

**Waddenzeedijk Ameland
Monitoringsproef km 6,8 - km 7,1**

onderzoeksrapport



**Waddenzeedijk Ameland
Monitoringsproef km 6,8 - km 7,1
onderzoeksrapport**

referentie	projectcode	status
AMES-4/15-001.125	AMES-4	concept 01
projectleider	projectdirecteur	datum
ir. R. Bouw	ir. H.J.M.A. Mols	22 januari 2015

autorisatie	naam	paraaf
goedgekeurd	ir. R. Bouw	

INHOUDSOPGAVE	blz.
1. INLEIDING	2
1.1. Aanleiding	2
1.2. Doel monitoringsproef	3
1.3. Leeswijzer	4
2. MEETLOCATIE	6
3. UITGANGSPUNTEN	8
3.1. Geometrische uitgangspunten	8
3.2. Hydraulische uitgangspunten	8
3.2.1. Buitenwaterstand	8
3.2.2. Binnenwaterstand	9
3.2.3. Verloop buitenwaterstand	10
3.3. Geotechnische uitgangspunten	11
3.4. Geohydrologische uitgangspunten	12
4. MONITORINGSDATA	14
4.1. Beschikbare data	14
4.2. Periode 2013-II	15
4.3. Periode 2014-I	16
4.4. Periode 2014-zomer	17
4.5. Periode 2014-II	18
4.6. Bewerking data	19
4.7. Conclusies en aanbevelingen	22
5. ANALYSE STIJGHOOGTEVERLOOP WATERVOERENDE PAKKET	24
5.1. Methode 1: Analytisch conform TRWD	25
5.1.1. Beschrijving methode	25
5.1.2. Methode specifieke uitgangspunten	25
5.1.3. Resultaten en discussie	27
5.2. Methode 2: Directe extrapolatie	29
5.2.1. Beschrijving methode	29
5.2.2. Methode specifieke uitgangspunten	31
5.2.3. Resultaten en discussie	31
5.3. Methode 3: Scheldestromen	34
5.3.1. Beschrijving methode	34
5.3.2. Methode specifieke uitgangspunten	41
5.3.3. Resultaten en discussie	41
5.4. Methode 4: Frequentieanalyse	44
5.4.1. Beschrijving methode	44
5.4.2. Methode specifieke uitgangspunten	49
5.4.3. Resultaten en discussie	50
5.5. Methode 5: PlaxFlow	52
5.5.1. Beschrijving methode	52
5.5.2. Methode specifieke uitgangspunten	54
5.5.3. Resultaten en discussie	55
5.6. Vergelijking toegepaste methoden	60
5.6.1. Vergelijking decemberstorm 2013	60
5.6.2. Validatie oktoberstorm 2014	63
5.6.3. Conclusies	65

6. ANALYSE PIPING	68
6.1. Ordenen	68
6.1.1. Schematisatie	69
6.1.2. Pipinganalyse methode A	74
6.1.3. Pipinganalyse methode B	76
6.1.4. Conclusie en discussie	76
6.2. Begrijpen	79
6.2.1. Invloed tijdsafhankelijkheid	79
6.2.2. Intreeweerstand voorland	79
6.2.3. Onzekerheden in uitgangspunten	80
6.3. Beslissen	81
6.3.1. Optimalisatie VKA	81
6.3.2. Onzekerheden	81
6.4. Doen	82
7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	84
7.1. Conclusies	84
7.2. Aanbevelingen	85
8. REFERENTIES	86
laatste bladzijde	86
BIJLAGEN	aantal blz.
I Tekeningen	4
II Methode TRWD	4
III Methode Scheldestromen	32
IV Methode Frequentieanalyse	15
V Methode PlaxFlow	3
VI Pipinganalyse	2

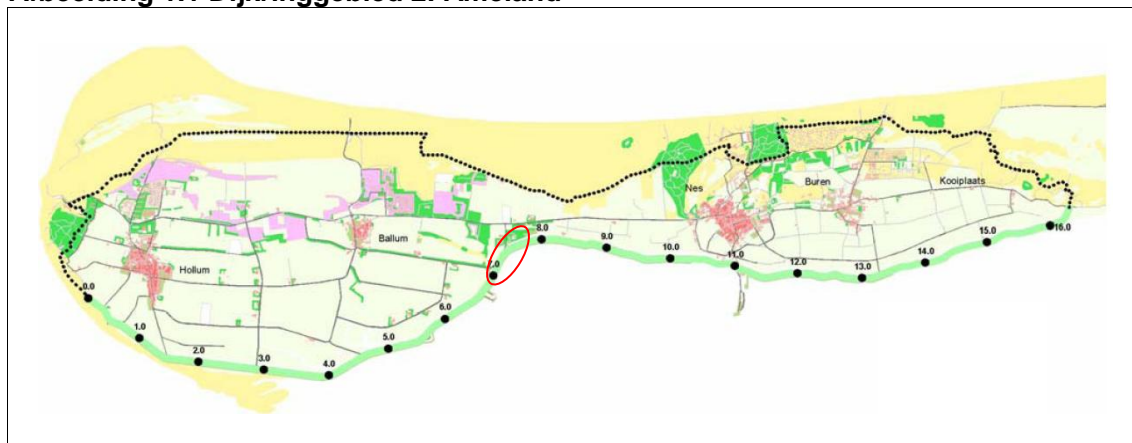
1. INLEIDING

1.1. Aanleiding

Versterking Waddenzeedijk Ameland

De Waddenzeedijk van Ameland maakt onderdeel uit van dijkkringgebied 2 (normfrequentie 1/2000 jaar). In de tweede toetsronde is de zeedijk afgekeurd over praktisch de gehele lengte van 16,6 km (Afbeelding 1.1). Dit deel is opgenomen in het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP).

Afbeelding 1.1 Dijkkringgebied 2: Ameland



Wetterskip Fryslân is de beheerder van de waterkering. Over een traject van circa 300 m (km 6,8 tot km 7,1 met rood omcirkeld in Afbeelding 1.1) is een pipingmaatregel opgenomen in het voorkeursalternatief (VKA). De maatregel bestaat uit het aanbrengen van een damwand.

SBW-onderzoek piping

De waterkering is in de planstudie beoordeeld op basis van de vigerende rekenregels. Deze worden mogelijk aangepast naar aanleiding van de kennis die is verkregen binnen het onderzoeksprogramma Sterkte Belastingen Waterkeringen (SBW), onderdeel piping. Het uitgevoerde onderzoek heeft veel kennis opgeleverd en heeft onder andere geresulteerd in het Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen (ORZW) [ref. 11] en een Werkwijzer piping [ref. 10].

Doelen in de tijd van Wetterskip Fryslân

Naar aanleiding van het dijkversterkingproject en de continue ontwikkelingen op het gebied van piping heeft het waterschap de volgende doelen in de tijd gesteld:

- *korte termijn*: onderzoeken of de voorziene versterkingsmaatregelen in het VKA geoptimaliseerd kunnen worden. Wellicht is een kortere damwand mogelijk of in het gunstigste geval zijn er geen maatregelen meer tegen piping noodzakelijk. Beide uitkomsten leiden tot een kostenbesparing en minder overlast voor de omgeving;
- *middellange termijn*: beter de gevolgen in kaart brengen van de nieuwe inzichten zoals vastgelegd in het ORZW. Dit geldt niet alleen voor dijkkringgebied 2, maar voor alle dijkkringgebieden binnen het beheersgebied van het waterschap;
- *lange termijn*: aansluiten en bijdragen aan het lopende onderzoek naar piping door een deel van de waterkering beschikbaar te stellen voor aanvullend onderzoek. De nieuwe pipinginzichten hebben effect op lange strekkingen van de Nederlandse waterkering met mogelijk grote investeringskosten tot gevolg. Het is van maatschappelijk belang om

kennis van het mechanisme te ontwikkelen, zodat er verantwoorde versterkingsmaatregelen doorgevoerd kunnen worden.

Monitoringsproeven Waddenzeedijk Ameland

Het Wetterskip Fryslân heeft Witteveen+Bos opdracht gegeven voor het uitvoeren van een monitoringsproef ter plaatse van het traject km 6,8 tot km 7,1. Deltares en Fugro fungeren daarbij als onderaannemers van Witteveen+Bos. Ter plaatse van km 2,4 voert Stichting FloodControl IJkdijk een monitoringsproef uit in opdracht van het waterschap met Deltares, InTech en Fugro als onderaannemers.

Monitoringsproef km 6,8 tot km 7,1

Op het traject van km 6,8 tot km 7,1 zijn een drietal meetraaien met in totaal twaalf waterspanningsmeters en drie peilbuizen aangebracht in het eerste watervoerende pakket (plaatsing medio november 2012). In mei 2014 is een workshop georganiseerd met pipingdeskundigen over de tussenresultaten van de monitoring. Tijdens de workshop is besloten om de invloed van de kleilaag op de scheiding van het geohydrologische systeem nader te onderzoeken. Over een periode van vier weken zijn in totaal drie peilbuizen boven de kleilaag aangebracht (twee in de kern van de waterkering en één in de binnenteensloot) om beter inzicht te krijgen in de interactie tussen de freatische lijn en stijghoogte in het eerste watervoerende pakket. De resultaten van het aanvullende onderzoek zijn besproken in de workshop van november 2014.

Het doel van deze monitoring is het verkrijgen van inzicht in:

- invloed van een variërende buitenwaterstand op de waterspanningen in het watervoerende pakket en daarmee op de veiligheid tegen piping;
- optimalisatiemogelijkheden van de voorziene versterkingsmaatregelen (VKA).

Monitoringsproef km 2,4

Ter plaatse van km 2,4 zijn in vier raaien in waterspanningsmeters aangebracht. Daarnaast wordt door InTech middels infraroodmetingen de temperatuur van het uittredende kwelwater gemeten. Het doel van deze monitoring is om inzicht te krijgen in:

- eventuele meerwaarde van een innovatief monitoringsysteem op basis van temperatuurmetingen;
- invloed van de intreeweerstand van het voorliggende wad op de waterspanningen in het watervoerende pakket door de metingen te vergelijken tussen de twee monitoringslocaties.

1.2. Doel monitoringsproef

Project

Het project heeft de volgende hoofddoelen:

- bijdragen aan lopende onderzoeken naar piping bij zeedijken;
- optimaliseren van het ontwerp van de versterkingsmaatregelen;
- inzicht verkrijgen in de gevolgen van de opgedane kennis uit het onderzoeksprogramma SBW voor zeedijken;
- meerwaarde onderzoeken van een innovatief monitoringsysteem op basis van temperatuur- en infraroodmetingen.

Onderzoeksrapport

Het voorliggende rapport betreft het onderzoeksrapport voor het traject km 6,8 tot km 7,1. Het onderzoek is gericht op het vaststellen van het effect van een variërende buitenwaterstand op de veiligheid tegen piping. Mogelijk kan met het in rekening brengen van dit positieve effect de maatregelen tegen piping in het VKA geoptimaliseerd worden. Daarnaast is het on-

derzoek gericht op het onderbouwen dan wel ontcrachten van de hypothesen in het Plan van aanpak [ref. 22].

1.3. Leeswijzer

Relatie tussen rapporten

In onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de rapporten die opgesteld zijn voor de monitoringsproef voor het traject km 6,8 tot 7,1.

Tabel 1.1. Overzicht rapporten monitoringsproef traject km 6,8 tot 7,1

titel	ref.	inhoud
Plan van aanpak	22	<ul style="list-style-type: none"> - beschrijving projectlocaties - onderzoekshypothesen - stappenplan werkzaamheden - organisatie en planning
Monitoringsplan	24	uitvraag aan grondonderzoeksbureau
Datacontrole (6 notities): <ul style="list-style-type: none"> - tot 15 maart 2013 - 15 maart 2013 tot 1 september 2013 - 1 september 2013 tot 1 januari 2014 - 1 januari 2014 tot 18 augustus 2014 - 17 juli 2014 tot 31 juli 2014 - 18 augustus 2014 tot 16 november 2014 	16, 17, 18, 19, 20 en 21	<ul style="list-style-type: none"> - controle datakwaliteit - controle fysica
Onderzoeksrapport	voorliggend	<ul style="list-style-type: none"> - beschrijving meetlocatie - uitgangspunten - analyse verloop stijghoogte watervoerende pakket - analyse piping - optimalisatie VKA

Onderzoeksrapport

De meetlocatie is beschreven in hoofdstuk 2 en de belangrijkste uitgangspunten in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 richt zich op de kwaliteit en het verwerken van de verkregen velddata. De analyse van het stijghoogteverloop in het watervoerende pakket op basis van verschillende methoden is beschreven in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 is op basis van de schematisatie van het stijghoogteverloop een pipinganalyse uitgevoerd conform de stappen in de recent opgeleverde Werkwijzer piping. De conclusies en aanbevelingen naar aanleiding van de analyses zijn opgenomen in hoofdstuk 7. Het rapport wordt afgesloten met een overzicht van de gebruikte literatuur in hoofdstuk 8.

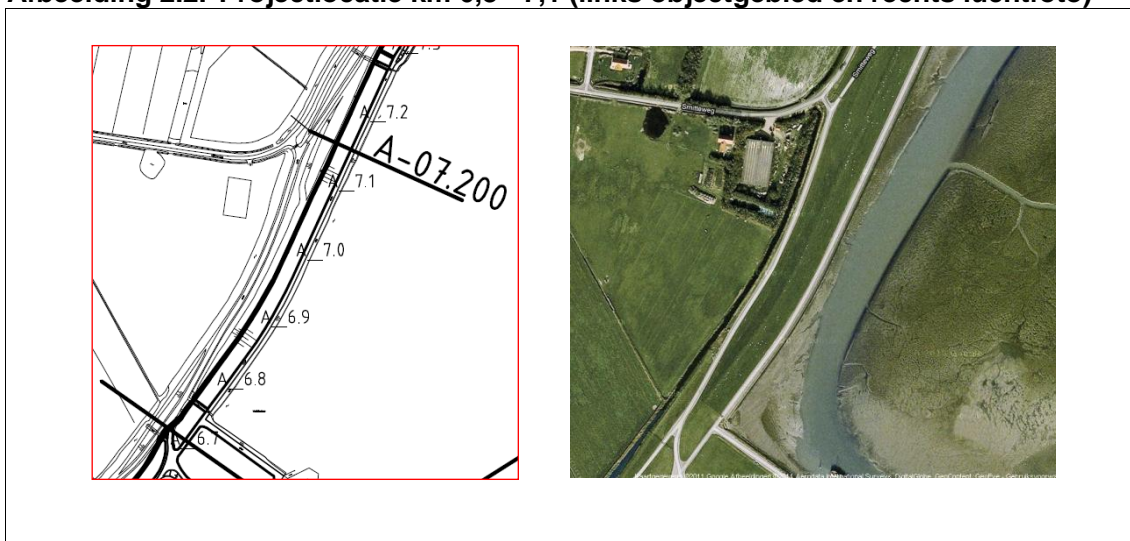
2. MEETLOCATIE

De monitoringsproef wordt uitgevoerd op het dijktraject km 6,8 tot km 7,1 nabij de Ballumerbocht, van de Waddenzeedijk van Ameland (Afbeelding 2.1 en Afbeelding 2.2). De meetlocatie wordt gekenmerkt door een intergetijdegeul die vlak tegen de buitenteen van de dijk aan ligt. Deze intergetijdegeul heeft zich ontwikkeld langs een strekdam die loodrecht op de primaire waterkering georiënteerd is.

Afbeelding 2.1. Westelijke Waddenzeedijk van Ameland



Afbeelding 2.2. Projectlocatie km 6,8 - 7,1 (links objectgebied en rechts luchtfoto)



Medio november 2012 zijn tussen de aanlanding van de strekdam en de dichtstbijzijnde bebouwing drie raaien uitgezet met waterspanningsmeters (WSM01 t/m WSM12) en peilbuizen (PB01 t/m PB03). Raai 1 ligt het meest noordelijk en raai 3 is het meest zuidelijk gelegen. In elke raai zijn vier waterspanningsmeters in het watervoerende pakket aangebracht ter plaatse van:

- achterland;
- tussen de sloot en de weg;
- binnentalud van de dijk;
- buitentalud van de dijk.

De installatiediepte van de waterspanningsmeters varieert tussen de NAP -3,1 m en NAP -3,7 m. De peilbuizen zijn in elke raai geplaatst in dezelfde watervoerende laag (filter van NAP -2,5 m tot NAP -3,5 m) en op dezelfde locatie als de tweede waterspanningsmeter, gezien vanuit de Waddenzee. De peilbuismetingen dienen ter verificatie van de waterspanningsmetingen.

In de zomer van 2014 zijn in de middelste raai (raai 2) over een periode van vier weken twee extra peilbuizen (PB04 en PB05) geplaatst in de kern van de dijk en één extra peilbuis in de binnenteensloot (PB06) om beter inzicht te krijgen van de geohydrologische interactie tussen de freatische lijn en stijghoogte in het eerste watervoerende pakket. De twee peilbuizen in de zandkern zijn geïnstalleerd boven de slecht doorlatende kleilaag op een installatiediepte rond NAP -0,5 m. De peilbuis in de sloot is geïnstalleerd rond NAP -0,5 m en staat in verbinding met het open water.

In bijlage I zijn de locaties van de geïnstalleerde meetinstrumenten aangegeven op tekening AME5.4.1010.

3. UITGANGSPUNTEN

De uitgangspunten die ter grondslag liggen aan de analyse zijn opgenomen in voorliggend hoofdstuk. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen geometrische, hydraulische, geotechnische en geohydrologische uitgangspunten.

3.1. Geometrische uitgangspunten

De raaien liggen ter plaatse van km 6,88, km 6,93 en km 6,99. Ter plaatse van de raaien zijn geen profielgegevens bekend. Voor de analyse is het ingemeten dwarsprofiel van km. 7.000 als representatief verondersteld voor alle raaien (tekening AME5.4.1012 in bijlage I).

Van de geul en het voorland zijn geen bathymetrische gegevens beschikbaar. De dimensies van de geul zijn daarom geschat op basis van Google Earth en expert judgement. De volgende dimensies zijn aangehouden:

- breedte tussen insteken: 50 m;
- diepte: -3 m+NAP;
- taludhellingen: 1:3.

Het maaiveld ter plaatse van de teen van de dijk ligt rond NAP +0 m. Uit het beschikbare grondonderzoek volgt dat er ter plaatse van het monitoringsgebied een slecht doorlatende kleilaag aanwezig is tussen NAP -1,5 m en NAP -2,0 m. Met de aangenomen geuldiepte wordt deze laag doorsneden, aangenomen dat deze laag op hetzelfde niveau doorloopt. Het is echter niet vanzelfsprekend dat daarmee hydraulische kortsluiting ontstaat. Een eventueel aanwezige sliblaag in de geul kan namelijk tevens functioneren als slecht doorlatende laag. Gezien de geografische ligging van de geul is het aannemelijk dat de bodem van de geul is opgebouwd uit slecht doorlatend materiaal (slib).

Karakterisatie van het sediment in de geul, in combinatie met een bathymetrische meting en onderzoek naar de laagopbouw in de geul (boring/sondering), kunnen deze onzekerheid wegnemen. Daarnaast kunnen de resultaten van de waterspanningsmetingen een indicatie geven over de opbouw van het voorland.

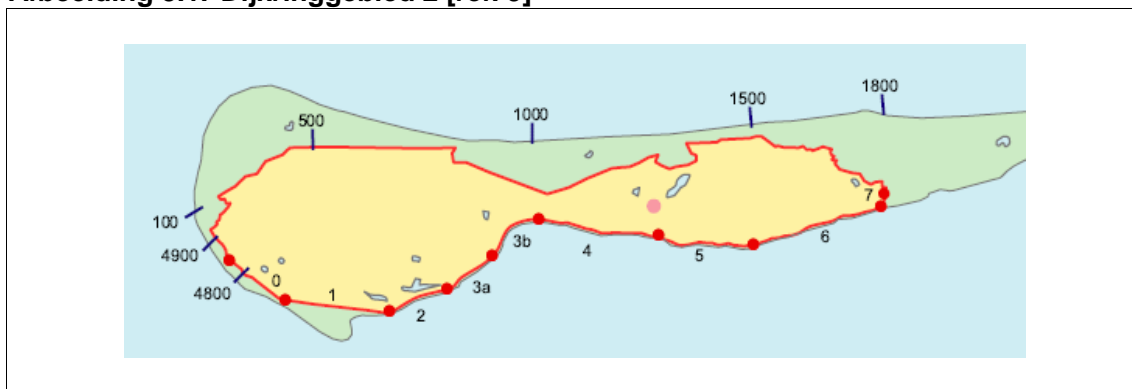
3.2. Hydraulische uitgangspunten

3.2.1. Buitenwaterstand

De hydraulische randvoorwaarden zijn bepaald door Deltares [ref. 3] voor alle dijkvakken langs de Waddenzeezijde van Ameland (Afbeelding 3.1). De monitoringsproef tussen km 6,8 en km 7,1 vindt plaats aan de westzijde van dijkvak 3b. Voor de volledigheid zijn tevens de ontwerpwaterstanden¹ voor dijkvak 3a en dijkvak 4 bij Nes (meetlocatie waterstanden) weergegeven in tabel 3.1. De meetlocatie voor de waterstanden ligt ongeveer 2 km ten zuiden van het monitoringsgebied. De intergetijdegeul staat rechtstreeks in verbinding met de hoofdgeul waar de buitenwaterstand geregistreerd wordt. Op basis van deze verbinding is te verwachten dat de waterstand aan de teen van de dijk de waterstand bij meetlocatie Nes volgt (met een fase- en eventueel amplitudeverschil).

¹ In deze rapportage is de ontwerpwaterstand gelijk gesteld aan het maatgevende hoogwater (MHW).

Afbeelding 3.1. Dijkkringgebied 2 [ref. 9]



Tabel 3.1. Ontwerpwaterstanden¹ dijkvakken Ameland

dijkvak	ontwerpwaterstand 2010 [m+NAP]
3a	4,95
3b	5,00
4 (Nes)	5,00

De gemiddelde waterstanden zijn per type tij geven in tabel 3.2. De gemiddelde waterstand over een getij is NAP +0,03 m.

Tabel 3.2. Gemiddelde waterstanden Nes²

type tij	HW-stand [m+NAP]	LW-stand [m+NAP]
gemiddeld tij	1,04	-1,26
gemiddeld springtij	1,19	-1,42
gemiddeld doottij	0,87	-1,01

3.2.2. Binnenwaterstand

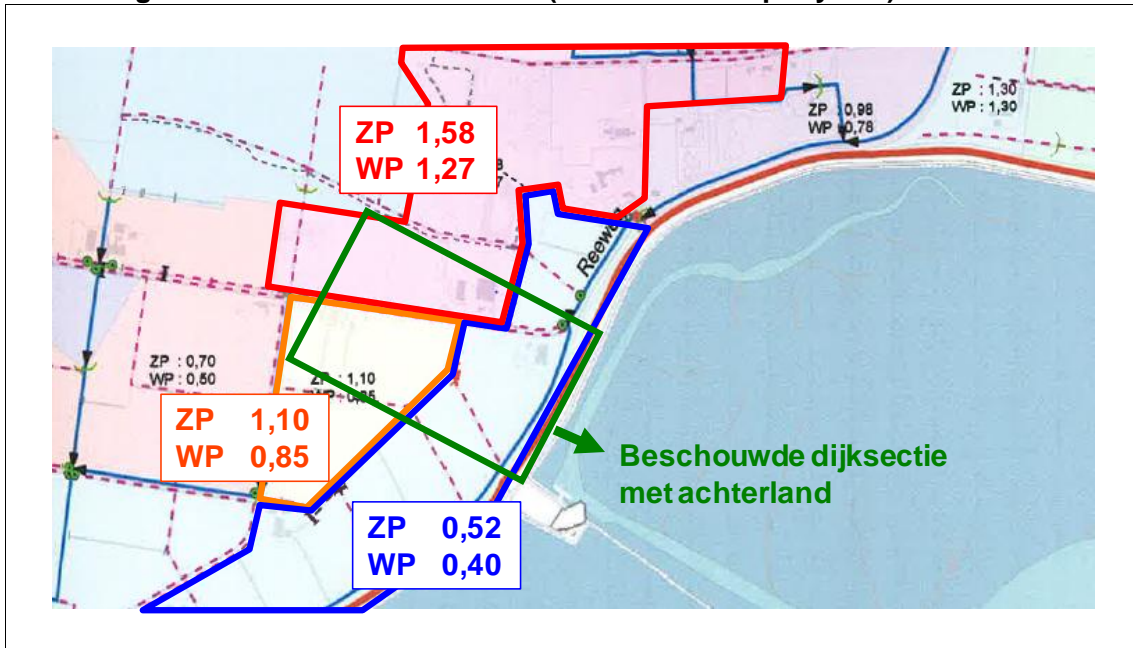
Aan de binnenzijde van de Waddenzeedijk bevindt zich ter hoogte van km 6,8 tot km 7,1 de polder Hollum - Ballum. Van deze polder is het zomerpeil (ZP) NAP +0,52 m en het winterpeil (WP) NAP +0,40 m (bron: IWBP gebiedsdeel Waddeneilanden). Bovengenoemde peilen zijn tevens gehanteerd in het dijkverbeteringplan Ameland [ref. 22]. Een kaart met polderpeilen (Afbeelding 3.2) laat zien welke peilgebieden in het geohydrologische invloedgebied vallen van de proef. In de directe omgeving van het monitoringsgebied worden de volgende peilen gehanteerd:

- binnenwaarts (achter de beschouwde profielen): ZP NAP +1,10 m en WP NAP +0,85 m;
- ten noorden: ZP NAP +1,58 m en WP NAP +1,27 m.

¹ Voor Ameland wordt bij het dijkverbeteringplan uitgegaan van een ontwerpperiode van 50 jaar (2015-2065).

² bron: waternormalen.nl

Afbeelding 3.2. Peilkaart Ballumerbocht (bron: Wetterskip Fryslân)



De overgang van WP naar ZP vindt formeel plaats op 1 april en van ZP naar WP op 1 oktober. Het instellen van het zomerpeil is echter weersafhankelijk en gebeurt in de praktijk rond half maart, waarbij in een droog voorjaar (in combinatie met verwachte weersvoorspellingen) het zomerpeil wordt opgezet tot NAP +0,60 m.

Tijdens extreme situaties kan het polderpeil niet gehandhaafd worden en zal daarom ter plaatse van km 6,8 – 7,1 oplopen tot NAP +0,90 m door scheve opzet en beperkte afvoermogelijkheden. Gelijk aan de planstudie is dit peil aangehouden als binnenwaterstand tijdens ontwerpomstandigheden. Een slootpeil van NAP +0,90 m is aangehouden in de piping analyse.

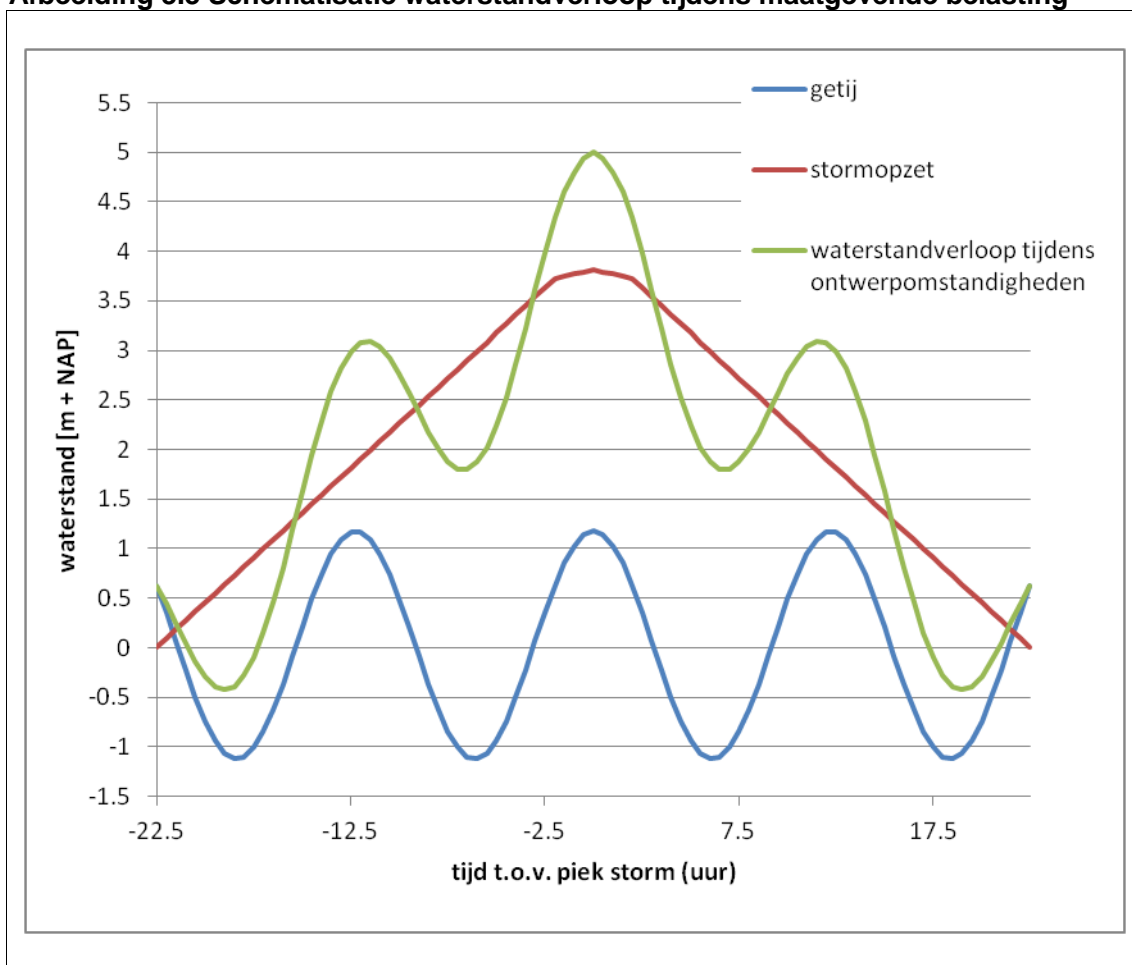
In de analyse van het stijghoogteverloop in het eerste watervoerende pakket (hoofdstuk 5) is geen rekening gehouden met (de invloed van) een dynamisch polderpeil. In alle methoden (met uitzondering van PlaxFlow) zit het polderpeil impliciet verwerkt en is deze geen invoerparameter. Een gewijzigd polderpeil tijdens MHW kan dus, als deze bekend is, niet apart worden meegenomen in de analyse. Met PlaxFlow kan wel een dynamisch polderpeil worden opgelegd als hydraulische randvoorwaarde, echter is het polderpeil tijdens de monitoring niet gemeten, en kan dit daarom in de analyse niet worden meegenomen. In de PlaxFlow analyse is een constant polderpeil gehanteerd van NAP +1,2 m.

3.2.3. Verloop buitenwaterstand

Volgens het VTV2006 en HR2006 [ref. 8, p102 en ref. 9, § 2.6.5] zijn er geen waterstandverlopen voor specifiek de Waddenzee beschikbaar. De Leidraad zee- en meerdijken [ref. 14, B2.2.8] stelt echter dat de stormduur in het waddengebied 45 uur duurt waarbij de piek van de storm een duur heeft van 4 uur.

In voorliggende rapportage is het waterstandverloop tijdens maatgevende omstandigheden geschematiseerd zoals aangegeven in Afbeelding 3.3. Hierbij is een gemiddelde getijamplitude (GGA) van 1,15 m (Tabel 3.2), gemiddelde waterstand van NAP +0,03 m en een stormopzet van 3,82 m gehanteerd (ontwerpwaterstand is daarmee NAP +5,00 m).

Abbeelding 3.3 Schematisatie waterstandverloop tijdens maatgevende belasting



3.3. Geotechnische uitgangspunten

Waterkering

Ter plaatse van de drie raaien zijn geotechnisch dwars- en langsdoorsneden opgesteld op basis van de beschikbare sonderingen uit het versterkingsontwerp [ref. 23] en de boringen die gedaan zijn tijdens de installatie van de peilbuizen en/of waterspanningsmeters door Fugro [ref. 6]. De doorsneden zijn opgenomen in bijlage I.

Uit sonderingen blijkt dat er in de bodem van het monitoringsgebied een slecht doorlatende laag aanwezig is rond NAP -2,0 m. In de boorstaten van de uitgevoerde handboringen voor het plaatsen van de meters is de laag omschreven als zand met matig siltig en/of matig kleilig.

In bijlage I is tevens de schematisatie van de bodemopbouw gegeven. Hierin is de slecht doorlatende laag geschematiseerd van NAP -1,5 m en NAP -2,0 m. Deze schematisatie is aangehouden in de analyses.

Voorland

Buitendijks van het monitoringsgebied is een schor aanwezig met daarin een intergetijdengeul. In de DINO databank zijn op het schor een aantal boorprofielen beschikbaar. Deze profielen laten aan het oppervlak een kleilaag met een variërende dikte zien. In de intergetijdengeul zijn geen boorprofielen beschikbaar.

Achterland

Binnendijks van het monitoringsgebied is uit de DINO databank een beperkt aantal boorprofielen beschikbaar. Eén van deze profielen laat op een afstand van ongeveer 150 m van het monitoringsgebied nog een slecht doorlatende laag zien op de diepte van NAP -3,5 m. Een andere boring toont deze laag niet meer in de bovenste 5,0 m van het maaiveld. Het is daarmee niet bekend tot hoever de slechtdoorlatende laag in het achterland doorloopt.

3.4. Geohydrologische uitgangspunten

Ten behoeve van het bepalen van de pipinggevoeligheid zijn geohydrologische parameters overgenomen uit de rapportages van Deltares [ref. 4] en Witteveen+Bos [ref. 23] (Tabel 3.3).

Tabel 3.3. Geohydrologische parameters

parameter	eenheid	waarde
doorlatendheid k	m/s	2×10^{-4}
korrelgrootte d_{70}	m	141×10^{-6}
dikte zandpakket D	m	25

4. MONITORINGSDATA

De waterspanningsmetingen zijn in hoofdstuk 5 van voorliggende rapportage geanalyseerd en vertaald naar een schematisatie van het stijghoogteverloop in het watervoerende pakket onder ontwerpomstandigheden. De kwaliteit van de schematisatie is direct gerelateerd aan de kwaliteit van de meetdata. In hoofdstuk 4 zijn de resultaten van datacontrole opgenomen.

4.1. Beschikbare data

Ten behoeve van de analyse is de aangeleverde data gecontroleerd. Van deze data is reeds een correctie toegepast voor de variatie in luchtdruk. Van de volgende periodes is data beoordeeld¹:

- 1 september 2013 tot en met 31 december 2013 (periode 2013-II);
- 1 januari 2014 tot en met 18 augustus 2014 (periode 2014-I);
- 17 juli 2014 tot en met 31 juli 2014 (periode 2014-zomer);
- 18 augustus 2014 tot en met 16 november 2014 (periode 2014-II).

Het tijdsbestek en type meting is per sensor uiteengezet in tabel 4.1.

Tabel 4.1. Aangeleverde meetperiodes

sensor	van	tot en met	type meting
WSM01	01-09-2013 0:00	16-11-2014 0:00	waterspanningsmeting
WSM02	01-09-2013 0:00	16-11-2014 0:00	waterspanningsmeting
WSM03	01-09-2013 0:00	16-11-2014 0:00	waterspanningsmeting
WSM04	01-09-2013 0:00	16-11-2014 0:00	waterspanningsmeting
WSM05	01-09-2013 0:00	16-11-2014 0:00	waterspanningsmeting
WSM06	01-09-2013 0:00	16-11-2014 0:00	waterspanningsmeting
WSM07	01-09-2013 0:00	16-11-2014 0:00	waterspanningsmeting
WSM08	01-09-2013 0:00	16-11-2014 0:00	waterspanningsmeting
WSM09	01-09-2013 0:00	16-11-2014 0:00	waterspanningsmeting
WSM10	01-09-2013 0:00	16-11-2014 0:00	waterspanningsmeting
WSM11	01-09-2013 0:00	16-11-2014 0:00	waterspanningsmeting
WSM12	01-09-2013 0:00	16-11-2014 0:00	waterspanningsmeting
PB01	01-09-2013 0:00	21-11-2014 0:00	peilbuismeting
PB02	01-09-2013 0:00	21-11-2014 0:00	peilbuismeting
PB03	01-09-2013 0:00	21-11-2014 0:00	peilbuismeting
PB-sloot	17-07-2014 16:05	31-07-2014 4:05	extra peilbuismeting
PB-WSM07	17-07-2014 17:00	31-07-2014 0:15	extra peilbuismeting
PB-WSM08	17-07-2014 17:00	31-07-2014 0:50	extra peilbuismeting

Van deze meetreeksen is de kwaliteit getest op de volgende onderdelen:

- chronologie;
- ongeldige meetwaarde;
- dubbele datum/tijd stempel;
- meetfrequentie;
- buiten meetbereik;
- dood signaal;
- staprends en outliers;

¹ De data van voor 1 september 2013 wordt niet bruikbaar geacht [ref. 16 en 17].

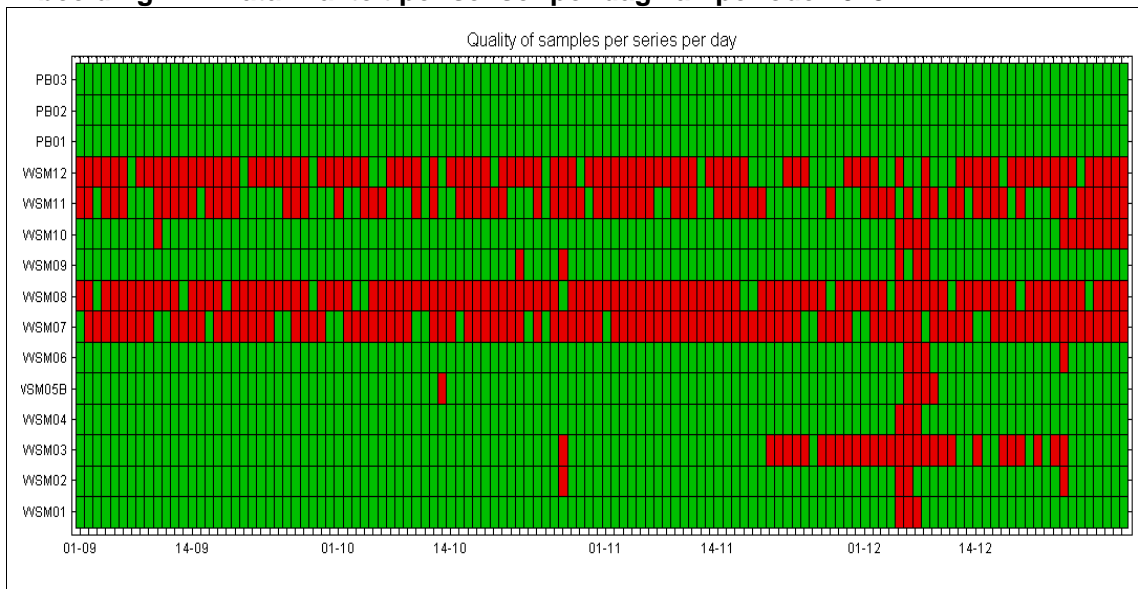
- lineaire trend;
- barometrische controle.

Daarnaast is een controle uitgevoerd op de fysica. De methode van kwaliteitbeoordeling is in meer detail besproken in de datacontrole-notities [ref. 18 t/m 20]. Hieronder zijn per periode de meest belangrijke conclusies uiteengezet. Daarna is beschreven welke data is gecorrigeerd en hoe de data is gecorrigeerd.

4.2. Periode 2013-II

In afbeelding 4.1 is een overzicht gegeven van de datakwaliteit van de metingen van de periode 2013-II. Elk vakje representeert één dag aan data voor één sensor. Een groen vakje betekent dat de metingen van de betreffende sensor voor die dag allemaal goed zijn. Een rood vakje betekent dat er minstens 1 meting niet van goede kwaliteit is. Omdat er in sommige meetreeksen sprake is van snelle stijgingen en dalingen van het waterpeil, is er een aantal metingen als staptrend gedetecteerd die wel logisch verklaarbaar is. Afkeuringen op basis van de staptrend zijn daarom niet meegenomen in de onderstaande afbeelding.

Afbeelding 4.1. Datakwaliteit per sensor per dag van periode 2013-II



Uit de controle van de data blijkt dat:

- alle sensoren een stijgende lineaire trend vertonen. Dit kan te maken hebben met vernatting vanwege het seizoen. In periode 2014-I is een dalende lineaire trend waargenomen, wat duidt op verdroging. Om deze reden worden de sensoren niet afgekeurd op dit feit;
- meetfrequenties (bijna) regelmatig zijn;
- enkele meetreeksen veel kleine uitschieters hebben;
- bijna elke meetreeks meerdere, niet-numerieke waarden heeft;
- WSM10 een periode van ongeveer 3 dagen metingen buiten bereik heeft.

Uit de controle op de fysische logica blijkt dat:

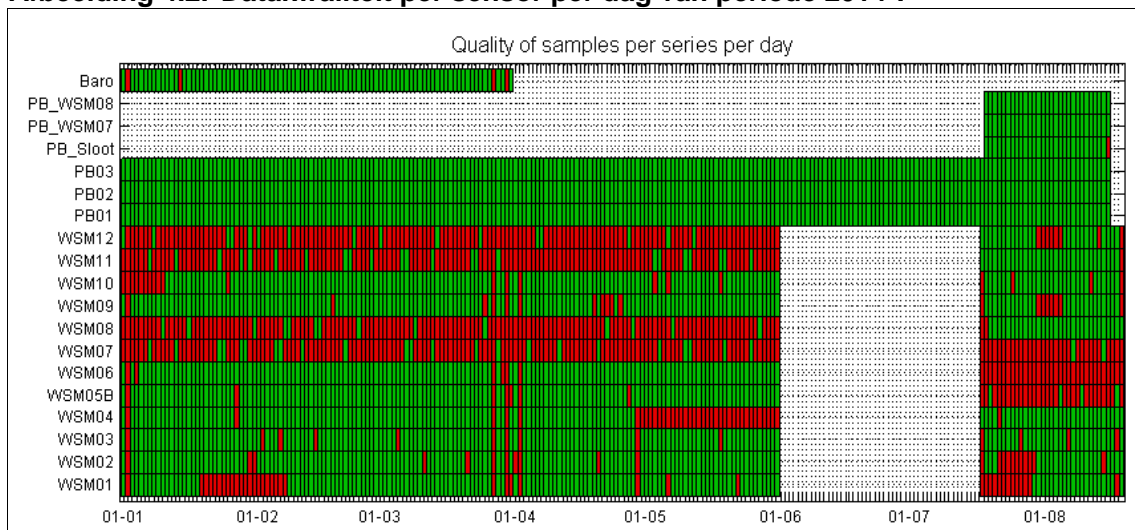
- peilbuizen PB01 en PB03 en de corresponderende waterspanningsmeters, respectievelijk WSM03 en WSM11, onderling onvoldoende overeenkomen;
- waterspanningsmeter WSM07 (raai 2) nog een onverklaarde offset heeft;

- waterspanningsmeters in raai 3 (WSM09 t/m 12) ten opzichte van de buitenwaterstand en ten opzichte van elkaar nog een onverklaarde tijdsverschuiving hebben;
- WSM11 en WSM12 (raai 3) een afwijking van meer dan 60 minuten hebben ten opzichte van de andere waterspanningsmeters op vergelijkbare afstand tot het buitenwater;
- alle registraties van de waterspanningsmeters in zomer- én wintertijd zijn, en de peilbuis meters in wintertijd.

4.3. Periode 2014-I

In Afbeelding 4.2 is een overzicht gegeven van de datakwaliteit van de metingen van de periode 2014-I. Een wit vakje betekent dat er geen data van de betreffende dag aanwezig was.

Afbeelding 4.2. Datakwaliteit per sensor per dag van periode 2014-I



Uit de controle van de data blijkt dat:

- alle sensoren een dalende lineaire trend vertonen. Dit kan te maken hebben met verdroging vanwege het seizoen. In periode 2013-II is een stijgende lineaire trend waargenomen, wat duidt op vernatting. Om deze reden worden de sensoren niet afgekeurd op dit feit;
- meetfrequenties (bijna) regelmatig zijn, WSM01 en WSM07 hebben in de zomerperiode een te lage meetfrequentie;
- enkele meetreeksen veel kleine uitschieters hebben;
- alle waterspanningsmeters meerdere, niet numerieke waarden hebben;
- alle waterspanningsmeters staprends vertonen;
- alle waterspanningsmeters een wisseling hebben van winter- naar zomertijd;
- WSM05, WSM06, WSM07, WSM08, WSM11 en WSM12 periodieke uitschieters hebben.

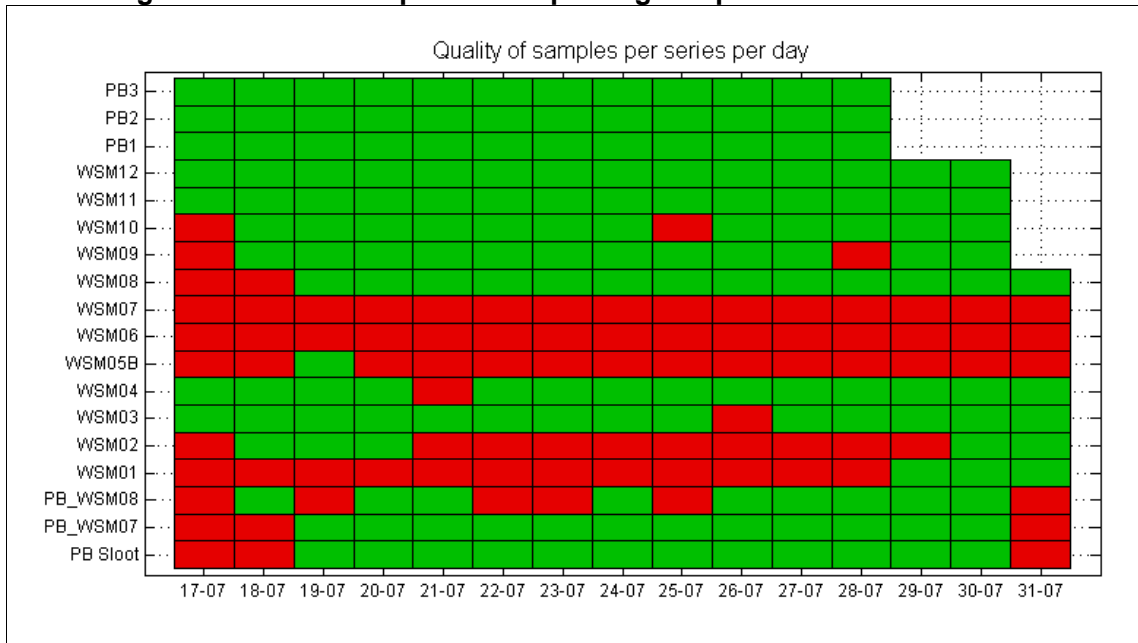
Uit de controle op de fysische logica blijkt dat:

- waterspanningsmeter WSM02 (raai 1) een te lage correlatie heeft met andere waterspanningsmeters;
- waterspanningsmeter WSM03 (raai 1) ten opzichte van de bijbehorende peilbuis (PB01), ten opzichte van de buitenwaterstand en ten opzichte van andere waterspanningsmeters nog een onverklaarde tijdsverschuiving heeft;
- waterspanningsmeter WSM03 vergeleken met de bijbehorende peilbuis en met andere waterspanningsmeters nog een onverklaarde offset heeft.

4.4. Periode 2014-zomer

In afbeelding 4.3 is een overzicht gegeven van de datakwaliteit van de metingen van de periode 2014-zomer.

Afbeelding 4.3. Datakwaliteit per sensor per dag van periode 2014-zomer



Uit de controle van de data blijkt het volgende:

- onjuiste meetfrequentie van WSM01 en WSM07;
- onjuiste meetfrequentie van aantal andere sensoren in begin van periode;
- gaten in datalevering van WSM02 en WSM05;
- staptrend in WSM09, op 28 juli verspringt de meetreeks, en is vervolgens overal 8 cm lager;
- veel kleine uitschieters in WSM06.

Uit de controle op fysische logica blijkt het volgende:

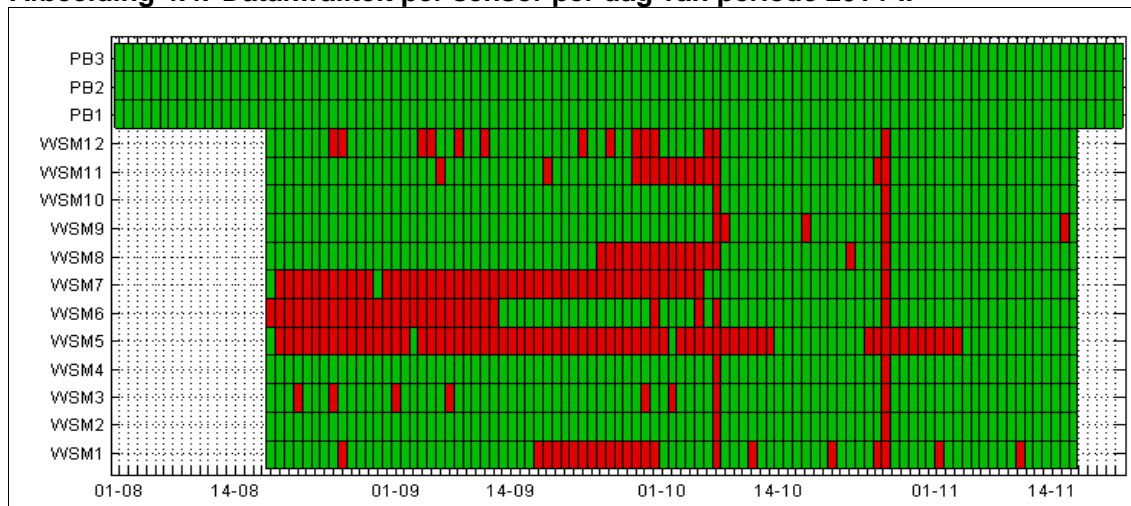
- de peilbuizen PB1, PB2 en PB3 hebben een structureel faseverschil met hun corresponderende waterspanningsmeters, respectievelijk WSM03, WSM07 en WSM11. Dit wordt veroorzaakt doordat de peilbuizen tijdsregistraties in wintertijd hebben en de waterspanningsmeters in zomertijd;
- alle waterspanningsmeters vertonen een consistent faseverschil met de buitenwaterstand. Waterspanningsmeters verder van zee vertonen een groter faseverschil;
- waterspanningsmeters in dezelfde raai vertonen logische faseverschillen met elkaar;
- waterspanningsmeters en peilbuizen op dezelfde afstand tot het buitenwater vertonen nagenoeg geen faseverschil.

De faseverschillen die WSM11 en WSM12 hadden met de buitenwaterstand en de andere waterspanningsmeters in de periode 2013-II zijn verdwenen. Dit komt mogelijk vanwege de reset die halverwege december 2013 heeft plaatsgevonden.

4.5. Periode 2014-II

In Afbeelding 4.4 is een overzicht gegeven van de datakwaliteit van de metingen van de periode 2014-II. Een wit vakje betekent dat er geen data van de betreffende dag aanwezig was.

Afbeelding 4.4. Datakwaliteit per sensor per dag van periode 2014-II



Uit de controle van de data blijkt dat:

- alle sensoren een stijgende lineaire trend vertonen. Dit kan worden verklaard door vernatting vanwege het seizoen. In periode 2013-II is ook een stijgende lineaire trend waargenomen, wat duidt op vernatting. In periode 2014-I is een dalende lineaire trend waargenomen, wat duidt op verdroging. Om deze reden worden de sensoren niet afgekeurd op dit feit;
- alle waterspanningsmeters ontbrekende of weggefilterde meetwaarden hebben, de meetreeksen WSM1, WSM5, WSM7, WSM9 en WSM11 elk meer dan 2000;
- WSM12 een staptrend heeft op 22 september;
- meetreeks WSM06 tot eind september periodieke uitschieters heeft;
- alle waterspanningsmeters een wisseling hebben van zomer- naar wintertijd.

Uit de controle op de fysische logica blijkt dat:

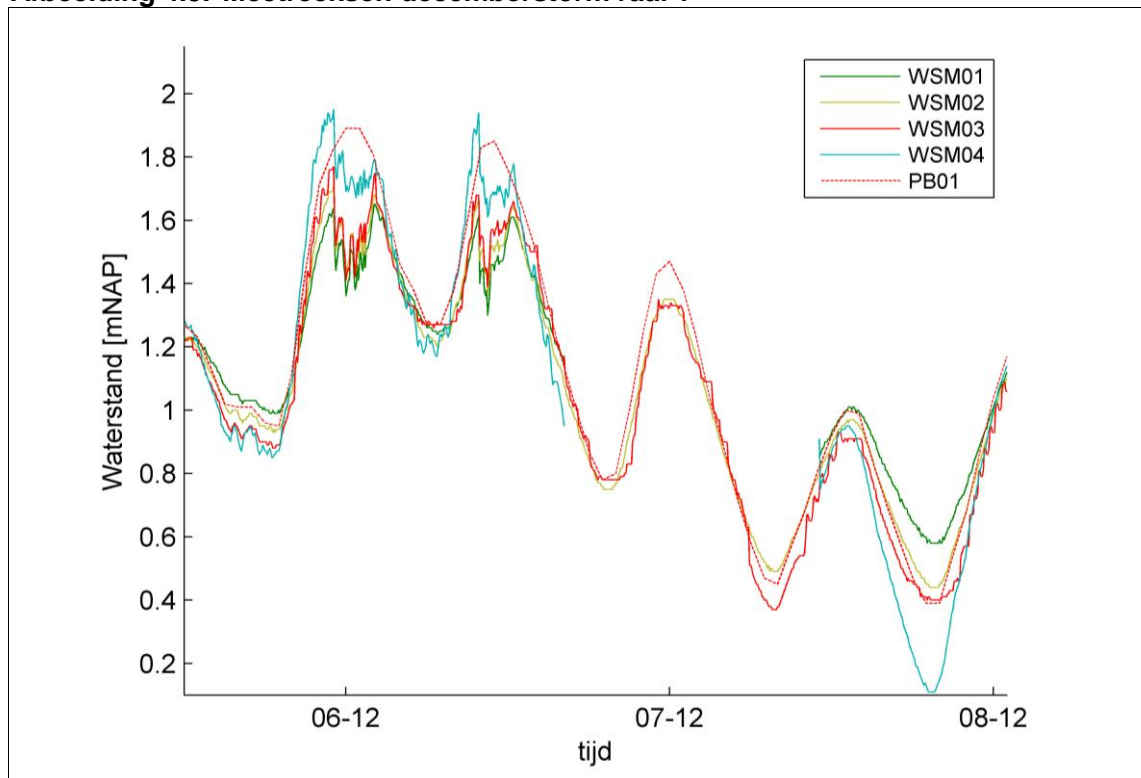
- waterspanningsmeter WSM10 (raai 3) vergeleken met andere waterspanningsmeters 15 minuten in tijd achterloopt;
- alle overige faseverschillen logisch te verklaren zijn.

4.6. Bewerking data

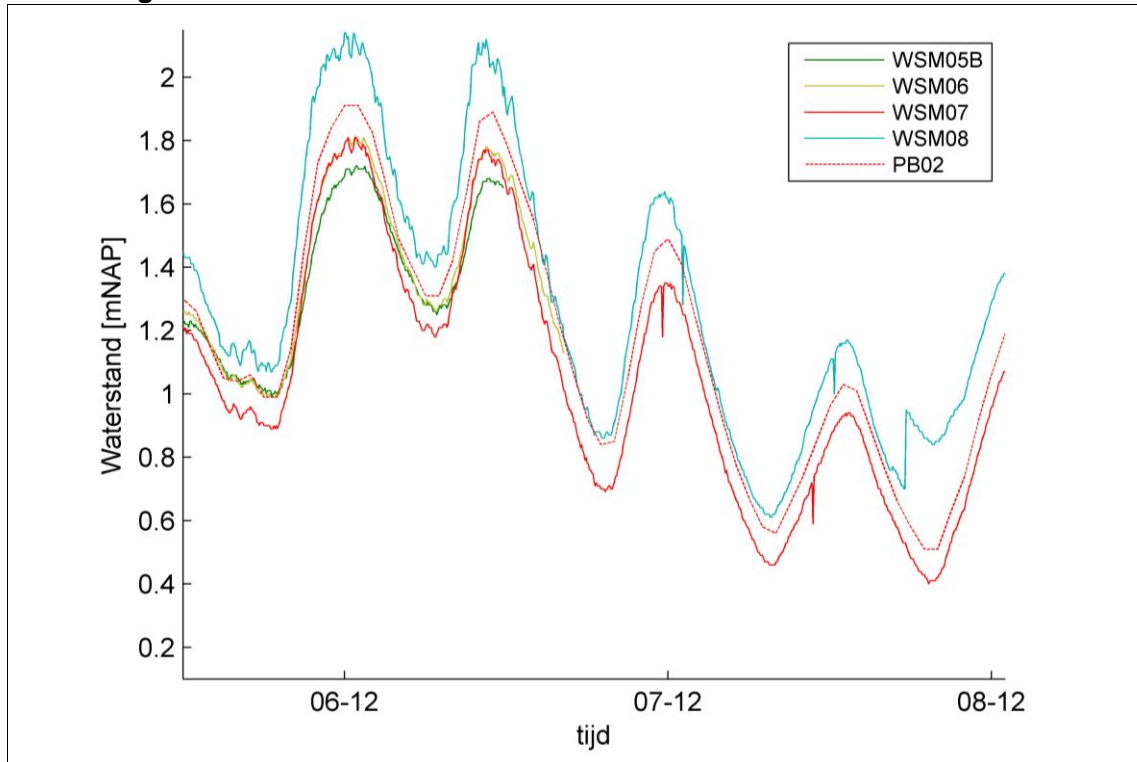
De gecorrigeerde data is verkregen door onjuiste meetfrequenties, kortstondige datafouten en kleine uitschieters door bewerking te corrigeren. Er zijn echter ook grotere afwijkingen geconstateerd, waarvoor geen eenduidige correctie mogelijk is. Tijdens de decemberstorm worden veel meetreeksen dusdanig onbetrouwbaar geacht dat bewerking niet meer mogelijk is.

In Afbeelding 4.5 tot en met Afbeelding 4.7 zijn de meetwaarden van alle reeksen per raai weergegeven. De enige meetreeksen die (vrijwel) ongeschonden de decemberstorm overleven zijn de meetreeksen van de peilbuizen en waterspanningsmeters 7, 8, 11 en 12. Daarbij moet worden opgemerkt dat deze reeksen wellicht nog een offset of een tijdsverschuiving vertonen met betrekking tot de werkelijke meetwaarde ter plaatse

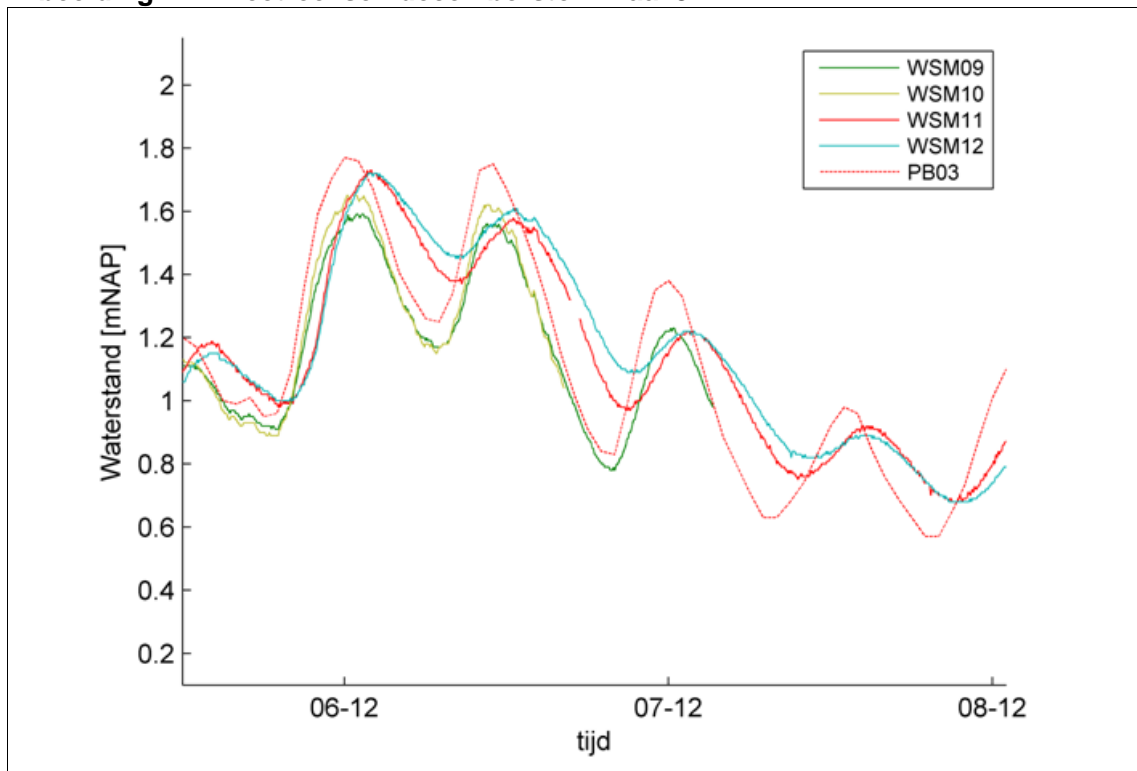
Afbeelding 4.5. Meetreeksen decemberstorm raai 1



Afbeelding 4.6. Meetreeksen decemberstorm raai 2



Afbeelding 4.7. Meetreeksen decemberstorm raai 3



De volgende bewerkingen zijn op de ruwe data uitgevoerd:

- alle onbetrouwbaar geachte meetwaarden zijn (lineair) geïnterpoleerd op een vijf minuten grid. Dit gebeurt met behulp van de twee omliggende, goed bevonden meetwaarden. Dit is alleen gedaan als het aantal opeenvolgende onbetrouwbare meetwaarden 12 of minder is. Als er meer opeenvolgende waarden zijn afgekeurd, zijn de betreffende meetwaarden verwijderd;
- na aanpassing door interpolatie is een oordeel gegeven aan de bruikbaarheid van de waterspanning meetreeksen voor periode 2013-II. Dit is weergegeven in tabel 4.2;
- de tijdstempels van alle waterspanning meetreeksen zijn omgezet naar wintertijd en het daardoor ontstane gat op 27 oktober wordt opgevuld door lineaire interpolatie;
- aanpassingen specifiek voor periode 2014-zomer:
 - vanwege een staptrend zijn de meetwaarden van de meetreeks WSM09 na 28 juli verwijderd;
 - om een gelijkvormige dataset te krijgen, is de totale dataset gelimiteerd tot de periode van 18 juli 00u00 tot en met 28 juli 00u00.

Uit tabel 4.2 wordt geconcludeerd dat tijdens de decemberstorm veel data als onbetrouwbaar is beoordeeld. Om niet alle stormdata te verwijderen, is ervoor gekozen om met behulp van de originele dataset een tweetal extra datasets te produceren; een gecorrigeerde en een geselecteerde dataset, welke als volgt zijn gedefinieerd:

- gecorrigeerd: foutieve metingen gerepareerd waar mogelijk en anders laten staan (inclusief decemberstorm);
- geselecteerd: foutieve metingen gerepareerd waar mogelijk en anders verwijderd (exclusief decemberstorm).

Tabel 4.2. Dataselectie van meetreeksen van periode 2013-II

sensor	# meetwaarden gecorrigeerd	Opmerkingen	Oordeel
WSM01	30	Zomer-wintertijd switch. Bij decemberstorm hapering en uitval. Zakt minder ver uit dan andere meters in positie 1.	tussen 5 en 9 december onbetrouwbaar
WSM02	42	Zomer-wintertijd switch. Bij decemberstorm hapering.	tussen 5 en 9 december onbetrouwbaar
WSM03	528	Zomer-wintertijd switch. V-offset met PB01 structureel ongeveer 7 cm. Na 20 november haperen, na 7 december saturerende meetwaarden.	van 29 oktober tot 20 november wel betrouwbaar, bij de analyse van de resultaten dient de constante offset met PB01 in gedachte te worden gehouden
WSM04	171	Bij decemberstorm hapering en uitval.	tussen 5 en 9 december onbetrouwbaar
WSM05B	1	Zomer-wintertijd switch. Klein aantal minipiekjes. Decemberstorm uitval.	tussen 5 en 9 december onbetrouwbaar
WSM06	2	Zomer-wintertijd switch. Decemberstorm uitval.	tussen 5 en 9 december onbetrouwbaar
WSM07	423	Zomer-wintertijd switch, V-offset met PB02 structureel ongeveer 7 cm. Veel mini piekjes, telkens op exact 11u00.	betrouwbaar, bij de analyse van de resultaten dient de constante offset met PB02 in gedachte te worden gehouden
WSM08	504	Veel mini piekjes, telkens exact op 12u30. V-offset na	betrouwbaar tot 13 december

sensor	# meetwaarden gecorrigeerd	Opmerkingen	Oordeel
		13 december.	
WSM09	9	Zomer-wintertijd switch. Klein aantal minipiekjes.	betrouwbaar
WSM10	10	Zomer-wintertijd switch.	betrouwbaar
WSM11	98	Geen zomer-wintertijd-switch. Twee uur delay met PB03. Amplitude wordt geleidelijk aan kleiner, tot 24 december. V-offset met PB03 vanaf dan constant -5 cm. Veel vlakker dan andere meters op positie 3. Delay (1 uur) met meters op positie 3. Minipiekjes telkens op 19u50.	na 24 december en na tijdsverschuiving van 2 uur betrouwbaar, bij de analyse van de resultaten dient de constante offset met PB03 in gedachte te worden gehouden
WSM12	429	Geen zomer-wintertijd-switch. Twee uur delay, veel kleinere amplitude dan andere meters op positie 4 (tot 12 december). Veel mini piekjes, telkens op 09u15.	na 24 december en na tijdsverschuiving van 2 uur betrouwbaar

4.7. Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

De ruwe data is gecontroleerd op kwaliteit. Daarop zijn de slechte datapunten gecorrigeerd. Tijdens de decemberstorm van 2013 blijkt echter veel data een slechte kwaliteit te hebben, vanwege sensorfalen. Omdat niet alle data tijdens de storm slecht is, en de goede data waardevol is, is ervoor gekozen om (naast de originele dataset) twee datasets te behouden: één set mét de decemberstorm (de gecorrigeerde data) en één set zonder de decemberstorm (de geselecteerde data).

De gezamenlijke datasets van raai 2 zijn als beste beoordeeld.

Aanbevelingen

Het verdient de aanbeveling om data die gebruikt wordt voor analyse van het stijghoogteverloop goed te controleren, met name op logica in fase-verschillen tussen verschillende meetreeksen. Deze controle is essentieel, omdat fouten in deze data onmiddellijk gevolgen hebben voor de conclusies.

5. ANALYSE STIJGHOOGTEVERLOOP WATERVOERENDE PAKKET

De aandrijvende kracht voor het pipingproces is een stijghoogteverschil over een slecht doorlatende laag. De huidige rekenmodellen voor grondwaterstroming in combinatie met piping zijn gericht op stationaire stromingssituaties en gaan uit van een 'constante' buitenwaterstand. Kenmerkend voor een stationaire stromingssituatie is dat de stroming volledig is ontwikkeld; er is evenwicht tussen de hydraulische belasting en de hydraulische weerstand.

De belastingsduur tijdens een hoogwater verschilt voor zee- en rivierdijken. Een hoge rivierafvoer houdt in de regel vijf tot tien dagen aan. Bij zeedijken duurt de stormopzet maximaal drie dagen en het getij kent een cyclus van twaalf uur en vijftwintig minuten. De getijperiode is te klein om een volledig stationaire stroming te ontwikkelen. De niet-stationaire stroming beïnvloedt het stijghoogteverloop in het watervoerende pakket. De waterspanningen bereiken niet de stationaire waarde. Dit wordt ook wel de tijdsafhankelijke invloed of het tijdsafhankelijke effect genoemd.

Tijdsafhankelijke invloeden op piping en erosie zijn nog onvoldoende onderzocht [ref. 11]. Hoewel theoretisch goed onderbouwde rekenmodellen ontbreken om de invloed van fluctuaties op het erosieproces af te schatten, kan overwogen worden om slechts een deel van het absolute verval in rekening te brengen in de pipinganalyse.

In dit hoofdstuk zijn de meetreeksen geanalyseerd met als doel het voorspellen van het stijghoogteverloop in het watervoerende pakket onder ontwerpomstandigheden. Op basis van het verloop is in de pipinganalyse (hoofdstuk 6) het absolute verval over de waterkering rekenkundig verkleind en daarmee is het tijdsafhankelijke effect in de pipinganalyse in rekening gebracht. De pipinganalyse is tevens ter onderbouwing van de hypothesen uit het plan van aanpak (zie kader).

Hypothesen invloed tijdsafhankelijkheid [ref. 22]

- T1: Niet het absolute verval over de kwelweglengte is van belang, maar de gradiënt van de waterspanning in de pipe ter plaatse van het uittreepunt.
- T2: Het verval (ΔH) voor initiatie van piping mag gereduceerd worden met de verhouding tussen de gradiënten steady en transient flow ter plaatse van het uittreepunt.
- T3: Door het monitoren van de waterspanningen kan aangetoond (onderbouwd) worden dat een reductie van het verval gerechtvaardigd is.
- T4: Het effect van de variërende buitenwaterstand op het stijghoogteverloop onder de dijk kan zichtbaar gemaakt worden met behulp van het monitoringsprogramma

Het stijghoogteverloop is in voorliggend hoofdstuk op basis van de volgende methoden voorspeld:

- *methode 1: Analytisch conform TRWD*: analytische methode om het stijghoogteverloop naar het achterland inzichtelijk te maken op basis van de voorgeschreven methode in het Technisch rapport waterspanningen bij dijken (TRWD) [ref. 15];
- *methode 2: Directe extrapolatie*: methode waarbij voor elk individueel getij de gemeten waterspanning lineair geëxtrapoleerd wordt naar ontwerpomstandigheden op basis van de buitenwaterstand;
- *methode 3: Scheldestromen*: door Waterschap Scheldestromen ontwikkelde methode waarbij de meetreeksen voor extrapolatie eerst opgedeeld worden in een quasi-statisch (gemiddeld) deel en een dynamisch deel. De methode is toegepast in de verlengde derde toetsronde;
- *methode 4: Frequentieanalyse*: wiskundige variant van de methode Scheldestromen;

- *methode 5: PlaxFlow*: mathematisch model om op basis van geometrische en geohydrologische eigenschappen de grondwaterstroming in het watervoerende pakket te modelleren.

De methoden zijn toegepast op de drie raaien, met uitzondering van methoden 1 en 5. Deze laatste twee methoden zijn alleen toegepast op raai 2, omdat dit de meest betrouwbare raai wordt geacht (hoofdstuk 4).

5.1. Methode 1: Analytisch conform TRWD

5.1.1. Beschrijving methode

In het TRWD [ref. 15] is een analytische methode beschreven om het verloop van de waterspanningen in het watervoerende pakket te schematiseren op basis van peilbuismetingen. Deze methode is tevens beschreven in het ORZW [ref. 11]. De methode beschrijft op fysisch-mathematische wijze het proces waarbij waterspanningen onder de dijk zich voortplanten naar het achterland. Met deze methode zijn peilbuiswaarnemingen te interpreteren en te extrapoleren. De cyclische respons in het watervoerende pakket voor een dijk zonder voorland is te beschrijven met de volgende vergelijking:

$$\phi(x) = H \exp(-x/\lambda_w)$$

waarin:

- ϕ respons in het watervoerende pakket [m];
- x afstand uit het intreepunt [m];
- H amplitude van de (getij)golf [m];
- λ_w lekfactor die de demping en vertraging beschrijft [m].

De lekfactor is een waarde die samenhangt met de geohydrologische eigenschappen van het dwarsprofiel. Uit de vergelijking volgt dat de stijghoogte in de watervoerende laag een landinwaarts gerichte afname vertoont volgens een exponentiële functie. De lekfactor is daarbij een maat waarbij de afname van de stijghoogte zichtbaar wordt. Voor de gedetailleerde beschrijving van de methode wordt verwezen naar het TRWD en Bauduin en Barends [ref. 1]. Als resultaat van de methode is λ_w gefit voor raai 2 aan de hand van de waterspanningsmetingen WSM05, WSM06 en WSM08 (Tabel 5.1).

5.1.2. Methode specifieke uitgangspunten

De tijdsafhankelijke component wordt in deze methode niet meegenomen. Daarom worden bij de analyse verschillende (getij)golven beschouwd. De methode wordt gebruikt voor het fitten van de exponentiële functie op één (getij)golf en drie waterspanningsmeters in een raai. Om het effect van de keuze van de golf inzichtelijk te maken, zijn de volgende golven beschouwd:

- golf 1: 2 oktober 2013 (Afbeelding 5.1);
- golf 2: 3 november 2013 (Afbeelding 5.2);
- golf 3: 6 december 2013 (Afbeelding 5.3).

Golf 1 is beschouwd, omdat het beeld van de stijghoogten en buitenwaterstand anders is dan verwacht. De gemeten stijghoogten liggen namelijk hoger dan de buitenwaterstand. De grotere stijghoogten worden veroorzaakt doordat het polderpeil in de achterliggende polders boven de maximale buitenwaterstand ligt (Afbeelding 3.2). De methode TRWD houdt geen rekening met een dergelijke bronterm en houdt alleen rekening met kwel/stroming

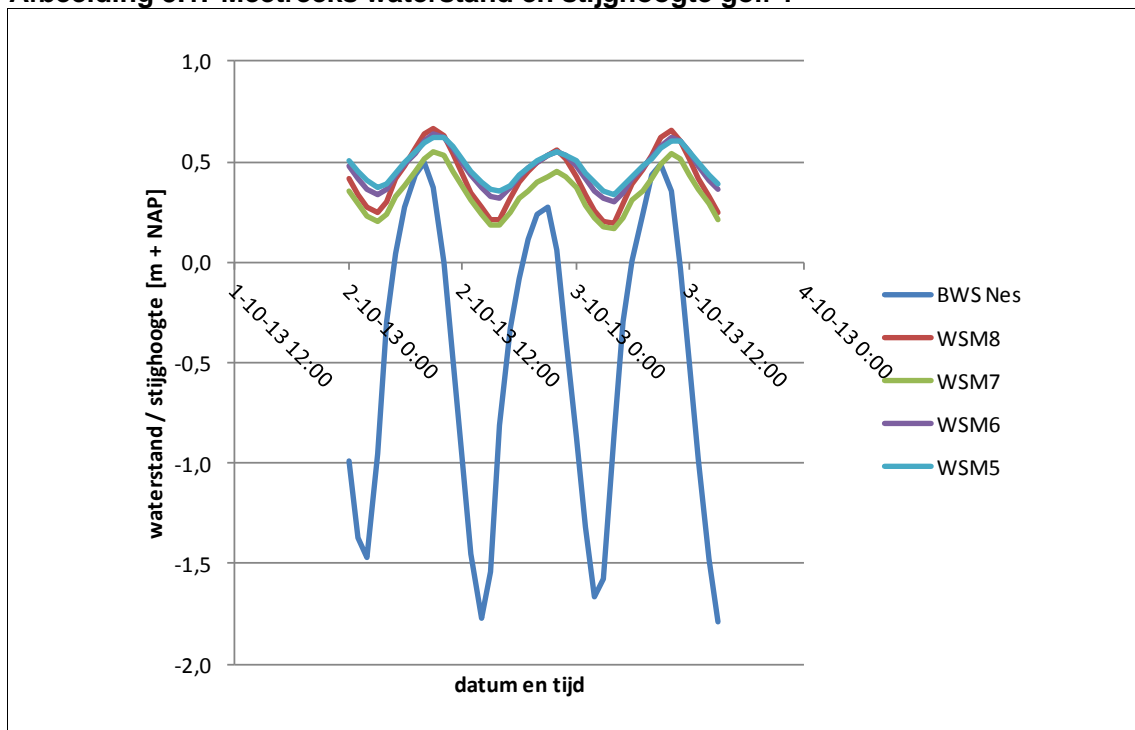
richting het achterland tijdens meetomstandigheden. Bij de beoordeling van de toepasbaarheid van deze methode dient hiermee rekening te worden gehouden.

Het gedrag van de andere twee golven voldoet aan de verwachting. De amplitude dempt uit richting het achterland, waarbij tevens een kleine faseverschuiving zichtbaar is.

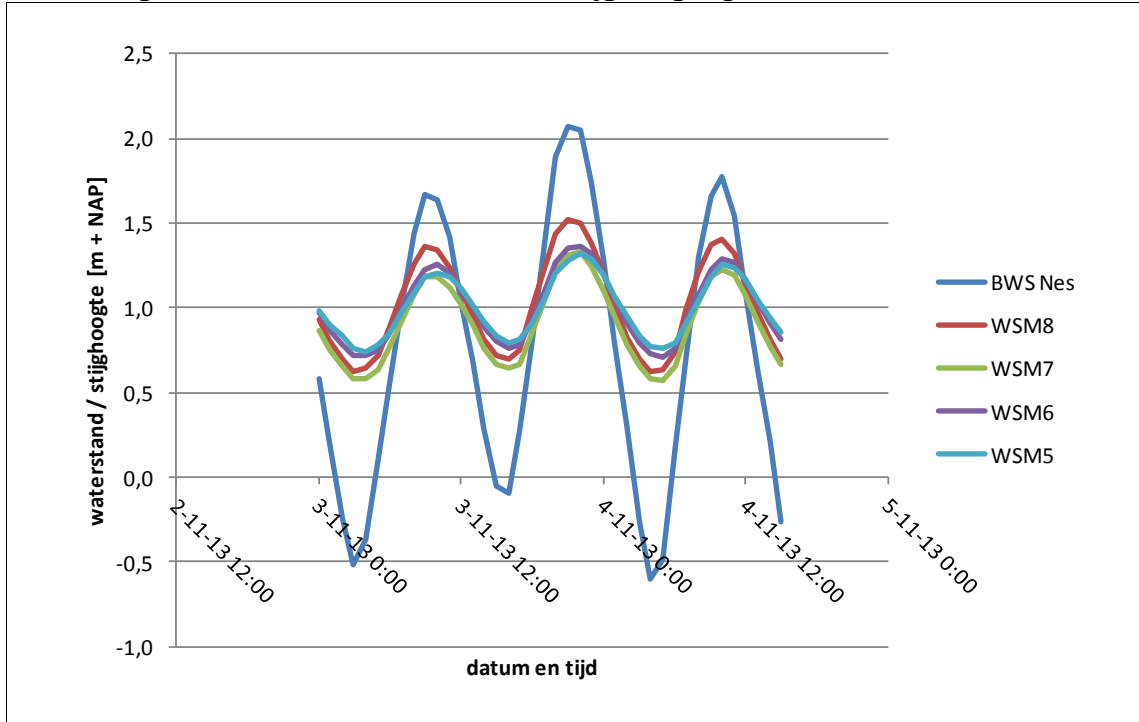
De methode is gebaseerd op de volgende aannamen [ref. 15]:

- weerstand in het voorland is verwaarloosbaar. In de situatie ter plaatse van de monitoringsproef is een geul en aansluitend een wad aanwezig in het voorland. De invloed hiervan wordt echter niet op voorhand uitgesloten en komt tot uiting in de lekfactor;
- zandpakket onder de dijk is relatief stijf;
- cyclische lekfactor kan bepaald worden uit een 13-uursmeting van waterspanningen en buitenwaterstanden;
- zandlaag in voor- en achterland is identiek;
- hydrodynamische periode is groot ten opzichte van de cyclustijd van de belasting.

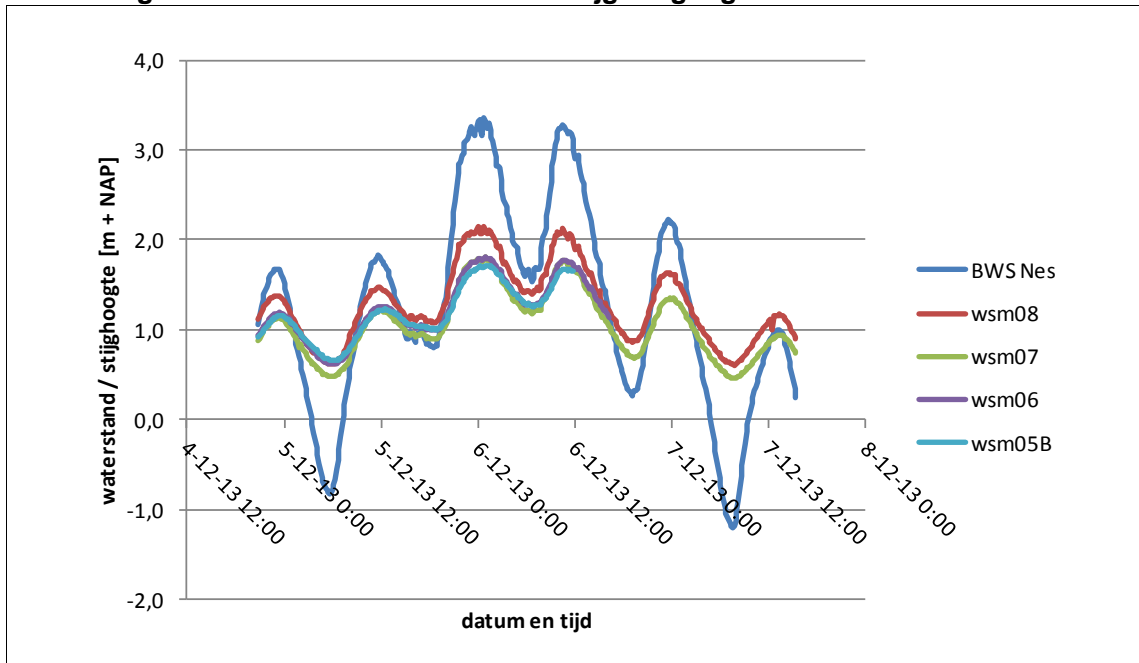
Afbeelding 5.1. Meetreeks waterstand en stijghoogte golf 1



Afbeelding 5.2. Meetreeks waterstand en stijghoogte golf 2



Afbeelding 5.3. Meetreeks waterstand en stijghoogte golf 3



5.1.3. Resultaten en discussie

Voor het verloop van elke golf zijn twee waarden voor λ_w (lekfactor) gefit voor een superpositie van een stormopzet (45 uur) en een dubbeldaags getij (12 uur en 25 min):

$$\phi(x) = H_{stationar} + H_{getij} \exp\left(-\frac{x}{\lambda_{wgetij}}\right) + H_{storm} \exp\left(-\frac{x}{\lambda_{wstorm}}\right)$$

In de fit is de invloed van het polderpeil in rekening gebracht (aangehouden op NAP +0,9 m). Bij golf 3 leidt dit tot een bovengrens voor de calibratie van de respons van het stationaire deel. Ondanks deze bovengrens, is de decemberstorm redelijk te fitten (paragraaf 5.6). Als resultaat van de fit zijn de bijbehorende lekfactoren gegeven in Tabel 5.1 (Bijlage II).

Tabel 5.1. Resultaten lekfactoren voor getij en stormduur

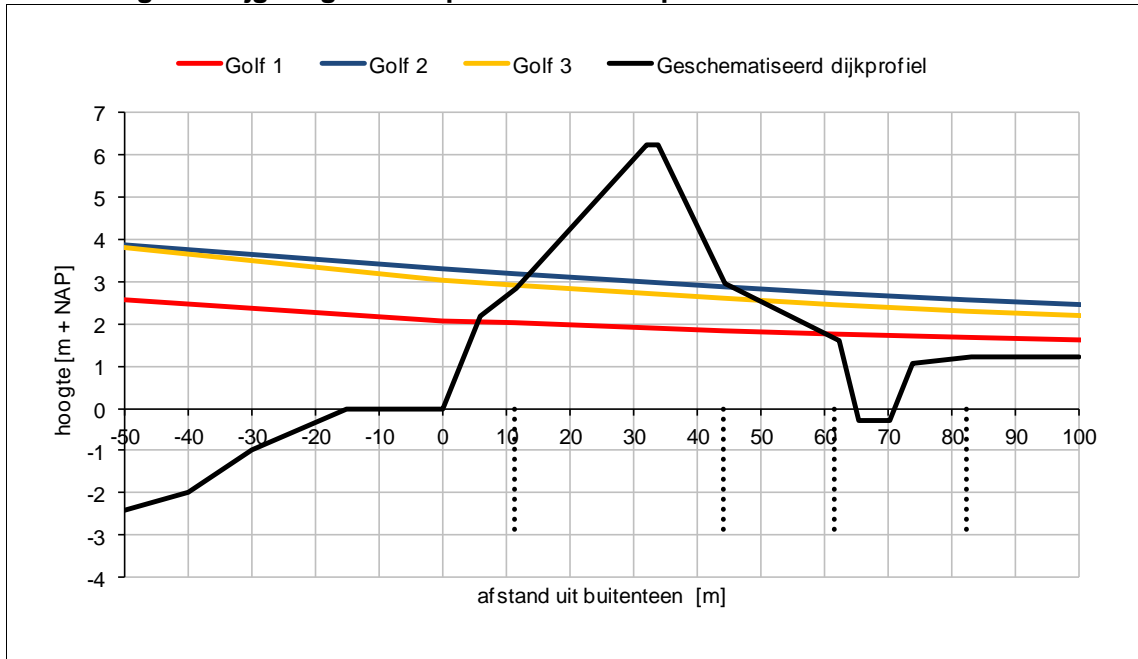
Golf	λ_w (T = 12 uur, 25 min) [m]	λ_w (T = 45 uur) [m]
1	124	204
2	148	243
3	134	220

Het resultaat van golf 1 is niet representatief voor het stijghoogteverloop, omdat de methode TRWD niet bedoeld is voor stroming vanuit het achterland. De fit van golf 2 en 3 laten zien dat de ontwerpwaterstand in het watervoerende pakket pas ver buiten de teen van de dijk bereikt wordt. Hieruit zou geconcludeerd kunnen worden dat het intreepunt ver voorbij de teen van de dijk ligt.

Het voorland dempt de stijghoogtes sterk, doordat de achterste waterspanningsmeters een bijna uniforme amplitude hebben. De amplitudedemping richting het achterland is daardoor slecht, wat zich vertaalt in een grote lekfactor λ_w . Een dergelijke grote lekfactor kan verklaard worden doordat het wad de intreeweerstand verhoogd. Echter, de amplitude van de peilbuizen wordt ook gedempt door het hoge polderpeil (groter dan de gemiddelde waterstand) aan de binnenzijde van de dijk. De lekfactor is om deze redenen kunstmatig hoog. De invloed van het voorland mag daarom niet op voorhand in rekening worden gebracht of worden uitgesloten.

Het verloop van de stijghoogte in het watervoerende pakket onder ontwerpomstandigheden is gegeven in Afbeelding 5.4. Het blijkt dat de keuze van de (getij)golf waarop de functie wordt gefit, veel invloed heeft op het verloop. Het stijghoogteverloop van golf 1 bepaald met methode TRWD is in de grafiek weergegeven ter illustratie, maar niet meegenomen in de verdere analyse om de bovengenoemde redenen.

Afbeelding 5.4 Stijghoogteverloop watervoerend pakket methode TRWD



5.2. Methode 2: Directe extrapolatie

5.2.1. Beschrijving methode

De directe extrapolatie methode heeft een wiskundige onderbouwing. Om de respons van de metingen te beschrijven zonder interpretatieslag, is de methode Directe extrapolatie beschouwd. Onder de aanname dat waterspanningen in de peilbuis en waterspanningsmeters lineair reageren op de buitenwaterstand, is het mogelijk om (delen van) de meetreeks te extrapoleren naar ontwerpomstandigheden. Deze relatief eenvoudige methode is intuïtief goed te begrijpen.

Het idee is om de buitenwaterstand te extrapoleren naar MHW. De extrapolatiefactor wordt rechtevenredig gebruikt om de waterspanning in het watervoerende pakket te bepalen. Voor deze methode is per getij een lokaal minimum en een lokaal maximum gehanteerd van zowel de buitenwaterstand als van de waterspanningsmeter. Met dit viertal verloopt de extrapolatie naar MHW volgens de volgende stappen:

- $BuWS_{dal}$: lokaal minimum van de buitenwaterstand;
- $BuWS_{piek}$: daarop volgende lokale maximum van de buitenwaterstand;
- WSM_{dal} : eerstvolgende lokale minimum van de waterspanningsmeter/peilbuis ná $BuWS_{dal}$;
- WSM_{piek} : daarop volgende lokale maximum van de waterspanningsmeter/peilbuis.

De extrapolatiefactor wordt per dal-piek combinatie bepaald door:

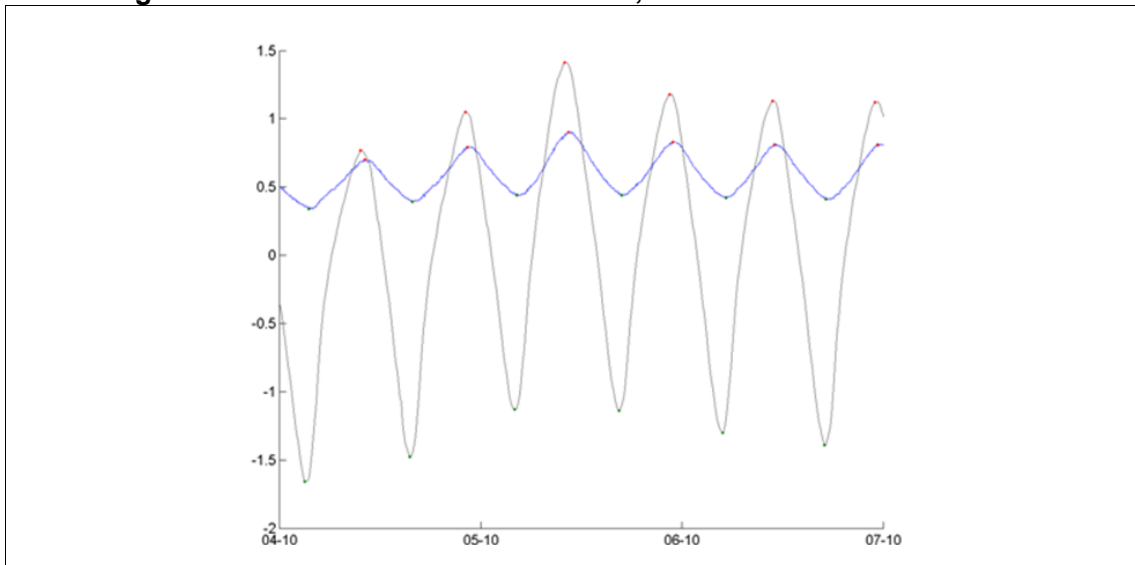
$$\text{factor} = (BuWS_{MHW} - BuWS_{dal}) / (BuWS_{piek} - BuWS_{dal})$$

Deze factor wordt gebruikt om de WSM-waarden op te schalen naar MHW-omstandigheden door:

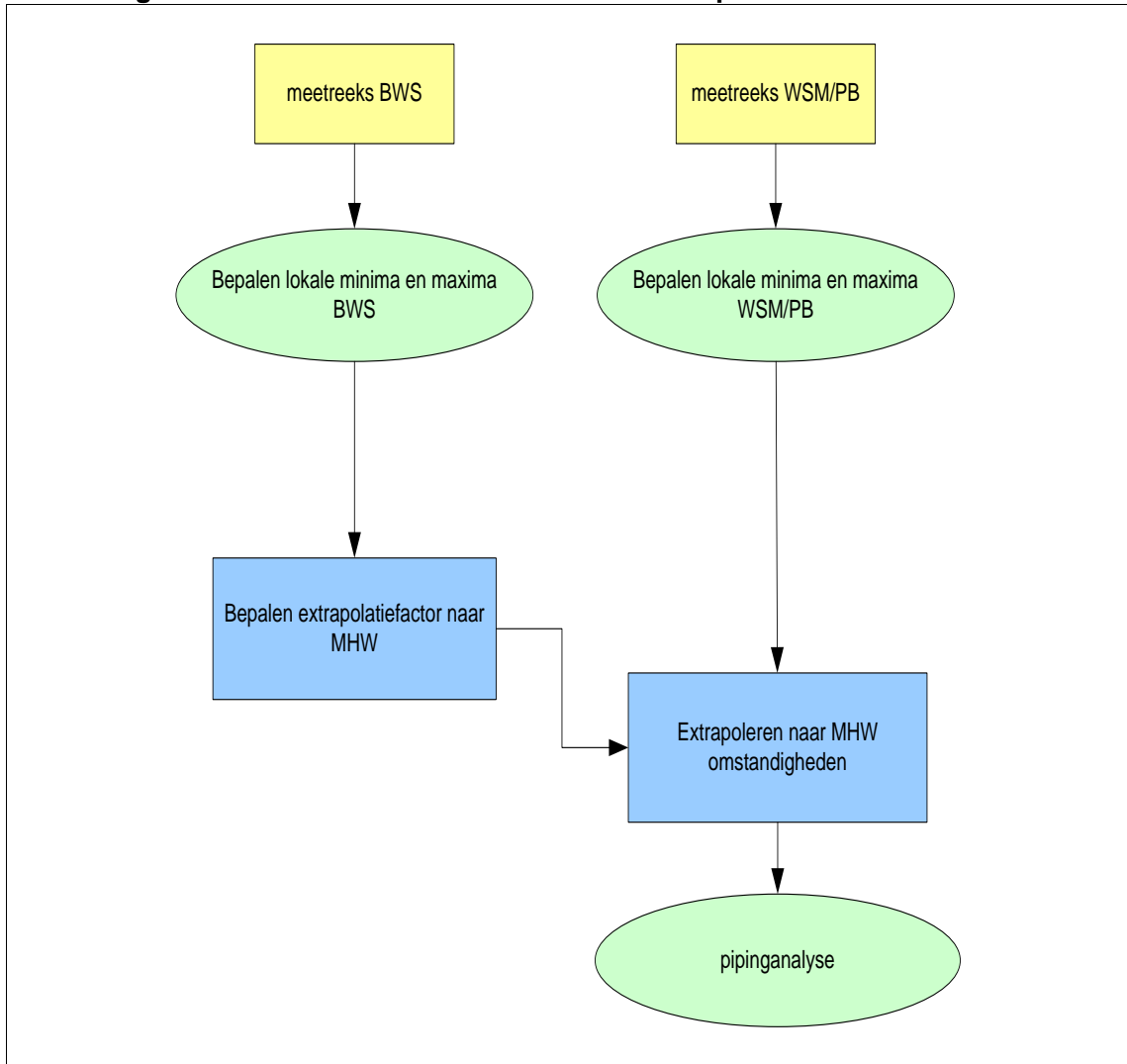
$$WSM_{MHW} = ((WSM_{piek} - WSM_{dal}) * \text{factor}) + WSM_{dal}$$

Voor ieder viertal wordt dus een specifieke extrapolatiefactor berekend. Daarmee wordt de stijghoogte in het watervoerende pakket voor ieder viertal geëxtrapoleerd naar een stijghoogte onder MHW-omstandigheden. In Afbeelding 5.5 is het verloop van één waterspanningsmeter en de buitenwaterstand uitgezet, met de bijbehorende detectie van de viertal lokale extrema. In Afbeelding 5.6 is het stroomschema van de methode weergegeven.

Afbeelding 5.5. Uitsnede van BWS en WSM05B; detectie van minima en maxima.



Afbeelding 5.6. Stroomschema methode Directe Extrapolatie



5.2.2. Methode specifieke uitgangspunten

De methode directe extrapolatie heeft de volgende specifieke uitgangspunten:

- dalen en pieken moeten voor alle reeksen aan elkaar gekoppeld worden. Daarom wordt er een selectie van de dataset genomen waar meetreeksen betrouwbaar worden geacht. In dit geval is dit voor raai 1 de geselecteerde data over de periode van 29 oktober tot 19 november 2013, voor raai 2 de periode van 28 september tot 1 december 2013 en voor raai 3 de periode van 15 januari tot 1 april 2014;
- bij droogvallen of overlopen, of bij andere afgetopte extrema van een meter kan geen juiste extrapolatie gedaan worden.

5.2.3. Resultaten en discussie

De geëxtrapolerde waterstanden laten een logisch verband zien tussen hoogte en afstand van de betreffende sensor tot het buitenwater (Tabel 5.2). De methode is getoetst op twee daadwerkelijk voorgekomen waarden. Bij de eerste getijgolfpiek van de decemberstorm is een buitenwaterstand van NAP +3,35 m gemeten. De berekende stijghoogte onder deze omstandigheden en de gemeten stijghoogte zijn ook gegeven in Tabel 5.2. In de laatste kolommen van de tabel zijn de berekende en gemeten waarden van een waterstandpiek van

NAP +2,09 m gegeven. In Afbeelding 5.7 is weergegeven hoe de geëxtrapolerde waterstand zich verhoudt tot de gebruikte buitenwaterstand.

Het verschil tussen stijghoogtes van de peilbuizen en de corresponderende waterspanningsmeters wordt veroorzaakt door een verticale offset. Deze offset is reeds geconstateerd in Tabel 4.2.

Tabel 5.2. Resultaten methode directe extrapolatie [m+NAP]

meetreeks	berekende stijghoogte bij MHW	berekende stijghoogte bij BuWS NAP +3,35 m	gemeten stijghoogte bij BuWS NAP +3,35 m	berekende stijghoogte bij BuWS NAP +2,09 m	gemeten stijghoogte bij BuWS NAP +2,09 m
WSM1	1,868	1,529	1,7 ¹⁾	1,271	1,33
WSM2	2,008	1,596	1,8 ¹⁾	1,282	1,34
WSM3	2,100	1,628	²⁾	1,268	1,33
WSM4	2,483	1,866	2,1 ¹⁾	1,394	1,45
WSM5	1,639	1,352	1,72	1,133	1,32
WSM6	1,770	1,435	1,81	1,180	1,38
WSM7	1,811	1,426	1,81	1,133	1,33
WSM8	2,154	1,687	2,14	1,330	1,53
WSM9	1,438	1,196	1,59	1,011	1,21
WSM10	1,518	1,239	1,65	1,026	1,23
WSM11 ³⁾	1,622	1,322	²⁾	1,093	²⁾
WSM12 ³⁾	1,779	1,421	²⁾	1,148	²⁾
PB01	2,181	1,704	1,89	1,340	1,41
PB02	1,885	1,499	1,91	1,204	1,42
PB03	1,637	1,331	1,77	1,098	1,33

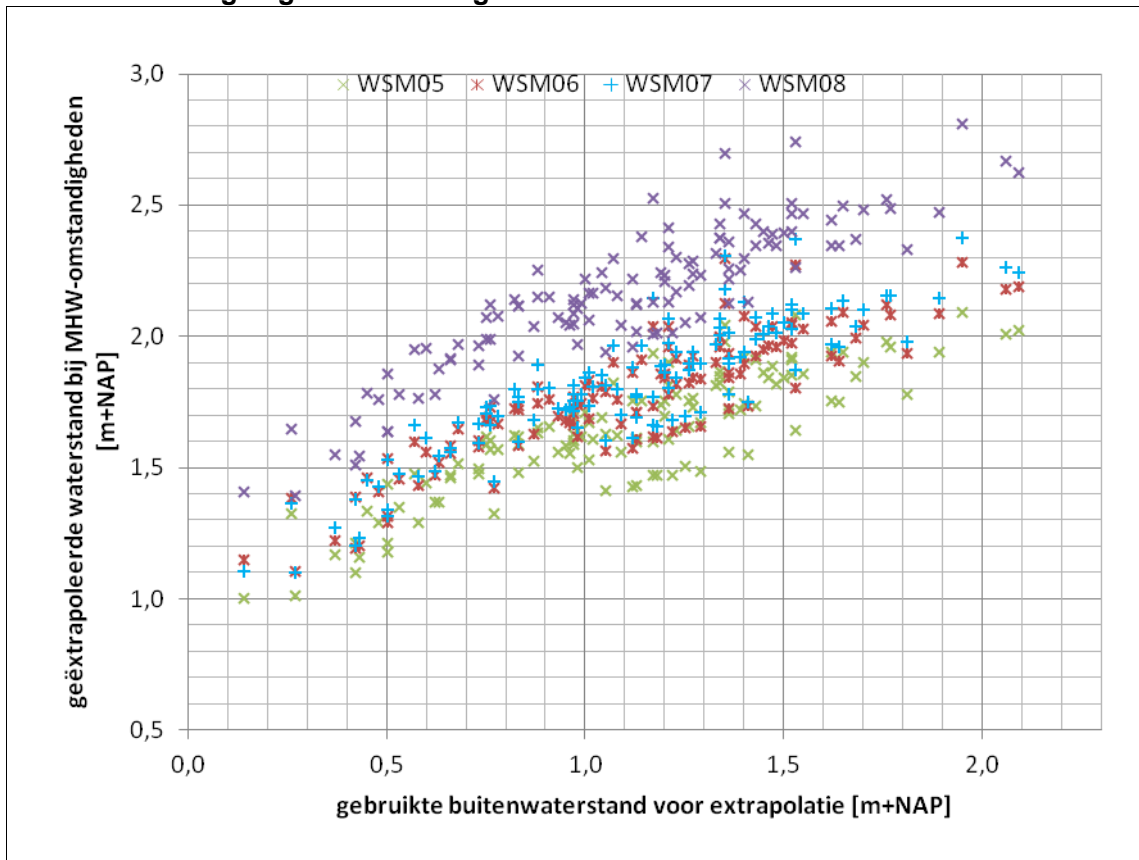
1) meetwaarden geschat op basis van curve in Afbeelding 4.5 tot en met Afbeelding 4.7

2) volledig onbetrouwbare metingen, geen uitspraak mogelijk.

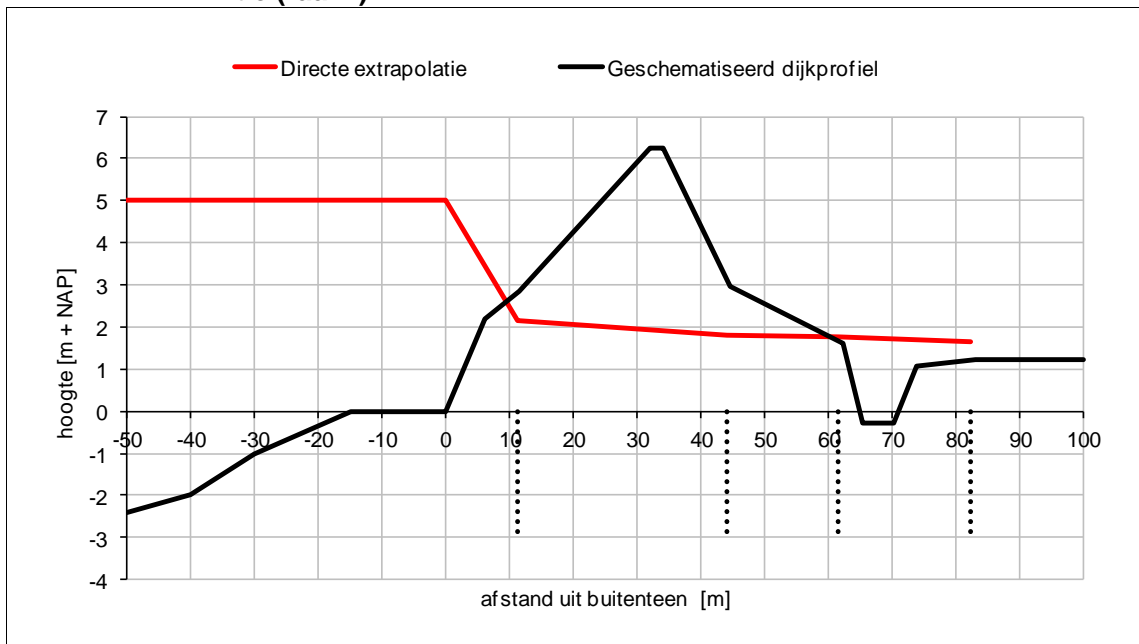
3) meetperiode van 15 januari tot 1 april 2014.

In alle gevallen is er sprake van een onderschatting van de gemeten waterstand. De onderschatting komt met name doordat de methode geen rekening houdt met de grotere invloed van een stormopzet op de stijghoogtes ten opzichte van een getijgolf. De aanname dat de waterstand lineair reageert op de buitenwaterstand is daarmee onjuist. Dit is afgebeeld in Afbeelding 5.7. Als de waterstanden wel lineair zouden reageren, dan zou de puntenwolk horizontaal georiënteerd zijn. De methode levert voor deze situatie daarmee een onveilige schatting van het stijghoogteverloop.

Afbeelding 5.7. Verdeling berekende geëxtrapoleerde waterstanden van waterspanningsmeters in raai 2 bij MHW-omstandigheden uitgezet tegen gebruikte voorgekomen buitenwaterstanden



Afbeelding 5.8. Stijghoogteverloop watervoerend pakket methode Directe extrapolatie (raai 2)



5.3. Methode 3: Scheldestromen

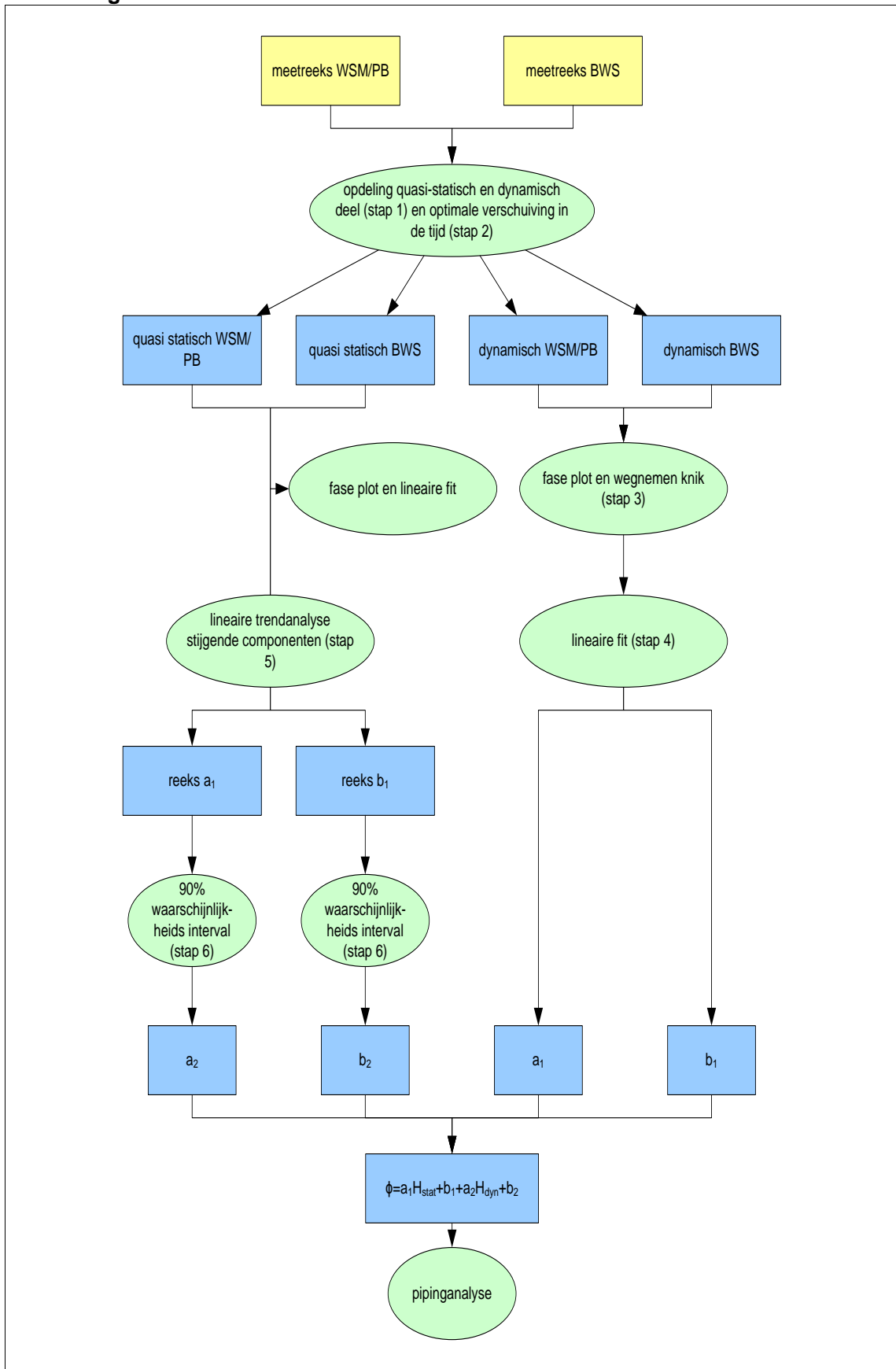
De methode Scheldestromen is door de heer H. van der Sande van Waterschap Scheldestromen toegepast in de verlengde derde toetsronde (2013). Middels deze methode is de tijdsafhankelijke invloed van de stijghoogte op het pipingprobleem in dijkkring 32 (Zee-land) in rekening gebracht. De basis van de hier gepresenteerde methode komt overeen, maar een afwijkende aanpak is gehanteerd voor het bepalen van het quasi-statische deel. Een vergelijking tussen de twee methoden is opgenomen in paragraaf 5.6.3. De hier gehanteerde aanpak wordt *Scheldestromen Statistisch* genoemd in tegenstelling tot de in de verlengde derde toetsronde gehanteerde methode *Scheldestromen Origineel*.

5.3.1. Beschrijving methode

Op basis van de uitgevoerde peilbuis- en waterspanningsmetingen in de watervoerende laag is de tijdsafhankelijke invloed van het stijghoogteverloop op de buitenwaterstand onderzocht. De individuele meetreeksen zijn daarvoor opgedeeld in een quasi-statisch (gemiddeld) deel en een dynamisch deel. Deze aanpak is gestoeld op het idee dat respons op een langdurige (langer dan één getijdeperiode zoals een stormopzet) waterstandverhoging groter is dan de respons op een kortstondige waterstandverhoging (getijbeweging). De maatgevende stijghoogte wordt per meetlocatie verkregen door superpositie van het quasi-statische deel en het dynamische deel onder maatgevende omstandigheden.

Het doel van het analyseren van de quasi-statische respons is het kwantificeren van het effect van een langdurige stormopzet, terwijl het analyseren van de dynamische respons gericht is op het bepalen van de invloed van kortstondige fluctuaties. In Afbeelding 5.9 is het doorlopen stroomschema gegeven.

Afbeelding 5.9. Stroomschema methode Scheldestromen statistisch



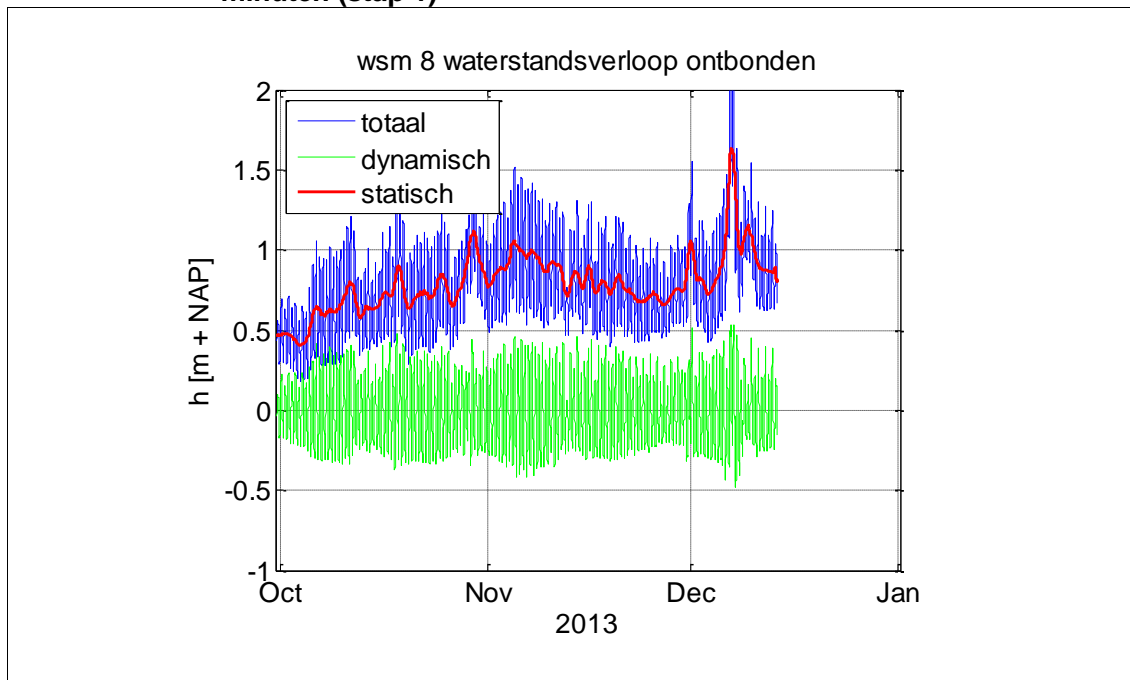
Hieronder zijn de stappen toegelicht om tot het stijghoogteverloop onder ontwerpomstandigheden te komen. De tijdreeks gemeten met waterspanningsmeter WSM08 (raai 2, locatie dichtst bij de buitenteen) is daarbij gebruikt als voorbeeld. Voor alle waterspanningsmeters en peilbuizen is de analyse uitgevoerd. In bijlage III zijn de illustraties gepresenteerd.

Stap 1

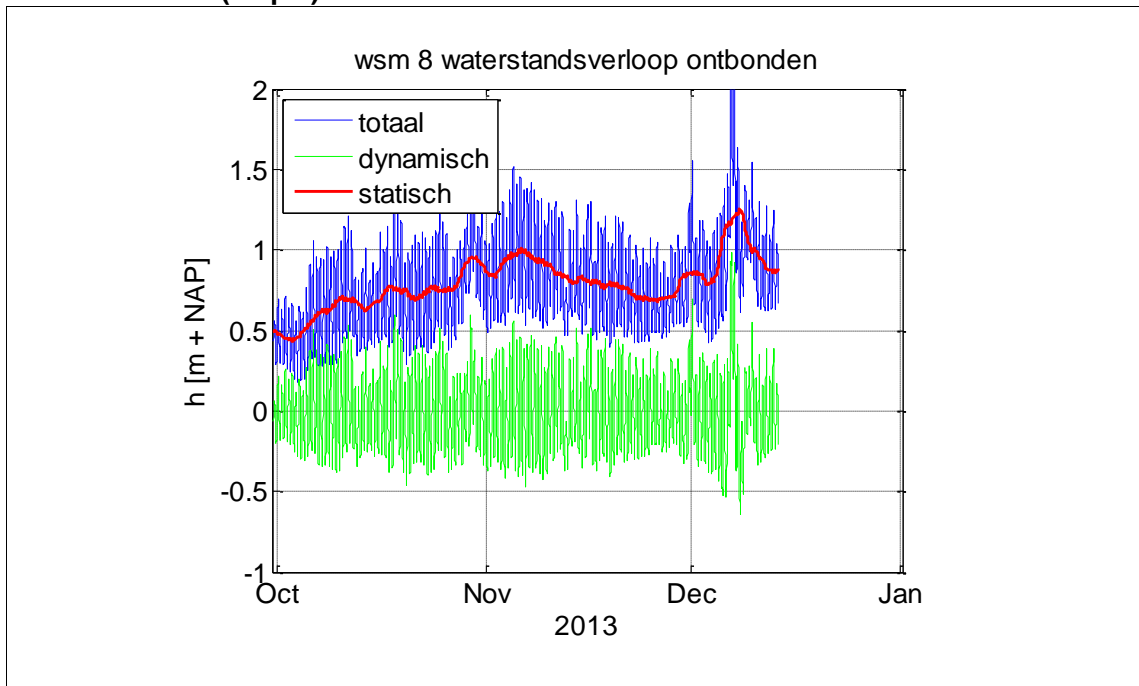
In stap 1 wordt de quasi-statische en dynamische component bepaald uit de tijdreeksen van de buitenwaterstand en peilbuis of waterspanningsmeting. In tegenstelling tot de methode Scheldestromen Origineel wordt de quasi-statische respons verkregen door middeling van de tijdreeks over één getijperiode (12 uur 25 minuten). De dynamische respons volgt vervolgens uit het verschil tussen de totale meting en de quasi-statische respons (Afbeelding 5.10). Door het middelen over deze periode staat met redelijke zekerheid vast dat de restcomponent (het quasi-statische deel) wordt veroorzaakt door overige invloeden, zoals: depressies, seiches en regenval. In de methode Scheldestromen Origineel wordt de totale respons gemiddeld over de maatgevende duur van de stormopzet in het Waddenzeegebied, conform de Leidraad zee en meerdijken [ref. 14] (Afbeelding 5.11).

Voor beide methode resulteert de dynamische component door de quasi-statische component van het totaal af te trekken. Bij de middeling over één getijperiode is het karakter van een dubbeldaags getij en de invloed van de M2-S2 cyclus beter zichtbaar dan bij middeling over de maatgevende stormduur. Hieruit valt op te maken dat middeling over één getijperiode een betrouwbaarder resultaat geeft van zowel de quasi-statische als de dynamische respons.

Afbeelding 5.10. Scheldestromen Statistisch: opsplitsen totale meetsignaal in quasi-statische en dynamische component door middeling over 12 uur 25 minuten (stap 1)



Afbeelding 5.11. Scheldestromen Origineel: opsplitsen totale meetsignaal in quasi statische en dynamische component door middeling over 45 uur (stap 1)

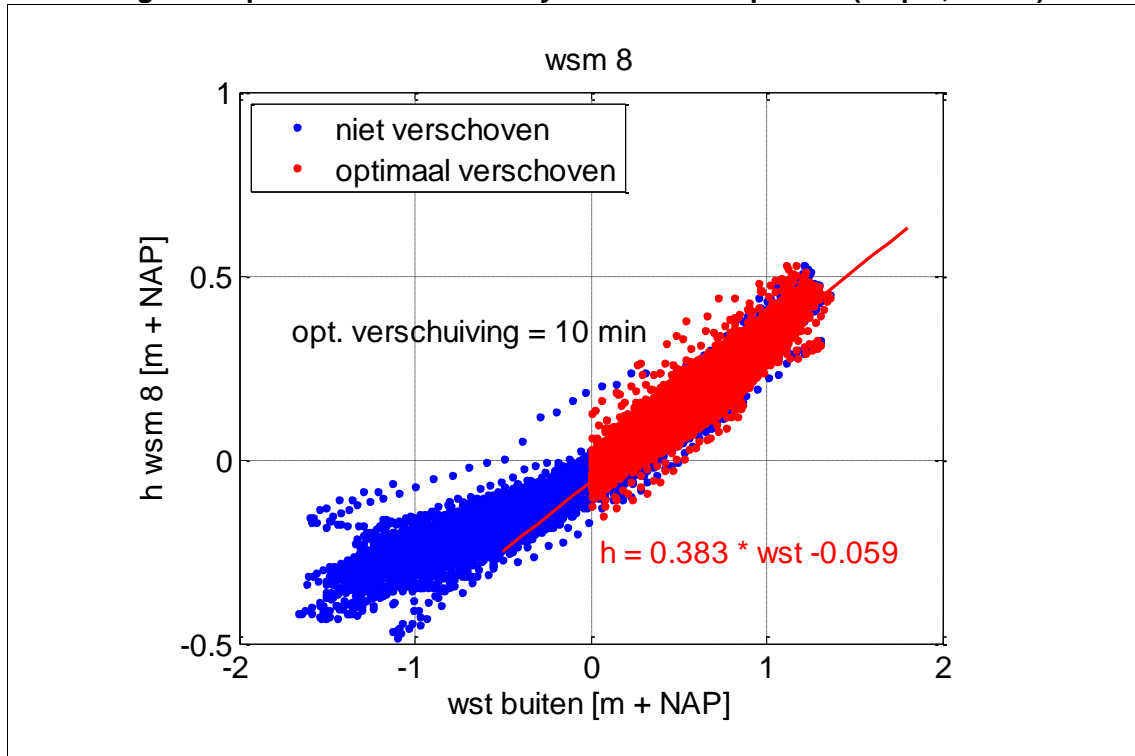


Stap 2

De tweede stap is het wegnemen van de faseverschuiving van het dynamische deel voor een optimale correlatie tussen buitenwaterstand en responsmeting (Afbeelding 5.12). De pieken en dalen van de responsmetingen en de buitenwaterstand (op basis van data van Nes) vallen in de tijd niet samen. Deels komt dit door het afstandsverschil tussen het meetstation en de onderzoekslocatie en deels door de infiltratievertraging tussen de buiten- en binnenzijde van de kering.

De faseverschuiving is geneutraliseerd door de datapunten van de waterspanningsmeting te verschuiven in de tijd ten opzichte van de buitenwaterstand. Door het wegnemen van de faseverschuiving volgt een optimale relatie tussen de maximale buitenwaterstand en de maximaal gemeten stijghoogte. Uit de extrapolatie naar ontwerpomstandigheden volgt daarbij de maximaal te verwachten stijghoogte. De intree weerstand of afstand tussen waterspanningsmeter en de meetlocatie van de buitenwaterstand is daarbij niet van belang.

Afbeelding 5.12 Optimaal verschuiven dynamische component (stap 2, 3 en 4)



Stappen 3 en 4

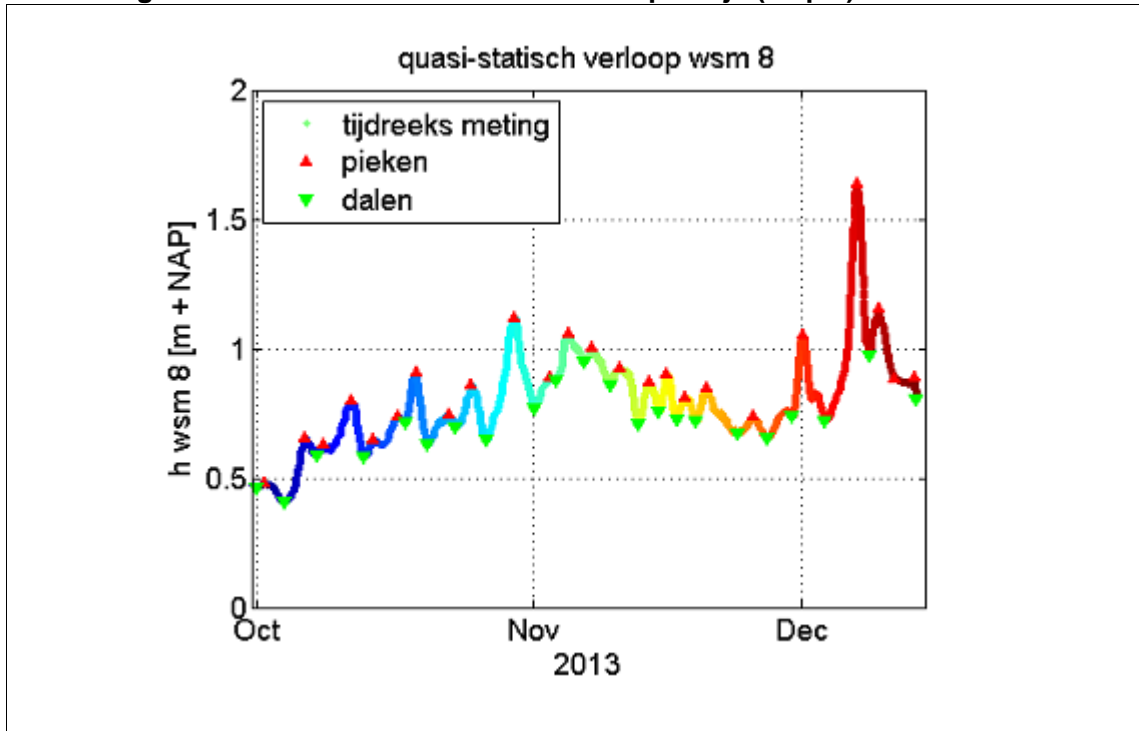
Bij een goede verschuiving en correlatie wordt er een min of meer lineaire relatie gevonden tussen de dynamische delen van de buitenwaterstand en de responsmeting. Echter, in de hysteresis is soms een knik aanwezig. Deze knik kan veroorzaakt worden door afwatering- of (polder)peilinvloeden. Deze invloeden zijn van ondergeschikt belang voor het bepalen van het verloop onder ontwerpomstandigheden. Daarom zijn alleen de datapunten boven de knik meegenomen in het bepalen van een lineaire fit. Het resultaat is de relatie tussen het dynamische deel van de responsmeting (ϕ_{dyn}) en dynamische deel van de buitenwaterstand (H_{dyn}) waarvoor in de lineaire relatie a_1 en b_1 wordt gehanteerd.

$$\phi_{dyn} = a_1 H_{dyn} + b_1$$

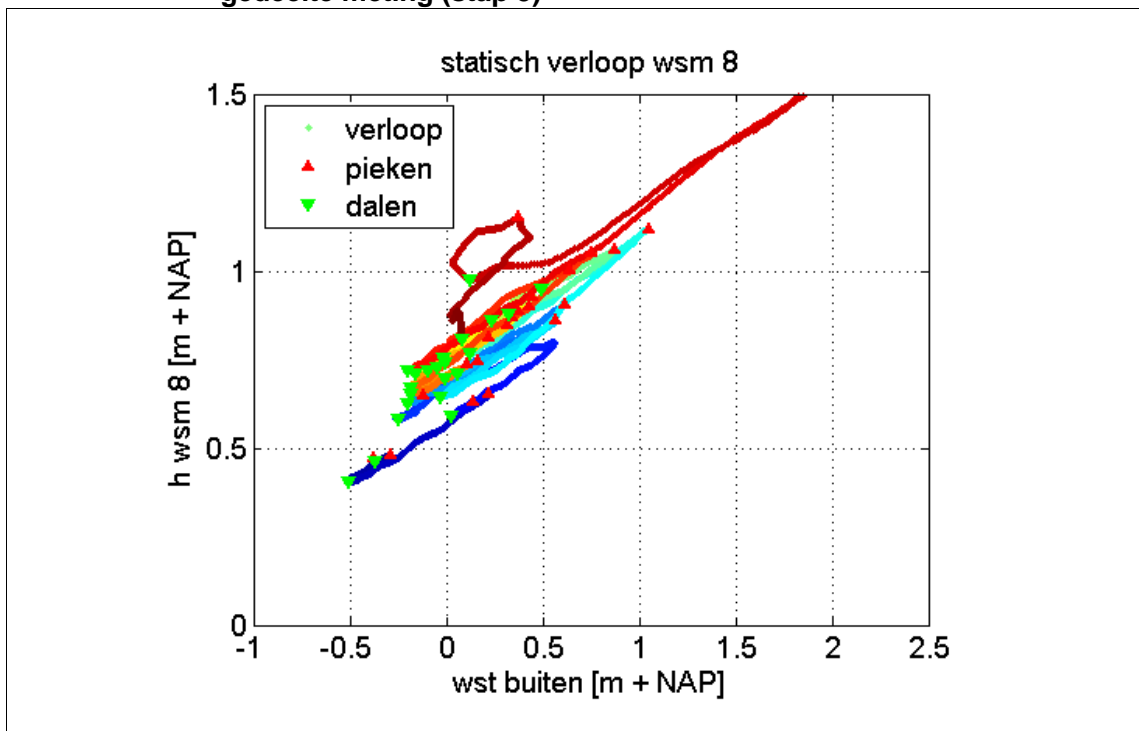
Stappen 5 en 6

In stappen 5 en 6 wordt de respons op het statische deel van de buitenwaterstand bepaald. Met betrekking tot de statische respons is alleen de invloed van opkomend water van belang. De stijgsnelheid op de meetlocaties is voor alle tijdvakken berekend waarin het quasi-statische gedeelte stijgt. Daarvoor zijn de opvolgende dalen en pieken in het meetsignaal van de quasi-statische respons gedetecteerd (Afbeelding 5.13). Vervolgens is een lineaire trendanalyse ($y=ax+b$) toegepast op elkaar opvolgende pieken en dalen in het vlak buitenwaterstand-responsmeting (Afbeelding 5.14), wat resulteert in een reeks aan waarden voor a_2 en b_2 . De waarden van a_2 zijn in alle gevallen positief (alleen opkomend water).

Afbeelding 5.13. Pieken en dalen statisch verloop in tijd (stap 5)



Afbeelding 5.14. Relatie tussen quasi-statische buitenwaterstand en quasi-statische gedeelte meting (stap 5)



Op de waarden van a_2 en b_2 is een normale verdeling toegepast (Afbeelding 5.15 en Afbeelding 5.16). Van deze verdelingen is de 90% waarschijnlijkheid waarde als representatief genomen voor de ontwerpomstandigheden. Daaruit volgt een serie waarden voor a_2 en b_2 :

$$\phi_{stat} = a_2 H_{stat} + b_2$$

Stap 7

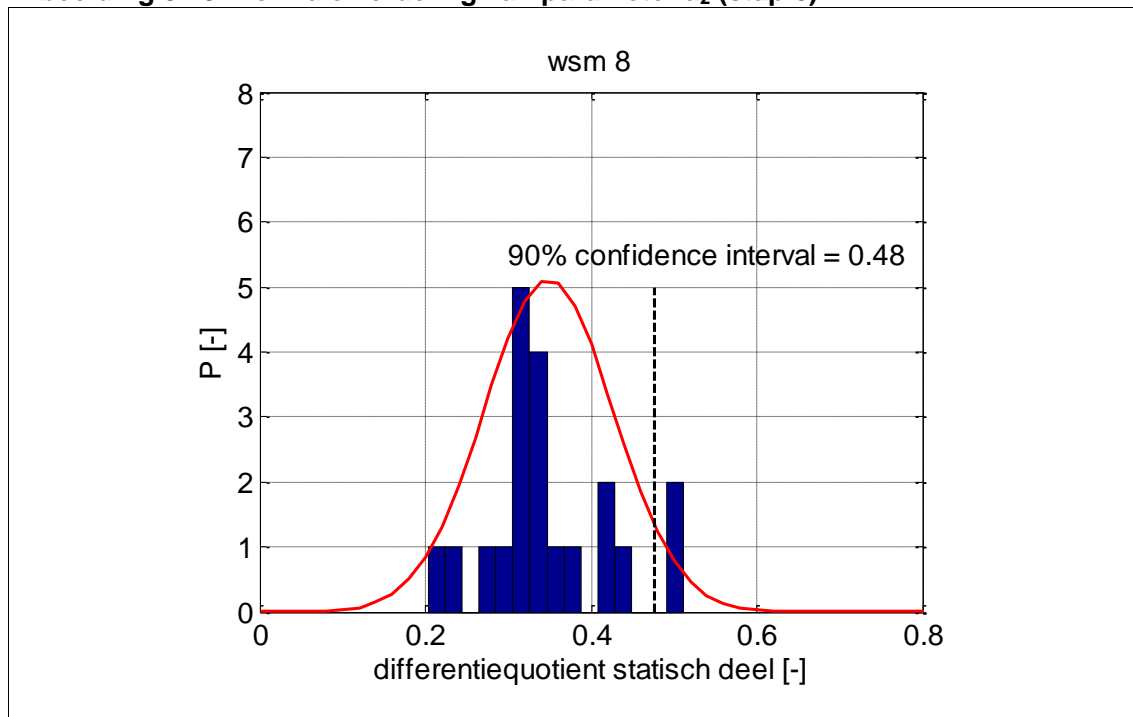
Voor het extrapoleren naar ontwerpomstandigheden zijn de individuele bijdragen van de quasi-statische en dynamische component van de buitenwaterstand van belang.

$$\phi = a_2 H_{stat} + b_2 + a_1 H_{dyn} + b_1$$

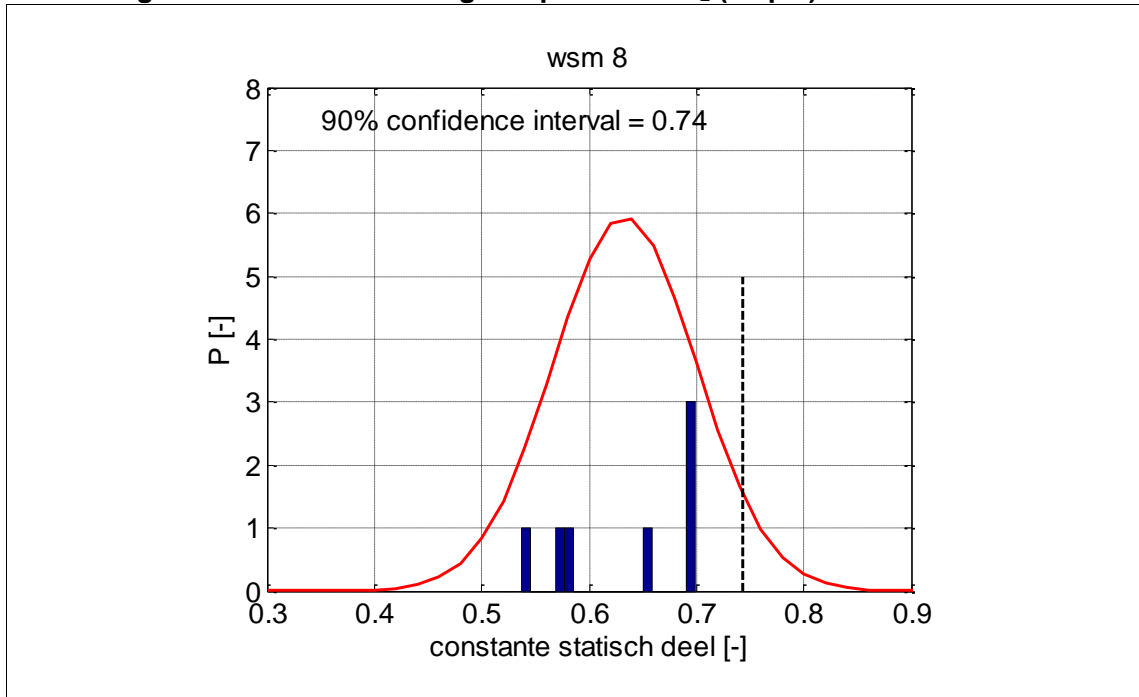
De bijdrage van het dynamische deel van de ontwerpwaterstand is gelijk aan het getij conform het aangenomen waterstandverloop in hoofdstuk 3 ($H_{dyn} = 1,15$ m). De bijdrage van het quasi-statische deel $H_{stat} = \text{NAP} + 5,00$ m - $1,15$ m - $\text{NAP} + 0,03$ m = $3,82$ m. Deze waarden zijn verder gehanteerd voor het extrapoleren naar ontwerpomstandigheden.

Naast bovenstaande afleiding is tevens een lineaire trendanalyse toegepast op alle data, zoals toegepast in de toetsing door Waterschap Scheldestromen (methode Scheldestromen Origineel). Daarin wordt de statische respons gehanteerd welke is verkregen door middelen over 45 uur. Nu worden de waarden voor a_1 , a_2 , b_1 en b_2 verkregen door een lineaire trendanalyse toe te passen op alle waarden in het buitenwaterstand - responsmeting vlak.

Afbeelding 5.15. Normale verdeling van parameter a_2 (stap 6)



Afbeelding 5.16. Normale verdeling van parameter b_2 (stap 6)



5.3.2. Methode specifieke uitgangspunten

Het toepassen van deze methode heeft de volgende beperkingen:

- het dient bekend te zijn of de deklaag gedurende de meetperiode is opgebarsten/opgedreven om ontspanning ten gevolge van uitstroom in het achterland te kunnen uitsluiten. Voor deze locatie is ervan uitgegaan dat er geen sprake is van opbarsten;
- buitenwater dient gedurende de meetperiode frequent aan de teen van de dijk te staan. Voor de meetlocatie is dat gedurende elke getijcyclus het geval. De situaties waarbij de buitenwaterstand lager is dan de meting zijn niet van invloed op het resultaat;
- deze methode bedient alleen individuele meetreeksen. Een direct begrip van het systeem wordt verkregen na verdere interpretatie;
- net als bij de andere methoden wordt de invloed van het bereiken van de grenspotentiaal en het opbarsten van de slootbodembodem onvoldoende tot niet meegenomen in de schematisering van het verloop tijdens ontwerpomstandigheden.

5.3.3. Resultaten en discussie

De resultaten van de analyse volgens de methode Scheldestromen voor alle waterspanningsmeters zijn weergegeven in Tabel 5.3 (Origineel) en Tabel 5.4 (Statistisch). Het verloop van de stijghoogte onder maatgevende omstandigheden is voor beide methoden weergegeven in Afbeelding 5.17. Met de methode Scheldestromen is geen faseverschuiving bepaald voor de peilbuizen. Dit komt door de lagere meetfrequentie (1 uur).

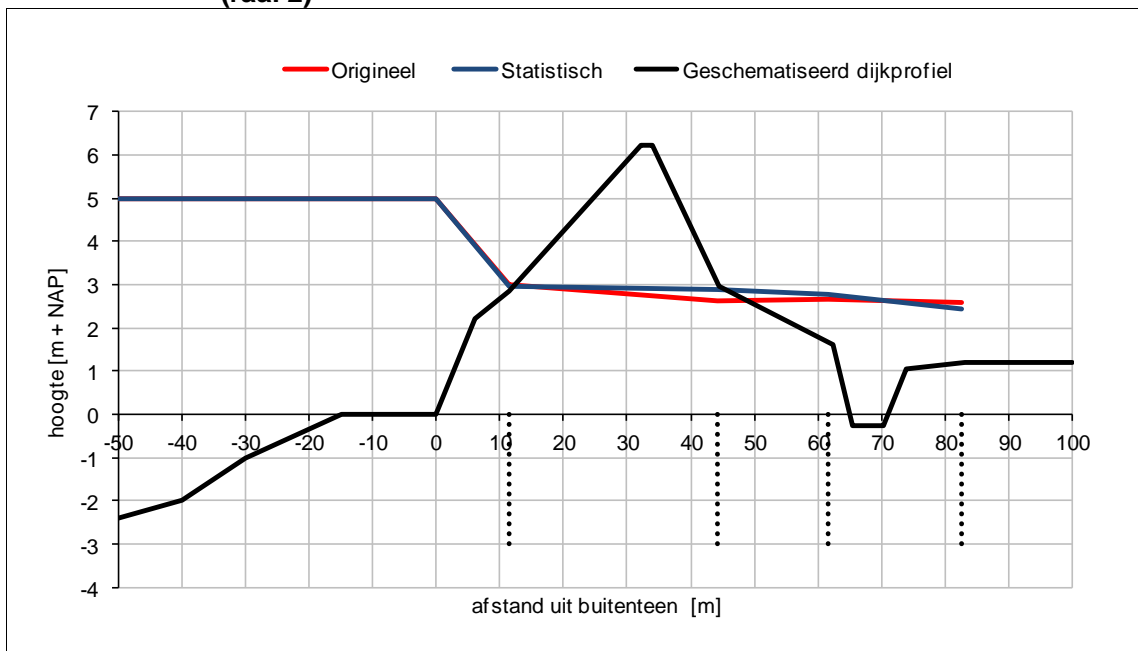
Tabel 5.3. Resultaten methode Scheldestromen (origineel)

meting	optimale verschuiving [min]	a ₁ (dynamisch)	b ₁ (dynamisch)	a ₂ (statisch)	b ₂ (statisch)	stijghoogte onder MHW-omstandigheden [m+NAP]
WSM01	40	0,260	-0,034	0,429	0,723	2,63
WSM02	30	0,310	-0,039	0,451	0,648	2,69
WSM03	20	0,344	-0,028	0,328	0,627	2,25
WSM04	10	0,448	-0,047	0,521	0,509	2,97
WSM05	40	0,246	-0,039	0,424	0,735	2,60
WSM06	30	0,287	-0,046	0,436	0,719	2,67
WSM07	20	0,335	-0,057	0,442	0,609	2,63
WSM08	10	0,392	-0,066	0,502	0,695	3,00
WSM09	40	0,228	-0,045	0,405	0,669	2,43
WSM10	40	0,254	-0,049	0,411	0,631	2,44
WSM11	30	0,293	-0,046	0,450	0,786	2,80
WSM12	10	0,328	-0,040	0,583	0,689	3,25
PB01	-	0,373	-0,055	0,487	0,614	2,85
PB02	-	0,351	-0,066	0,473	0,671	2,82
PB03	-	0,298	-0,066	0,429	0,667	2,58

Tabel 5.4. Resultaten methode Scheldestromen (statistisch)

meting	optimale verschuiving [min]	a ₁ (dynamisch)	b ₁ (dynamisch)	a ₂ (statisch)	b ₂ (statisch)	stijghoogte onder MHW-omstandigheden [m+NAP]
WSM01	40	0,252	-0,031	0,47	0,70	2,75
WSM02	30	0,303	-0,036	0,48	0,75	2,90
WSM03	20	0,348	-0,032	0,54	0,67	3,10
WSM04	10	0,447	-0,047	0,53	0,69	3,18
WSM05	40	0,237	-0,035	0,39	0,70	2,43
WSM06	30	0,279	-0,041	0,47	0,70	2,78
WSM07	20	0,322	-0,047	0,47	0,75	2,87
WSM08	10	0,383	-0,059	0,48	0,74	2,96
WSM09	40	0,215	-0,036	0,46	0,76	2,73
WSM10	40	0,241	-0,040	0,47	0,74	2,77
WSM11	30	0,278	-0,040	0,41	0,71	2,56
WSM12	10	0,328	-0,042	0,44	0,75	2,77
PB01	-	0,365	-0,049	0,47	0,72	2,89
PB02	-	0,337	-0,056	0,43	0,75	2,72
PB03	-	0,280	-0,053	0,46	0,76	2,79

Afbeelding 5.17 Stijghoogteverloop watervoerend pakket methode Scheldestromen (raai 2)



Het stijghoogteverloop in het watervoerend pakket is voor beide methoden (statistisch en origineel) redelijk gelijk. Ook voor de waarden van a_1 , a_2 , b_1 en b_2 komen veelal overeen. Dit geldt echter niet voor alle metingen. WSM01 is een voorbeeld waarbij de a_2 groter is bij de methode Scheldestromen Statistisch. Een verklaring hiervoor ligt in het meenemen van de spreiding in de statische stijghoogtesnelheid in de methode Scheldestromen Statistisch. Daarnaast wordt in de methode Scheldestromen Origineel de stijghoogtesnelheid ook beïnvloed door de daling van de stijghoogte. Door getij asymmetrie stijgt het buitenwater sneller dan dat het daalt, en dus duurt het langer voordat de stijghoogte afneemt. Het meenemen van de daalsnelheid, zoals in de methode Scheldestromen Origineel, heeft geen volledig correcte fysische onderbouwing.

Demping, vertraging en stroming

De resultaten laten zien dat de dynamische respons afneemt naarmate de waterspanningsmeter meer landinwaarts ligt. Dit komt overeen met de verwachting: de amplitude van de getijgolf dempt uit in het achterland. Voor de peilbuismetingen is geen tijdsverschuiving meegenomen, omdat de meetfrequentie te laag is (1 x per uur). Hierdoor is geen nauwkeurige verschuiving te bepalen. Voor alle drie de raaien komt de vertraging die optreedt richting het achterland ongeveer overeen. Dit impliceert dat er een uniforme stroomrichting aanwezig is in het watervoerende pakket (geen doorstroom uit zijrichtingen). De vertraging impliceert tevens dat er stroming optreedt; een afgesloten watervoerend pakket zou als een star systeem (zonder vertraging) reageren waardoor een verhoging van de buitenwaterstand direct merkbaar zou moeten zijn in de waterspanningsmetingen.

Slootpeil

Mogelijk is de methode voor Ameland minder betrouwbaar, omdat de waterstand in de teensloot niet 'meebeweegt' tijdens een storm. Als alleen het slootpeil opgezet wordt tot NAP +0,9 m tijdens ontwerpomstandigheden, dan is de extrapolatie op basis van de meetreeks minder betrouwbaar. Immers, de invloed van het hogere slootpeil op de respons van de waterspanningsmeters is niet bekend.

5.4. Methode 4: Frequentieanalyse

De methode frequentieanalyse heeft een aantal overeenkomsten met de methode Scheldestromen. Het scheiden van twee componenten en het verschuiven van de meetreeks in de tijd komt in beide methoden voor. De wijze waarop de componenten worden gescheiden en de meetreeks wordt verschoven, is echter anders. Deze methode maakt gebruik van het frequentiedomein en kruiscorrelaties. Het stappenplan horende bij deze methode is weer gegeven in Afbeelding 5.22.

5.4.1. Beschrijving methode

Op basis van alle meetreeksen van de peilbuis- en waterspanningsmeters en de buitenwaterstand is geanalyseerd wat de invloed is van het dubbeldaags getij, en wat de invloed is van overige factoren. Aangenomen is dat de waterstanden worden veroorzaakt door de volgende twee componenten: de dubbeldaagse getijdebeweging en de overige bewegingen. Deze overige bewegingen worden bijvoorbeeld veroorzaakt door windvelden, springen doodtij, neerslag en seizoenen.

Omdat is aangenomen dat zowel de buitenwaterstand (BWS) en de meetreeksen van de waterspanningsmeters en peilbuizen (WSM) op te splitsen zijn in de twee componenten, kunnen de waterstanden als volgt worden beschreven:

$$\begin{aligned} WSM &= WSM_{dyn} + WSM_{stat} \\ BWS &= BWS_{dyn} + BWS_{stat} \end{aligned}$$

De invloed van het dubbeldaags getij is duidelijk periodiek, en kan gezien worden als een harmonische component, het dynamische gedeelte. Daarom is gekozen om deze componenten te scheiden van het quasi-statische deel door middel van een butterworth-filter [ref. 13]. Om deze decompositie te illustreren zijn in Afbeelding 5.18 en afbeelding 5.19 grafieken weergegeven van de meetreeks WSM08. De grafieken beslaan de periode van 2 oktober tot 2 november. Alle meetreeksen, ook de buitenwaterstand, worden op deze manier opgesplitst.

De tijdsverschuiving tussen de meetreeks en de buitenwaterstand wordt met behulp van kruiscorrelatie bepaald. De meetreeks wordt net zo lang verschoven totdat deze kruiscorrelatie maximaal is. Deze verschuiving wordt aangenomen als tijdsverschil.

Vervolgens wordt voor iedere meetreeks het dynamische deel uitgezet tegen het dynamische deel van de buitenwaterstand. (in afbeelding 5.20: rood). Het tijdsverschil wordt gebruikt om het faseverschil te verwijderen (in afbeelding 5.20: paars). Dit tijdsverschil wordt ook gebruikt om het faseverschil van het quasi-statische gedeelte te verwijderen (afbeelding 5.21: licht groen: origineel, donker groen: optimaal verschoven).

Door middel van een lineaire fit worden zowel de quasi-statische respons als de dynamische respons bepaald. Hiermee zijn de volgende vergelijkingen af te leiden:

$$\begin{aligned} WSM_{dyn} &= a_1 BWS_{dyn} + b_1 \\ WSM_{stat} &= a_2 BWS_{stat} + b_2 \end{aligned}$$

De constante term van de dynamische term (b_1) is altijd nagenoeg nul, omdat er sprake is van een harmonische reeks. De term kan daarom verwaarloosd worden. De waterstand kan nu op een meetlocatie worden benaderd, door bovenstaande functies te combineren.

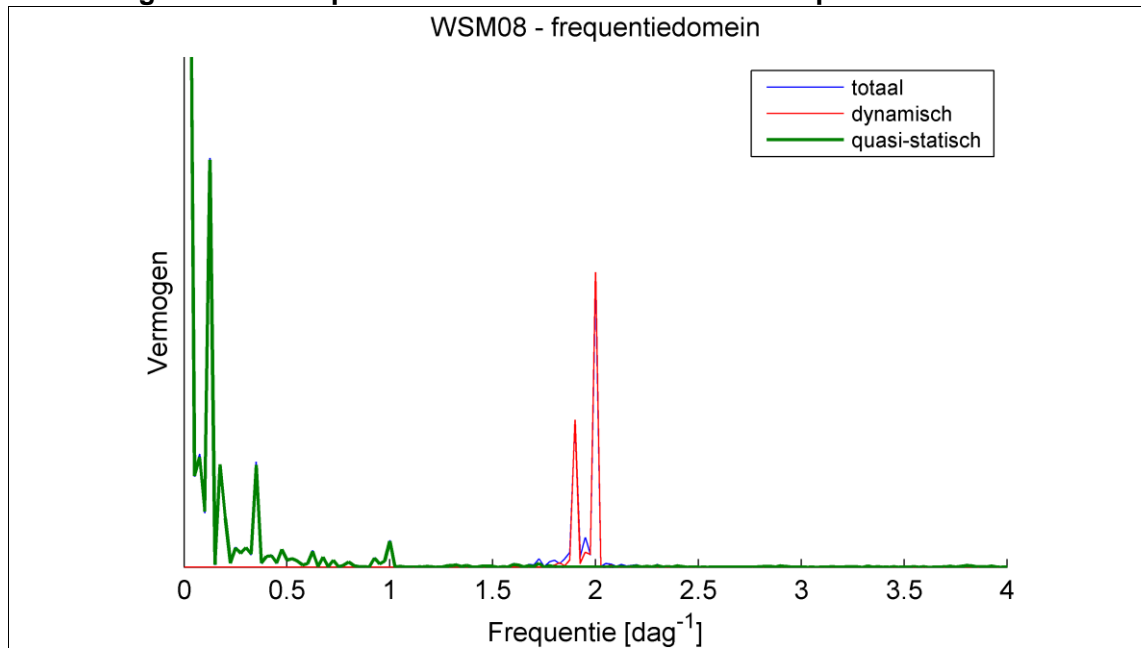
$$WSM = WSM_{stat} + WSM_{dyn} = a_1 BWS_{dyn} + a_2 BWS_{stat} + b_2$$

De coëfficiënten a_1 , a_2 en b_2 zijn meetlocatie afhankelijk.

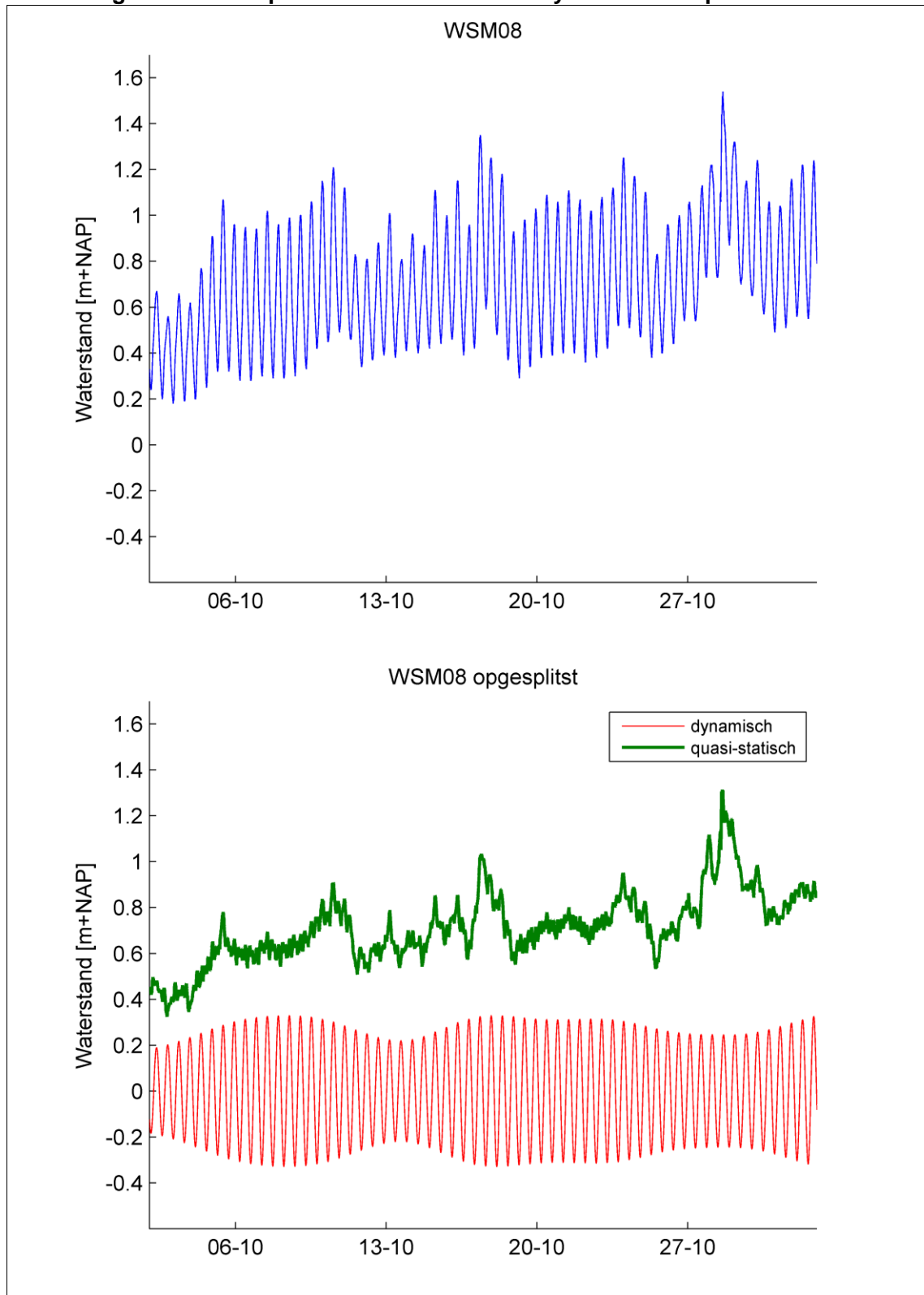
De maximale buitenwaterstand waartegen de dijk weerstand moet kunnen bieden (de ontwerpwaterstand) is gegeven. Als deze waterstand wordt gerealiseerd, dan wordt ook deze waterstand bepaald door een dynamische component en een statische component. We nemen aan dat de statische component op dat moment maximaal is en dat de dynamische component op dat moment op de top is van gemiddeld hoogwater:

$$BWS^{max} = BWS_{dyn}^{max} + BWS_{stat}^{max}$$

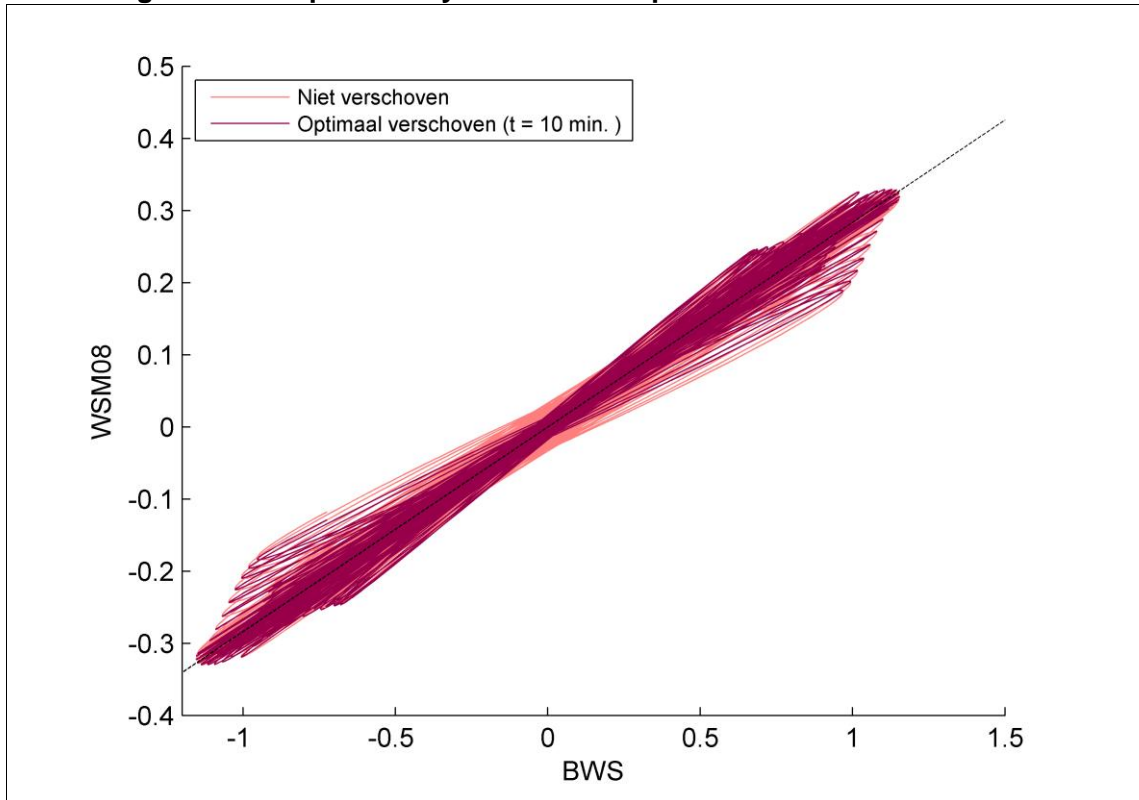
Afbeelding 5.18. Decompositie van een meetreeks in het frequentiedomein



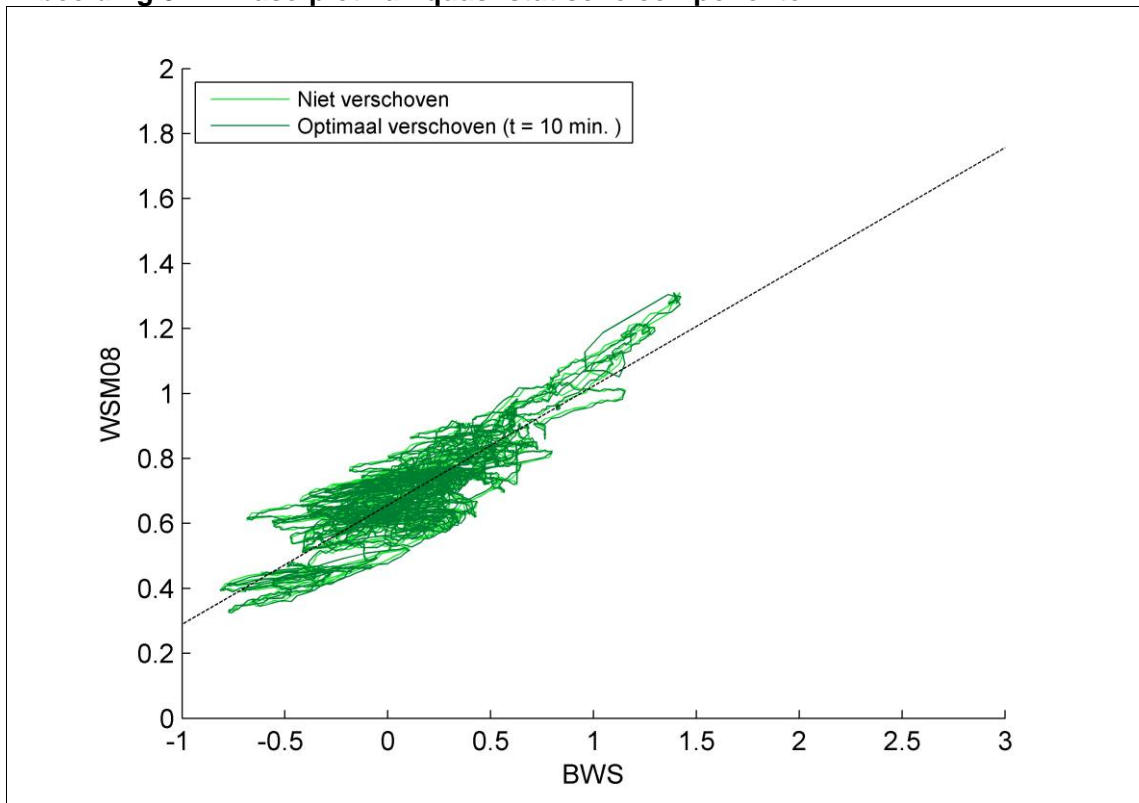
Afbeelding 5.19. Decompositie van meetreeks in dynamisch en quasistatisch deel



Afbeelding 5.20. Fase-plot van dynamische componenten



Afbeelding 5.21. Fase-plot van quasi-statische componenten



In dit project is er sprake van een ontwerpwaterstand van NAP +5,00 m, een gemiddelde getijde amplitude van 1,15 m en een gemiddelde waterstand van NAP +0,03 m. De maximale statische component van het buitenwater wordt dus bepaald door:

$$BWS_{dyn}^{max} = 1,15$$

$$BWS_{stat}^{max} = 5,00 - 1,15 - 0,03 = 3,82$$

Ter illustratie zijn de coëfficiënten a_1 , a_2 en b_2 gegeven voor meetreeks WSM08.

Tabel 5.5. Coëfficiënten van meetreeks WSM08

Meetreeks	a1 (dynamische comp.)	a2 (statische comp.)	b2 (constante)
WSM08	0,29	0,37	0,70

De maximale waterstand op meetlocatie WSM08 is met de gegeven componenten van de buitenwaterstand te schrijven als volgt:

$$WSM^{max} = a_1 BWS_{dyn}^{max} + a_2 BWS_{stat}^{max} + b_2$$

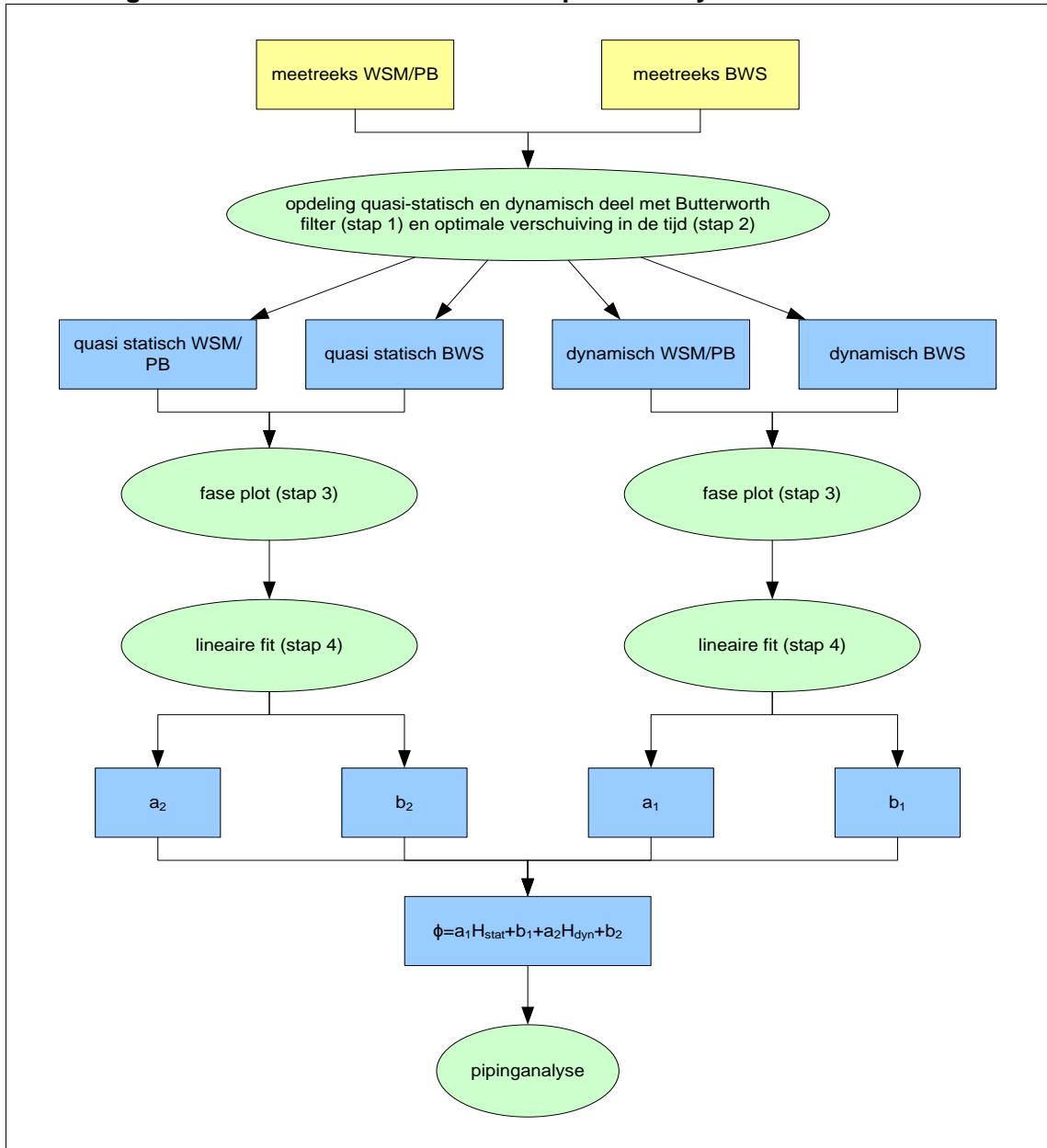
$$WSM08^{max} = 0,29 \cdot 1,15 + 0,37 \cdot 3,82 + 0,70 = 2,45$$

Stappenplan

De procedure is in de onderstaande opsomming kort weergegeven. In Afbeelding 5.22 is een stroomschema weergegeven:

1. (indien nodig) tijdreeks equidistant maken door middel van interpolatie;
2. scheiding tussen dynamische component en quasi-statische component door middel van butterworth filters;
3. kruiscorrelatie tussen de tijdreeks van de buitenwaterstand en de meetreeks, om tijdsverschil te bepalen;
4. meetreeks verschuiven met behulp van stap 3, daarmee het tijdsverschil annihileren;
5. lineaire fit op de optimaal verschoven tijdslijnen van zowel de statische als de dynamische component. Daaruit de coëfficiënten a_1 , a_2 en b_2 extraheren;
6. bepalen van de statische component van de maximale waterstand met behulp van de ontwerpwaterstand en de gemiddelde getijde-amplitude;
7. bepalen van de maximale waterstand op een meetlocatie met behulp van stappen 5 en 6;
8. maximale waterstanden van de meetlocaties uitzetten tegenover de afstand van de meetlocatie tot het buitenwater.

Afbeelding 5.22 Stroomschema methode Frequentieanalyse



5.4.2. Methode specifieke uitgangspunten

Het dubbeldaagse getij heeft een frequentie van $1/745 \text{ min}^{-1}$. Dit getij is de dynamische component van de waterstand. Om deze component te kunnen filteren is het butterworth-filter geconfigureerd als een doorlaatfilter met frequenties van $1/810 \text{ min}^{-1}$ tot $1/690 \text{ min}^{-1}$. Op deze manier blijft na filteren van de meetreeks slechts de dynamische component over. De quasi-statische component is berekend door een butterworth-filter te configureren als stopfilter, met dezelfde frequenties.

Het butterworth-filter heeft een opstartperiode van ongeveer 4 dagen waarin het meetsignaal niet goed wordt gefilterd. Meetdata tussen 5 september 2013 en 27 december 2013 zijn correct gefilterd. Dit zegt niets over de datakwaliteit van de tijdreeks.

5.4.3. Resultaten en discussie

De hierboven beschreven methode is toegepast op de geselecteerde dataset van 2013-II, en daarvan alle waterspanning- en peilbuismeetreeksen. Omdat een goede frequentieanalyse alleen plaats kan vinden bij meetreeksen die netjes in de pas lopen, is er gekozen om de langst aaneengesloten periode te gebruiken met geselecteerde data. De gebruikte periode voor de berekeningen loopt van 1 oktober tot 5 december 2013. Uitzonderingen zijn WSM03 (29 oktober tot 19 november), WSM11 en WSM12 (24 december 2013 tot 1 januari 2014). De decemberstorm is dus niet meegenomen in de analyse.

In bijlage IV zijn de afbeeldingen opgenomen van de faseverschillen van de meetreeksen met de buitenwaterstand. De tijdsverschuivingen die zijn gedaan met behulp van de kruiscorrelaties zijn genoemd in Tabel 5.6. Voor waterspanningsmeter WSM11 en PB03 komen de berekende tijdsverschillen niet overeen. Dit komt door het verschil in de meetfrequentie van reeksen: PB03 meet eens per uur, buitenwaterstand eens per 10 minuten en WSM11 eens per 5 minuten. De tijdsverschillen zijn bepaald door de meetreeksen te interpoleren op het tijdsgrid van de buitenwaterstand, en daar kan een kleine afwijking ontstaan. Alle tijden laten wel een logisch tijdsverschil zien met betrekking tot de afstand tot het buitenwater.

Tabel 5.6. Berekende tijdsverschillen tussen de buitenwaterstand en de meetreeksen

meetreeks	Tijdsverschil [min.]
WSM01	40
WSM02	30
WSM03	20
WSM04	10
WSM05B	40
WSM06	30
WSM07	20
WSM08	10
WSM09	40
WSM10	40
WSM11	30
WSM12	10
PB01	20
PB02	20
PB03	20

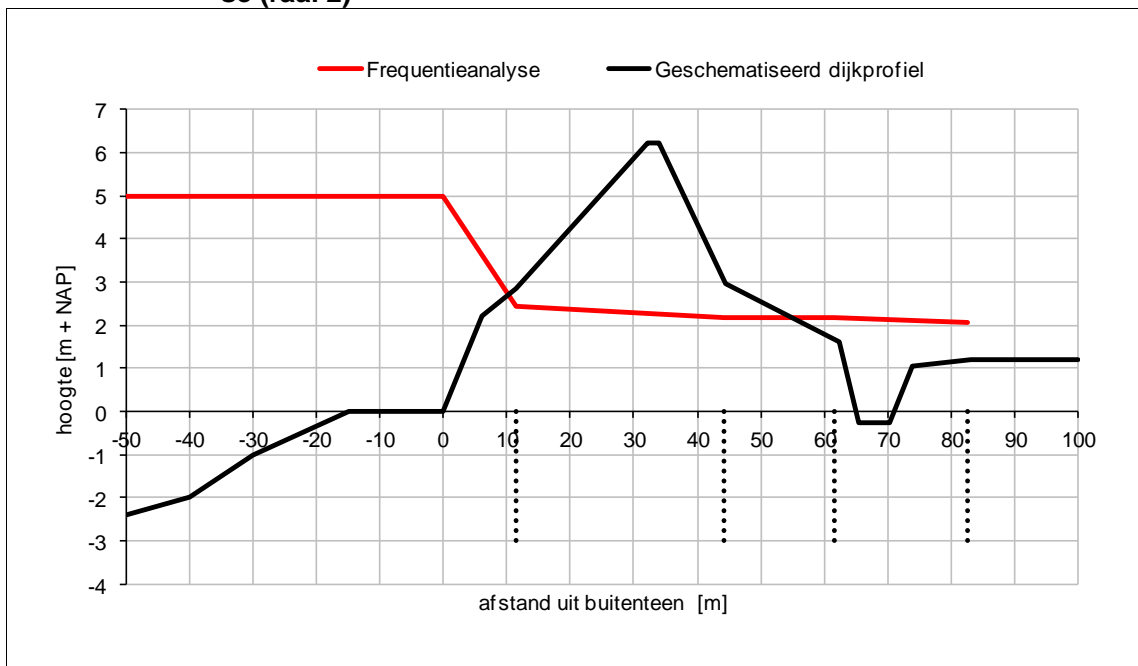
Deze tijdsverschillen worden gebruikt om de meetreeksen in tijd te verschuiven. Dit zorgt ervoor dat de extrema van de getijdebeweging in de buitenwaterstand samenvallen met de extrema van de getijdebeweging in de meetreeksen.

In het ideale geval zal de fase-plot van de dynamische component na tijdsverschuiving een perfecte rechte lijn zijn met richtingscoëfficiënt a_1 . In het geval van deze meetreeksen is een lineaire fit gedaan op de verschoven tijdreeksen. Ook van de statische component is een lineaire fit berekend. De fit van de dynamische component resulteert in de coëfficiënt a_1 en de fit van de quasi-statische component levert de coëfficiënten a_2 en b_2 . Deze coëfficiënten zijn weergegeven in Tabel 5.7 en het verloop van de waterspanningen onder ontwerpomstandigheden in Afbeelding 5.23.

Tabel 5.7. Coëfficiënten van de meetreeksen en berekende stijghoogte bij MHW

meetreeks	a_1 (dynamisch comp.)	a_2 (statisch comp.)	b_2 (constante)	stijghoogte onder MHW-omstandigheden [m+NAP]
WSM1	0,20	0,31	0,73	2,14
WSM2	0,24	0,34	0,65	2,22
WSM3	0,28	0,31	0,64	2,15
WSM4	0,36	0,43	0,51	2,57
WSM5	0,18	0,29	0,74	2,05
WSM6	0,20	0,32	0,73	2,18
WSM7	0,24	0,34	0,61	2,18
WSM8	0,29	0,37	0,70	2,45
WSM9	0,15	0,28	0,68	1,92
WSM10	0,17	0,29	0,64	1,94
WSM11	0,19	0,24	0,84	1,98
WSM12	0,24	0,26	0,77	2,04
PB01	0,28	0,38	0,62	2,39
PB02	0,24	0,35	0,68	2,29
PB03	0,19	0,31	0,68	2,08

Afbeelding 5.23 Stijghoogteverloop watervoerend pakket methode Frequentieanalyse (raai 2)



In Tabel 5.7 is duidelijk te zien aan de coëfficiënten dat de meetpunten dicht bij het buitenwater meer worden beïnvloed door het buitenwater, door zowel de dynamische component als de quasi-statische component. De constante factor neemt af naarmate de afstand naar het buitenwater kleiner wordt. Alleen de constante factor van WSM08 is iets hoger dan verwacht. Dit komt omdat deze meetreeks minder ver uitzakt bij laagtij in vergelijking met de andere waterspanningsmeters dicht bij het buitenwater. De coëfficiënten van WSM11 en WSM12 zijn bepaald op basis van een korte meetperiode (1 week).

De berekende stijghoogte bij MHW bij de peilbuizen en de corresponderende waterspanningsmeters wijken af. Merk op dat de dynamische coëfficiënt overeenkomt, en dat het verschil wordt veroorzaakt door de statische coëfficiënten. Dit komt vanwege de verticale off-

set die beschreven is in hoofdstuk 4. Het effect van een verticale offset in de metingen van de waterspanningsmeters op het kwelweglengtetekort is ingeschat in paragraaf 6.1.4.

De statische coëfficiënten die bepaald zijn met behulp van de peilbuizen liggen meer in lijn met de coëfficiënten van de omliggende meetpunten, dan de corresponderende waterspanningsmeters.

Discussie

De hoogte van de quasi-statische component wordt veroorzaakt door verschillende factoren. In de bovenstaande methode wordt aangenomen dat al deze factoren identiek doorwerken in verhouding tot de buitenwaterstand. Dat is niet altijd reëel.

Het butterworth-filter extraheert het harmonische signaal van de meetreeks die veroorzaakt wordt door de dubbeldaagse getijbeweging. Als de totale meetreeks deze harmonische beweging bevat, maar aan de onderkant is afgeknot door invloed van het grondwater in de polder, dan is de extractie van de getijbeweging minder precies. De mate van precisie hangt af van hoeveel de harmonische beweging wordt afgeknot.

De quasi-statische component van de maximale waterstand wordt nu bepaald door middel van het gemiddelde springtij. Als de ontwerpwaterstand wordt bereikt op het moment dat de dynamische component lager is dan deze amplitude, dan is de statische component hoger. Omdat de coëfficiënten van de statische component (a_2) hoger zijn dan de coëfficiënten van de dynamische component (a_1), zal de binnenwaterstand hoger uitvallen dan de berekende waarden in Tabel 5.7.

In extreme omstandigheden wordt de verhouding tussen de buitenwaterstand en de meetreeksen wellicht niet meer goed door de lineaire benadering beschreven. Een extreme waarden analyse met daarbij langere en betrouwbare meetreeksen geven een beter beeld over het gedrag in extreme situaties. Omdat de data van de decemberstorm erg onbetrouwbaar is, is deze (extreme) gebeurtenis niet bruikbaar om deze methode te verifiëren. Frequentieanalyse is namelijk niet geschikt voor meetreeksen met gaten, haperingen en staptrends, omdat daarmee de hele periodiciteit van de meetreeks verdwijnt.

De puntenwolk in de fase-plot van de quasi-statische component is breed. De onzekerheid van deze punten is van dezelfde orde grootte als de dynamische component. Om de quasi-statische component vlakker te maken, kan er gezocht worden naar meerdere verklarende variabelen.

5.5. Methode 5: PlaxFlow

5.5.1. Beschrijving methode

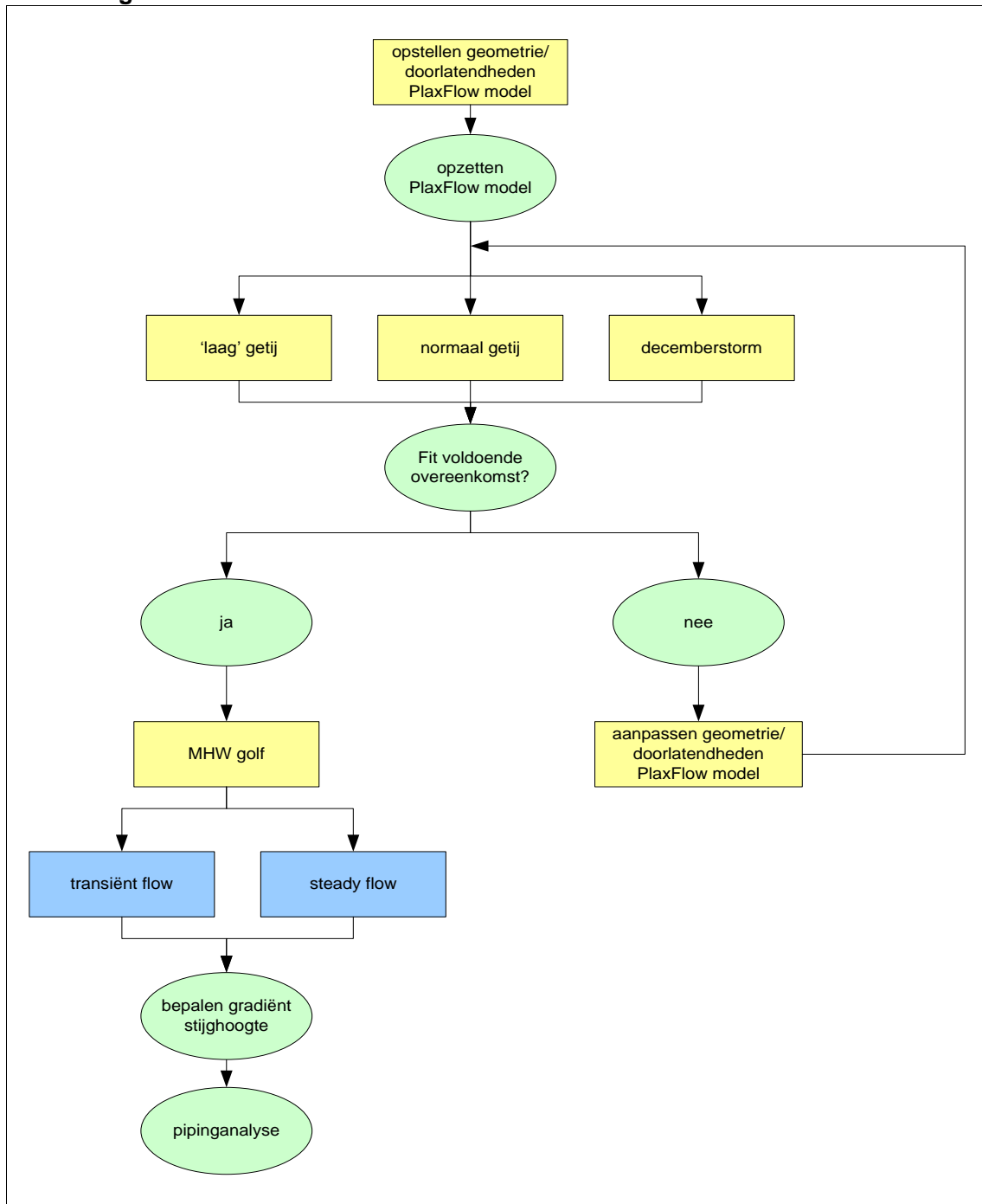
Met behulp van PlaxFlow (versie 2012 build 7267) kunnen stationaire en tijdsafhankelijke grondwaterstromingsberekeningen gemaakt worden op basis van de eindige elementen methode (EEM). Door het opleggen van hydraulische randvoorwaarden en grondeigenschappen berekent het model de grondwaterstroming. De buitenwaterstand kan met maximaal 100 tijdsintervallen beschreven worden. De bijbehorende stijghoogte kan voor verschillende locaties uitgelezen worden.

Het doel is om inzicht te krijgen in het stijghoogteverloop tijdens maatgevende omstandigheden, en wat de invloed is van tijdsafhankelijk rekenen ten opzichte van stationair. Hiertoe dient eerst een model opgezet te worden, welke wordt gevalideerd door de berekende waterspanningen/stijghoogten te fitten met veldmetingen. Dit is gedaan voor de volgende drie situaties:

- laag getij (29 september 2013 0:00 - 2 oktober 2013 4:00);
- gemiddeld getij (3 november 2013 0:00 - 7 november 2013 4:00);
- decemberstorm (4 december 2013 0:00 - 8 december 2013 4:00).

Wanneer de berekende en gemeten waarden voldoende overeenkomen (criterium 'voldoende' op basis van expert judgement), wordt de stijghoogte berekend bij maatgevende omstandigheden, zowel stationair als tijdsafhankelijk. Voor beide stijghoogteverlopen wordt de gradiënt van de stijghoogte bepaald. Dit is vervolgens input voor de pipinganalyse. Het stroomschema dat doorlopen is bij deze methode, is weergegeven in Afbeelding 5.24. De gecorrigeerde dataset is gebruikt bij deze methode.

Afbeelding 5.24 Stroomschema methode PlaxFlow



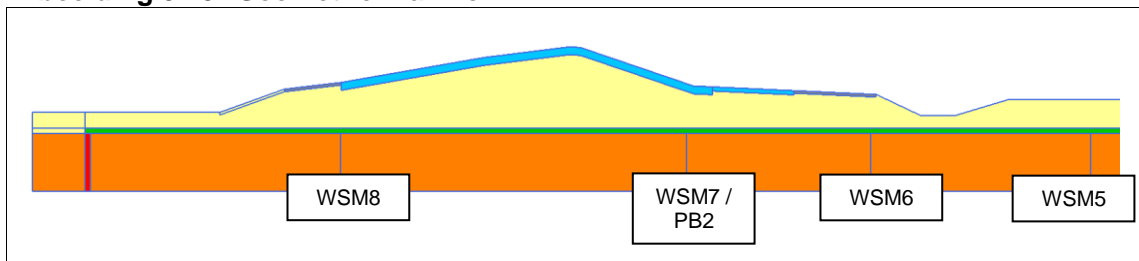
5.5.2. Methode specifieke uitgangspunten

De modellering is gedaan op basis van raai 2, omdat deze het meest betrouwbaar is. De uitgangspunten voor het PlaxFlow-model zijn een resultaat van de fit met de gemeten waterspanningen. De geometrie en parameters, welke de beste fit geven, zijn weergegeven in afbeelding 5.25 en tabel 5.8. Enkele aannamen (zie ook paragraaf 5.5.3 voor onderbouwing):

- circa 13 m voor de buitenteen van de dijk is een waterremmende laag in het eerste wattervoerend pakket aanwezig. Dit representeert een sliblaag die waarschijnlijk aanwezig

- is ter plaatse van de geul. Op het voorland is aan het oppervlak tevens een slecht doorlatende toplaag aanwezig;
- er is een slecht doorlatende kleilaag tussen ongeveer NAP -1,5 m en NAP -2,0 m aanwezig over de gehele lengte van het model;
 - polderpeil is op NAP +1,2 m gezet, dit gaf de beste fit. In het achterland van de beschouwde dijksectie zijn meerdere peilgebieden, zoals weergegeven in Afbeelding 3.2. Het gele gebied (zuidelijk, dat grenst aan het meetvak) heeft een polderpeil van NAP +0,85 m in de winter en NAP +1,10 m in de zomer. Het paarse gebied (noordelijk) heeft een polderpeil van NAP +1,27m in de winter en NAP + 1,58 in de zomer. Het is niet bekend of en hoe de verschillende polders geohydrologisch met elkaar verbonden zijn, ook is het polderpeil niet gemonitord en zijn variaties in plaats en tijd dus onbekend. Het gehanteerde polderpeil van NAP +1,2 m in het PlaxFlow model valt wel goed in de range van de peilen in het achterland en is daarom voldoende betrouwbaar geacht voor de berekeningen. Bovendien wordt de stijghoogte in het watervoerende pakket voornamelijk beïnvloed door het polderpeil in het achterland en niet door het slootpeil direct aan de binnenzijde van de dijk, vanwege de afsluitende kleilaag tussen NAP -1,5 m en NAP -2,0 m.

Afbeelding 5.25. Geometrie PlaxFlow



WSM = Waterspanningsmeter;
PB = Peilbuis.

Tabel 5.8. PlaxFlow parameters

grondsoort	kleur	flow data set	flow model	soil type	k_x [m/dag]	k_y [m/dag]
zand dijk	geel	Standard	Van Genuchten	Coarse	20,00	20,00
deklaag klei	blauw	Standard	Van Genuchten	Fine	0,05	0,05
asfalt	grijs	Non-porous	-	-	-	-
klei	groen	Standard	Van Genuchten	Fine	0,05	0,05
slib geul	rood	Standard	Van Genuchten	Fine	0,50	0,50
zand 1° wvp	oranje	Standard	Van Genuchten	Coarse	200,00	10,00*

* Deze laag betreft een Wadzandafzetting, wat gekenmerkt wordt door een gelaagde afzetting. Op advies van Deltares is uitgegaan dat de doorlatendheid in verticale richting (k_y) een factor 20 kleiner is dan de doorlatendheid in horizontale richting (k_x). Dit heeft overigens geen effect op de resultaten, aangezien er vrijwel uitsluitend horizontale grondstroming optreedt in deze laag.

5.5.3. Resultaten en discussie

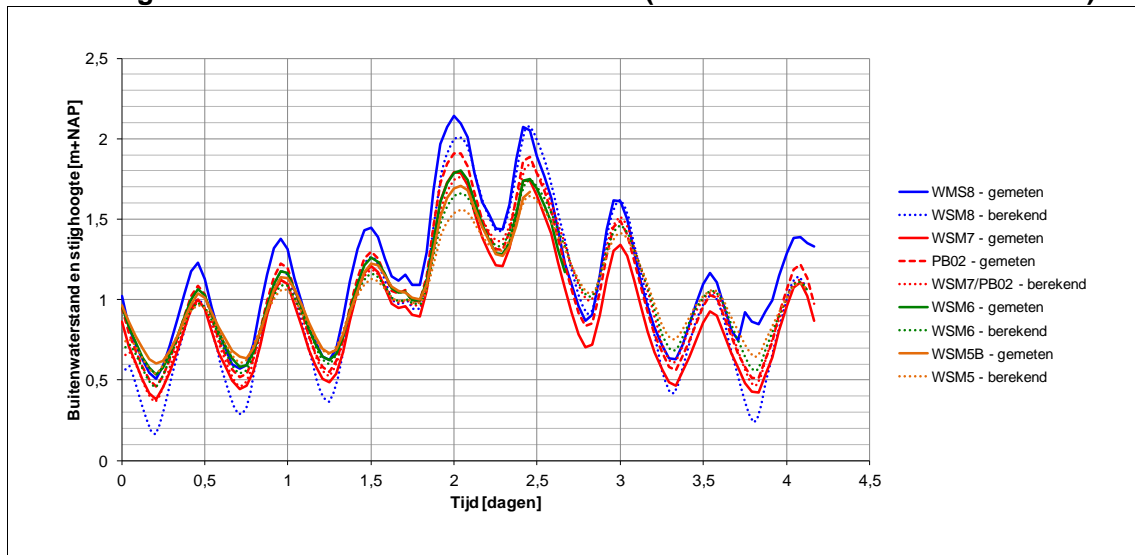
Fitten PlaxFlow model

Wat opvalt aan de gemeten stijghoogten, is dat de vier meetpunten van raai 2, vergeleken met de relatief grote amplitude van de buitenwaterstand en het relatief constante slootpeil, globaal gezien dezelfde amplitude en gemiddeld stijghoogteverloop hebben. Dit betekent dat er relatief weinig demping van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket tussen de vier meetpunten zit, vergeleken met de hydraulische randvoorwaarden (buitenwaterstand en slootpeil). Om dit ook uit het PlaxFlow model te krijgen, zijn een aantal model-eigenschappen benodigd:

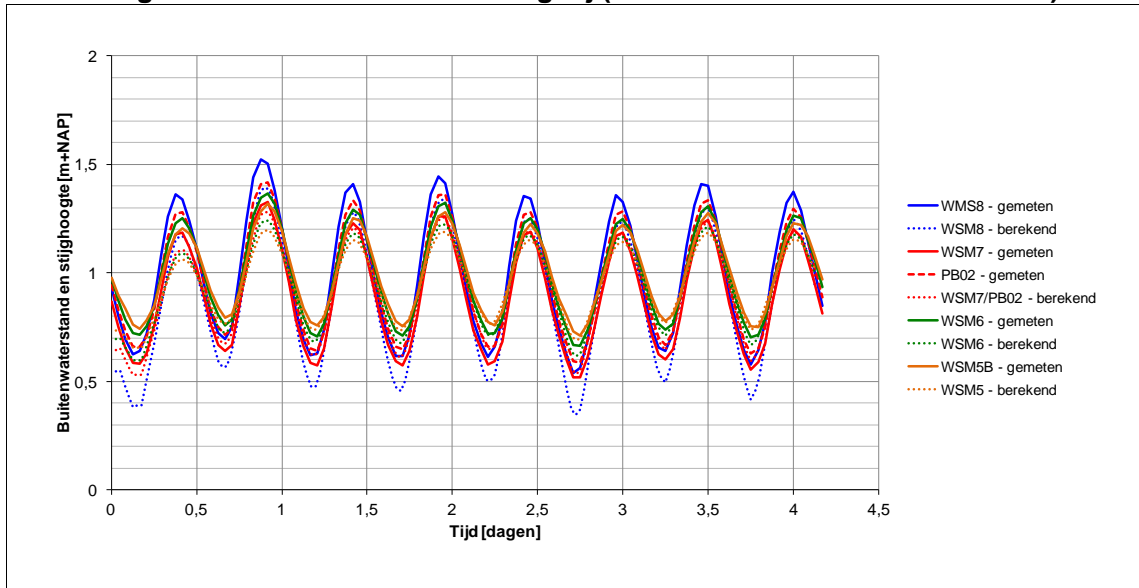
- een grote doorlatendheid van het zand in het watervoerende pakket (gefit op 200 m/dag). Zoals besproken tijdens de workshop in mei 2014, is deze grote doorlatendheid niet waarschijnlijk. Een drukgolf in plaats van grondwaterstroming is een logischere verklaring. Deze kan echter niet met PlaxFlow gemodelleerd worden, daarom is de drukgolf 'gemodelleerd' door toepassing van een grote doorlatendheid;
- een slecht doorlatende kleilaag over de gehele breedte van het model, omdat anders de waterspanningsmeter in het achterland het slootpeil/polderpeil zal aannemen, terwijl ter plaatse van het achterland nog wel een getijbeweging aanwezig is. Een gevoeligheidsanalyse hiervan is opgenomen in bijlage V;
- een sliblaag ter plaatse van de geul. Deze laag met lage doorlatendheid zorgt voor een verval van de stijghoogte en daarmee een demping van de amplitude van de stijghoogte ten opzichte van de buitenwaterstand. Een gevoeligheidsanalyse hiervan is opgenomen in bijlage V;
- om de juiste amplitude en gemiddeld stijghoogteverloop uit PlaxFlow te krijgen, is een polderpeil in het achterland van NAP +1,2 m benodigd. Een gevoeligheidsanalyse hiervan is opgenomen in bijlage V.

De resultaten van de fits van de drie gemodelleerde situaties zijn weergegeven in afbeelding 5.26, afbeelding 5.27 en afbeelding 5.28.

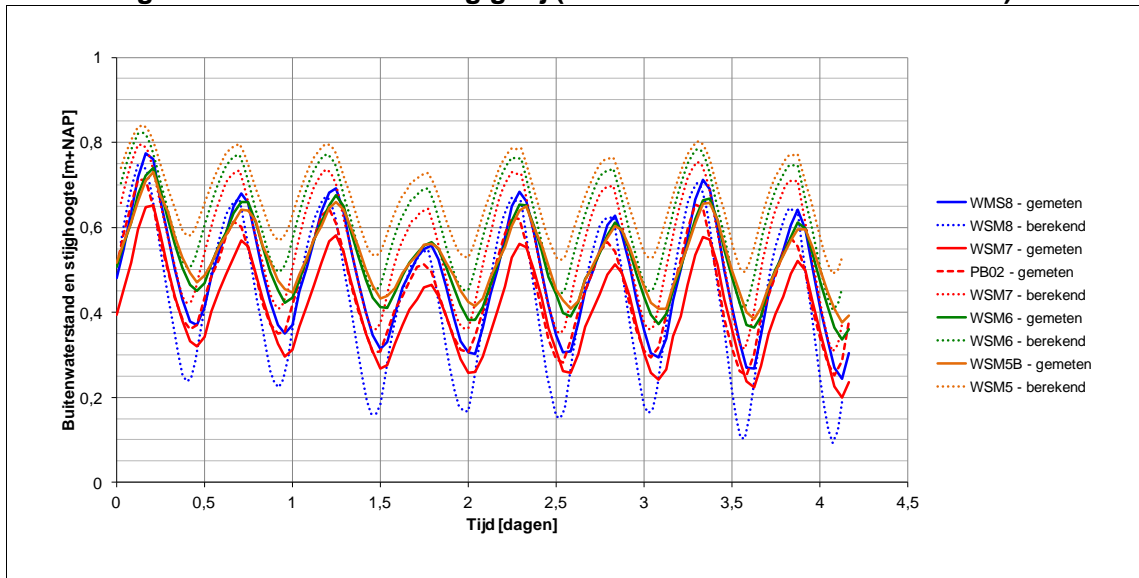
Afbeelding 5.26. PlaxFlow fit – Decemberstorm (04/12/2013 0:00 - 08/12/2013 4:00)



Afbeelding 5.27. PlaxFlow fit - Normaal getij (03-11-2013 0:00 - 07-11-2013 4:00)



Afbeelding 5.28. PlaxFlow fit - Laag getij (29-09-2013 0:00 - 02-10-2013 4:00)

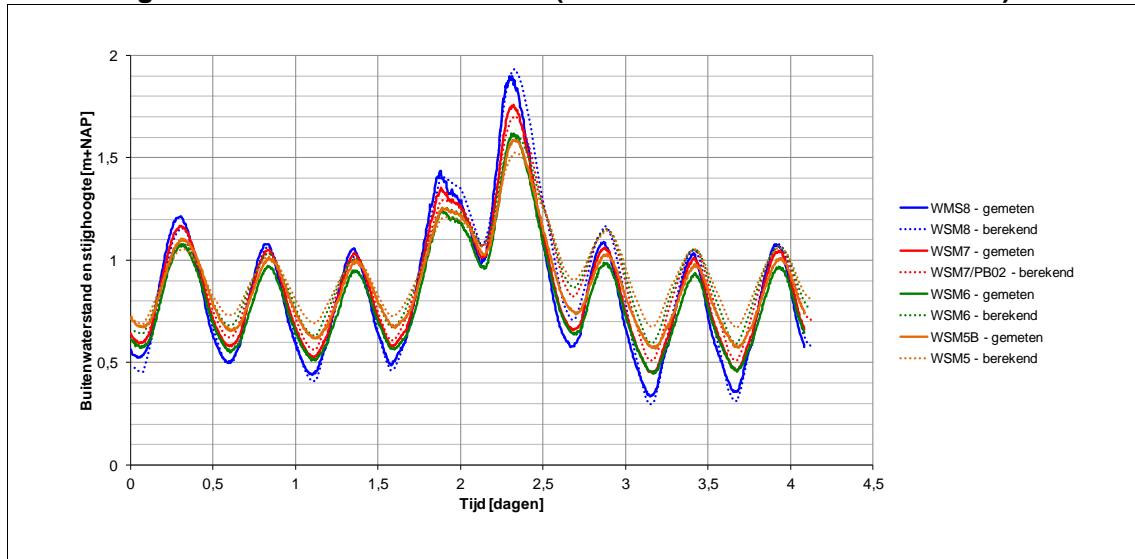


Validatie oktoberstorm 2014

De storm in de tweede helft van oktober 2014 is gebruikt om het PlaxFlow model te valideren. Alle uitgangspunten van het model zijn ongewijzigd gebleven, alleen de buitenwaterstand is als gewijzigde randvoorwaarde opgelegd.

De berekende waarden zijn samen met de gemeten waarden gepresenteerd in Afbeelding 5.29. De resultaten uit PlaxFlow komen goed overeen met de gemeten waarden. De gehanteerde uitgangspunten en modellering met PlaxFlow worden daarom voldoende betrouwbaar geacht.

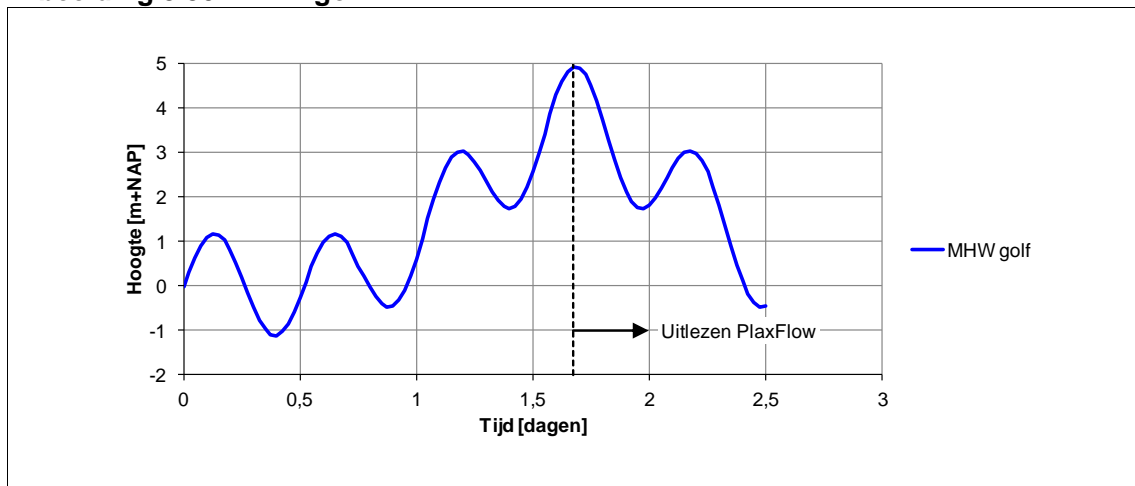
Afbeelding 5.29. PlaxFlow oktoberstorm (20-10-2014 0:00 - 24-10-2014 4:00)



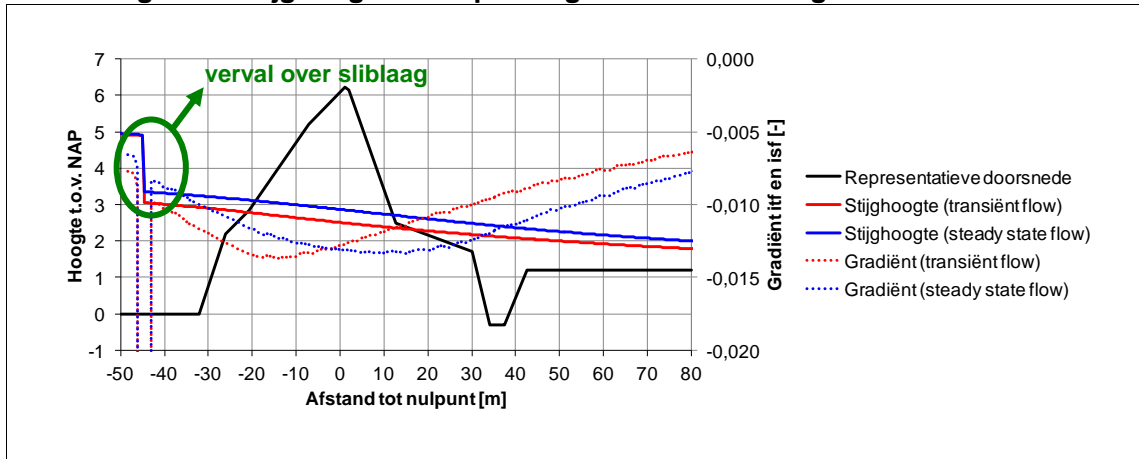
MHW golf in het model waar de geometrie en doorlatendheden mee gefit zijn, is een MHW golf, zoals weergegeven in afbeelding 5.30, berekend. Op het hoogste punt (NAP +5,00 m) is de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket uitgelezen. Dit verloop is weergegeven in afbeelding 5.31. Vervolgens is een steady state flow berekening met buitenwaterstand op NAP +5,00 m uitgevoerd. Het stijghoogteverloop is ook weergegeven in afbeelding 5.31.

Voor beide stijghoogteverlopen is de gradiënt bepaald, welke zijn weergegeven in afbeelding 5.31 en afbeelding 5.32. Vanaf circa $x = -2$ m is de gradiënt van de tijdsafhankelijke berekening (i_{tf}) kleiner dan van de stationaire berekening (i_{sf}). Ter plaatse van de sloot is de ratio $F_i = i_{tf} / i_{sf}$ circa 0,80. Een lagere stijghoogtegradiënt zorgt voor een grotere veiligheid op het ontstaan van een pipe. Tijdsafhankelijk rekenen zorgt in dit geval dus voor een optimalisatie van het ontwerp op piping.

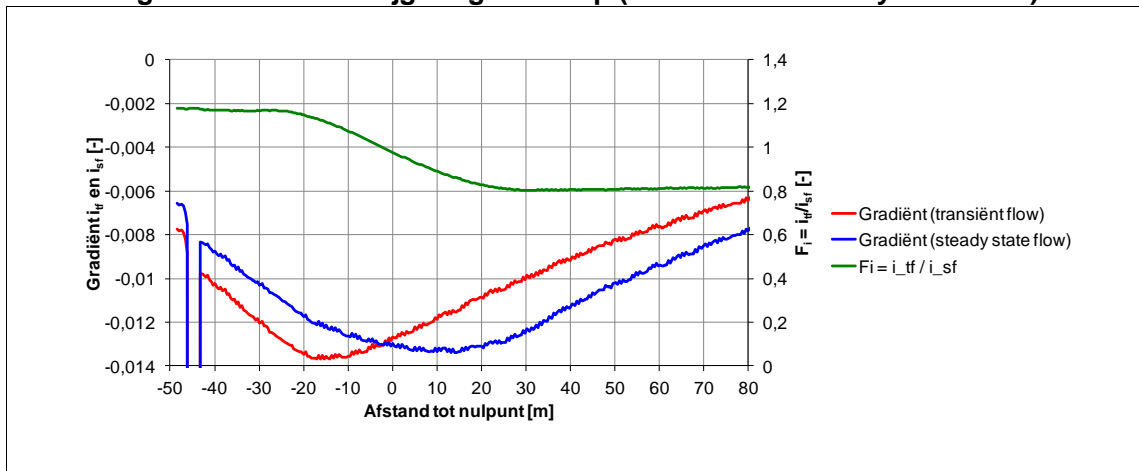
Afbeelding 5.30. MHW golf



Afbeelding 5.31. Stijghoogteverloop maatgevende omstandigheden



Afbeelding 5.32. Gradiënt stijghoogteverloop (transiënt- en steady state flow)



Discussie en suggesties ter verbetering

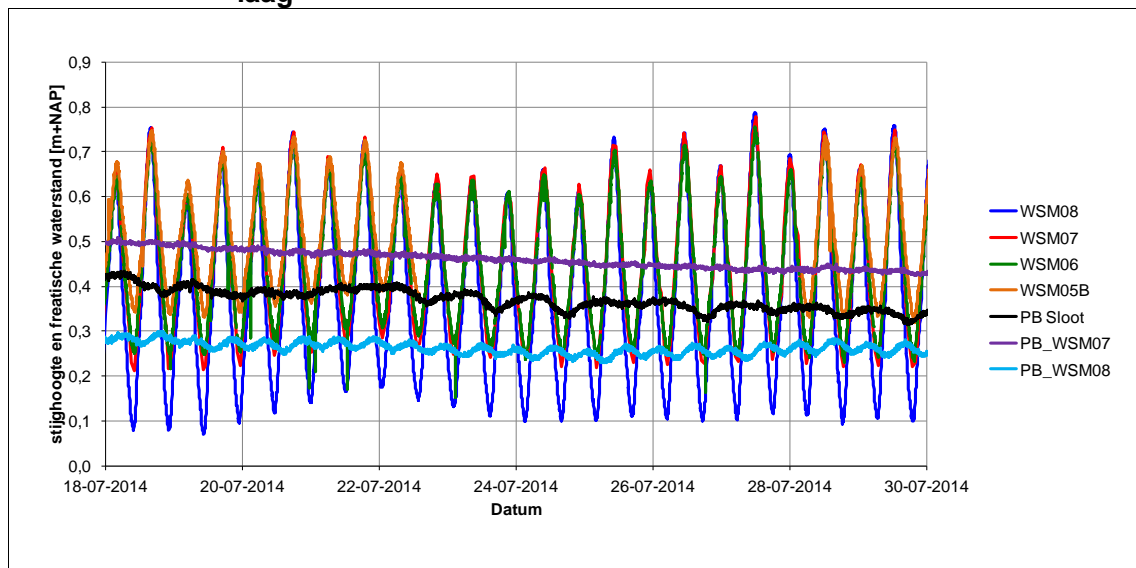
Aanwezigheid afsluitende kleilaag

Het grondonderzoek (sonderingen en boringen) [ref. 7.] wijst op een zandige ondergrond. In sonderingen wordt een terugval van conusweerstand gezien, wat kan duiden op een slappere, slecht doorlatende laag, welke benodigd is voor een pipe om te ontwikkelen. Omdat de laag zeer dun is en deze in de boringen niet wordt teruggevonden, kwam de vraag in hoeverre deze laag overal wel aanwezig is en of er dus wel een risico op piping is. De gemeten stijghoogten, in combinatie met het PlaxFlow-model, laten zien dat er wel de- gelijk een slecht doorlatende, doorlopende laag aanwezig moet zijn van voor- naar achter- land. Er is dus geen sprake van een zand op zand situatie.

Aanvullende metingen boven afsluitende kleilaag

In de periode van 17 juli tot en met 31 juli 2014 is ook de freatische waterstand boven de kleilaag gemeten ter plaatse van waterspanningsmeters WSM08 en WSM07, evenals het slootpeil. De resultaten zijn gepresenteerd in afbeelding 5.33. Hierin is te zien dat de twee lagen geohydrologisch gescheiden zijn, gezien het grote verschil in amplitude, wat de hier- boven gestelde hypothese, dat er een slecht doorlatende doorlopende laag moet zijn, be- vestigt.

Afbeelding 5.33. Gemeten stijghoogte onder- en freatische waterstand boven klei- laag



Sliblaag

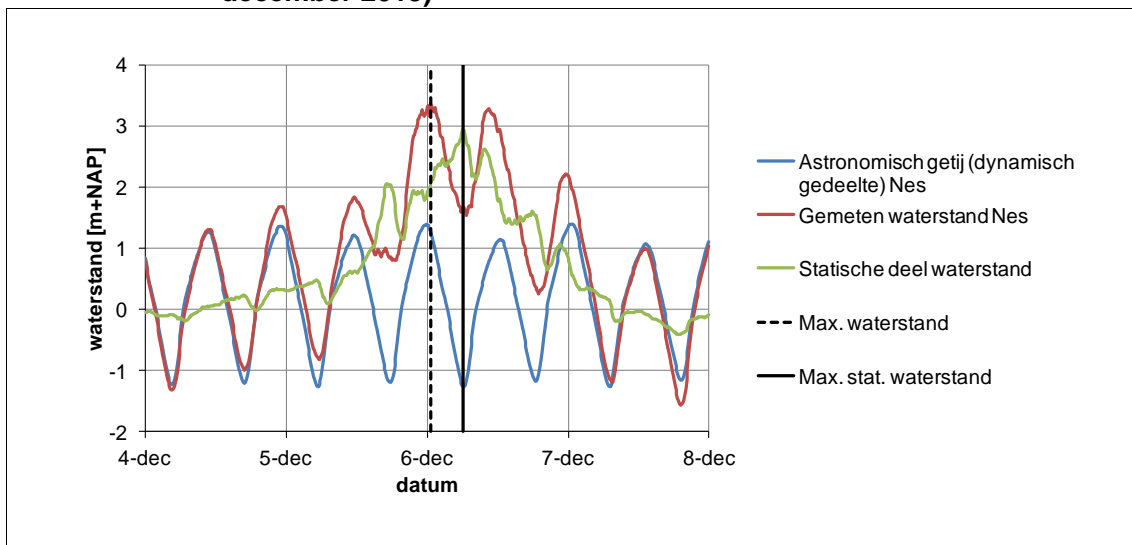
Voor de PlaxFlow fits is een sliblaag ter plaatse van de geul gemodelleerd. Hier is geen in-situ informatie over beschikbaar, en dus zijn aannames gedaan. De invloed hiervan op de resultaten is groot. Een gevoeligheidsanalyse op deze intredeweerstand is opgenomen in bijlage V. Nader onderzoek naar de geul, evenals de aanwezigheid van de sliblaag in de toekomst, wordt aanbevolen om het model verder te verfijnen.

5.6. Vergelijking toegepaste methoden

5.6.1. Vergelijking decemberstorm 2013

Begin december 2013 heeft zich in het Waddenzeegebied een storm voorgedaan. Het verloop van de gemeten waterstand, het voorspelde astronomische getij en de berekende statische waterstand tijdens deze storm is weergegeven in Afbeelding 5.34. Ten behoeve van de vergelijking van de verschillende analysemethoden is het waterstandverloop opgedeeld in een statische en een dynamische component. Voor de dynamische waterstand is het voorspelde astronomische getij aangenomen. De statische waterstand volgt uit het verschil tussen de gemeten (totale) waterstand en de dynamische waterstand.

Afbeelding 5.34 Verloop gemeten waterstand, berekend astronomisch getij en statische component bij meetstation Nes¹ (4 december 2013 tot en met 7 december 2013)



De tijdens de decemberstorm verzamelde data (waterstanden, waterspanningen) is gebruikt om de gehanteerde methoden te vergelijken. Daarvoor zijn de waterstanden bij maximale totale waterstand en maximale statische waterstand tijdens de storm (Tabel 5.9) gehanteerd.

Tabel 5.9. Waterstanden horen bij maximale totale waterstand en maximale statische waterstand

event	tijdstip [dd tt]	tot. wst. [m + NAP]	dyn. wst. [m + NAP]	stat. wst. [m + NAP]
max. tot. wst.	6 dec. 2013 00:40	3,35	1,26	2,09
max. stat. wst.	6 dec. 2013 06:10	1,68	-1,27	2,95

De maximale totale waterstand (NAP +3,35 m) is gemeten op 6 december om 00.40 uur. De maximale statische waterstand (NAP +2,95 m) volgt 5 uur en 30 minuten later. De maximale statische component van de storm is dus opgetreden tijdens de maximale eb.

In Tabel 5.10 zijn de gemeten en berekende stijghoogten ten tijde van de maximale totale waterstand weergegeven. Hetzelfde is gedaan in Tabel 5.11 voor de stijghoogten ten tijde van de maximale statische waterstand.

Tabel 5.10. Berekende stijghoogten ter plaatse van waterspanningsmeters tijdens maximale totale waterstand (6 december 2013, 00:40)

meter	meting	1 TRWD (golf 3)	2 Directe extrapolatie	3a Schel-destr. (statistisch)	3b Schel-destr. (origineel)	4 Frequentie-analyse ^{*3}	5 Plax-Flow
WSM08	2,14	2,17	1,69	2,17	2,17	1,85	2,00
WSM07	1,78	^{*2} 1,97	1,43	2,09	1,90	1,65	^{*2} 1,78
WSM06	1,80	1,88	1,44	1,99	1,95	1,68	1,67
WSM05	1,70	1,78	1,35	1,78	1,89	1,61	1,59

¹ Bron gemeten waterstand en astronomisch getij: live.waterbase.nl en live.getij.nl.

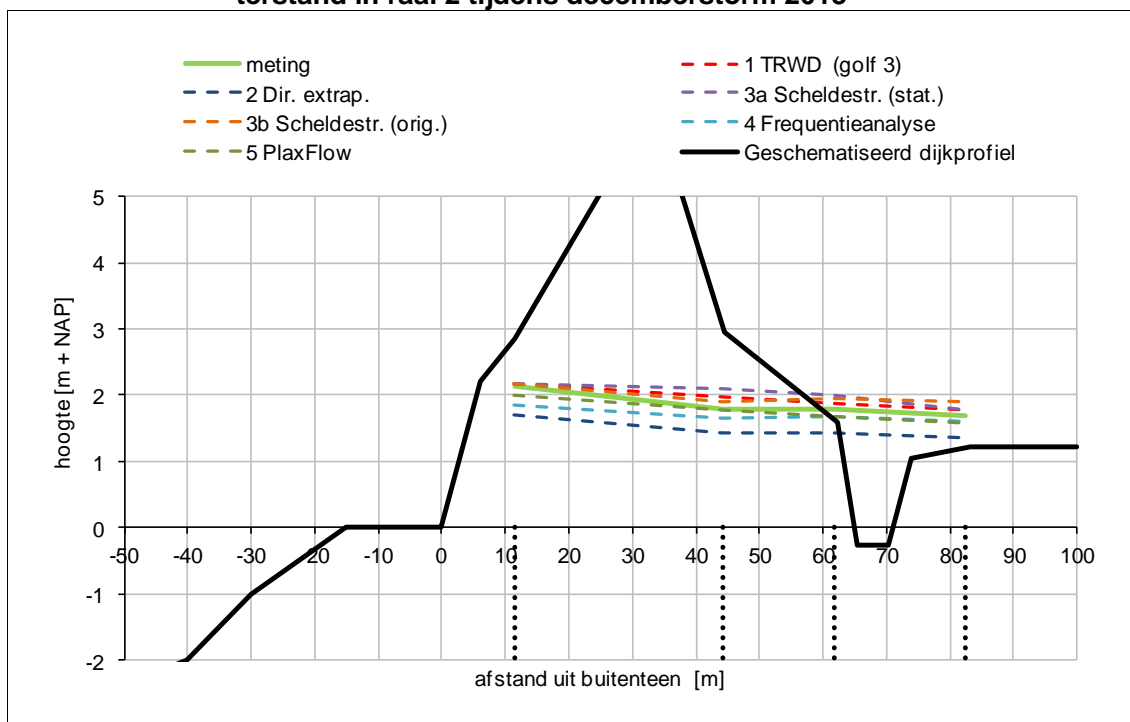
meter	meting	1 TRWD (golf 3)	2 Directe extrapolatie	3a Scheldestr. (statistisch)	3b Scheldestr. (origineel)	4 Frequentie-analyse ^{*3}	5 Plax-Flow
PB02	* ¹ 1,91	* ² 1,97	1,50	2,00	2,04	1,76	* ² 1,78

*1 Meting om 01:00 uur (meetinterval is 1 uur)

*2 Locatie WSM07 en PB02 is gelijk

*3 Statische component: 2,39 m; Dynamische component: 0,96 m. Deze componenten zijn bepaald door de frequentie-analysmethode.

Afbeelding 5.35. Vergelijking gemeten stijghoogten met analyses voor maximale waterstand in raai 2 tijdens decemberstorm 2013



Tabel 5.11. Berekende stijghoogten ter plaatse van waterspanningsmeters tijdens maximale statische waterstand (6 december 2013, 6:10)

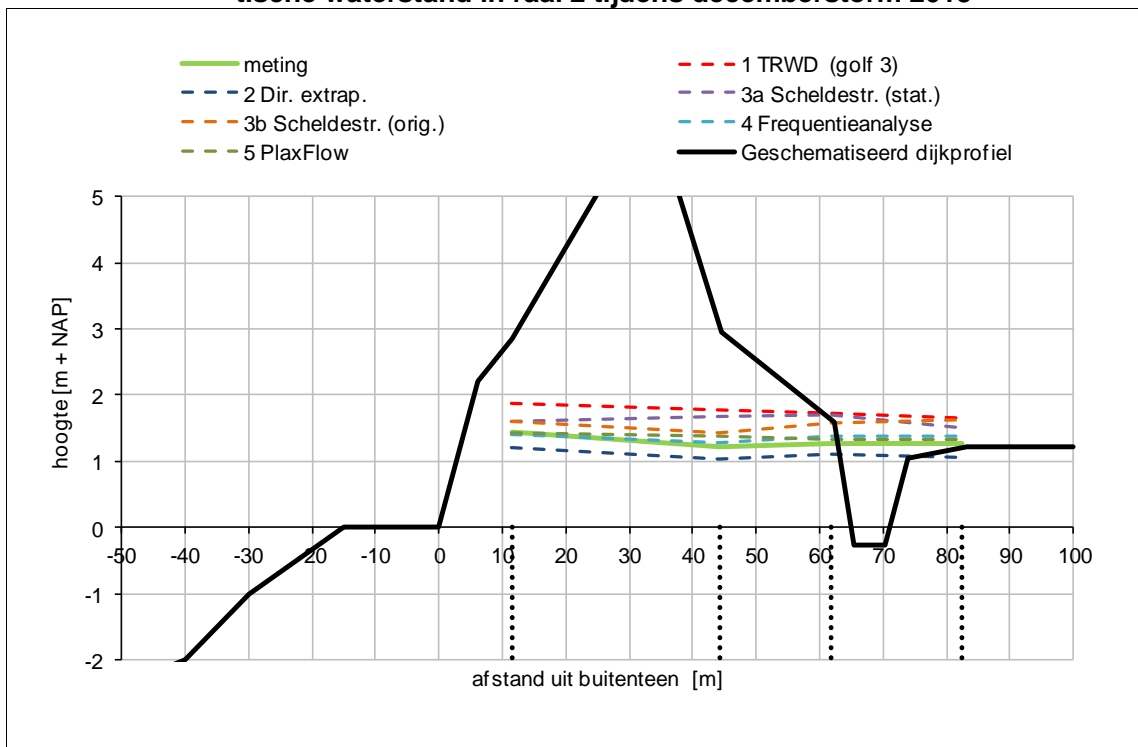
meter	meting	1 TRWD (golf 3)	2 Directe extrapolatie	3a Scheldestr. (statistisch)	3b Scheldestr. (origineel)	4 Frequentie-analyse ^{*3}	5 Plax-Flow
WSM08	1,43	1,88	1,21	1,61	1,61	1,40	1,43
WSM07	1,21	* ² 1,77	1,04	1,68	1,43	1,29	* ² 1,38
WSM06	1,28	1,72	1,10	1,69	1,59	1,38	1,34
WSM05	1,28	1,66	1,06	1,51	1,63	1,37	1,32
PB02	* ¹ 1,31	* ² 1,88	1,10	1,55	1,55	1,40	* ² 1,38

*1 Meting om 06:00 uur (meetinterval is 1 uur).

*2 Methode is locatie afhankelijk, locaties WSM07 en PB02 zijn gelijk.

*3 Statische component: 2,76 m; Dynamische component: -1,08 m. Deze componenten zijn bepaald door de frequentie-analysmethode.

Afbeelding 5.36. Vergelijking gemeten stijghoogten met analyses voor maximale statische waterstand in raai 2 tijdens decemberstorm 2013

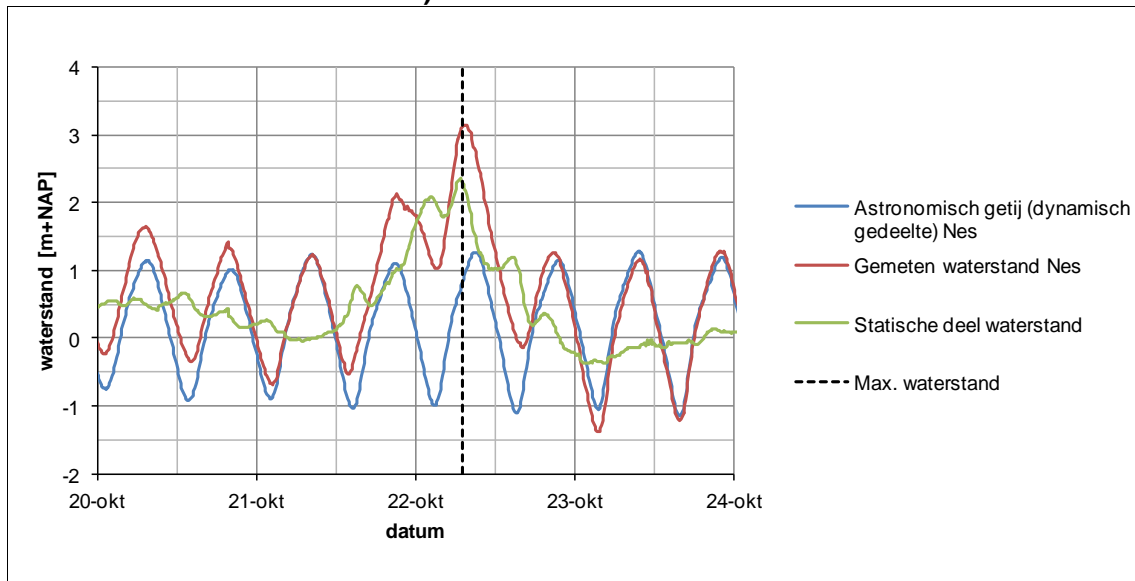


Uit tabellen Tabel 5.10 en Tabel 5.11 blijkt dat WSM07 een onwaarschijnlijk lage waarde geeft voor de meetlocatie. Dit is ook te concluderen na een vergelijking met PB02. Deze verticale offset is tevens opgemerkt in de datacontrole (hoofdstuk 4). Hiermee dient rekening gehouden te worden bij de interpretatie. Het effect van verticale offset op het kwelweglengtetekort is toegelicht in paragraaf 6.1.4.

5.6.2. Validatie oktoberstorm 2014

Tweede helft van oktober 2014 heeft zich in het Waddenzeegebied wederom een storm voorgedaan. Het verloop van de gemeten waterstand, het voorspelde astronomische getij en de berekende statische waterstand tijdens deze storm zijn weergegeven in Afbeelding 5.34. Ten behoeve van de validatie van de verschillende analysemethoden is het waterstandverloop opgedeeld in een statische en een dynamische component. Voor de dynamische waterstand is het voorspelde astronomische getij aangenomen. De statische waterstand volgt uit het verschil tussen de gemeten (totale) waterstand en de dynamische waterstand.

Afbeelding 5.37 Verloop gemeten waterstand, berekend astronomisch getij en statische component bij meetstation Nes¹ (4 december 2013 tot en met 7 december 2013)



De tijdens de oktoberstorm verzamelde data (waterstanden en waterspanningen) is gebruikt om de gehanteerde methoden te valideren. De data van de oktoberstorm is namelijk niet gebruikt om de uitgangspunten van de methoden af te leiden en te fitten. Enkel de buitenwaterstand van de oktoberstorm is gebruikt als invoerparameter voor de methoden. Daarvoor zijn de waterstanden op 22 oktober 2014 om 07:00u (Tabel 5.12) gehanteerd. In Tabel 5.13 zijn de gemeten en berekende stijghoogten weergegeven. De resultaten zijn gevisualiseerd in Afbeelding 5.38.

Tabel 5.12. Waterstanden op 22 oktober 2014, 07:00

tijdstip [dd tt]	tot. wst. [m + NAP]	dyn. wst. [m + NAP]	stat. wst. [m + NAP]
22 okt. 2014 07:00	3,12	0,82	2,30

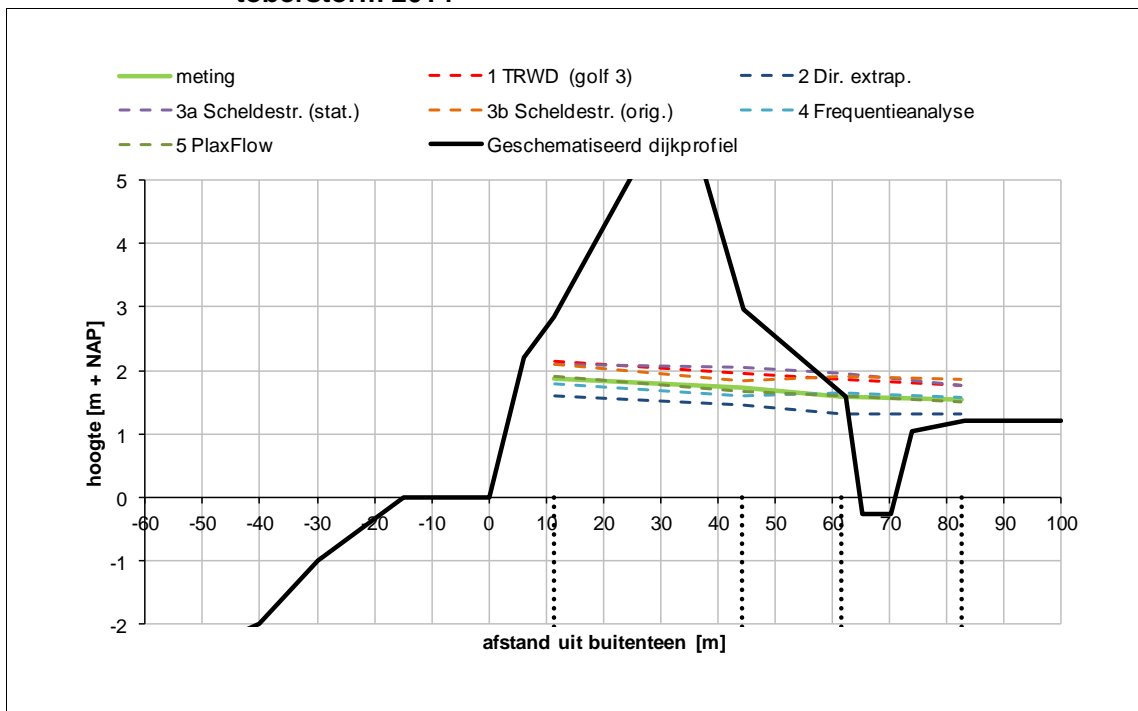
Tabel 5.13. Berekende stijghoogten ter plaatse van waterspanningsmeters (22 oktober 2014, 07:00)

meter	meting	1 TRWD (golf 3)	2 Directe extrapolatie	3a Scheldestr. (statistisch)	3b Scheldestr. (origineel)	4 Frequentie-analyse* ¹	5 Plax-Flow
WSM08	1,87	2,15	1,59	2,10	2,11	1,80	1,91
WSM07	1,73	1,96	1,46	2,05	1,84	1,61	1,68
WSM06	1,58	1,87	1,32	1,97	1,91	1,65	1,59
WSM05	1,55	1,77	1,31	1,76	1,87	1,59	1,50

*1 Statische component: 2,52 m; Dynamische component: 0,60 m. Deze componenten zijn bepaald door de frequentie-analysemethode.

¹ Bron gemeten waterstand en astronomisch getij: live.waterbase.nl en live.getij.nl.

Afbeelding 5.38. Vergelijking gemeten stijghoogten met analyses in raai 2 tijdens oktoberstorm 2014



5.6.3. Conclusies

Algemeen

De validatie van de gehanteerde methoden maakt het mogelijk om een uitspraak te doen over het stijghoogteverloop over de waterkering onder maatgevende omstandigheden. De validatie tijdens maximale totale waterstand én de maximale statische waterstand is daarbij van waarde, omdat bij drie van de methodes zowel een statische als een dynamische component wordt gehanteerd. Een dergelijke methode valt samen met het vigerende ontwerpinstrumentarium. Door de combinatie van vigerende en niet-vigerende methoden is het mogelijk de variatie van de stijghoogte in het watervoerende pakket inzichtelijk te maken. Een uitspraak over de “beste” methode blijft lastig. PlaxFlow geeft weliswaar de beste resultaten, echter heeft deze ook de meest complexe invoer waarbij veel kennis van het geohydrologische systeem nodig is. Voor de andere methoden geldt dat deze eerst bij andere projectlocaties toegepast zouden moeten worden om een uitspraak over “beste” methode te kunnen doen.

De belangrijkste conclusie is dat de validatie laat zien dat de gemeten stijghoogten binnen het bereik van de met de verschillende methoden geëxtrapolerde stijghoogten vallen. Hierdoor valt met een grote zekerheid te zeggen dat, in ieder geval voor raai 2, de combinatie van methoden een bereik van waterspanningen geven waarbinnen het verwachte waterspanningsverloop valt.

Methode TRWD

De methode TRWD (golf 3) geeft voor de maximale totale waterstand een goede schatting en voor de maximaal statische waterstand een overschatting van de stijghoogten ten opzichte van de waterspanningsmeters en de peilbuis. De lambda's voor golf 3 zijn gefit op de decemberstorm. Het ligt daarmee voor de hand dat deze een goede voorspelling geeft.

Als golf 2 van de methode TRWD genomen wordt als basis (niet weergegeven in bovenstaande afbeeldingen), dan geeft de methode TRWD een overschatting van circa 0,2 m voor de maximale totale waterstand en 0,5 m voor de maximaal statische waterstand. Het is daarmee conservatief om in het vervolg uit te gaan van golf 2.

Directe extrapolatie

Met de methode directe extrapolatie komen de geëxtrapoleerde waarden structureel onder de gemeten waarden (verschil -0,2 tot -0,4 m). Deze methode geeft daarom geen goede indicatie van het stijghoogteverloop. Ook doordat de methode structureel onder de gemeten stormwaarden ligt, is de methode niet-conservatief en onveilig. Om deze reden is de methode directe extrapolatie het minst geschikt.

Methode Scheldestromen

De methode Scheldestromen (zowel statistisch als origineel) overschat voor zowel de maximale totale waterstand (verschil 0,0 tot 0,2 m) als de maximale statische waterstand (verschil 0,2 tot 0,4 m) de stijghoogten ten opzichte van de waterspanningsmeters en de peilbuis.

De originele aanpak presteert ongeveer gelijk aan de statistische methode, zowel bij de maximale waterstand als bij de maximale statische waterstand. Beide methoden zijn bruikbaar voor het interpreteren van de waterstroming in het watervoerende pakket. Daarbij geeft de onafhankelijke analyse van alle meetreeksen informatie over de voorplanting van de getijgolf in het watervoerende pakket.

De methode Scheldestromen statistisch kan aangepast worden door het betrouwbaarheidsinterval aan te passen. De resultaten van de waterspanningsmeter aan de binnenzijde van de kruin laten zien dat een kleiner interval mogelijk is. WSM08 echter, laat zien dat de methode bij het 90 % interval de gemeten waterspanning benaderd.

Fysisch gezien is het niet juist om een berekende stijghoogte horende bij een 90 % betrouwbaarheidsinterval te vergelijken met de gemeten waarde. De verwachtingswaarde van de componenten zou hiervoor logisch gezien geschikter zijn. De statische component van de stijghoogte heeft echter een grote bijdrage in de totale stijghoogte, maar deze component is moeilijk in te schatten. Om deze reden is conservatief gerekend met een 90 % waarde. Nader onderzoek naar de werkelijke waarde van de statische component is aanbevolen om de verwachtingswaarde van de statische component te kunnen gebruiken.

Methode Frequentieanalyse

De methode Frequentieanalyse onderschat voor de maximale totale waterstand tijdens de decemberstorm de stijghoogten ten opzichte van de waterspanningsmeters en de peilbuis (verschil -0,2 tot -0,3 m). De stijghoogten ten tijde van de maximale statische waterstand tijdens de decemberstorm worden door deze methode vrij goed geschat (verschil tot +0,15 m). Ook bij de validatie met de oktoberstorm doet deze methode het goed. Aan de buitenzijde worden de stijghoogten iets onderschat, aan de binnenzijde iets overschat.

Van de methodes waarbij enkel de buitenwaterstand en de gemeten waarden van de stijghoogten worden gebruikt (= alle methoden behalve PlaxFlow), komt de Frequentieanalyse het beste overeen met de gemeten waarden. De Frequentieanalyse kan daarom het beste als (relatief eenvoudige) methode gebruikt worden om de verwachtingswaarde van de stijghoogte te bepalen. Opgemerkt wordt dat de methode niet per definitie een overschatting of onderschatting geeft. Daarnaast heeft de methode als nadeel dat deze een continue meetreeks moet hebben, en dus geen meetgaten mag bevatten. Ten tweede geeft de methode een goede benadering als de getijbeweging een goede sinusoïde is. Dat is echter

niet altijd het geval, bijvoorbeeld in situaties waar de stijghoogte wordt beïnvloed door een constant polderpeil. De afwijking tussen goede sinusoïde en de getijdebeweging zorgt ervoor dat de betrouwbaarheid van de methode omlaag gaat.

Methode PlaxFlow

De methode PlaxFlow geeft bij de maximale totale waterstand van de decemberstorm een lichte onderschatting van het stijghoogteverloop ten opzichte van de metingen. Bij de maximale statische waterstand van de decemberstorm geeft PlaxFlow een lichte overschatting. In het algemeen geeft deze methode wel de beste fit van alle methoden. Dit volgt logischerwijs uit het feit dat voor zowel de calibratie als verificatie dezelfde dataset is gebruikt. Bij de validatie met de oktoberstorm geeft PlaxFlow een zeer goede fit met de meetresultaten en presteert het beste van alle methoden.

Op basis van de validatie van de oktoberstorm kan geconcludeerd worden dat PlaxFlow de beste methode is om het stijghoogteverloop in te schatten. Dit volgt logischerwijs uit het feit dat deze methode het meest geavanceerd is, waarbij de vele randvoorwaarden en uitgangspunten van het geohydrologische systeem meegenomen (kunnen) worden. Dit is tevens het nadeel van deze methode; er is namelijk veel kennis van het geohydrologische systeem nodig. Ook is een storm nodig in de meetperiode, om een goed geohydrologisch model op te zetten. Daarnaast is een tweede storm nodig om het model te valideren.

6. ANALYSE PIPING

De analyse van de aard en omvang van het pipingprobleem is uitgevoerd aan de hand van de Werkwijzer piping [ref. 10]. De indeling van dit hoofdstuk is gelijk aan de stappen in de werkwijzer:

- stap 1 ordenen;
- stap 2 begrijpen;
- stap 3 beslissen;
- stap 4 doen.

6.1. Ordenen

Onder ordenen wordt onder andere het opstellen van de geotechnische profielen, het verzamelen van geohydrologische gegevens en het bepalen van de maatgevende omstandigheden verstaan. Het geotechnische profiel en de geohydrologische eigenschappen zijn reeds geordend in hoofdstuk 2. In deze paragraaf is voornamelijk de invloed van de extrapolatie van de stijghoogten in het watervoerende pakket volgens de verschillende methoden onderzocht op het pipingproces. De benodigde kwelweglengten zijn zowel berekend conform de vigerende rekenregel volgens het VTV2006 (Sellmeijer I) [ref. 8] als de toekomstige rekenregel uit het ORZW (Sellmeijer II) [ref. 11]. Het tijdsafhankelijke effect is op twee manieren meegenomen in de bepaling van de benodigde kwelweglengte.

Methode A

De eerste methode beschouwt het verval over verschillende kwelweglengten. Op basis van de extrapolatie naar ontwerpomstandigheden, volgens de methoden uit hoofdstuk 5, is bijvoorbeeld de verwachte stijghoogte in WSM08 bekend. Tevens is de aanwezige kwelweglengte tussen WSM08 en het uittreepunt gegeven. Op basis van het verval en de kwelweglengte kan onderzocht worden of voldaan wordt aan het faalmechanisme. Deze aanpak is toegepast in de verlengde derde toetsronde door Waterschap Scheldestromen.

Methode B

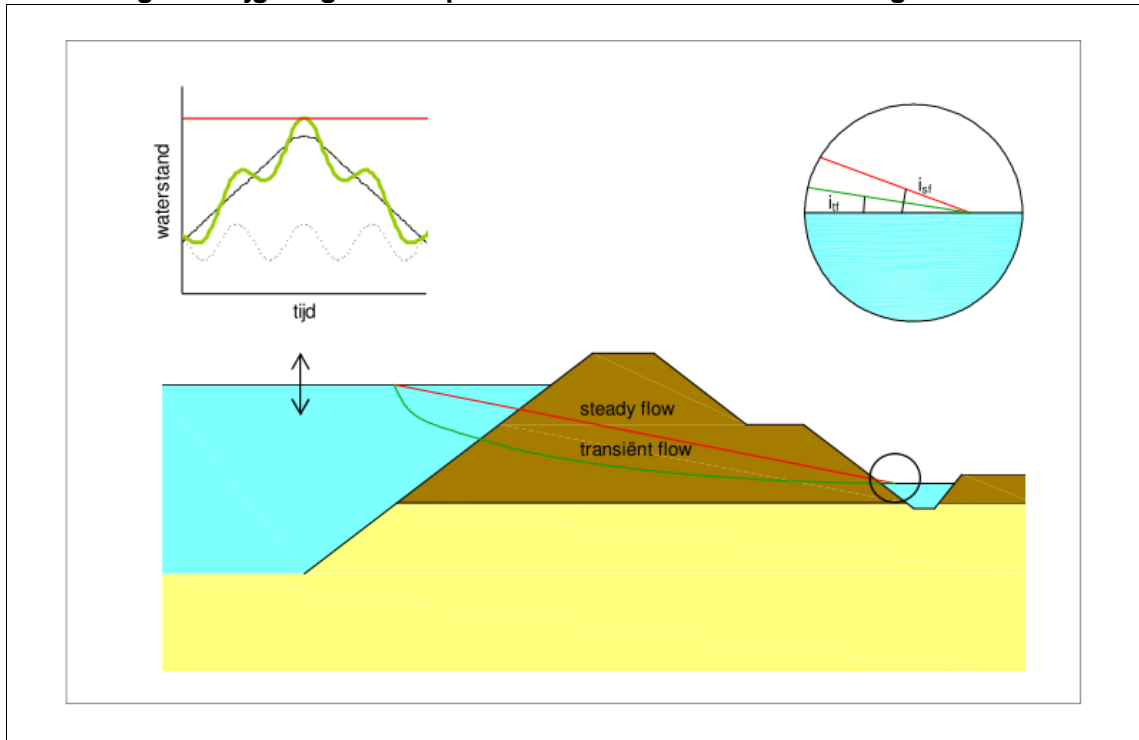
De tweede methode is ontwikkeld door de heer J. Weijers van Rijkswaterstaat. Deze methode gaat ervan uit dat het effect van het waterstandverloop in rekening gebracht mag worden door het verval (ΔH) over de waterkering te verlagen met een factor F_i . Deze factor is gelijk aan de verhouding tussen de gradiënten voor steady en transiënt flow (Afbeelding 6.1), welke kan worden afgeleid uit de PlaxFlow-modellering:

$$F_i = \frac{i_{tf}}{i_{sf}}$$

waarin:

i_{sf}	gradiënt bij steady flow	[-]
i_{tf}	gradiënt bij transiënt flow	[-]
F_i	verhouding tussen gradiënten steady en transiënt flow; $F_i \leq 1$	[-]

Afbeelding 6.1 Stijghoogteverloop transiënt en stationaire stroming



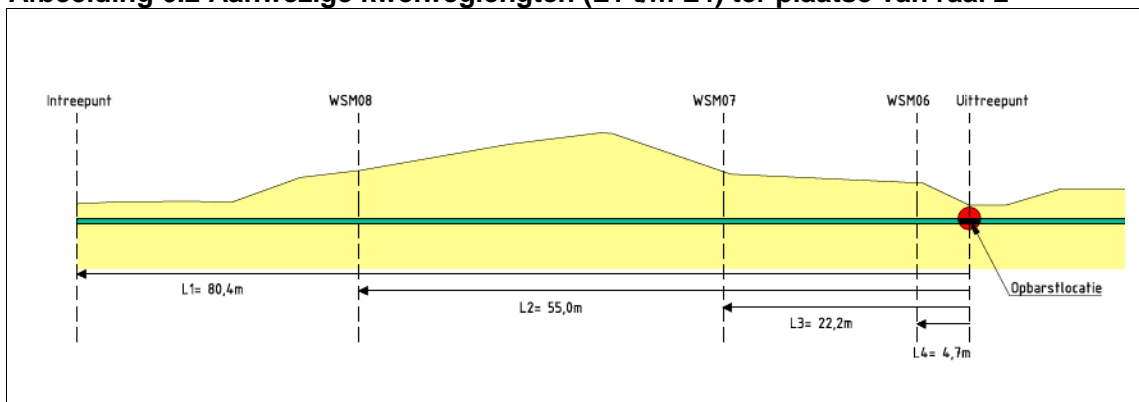
Afbeelding 5.32 laat zien dat een verhouding van circa 0,8 toegepast kan worden ter plaatse van het uittreepunt.

6.1.1. Schematisatie

Bodemopbouw

Ten behoeve van de pipinganalyses is de bodemopbouw geschematiseerd als in Afbeelding 6.2 en tekening AME5.4.1012 in bijlage I. In zowel de sonderingen als boorstaten van de handboringen is een relatief slecht doorlatende laag aangegeven tussen circa NAP -1,5 m en NAP -2,0 m. De waterspanningsmetingen boven en onder de slecht doorlatende laag, en in de sloot, laten zien dat er twee geohydrologisch gescheiden lagen aanwezig zijn. Dit wordt onderbouwd door het PlaxFlow-model. Hieruit is geconcludeerd dat er risico bestaat op piping in het monitoringsgebied.

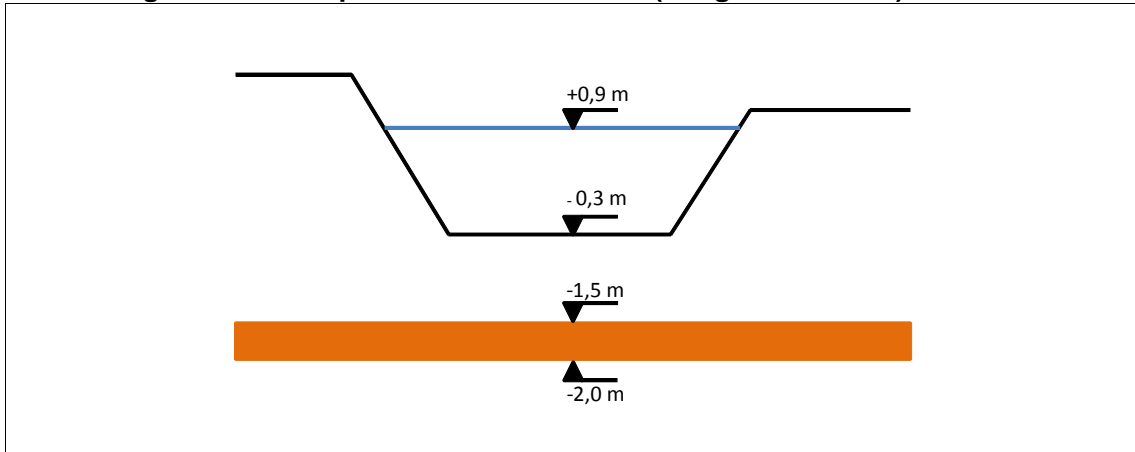
Afbeelding 6.2 Aanwezige kwelweglengten (L1 t/m L4) ter plaatse van raai 2



Grenspotentiaal

Op basis van de geschematiseerde bodemopbouw ter plaatse van raai 2, die representatief is verondersteld voor het gehele traject tussen km 6,8 en 7,1 (Afbeelding 6.3), is de grenspotentiaal bepaald conform het TRWD [ref. 15]. De afstand tussen de onderkant van de slootbodem en de onderkant van de kleilaag is kleiner dan de breedte van de onderkant van de slootbodem, daarom is de schematisatie als in figuur b1.6 uit het TRWD gehanteerd. Daaruit volgt een grenspotentiaal van circa NAP +2,2 m.

Afbeelding 6.3. Bodemopbouw kwelsloot raai 2 (hoogte t.o.v. NAP)



Grondspanning:

$$\sigma_g = 1,2 * 10 + 1,2 * 19 + 0,5 * 15 = 42,3 \text{ kPa}$$

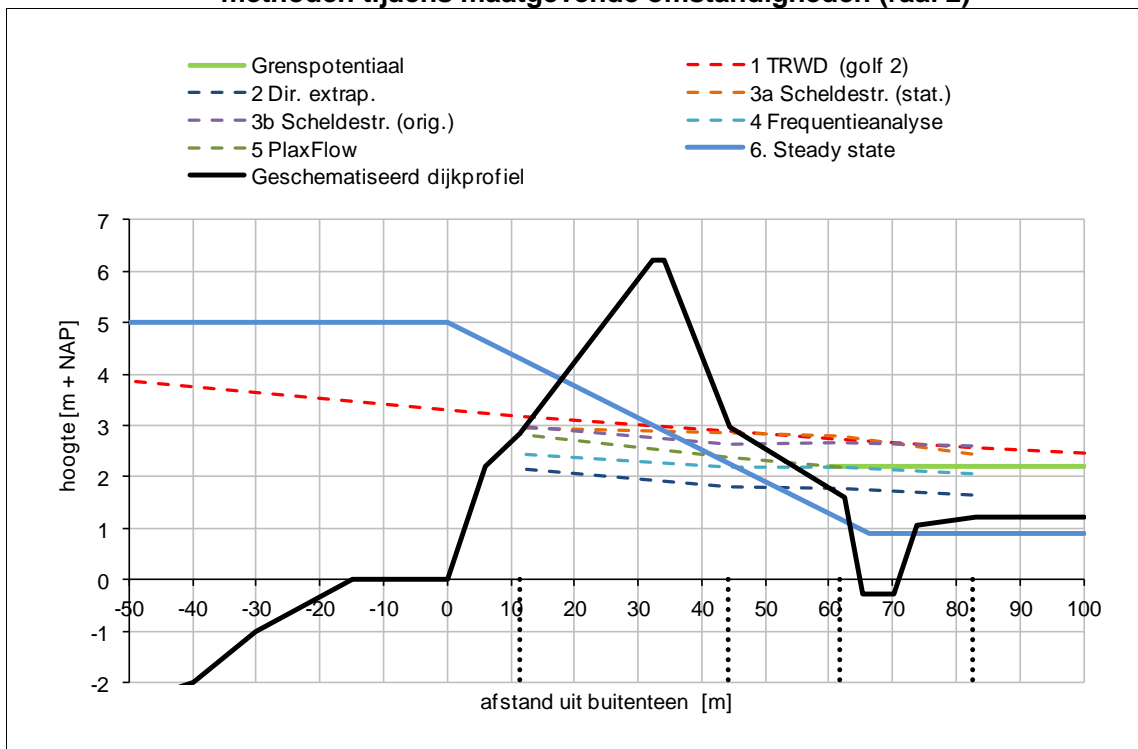
Grenspotentiaal:

$$\varphi = 42,3 / 10 - 2,0 = \text{NAP} + 2,2 \text{ m}$$

De afstand tussen de slootbodem en de kleilaag blijkt ter plaatse van raai 2 juist maximaal (bijlage I). Daarom is het aannemelijk dat NAP +2,2 m een bovengrens is voor de grenspotentiaal.

In Afbeelding 6.4 is het verloop van de waterspanning in het watervoerende pakket onder maatgevende omstandigheden weergegeven volgens alle gehanteerde methoden. Daaruit valt op te maken dat de bovengrens van de grenspotentiaal in het gebied van de monitoringsproef zeer waarschijnlijk overschreden wordt onder maatgevende omstandigheden, en daarmee is de kans op opbarsten reëel. Uit de metingen is gebleken dat er een afsluitende laag aanwezig is in het monitoringsgebied. Deze uniforme aanwezigheid, in combinatie met de opbarstgevoeligheid toont aan dat het gebied pipinggevoelig is.

Afbeelding 6.4 Visualisatie stijghoogteverloop naar achterland voor verschillende methoden tijdens maatgevende omstandigheden (raai 2)



Uittreepunt

Voor het uittreepunt is de insteek van de slootbodembodem aangenomen. Ter plaatse van de teensloot is de kans op opbarsten het meest waarschijnlijk, omdat hier de aanwezige deklaag minimaal is. De aanwezige afstand tussen het uittreepunt en de waterspanningsmeters (Tabel 6.1) zijn relevant voor methode A.

Tabel 6.1. Aanwezige afstand tussen waterspanningsmeter en uittreepunt

raai	WSM4, WSM8 en WSM12 (L2) [m]	WSM3, WSM7 en WSM11 (L3) [m]	WSM2, WSM6 en WSM10 (L4) [m]
1	54,6	20,8	4,8
2	55,0	22,2	4,7
3	55,2	25,2	5,8

Intreepunt

Voor het intreepunt zijn de volgende opties mogelijk (Afbeelding 6.5):

1. ter plaatse van buitenteen;
2. ter plaatse van rand geul;
3. ter plaatse van geul, waar de onderkant van de kleilaag de geulwand snijdt;
4. door extrapolatie van de stijghoogte volgens methode TRWD tot aan MHW.

Optie 1 valt af, omdat met de verschillende methoden voor het schematiseren van het stijghoogteverloop is aangetoond dat het intreeweestand van het voorland meegenomen mag worden in de bepaling van de kwelweglengte.

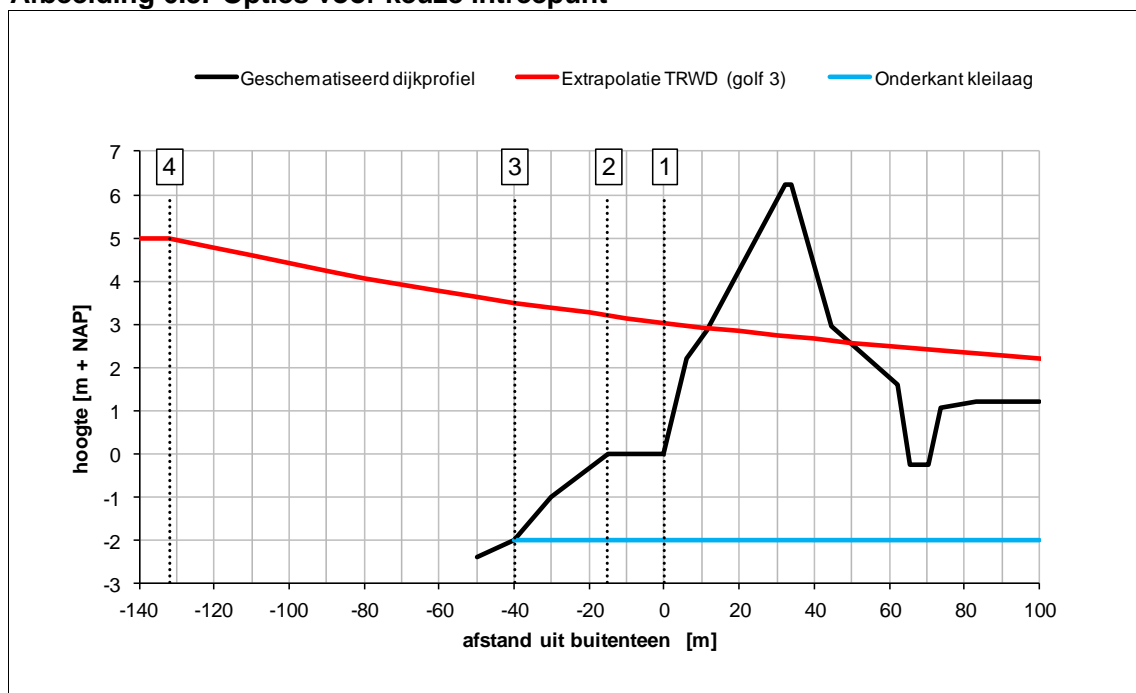
Op basis van de methoden zou optie 4 gekozen kunnen worden. Deze optie levert een extra kwelweglengte van meer dan 100 m op in vergelijking met optie 1. Deze optie is echter niet goed te verklaren gezien de verwachte intreeweestand op basis van expert judgement

ter plaatse van de geul. Optie 4 is minder representatief voor het geohydrologische systeem van dit project en wordt daarom niet aanbevolen.

Een intrepunt ter plaatse van de geul (optie 2 en 3) is fysisch het meest waarschijnlijk, ook gezien de resultaten van het PlaxFlow-model. Strooming van water gaat voornamelijk door de sliblaag bij de geul, en nauwelijks door de kleilaag onder de dijk. Optie 3 zou fysisch gezien de meest realistische keuze zijn, maar omdat de diepte van de kleilaag ter plaatse van de geul niet bekend is, is gekozen voor optie 2.

De aanwezige kwelweglengte tussen intrepunt en uittepunt (L1) is daarmee 80,4 m. Een consequentie voor het aangenomen intrepunt is dat de positie van de geulrand op de huidige afstand van de dijk gehandhaafd moet worden. Het vastleggen van de positie van de geulrand door middel van bestorting is dus een te nemen maatregel. De positie van de geulwand, op 14 m van de teen wordt hierdoor gewaarborgd.

Afbeelding 6.5. Opties voor keuze intrepunt



Verloop waterspanningen in watervoerend pakket

De verwachte stijghoogtes voor de meetlocaties onder maatgevende omstandigheden, zoals bepaald voor alle methoden, zijn weergegeven in de volgende tabellen. Het verval is gelijk aan de stijghoogte naar het slootpeil (NAP +0,9 m).

De waterspanningen waarop deze stijghoogten gebaseerd zijn, kunnen een verticale offset hebben. Zo bleek uit de data-analyse in hoofdstuk 4 dat in raai 2 WSM07 een verticale offset heeft van structureel circa 7 cm. De gebruikte waterspanning voor dit punt is dus gemiddeld 7 cm te laag. Het effect van verticale variatie in de stijghoogten is geanalyseerd in paragraaf 6.1.4.

Tabel 6.2. Stijghoogten meetlocaties in raai 1

methode	H WSM04 [m+NAP]	H WSM03 [m+NAP]	H WSM02 [m+NAP]
2. Directe extrapolatie	2,48	2,10	2,01
3a. Scheldestromen statistisch	3,18	3,10	2,90

methode	H WSM04 [m+NAP]	H WSM03 [m+NAP]	H WSM02 [m+NAP]
3b. Scheldestromen origineel	2,97	2,25	2,69
4. Frequentieanalyse	2,58	2,15	2,22
6. Steady state	3,68	1,96	1,14

Tabel 6.3. Stijghoogten meetlocaties in raai 2

methode	H WSM08 [m+NAP]	H WSM07 [m+NAP]	H WSM06 [m+NAP]
1. TRWD (golf 2)	3,18	2,89	2,74
2. Directe extrapolatie	2,15	1,81	1,77
3a. Scheldestromen statistisch	2,96	2,87	2,78
3b. Scheldestromen origineel	3,00	2,63	2,67
4. Frequentieanalyse	2,43	2,17	2,17
5. PlaxFlow	2,84	2,38	2,20
6. Steady state	3,70	2,03	1,14

Tabel 6.4. Stijghoogten meetlocaties in raai 3

methode	H WSM12 [m+NAP]	H WSM11 [m+NAP]	H WSM10 [m+NAP]
2. Directe extrapolatie	1,78	1,62	1,52
3a. Scheldestromen statistisch	2,77	2,56	2,77
3b. Scheldestromen origineel	3,25	2,80	2,44
4. Frequentieanalyse	2,05	1,97	1,95
6. Steady state	3,71	2,18	1,20

Invoerparameters rekenregels

Ten behoeve van het bepalen van de kritische kwelweglengten zijn de parameters gebruikt als in Tabel 6.5.

Tabel 6.5. Toegepaste parameters ter bepaling van kritische kwelweglengten

parameter	eenheid	waarde
dikte afdekkende laag (d)	m	0
dikte watervoerend pakket (D)	m	25
doorlatendheid (k)	m/s	$2,0 \times 10^{-4}$
korreldiameter d_{70}	m	$1,41 \times 10^{-4}$
veiligheidsfactor (γ_n), Sellmeijer I en II	-	1,2
schematiseringfactor (γ_b), Sellmeijer II	-	1,1
volumiek gewicht verzadigde grond (γ'_p), Sellmeijer II	kN/m ³	16

Uit het geotechnische onderzoek [ref. 6] is geen ondergrens gevonden van de watervoerende laag. Daarom is voor de dikte van het watervoerende zandpakket 25 m aangenomen. Omdat het watervoerende pakket pas een significante invloed op de stijghoogte krijgt bij kleine diktes ($D < 10$ m), is dit een veilige waarde. Voor de veiligheidsfactor (γ_n) is een waarde van 1,2 aangehouden conform Ontwerprichtie versterking Waddenzeedijk Ameland [ref. 23]. De onderbouwing van de schematiseringfactor ($\gamma_b=1,1$) is gegeven in het project dijkverbetering Ameland [ref. 25]. Voor de dikte van de afdekkende laag is geen eenduidige waarde aan te geven (zie ook dwarsdoorsneden in bijlagen III). Daarom wordt hier conservatief de waarde 0 aan toegekend. Deze waarde is tevens toegepast in Deltares 2011 [ref. 4].

6.1.2. Pipinganalyse methode A

Methode A is uitgevoerd voor de locaties waar de stijghoogten geëxtrapoleerd zijn (Tabel 6.7 t/m

Tabel 6.17). Per kwelweg (L1 t/m L4) is daarbij op basis van de stijghoogteverschillen (ΔH) de kritische kwelweglengte (L_{cr}) berekend volgens de vigerende (Sellmeijer I) en nieuwe piping rekenregel (Sellmeijer II). Voor Raai 2 en WSM08 zijn in bijlage V de berekeningen opgenomen.

Tabel 6.6. Berekende (Sellmeijer I) kritische kwelweglengten raai 1

Methode	L_{cr} buitenwater [m]	L_{cr} WSM04 [m]	L_{cr} WSM03 [m]	L_{cr} WSM02 [m]
2, Directe extrapolatie	83,9	29,7	21,4	19,4
3a, Scheldestromen statistisch	83,9	44,8	43,1	38,7
3b, Scheldestromen origineel	83,9	40,2	24,6	34,2
4, Frequentieanalyse	83,9	31,9	22,5	24,0
6, Steady state	83,9	55,7	18,3	2,5

Tabel 6.7. Berekend (Sellmeijer I) kwelweglengtetekort raai 1

Methode	L buitenwater [m]	L_{cr} WSM04 [m]	L_{cr} WSM03 [m]	L_{cr} WSM02 [m]
2, Directe extrapolatie	3,5	-24,9	0,6	14,6
3a, Scheldestromen statistisch	3,5	-9,8	22,3	33,9
3b, Scheldestromen origineel	3,5	-14,4	3,8	29,4
4, Frequentieanalyse	3,5	-22,7	1,7	19,2
6, Steady state	3,5	1,1	-2,5	-2,3

Tabel 6.8. Berekende (Sellmeijer II) kritische kwelweglengten raai 1

Methode	L_{cr} buitenwater [m]	L_{cr} WSM04 [m]	L_{cr} WSM03 [m]	L_{cr} WSM02 [m]
2, Directe extrapolatie	111,2	36,9	26,0	23,5
3a, Scheldestromen statistisch	111,2	57,0	54,7	48,8
3b, Scheldestromen origineel	111,2	50,8	30,2	42,8
4, Frequentieanalyse	111,2	39,7	27,5	29,5
6, Steady state	111,2	71,8	22,1	2,5

Tabel 6.9. Berekend (Sellmeijer II) kwelweglengtetekort raai 1

Methode	L buitenwater [m]	L_{cr} WSM04 [m]	L_{cr} WSM03 [m]	L_{cr} WSM02 [m]
2, Directe extrapolatie	30,8	-17,7	5,2	18,7
3a, Scheldestromen statistisch	30,8	2,4	33,9	44,0
3b, Scheldestromen origineel	30,8	-3,8	9,4	38,0
4, Frequentieanalyse	30,8	-14,9	6,7	24,7
6, Steady state	30,8	17,2	1,3	-2,3

Tabel 6.10. Berekende (Sellmeijer I) kritische kwelweglengten raai 2

Methode	L_{cr} buitenwater [m]	L_{cr} WSM08 [m]	L_{cr} WSM07 [m]	L_{cr} WSM06 [m]
1, TRWD	83,9	44,9	38,5	35,3
2, Directe extrapolatie	83,9	22,5	15,1	14,3
3a, Scheldestromen statistisch	83,9	40,0	38,1	36,0
3b, Scheldestromen origineel	83,9	40,9	32,8	33,7
4, Frequentieanalyse	83,9	28,6	23,0	22,9
5, PlaxFlow	83,9	37,4	27,4	23,5
6, Steady state	83,9	56,1	19,9	2,4

Tabel 6.11. Berekend (Sellmeijer I) kwelweglengtetekort raai 2

Methode	L buitenwater [m]	L WSM08 [m]	L WSM07 [m]	L WSM06 [m]
1, TRWD	3,5	-10,1	16,3	30,6
2, Directe extrapolatie	3,5	-32,5	-7,1	9,6
3a, Scheldestromen statistisch	3,5	-15,0	15,9	31,3
3b, Scheldestromen origineel	3,5	-14,1	10,6	29,0
4, Frequentieanalyse	3,5	-26,4	0,8	18,2
5, PlaxFlow	3,5	-17,6	5,2	18,8
6, Steady state	3,5	1,1	-2,3	-2,3

Tabel 6.12. Berekende (Sellmeijer II) kritische kwelweglengten raai 2

Methode	L _{cr} buitenwater [m]	L _{cr} WSM08 [m]	L _{cr} WSM07 [m]	L _{cr} WSM06 [m]
1, TRWD	111,2	57,1	48,5	44,3
2, Directe extrapolatie	111,2	27,6	18,0	16,9
3a, Scheldestromen statistisch	111,2	50,5	48,0	45,3
3b, Scheldestromen origineel	111,2	51,7	41,0	42,2
4, Frequentieanalyse	111,2	35,5	28,1	28,1
5, PlaxFlow	111,2	47,1	34,0	28,9
6, Steady state	111,2	72,4	24,1	2,3

Tabel 6.13. Berekend (Sellmeijer II) kwelweglengtetekort raai 2

Methode	L buitenwater [m]	L WSM08 [m]	L WSM07 [m]	L WSM06 [m]
1, TRWD	30,8	2,1	26,3	39,6
2, Directe extrapolatie	30,8	-27,4	-4,2	12,2
3a, Scheldestromen statistisch	30,8	-4,5	25,8	40,6
3b, Scheldestromen origineel	30,8	-3,3	18,8	37,5
4, Frequentieanalyse	30,8	-19,5	5,9	23,4
5, PlaxFlow	30,8	-7,9	11,8	24,2
6, Steady state	30,8	17,4	1,9	-2,4

Tabel 6.14. Berekende (Sellmeijer I) kritische kwelweglengten raai 3

Methode	L _{cr} buitenwater [m]	L _{cr} WSM12 [m]	L _{cr} WSM11 [m]	L _{cr} WSM10[m]
2, Directe extrapolatie	83,9	14,5	11,2	9,1
3a, Scheldestromen statistisch	83,9	35,8	31,3	36,0
3b, Scheldestromen origineel	83,9	46,4	36,5	28,9
4, Frequentieanalyse	83,9	20,2	18,5	18,1
6, Steady state	83,9	56,3	23,2	3,2

Tabel 6.15. Berekend (Sellmeijer I) kwelweglengtetekort raai 3

Methode	L buitenwater [m]	L _{cr} WSM12 [m]	L _{cr} WSM11 [m]	L _{cr} WSM10[m]
2, Directe extrapolatie	3,5	-40,7	-14,0	3,3
3a, Scheldestromen statistisch	3,5	-19,4	6,1	30,2
3b, Scheldestromen origineel	3,5	-8,8	11,3	23,1
4, Frequentieanalyse	3,5	-35,0	-6,7	12,3
6, Steady state	3,5	1,1	-2,0	-2,6

Tabel 6.16. Berekende (Sellmeijer II) kritische kwelweglengten raai 3

Methode	L _{cr} buitenwater [m]	L _{cr} WSM12 [m]	L _{cr} WSM11 [m]	L _{cr} WSM10[m]
2, Directe extrapolatie	111,2	17,2	13,0	10,3
3a, Scheldestromen statistisch	111,2	45,0	39,0	45,2
3b, Scheldestromen origineel	111,2	59,1	45,9	35,8

Methode	L _{cr} buitenwater [m]	L _{cr} WSM12 [m]	L _{cr} WSM11 [m]	L _{cr} WSM10[m]
4, Frequentieanalyse	111,2	24,5	22,3	21,8
6, Steady state	111,2	72,7	28,4	3,3

Tabel 6.17. Berekend (Sellmeijer II) kwelweglengtetekort raai 3

Methode	L buitenwater [m]	L _{cr} WSM12 [m]	L _{cr} WSM11 [m]	L _{cr} WSM10[m]
2, Directe extrapolatie	30,8	-38,0	-12,2	4,5
3a, Scheldestromen statistisch	30,8	-10,2	13,8	39,4
3b, Scheldestromen origineel	30,8	3,9	20,7	30,0
4, Frequentieanalyse	30,8	-30,7	-2,9	16,0
6, Steady state	30,8	17,5	3,2	-2,5

6.1.3. Pipinganalyse methode B

Methode B gaat ervan uit dat het effect van het waterstandverloop in rekening gebracht mag worden door het verval (ΔH) over de waterkering te verlagen met een factor F_i . Deze factor is gelijk aan de verhouding tussen de gradiënten voor steady en transiënt flow (Afbeelding 6.1). Uit de ruimtelijke verdeling van de meetlocaties volgt dat van de verschillende methoden alleen de PlaxFlow-berekeningen toepasbaar zijn voor het accuraat bepalen van F_i . Ten behoeve van het in rekening brengen van een stijghoogtereductie volgens de methode 'Weijers' is ter plaatse van het uittreepunt (opbarstlocatie) de gradiënt in transiënt en steady flow bepaald (Tabel 6.18).

Tabel 6.18. Transiënt en steady gradiënten ter plaatse van het uittreepunt (PlaxFlow)

parameter	eenheid	waarde
i_{tr}	[-]	0,00971
i_{st}	[-]	0,01232
$F_i = i_{tr}/i_{st}$	[-]	0,788 (= afgerond naar 0,8)

Een reductie van 20 % op het verval lijkt dus haalbaar. De resultaten van de berekeningen zijn opgenomen in Tabel 6.19 en Tabel 6.20.

Tabel 6.19. Berekende kwelweglengte raai 2 (inclusief 20% reductie op verval)

methode	L _{cr} buitenwater [m]
1. Sellmeijer I	66,3
2. Sellmeijer II	86,5

Tabel 6.20. Berekend kwelweglengtetekort raai 2 (inclusief 20% reductie op verval)

methode	L buitenwater [m]
1. Sellmeijer I	-14,1
2. Sellmeijer II	6,1

6.1.4. Conclusie en discussie

De volgende aspecten zijn beschouwd in de pipinganalyse:

- drie raaien;
- twee methoden om het tijdsafhankelijke effect in rekening te (methoden A en B);
- twee rekenregels (Sellmeijer I en II);
- zes methoden om het stijghoogteverloop te bepalen (methoden 1 tot en met 5 en één verloop conform steady state).

Het overzicht van het resultaat van de pipinganalyse staat in Tabel 6.23. Elke combinatie wordt in het vervolg van de paragraaf toegelicht.

Tabel 6.21. Overzicht resultaat van pipinganalyse

	steady state	methode A	methode B
Sellmeijer I	voldoet niet	voldoet	voldoet net
Sellmeijer II	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet

Steady state en Sellmeijer I en II

Als het tijdsafhankelijke effect niet in rekening wordt gebracht, dan voldoet de waterkering (raaien 1, 2 en 3) niet aan de rekenregels Sellmeijer I en II.

Methode A en Sellmeijer I

Als het tijdsafhankelijke effect in rekening wordt gebracht conform methode A, dan voldoen de drie raaien conform rekenregel Sellmeijer I voor alle vijf de methoden voor het bepalen van het stijghoogteverloop (methoden 1 tot en met 5).

In methode A zijn vier kwelweglengtes beschouwd (L1 tot en met L4). De waterkering voldoet alleen voor L2. Dat de kwelweglengtes L1, L3 en L4 niet voldoen, sluit aan bij de verwachting. Bij L1 is uitgegaan van een steady-state-verhang (kwelweglengtetekort = 3,5 m). Het tijdsafhankelijke effect is hier niet in rekening gebracht. Kwelweglengtes L3 en L4 zijn relatief kort, waardoor de optredende fout in het schalen van de stijghoogteverdeling groter is dan bij L2, met een relatief lange afstand. Bij L2 is de fout kleiner en acceptabel, maar door het effect van het schalen is het berekende kwelweglengtetekort van L2 aan de conservatieve kant.

Bij toepassing van methode A en Sellmeijer I is in het geval van opbarsten (en een relatief kleine d) altijd een verhouding $\Delta H/L$ te vinden waarbij niet voldaan wordt aan de veiligheidseis. Bij een kwelweglengte dicht bij het opbarstkanaal (bijvoorbeeld $L = 0,5$ m) is het verval ongeveer gelijk aan het verschil tussen de grenspotential en het slootpeil. Bij een dergelijke verhouding ($\Delta H = 2,2 - 0,9 = 1,3$ m en $L = 0,5$ m) wordt vrijwel nooit voldaan aan de veiligheidseis. Beschouwde kwelweglengtes tussen binnenwaarts gelegen meetlocaties en de opbarstlocatie voldoen daarmee vaak niet.

Ondanks dat alleen L2 voldoet, wordt om bovenstaande redenen toch voldaan aan de veiligheidseis. De kracht van methode A (in combinatie met L2) is dat de methode onafhankelijk is van de locatie van het 'fysieke' intreepunt en (grotendeels) onafhankelijk is van het effect van opbarsten/opdrijven.

Methode A en Sellmeijer II

Per raai voldoet steeds één methode om het stijghoogteverloop te bepalen de waterkering niet voor rekenregel Sellmeijer II. Bij raai 2 is dat methode TRWD en bij raaien 1 en 3 is dat methode Scheldestromen (statistisch respectievelijk origineel).

In hoofdstuk 5 is reeds gesteld dat de aangehouden golf (golf 2) voor de extrapolatie naar ontwerpomstandigheden conservatief is. Als golf 3 (die beter voldoet aan de validatie van de decemberstorm) aangehouden wordt, dan voldoet raai 2 wel.

De methode Scheldestromen is relatief gevoelig voor de kwaliteit van de data. Met name WSM12 (raai 3) heeft relatief veel gecorrigeerde waarden, maar ook WSM04 is niet altijd betrouwbaar.

Ondanks bovenstaande opmerkingen, wordt toch gesteld dat niet voldaan wordt aan rekenregel Sellmeijer II.

Methode B en Sellmeijer I

Bij toepassing van methode B (methode van de heer J. Weijers) voldoet de waterkering voor Sellmeijer I.

De volgende kanttekeningen worden geplaatst met betrekking tot de toepasbaarheid van methode B (in combinatie met de gebruikte methoden om het stijghoogteverloop te bepalen) voor de onderzoekslocatie:

- het effect van opbarsten is niet meegenomen;
- de berekende gradiënten van het stijghoogteverloop zijn relatief klein;
- de locatie van het intreepunt (opbouw voorland) is onbekend.

Opbarsten

In de berekeningen met PlaxFlow is opbarsten niet in rekening gebracht (vrijwel niet te modelleren in het model). In het geval van (extreem) opbarsten, zal de waterspanning in het watervoerende pakket zich dicht bij de sloot lokaal aanpassen aan het slootpeil. Rondom het opbarstkanaal heerst de grenspotential. Dit heeft effect op zowel het verhang bij het uittreepunt in steady state situaties als bij een dynamisch verloop van de buitenwaterstand.

Kleine gradiënten

De berekende gradiënten voor transiënt en steady flow zijn voor Ameland relatief klein (Tabel 6.18). Dit komt met name door het (nagenoeg) horizontale verloop van de stijghoogtes (beperkte afname respons van waterspanningsmeters richting het achterland). De factor F_i is hierdoor relatief gevoelig voor kleine wijzigingen van de invoer en met PlaxFlow (zonder rekening te houden met opbarsten/opdrijven) niet nauwkeurig te bepalen.

Locatie intreepunt

Bij methode B moet het intreepunt worden bepaald (dit is bij methode A niet nodig).

Methode B en Sellmeijer II

De waterkering voldoet op basis van methode B niet aan de rekenregel van Sellmeijer II.

Gevoeligheid voor variatie in stijghoogte

Een verticale offset in de metingen van de waterspanningsmeters werkt door in de bepaalde stijghoogten. De afwijking in de meting werkt niet direct door in de resulterende stijghoogten, maar deze doorvertaling is niet apart beschouwd. Het gevolg van een variatie in de stijghoogte op het kwelweglengtetekort is bekeken voor raai 2 met Sellmeijer II. Een hogere stijghoogte leidt tot een groter kwelweglengtetekort. De berekende stijghoogten verhoogd met 7 cm leidt gemiddeld tot een 2,0 m langer kwelweglengtetekort, bepaald voor L2 (WSM08). Een hogere stijghoogte met 5 cm - 10 cm, geeft respectievelijk een 1,5 - 2,9 m groter kwelweglengtetekort.

In dit geval leidt een variatie in de bepaalde stijghoogte (bij WSM08) niet tot een andere beoordeling van deze dijk. In het algemeen, bij het beoordelen van de pipinggevoeligheid van dijken met behulp van metingen, is het goed om bewust te zijn van het effect van meetfouten op het resultaat van de pipinganalyse.

Algemene conclusie

Op basis van de toegepaste methoden en uitgangspunten, wordt het volgende geconcludeerd:

- de waterkering voldoet niet conform Sellmeijer I en II zonder het tijdsafhankelijke effect in rekening te brengen (steady state);
- de waterkering voldoet conform Sellmeijer I als het tijdsafhankelijke effect in rekening wordt gebracht;
- de waterkering voldoet niet conform Sellmeijer II als het tijdsafhankelijke effect in rekening wordt gebracht.

Een aantal aspecten dat positief bijdraagt aan de weerstand tegen piping is niet of beperkt meegenomen in de analyse. Deze aspecten worden besproken in paragraaf 7.1.

6.2. Begrijpen

Om de pipingproblematiek te analyseren, zijn in het Plan van aanpak [ref. 24] hypothesen opgesteld. In deze paragraaf is de juistheid van de gestelde hypothesen getoetst op basis van de uitgevoerde meetcampagne en daaraan gekoppelde analyse.

6.2.1. Invloed tijdsafhankelijkheid

In het Plan van aanpak [ref. 24] zijn hypothesen opgesteld met betrekking tot de tijdsafhankelijke invloed. De bevindingen met betrekking tot de hypothesen zijn gegeven in de volgende tabel.

Tabel 6.22. Bevindingen hypothesen invloed tijdsafhankelijkheid

code	hypothese	bevinding
T1	Niet het absolute verval over de kwelweglengte is van belang, maar de gradiënt van de waterspanning in de pipe ter plaatse van het uittreepunt.	Op basis van alleen waterspanningsmetingen is zonder het optreden van zandmeevoerende wellen geen bindende uitspraak mogelijk over het tijdsafhankelijke effect.
T2	Het verval (ΔH) voor initiatie van piping mag gereduceerd worden met de verhouding tussen de gradiënten steady en transient flow ter plaatse van het uittreepunt.	Voor hypothese T2 geldt hetzelfde bevinding als voor hypothese T1.
T3	Door het monitoren van de waterspanningen kan aangetoond (onderbouwd) worden dat een reductie van het verval rechtvaardig is.	Middels de monitoringsproef is de reductie van de waterspanningen naar het achterland inzichtelijk gemaakt. Zowel de waterspanningsmeters als de peilbuizen geven een reductie van de stijghoogte in de watervoerende laag ten opzichte van de buitenwaterstand. Voor de rechtvaardiging van de reductie in de piping analyse is echter meer systeembegrip vereist.
T4	Het effect van de variërende buitenwaterstand op het stijghoogteverloop onder de dijk kan zichtbaar gemaakt worden met behulp van het monitoringsprogramma.	Middels de monitoringsproef is het effect van een variërende buitenwaterstand op het monitoringsgebied inzichtelijk gemaakt. Op alle meetlocaties verloopt de stijghoogte in het watervoerende pakket in fase, maar met een vertraging, met de buitenwaterstand. De amplitude neemt daarbij doorgaans af naar het achterland. Het monitoringsprogramma levert daarbij extra informatie over het systeem, te weten de invloed van het polderpeil en de opbouw van het geohydrologisch systeem.

6.2.2. Intreeweerstand voorland

De bevindingen met betrekking tot de intreeweerstand van het voorland zijn opgenomen in Tabel 6.23.

Tabel 6.23. Bevindingen hypothesen intreeweerstand voorland

code	hypothese	bevinding
V1	De aanwezigheid van een geul ter plaatse van het voorland heeft een sterke invloed op de intreeweerstand en daarmee op de gradiënt in de waterspanningen ter plaatse van het uittreepunt.	De analyses die het gehele systeem beschouwen (PlaxFlow en TRWD) vertonen kleine waterspanningsgradiënten in de zone rond de geul en de teen van de dijk. Aangezien de geul tegen de teen aan ligt, blijkt dat het intreepunt voorbij de geul ligt. Daarom beïnvloedt deze het verloop van de waterspanning niet. Het voorland, met bijbehorende geul, heeft echter in zijn geheel een dempende invloed op de stijghoogteamplitude. Nabij de teen van de dijk is de respons van de waterspanningen nog relatief groot. Richting het achterland neemt de respons af, mede door de invloed van het polderpeil. Het gehele geohydrologische systeem beïnvloed daardoor de gradiënt ter plaatse van het uittreepunt.
V2	Het effect kan zichtbaar gemaakt worden met een monitoringsprogramma en uitvoerige geohydrologische studie door een locatie met en zonder een geul te beschouwen.	Deze hypothese kan op basis van voorliggend rapport niet onderbouwd worden. Hiervoor is de meetdata en afstemming met het monitoringsprogramma ter plaatse van km 2,4 nodig.

6.2.3. Onzekerheden in uitgangspunten

Met betrekking tot de onzekerheden in de uitgangspunten is in het Plan van aanpak [ref. 22] één hypothese opgesteld. De bevindingen zijn gegeven in Tabel 6.24.

Tabel 6.24. Bevindingen hypothese onzekerheid uitgangspunten

code	hypothese	bevinding
U1	Op basis van de monitoringsproef worden de onzekerheden in de aan te houden uitgangspunten (invoerparameters) verkleind.	De belangrijkste onduidelijkheid was de mate van pipinggevoeligheid van de ondergrond. Het was onzeker of de aangetroffen slecht doorlatende laag wel doorlopend, en daarmee pipinggevoelig, is. Op basis van de responsmetingen is de onzekerheid op dit vlak weggenomen. De respons van de waterspanningen in het watervoerende pakket op de buitenwaterstand is relatief constant; de gemeten stijghoogten vertonen een demping van de amplitudes en een vertraging richting het achterland. Richting het achterland neemt de demping toe. De toename van de demping is echter tweeledig: 1) door de weerstand die de stroming ondervindt richting het achterland, dempt de amplitude uit en 2) door een hoog polderpeil wordt het gebied bij een lage waterstand in de Waddenzee de waterspanningen "gevoed" vanuit het achterland waardoor de waterspanningen niet slechts reageren op de buitenwaterstand. Omdat er geen 'ontspanning' plaatsvindt ter plaatse van de sloot, is er zeer waarschijnlijk een doorlopende, slecht doorlatende laag aanwezig. Indien er sprake zou zijn van ontspan-

code	hypothese	bevinding
		<p>ning, dan dient de stijghoogte van zowel de waterspanningsmeter direct naast de sloot als in het achterland de waarde van het polderpeil aan te nemen. Dit laatste is niet het geval.</p> <p>Daarnaast is er een slechte correlatie tussen de fluctuatie van het slootpeil met de waterspanningen, en tussen de waterspanningen onder en boven de slechtdoorlatende laag. Deze observatie geeft aan dat er twee gescheiden systemen zijn. Deze scheiding kan alleen veroorzaakt worden door de aanwezigheid van een afsluitende laag.</p> <p>Bovenstaande bevindingen worden tevens ondersteund door de opgestelde geotechnische langs- en dwarsprofielen.</p>

6.3. Beslissen

6.3.1. Optimalisatie VKA

De stap 'Beslissen' bestaat doorgaans uit het genereren van mogelijke (versterking)maatregelen en het selecteren van het VKA.

Door het in rekening brengen van het tijdsafhankelijke effect is met de vigerende pipingregel (Sellmeijer I) geen kwelweglengtetekort aanwezig. Op basis van Sellmeijer II voldoet de waterkering niet volgens de gevolgde methoden.

Verschuivende aspecten die positief bijdragen aan de weerstand tegen piping zijn niet meegenomen in de pipinganalyse, zoals: de dikte van de afsluitende laag en de heterogeniteit van de ondergrond. Deze aspecten zijn toegelicht in paragraaf 7.1. Met in achtnaam van deze aspecten, is tijdens de workshop van november 2014 besloten dat het niet nodig is om een versterkende maatregel toe te passen om piping tegen te gaan. De dijk voldoet dan namelijk ook voor de verwachte opzet van de komende toetsronde.

De basis van deze beslissing is dat de positie van de geulrand op de huidige afstand van de dijk gehandhaafd wordt. Het vastleggen van de positie van de geulrand door middel van bestorting is dus een te nemen maatregel. De damwand als versterkingsmaatregel tegen piping in het huidige VKA mag dan vervallen.

6.3.2. Onzekerheden

Naar aanleiding van het monitoringsprogramma met bijbehorende analyses zijn niet alle onzekerheden weggenomen. Deze onzekerheden beïnvloeden deels de beslissing. Gezien het karakter van de monitoringsproef zijn in deze paragraaf ideeën opgenomen om de onzekerheden beter te onderbouwen.

Tabel 6.25. Resterende onzekerheden

Oorsprong onzekerheden	Onzekerheden
systeembegrip	<p>De volgende onzekerheden betreffen het systeembegrip:</p> <ul style="list-style-type: none"> - dikte watervoerend pakket; - stijghoogteverloop in voorland (bepalen intreepunt); - geometrie, dikte en ligging afdekkende laag.

6.4. Doen

In de workshop van 17 november 2014 zijn de gevolgde onderzoeksmethoden en de resultaten en onzekerheden besproken. Vanuit de experts op het gebied van piping is de conclusie getrokken dat er voldoende zekerheid is om te zeggen dat de onderzochte dijk in de huidige staat voldoet aan de norm betreffende piping en dat deze met het verwachte toetsinstrumentarium in de toekomst ook voldoet. Het aanbrengen van een versterkende maatregel in de dijk zoals een damwand is dus niet nodig om piping tegen te gaan. Om zeker te zijn van de locatie van de geulrand en daarmee het intreepunt, wordt geadviseerd om de geul vast te leggen door het aanbrengen van een bestorting.

7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

7.1. Conclusies

Pipinggevoeligheid ondergrond

Uit de grondboringen en sonderingen lijkt een afsluitende laag afwezig (bijlage I). De metingen van de waterspanningen in de laag boven het watervoerende pakket en het PlaxFlow-model laten zien dat de twee lagen geohydrologisch gescheiden zijn. Dit bevestigt de aanwezigheid van een afsluitende laag. Op basis van de analyse van de bodemopbouw en de responsmetingen is geconcludeerd dat piping een reëel gevaar is.

Methoden schematiseren stijghoogteverloop

Vijf verschillende methoden zijn vergeleken om de waterspanningen in het watervoerende pakket te voorspellen/schematiseren tijdens ontwerpomstandigheden op basis van responsmetingen. De methoden zijn gevalideerd op een storm. De validatie maakt het mogelijk om een uitspraak te doen over het stijghoogteverloop over de waterkering onder maatgevende omstandigheden.

Een uitspraak over de 'beste' methode is lastig. PlaxFlow geeft voor dit project de beste overeenkomst met de gemeten waarden, maar heeft de meeste input nodig, welke bij ieder volgend project afgeleid zal moeten worden. Directe extrapolatie geeft bij stormsituaties consequent lagere waarden vergeleken met de metingen, en is daarom het minst betrouwbaar. Om een uitspraak over de andere methoden te doen zouden deze toegepast en vergeleken moeten worden bij andere projecten in andere situaties.

De belangrijkste conclusie is dat de validatie laat zien dat de gemeten stijghoogten binnen het bereik van de met de verschillende methoden geëxtrapoleerde stijghoogten vallen. Hierdoor valt met een grote zekerheid te zeggen dat de combinatie van methoden een bereik van waterspanningen geven waarbinnen het verwachte waterspanningsverloop valt.

Veiligheid tegen piping

De benodigde kwelweglengte is berekend conform de vigerende rekenregel (Sellmeijer I) en het ORZW (Sellmeijer II). De aanwezige kwelweglengte is aangenomen op 80,4 m. Het uittreepunt is gekozen ter plaatse van de binnenteensloot en het intreepunt ter plaatse van de geulrand. De locatie van het intreepunt volgt uit de analyse van het verloop van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket. De analyses laten een duidelijke remmende werking van het voorland zien. Om deze remmende werking van het voorland in de toekomst te blijven garanderen, is het van belang dat de locatie van de geul gehandhaaft blijft.

Zonder het in rekening brengen van het tijdsafhankelijke effect voldoet de waterkering niet aan het faalmechanisme piping. Door het tijdsafhankelijke effect mee te nemen in de pipinganalyse volgt met Sellmeijer I dat de huidige kwelweglengte voldoet. Naast het fixeren van de geul is het nemen van een versterkingsmaatregel, zoals het plaatsen van een damwand niet nodig.

Vooruitblikkend naar de situatie in de toekomst, is te verwachten dat de norm aangepast wordt naar het toetsen van dijken met Sellmeijer II (eventueel met in achtname van het tijdsafhankelijke effect). Op basis van de gepresenteerde analyses blijkt dat de dijk niet voldoet, maar dan zijn de volgende positieve aspecten nog niet meegenomen:

- de dikte van de afdekkende laag (d) is in de analyse aangenomen als 0 m terwijl er wel een afsluitende laag aanwezig is. Het onderzoeken en meenemen van de aanwezigheid van een afdekkende laag leidt tot een kleinere benodigde kwelweglengte. Een af-

- sluitende laag van 1,7 m leidt bijvoorbeeld tot een reductie van het verval van 0,5 m, en circa 10 m verschil in kwelweglengte;
- de veiligheidsnorm van Ameland gaat vermoedelijk omlaag en vanwege de vrij korte dijktrajectlengte is op basis van het Ontwerpinstrumentarium 2014/WTI 2017 geen hogere veiligheidsfactor dan de nu gebruikte 1,2 te verwachten. Neutraal dus wat betreft de pipingformule, uitgaande van de overgang naar Sellmeijer II. De normwaterstand wordt eerder iets gunstiger dan ongunstiger door de lagere veiligheidsnorm;
 - de heterogeniteit van de grond heeft een positief effect op de toelaatbare kwelweglengte van de dijk. Onderzoek naar het effect van heterogeniteit op piping is nog niet afgerond, maar de eerste conclusies op dit vlak laten zien dat in een heterogene samenstelling van de grond kwelvorming meer weerstand ondervindt. In de analyse is uitgegaan van een homogene grondsamenstelling.

Op basis van de gepresenteerde analyse en de bovenstaande positieve factoren die niet meegenomen zijn in de analyse, is geconcludeerd dat de getoetste dijksectie ook bij de eerstvolgende toetsing zal voldoen aan de gestelde eisen wat betreft piping.

Workshop 17 november 2014

Bovenstaande conclusies zijn tot stand gekomen tijdens de workshop van 17 november 2014 en onderschreven door de aanwezigen.

7.2. Aanbevelingen

De volgende aanbevelingen worden gedaan:

- de damwand als versterkingsmaatregel in het huidige VKA is niet nodig;
- fixeren van de geul op een minimale afstand van 14 m van de teen van de dijk, door bijvoorbeeld het aanbrengen van een bestorting. De bestorting moet voldoende weerstand bieden tegen de hydraulische condities (stromingen en golven);
- nader onderzoek doen naar de geul en de aanwezigheid van de sliblaag in de toekomst om het PlaxFlow model verder te verfijnen;
- naar aanleiding van het monitoringsprogramma met bijbehorende analyses zijn niet alle onzekerheden (zoals: dikte watervoerend pakket, stijghoogteverloop in voorland en geometrie, dikte en ligging afdekkende laag) weggenomen. Aanvullend onderzoek leidt waarschijnlijk niet tot een andere veiligheidsbeoordeling, maar biedt wel meer inzicht in de hypothesen;
- het is niet gelukt om te bepalen welke van de beschouwde methoden overtuigend het beste resultaat geeft. Aanbevolen wordt om voor meerdere pipinglocaties de methoden toe te passen.

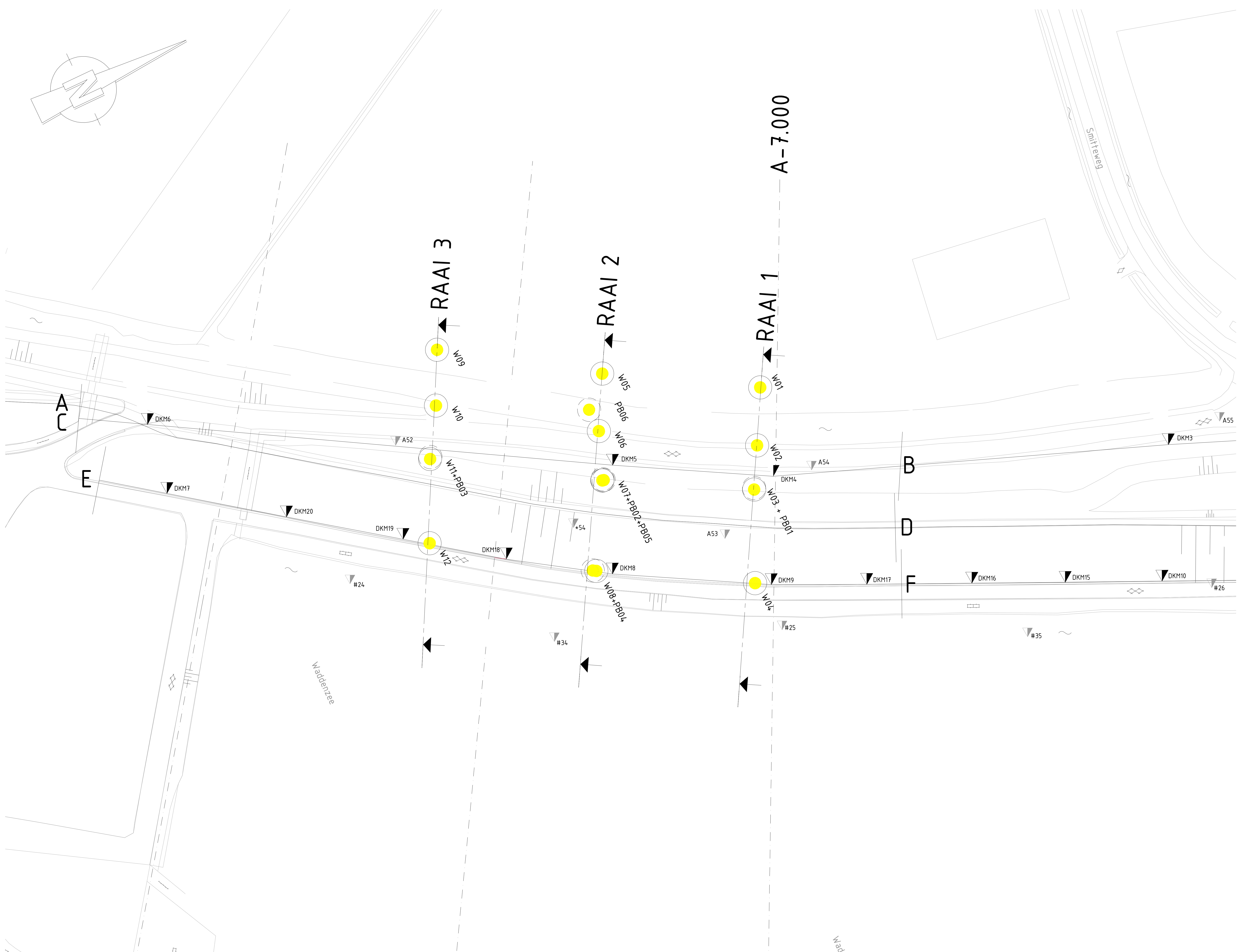
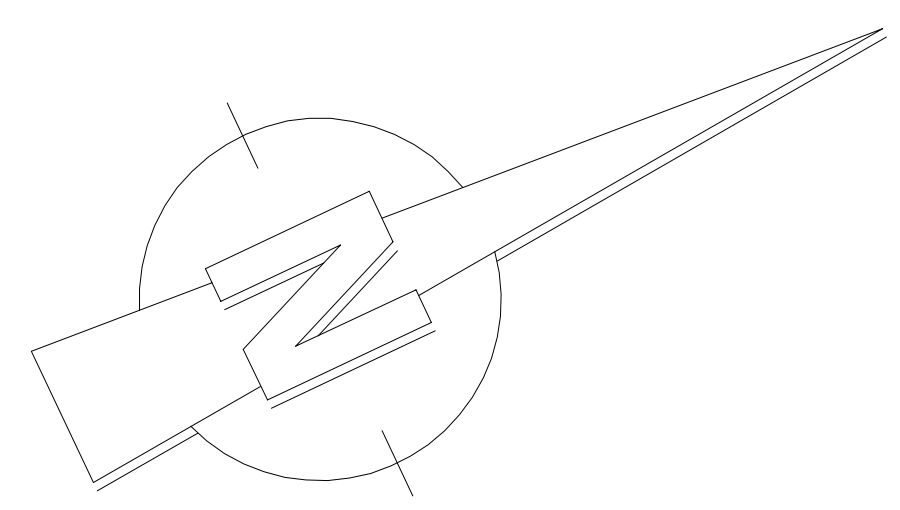
8. REFERENTIES

1. Bauduin en Barends (1988), Getijde-respons in grondwater onder Nederlandse dijken, H₂O, nr.1.
2. Bligh, W.G. (1910), Dams Barrages and Weirs on porous foundations, Engineering news, p708.
3. Deltares (2011), Hydraulische randvoorwaarden voor Ameland en de Friese kust, kenmerk 1204042-000-HYE-0004.
4. Deltares (2011), Toepassing vigerende en nieuwe pipingregels op Ameland, kenmerk: 1204707-000-GEO-0003.
5. Deltares (2011), Toepassen vigerende en nieuwe pipingregel op Ameland, versie 01 d.d. juli 2011.
6. Fugro (2011), Geotechnisch onderzoek langs de dijk nabij Nes (Ameland), Rapport 5011-0275-000.R01.
7. Fugro (2012), Waterspanningsmetingen dijk nabij Nes (Ameland), Rapport 5011-0275-002.
8. Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007), Voorschrift toetsen op veiligheid primaire waterkeringen (VTV2006).
9. Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007), Randvoorwaarden primaire waterkeringen voor de derde toetsronde (2006-2011), augustus 2007.
10. Rijkswaterstaat (2013). Werkwijzer piping, d.d. 19 december 2013.
11. Rijkswaterstaat (2012). Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen.
12. Senhorts, H. (2014). Memo Analyse waterspanningsmetingen Ameland.
13. Smith, Steven W. (2003). Digital signal processing: a practical guide for engineers and scientists. Newnes.
14. TAW (2009), Leidraad zee en meerdijken.
15. TAW (2004), Technisch rapport waterspanningen bij dijken.
16. Witteveen+Bos (2014), Waddenzeedijk Ameland, Monitoringsproef km 6,8 - km 7,1, Datacontrole tot 15 maart 2013.
17. Witteveen+Bos (2014), Waddenzeedijk Ameland, Monitoringsproef km 6,8 - km 7,1, Datacontrole 15 maart 2013 tot 1 september 2013.
18. Witteveen+Bos (2014), Waddenzeedijk Ameland, Monitoringsproef km 6,8 - km 7,1, Datacontrole 1 september 2013 tot 1 januari 2014.
19. Witteveen+Bos (2014), Waddenzeedijk Ameland, Monitoringsproef km 6,8 - km 7,1, Datacontrole 1 januari 2014 tot 18 augustus 2014.
20. Witteveen+Bos (2014), Waddenzeedijk Ameland, Monitoringsproef km 6,8 - km 7,1, Datacontrole 17 juli 2014 tot 31 juli 2014.
21. Witteveen+Bos (2014), Waddenzeedijk Ameland, Monitoringsproef km 6,8 - km 7,1, Datacontrole 18 augustus 2014 tot 16 november 2014.
22. Witteveen+Bos (2015), Waddenzeedijk Ameland, Monitoringsproef km 6,8 - km 7,1, Plan van aanpak.
23. Witteveen+Bos (2013), Ontwerpnotitie versterking Waddenzeedijk Ameland.
24. Witteveen+Bos (2012), Waterspanningsmetingen Waddenzeedijk Ameland, Plan van aanpak (monitoringsplan), referentie AME5-4/zutd/006.
25. Witteveen+Bos (2012), Notitie Afleiding Schematiseringsfactor, project dijkverbetering Ameland d.d. 29 augustus 2012.

BIJLAGE I TEKENINGEN

Tabel I.1. Tekeningenlijst

nummer	omschrijving	formaat
AME5.4.1010	Monitoringsproef Waddenzeedijk Ameland, Traject km 6,8 tot km 7,1, Overzicht geotechnisch onderzoek, Overzicht raaien en doorsneden	A1
AME5.4.1011	Monitoringsproef Waddenzeedijk Ameland, Traject km 6,8 tot km 7,1, Geotechnische lengtedoorsneden	A0
AME5.4.1012	Monitoringsproef Waddenzeedijk Ameland, Traject km 6,8 tot km 7,1, Geotechnische dwarsdoorsneden, Representatieve doorsnede	A0



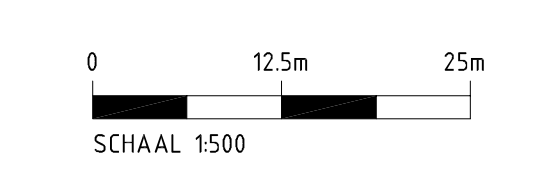
COÖRDINATEN AANLEG SENSOREN

SENSOR	X-COÖRDINAAT	Y-COÖRDINAAT
W01	176924.6	605826.9
W02	176943.1	605816.9
W03	176957.1	605809.1
W04	176987.9	605794.9
W05	176895.6	605777.3
W06	176913.9	605767.3
W07	176930.6	605760.8
W08	176959.3	605744.8
W09	176862.2	605726.9
W10	176880.3	605717.9
W11	176896.9	605707.7
W12	176924.4	605694.5
PB01	176956.6	605809.3
PB02	176930.2	605761.0
PB03	176896.3	605708.1
PB04	176958.6	605743.7
PB05	176930.7	605761.3
PB06	176905.4	605767.4

ALGEMENE LEGENDA

- KILOMETRERING
- ▼ SONDERING
- DKM SONDERING BEHOORT TOT RAPPORT FUGRO 5011-0275-000, d.d. 23-09-2011
- A SONDERING BEHOORT TOT RAPPORT DELTARES CPT-376790, d.d. 04-09-2001
- # SONDERING BEHOORT TOT RAPPORT GRONDLAB DELFT CPT-24730, d.d. 06-06-1979
- * SONDERING BEHOORT TOT RAPPORT GRONDLAB DELFT CPT-247560, d.d. 11-11-1977

DOCUMENT IN BEWERKING
6
10-11-2014

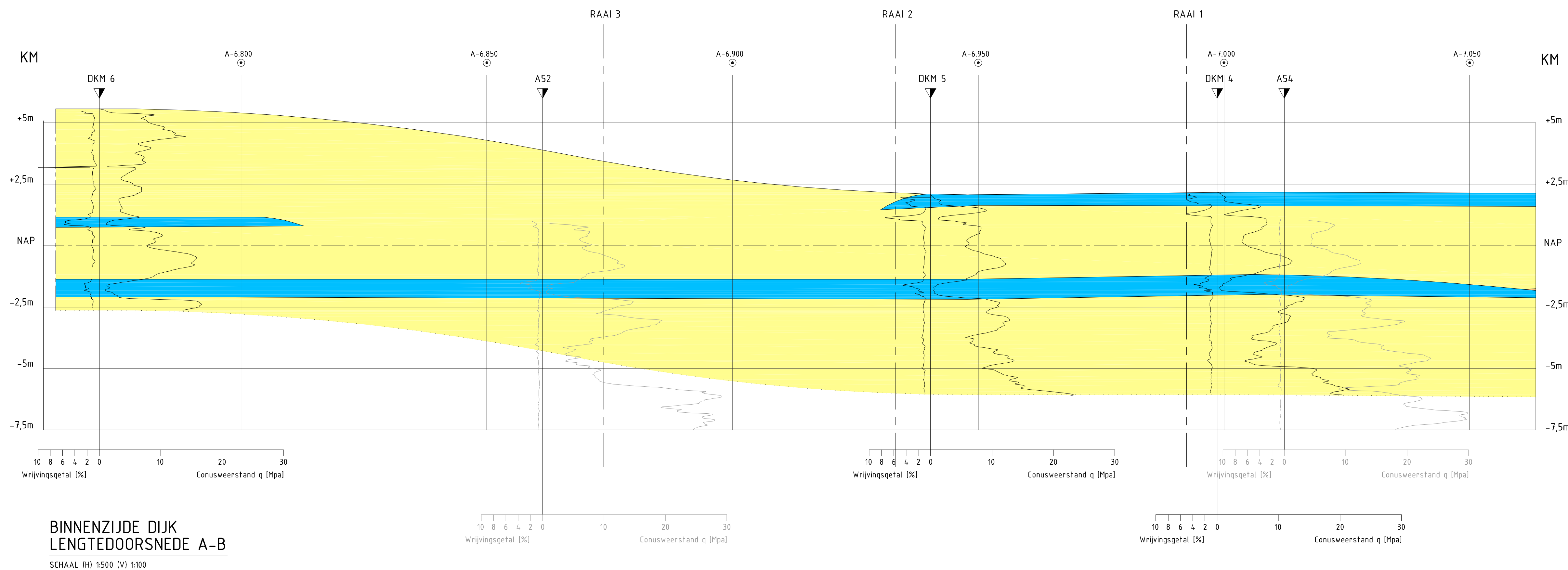


WETTERSKIP FRYSLÂN	S	
MONITORINGSPROEF WADDENZEEDIJK AMELAND	F	
Traject km 6,8 tot km 7,1	D	
Overzicht geotechnisch onderzoek	C	
Overzicht raaien en doorsneden	B	
	A	
	Wingspan	

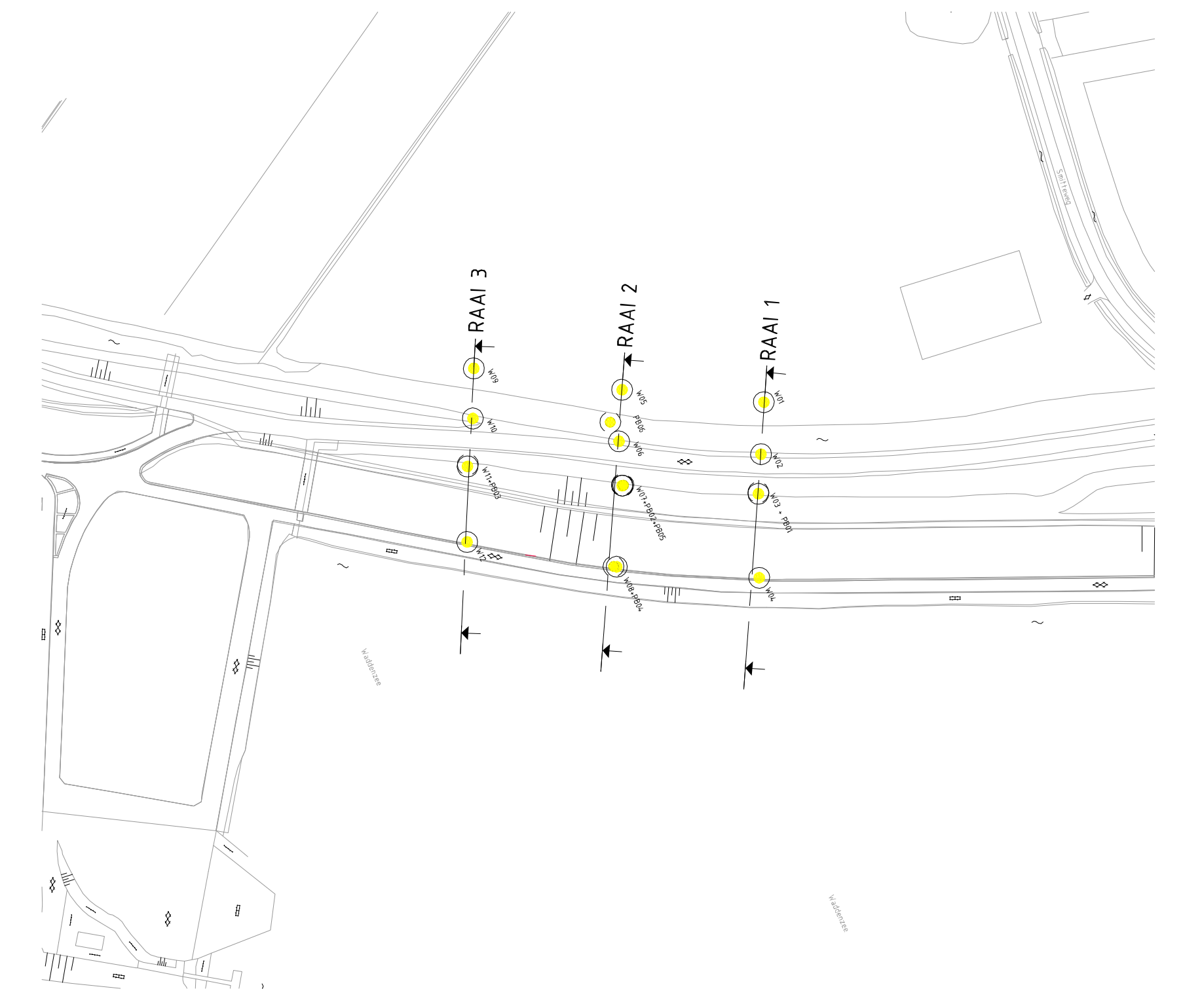
Witteveen+Bos
 Getuend S. Slot
 Gecontroleerd J. Stuis
 Getuend R. Bouw
 Datum 10-11-2014
 Formaat A1
 Schaal 1:100 / 1:500 / 1:2.500
AME5.4.1010

OVERZICHT
SCHAAL 1:500

CAD: D:\...
 10-11-2014
 10-11-2014



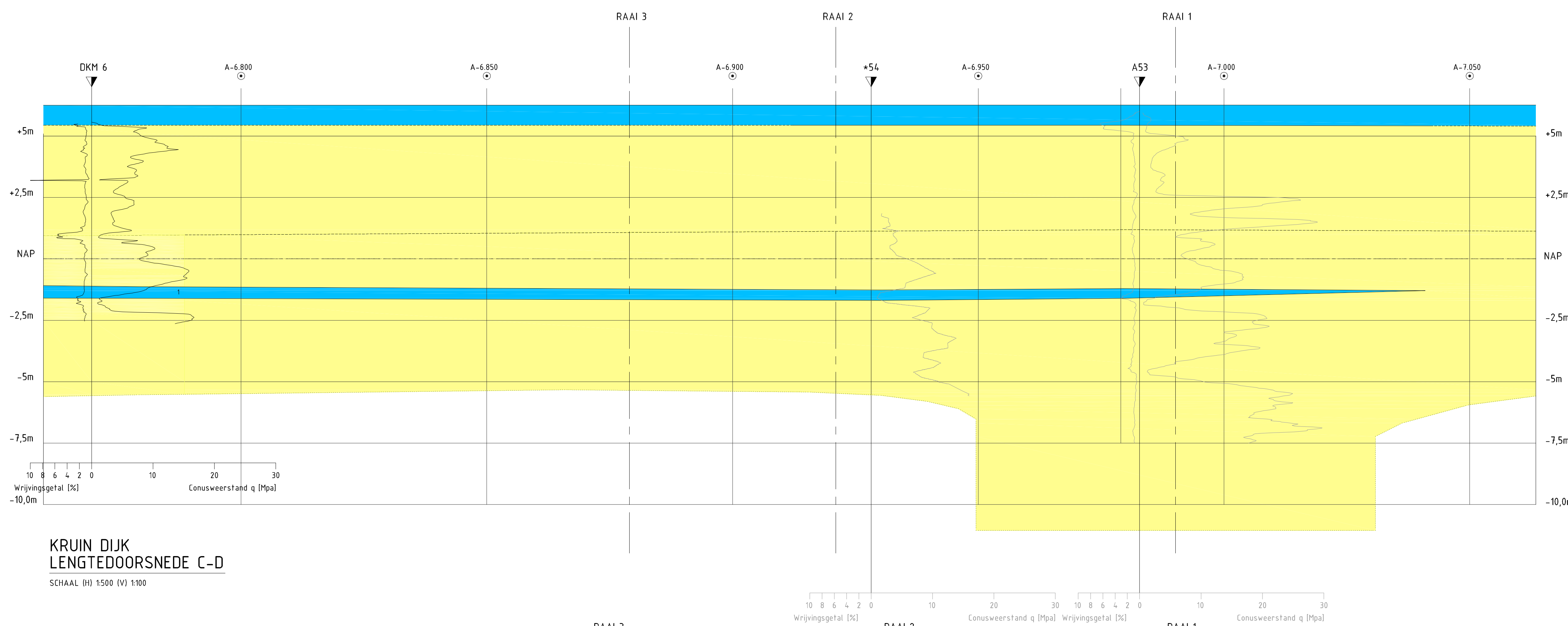
**BINNENZIJDJE DIJK
LENGTEDOORSNEDE A-B**
SCHAAL (H) 1500 (V) 1100



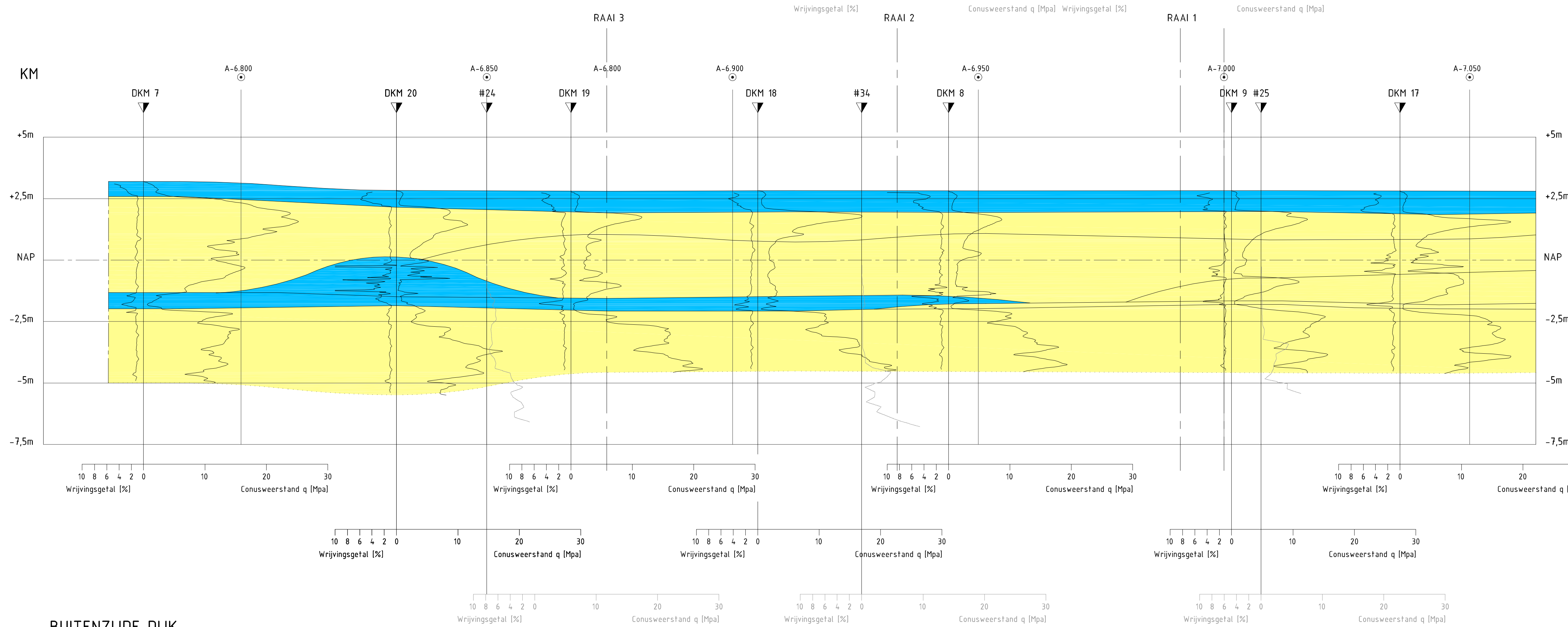
OVERZICHT
SCHAAL 12.000

LITHOSTRATIGRAFISCHE LEGENDA

OA	HOOFDZAKELIJK ZAND
OB	HOOFDZAKELIJK KLEI



**KRUIN DIJK
LENGTEDOORSNEDE C-D**
SCHAAL (H) 1500 (V) 1100



**BUITENZIJDJE DIJK
LENGTEDOORSNEDE E-F**
SCHAAL (H) 1500 (V) 1100

ALGEMENE LEGENDA

- KILOMETRERING
- ▼ SONDERING
- DKM SONDERING BEHOORT TOT RAPPORT FUGRO 5011-0275-000, d.d. 23-09-2011
- A SONDERING BEHOORT TOT RAPPORT DELTARES OPT-376790, d.d. 04-09-2001
- # SONDERING BEHOORT TOT RAPPORT GRONDLAB DELFT OPT-244730, d.d. 06-06-1979
- SONDERING BEHOORT TOT RAPPORT GRONDLAB DELFT OPT-241560, d.d. 11-11-1977

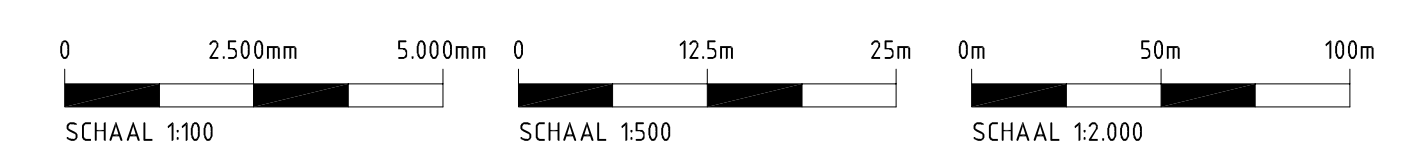
**DOCUMENT IN
BEWERKING**

5

10-11-2014

OPMERKINGEN

- DE GEOTECHNISCHE GEVEGENS ZIJN AFKOMSTIG UIT HET GEOTECHNIECH ONDERZOEK LANGS DE DIJK HADJUNES (AMELAND) UITGEVOERD DOOR FUGRO, OPDRACHTNUMMER 5011-0275-000
- DE TEKENING IS OPGEBOUWD UIT 2 GEOTECHNISCHE LENGTEPROFIELEN. DEZE LOPEN BIJNA PARALLEL AAN ELKAAR MET EEN TUSSENAFSTAND VAN CA. 40 METER.
- PER SONDERING IS EEN EIGEN MEETLAT TOEGEVOEGD, WAARNEE HET WRIJVINGSGETAL EN DE CONUSWEERSTAND IS AF TE LEZEN;
- BIJ HET BEPALLEN VAN DE LAGEN IS DE LITHOSTRATIGRAFISCHE LEGENDA VAN TOEPASSING;
- DE MAATVOERING IS GEGEVEN IN KILOMETERS, UITGAANDE VAN DE KILOMETRERING OP HET DIJKPROFIEL;
- DE HOOGTES ZIJN GEGEVEN IN METERS TEN OPZICHTE VAN N.A.P.



**WETTERSKIP FRYSLÂN
MONITORINGSPROEF WADDENZEE DIJK AMELAND**

Traject km 6,8 tot km 7,1
Geotechnische lengtedoorsneden

BIJLAGE II METHODE TRWD

Raai 2	Golf 1
---------------	---------------

Geometrie gegevens

afstand uit de as van de dijk		
wsm 8	11,4	m
wsm 6	61,7	m
wsm 5	82,5	m
intreepunt uit de as van de dijk		
stationair	110	m
amplitude	200	m

M.H.W. gegevens

golf 1		
duur	45,00	uren
amplitude	3,82	m
golf 2		
duur	6,20	uren
amplitude	1,15	m

Meetgegevens

rivier		
stationair deel	0,03	m
amplitude	2,04	m
duur amplitude	6,20	uren

peilbuizen stijghoogte t.o.v. NAP		
stationair deel WSM8	0,51	m
stationair deel WSM6	0,52	m
stationair deel WSM5	0,52	m
peilbuizen respons		
amplitude WSM8	0,36	m
amplitude WSM6	0,25	m
amplitude WSM5	0,21	m

randvoorwaarde polderzijde t.o.v. NAP		
stijghoogte	0,90	m

Calibratie

lambda meting	
stationair	180
amplitude	124

calibratie respons	
0,46	m
0,56	m
0,60	m
calibratie respons	
0,37	m
0,25	m
0,21	m

lambda M.H.W.	
golf 1	204
golf 2	124

Potentiaalverloop bij M.H.W. zonder opdrijven

bijdrage	stijghoogte op [m] uit as van de dijk						
	-150,0	0,0	11,4	44,2	61,7	82,5	150,0
stationair	-0,19	0,43	0,46	0,53	0,56	0,60	0,69
golf 1	2,99	1,43	1,35	1,15	1,06	0,95	0,68
golf 2	0,77	0,23	0,21	0,16	0,14	0,12	0,07
totaal	3,57	2,09	2,02	1,84	1,76	1,67	1,45

M.H.W.	5,00
--------	------

Raai 2	Golf 2
---------------	---------------

Geometrie gegevens

afstand uit de as van de dijk		
wsm 8	11,4	m
wsm 6	61,7	m
wsm 5	82,5	m
intreepunt uit de as van de dijk		
stationair	150	m
amplitude	150	m

M.H.W. gegevens

golf 1		
duur	45,00	uren
amplitude	3,82	m
golf 2		
duur	6,20	uren
amplitude	1,15	m

Meetgegevens

rivier		
stationair deel	0,03	m
amplitude	2,67	m
duur amplitude	6,20	uren

peilbuizen stijghoogte t.o.v. NAP		
stationair deel WSM8	0,83	m
stationair deel WSM6	0,86	m
stationair deel WSM5	0,89	m
peilbuizen respons		
amplitude WSM8	0,90	m
amplitude WSM6	0,66	m
amplitude WSM5	0,56	m

randvoorwaarde polderzijde t.o.v. NAP		
stijghoogte	0,90	m

Calibratie

lambda meting	
stationair	63
amplitude	148

calibratie respons	
0,83	m
0,87	m
0,88	m
calibratie respons	
0,90	m
0,64	m
0,55	m

lambda M.H.W.	
golf 1	243
golf 2	148

Potentiaalverloop bij M.H.W. zonder opdrijven

bijdrage	stijghoogte op [m] uit as van de dijk						
	-150	0	11,4	44,2	61,7	82,5	150
stationair	0,03	0,82	0,83	0,86	0,87	0,88	0,89
golf 1	3,82	2,06	1,97	1,72	1,60	1,47	1,11
golf 2	1,15	0,42	0,39	0,31	0,28	0,24	0,15
totaal	5,00	3,30	3,18	2,89	2,74	2,58	2,16

M.H.W.	5,00
--------	------

Raai 2	Golf 3
---------------	---------------

Geometrie gegevens

afstand uit de as van de dijk		
wsm 8	11,4	m
wsm 6	61,7	m
wsm 5	82,5	m
intreepunt uit de as van de dijk		
stationair	245	m
amplitude	165	m

M.H.W. gegevens

golf 1		
duur	45,00	uren
amplitude	3,82	m
golf 2		
duur	6,20	uren
amplitude	1,15	m

Meetgegevens

rivier		
stationair deel	0,03	m
amplitude	3,35	m
duur amplitude	45,00	uren

peilbuizen stijghoogte t.o.v. NAP		
stationair deel WSM8	1,02	m
stationair deel WSM6	0,94	m
stationair deel WSM5	0,95	m
peilbuizen respons		
amplitude WSM8	1,53	m
amplitude WSM6	1,19	m
amplitude WSM5	1,06	m

randvoorwaarde polderzijde t.o.v. NAP		
stijghoogte	0,90	m

Calibratie

lambda meting	
stationair	50
amplitude	220

calibratie respons	
0,89	m
0,90	m
0,90	m
calibratie respons	
1,50	m
1,20	m
1,09	m

lambda M.H.W.	
golf 1	220
golf 2	134

Potentiaalverloop bij M.H.W. zonder opdrijven

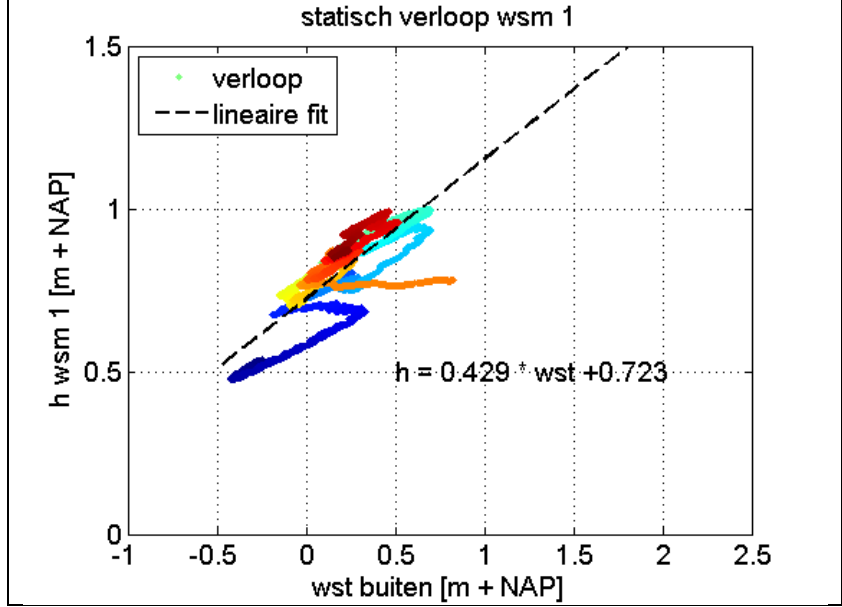
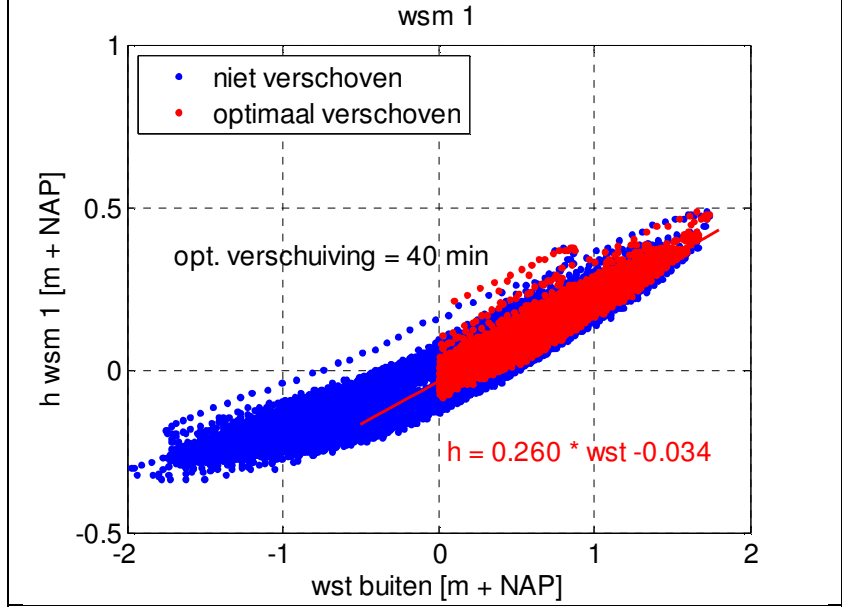
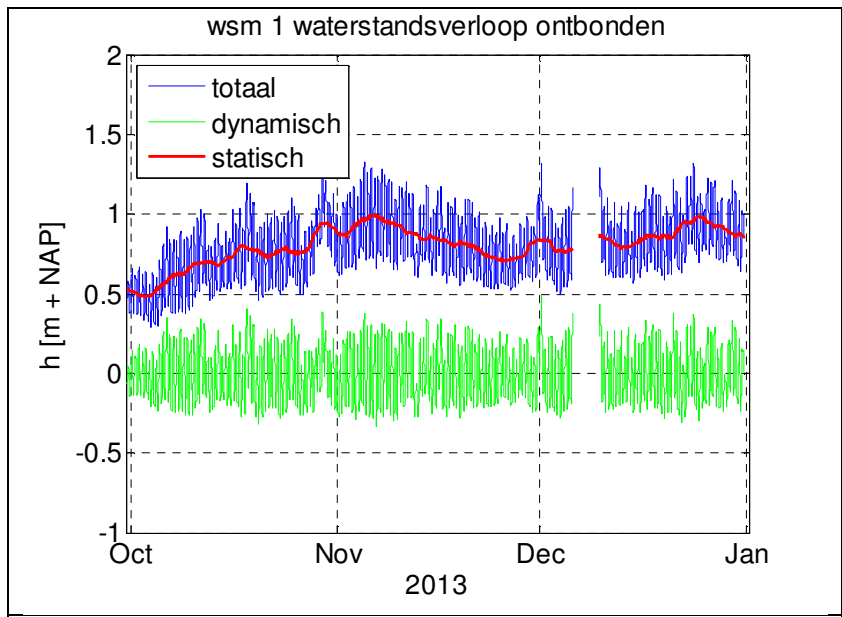
bijdrage	stijghoogte op [m] uit as van de dijk						
	-150,0	0,0	11,4	44,2	61,7	82,5	150,0
stationair	0,77	0,89	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90
golf 1	3,57	1,80	1,71	1,48	1,36	1,24	0,91
golf 2	1,03	0,34	0,31	0,24	0,21	0,18	0,11
totaal	5,37	3,03	2,92	2,61	2,47	2,32	1,92

M.H.W.	5,00
--------	------

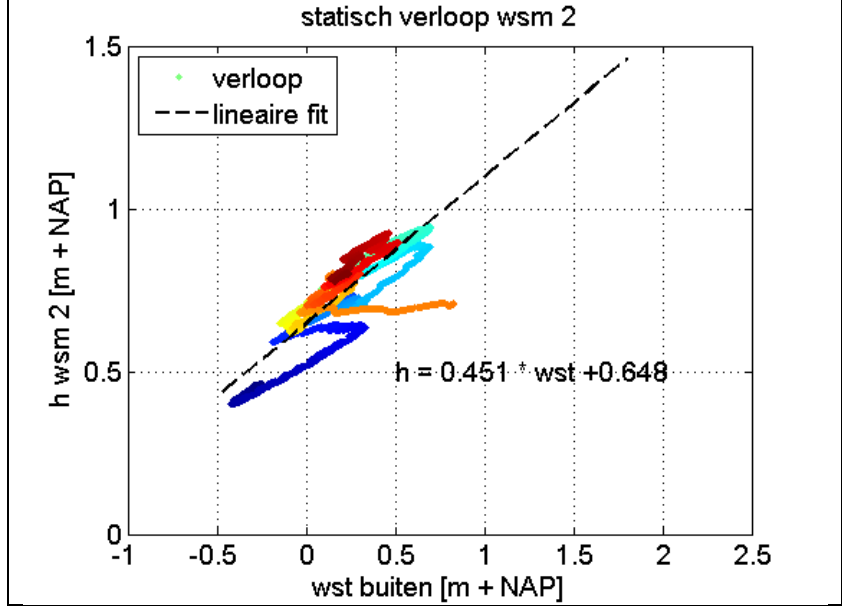
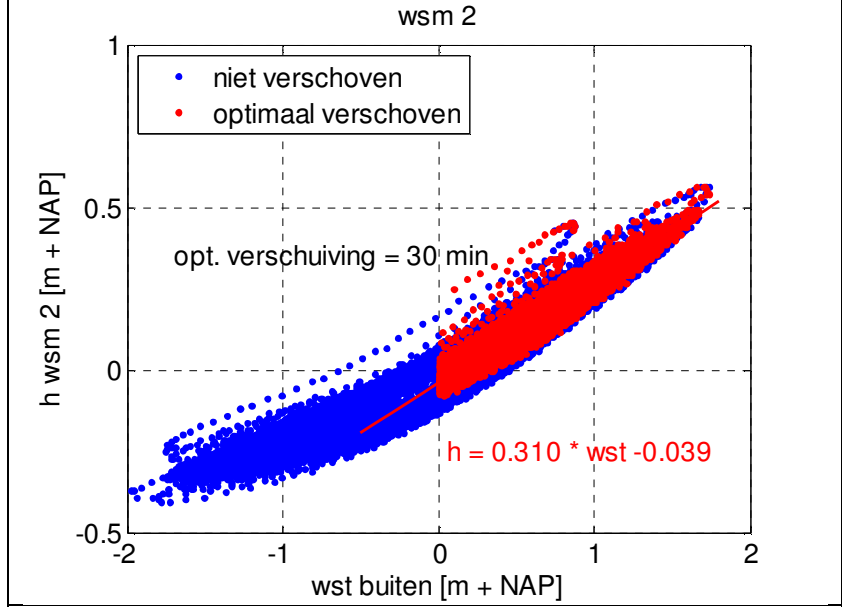
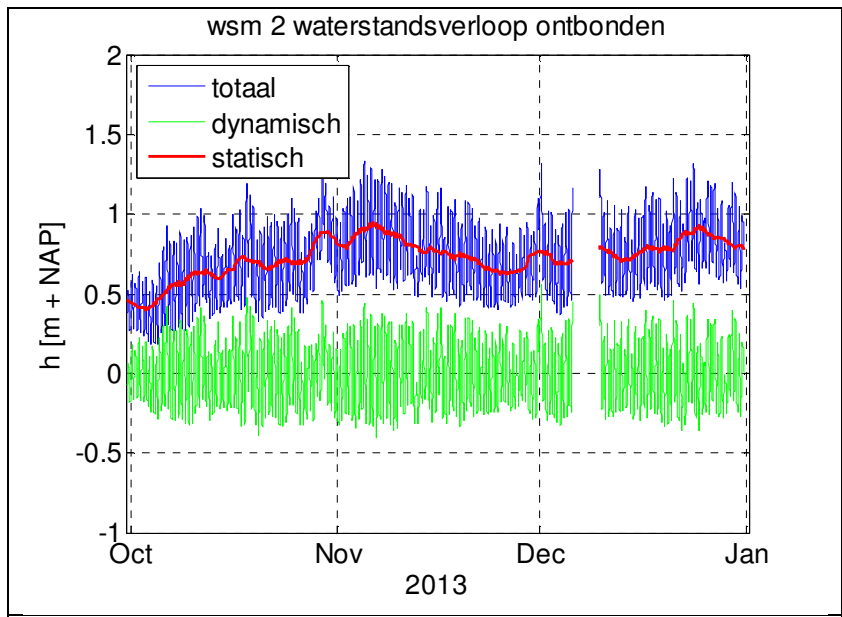
BIJLAGE III METHODE SCHELDESTROMEN

Tabel 1. Overzicht resultaten methode Scheldestromen (origineel)

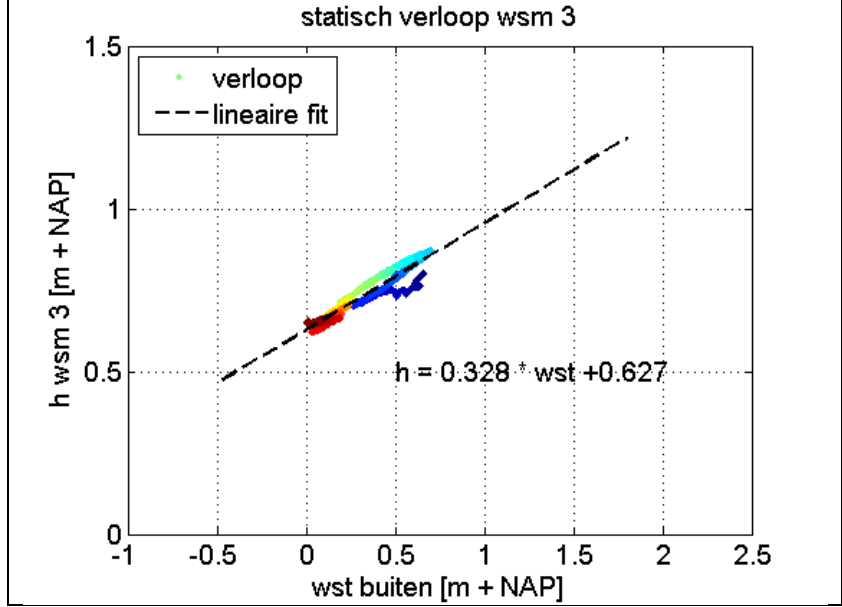
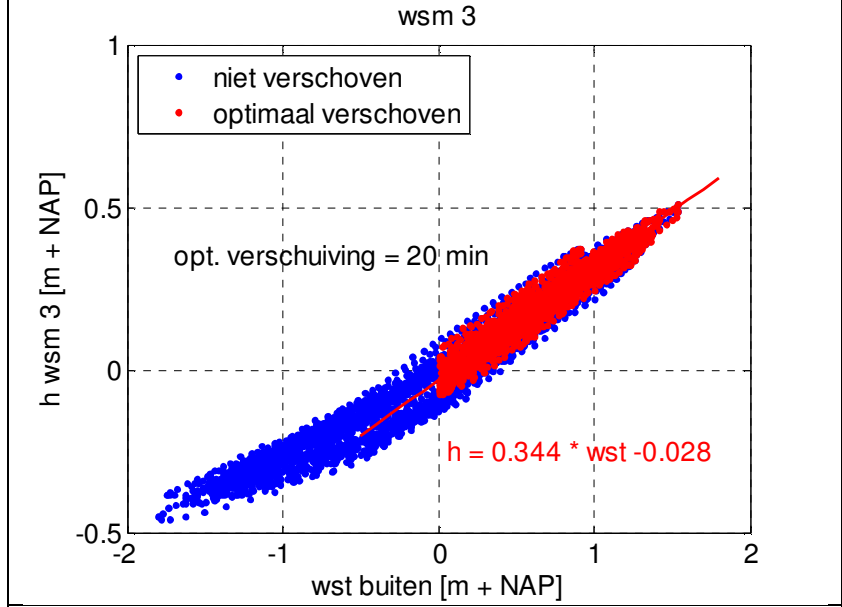
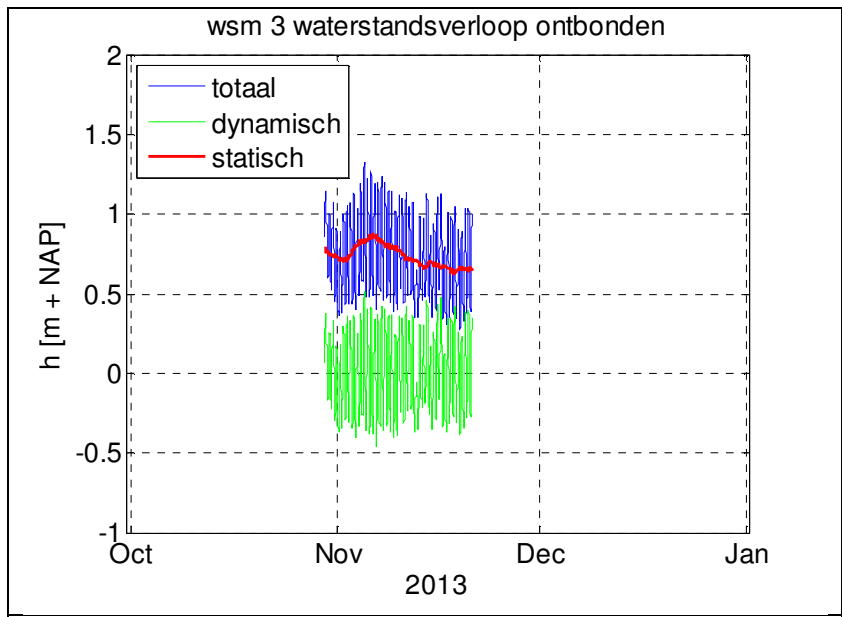
meetreeks	optimale verschuiving [min]	a ₁ (dynamisch)	b ₁ (dynamisch)	a ₂ (statisch)	b ₂ (statisch)	stijghoogte onder MHW- omstandigheden [m+NAP]
WSM01	40	0,260	-0,034	0,429	0,723	2,63
WSM02	30	0,310	-0,039	0,451	0,648	2,69
WSM03	20	0,344	-0,028	0,328	0,627	2,25
WSM04	10	0,448	-0,047	0,521	0,509	2,97
WSM05	40	0,246	-0,039	0,424	0,735	2,60
WSM06	30	0,287	-0,046	0,436	0,719	2,67
WSM07	20	0,335	-0,057	0,442	0,609	2,63
WSM08	10	0,392	-0,066	0,502	0,695	3,00
WSM09	40	0,228	-0,045	0,405	0,669	2,43
WSM10	40	0,254	-0,049	0,411	0,631	2,44
WSM11	30	0,293	-0,046	0,450	0,786	2,80
WSM12	10	0,328	-0,040	0,583	0,689	3,25
PB01	-	0,373	-0,055	0,487	0,614	2,85
PB02	-	0,351	-0,066	0,473	0,671	2,82
PB03	-	0,298	-0,066	0,429	0,667	2,58



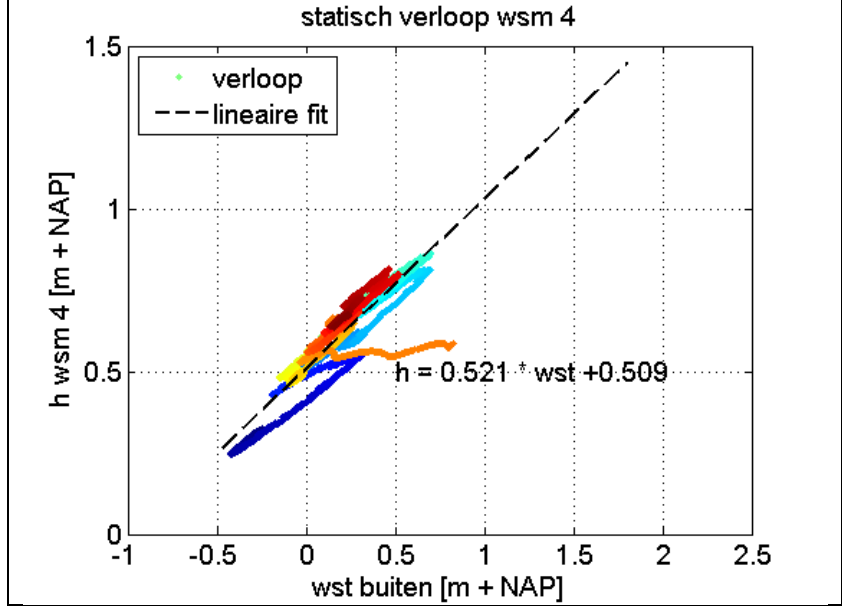
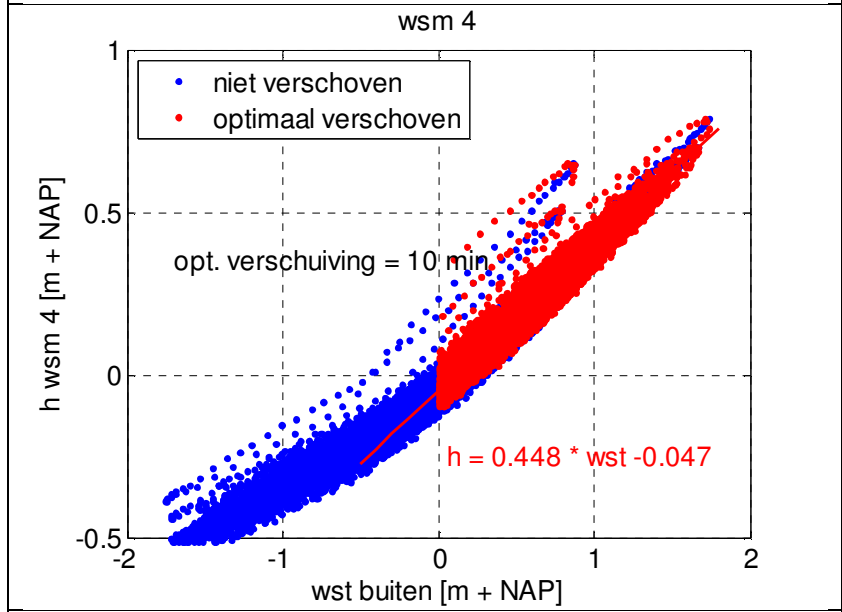
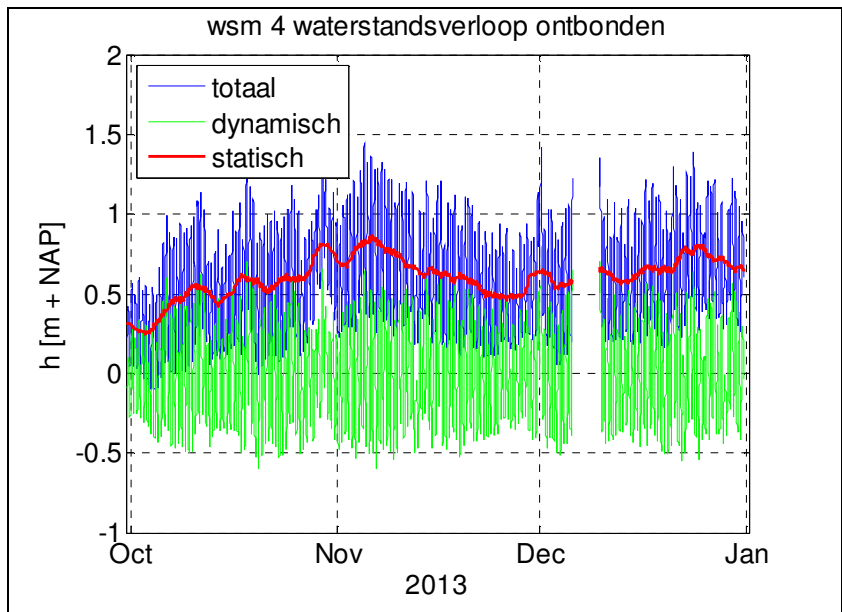
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 1 (WSM01)



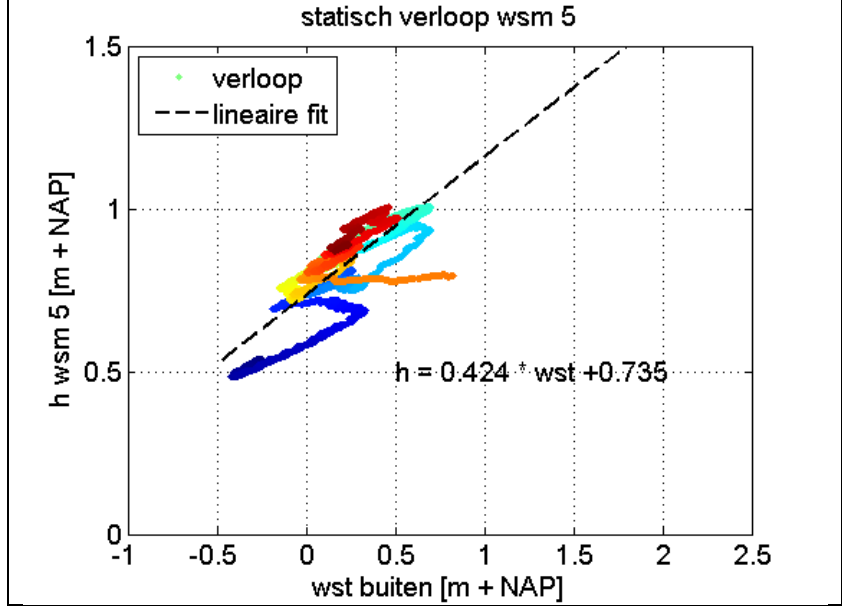
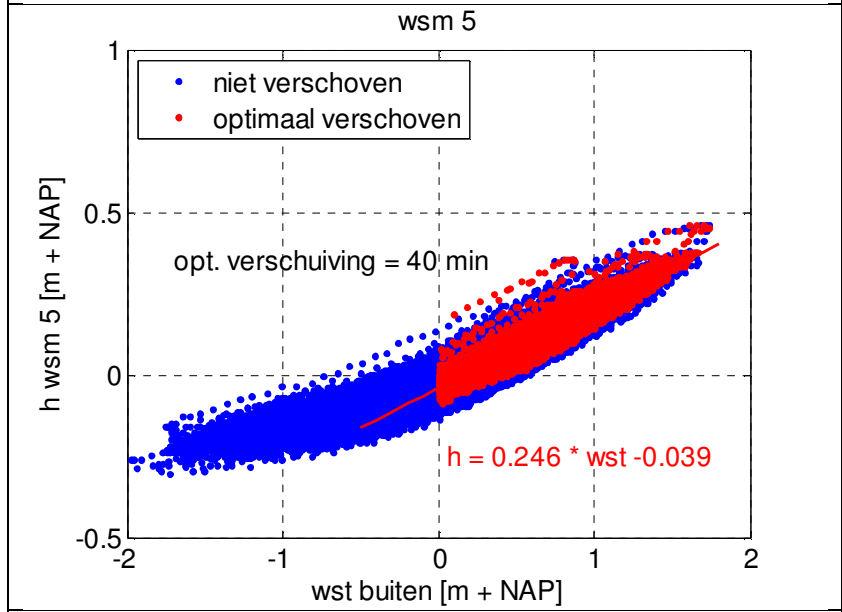
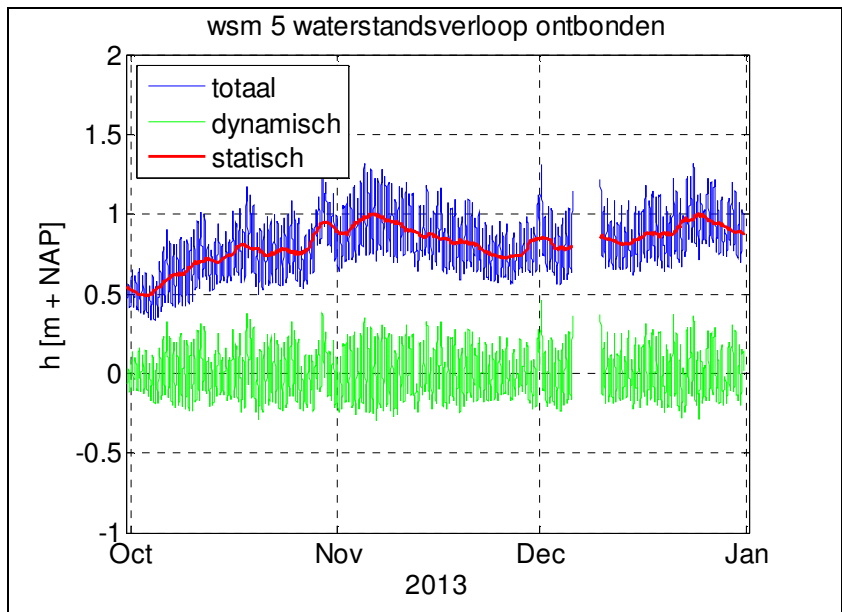
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 2 (WSM02)



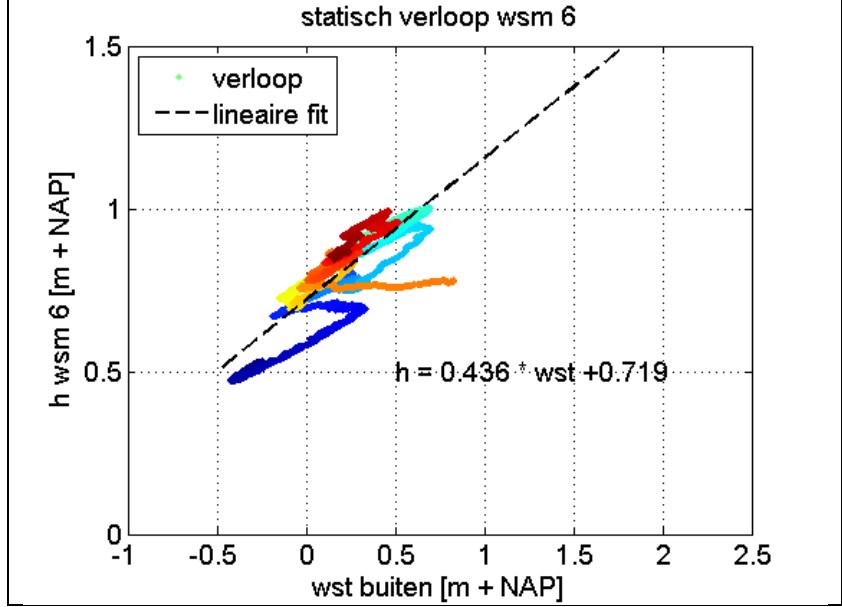
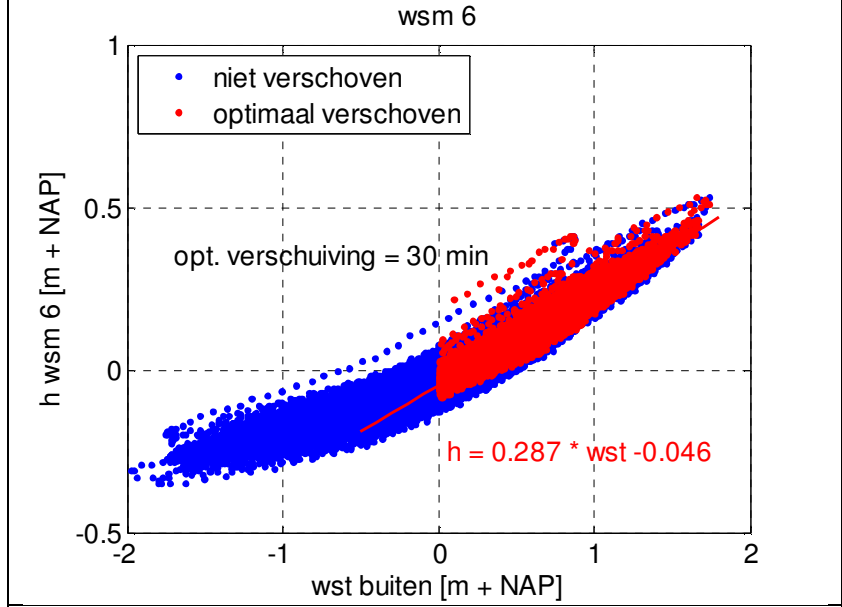
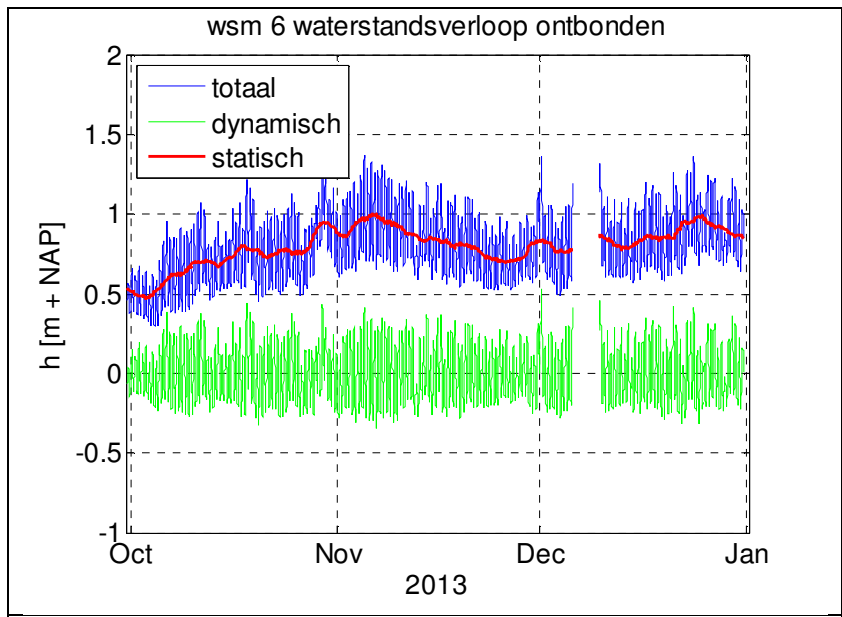
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 3 (WSM03)



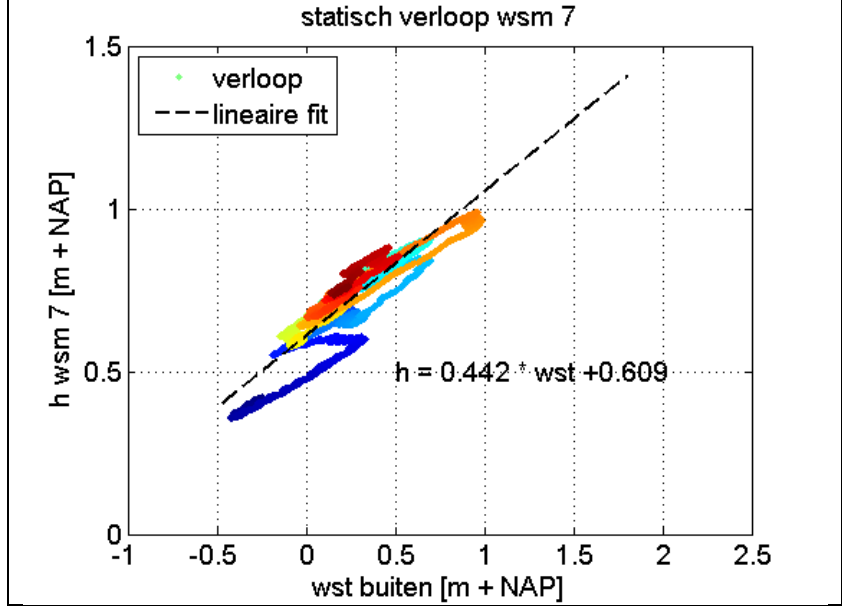
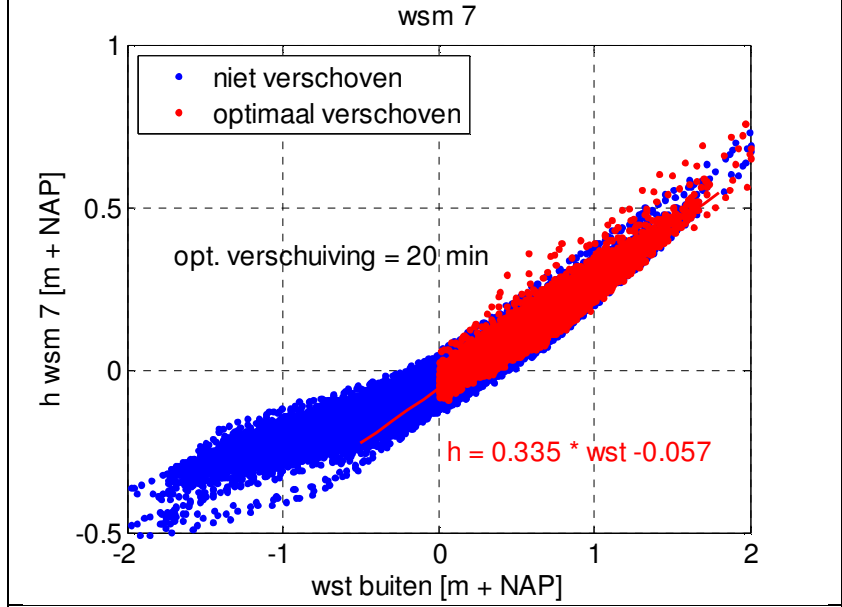
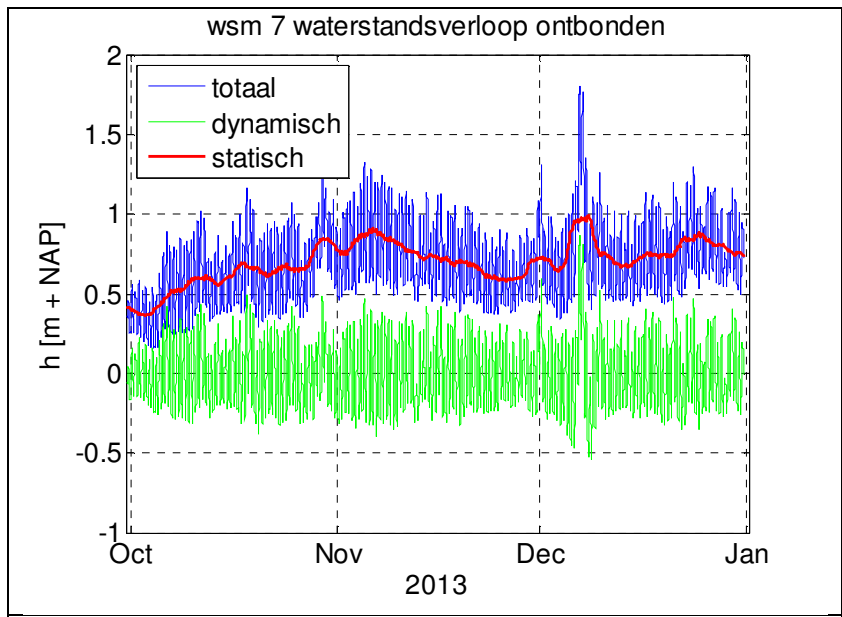
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 4 (WSM04)



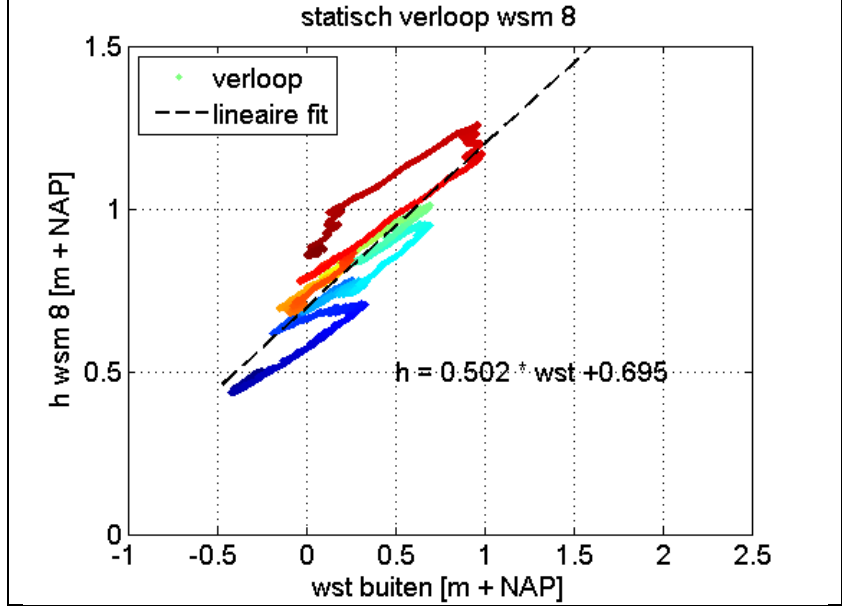
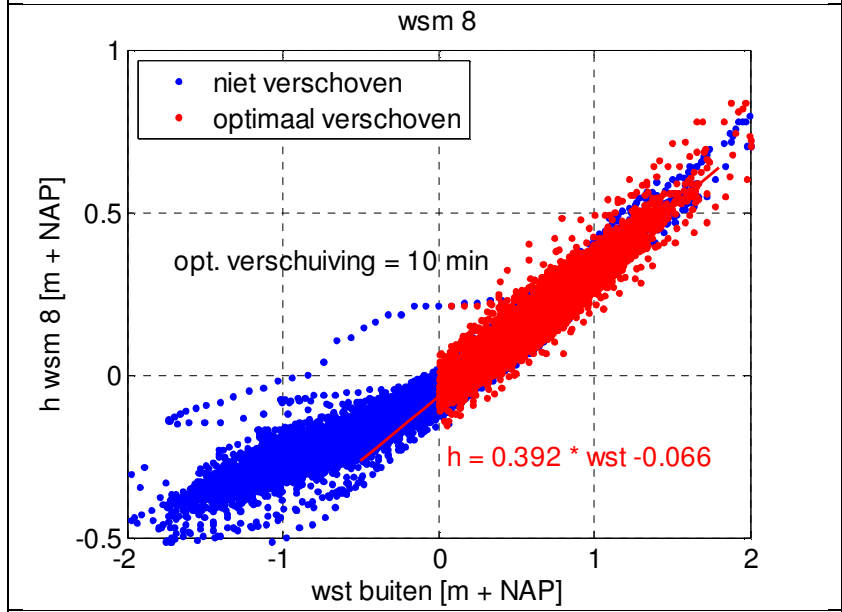
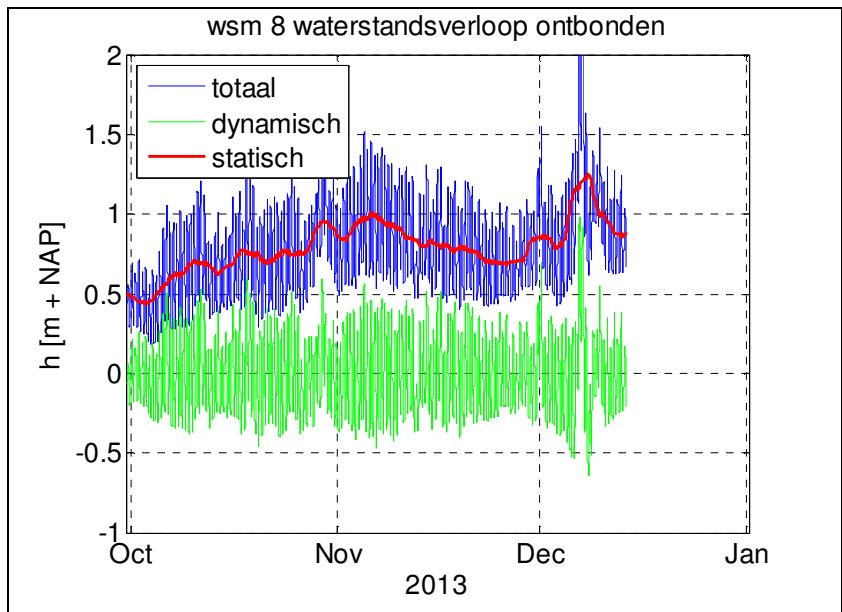
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 5 (WSM05)



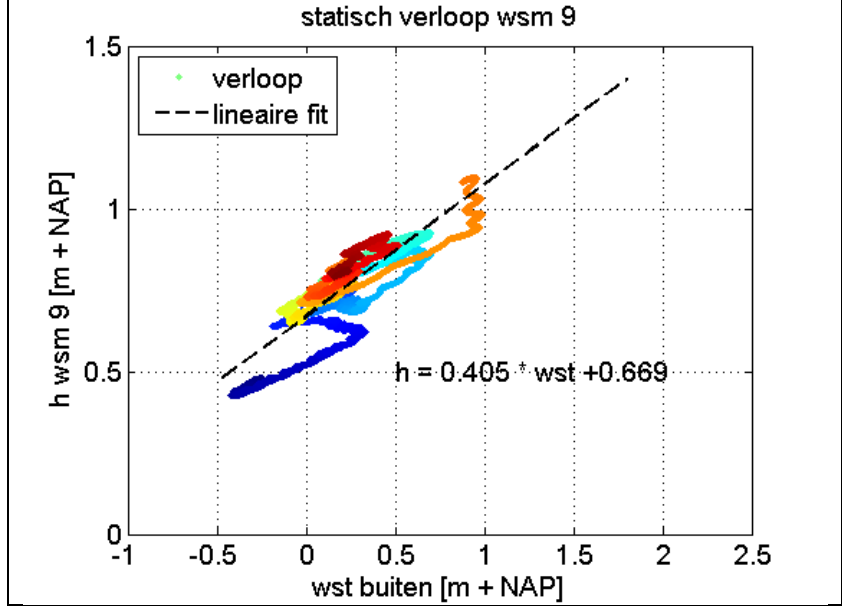
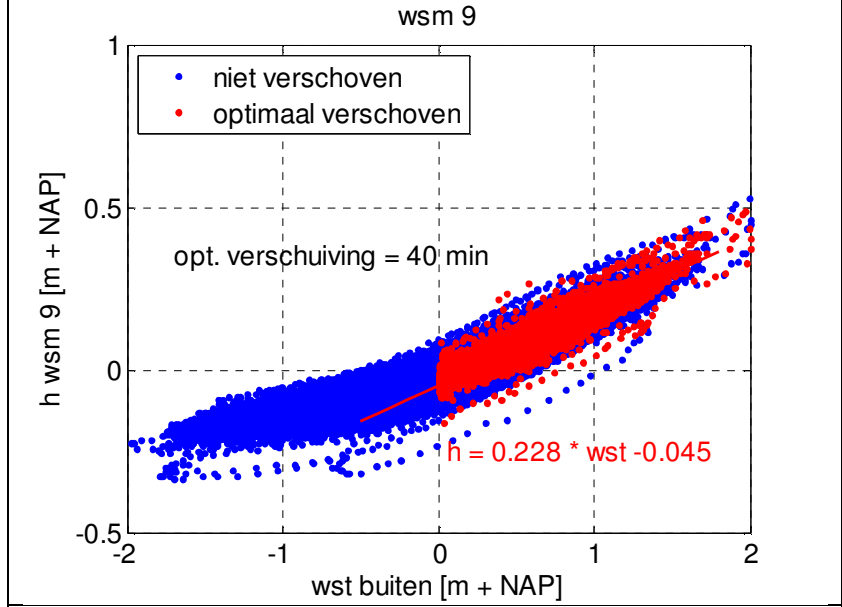
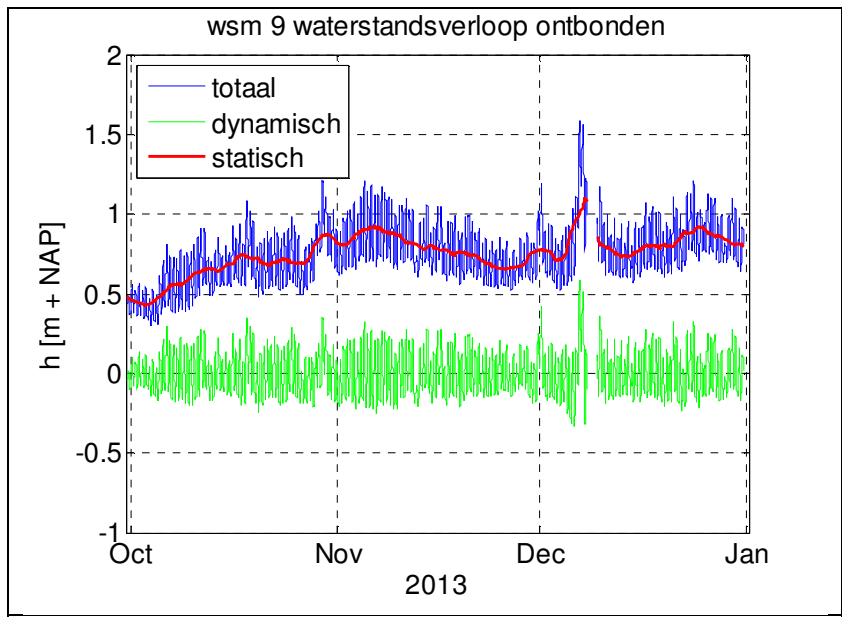
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 6 (WSM06)



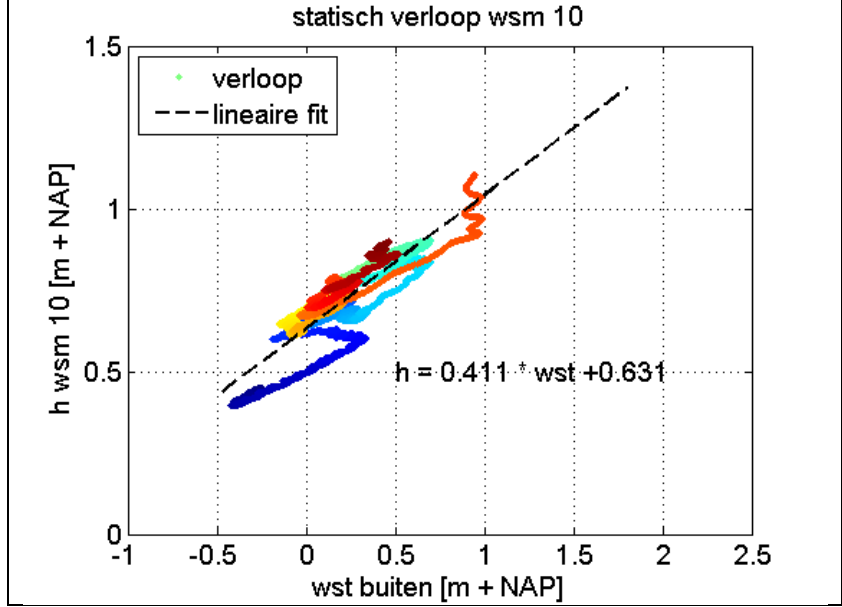
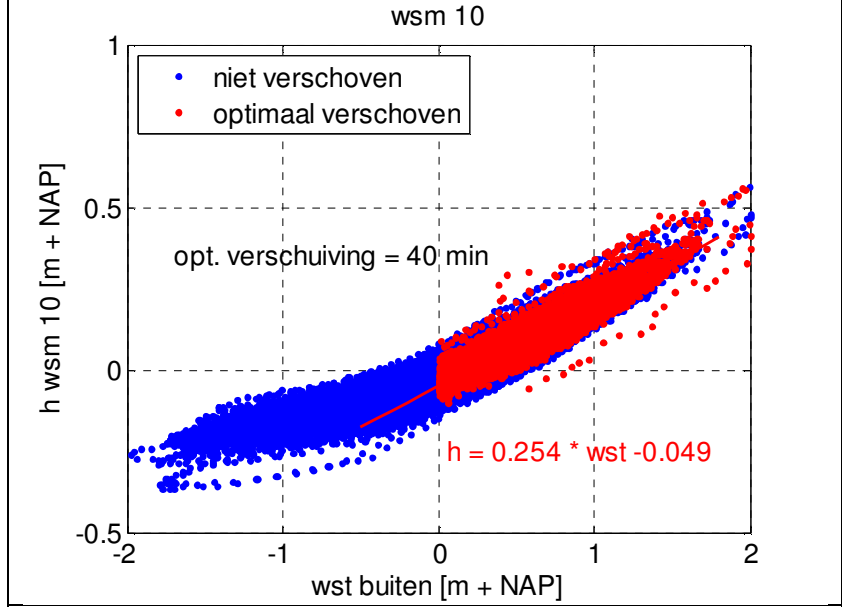
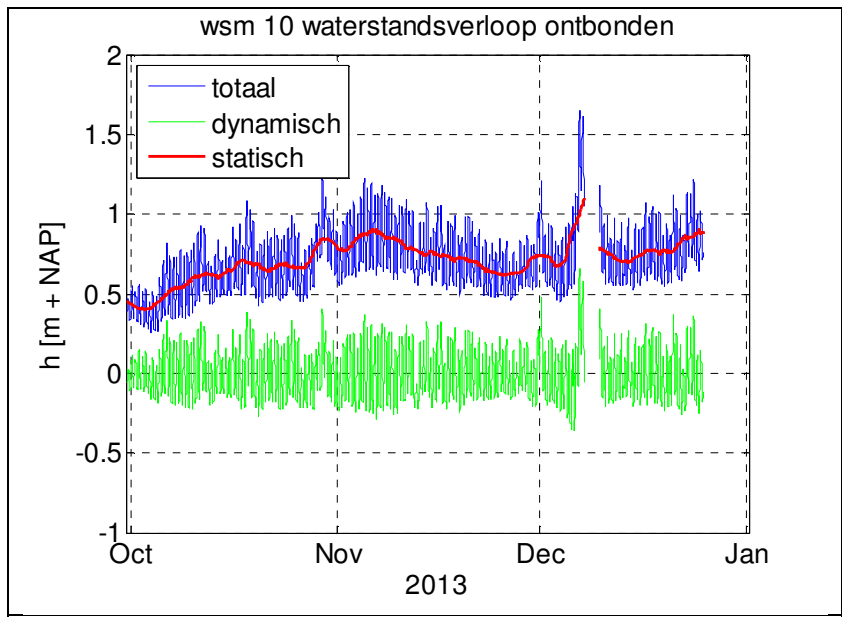
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 7 (WSM07)



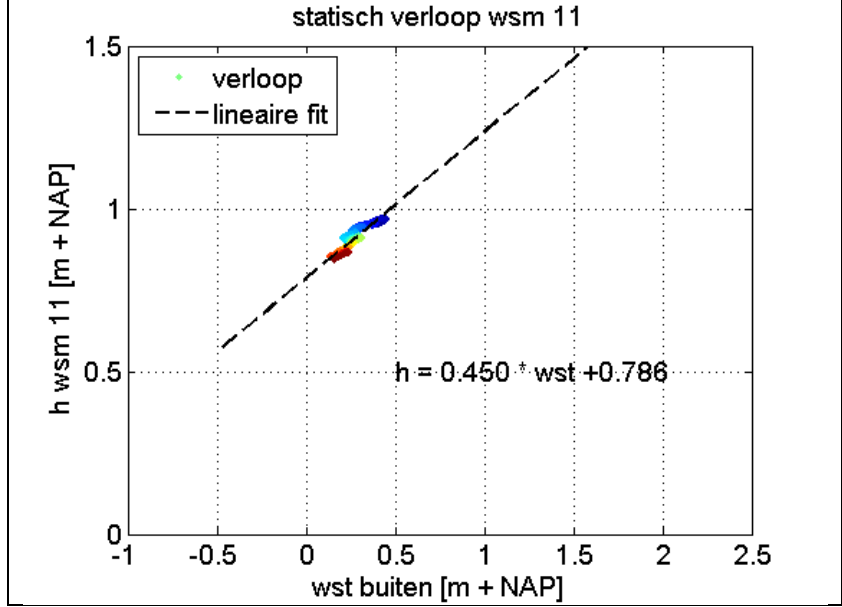
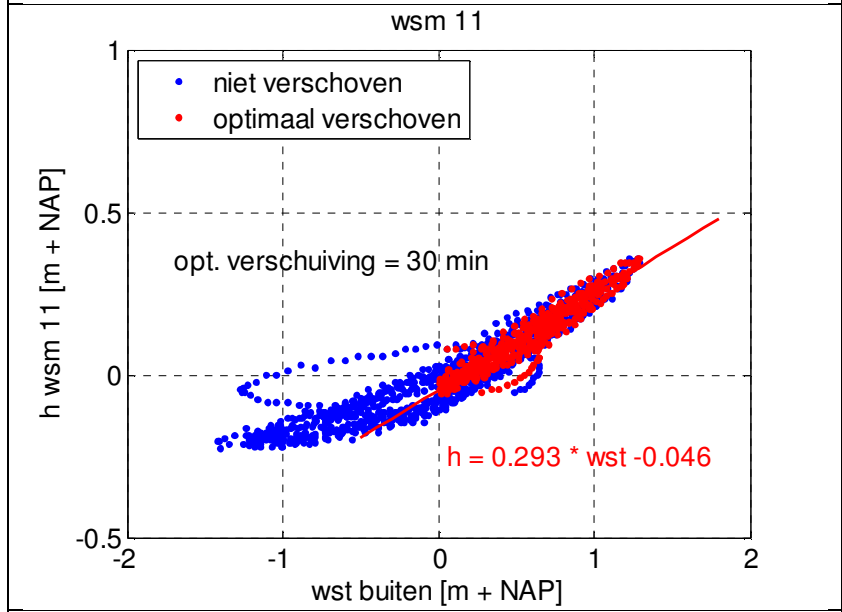
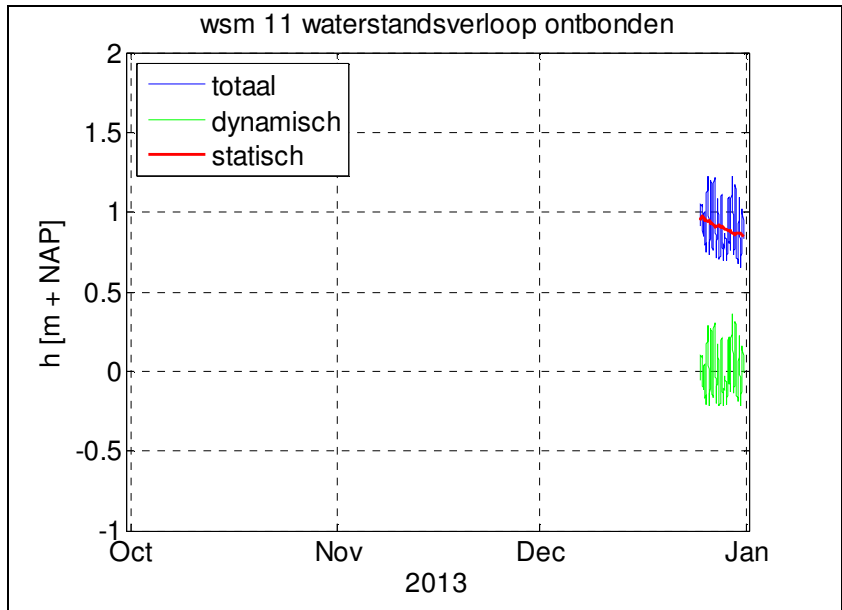
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 8 (WSM08)



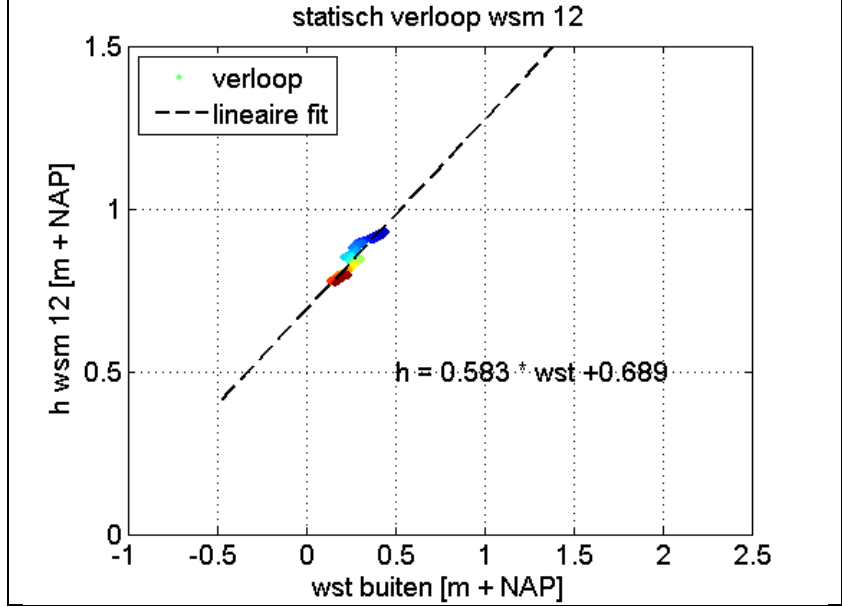
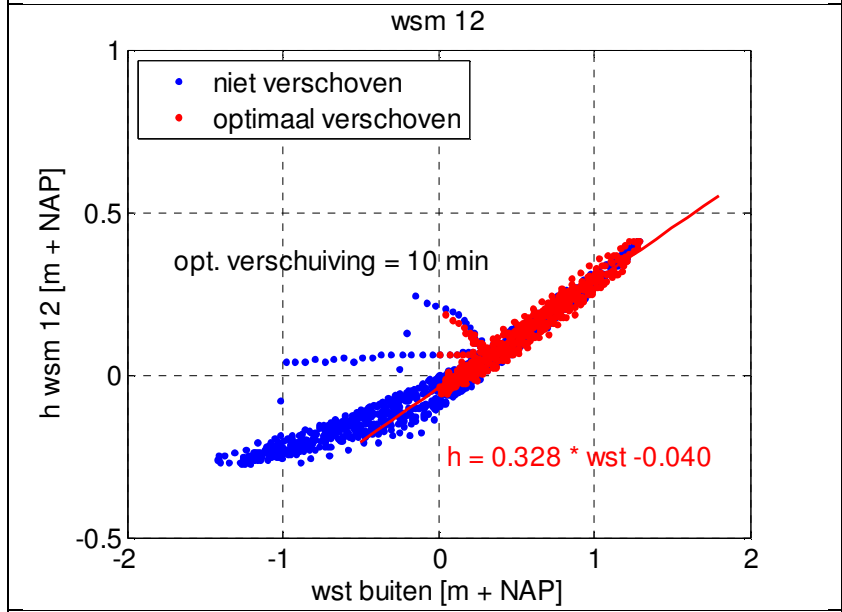
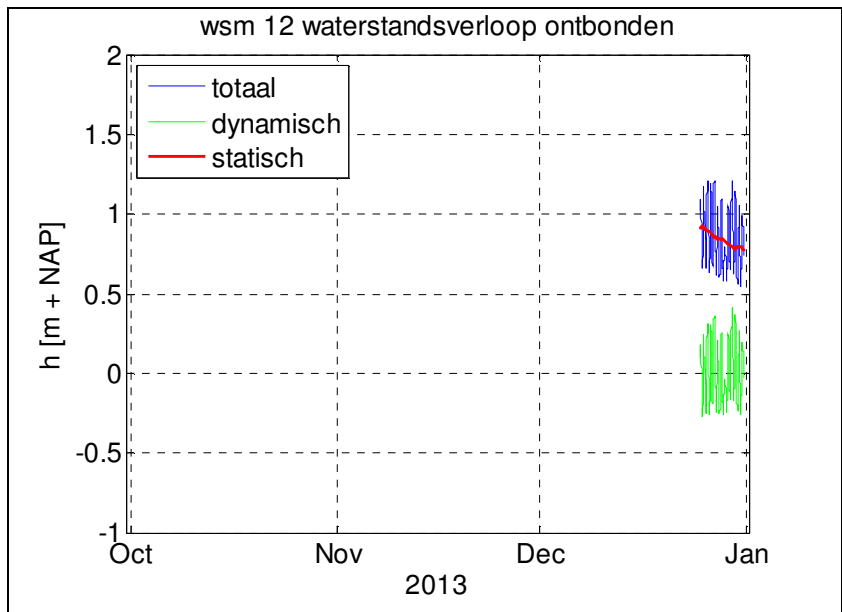
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 9 (WSM09)



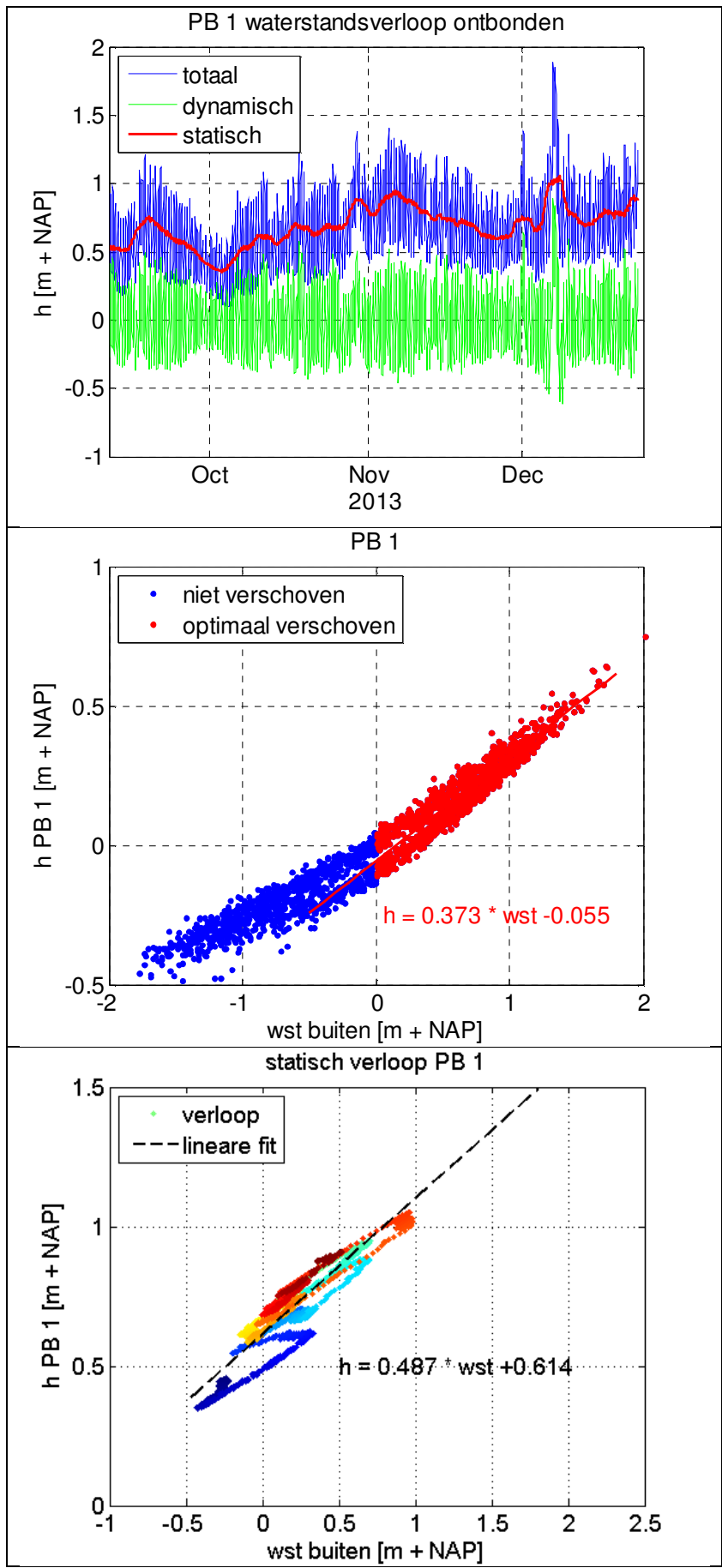
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 10 (WSM10)



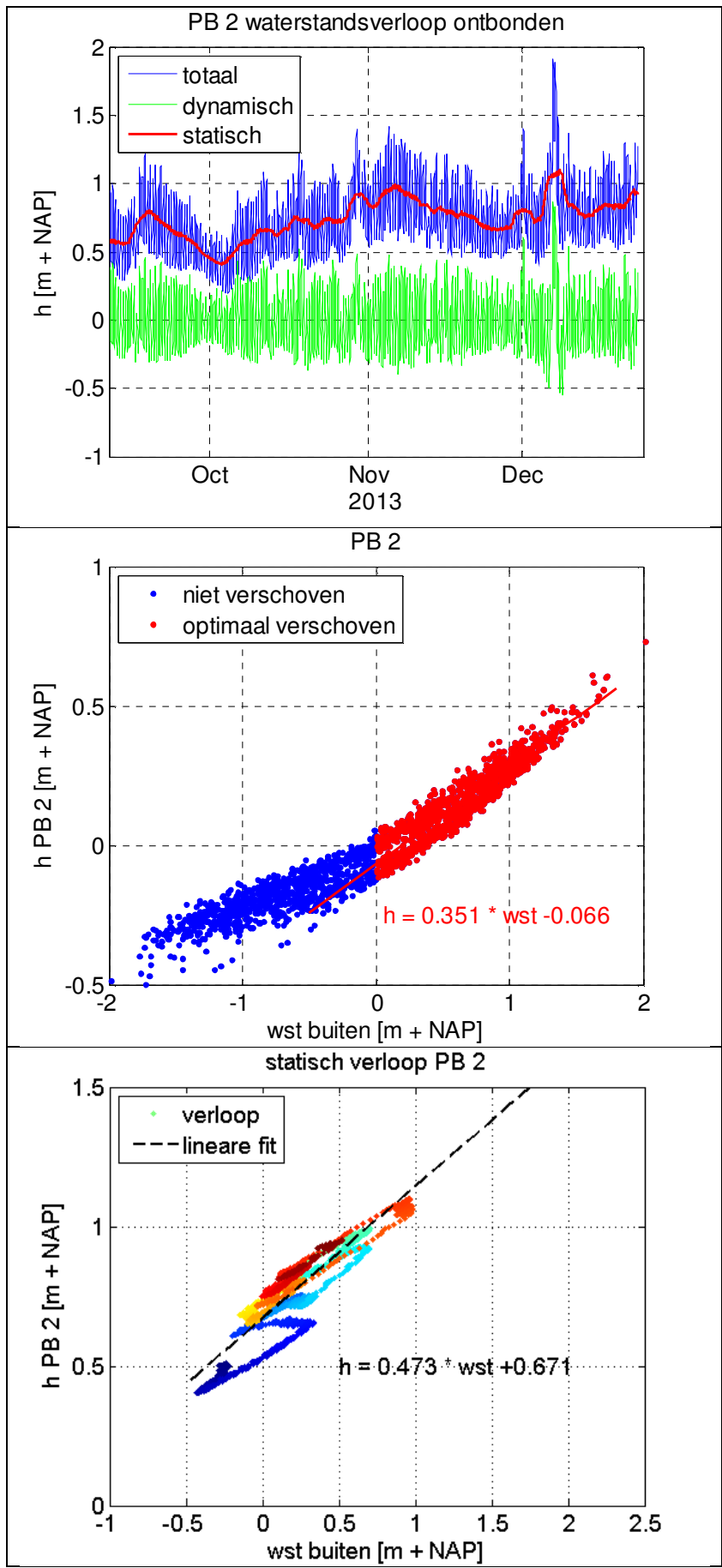
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 11 (WSM11)



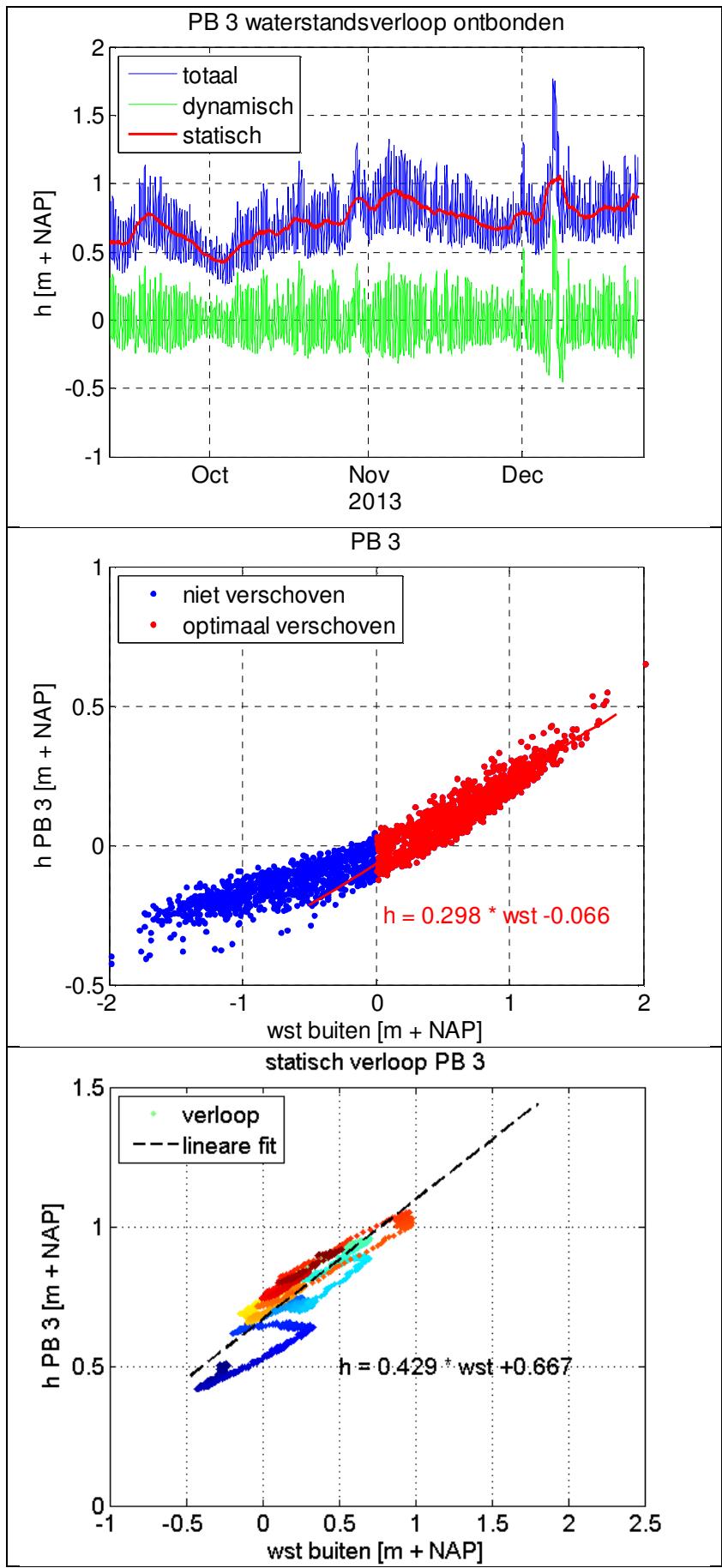
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 12 (WSM12)



Resultaten met geselecteerde input data peilbuis 1 (PB01)



Resultaten met geselecteerde input data peilbuis 2 (PB02)

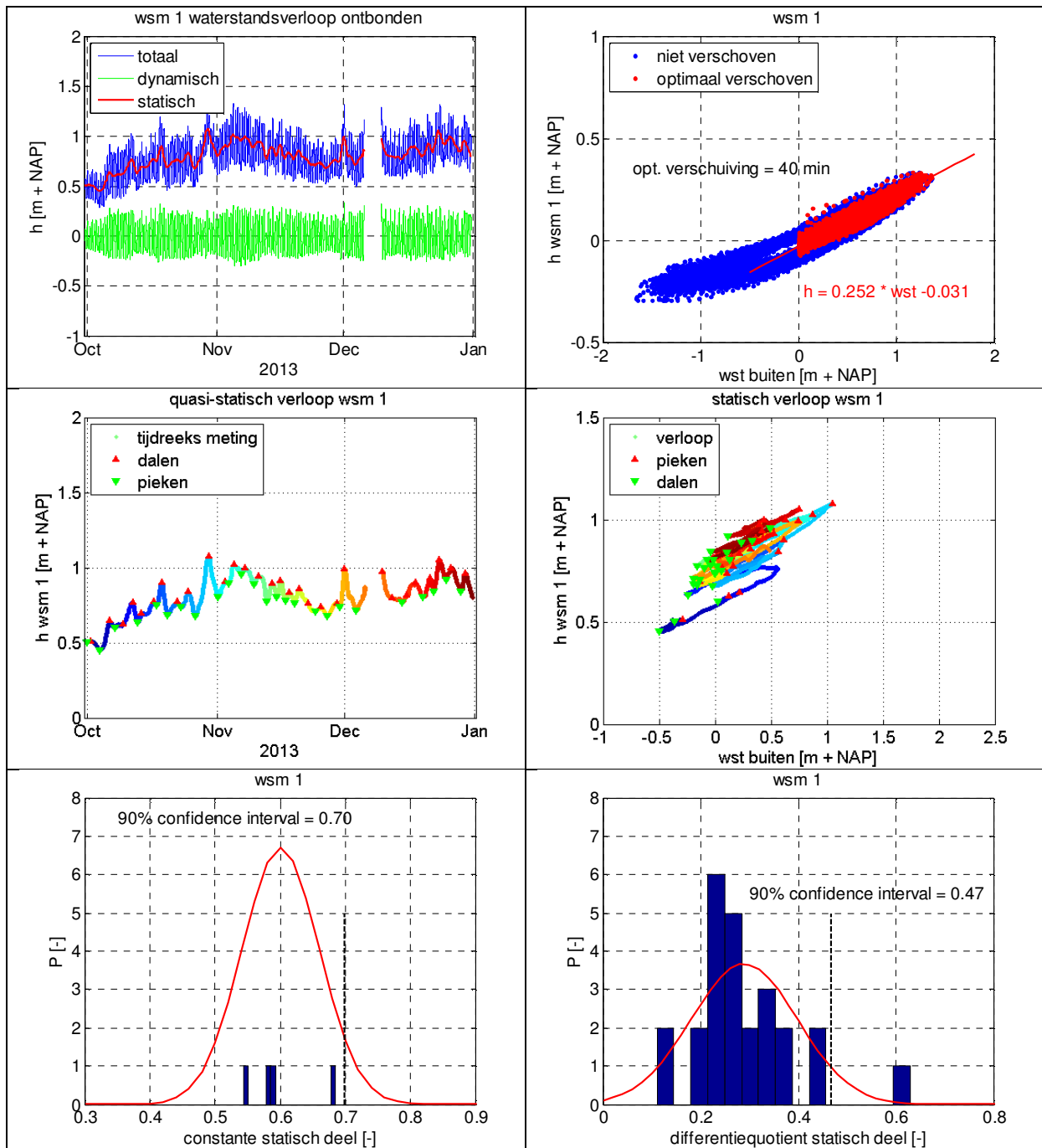


Resultaten met geselecteerde input data peilbuis 3 (PB03)

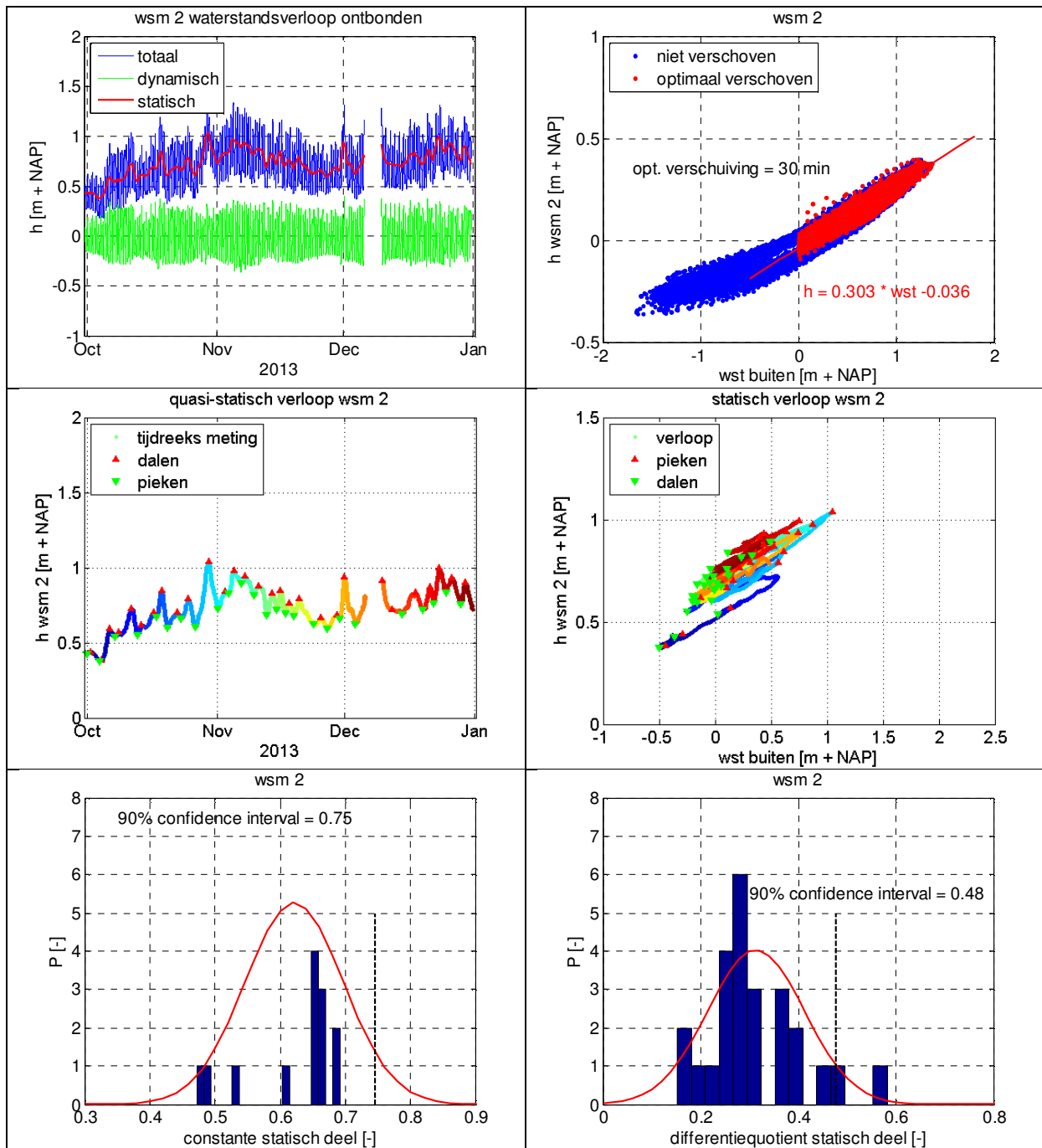
Tabel 2. Overzicht resultaten Scheldestromen statistisch

meetreeks	optimale verschuiving [min]	a ₁ (dynamisch)	b ₁ (dynamisch)	a ₂ (statisch)	b ₂ (statisch)	stijghoogte onder MHW- omstandigheden [m+NAP]
WSM01	40	0,252	-0,031	0,47	0,70	2,75
WSM02	30	0,303	-0,036	0,48	0,75	2,90
WSM03	20	0,348	-0,032	0,54	0,67	3,10
WSM04	10	0,447	-0,047	0,53	0,69	3,18
WSM05	40	0,237	-0,035	0,39	0,70	2,43
WSM06	30	0,279	-0,041	0,47	0,70	2,78
WSM07	20	0,322	-0,047	0,47	0,75	2,87
WSM08	10	0,383	-0,059	0,48	0,74	2,96
WSM09	40	0,215	-0,036	0,46	0,76	2,73
WSM10	40	0,241	-0,040	0,47	0,74	2,77
WSM11	30	0,278	-0,040	0,41 [#]	0,71 [#]	2,56
WSM12	10	0,328	-0,042	0,44 [#]	0,75 [#]	2,77
PB01	-	0,365	-0,049	0,47	0,72	2,89
PB02	-	0,337	-0,056	0,43	0,75	2,72
PB03	-	0,280	-0,053	0,46	0,76	2,79

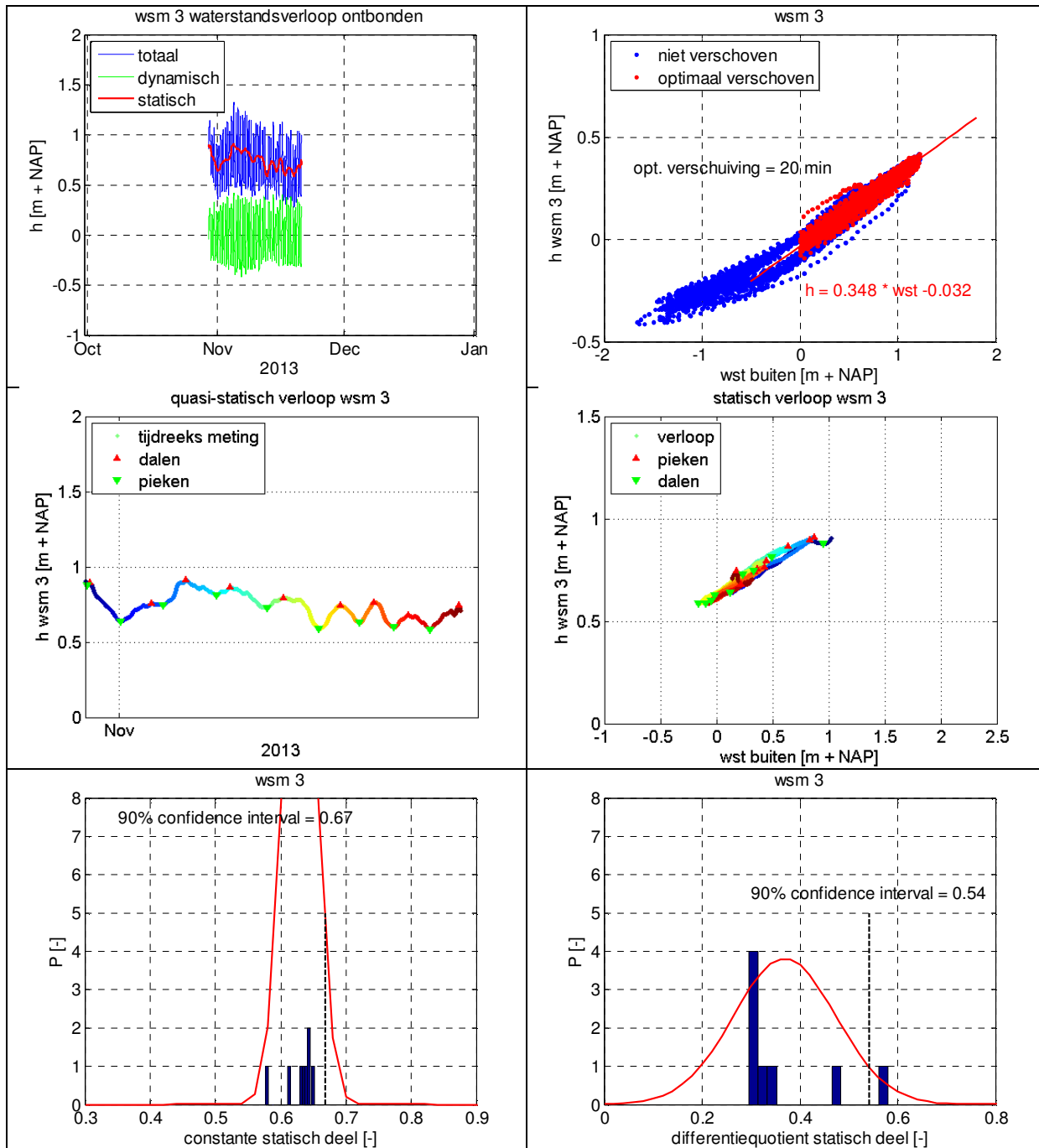
[#] Vanwege het geringe tijdsbestek waarin goede datapunten beschikbaar zijn is voor het statische deel de gecorrigeerde dataset gebruikt.



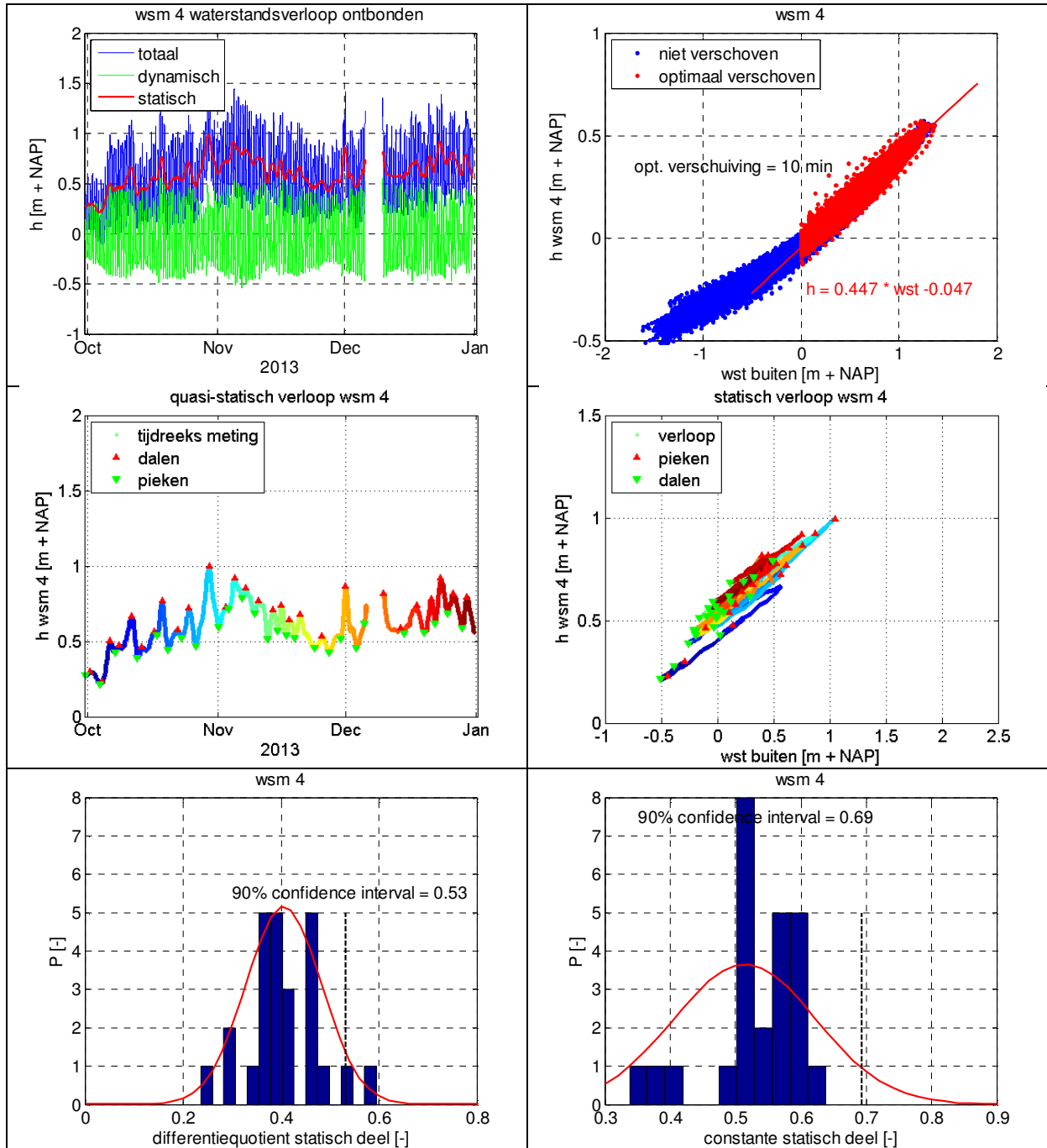
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 1 (WSM01)



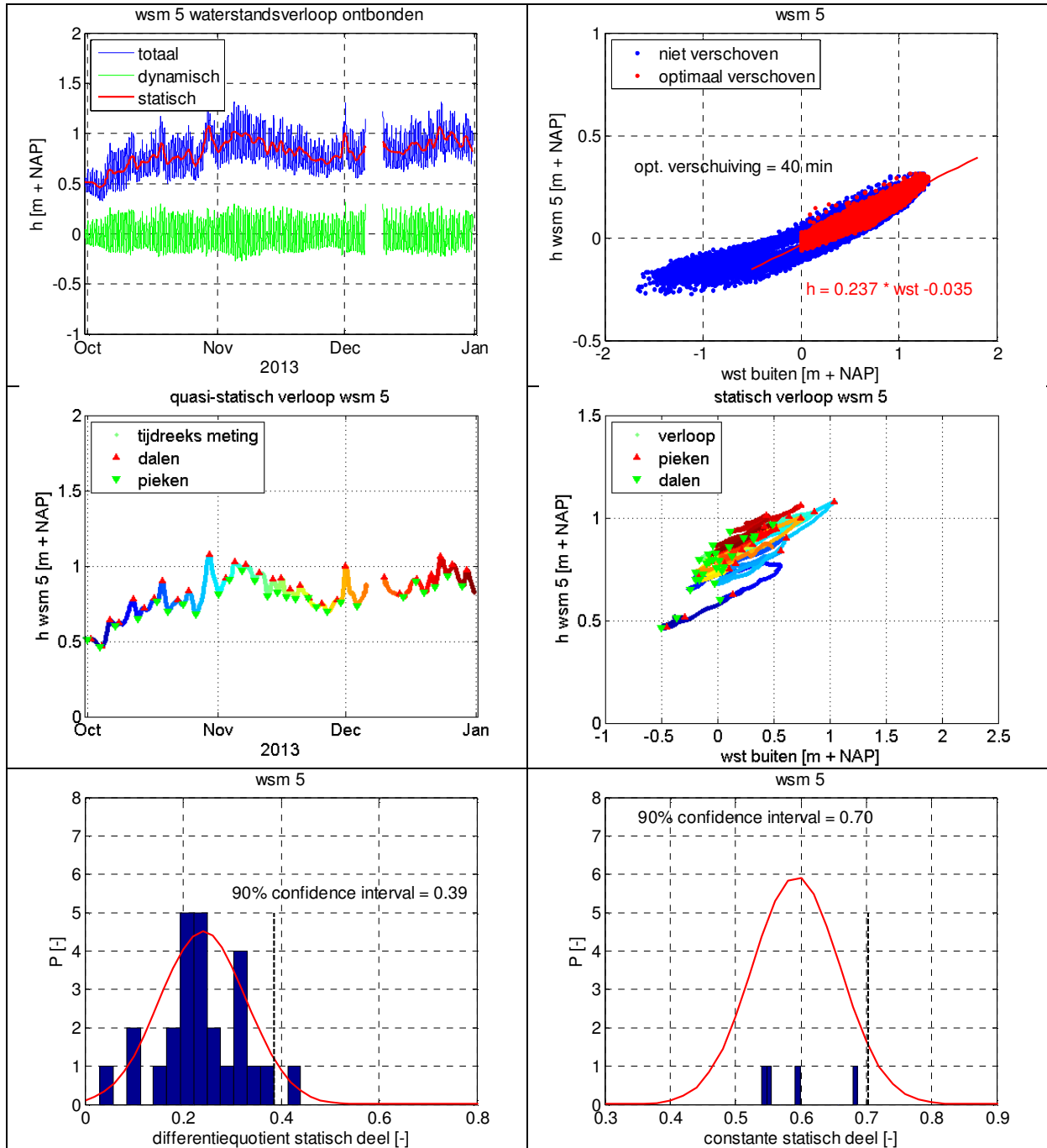
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 2 (WSM02)



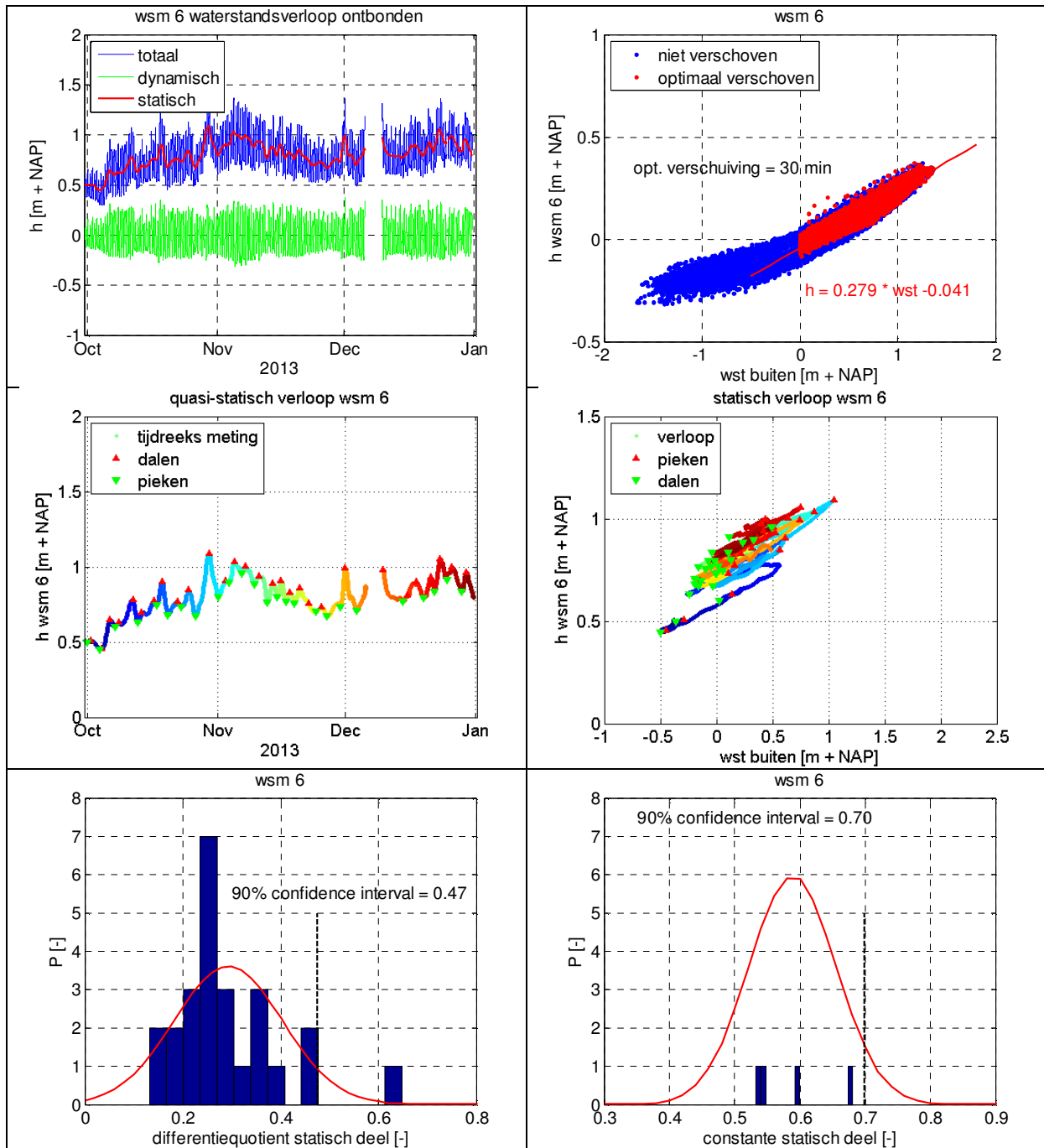
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 3 (WSM03)



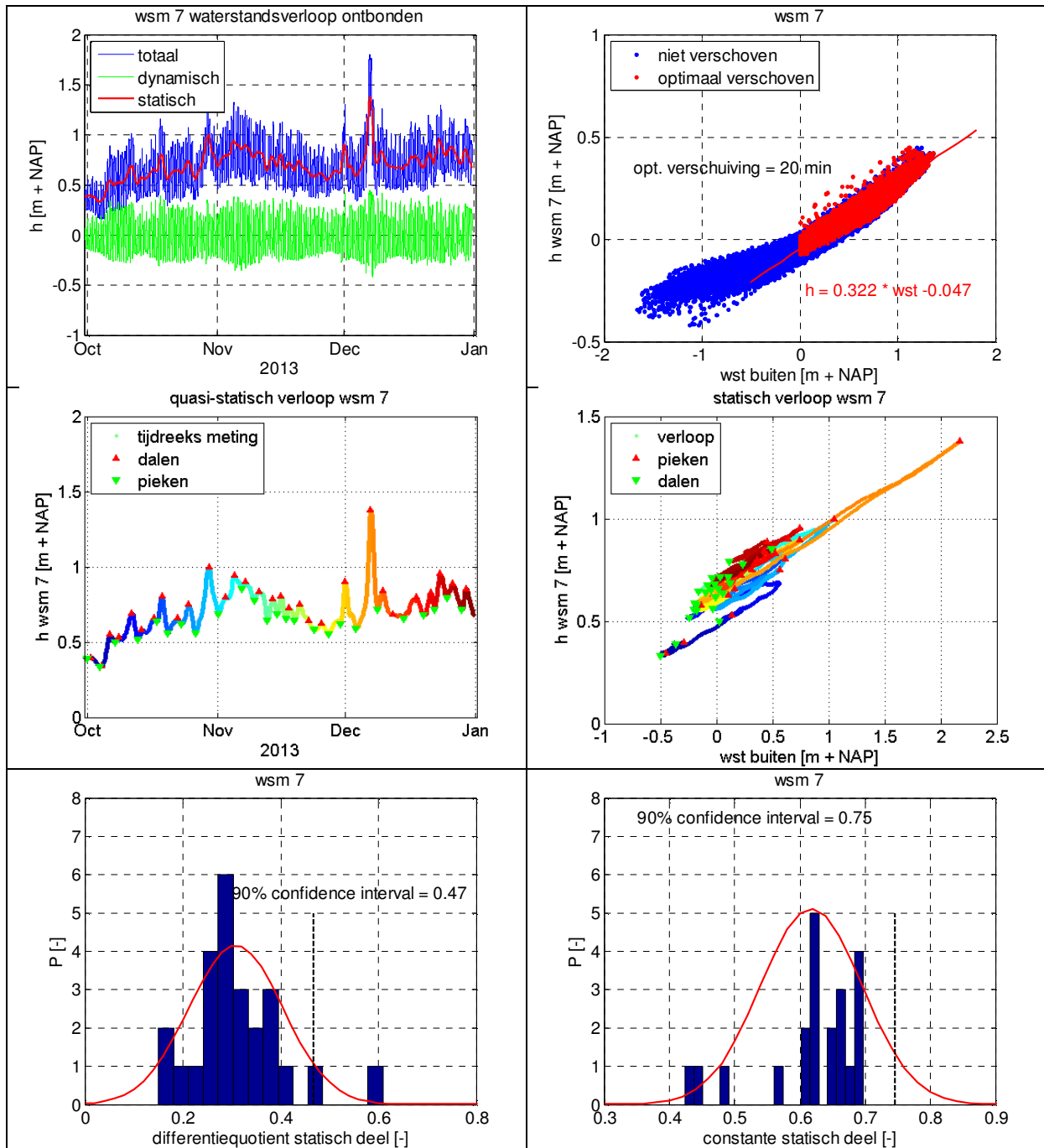
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 4 (WSM04)



Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 5 (WSM05)

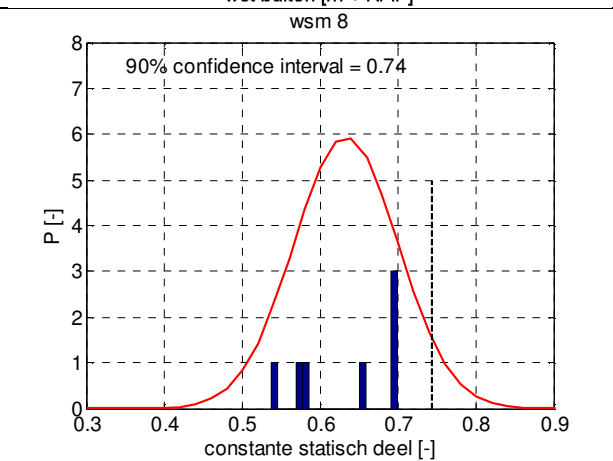
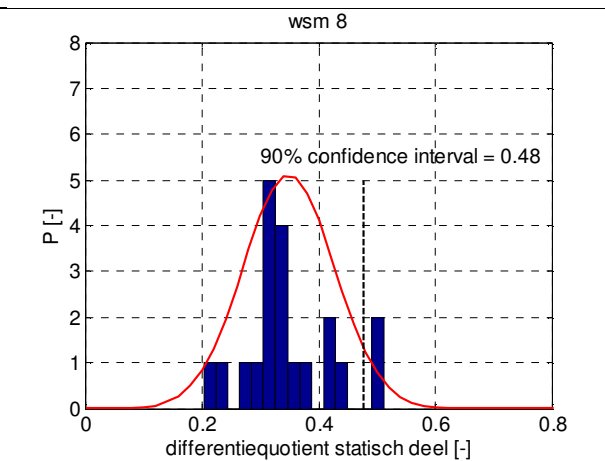
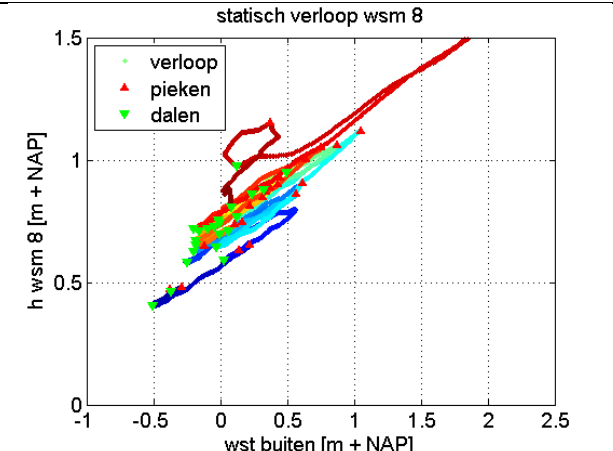
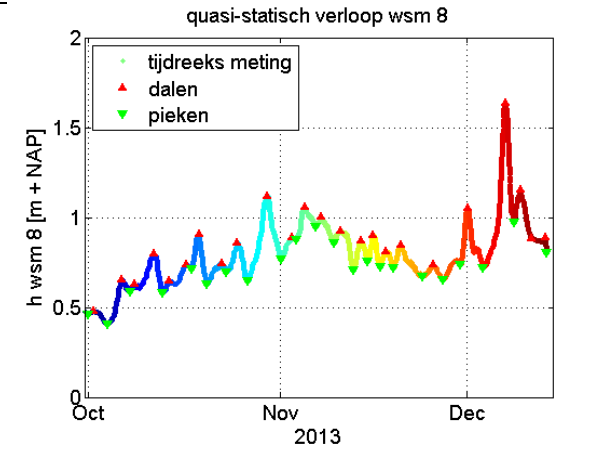
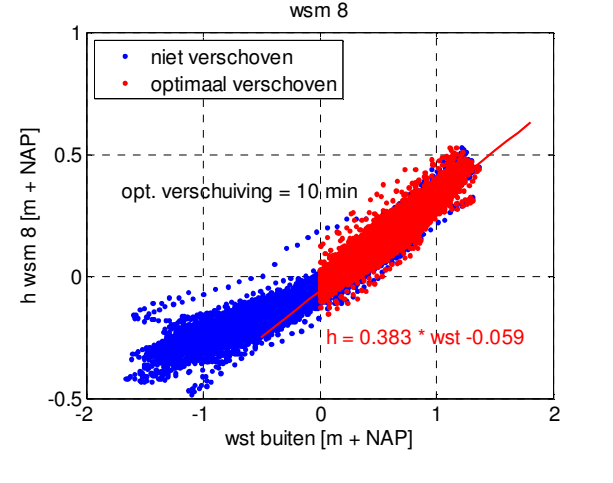
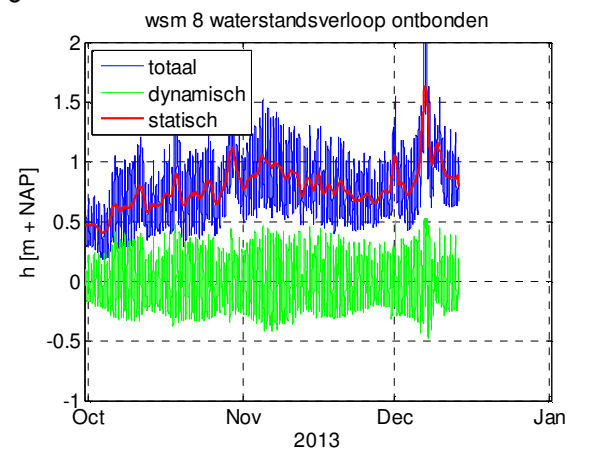


Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 6 (WSM06)

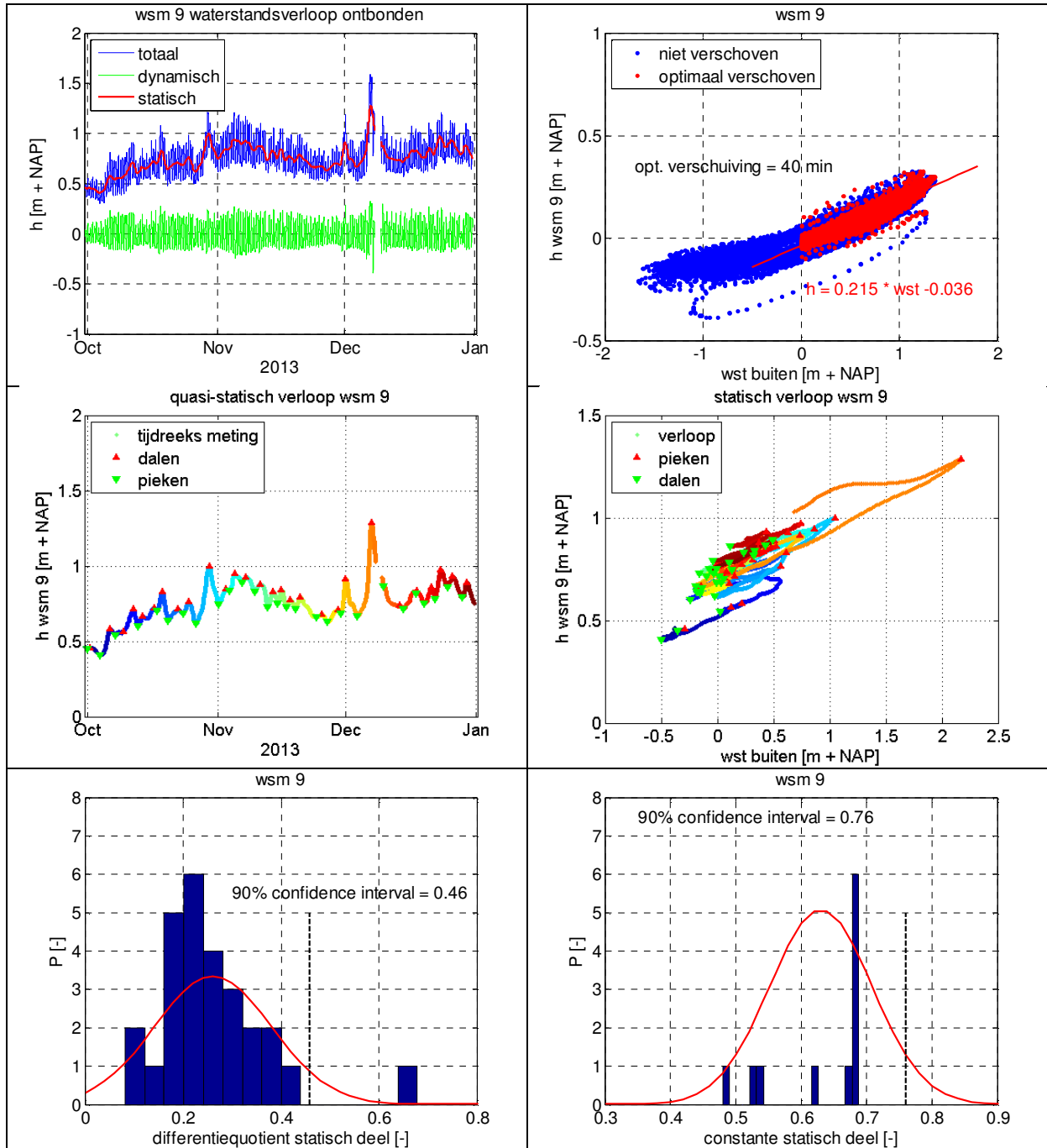


Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 7 (WSM07)

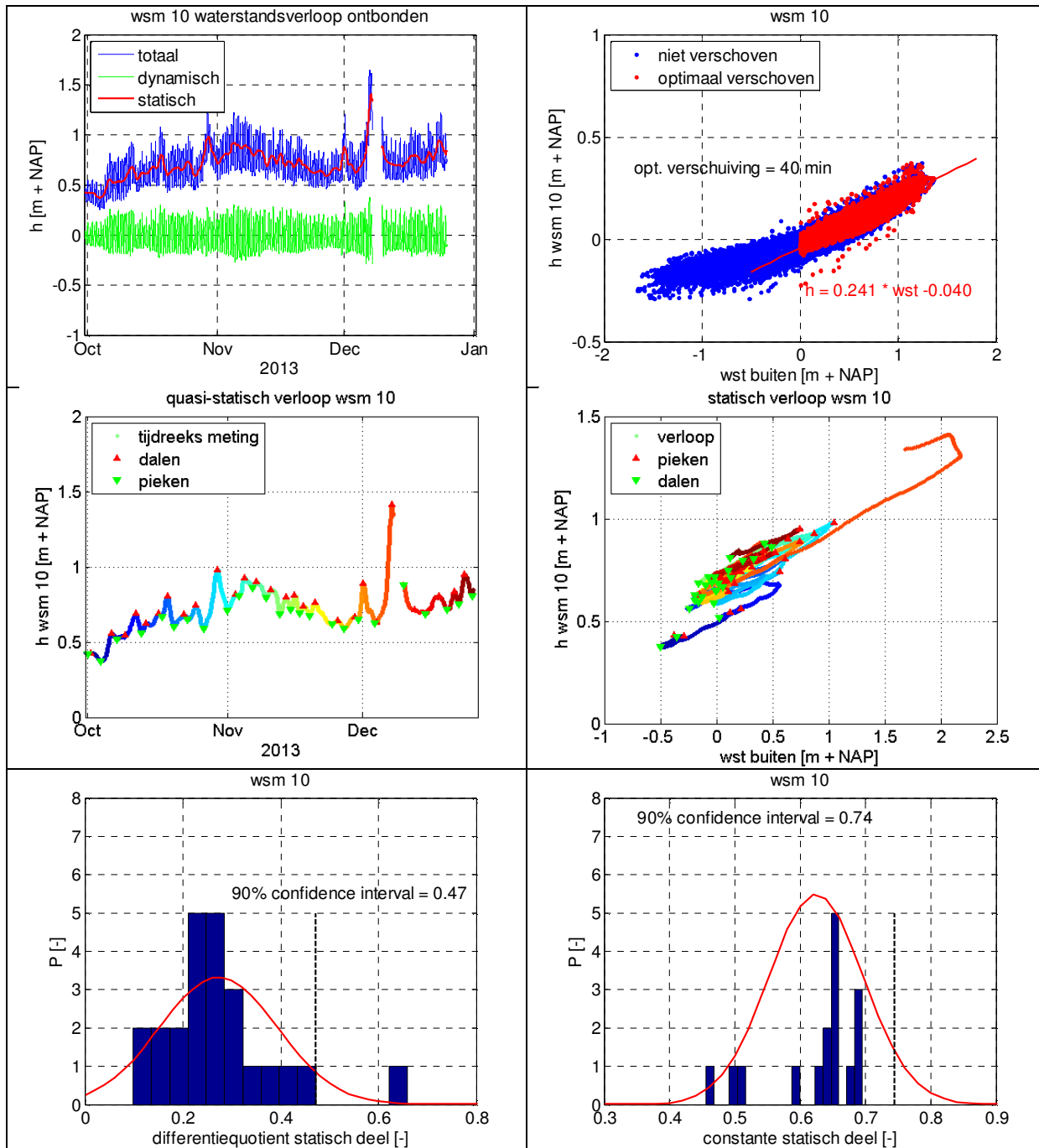
6



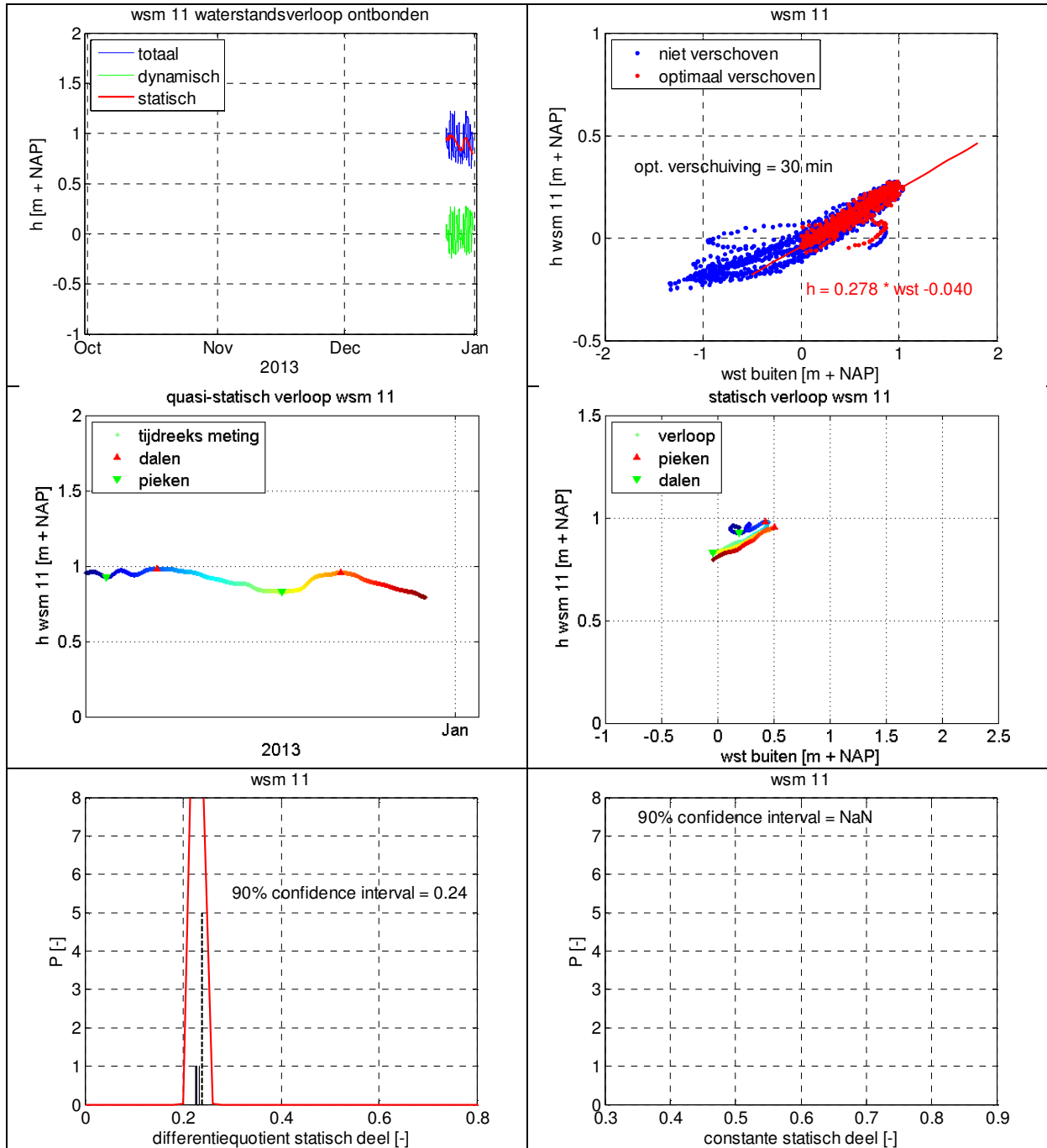
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 8 (WSM08)



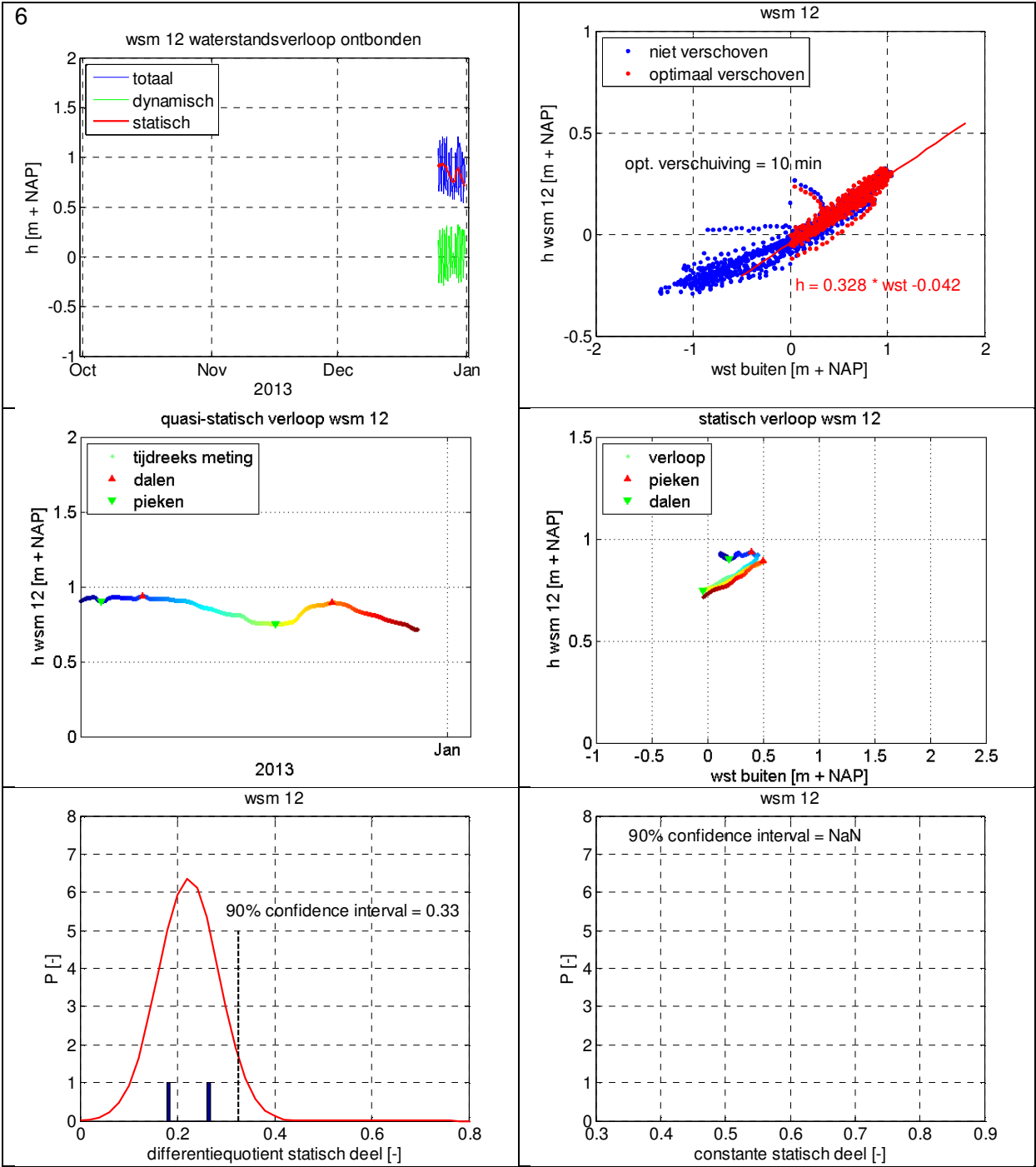
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 9 (WSM09)



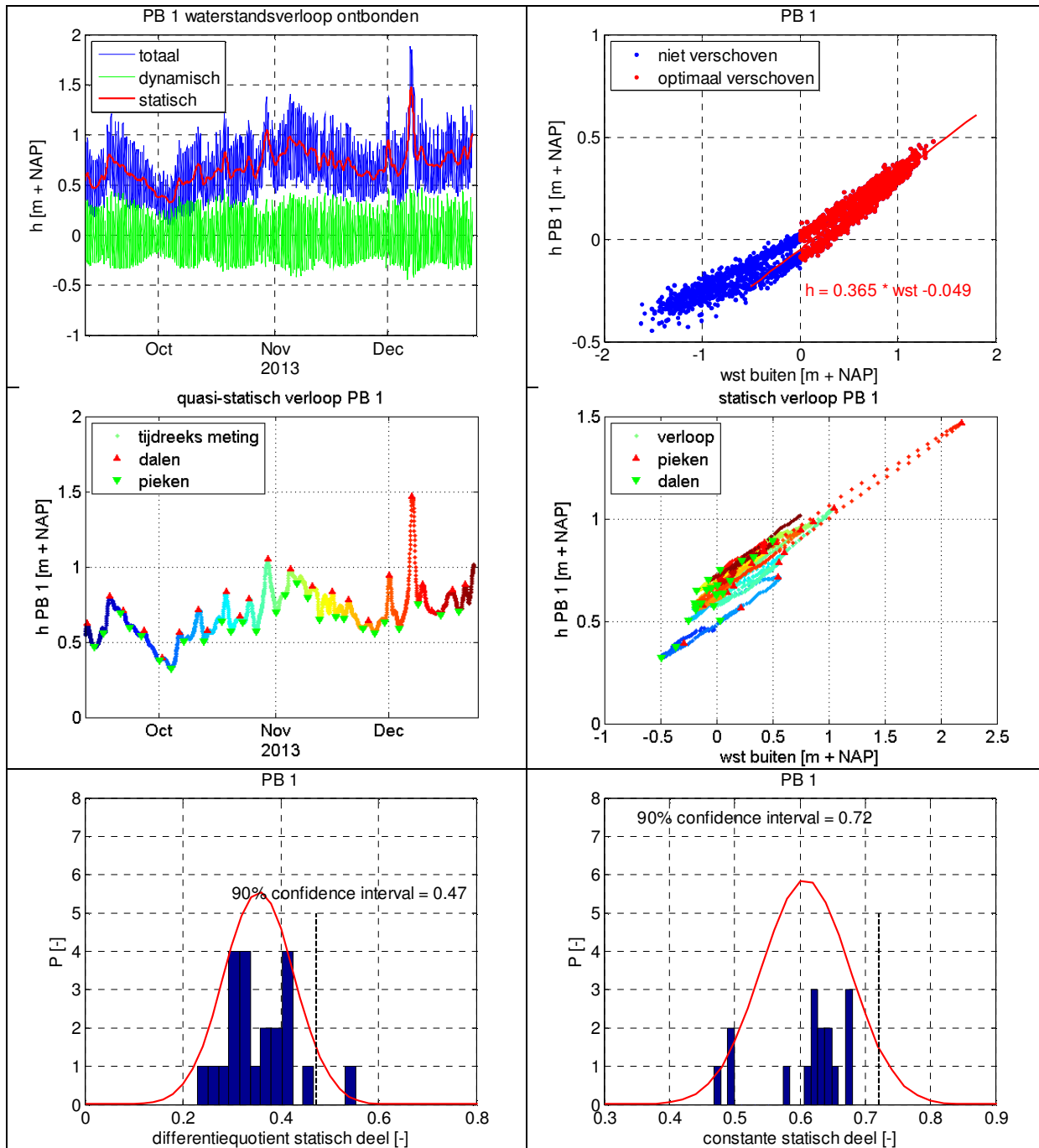
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 10 (WSM10)



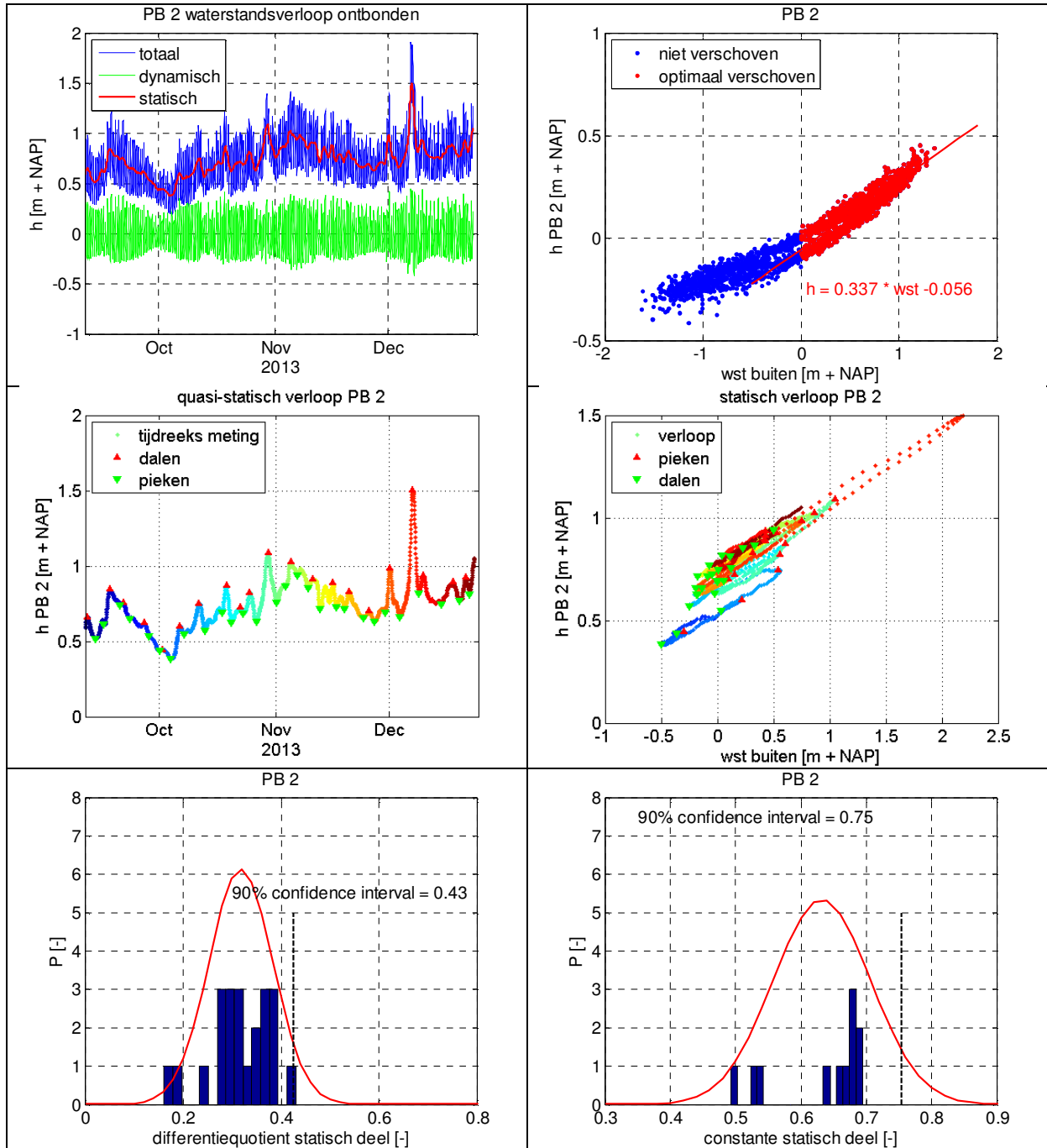
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 11 (WSM11)



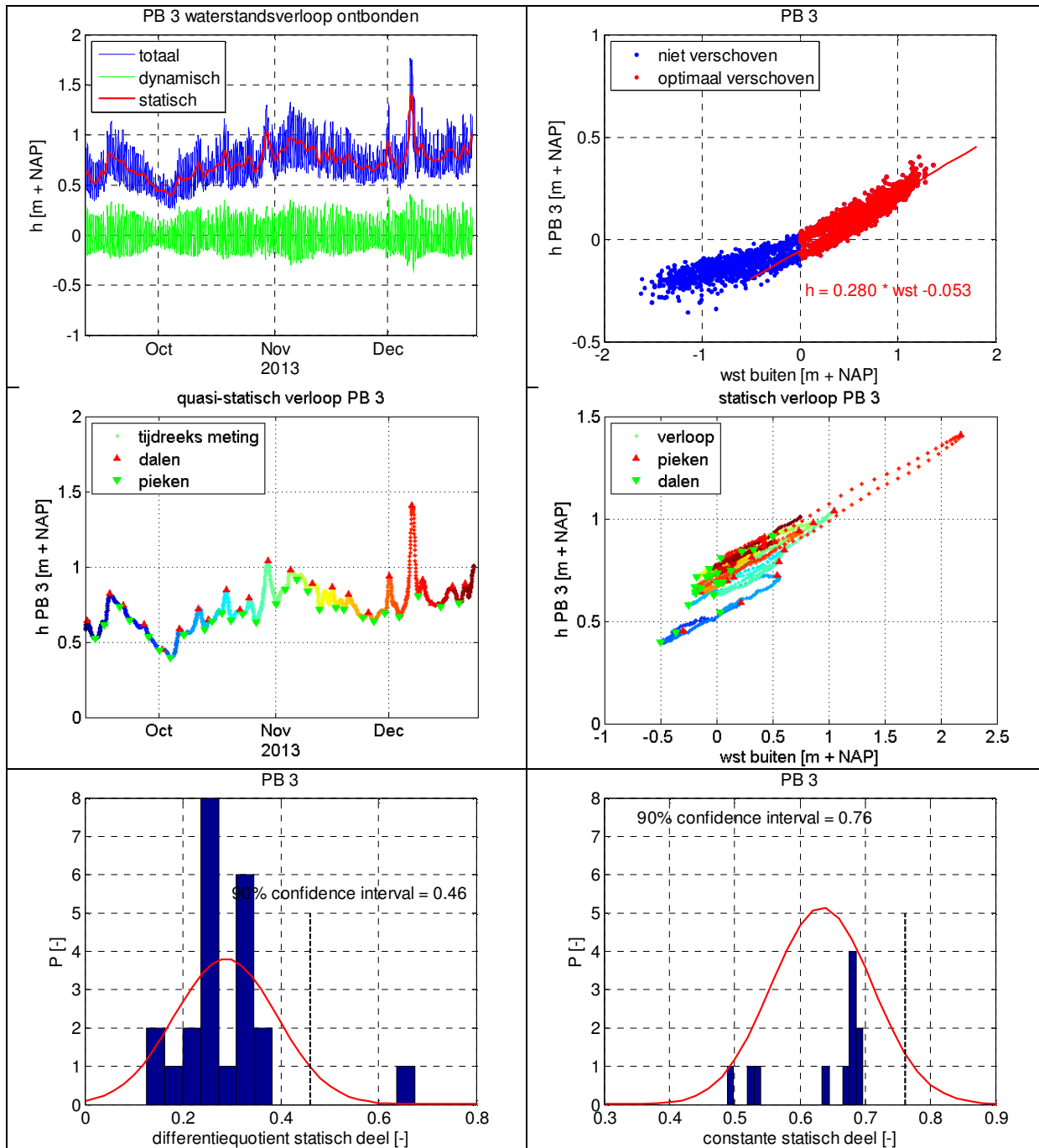
Resultaten met geselecteerde input data waterspanningsmeter 12 (WSM12)



Resultaten met geselecteerde input data peilbuis 1 (PB01)

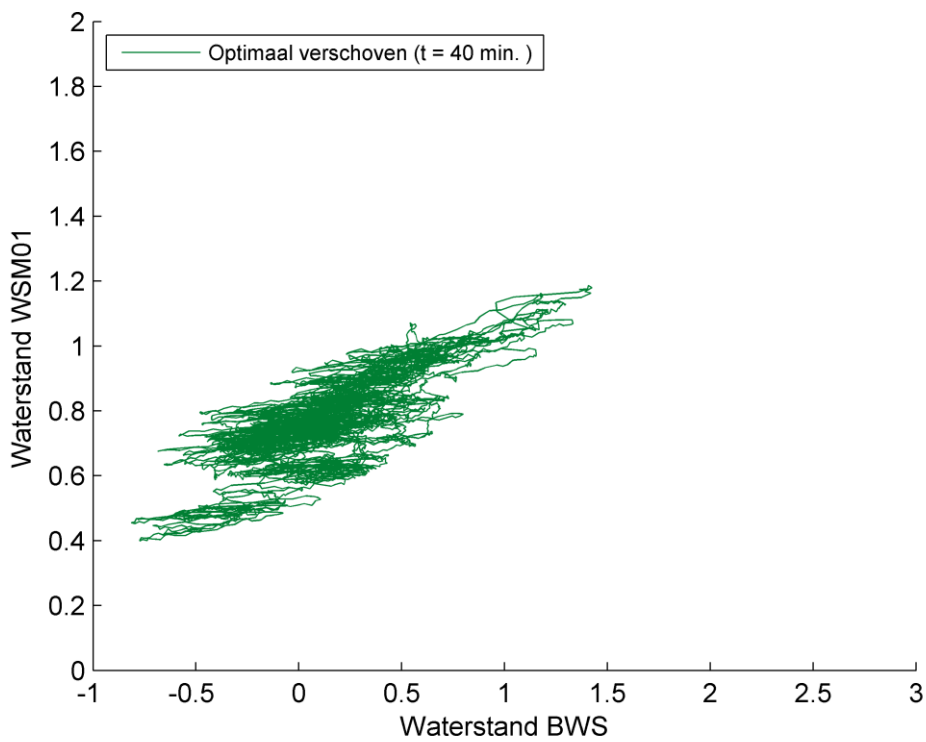
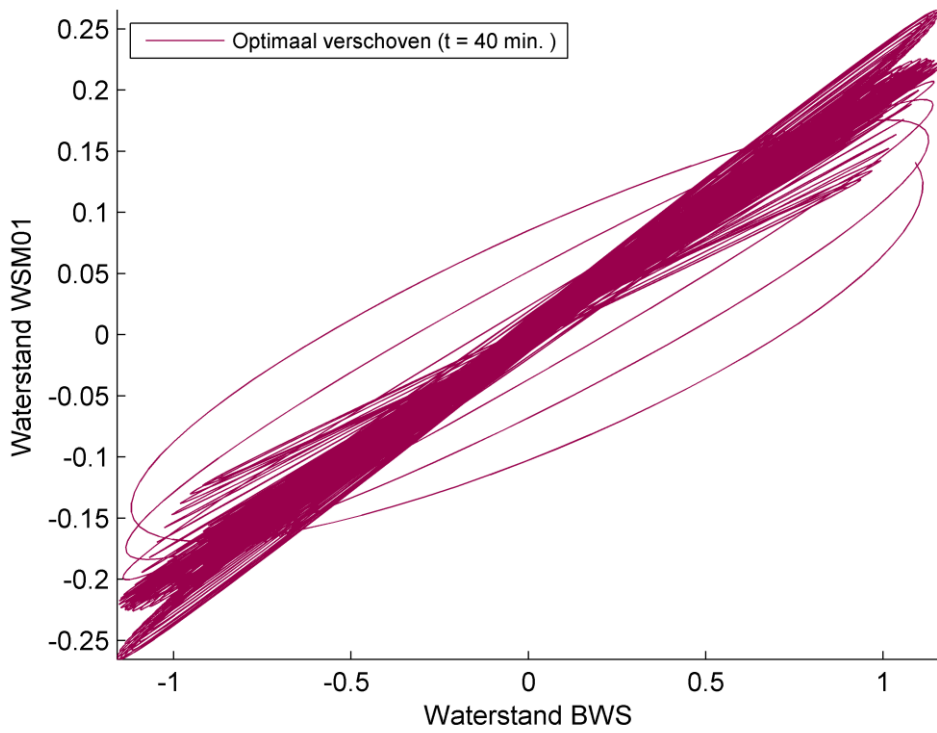


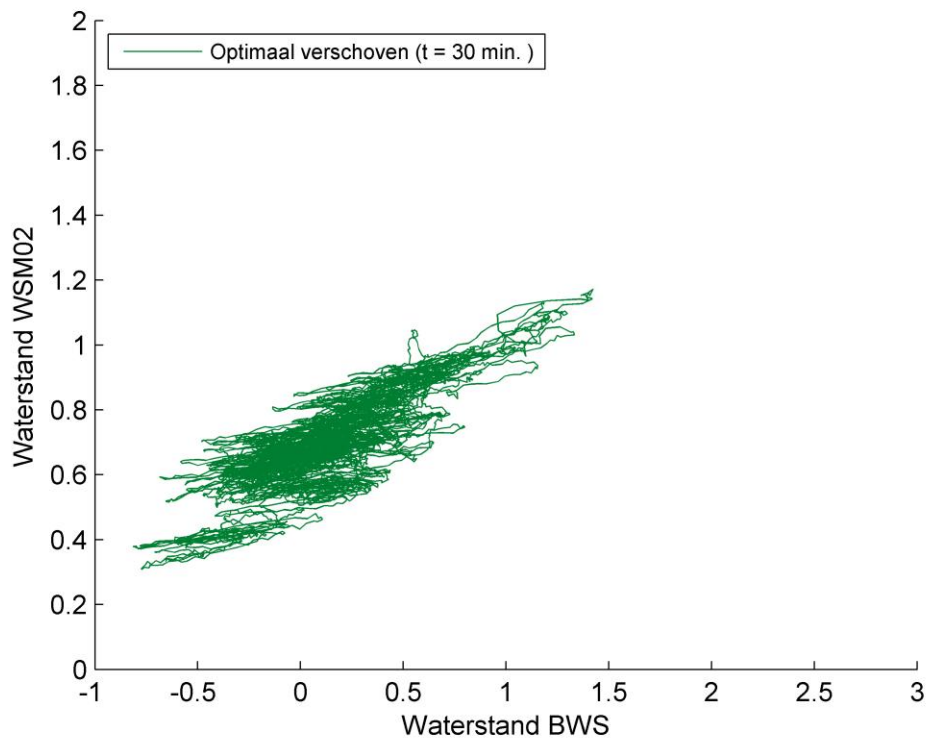
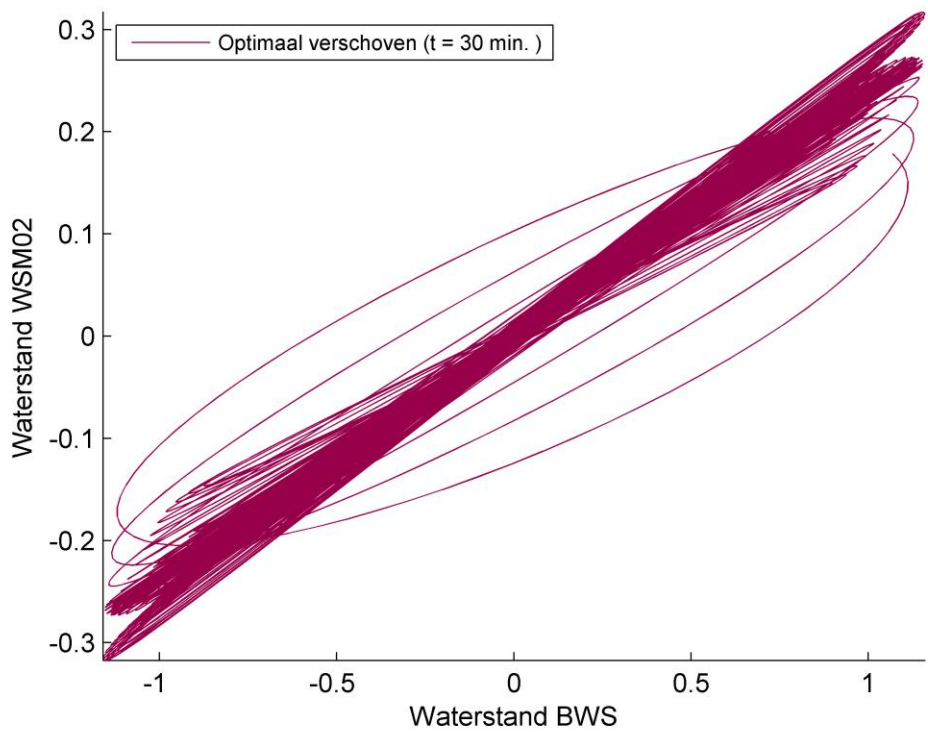
Resultaten met geselecteerde input data peilbuis 2 (PB02)

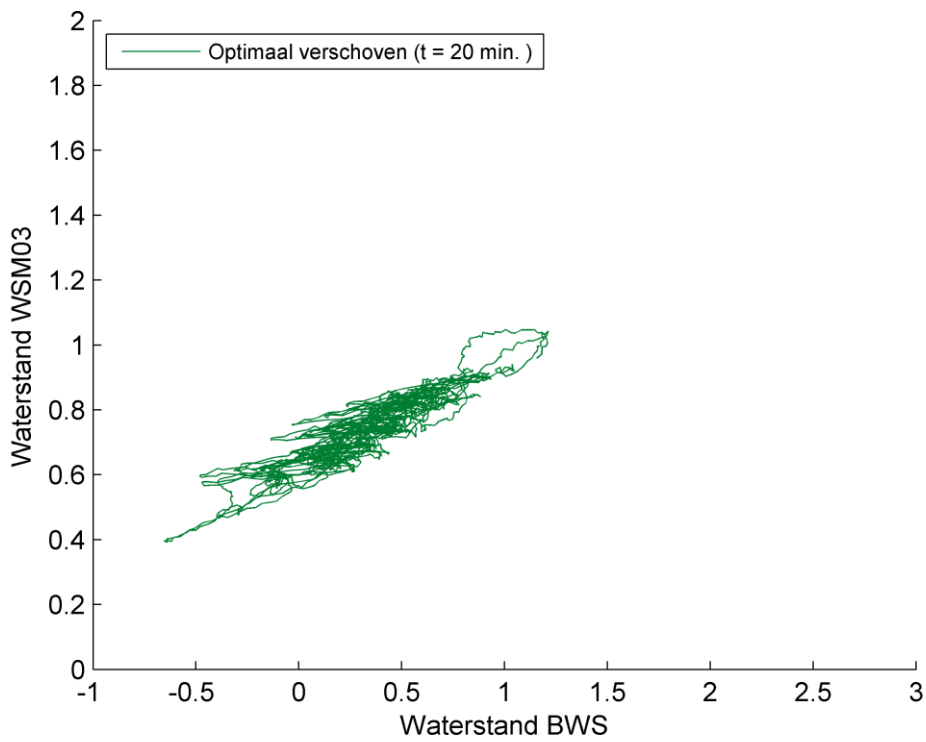
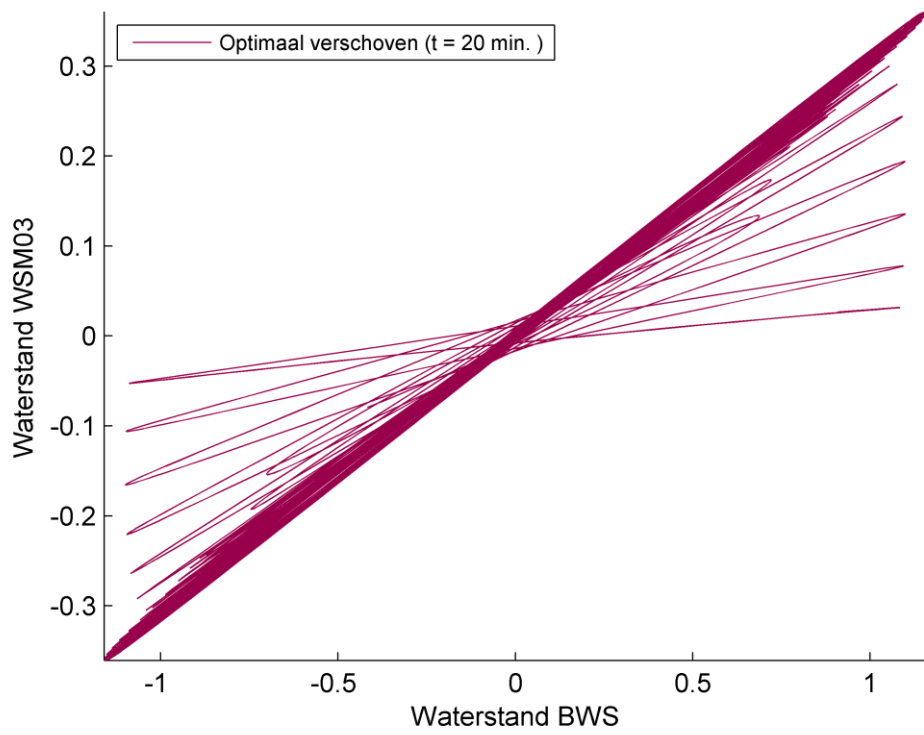


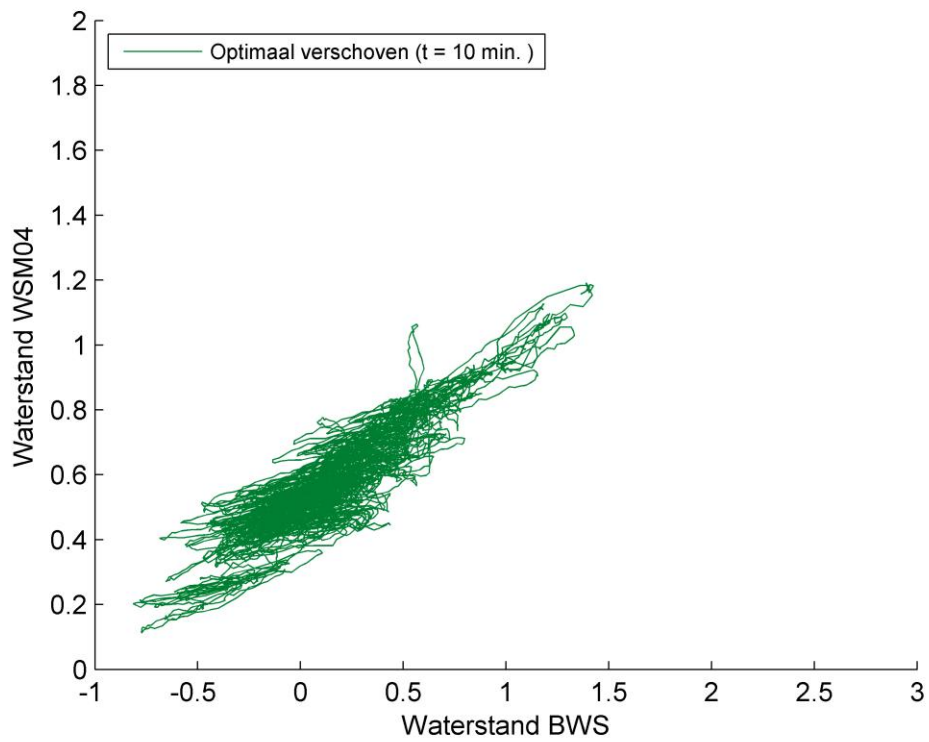
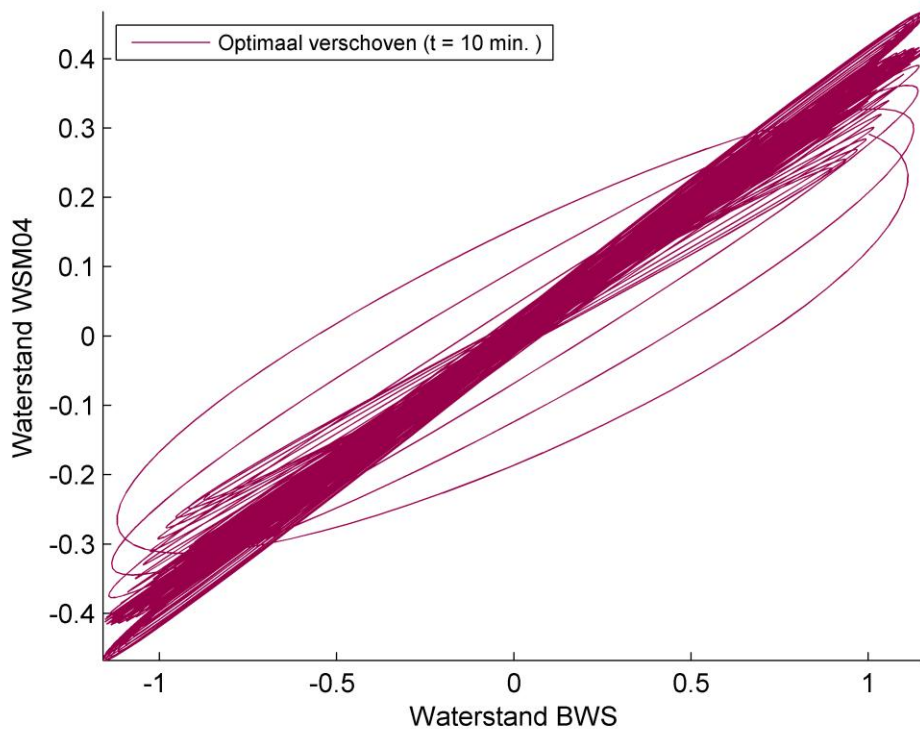
Resultaten met geselecteerde input data peilbuis 3 (PB03)

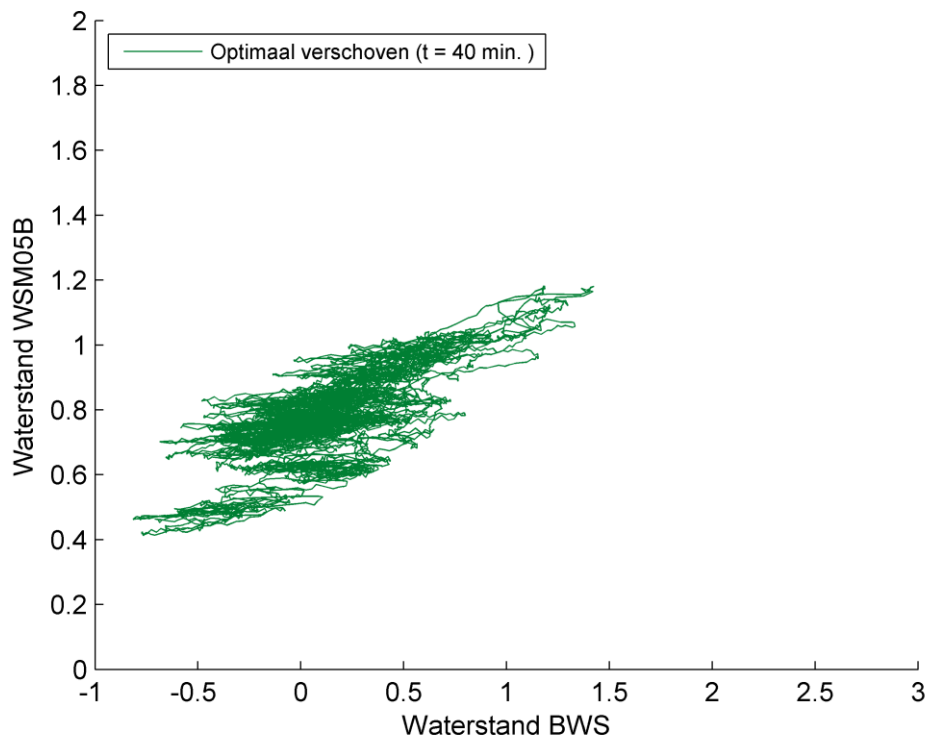
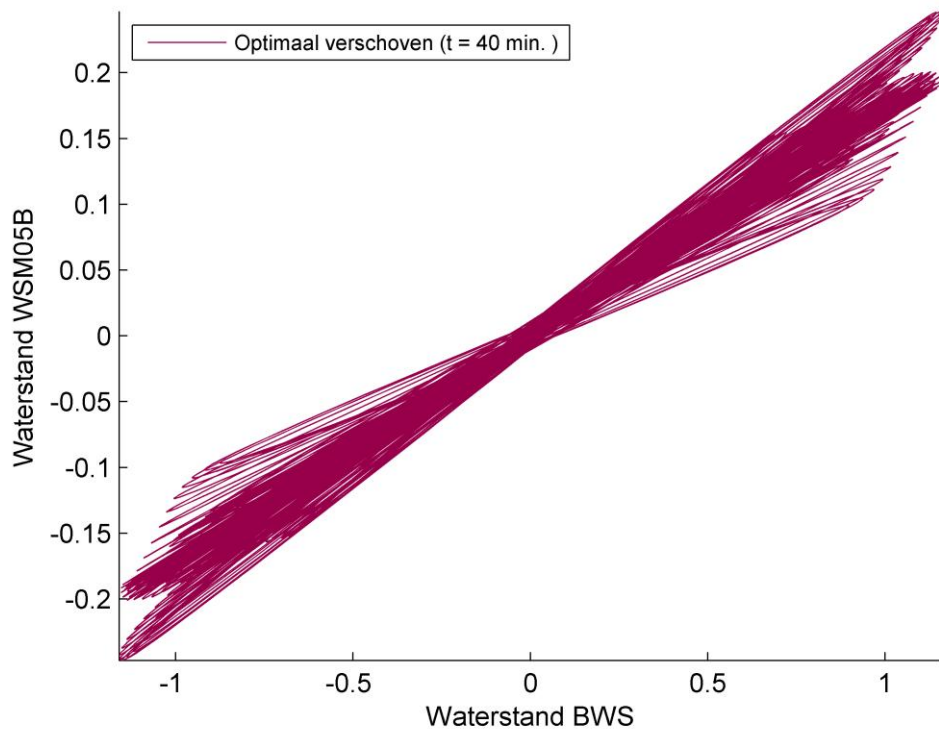
BIJLAGE IV METHODE FREQUENTIEANALYSE

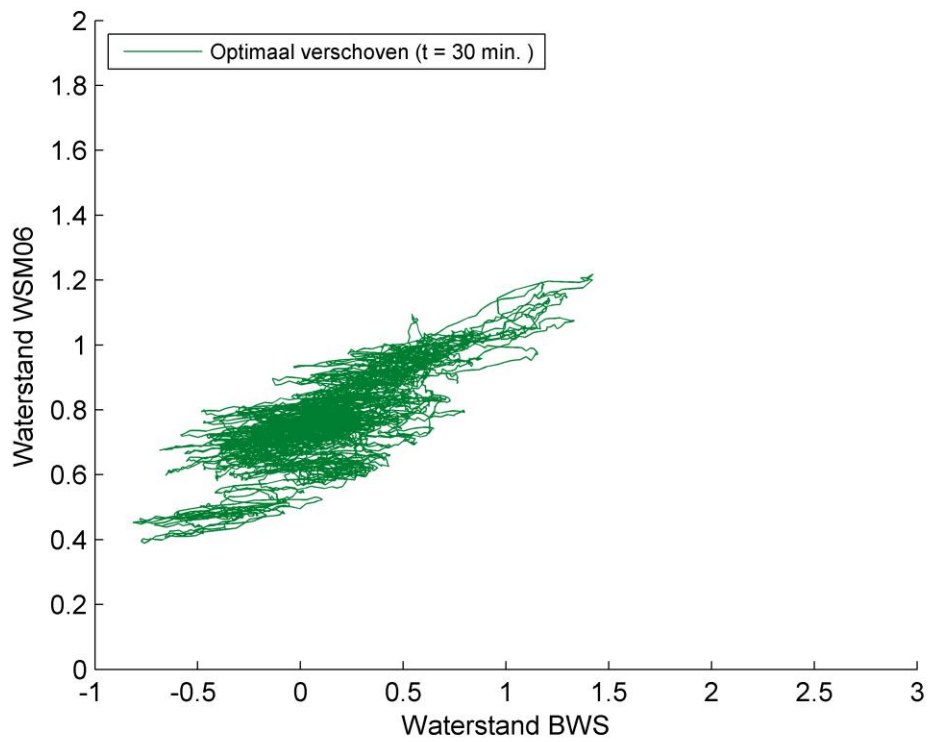
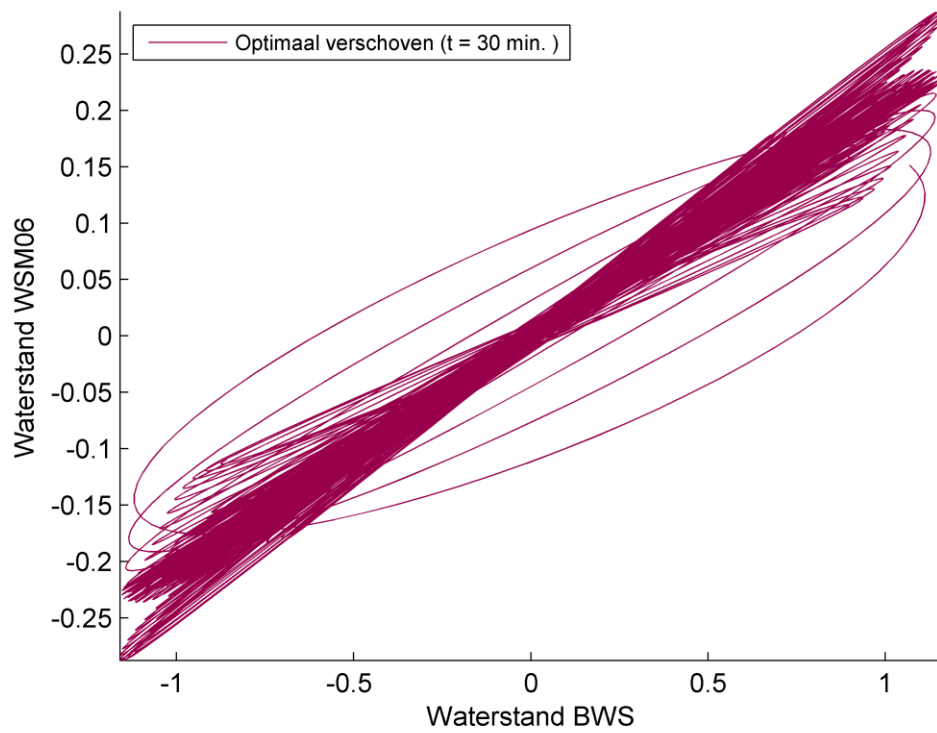


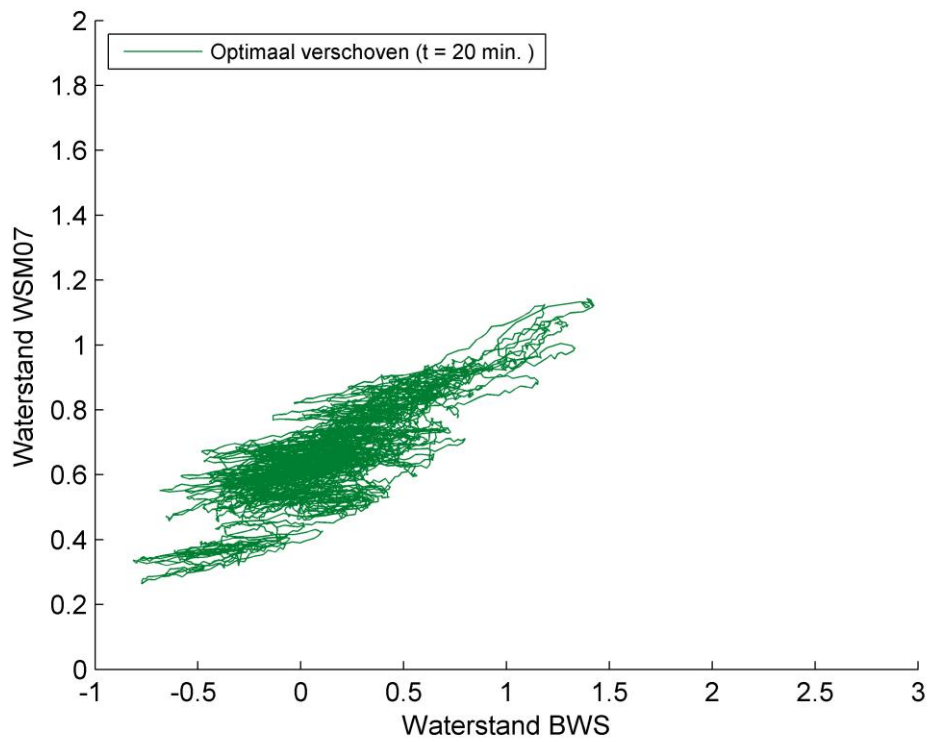
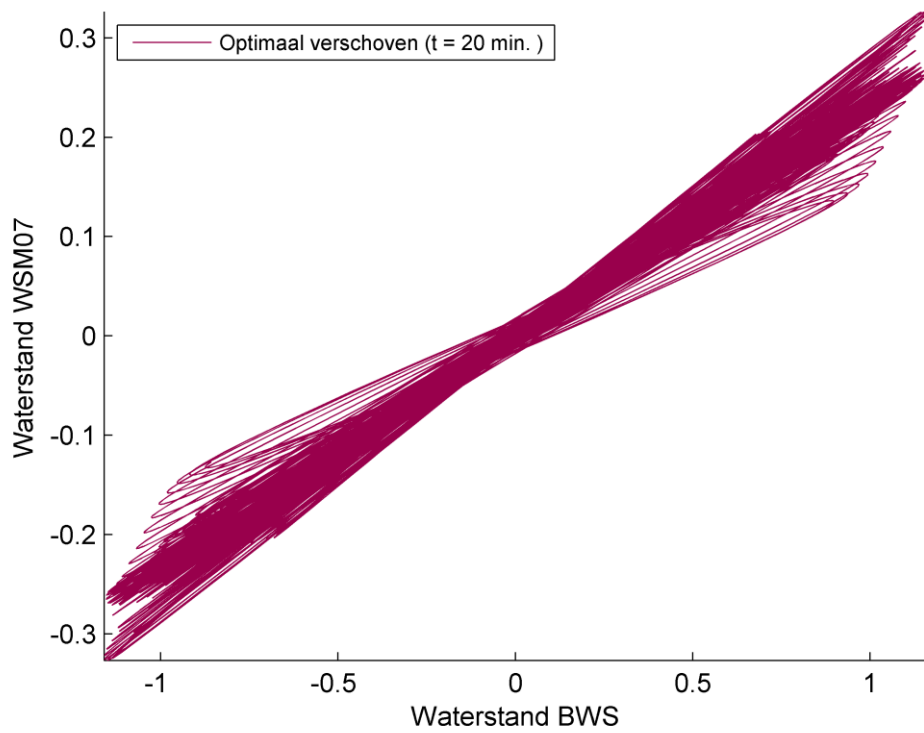


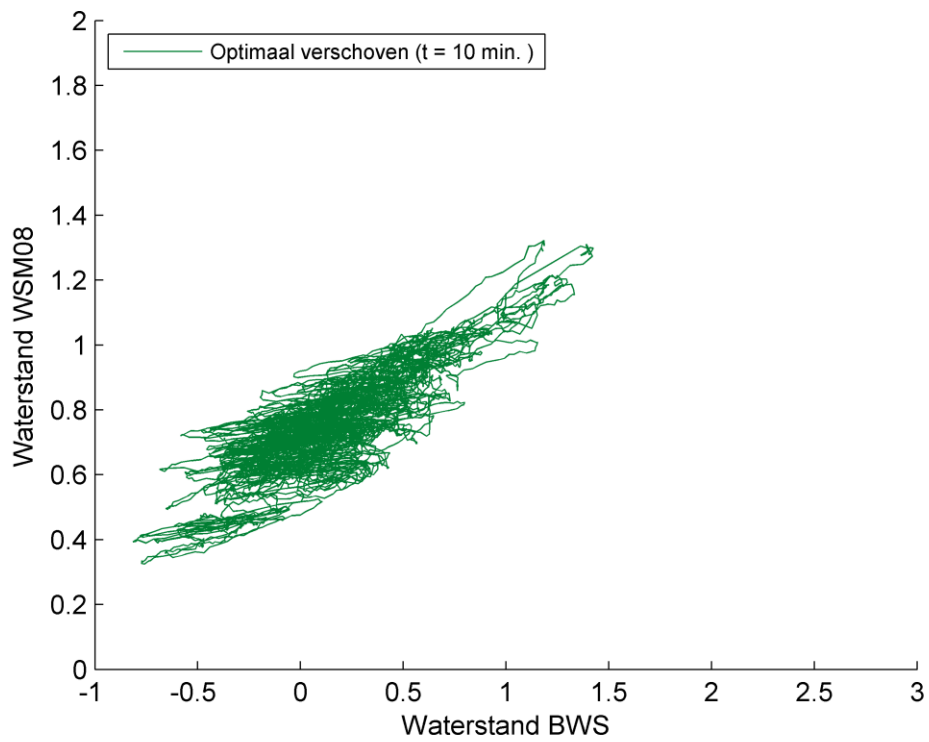
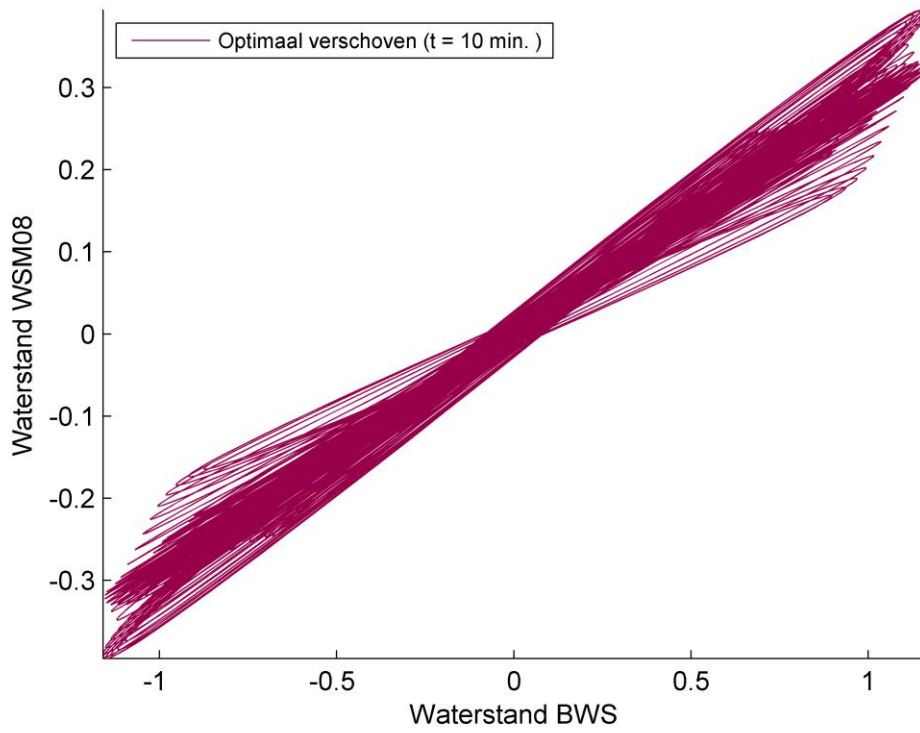


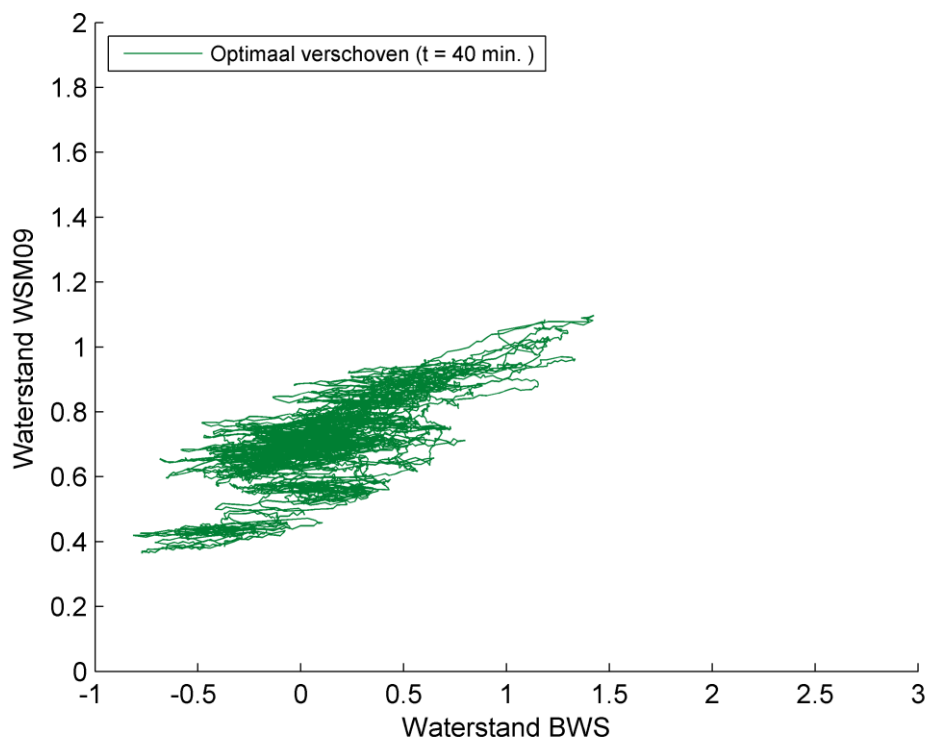
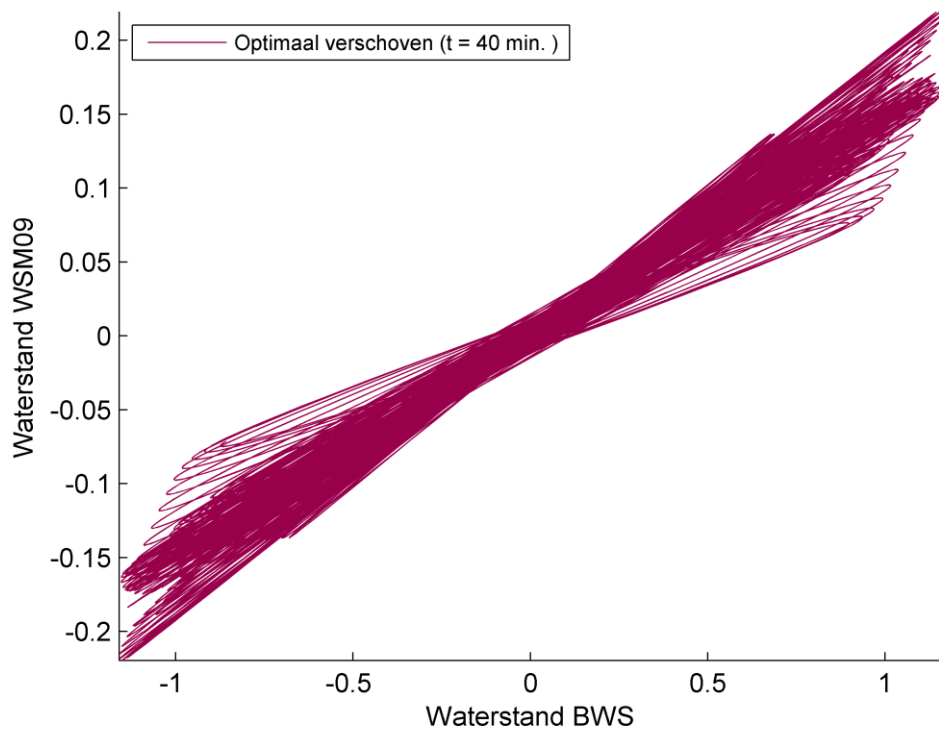


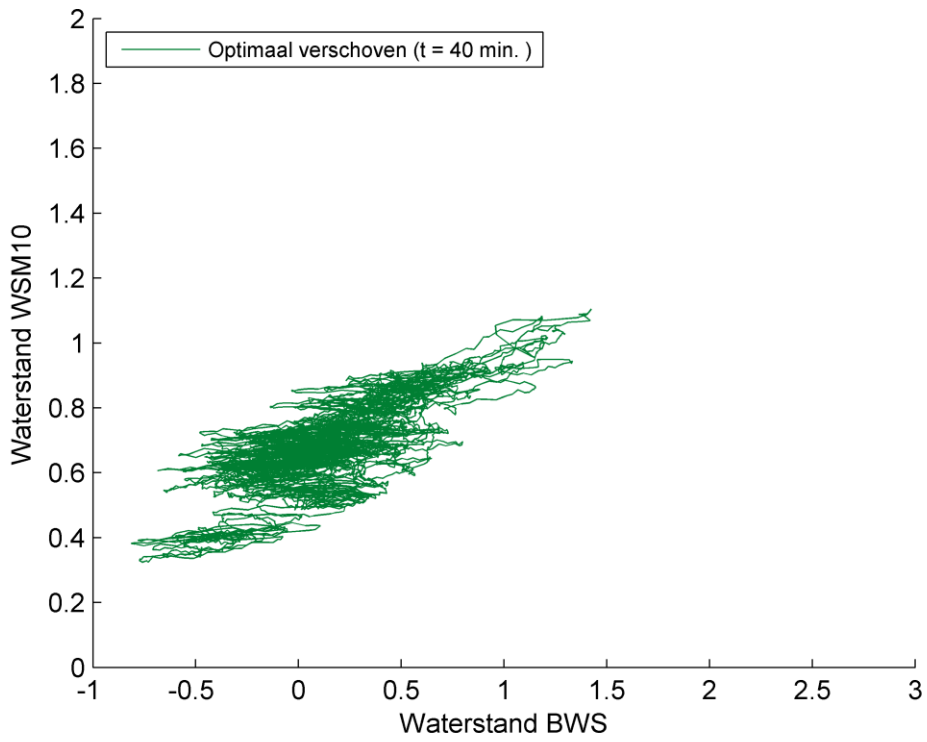
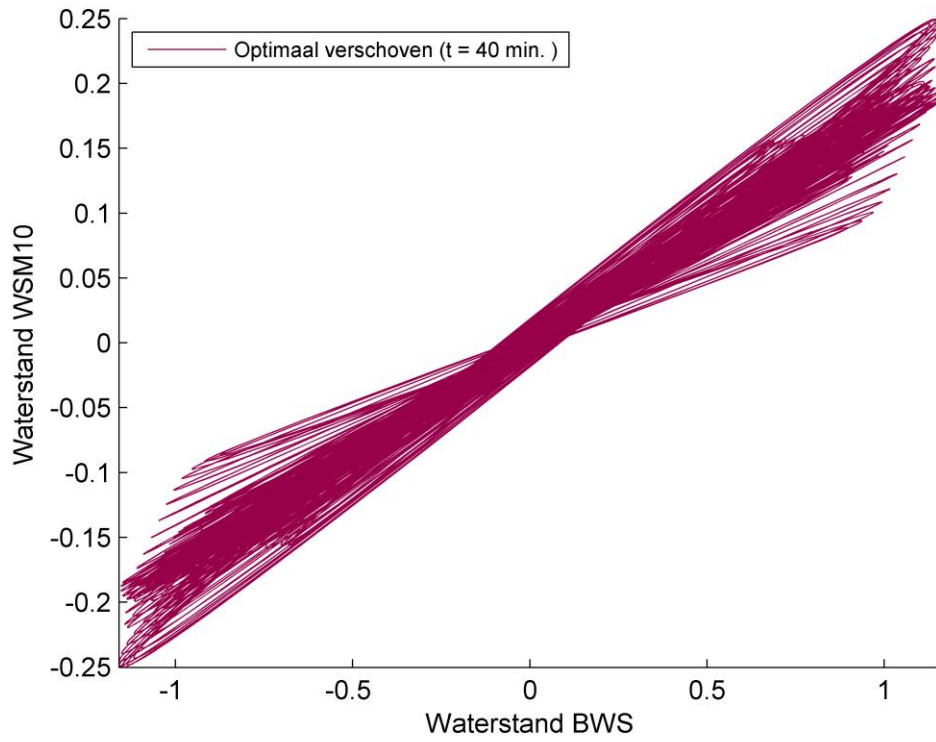


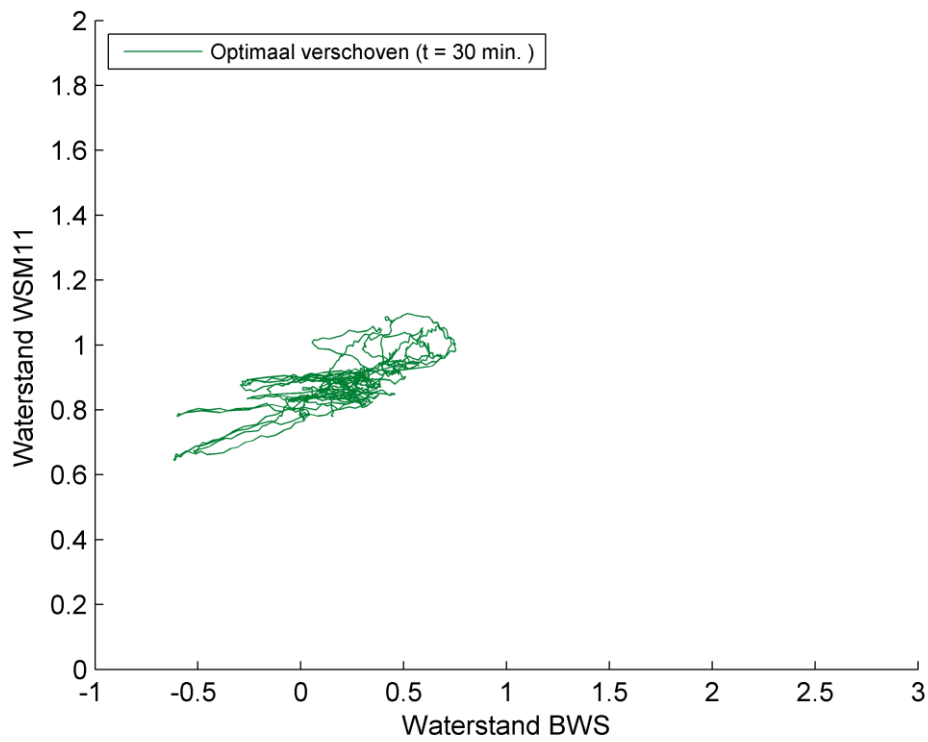
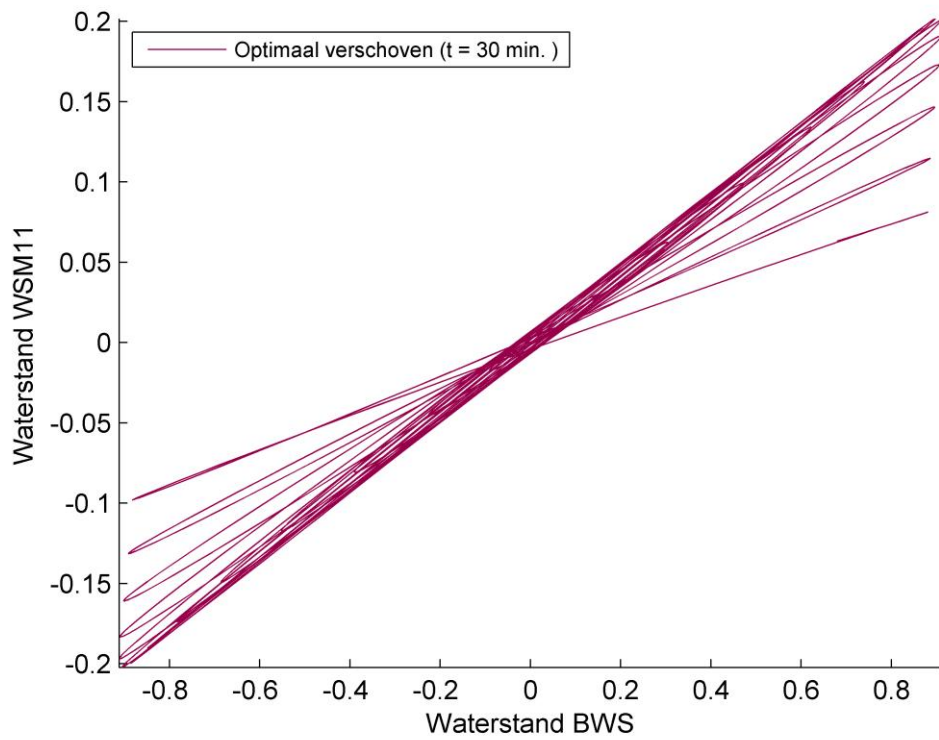


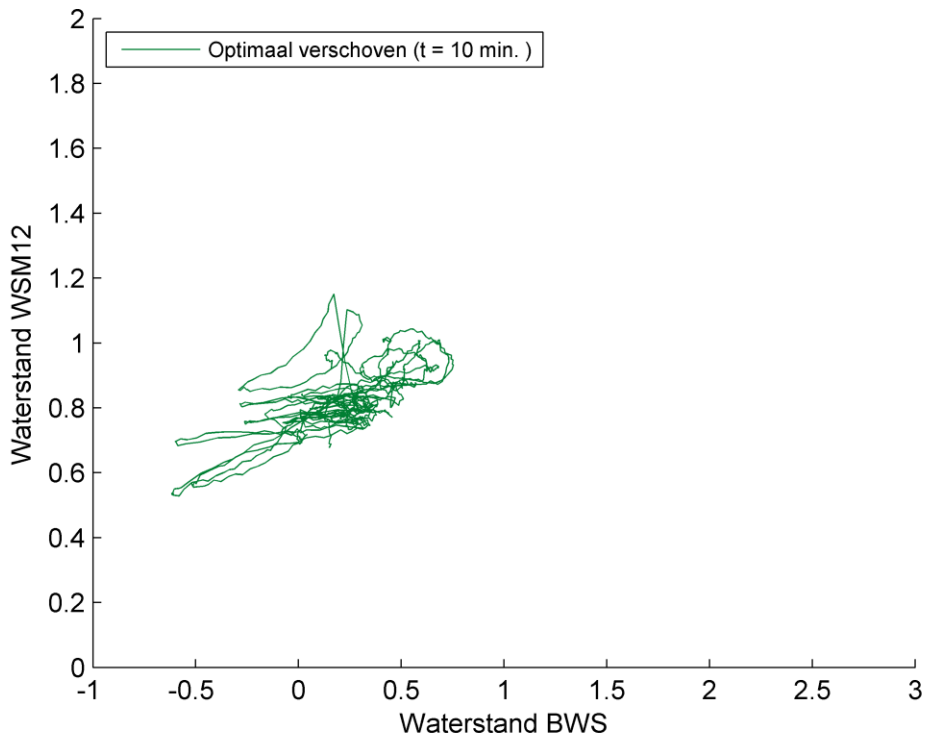
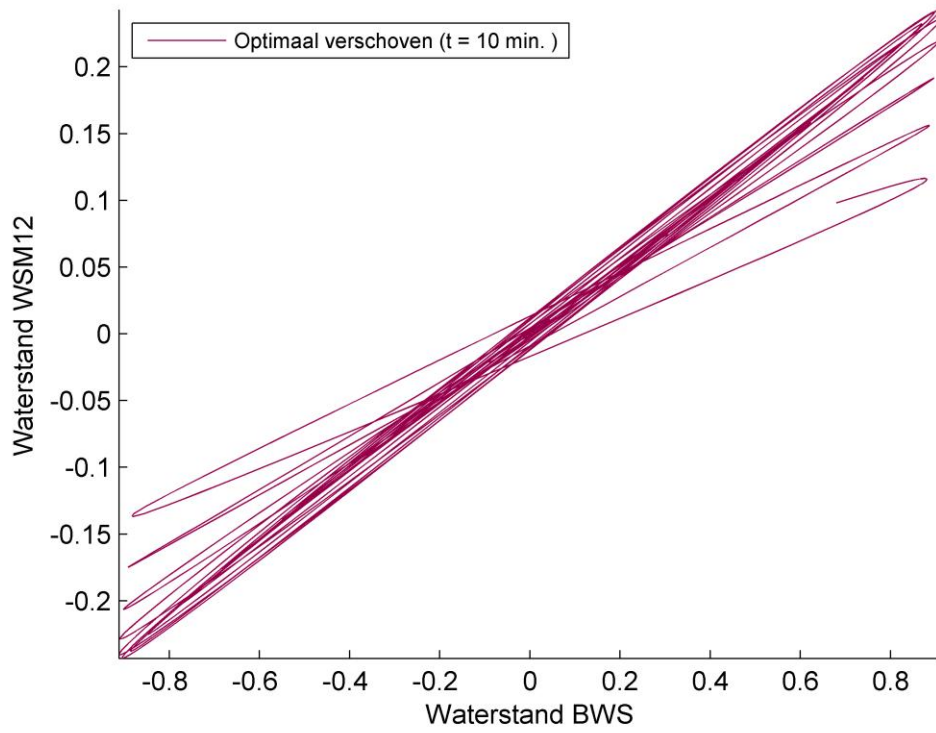


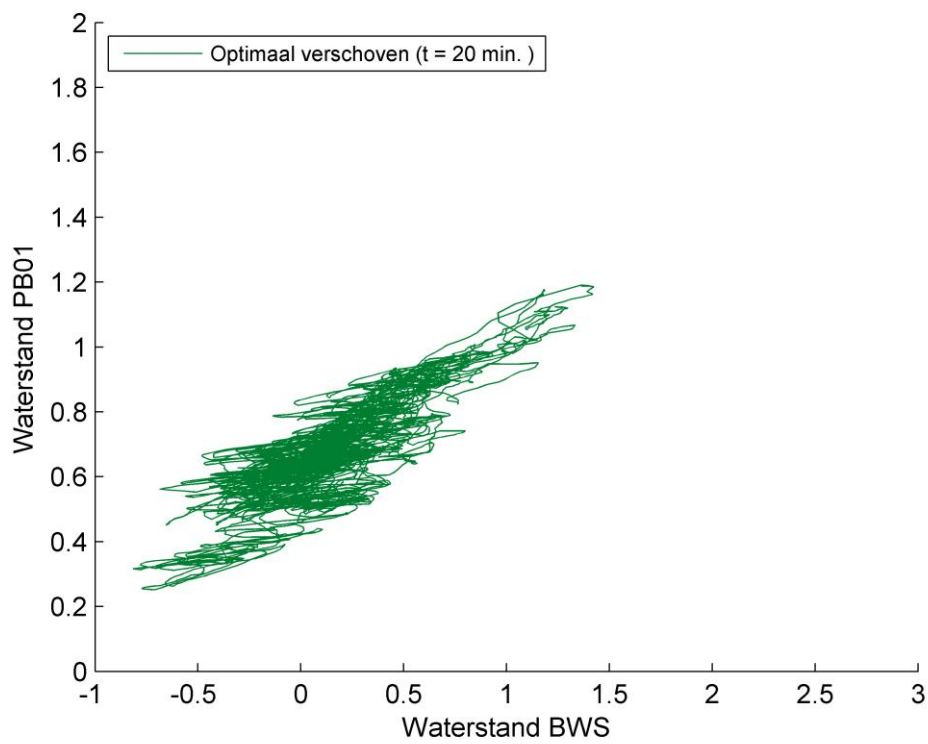
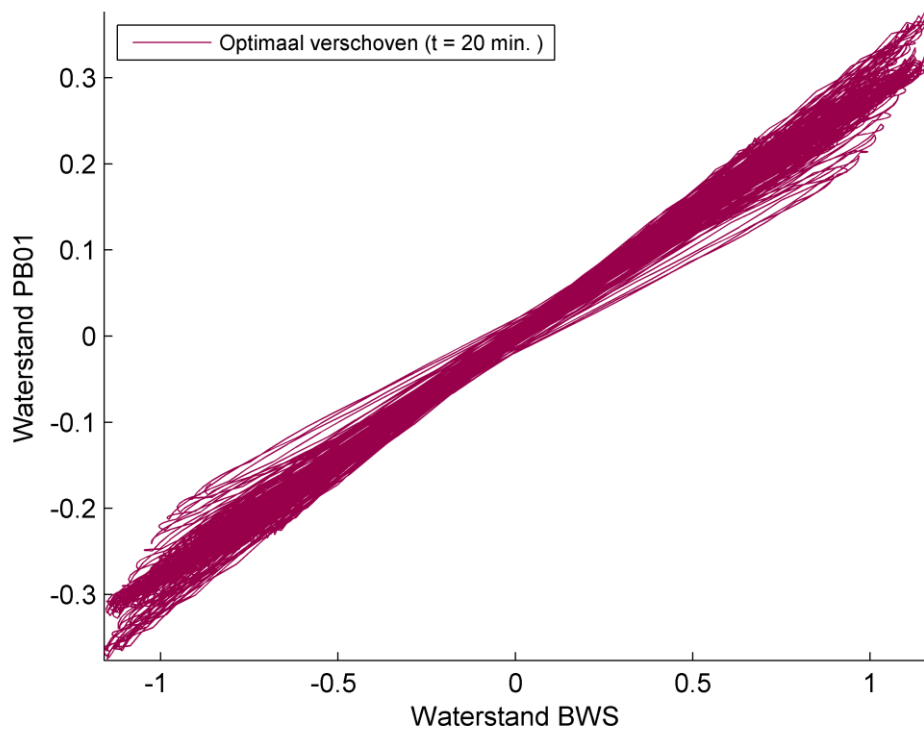


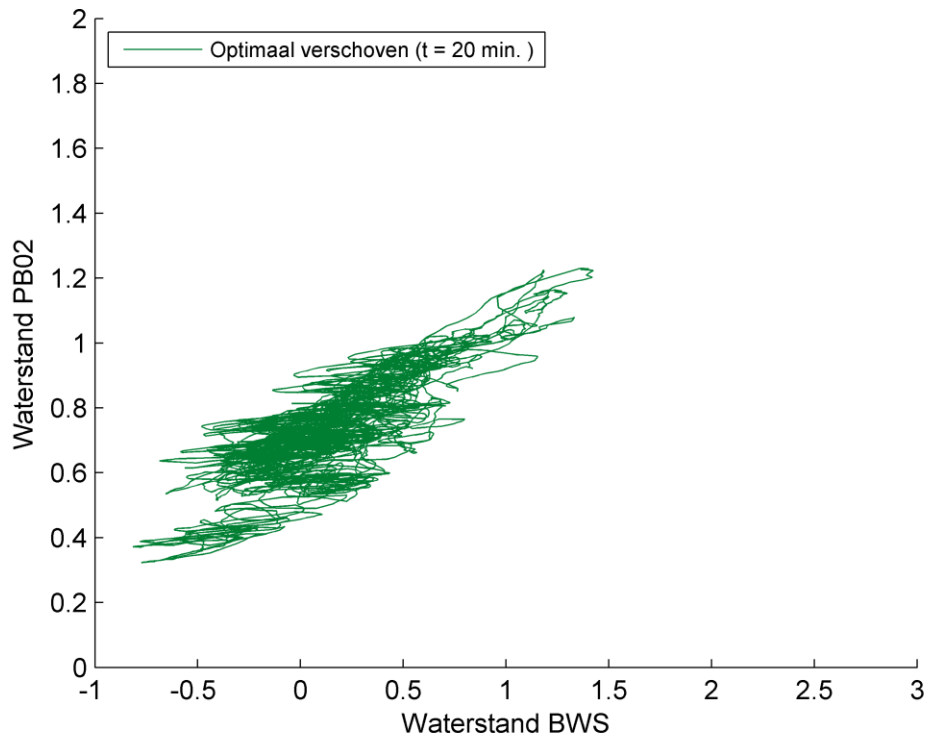
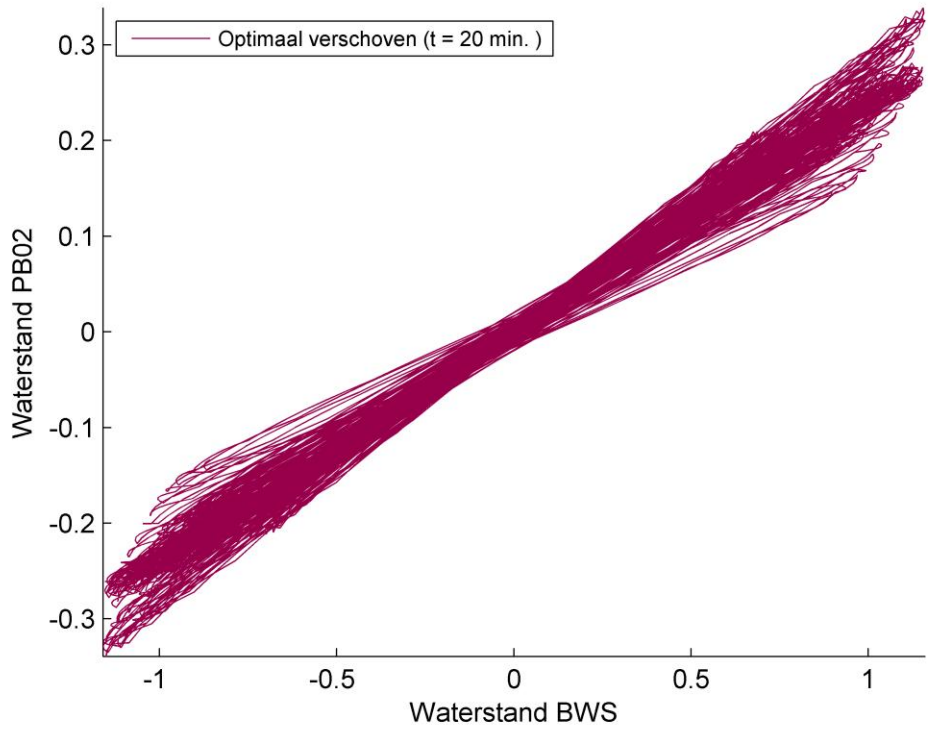


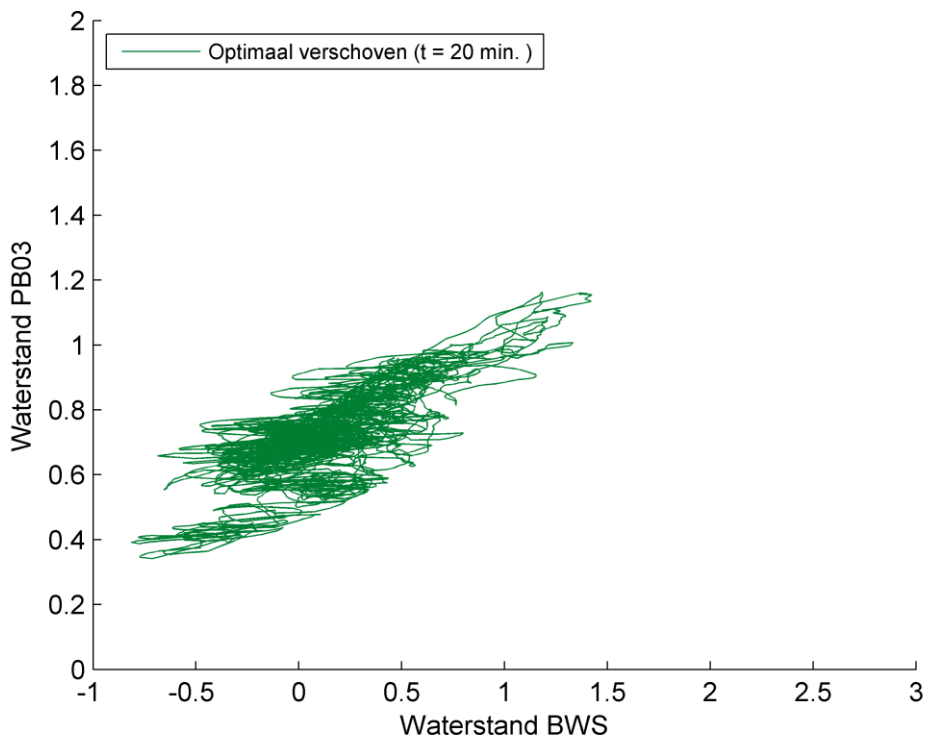
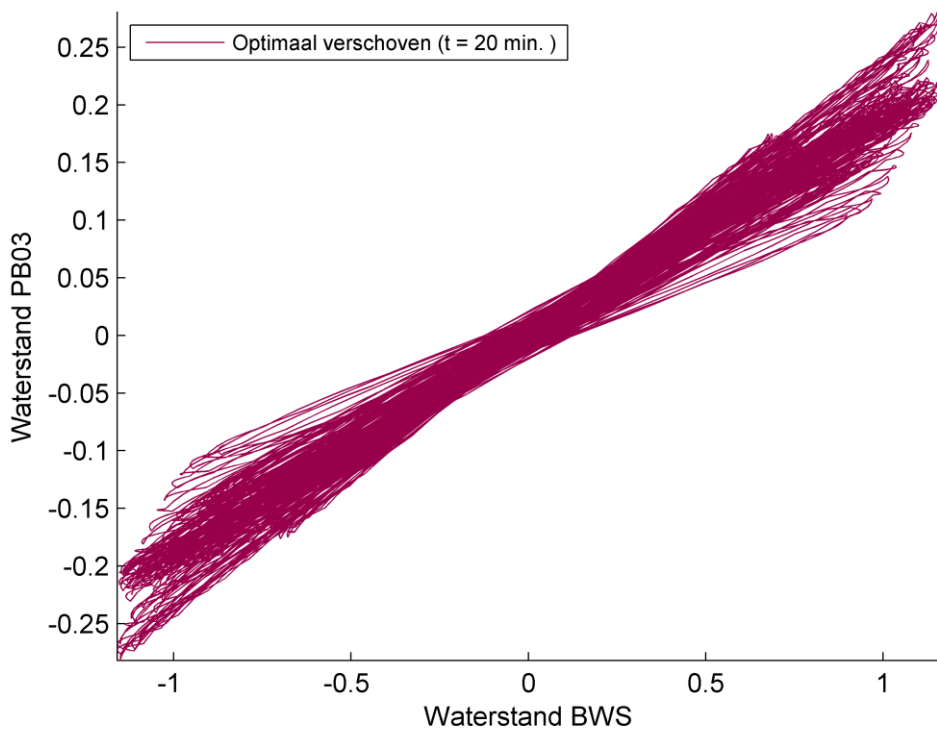












BIJLAGE V PLAXFLOW

V.1. Inleiding

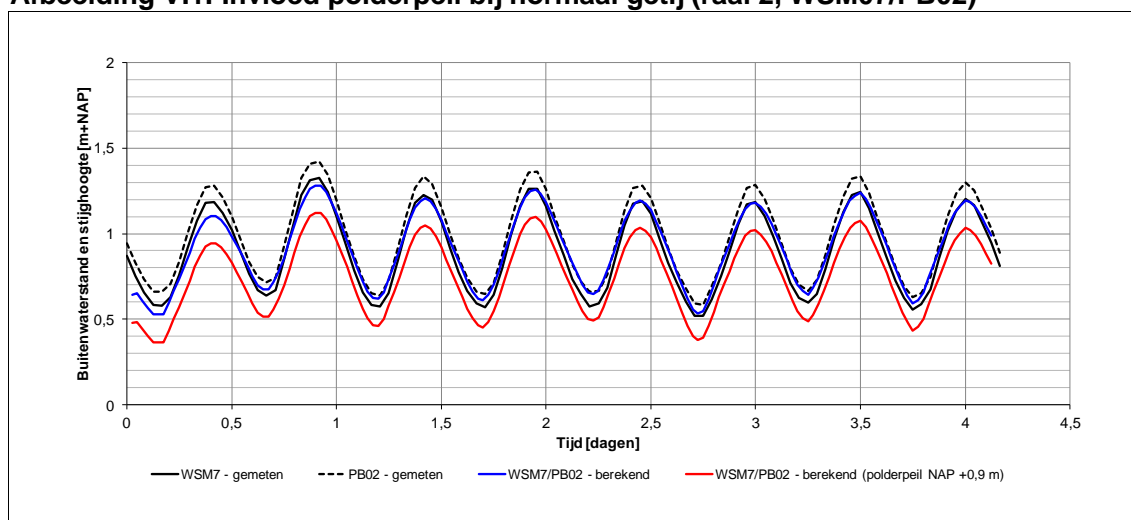
Bij het opstellen en fitten van het PlaxFlow-model zijn diverse aannames gemaakt. Deze bijlage presenteert een gevoeligheidsanalyse van de volgende modelspecifieke uitgangspunten:

- polderpeil achterland (NAP +1,2 m). In deze bijlage is een polderpeil van NAP +0,9 m gehanteerd, het slootpeil/polderpeil direct aan de binnenzijde van de dijk. Door deze gevoeligheidsanalyse is de invloed van verschillende polderpeilen in het achterland beschouwd;
- doorlatendheid sliblaag geul ($k = 0,5$ m/dag). In deze bijlage is deze doorlatendheid met een factor 5 verhoogd en verlaagd. Door deze gevoeligheidsanalyse is de invloed van de sliblaag op het stijghoogteverloop beschouwd;
- doorlatendheid kleilaag tussen NAP -1,5 m en NAP -2,0 m ($k = 0,05$ m/dag). In deze bijlage is deze doorlatendheid met een factor 5 verhoogd. Door deze gevoeligheidsanalyse is de invloed van de afsluitende kleilaag beschouwd (geen sprake van zand op zand situatie).

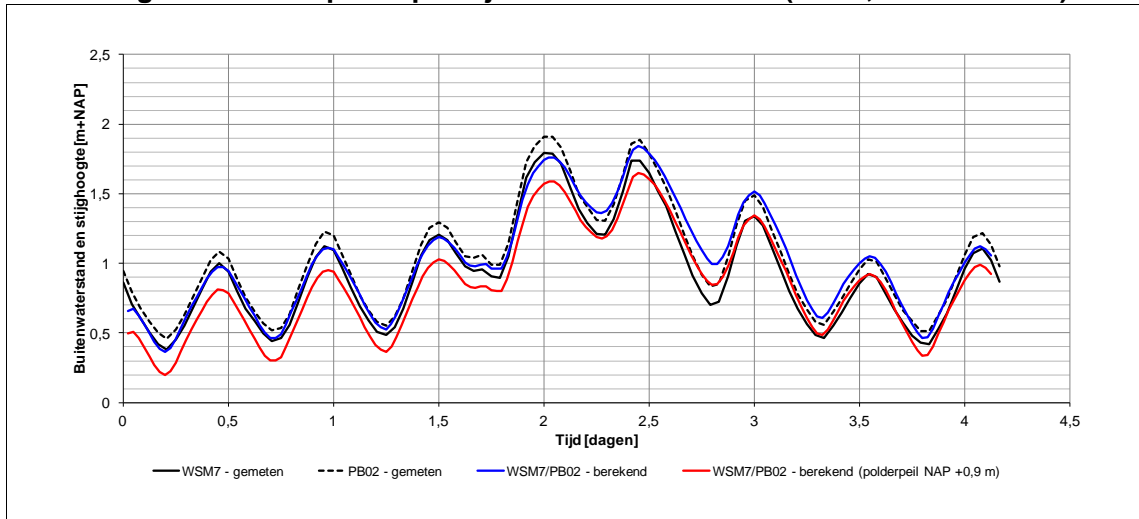
V.2. Invloed polderpeil

Wanneer het polderpeil in het PlaxFlow-model op NAP +0,9 m wordt gezet, is de berekende stijghoogte consequent te laag vergeleken met de gemeten stijghoogte, zoals weergegeven in Afbeelding V.1 en Afbeelding V.2 voor WSM07/PB02 in raai 2. De andere waterspanningsmeters laten hetzelfde beeld zien. Hier is geconcludeerd dat de stijghoogte voornamelijk wordt beïnvloed door het (hogere) polderpeil in het achterland, en niet door het slootpeil direct achter de dijk. Hieruit kan ook geconcludeerd worden dat het eerste watervoerende pakket en het freatische pakket twee geohydrologisch gescheiden systemen zijn, anders zou de invloed van het (verre) achterland niet zo groot zijn.

Afbeelding V.1. Invloed polderpeil bij normaal getij (raai 2, WSM07/PB02)



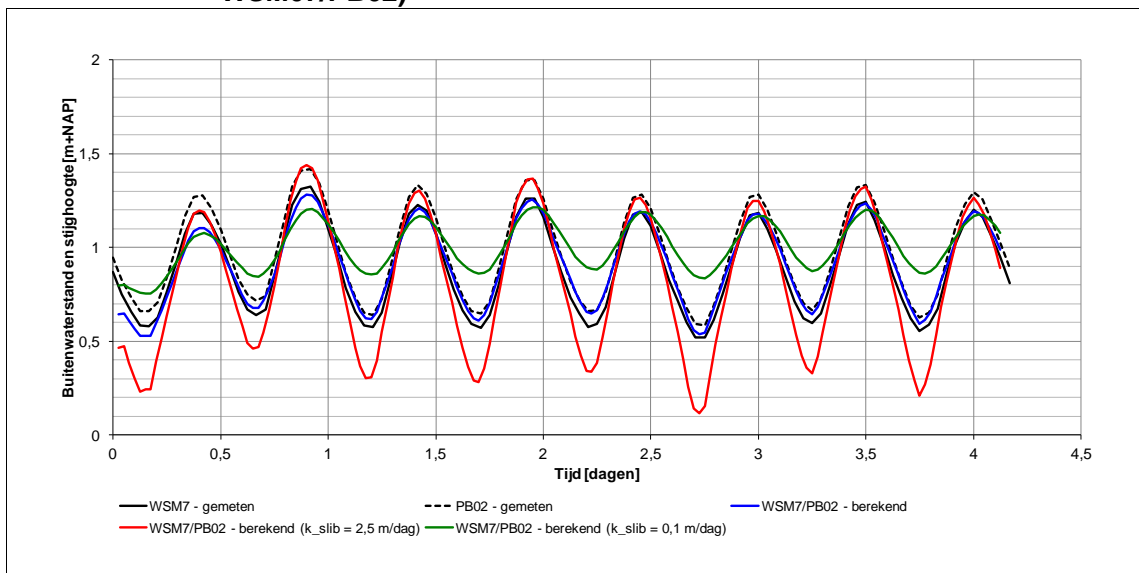
Afbeelding V.2. Invloed polderpeil tijdens decemberstorm (raai 2, WSM07/PB02)



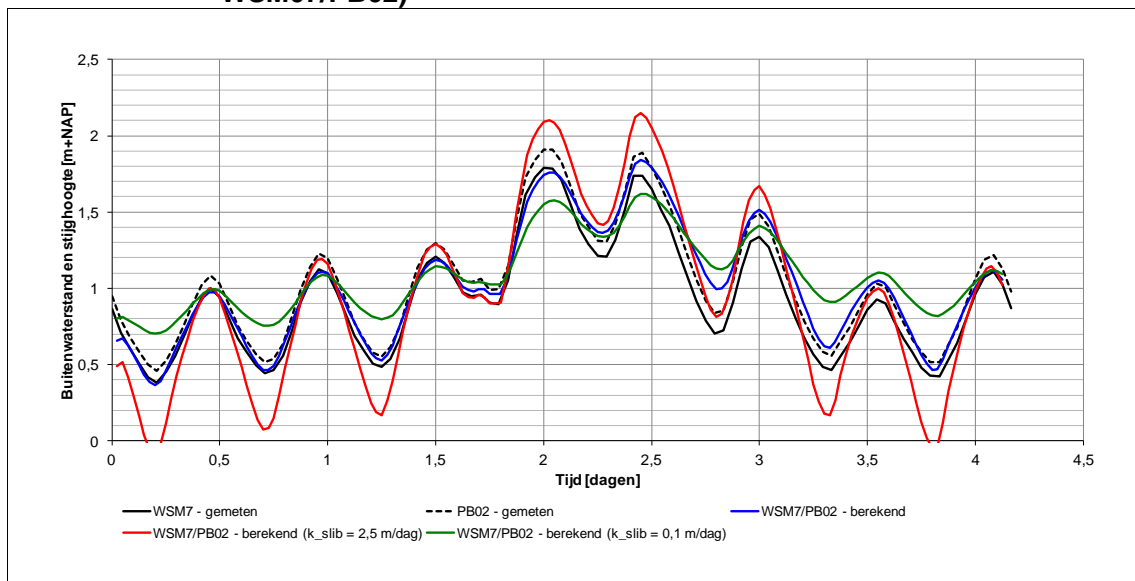
V.3. Invloed doorlatendheid sliblaag

Er is geen in-situ informatie bekend over de dikte en doorlatendheid van de sliblaag in de geul. Wel kan er een intredeweerstand worden gemodelleerd. De dikte is constant op 0,5 m aangehouden, de doorlatendheid is bepaald door de amplitude van de stijghoogte te fitten. Tussen de buitenwaterstand en de gemeten stijghoogte in het eerste watervoerende pakket zit namelijk een demping van de amplitude, welke wordt veroorzaakt door de intredeweerstand van de sliblaag. Met een doorlatendheid van 0,5 m/dag wordt een goede fit verkregen, een voorbeeld hiervan is weergegeven in Afbeelding V.3 en Afbeelding V.4. Wanneer de doorlatendheid van de sliblaag groter dan wel lager wordt genomen, wordt de amplitude respectievelijk groter dan wel kleiner en is de fit niet goed meer.

Afbeelding V.3. Invloed doorlatendheid sliblaag bij normaal getij (raai 2, WSM07/PB02)



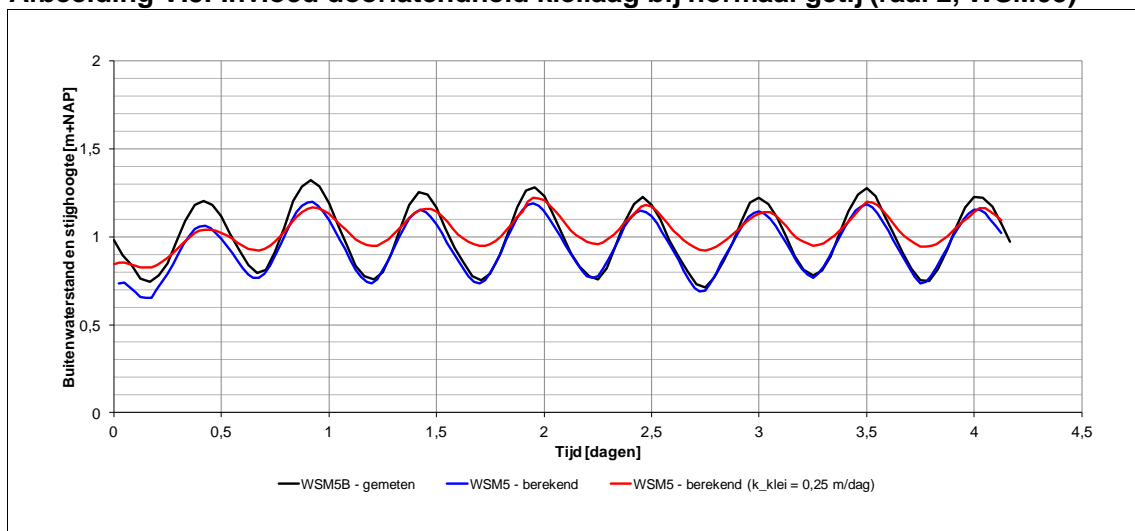
Afbeelding V.4. Invloed doorlatendheid sliblaag tijdens decemberstorm (raai 2, WSM07/PB02)



V.4. Invloed doorlatendheid kleilaag

Wanneer de doorlatendheid van de kleilaag tussen NAP -1,5 m en NAP -2,0 m wordt verhoogd, verkleint de amplitude, zoals weergegeven in Afbeelding V.5 voor waterspanningsmeter WSM05 in het achterland. Dit komt doordat de stijghoogte steeds meer beïnvloed wordt door het relatief constante slootpeil direct achter de dijk. Overigens kan de amplitude voor deze waterspanningsmeter iets beter gefit worden door de doorlatendheid van de sli blaag wat te vergroten (zie vorige paragraaf), echter wordt dan de amplitude bij de andere waterspanningsmeters te groot. Hieruit is geconcludeerd dat de kleilaag tussen NAP -1,5 m en NAP -2,0 m zorgt voor een geohydrologische scheiding tussen het eerste watervoerend pakket en het freatische pakket.

Afbeelding V.5. Invloed doorlatendheid kleilaag bij normaal getij (raai 2, WSM05)



BIJLAGE VI BEREKENINGEN

Rekenregel Sellmeijer I
Locatie WSM08

parameter	eenheid	waarde
γ_w	kN/m ³	10
γ'_p	kN/m ³	17
θ	°	41
v (kin. viscositeit water)	m ² /s	1,33E-06
g	m/s ²	9,81
η (coeff White)	-	0,25
k (specifieke doorlatendheid)	m/s	2,00E-04
D (dikte watervoerend pakket)	m	25
d ₇₀ (70% percentief PSD)	m	1,41E-04
κ	-	2,71E-11
γ (veiligheidsfactor)	-	1,2
uittreepunt	m+NAP	0,90

parameter	eenheid	1. TRWD	2. Dir. Extrap.	3a. Schelde. Stat.	3b. Schelde. Orig.	4. Frequentie-analyse	5. Plax-Flow	6. Steady State
H stijghoogte berekend	m+NAP	3,18	2,15	2,96	3,00	2,43	2,84	3,70
ΔH aanwezig	m	2,28	1,25	2,06	2,10	1,53	1,94	2,80
c	-	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03
a	-	1,23	1,09	1,20	1,20	1,13	1,18	1,29
L benodigd	m	37,43	18,77	33,32	34,05	23,83	31,20	46,76
L benodigd incl factor	m	44,91	22,53	39,99	40,86	28,60	37,44	56,11
L aanwezig	m	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00
Kwelwengtetekort	m	-10,09	-32,47	-15,01	-14,14	-26,40	-17,56	1,11

Rekenregel Sellmeijer II
Locatie WSM08

parameter	eenheid	1. TRWD	2. Dir. Extrap.	3a. Schelde. Stat.	3b. Schelde. Orig.	4. Frequentie-analyse	5. Plax-Flow	6. Steady State
H stijghoogte berekend	m+NAP	3,18	2,15	2,96	3,00	2,43	2,84	3,70
H uittreepunt	m+NAP	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
ΔH aanwezig	m	2,28	1,25	2,06	2,10	1,53	1,94	2,80
d	m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
γ_n	-	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
γ_b	-	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
γ'_p	kN/m ³	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
γ_w	kN/m ³	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
k (specifieke doorlatendheid)	m/s	2,00E-04	2,00E-04	2,00E-04	2,00E-04	2,00E-04	2,00E-04	2,00E-04
d70m (ref tov schaalproeven)	m	2,08E-04	2,08E-04	2,08E-04	2,08E-04	2,08E-04	2,08E-04	2,08E-04
d70 (70% percentief PSD)	m	1,41E-04	1,41E-04	1,41E-04	1,41E-04	1,41E-04	1,41E-04	1,41E-04
η (coeff White)	-	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
θ	°	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00
tan(θ)	-	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
kin. Viscositeit water	m ² /s	1,33E-06	1,33E-06	1,33E-06	1,33E-06	1,33E-06	1,33E-06	1,33E-06
intrinsieke doorlatendheid	-	2,71E-11	2,71E-11	2,71E-11	2,71E-11	2,71E-11	2,71E-11	2,71E-11
D	m	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
F1	m	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
F2	m	0,15	0,20	0,16	0,16	0,18	0,16	0,14
F3	m	1,14	1,02	1,11	1,12	1,05	1,10	1,19
L aanwezig	m	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00
ΔH_c	m	2,90	3,30	2,96	2,95	3,14	2,99	2,81
L kritisch (Sellmeijer)	m	57,13	27,55	50,47	51,69	35,46	47,13	72,4
Kwelweglengtetekort	m	2,13	-27,45	-4,53	-3,31	-19,54	-7,87	17,4