



Waterschap **Scheldestromen**

## PROJECT OVERSTIJGENDE VERKENNING PIPING

EFFECT TIJDSAFHANKELIJKHEID OP STIJGHOOGTE BIJ GETIJDWATEREN

UITGEWERKT VOOR  
DIJKRING 32 ZEEUWS VLAANDEREN,  
KOP VAN OSSENISSE

Datum : maandag 16 maart 2018  
Versie : 1.0  
Registratienummer: 2018xxxxxxx  
Auteur : Hans van der Sande

## Inhoudsopgave

Aanleiding .....	4
1 Inleiding.....	5
1.1 Doel.....	5
1.2 Leeswijzer .....	5
2 Opzet onderzoek .....	6
2.1 Onderzoeklocatie .....	6
2.2 Gedetailleerdheid grondonderzoek .....	6
2.3 Werkvolgorde.....	6
2.3.1 Keuze locatie sonderingen .....	6
2.3.2 Keuze locatie boringen met peilbuizen .....	7
2.3.3 Keuze locatie doorlatendheid metingen en grofheid zand .....	7
2.3.4 Bijzonderheid peilbuizen.....	8
2.3.5 Peilbuismetingen .....	8
2.3.6 Laboratorium onderzoek .....	8
2.3.7 Geotechnisch lengteprofiel .....	8
2.3.8 Doorlooptijd onderzoek .....	9
2.4 Analyse van het grondonderzoek .....	9
2.5 Grondwaterstromingsmodel .....	10
2.6 Piping.....	10
2.7 Afschatting kansrijkheid toepassing tijdsafhankelijkheid voor andere gebieden	10
3 Werkwijze .....	11
3.1 Hydraulische belasting .....	11
3.1.1 Analyse buitenwaterstanden.....	11
3.1.2 Peilbuismetingen .....	12
3.1.3 Analyse peilbuismetingen t.b.v. piping .....	13
3.1.4 Analyse peilbuismetingen t.b.v. binnenwaartse stabiliteit .....	15
3.1.5 Analyse peilbuismetingen t.b.v. buitenwaartse stabiliteit.....	16
3.2 Profiel schematisatie.....	16
3.2.1 Geotechnisch lengteprofiel .....	16
3.2.2 Profielcontour inclusief onderwateroever .....	17
3.2.3 Dwarsprofiel met grondopbouw .....	17
3.3 Grondwaterstromingsmodel .....	17
3.3.1 Profiel schematisatie .....	18
3.3.2 Hydraulische en modelspecifieke randvoorwaarden .....	20
3.3.3 Kalibratie doorlatendheid.....	20
3.4 Piping en Heave analyse .....	21
3.4.1 Basisscenario .....	22
3.4.2 Schematiseringsfactoren .....	22
4 Resultaten en deel analyses .....	24
4.1 Analyse buitenwaterstanden .....	24
4.2 Analyse peilbuismetingen.....	24
4.3 Correlatie grofheid zand (D70) en doorlatendheid.....	24
4.4 Effect tijdsafhankelijkheid .....	25
4.4.1 Piping .....	25
4.4.2 Binnenwaartse stabiliteit.....	26
4.4.3 Buitenwaartse stabiliteit .....	26
4.5 Grondwatermodellering.....	26

---

4.5.1	Kalibratie doorlatendheid.....	27
4.5.2	Effect Intredepunt .....	27
4.5.3	Doorlatendheid van de aquifer (waterdoorlatende laag).....	29
4.5.4	Vorm van peilbuismetingen en modeluitkomsten.....	32
4.5.5	Validatie modelinstellingen.....	33
4.5.6	Conclusie .....	34
4.6	Piping analyse .....	35
5	Kansrijkheid toepassing tijdsafhankelijkheid voor andere gebieden .....	36
6	Conclusies en advies .....	37
6.1	Conclusie.....	37
6.2	Advies .....	38
6.3	Vervolg .....	39
7	Referentielijst .....	40
8	Appendices .....	41
9	Begrippen en symbolen.....	42
10	Lijst met figuren en tabellen .....	43
Bijlage 1, Situering onderzoeksgebied .....		44
B1.1 Relatie, met VNK beschouwing.....		44
B1.2 Ligging beschouwde trajecten.....		44
B1.3 Toelichting op trajectniveau .....		45
Bijlage 2, Overzicht locaties onderzoek .....		46
Bijlage 3, Bepaling gemiddelde stormopzet.....		47
Bijlage 4, Duur en effect waterstandsval .....		51
B4.1 Duur waterstandsval uit waarnemingen.....		51
B4.2 Effect waterstandsval op de respons in de peilbuis.....		53
B4.3 Resulterende respons van alle peilbuizen op de buitenberm.....		56
B4.4 Gemiddelde stijgsnelheden in peilbuis.....		57
Bijlage 5, Resultaat peilbuisanalyse bij dp 238.....		58
Bijlage 6, waterstandsverloop bij storm .....		61
Bijlage 7, Toelichting schematiseringsfactor bij piping .....		65
Bijlage 8, Kalibratie grondwaterstromingsmodel nader beschouwd .....		66
Bijlage 9, Effect doorlatendheid Sloot .....		67

## Aanleiding

In het nieuwe dijkverbeteringsprogramma HWBP is een Project Overstijgende Verkenning opgenomen naar het bezwijkmechanisme piping. Hierin wordt de problematiek inclusief oplossingsrichtingen op een landelijk niveau onder de loep genomen.

Eén van de aspecten is het vergroten van de kennis - over grondopbouw, eigenschappen van grondlagen en tijdsafhankelijkheid van de stijghoogte van de waterstand onder de dijk. De verwachting is dat hierdoor op termijn de benodigde maatregelen ingeperkt kunnen worden en dat de omvang van de maatregel beter kan worden ingeschat.

Binnen dijkring 32 (Zeeuws Vlaanderen) is het de bedoeling om de kans op piping verder te kwantificeren door specifiek in te zoomen op het effect van tijdsafhankelijk op de stijghoogte in en onder de dijk. Hiervoor is lokaal grondonderzoek nodig in combinatie met peilbuismetingen. De onderzoekslocatie bij de Kop van Ossenissee bestaat uit een deel dat grotendeels is afgekeurd bij de verlengde toetsronde (2013) en een deel dat binnen VNK-2 een hoge faalkans heeft opgeleverd.

Het waterschap heeft bij de toetsing in 2010 reeds gebruik gemaakt van reductie van de stijghoogte door tijdsafhankelijkheid. Op basis van een beperkt aantal metingen is voor de Noordzeekust, de Westerschelde en de Oosterschelde een gebiedsreductie afgeleid waarbij rekening is gehouden met het al dan niet aanwezig zijn van voorland (slik/schor, strand).

Voor de verlengde derde toetsronde (2013) is de methode verder verfijnd en in Zeeuws Vlaanderen voor een traject van 3 kilometer bij de Kop van Ossenissee toegepast om te komen tot een definitief veiligheidsoordeel. Deze methode is ook gebruikt voor de Case Zeeuws Vlaanderen van de werkwijzer piping (2014).

Het doel van het onderzoek is het kwantificeren van het effect van de tijdsafhankelijkheid en vaststellen onder welke voorwaarden deze reductie in rekening kan worden gebracht.

Tevens zal onderzocht worden in hoeverre er een relatie te leggen is tussen de verschillende parameters die in het pipingproces een belangrijke rol spelen zoals de zandgrofheid (D70), de doorlatendheid van het zand, het effect van de tijdsafhankelijkheid en de dikte van de watervoevende zandlaag.

Het effect van waterstandreductie kan ook nuttig zijn voor trajecten waar de faalkans door piping groot is, omdat dit een directe relatie heeft met de mogelijke versterkingsopgave ten gevolge van de nieuwe normering. Daarom wordt in dit onderzoek een tweede traject meegenomen, waarvan binnen het project VNK2 een hoge faalkans berekend is, terwijl bij de toetsing in 2010 het traject op alle sporen is goedgekeurd. Het verkleinen van de onzekerheden van de verschillende parameters is van groot belang voor het WBI 2017 en de doorwerking op de benodigde afmeting ten gevolge van de nieuwe normering.

Afhankelijk van de uitkomsten van de analyse heeft het project een bepaalde zeggingskracht. Als er geen relatie te leggen is tussen de zandgrofheid en de gemeten doorlatendheid en de zandgrofheid en de berekende doorlatendheid op basis van peilbuismetingen kan het nut van gedetailleerd onderzoek naar de grondparameters (D70 en kd waarde) worden betwijfeld.

## 1 Inleiding



Figuur 1: ontstaan van zandmeevoerende wel

In het nieuwe dijkverbeteringsprogramma HWBP is een Project Overstijgende Verkenning (POV) opgenomen naar het bezwijkmechanisme piping (zie Afbeelding 1). Hierin wordt de problematiek inclusief oplossingsrichtingen op een landelijk niveau onder de loep genomen. Eén van de aspecten is het vergroten van de kennis over grondopbouw, eigenschappen van grondlagen en tijdsafhankelijk-

heid van de stijghoogte van de waterstand onder de dijk. De verwachting is dat hierdoor op termijn de benodigde maatregelen ingeperkt kunnen worden en dat de omvang van de maatregel beter kan worden ingeschat.

### 1.1 Doel

Het doel van het onderzoek is het kwantificeren van het effect van de tijdsafhankelijkheid en vast te stellen onder welke voorwaarden deze reductie in rekening kan worden gebracht. Door peilbuismetingen is het mogelijk om het piping probleem te beperken en scherper te begrenzen.

Het verder operationaliseren van de gehanteerde systematiek vormt het doel van dit onderzoek, zoals ook deels beschreven is in de case Zeeuws Vlaanderen van de werkwijze piping en in de rapportage van de verlengde derde toetsronde, onderdeel dijken. Hiermee wordt deze kennis ontsloten voor meerdere waterkeringbeheerders. Het verkleinen van onzekerheden van verschillende parameters is van groot belang voor het WBI 2017 en de doorwerking op de benodigde afmetingen ten gevolge van de nieuwe normering.

Het nagaan in hoeverre er een relatie te leggen is tussen de verschillende parameters die in het pipingproces een belangrijke rol spelen zoals de zandgrofheid (D70), de doorlatendheid, het effect van de tijdsafhankelijkheid en de dikte van de watervoerende zandlaag vormt een subdoel. Het inzichtelijk maken hoe van een minder conservatief verloop van de stijghoogte bij stabiliteitsanalyses is eveneens een subdoel.

Het kunnen toepassen van reductie van stijghoogte door tijdsafhankelijkheid is kansrijk voor getijdegebieden (kust, estuaria, benedenrivieren) en meren. Mogelijk ook voor relatief korte hoogwatergolven op rivieren (Maas). In algemene zin zal een uitspraak worden gedaan op basis van het waterstandsverloop bij hoogwater.

### 1.2 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op verschillende aspecten die van belang zijn bij het opzetten van grondonderzoek en het uitzetten van peilbuismetingen. De gehanteerde werkwijze van de verschillende analyses worden beschreven in hoofdstuk 3. De resultaten van de analyses wordt toegelicht in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de kansrijkheid voor het toepassen van tijdsafhankelijk in andere gebieden. De conclusies, het advies en het vervolg op dit onderzoek wordt in hoofdstuk 6 gepresenteerd. De referentielijst is te vinden in hoofdstuk 7.

Naast de bijgevoegde bijlagen wordt in dit rapport ook verwezen naar appendices. De appendices die eveneens bij dit rapport horen zijn opgenomen in een apart document (een Excel spreadsheet bestand, zie [2]). In Appendix 1 is een overzicht opgenomen van alle appendices met toelichting. In bijlage 8 van het rapport is eveneens een overzicht van de appendices opgenomen.

## 2 Opzet onderzoek

In het navolgende paragrafen zijn de verschillende fasen en aspecten van het onderzoek toegelicht.

### 2.1 Onderzoekslocatie

De onderzoeklocatie bestaat uit een deel dat is afgekeurd in de verlengde derde toetsronde en een deel dat binnen het project VNK-2 een hoge faalkans heeft opgeleverd. Hieraan is toegevoegd een aansluitende deel waar verificatie van de grondopbouw en respons nodig is, mede omdat bij VNK-2 een hoge faalkans is berekend. Tenslotte is 300 meter aan het onderzoek toegevoegd omdat tijdens de sinterklaasstorm van 2013 wellen geconstateerd zijn. In tabel 2.1-1 wordt voor ieder traject de aanleiding vermeld, het toetsoordeel (verlengde derde toetsronde 2013) en de faalkans piping binnen het VNK project gegeven.

dp van	dp tot	lengte	aanleiding	toetsoordeel	Faalkans piping VNK
217	220	300	sinterklaasstorm 2013, wellen	vold	niet berekend
220	232	1.200	verificatie grondopbouw en respons	n.o/ vold	1/360
232	248	1.600	afgekeurd bij verlengde 3e toetsronde	onvol	1/670 en 1/360
259	278	1.900	hoge faalkans VNK	vold	1/690

Tabel 2.1-1, trajectenindeling onderzoek

(n.o. =nader onderzoek)

In bijlage 1 wordt de ligging van de onderzoeklocaties op kaart aangegeven en is een overzicht van de faalkansen van VNK opgenomen.

### 2.2 Gedetailleerdheid grondonderzoek

Voor het onderzoek is het nodig om de grondopbouw ter plaatse van de buitenberm, de kruin, de binnenteen en het achterland te bepalen. De gedetailleerdheid van het grondonderzoek onderzoek wordt vooral bepaald door de noodzaak om toegesneden binnenwaartse en buitenwaartse stabiliteitsanalyses te kunnen uitvoeren. Hiervoor is het noodzakelijk om inzicht te verkrijgen in de grondopbouw zowel langs- als dwarsrichting van de dijk. Zodoende wordt ter plaatse van de buitenberm, de kruin, de binnenteen en zo mogelijk in het achterland een doorlopend lengteprofiel opgesteld.

In bijlage 2 wordt een overzicht gegeven van de locaties van de sonderingen, boringen en peilbuizen, inclusief de boringen van eerder uitgevoerd onderzoek die in het kader van de verlengde derde toetsronde zijn geplaatst.

### 2.3 Werkvolgorde

#### 2.3.1 Keuze locatie sonderingen

Als eerste stap in het onderzoek worden sonderingen geplaatst, die de basis vormen voor de keuzes van de locaties van de boringen met peilbuizen.

Om een gedetailleerd beeld van de ondergrond en het dijklichaam te verkrijgen is zijn voor de sonderingen de volgende tussenafstanden aangehouden:

Buitenberm : 100 m (alleen als buitenwaartse stabiliteit een issue is).  
 Kruin : 50 m  
 Binnenteen : 100 m  
 Achterland : 100 m (indien mogelijk)

In het achterland is het kunnen uitvoeren van sonderingen en boringen afhankelijk van de bereikbaarheid en de bereidheid tot medewerking van de landeigenaren.

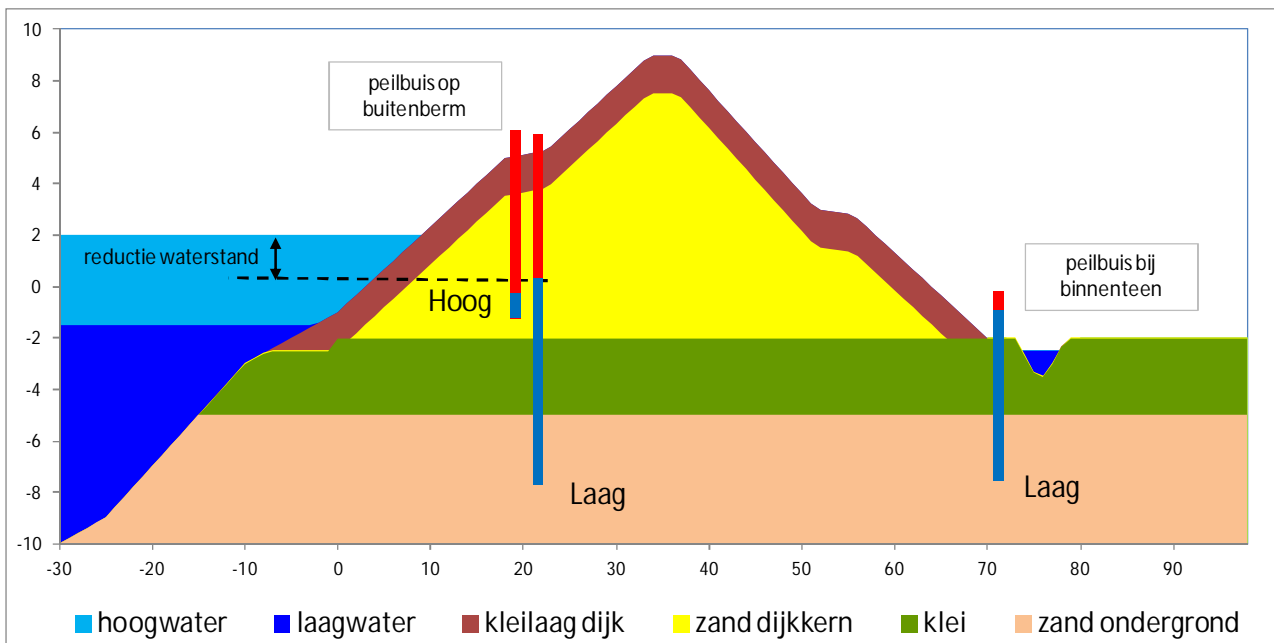
Voor dit onderzoek is ter plaatse van de kruin de tussenafstand verkleind naar 50 m om meer zekerheid te verkrijgen of er sprake is een 'zand op zand' situatie. In dat geval is piping geen issue, omdat er dan geen doorlopende pijp kan ontstaan.

Voor trajecten waar het al dan niet opbarsten van de deklaag relevant is, wordt geadviseerd om juist bij de binnenteen de tussenafstand te verkleinen naar 50 m om zekerheid in de ruimtelijke variatie van de afsluitende deklaag te verkrijgen. In die situatie is een tussenafstand van 100 meter bij de kruin toereikend.

Binnen dit onderzoek is bij de buitenberm geen geotechnisch lengteprofiel bepaald omdat buitenwaartse stabiliteit destijds geen issue was.

### 2.3.2 Keuze locatie boringen met peilbuizen

Op basis van de sonderingen zijn de locaties van de boringen bepaald. Per boring zijn één of meerdere peilbuizen geplaatst. Per dwarsprofiel zijn minimaal op twee posities peilbuizen geplaatst (kruin/buitenberm en binnenteen, zie figuur 2.3.2-1). Zo mogelijk een derde positie op het achterland. Hierbij wordt uitgegaan van een gemiddelde tussenafstand van 500 meter.



Figuur 2.3.2-1, dwarsprofiel met peilbuizen op buitenberm en bij binnenteen tijdens een hoogwater situatie

Gezien de geringe meerkosten voor het plaatsen van een peilbuis in een boring wordt geadviseerd om in elke boring altijd één of meer peilbuizen te plaatsen.

### 2.3.3 Keuze locatie doorlatendheid metingen en grofheid zand

Voor piping is de grofheid van het zand en de doorlatendheid met name ter plaatse van het uitstredpunt bepalend voor het kritieke verval. Daarom wordt bij het uitvoeren van boringen altijd ter plaatse van de binnenteen in het watervoerend pakket een zandmonster genomen en een Pompproef (Hvorslev methode) uitgevoerd. Deze metingen geven een indicatie voor de toe te passen doorlatendheid.

Om een indruk te krijgen van de ruimtelijke variatie van de korrelverdeling van het zand in dwarsrichting worden voor alle boringen zandmonsters genomen.

### 2.3.4 Bijzonderheid peilbuizen

Bij het plaatsen van peilbuizen is aan de onderzijde van de buis een zandvang aangebracht. Onder de filter is een dichte buis met een lengte van één meter aangebracht. Hierdoor blijft de filterwerking beter gegarandeerd als er sprake is van materiaaltransport door de filter. Met name voor gebieden met de fijne zandfracties essentieel om een langere periode te kunnen meten. Bij verzanding is regeneratie mogelijk door de buis 'schoon' te spoelen.

### 2.3.5 Peilbuismetingen

Voor alle peilbuizen zijn metingen verricht. Bij getijdewateren is een meetcampagne van twee maanden toereikend om een nauwkeurige inschatting te kunnen maken van de maximale stijghoogte in de peilbuis onder maatgevend omstandigheden.

Na afronding van de metingen is een analyse uitgevoerd om per peilbuis de maximale stijghoogte te bepalen, gebruikmakend van de methode die bij de toetsing is ontwikkeld.

Voor de locaties met een tussen zandlaag is nadrukkelijk gekeken of in deze laag sprake is van een gunstiger beeld voor de stijghoogte omdat er mogelijk geen respons op het buitenwater gemeten kan worden.

### 2.3.6 Laboratorium onderzoek

Het laboratorium onderzoek bestaat uit het bepalen van de korrelverdeling van zandmonsters inclusief de slibfractie ( $<63 \mu\text{m}$ ) en het uitvoeren van een aantal triaxiaal en samendrukkingsproeven voor kleimonsters en veen. In aanvulling op het veldwerk is in het laboratorium een classificatie van de hele boring uitgevoerd.

In dit onderzoek zijn de proeven volgens de inzichten uit 2010 uitgevoerd (nog niet geschikt voor ongedraineerd rekenen). De wijze waarop de proeven zijn uitgevoerd staat beschreven in bestaande protocollen, die door de verschillende onderzoeksbureaus gehanteerd worden.

Aandachtspunt hierbij is de wijze waarop de meta informatie van de verschillende proeven tot stand komt. Vaak is dit een handmatige actie. Dit vormt dan ook de bron van de meeste fouten (verkeerde locatie en diepte aanduiding).

Geadviseerd wordt om de meta gegevens uit het dinoloket (de z.g. GEF-bestanden) te vergelijken met de gegevens die door het laboratorium worden aangeleverd.

Vanaf 2017 is met de opdrachtnemer afgesproken dat de resultaten van de labproeven ook worden opgeleverd in het format van de landelijk Stowa database. Voor dit project, waarbij het onderzoek in 2014 is uitgezet, is dit niet aan de orde geweest.

### 2.3.7 Geotechnisch lengteprofiel

Ter plaatse van de kruin, binnenteen en achterland worden doorlopende lengteprofielen opgesteld op basis van de sonderingen en boringen.

In tweede instantie is de grondopbouw ook gekarakteriseerd volgens de indeling van het stochastische ondergrond schematisatie, aansluitend op het WBI2017.

De lengteprofielen zijn door het onderzoeksbureau opgesteld. Hiermee is de specialistische geotechnische kennis in de grondopbouw verwerkt, zodat bij de veiligheidsbeoordeling geen interpretatie van de sonderingen nodig is.

De geotechnische profielen vormen de basis voor het te gebruiken stochastisch ondergrondmodel. Door de gedetailleerdheid van het onderzoek wordt ervan uitgegaan dat de karakterisering in iedere doorsnede een scenariokans van 100%, waarbij in dwarsrichting ter plaatse van kruin, binnenteen en achterland de beschikbare grondopbouw gebruikt wordt.



### 2.3.8 Doorlooptijd onderzoek

Uit de verschillende onderzoekopdrachten is naar voren gekomen dat gerekend moet worden op een minimale doortijd van 6 maanden om alle onderdelen van het onderzoek te kunnen doorlopen. Met name het uitvoeren van de laboratoriumproeven is bepalend voor de doorlooptijd, omdat de capaciteit van laboratoria beperkt is.

Als voorbeeld is in figuur 2.3.8-1 een planning opgenomen van opdracht die in januari 2108 voor een traject op Tholen met een lengte van 3,5 km is uitgezet.

aspect / onderdeel	actie	houder	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
opdracht	aanvragen	waterschap	X																										
	offreren	Extern		X																									
Sonderen	voorbereiden	Extern			X	X	X	X	X	X	X																		
	uitvoeren	Extern									X	X	X	X															
boren	voorbereiden	Combi										X	X																
	uitvoeren	Extern										X	X	X	X														
labproeven	voorbereiden	Combi													X	X													
	uitvoeren	Extern														X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
lengteprofiel	voorbereiden	Extern												X	X														
	uitvoeren	Extern														X	X	X	X										
meten	uitvoeren	waterschap												X	X	X	X	X	X	X	X								
	analyseren	waterschap																				X	X	X	X				
resultaten	controle	waterschap																			X	X			X	X			
	analyseren	waterschap																				X	X				X	X	

Figuur 2.3.8-1, voorbeeld planning grondonderzoek, 2018 project op Tholen, Oosterschelde tussen dp 932 en 967

Uit deze planning blijkt dat de peilbuismetingen door het waterschap worden uitgevoerd. Verder is het essentieel dat voldoende capaciteit wordt gereserveerd voor het controleren en analyseren van de resultaten. Het controleren richt zich op de lengteprofielen en de meta informatie van de labproeven. Daarnaast wordt een analyse uitgevoerd van de peilbuismetingen. De resultaten van de labproeven worden nader beschouwd en verwerkt tot een proevenverzameling<sup>1)</sup>.

### 2.4 Analyse van het grondonderzoek

De verkregen data uit het grondonderzoek is geanalyseerd en er wordt vergeleken met de nu al beschikbare gegevens die gebruikt zijn bij de laatste toetsronde en bij VNK-2. Bij de vergelijking met de gegevens van VNK2 is gekeken naar de aanwezige gegevens uit de DINO-database en de gegevens die zijn toegevoegd op basis van lokale data.

Met behulp van de lengteprofielen is nagegaan in hoeverre een doorlopende deklaag van klei/veen onder de dijk aanwezig is zodat kan worden vastgesteld of piping aan de orde kan zijn (zand op zand betekent geen piping).

Vergelijking tussen de zandgrofheid (D70) en de gemeten doorlatendheid zal antwoord geven in hoeverre deze in de praktijk gecorreleerd zijn zoals in theorie wordt verondersteld.

De resultaten van de labproeven (klei en veen) worden meegenomen in de proevenverzameling van het waterschap, die de basis vormen van de grondparameters bij stabiliteitsberekeningen volgens de Coulomb -Mohr methode. In 2014 is dit onderzoek reeds uitgevoerd, zodat er geen proeven zijn uitgevoerd ten behoeve van het ongedraineerd rekenen. In het kader van dit onderzoek is dit ook niet relevant.

<sup>1)</sup> Voor het project op Tholen speelt piping geen rol. Vandaar dat er de grondwatermodellering ontbreekt.

## 2.5 Grondwaterstromingsmodel

De resultaten van de peilbuismetingen worden samen met de grondopbouw verwerkt in een grondwaterstromingsmodel met dynamische waterstandscondities (Plaxflow). Onderzocht is of een representatieve waarde voor de doorlatendheid af te leiden is. Hierbij zal ook gekeken worden naar anisotropie (verschil tussen horizontale en verticale doorlatendheid). Vergelijking tussen gekalibreerde doorlatendheid met de lokaal gemeten doorlatendheid (Horlev methode) moet antwoord geven op de vraag of pompproeven gebruikt kunnen worden om de representatieve doorlatendheid vast te stellen en of met een grondwaterstromingsmodel de doorlatendheid eenduidig vastgesteld kan worden.

## 2.6 Piping

De formule van Sellmeijer zal worden gebruikt om vast te stellen of er sprake is van een piping probleem, conform de het onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen en aansluitend bij methodiek van het WBI2017. Hierbij zal gebruik worden gemaakt van de resultaten van de peilbuismetingen, de gemeten zandgrofheid (D70), de gekalibreerde doorlatendheid (Plaxflow) en de gemeten doorlatendheid.

## 2.7 Afschatting kansrijkheid toepassing tijdsafhankelijkheid voor andere gebieden

In het onderzoek wordt aandacht besteed aan het afschatten van de kansrijkheid van het toepassen van een reductie door tijdsafhankelijkheid voor andere gebieden (meren en rivieren met relatief kortere hoogwatergolven) op basis van het waterstandsverloop bij opgetreden hoogwaterstanden en de opzet volgens vigerende randvoorwaarden.

### 3 Werkwijze

In dit hoofdstuk worden de werkwijze in het kort toegelicht van de benodigde stappen, die doorlopen moeten worden om een piping analyse te kunnen uitvoeren, gebruikmakend van peilbuis-metingen. Naast het beschrijven van de methode om het effect van de tijdsafhankelijkheid te kunnen kwantificeren, is ingegaan op de manier om tot een profiel schematisatie te komen. Hierbij is ook ingegaan op waterstand schematisatie ten behoeve van stabiliteitsbeschouwingen. Vervolgens wordt ingegaan op de specifieke aspecten van een grondwatermodellering. Tenslotte wordt ingegaan op de piping analyse gebruiken makend van het Oi2014 waarbij de verschillende resultaten van het uitgevoerd onderzoek zijn geïmplementeerd.

Omdat het rekening in brengen van tijdsafhankelijkheid nog niet in de beoordelingsystematiek van het WBI 2017 is opgenomen vormt het resultaat van de piping analyse een 'toets op maat' beoordeling. Dit geldt ook voor de stabiliteitsbeschouwingen.

In het rapport is de werkwijze globaal beschreven. Een meer gedetailleerde uitwerking van verschillende werkstappen zal worden beschreven in verschillende achtergrondrapporten, die primair voor intern gebruik bedoeld zijn.

#### 3.1 Hydraulische belasting

Het waterschap heeft bij de toetsing in 2010 reeds gebruik gemaakt van reductie van de stijghoogte door tijdsafhankelijkheid. Op basis van een beperkt aantal metingen is voor de Noordzeekust, de Westerschelde en de Oosterschelde een gebiedsreductie afgeleid waarbij rekening is gehouden met het al dan niet aanwezig zijn van voorland (slik/schor, strand).

Voor de verlengde derde toetsronde (2013) is de methode verder verfijnd en in Zeeuws Vlaanderen voor een traject van 3 kilometer bij de Kop van Ossenissee toegepast om te komen tot een definitief veiligheidsoordeel. Deze methode is ook gebruikt voor de Case Zeeuws Vlaanderen van de werkwijze piping (2014).

In het kader van dit onderzoek is de methode verder geoperationaliseerd. Het afleiden van een minder conservatieve inschatting van het waterstandsverloop voor buitenwaartse Macrostabiliteit is een uitbreiding van de eerder beschreven methode. In bijlage 4 en 6 wordt toegelicht op welke wijze een waterstand schematisatie bij stormcondities verkregen kan worden uit peilbuis-metingen.

Voor getijde gebieden is gebleken dat de regressieanalyse van peilbuis-metingen verbeterd kan worden door het meetsignaal op te splitsen in een gemiddeld deel (quasi-statisch) en een dynamische component. Voor het bepalen van de gemiddelde waterstand is een periode van 1 tot 10 getijden in ogenschouw genomen (= ½ tot 5 dagen).

In dit onderzoek is naar voren gekomen dat het verstandig is om een eventuele stormtoeslag op de maximale waterstand af te leiden ten gevolge van het waterstandsverloop tijdens stormomstandigheden (zie bijlage 6).

##### 3.1.1 Analyse buitenwaterstanden

Voor de analyse van de buitenwaterstanden zijn de waterstandgegevens van meetnet van Rijkswaterstaat gebruikt in de periode tussen 1985 en 2015. Alle meetstations in Zeeland zijn hierin betrokken.

Voor het bepalen van de gemiddelde buitenwaterstanden worden de volgende stappen doorlopen:

1. Bepaal per jaar de maximale gemiddelde waterstand voor periode van 1 tot 10 getijden.
2. Bepaal het gemiddelde en de standaardafwijking van de jaarmaxima van de gemiddelde waterstand bij de verschillende perioden.

3. Bepaal per normtraject, de gemiddelde stormopzet. Dit is de maximale waarde van de gemiddelde waterstand bij middeling over meerdere getijden op basis van een normale verdeling en de geldende terugkeertijd <sup>2)</sup>.

In bijlage 3 wordt de werkwijze voor het bepalen van de gemiddelde stormopzet verder toegelicht, waarbij ook aandacht wordt besteed aan relevante aspecten in de ontwikkeling van deze werkwijze.

Voor piping en Stabiliteit geldt dat de maatgevende buitenwaterstand bepaald moet worden bij de normeis op trajectniveau. Deze waterstand kan bijvoorbeeld met het WBI instrumentarium (Riskeer) worden bepaald.

Verder moet worden opgemerkt dat alleen een waterstand ter plaatse van het waterstandstation gebruikt mag worden voor het bepalen van de maatgevende situatie omdat bij de regressieanalyse van de peilbuismetingen ook alleen de waterstanden bij de meetstations gehanteerd zijn.

### 3.1.2 Peilbuismetingen

In de handleiding opzet peilbuis onderzoek [5] wordt ingegaan op verschillende aspecten van het veldwerk van een peilbuis onderzoek en het omzetten van de drukdoosmetingen naar waterstanden uitgedrukt in m +NAP. Deze handleiding wordt primair geschreven voor intern gebruik. In het rapport vormen de waterstanden uitgedrukt in m +NAP het vertrekpunt van de analyse.

Bij het verder operationaliseren van de responsmetingen, is gebleken dat het verstandig is om de relatie tussen de buitenwaterstand en de gemeten respons te splitsen in een gemiddeld deel (quasi-statisch) en een dynamische component.

De gedachte hierachter is dat de respons op een langdurige waterstandverhoging groter zal zijn dan op een korte waterstandverhoging. Op basis van de doorlatendheden in het zand en op advies van deltares is gekozen voor een periode van 3 dagen (= 6 getijden) voor het middelen van de waterstanden <sup>3)</sup>.

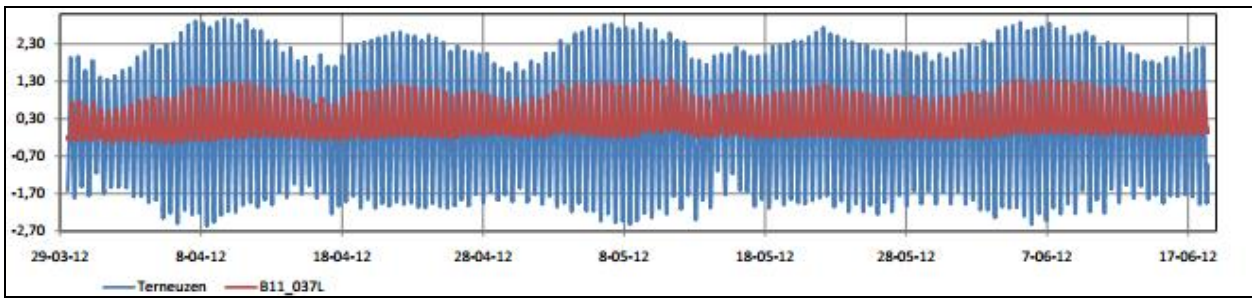
Het voordeel van deze aanpak is dat:

- de correlatie tussen buitenwaterstand en de respons in de peilbuis wordt verhoogd;
- bij extrapoleren van de meting naar maatgevende omstandigheden kan gebruik worden gemaakt van de vigerende stormopzet (deltawateren: 35 uur), rekening houdend met de maxima van de opgetreden gemiddelde opzet bij de verschillende waterstandstations;
- de ruis in het signaal wordt meer zichtbaar gemaakt, waardoor andere invloeden (bijvoorbeeld neerslag, verandering polderpeil) op de waterstand in de peilbuis sneller worden opgemerkt;
- het signaal van slecht functionerende Dataloggers blijft langer bruikbaar (vooral in het gemiddelde signaal ontstaat een afwijkend gedrag; in het dynamische deel blijft de respons veelal bruikbaar).

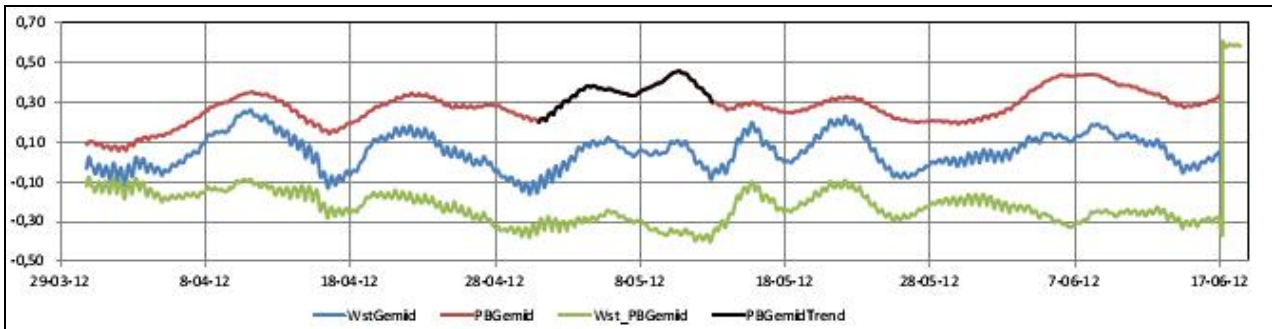
De werkwijze wordt toegelicht aan de hand van de respons in de buitenberm bij dp 238. De locatie is terug te vinden in figuur B1.2-1 van bijlage 1. In figuur 3.1.2-1 wordt het waterstandverloop van het buitenwater bij Terneuzen en van de peilbuis in de tijd gegeven. In figuur 3.1.2-2 wordt het quasi statische verloop van de waterstand gepresenteerd, ofwel de gemiddelde waterstand over 3 dagen(= 6 getijden). In figuur 3.1.2-3 wordt het verloop van de dynamische component weergegeven. De dynamische component is het verschil tussen het oorspronkelijke signaal en het quasi statische deel.

<sup>2)</sup> Bij het afleiden van de maximale buitenwaterstanden worden andere kansverdelingen gehanteerd (Weibull) dan bij maxima van gemiddelde waterstanden. In dit kader wordt verondersteld dat het werken met een normale verdeling voor het bepalen van het maximum van de gemiddelde waterstand legitiem is.

<sup>3)</sup> In figuur B5-3 van bijlage 5 wordt een gevoeligheidsanalyse gepresenteerd voor de periode van middeling (tussen 1 en 10 getijden) bij dp 238 op de buitenberm. Hieruit blijkt dat voor  $N \geq 2$  de maximale respons nagenoeg gelijk blijft.

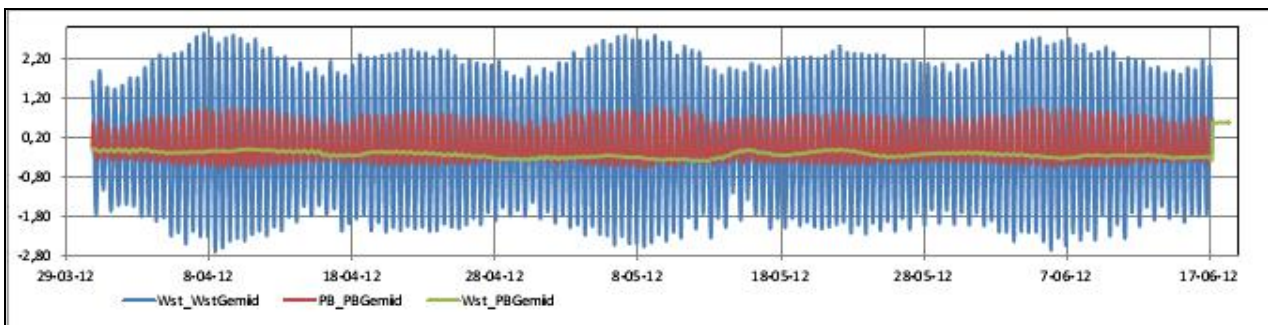


Figuur 3.1.2-1, verloop van de buitenwaterstand (blauw) en waterstand in de peilbuis (bruin) als functie van de tijd



Figuur 3.1.2-2, verloop van de 3 daags gemiddelden van de buitenwaterstand (blauw) en de waterstand in de peilbuis (bruin)

Gezien de ruis in het gemiddelde signaal (zie figuur 3.1.2-2 en 3.1.3-3) wordt het meest ongunstige deel van de periode geselecteerd voor de regressieanalyse (in figuur 3.1.2-2 de zwarte lijn PBGemidTrend).



Figuur 3.1.2-3, verloop van de dynamische componenten van de buitenwaterstand (blauw) en de waterstand in de peilbuis (bruin)

In figuur 3.1.2-3 wordt de dynamische component van het buitenwater in blauw weergegeven, en van de respons bij buitenberm in bruin. De groene lijn presenteert het verschil tussen de gemiddelde buitenwaterstand en de gemiddelde respons in de peilbuis.

### 3.1.3 Analyse peilbuismetingen t.b.v. piping

In figuur 3.1.3-1 t/m 3.1.3-4 wordt de aanpak van de regressie analyse geïllustreerd.

- Stap 1: relatie tussen de buitenwaterstand en de waterstand in de peilbuis (figuur 3.1.3-1)
- Stap 2: relatie als in figuur 3.1.3-1, maar optimaal in de tijd verschoven (figuur 3.1.3-2)

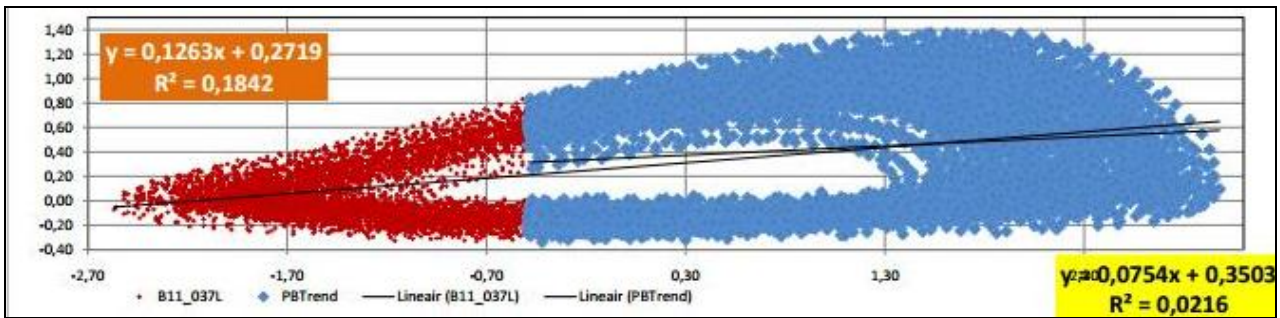
De buitenwaterstand en de waterstand in de peilbuis wordt gesplitst in een quasi statisch deel en een dynamisch deel.

- Stap 3: quasi statisch deel optimaal verschoven (figuur 3.1.3-3)
- Stap 4: dynamisch deel optimaal verschoven (figuur 3.1.3-4)

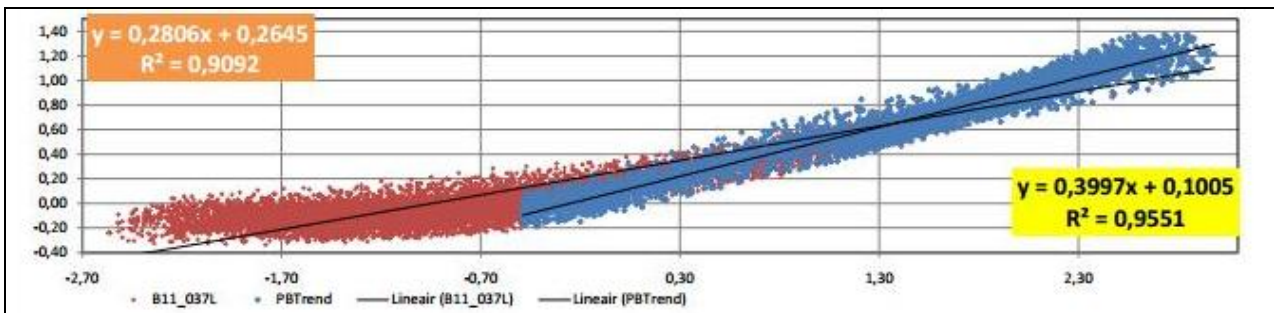
Omdat de respons in de peilbuis bij de lagere waterstanden veelal kleiner is dan bij hogere waterstanden wordt bij de regressie van de dynamische component alleen de geselecteerde (blauwe) punten gebruikt. Om de impact van de selectie te zien wordt ook de analyse van alle (bruine) punten gepresenteerd.



Gezien de ruis in het gemiddelde signaal (zie figuur 3.1.2-2 en 3.1.3-3) wordt het meest ongunstige deel van de periode geselecteerd voor de regressieanalyse (in figuur 3.1.2-2 de zwarte lijn PBGeMidTrend). Dit wordt gevisualiseerd door de blauwe punten in figuur 3.1.3-3.



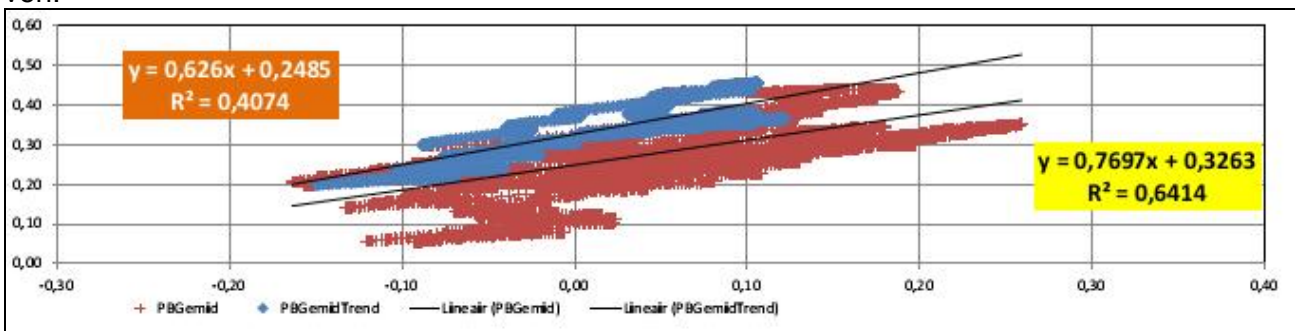
Figuur 3.1.3-1, relatie buitenwaterstand en waterstand in de peilbuis zonder verschuiving



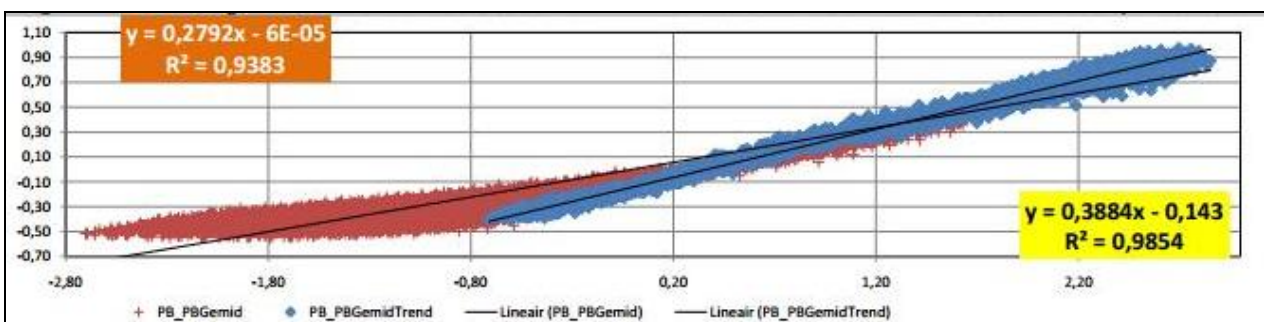
Figuur 3.1.3-2, relatie buitenwaterstand en waterstand in de peilbuis met optimale verschuiving, trend in blauw

In figuur 3.1.3-1 is de relatie gegeven tussen de buitenwaterstand en de stijghoogte in de peilbuis zonder verschuiving in de tijd. Na optimale verschuiving in de tijd wordt deze relatie weergegeven in figuur 3.1.3-2. Voor deze peilbuis is een verschuiving van 2½ uur nodig om de correlatie van de waterstand in de peilbuis en de waterstandmeting bij Terneuzen te optimaliseren.

In figuur 3.1.3-3 en 3.1.3-4 wordt de relatie tussen buitenwaterstand en de stijghoogte in de peilbuis van het gesplitste signaal gepresenteerd. In figuur 3.1.3-3 betreft dit de gemiddelde component (quasi statische deel). De relatie van de dynamische component wordt in figuur 3.1.3-4 gegeven.



Figuur 3.1.3-3, relatie gemiddelde buitenwaterstand en gemiddelde waterstand in de peilbuis; optimaal verschoven, het quasi-statische deel



Figuur 3.1.3-4, relatie buitenwaterstand en waterstand in de peilbuis met optimale verschuiving voor het dynamische deel

Uit figuur 3.1.3-3 valt op te maken dat de respons op de gemiddelde waterstand met de geselecteerde punten 77% betreft en uit figuur 3.1.3-4 blijkt dat voor het dynamische deel een respons heeft van slechts 39%. De correlatie ( $R^2$ ) in het dynamische deel is 0,9854. Deze correlatie is groter dan bij het originele signaal (0,95551 in figuur 3.1.3-2). Door andere invloeden is de correlatie in het gemiddelde signaal geringer (0,6414) maar de correlatiefactor zelf (0,77) is een goede schatter te zijn van de respons. In het gemiddelde signaal is veel ruis te zien. Bij regressie met alle punten wordt de correlatiefactor 0,407; andere invloeden zijn belangrijker op de gemiddelde stijghoogte in de peilbuis dan het effect van de gemiddelde buitenwaterstand.

WsZui dp 238		Refbuis :13B_094L				op taluddeel : buitenberm				
MetaInfo		Regressie	PB	Stat.	Dynam.	S + D	Extremen gedurende de meetperiode			
MHW	5,80	Rkwdr	98,4%	85,3%	98,5%		extremen	Signaal	Stat.	Dynam.
opzet Statisch deel	1,35	rcoef	0,45	0,72	0,45		WstMax	3,06	0,35	2,88
(incl. dY extra: 0,00 m)		const	-0,16	-0,07	-0,10		WstMin	-2,62	-0,06	-2,70
offSetDefTotaal	-15	SigmaYx	0,07	0,02	0,06		PbMax	1,22	0,13	1,16
offSetDefStatisch	-24	hMeet	3,06	0,35	2,71	3,06	PbMin	-0,94	-0,12	-0,94
offSetDefDynam	-15	Pb(hmeet)	1,23	0,18	1,13	1,30	PBtrend bij HW	Peilbuisgegevens buitenberm		
		MHW	5,80	1,35	4,45	5,80	AfstUitRef	Bk Pbuis	MV	
periode middeling : 6 Getyden		Pb (MHW)	2,48	0,89	1,91	2,81	PBtrend bij MHW	16,39	6,26	6,31
regressieHW : ja		verschil	3,32	0,46	2,54	2,99	m	m+NAP	m+NAP	

Tabel 3.1.3-1, resume regressie analyse peilbuis op de buitenberm bij dp 238

In tabel 3.1.3-1 zijn de verschillende deelresultaten bij elkaar gezet. Uitgaande van een MHW = 5,80 m +NAP en een gemiddelde waterstand ( $wst_{stat}$ ) van 1,35 m +NAP is de dynamische component ( $wst_{dyn}$ ) 4,45 m +NAP. De maximale respons in de peilbuis wordt als volgt berekend:

$$Pb(MHW) = Rc_{stat} * wst_{stat} + const_{stat} + Rc_{dyn} * wst_{dyn} + const_{dyn} + y_{extra} = 2,81 \text{ m +NAP}$$

Voor het verkrijgen van de maximale correlatie is voor het originele signaal en de dynamische component een offset van 150 minuten nodig ( in tabel 3.1.3-1 :  $offsetDefTotaal = -15 * 10 = 150$  minuten). Voor het gemiddelde signaal is een verschuiving van 4 uur nodig ( $offsetDefStatisch = -24 * 10 = 240$  minuten =4 uur).

Verder bestaat de mogelijkheid om de respons in de peilbuis handmatig aan te passen ( $y_{extra}$ ), zodat een voldoende conservatieve inschatting van het gemiddelde waterstand ( $wst_{stat}$ ) gegeven wordt.

### 3.1.4 Analyse peilbuismetingen t.b.v. binnenwaartse stabiliteit

Voor binnenwaartse stabiliteit is het nodig dat de freatische lijn in de dijk wordt bepaald en het waterstandsverloop in het watervoerend pakket.

Uit verschillende peilbuismetingen is gebleken dat de waterstand in de dijk veelal niet wordt beïnvloed door de buitenwaterstand. Meestal wordt de maximale waterstand in de dijk door de neerslag bepaald en de dikte van de deklaag aan de binnenzijde en de hoogte van de kleikades bij de dijkversterking in de jaren 70er en 80er jaren van de 20<sup>ste</sup> eeuw. In die gevallen wordt er ervan uitgegaan dat de maximale hoogte van de freatische lijn afhangt van de dikte van de deklaag, bovenkant afsluitende laag en de hoogte van de binnenteen.

#### Freatische lijn in dijk

1. Vaststellen of de waterstand in de dijk wordt beïnvloed door het buitenwater, zo niet dan 2.
2. De maximale hoogte van de waterstand is afhankelijk van de deklaag dikte, aanwezigheid van kleikades en de hoogte binnenteen of afsluitende laag.

#### Waterstand in het watervoerend pakket

Deze waterstand wordt bepaald conform de aanpak bij piping

### 3.1.5 Analyse peilbuismetingen t.b.v. buitenwaartse stabiliteit

Voor Buitenwaartse stabiliteit wordt gekeken naar een waterstandval bij de volgende twee situaties.

1. MHW naar GHW (bijlage 4 en 6)
2. GHW naar GLW (bijlage 4)

Voor de uitwerking van de aanpak wordt verwezen naar bijlage 4 en bijlage 6.

In §B4.1 van bijlage 4 wordt ingegaan op de wijze waarop de duur van de waterstandsval bij 'normale' omstandigheden wordt bepaald. Het effect van de waterstandsval op de respons in peilbuis wordt voor één locatie in detail uitgewerkt In §B4.2 van bijlage 4. De uitwerking is alleen geldig voor de val van GHW naar GLW.

In bijlage 6 wordt voor één locatie een en ander in detail uitgewerkt voor de opschaling naar stormomstandigheden rekening houdend met verschillende tijdstippen van de maximale opzet.

Dit heeft geleid tot de volgende aanpak:

- Respons in de peilbuis bij MHW ( $PB_{MHW}$ ) en GHW( $PB_{GHW}$ ) volgens de aanpak van §3.1.3
- Voor extreme situaties de waterstandsval afleiden m.b.v. de gemeten waterstanden en een geschematiseerd verloop van de stormopzet met verschillende tijdstippen voor het maximum: bij LW, 4½ uur voor HW, bij HW en 4½ uur na HW (zie bijlage 6).
- Voor normale omstandigheden rekening houden met het verband tussen de getijamplitude en het verval in de peilbuis (zie bijlage 4).
- Reductie Respons in peilbuis bij vallend water:
  - Voor extreme situaties gebruik maken van de extrapoleerde respons in de peilbuis, rekening houdend met verschillende ligging van de maximale stormopzet en de correlatie tussen de stijg- en daalsnelheden in de peilbuis en het verschil tussen het voorafgaande hoog en laagwater.  
(zie figuur B6-1 t/m-4 :  $PB_{MHW}(HW)$  = maximale respons in peilbuis tijdens beschouwde stormverloop  
 $PB_{MHW}(LW)$  = respons in peilbuis bij het navolgende hoogwater  
 $PB(MHW \rightarrow GHW) = PB_{MHW}(HW) - PB_{MHW}(LW)$ )
  - Voor 'normale' omstandigheden (val van GHW -GLW) rekening houden met de correlatie tussen de getijamplitude en het verval in de peilbuis  
(zie figuur B4.2-1:  $PB_{val}(LW) = (GHW-GLW) \cdot r_{Cval} + const_{val}$ , )  
 $PB(GHW \rightarrow GLW) = PB_{GHW} - PB_{val}(LW)$ )

## 3.2 Profiel schematisatie

Voor de profiel schematisatie wordt het contour van het dwarsprofiel gecombineerd met de raai georiënteerde bathymetrie en de grondopbouw volgens het geotechnisch lengteprofiel ter plaatse van de kruin.

### 3.2.1 Geotechnisch lengteprofiel

Binnen het onderzoek is ter plaatse van de kruin, de binnenteen en het achterland een geotechnisch lengteprofiel opgesteld. Uit eerder onderzoek (TNO, 1999) was reeds een geotechnisch lengteprofiel langs de kruin tot NAP opgesteld. In appendix 8.1 en 8.2 wordt hiervan een overzicht gegeven.

Op detail niveau zijn er zeker verschillen te vinden. In het kader van dit onderzoek is het van belang te achterhalen of over het hele traject een doorlopende kleilaag (m.n. tussen dp 220 en 232) aanwezig is of de veronderstelde tussenlaag tussen dp 259 en 278 watervoerend is .

Voor piping doeleinden volstaat een schematisatie met uniforme grondopbouw in dwarsrichting. Uiteraard is de dikte van de deklaag bij de binnen, sloot en achterland nabij het uittredepunt



mede bepalend of er sprake is van opbarsten. Deze dikte wordt dan separaat van de schematisatie geanalyseerd.

Alleen ter plaatse van dp 233 zou mogelijk de zandige ondergrond kortsluiting kunnen maken met de zandkern van het dijklichaam.

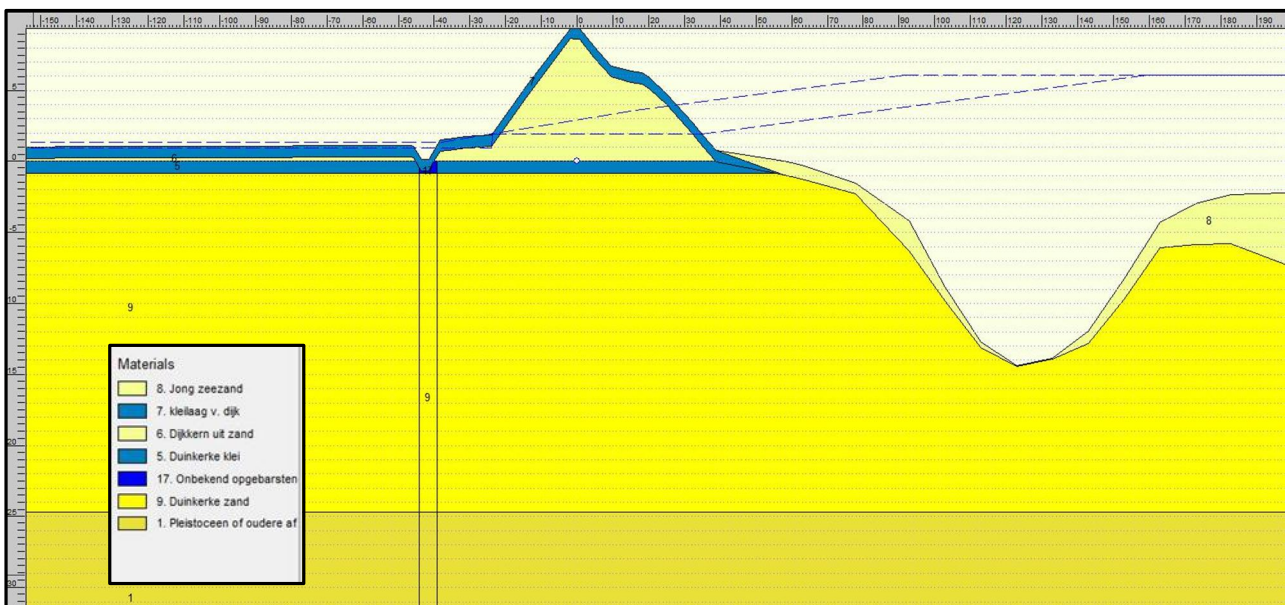
### 3.2.2 Profielcontour inclusief onderwateroever

In Zeeland wordt de onderwateroever jaarlijks gepeild. Bij ongunstige ontwikkelingen van de vooroever wordt de meetfrequentie vergroot. Als de standzekerheid van de vooroever ontoereikend geacht wordt, worden maatregelen getroffen, veelal in de vorm van bestortingen en langs de Noordzeekust zo veel mogelijk met zandsuppleties.

De constructie en de contouren van het dijklichaam zijn vastgelegd in een GIS systeem op basis van landmeetkundige metingen. Daarnaast wordt gebruik gemaakt van het AHN, om discrepanties en de actualiteit van het beheerregister te kunnen vaststellen.

### 3.2.3 Dwarsprofiel met grondopbouw

In figuur 3.2.3-1 wordt een voorbeeld van het dwarsprofiel inclusief de onderwateroever met grondopbouw gegeven. Dit profiel vormt het vertrekpunt voor de grondwatermodellering.



Figuur 3.2.3-1 Geschematiseerd profiel (D-Geostability) bij dp 238 met het geotechnisch lengteprofiel (TNO,1999)

Uit figuur 3.2.3-1 blijkt dat bij dp 238 een doorlopende deklaag in de ondergrond aanwezig is. Het verschil tussen de grootste gepeilde diepte en de huidige bodemligging wordt als jong zeezand aangemerkt. Deze grondlaag is zandig met mogelijk slib afzettingen met een relatief losse pakking.

## 3.3 Grondwaterstromingsmodel

Voor het schematiseren van een grondwatermodel is het verstandig om de schematisatie aan te passen zodat verschillende variabelen (zoals het intrede- en uittredepunt) kunnen aante passen zijn zonder het bodemgrid opnieuw te berekenen. Dit maakt het vergelijken van de resultaten van verschillende berekeningen eenvoudiger.

Verder is het verstandig om slechts één getijdencyclus te kiezen om te kunnen vaststellen of het model een dynamisch evenwicht oplevert en hoelang dit duurt. Bij het definiëren van de model boundaries en grondlagen dient te worden rekenschap gegeven te worden van de mogelijke berging in de sloot en het gemiddelde peil aan de landzijde en zeezijde.

Het vertrekpunt voor de doorlatendheid van zand is  $k = 4,32 \text{ m/dag}$  ( $= 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ) en voor klei  $0,0432 \text{ m/dag}$  ( $= 5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ). Uit pompproeven is gebleken dat de doorlatendheid op het traject tussen dp 220 en 250 ligt tussen  $0,23 \times 10^{-5}$  en  $17 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  (0,2 en 14,7 m/dag). Ter plaatse van dp 238 bij de binnen teen is een relatief hoger waarde gevonden:  $8 \times 10^{-5}$  en  $17 \times 10^{-5}$  met een gemiddelde van  $12 \times 10^{-5}$  (resp. 6,9 en 14,7 en gemiddeld 10,4 m/dag).

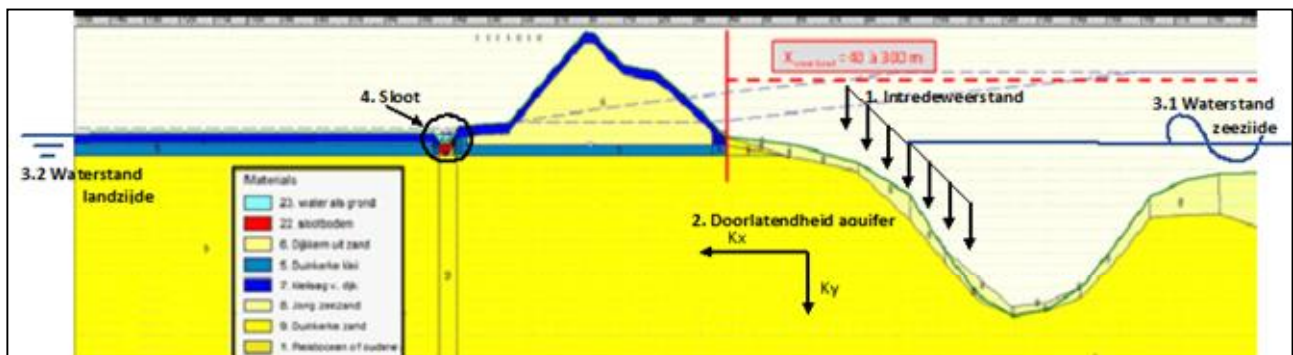
De maatgevende variabelen zijn:

1. Intrede punt c.q. intredeweerstand
  - 1.1. lengte van de deklaag (minder doorlatend c.q. ondoorlatend voorland)
  - 1.2. doorlatendheid van de deklaag (absolute waarde)
2. doorlatendheid van de aquifer (watervoerende laag)
  - 2.1. absolute waarde van de horizontale doorlatendheid ( $K_x$ )
  - 2.2. absolute waarde van de verticale doorlatendheid ( $K_y$ )
  - 2.3. verhouding van horizontale en verticale doorlatendheid ( $K_x / K_y$ )
3. Hydraulische randvoorwaarden
  - 3.1. waterpeil aan landzijde (constant)
  - 3.2. waterstand zeezijde (getijde)
4. Sloot
  - 4.1. Opslag voor water
  - 4.2. Slootbodembodem doorlatendheid

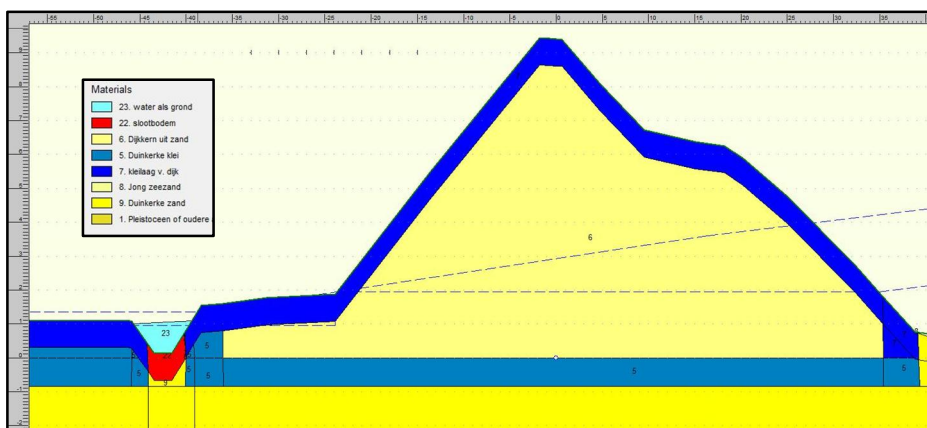
Voor validatie van het model is ook de situatie doorgerekend bij doortij en bij een meer extremer springtij (zie §4.5.5).

### 3.3.1 Profiel schematisatie

In figuur 3.3.1-1 wordt een profiel schematisatie van het grondwatergrondmodel met relevante variabelen weergegeven (zie ook §3.3). In figuur 3.3.1-2 wordt ingezoomd op de sloot.



Figuur 3.3.1-1, schematisatie grondwaterstromingsmodel met maatgevende variabelen



Figuur 3.3.1-2 schematisatie grondwaterstromingsmodel, ingezoomd op dijk

Om de gevoeligheid van het grondwaterstromingsmodel te kunnen analyseren aan de hand van de bovenstaande parameters, is een goede schematisatie noodzakelijk. Per parameter is de keuze voor de schematisatie toegelicht. Daarna zijn er nog een aantal andere schematisatie kenmerken toegelicht.

#### *Intrede punt*

In werkelijkheid is de intredeweerstand en het verloop hiervan niet bekend. De intredeweerstand is in het model als het fictieve intredepunt geschematiseerd. Het intredepunt zit op het voorland tussen de gesloten deklaag met een ondoorlatende klei laag (met  $K_x$  en  $K_y$  van  $0.432E-9$  m/dag) en de open deklaag met een grote doorlatendheid ( $K_x=K_y=4.32$  m/dag). De deklaag is opgedeeld in een stukken van 20 meter met een dikte van 1 meter. Door de lengte van de gesloten deklaag te vergroten en te verkleinen, verschuift het intredepunt. De gebruikte waarden voor de doorlatendheid zijn gecontroleerd door de waterstanden net voorbij de beëindiging van de gesloten deklaag te bekijken. Met deze lage doorlatendheid ( $0.432E-9$  m/dag) dringt het water niet via de deklaag binnen en met de hoge doorlatendheid ( $4.32$  m/dag) dringt het water met een kleine vertraging meteen in de aquifer laag, ter plaatse van de open deklaag. Het vergroten van de lengte van de deklaag (zeewaarts verplaatsen van het intredepunt) werkt zowel dempend als vertragend op het waterstandsverloop.

#### *aquifer (waterdoorlatende laag)*

In eerste instantie was het de bedoeling om het model te kalibreren aan de hand van alleen de doorlatendheid van de aquifer. Bij de eerste berekeningen blijkt dat de geschikte waarde van de toe te passen doorlatendheid samen hangt met de ligging van het intredepunt. Beide parameters zorgen voor een vertraging en een demping van de waterstand onder dijk. De  $K_y$  van de aquifer zorgt ervoor dat het water naar diepere lagen kan stromen. De  $K_x$  zorgt voor de mate dat het water naar het achterland doordringt. In het vervolg zijn berekeningen uitgevoerd met een bepaalde doorlatendheid en de keuze van het intredepunt.

Uit de boringen blijkt dat onder de dijkkern een ondoorlatende laag is, daaronder is het alleen maar zand. Deze aanname dat de aquifer oneindige diepte heeft is in het model als 40 meter aangenomen. De diepte van de aquifer is een parameter die effect heeft op de doorlatendheid van deze laag. Door de aanname van 40 meter in het model, kan de gevonden doorlatendheid in de aquifer groter en kleiner zijn dan in werkelijkheid (een grotere dikte van de aquifer kan gesimuleerd worden door grotere waarde van de doorlatendheid).

#### *Hydraulische randvoorwaarden*

De hydraulische randvoorwaarden zijn aan zowel de landzijde als de zeezijde. Aan de zeezijde is getij gebruikt, aan de hand van metingen in Terneuzen. Hier is gekozen om één periode van 12.5 uur het getij te nemen en dit 5 dagen te herhalen. Aan de landzijde is een constante waterstand opgelegd.

#### *sloot*

In werkelijkheid is er aan de landzijde naast de dijk een sloot aanwezig. De sloot is geschematiseerd als de grondlaag "water als grond" met een hoge doorlatendheid ( $K_x=K_y=1000$  m/dag). Hierdoor kan een freatische waterstand in de sloot berekend worden. Op deze manier stroomt er redelijk makkelijk water in de sloot. Voor de bodem van de sloot is een aparte laag gemaakt om eventuele opbarsten en ondoorlatendheid te kunnen modeleren.

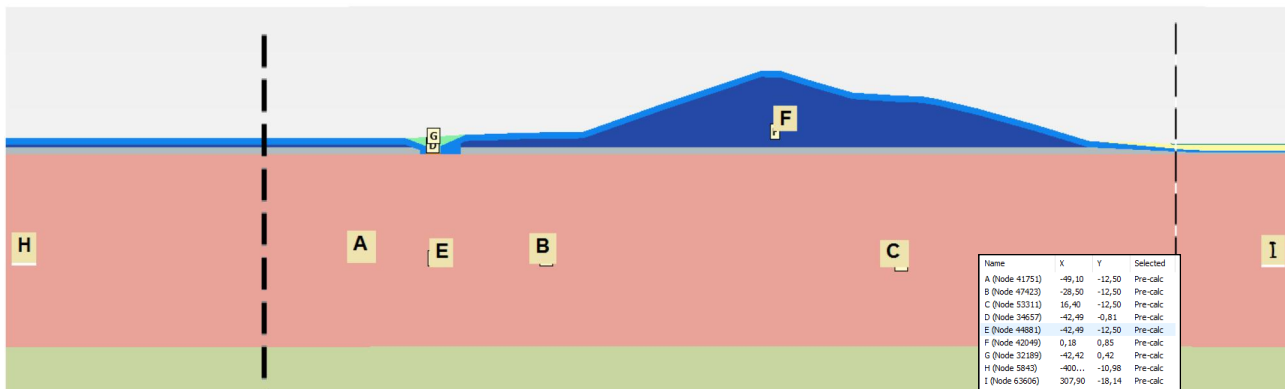
#### *dijk*

De kern van de dijk bestaat uit zand. Uit metingen is gebleken dat de waterstand in de dijkkern niet reageert op het buitenwater. In de schematisatie is de zandkern van de dijk volledig omringd met ondoorlatende kleilagen. Dat houdt in dat het water alleen via de aquifer stroomt en dat alleen via het voorland, via de sloot en het achterland het water kan uitreden.

#### *Preprocessing en Resultaten*

Het model berekent voor alle knooppunten de waterstanden. Het ophalen van de resultaten in deze knooppunten kost veel tijd. Door voor de start van een berekening een aantal locaties te

kiezen, worden voor deze locaties de resultaten weggeschreven. In het model kunnen er maximaal 10 knooppunten vooraf gekozen worden. Dit zijn de knooppunten die gekozen zijn:



Figuur 3.3.1-3 ondergrondmodel met locatie van uitvoerpunten (node A t/m I)

De peilbuismeting ter plaatse van de buitenberm worden vergeleken met de modelresultaten bij punt C, de binnentoevoer met punt B en het achterland met punt A.

### 3.3.2 Hydraulische en modelspecifieke randvoorwaarden

Voor dit profiel zijn peilbuismetingen beschikbaar bij de buitenberm, de binnentoevoer en het achterland. Uit de meetserie is één periode van een getijde (met een lengte van 12½ uur) gekozen waarbij het verschil tussen de waterstand aan het begin en einde van deze periode nagenoeg gelijk aan nul is, zowel voor de buitenwaterstand en bij de drie peilbuizen. (afwijking <0,01 m).

Door alleen de dynamische respons van het model te kijken aan de metingen hoeft alleen naar de verhouding tussen de amplitudes van de meting en het model gekeken worden. Deze vergelijking wordt voor alle drie de peilbuizen uitgevoerd.

Voor de model randvoorwaarden aan de linkerkant (landzijde) van het profiel is een dichte rand met constante waterstand aangehouden van 0.35 m +NAP. De waterstand aan de zeezijde komt overeen met de gemiddelde waterstand van het gekozen getij: 0,12m +NAP.

Aan de landzijde geldt een waterpeil van 0.35m. De afstand waarop het vaste waterpeil invloed heeft op de waterstroming onder de dijk is cruciaal. De invloedsafstand van het waterpeil is bepaald op 300 meter van de sloot bij deze schematisatie.

### 3.3.3 Kalibratie doorlatendheid

Zoals is aangegeven bij de schematisatie is de kalibratie op de amplitude van de metingen afhankelijk van twee variabelen; de doorlatendheid van de aquifer en de intredeweerstand (ligging van het intredepunt).

In het model is dit vertaald naar de volgende variatie van de parameters:

1. intredeweerstand (in het model is het intredepunt)
  - 1.1. Lengte van het voorland met klei en zand
  - 1.2. doorlatendheid van deklaag (aangenomen als ondoorlatend deklaag met varieerden lengte)
2. doorlatendheid van de aquifer
  - 2.1.  $K_x$ , horizontale doorlatendheid
  - 2.2.  $K_y$ , verticale doorlatendheid
  - 2.3. verhouding  $K_x$  en  $K_y$

Om de optimale doorlatendheid te bepalen, zijn voor alle berekeningen met de verschillende  $K_x$  en  $K_y$  voor alle lengtes van het intredepunt berekening uitgevoerd. Dit geeft inzicht in de impact tussen deze twee variabelen.

In Tabel 3.3.3-1 wordt een overzicht gegeven van de parameter variatie bij de verschillende berekeningen.

Case Nr.	BerekeningNr.	Kx [m/dag]		Ky [m/dag]		Kx/Ky		Lengte dichte deklaag [m] Van - Tot	Verandering in andere kenmerken
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.		
1	8 t/m 13	4.23		0.432	43.2	0.1	10	40 - 300	
2	14 t/m 21	0.432	43.2	4.23		0.1	10	40 - 300	
3	22 t/m 26	13.6		1.36	13.6	1	10	40 - 300	
4	27 t/m 32	4.23	13.6	4.23		1	3.2	40 - 300	Gat voorland
5	33 t/m 39	4.23		4.23		1		40 - 300	Hydraulische randvoorwaarden
6	40 t/m 41	60	4.32	4.23					
7	42 t/m 46	13.6		4.23		3.2		130	Hydraulische randvoorwaarden
8	47 t/m 46	13.6		4.23		3.2		130	Sloot open/dicht

Tabel 3.3.3-1, overzicht van de gebruikte parameters bij de verschillende berekeningen

Voor meerdere posities van het intredepunt zijn berekeningen uitgevoerd. In het model zijn de ligging van het intredepunt aangegeven als afstand van het intredepunt tot aan de zeewaartse grens. In tabel 3.3.3-2 staan deze afstanden van omgezet naar de afstand ten opzichte van de buitenkruinlijn.

	Naam in model	Afstand intredepunt tot zeewaartse grens [m]	Locatie intredepunt met x=0 buitenkruinlijn [m]	Lengte deklaag [m]
1	L265	265	43	0
2	L250	250	58	15
3	L230	230	78	35
4	L205	205	103	60
5	L185	185	123	80
6	L165	165	143	100
7	L145	145	163	120
8	L125	125	183	140
9	L100	100	208	165
10	L075	75	233	190
11	L050	50	258	215
12	L030	30	278	235
13	L005	5	303	260

Tabel 3.3.3-2 Model aanduiding intredepunt omgezet naar afstand uit de buitenkruinlijn

Bij de kalibratie wordt ook gekeken naar mogelijk andere (model)factoren die hierbij een rol kunnen spelen, zoals de poriëgehalte (void ratio) en verzadigingsgraad (saturation factor).

### 3.4 Piping en Heave analyse

Uit de variatie van de peilbuismetingen volgt dat bij analyse niet alleen gekeken moet worden naar de respons van een enkel dwarsprofiel maar dat een statistische vertaling moet worden gemaakt van de verschillende bij elkaar horende peilbuismetingen en deze toepassen op een geografische eenheden passend bij de grondopbouw.

Hiervoor zijn tot dusver geen regels geformuleerd maar met behulp van schematiseringsfactoren kan een goede inschatting worden gemaakt om te zorgen dat niet een te optimistische/ pessimistische inschatting wordt gemaakt voor een bepaald traject.



Voor de duidelijkheid wordt de analyse in drie stappen opgesplitst.

### Stap 1

Voer de piping analyse per dwarsprofiel uit ter plaatse van de peilbuismetingen voor de verschillende belastinggevallen volgens tabel 3.4.2-1. De analyse richt zich op drie mogelijke uittreepunten: de binnenteen, de sloot en het achterland. In de analyse wordt uitgegaan van de geëxtrapoleerde lokale respons ter plaatse.

### Stap 2

Voer de analyse nogmaals uit met de statistische bepaalde respons zoals deze is afgeleid ten behoeve van de schematiseringsfactoren. De reden hiervoor is dat een geringe respons een toevalstreffer kan zijn die niet representatief voor het traject is. Hiervoor wordt zonnodig de maximale waterstand van de peilbuismeting aangepast zodat de kans op een hogere maximale waterstand van 0,25 meter kleiner dan 25 à 30% blijft.

### Stap 3

Op basis van de resultaten van stap 1 en 2 naar een oordeel op trajectniveau.

Voor de deelmechanismen Opbarsten en Heave wordt met name de peilbuis aan de binnenzijde gebruikt. Voor het deelmechanisme Piping vormt de respons van de peilbuis aan de buitenzijde het vertrekpunt. Bij de analyse wordt de respons aan de buitenzijde zonnodig gecorrigeerd om te zorgen dat het beeld past bij de respons aan de binnenzijde<sup>4)</sup>. De methode die gebruikt is sluit aan bij de werkwijze die in de verlengde derde toetsronde is gehanteerd (zie [3] en [4]) en is aangepast om het gebruik van schematiseringsfactoren te operationaliseren.

#### 3.4.1 Basisscenario

In het basisscenario wordt een standaard set parameters gebruikt, die deels worden aangepast op basis van lokale onderzoeksresultaten.

Het werken met schematiseringsfactoren maakt het mogelijk om te na te gaan of de basisschematisering niet te optimistisch en niet te pessimistisch is aangenomen.

Voor het basisscenario wordt afgeleid hoe groot de schematiseringsfactor zou moeten zijn om precies te voldoen aan de eisen. Als deze factor kleiner is dan het maximum van de schematiseringsfactor van de beschouwde scenario's wordt niet aan de eis van het mechanisme voldaan. Als voor beiden (Opbarsten en Piping) hieraan niet wordt voldaan is de veiligheid tegen piping onvoldoende gewaarborgd en wordt de waterkering definitief hierop afgekeurd. Invulling hierop is ook gekeken naar Heave, zoals geformuleerd in het ORZW 2012 (zie [11]).

#### 3.4.2 Schematiseringsfactoren

scenario	omschrijving	standaard				Bron	traject WsZ dp 233 -239			
		Basis waarde	para meter	variatie	scenario kans		Basis waarde	para meter	variatie	scenario kans
1	var_dieptesloot	1,5	1	0,5	10%	inschatting WSS	1,5	1	0,5	10,0%
2	var_k	5,00E-05	2	100%	10%	Fugro traject, appendix 9c	5,00E-05	2	100%	12,9%
3	var_D70	115	3	25%	20%	Fugro traject, appendix 9c	115	3	25%	4,7%
4	var_Dzand	40	4	20%	10%	VNK	40	4	20%	10,0%
5	Var_deklaag	Boring biteen	5	0,25	25%	Fugro Lengteprofiel, appendix 8b	0,35	5	0,25	9,4%
6	Var_deklaag	Boring biteen	5	0,5	5%	Fugro Lengteprofiel, appendix 8b	0,35	5	0,5	0,4%
7	var_Peilbuis	PB analyse	6	0,25	25%	appendix 9c	2,90	6	0,25	9,6%
8	var_Peilbuis	PB analyse	6	0,5	1%	appendix 9c	2,90	6	0,5	0,1%

Tabel 3.4.2-1 Standaard instelling voor schematiseringsfactoren van het mechanisme piping en aanpassing voor traject

In tabel 3.4.2-1 worden de standaard instelling gegeven van het basisscenario in Zeeland en op de specifieke waarden van het basisscenario voor het traject tussen dp 233 en dp239 met bijbe-

<sup>4)</sup> Bij de analyse wordt de respons aan de buitenzijde zonnodig gecorrigeerd om te zorgen dat de reactie aan de buitenzijde groter is dan aan de binnenzijde. Hiertoe wordt de richtingscoëfficiënt van de dynamische component verhoogd. Voor dit traject is deze correctie niet nodig (zie appendix 8).

horende kansen van de diverse scenario's. Voor de overige trajecten wordt verwezen naar appendix 9b en 9c [2].

Het effect van de variatie van de diepte van de sloot wordt meegenomen in scenario 1, de variatie in de doorlatendheid bij scenario 2, de variatie van de korreldiameter bij scenario 3 en de variatie van de watervoerende laag bij scenario 4. Voor de variatie in de dikte van de deklaag worden 2 scenario's beschouwd (scenario 5 en 6). Ten slotte wordt de variatie van de maximale waterstand in de peilbuis aan de buitenzijde in scenario 7 en 8 beschouwd.

Voor de verschillende parameters is een trajectafhankelijke kans op optreden bepaald aan de hand van het uitgevoerde onderzoek. De resultaten hiervan zijn opgenomen Appendix 9b [2]. De onderbouwing hiervan is terug te vinden in Appendix 8a en 9c [2]. Voor sommige dwarsprofiellocaties is het nodig om de waterstand respons bij het intredepunt van de basisom aan te passen om te zorgen dat de kans op een hogere maximale waterstand in de peilbuis kleiner dan 25 à 30% blijft ).

## 4 Resultaten en deel analyses

### 4.1 Analyse buitenwaterstanden

Zoals in hoofdstuk 3 is aangegeven, wordt bij de regressie analyse de buitenwaterstand en de respons in de peilbuis gesplitst in een gemiddeld deel (quasi-statisch) en een dynamische component. Hiertoe wordt het maatgevend hoogwater (MHW) gesplitst in een verwachte maximale gemiddelde stormopzet ( $wst_{Stat}$ ) en een dynamische component ( $wst_{Dyn} = MHW - wst_{Stat}$ ).

Voor de analyse van de buitenwaterstand zijn de waterstandwaarnemingen gebruikt in de periode tussen 1987 en 2015. Per jaar zijn maximale waterstanden bepaald en de maximale gemiddelde waterstand bij middeling over 1 à 10 getijden. Dit is in bijlage 3 uitgewerkt.

#### Bepaling MHW

Het maatgevend hoogwater voor de verschillende normtrajecten kan worden bepaald met het instrumentarium van het WBI2007 (Riskeer).

#### Bepaling maximale stormopzet

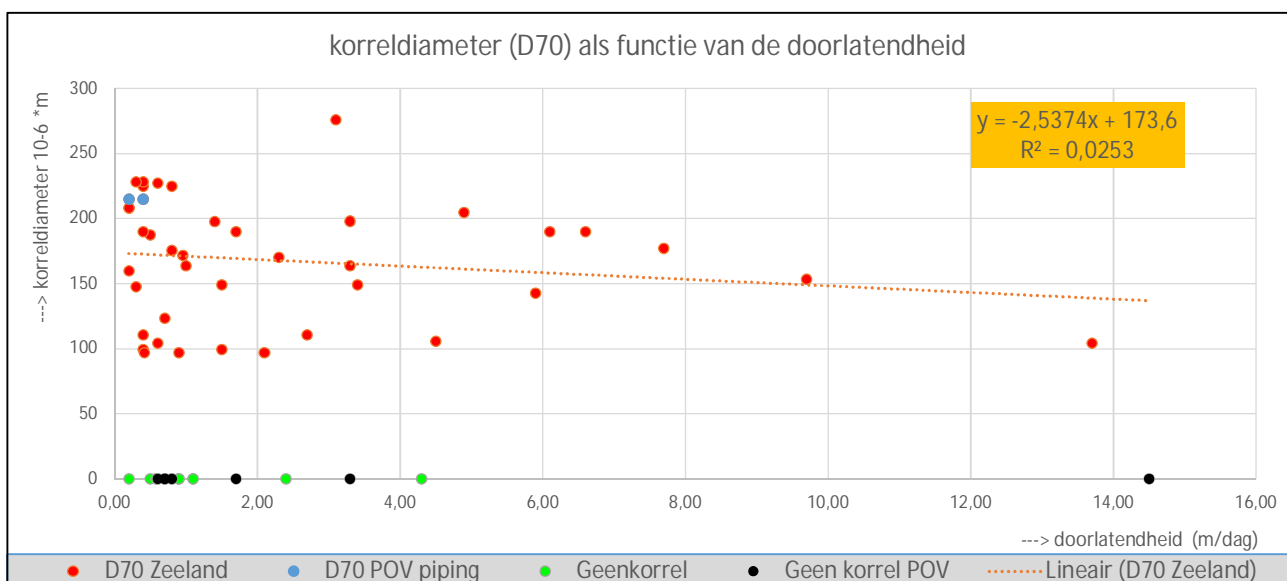
De in rekening te brengen gemiddelde stormopzet is voor ieder meetstation afgeleid op basis van een middeling over 6 getijden, gebruikmakend van een normale verdeling. In tabel B3-2 van bijlage 3 worden voor alle meetstations bij verschillende normeisen deze waarden ( $wst_{Stat}$ ) gepresenteerd.

### 4.2 Analyse peilbuismetingen

In bijlage 5 is een voorbeeld opgenomen van de peilbuisanalyse op de buitenberm bij dp 238. Alle resultaten van de peilbuisanalyse bij MHW zijn verzameld in appendix 7 en worden ook weergegeven in het lengteprofiel (zie appendix 8.1 voor het traject tussen dp 217 en dp 250 en appendix 8.2 voor het traject tussen dp 259 en dp 278). In het overzicht met de afzonderlijke boringen zijn eveneens de resultaten van de analyse opgenomen (zie appendix 8).

### 4.3 Correlatie grofheid zand (D70) en doorlatendheid

In figuur 4.3-1 wordt de gemeten doorlatendheid van de pompproeven (Horslev methode) uitgezet tegen de representatieve korreldiameter uit de formule van Sellmeijer (D70).



Figuur 4.3-1, correlatie tussen korreldiameter (D70) en de gemeten doorlatendheid

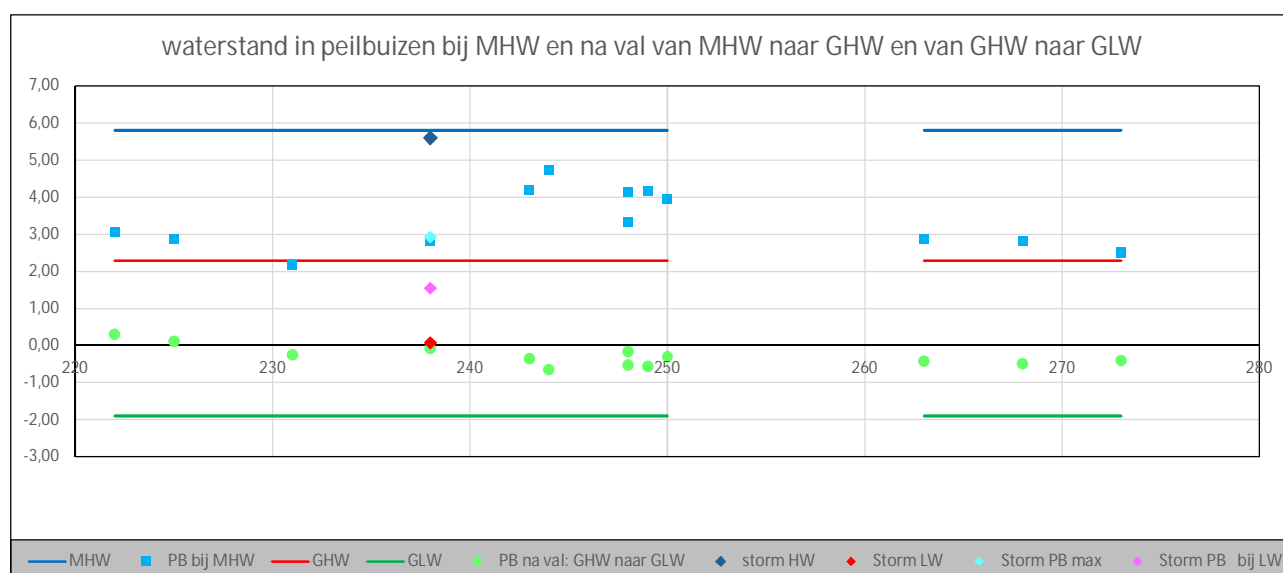


Uit figuur 4.3-1 blijkt dat er geen correlatie aanwezig tussen korreldiameter en de gemeten doorlatendheid ( $R^2 = 0,0253$ ) voor de pompproeven in Zeeland. Bij een aantal locaties zijn geen korrelverdelingen bepaald.

#### 4.4 Effect tijdsafhankelijkheid

In figuur 4.4-1 wordt het effect van de tijdsafhankelijkheid weergegeven voor de respons in de peilbuis op de buitenberm en kruin bij MHW, na de val van MHW naar GHW en van de GHW naar GLW. Het MHW is bepaald voor een 1/4.000ste waterstand bij Terneuzen. (zie ook tabel B4.3-1 van bijlage 4).

De val van MHW naar GHW is in detail onderzocht in bijlage 6 waarbij het tijdstip van de maximale opzet gevarieerd is. De volgende vier situaties zijn onderzocht: maximale opzet bij laagwater, 4½ uur voor Hoogwater, bij hoogwater en 4½ uur na hoog water. Een waterstandsval van MHW naar een waterstand in de buurt van GHW is alleen mogelijk als gekozen zou worden voor een maximale opzet bij laagwater. In die situatie is de val direct na het MHW niet maatgevend, maar de val na het 2<sup>e</sup> sterk verhoogde hoogwater. Voor één peilbuis op de buitenberm bij dp 238 wordt dit in bijlage 6 gepresenteerd. Uit deze analyse blijkt dat voor deze peilbuis een storm met maximale opzet bij laagwater zowel maatgevend is voor de waterstandsval als de maximale stijghoogte in de peilbuis. In figuur 4.4.1-1 wordt alleen voor deze peilbuis de representatieve waarde gegeven (maatgevend waterstandsval bij stormomstandigheden: van 5,59 m +NAP naar -1,07 m +NAP en maximale stijghoogte van 2,92 m +NAP naar 1,54 m +NAP bij dit laagwater).



Figuur 4.4-1 waterstand in peilbuizen bij MHW en na val van MHW naar GHW en van GHW naar GLW

De volgende conclusies zijn uit deze figuur te trekken :

- Bij MHW leidt de respons in de peilbuis tussen dp 243 en 250 tot de hoogste waterstanden in de ondergrond (blauwe vierkantjes)
- Alleen bij de peilbuis op de buitenberm bij dp 238 is de maatgevende waarde voor de val van MHW naar GHW opgenomen (buitenwater van 5,59 naar -1,07 m + NAP, stijghoogte van 2,92 naar 2,54 m +NAP). Deze situatie is voor deze peilbuis extremer dan de val van GHW naar GLW (verval tussen peilbuis en buitenwater respectievelijk 2,61 meter en 1,81 meter).
- Voor de waterstandsval van GHW en GLW geldt op het hele traject dat er sprake is van een positief verval tussen 1,2 en 2,2 meter, gemiddeld 1,6 m).

##### 4.4.1 Piping

Uit de grondopbouw ter plaatse van de kruin is overal een doorlopende deklaag aanwezig is (zie appendix 8.1 en 8.2). Alleen ter plaatse van dp 233 lijkt er een verbinding te bestaan tussen de zandkern van de dijk en de zandige ondergrond. Uit de peilbuismeting in het dijklichaam onder

de kruin bij dp 222 is echter geen respons op het buitenwater gemeten. Derhalve wordt voor het hele traject aangenomen dat piping aan de orde kan zijn.

Voor piping wordt de volgende situatie beschouwd:

1. MHW met een geëxtrapoleerde respons in de watervoerende laag figuur 4.4-1 (storm hoogwater : donker blauwe ruitjes, respons in de peilbuis: licht blauwe ruitjes)

#### 4.4.2 Binnenwaartse stabiliteit

Voor binnenwaartse stabiliteit wordt de volgende situatie beschouwd:

1. MHW met een extreme (hoge) waterstand in dijk en geëxtrapoleerde respons in de watervoerende laag figuur 4.4-1 (blauwe vierkanten c.q. licht blauwe ruitjes)

In het kader van dit onderzoek is voor binnenwaartse stabiliteit alleen een beschouwing van maatgevende waterstanden afgeleid. Berekeningen van de buitenwaartse stabiliteit zelf vallen buiten het kader van dit onderzoek.

#### 4.4.3 Buitenwaartse stabiliteit

Voor buitenwaartse stabiliteit worden drie situaties beschouwd:

1. Val MHW naar GHW met een extreme (hoge) waterstand in dijk en berekende respons in de watervoerende laag (zie figuur 4.4-1, storm laagwater: rode ruitjes en respons in peilbuis: roze ruitjes, alleen bij dp 238).
2. Val GHW naar GLW met een Extreme (hoge) waterstand in dijk en berekende respons in de watervoerende laag ter plaatse van de buitenberm/kruin (zie figuur 4.4-1, gemiddeld laagwater: groene lijn en respons in peilbuis: groene bolletjes).
3. Val GHW naar GLW met een normale waterstand in dijk en berekende respons in de watervoerende laag ter plaatse van de buitenberm/kruin zie figuur 4.4-1, gemiddeld laagwater: groene lijn en respons in peilbuis: groene bolletjes).

In het kader van dit onderzoek is voor buitenwaartse stabiliteit alleen een beschouwing van maatgevende waterstanden afgeleid. Berekeningen van de buitenwaartse stabiliteit zelf vallen buiten het kader van dit onderzoek.

Door zeer recent nieuw inzicht in de aanpak bij de waterstandsval na MHW is de situatie alleen ter plaatse van dp 238 gekwantificeerd, omdat gekozen is voor tijdige afronding van het rapport. In het vervolg zal dit worden opgepakt en de methode verder worden geoperationaliseerd.

#### 4.5 Grondwatermodellering

De kalibratie van de grondwaterstromingsmodel is gedaan aan de hand van de peilbuismetingen. In paragraaf 3.3 is uitleg gegeven dat de doorlatendheid van de aquifer en intredepunt gebruikt zijn om te kalibreren. Er is gebruik gemaakt van drie peilbuismetingen en de buitenwaterstand. Omdat het intredepunt niet bekend is, is het werkelijke waterstandsverloop m.n. zeewaarts van de peilbuismetingen onbekend. Dit is sterk afhankelijk van het intredepunt en de doorlatendheid van de aquifer. In bijlage 8 het effect hiervan verder toegelicht.

In de tabel 4.5-1 is aangegeven welke berekeningen zijn uitgevoerd met bijbehorende parameters en de variatie van de verschillende parameters (deze tabel is gelijk aan Tabel 3.3.3-1).

Case Nr.	BerekeningNr.	Kx [m/dag]		Ky [m/dag]		Kx/Ky		Lengte dichtte deklaag [m]	Verandering in andere kenmerken
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Van - Tot	
1	8 t/m 13	4.23		0.432	43.2	0.1	10	40 - 300	
2	14 t/m 21	0.432	43.2	4.23		0.1	10	40 - 300	
3	22 t/m 26	13.6		1.36	13.6	1	10	40 - 300	
4	27 t/m 32	4.23	13.6	4.23		1	3.2	40 - 300	Gat voorland
5	33 t/m 39	4.23		4.23		1		40 - 300	Hydraulische randvoorwaarden
6	40 t/m 41	60	4.32	4.23					
7	42 t/m 46	13.6		4.23		3.2		??	Hydraulische randvoorwaarden

Tabel 4.5-1 overzicht van de gebruikte parameters bij de verschillende berekeningen

#### 4.5.1 Kalibratie doorlatendheid

In eerste instantie is de kalibratie gefocust op de amplitude tussen de peilbuismeting en de modelberekeningen op de uitvoerlocaties.

Daarna is de kalibratie uitgevoerd op basis van de vorm van het metingen. Om de vorm passend te maken is gekeken naar de stijg- en daalsnelheid van de waterstand in de drie peilbuizen.

Bij de vergelijking Amplitude van peilbuismetingen en model wordt eerste gekeken naar het effect van het intredepunt en vervolgens naar de grootte van de doorlatendheid.

#### 4.5.2 Effect Intredepunt

De ligging van het intredepunt heeft veel effect op de kalibratie van de amplitude van de waterstanden.

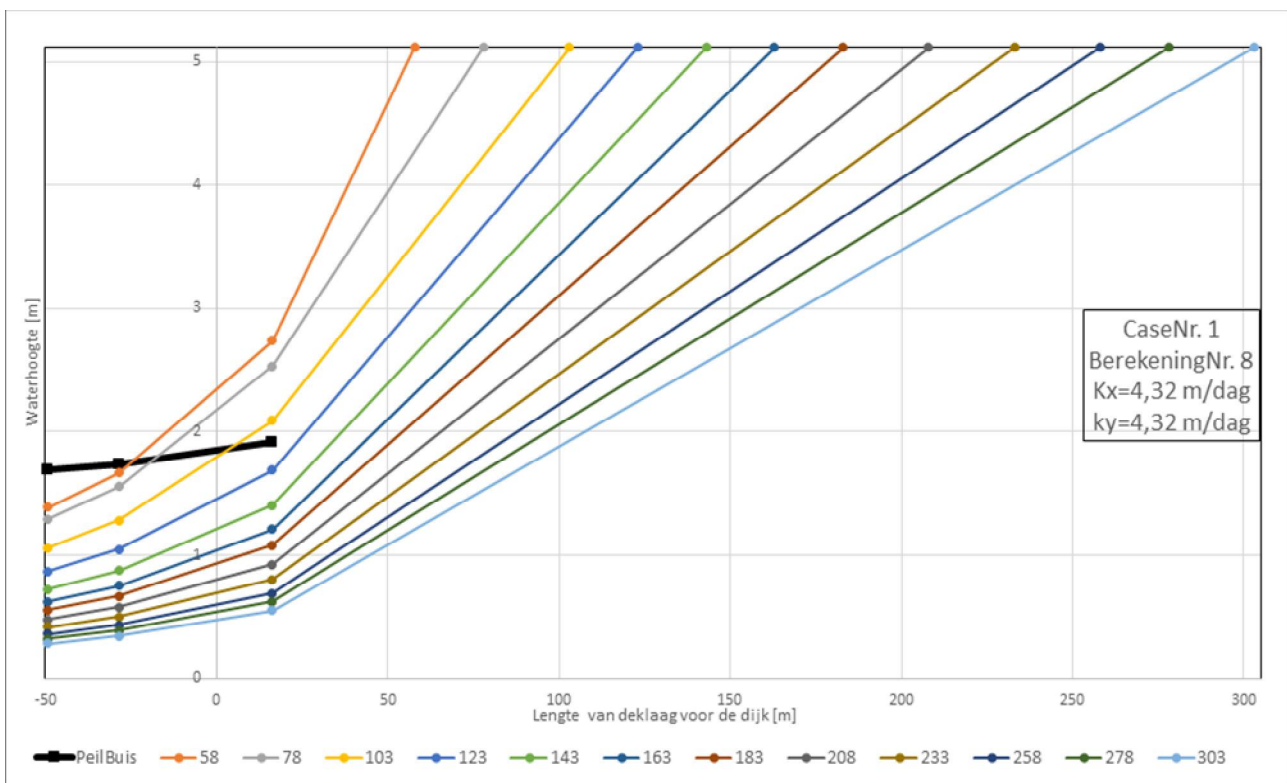
In figuur 4.5.2-1 t/m 4.5.2-3 worden de resultaten met verschillende instelling voor de doorlatendheden weergegeven, waarbij het alleen het intredepunt varieert vanaf buitenteen van de dijk (40 m) tot aan zeewaartse grens van het model (300 meter). De peilbuismeting worden met een zwarte lijn weergegeven voor de drie locaties: Achterland, Binnenteen en Buitenberm. Als legenda voor de verschillende resultaten van de modelberekening is de locatie van het intredepunt als afstand uit de buitenkruinlijn aangegeven intredepunt aangehouden.

In de drie figuren is gekozen voor een andere instelling voor een doorlatendheid in de watervoevende laag (horizontaal wordt aangeduid met Kx en verticaal met Ky):

Figuur 4.5.2-1 : Kx = 4,32 en Ky = 4,32 m/dag.

Figuur 4.5.2-2 : Kx = 4,32 en Ky =43,2 m/dag

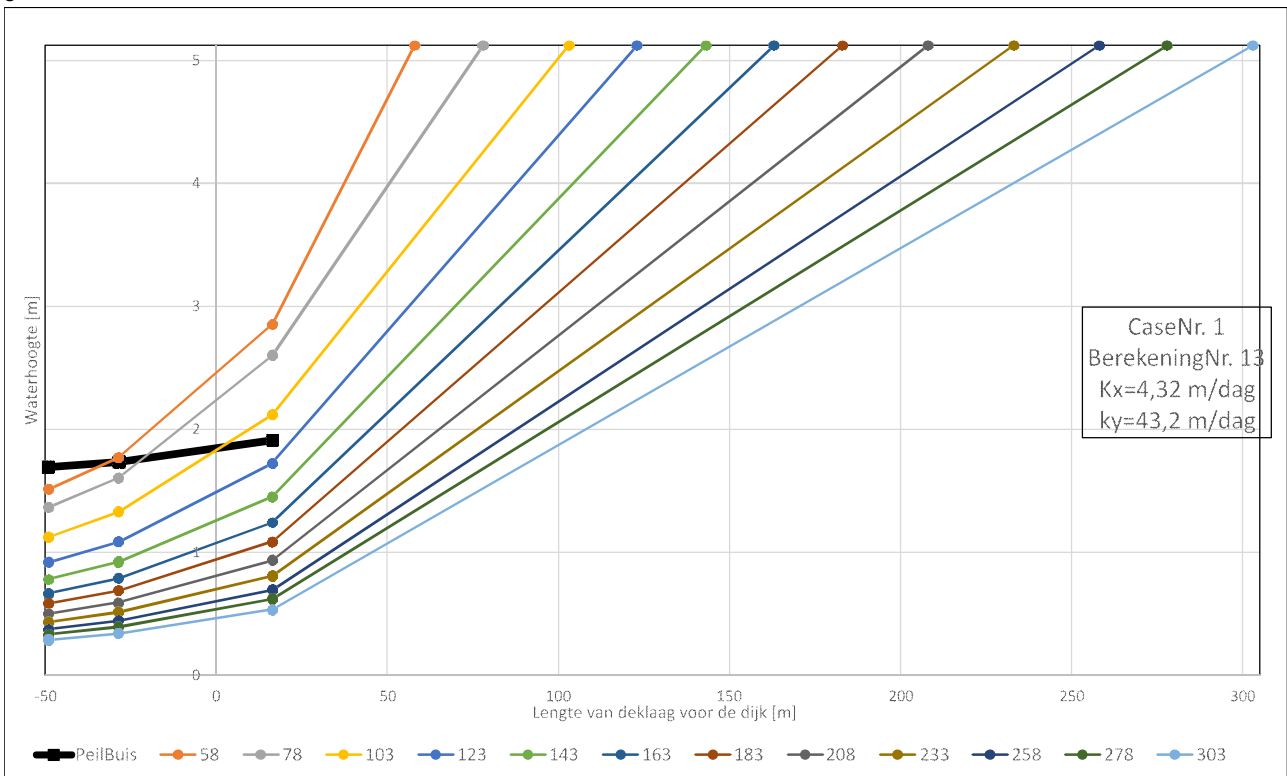
Figuur 4.5.2-3 : Kx =43,2 en Ky = 4,32 m/dag.



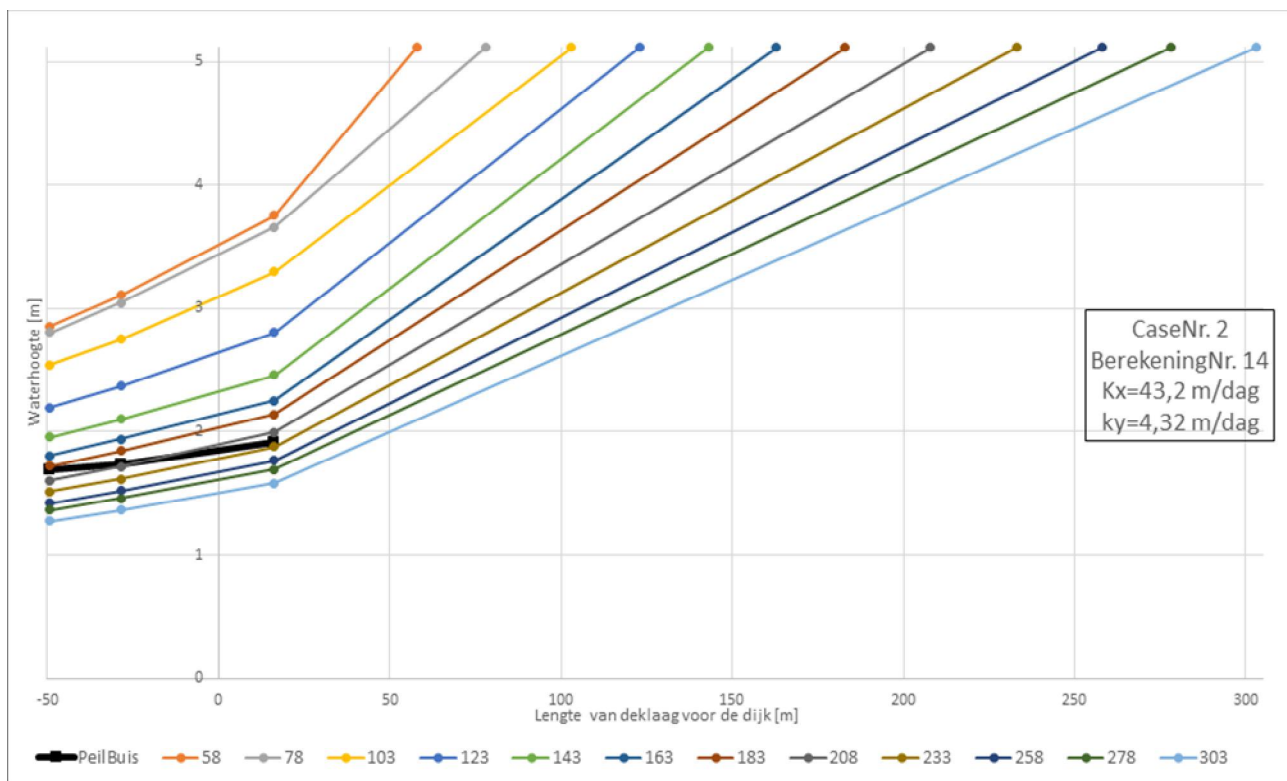
Figuur 4.5.2-1 amplitudes op 3 locaties met variërende deklaag lengte als functie van het intredepunt, case nr 1, batch 8

Afhankelijk van de doorlatendheid van de aquifer (grotere doorlatendheid) heeft het intredepunt meer invloed op de waterstand. In de volgende figuren zijn de waterstanden voor de meetlocaties gegeven met andere Kx en Ky waarden voor verschillende lengtes van de deklaag.

S



Figuur 4.5.2-2 amplitudes op 3 locaties met variërende deklaag lengte als functie van het intredepunt, case Nr.1, batch 13



Figuur 4.5.2-3 amplitudes op 3 locaties met variërende deklaag lengte als functie van het intredepunt, case Nr.2, batch 14

Uit de figuren 4.5.2-1 tot met 4.5.2-3 blijkt dat lengte van de deklaag veel impact heeft op de modelwaterstanden op de gemeten locaties. De invloed van de lengte van de deklaag van de (c.q. de ligging van het intredepunt) is sterk afhankelijk van de absolute  $K_x$  waarde (groot verschil tussen figuur 4.5.2-1 en 4.5.2-3) en de absolute waarde van  $K_y$  heeft bijna geen invloed (klein tot geen verschil tussen figuur 4.5.2-1 en 4.5.2-2).

Uit de figuren 4.5.2-1 tot met 4.5.2-3 blijkt dat de amplitude van de drie peilbuismetingen niet sterk varieën (zwarte lijn PeilBuis in de figuren). Om dit na te bootsen blijkt de combinatie van grote lengte van de deklaag en een grote horizontale doorlatendheid van de aquifer ( $K_x$ ) het meest maatgevend te zijn.

Een grote lengte van de deklaag bij figuur 4.5.2-2 zorgt voor een redelijk match voor het meetpunt aan de buitenberm, maar het verschil op de locaties achterland en binnenteen tussen de peilbuismetingen en het model is groot. Het kleinste verschil is te vinden bij figuur 4.5.2-3, met een grote lengte van de deklaag en hoge  $K_x$  waarde.

Uit de resultaten van case nr.1 en nr.2 blijkt dat om een goede keuze te maken voor het intredepunt het van belang is een grote doorlatendheid van aquifer te kiezen met een relatief grote lengte voor deklaag. Voor deze locatie varieert de optimale afstand uit de kruinlijn tussen 100 en 250 meter.

#### 4.5.3 Doorlatendheid van de aquifer (waterdoorlatende laag)

Om de gevoeligheid van de doorlatendheid op de waterstanden te bepalen zijn er verschillende berekeningen gedaan om de invloed van  $K_x$ ,  $K_y$  en de verhouding tussen die twee te bepalen. Uit paragraaf 4.5.2 is gebleken dat de beste fit voor alle drie de meetlocaties wordt bereikt met een grote lengte van deklaag. We zullen in het vervolg gebruik maken van deklaaglengte tussen 100 en 250 meter. Dit komt overeen met de volgende model aanduiding van het intredepunt L205 en L075 zie ook tabel 3.3.3-2.

Hieruit is gebleken dat  $K_x$  de grootste impact heeft op het verloop en de absolute waterstanden.  $K_y$  heeft een beperkte tot geen invloed. Dit is opzicht ook logisch want het intredepunt wordt bepaald aan de hand van de lengte van het voorland, dus als het water eenmaal in de aquifer-

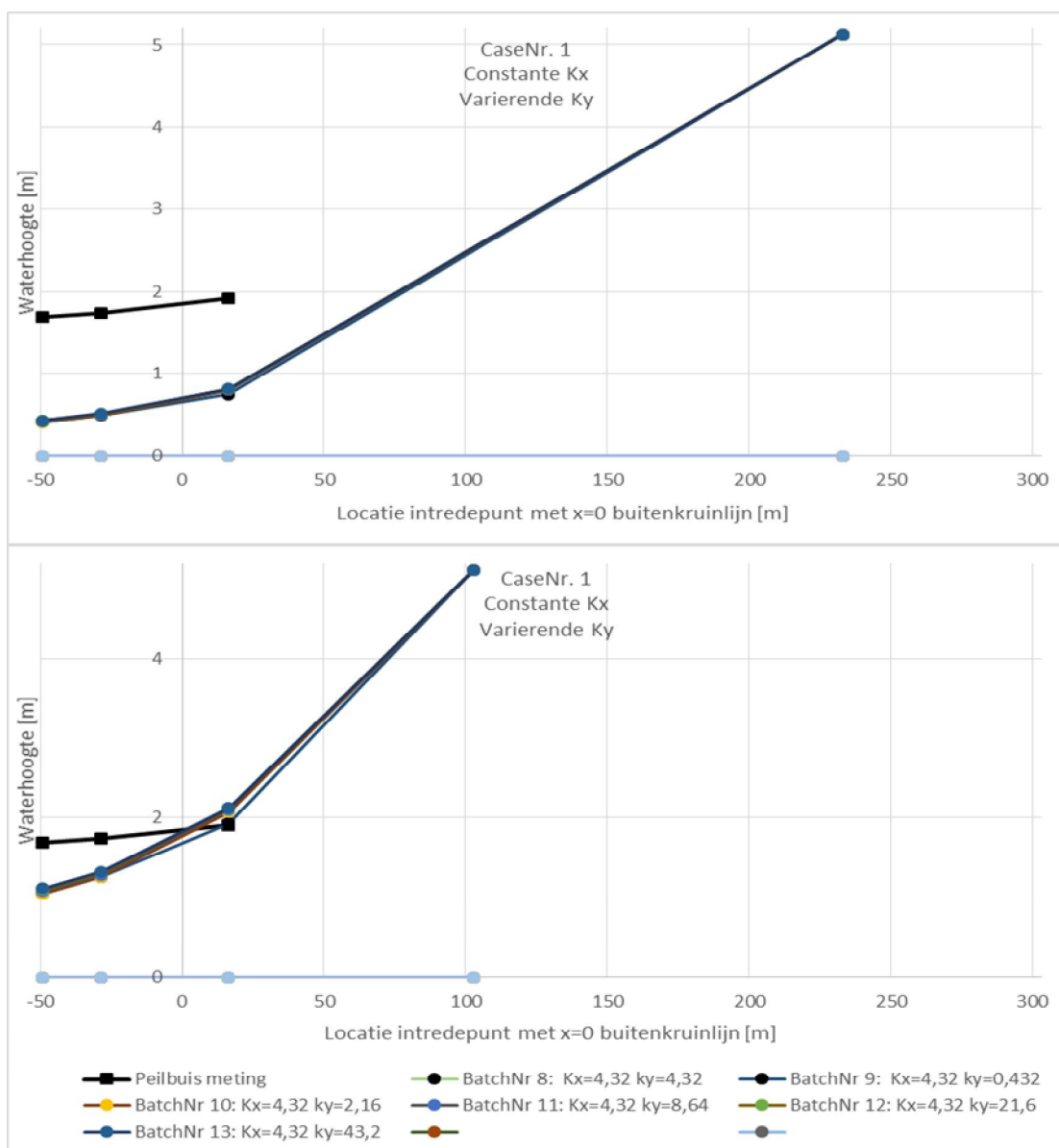
laag doorgedrongen is, zal  $K_y$  niet veel invloed hebben op de modelwaterstanden bij de peilbuismetinglocaties.

In figuur 4.5.3-1 en 4.5.3-2 zijn de resultaten te zien uit case nr. 1 en nr. 2 en met verschillende keuzes voor de ligging van het een fictief intredepunt weergegeven:

Figuur 4.5.3-1:  $K_x$ = constant: bovenste deel: intredepunt op 230 m uit de buitenkruinlijn, onderste deel: intredepunt op 100 m.

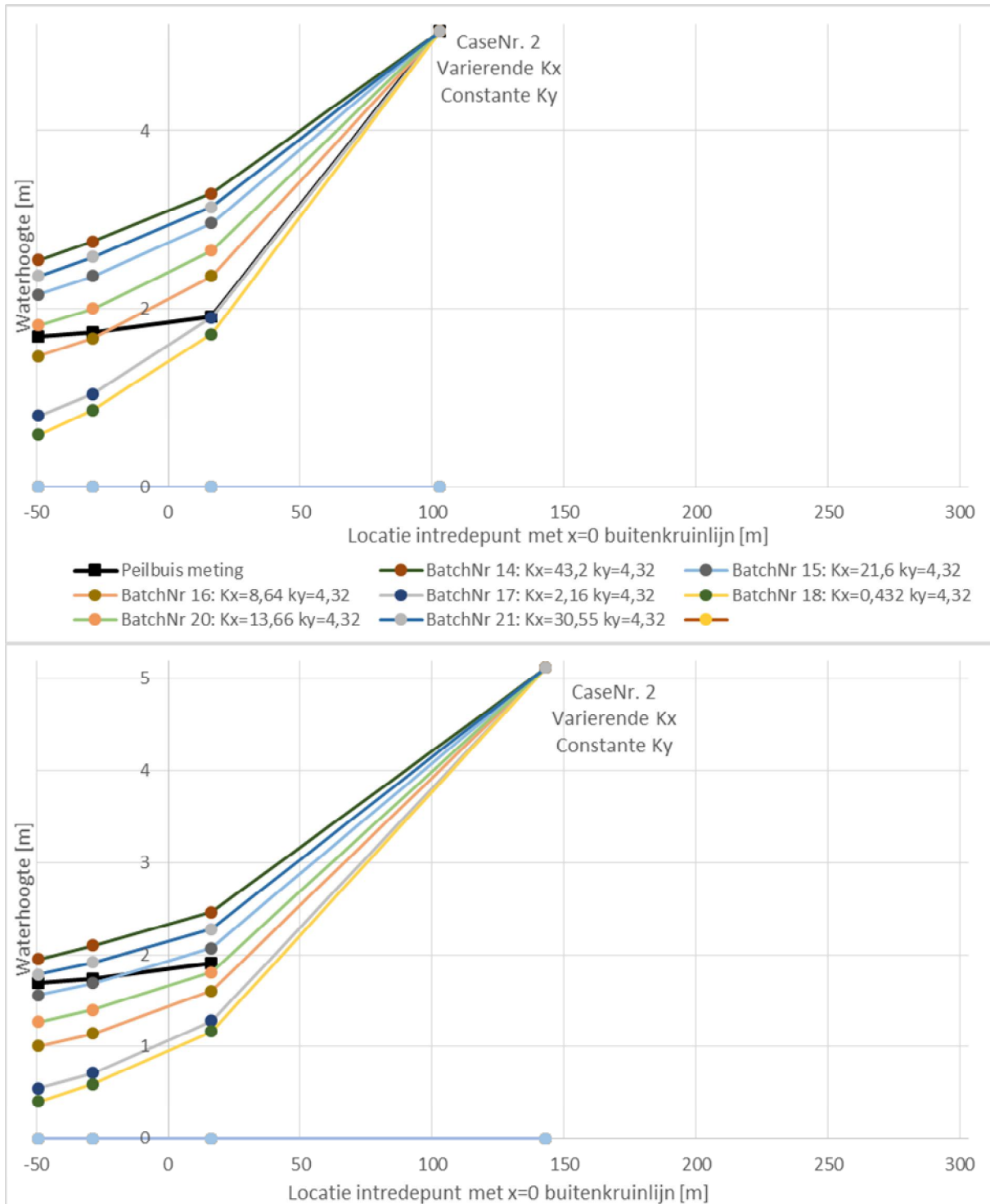
Figuur 4.5.3-2:  $K_y$ = constant: bovenste deel: intredepunt op 140 m, onderste deel: intredepunt op 100 m.

Case Nr.	BerekeningNr.	$K_x$ [m/dag]		$K_y$ [m/dag]		$K_x/K_y$		Lengte dichtte deklaag [m] Van - Tot	Gat voorland
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.		
1	8 t/m 13	4.32		0.432	43.2	0.1	10	40 - 300	Nee
2	14 t/m 21	0.432	43.2	4.32		0.1	10	40 - 300	Nee



Figuur 4.5.3-1: amplitudes op 3 locaties met constante  $K_x = 4,32$  en variërende  $K_y$

Uit figuur 4.5.3-1 blijkt duidelijk dat er weinig variatie zit in waterhoogte op de vier locaties (AL, BIT, BUB en intredepunt) door verandering van  $K_y$ . Als het intredepunt dichterbij de teen van de dijk ligt neemt het verschil enigszins toe en wordt het verhang tussen BUB en AL groter.



Figuur 4.5.3-2: model amplitudes op 3 locaties met variërende Kx en constante Ky =4,32

Uit figuur 4.5.3-2 blijkt duidelijk dat er veel variatie zit in resulterende waterhoogte op de vier locaties (AL, BIT, BUB en intredepunt) door verandering van Kx. Als het intredepunt dichterbij de teen ligt neemt het verhang tussen BUB en AL toe.

Ook blijkt uit de berekeningen dat de verhouding tussen Kx en Ky minder invloed heeft dan de absolute waarde voor Kx.

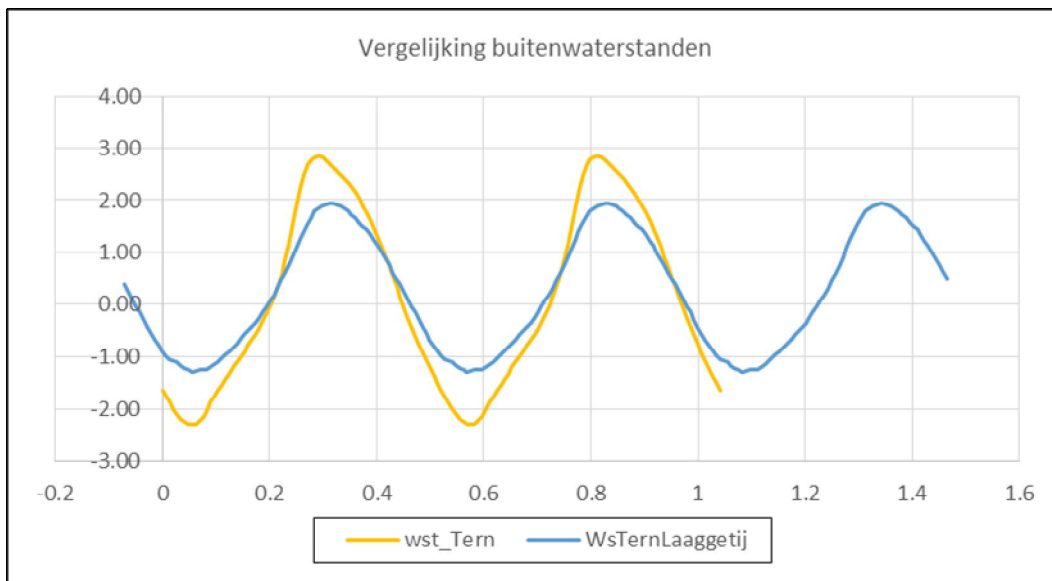
Uit de berekeningen uit case nr. 2 blijkt dat de beste fit met een intredepunt variërend tussen 100 en 250 meter en een horizontale doorlatendheid (Kx) tussen 21.6 en 8.64.



Met een interpolatie tussen de berekeningen en een extra aantal berekeningen (case nr.3) blijkt dat een  $K_x = 13.6$  m/dag de beste fit met de peilbuismetingen oplevert. Voor meer detail wordt verwezen naar appendix 13.

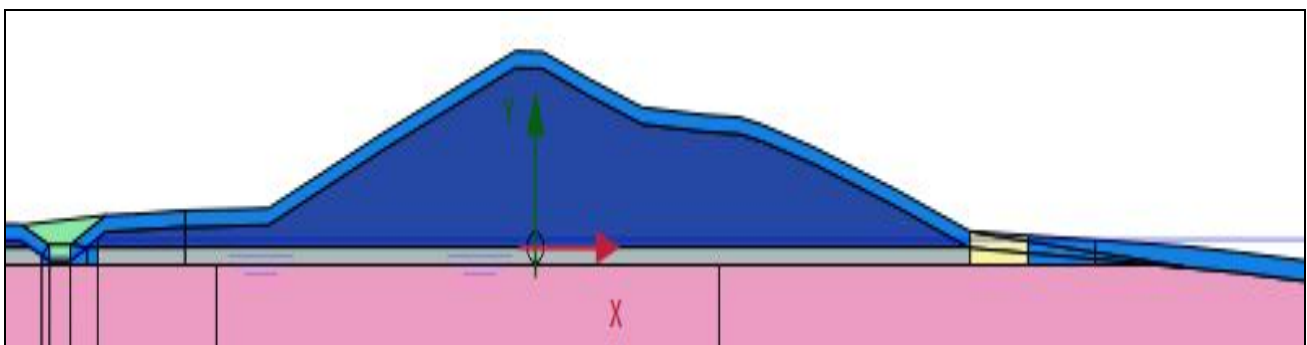
#### 4.5.4 Vorm van peilbuismetingen en modeluitkomsten

In de besproken berekeningen in case nr.1 en nr.2 is er gezocht naar optimaal model om de amplitude te kalibreren. Uit diverse berekeningen blijkt dat met het intredepunt en de doorlatendheid van de aquifer een redelijke kalibratie gemaakt kan worden voor de grootte van de amplitude. De vorm van het waterstandsverloop is niet te kalibreren met deze parameters. Door het gekozen getij (wst Tern) te vergelijken met andere getijden, blijkt de getijdevorm te veranderen; bij een getijde met een kleinere amplitude, stijgt en daalt de waterstand rondom het hoogwater minder snel, zie figuur 4.5.4-1.



Figuur 4.5.4-1 getijde vorm afhankelijk van de getijde amplitude

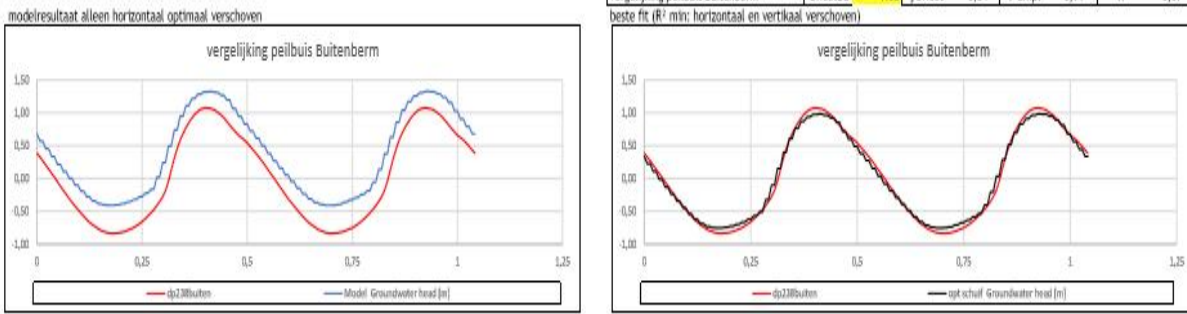
Bij het gekozen getijde is juist een versnelling te zien in de stijging en daling nabij Hoogwater. Deze versnelling in stijging en daling van de waterstanden is ook te zien op de peilbuismetingen. Het lijkt dat boven bepaalde waterstanden sprake is van een extra watertoetreding in de ondergrond. Door een klein gat te maken nabij de teen van de dijk, geschematiseerd als een doorlatend deel met lengte van 5.5 meter en doorlatendheid van 4.32 m/dag (hetzelfde als doorlatende deklaag) kan deze hypothese onderzocht worden. In figuur 4.5.4-2 wordt de aangepaste model schematisatie gepresenteerd.



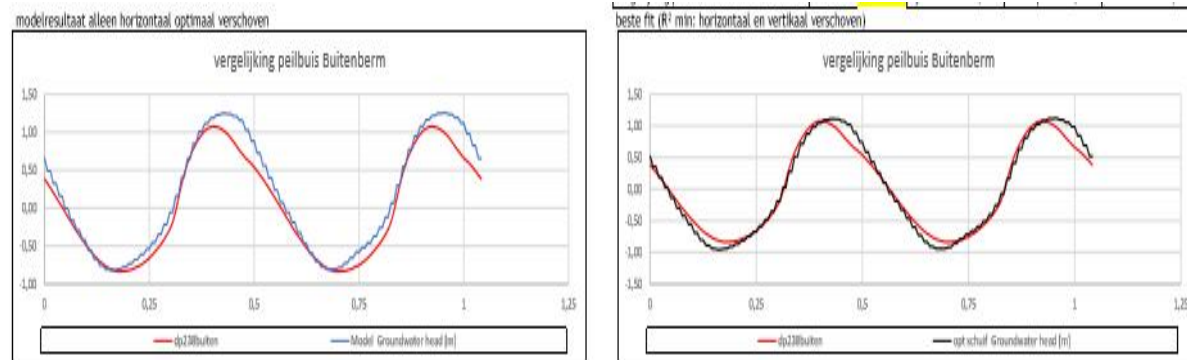
Figuur 4.5.1-2, Model schematisatie met gat in de deklaag nabij de teen van de dijk

In de figuren 4.5.4-3 en 4.5.4-4 wordt het waterstandsverloop (stijg- en daalsnelheid) uit het model met en zonder gat aan de teen aan de dijk aan de buitenberm vergeleken met de peilbuismeting bij de buitenberm.





Figuur 4.5.4 -3, Model resultaat Met open gat aan de teen van de dijk (caseNr.4)



Figuur 4.5.4-4, Model resultaat Zonder open gat aan de teen van de dijk (case Nr.2)

Uit figuur 4.5.4-3 en 4.5.4-4 blijkt dat het model met open gat bij de teen van de dijk, een veel betere overeenstemming van de vorm van de peilbuismeting oplevert, dan een model berekening zonder gat en vanzelfsprekend ook een betere fit van de amplitudes.

#### 4.5.5 Validatie modelinstellingen

Bij de kalibratie is slechts summier gekeken naar effect verzadigingsgraad (saturation factor). Hieruit bleek dat de variatie hiervan geen effect heeft de modelresultaten (case nr. 1) . Voor het vervolg wordt geadviseerd om bij kalibratie het effect van andere (model)factoren zoals de poriëngehalte (void ratio) en verzadigingsgraad (saturation factor)nadrukkelijk te onderzoeken.

In bijlage 9 wordt het effect van een open en dicht slootbodem gevisualiseerd. Uit figuur B9-1 blijkt dat een open slootbodem dempend werkt op de amplitudes bij de meetlocaties van de peilbuizen en het verhang tussen BUB en AL verkleint.

Om na te gaan of de gekozen model instellingen bruikbaar zijn onder stormvloed omstandigheden wordt eerst gekeken naar het effect van andere getij amplitudes op de juistheid van de kalibratie. Hiervoor wordt de gekalibreerde getijdeamplitude (standaard keus) vergeleken met een getijde met een kleinere (doodtij) en een grotere amplitude(extremer springtij). In tabel 4.5.5-1 worden de gemeten amplitudes voor de drie verschillende getijde situaties weergegeven.

BuitenwaterNr.	Omschrijving	Amplitude meting			
		Buitenwater	AL	BIT	BUB
1	getij met kleinere amplitude	3.55	1.32	1.33	1.46
	onder normale omstandigheden (standaard keus)	5.12	1.69	1.74	1.91
3	getij met grotere hoge amplitude	5.44	1.74	1.81	1.98

Tabel 4.5.5-1 gemeten amplitudes voor drie getij situaties

In tabel 4.5.1-2 worden de resultaten gepresenteerd voor de drie verschillende hoogwatersituaties. Hierbij is de parameterkeus door de standaardkeus van getijde (buitenwaterNr.2, best fit voor amplitude en vorm door de variabelen, intredepunt (lengte deklaag =123 m,  $K_x = 13.6$  m/dag,  $K_y = 4.32$  m/dag en open gat aan de teen van de dijk).

In de tabel 4.5.1-2 worden de amplitudes van de meting vergeleken met de berekende amplitudes uit het model.

BuitenwaterNr.	Omschrijving	Amplitude meting					Amplitude Model				Verschil meting en model				Verhouding amplitude (Ampl. Meeting / Ampl. Model)			
		Buiten water	getij verhouding	AL	BIT	BUB	Buiten water	AL	BIT	BUB	Buiten water	AL	BIT	BUB	Buiten water	AL	BIT	BUB
1	getij met kleinere amplitude	3.55	69%	1.32	1.33	1.46	3.55	1.35	1.51	1.95	0.00	-0.03	-0.18	-0.49	1.00	1.02	1.13	1.33
2	omstandigheden (standaard keus)	5.12	100%	1.69	1.74	1.91	5.12	1.88	2.12	2.82	0.00	-0.19	-0.38	-0.91	1.00	1.11	1.22	1.48
3	getij met grotere hoge amplitude	5.44	106%	1.74	1.81	1.98	5.44	1.94	2.21	3.04	0.00	-0.20	-0.40	-1.06	1.00	1.11	1.22	1.53

Tabel 4.5.5-2, gemeten en gemodelleerde amplitudes voor drie verschillende getijdeamplitudes

Bij doortij (nr.1) is de amplitude van het getij 69% van de standaard keus. Bij een extremer springtij (nr.3) is de amplitude van het getij 106% van de standaard keus.

Uit tabel 4.5.5-2 blijkt dat met de standaard keus van het getijde de verhouding tussen amplitude in het model en meting bij de buitenberm ( $F_{BUB}$ ) gelijk is 1,48. Bij een enigszins extremer getij ( $F_{BW}=1,06$ ) neemt deze factor toe tot 1,53. Bij een getij met een kleinere amplitude ( $F_{BW}=0,69$ ) neemt deze factor af tot 1,33.

Bij het achterland en de binnenteen neemt de factor niet toe bij een enigszins extremer getij ( $F_{BW} = 1,06$ ). Wel blijft de factor afnemen bij een getijde met een kleinere amplitude minder. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de sloot aan de binnenzijde.

Dit betekent dat opschaling naar stormomstandigheden met (grote) onzekerheid omgeven is. Met deze configuratie van parameters en bodemopbouw zal het model de respons waarschijnlijk overschatten. Het doorrekenen van een storm geeft in ieder geval wel meer inzicht in het verloop van de waterstand in de peilbuizen tijdens stormomstandigheden. In figuur B6-5 van bijlage 6 wordt een voorbeeld gegeven van een maatgevende storm met maximale opzet 4½ uur na HW.

#### 4.5.6 Conclusie

- Een grotere doorlatendheid en een meer zeewaarts gelegen intredepunt zorgen beiden voor afname in het verhang tussen buitenberm en achterland
- Voor de kalibratie zijn twee parameters het belangrijkste de grootte van de horizontale doorlatendheid en de ligging van het intredepunt. Deze twee parameters hebben een sterke correlatie. Bij een grotere doorlatendheid is een minder zeewaarts gelegen intredepunt nodig voor een goede fit. Door deze correlatie is het niet mogelijk om een 'overall' best fit te krijgen (zie ook bijlage 8).
- Toestroming nabij de teen van de dijk bij alleen hogere waterstanden (gat bij dijk) geeft een verbetering van de overeenstemming van de vorm van respons.
- Met het grondwatermodel is het niet mogelijk om een perfecte fit voor alle drie de meetlocaties te verkrijgen. Of bij buitenberm of bij het achterland is sprake van onder- of overschatting bij best fit op de andere locatie.
- Voor opschaling naar andere waterstanden waarvoor geen peilbuismeting beschikbaar zijn (maatgevende storm) is de betrouwbaarheid van de resultaten van een grondwatermodel voor deze locatie niet goed te kwantificeren.
- Verder onderzoek is nodig om de invloed van andere modelfactoren te kwantificeren.

#### 4.6 Piping analyse

Wordt opgenomen in het definitieve concept van de rapportage.

## 5 Kansrijkheid toepassing tijdsafhankelijkheid voor andere gebieden

Het toepassen van tijdsafhankelijkheid is kansrijk voor de gebieden die een sterk dynamisch karakter hebben, zoals gebieden met een grote invloed van het getijde (kust, estuaria, benedenrivieren) en locaties waar windopzet een belangrijke rol speelt in het maatgevende hoogwater zoals bij de meren (Grevelingenmeer, IJsselmeer).

Op basis van de gemeten waterstandsverlopen over meerdere jaren kan een inschatting gemaakt worden in hoeverre tijdsafhankelijkheid een rol speelt. Met peilbuismetingen kan vervolgens ook gekeken worden in hoeverre een minder conservatieve benadering gehanteerd kan worden bij het vallend hoogwater, zodat voor buitenwaartse stabiliteit een minder extreme situatie beschouwd hoeft te worden.

Binnen dit onderzoek is het niet mogelijk geweest om een en ander te kwantificeren omdat hiervoor de benodigde tijd ontbrak.

## 6 Conclusies en advies

### 6.1 Conclusie

Uit dit onderzoek zijn de volgende conclusie te trekken:

Waterstanden en respons in peilbuizen

- Naast de gepresenteerde regressie analyse om de maatgevende respons in de peilbuis te bepalen, zal mogelijk een kleine stormtoeslag hierop nodig zijn om het effect van het werkelijk waterstandsverloop tijdens stormomstandigheden in rekening te kunnen brengen.
- Het extrapoleren van het waterstandsverloop in de peilbuizen naar extreme stormcondities door gebruik te maken van getijde afhankelijke en gemeten stijg- en daalsnelheden in peilbuizen levert een bruikbare methodiek op. De amplitude van respons bij dp 238 op de buitenberm wordt bevestigd door een grondwaterstromingsmodel.
- Voor de zuidoever Westerschelde is een stormtoeslag van 0,10 meter berekend voor één locatie op de buitenberm bij dp 238.
- Voor buitenwaartse stabiliteit wordt geadviseerd uit te gaan van het grootste verschil tussen buitenwaterstand en respons in de peilbuis bij laag water. Voor deze peilbuis is dan de situatie met maximale opzet bij LW maatgevend. Dit betekent een waterstand in de peilbuis van 1,54 m + NAP en een LW = -1,07 m + NAP).

#### Doorlatendheid (grondwatermodellering)

- Uit de grondwatermodellering bij dp 238 blijkt dat de kalibratie van de doorlatendheid niet eenduidig af te leiden is, omdat de absolute waarde van de doorlatendheid afhangt van de veronderstelde intredepunt. Voor deze locatie levert het fictieve intredepunt op 123 meter uit de buitenkruin met een doorlatendheid van 13,6 m/dag de beste fit op voor de amplitude bij de buitenberm (conservatieve waarde).
- De invloed van de verticale doorlatendheid is veel beperkter dan de invloed van de horizontale doorlatendheid.
- Gezien het beperkte succes van de eenduidige kalibratie wordt geadviseerd om uit te gaan van een relatief conservatieve waarde van de doorlatendheid. Bij veiligheidsbeoordelingen op basis van peilbuismetingen speelt de ligging van het fictieve intredepunt geen rol omdat de locatie van de peilbuis met bijbehorende respons fungeert als intredepunt bij een piping analyse.
- De doorlatendheden, zoals bepaald in appendix 9c, blijven het vertrekpunt bij een piping analyse. Essentieel hierbij het in rekening brengen van de onzekerheid m.b.v. schematiseringsfactoren.
- Vergelijken van de optimaal gekalibreerde doorlatendheid uit het model ( $K_x = 13,66$  m/dag) met de pompproeven betekent dat de kans op een grotere doorlatendheid 6 à 7%. Het in rekening brengen van deze onzekerheid past binnen van de schematiseringsfactoren.
- Voor opschaling naar andere waterstanden waarvoor geen peilbuismetingen beschikbaar zijn (maatgevende storm) is de betrouwbaarheid van de resultaten van een grondwatermodel voor deze locatie niet goed te kwantificeren.
- Verder onderzoek is nodig om de invloed van andere modelfactoren te kwantificeren.
- Een open slootbodem in het model werkt als drukventiel en heeft een dempend effect op de amplitudes van de respons en zorgt voor een afname in het verhang tussen buitenberm en achterland.

#### Grondopbouw

- Langs het hele traject is een doorlopende deklaag aanwezig zodat piping overal een relevant mechanisme is

#### Korrel diameter

- Uit onderzoek blijkt dat er geen verband bestaat tussen de korrel diameter en de doorlatendheid die gemeten wordt met pompproeven.

- Voor het bepalen van de korreldiameter kan alleen worden teruggevallen naar het gemiddelde en de standaardafwijking van de proevenverzameling en het aantal proeven, zoals is afgeleid in appendix 9c.

#### Trajectindeling

- Voor piping analyses en stabiliteitsbeschouwingen is het noodzakelijk om een indeling te maken die gebaseerd is op een doorlopend lengteprofiel en de respons in peilbuizen. Hiermee kan bijvoorbeeld worden vastgesteld of er sprake is van een tussenzandlaag die al dan niet reageert op het buitenwater en de hiermee samenhangende dikte van de deklaag.
- Variatie van de deklaag baseren op de onderkant van de afsluitende laag en niet op de dikte.
- Trajectindeling op basis van enige uniformiteit in de respons van de peilbuizen en op basis van de onderkant deklaag, de doorlatendheid en de korreldiameter. Verder speelt hierbij ook de aanwezigheid en hoedanigheid van een sloot en de hoogteligging van maaiveld in de polder een rol.

## 6.2 Advies

#### Waterstanden en respons in peilbuizen

- Geadviseerd wordt om bij het in rekening brengen van tijdsafhankelijkheid een extra stormtoeslag mee te nemen in de maximale waterstand van de peilbuis. Vooral nog wordt voor de Westerschelde geadviseerd om uit te gaan van een toeslag van 0,10 meter.
- Voor de waterstandsval na MHW wordt geadviseerd om uit te gaan van een storm met maximale opzet bij laagwater en de hierbij horende respons in de peilbuizen baseren op de gemeten stijg- en daalsnelheden bepalen in de peilbuis (zie bijlage 6).
- Bij de analyse bewust zijn van het feit dat de theoretische stormduur van 35 uur in de praktijk regelmatig wordt overschreden. Door uit te gaan van opgeschaalde gemiddelde waterstand over 6 getijden (= 75 uur) is hier bij de regressie afdoende rekening mee gehouden.

#### Doorlatendheden (grondwatermodellering)

- De doorlatendheden, zoals bepaald in appendix 9c, blijven het vertrekpunt bij een piping analyse. Essentieel hierbij is het in rekening brengen van de onzekerheid m.b.v. schematiseringsfactoren. Wel wordt geadviseerd om bij afkeur een grondwatermodel te gebruiken om na te gaan of een minder conservatieve inschatting mogelijk is.
- Gezien de beperkte betrouwbaarheid van de resultaten van een grondwatermodel voor deze locatie wordt geadviseerd om het grondwatermodel niet te gebruiken voor opschaling naar maatgevende stormcondities.

#### **Grondopbouw**

- Voor een goede beoordeling van piping en stabiliteit is het essentieel dat een doorlopend lengteprofiel beschikbaar is minimaal bij de binnenteen en de kruin. Voor de buitenwaartse stabiliteit geldt dit ook bij de buitenberm. Bij sterke variatie in de grondopbouw wordt geadviseerd om ook in het achterland een doorlopend lengteprofiel beschikbaar te krijgen. Ten behoeve van mogelijk buitenwaartse versterking kan het handig zijn om tijdens de iniatiefase ook op het voorland grondonderzoek uit te voeren om een lengteprofiel te verkrijgen.

#### **Korreldiameter**

- Afleiden van een geschikte korreldiameter blijft lastig. Vooral nog wordt geadviseerd om altijd aan de binnenzijde in de watervoerende zandlaag de korrelverdeling te laten bepalen en de representatieve waarde af te leiden uit normale verdeling rekening houdend met aantal proeven.

#### Trajectindeling

- De traject indeling baseren om uniformiteit van korreldiameter, respons in buis, grondopbouw, aanwezigheid sloot en hoogte maaiveld.

### 6.3 Vervolg

#### Waterstanden en respons in peilbuizen

- Verificatie van extra stormtoeslag op de maatgevende waterstand in een peilbuis is nodig. Hiervoor zal de analyse voor meerdere peilbuizen moeten worden uitgevoerd en zal gekeken moeten naar de afhankelijkheid van de normeis en waterstandsstation op deze toeslag.
- In breder kader zal zeker voor de Oosterschelde een analyse van de stormopzet opgepakt moeten worden om te zorgen dat de invloed van het menselijk falen (noodsluiting) inzichtelijk wordt gemaakt op het verloop van de waterstand in de Oosterschelde.

#### Doorlatendheden (grondwatermodellering)

- Uitbreiding van het onderzoek naar andere locaties ter verificatie van de conclusies m.b.t. de resultaten van de doorlatendheden. Mogelijk kan op andere locaties een betere en een meer éénduidige overeenstemming gevonden worden. De locatie keuze mede laten afhangen van de beperkte ruis in het gemiddeld signaal aan de binnenzijde, waardoor in principe een betere fit mogelijk moet zijn.
- Verder onderzoek is nodig om de invloed van andere modelfactoren te kwantificeren.

## 7 Referentielijst

- [1]
- [2] 02 2018 0319 appendices behorend bij rapport effect tijdsafhankelijkheid.xslm
- [3] 03 2013007747 Rapportage verlengde 3e toetsronde dijken v4.doc
- [4] 04 2013007747 Appendix 7 Toetsschema voor piping v4.docx
- [5] 2018 handleiding opzet peilbuis onderzoek.docx (in bewerking)
- [6]
- [11] Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen, herziene versie maart 2012 (ORZW 2012)

De referenties die met een **cijfer** beginnen zijn opgenomen in de projectmap : \\24Z  
De overige rapporten zijn opvraagbaar

**Dit overzicht wordt bij de definitieve rapportage compleet gemaakt.**



## 8 Appendices

Overzicht van de appendices die in een apart document zijn opgenomen en vormen een onderdeel van dit rapport

Dit overzicht wordt bij de definitieve rapportage bijgevoegd.

## 9 Begrippen en symbolen

AL	Achterland
BIT	Binnenteen
BUB	Buitenberm
D70	grofheid van het zandmonster, korreldiameter
Kx	horizontale doorlatendheid
Ky	verticale doorlatendheid

Dit overzicht wordt bij de definitieve rapportage compleet gemaakt

## 10 Lijst met figuren en tabellen

Dit overzicht wordt bij de definitieve rapportage bijgevoegd.

## Bijlage 1, Situering onderzoeksgebied

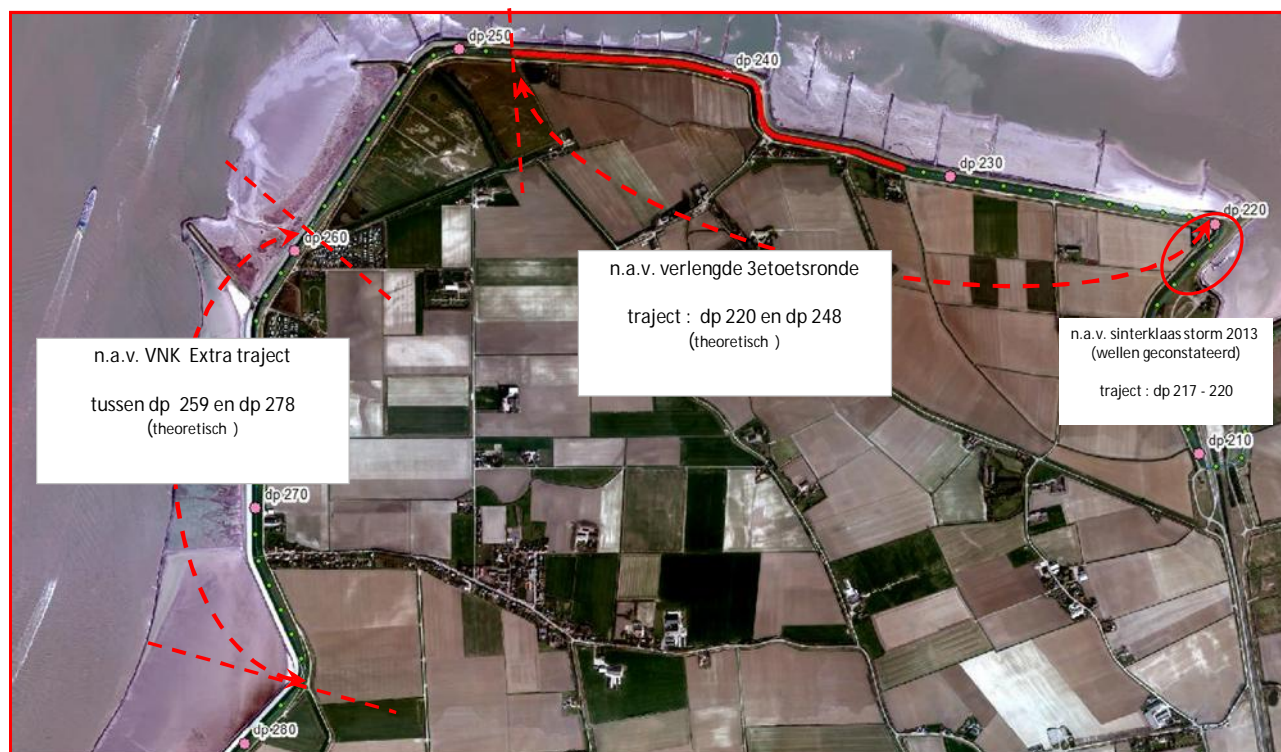
### B1.1 Relatie, met VNK beschouwing

Vak nr.	Vaknaam	Faalkans (per jaar) per faalmechanisme				Gecombineerd
		Overloop en golfoverslag	Macrostabieliteit binnenwaarts	Opbarsten en piping	Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam	
17	hm 17.200 - 17.640	<1/1.000.000	<1/1.000.000	-	-	<1/1.000.000
18	hm 17.640 - 18.000	1/180.000	-	-	-	1/180.000
19	hm 18.000 - 18.800	<1/1.000.000	<1/1.000.000	-	-	<1/1.000.000
20	hm 18.800 - 19.610	1/540.000	-	-	-	1/540.000
21	hm 19.610 - 20.090	<1/1.000.000	-	-	-	<1/1.000.000
22	hm 20.090 - 22.020	1/250.000	-	-	-	1/250.000
23	hm 22.020 - 22.900	<1/1.000.000	-	1/360	-	1/360
24	hm 22.900 - 23.690	<1/1.000.000	-	1/670	-	1/670
25	hm 23.690 - 24.070	<1/1.000.000	-	-	-	<1/1.000.000
26	hm 24.070 - 24.980	<1/1.000.000	-	1/360	-	1/360
27	hm 24.980 - 25.920	1/670.000	-	<1/1.000.000	-	1/580.000
28	hm 25.920 - 27.140	<1/1.000.000	1/640.000	1/690	-	1/690
29	hm 27.140 - 28.200	<1/1.000.000	-	-	-	<1/1.000.000
30	hm 28.200 - 29.000	<1/1.000.000	-	-	1/2.400	1/2.400
31	hm 29.000 - 30.200	<1/1.000.000	<1/1.000.000	1/310.000	-	1/300.000

Tabel B1.1 Faalkans beschouwing dijkkring 32 VNK-2 rapport, 2013.

Uit tabel B1.1 blijkt dat binnen VNK, voor piping bij de vakken 22, 23, 26 en 28 een hoge faalkans is berekend. Bij de verlengde derde toetsronde (2013) zijn alleen de 22 t/m 26 afgekeurd.

### B1.2 Ligging beschouwde trajecten



## B1.3 Toelichting op trajectniveau

dp van	dp tot	aanleiding	toetsoordeel
217	220	sinterklaasstorm 2013; wellen	vold
220	232	verificatie grondopbouw en respons	n.o./vold
232	248	afgekeurd bij 3e toetsronde	onvol
259	278	hoge faalkans VNK	vold

## Bijlage 2, Overzicht locaties onderzoek

In figuur B2-1 en B2-2 wordt een overzicht gegeven van de locaties van sonderingen en peilbuizen. Figuur B2-1 betreft het deel tussen dp 217 en dp 250, en figuur B2-2 tussen dp 259 en 278.

De sonderingen worden met groene driehoeken aangegeven en de peilbuizen met een bolletje. De kleur van het bolletje geeft het aantal peilbuizen per boring aan (zie legenda). De ligging van de peilbuizen uit eerder onderzoek (2011) is met rode lijn aangegeven. Dit betreft vier dwarsprofiellocaties bij dp 225, 244, 249 en 250.



Figuur B2-1 situatie onderzoek Kop van Ossensisse tussen dp 217 en 250 met locaties van sonderingen en peilbuizen



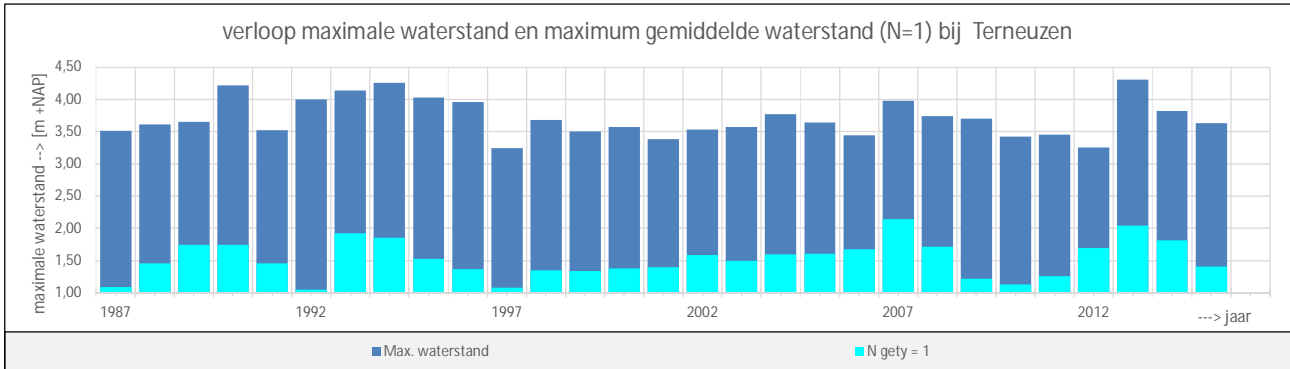
Figuur B2-2, situatie onderzoek Kop van Ossensisse tussen dp 259 en 270 met locaties van sonderingen en peilbuizen



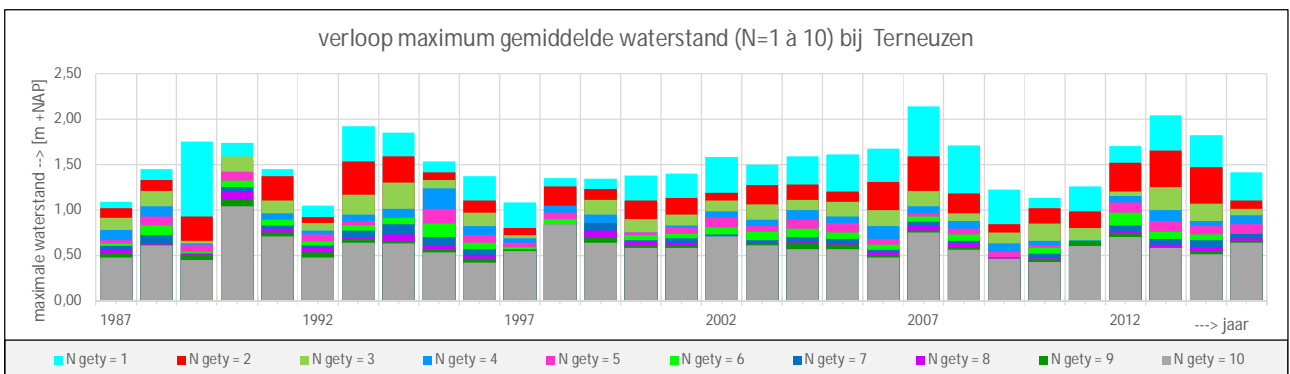
### Bijlage 3, Bepaling gemiddelde stormopzet

Voor het bepalen van de gemiddelde stormopzet van het buitenwater zijn de gemeten waterstanden (1987-2015) bij diverse meetstations in Zeeland beschouwd.

In figuur B-1 wordt voor het meetstation Terneuzen de maximale waterstand per jaar gegeven en de maximale gemiddelde waterstand met een middeling over één getij (=12,25 u). In figuur B3-2 wordt de maximale gemiddelde waterstand per jaar over 1 à 10 getijden gepresenteerd.



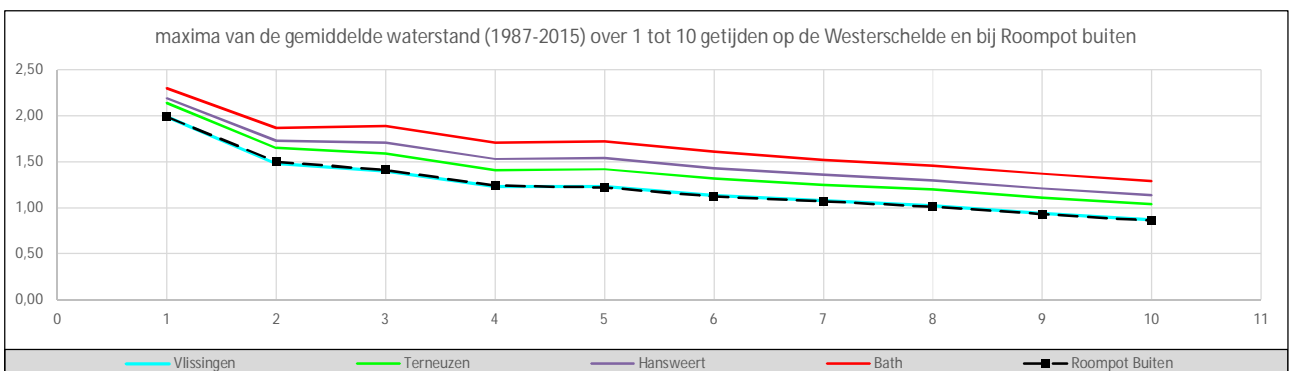
Figuur B3-1 Terneuzen, jaarmaxima van de waterstand en de gemiddelde waterstand over 1 getijde voor 1987- 2015



Figuur B3-2, Terneuzen, verloop van de jaarmaxima van de gemiddelde waterstand over 1 tot 10 getijden voor 1987-2015

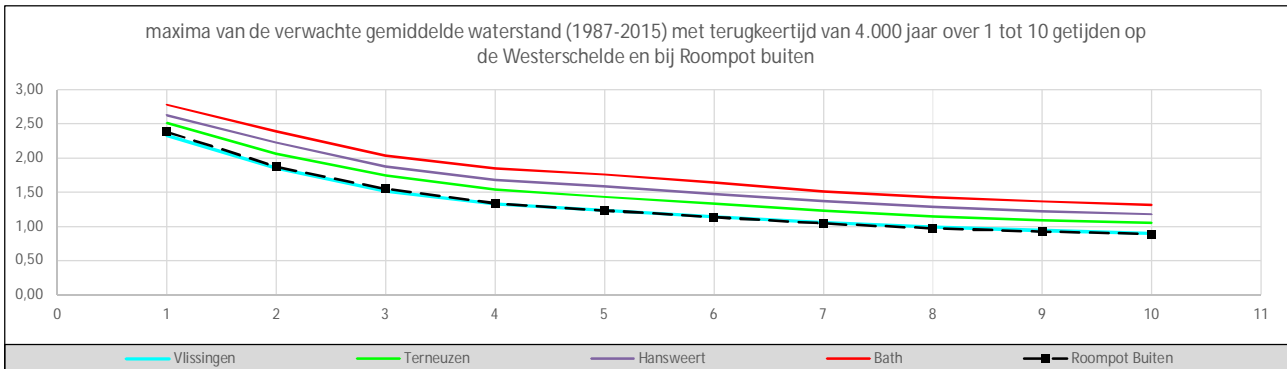
Uit figuur B3-2 blijkt dat de langdurige storm in 1990 (jan/feb) heeft geleid tot extreem hoge waarde van de gemiddelde waterstand over meerdere getijden (>2). Gedurende deze storm is een maximale waterstand van 4,22 m +NAP opgetreden. De kortdurende storm in 2007 en 2013 had tot gevolg dat juist het maximum bij middeling over 1 à 2 getijden extreem te noemen is. In 2013 is voor Terneuzen de maximale waterstand binnen deze periode opgetreden (4,31 m +NAP) .

In figuur B3-3 worden de maxima van de gemiddelde waterstanden met een middeling over 1 à 10 getijden voor verschillende meetstations weergegeven langs de Westerschelde. In figuur B3-4 wordt verwachte waarde van de maxima van de gemiddelde waterstanden bij een terugkeertijd van 4.000 jaar gebruikmakend van een normale verdeling.



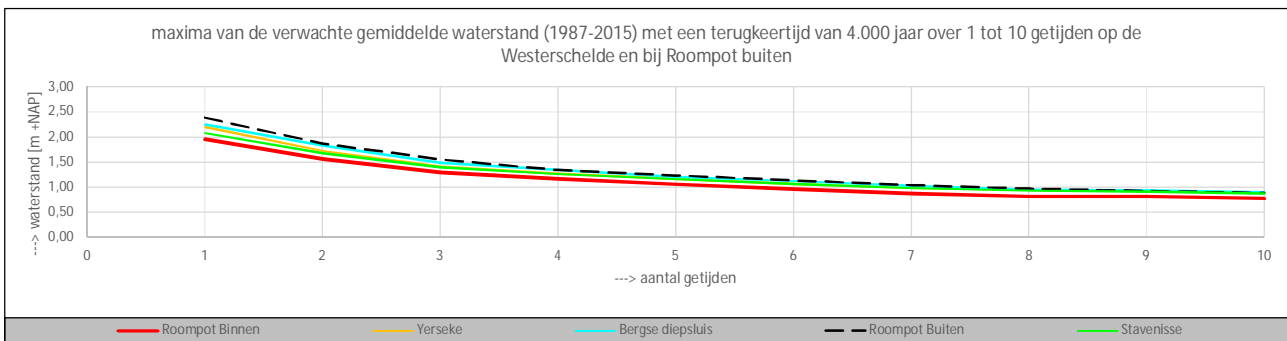
Figuur B3-3 Verloop van de maxima van de gemiddelde waterstand over 1 tot 10 getijden op de Westerschelde en bij Roompot buiten

Uit figuur B3-3 blijkt dat voor alle meetstations het verloop vergelijkbaar is, en bij middeling over 1 à 5 getijden een minder stabiel patroon laat zien. Verder valt op dat de waarden bij Roompot Buiten overeenkomen met Vlissingen. Voor een middeling over 3 getijden neemt het maximum toe van 1,40 m +NAP bij Vlissingen tot 1,90 m +NAP bij Bath.



Figuur B3-4 Verloop van de verwachte maxima van de gemiddelde waterstand met een terugkeertijd van 4.000 jaar over 1 tot 10 getijden op de Westerschelde en bij Roompot Buiten.

Uit figuur B3-4 blijkt dat het verloop van de verwachte maxima van de gemiddelde waterstanden minder grillig verloopt. Bij een terugkeertijd van 4.000 jaar is het verwachte maximum bij mindeling over 6 getijden voor Vlissingen en Terneuzen gelijk aan de maximale waarden die in de beschouwde periode (1987-2015) is opgetreden (Vlissingen 1,14 m +NAP en Terneuzen 1,33 m +NAP).



Figuur B3-5 verloop van de verwachte maxima van de gemiddelde waterstand met een terugkeertijd van 4.000 jaar over 1 tot 10 getijden in de Oosterschelde en bij Roompot Buiten.

In de Oosterschelde is er nauwelijks sprake van enige scheefstand in het bekken. Alleen bij Roompot Binnen is een enigszins lagere gemiddelde waterstand terug te vinden (zie figuur B3-5).



In tabel B3-1 wordt een overzicht gegeven van de hydraulische randvoorwaarden bij de meetstations in Zeeland en de ontwikkeling van de uitgangspunten voor het bepalen van maximale waarde van de gemiddelde waterstand.

- De verschillende meetstations in Zeeland zijn vermeld in kolom (1).
- Het maatgevend hoogwater (MHW) wordt in kolom (2) gegeven, GHW en GLW in kolom (3) en (4) en in kolom 4 GLW.
- De informatie die gebruikt om te komen tot de waterstand van het quasi statisch deel (wst<sub>Stat2010</sub>) ten behoeve van de **derde toetsronde (2010)** is opgenomen in kolom 5 t/m 11.
- Voor de **verlengde derde toetsronde (2013)** heeft een nadere analyse van de waterstandwaarnemingen tot nieuwe schattingen geleid van de waterstanden voor het statisch deel (wst<sub>Stat2013</sub>) en dynamisch deel (wst<sub>Dyn2010</sub>). Zie kolom (12) en (13).
- Bij de beoordeling volgens het WBI geldt per normtraject een specifieke normeis (varieert tussen een overstromingskans van 1/100 en 1/1.000.000). Hierdoor is het noodzakelijk om de bepaling statisch deel van de maatgevende waterstand afhankelijk van de normeis verder uit te werken (zie kolom (15) t/m (22)). Als voorbeeld is een en ander uitgewerkt bij een 1/4.000ste waterstand om de vigerende benadering direct te kunnen vergelijken met de eerdere aanpak.

Waterstand station	HR2006			opzet Toetsing2010							Verlengde 3e toetsing (2013)		vigerende benadering Statisch deel waarnemingen : 1987 -2015							
	MHW	GHW	GLW	bepaling opzet			1991.0 Gemid wst <sup>1)</sup>	waterstand waarnemingen 1987 -2010			Gebied	Waterstand Statisch deel Wst <sub>Stat 2013</sub>	Waterstand dynamisch deel Wst <sub>Dyn 2013</sub>	Gemiddelde	standaardafwijking	Dev Min	Wst Dev Def	Aantal	1/4.000ste wst.	Afgerond
				maximum	gemid 3 getijden	gemid 6 getijden		Max Gemid wst	MaxWst - Max gemid wst van 3 getijden = stormopzet	Max gemid wst van 3 getijden Wst <sub>Stat 2010</sub>										
Vlissingen	5,30	2,05	-1,81	3,25	1,63	0,81	-0,01	0,05	1,10	1,15	WsNoo	1,15	4,15	0,65	0,14	0,14	0,14	29	1,14	1,15
Borsele	5,60	2,20	-1,90	3,40	1,70	0,85	0,10	0,10	1,10	1,20	WsNoo	1,20	4,40	0,71	0,12	0,14	0,14	24	1,20	1,20
Hansweert	6,10	2,42	-2,06	3,68	1,84	0,92	0,08	0,15	1,10	1,25	WsNoo	1,50	4,60	0,82	0,19	0,14	0,19	29	1,48	1,50
Bath	6,60	2,72	-2,11	3,88	1,94	0,97	0,14	0,20	1,10	1,30	WsNoo	1,65	4,95	0,91	0,21	0,14	0,21	29	1,64	1,65
Roompot Binnen	3,50	1,33	-1,21	2,17	1,09	0,54	0,01	0,05	0,90	0,95	Os	0,95	2,55	0,60	0,10	0,13	0,13	29	1,04	1,05
Stavenisse	3,50	1,58	-1,39	1,92	0,96	0,48	0,03	0,05	0,90	0,95	Os	1,05	2,45	0,67	0,11	0,13	0,13	29	1,11	1,10
Yerseke	3,80	1,70	-1,50	2,10	1,05	0,53		0,05	0,90	0,95	Os	1,05	2,75	0,67	0,11	0,13	0,13	29	1,11	1,10
Bergse diepsluis	4,00	1,86	-1,60	2,14	1,07	0,54	0,03	0,05	0,90	0,95	Os	1,10	2,90	0,68	0,13	0,13	0,13	25	1,12	1,10
Roompot Buiten	5,18	1,55	-1,33	3,63	1,82	0,91	-0,01	-0,01	1,10	1,10	OSK	1,15	4,03	0,64	0,14	0,14	0,14	29	1,13	1,15
Cadzand	5,10	1,95	-1,74	3,15	1,58	0,79	0,00	0,05			WsZui	0,95	4,15	0,58	0,10	0,14	0,14	5	1,08	1,10
Breskens	5,30	2,00	-1,80	3,30	1,65	0,83		0,05			WsZui	1,05	4,25	0,65	0,12	0,14	0,14	5	1,14	1,15
Terneuzen	5,80	2,29	-1,90	3,51	1,76	0,88	0,08	0,15			WsZui	1,20	4,60	0,77	0,16	0,14	0,16	29	1,33	1,35
Overloop van Hansweert	6,10	2,40	-1,95	3,70	1,85	0,93		0,15			WsZui	1,35	4,75	0,80	0,15	0,14	0,15	5	1,34	1,35
Walsoord	6,20	2,60	-2,05	3,60	1,80	0,90		0,20			WsZui	1,60	4,60	0,80	0,23	0,14	0,23	5	1,58	1,60
kolomnr (1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)
geïnterpoleerde waarden				Bronnen : <sup>1)</sup> Gemiddelde getijkromme RIKZ 1991.0							Middeling over Ngetij =6									

Tabel B3-1: Hydraulische randvoorwaarden bij de meetstations in zeeland met de gehanteerde waterstanden bij de peilbuisanalyse

### Maximale en gemiddelde opzet volgens vigerende stormduur van 35 uur (= circa 3 getijden)

Volgens VTV en het WBI2017 wordt voor getijdewateren in Zeeland uitgegaan van een stormduur van 35 uur. Voor Vlissingen geldt onder maatgevende omstandigheden een maximale opzet van 3e,25 m (zie kolom (5), dit is het verschil tussen MHW en GHW (kolom (2) minus kolom (3)). Dit betekent dat de gemiddelde opzet bij middeling over 3 getijden gelijk is aan de helft van de maximale opzet (zie kolom (6), voor Vlissingen 1,63 m). Bij middeling over 6 getijden is dit een kwart van de maximale opzet, als buiten de beschouwde storm de gemiddelde waterstand niet verhoogd zou zijn (zie kolom (7)).

### Aanpak toetsing 2010 met waterstandwaarnemingen in de periode 1987 - 2010

De informatie die gebruikt om te komen tot de waterstand van het quasi statisch deel (wst<sub>Stat2010</sub>) ten behoeve van de toetsing 2010 is opgenomen in kolom 5 t/m 11.

Uit de waterstandwaarnemingen valt op te maken dat de maxima van de gemeten stormopzet zowel in de Westerschelde (1,10 m) als de Oosterschelde (0,90 m) constant blijft (zie kolom (10)). De scheefstand in de maximale gemiddelde waterstand met middeling over 3 getijden wordt volledig bepaald door het oplopen van de gemiddelde waterstand in de Westerschelde. In de Oosterschelde is er nauwelijks sprake van enige scheefstand in het bekken (zie ook figuur B3-4 en B3-5).

In kolom (9) wordt het maximum van de geregistreerde gemiddelde waterstanden per jaar gegeven. Deze waarden zijn enigszins hoger dan de waarden uit "de gemiddelde getijkromme RIKZ 1991.0" in kolom (8). Het maximum van de jaarmaxima uit de periode 1987 en 2010 bij middeling over 3 getijden en wordt in kolom (11) gepresenteerd. De resulterende maximale stormopzet van

de gemiddelde waterstand wordt in kolom (10) gegeven. Dit is het verschil tussen kolom (9) en kolom(11).

### Maximale en gemiddelde opzet bij de verlengde 3e toetsronde

Bij de verlengde 3<sup>e</sup> toetsronde worden voor de peilbuisanalyse de meetwaarden van de middeling over 3 getijden gebruikt als uitgangspunt voor de waterstand van het statische deel, die feitelijk gebaseerd is op een middeling over 6 getijden. Hiermee wordt enig conservatisme ingebouwd ten behoeve van het extrapoleren naar maatgevende omstandigheden.

Verder zijn deze waarden zijn enigszins hoger dan theoretisch is af te leiden uit de stormopzet volgens het VTV (vergelijk in tabel 3-2 de kolom (7) met de kolom (13)). Gezien onzekerheden over de werkelijke stormduur waarbij over een langere periode sprake kan zijn van een verhoogde gemiddelde waterstand, zoals bij de storm in jan/feb 1990, is deze toename van 0,3 à 0,5 m verstandig te noemen.

Voor de maximale waterstand in de peilbuis betekent dit een toename van maximaal in de orde van 0,1 à 0,2 m, omdat het verschil in de respons tussen het statische en dynamische deel maximaal 20 à 35% bedraagt.

De waterstand van het statisch deel plus het dynamisch deel is gelijk aan het maatgevend hoogwater (MHW). In kolom (13) en (14) is voor ieder meetstation de waterstand van het statische en dynamische deel aangegeven.

### Vigerende aanpak voor bepalen gemiddelde opzet, uitgewerkt voor 1/4.000ste waterstand

Om beter te kunnen aansluiten bij de verschillende normeisen is voor de basis van de maximale gemiddelde opzet uitgegaan van een middeling over 6 getijden, gebruikmakend van een normale kansverdeling. Uit de waterstandwaarneming in de periode 1987-2015 zijn het gemiddelde en standaard afwijking bepaald uit de jaarlijkse maximale gemiddelde waterstanden bij middeling over 6 getijden (zie kolom (15) en (16)). Voor verschillende gebieden is een minimale waarde van de standaardafwijking aangehouden, om een voldoende consistente inschatting te maken voor de situaties waar minder waarnemingen voorkomen (zie kolom (17)). Gebruikmakend van de gemiddelde waarde uit kolom (15) en de bijgestelde standaardafwijking uit kolom (18) is waterstand bij een 1/4.000ste waterstand berekend op basis van een normale verdeling (zie kolom (20)). De afgeronde waarden op 5 cm voor als representatieve waarde van het statisch deel van waterstand beschouwd (zie kolom (22)).

In Tabel B3-2 wordt voor de verschillende normeisen de resulterende stormopzet gepresenteerd, op basis van middeling over 6 getijden.

Station	Station & Aantal Getij	Gemiddelde standaardafwijking	DevMir	WstDevDef	Aantal	kans = 1/100	kans = 1/300	kans = 1/1.000	kans = 1/3.000	kans = 1/4.000	kans = 1/10.000	kans = 1/30.000	kans = 1/100.000	kans = 1/300.000	kans = 1/1.000.000	Buiten water
Cadz	Cadz6	0,58 0,10	0,14 0,14	5	0,90	0,95	1,05	1,05	1,10	1,10	1,15	1,20	1,25	1,25	Nz	
Wkap	Wkap6	0,63 0,11	0,14 0,14	4	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,15	1,20	1,25	1,25	1,30	Nz	
RpBu	RpBu6	0,64 0,14	0,14 0,14	29	0,95	1,05	1,10	1,10	1,15	1,15	1,20	1,25	1,30	1,30	Nz2	
BrGa	BrGa6	0,72 0,11	0,14 0,14	4	1,05	1,10	1,15	1,20	1,20	1,25	1,30	1,30	1,35	1,40	Nz2	
RpBi	RpBi6	0,60 0,10	0,13 0,13	29	0,90	0,95	1,00	1,05	1,05	1,10	1,10	1,15	1,15	1,20	Os	
Stav	Stav6	0,67 0,11	0,13 0,13	29	0,95	1,00	1,05	1,10	1,10	1,15	1,15	1,20	1,25	1,25	Os	
Yers	Yers6	0,67 0,11	0,13 0,13	29	0,95	1,00	1,05	1,10	1,10	1,15	1,15	1,20	1,25	1,25	Os	
BdSI	BdSI6	0,68 0,13	0,13 0,13	25	0,95	1,00	1,05	1,10	1,10	1,15	1,20	1,20	1,25	1,30	Os	
Vlis	Vlis6	0,65 0,14	0,14 0,14	29	1,00	1,05	1,10	1,15	1,15	1,20	1,20	1,25	1,30	1,30	Wsnoo	
Bors	Bors6	0,71 0,12	0,14 0,14	24	1,05	1,10	1,15	1,20	1,20	1,25	1,25	1,30	1,35	1,40	Wsnoo	
Hweert	Hweert6	0,82 0,19	0,14 0,19	29	1,25	1,35	1,40	1,45	1,50	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	Wsnoo	
Bath	Bath6	0,91 0,21	0,14 0,21	29	1,40	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	Wsnoo	
Brsk	Brsk6	0,65 0,12	0,14 0,14	5	1,00	1,05	1,10	1,15	1,15	1,20	1,20	1,25	1,30	1,35	WsZui	
Tern	Tern6	0,77 0,16	0,14 0,16	29	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	WsZui	
OvHa	OvHa6	0,80 0,15	0,14 0,15	5	1,15	1,20	1,30	1,30	1,35	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	WsZui	
Wals	Wals6	0,80 0,23	0,14 0,23	5	1,30	1,40	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85	WsZui	

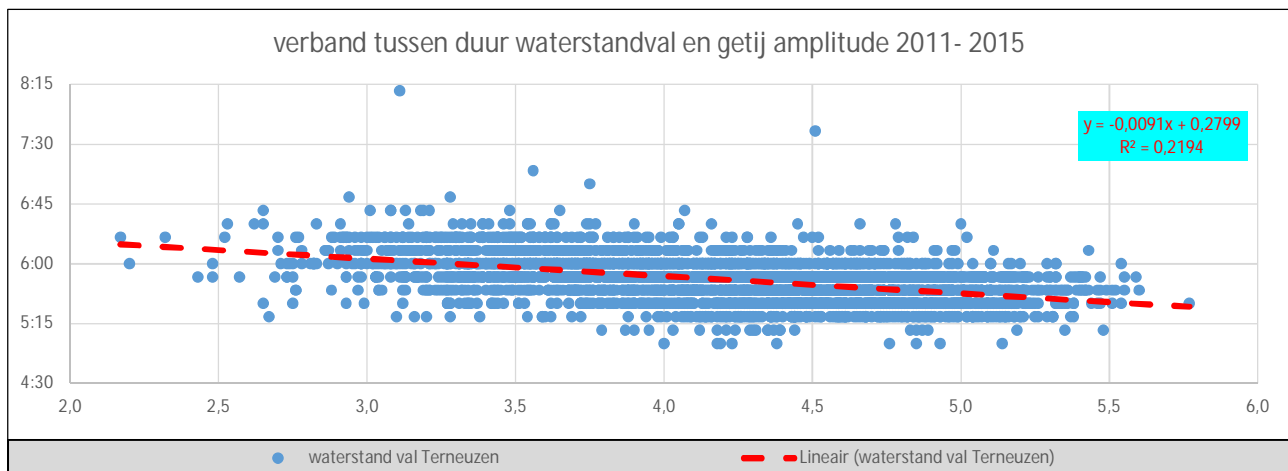
Tabel B3-2, Resulterende Maximale stormopzet (wst<sub>Stat</sub>) bij verschillende normeisen, afgeleid op basis van middeling over 6 getijden

## Bijlage 4, Duur en effect waterstandsval

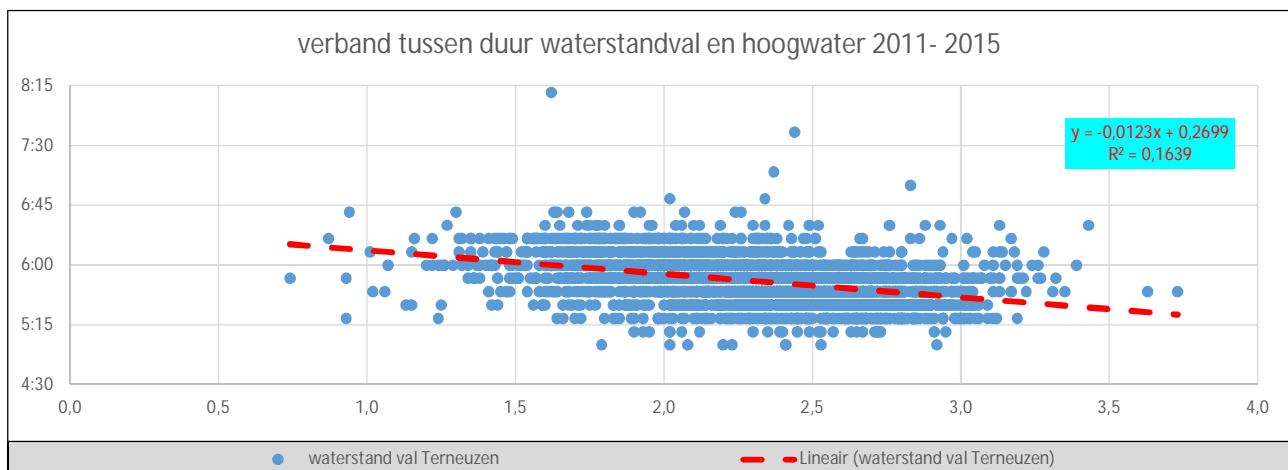
### B4.1 Duur waterstandsval uit waarnemingen

Voor het bepalen van de maximale waterstand in de peilbuis na hoogwater is het nodig om een inschatting te kunnen maken van de duur van het vallen van het water. Zodoende is voor de verschillende waterstandstations de tijdsduur bepaald, die ligt het moment van het hoogwater en het hierop volgend laagwater, voor alle hoogwaters in de periode tussen 2008 en 2015. Voor Terneuzen tussen 2011 en 2015.

In figuur B4.1-1 wordt het verband weergegeven tussen de duur van de waterstandsval en de getijamplitude. In figuur B4.1-2 wordt de relatie tussen de duur van de waterstandsval en de hoogte van het hoogwater gepresenteerd.



Figuur B4.1-1 verband tussen duur waterstandsval en het getij amplitude in de periode 2011-2015



Figuur B4.1-2 verband tussen duur waterstandsval en het hoogwater in de periode 2011-2015

Uit figuur B4.1-1 en B4.1-2 blijkt dat er geen verband is tussen de duur van de waterstandsval en de getijde amplitude en ook niet tussen de duur van de waterstandsval en het hoogwater. Om de minimale duur van de waterstandsverval onder extreme omstandigheden in te schatten wordt derhalve gebruikt gemaakt van een normale verdeling, op basis van alle hoogwaters in de periode tussen 2011 en 2015.

In tabel B4.1-1 zijn de resultaten van de analyse gepresenteerd. In kolom (2) de gemiddelde duur en de standaard afwijking in kolom(3). Gebruikmakend van een normale verdeling wordt voor de verschillende terugkeertijden de verwachte minimale duur gegeven (zie kol (4) t/m (8).

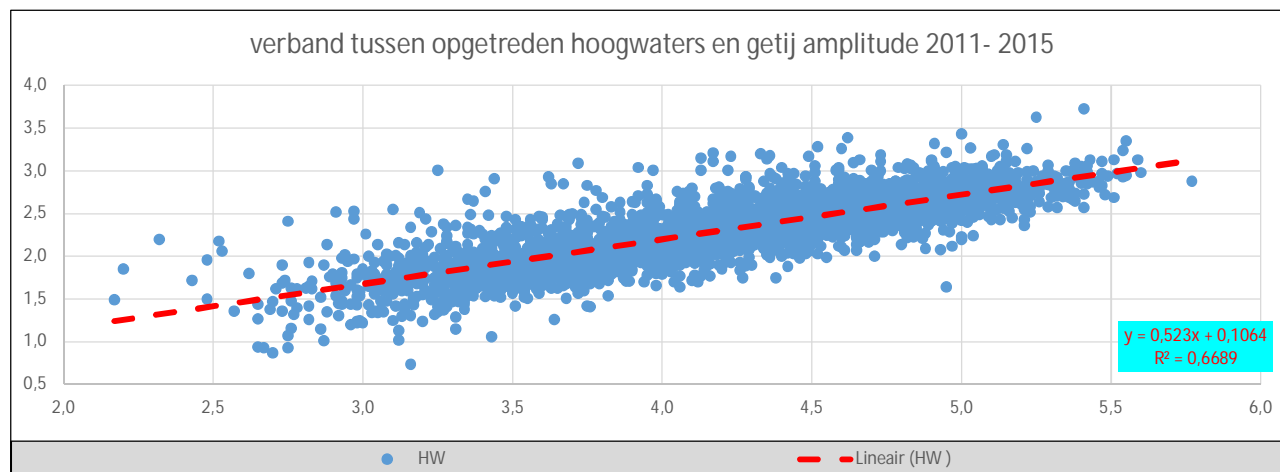
Voor de bepaling van de minimale duur per gebied is een pragmatische keuze gemaakt voor een terugkeertijd van 10.000 jaar (zie kolom (10)). Vervolgens naar beneden afgerond op een veelvoud van 10 minuten overeenkomstig met het meetinterval van de uitgevoerde peilbuis metingen (zie kolom (11)).

Waterstandstation analyseperiode: 2010 -2015	Gemid. van wstVal	St afw. van wstVal	duur Val f= 1E-01	duur Val f= 1E-02	duur Val f= 1E-03	duur Val f= 1E-04	duur Val f= 1E-05	BW	gemid duur per gebied	keus duur
kolom (1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
BrouwershavenGat	6:13	0:24	05:42	05:16	04:58	04:43	04:29	NZ2		4:30
Cadzand	6:34	0:14	06:15	06:00	05:49	05:39	05:31	NZ	05:34	5:30
Roompot Buiten	6:24	0:15	06:04	05:48	05:36	05:26	05:17	NZ		
Westkapelle	6:31	0:14	06:12	05:57	05:47	05:38	05:30	NZ		
Bergse diepsluis	6:03	0:12	05:46	05:33	05:23	05:15	05:08	OS	05:05	5:00
Roompot Binnen	6:02	0:15	05:42	05:26	05:14	05:04	04:55	OS		
Stavenisse	5:55	0:17	05:33	05:15	05:02	04:51	04:42	OS		
Yerseke	6:00	0:13	05:42	05:27	05:17	05:08	05:01	OS		
Bath	6:33	0:14	06:15	06:00	05:49	05:40	05:32	WS	05:34	5:30
Borssele	6:32	0:14	06:14	05:59	05:49	05:40	05:32	WS		
Breskens	6:30	0:13	06:12	05:58	05:47	05:39	05:31	WS		
Hansweert	6:25	0:16	06:04	05:48	05:35	05:25	05:16	WS		
Overloop van Hansweert	6:17	0:15	05:57	05:41	05:29	05:19	05:10	WS		
Terneuzen	6:37	0:14	06:18	06:02	05:51	05:42	05:34	WS		
Vlissingen	6:28	0:13	06:10	05:55	05:45	05:36	05:28	WS		
Walsoorden	6:22	0:14	06:04	05:49	05:38	05:28	05:21	WS		

Tabel B4.1-1, Analyse Tijdsduur waterstandsval in Zeeland

Uit tabel B4.1-1 blijkt dat voor de Oosterschelde uitgegaan moet worden van een minimale tijdsduur van 5 uur. Voor de rest van Zeeland kan van 5½ uur worden gehanteerd. Behalve bij de Brouwersdam waar slechts met 4½ uur gerekend mag worden. Voor de bepaling van de waterstandsval tussen MHW en GHW zal gebruik worden gemaakt van deze tijdsduren.

In figuur B4.1-3 wordt de relatie tussen de hoogte van het hoogwater en de getijamplitude gepresenteerd.

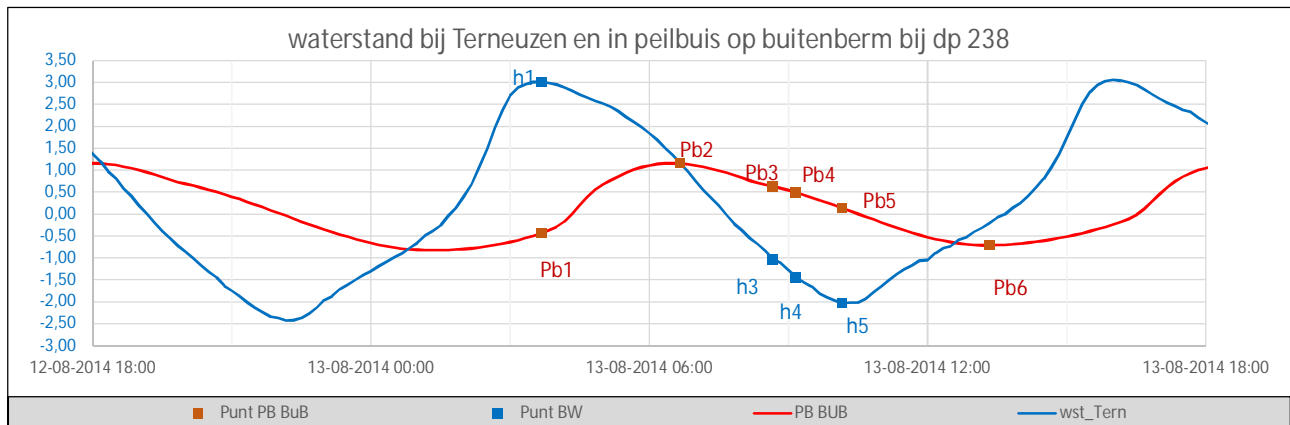


Figuur B4.1-3, verband tussen opgetreden hoogwaters en getij amplitude in de periode 2011-2015

Uit figuur B4.1-3 blijkt een duidelijk verband te bestaan tussen het hoogwater en de getij amplitude, zij het met aanzienlijke ruis ( $R^2=0,6689$ ). Dit vormt wel een indicatie dat onder normale omstandigheden gebruik kan worden gemaakt van de relatie tussen getijde amplitude en het verval in de peilbuis, hetgeen gebruikt kan worden bij de bepaling van het waterstandsverloop t.b.v. de buitenwaartse stabiliteit.

B4.2 Effect waterstandsval op de respons in de peilbuis

Bij de analyse van de peilbuismetingen zijn per getij de maximale waterstand in de peilbuis vergeleken met de waterstand in de peilbuis na 5 en 5½ uur van het moment van hoogwater (t=0) bij Terneuzen (Pbval(5u) en Pbval(5½u) en met het moment van laagwater (PBval(LW)). Ter verduidelijking is in figuur B4.2-1 en bijbehorende tabel B4.2-1 voor één getij een voorbeeld uitgewerkt. In figuur B4.2-1 wordt de waterstand van Terneuzen en van de peilbuis op de buitenberm bij dp 238 weergegeven. Ter verduidelijking zijn markante punten voor de waterstand (h1 t/m h5) en de respons in de peilbuis (Pb1 t/m Pb6) in de figuur opgenomen. Deze punten worden in tabel B4.2-1 toegelicht en de berekening uitgevoerd voor het verval in de peilbuis voor één getij.



Figuur B4.2-1, waterstand bij Terneuzen en respons van peilbuis op buitenberm bij dp 238

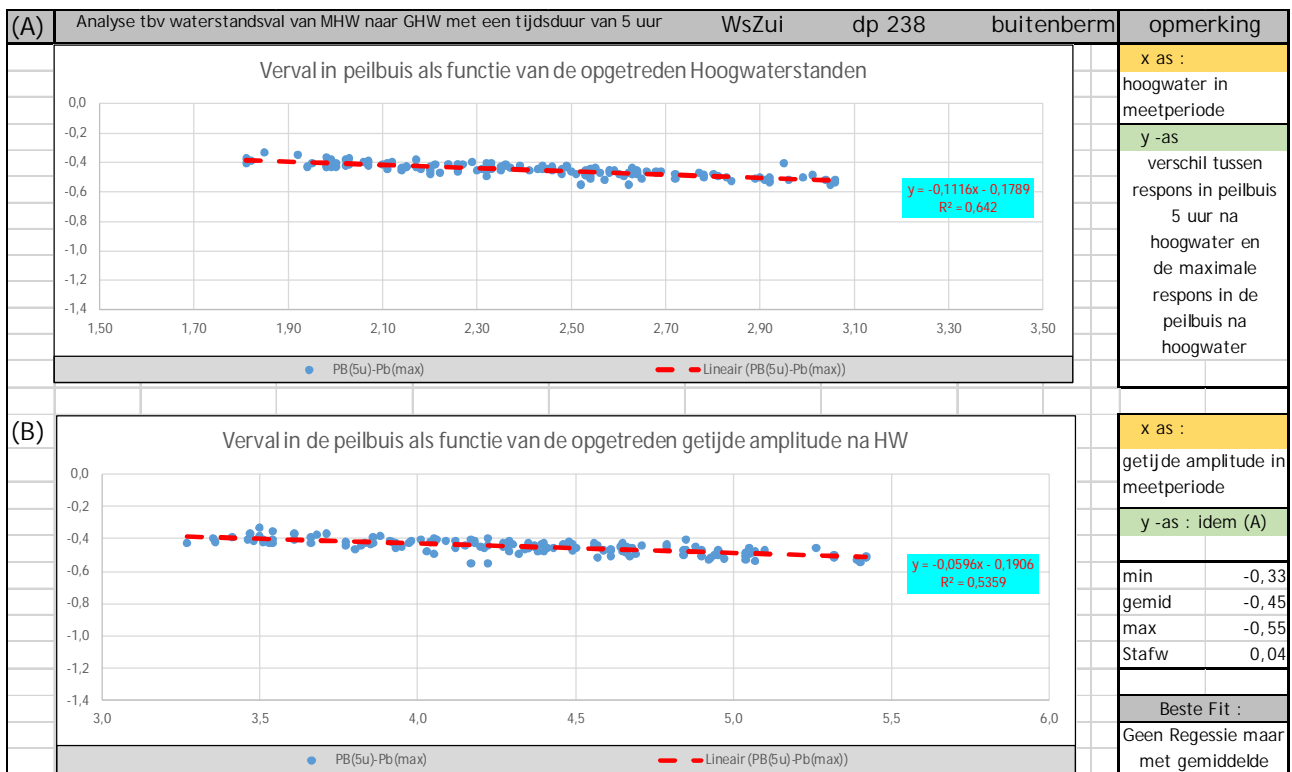
HW op tijdstip 0:00		wst Terneuzen		peilbuis BUB		reductie in PB na 5 u :			
punt	Gebeurtenis	tijd	h	waarde	PB	waarde	PBVal (5u)	= PB <sub>3</sub> -PB <sub>2</sub> = 0,67-1,16 = -0,49	
1	HW	0:00	h1	3,01	PB1	-0,50			
2	Max PB	3:00	h2	1,34	PB2	1,16	reductie in PB na 5 u :		
3	5 u na HW	5:00	h3	-0,84	PB3	0,67	PBVal (5½u)	= PB <sub>4</sub> -PB <sub>2</sub> = 0,54-1,16 = -0,62	
4	5½u na HW	5:30	h4	-1,28	PB4	0,54			
5	LW	6:40	h5	-2,03	PB5	0,13	reductie in PB bij LW :		
6	Min PB	9:40	h6	-0,32	PB6	-0,71	Pb val (LW)	= PB <sub>5</sub> -PB <sub>2</sub> = 0,13-1,16 = -1,03	

Tabel B4.2-1, berekening verval in de peilbuis.

In de volgende figuren (figuur B4.2-2 t/m B4.2-4) worden voor één peilbuis de reductie in de peilbuis gedurende de hele meetperiode (±2 maanden) weergegeven en het resultaat van deze analyse gepresenteerd. Figuur B4.2-2 betreft het waterstandsverval in peilbuis na 5 uur, figuur B4.2-3 idem na 5½ u en figuur B4.2-5 idem bij LW. In de bovenste figuren (A) is het verval uitgezet als functie van het hoogwater en in de onderste (B) als functie van getijdeamplitude. Het betreft de peilbuis op de buitenberm bij dp 238.

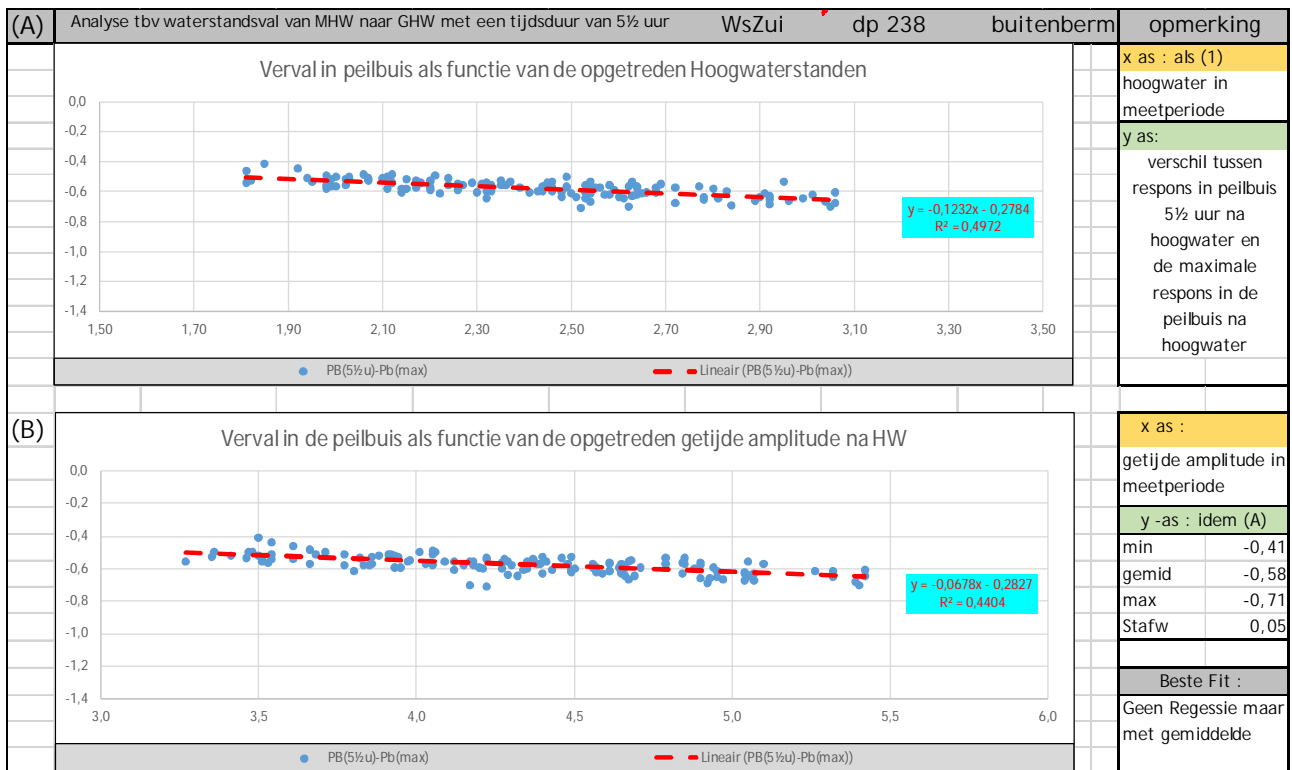
In figuur B4.2-5 wordt het verband weergegeven tussen de getijamplitude met hoogwater (A) en met de duur waterstandsverval (B). Het bovenste deel van de figuur (A) is vergelijkbaar met figuur B4.1-3 en het onderste deel (B) met figuur B4.1-1. Alleen de beschouwde periode is verschillend (in figuur B42-5: 11 juni -18 augustus 2014 en in de twee andere figuren 2011 - 2015).

De aanpak voor de waterstandsval van MHW naar GHW is vervangen door de aanpak die beschreven wordt in bijlage 6. Voor de consistentie in het rapport is gekozen om deze nog wel op te nemen. De getalswaarden zijn in de resultaat tabel B4.2-1 zijn wel verwijderd en vervangen door de nieuwe aanpak. Voor het verval alleen bij dp238.



Figuur B4.2-2, waterstandsverval in peilbuis 5 uur na hoogwater

periode: 11 juni - 19 aug 2014



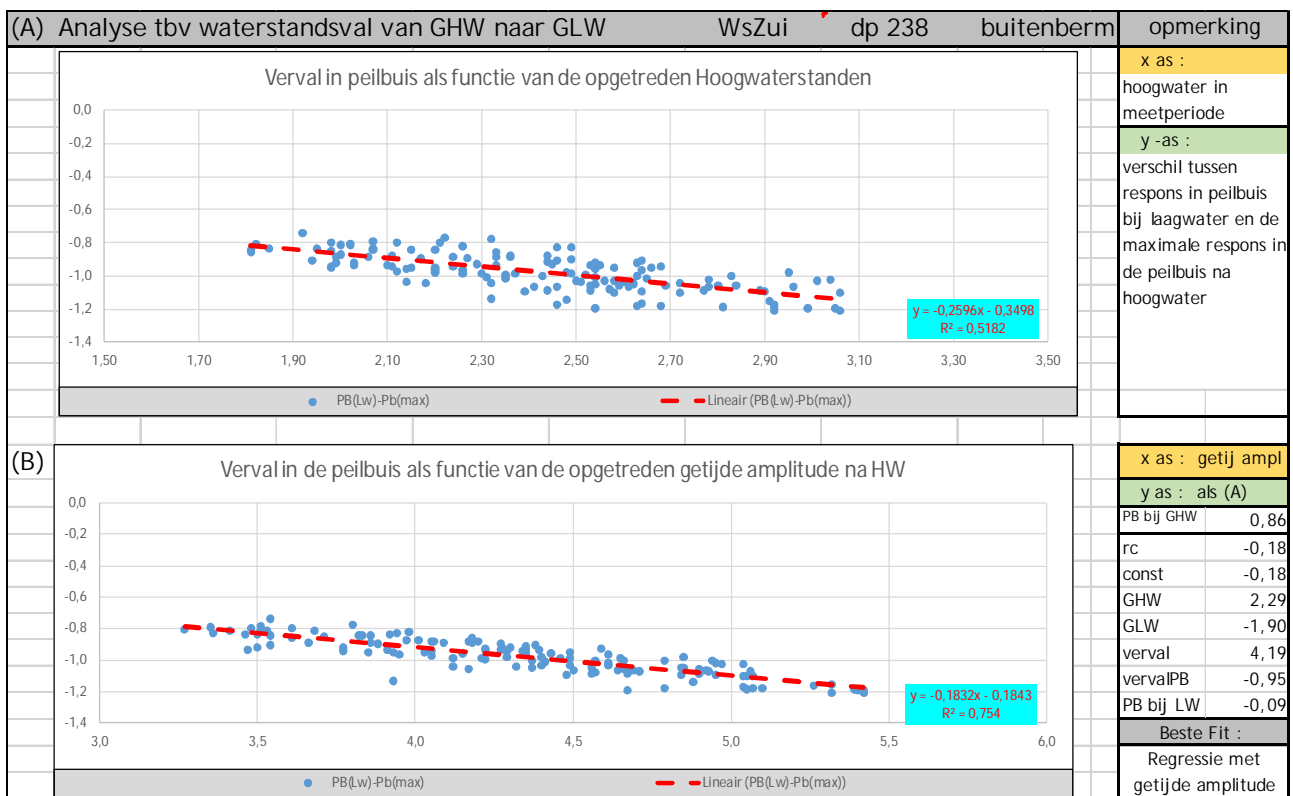
Figuur B4.2-3, waterstandsverval in peilbuis 5½ uur na hoogwater

periode: 11 juni - 19 aug 2014

De correlatie tussen het waterstandsverval in peilbuis 5u en 5½ na hoogwater met het hoogwater en met de getijamplitude is laag ( $R^2 = 0,44$  a  $0,64$ ). Voor deze peilbuis is de correlatie met het hoogwater iets beter dan met getijamplitude, maar de ruis is in beide gevallen veel te groot.

Hierdoor wordt bij het toepassen van beide waterstandsvervallen gebruik gemaakt van het gemiddelde. Voor deze peilbuis is het gemiddelde verval respectievelijk 0,45 en 0,58 m. In de Westerschelde wordt uitgegaan van een verval 5½ uur na hoogwater (zie tabel B4.1-1)





Figuur B4.2-4, waterstandsverval in peilbuis bij Laagwater,

periode: 11 juni - 19 aug 2014

De correlatie tussen het waterstandsverval in peilbuis bij laagwater met het hoogwater blijft laag ( $R^2 = 0,5182$ ) maar met de getijamplitude is hoog ( $R^2 = 0,754$ ). Bij toename van het verval op de Westerschelde neemt het verval in de peilbuis ook toe (met 18%).

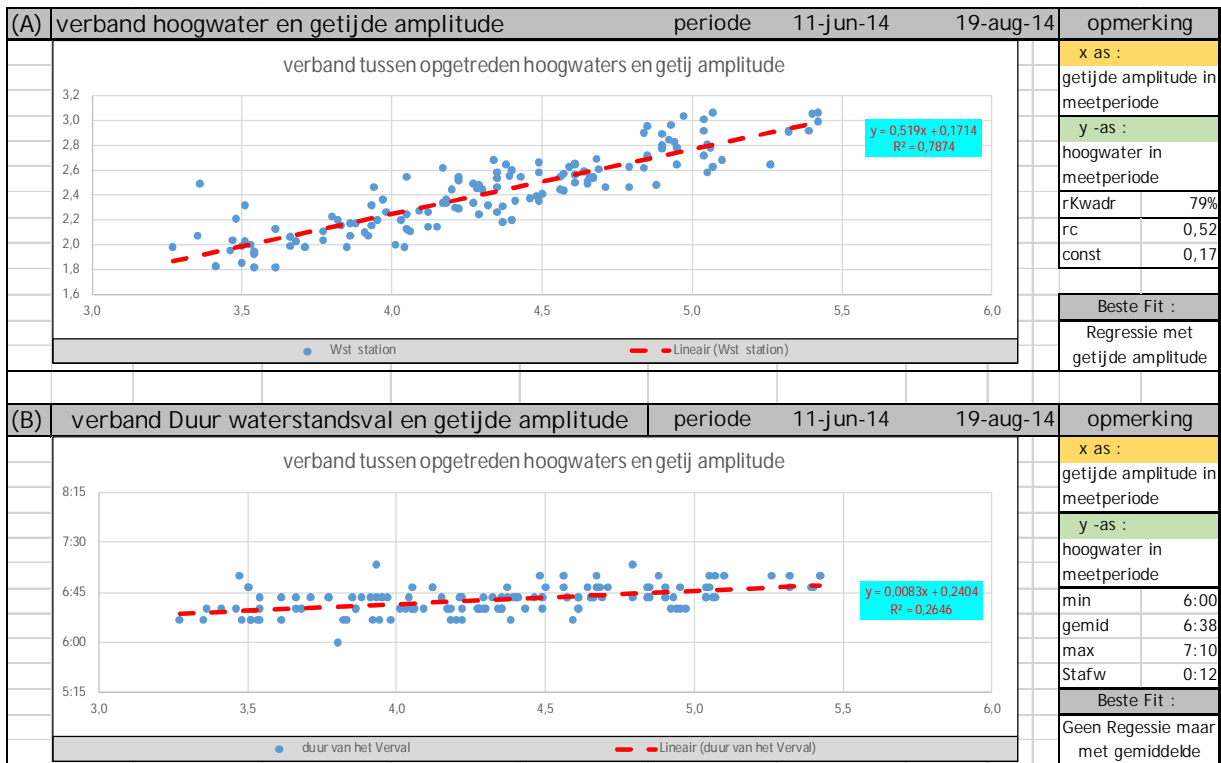
Hierdoor kan bij het toepassen van een waterstandsverval in de peilbuis gebruik gemaakt van de regressie relatie. Dit geldt zeker voor normale omstandigheden (verval tussen GHW en GLW). Bij extreme situaties (verval tussen MHW en GHW) wordt geadviseerd om uit te gaan van een extreem korte duur van het verval (in de Westerschelde 5½ uur na HW) en de hierbij behorende gemiddelde waarde van het verval.

Dit levert voor deze peilbuis het volgende op:

1. PB respons bij MHW (zie figuur B5-1) : 2,81 m +NAP
2. PB verval na 5½ uur (zie figuur B4.2-3) : 0,58 m
3. PB respons na waterstandsval van MHW naar GHW :  $2,81 - 0,58 = 2,23$  m +NAP
4. PB respons na waterstandsval van GHW naar GLW (zie figuur B4.2-4) : -0,09 m +NAP

Bepaling verval in de peilbuis	Buiten water stand	keus perc Max Opzet	Peilbuis							Stat		Dynam		verval	
			Wst Stat	Wst Dynam	PB bij MHW of GHW	Pb na val	Pb 5u na HW	Pb 5½u na HW	Pb bij LW	rc2	const2	Rc3	const3	Rc.val	Const.val
MHW	5,80	100%	1,35	4,45	2,81	2,23	2,36	2,23	1,85	0,72	-0,07	0,45	-0,10		
GHW (max opzet wstStat)	2,29	100%	1,35	0,94	1,22	0,64	0,77	0,64	0,27	0,72	-0,07	0,45	-0,10		
GHW (50% max opzet wstStat)	2,29	50%	0,68	1,62	1,04	0,46	0,59	0,46	0,09	0,72	-0,07	0,45	-0,10		
GHW (0% geen opzet wstStat)	2,29	0%	0,00	2,29	0,86	0,29	0,41	0,29	-0,09	0,72	-0,07	0,45	-0,10		
GLW	-1,90		analyse regressie alleen voor GHW en MHW												
opzetWstStat Max			1,35												
VervaWst_in_PB						-0,58	-0,45	-0,58	-0,95					-0,18	-0,18
VervalBuitenWater (GHW -GLW)									-4,19						

Tabel B4.2-1, berekening respons in peilbuis bij MHW en GHW met situatie na val van het hoogwater



Figuur B4.2-5, verband getijamplitude met hoogwater en duur waterstandsverval

periode: 11 juni - 19 aug 2014

Voor een korte meetperiode blijft er een duidelijk het verband tussen opgetreden hoogwater en de getijamplitude bestaan met iets minder ruis ( $R^2 = 79\%$ ). Ook blijft gelden dat er geen verband is tussen de duur van de waterstandsval en de getijde amplitude. Beide aspecten zijn consistent met eerdere constatering (periode 2011 -2015).

### B4.3 Resulterende respons van alle peilbuizen op de buitenberm.

In Tabel B4.3-1 worden de resulterende respons in de peilbuizen bij de kruin en de buitenberm voor drie verschillende situaties gepresenteerd. Aanpak uit kolom (5) en (7) is vervangen door een aanpak uit bijlage 6 en is opgenomen in kolom (17) en voor de val alleen uitgewerkt bij dp 238 (kolom (18)).

1. PB respons bij MHW (kolom (17));
2. Pb respons na waterstandsval van MHW naar GHW (kolom (15) t/m (18))
3. PB respons na waterstandsval van GHW naar GLW (kolom (9))

Resume Resultaat Buitenberm en kruin					Van MHW naar GHW		Van GHW naar GLW		gemiddelde val in PB		Verval in PB HW-LW			Van MHW naar GHW				
peilbuis	locatie	dp	MHW	PB bij MHW	GHW	PB na val: MHW naar GHW	GLW	PB na val: GHW naar GLW	na 5 uur	na 5½ uur	Rc Val	Const Val	Rkwadr	storm wst HW	Storm wst LW	storm PB max	storm PB bij LW	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	
13B_090L	kruin	222	5,80	3,07	2,29	Deze aanpak is vervallen	-1,90	0,30	-0,51	-0,61	-0,17	-0,12	88%			3,17		
B11_037L	buitenberm	225	5,80	2,88	2,29		-1,90	0,11	-0,67	-0,77	-0,21	-0,08	84%				2,98	
13B_092L	buitenberm	231	5,80	2,16	2,29		-1,90	-0,25	-0,67	-0,76	-0,17	-0,19	86%				2,26	
13B_094L	buitenberm	238	5,80	2,81	2,29		-1,90	-0,09	-0,45	-0,58	-0,18	-0,18	75%	5,59	-1,07	2,92	1,54	
13B_096L	kruin	243	5,80	4,19	2,29		-1,90	-0,36	-0,93	-1,21	-0,32	-0,57	79%				4,29	
B11_039L	buitenberm	244	5,80	4,73	2,29		-1,90	-0,66	-1,32	-1,64	-0,41	-0,70	87%				4,83	
13B_098L	buitenberm	248	5,80	4,14	2,29		-1,90	-0,53	-0,95	-1,23	-0,32	-0,57	79%				4,24	
13B_098H	buitenberm	248	5,80	3,33	2,29		-1,90	-0,18	-0,59	-0,80	-0,21	-0,45	75%				3,43	
B11_041L	buitenberm	249	5,80	4,16	2,29		-1,90	-0,56	-1,10	-1,36	-0,33	-0,61	87%				4,26	
B11_043L	buitenberm	250	5,80	3,95	2,29		-1,90	-0,31	-0,98	-1,20	-0,29	-0,50	87%				4,05	
																		0,10
13B_107L	kruin	263	5,80	2,89	2,29		-1,90	-0,44	-0,66	-0,83	-0,24	-0,21	86%				2,99	
13B_105L	kruin	268	5,80	2,81	2,29		-1,90	-0,49	-0,68	-0,86	-0,21	-0,38	87%				2,91	
13B_103L	kruin	273	5,80	2,51	2,29	-1,90	-0,40	-0,66	-0,82	-0,19	-0,35	91%				2,61		

Tabel B4.3-1 Buitenwaterstanden met bij behorende respons in peilbuizen

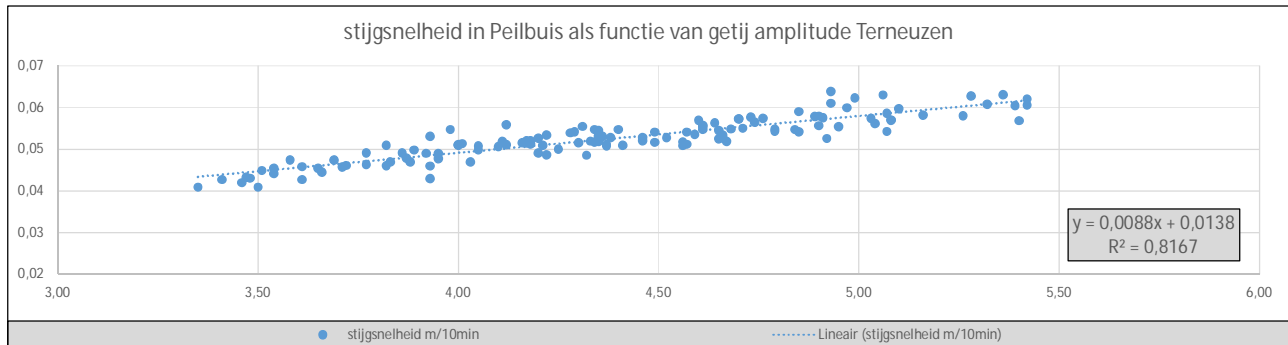
Voor alle peilbuizen is de correlatie voor het verval van GHW naar GLW hoog ( $R^2 \geq 75\%$ ).



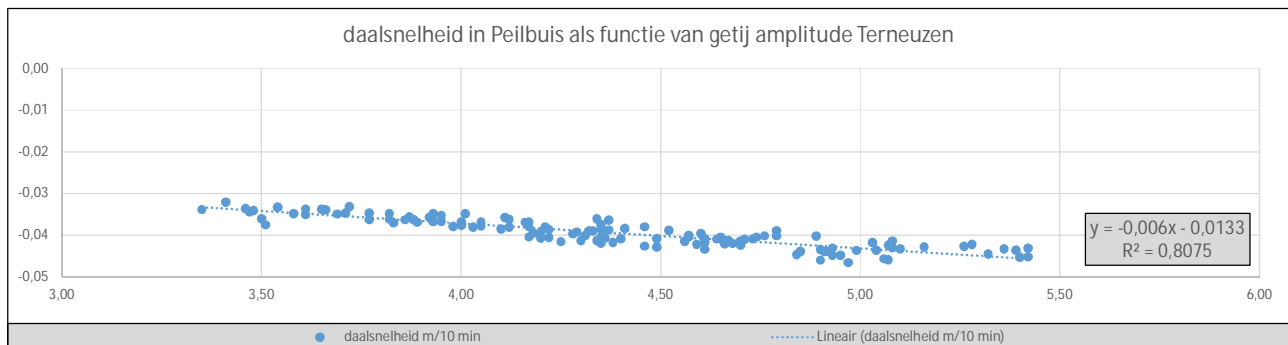
#### B4.4 Gemiddelde stijgsnelheden in peilbuis

Voor verdere verfijning van de methode is na gegaan in hoeverre gebruik kan worden gemaakt van de gemiddelde stijg- en daalsnelheden in de peilbuis om bij verschillende stormen het meet-signaal te kunnen omzetten naar stormomstandigheden.

In figuur B4.4-1 en B4.4-2 wordt het verband weergegeven tussen de stijg- en daalsnelheden in de peilbuis als functie van het verschil tussen het voorgaande hoog- en laagwater.



Figuur B4.4-1, verband gemiddelde stijgsnelheid in peilbuis en getijamplitude: 11 juni - 19 aug 2014



Figuur B4.4-2, verband gemiddelde daalsnelheid in peilbuis en getijamplitude: 11 juni - 19 aug 2014

Uit beide figuren blijkt dat het verband tussen gemiddelde snelheden in de peilbuis en de getij amplitude goed gecorreleerd. Verder blijkt dat de stijgsnelheid zijn ongeveer 50% groter is dan de daalsnelheid.

In bijlage 6 wordt deze relatie gebruikt bij de extrapolatie van de stijghoogte in de peilbuis. Dit leidt tot andere belasting situatie voor de val na MHW en een kleine toeslag op de maximale stijghoogte in de peilbuis bij MHW.

Hieruit blijkt dat de waterstandsval MHW naar GHW alleen mogelijk is bij de keuze voor een maximale opzet bij LW. Deze situatie levert echter niet de maatgevende omstandigheid op voor de stijghoogte in de peilbuis.

#### Advies

- Voor het bepalen van de maatgevende stijghoogte in de peilbuis aan de zeezijde van de dijk (buitenberm/kruin) na MHW ten behoeve van buitenwaartse stabiliteit wordt geadviseerd om uit te gaan van het geschematiseerd stormverloop.
- Voor de peilbuis op de buitenberm bij dp 238 is de situatie met maximale opzet bij laagwater maatgevend gebleken. De val na het 2<sup>e</sup> hoogwater is bepalend met een laagwater van - 1,07 m +NAP en een stijghoogte in de peilbuis van 1,54 m +NAP (zie tabel B6-1).
- Voor de waterstandsval van GHW naar GLW blijft de tabel B4-3 van kracht (zie kolom (8) en (9)).

Bijlage 5, Resultaat peilbuisanalyse bij dp 238

**WsZui dp 238**

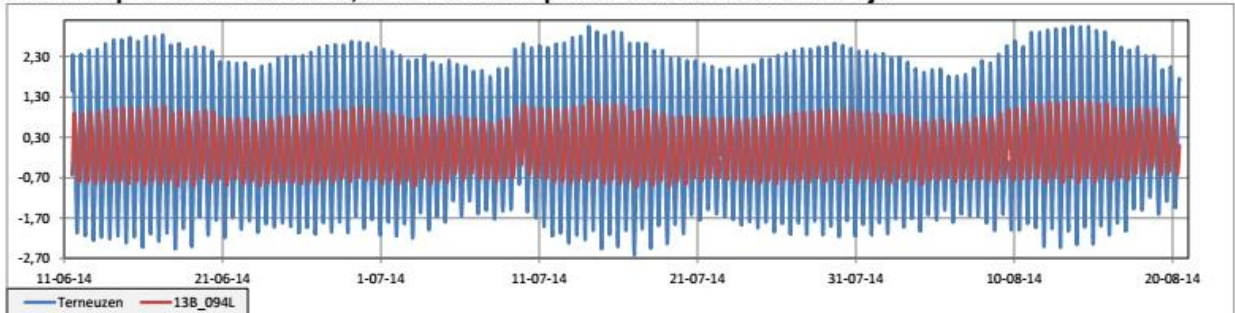
**Refbuis :13B\_094L**

**op taluddeel : buitenberm**

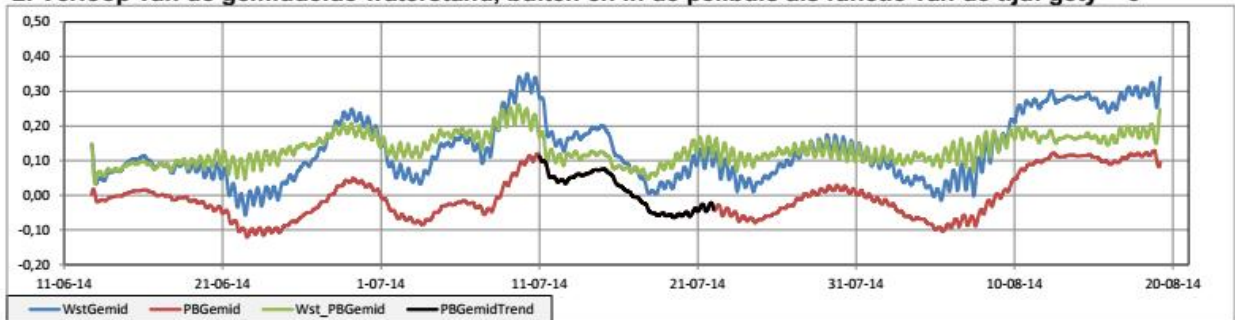
MetaInfo	Regressie	PB	Stat.	Dynam.	S + D	
MHW	5,80	Rkwdr	98,4%	85,3%	98,5%	
opzet Statisch deel	1,35	rcoef	0,45	0,72	0,45	
		const	-0,16	-0,07	-0,10	
offSetDefTotaal	-15	SigmaYx	0,07	0,02	0,06	
offSetDefStatisch	-24	hMeet	3,06	0,35	2,71	3,06
offSetDefDynam	-15	Pb(hmeet)	1,23	0,18	1,13	1,30
periode middeling : 6 Getyden		MHW	5,80	1,35	4,45	5,80
regressieHW : ja		Pb (MHW)	2,48	0,89	1,91	2,81
		verschil	3,32	0,46	2,54	2,99

Extremen gedurende de meetperiode			
extremen	Signaal	Stat.	Dynam.
WstMax	3,06	0,35	2,88
WstMin	-2,62	-0,06	-2,70
PbMax	1,22	0,13	1,16
PbMin	-0,94	-0,12	-0,94
Peilbuisgegevens			
buitenberm			
PBtrend bij HW	AfstUitRef	Bk Pbuis	MV
	16,39	6,26	6,31
	m	m+NAP	m+NAP

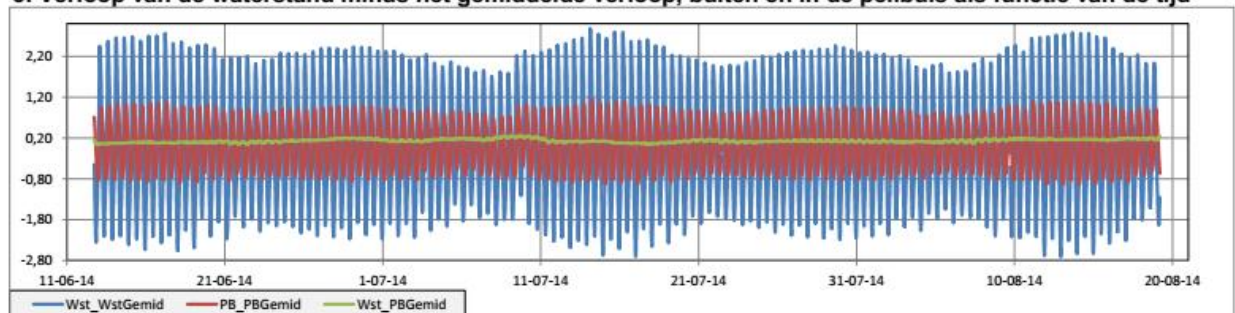
**1. Verloop van de waterstand, buiten en in de peilbuis als functie van de tijd**



**2. Verloop van de gemiddelde waterstand, buiten en in de peilbuis als functie van de tijd: gety = 6**



**3. Verloop van de waterstand minus het gemiddelde verloop, buiten en in de peilbuis als functie van de tijd**



<b>Trendperiode waterstand:</b>	<b>11 jun 2014</b>	<b>tot</b>	<b>20 aug 2014</b>
<b>Trendperiode gemiddelde waterstand:</b>	<b>11 jul 2014</b>	<b>tot</b>	<b>22 jul 2014</b>
<b>Meetbestand :</b>	PBVerzamel Uitlees 2014 0527-2014 0820 24Z WsZ dp220-278.xlsxm	Trend afkapparameters	PbMin -3,00 WstMin -1,00

aspect	figuur	Toelichting
Waterstandverloop	1	verloop voor de waterstand van het gekozen waterstand station en geselecteerde peilbuismeting
	2	verloop voor de gemiddelde buitenwaterstand (wstGemid), waterstand in de peilbuis (PBGemid) en het verschil hiertussen WST_PBGemid = wst - PBgemid)
	3	verloop voor het dynamische deel van de buitenwaterstand (Wst_wstGemid = wst - wstGemid) en het dynamisch deel van de waterstand in de peilbuis (PB_Pbgemid = PB - PBgemid)

Regressie	bruin: analyse van alle punten	blauw: analyse van geselecteerde punten	selectie op basis van
4	regressie tussen buitenwaterstand en peilbuis met optimale verschuiving		wst> WstMin en PB>Pbmin
5	regressie voor het quasi-statisch deel		trendperiode zie figuur 2
6	regressie voor het dynamisch deel		wst> WstMin en PB>Pbmin
7	regressie buitenwaterstand waterstand in peilbuis zonder verschuiving		wst> WstMin en PB>Pbmin

Figuur B5-1, Responsmeting bij dp 238 Buitenberm

WsZui dp 238

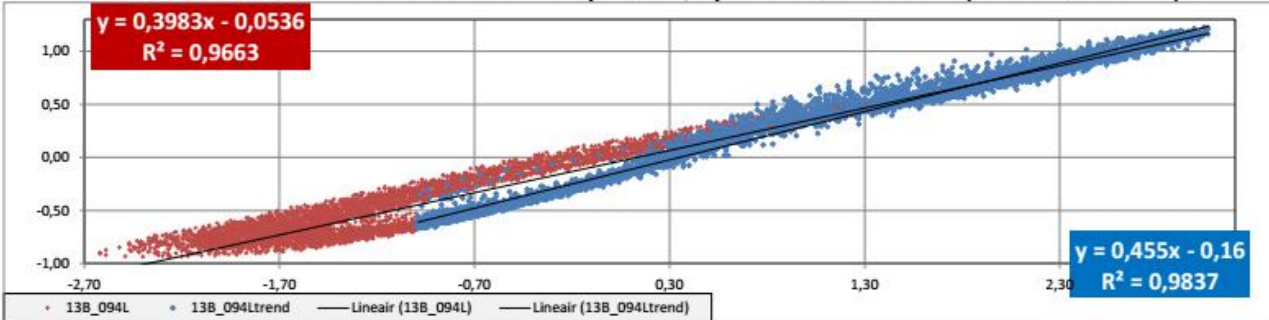
Refbuis :13B\_094L

op taluddeel : buitenberm

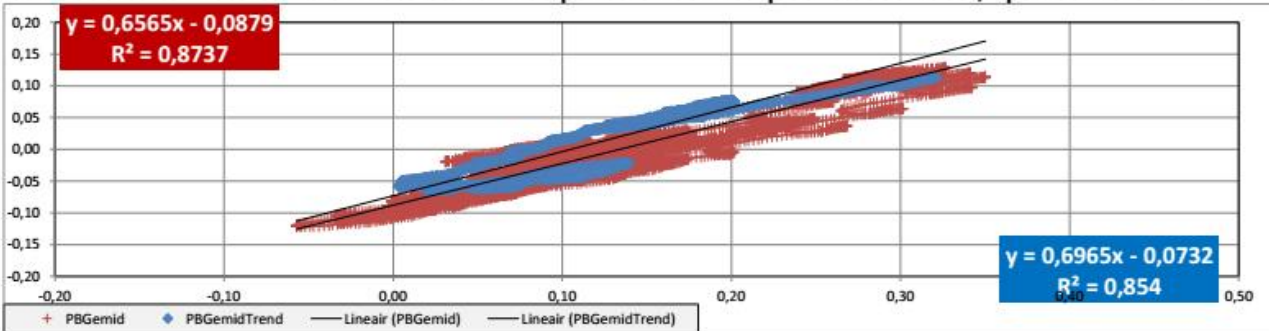
MetaInfo	Regressie	PB	Stat.	Dynam.	S + D
MHW	5,80	Rkwdr	98,4%	85,3%	98,5%
opzet Statisch deel	1,35	rcoef	0,45	0,72	0,45
		const	-0,16	-0,07	-0,10
offSetDefTotaal	-15	SigmaYx	0,07	0,02	0,06
offSetDefStatisch	-24	hMeet	3,06	0,35	2,71
offSetDefDynam	-15	Pb(hmeet)	1,23	0,18	1,13
periode middeling : 6 Getyden		MHW	5,80	1,35	4,45
regressieHW : ja		Pb (MHW)	2,48	0,89	1,91
		verschil	3,32	0,46	2,54
					1,30

Extremen gedurende de meetperiode			
extremen	Signaal	Stat.	Dynam.
WstMax	3,06	0,35	2,88
WstMin	-2,62	-0,06	-2,70
PbMax	1,22	0,13	1,16
PbMin	-0,94	-0,12	-0,94
Peilbuisgegevens		buitenberm	
AfstUitRef	Bk Pbuis	MV	
16,39	6,26	6,31	
m	m+NAP	m+NAP	

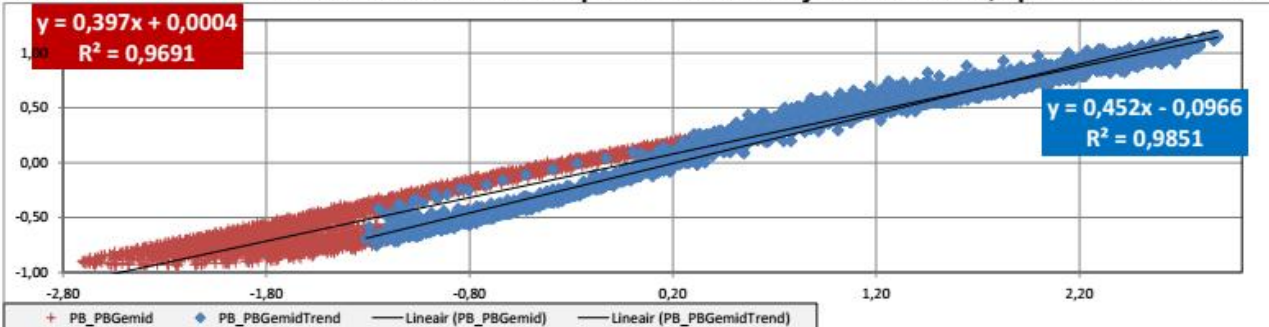
4. Relatie buitenwaterstand en waterstand in de peilbuis; optimaal verschoven (selectie in blauw)



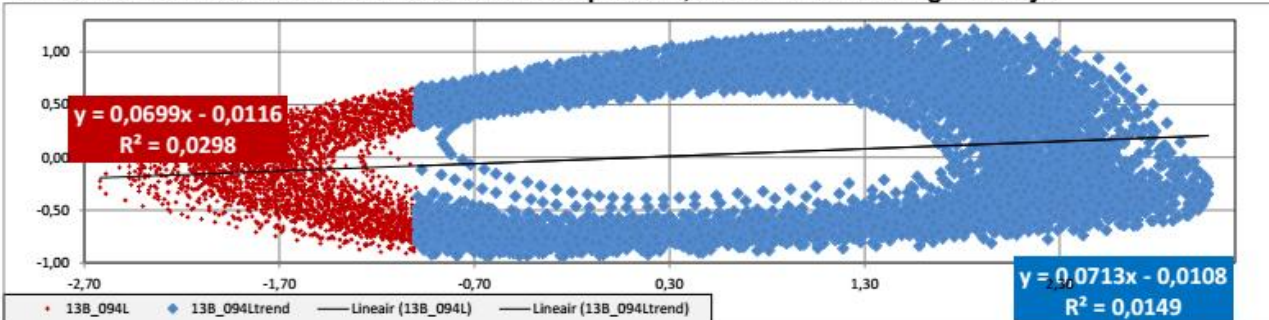
5. Relatie buitenwaterstand en waterstand in de peilbuis voor het quasi-statisch deel; optimaal verschoven



6. Relatie buitenwaterstand en waterstand in de peilbuis voor het dynamische deel; optimaal verschoven

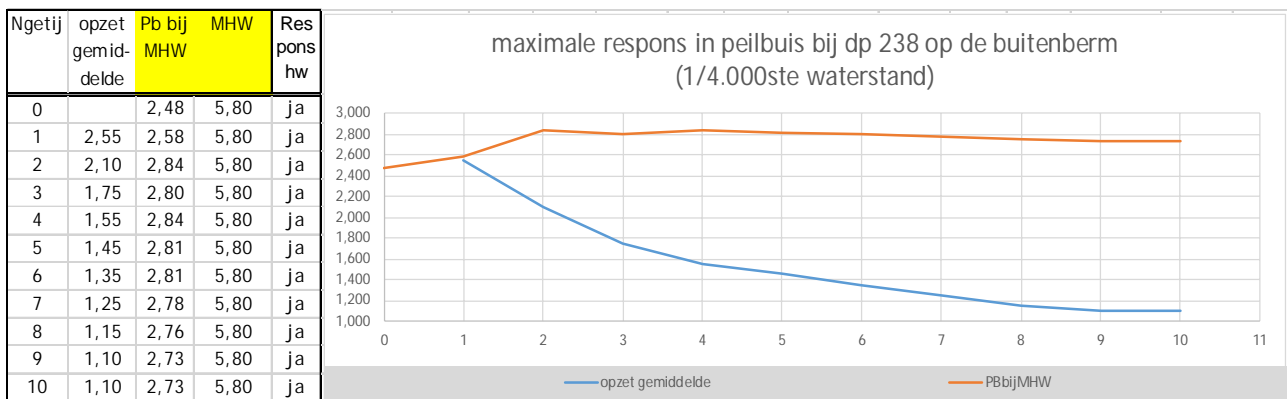


7. Relatie buitenwaterstand en waterstand in de peilbuis, zonder verschuiving in de tijd



Figuur B5-2, Regressieanalyse bij dp 238 Buitenberm





Figuur B5-3, Regressieanalyse bij dp 238 Buitenberm effect middeling op berekende respons

In figuur B5-1 en B5-2 is een voorbeeld opgenomen van de regressie analyse in de peilbuis op de buitenberm bij dp 238.

In figuur B5-3 wordt de maximale respons als functie van de middelingsperiode (N=1 à 10) gepresenteerd. De regressie zonder middeling wordt met N=0 aangegeven. Uit deze figuur blijkt dat voor  $N \geq 2$  de maximale respons nauwelijks veranderd.

### Bijlage 6, waterstandsverloop bij storm

Ter verificatie van de aanpak om de reductie van de waterstand in de peilbuis na val bij MHW worden de volgende vier verschillende keuzes gepresenteerd voor de stormopzet. Hierbij wordt uitgegaan van een stormduur van drie getijden (37,5 uur) en is een voor de bepaling van de respons in de peilbuis een waterstand voor het statische deel de waarde van middeling over 6 getijden aangehouden ( $w_{Stat} = 1,35$  m). Tevens is een driehoekig verloop van de opzet aangehouden. Voor het maatgevend hoogwater (MHW) wordt de 1/4.000ste waterstand aangehouden.

1. Maximale opzet bij Laagwater (LW) voor MHW
2. Maximale opzet 4½ uur voor MHW
3. Maximale opzet bij MHW
4. Maximale opzet 4½ uur na MHW

In de figuren B6-1 t/m B6-4 worden de verschillende situaties gepresenteerd. De gemeten respons in de peilbuis bij normale omstandigheden wordt voor de stormomstandigheden aangepast door op de gekozen tijdstappen (PB Def) gebruik te maken van de trendanalyse om bij het 1<sup>e</sup> hoogwater de respons in de peilbuis af te leiden. Voor de volgende tijdstippen wordt op basis van de relatie tussen de stijg- en daalsnelheden en het voorafgaande getij amplitude (zie B2-4) de respons in de peilbuis afgeleid en te interpoleren voor de tussenliggende tijdstippen. Eventuele extra verhoging van de respons bij het 1<sup>e</sup> HW zodat de respons bij MHW minimaal gelijk is aan de waarde volgend de trend analyse. Als voorbeeld is de respons op de buitenberm bij dp 238 gekozen.

Bij het opstellen van de normeisen is gebruik gemaakt van het waterstandsverloop met een maximale opzet 4½ uur na MHW om de gevolgen van een overstroming te maximaliseren. Dit is ook de aanpak die destijds binnen VNK gehanteerd werd.

In tabel B6-1 worden op de markante tijdstippen de buitenwaterstanden en de resulterende respons in de peilbuis op de buitenberm gegeven. Voor deze peilbuis is afgeleid dat de resulterende respons bij MHW gelijk is aan +2,81 m +NAP (zie figuur B5-2) en de optimale verschuiving 2½ uur bedraagt.

Maximale stormopzet bij Pb BuB dp238		stormzet dp238 Max bij LW Max opzet bij LW					stormzet dp238 Max 4½u voor HW Max opzet 4½u voor MHW					stormzet dp238 Max bij HW Max opzet bij MHW					stormzet dp238 Max 4½u na HW Max opzet 4½u na MHW				
punt	omschrijving	tijd	HW meet	BW Storm	PB storm	snelh PB 0.1*	tijd	HW meet	BW Storm	PB storm	snelh PB 0.1*	tijd	HW meet	BW Storm	PB storm	snelh PB 0.1*	tijd	HW meet	BW Storm	PB storm	snelh PB 0.1*
			m+NAP	m+NAP	m+NAP	m/min		m+NAP	m+NAP	m+NAP	m/min		m+NAP	m+NAP	m+NAP	m/min		m+NAP	m+NAP	m+NAP	m/min
1	HW	0u 00min	2,78	5,80			0u 00min	2,78	5,29			0u 00min	2,78	3,93			0u 00min	2,78	3,27		
2	Max PB	2u 30min			2,81		2u 30min			2,57		2u 30min			2,04		2u 30min				1,87
3	LW	6u 10min	-2,08	2,37	2,06	-0,03	6u 10min	-2,08	1,81	1,82	-0,03	6u 10min	-2,08	0,14	1,25	-0,04	6u 10min	-2,08	-0,20	1,12	-0,03
4	Min PB	9u 00min			1,49	-0,03	9u 00min			1,24	-0,03	9u 00min			0,64	-0,04	9u 00min				0,54
5	HW	12u 10min	2,57	5,59		0,04	12u 00min	2,58	5,80		0,05	12u 10min	2,57	5,80		0,06	12u 10min	2,57	5,80		0,07
6	Max PB	14u 40min			2,92	0,04	14u 30min			2,86	0,05	14u 40min			2,81	0,06	14u 40min			2,81	0,07
7	LW	19u 00min	-2,46	-1,07	1,54	-0,05	19u 00min	-2,46	-0,81	1,44	-0,05	19u 00min	-2,46	-0,42	1,50	-0,05	19u 00min	-2,46	1,22	1,76	-0,04
8	Min PB	21u 30min			0,75	-0,05	21u 30min			0,64	-0,05	21u 30min			0,74	-0,05	21u 30min				1,15
9	HW	24u 30min	2,63	2,71	1,60	0,05	24u 30min	2,63	3,04	1,51	0,05	24u 30min	2,63	3,72	1,65	0,05	24u 30min	2,63	5,07	2,01	0,05
10	Max PB	27u 00min			2,30	0,05	27u 00min			2,22	0,05	27u 00min			2,40	0,05	27u 00min				2,73
11	LW	31u 20min	-1,88	-1,88	1,24	-0,04	31u 30min	-1,79	-1,79	1,08	-0,04	31u 20min	-1,88	-1,88	1,18	-0,05	31u 20min	-1,88	-0,98	1,44	-0,05
12	Min PB	33u 50min			0,63	-0,04	34u 00min			0,45	-0,04	33u 50min			0,48	-0,05	33u 50min				0,70
Keus voor Maximale waterstandsval																					
	Pbmax (2½ u na HW)	14u 40min			2,92	val PB	14u 30min			2,86	val PB	14u 40min			2,81	val PB	27u 00min			2,73	val PB
	PB bij LW	19u 00min		-1,07	1,54	1,38	19u 00min		-0,81	1,44	-1,43	19u 00min		-0,42	1,50	-1,31	31u 20min		-0,98	1,44	-1,29
	Vershil PB en LW	19u 00min				2,61	19u 00min			2,25	19u 00min			1,91	31u 20min						2,42

Tabel B6-1, resume buitenwaterstand en respons in peilbuis bij verschillende opzet maxima

Uit Tabel B6-1 blijkt dat de uitgevoerde regressie in de peilbuis van 2,81 m +NAP niet altijd het maximum te zijn van de respons. Afhankelijk van de keus van het tijdstip van maximale opzet geldt het volgende:

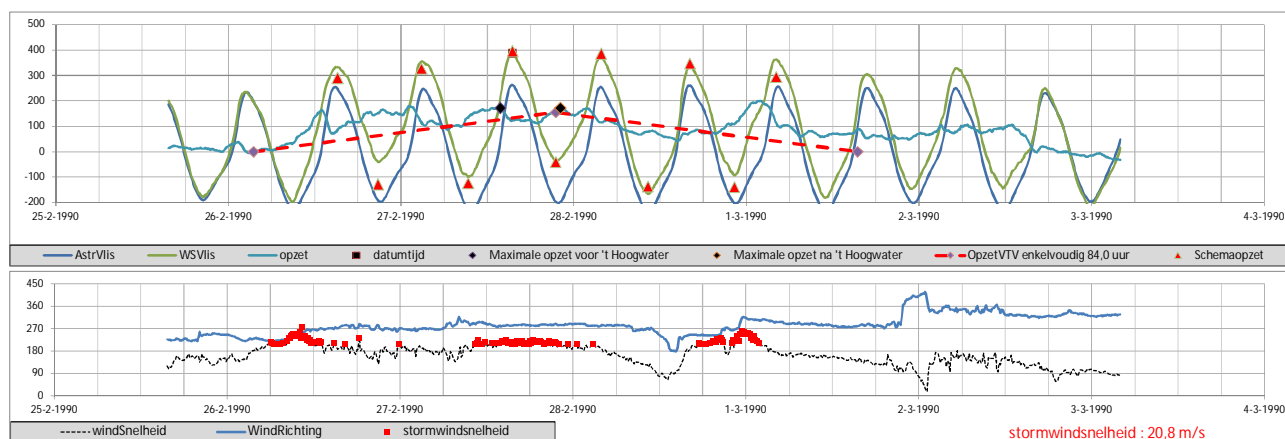
- De maximale respons in de peilbuis is +2,81 à 2,92 m +NAP (in blauw aangegeven). Een maximale verhoging 0,11 meter t.o.v. de aanpak met alleen regressie. De maximale opzet bij laagwater is maatgevend.
- Het laagwater direct na MHW varieert tussen -0,81 en +2,37 m +NAP
- De maximale waterstandsval treedt niet altijd op direct na MHW. Wel bij de keus voor een maximale opzet bij MHW en 4½ uur na MHW.
- Bij laagwater is de respons in de peilbuis 1,91 à 2,61 met hoger dan de buitenwaterstand bij Terneuzen. De maximale opzet bij laagwater is maatgevend.

Ter verificatie van de aanpak zijn met het grondwaterstromingsmodel de verschillende stormsituaties beschouwd. In figuur B6-5 wordt een voorbeeld gegeven van de vergelijking van twee plaxflow berekeningen en het resultaat van de gevolgde opgeschaalde regressie aanpak met een maximale opzet bij 4½ uur na MHW.

In het grondwatermodel blijft de respons direct na MHW maatgevend terwijl bij de regressie een toename van 0,11 meter berekend is na het tweede hoogwater (zie figuur B6-5 en tabel B6-1).

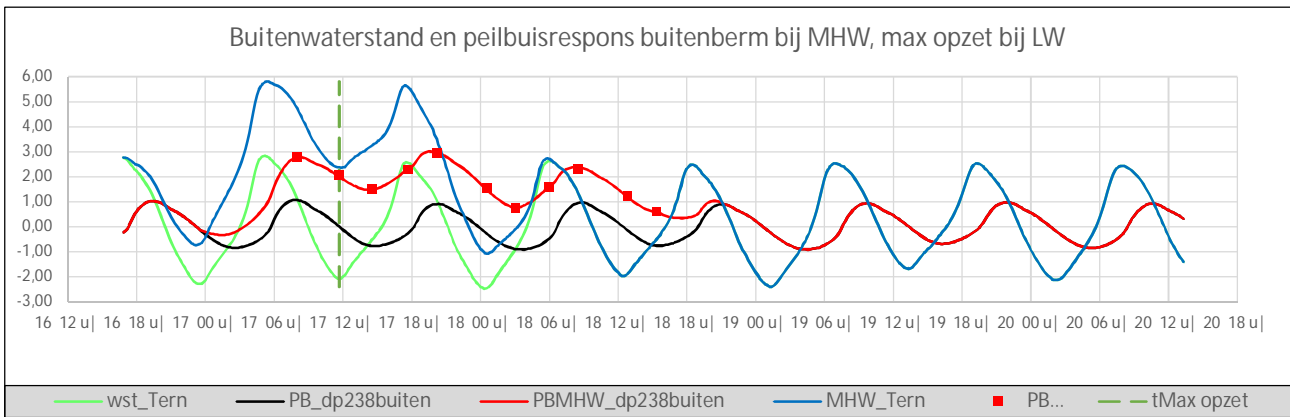
Hierbij moet opgemerkt wordt dat met name gekeken moet worden naar de vorm van de extrapoleerde respons en minder naar de exactheid van de overeenstemming omdat de extreme verhoging van de gemiddelde waterstand (1,35 m +NAP voor middeling over 6 getijden) niet verwerkt is in het verloop van de buitenwaterstand. Voor het verloop van de buitenwaterstand is aansluiting gezocht bij de vigerende aanpak van het WBI2017 (stormduur van 35 uur met alleen opzet gedurende de storm). Wel is de stormduur verlengd naar 37,5 uur om een veelvoud van getijde perioden aan te houden.

Uit eerdere studies waar gekeken is naar de duur van de stormopzet is gebleken dat uit metingen een veel langere duur mogelijk is. Gemiddeld 72 uur en tijdens de 6 toppige storm in 1990 was de totale duur meer dan 100 uur. Deze storm bestond eigenlijk uit twee stormen die direct na elkaar plaatsvonden. Volgens WBI aanpak zou dit een storm duur van 84 uur opleveren (zie figuur B6-0).

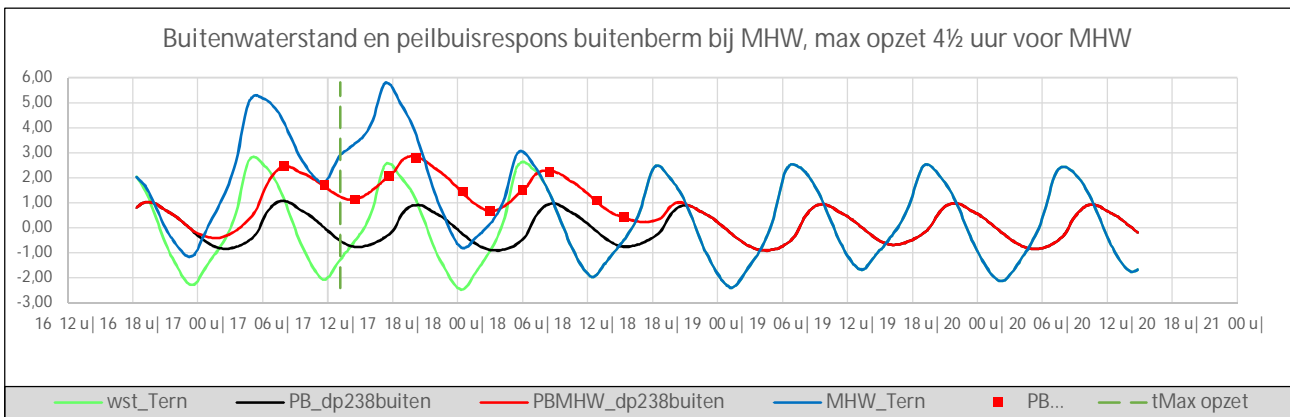


Figuur B6-0 waterstandsverloop bij Vlissingen gedurende de 6 toppige storm in 1990

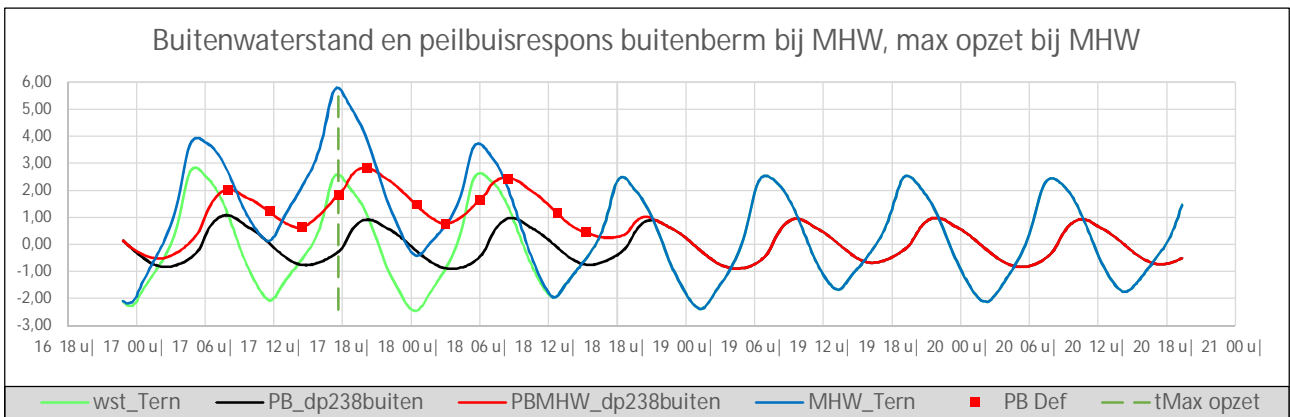
In het bovenste deel van figuur B6-0 is het verloop van de waterstand bij Vlissingen weergegeven. In deze figuur is de geschematiseerde opzet opgenomen (rode gestippelde lijn). Bij hoog en laag water is met een rood driehoekje de resulterende waterstand op basis van deze opzet en het gemiddeld getij zou zijn. In het onderste deel is de windsnelheid en richting gevisualiseerd. De situatie met een minimale windsnelheid van 20,8 m/s is rood gemarkeerd.



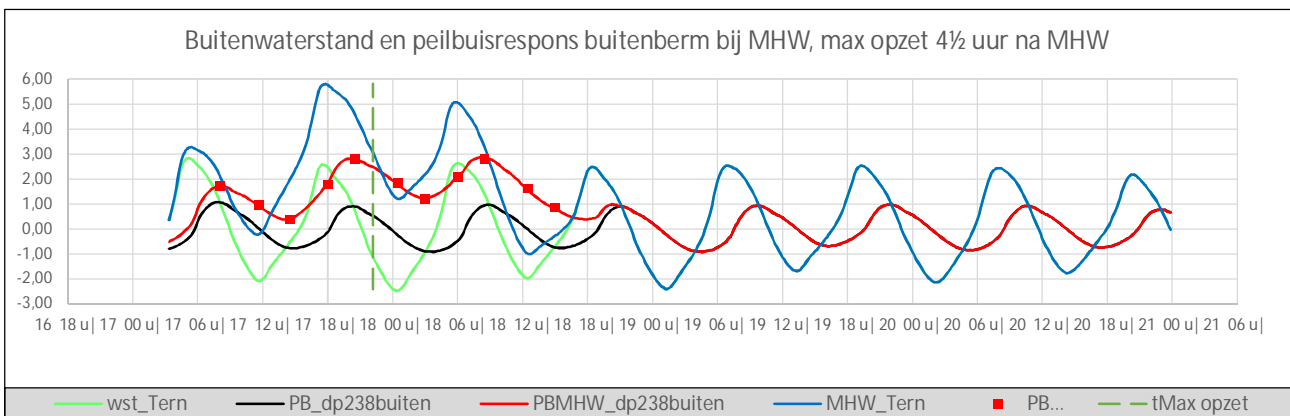
Figuur B6-1 Verloop waterstanden met maximale opzet bij het Laagwater (LW) voor MHW



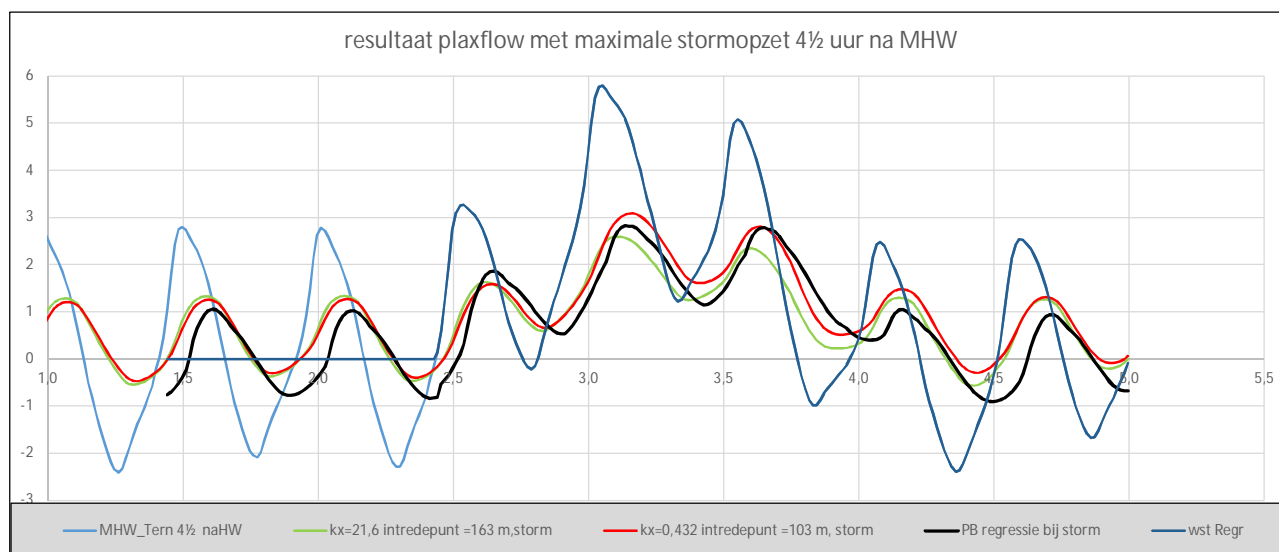
Figuur B6-2 Verloop waterstanden met maximale opzet bij 4½ uur voor MHW



Figuur B6-3 Verloop waterstanden met maximale opzet bij MHW



Figuur B6-4 Verloop waterstanden met maximale opzet bij 4½ uur na MHW



Figuur B6-5 Vergelijking regressie met resultaat plaxflow bij storm omstandigheden

In figuur B6-5 worden de volgende 2 resultaten van de grondwaterstromingsmodel gepresenteerd.

1. Doorlatendheid :  $K_x = 21,6$  m/dag en een deklaag op voorland tot 163 m uit de kruin (groen)
2. Doorlatendheid :  $K_x = 0,43$  m/dag en een deklaag op voorland tot 103 m uit de kruin (rood)

Uit figuur B6-5 blijkt het volgende:

- De vorm van de geëxtrapoleerde peilbuis meting heeft hetzelfde verloop als plaxflow.
- In plaxflow is alleen op de amplitude gekalibreerd. Kalibratie van de absolute hoogte is met andere waterstand instellingen aan de rand te verkrijgen.
- Bij extrapolatie van de regressie is bij aanvang storm sprake van overschatting, omdat de regressie waarde met 0,21 meter verhoogd is, om te zorgen dat na MHW de beoogde regressie waarde gehaald wordt.

Op basis van de uitgevoerde analyse bij variërende ligging van de maximale opzet en de vergelijking met plaxflow zijn de volgende conclusies te trekken.

### Conclusies

- Door de peilbuismetingen om te zetten naar een respons in de tijd bij storm omstandigheden wordt inzichtelijk of de berekende maximale respons volgens de regressie analyse (zie §3.1.3) voldoende conservatief is.
- Uit deze analyse blijkt dat voor deze peilbuis de berekende maximale respons in de peilbuis maximaal met 0,1 m verhoogd moet worden.
- Voor buitenwaartse stabiliteit wordt geadviseerd uit te gaan van het grootste verschil tussen buitenwaterstand en respons in de peilbuis bij laag water. Voor deze peilbuis is dan de situatie met maximale opzet bij LW maatgevend. Dit betekent een waterstand in de peilbuis van 1,54 m + NAP en een LW = -1,07 m + NAP).

### Advies

- Verificatie van de extra opzet ten gevolge van het in rekening brengen van het stormverloop toepassen op meerdere peilbuizen aan de zeezijde van de dijk. Op basis van de huidige inzichten extra opzet van 0,1 meter toepassen op het basisscenario voor piping en binnenwaartse stabiliteit. Bij het afschatten van schematiseringsfactoren nog een extra waterstandverhoging hiervoor meenemen (0,2 meter met 10% kans).
- Voor buitenwaartse stabiliteit kan reductie in de peilbuis verdisconteerd worden. Voor de val van MHW naar GHW wordt geadviseerd om de maximale stormopzet bij laagwater te gebruiken. Voor Terneuzen betekent dit bij  $\frac{1}{4}$ .000ste waterstand een LW van -1,07 +NAP i.p.v. GHW met een waterstand van 2,29 m +NAP. Uitwerking voor andere locaties in het vervolg.



## Bijlage 7, Toelichting schematiseringsfactor bij piping

In tabel B7.1 wordt een overzicht gegeven van de uitwerking van de variatie van de verschillende parameters op de benodigde schematiseringsfactor bij teen, sloot en achterland. Hiervoor is als voorbeeld het belasting geval 3b beschouwd van een in 2016 uitgevoerd versterkingsproject op het schouwen langs de Oosterschelde bij dp 229 (HWBP project 24L).

Benodigde schematiseringsfactor voor piping bij dp 229,00, case 3b							Teen			sloot			achterland			
							$\gamma_{basis}$	$f_{s,max}$				$\gamma_{basis}$	$f_{s,max}$			
$\Delta F_{pip} = (\gamma_b - \gamma_{basis}) * \max(1; 1,3/\gamma_{basis})$							2,28	2,00				0,79	1,16			
							extra kwelberm			extra kwelberm						
Scenario	para	Omschrijving	basis som	Een heid	variatie	kans	$\Delta F_{pip}$	$\gamma_b$	$f_{schem}$	$\Delta F_{pip}$	$\gamma_b$	$f_{schem}$	$\Delta F_{pip}$	$\gamma_b$	$f_{schem}$	
1	1	var_dieptesloot	1,50	m	0,50	10,0%	-0,01	2,27	1,08	0,00	0,79	1,08	-0,11	0,98	1,18	
2	2	var_kd	50,00	$\mu\text{m/s}$	100%	4,0%	-0,27	1,80	1,26	-0,18	0,61	1,16	-0,22	0,87	1,26	
3	3	var_D70	115,00	$\mu\text{m}$	25%	12,0%	-0,11	2,08	1,18	-0,09	0,70	1,08	-0,09	1,00	1,08	
4	4	var_Dzand	40,00	m	20%	10,0%	-0,03	2,23	1,08	-0,04	0,75	1,08	-0,02	1,07	1,08	
5	5	Var_deklaag	1,91	m	0,15	10,0%	-0,13	2,05	1,18	-0,02	0,77	1,08	-0,04	1,05	1,08	
6	5	Var_deklaag	1,91	m	0,30	1,0%	-0,23	1,88	1,23	-0,01	0,78	1,04	-0,08	1,01	1,04	
7	6	var_Peilbuis	1,81	m+NAP	0,25	15,0%	-0,27	1,81	1,28	-0,06	0,73	1,08	-0,09	1,00	1,08	
8	6	var_Peilbuis	1,81	m+NAP	0,50	0,1%	-0,44	1,50	2,00	-0,11	0,68	1,08	-0,17	0,92	1,08	
Wst lineair bij pbmeting buitenzijde			2,51	m+NAP												
Locatie pbmeting buitenzijde			9,52	m												
Respons pbmeting buitenzijde			1,82	m+NAP												
aanpassen wst PB in basissom			0,00	m												
										1,54						

Tabel B7-1, resulterende schematiseringsfactoren van de acht beschouwde scenario's

### Met

- $\gamma_{basis}$  De maximaal toelaatbare schematiseringsfactor waarbij de basissom de score goed krijgt.
- $\gamma_b$  De minimale schematiseringsfactor van het betreffende scenario met de score goed.
- $f_{schem}$  De benodigde schematisering factor volgend uit tabel van oi2014 v3 die afhangt van de kans van voorkomen en de mate waarin de schematiseringsfactor afneemt.
- $f_{s,max}$  het maximum van de benodigde schematiseringsfactoren ( $f_{schem}$ ) van de 8 scenario's
- $\Delta F_{pip}$  Het verschil tussen de schematiseringsfactor van de basissom en een scenario. Bij  $\gamma_{basis} > 1,3$  wordt deze gecorrigeerd om minder conservatieve factoren te krijgen. Relevant voor het bepalen van het zichtjaar waarop maatregelen nodig zijn.

Het effect van de variatie van de diepte van de sloot wordt meegenomen in scenario 1, de variatie in de doorlatendheid bij scenario 2, de variatie van de korreldiameter bij scenario 3 en de variatie van de watervoerende laag bij scenario 4. Voor de variatie in de dikte van de deklaag worden 2 scenario beschouwd (scenario 5 en 6). Ten slotte wordt de variatie van de maximale waterstand in de peilbuis aan de buitenzijde in scenario 7 en 8 beschouwd.

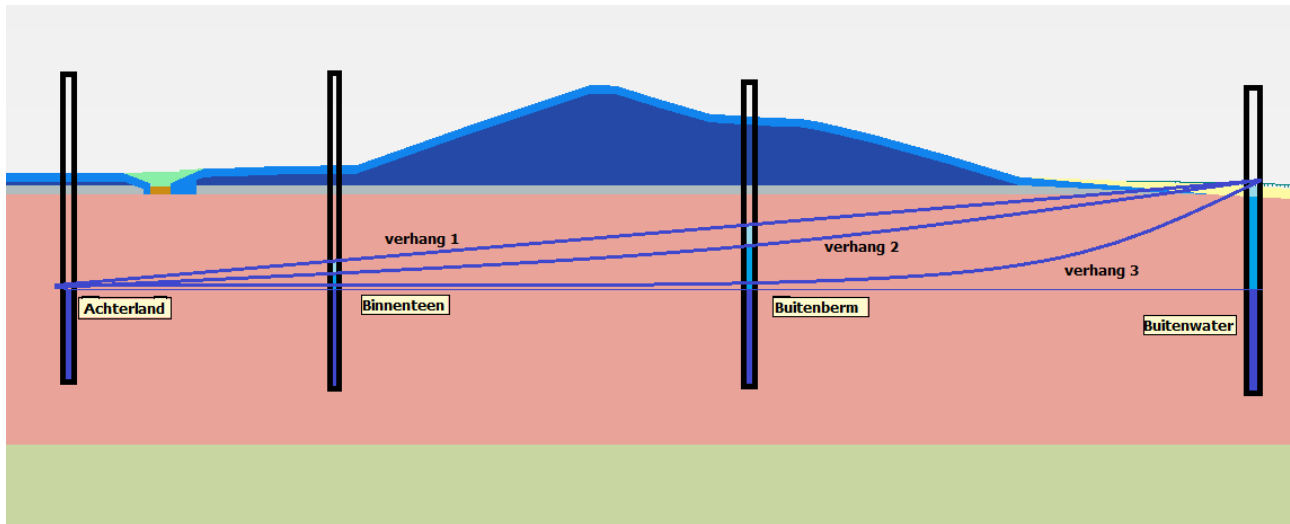
Verder is in de tabel de waterstand gegeven op basis van een lineair verval tussen de buitenwaterstand en het grenspotentiaal aan de binnenzijde ter plaatse van de peilbuis aan de buitenzijde van waterkering (wst lineair bij pbmeting buitenzijde). Het verschil met de geëxtrapoleerde respons van de peilbuismeting aan de buitenzijde geeft aan in hoeverre tijdsafhankelijkheid een reductie van de waterstand oplevert. In dit geval een reductie van 0,69 meter.

In de definitieve rapportage zal de kwantitatieve uitwerking vervangen worden door een beschouwing bij dp 238 op dit traject

## Bijlage 8, Kalibratie grondwaterstromingsmodel nader beschouwd

Het bepalen van de doorlatendheid aan de hand van peilbuismeting is enorm lastig. Het kalibreren van de peilbuismeting aan de hand grondwaterstromingsmodel is niet alleen afhankelijk van de doorlatendheid. Uit de resultaten blijkt dat lengte van deklaag, doorlatendheid van sloot, dikte van de aquifer allemaal invloed hebben op de kalibratie.

Aan de hand van de peilbuismetingen, kan het vervang van de waterstandsverloop tussen deze meetlocaties bepaald worden en tussen de buitenwaterstand en buitenberm.



Figuur B8-1, verhang tussen A en C en het verschil in amplitude tussen C en buitenwater

Voor het verhang tussen buitenberm en achterland geldt :

verhang 1: Bij een groot verhang heeft de grond een relatief lage doorlatendheid.

verhang 3: Bij een klein verhang heeft de grond relatief hoge doorlatendheid.

Verskil in amplitude tussen buitenwater en buitenberm geldt:

verhang 1: bij een groot verschil is de intredeweerstand groot, dan wel ligt het intredepunt relatief ver weg

verhang 3: bij een klein verschil ligt het intredepunt relatief dichtbij (intredeweerstand is relatief klein).

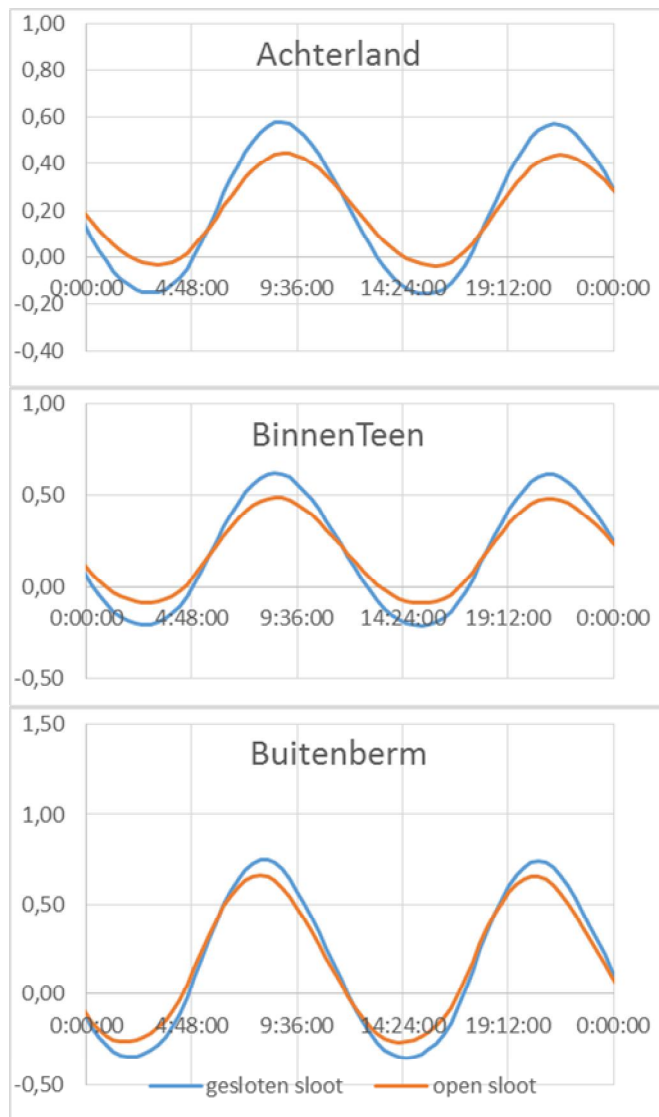
In het model wordt de intredeweerstand geschematiseerd door de ligging van het intredepunt.

Voor de onderzochte locatie is het verhang tussen buitenberm en achterland relatief klein (1 op 300) en verhouding tussen de amplitude van het buitenwater en de buitenberm is groot (5,12/1,91=2,7). Voor de schematisatie bij dijkpaal 238, is het model geschematiseerd met een grote doorlatendheid in de aquifer,  $K_x=13.6$  m/d en grote lengte van de deklaag tussen de 100 en 200 meter.

Daarnaast bleek de vorm van waterstandsverloop te worden beïnvloed door de aanwezigheid een gat in de deklaag. Met een gat van beperkte afmetingen en de onderkant boven NAP wordt de vorm vergelijkbaar met de meting.

## Bijlage 9, Effect doorlatendheid Sloot

In het model is de sloot geschematiseerd met een slootbodem met een doorlatendheid. Er zijn twee berekeningen gemaakt om de impact van de doorlatendheid van de slootbodem (case nr.9) te bepalen. In figuur B9-1 wordt effect op de respons ter plaatse van de drie meetlocaties weergegeven



Figuur B9-1 Verschil in waterstand op peilbuis locaties met open en gesloten sloot.

Uit figuur B9-1 blijkt dat een open sloot leidt tot demping van het getijdeamplitudes. Het effect is het grootst bij het achterland, maar ook duidelijk aanwezig bij de buitenberm.