

POVM

Onderdelen 2.3 & 2.7 –
niet stationaire grondwaterstroming en EEM
schematisering van 3D grondwaterspanningen

Definitief



POV

MACRO
STABILITEIT

Auteur: J.M. van Esch
Datum: september 2017

Versie: 2

Project	Pagina's
1230161-011	1
1230162-011	




Samenvatting

De stabiliteit van een waterkerende grondconstructie wordt in sterke mate beïnvloed door de grondwaterstroming en de daarmee samenhangende waterspanningen in het grondlichaam en de ondergrond aangezien de schuifweerstand gerelateerd is aan het verschil tussen grondspanning en waterspanning. Bij de beschrijving van de grondwaterstroming wordt onderscheid gemaakt tussen stationaire en niet-stationaire condities en kunnen situaties, naast de gebruikelijke tweedimensionale benadering, driedimensionale invloeden ondervinden. Onder stationaire stromingscondities reageert de waterspanning gedempt en instantaan op veranderingen van de buitenwaterstand. Niet-stationaire condities worden gekenmerkt door een vertraagde reactie van de waterspanningen op waterstandsvariëaties waarbij extra demping optreedt als gevolg van elastische en freatische berging. In dit onderzoek is het in rekening brengen van niet-stationaire driedimensionale grondwaterstroming bij het beoordelen van de stabiliteit voor zes cases gekwantificeerd. Drie onderzoekslocaties liggen in het bovenrivierengebied (Waldijk Opijnen, Herwijnen en Vuren), één locatie wordt aangemerkt als een zeedijk (Zeedijk Ameland), één als meerdijk (Markermeerdijk Uitdam) en één locatie ligt in het benedenrivierengebied (Aaldijk Nieuw Beijerland).

Voor de locaties in het bovenrivierengebied en voor de onderzochte meerdijk levert tijdsafhankelijk rekenen geen voordelen en volstaat een stationaire berekening van de waterspanningen. Voor de onderzochte dijk in het benedenrivierengebied geeft een tijdsafhankelijke berekening een 5% hogere veiligheidsfactor dan een stationaire beschouwing en voor de zeedijk is dit verschil zelfs 13%.

Tijdsafhankelijk rekenen zal voor deze gevallen dus leiden tot minder afkeuringen en goedkopere ontwerpen.

De grondwaterstroming onder de Markermeerdijk heeft een regionaal karakter door de aanwezigheid van diepe polders in de omgeving. Waterspanningen bij maatgevende condities kunnen berekend worden met analytische modellen uit ontwerprichtlijnen waarbij metingen worden geëxtrapoleerd. De grondwaterstroming in het onderzoeksgebied bij Herwijnen heeft plaatselijk een driedimensionaal karakter door een verlaging van het voorland aan de westzijde van de meetlocatie en de stroming bij Vuren en Nieuw Beijerland is overwegend tweedimensionaal. Voor deze gevallen heeft een tweedimensionale EEM beschrijving de voorkeur. Het stromingsbeeld bij Opijnen en op Ameland heeft echter een sterk driedimensionaal karakter. In het onderzoeksgebied Opijnen ligt een zandwinput waarvan het oppervlaktewater via een breed voorland in contact staat met de Waal en op Ameland valt het voorland droog bij eb en is een sterk gekromde getijdegeul aanwezig. Voor beide gevallen levert een extrapolatie van de gemeten grondwaterspanningen naar een hoogwatersituatie op basis van driedimensionale EEM modellen een nauwkeurigere voorspelling van de stabiliteit van de kering dan een tweedimensionale berekening.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	april 2017	dr.ir. J.M.van Esch		ir. T.P. Stoutjesdijk		ir. L. Voogt	
	sept. 2017	dr.ir. J.M.van Esch		ir. T.P. Stoutjesdijk		ir. L. Voogt	

Status

definitief



Project
1230161-011
1230162-011

Pagina's
1

6 september 2017, definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Adviespraktijk	2
1.3 Rekenmodellen	5
1.4 Meetmethoden	6
2 Probleemstelling	7
2.1 Uitgangspunten	7
2.2 Onderzoeksvragen	9
3 Waaldijk Opijen	11
3.1 Waterspanningsmetingen	11
3.2 Regionaal geohydrologisch model	16
3.3 Lokaal geohydrologisch model	22
3.4 Geotechnisch model	29
4 Waaldijk Herwijken	35
4.1 Waterspanningsmetingen	35
4.2 Regionaal geohydrologisch model	40
4.3 Lokaal geohydrologisch model	46
4.4 Geotechnisch model	53
5 Waaldijk Vuren	59
5.1 Waterspanningsmetingen	59
5.2 Regionaal geohydrologisch model	64
5.3 Lokaal geohydrologisch model	70
5.4 Geotechnisch model	77
6 Zeedijk Ameland	83
6.1 Waterspanningsmetingen	83
6.2 Lokaal geohydrologisch model	86
6.3 Geotechnisch model	91
7 Aaldijk Nieuw Bijerland	97
7.1 Waterspanningsmetingen	97
7.2 Lokaal geohydrologisch model	99
7.3 Geotechnisch model	103
8 Markermeerdijk Uitdam	109
8.1 Waterspanningsmetingen	109
8.2 Lokaal geohydrologisch model	113
8.3 Geotechnisch model	117
9 Conclusie	123
9.1 Waterspanningsmetingen	124
9.2 Regionaal geohydrologisch model	124



6 september 2017, definitief

9.3	Lokaal geohydrologisch model	126
9.4	Geotechnisch model	128
10	Aanbevelingen	131
	Literatuur	133
	Bijlage(n)	
A	Gevoeligheidsonderzoek	A-1
A.1	Waaldijk Opijnen	A-1
A.2	Waaldijk Herwijnen	A-6
A.3	Waaldijk Vuren	A-11
A.4	Zeedijk Ameland	A-16
A.5	Aaldijk Nieuw Bijerland	A-19
A.6	Markermeerdijk Uitdam	A-23
B	Waterspanningsmetingen	B-1
B.1	Waaldijk Opijnen	B-1
B.2	Waaldijk Herwijnen	B-3
B.3	Waaldijk Vuren	B-5
B.4	Zeedijk Ameland	B-6
B.5	Aaldijk Nieuw Bijerland	B-8
B.6	Markermeerdijk Uitdam	B-10



6 september 2017, definitief

1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de aanleiding voor het onderzoek naar de noodzaak van het in rekening brengen van niet-stationaire driedimensionale grondwaterstroming bij het beoordelen van de macrostabiliteit van dijken geschetst. Methoden voor het bepalen van waterspanningen in de huidige adviespraktijk worden uiteengezet en daarnaast worden geavanceerde rekenmethodieken voor het voorspellen van grondwaterspanningen en meetmethoden voor het kalibreren van deze modellen besproken.

1.1 Aanleiding

Het nationale Deltaprogramma heeft als doelstelling Nederland nu en in de toekomst te beschermen tegen overstromingen en te zorgen voor voldoende zoetwater. Het Hoogwater Beschermingsprogramma (HWBP) is onderdeel van het Deltaprogramma en richt zich op primaire keringen die in de derde (verlengde) toetsronde zijn afgekeurd. Dit programma wordt uitgevoerd door de waterschappen en het ministerie van Infrastructuur en Milieu.

Het aantal dijkvakken dat in het kader van het HWBP moet worden versterkt vanwege onvoldoende sterkte is omvangrijk en de strategische doelstelling van het HWBP is deze dijkvakken sneller, beter en goedkoper te versterken. Om deze doelstelling te bereiken heeft het HWBP kansrijke productinnovaties en kennisontwikkelingen geïdentificeerd die door een versnelde doorontwikkeling en implementatie een significante bijdrage kunnen leveren aan de optimalisatie van de versterkingsopgave. De geïdentificeerde innovaties en ontwikkelingen worden binnen een aantal Project Overstijgende Verkenningen (POV) geschikt gemaakt voor toepassing in HWBP projecten.

Binnen de totale opgave van het HWBP is het faalmechanisme macrostabiliteit bij 287 kilometer waterkering het maatgevende mechanisme dat leidt tot afkeuren (Van den Berg ea. 2015). Hiervan is 69,5 kilometer als urgent aangemerkt en opgenomen in de HWBP programmering 2015-2020. Door de omvang van dit probleem heeft het HWBP het initiatief genomen voor het initiëren van een project overstijgende verkenning 'POV Macrostabiliteit' (POVM). Vervolgens is door het Waterschap Rivierenland samen met andere betrokken waterschappen een startdocument opgesteld waarin de scope van de project-overstijgende verkenning macrostabiliteit wordt beschreven.

In het document 'plan van aanpak POVM' worden vier thematische clusters beschreven; 'innovaties in versterkingstechnieken', 'rekenmethodieken', 'monitoring van de sterkte' en 'procesverbetering'. Binnen de clusters worden de innovaties en ontwikkelingen uitgewerkt en toegepast in zes referentieprojecten: de dijkvakken Gorinchem-Waardenburg (23 km), Tiel-Waardenburg (20 km), Gouderak (3,5 km) Oudekerk-Krimpen (5km), Gouda (3.8 km) en Markermeerdijk (33 km). Vervolgens wordt de generieke meerwaarde voor de optimalisatie van de versterkingsopgave vastgesteld. Binnen het

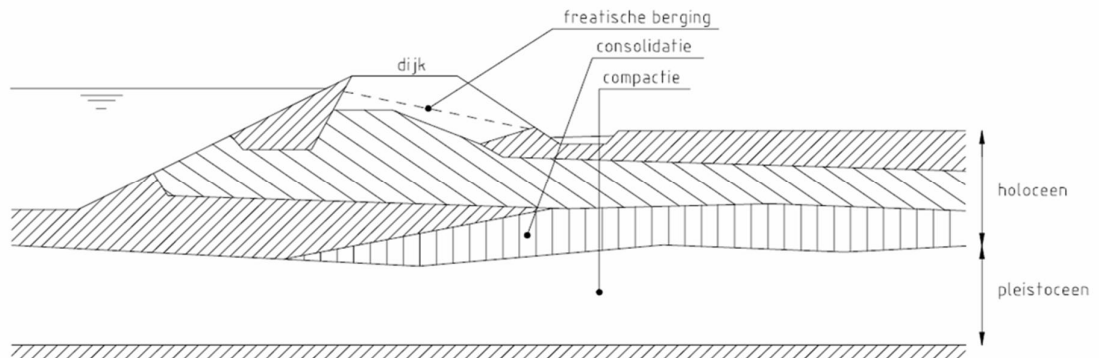
6 september 2017, definitief

thematische cluster ‘rekenmethodieken’ worden methoden ontwikkeld waarmee productinnovaties eenduidig kunnen worden ontworpen en getoetst en worden procedures opgesteld voor het gebruik van nieuwe numerieke modellen. Niet stationaire (tijdsafhankelijke) grondwaterstroming en driedimensionale grondwaterspanningsschematisatie zijn twee onderwerpen binnen het cluster rekenmethodieken.

Het in rekening brengen van het driedimensionale niet-stationaire karakter van grondwaterstroming geeft in potentie een substantiële reductie van de versterkingsopgave. In dit rapport worden drie cases binnen de referentieprojecten TIWA en GOWA onderzocht. De waterkering op deze locaties wordt aangemerkt als een dijk in het bovenrivieren gebied. Vervolgens wordt een zeedijk op Ameland onderzocht, een dijk in het benedenrivierengebied langs het Spui geanalyseerd en een Meerdijk aan het Markermeer bestudeerd.

1.2 Adviespraktijk

De stabiliteit van een waterkerende grondconstructie wordt in sterke mate beïnvloed door grondwaterstroming in het grondlichaam en de ondergrond. In Nederland wordt de ondergrond veelal gekenmerkt door een relatief goed doorlatend onsamendrukbaar Pleistoceen zandpakket en slecht doorlatende Holocene deklagen; het Hollandprofiel (TAW 2001) zoals afgebeeld in Figuur 1.1.

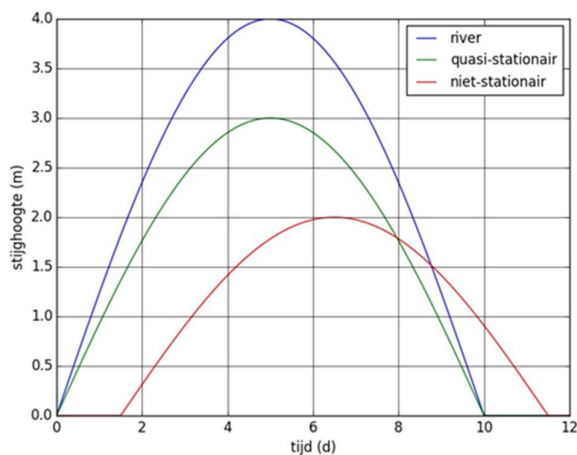


Figuur 1.1 Hollandprofiel (TRW).

De grondwaterstroming door het grondlichaam, de deklagen en het zandpakket is het gevolg van hydraulische belastingen door de buitenwaterstand, het polderpeil, neerslag, verdamping, overloop en overslaande golven. Als de hydraulische belasting op de constructie niet stationair is, dan zal de grondwaterstroming en daarmee de grondwaterspanning in de tijd variëren. Bij de beoordeling van de stabiliteit van dijken wordt hier in veel gevallen geen rekening mee gehouden en wordt gerekend met een constante belasting door maatgevend hoog water.

6 september 2017, definitief

In het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies (TRWG) worden de hoofdlijnen voor het bepalen van waterspanningen in het dijklichaam en de ondergrond behandeld (TAW 2001). Het TRWG geeft ook een definitie van stationaire en niet-stationaire grondwaterstroming die in dit rapport wordt overgenomen. Volgens de TRWG moet met niet-stationaire grondwaterstroming rekening gehouden worden als de duur van de maatgevende hoogwaterstand kort is in verhouding tot de consolidatieperiode van de afdekkende lagen op de watervoerende zandlaag. Als dit niet het geval is kunnen de waterspanningen zich praktisch direct aan de hydraulische randvoorwaarden aanpassen en wordt de stroming quasi-stationair genoemd. In dat geval kan de stroming in een ontwerpberekening stationair worden verondersteld. Bij stationaire grondwaterstroming worden de tijdsafhankelijke randvoorwaarden gedempt door stromingsweerstand in de ondergrond. Niet-stationaire stroming wordt gekenmerkt door vertraging en extra demping. Dit wordt veroorzaakt door freatische berging in hoofdzakelijk het dijklichaam en elastische berging in de ondergrond. Freatische berging vindt plaats bij een stijgende vrije grondwaterspiegel waarbij de poriën met water gevuld raken. Elastische berging treedt op bij een stijging van de grondwaterspanningen bij gelijkblijvende gronddruk waarbij de grond elastisch uitzet. Figuur 1.2 illustreert het effect van quasi-stationaire en niet-stationaire waterspanningsvoortplanting.



Figuur 1.2 Quasi-stationaire en niet-stationaire reactie.

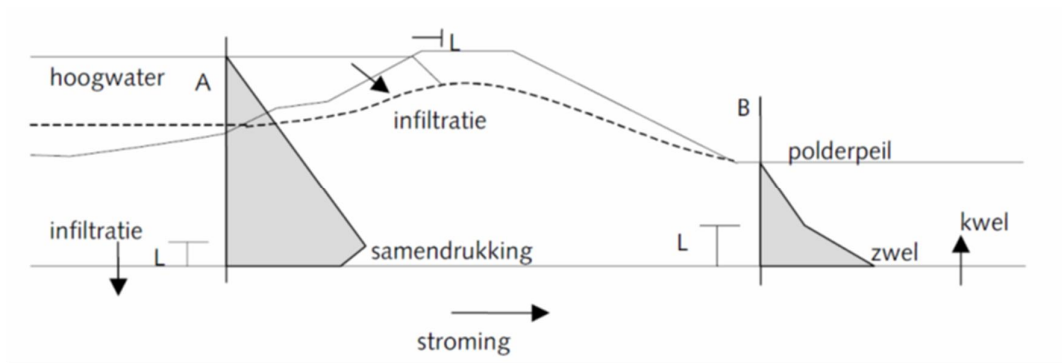
Boven de freatische lijn vindt capillaire opstijging plaats en stroming door de onverzadigde zone. Deze stroming wordt hoofdzakelijk aangedreven door neerslag en verdamping en is bepalend voor de hoeveelheid freatische berging. Onverzadigde waterspanningen worden bij een stabiliteitsberekening over het algemeen verwaarloosd omdat de bijdrage van de zuigspanningen aan de stabiliteit van de constructie gering is en de spanningen lastig te bepalen zijn. Verzadigde waterspanningen daarentegen bepalen in hoge mate de stabiliteit van het dijklichaam doordat de schuifweerstand is gerelateerd aan het verschil tussen grondspanning en waterspanning. Bij opdrijven van slecht doorlatende lagen direct naast de constructie kan de schuifweerstand in de interface tussen goed en slecht doorlatende grondlagen zelf tot nul teruglopen. Opdrijven

6 september 2017, definitief

van het afsluitend pakket bij hoge buitenwaterstanden treedt op als de opwaartse druk onder het afsluitende klei- en veenpakket gelijk wordt aan het gewicht van de grondlagen. De stijghoogte die hierbij hoort wordt de grenspotentiaal genoemd. Bij overschrijding van deze potentiaal kan de slecht doorlatende laag opbarsten waardoor de waterspanningen niet verder zullen stijgen.

Het Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken (TRW) geeft ontwerpers en toetsers een richting voor het schematiseren van waterspanningen (TAW 2004). Het rapport richt zich voornamelijk op de door grondwaterstroming geïnduceerde waterspanningen bij extreme waterstanden, sterk variërende waterstanden en neerslag. Daarnaast worden met grondspanning samenhangende waterspanningen en door vervorming geïnduceerde waterspanningen genoemd. Deze waterspanningen worden bijvoorbeeld veroorzaakt door ophogingen en verkeer waarbij de grond (elasto-plastisch) vervormt. Het TRW geeft methoden voor een eerste schematisering van de ligging van de freatische lijn, de stijghoogte in de tussenzandlaag en de stijghoogte in de watervoerende zandlaag voor een viertal cases: dijk in het benedenrivierengebied, dijk in het bovenrivierengebied, meerdijk en boezemkade. Bij rivierdijken in het bovenrivierengebied is een langdurige hoge waterstand bij een hoge rivierafvoer de maatgevende belasting bij het ontwerp. Rivierdijken in het benedenrivierengebied worden daarnaast belast door het getij. Meerdijken worden in maatgevende situaties belast door een hoge waterstand bij windopzet en boezemkaden keren bijna dagelijks de ontwerpbelasting. In het technisch rapport worden zeedijken buiten beschouwing gelaten omdat deze constructies ruim gedimensioneerd zijn en de freatische lijn laag ligt waardoor waterspanningsveranderingen de stabiliteit van de constructie minder beïnvloeden. De maatgevende waterstand voor zeedijken wordt geleverd door windopzet in combinatie met het getij en is relatief kort aanwezig. Het TRW geeft tevens analytische oplossingen voor het stationaire stijghoogteverloop in de watervoerende laag waarbij de dijk ondoorlatend wordt verondersteld en delen van het voorland en het achterland ondoorlatend of slecht doorlatend zijn. De analytische oplossingen voor het niet-stationaire stijghoogteverloop zijn afgeleid uit berekeningen die met het programma WATEX (Barends 1982) zijn uitgevoerd. Dit programma beschouwt grondwaterstroming, waterspanningsgeneratie (zwell) en waterspanningsdissipatie (consolidatie) als gevolg een potentiaalverschil over de constructie en door deformatie van de ondergrond. Het programma Watex geeft een elegante oplossing voor een vereenvoudigd gekoppeld probleem; eendimensionale verticale waterspanningsgeneratie en consolidatie in het voorland, horizontale drukvoortplanting onder de dijk en verticale zwell en dissipatie van waterspanningen in het achterland. In een handreiking vereenvoudigt het TRW de oplossing nog sterker en introduceert een indringingslengte die de hoogte waarover de waterspanningsvariatie in het watervoerend pakket de waterspanningen in het samendrukbare pakket beïnvloedt.

6 september 2017, definitief



Figuur 1.3 Indringlengte (TRW).

De indringingslengte wordt gerelateerd aan de wortel van de tijd. De lengte begrenst de zone waar consolidatie optreedt in het voorland na een verhoging van de buitenwaterstand en begrenst de zone waar zwell optreedt in het achterland als weergegeven in Figuur 1.3. Schoofs en Van Duinen (2006) geven een uitwerking van de procedure die in het TRW wordt voorgesteld voor de Lekdijken in de Alblasserwaard.

1.3 Rekenmodellen

Het TRW geeft ook een overzicht van beschikbare rekenmodellen en meetmethoden voor het voorspellen van grondwaterspanningen. Grondwaterspanningen kunnen worden berekend met numerieke stromingsmodellen waarbij de deformatie van de grond wordt verwaarloosd. Voor stroming door goed doorlatende en slecht samendrukbare lagen (zand / grind) geven deze modellen betrouwbare resultaten. Als grondwaterspanningen in slecht doorlatende lagen (klei / veen) moeten worden bepaald en de belasting relatief snel in de tijd varieert, is het van belang om ook de deformatie van de ondergrond in rekening te brengen. Met een (ontkoppelde) stromingsberekening kan de dissipatie van grondwaterspanningen als gevolg van deformaties in de ondergrond weliswaar worden gemodelleerd (Verruijt 1990) maar voor de generatie van waterspanningen als gevolg van vervormingen moet het gekoppelde proces van stroming en deformatie worden beschreven (TAW 2004). Met de rekenprogramma's Plaxis (Brinkgreve ea. 2015) en DgFlow (Van Esch ea. 2013) kunnen gekoppelde stromings-deformatie en ontkoppelde stromingsberekeningen worden gemaakt. Met het rekenmodel Modflow kunnen alleen ontkoppelde stromingsberekeningen worden gemaakt.

Grondwaterspanningen kunnen daarnaast met tweedimensionale, driedimensionale en quasi-driedimensionale modellen worden voorspeld. Een tweedimensionale beschrijving (in het verticale vlak) van de grondwaterspanningen bij dijken is op zijn plaats als de stroming loodrecht om de dijkas plaats vindt. Deze beschrijving kan zo nodig worden vereenvoudigd tot een quasi-tweedimensionale beschrijving, die horizontale stroming door goed doorlatende lagen en verticale stroming door slecht doorlatende lagen veronderstelt, als de lengte van het profiel groot is (TAW 2004). Een quasi-driedimensionale berekening is meer op zijn plaats als de waterspanningen lokaal

6 september 2017, definitief

worden beïnvloed door bijvoorbeeld een zandwininput of een grondwateronttrekking. Ook bij deze beschrijving wordt de stromingsrichting in aquifers, die zijn opgebouwd uit goed doorlatend materiaal, horizontaal en in aquitards, die zijn samengesteld uit slecht doorlatende materialen, verticaal verondersteld. Het stromingsbeeld in de ondergrond krijgt echter een volledig driedimensionaal karakter als een rivier de watervoerende laag buitendijks onvoldoende diep insnijdt of als er een wiel binnendijks aanwezig is met een beperkte diepte. Het stromingsbeeld in het dijklichaam krijgt een driedimensionaal karakter langs rivierbochten, in de buurt van constructies en rond zandbanen. Met Plaxis en DgFlow kan de grondwaterstroming zowel tweedimensionaal als driedimensionaal worden gemodelleerd en kan de ligging van de freatische lijn worden bepaald. Modflow geeft een quasi-driedimensionale beschrijving van de grondwaterstroming.

1.4 Meetmethoden

Voor het voorspellen van grondwaterspanningen bij maatgevende hoge waterstanden is het zinvol om rekenmodellen in combinatie met grondwatermonitorsystemen te gebruiken. Onder verzadigde condities worden de waterspanningen in goed doorlatende lagen veelal met drukopnemers in peilbuizen gemeten. In slecht doorlatende lagen worden daarvoor in veel gevallen waterspanningsmeters gebuikt. Meetgegevens kunnen met dataloggers verzameld worden en eventueel draadloos worden verstuurd. Op basis van de gemeten waterspanningen wordt het rekenmodel geïjkt, waarna waterspanningen bij maatgevende hoge waterstanden kunnen worden voorspeld die gebruikt worden voor het ontwerp van een waterkering. Op die manier worden niet-lineaire effecten in rekening gebracht. Voorbeelden van niet-lineaire effecten zijn: het bereiken van de grenspotentiaal onder een slecht doorlatend pakket waardoor de stijghoogte niet verder toe kan nemen, het ontstaan van spanningswater bij afname van de freatische berging en het onderlopen van het voorland waardoor de ondergrond op een andere manier hydraulisch belast wordt dan bij laag water. Na de versterking van de waterkering kunnen met de metingen mogelijke veranderingen in modelparameters door bijvoorbeeld structuurvorming, baggerwerkzaamheden of het staken van een grondwateronttrekking worden gedetecteerd. Daarnaast is het mogelijk om de response op veranderende hydraulische belastingen vast te stellen.

2 Probleemstelling

In het voorliggende onderzoek wordt het driedimensionale en / of niet-stationaire karakter van grondwaterstroming in en rond dijken onderzocht voor een drietal locaties langs de Waaldijk in het traject Gorinchem–Waardenburg (GOWA) en het traject Tiel-Waardenburg (TIWA). De locaties worden aangeduid met het dijkpaalnummer TG175, TG356 en TG385 en zijn in Figuur 2.1 aangegeven. De waterkering op deze locaties wordt aangemerkt als een dijk in het bovenrivieren gebied.



Figuur 2.1 Tracé Tiel-Waardenburg (TIWA) Gorinchem-Waardenburg (GOWA).

Aanvullend wordt de grondwaterstroming in een zeedijk op Ameland, in een dijk in het benedenrivierengebied langs het Spui en in een Meerdijk aan het Markermeer onderzocht om meer generieke uitspraken te kunnen doen over het niet-stationaire driedimensionale karakter van grondwaterstroming in en rond dijken in Nederland.

2.1 Uitgangspunten

Voor de onderzoekslocaties in het bovenrivierengebied zijn ondergrondgegevens uit het regionale grondwater modelinstrumentarium MORIA (Modellering Ondergrond Rivierenland Interactief en Actueel), dat onderdeel van het Nederlands Hydrologisch Instrument (NHI) is, beschikbaar. Het Nederlands Hydrologisch Instrument (NHI) bestaat uit een verzameling rekenprogramma's en databases voor de simulatie van grondwater- en oppervlaktewatersystemen in Nederland (www.nhi.nu). Met het NHI is het Landelijk Hydrologisch Model (LHM) opgesteld. In dit model is de ondergrond geschematiseerd in zeven lagen die zijn afgeleid uit het REGIS model. De ligging van het maaiveld volgt uit het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) en het oppervlaktewater wordt op regionaal niveau geschematiseerd met het MOZART model. Grondwaterstroming wordt gemodelleerd met de door Deltares ontwikkelde rekencode iMod. Deze rekencode bevat een versnelde versie van de door de USGS ontwikkelde Modflow code en het door Alterra ontwikkelde MetaSwapt.

MORIA is ontwikkeld door Deltares, Alterra, TAUW en Royal Haskoning in opdracht van Waterschap Rivierenland, Provincie Gelderland en Waterbedrijf Vitens, voor het beheergebied van Waterschap Rivierenland. Data, deelmodellen en modelvarianten van de ondergrond en het watersysteem worden in MORIA systematisch beheerd. Het

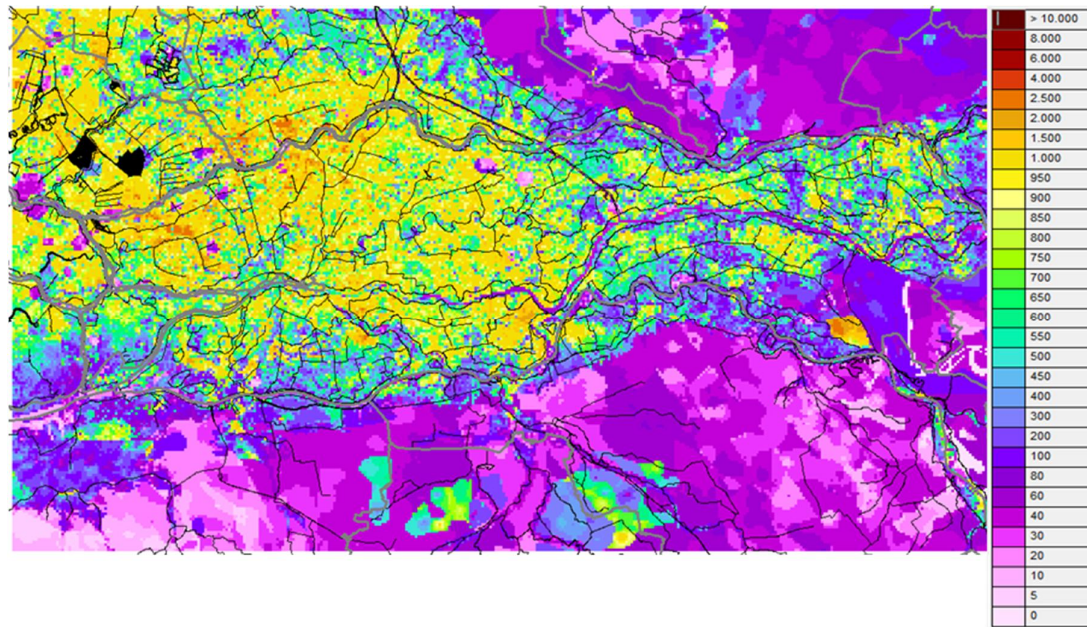
6 september 2017, definitief

MORIA model geeft een geohydrologische beschrijving van het beheergebied van Waterschap Rivierenland. De grondwaterstroming wordt gesimuleerd met de eindige differentie code Modflow waarbij gebruikt gemaakt wordt van een quasi-driedimensionale benadering; horizontale stroming door aquifers (goed doorlatende zand en grind lagen) en verticale stroming door aquitards (slecht doorlatende klei en veen lagen) en de ondergrond geheel verzadigd wordt verondersteld. MORIA berekeningen worden uitgevoerd met tijdstappen van 1 dag en de resultaten van dag 14 en 28 van iedere maand worden opgeslagen. De rekencellen zijn 25 bij 25 meter groot en de ondergrondinformatie (transmissiviteit van aquifers en stromingsweerstand van aquitards) wordt met cellen van 100 bij 100 meter beschreven. Iedere 'ondergrond' cel wordt dus opgedeeld in vier rekencellen met dezelfde eigenschappen. De dikte van de modelcellen varieert van enkele meters tot tientallen meters.

Uit MORIA gegevens kan de grootte van deelmodellen voor het beschrijven van grondwaterspanningen in en om dijken worden afgeleid. Dit gebeurt op basis van de lekfactor die in Figuur 2.2 grafisch is weergegeven en in het model varieert tussen 1000 en 2000 meter in het westen tot 100 en 500 meter in het oosten (Borren en Hoogewoud 2015). Op een afstand van drie maal de lekfactor is de invloed van een rivier op de stijghoogte in het goed doorlatende pakket voor 95% uitgedempt (Verruijt 1986). Voor een correcte beschrijving van de grondwaterstroming beslaan de modellen een gebied van 300 tot 6000 m. Geohydrologische modellen omvatten een veel groter modelgebied dan geotechnische modellen waarmee de stabiliteit van een constructie wordt bepaald. Deze modellen hebben over het algemeen grootte van 150 m. Mede door de omvang van het modelgebied en de aanwezigheid van bijvoorbeeld waterwinningen, zandwinplassen en zandbanen in het gebied, is een driedimensionale beschrijving van de grondwaterstroming vaak onvermijdelijk.

Naast de MORIA gegevens is een set van boringen en sonderingen, die in opdracht van Waterschap Rivierenland door het Raadgevend Ingenieursbureau Wiertsema & Partners BV zijn uitgevoerd, beschikbaar. De metingen worden door het Waterschap Rivierenland gebruikt bij het dimensioneren van de dijkverbetering die onderdeel uitmaakt van het HWBP programma en door het waterschap zal worden gerealiseerd. De metingen zijn gestart in augustus 2014 en zullen doorlopen tot april 2017. In die periode is de response op de hoogwaterperiode rond 2 januari 2015 vastgesteld waarbij het voorland in alle profielen gedeeltelijk is ondergelopen. De meetresultaten die vallen binnen het referentieproject 'dijkvak Gorinchem-Waardenburg' (GOWA) zijn gerapporteerd door Oudega (2015b). Voor de resultaten binnen het referentieproject 'dijkvak Tiel-Waardenburg' (TIWA) wordt verwezen naar (Oudega 2015a).

6 september 2017, definitief



Figuur 2.2 Spreidingslengte MORIA model.

2.2 Onderzoeksvragen

De hoofdvraag ten aanzien van grondwaterstromingsmodellering vanuit de adviespraktijk (en het HWBP) is: wat een (voldoende) betrouwbare manier is om waterspanningen en stijghoogtes vast te stellen in relatie tot de stabiliteit van waterkeringen? Voorafgaande aan dit onderzoek zijn daaruit drie onderzoeksvragen geformuleerd:

- hoe groot is het effect van elastische en freatische berging op de ontwikkeling van de stijghoogtes in en onder de dijk?
- hoe bruikbaar zijn de beschikbare rekenmodellen?
- welke metingen moeten uitgevoerd worden om te komen tot betrouwbare voorspellingen?

Stijghoogtes die volgen uit niet-stationaire grondwaterstromingsberekeningen en stijghoogtes die bepaald zijn met stationaire grondwaterstromingsberekeningen worden onderling vergeleken en de berekende waterspanningsvelden worden daarna opgelegd in stabiliteitsberekeningen. De invloed van elastische en freatische berging op de stabiliteit van de waterkering in de gekozen onderzoekslocaties wordt hiermee gekwantificeerd waarbij de stabiliteit van de waterkering wordt uitgedrukt in een veiligheidsfactor. Het in rekening brengen van niet-stationaire grondwaterstroming wordt langs deze weg vastgesteld voor een dijk in het bovenrivierengebied, een dijk in het benedenrivierengebied, een zeedijk en een meerdijk.

6 september 2017, definitief

Voor het beheergebied van Waterschap Rivierenland zijn de geohydrologische gegevens ondergebracht in het MORIA model waarmee quasi-driedimensionale Modflow berekeningen worden gemaakt. Met een lokaal verfijnd Modflow model wordt de stijghoogte nauwkeuriger bepaald maar processen als deformatie van de grond en onverzadigde stroming worden met dit model niet beschreven. Met DgFlow kunnen dergelijke processen wel worden gekwantificeerd waarmee een gedetailleerdere voorspelling van het stromingsgedrag wordt verkregen. Met DgFlow worden tweedimensionale en driedimensionale berekeningen gemaakt en onderling vergeleken. De bruikbaarheid van de beschikbare rekenmodellen wordt bepaald door de reproduceerbaarheid van stijghoogtemetingen, de benodigde rekentijden en de tijd die nodig is om te komen tot een gekalibreerd model.

Stijghoogtes worden meestal gemeten met drukmeters in peilbuizen en met waterspanningsmeters. De plaats en het aantal van deze metingen bepaalt de nauwkeurigheid waarmee modelparameters via een inverse analyse met het stromingsmodel kunnen worden bepaald. Vastgesteld wordt welke meetopstelling de voorkeur heeft en of er aanvullende metingen noodzakelijk zijn om een unieke set modelparameters af te leiden.

3 Waaldijk Opijnen

De grondwaterstroming in het onderzoeksgebied ‘Waaldijk Opijnen’ (TG175) heeft een complex driedimensionaal karakter. In het onderzoeksgebied ligt een zandwinput waarvan het oppervlaktewater via een breed voorland in contact staat met de rivier de Waal. In dit hoofdstuk wordt het stromingsbeeld berekend met de grondwaterstromingsmodellen Modflow en DgFlow waarbij de uitkomsten worden vergeleken met stijghoogtemetingen. Hiervoor worden stijghoogtemetingen in vijf peilbuizen en vijf waterspanningsmeters gebruikt die in het kader van het dijkversterkingsproject zijn geïnstalleerd. De berekende waterspanningen worden opgelegd in een geotechnisch model Plaxis waarmee de stabiliteit van de waterkering wordt berekend. Het bovenaanzicht van onderzoekslocatie TG175 met de positie van de meetraai waarin peilbuizen en waterspanningsmeters zijn geplaatst is afgebeeld in Figuur 3.1.

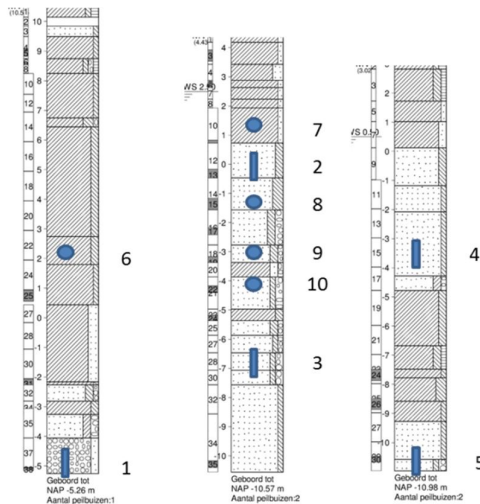


Figuur 3.1 Onderzoekslocatie TG175.

3.1 Waterspanningsmetingen

Figuur 3.2 geeft een aantal profielen voor de locatie ‘Waaldijk Opijnen’ weer die afgeleid zijn uit boringen (Oudega 2015a) met daarin de posities van de waterspanningsmeters (cirkel) en peilbuizen (rechthoek). De boorprofielen zijn opgesteld ter plaatse van de kruin, binnenkant teen en het achterland.

6 september 2017, definitief



Figuur 3.2 Ondergrondprofielen TG175+090_B_KR, TG175+089_B_BIT, TG176+002_B_AL.

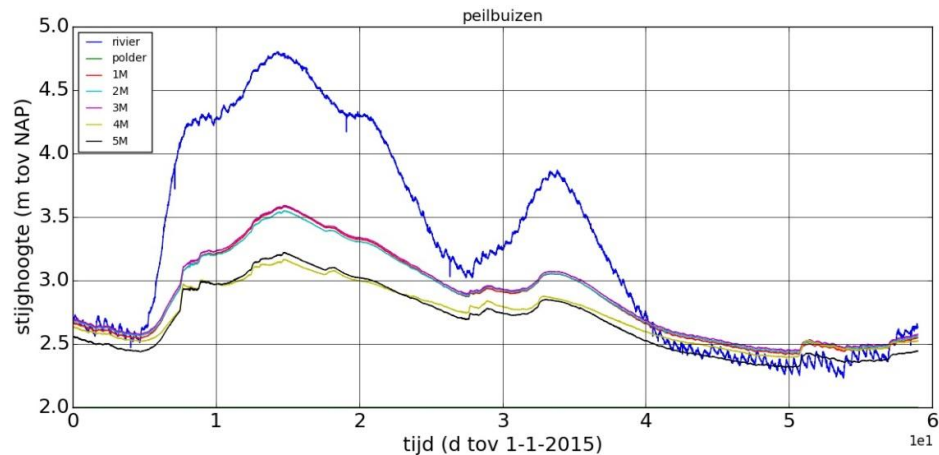
In Tabel 3.1 zijn de posities van de peilbuizen en waterspanningsmeters, de hoogte van het maaiveld en de boven- en onderkant van de filters voor meetraai TG175 verzameld. De meetlocaties langs het traject Tiel-Gorinchem worden aangeduid met TG en het dijkspaalnummer. De dijken zijn om de 100 meter geplaatst. De plaats van de peilbuis wordt daarnaast aangeduid met een codering: voorland (vl), buitenteen (but), kruin (kr), binnenteen (bit) en achterland (al) en de aanvulling +xxx geeft de afstand tot de dijkspaal in meters aan. Een peilbuis wordt aangeduid met het label P en een waterspanningsmeter met W+yyy, waarin yyy de positie t.o.v. NAP aangeeft in centimeters. TG332.+044_W-526_BIT geeft dus bijvoorbeeld de positie van de waterspanningsmeter aan die 33244 m vanaf de referentiedijkspaal TG000 is geplaatst (gemeten langs het dijktracé) op een diepte van NAP -5,26 m in de binnenteen.

nr.	Locatienaam	x m	y m	mv cm t.o.v. NAP	bf cm t.o.v. NAP	of cm t.o.v. NAP
1	TG175.+090_P1_KR	148429	426848	1054	-436	-536
2	TG175.+089_P1_BIT	148445	426857	443	43	-57
3	TG175.+089_P2_BIT	148445	426857	443	-657	-757
4	TG176.+002_P1_AL	148564	426955	302	-298	-398
5	TG176.+002_P2_AL	148564	426955	302	-998	-1098
6	TG175.+092_W+216_KR	148428	426850	1056	216	216
7	TG175.+091_W+122_BIT	148443	426858	452	122	122
8	TG175.+086_W-127_BIT	148446	426855	453	-127	-127
9	TG175.+087_W-322_BIT	148446	426856	443	-322	-322
10	TG175.+087_W-412_BIT	148445	426855	463	-412	-412

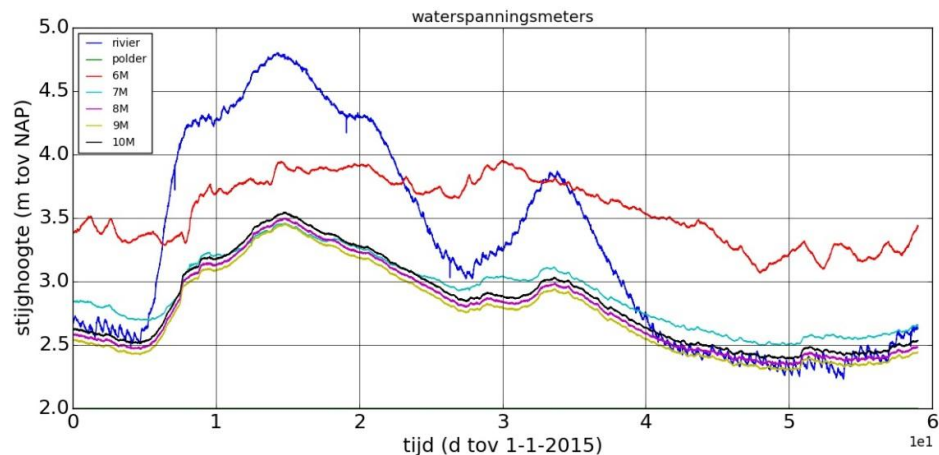
6 september 2017, definitief

Tabel 3.1 Meetlocaties TG175.

De metingen over de periode januari-februari 2015 worden in dit rapport gebruikt om de invloed van de tijdsafhankelijke variatie van het rivierpeil op de waterspanningsontwikkeling in en om de Waaldijk vast te stellen. In deze periode is een hoogwatergolf met een duur van 25 dagen en amplitude van 2.1 meter ter plaatse van profiel TG175 waargenomen (Oudega 2015a). Deze hoogwatergolf wordt gevolgd door een tweede golf met een duur van 10 dagen en een amplitude van 0.8 meter. De invloed van het getij is daarbij nauwelijks waarneembaar. Stijghoogtemetingen in het pleistocene pakket en de holocene deklaag laten een faseverschuiving van hooguit enkele uren zien ten opzichte van de gemeten rivierwaterstand. Daaruit kan geconcludeerd worden dat niet-stationaire effecten door berging in de ondergrond en het dijklichaam klein zijn. Figuur 3.3 geeft het waargenomen stijghoogteverloop in de peilbuizen weer en Figuur 3.4 geeft het verloop van de stijghoogte weer dat is afgeleid uit waterspanningsmetingen. Met een meetfrequentie van 1 meting per 10 minuten worden 8640 metingen per observatiepunt over een periode 60 dagen verzameld.



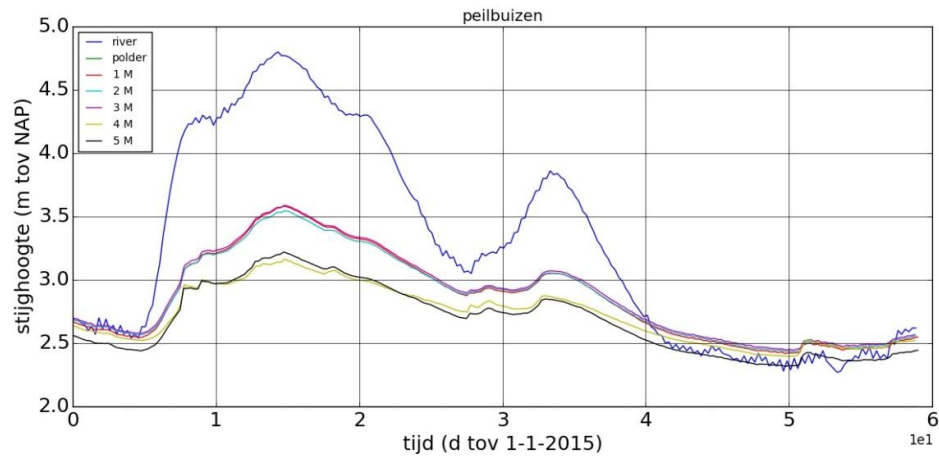
Figuur 3.3 Peilbuismetingen TG175 1 januari 2015 tot 1 maart 2015 (meetfrequentie 1/10 min).



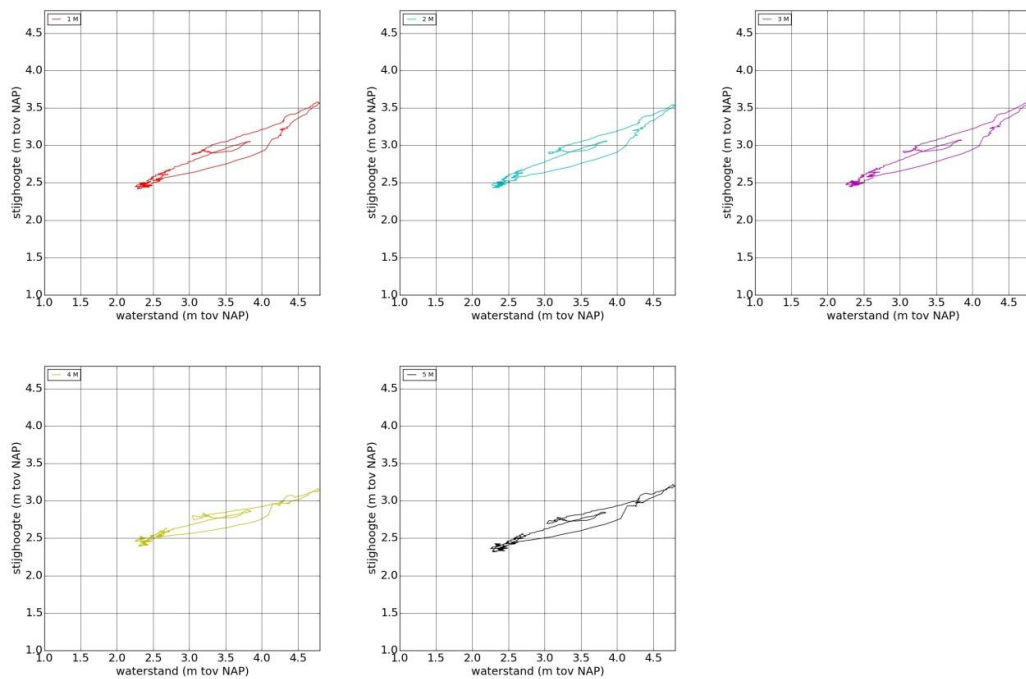
Figuur 3.4 Waterspanningsmetingen TG175 1 januari 2015 tot 1 maart 2015 (meetfrequentie 1/10 min).

6 september 2017, definitief

Figuur 3.5 en Figuur 3.7 geven het stijghoogteverloop over een periode van 60 dagen weer voor locatie TG175 waarbij het signaal is gesampeld met 1 meting per 6 uur. Dit gesampelde verloop is gebruikt als basis voor de stromingsberekeningen. In Figuur 3.6 en Figuur 3.8 is de stijghoogte per meetpunt als functie van de rivierwaterstand uitgezet. De helling wordt bepaald door de stromingsweerstand van de grond en de hysteresis is het gevolg van freatische en elastische berging in de ondergrond en het dijklichaam.

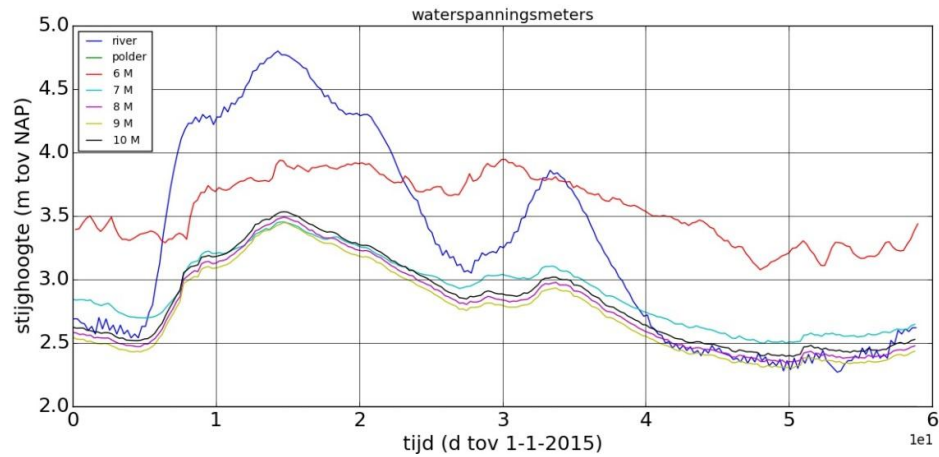


Figuur 3.5 Peilbuismetingen TG175 1 januari 2015 tot 1 maart 2015 (meetfrequentie 1/6 uur).

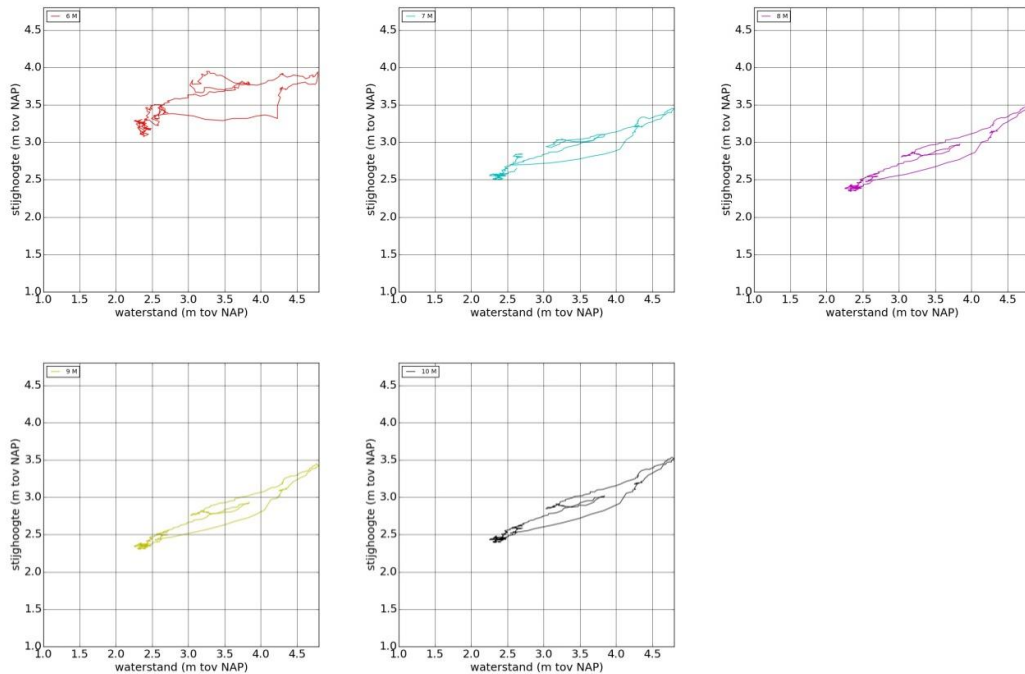


Figuur 3.6 Peilbuismetingen TG175 1 januari 2015 tot 1 maart 2015 als functie van de buitenwaterstand.

6 september 2017, definitief



Figuur 3.7 Waterspanningsmetingen TG175 1 januari 2015 tot 1 maart 2015 (meetfrequentie 1/6 uur).

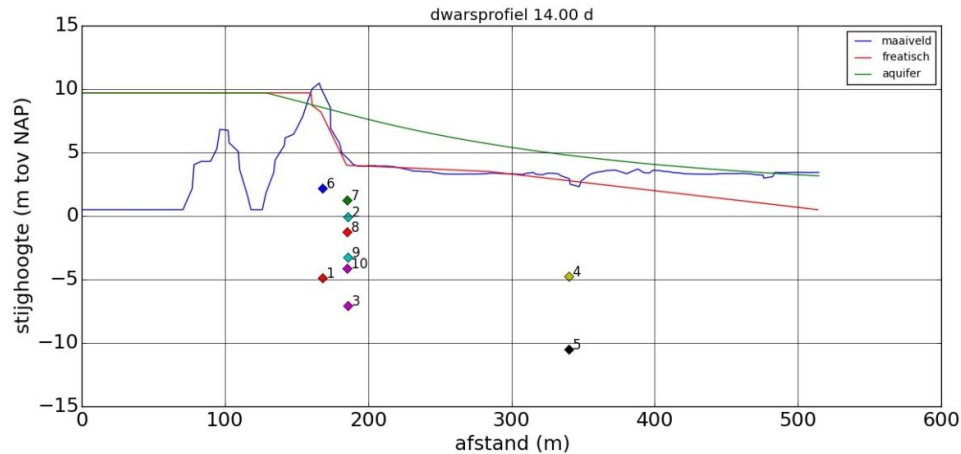


Figuur 3.8 Waterspanningsmetingen TG175 1 januari 2015 tot 1 maart 2015 als functie van de buitenwaterstand.

In Figuur 3.9 is het stijghoogteverloop dat volgt uit de procedure die in bijlage B.2 van de leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken TAW (1985) wordt beschreven, afgebeeld. De procedure is opgesteld voor stationaire stroming in een zandpakket die overwegend horizontaal is waarbij het dijklichaam ondoorlatend wordt verondersteld en de afdekkende lagen in het voor- en achterland slecht doorlatend zijn. Het maatgevend hoog water is daarbij op 9,7 m en het polderpeil op 2 m gesteld. De lengte van het voorland bedraagt 1 m met een spreidingslengte van 100 m en de lengte van het achterland is 2000 m met een spreidingslengte van 200 m. De basis van het dijklichaam heeft een afmeting van 60 m en de transmissiviteit van de aquifer bedraagt $1250 \text{ m}^2/\text{d}$. Het freatisch vlak is bepaald met de

6 september 2017, definitief

procedure die in bijlage 1 (b1.3.3) van het technisch rapport waterspanningen bij dijken (TRW 2004) is voorgesteld.



Figuur 3.9 Stijghoogteverloop TG175 volgens ontwerprichtlijn.

3.2 Regionaal geohydrologisch model

De Modflow modellen, die in dit onderzoek zijn opgesteld, zijn opgebouwd uit cellen van 5 bij 5 meter. De dikte van de cellen komt overeen met de laagdikte en er wordt geen onderscheid gemaakt tussen aquifers en aquitards; aan iedere cel wordt een doorlatendheid in drie richtingen en een samendrukbaarheid toegekend. De grondeigenschappen van de cellen zijn afgeleid uit een driedimensionale schematisatie van de ondergrond die met het programma iMod is opgesteld. De schematisatie is gebaseerd op boor- en sondeergegevens die in het kader van het dijkversterkingsproject zijn verzameld. De Modflow berekeningen worden uitgevoerd met tijdstappen van een uur en de resultaten worden opgeslagen in intervallen van een dag.

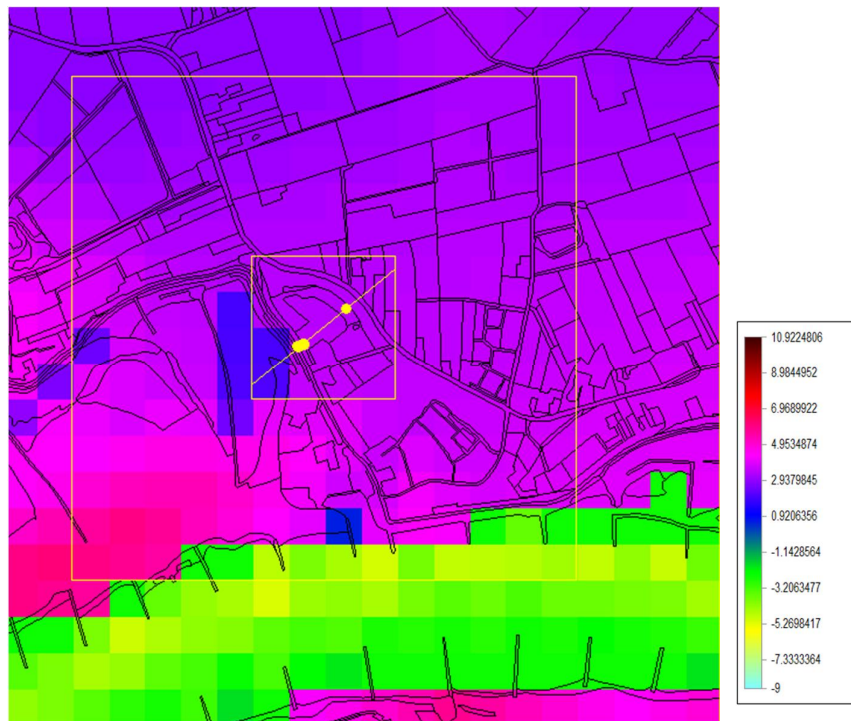
Bij zowel het regionale MORIA model als het Modflow model wordt de onverzadigde zone buiten beschouwing gelaten en wordt een confined (volledig verzadigde) toestand verondersteld. De koppeling tussen Modflow en MORIA wordt afgehandeld in een iModflow module. Modflow berekeningen zijn uitgevoerd voor de periode januari-februari 2015 waarbij de randvoorwaarden volgen uit MORIA berekeningen van dezelfde periode in 2014 omdat MORIA rekenresultaten voor 2015 ontbraken. Met deze procedure is het rekenconcept echter voldoende getoetst.

In het profiel 'Waaldijk Opijnen' is een deklaag van 3 meter in het achterland vastgesteld. Uit de dikte van de laag en de doorlatendheid van het materiaal waaruit de laag is opgebouwd kan de stromingsweerstand worden afgeleid. Uit de doorlatendheid die volgt uit een initiële tweedimensionale DgFlow berekeningen is een weerstand van de deklaag van 206 dagen afgeleid. Uit de weerstand van de deklaag en de transmissiviteit van de ondergelegen goed doorlatende zandlaag, die eveneens met een initiële tweedimensionale DgFlow berekeningen is bepaald, volgt een spreidingslengte van 385

6 september 2017, definitief

m. Volgens de analytische oplossing van het geohydrologische probleem van een landstrook met een slecht doorlatende deklaag, dat deze locaties kenmerkt, is de invloed van de buitenwaterstand voor 95% uitgedempt op een afstand van drie maal de spreidingslengte vanaf de rivier. Deze afstand bedraagt 1,2 km. Bij stromingsmodellen met deze afmetingen is de invloed van de influx door verticale randen, als gevolg van een verschil in rivierwaterstand en polderpeil, te verwaarlozen waardoor een nauwkeurige voorspeling van de grondwaterstroming kan worden gemaakt.

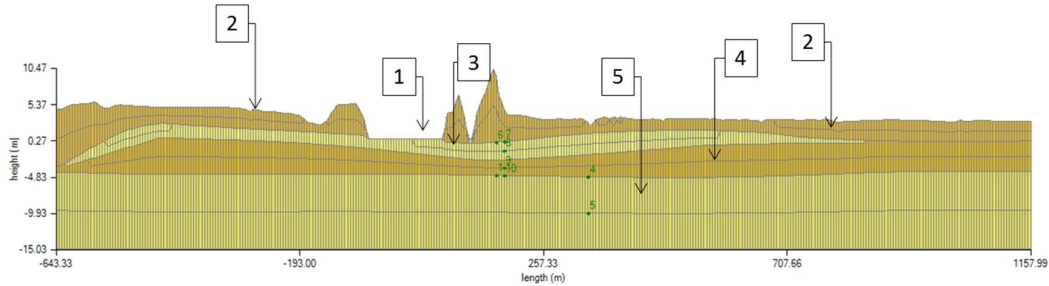
De hoogtekaart die is gebruikt bij het opstellen van het MORIA model is afgebeeld in Figuur 3.10. In deze figuur zijn tevens de modelgebieden van het regionale Modflow model en het lokale DgFlow model weergegeven. Het Modflow model heeft een afmeting van 1400x1400 meter en ligt in het kaartvlak (147800, 426200) - (149200, 427600). Het DgFlow model heeft een afmeting van 400x400 meter en ligt in het kaartvak (148300, 426700) - (148700, 427100).



Figuur 3.10 Hoogtekaart MORIA model TG175.

Het ondergrondprofiel, dat volgt uit het MORIA model voor de dwarsdoorsnede die in Figuur 3.10 is afgebeeld, is weergegeven in Figuur 3.11. In dit profiel worden tot een diepte van NAP -24,00 m vier lagen onderschrijden, laag: 1, 2, 9 en 11 en het dijklichaam ontbreekt. Voor het beoordelen van de stabiliteit van dijken is het MORIA niet geschikt en daarom is het regionale MORIA model voor de locatie lokaal verfijnd.

6 september 2017, definitief



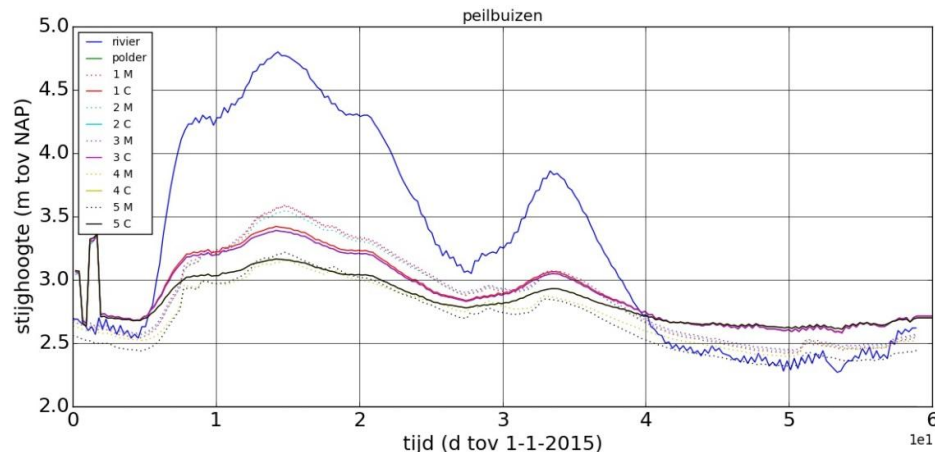
Figuur 3.13 Dwarsprofiel Modflow model TG175.

De doorlatendheid en samendrukbaarheid van de materialen die zijn afgeleid uit een inverse Modflow berekening zijn verzameld in Tabel 3.2.

Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	100	10^{-4}
2	1	10^{-4}
3	1	10^{-5}
4	50	10^{-5}
5	100	10^{-5}

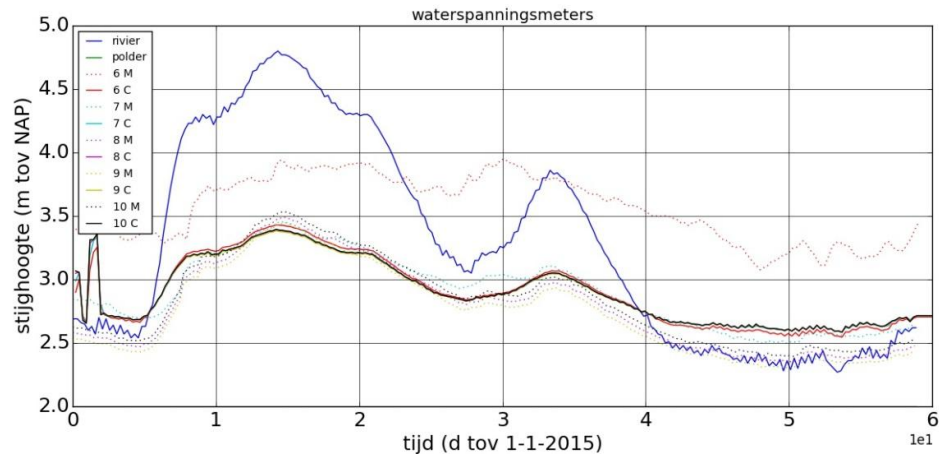
Tabel 3.2 Materiaaleigenschappen Modflow model TG175.

De invloed van de stijghoogteverdeling over de verticale randen die het Modflow model begrenzen is bepaald door naast een Modflow berekening met gesloten randen een gekoppelde Modflow-MORIA berekening uit te voeren. Daarbij worden stijghoogtes die met een MORIA berekening zijn voorspeld opgelegd als randvoorwaarde in de Modflow berekening. De stijghoogtes in peilbuizen en waterspanningsmeters die volgen uit een gekoppelde Modflow-MORIA berekening zijn weergegeven in Figuur 3.14 en Figuur 3.15. In Figuur 3.16 en Figuur 3.17 zijn de resultaten van een ontkoppelde Modflow berekening over dezelfde periode afgebeeld.

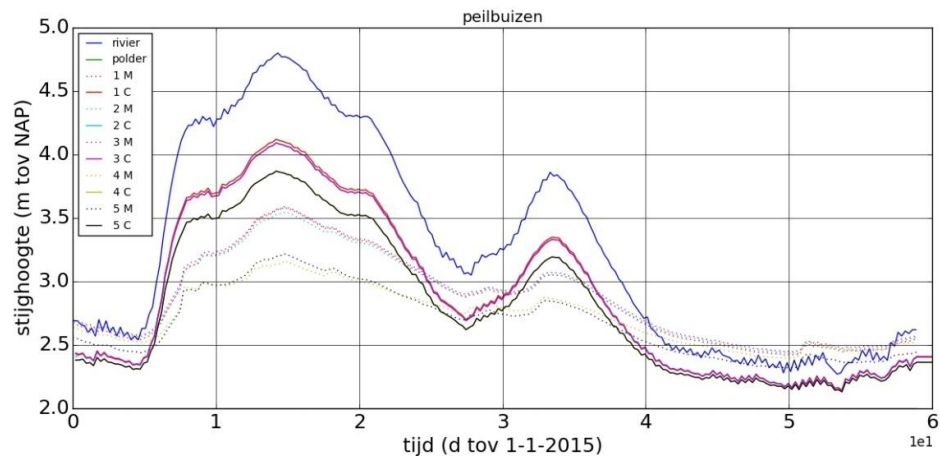


Figuur 3.14 Stijghoogteverloop peilbuizen TG175 volgens een Modflow-MORIA berekening.

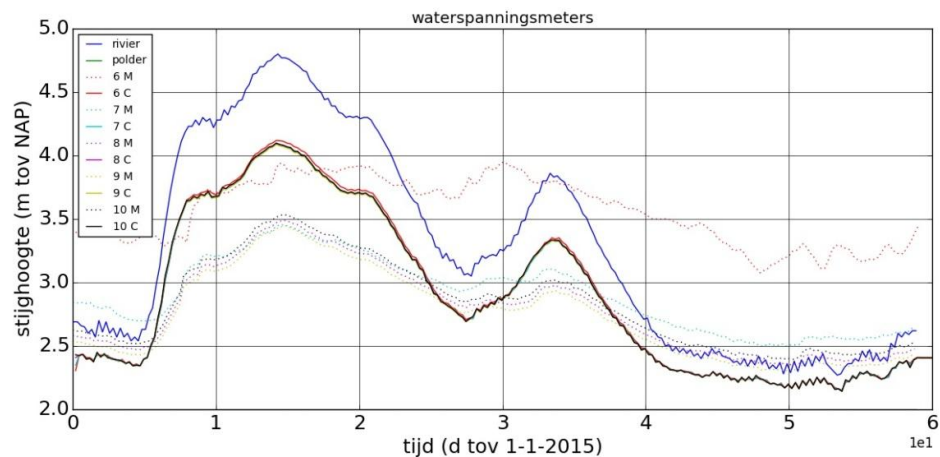
6 september 2017, definitief



Figuur 3.15 Stijg­hoogte­verloop waterspanningsmeters TG175 volgens een Modflow-MORIA berekening.



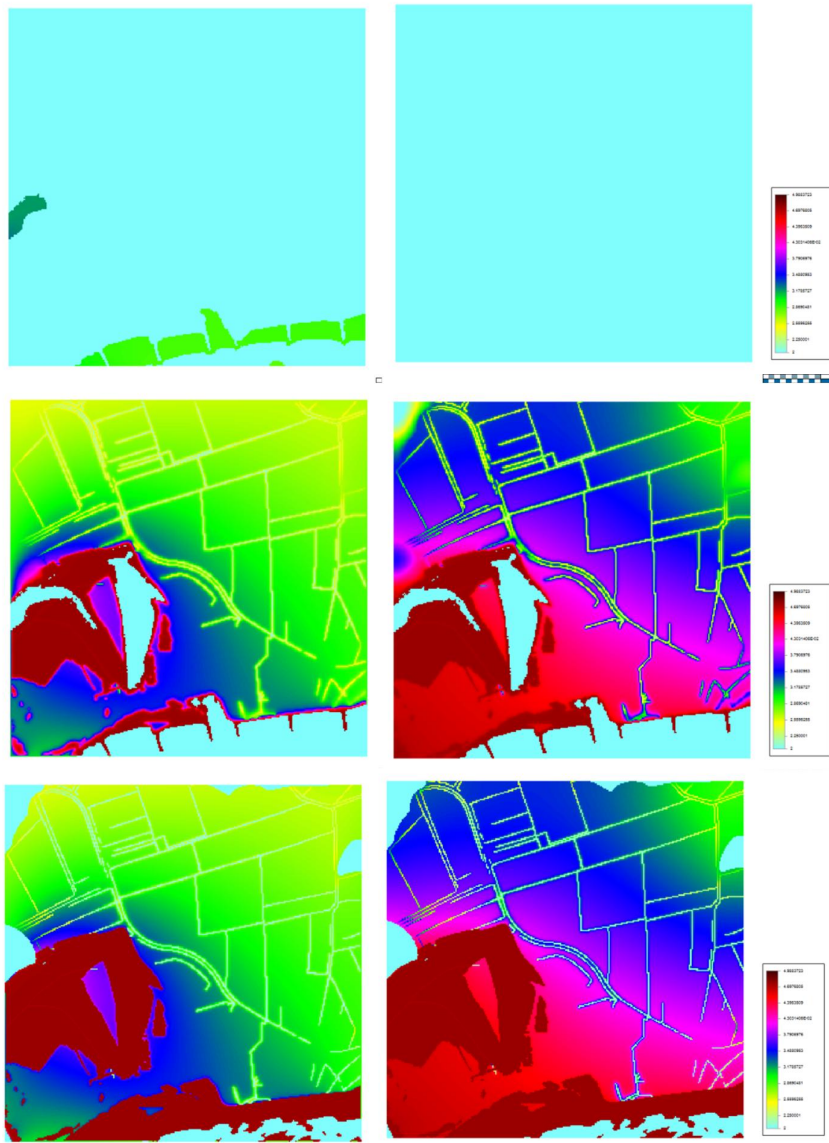
Figuur 3.16 Stijg­hoogte­verloop peil­buizen TG175 volgens een Modflow berekening.



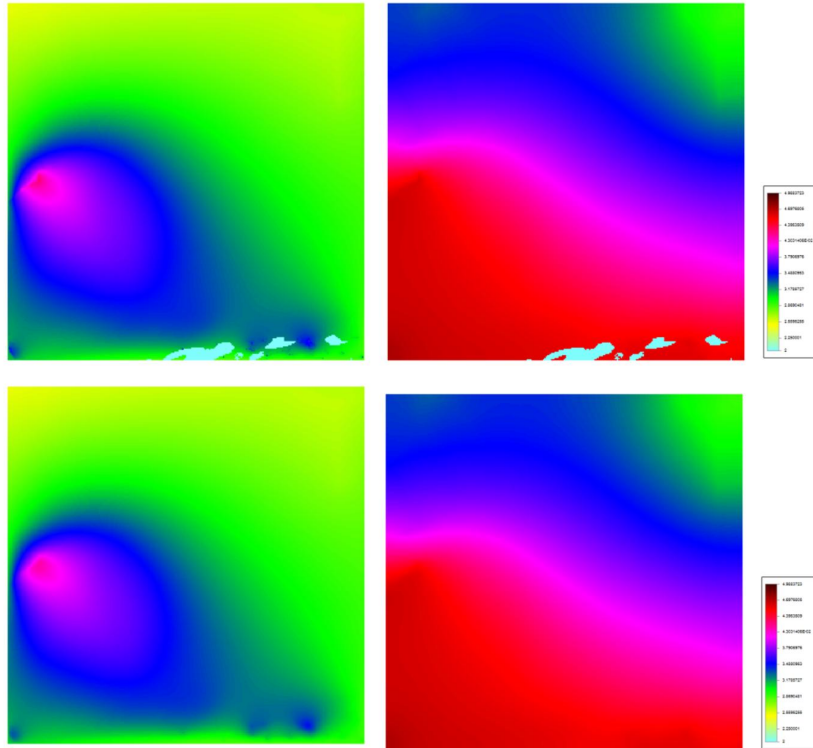
Figuur 3.17 Stijg­hoogte­verloop waterspanningsmeters TG175 volgens een Modflow berekening.

6 september 2017, definitief

Voor het bovenstroomse profiel TG175 geeft een gekoppelde Modflow-MORIA berekening resultaten die beter overeenkomen met gemeten stijghoogtes dan een ontkoppelde Modflow berekening waarbij de verticale randen van het modelgebied gesloten zijn. De stijghoogte in de watervoerende laag aan de randen van het Modflow model die is berekend met het MORIA model is namelijk significant lager dan de stijghoogte volgt uit een ontkoppelde Modflow berekening. Hieruit wordt afgeleid dat de modelgrootte die is afgeschat uit de spreidingslengte onvoldoende is om de invloed van randeffecten teniet te doen. Figuur 3.18 geeft het stijghoogteverloop per laag voor een gekoppelde en een ontkoppelde berekening weer. De afbeeldingen laten zien dat het stijghoogteverloop in de 4^{de} en 5^{de} modellaag ter plaatse van de meetraai wordt sterk bepaald door de stijghoogte aan de modelranden.



6 september 2017, definitief

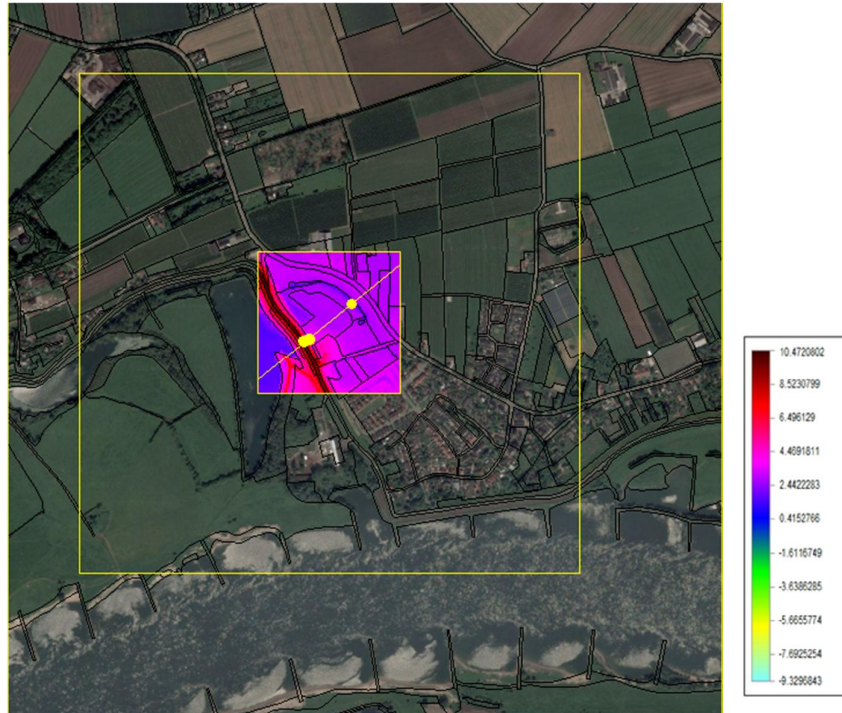


Figuur 3.18 Stijghoogtes Modflow-MORIA berekening (links) Modflow berekening (rechts) TG175 15 januari 2015.

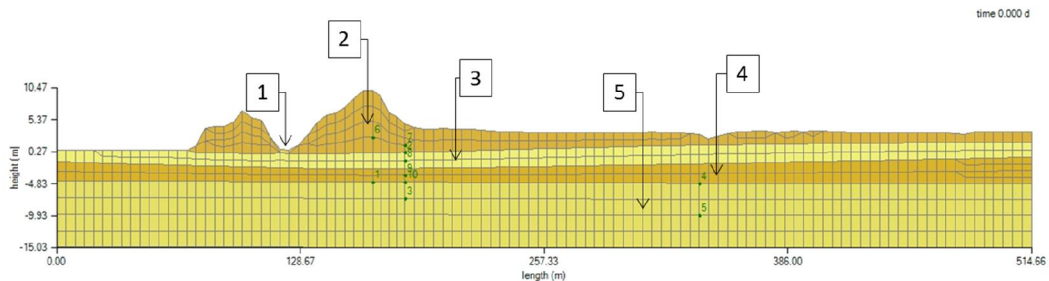
3.3 Lokaal geohydrologisch model

Lokaal in en rond een dijklichaam moet rekening gehouden worden met waterspanningsgeneratie en waterspanningsdissipatie (consolidatie) door vervorming van de ondergrond (TAW 2004). Dit kan de stabiliteit van dijken langs een rivier sterk beïnvloeden. Voor geselecteerde meetlocatie is daarom een driedimensionaal DgFlow deelmodel opgesteld waarmee gekoppelde stromings-deformatie berekeningen zijn gemaakt. De deelmodellen zijn daarbij gekoppeld aan de Modflow modellen waarbij de ondergrondgegevens zijn gedeeld. De DgFlow modellen zijn eveneens op basis van beschikbare waterspanningsmetingen gekalibreerd. De hoogtekaart van het driedimensionale DgFlow model is afgebeeld in Figuur 3.19. De dwarsdoorsnede van het model langs de meetraai is afgebeeld in Figuur 3.20 en het ondergrondmodel is weergegeven in Figuur 3.21.

6 september 2017, definitief



Figuur 3.19 Hoogtekaart DgFlow model TG175



Figuur 3.20 Dwarsprofiel DgFlow model TG175.

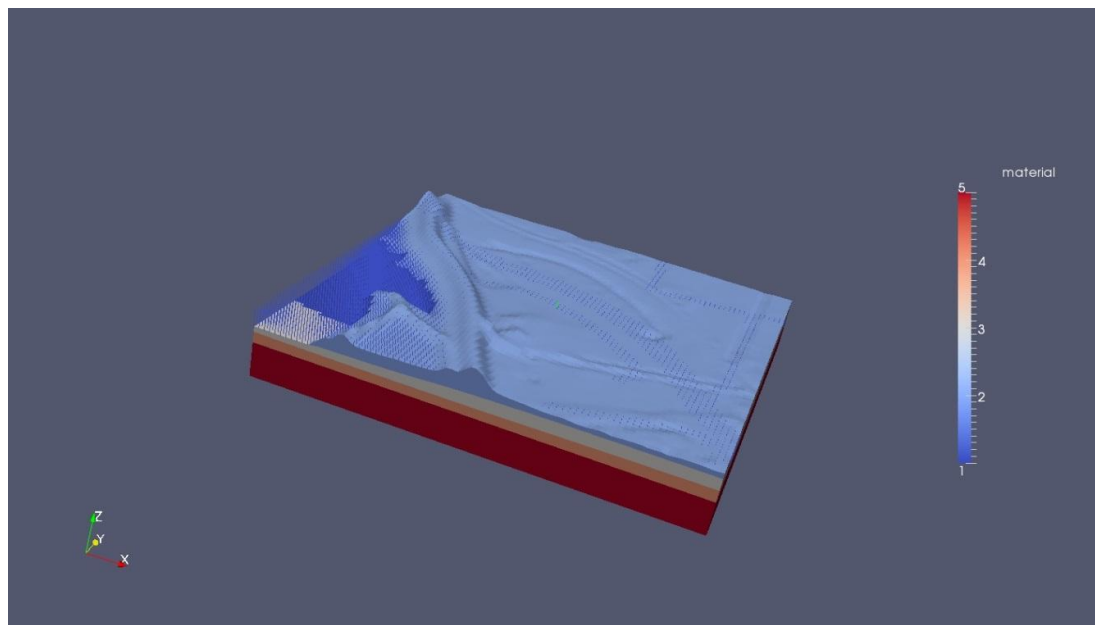
De materiaalparameters van het driedimensionale DgFlow model zijn verzameld in Tabel 3.3. Materiaalparameters als transmissiviteit van een goed doorlatende laag en stromingsweerstand van een slecht doorlatende deklaag zijn door middel van een inverse analyse met het stromingsmodel DgFlow bepaald. Daartoe is een Levenberg-Marquard algoritme aan de code toegevoegd waarmee de parameters volgens een niet-lineaire kleinste kwadraten methode uit gemeten stijghoogtes worden afgeleid. Die bepaling was echter niet triviaal. Ten eerste wordt opgemerkt dat de parameters op basis van stijghoogtes alleen niet uniek bepaald kunnen worden. Dit probleem is in dit onderzoek ondervangen door een regularisatie methode rond initiële parameters toe te passen. Ten tweede zijn er parameters (zoals de doorlatendheid van de dijk zelf) waar het kalibratieproces ongevoelig voor is; een verhoging van de doorlatendheid van het dijkmateriaal geeft geen verandering van berekende stijghoogtes in het goed doorlatend

6 september 2017, definitief

pakket. Als deze parameter belangrijk is voor het bepalen van de stabiliteit van een dijklichaam dan moeten waterspanningen in het dijklichaam zelf worden gemeten.

Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	100	10^{-4}
2	100	10^{-4}
3	0,02	10^{-5}
4	50	10^{-5}
5	100	10^{-5}

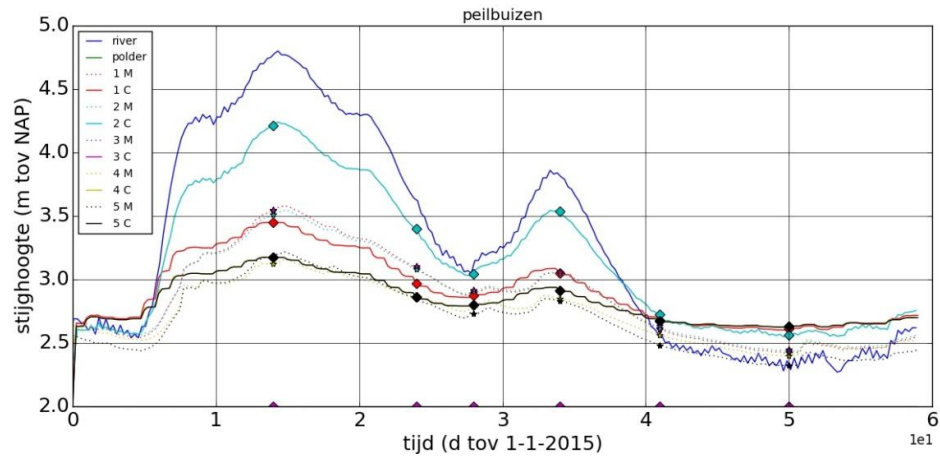
Tabel 3.3 Materiaaleigenschappen DgFlow3D model TG175.



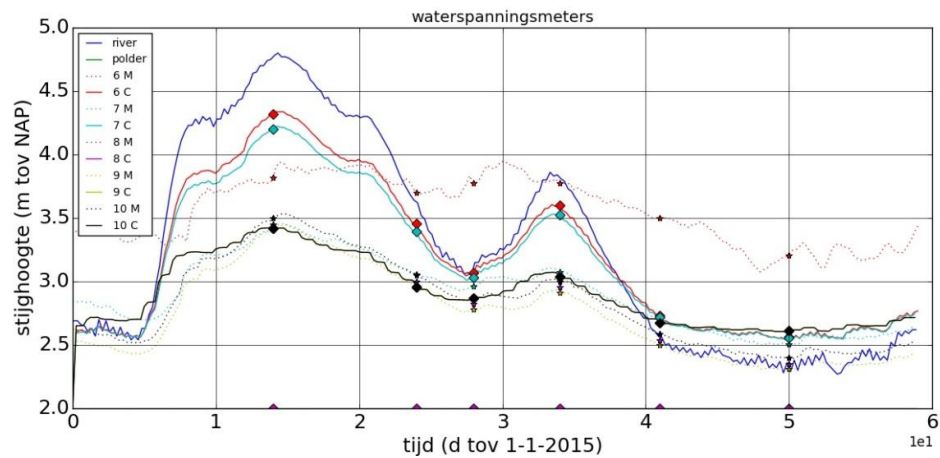
Figuur 3.21 Ondergrondschematisatie DgFlow3D model TG175

Waterspanningsvelden zijn berekend met een gekoppeld DgFlow-Modflow model waarbij de stijghoogte langs de verticale DgFlow modelranden volgt uit de hiervoor beschreven regional Modflow berekening. De DgFlow berekening is uitgevoerd met tijdstappen van 1 uur waarbij de uitwisseling van stijghoogtes op dagbasis plaats vindt. Figuur 3.22 en Figuur 3.23 geven het stijghoogteverloop weer in peilbuizen en waterspanningsmeters dat volgt uit een gekoppelde Modflow-DgFlow berekening. De resultaten zijn vervolgens vergeleken met uitkomsten van een DgFlow berekening waarbij de verticale modelranden gesloten zijn en water alleen door de rivier en de poldersloten het model in en uit kan stromen. In Figuur 3.24 en Figuur 3.25 zijn de resultaten van de ontkoppelde driedimensionale DgFlow berekening afgebeeld.

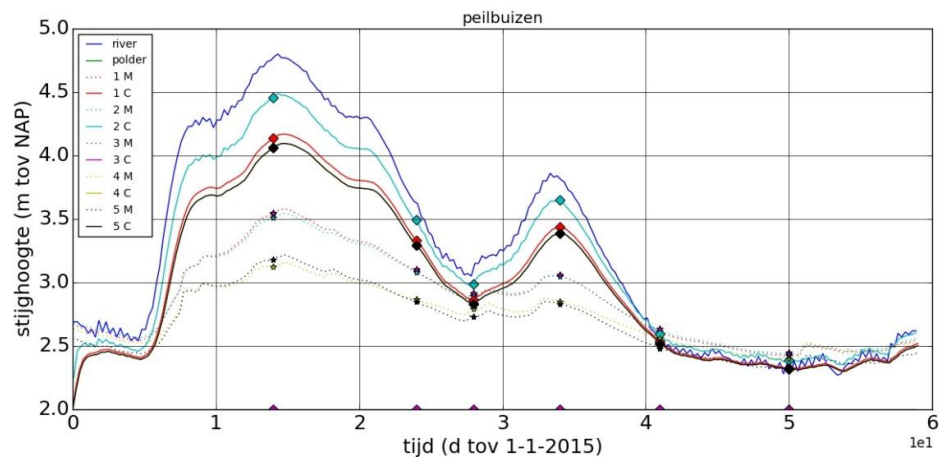
6 september 2017, definitief



Figuur 3.22 Stijg­hoogte­verloop peil­buizen TG175 vol­gens een DgFlow3D-Modflow bere­kening.

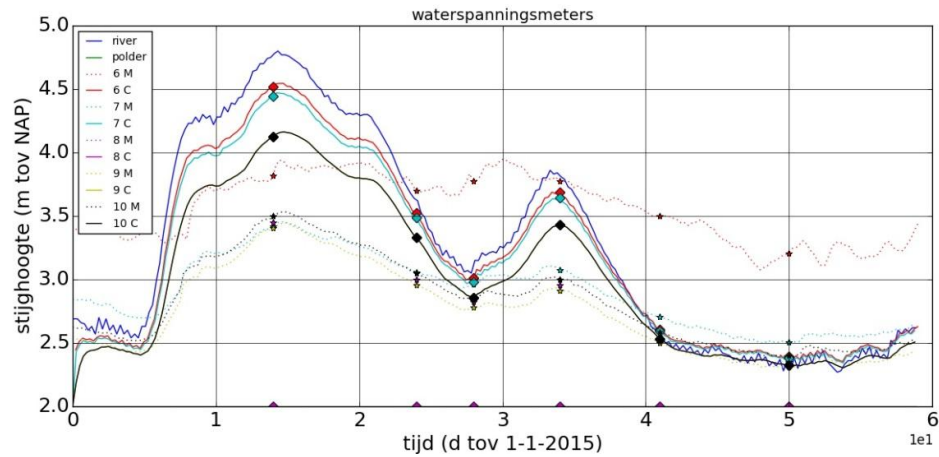


Figuur 3.23 Stijg­hoogte­verloop waterspannings­me­ters TG175 vol­gens een DgFlow3D-Modflow bere­kening.



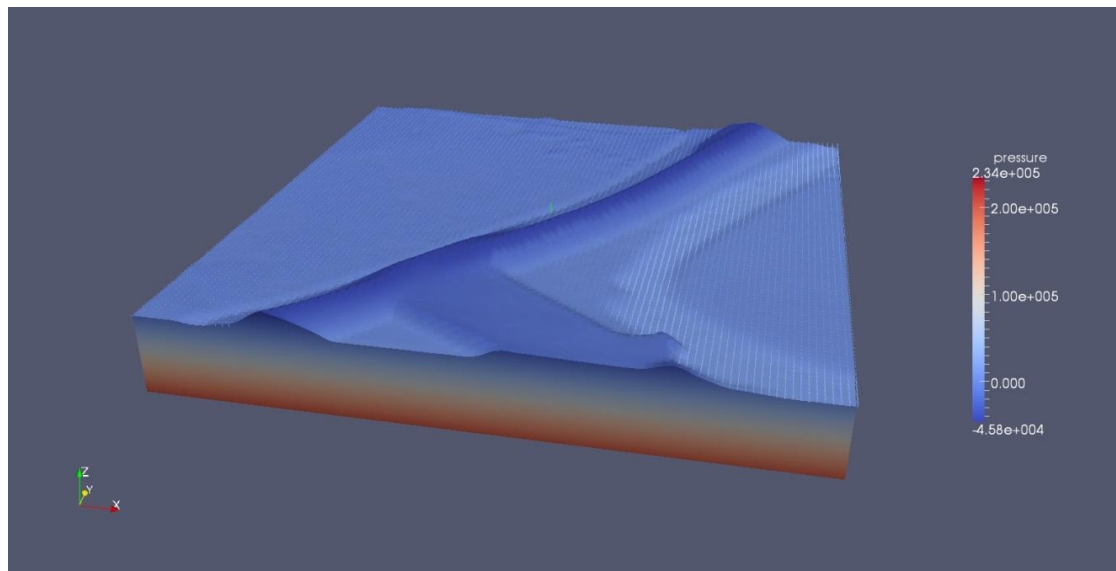
Figuur 3.24 Stijg­hoogte­verloop peil­buizen TG175 vol­gens een DgFlow3D bere­kening.

6 september 2017, definitief



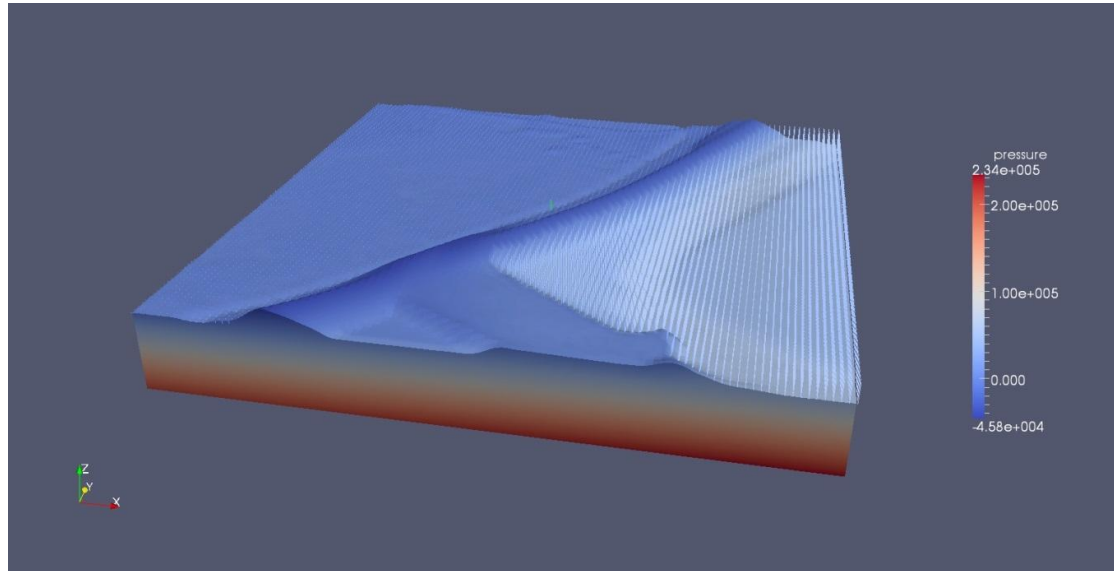
Figuur 3.25 Stijghoogteverloop waterspanningsmeters TG175 volgens een DgFlow3D.

Het modelgebied voor de onderzoekslocatie TG175 waarmee driedimensionale DgFlow berekeningen zijn uitgevoerd is niet groot genoeg om de voeding van grondwater door de rivierbodem te beschrijven. Een gekoppelde Modflow-DgFlow berekening geeft daarom betere resultaten dan een DgFlow berekening waarbij de verticale modelranden gesloten zijn. Ter illustratie geeft Figuur 3.26 de berekende waterspanningen bij een rivierwaterstand van NAP +6,20 m weer en presenteert Figuur 3.27 het waterspanningsverloop bij maatgevend hoog water van NAP + 9,70 m.



Figuur 3.26 Waterspanningen TG175 DgFlow3D berekening rivierwaterstand NAP +6,20 m.

6 september 2017, definitief



Figuur 3.27 Waterspanningen TG175 DgFlow3D berekening maatgevend hoogwater NAP +9,70 m.

Bij tweedimensionale DgFlow berekeningen worden polderrandvoorwaarden toegekend aan de bovenrand van het model en niet aan de sloten zoals bij Modflow of DgFlow3D het geval was. Aan verticale randen kan het rivierpeil en het polderpeil (gedempt) worden toegekend. Sijpelrandvoorwaarden worden toegekend aan het dijklichaam en aan een deel van de polderrand waarmee uitstroom van water bij atmosferische condities wordt voorgeschreven en instroom wordt voorkomen. In Modflow wordt deze conditie als drain condities voorgeschreven. Bij de tweedimensionale DgFlow simulaties wordt de stromingsweerstand van rivierbodem toegekend aan elementen in het rivierbed en niet verdisconteerd met randelementen. In Figuur 3.13 en Figuur 3.20 zijn twee dwarsprofielen afgebeeld die volgden als dwarsdoorsnede in het modeldomein van Modflow en DgFlow. De tweedimensionale berekeningen zijn uitgevoerd in de dwarsdoorsnede van het Modflow model met een lengte van 1700 m. De materiaalparameters die zijn bepaald met de kalibratie van het tweedimensionale DgFlow model zijn opgenomen in Tabel 3.4.

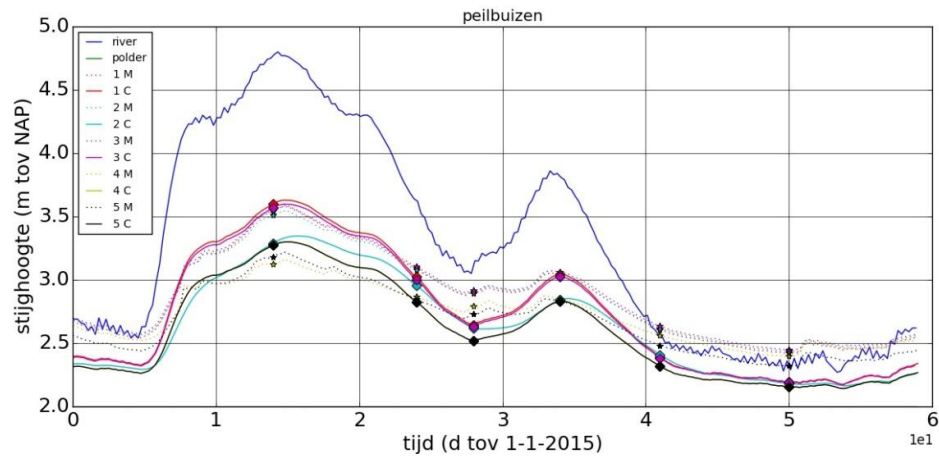
Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	100	10^{-4}
2	0,01	10^{-4}
3	0,02	10^{-5}
4	50	10^{-5}
5	100	10^{-5}

Tabel 3.4 Materiaaleigenschappen DgFlow2D model TG175.

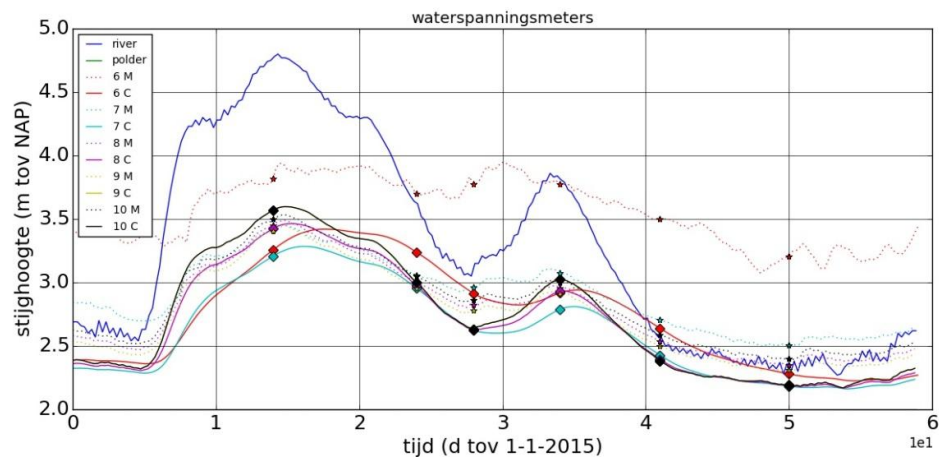
In de tweedimensionale snede zijn twee typen berekeningen gemaakt; gekoppelde stromings-deformatie en ontkoppelde stromingsberekeningen, om de invloed van waterspanningsgeneratie op de ontwikkeling van de stijghoogte in de ondergrond vast te

6 september 2017, definitief

stellen. Figuur 3.28 geeft het stijghoogteverloop weer dat volgt uit een gekoppelde stromings-deformatie berekening ter plaatse van de peilbuizen en Figuur 3.29 laat de stijghoogteontwikkeling zien bij de waterspanningsmeters. De resultaten van een ontkoppelde stromingsberekening zijn weergegeven in Figuur 3.30 en Figuur 3.31.

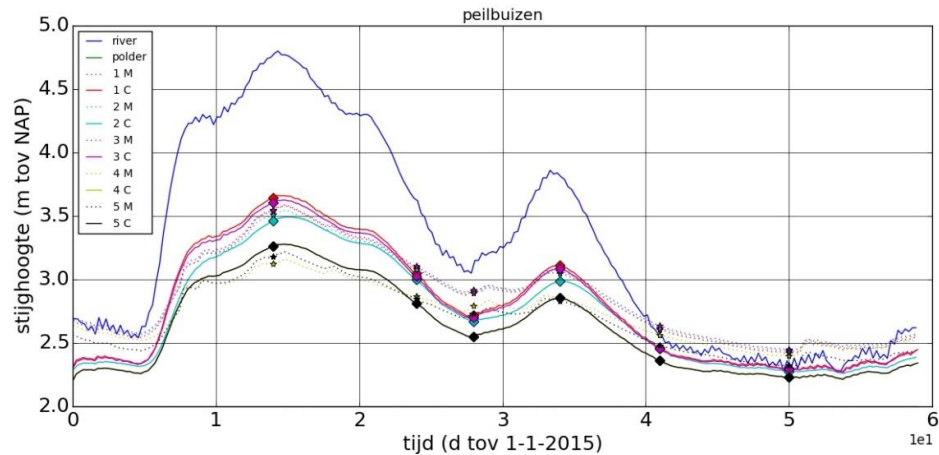


Figuur 3.28 Stijghoogteverloop peilbuizen TG175 volgens een DgFlow2D berekening.

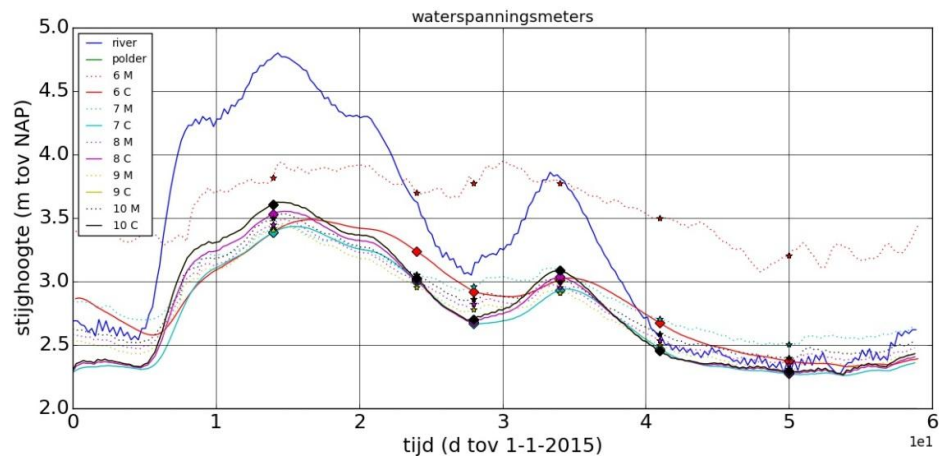


Figuur 3.29 Stijghoogteverloop waterspanningsmeters TG175 volgens een DgFlow2D berekening.

6 september 2017, definitief



Figuur 3.30 Stijghoogteverloop peilbuizen TG175 volgens een DgFlow2Dc berekening.



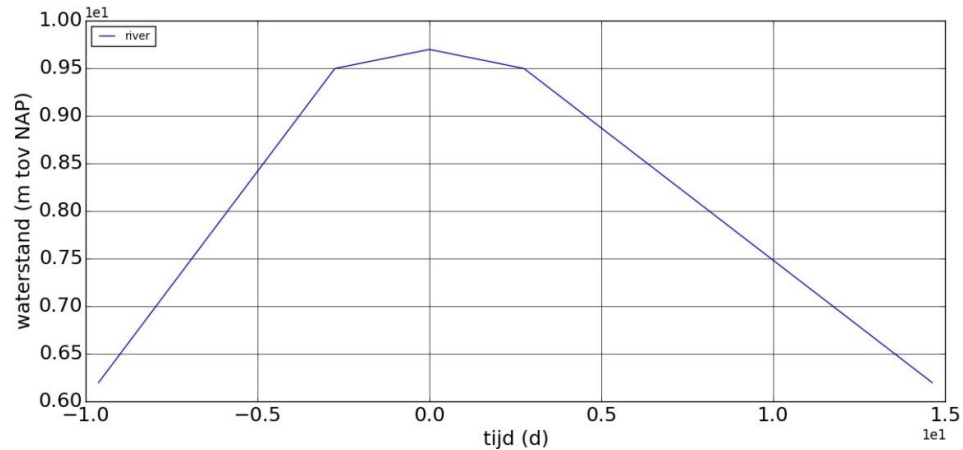
Figuur 3.31 Stijghoogteverloop waterspanningsmeters TG175 volgens een DgFlow2Dc berekening.

Voor tweedimensionale DgFlow berekeningen is de doorlatendheid van laag 3 verhoogd met een factor 2 en is de rivierand direct aan de verticale rand van de watervoerende laag toegekend. De berekende stijghoogtes komen daarmee goed overeen met gemeten stijghoogtes. De gekoppelde stromings-deformatieberekeningen geven nagenoeg dezelfde resultaten als ontkoppelde stromingsberekeningen.

3.4 Geotechnisch model

De maatgevende belasting van het dijklichaam bij hoogwater is bepaald met de hydraulische randvoorwaarden tool die geleverd wordt door de helpdesk van Rijkswaterstaat en ondergebracht is in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium (WBI). De maatgevende hydraulische belasting van profiel TG175 is weergegeven in Figuur 3.32. De hoogwatergolf heeft een duur van 25 dagen en het maximale verschil met het polderpeil bedraagt 9.697 m.

6 september 2017, definitief



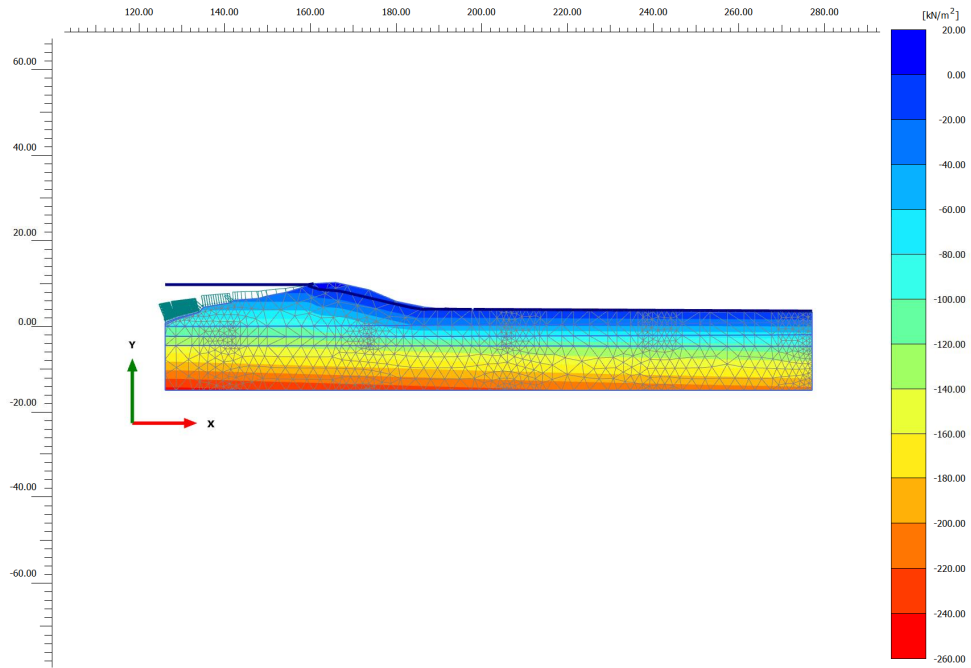
Figuur 3.32 Maatgevende hydraulische belasting TG175.

De hydraulische belasting is opgegeven als randvoorwaarde in het driedimensionale DgFlow model waarna de waterspanningen zijn berekend. De stijghoogtes langs geometrielijnen (laagscheidingen) zijn vervolgens langs de dwarsdoorsnede uit het driedimensionale model gefilterd en opgelegd in Plaxis2D. Het materiaalgedrag van de ondergrond en het dijklichaam is beschreven met het Mohr-Coulomb model (undrained A), waarbij het onverzadigde volumieke gewicht van de grond op $19,5 \text{ kN/m}^3$ is gesteld, voor het verzadigde volumieke gewicht van de grond is een waarde van $20,5 \text{ kN/m}^3$ aangehouden, de cohesie bedraagt 1 kN/m^2 en de hoek van inwendige wrijving is gelijk gesteld aan 30° . Het verkregen waterspanningsveld is afgebeeld in Figuur 3.35. Vervolgens is een stabiliteitsanalyse uitgevoerd waarvan de vervormingsresultaten zijn afgebeeld in Figuur 3.36.

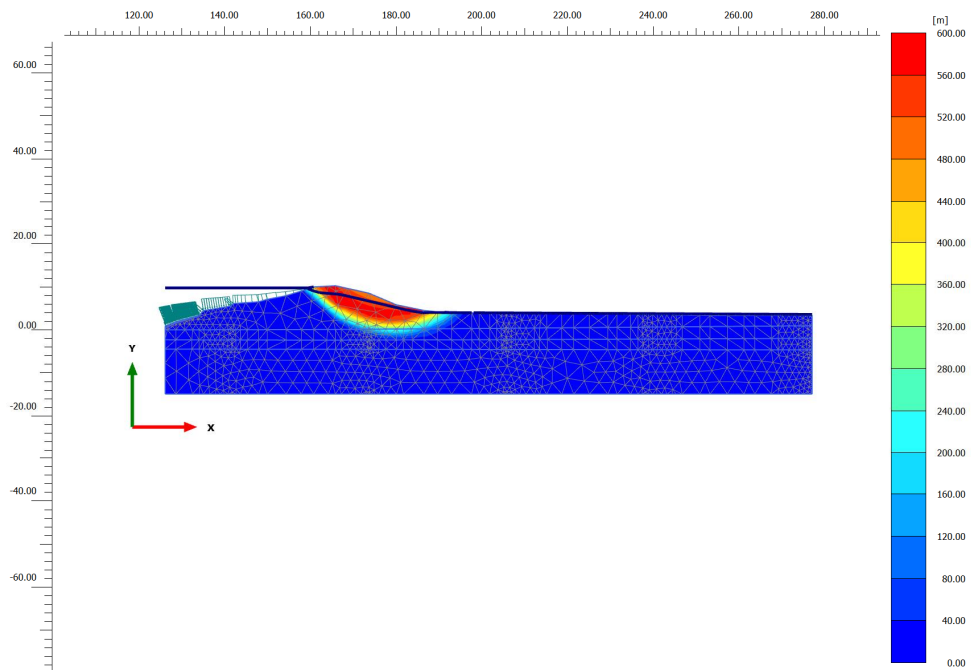
De waterspanningen die volgen uit een tweedimensionale DgFow berekening, met de maatgevende hoogwaterbelasting als randvoorwaarden, zijn volgens dezelfde procedure aan in Plaxis2D opgelegd waarna de veiligheidsfactor bij phi-c reductie is bepaald. De resultaten van deze berekening zijn afgebeeld in Figuur 3.37 en Figuur 3.38.

De veiligheidsfactoren bij maximaal hoogwater (0 d) en twee tijdstappen daarna zijn verzameld in Tabel 3.5. Uit de resultaten wordt geconcludeerd dat berging van grondwater niet tot een verhoging van de veiligheidsfactor leidt. Het tijdsafhankelijke effect is dus te verwaarlozen. De driedimensionale berekening levert wel een lagere waarde van de stabiliteitsfactor. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de lagere ligging van de freatische lijn. Bij de vergelijking van de modeluitkomsten wordt opgemerkt dat de doorlatendheid van de deklaag in het achterland in geval van een tweedimensionale berekening een orde 2 lager is gekozen dan in de driedimensionale berekening. De reden hiervoor is het verschil in het toekennen van polderrandvoorwaarde; bij de driedimensionale berekening wordt de randvoorwaarde in de sloten opgelegd en bij de tweedimensionale berekening wordt de conditie aan de bovenrand toegekend. Het dijk materiaal heeft dezelfde eigenschappen als de deklaag en dat verklaart het verschil in de ligging van de freatische lijn.

6 september 2017, definitief

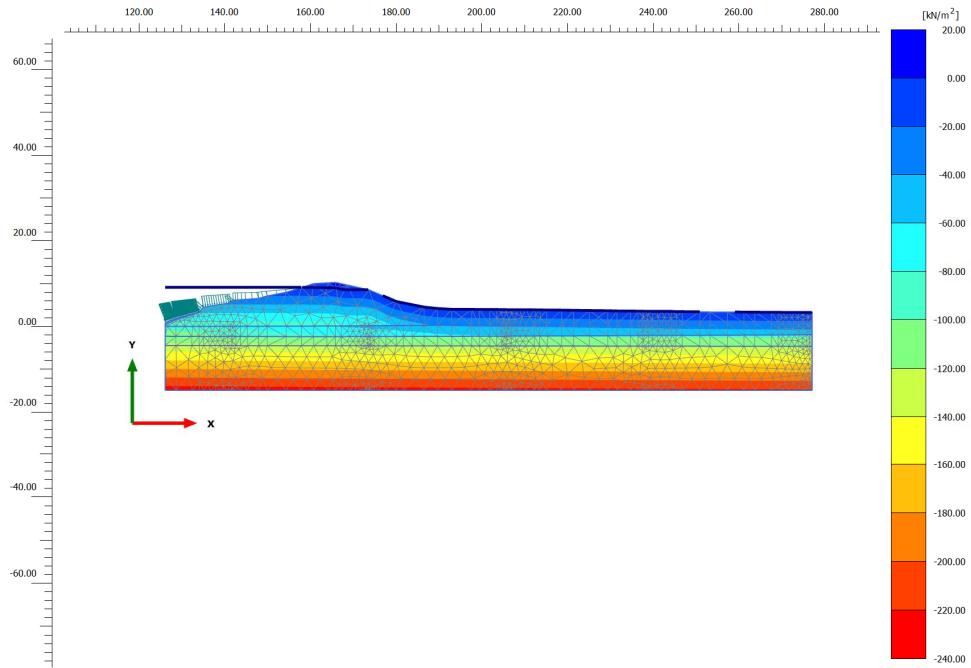


Figuur 3.33 Waterspanningen ontwerpberekening TG175.

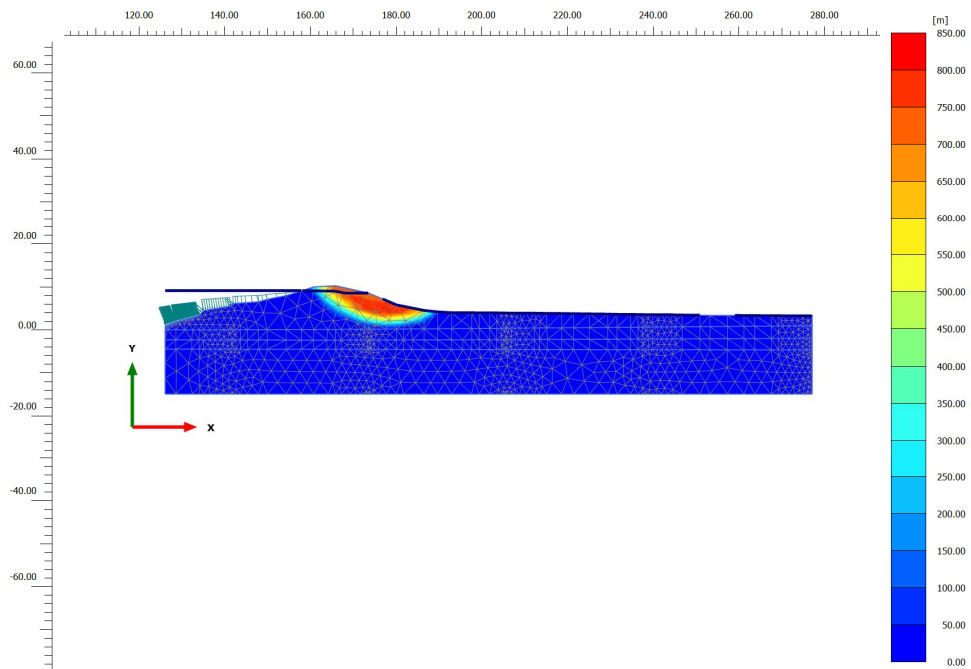


Figuur 3.34 Vervormingen ontwerpberekening na ϕ -c reductie TG175.

6 september 2017, definitief

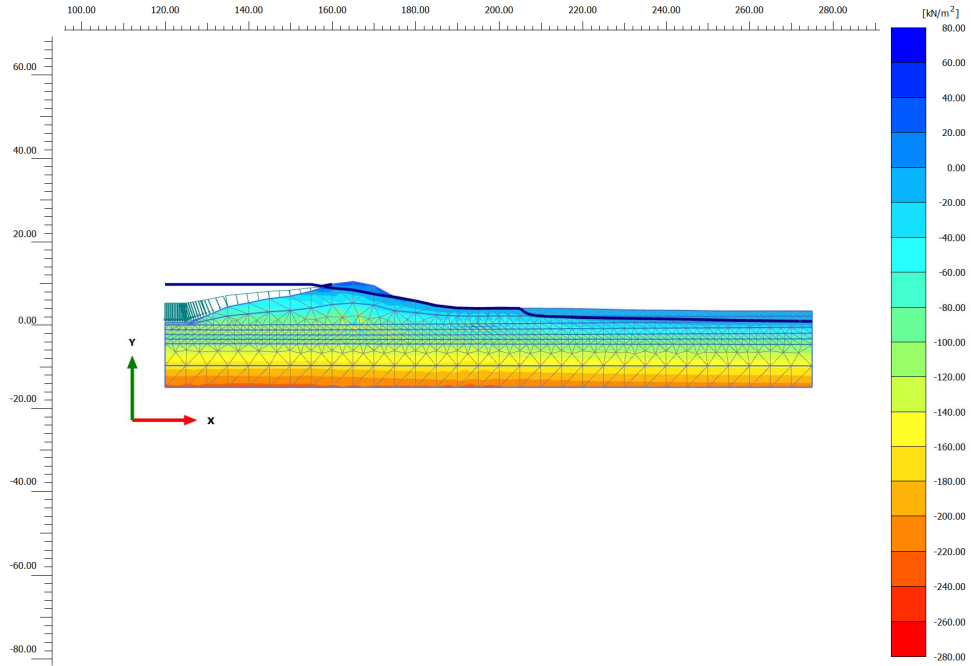


Figuur 3.35 Waterspanningen Plaxis2D-DgFlow3D TG175.

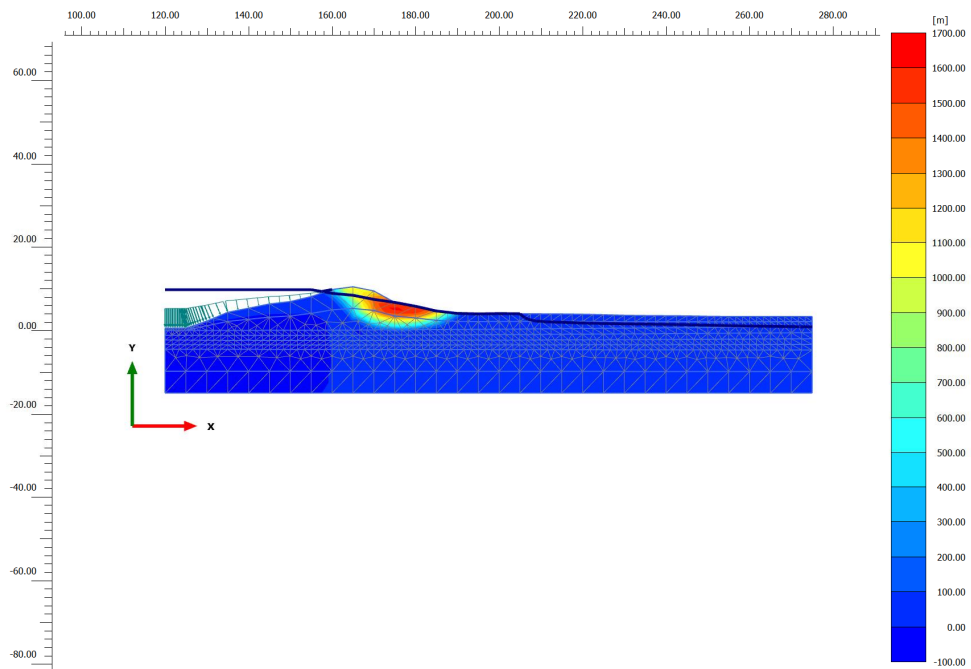


Figuur 3.36 Vervormingen Plaxis2D-DgFlow3D na phi-c reductie TG175.

6 september 2017, definitief



Figuur 3.37 Waterspanningen Plaxis2D-DgFlow2D TG175.



Figuur 3.38 Vervormingen Plaxis2D-DgFlow2D na phi-c reductie TG175.

6 september 2017, definitief

tijd (d)	waterstand (m NAP)	F _{ontwerp} 2D (-)	F _{stat} 2D (-)	F _{tijdsafh} 2D (-)	F _{tijdsafh} 3D (-)
0,000	9,70	1,40	1,33	1,33	1,24
1,000	9,62			1,34	1,25
2,000	9,55			1,34	1,25

Tabel 3.5 Veiligheidsfactoren TG175.

4 Waaldijk Herwijnen

De grondwaterstroming in het onderzoeksgebied 'Waaldijk Herwijnen' heeft een lokaal driedimensionaal karakter door een verlaging van het voorland aan de westzijde van de meetlocatie. Voor deze locatie worden waterspanningen eveneens berekend met de grondwaterstromingsmodellen Modflow en DgFlow en de voorspellingen worden vervolgens vergeleken met stijghoogtemetingen. Hiervoor zijn meetreeksen van vijf drukmeters in peilbuizen en vijf waterspanningsmeters gebruikt. In Figuur 4.1 is een bovenaanzicht van onderzoekslocatie TG356 met de positie van de peilbuizen en de waterspanningsmeters weergegeven.

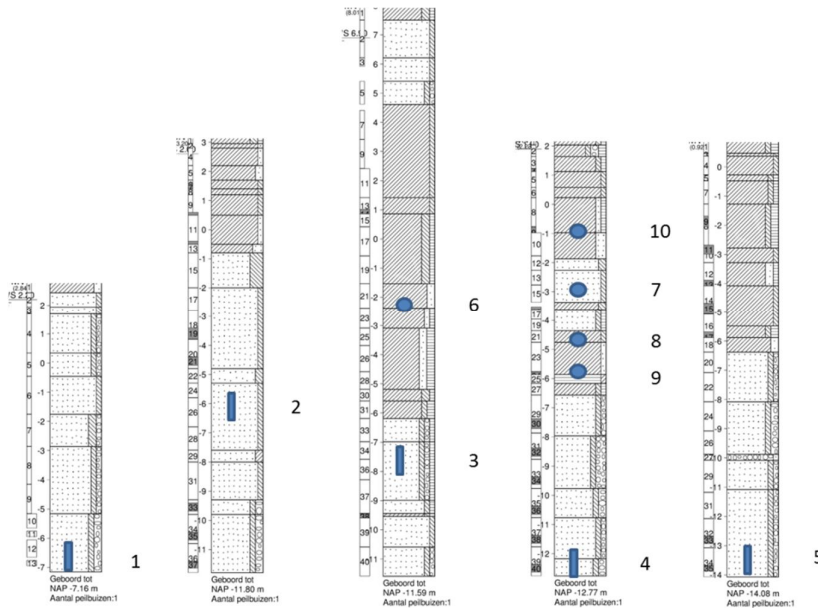


Figuur 4.1 Onderzoekslocatie TG356.

4.1 Waterspanningsmetingen

De grondprofielen waarin de posities van de peilbuisfilters en de waterspanningsmeters zijn aangegeven zijn afgebeeld in Figuur 4.2. De profielen zijn afgeleid uit boringen die in het voorland, de buitenteen, de kruin, de binnenteen en het achterland zijn uitgevoerd. De deklaag in het profiel 'Waaldijk Herwijnen' heeft in het achterland een dikte van 6 meter.

6 september 2017, definitief



Figuur 4.2 Ondergrondprofielen TG355+083_B_VL, TG355+083_B_BUT, TG355+082_B_KR, TG355+093_B_BIT, TG355+019_B_AL.

In Tabel 4.1 zijn de ruimtelijke coördinaten (x,y), de positie van het maaiveld en de boven- en onderzijde van het filter van de peilbuizen en waterspanningsmeters verzameld.

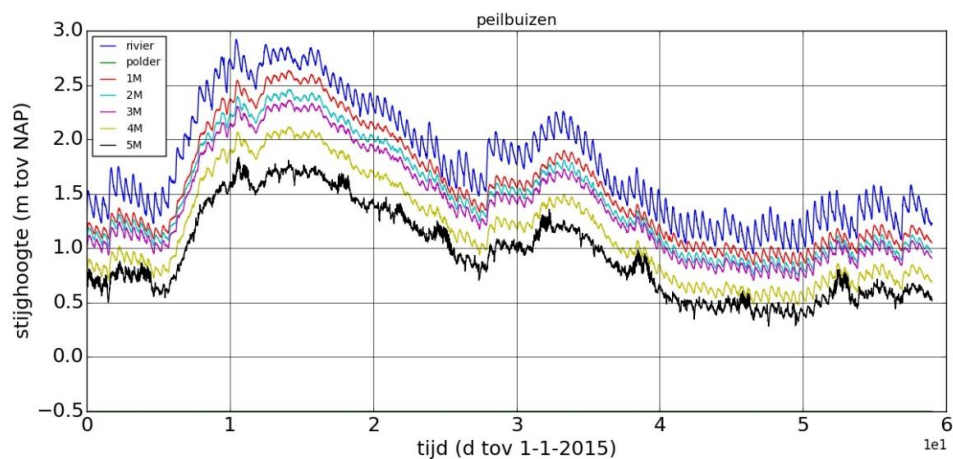
nr.	locatiennaam	x m	y m	mv t.o.v. NAP	cm	bf cm t.o.v. NAP	of cm t.o.v. NAP
1	TG355.+083_P1_VL	134652	426817	283		-617	-717
2	TG355.+083_P1_BUT	134660	426866	320		-580	-680
3	TG355.+082_P1_KR	134662	426882	801		-699	-799
4	TG355.+093_P1_BIT	134654	426903	223		-1177	-1277
5	TG356.+019_P1_AL	134644	427047	92		-1308	-1408
6	TG355.+080_W-187_KR	134664	426882	798		-187	-187
7	TG355.+093_W-328_BIT	134653	426900	257		-328	-328
8	TG355.+095_W-458_BIT	134652	426900	262		-458	-458
9	TG355.+096_W-568_BIT	134650	426900	262		-568	-568
10	TG355.+092_W-074_BIT	134655	426900	256		-74	-74

Tabel 4.1 Meetlocaties TG356.

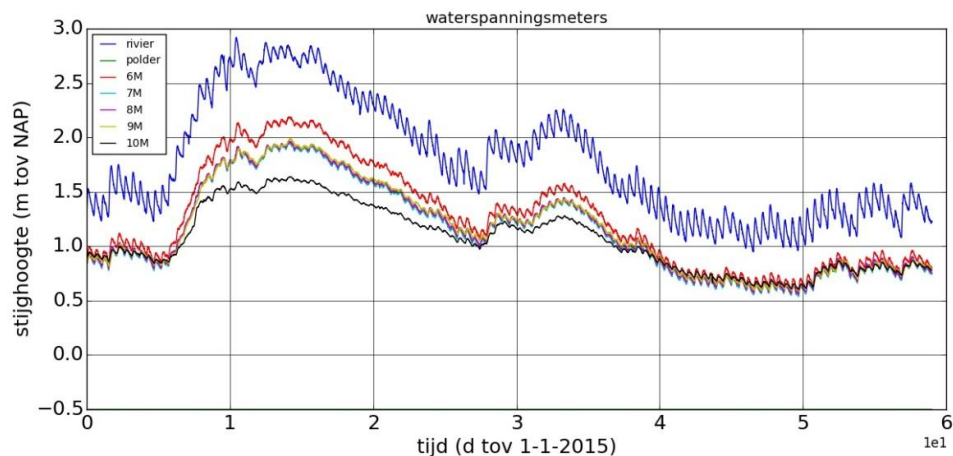
In de periode januari-februari 2015 is een hoogwatergolf met een duur van 25 dagen en amplitude van 1.6 meter ter plaatse van profiel TG356 waargenomen. De metingen zijn uitgevoerd voor het referentieproject 'dijkvak Gorinchem-Waardenburg' (GOWA) en zijn gerapporteerd door Oudega (2015b). Deze hoogwatergolf wordt gevolgd door een

6 september 2017, definitief

tweede golf met een duur van 10 dagen en een amplitude van 0.7 meter. De invloed van het getij is daarbij goed waarneembaar. Stijghoogtemetingen in het pleistocene pakket en de holocene deklaag laten een faseverschuiving van enkele uren zien ten opzichte van gemeten rivierwaterstanden. Daaruit kan geconcludeerd worden dat niet-stationaire effecten door berging in de ondergrond en het dijklichaam ook voor deze locatie klein zijn. Het gemeten stijghoogteverloop in de peilbuizen is voor de maanden januari en februari van het jaar 2015 in Figuur 4.3 afgebeeld. De waterspanningsmetingen zijn weergegeven in Figuur 4.4. In beide figuren is de oorspronkelijke meetfrequentie van 1 meting per 10 minuten gebruikt.



Figuur 4.3 Peilbuismetingen TG356 1 januari 2015 tot 1 maart 2015 (meetfrequentie 1/10 min).

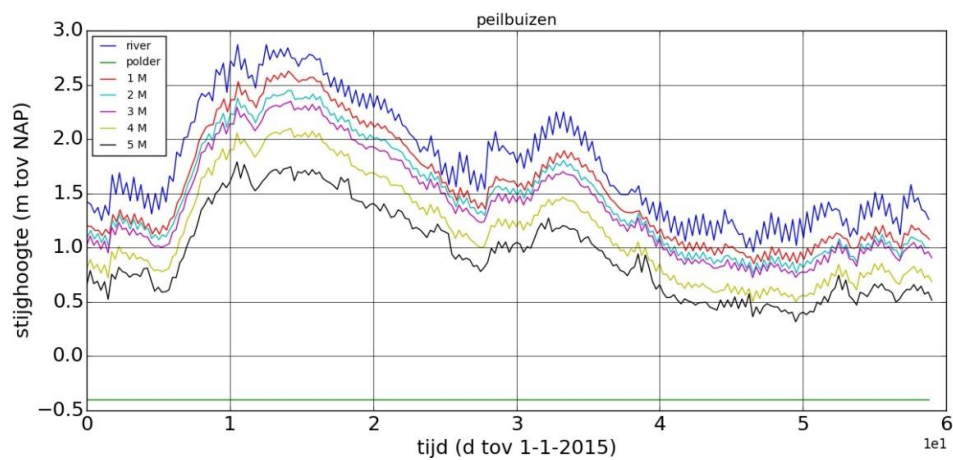


Figuur 4.4 Waterspanningsmetingen TG356 1 januari 2015 tot 1 maart 2015 (meetfrequentie 1/10 min).

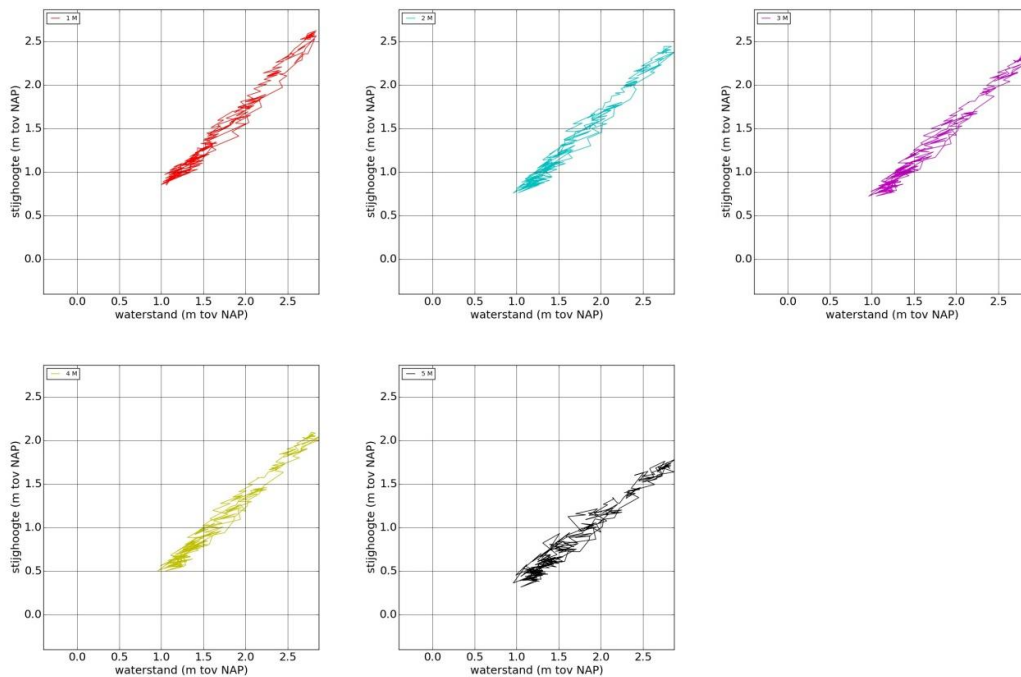
Figuur 4.5 geeft het stijghoogteverloop in de peilbuizen weer dat is gebruikt voor het kalibreren van de rekenmodellen. De frequentie is gereduceerd tot 1 meting per 6 uur. In Figuur 4.6 is het stijghoogteverloop per peilbuis als functie van de buitenwaterstand afgebeeld. In deze figuren representeert de scheefstand van de lijnen de mate van demping (stationair en tijdsafhankelijk) en de hysteresis geeft de mate van vertraging (tijdsafhankelijk) aan. In peilbuis 1, die geplaatst is in het voorland, wordt bij een

6 september 2017, definitief

waterstand van NAP +2,50 m een stijghoogte van NAP +2,15 m waargenomen bij een verhoging van de rivierstand en een stijghoogte van NAP +2,30 m afgelezen bij een neergaand rivierpeil. De gemiddelde demping is dus 28 cm. Het verschil in stijghoogte bij verlagen en verhogen van het rivierpeil is 15 cm. In peilbuis 4, die zich in de binnenteen bevindt, is de stijghoogte NAP +1,80 m bij een verhoging van het rivierpeil en NAP +1,90 m bij een verlaging van het rivierpeil tot een waterstand van NAP + 2,50 m. In peilbuis 4 bedraagt de demping 70 cm en is de hystereze door tijdsafhankelijke grondwaterstroming 10 cm.



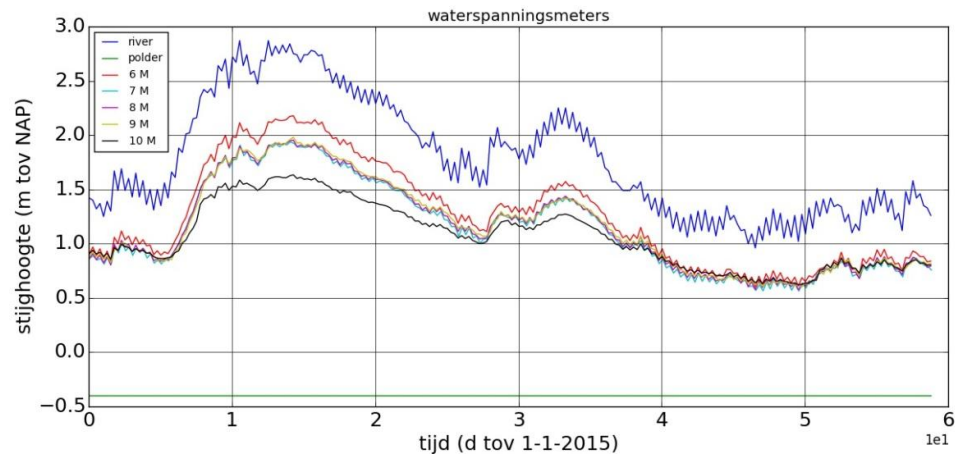
Figuur 4.5 Peilbuismetingen TG356 1 januari 2015 tot 1 maart 2015 (meetfrequentie 1/6 uur).



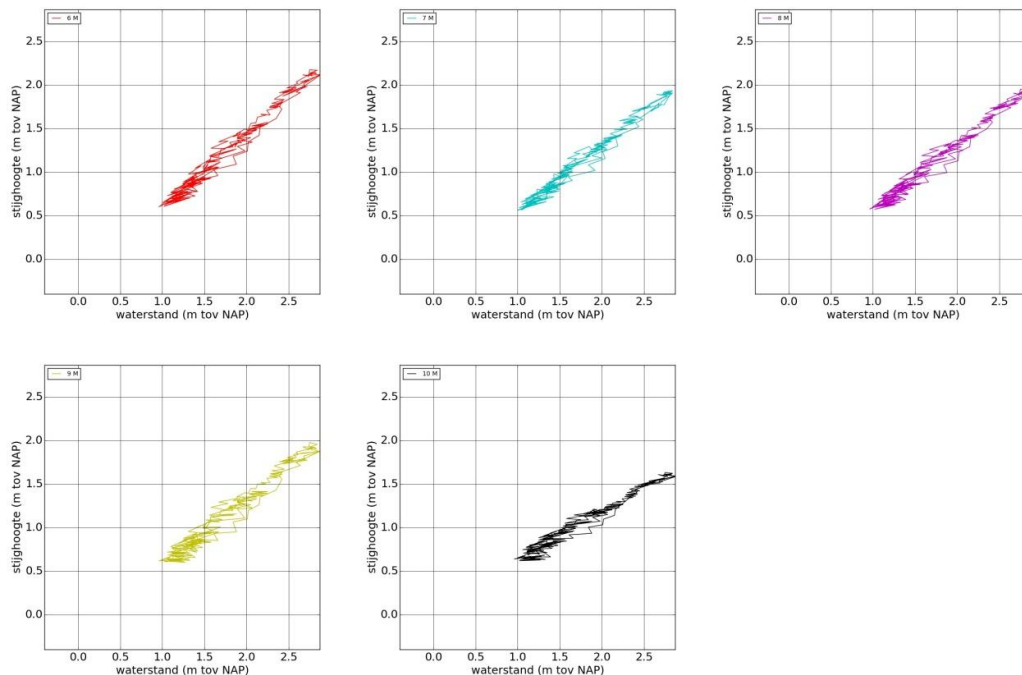
Figuur 4.6 Peilbuismetingen TG356 1 januari 2015 tot 1 maart 2015 als functie van de buitenwaterstand.

6 september 2017, definitief

Het stijghoogteverloop in de waterspanningsmeters is weergegeven in Figuur 4.7 en Figuur 4.8. In waterspanningsmeters 7 en 8 in de binnenkruin varieert de stijghoogte tussen NAP +1,65 m en NAP +1,70 m bij een rivierwaterstand van NAP +2,50 m. De invloed van berging is dus zeer gering.



Figuur 4.7 Waterspanningsmetingen TG356 1 januari 2015 tot 1 maart 2015 (meetfrequentie 1/6 uur).

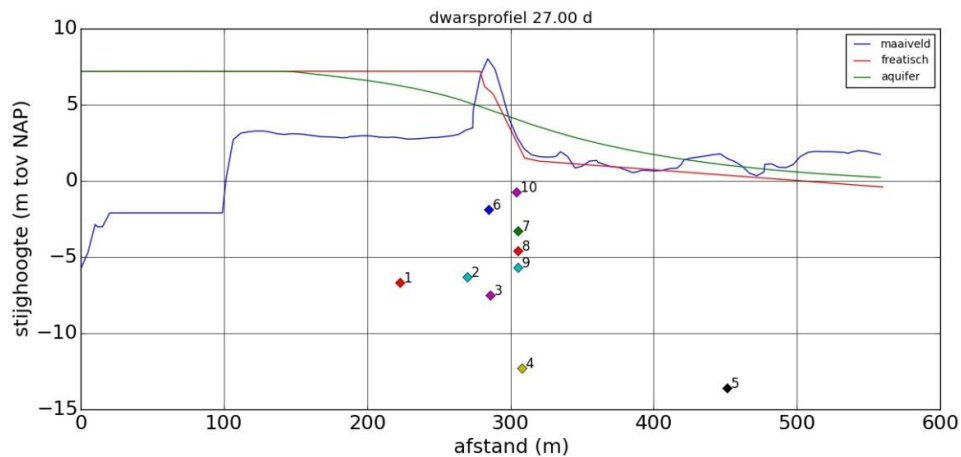


Figuur 4.8 Waterspanningsmetingen TG356 1 januari 2015 tot 1 maart 2015 als functie van de buitenwaterstand.

In Figuur 4.9 is het stijghoogteverloop dat volgt uit de procedure die in bijlage B.2 van de leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken TAW (1985) wordt beschreven, afgebeeld. Het maatgevend hoog water is daarbij op 7,2 m en het polderpeil op -0,4 m gesteld. De lengte van het voorland bedraagt 130 m met een spreidingslengte van 70 m en de lengte van het achterland is 2000 m met een spreidingslengte van 130 m. De basis van het dijklichaam heeft

6 september 2017, definitief

een afmeting van 35 m en de transmissiviteit van de aquifer bedraagt 1250 m²/d. Het freatisch vlak is bepaald met de procedure die in bijlage 1 (b1.3.3) van het technisch rapport waterspanningen bij dijken (TRW 2004) is voorgesteld.

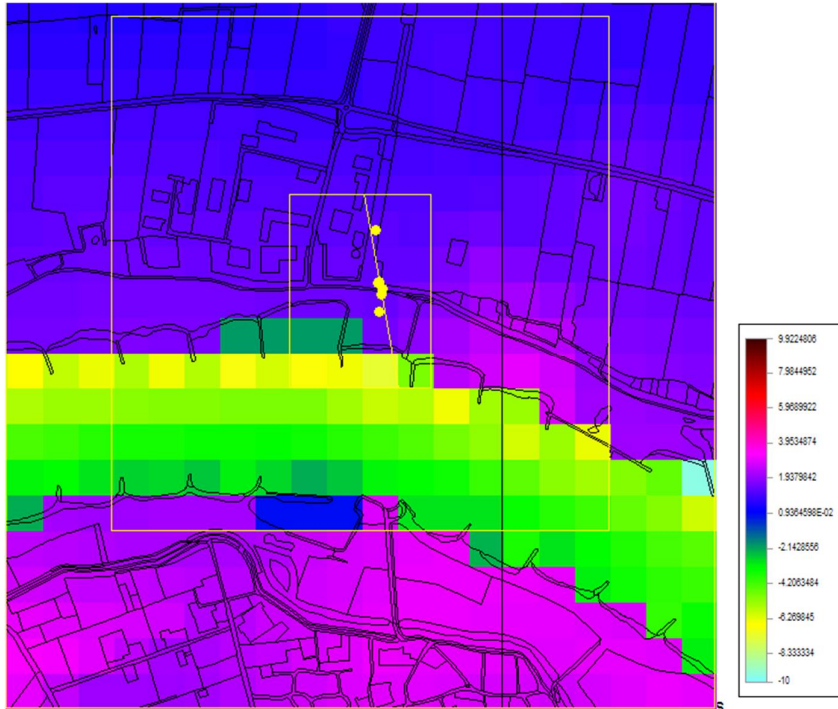


Figuur 4.9 Stijghoogteverloop TG356 volgens ontwerprichtlijn.

4.2 Regionaal geohydrologisch model

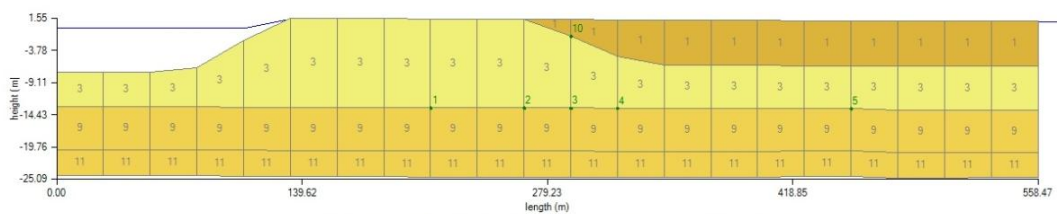
Uit de dikte van de deklaag en de doorlatendheid van het materiaal waaruit de laag is opgebouwd is de stromingsweerstand van 463 dagen afgeleid. Uit deze stromingsweerstand en de transmissiviteit van de ondergelegen goed doorlatende zandlaag volgt een spreidingslengte van 481 m waaruit vervolgens een modelgrootte van 1,4 km is geschat. In Figuur 4.10 is de hoogtekkaart afgebeeld die is gebruikt voor het opstellen van het MORIA model en zijn de modelgebieden aangegeven die worden gebruikt bij de Modflow en DgFlow berekeningen. Het Modflow model heeft een afmeting van 1400 bij 1450 meter en ligt in kaartvlak (133900, 426200) tot (135300, 427650). Het DgFlow model heeft een afmeting van 400 bij 550 meter en ligt in kaartvlak (134400, 426600) tot (134800, 427150).

6 september 2017, definitief



Figuur 4.10 Hoogtekaart MORIA model TG356.

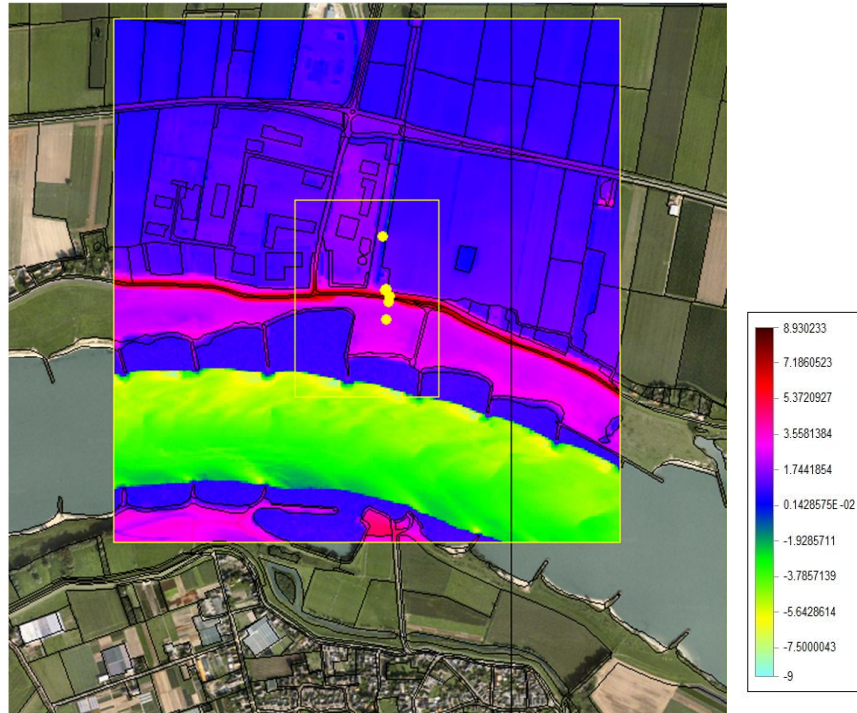
Het ondergrondprofiel dat uit het MORIA model volgt voor de meetraai die in Figuur 4.10 is afgebeeld is weergegeven in Figuur 4.11. Tot een diepte van NAP -25,00 m zijn daarin 4 lagen aanwezig: 1, 3, 9 en 11, het dijklichaam ontbreekt.



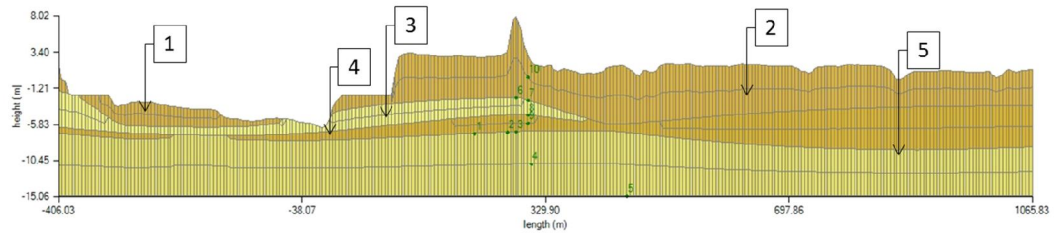
Figuur 4.11 Dwarsdoorsnede MORIA model TG356.

In Figuur 4.12 is de hoogtekaart afgebeeld die de bovenbegrenzing van het Modflow model vormt. De resolutie van 25 bij 25 meter die gebruikt wordt voor het MORIA model is daarmee verhoogt tot een resolutie van 1 bij 1 meter. De dwarsdoorsnede lang de meetraai is afgebeeld in Figuur 4.13.

6 september 2017, definitief



Figuur 4.12 Hoogtekaart Modflow model TG356.



Figuur 4.13 Dwarsprofiel Modflow model TG356.

De parameterwaarden van de lagen die aan het Modflow model zijn toegekend zijn samengevat in Tabel 4.2.

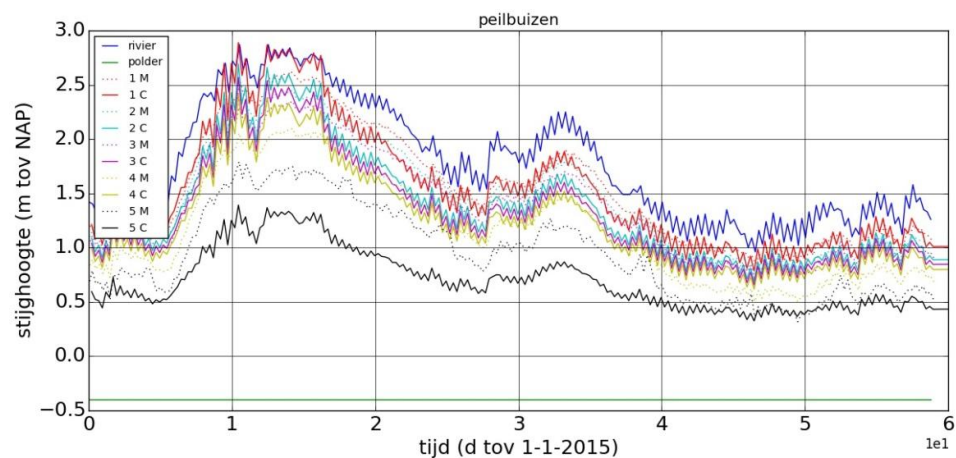
Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	100	10^{-4}
2	0,01	10^{-4}
3	100	10^{-5}
4	50	10^{-5}
5	50	10^{-5}

Tabel 4.2 Materiaaleigenschappen Modflow model TG356.

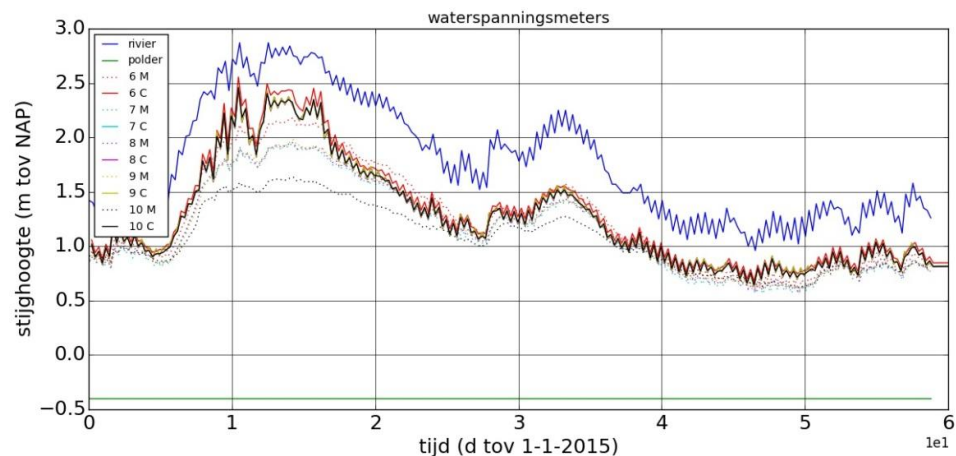
Het stijghoogteverloop dat volgt uit een gekoppelde Modflow-MORIA berekeningen ter plaatse van de peilbuizen is afgebeeld in Figuur 4.14 en het stijghoogteverloop bij de

6 september 2017, definitief

waterspanningsmeters is afgebeeld in Figuur 4.15. Bij deze berekening vindt vijf maal een uitwisseling van stijghoogtes plaats tussen MORIA en Modflow over een periode van 2 maanden. Het stijghoogteverloop dat volgt uit een Modflow berekening, waarbij de verticale randen ondoorlatend verondersteld worden, is afgebeeld in Figuur 4.16 en Figuur 4.17. De gekoppelde Modflow-MORIA berekeningen geven nagenoeg hetzelfde resultaat als de ontkoppelde Modflow berekeningen; de modelgebieden zijn dus groot genoeg gekozen waardoor de stijghoogtes aan de verticale modelranden de berekende stijghoogtes in de doorsnede niet significant beïnvloeden.

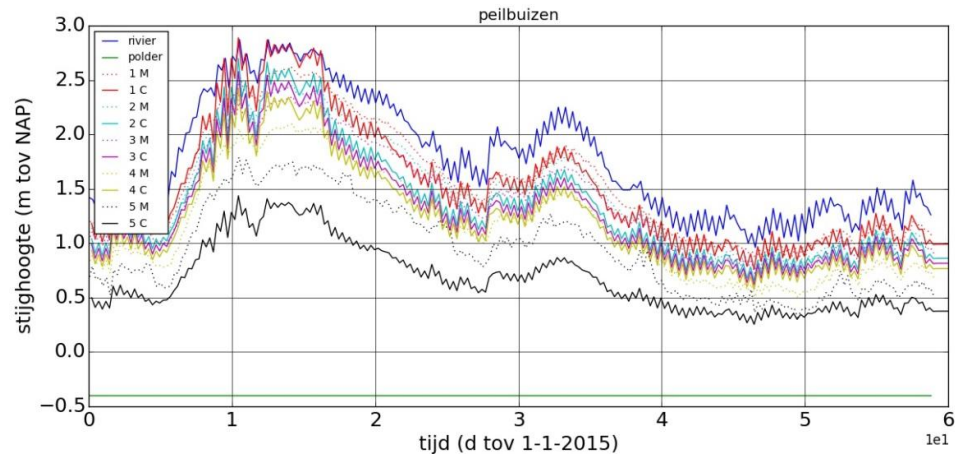


Figuur 4.14 Stijghoogteverloop peilbuizen TG356 volgens een Modflow-MORIA berekening.

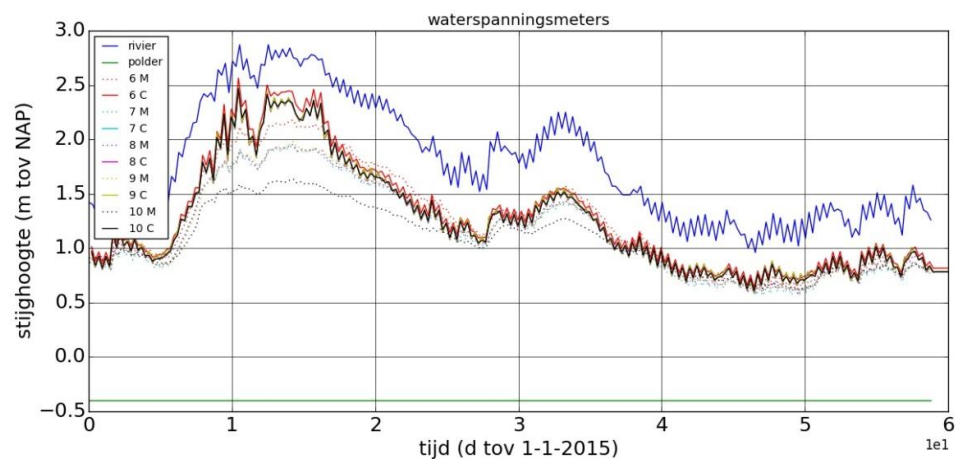


Figuur 4.15 Stijghoogteverloop waterspanningsmeters TG356 volgens een Modflow-MORIA berekening.

6 september 2017, definitief



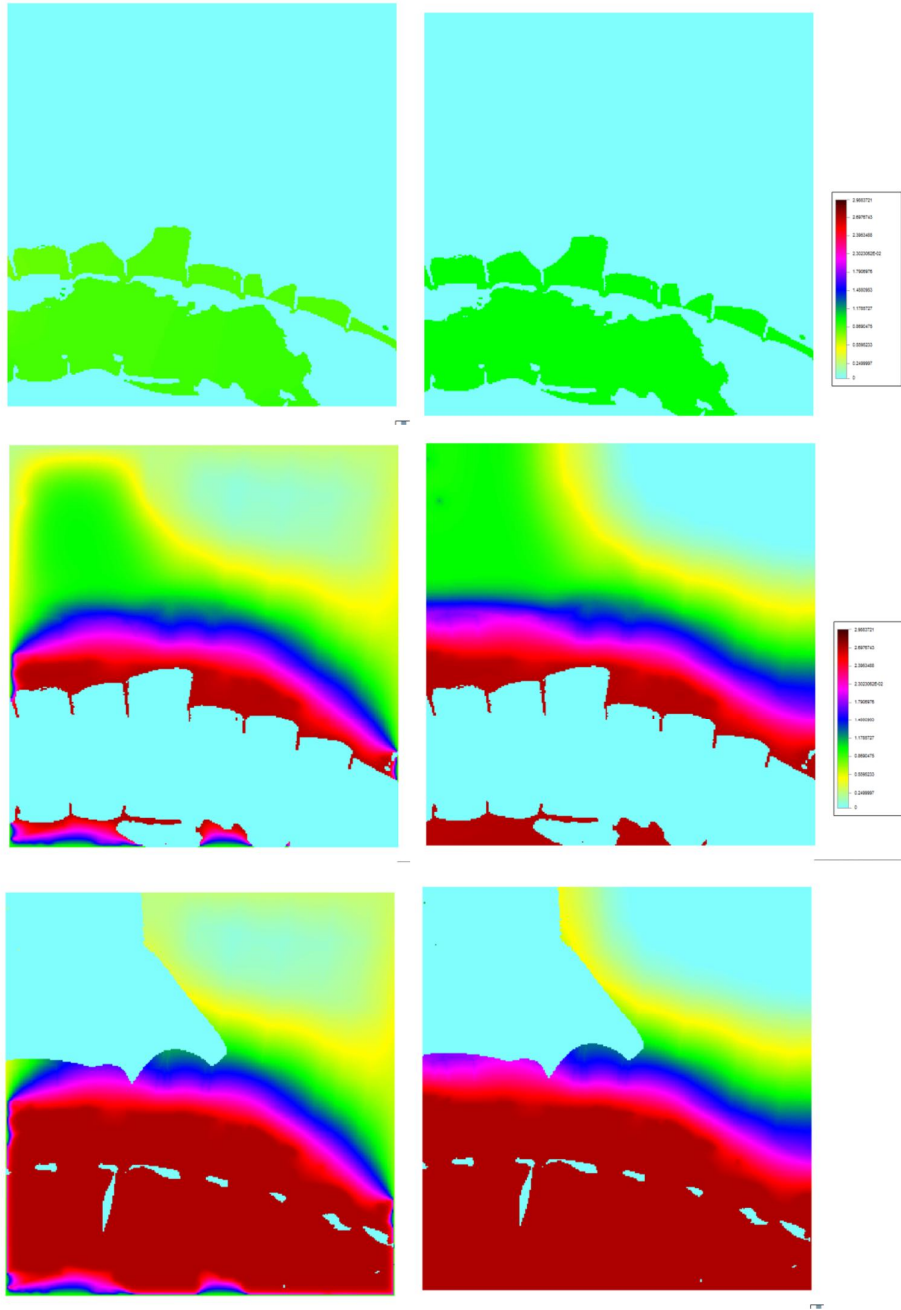
Figuur 4.16 Stijghoogteverloop peilbuizen TG356 volgens een Modflow berekening.



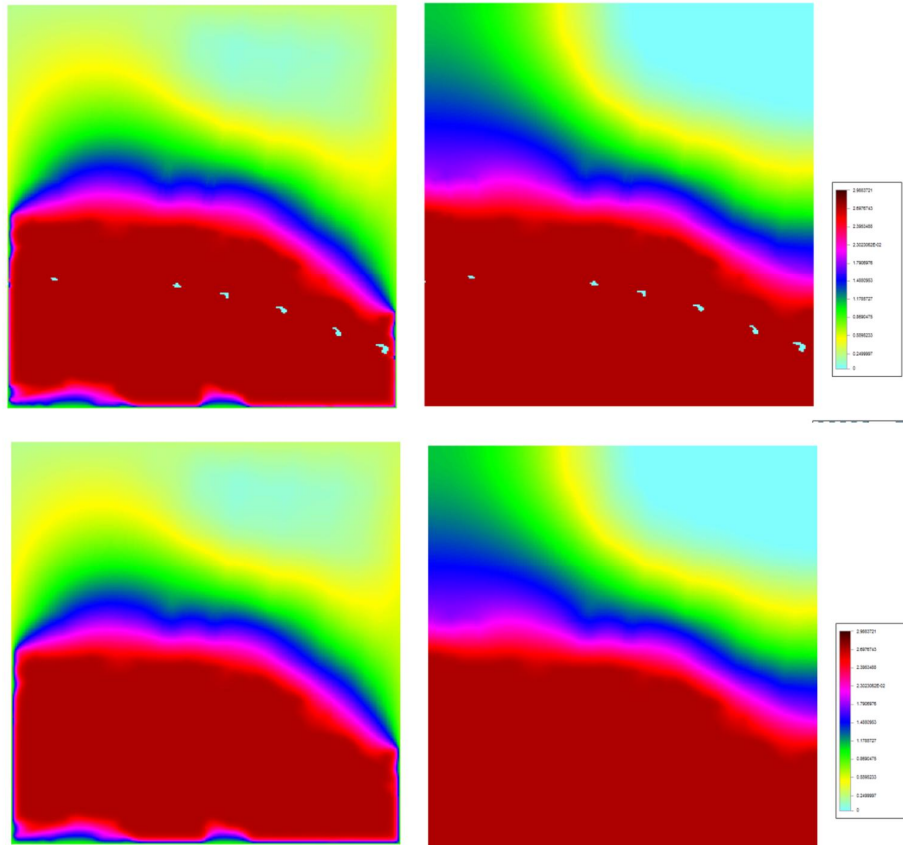
Figuur 4.17 Stijghoogteverloop waterspanningsmeters TG356 volgens een Modflow berekening.

In Figuur 4.18 is het stijghoogteverloop tijdens de hoogwatersituatie voor vijf modellen op 15 januari 2015 afgebeeld. De figuren aan de linker zijde zijn berekend met het gekoppelde Modflow-MORIA model en de naastgelegen afbeeldingen zijn berekend met het ontkoppelde Modflow model.

6 september 2017, definitief



6 september 2017, definitief



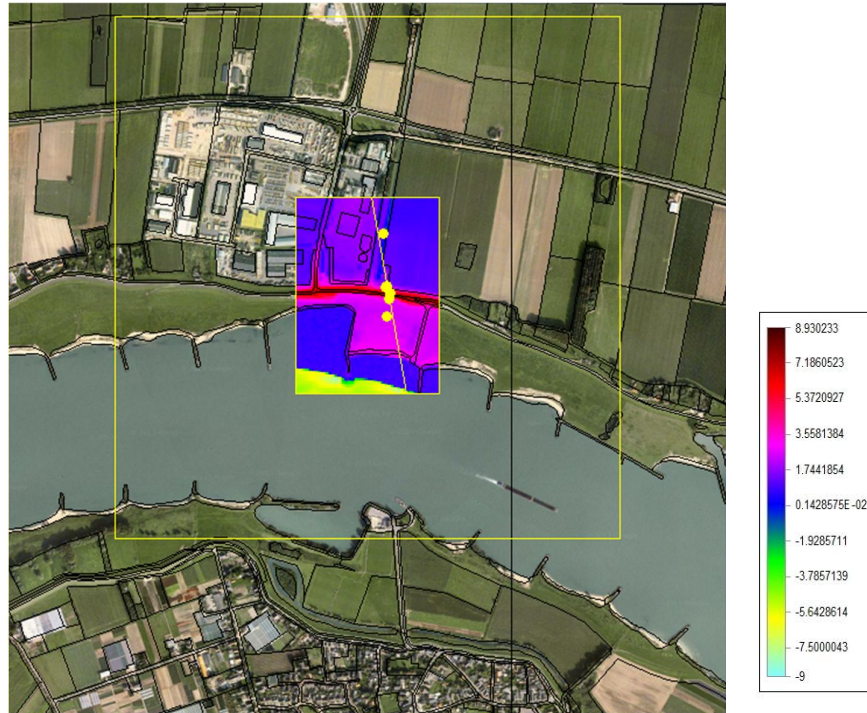
Figuur 4.18 Stijghoogtes Modflow-MORIA berekening (links) Modflow berekening (rechts) TG356 15 januari 2015.

Het stijghoogteverloop in de 4^{de} en 5^{de} modellaag laat een geringe invloedzone van de randcondities zien.

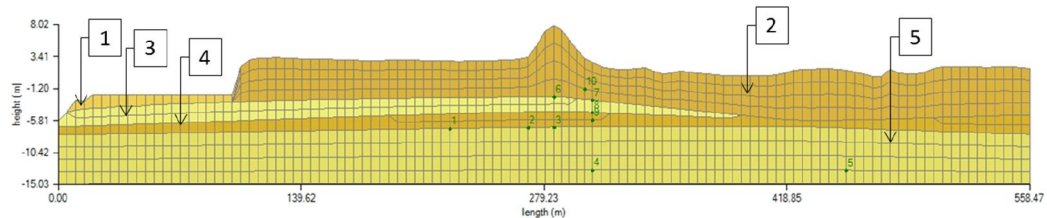
4.3 Lokaal geohydrologisch model

In Figuur 4.19 is het modelgebied van het driedimensionale DgFlow model afgebeeld. De dwarsdoorsnede langs de meetraai is afgebeeld in Figuur 4.20 en Figuur 4.21 geeft de ondergrondschematisatie driedimensionaal weer. In het model zijn een tweetal ontgrondingen te zien achter kribkoppen waardoor een kortsluiting ontstaat tussen de rivier en de watervoerende laag.

6 september 2017, definitief



Figuur 4.19 Hoogtekaart DgFlow model TG356.



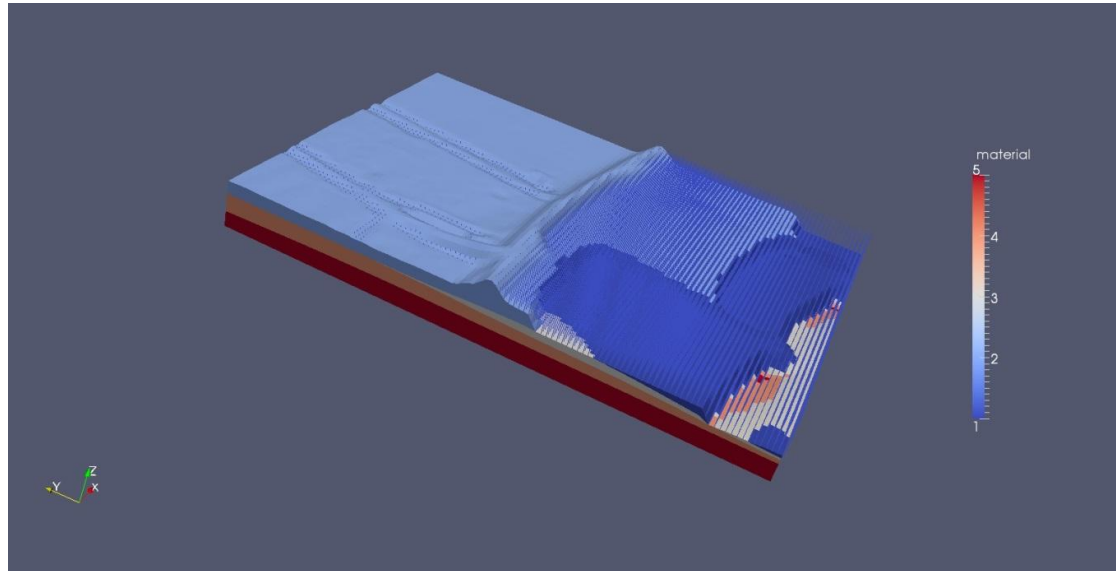
Figuur 4.20 Dwarsprofiel DgFlow model TG356.

Tabel 4.3 bevat de materiaalparameters van het DgFlow model 'Herwijnen'.

Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	100	10^{-4}
2	1	10^{-4}
3	100	10^{-5}
4	50	10^{-5}
5	50	10^{-5}

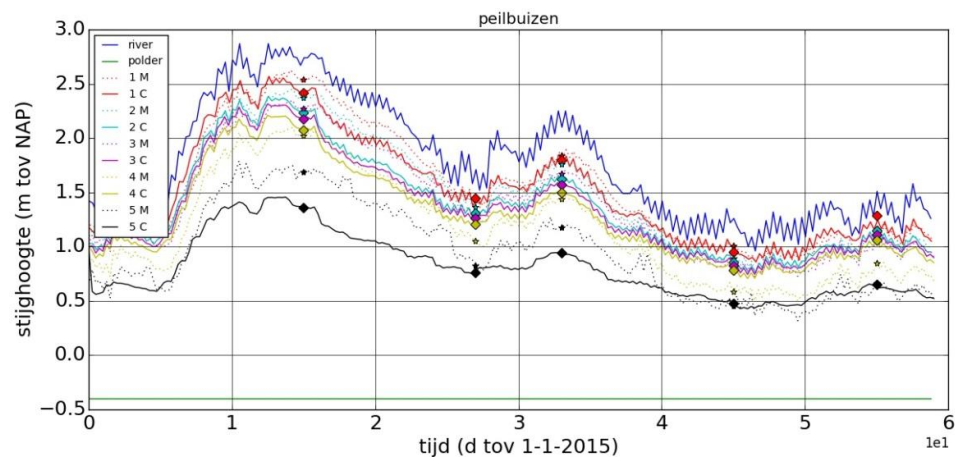
Tabel 4.3 Materiaaleigenschappen DgFlow3D model TG356.

6 september 2017, definitief



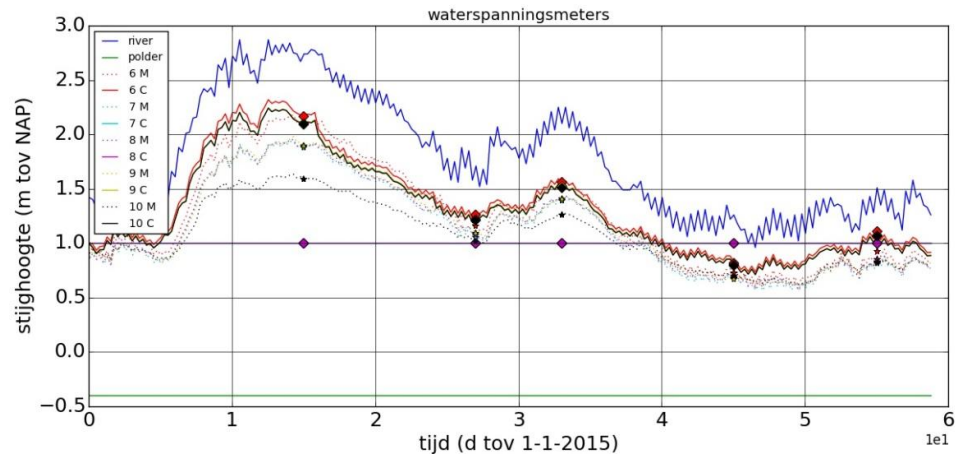
Figuur 4.21 Ondergrondschematisatie DgFlow3D model TG356.

Het met het gekoppelde Modflow-DgFlow model berekende stijghoogteverloop in de peilbuizen is afgebeeld in Figuur 4.22, resultaten ter plaatse van de waterspanningsmeters zijn weergegeven in Figuur 4.23. De resultaten die met het ontkoppelde DgFlow model zijn bepaald zijn afgebeeld in Figuur 4.24 en Figuur 4.25.

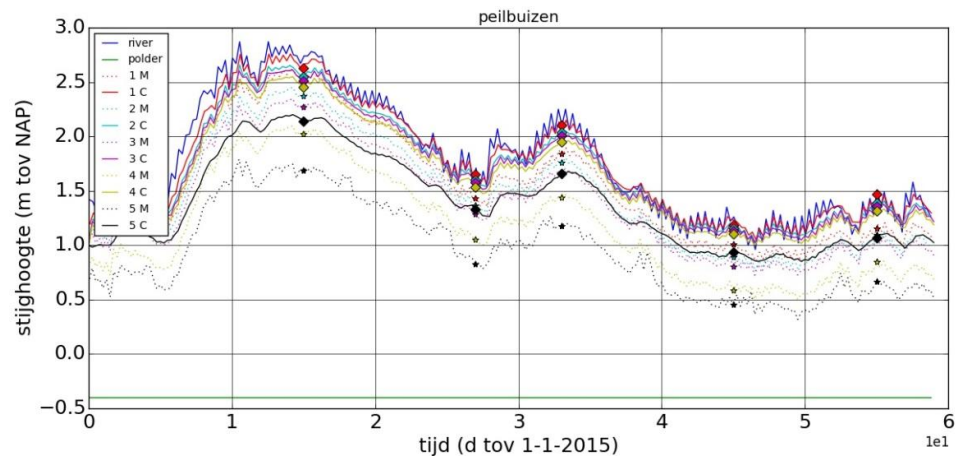


Figuur 4.22 Stijghoogteverloop peilbuizen TG356 volgens een DgFlow3D-Modflow berekening.

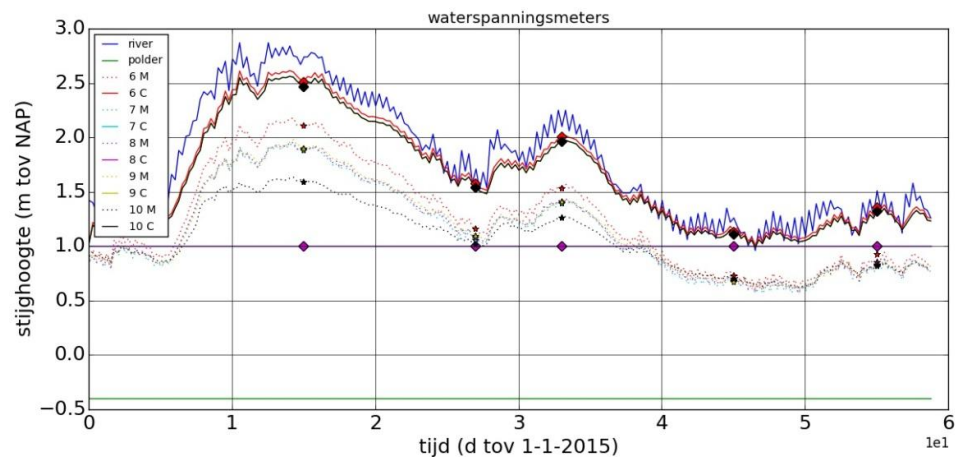
6 september 2017, definitief



Figuur 4.23 Stijghoogteverloop waterspanningsmeters TG356 volgens een DgFlow3D-Modflow.



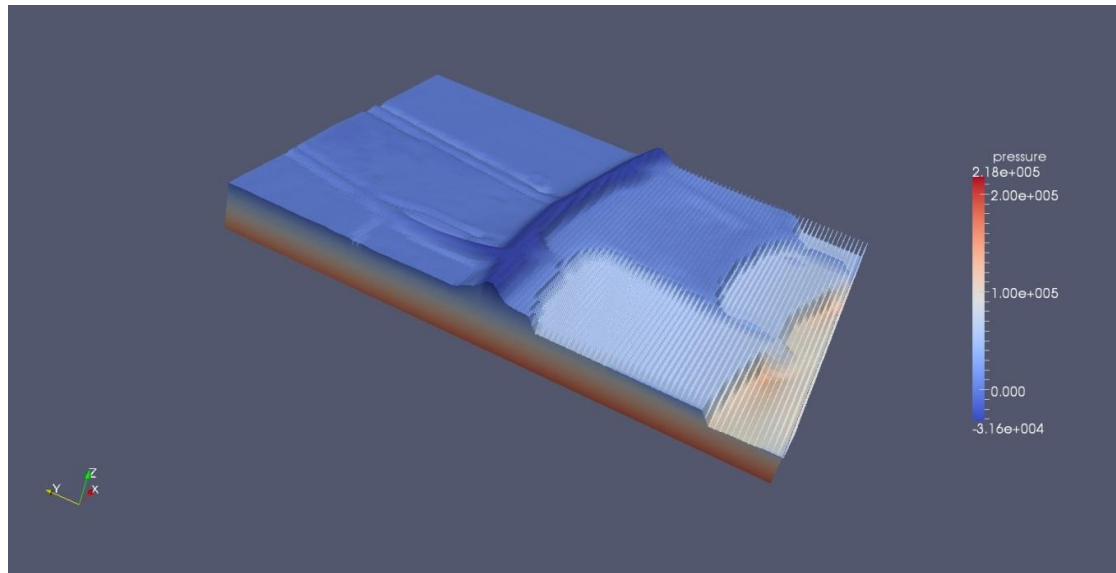
Figuur 4.24 Stijghoogteverloop peilbuizen TG356 volgens een DgFlow3D berekening.



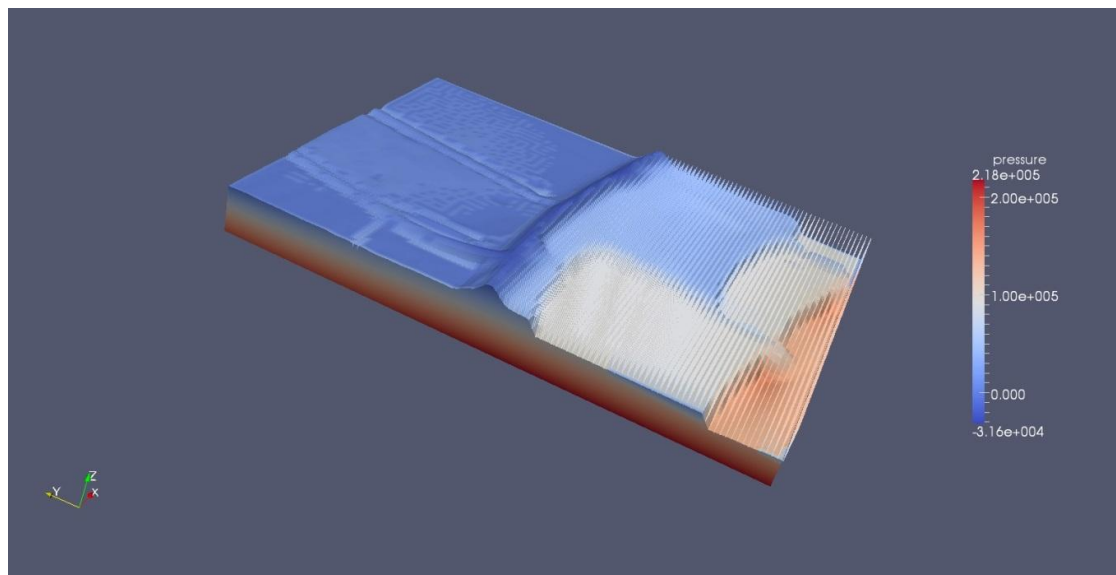
Figuur 4.25 Stijghoogteverloop waterspanningsmeters TG356 volgens een DgFlow3D berekening.

6 september 2017, definitief

Het modelgebied van onderzoekslocatie TG356 waarmee driedimensionale DgFlow berekeningen zijn uitgevoerd is niet groot genoeg om de voeding van grondwater door de rivier te beschrijven. Een gekoppelde Modflow-DgFlow berekening geeft daarom betere resultaten dan een DgFlow berekening waarbij de verticale modelranden gesloten zijn. Figuur 4.26 geeft de berekende waterspanningen bij een buitenwaterstand van NAP +3,70 m weer en Figuur 4.27 beeldt het waterspanningsverloop bij een maatgevend hoogwater van NAP +7,20 m af.



Figuur 4.26 Waterspanningen TG356 DgFlow3D berekening rivierwaterstand NAP +3,70 m.



Figuur 4.27 Waterspanningen TG356 DgFlow3D berekening maatgevend hoogwater NAP +7,20 m.

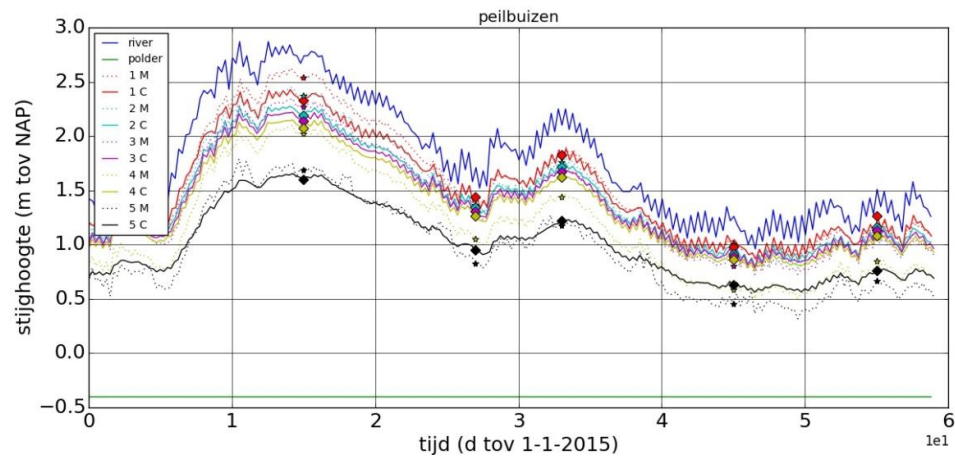
6 september 2017, definitief

De dwarsprofielen waarvoor tweedimensionale DgFlow berekeningen zijn uitgevoerd zijn afgebeeld in Figuur 4.13 en Figuur 4.20. De profielen hebben een lengte van 1461 m en 558 m. In deze paragraaf worden de resultaten van het profiel dat volgt als snede in het Modflow gerapporteerd omdat de randeffecten bij het kleinere model te groot zijn gebleken. De materiaalgegevens die uit een inverse analyse zijn bepaald zijn weergegeven in Tabel 4.4.

Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	100	10^{-4}
2	0,01	10^{-4}
3	100	10^{-5}
4	50	10^{-5}
5	50	10^{-5}

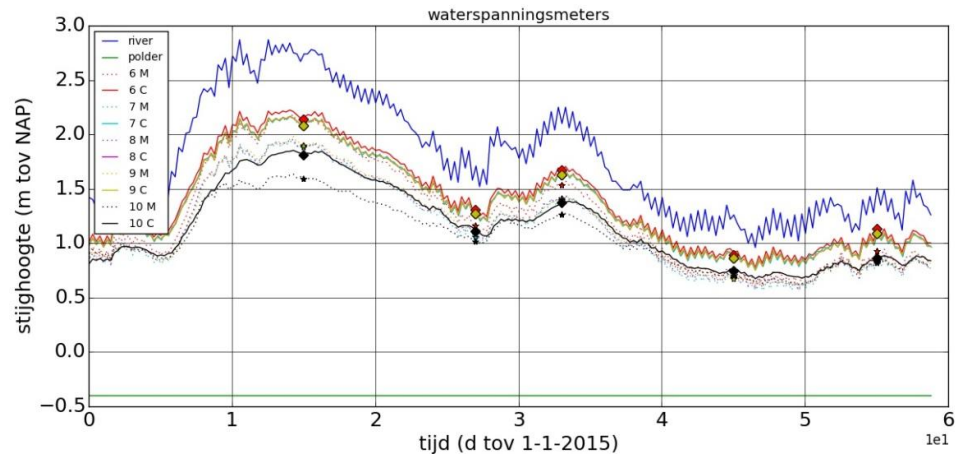
Tabel 4.4 Materiaaleigenschappen DgFlow2D model TG356.

De resultaten van gekoppelde stromings-deformatieberekeningen zijn weergegeven in Figuur 4.28 en Figuur 4.29 en het berekende stijghoogteverloop volgens ontkoppelde stromingsberekeningen is afgebeeld in Figuur 4.30 en Figuur 4.31.

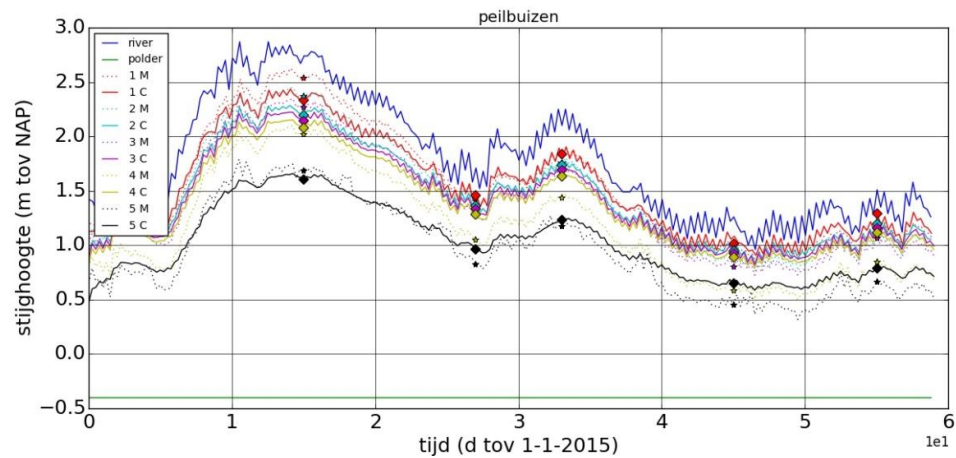


Figuur 4.28 Stijghoogteverloop peilbuizen TG356 volgens een DgFlow2D berekening.

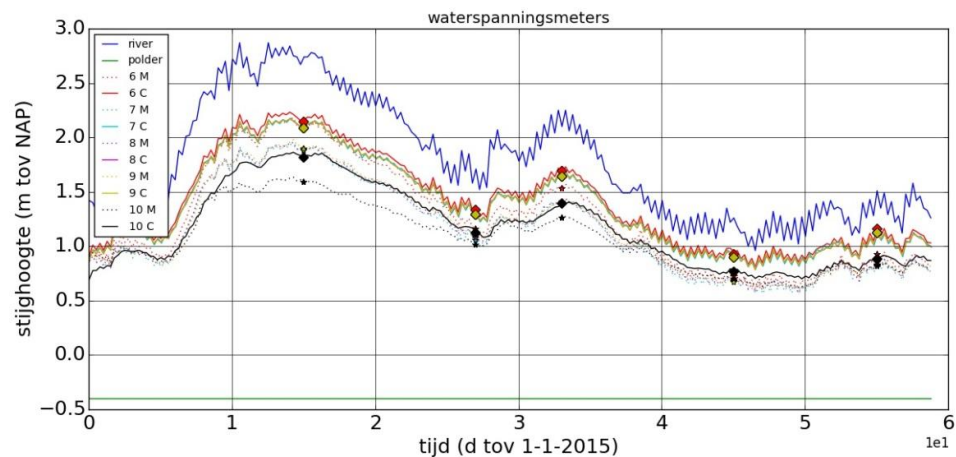
6 september 2017, definitief



Figuur 4.29 Stijghoogteverloop waterspanningsmeters TG356 volgens een DgFlow2D berekening.



Figuur 4.30 Stijghoogteverloop peilbuizen TG356 volgens een DgFlow2Dc berekening.



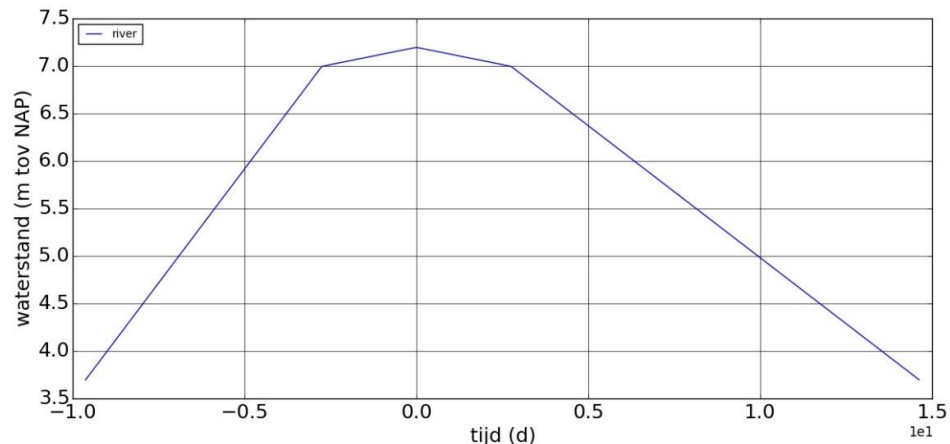
Figuur 4.31 Stijghoogteverloop waterspanningsmeters TG175 volgens een DgFlow2Dc berekening.

6 september 2017, definitief

De modelparameters (doorlatendheden en bergingscoëfficiënten) zijn bij de tweedimensionale DgFlow berekening gelijk aan die van de Modflow berekening. De overeenkomsten met de metingen is goed en de gekoppelde stromings-deformatieberekeningen geven nagenoeg dezelfde resultaten als ontkoppelde stromingsberekeningen.

4.4 Geotechnisch model

De hydraulische belasting die volgt uit de WTI tool voor de Waaldijk ter plaatse van dijkpaal TG356 is afgebeeld in Figuur 4.32. De hoogwatergolf heeft een duur van 25 dagen en het maximale verschil met het polderpeil bedraagt 7,196 m.

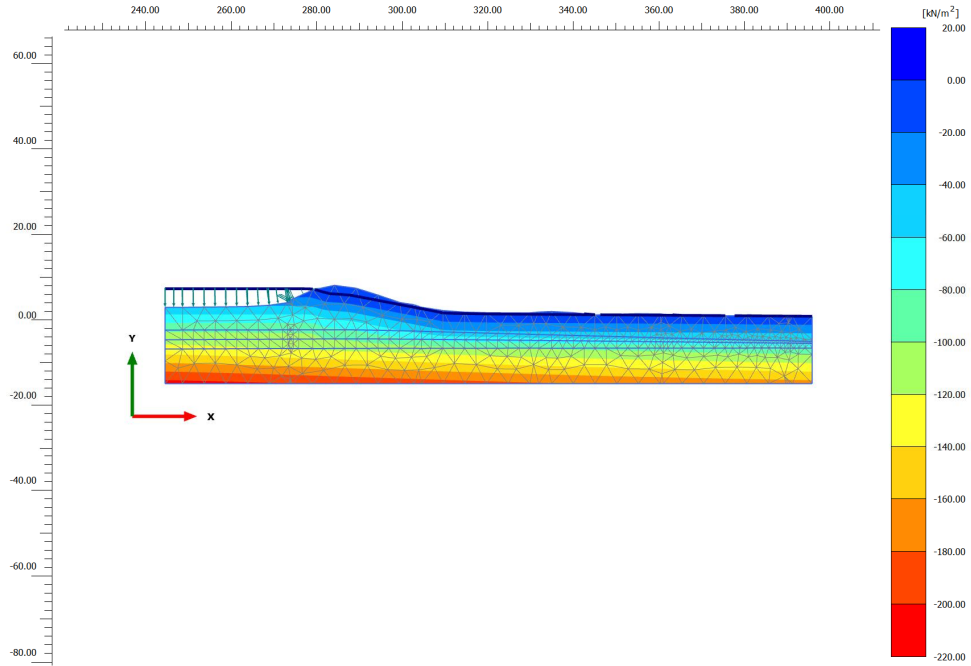


Figuur 4.32 Maatgevende hydraulische belasting TG356.

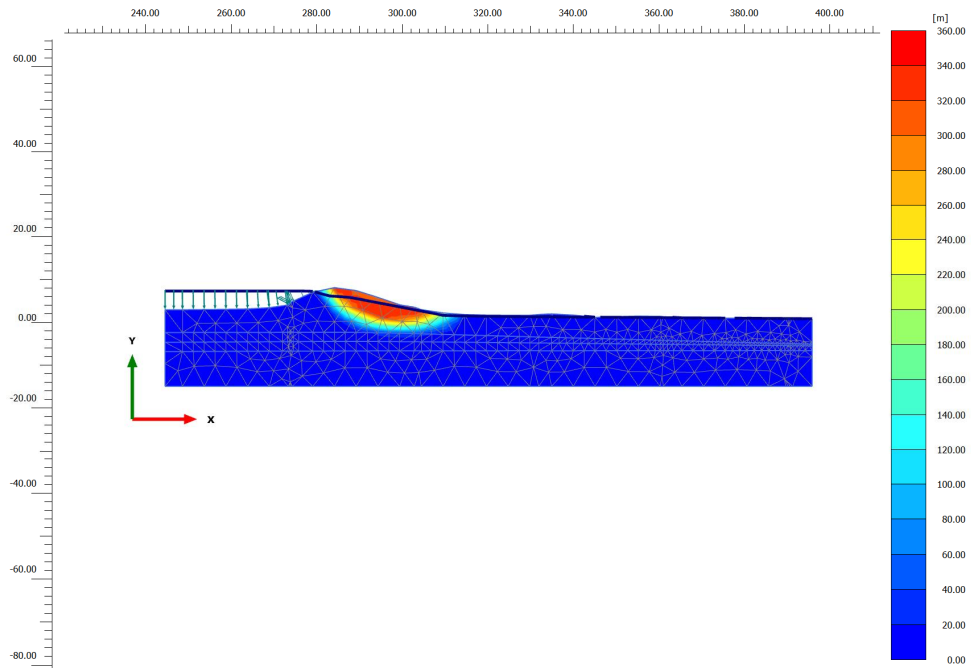
De waterspanningen die zijn berekend met DgFlow3D en daarna zijn opgelegd in Plaxis2D zijn afgebeeld in Figuur 4.35, de bijbehorende vervormingen die volgen uit een phi-c reductie zijn weergegeven in Figuur 4.36. De resultaten van deze berekening komen redelijk goed overeen met de resultaten van een tweedimensionale DgFlow berekening die zijn weergegeven in Figuur 4.37 en Figuur 4.38.

De veiligheidsfactoren zijn verzameld in Tabel 4.5. Uit de resultaten wordt geconcludeerd dat tijdsafhankelijk rekenen niet tot een hogere waarde van de stabiliteitsfactor leidt. De driedimensionale berekening geeft een lagere waarde van de stabiliteitsfactor. Dit is het gevolg van een hogere druk in het watervoerend pakket onder de instabiele zone die wellicht veroorzaakt wordt door de ontgrondingen achter de kribkoppen waardoor een kortsluiting met de watervoerende laag is ontstaan. De doorlatendheid van de deklaag is in het geval van de driedimensionale beschouwing echter ook een orde twee hoger gekozen dan bij de tweedimensionale analyse om het verschil in toekennen van polderrandvoorwaarden te faciliteren. Dit verschil beïnvloedt de ligging van de freatische lijn in het dijklichaam en maakt het vergelijken van tweedimensionale en driedimensionale uitkomsten lastiger.

6 september 2017, definitief

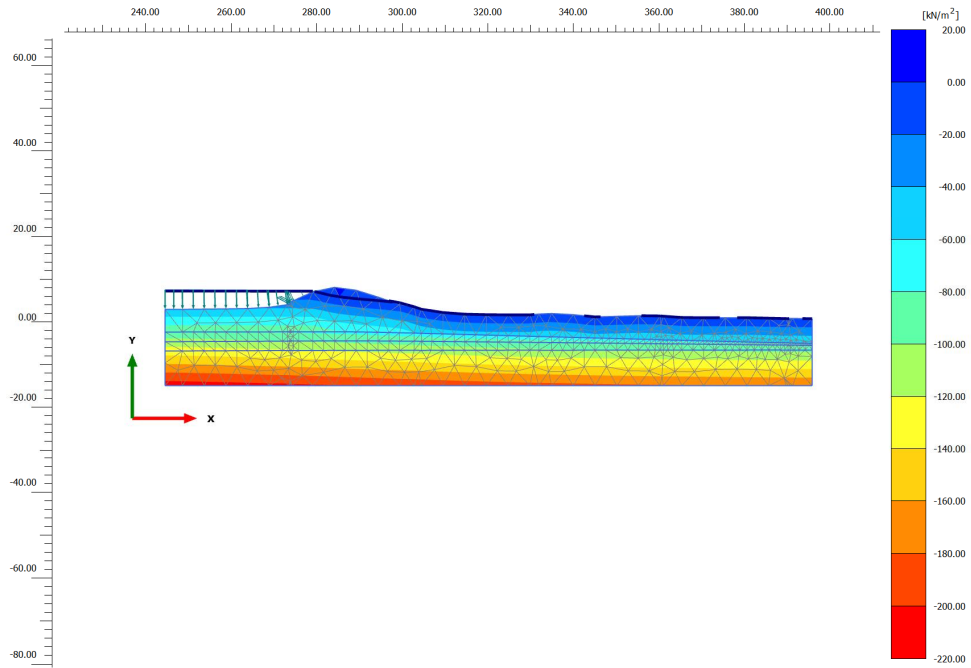


Figuur 4.33 Waterspanningen ontwerpberekening TG356.

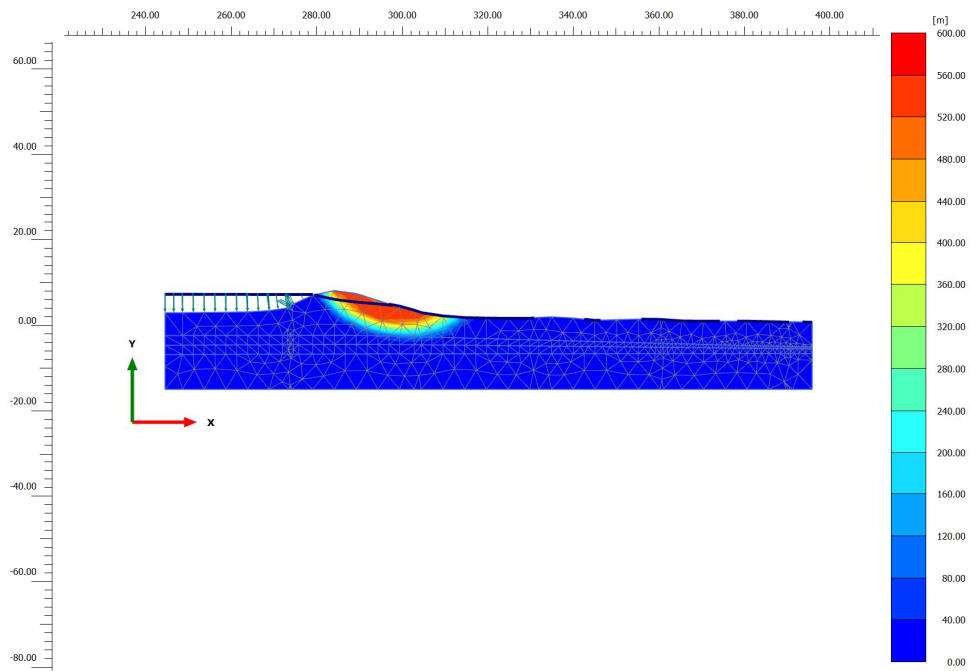


Figuur 4.34 Vervormingen ontwerpberekening na phi-c reductie TG356.

6 september 2017, definitief

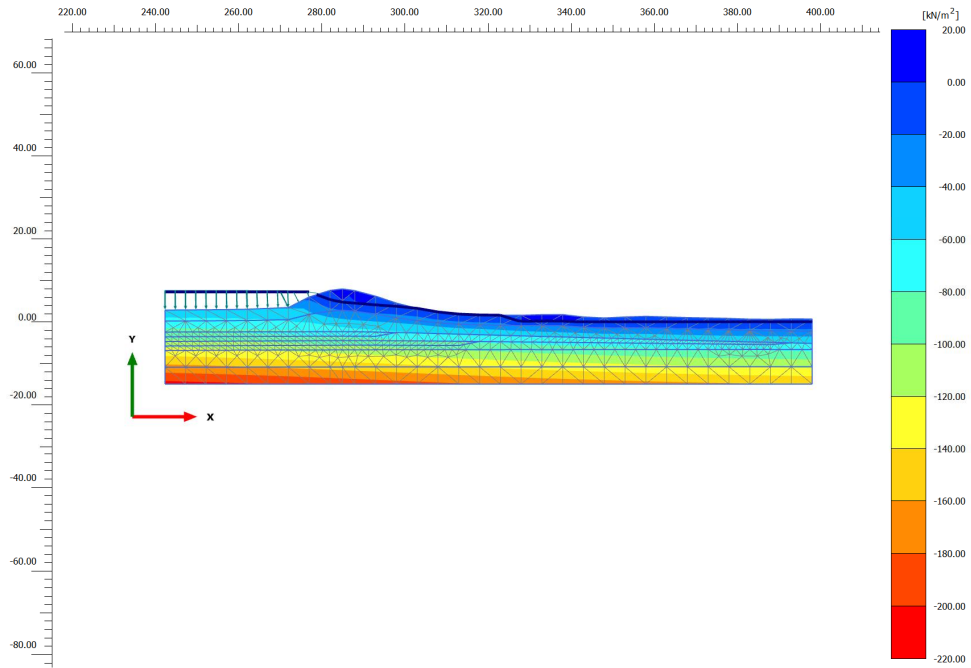


Figuur 4.35 Waterspanningen Plaxis2D-DgFlow3D TG356.

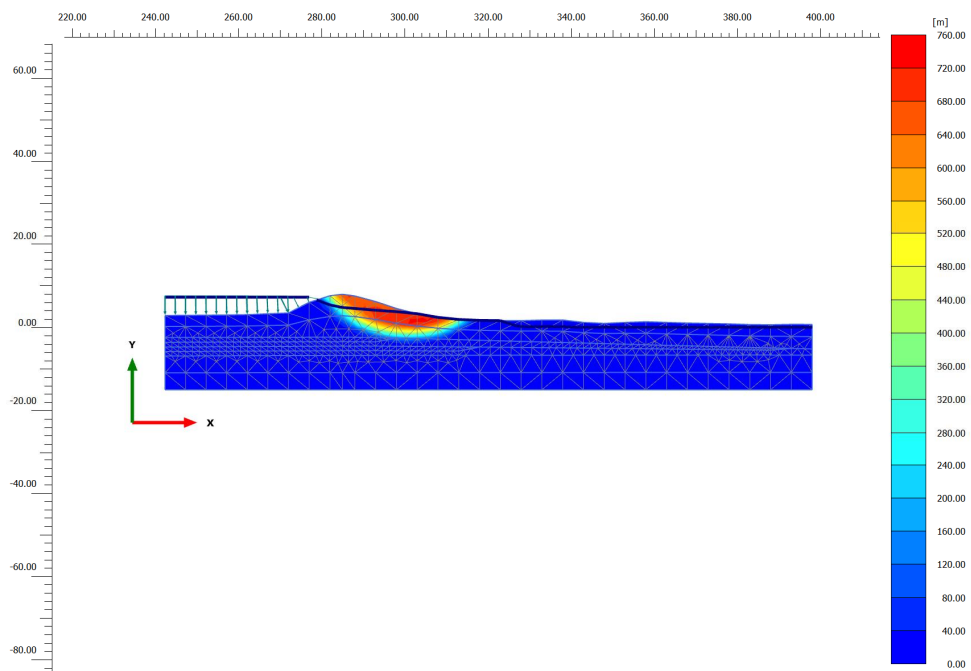


Figuur 4.36 Vervormingen Plaxis2D-DgFlow3D na phi-c reductie TG356.

6 september 2017, definitief



Figuur 4.37 Waterspanningen Plaxis2D-DgFlow2D TG356.



Figuur 4.38 Vervormingen Plaxis2D-DgFlow2D na phi-c reductie TG356.

6 september 2017, definitief

tijd (d)	waterstand (m NAP)	F _{ontwerp} (-)	F _{stat} 2D (-)	F _{tijdsafh} 2D (-)	F _{tijdsafh} 3D (-)
0.000	7,20	1,48	1,49	1,49	1,39
1.000	7,12			1,50	1,38
2.000	7,05			1,50	1,39

Tabel 4.5 Veiligheidsfactoren TG356.

5 Waaldijk Vuren

In het onderzoeksgebied 'Waaldijk Vuren' is de grondwaterstroming overwegend tweedimensionaal. Het stromingsbeeld wordt ook voor deze derde case berekend met de grondwaterstromingsmodellen Modflow en DgFlow en de voorspellingen worden vergeleken met stijghoogtemetingen die zijn waargenomen in 5 peilbuizen en met 4 waterspanningsmeters. Het bovenaanzicht van de onderzoekslocatie is afgebeeld in Figuur 5.1.

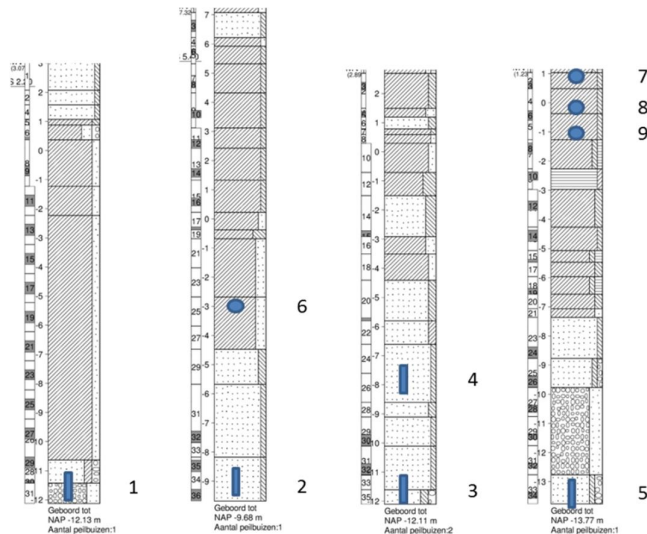


Figuur 5.1 Onderzoekslocatie TG385.

5.1 Waterspanningsmetingen

De boorprofielen van een boring in het voorland, in de kruin, ter plaatse van de binnenteen en in het achterland zijn weergegeven in Figuur 5.2. In deze figuur is eveneens de positie van de peilbuisfilters en de waterspanningsmeters aangegeven.

6 september 2017, definitief



Figuur 5.2 Ondergrondprofielen TG384+089_B_VL, TG384+055_B_KR, TG384+056_B_BIT, TG384+064_B_AL.

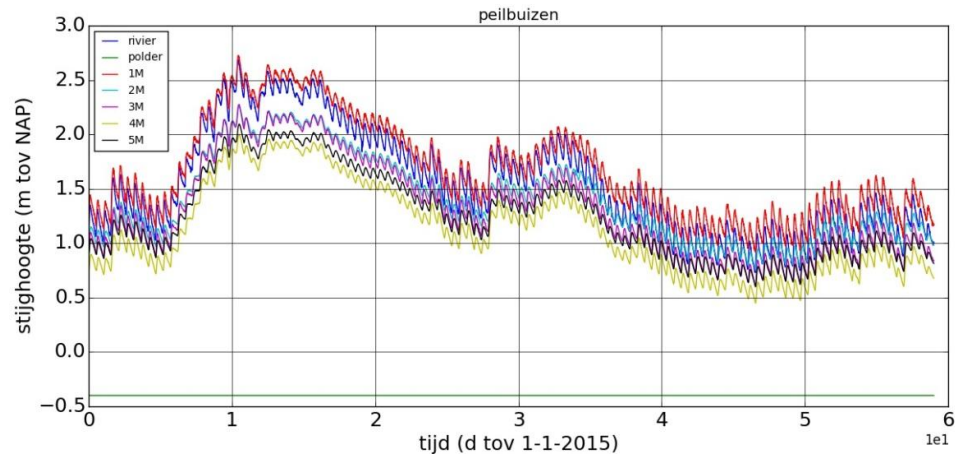
De posities van de peilbuisfilters en de waterspanningsmeters zijn samengevat in Tabel 5.1.

nr.	locatiennaam	x m	y m	mv cm t.o.v. NAP	bf cm t.o.v. NAP	of cm t.o.v. NAP
1	TG384.+089_P_VL	132084	425965	307	-1093	-1193
2	TG384.+055_P_KR	132077	426051	732	-868	-968
3	TG384.+056_P_BIT	132069	426066	289	-1111	-1211
4	TG384.+056_P_BIT	132069	426066	289	-711	-811
5	TG384.+064_P_AL	131989	426194	123	-1277	-1377
6	TG384.+058_W-273_KR	132075	426050	732	-273	-273
7	TG384.+058_W+091_BIT	132067	426063	306	91	91
8	TG384.+057_W-010_BIT	132069	426063	305	-10	-10
9	TG384.+055_W-109_BIT	132070	426063	306	-109	-109

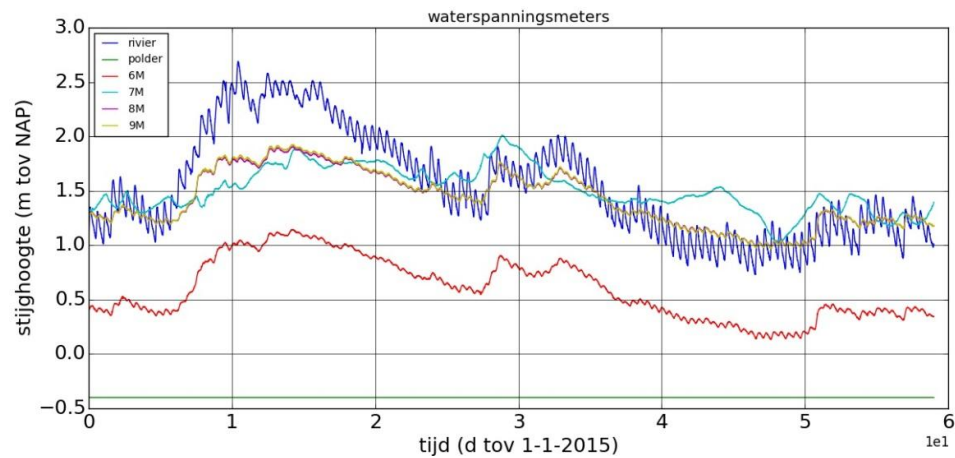
Tabel 5.1 Meetlocaties TG385.

In de periode januari-februari 2015 is een hoogwatergolf met een duur van 25 dagen en amplitude van 1.6 meter waargenomen. Deze hoogwatergolf wordt gevolgd door een tweede golf met een duur van 10 dagen en een amplitude van 0.7 meter. De beïnvloeding van de rivierwaterstand door het getij is duidelijk waarneembaar. Het waargenomen stijghoogte verloop in de tijd is weergegeven in Figuur 5.3 en Figuur 5.4.

6 september 2017, definitief



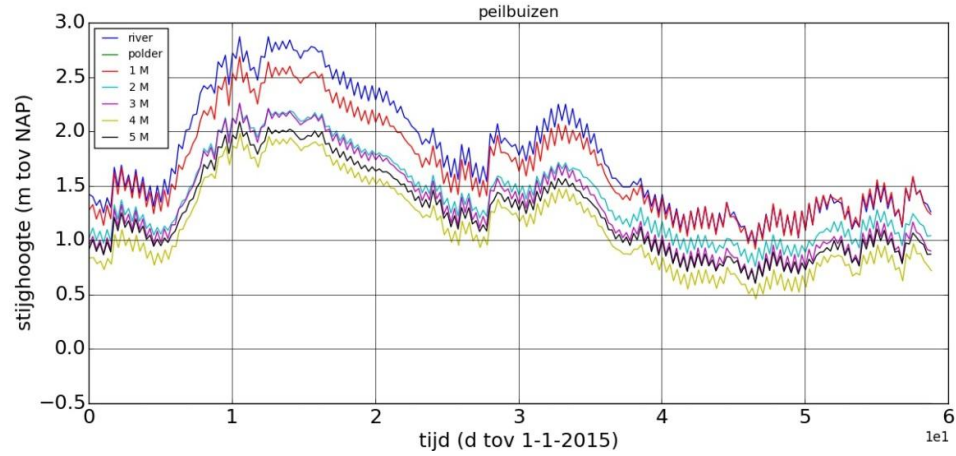
Figuur 5.3 Peilbuismetingen TG385 1 januari 2015 tot 1 maart 2015 (meetfrequentie 1/10 min).



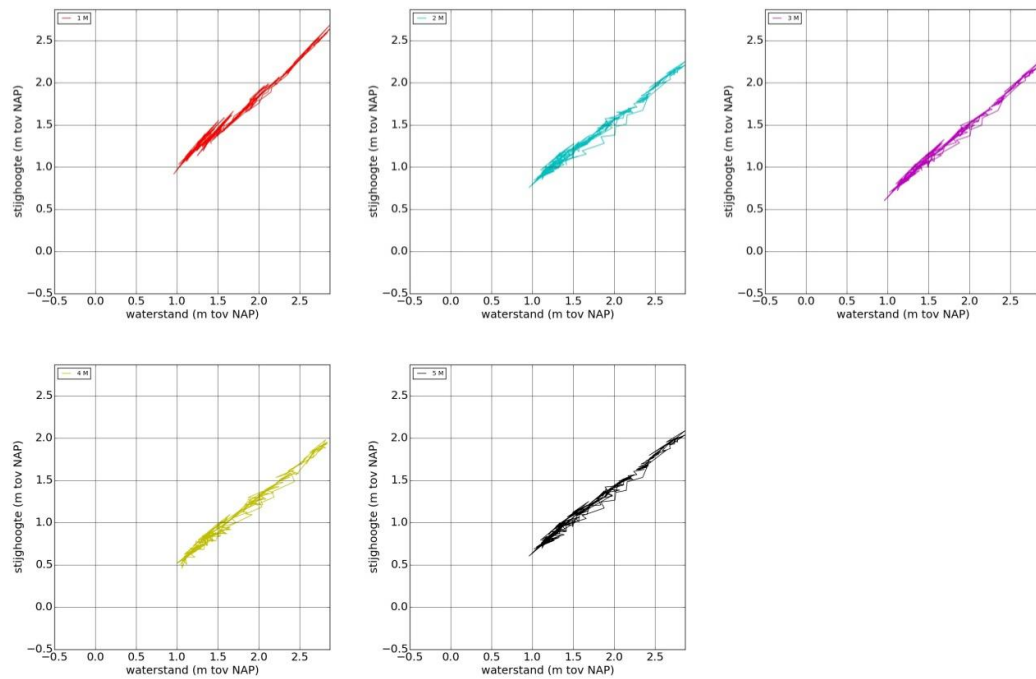
Figuur 5.4 Waterspanningsmetingen TG385 1 januari 2015 tot 1 maart 2015 (meetfrequentie 1/10 min).

Figuur 5.5 en Figuur 5.6 geven het gefilterde stijghoogteverloop voor dezelfde periode van 60 dagen weer voor de peilbuizen dat wordt gebruikt bij de berekeningen. Figuur 5.7 en Figuur 5.8 laten de metingen in de waterspanningsmeters zien, bij een frequentie van 1 waarneming per 6 uur. Deze signalen zijn gebruikt voor het ijken van de grondwaterstromingsmodellen.

6 september 2017, definitief

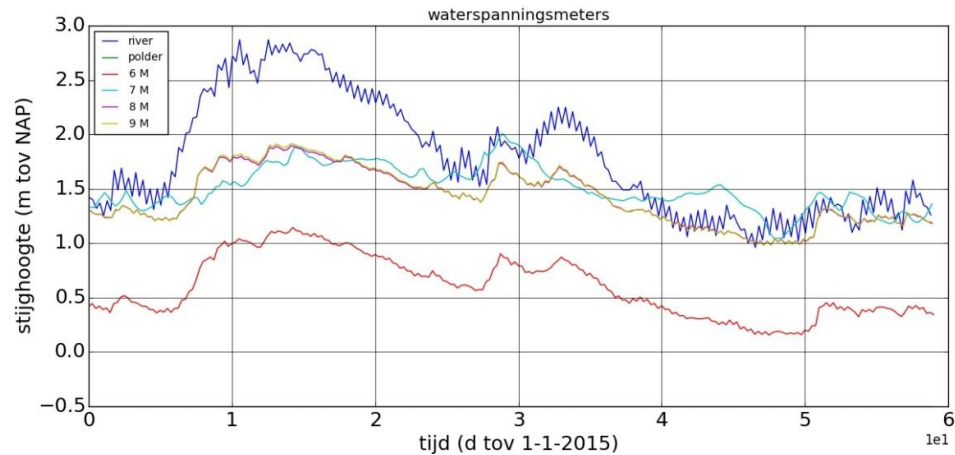


Figuur 5.5 Peilbuismetingen TG385 1 januari 2015 tot 1 maart 2015 (meetfrequentie 1/6 uur).

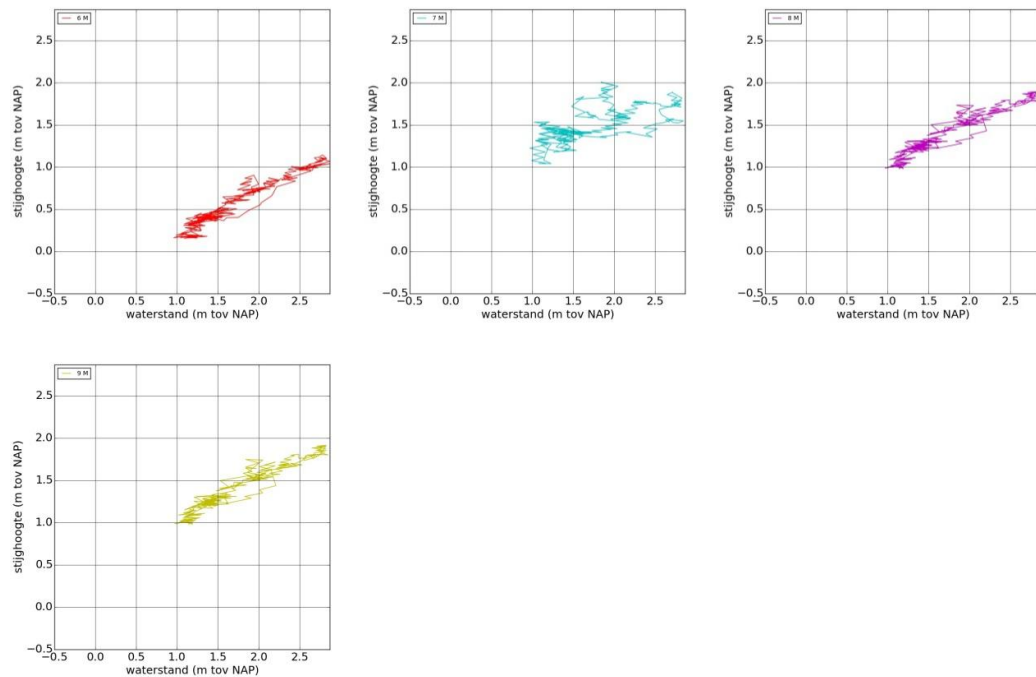


Figuur 5.6 Peilbuismetingen TG385 1 januari 2015 tot 1 maart 2015 als functie van de buitenwaterstand.

6 september 2017, definitief



Figuur 5.7 Waterspanningsmetingen TG385 1 januari 2015 tot 1 maart 2015 (meetfrequentie 1/6 uur).



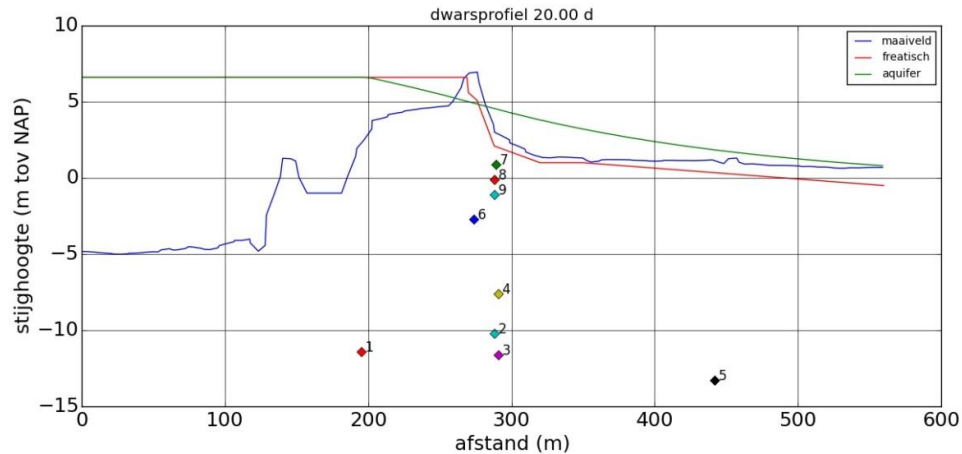
Figuur 5.8 Waterspanningsmetingen TG385 1 januari 2015 tot 1 maart 2015 als functie van de buitenwaterstand.

Bij het plotten van de stijghoogte als functie van de buitenwaterstand wordt nagenoeg geen hysteresis waargenomen wat duidt op te verwaarlozen tijdsafhankelijke effecten in de waterspanningsopbouw tijdens een hoogwatersituatie.

In Figuur 4.9 is het stijghoogteverloop dat volgt uit de procedure die in bijlage B.2 van de leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken TAW (1985) wordt beschreven, afgebeeld. Het maatgevend hoog water is daarbij op 6,6 m en het polderpeil op -0,5 m gesteld. De lengte van het voorland bedraagt 60 m met een spreidingslengte van 100 m en de lengte van het

6 september 2017, definitief

achterland is 2000 m met een spreidingslengte van 200 m. De basis van het dijklichaam heeft een afmeting van 30 m en de transmissiviteit van de aquifer bedraagt $1250 \text{ m}^2/\text{d}$. Het freatisch vlak is bepaald met de procedure die in bijlage 1 (b1.3.3) van het technisch rapport waterspanningen bij dijken (TRW 2004) is voorgesteld.

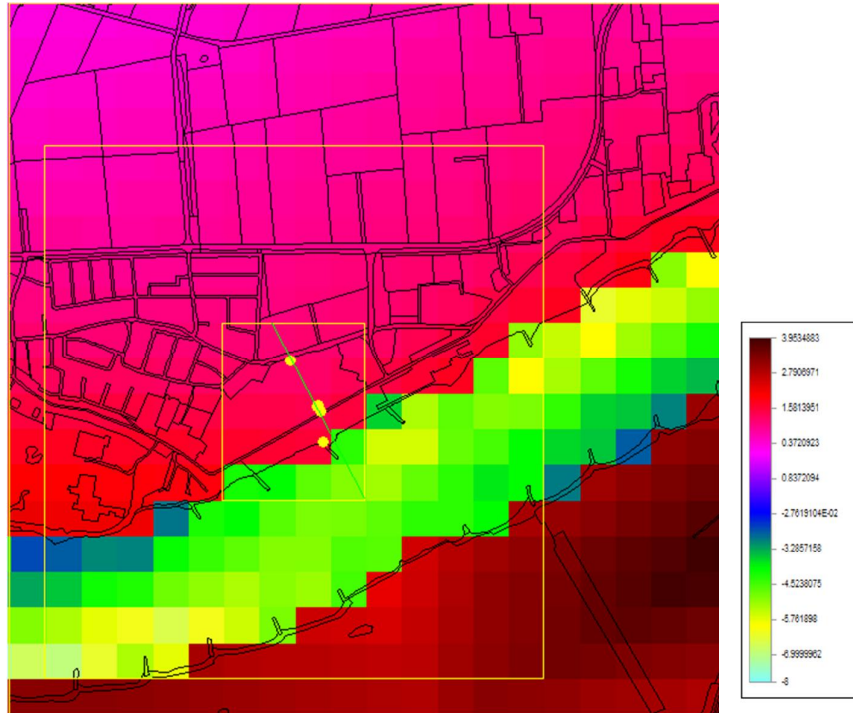


Figuur 5.9 Stijghoogteverloop TG385 volgens ontwerprichtlijn.

5.2 Regionaal geohydrologisch model

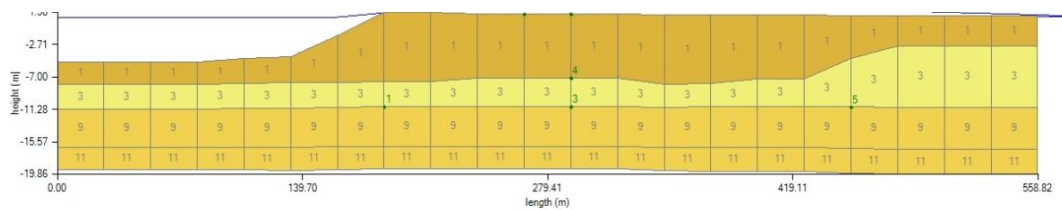
In het profiel ter plaatse van dijkpaal TG385 heeft de deklaag een dikte van 8 meter. Uit de dikte van de laag en de doorlatendheid van het materiaal waaruit de laag is opgebouwd is een stromingsweerstand van 520 dagen afgeleid. Samen met de waarde van de transmissiviteit van de ondergelegen goed doorlatende zandlaag wordt een spreidingslengte van 572 m gevonden en een modelgrootte van 1,7 km geschat. De hoogtekaart die is gebruikt bij het opstellen van het MORIA model met het modelgebied van het Modflow model en het domein van het DgFlow model is afgebeeld in Figuur 5.10. Het Modflow model heeft een afmeting van 1400 bij 1500 meter en ligt in het kaartvlak (131300, 425300) - (132700, 426800). Het DgFlow model is 400 bij 500 meter groot en ligt in kaartvlak (131800, 425800) - (132200, 426300).

6 september 2017, definitief



Figuur 5.10 Hoogtekaart MORIA model TG385.

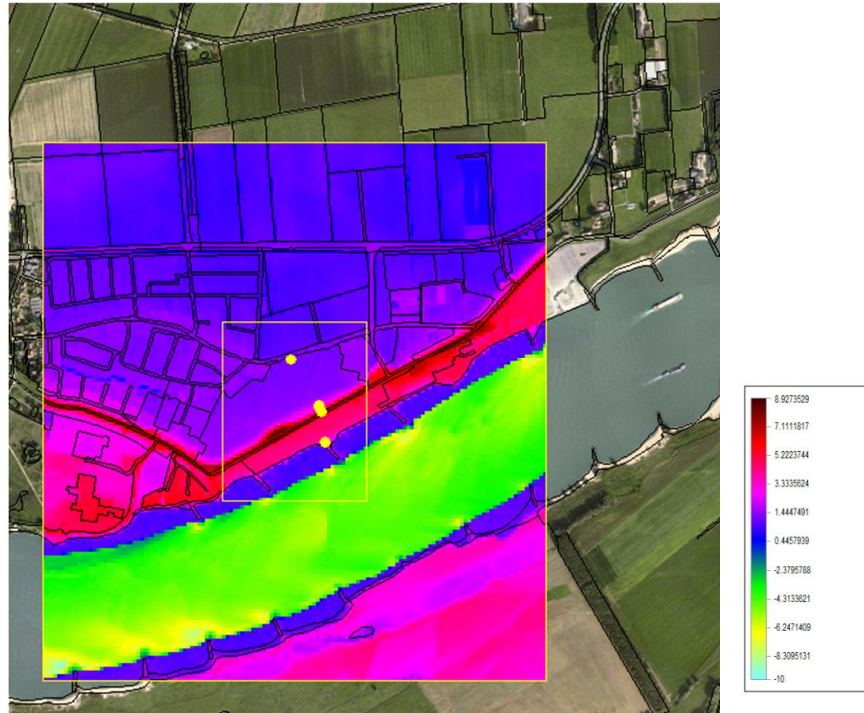
Voor de in Figuur 5.10 getoonde meetraai is het ondergrondprofiel van het MORIA model afgebeeld in Figuur 5.11. In dit profiel worden tot een diepte van NAP -20,00 m vier materialen onderscheiden: 1, 3, 9 en 11. Het dijklichaam is niet in het model opgenomen.



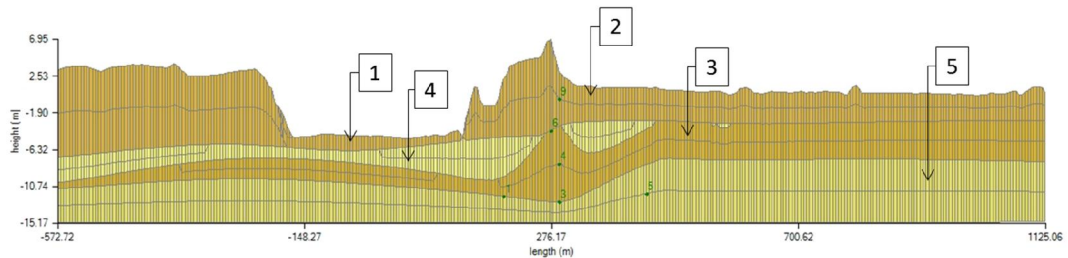
Figuur 5.11 Dwarsprofiel MORIA model TG385.

De hoogtekaart waarmee het Modflow model is opgesteld is weergegeven in Figuur 5.12 en het dwarsprofiel langs de meetraai is afgebeeld in Figuur 5.13.

6 september 2017, definitief



Figuur 5.12 Hoogtekaart Modflow model TG385.



Figuur 5.13 Dwarsprofiel Modflow model TG385.

De materiaalparameters die verkregen zijn bij de kalibratie van het Modflow model zijn verzameld in Tabel 5.2.

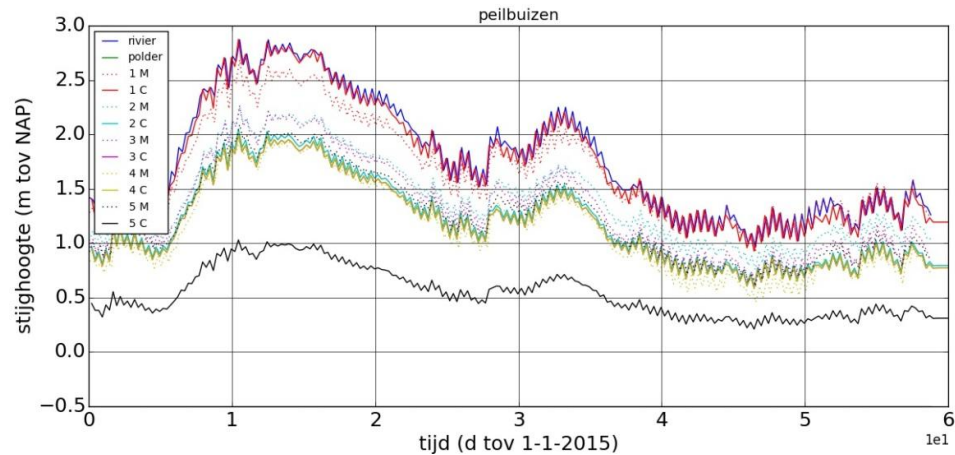
Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	100	10^{-4}
2	0,005	10^{-4}
3	100	10^{-5}
4	50	10^{-5}
5	50	10^{-5}

Tabel 5.2 Materiaaleigenschappen Modflow model TG385.

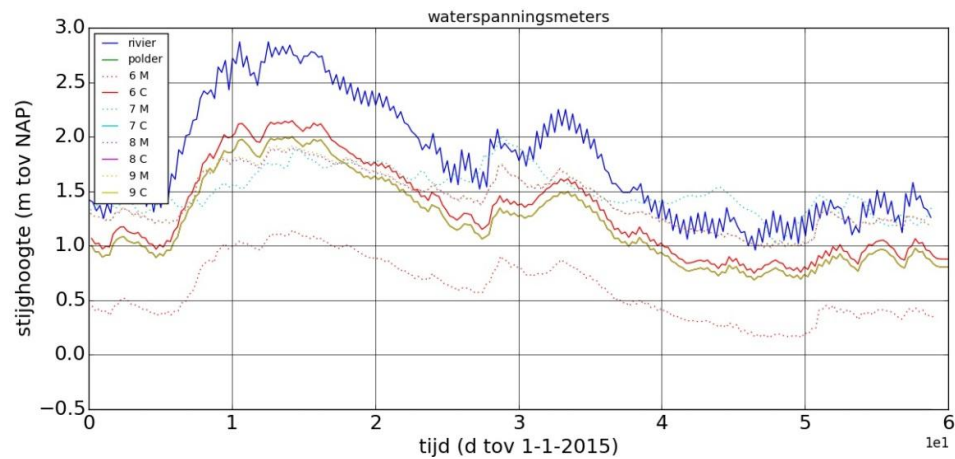
De resultaten van de gekoppelde Modflow-MORIA berekening zijn afgebeeld in Figuur 5.14 en Figuur 5.15. De stijghoogtes volgens een ontkoppelde Modflow berekening

6 september 2017, definitief

worden gepresenteerd in Figuur 5.16 en Figuur 5.17. Conform het resultaat van profiel TG356 geven de gekoppelde Modflow-MORIA berekeningen nagenoeg hetzelfde resultaten als de ontkoppelde Modflow berekeningen. Geconcludeerd wordt dat de Modflow modelgebieden voldoende groot zijn waardoor de stijghoogte aan de verticale modelranden de berekende stijghoogte in de doorsnede niet significant beïnvloedt.

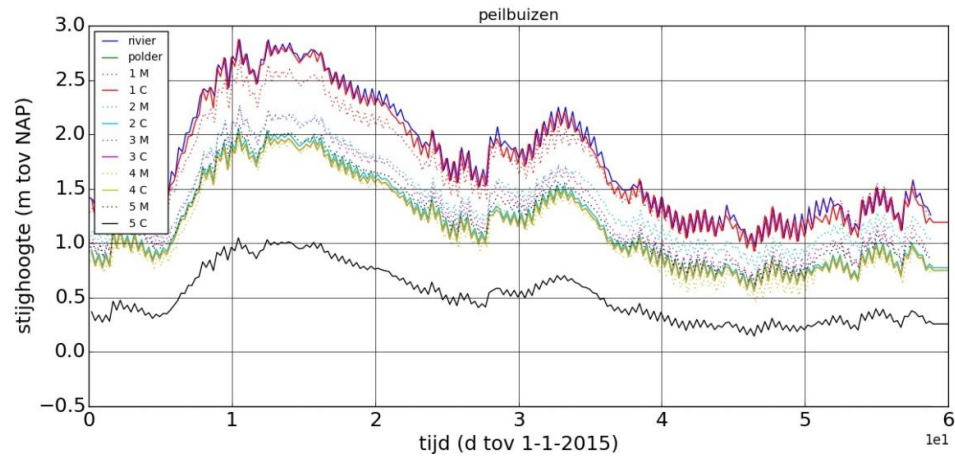


Figuur 5.14 Stijghoogteverloop peilbuizen TG385 volgens een Modflow-MORIA berekening.

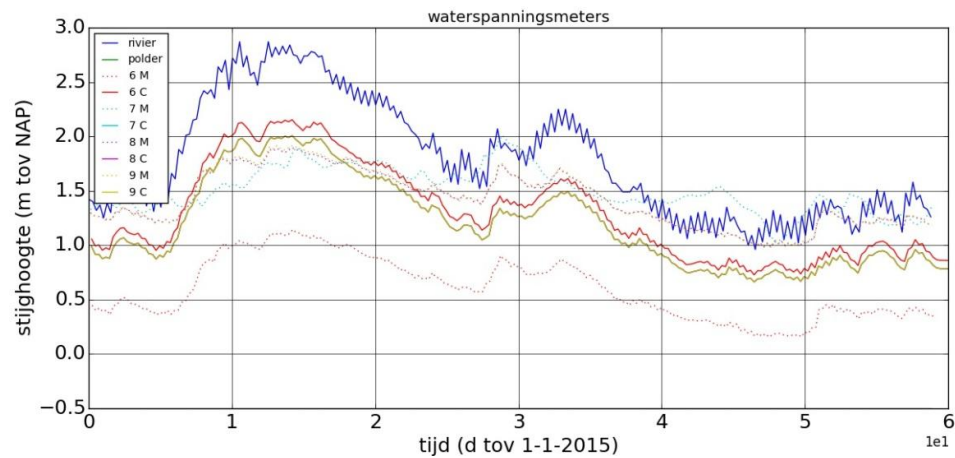


Figuur 5.15 Stijghoogteverloop waterspanningsmeters TG355 volgens een Modflow-MORIA.

6 september 2017, definitief



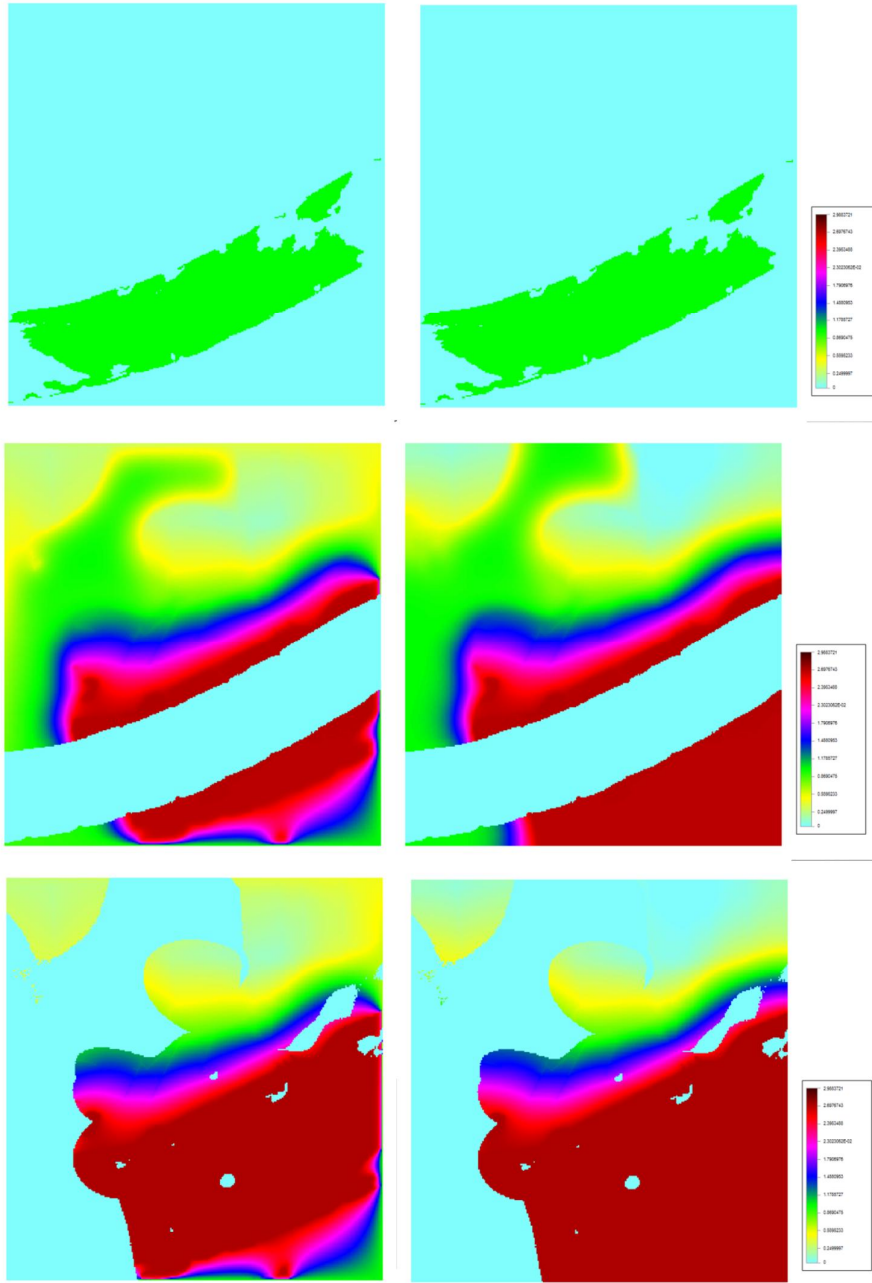
Figuur 5.16 Stijghoogteverloop peilbuizen TG385 volgens een Modflow berekening.



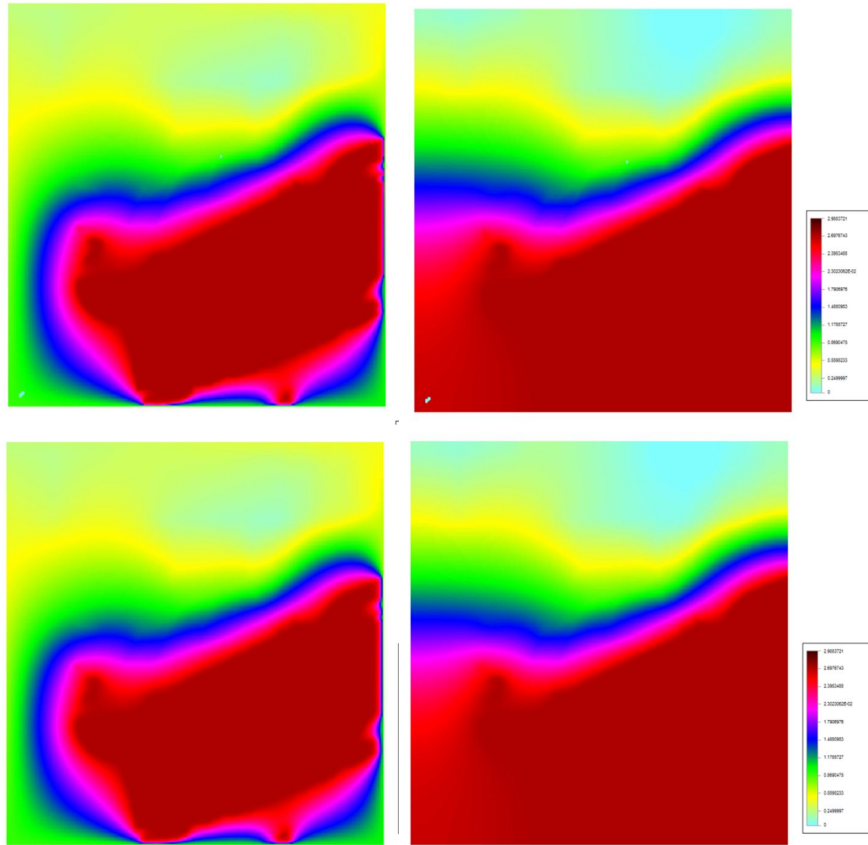
Figuur 5.17 Stijghoogteverloop waterspanningsmeters TG385 volgens een Modflow berekening.

In Figuur 5.18 is het stijghoogteverloop voor de hoogwatersituatie op 15 januari 2015 afgebeeld. De figuren aan de linker zijde zijn berekend met het gekoppelde Modflow-MORIA model en de naastgelegen afbeeldingen zijn berekend met het ontkoppelde Modflow model.

6 september 2017, definitief



6 september 2017, definitief



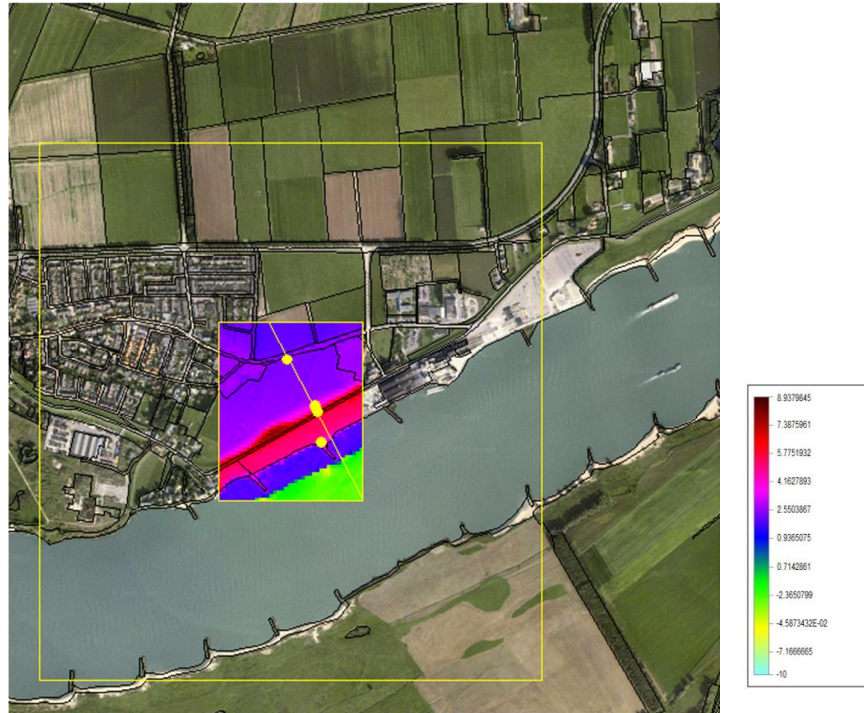
Figuur 5.18 Stijghoogtes Modflow-MORIA berekening (links) Modflow berekening (rechts) TG385 15 januari 2015.

De invloed van de opgelegde stijghoogte langs de verticale rand van het Modflow model die volgt uit de MORIA berekening is duidelijk zichtbaar in modellagen 4 en 5 maar de stijghoogteverschillen ter plaatse van de meetlocatie zijn klein. Het stromingsbeeld dat in de onderste modellaag van het gekoppelde Modflow-MORIA model ontstaat ziet er fysisch niet erg realistisch uit; aan de linker onderrand stroomt water uit het model. De reden hiervoor is niet uit de geometrie van de locatie te herleiden.

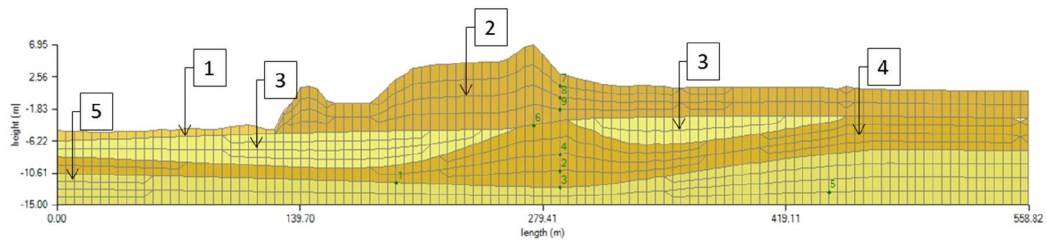
5.3 Lokaal geohydrologisch model

In Figuur 5.19 is het lokale modelgebied van locatie 'Vuren' afgebeeld en de dwarsdoorsnede langs de meetraai is afgebeeld in Figuur 5.20. Het ondergrondmodel van het driedimensionale DgFlow model is weergegeven in Figuur 5.21. In dit model zijn eveneens twee kortsluitingen tussen de rivier en het watervoerend pakket in de buurt van de kribkoppen zichtbaar.

6 september 2017, definitief



Figuur 5.19 Hoogtekaart DgFlow model TG385.



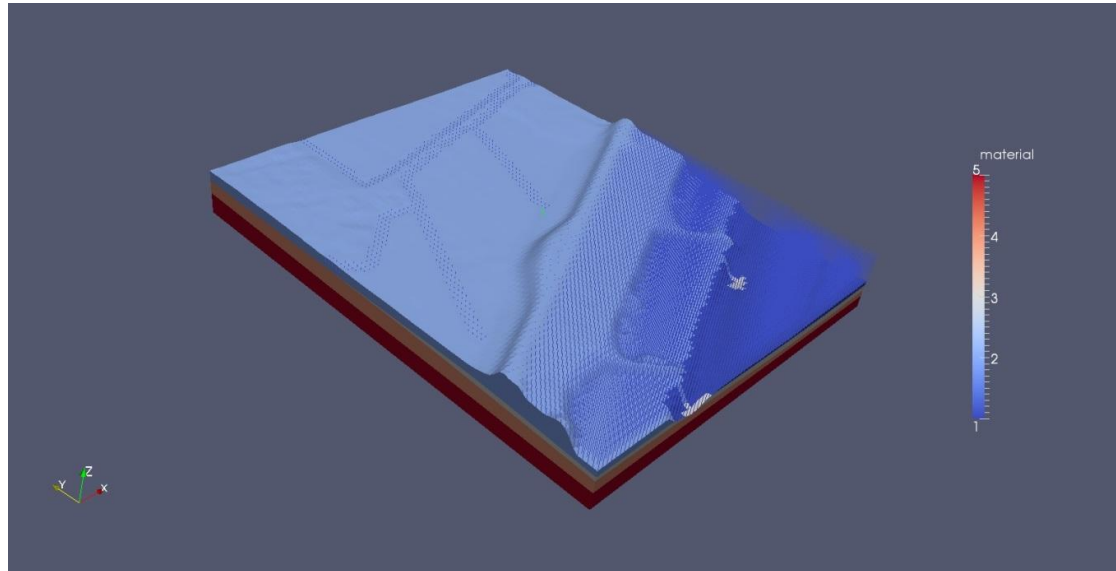
Figuur 5.20 Dwarsprofiel DgFlow model TG385.

Tabel 5.3 geeft de materiaalparameters voor het DgFlow model die bepaald zijn met een inverse analyse.

Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	100	10^{-4}
2	0.5	10^{-4}
3	100	10^{-5}
4	50	10^{-5}
5	50	10^{-5}

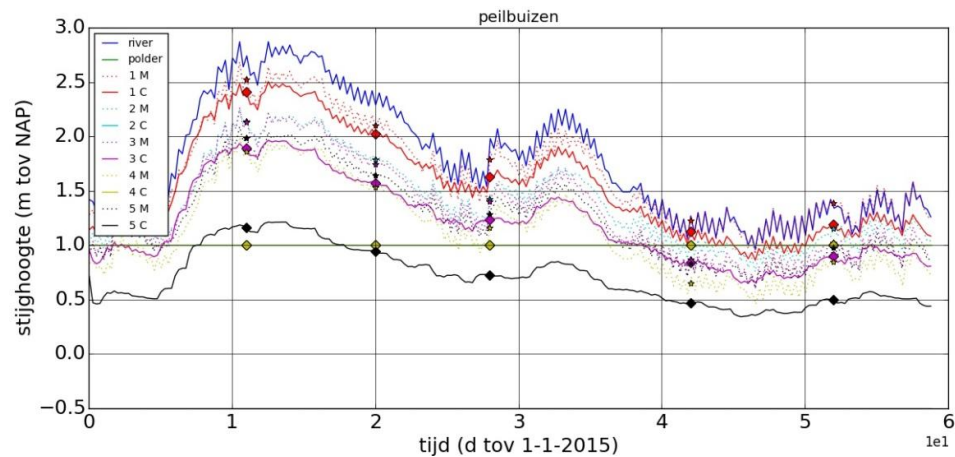
Tabel 5.3 Materiaaleigenschappen DgFlow3D model TG385.

6 september 2017, definitief



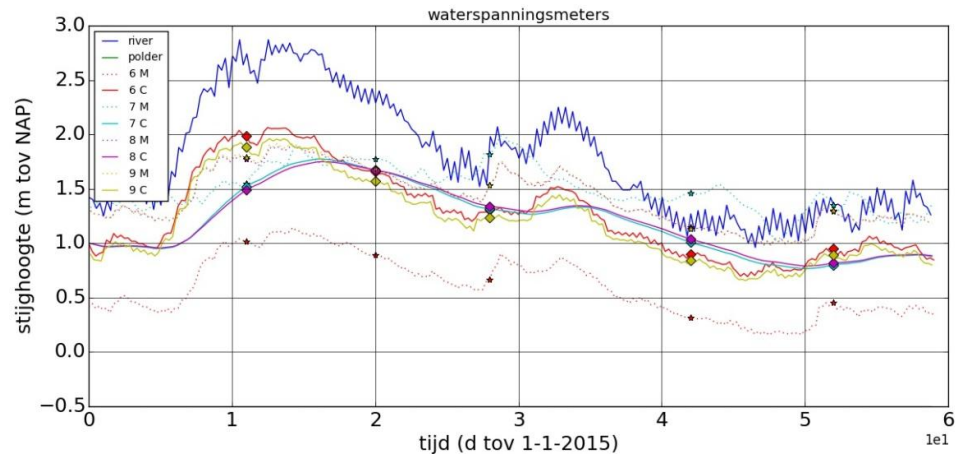
Figuur 5.21 Ondergrondschematisatie DgFlow3D model TG385

Het stijgheighteverloop dat volgt uit een gekoppelde DgFlow-Modflow berekening is afgebeeld in Figuur 5.22 en Figuur 5.23. De resultaten van een DgFlow berekening, waarbij de verticale modelranden zijn gesloten, zijn weergegeven in Figuur 5.24 en Figuur 5.25.

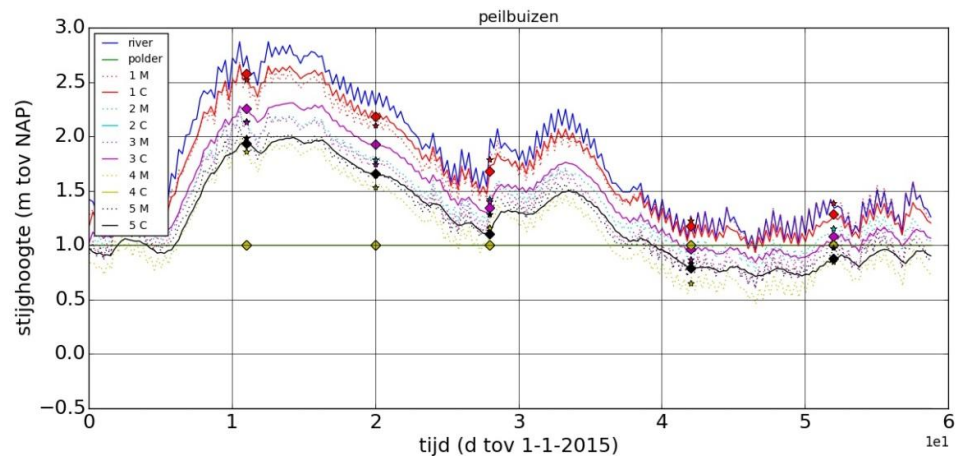


Figuur 5.22 Stijgheighteverloop peilbuizen TG385 volgens een DgFlow3D-Modflow.

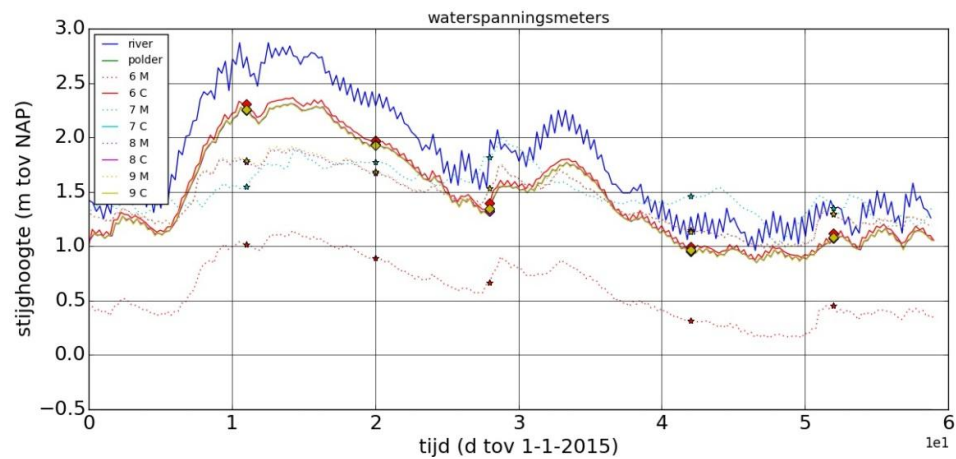
6 september 2017, definitief



Figuur 5.23 Stijghoogteverloop waterspanningsmeters TG385 volgens een DgFlow3D-Modflow berekening.



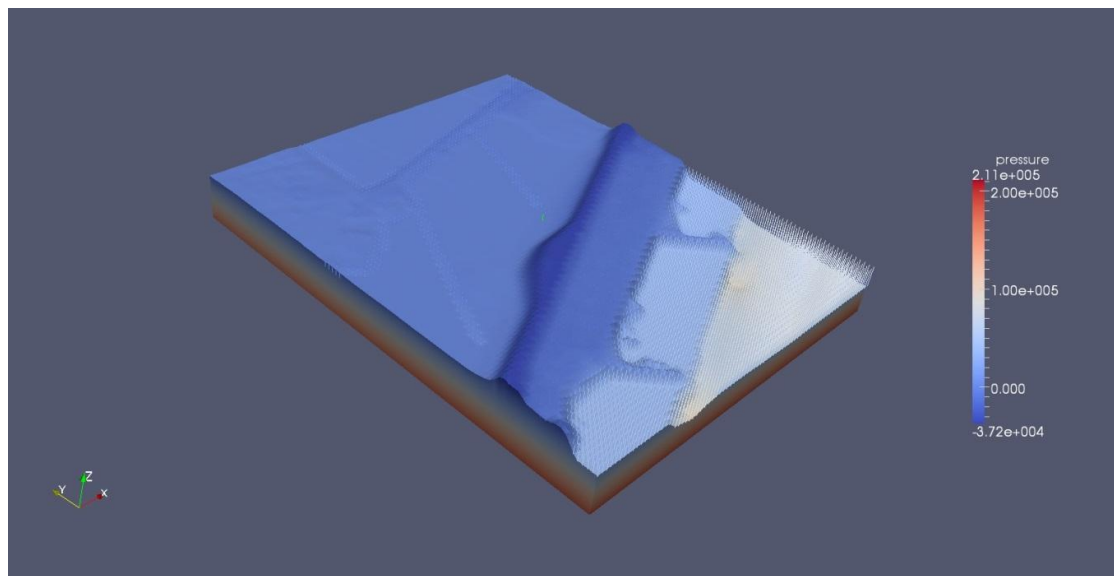
Figuur 5.24 Stijghoogteverloop peilbuizen TG385 volgens een DgFlow3D berekening.



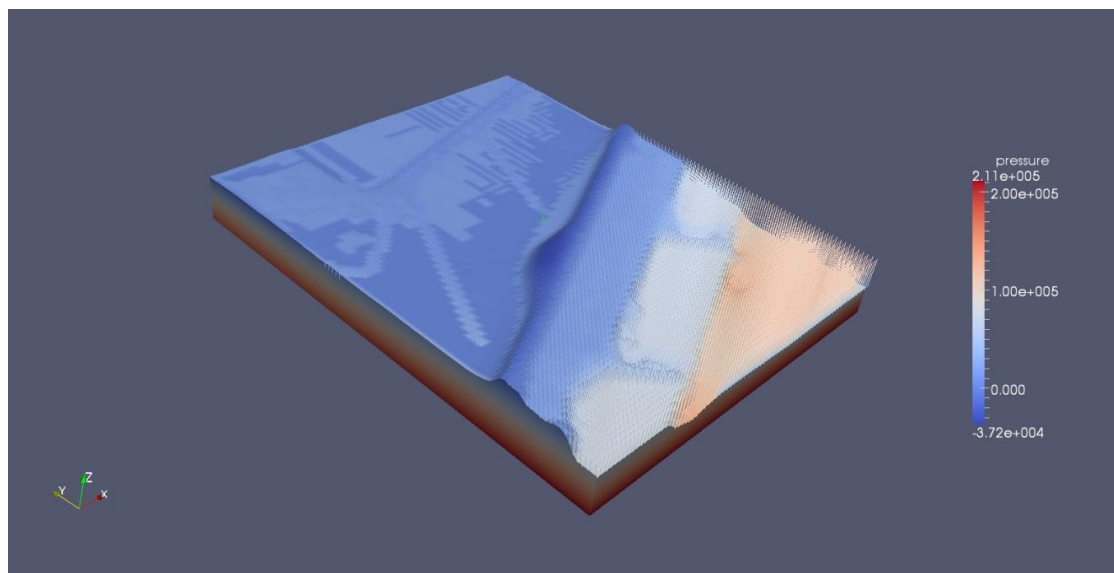
Figuur 5.25 Stijghoogteverloop waterspanningsmeters TG385 volgens een DgFlow3D berekening.

6 september 2017, definitief

Uit de rekenresultaten wordt geconcludeerd dat het modelgebied voor de onderzoekslocatie TG385 waarmee driedimensionale DgFlow berekeningen zijn uitgevoerd niet groot genoeg is om de voeding van grondwater door de rivier te beschrijven. Een gekoppelde Modflow-DgFlow berekening geeft daarom betere resultaten dan een DgFlow berekening waarbij de verticale modelranden gesloten zijn. Figuur 5.26 geeft de berekende waterspanningen bij een buitenwaterstand van NAP +3,10 m weer en Figuur 5.27 presenteert het waterspanningsverloop voor een maatgevend hoogwatersituatie bij een rivierwaterstand van NAP +6,60 m.



Figuur 5.26 Waterspanningen TG385 DgFlow3D berekening rivierwaterstand NAP +3,10 m.



Figuur 5.27 Waterspanningen TG385 DgFlow3D berekening maatgevend hoogwater NAP +6,60 m.

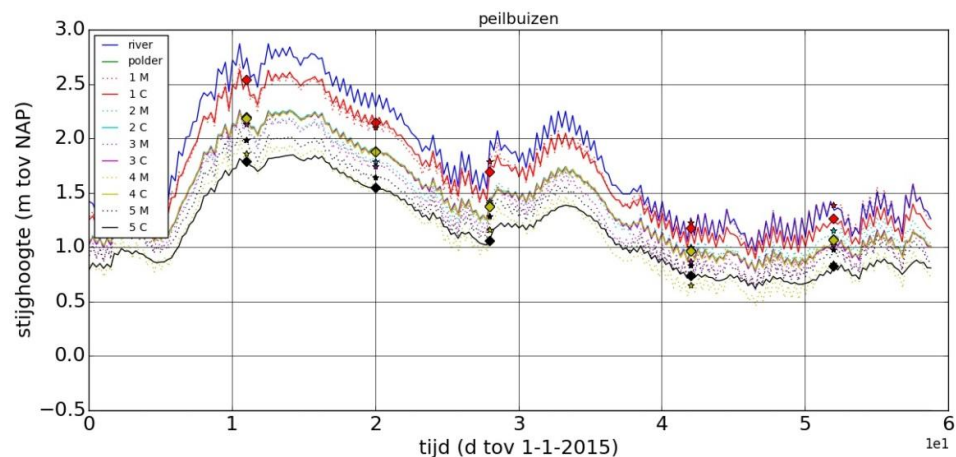
6 september 2017, definitief

De tweedimensionale berekeningen zijn uitgevoerd voor de dwarsdoorsnede die is afgeleid uit het Modflow model en is afgebeeld in Figuur 5.13. De modelparameters (doorlatendheden en bergingscoëfficiënten) zijn bij de tweedimensionale DgFlow berekening gelijk aan die van de Modflow berekening. De parameterwaarden zijn verzameld in Tabel 5.4.

Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	100	10 ⁻⁴
2	0,005	10 ⁻⁴
3	100	10 ⁻⁵
4	50	10 ⁻⁵
5	50	10 ⁻⁵

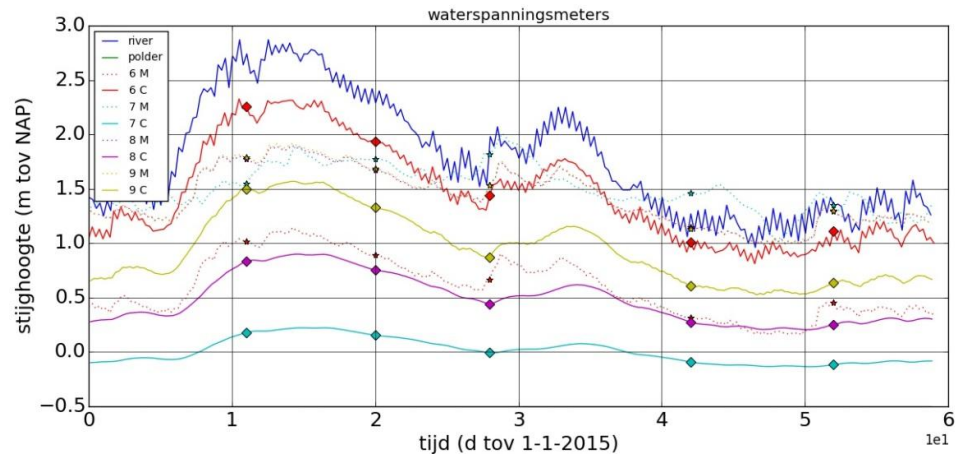
Tabel 5.4 Materiaaleigenschappen DgFlow2D model TG385.

Figuur 5.28 en Figuur 5.29 geven het stijghoogteverloop weer zoals berekend met een gekoppeld stroming-deformatie model. De resultaten van een ontkoppelde stromingsberekening zijn afgebeeld in Figuur 5.30 en Figuur 5.31. De overeenkomsten tussen gemeten en berekende stijghoogtes zijn redelijk goed en de gekoppelde stromings-deformatieberekeningen geven nagenoeg dezelfde resultaten als ontkoppelde stromingsberekeningen.

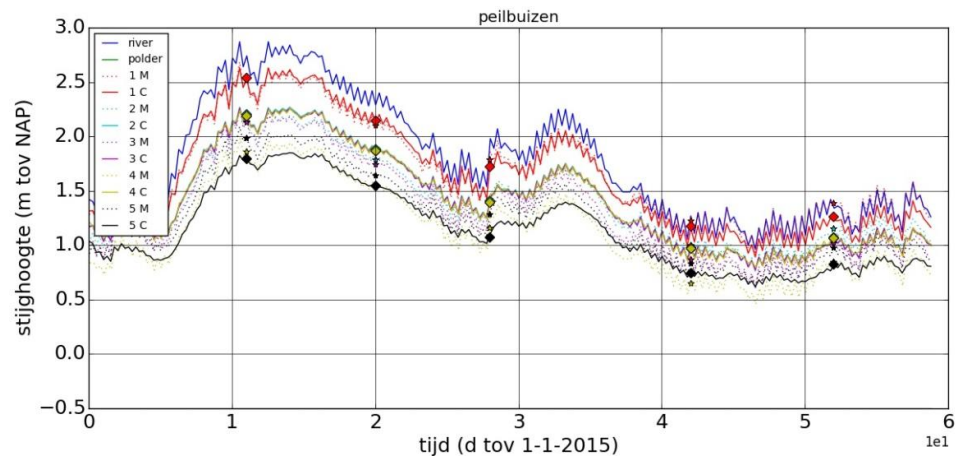


Figuur 5.28 Stijghoogteverloop peilbuizen TG385 volgens een DgFlow2D berekening.

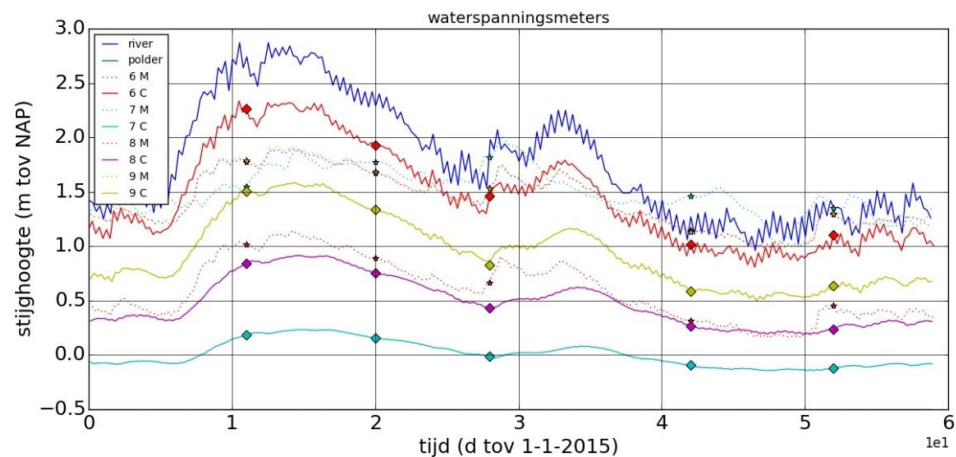
6 september 2017, definitief



Figuur 5.29 Stijghoogteverloop waterspanningsmeters TG385 volgens een DgFlow2D berekening.



Figuur 5.30 Stijghoogteverloop peilbuizen TG385 volgens een DgFlow2Dc berekening.

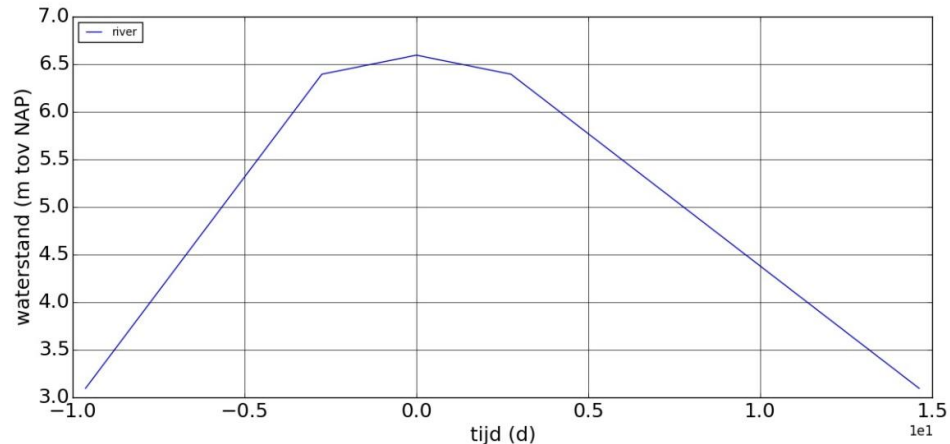


Figuur 5.31 Stijghoogteverloop waterspanningsmeters TG385 volgens een DgFlow2Dc berekening.

6 september 2017, definitief

5.4 Geotechnisch model

De maatgevende hydraulische belasting voor de onderzoekslocatie ‘Waaldijk Herwijnen’ is afgebeeld in Figuur 5.32. De hoogwatergolf heeft een duur van 25 dagen en het maximale verschil met het polderpeil bedraagt 6.595 m.

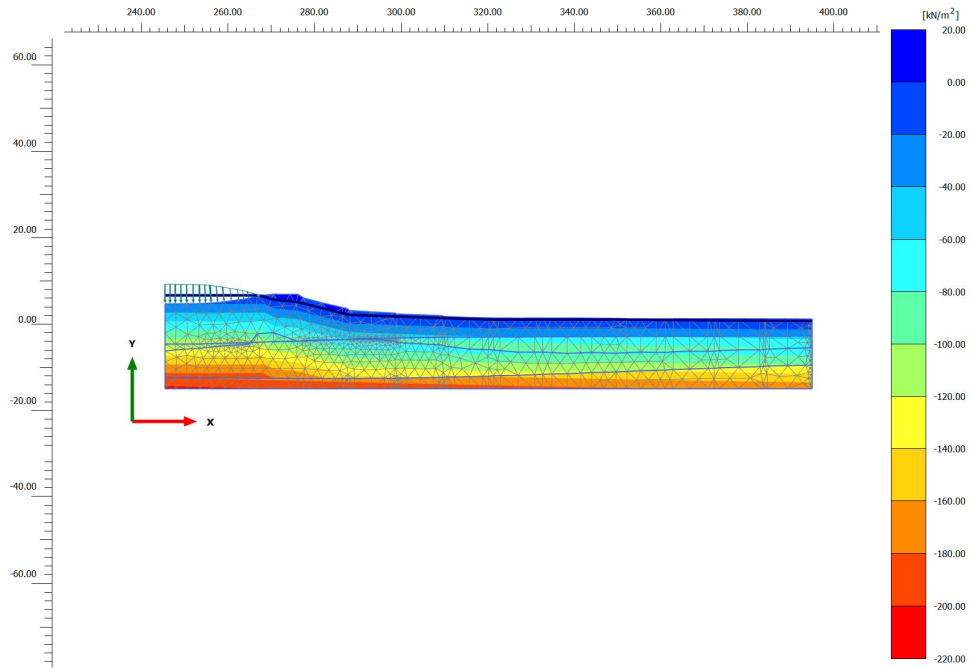


Figuur 5.32 Maatgevende hydraulische belasting TG385.

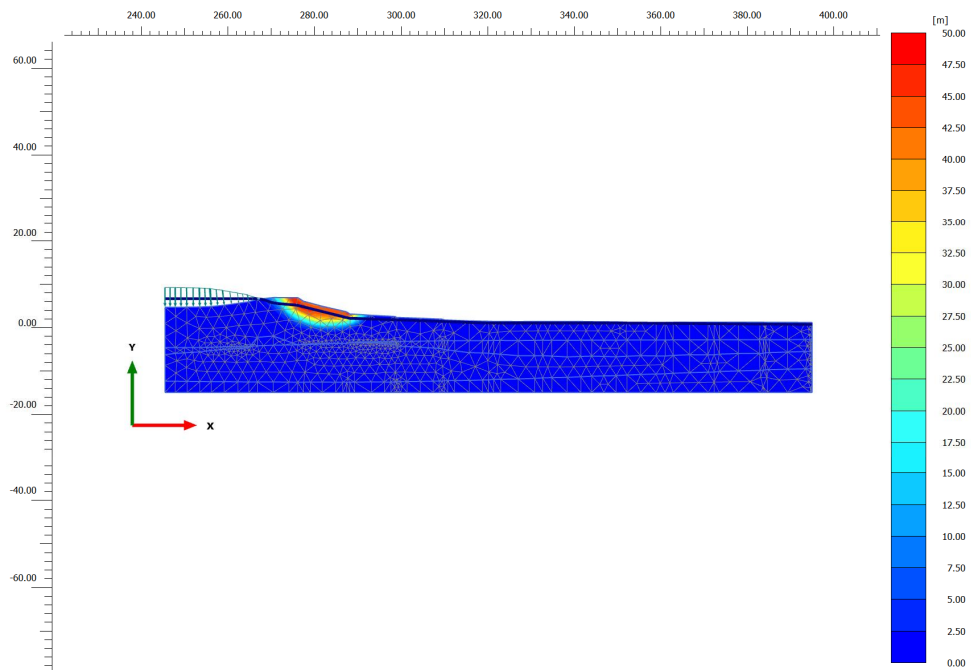
Het waterspanningsveld dat volgt uit een driedimensionale DgFlow berekening is opgelegd in een Plaxis berekening en weergegeven in Figuur 5.35, het vervormingsbeeld dat daarbij met een phi-c reductie procedure is berekend, is afgebeeld in Figuur 5.36. Figuur 5.37 geeft het waterspanningsveld dat volgt uit een tweedimensionale DgFlow berekening weer en in Figuur 5.38 zijn de verplaatsingen afgebeeld.

De freatische lijn die volgt uit een driedimensionale berekening ligt hoger dan de freatische lijn die bepaald is met een tweedimensionale berekening. Dit vertaalt zich in een stabiliteitsfactor die 11% kleiner is bij een driedimensionale beschouwing. Het verschil in hoogteligging is te verklaren uit het verschil in de doorlatendheid die toegekend is aan het dijkmateriaal in de tweedimensionale en driedimensionale analyse. De veiligheidsfactor die volgt uit een tijdsafhankelijke berekening komt overeen met de veiligheidsfactor die bepaald wordt met een stationaire berekening zodat geconcludeerd wordt dat het effect van tijdsafhankelijke grondwaterstroming op de stabiliteit van het dijklichaam te verwaarlozen is. In Tabel 5.5 zijn de waarden van de veiligheidsfactoren verzameld.

6 september 2017, definitief

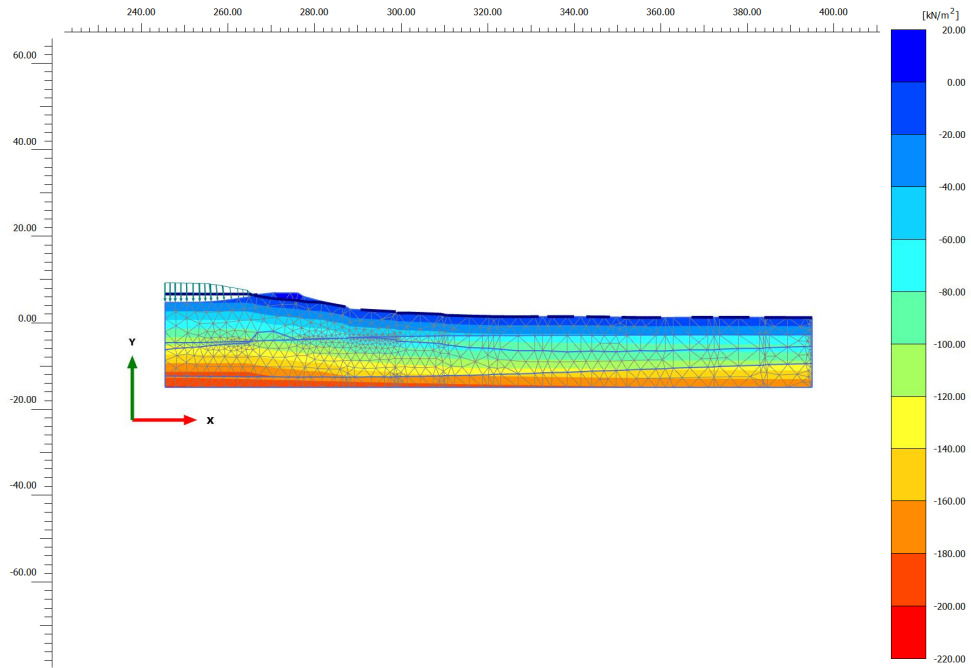


Figuur 5.33 Waterspanningen ontwerpberekening TG385.

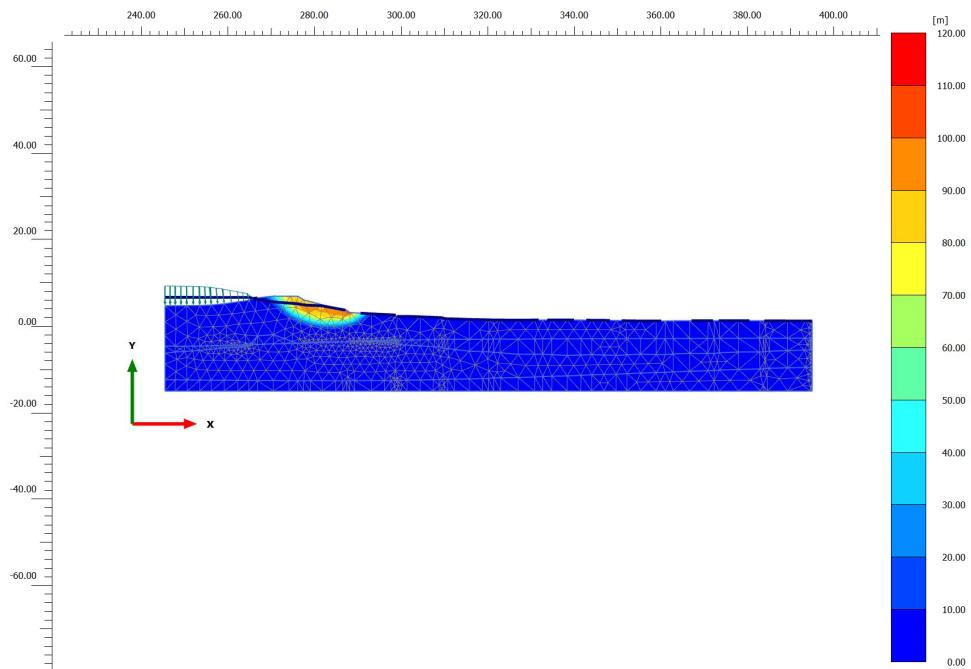


Figuur 5.34 Vervormingen ontwerpberekening na phi-c reductie TG385.

6 september 2017, definitief

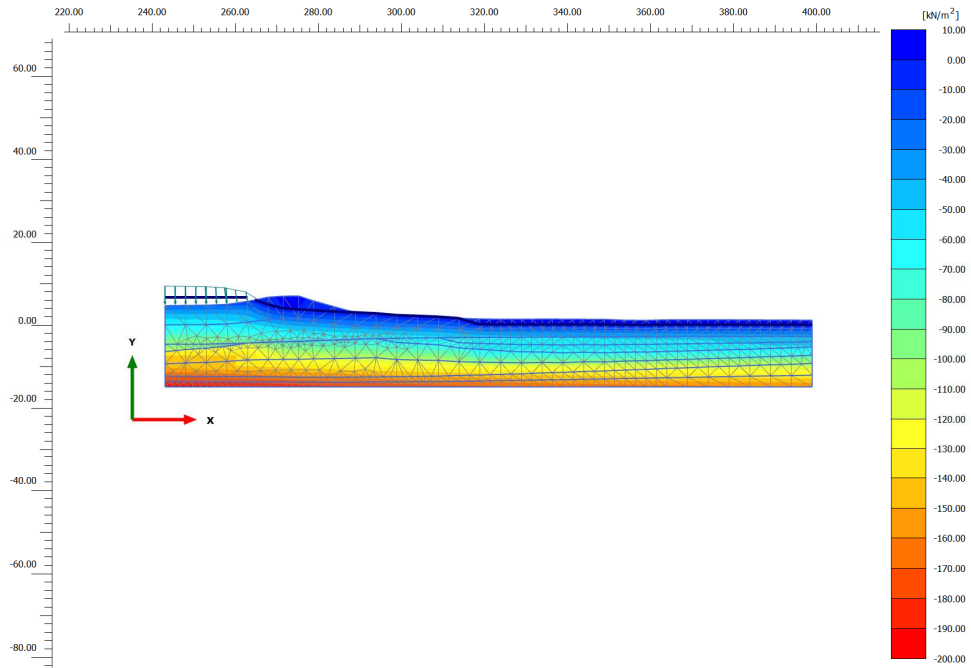


Figuur 5.35 Waterspanningen Plaxis2D-DgFlow3D TG385.

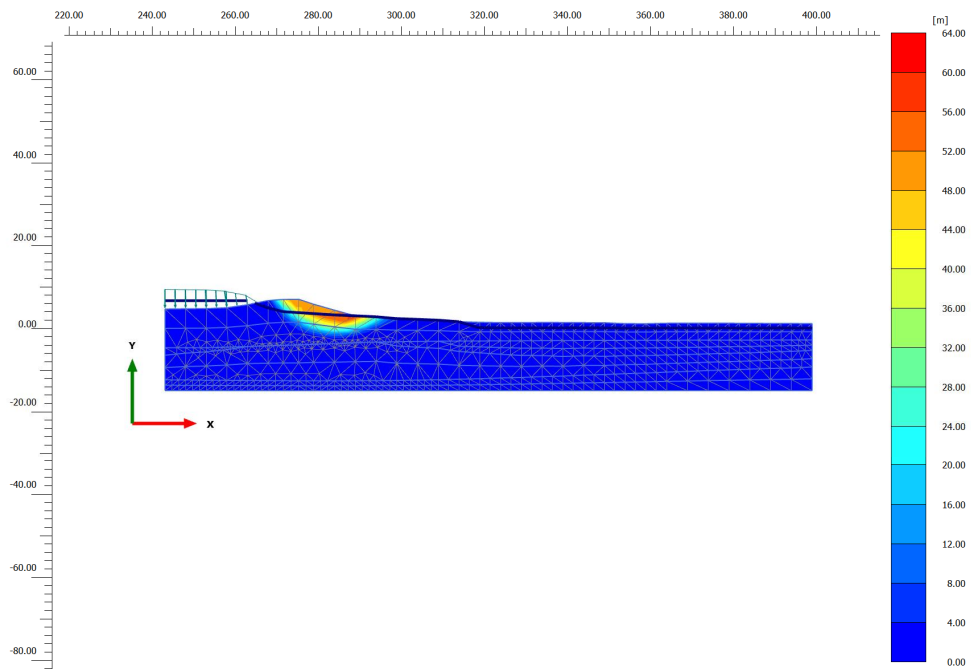


Figuur 5.36 Vervormingen Plaxis2D-DgFlow3D na phi-c reductie TG385.

6 september 2017, definitief



Figuur 5.37 Waterspanningen Plaxis2D-DgFlow2D TG385.



Figuur 5.38 Vervormingen Plaxis2D-DgFlow2D na phi-c reductie TG385.

6 september 2017, definitief

tijd (d)	waterstand (m NAP)		F _{stationair} 2D (-)	F _{tijdsafh} 2D (-)	F _{tijdsafh} 3D (-)
0.000	6,60	1,72	1,66	1,67	1,50
1.000	6,52			1,67	1,53
2.000	6,45			1,67	1,54

Tabel 5.5 Veiligheidsfactoren TG385.

6 Zeedijk Ameland

In Figuur 6.1 is de onderzoekslocatie op Ameland afgebeeld. De Waddenzeedijk maakt onderdeel uit van dijkkring 2 en is in de tweede toetsronde afgekeurd over vrijwel geheel de lengte voor het piping mechanisme. Langs de zeedijk ligt een getijdegeul waardoor de grondwaterstroming een driedimensionaal karakter krijgt. In de figuur zijn drie meetraaien afgebeeld waarin de stijghoogte wordt gemeten. Dit POVM onderzoek richt zich op de meest noordelijk gelegen meetraai (raai 6800).



Figuur 6.1 Onderzoekslocatie Ameland km 6.8.

6.1 Waterspanningsmetingen

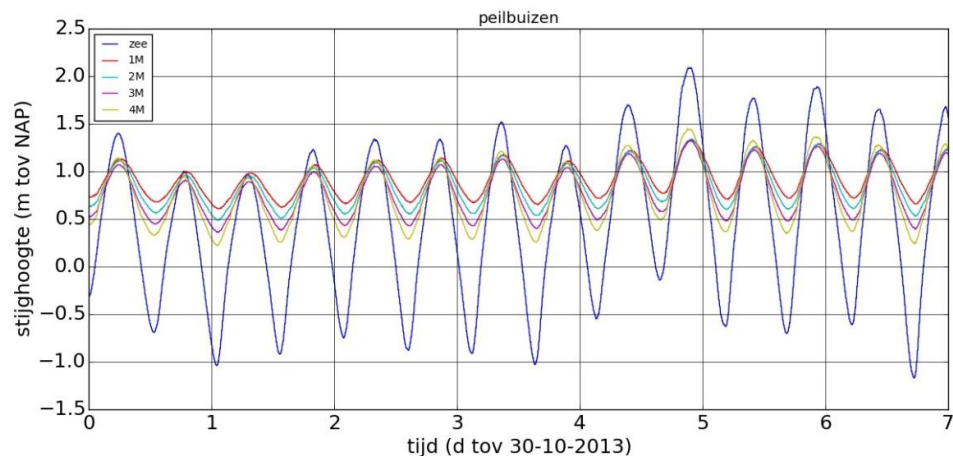
In opdracht van het Wetterskip Fryslan heeft Witteveen en Bos een monitoringsproef uitgevoerd over het traject km 6,8 tot km 7,1 (Bouw 2014). Binnen dit traject zijn drie meetraaien met in totaal twaalf waterspanningsmeters en drie peilbuizen geplaatst. Met de metingen is de invloed van een variërende buitenwaterstand op de waterspanningen in de watervoerende laag onderzocht. Boven de watervoerende laag bevindt zich een slecht doorlatende laag tussen NAP -1,50 m en NAP -2,00 m die omschreven is als matig siltig en/of matig kleilig zand. In dit onderzoek worden de metingen gebruikt om het effect van de tijdsafhankelijke waterspanningsopbouw op de stabiliteit van de waterkering vast te stellen. In Tabel 6.1 zijn de posities van de waterspanningsmeters verzameld.

6 september 2017, definitief

naam	x (m)	y (m)	z (m)
M1	176924,60	605826,90	-3,40
M2	176943,10	605816,90	-3,40
M3	176957,10	605809,10	-3,40
M4	176987,90	605794,90	-3,40
M5	176895,60	605777,30	-3,40
M6	176913,90	605767,30	-3,40
M7	176930,60	605760,80	-3,40
M8	176959,30	605744,80	-3,40
M9	176862,20	605726,90	-3,40
M10	176880,30	605717,90	-3,40
M11	176896,90	605707,70	-3,40
M12	176924,40	605694,50	-3,40

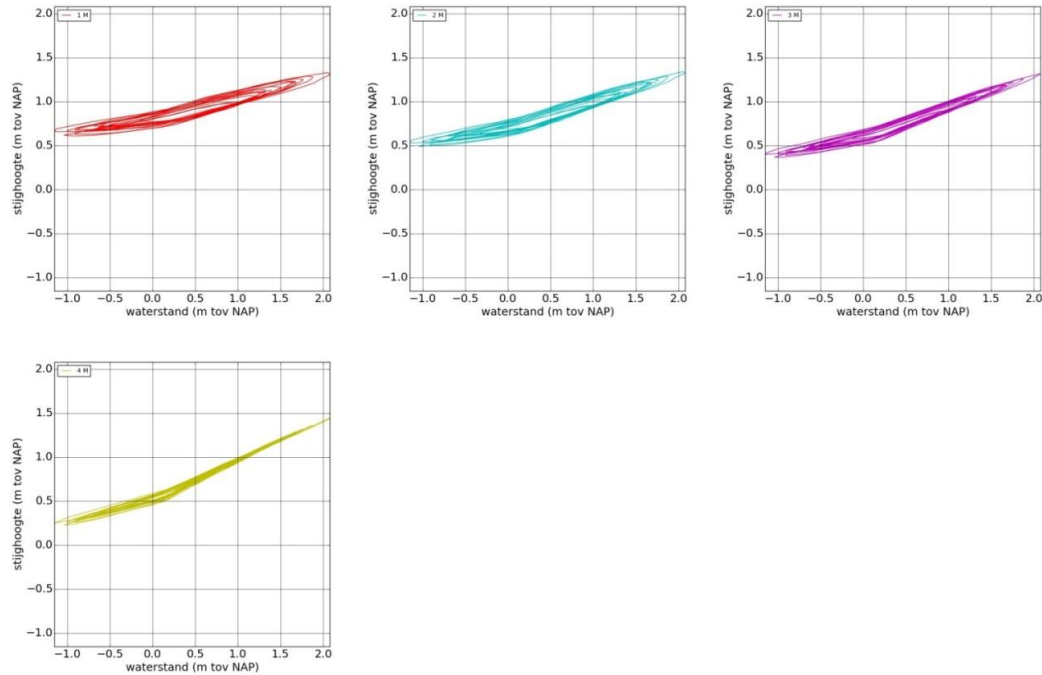
Tabel 6.1 Meetlocaties Ameland.

Met deze gegevens zijn de gemeten waterspanningen vertaald naar stijghoogtes en het stijghoogteverloop is voor een periode van 7 dagen afgebeeld in Figuur 6.2 en zijn de stijghoogtes per meetpunt als functie van de buitenwaterstand afgebeeld in Figuur 6.3. In deze figuren is een knik in het stijghoogteverloop zichtbaar die het gevolg is van het onderlopen en droogvallen van het voorland. De hysteresis duidt op een tijdsafhankelijke reactie als gevolg van berging in het systeem.



Figuur 6.2 Peilbuismetingen Ameland 30 oktober 2013 tot 6 november 2013.

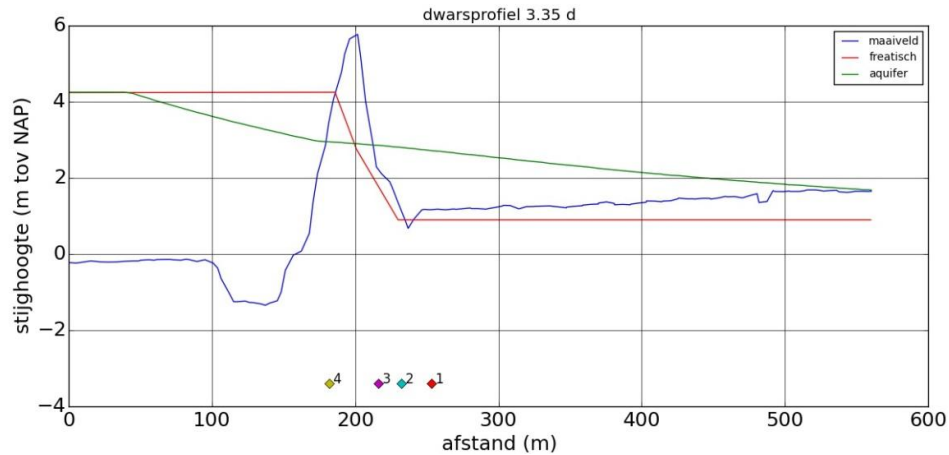
6 september 2017, definitief



Figuur 6.3 Peilbuismetingen Ameland 30 oktober 2013 tot 6 november 2013 als functie van de buitenwaterstand.

In Figuur 6.4 is het stijghoogteverloop afgebeeld dat volgt uit het gebruik van de ontwerprichtlijnen. Hierbij wordt de procedure uit bijlage B.2 van de leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken TAW (1985) voor stationaire stroming gecombineerd met de procedure die in bijlage b3.4 van het technisch rapport waterspanningen bij dijken (TRW 2004) wordt beschreven. Voor deze case is de stationaire lekfactor 76 m en de tijdsafhankelijke lekfactor op basis van de metingen 180 m. De hoogwatergolf heeft een duur van 2.5 dagen en een amplitude van 3.77 meter. De tijdsafhankelijke lekfactor bij maatgevend hoog water is vastgesteld op 317 m. Het freatisch vlak is bepaald met de procedure die in bijlage 1 (b1.3.3) van het technisch rapport waterspanningen bij dijken (TRW 2004) is voorgesteld.

6 september 2017, definitief

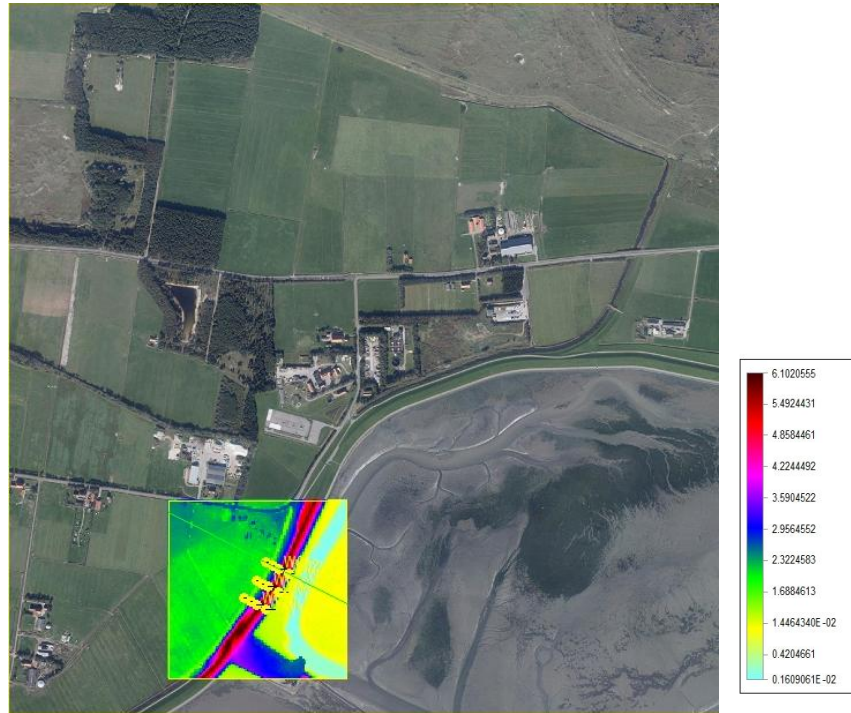


Figuur 6.4 Stijghoogteverloop Ameland volgens ontwerprichtlijn.

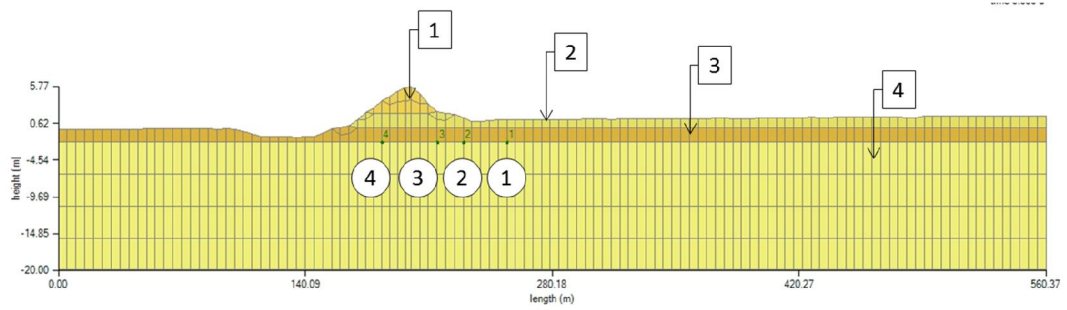
6.2 Lokaal geohydrologisch model

De hoogtekarta die gebruikt is voor het opstellen van het driedimensionale DgFlow model is afgebeeld in Figuur 6.5. Uit initiële berekeningen volgt een weerstand van de Holocene deklaag van 20 d en een transmissiviteit van het Pleistocene pakket van 540 m/d. De spreidingslengte bedraagt daarmee 104 m en randeffecten zijn te verwaarlozen bij een modelafmeting van 312 m. Het driedimensionale DgFlow model, waarvan het stromingsdomein is afgebeeld in Figuur 6.5, heeft een afmeting van 500 bij 500 meter en ligt in kaartvlak (176650,605500) - (177150,606000). De dwarsdoorsnede langs de meetraai die gebruikt wordt voor het opstellen van het tweedimensionale DgFlow model is weergegeven in Figuur 6.6. In Figuur 6.7 is het ondergrondmodel afgebeeld. De materiaaleigenschappen die volgden uit een inverse analyse met het driedimensionale DgFlow model zijn verzameld in Tabel 6.2.

6 september 2017, definitief



Figuur 6.5 Hoogtekaart DgFlow Ameland model.

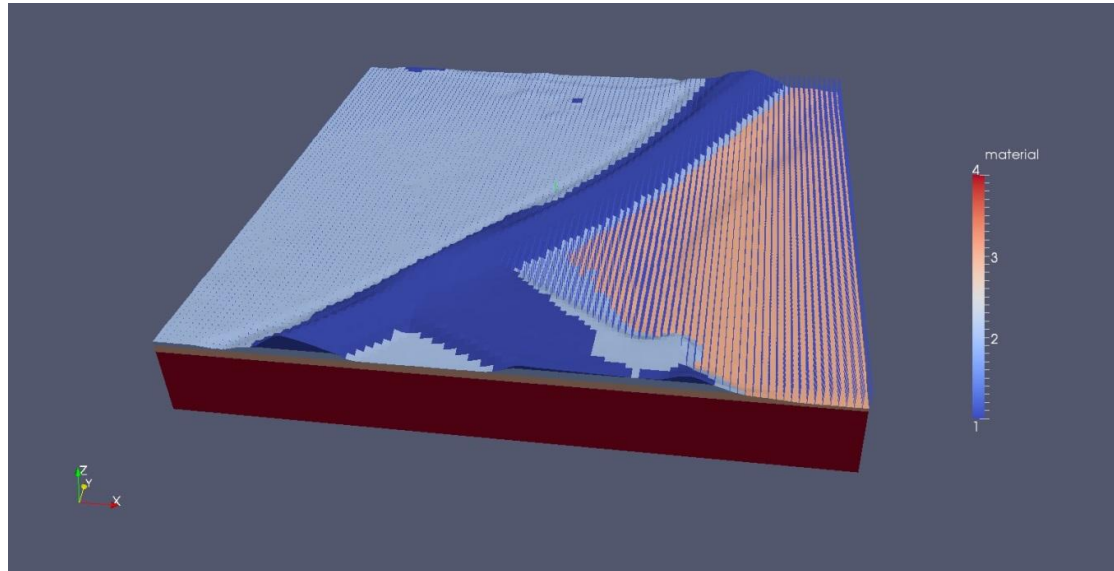


Figuur 6.6 Dwarsprofiel DgFlow Ameland model.

Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	0,1	10^{-5}
2	4	10^{-5}
3	0,1	10^{-5}
4	30	10^{-5}

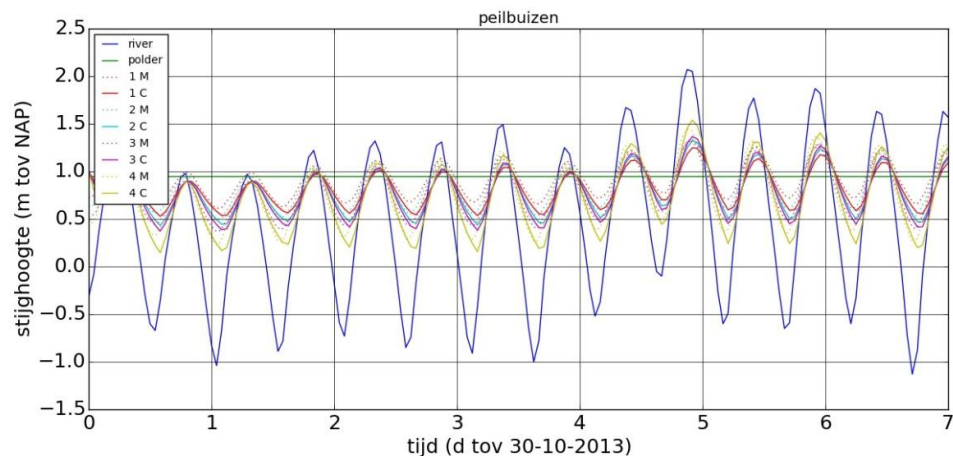
Tabel 6.2 Materiaaleigenschappen Ameland DgFlow3D

6 september 2017, definitief



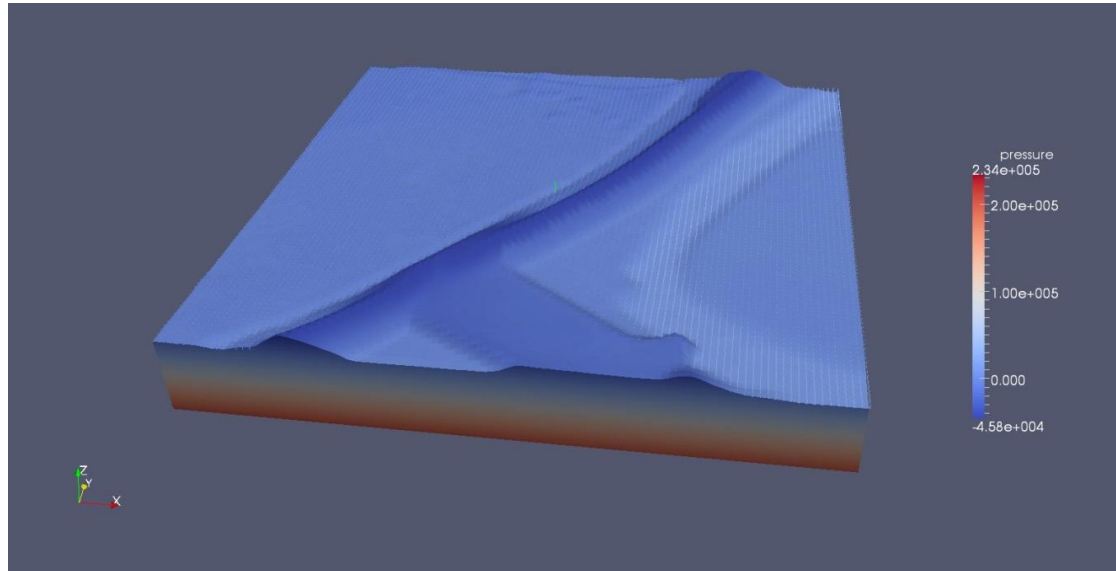
Figuur 6.7 Ondergrondschematisatie DgFlow3D model Ameland

De resultaten van een driedimensionale DgFlow berekening zijn afgebeeld in Figuur 6.8. Uit deze figuur wordt geconcludeerd dat het gemeten stijghoogteverloop redelijk goed gesimuleerd kan worden met het gekalibreerde stromingsmodel. Ter illustratie worden de waterspanningen bij een buitenwaterstand van NAP +0,21 m in Figuur 6.9 afgebeeld en Figuur 6.10 geeft de waterspanningen weer tijdens maatgevend hoogwater waarbij het Waddenzeepeil een hoogte heeft van NAP +4,25 m.

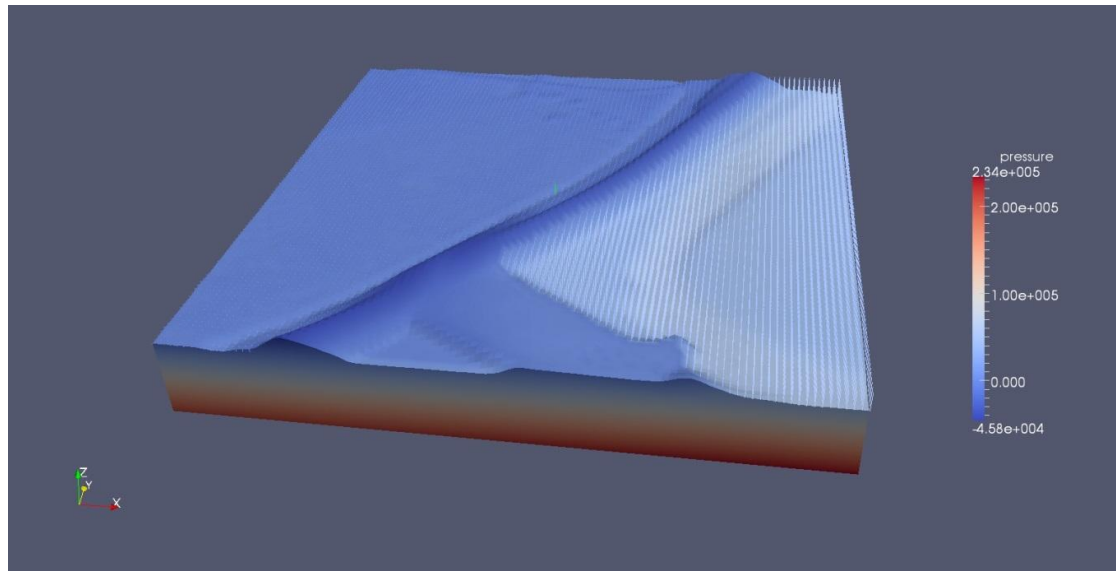


Figuur 6.8 Stijghoogteverloop peilbuizen Ameland volgens een DgFlow3D berekening.

6 september 2017, definitief



Figuur 6.9 Waterspanningen Ameland DgFlow3D berekening zeepeil NAP +0,21 m.



Figuur 6.10 Waterspanningen Ameland DgFlow3D berekening maatgevend hoogwater NAP +4,25 m.

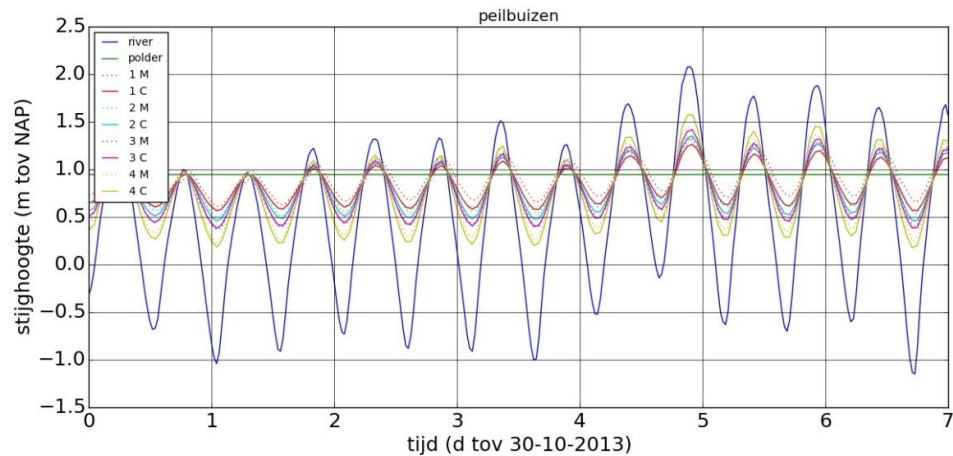
Voor de tweedimensionale snede die is afgebeeld in Figuur 6.6 worden gekoppelde stromings-deformatieberekeningen en ontkoppelde stromingsberekeningen gemaakt. De materiaalparameters die verkregen zijn uit een inverse analyse met het gekoppelde model zijn verzameld in Tabel 6.3.

6 september 2017, definitief

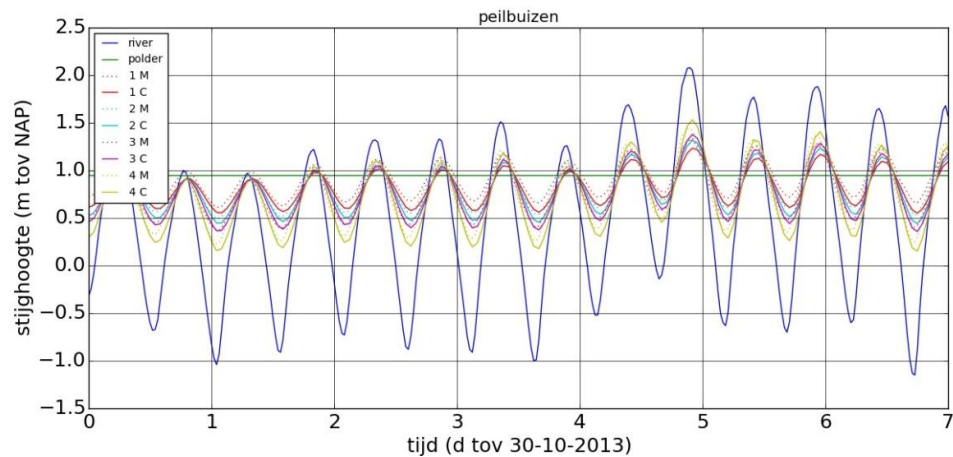
Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	0,1	10^{-5}
2	4	10^{-5}
3	0,1	10^{-5}
4	30	10^{-5}

Tabel 6.3 Materiaaleigenschappen Ameland.DgFlow2D

Het stijghoogteverloop dat is bepaald met een ontkoppelde berekening is weergegeven in Figuur 6.11. De gekoppelde berekening levert vrijwel hetzelfde verloop. Dit verloop is afgebeeld in Figuur 6.12.



Figuur 6.11 Stijghoogteverloop peilbuizen Ameland volgens een DgFlow2D berekening.

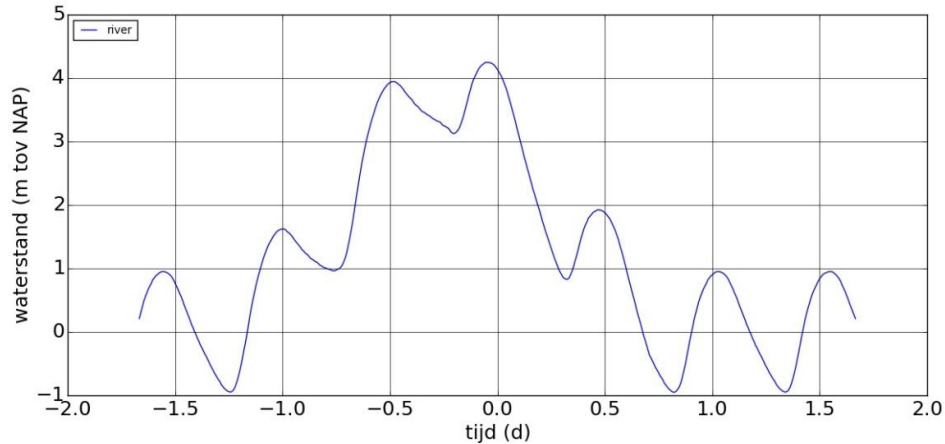


Figuur 6.12 Stijghoogteverloop peilbuizen Ameland volgens een DgFlow2Dc berekening.

6 september 2017, definitief

6.3 Geotechnisch model

De maatgevende hydraulische belasting die is berekend met het Wettelijk Beoordelings Instrument is afgebeeld in Figuur 6.13. De hoogwatergolf heeft een duur van 3,5 dagen en het maximale verschil met het polderpeil bedraagt 3,296 m.

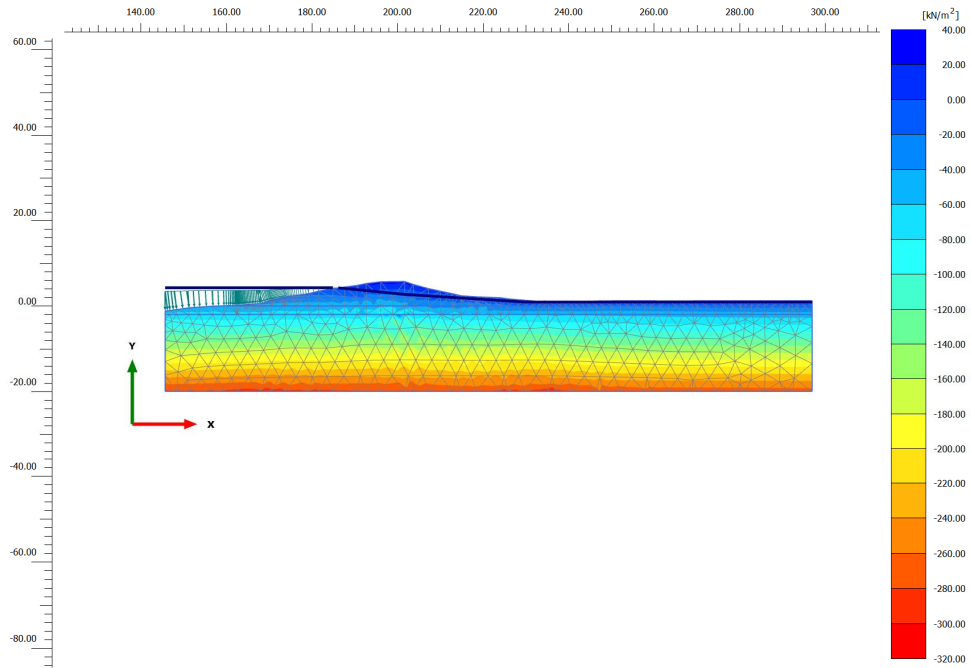


Figuur 6.13 Maatgevende hydraulische belasting Ameland.

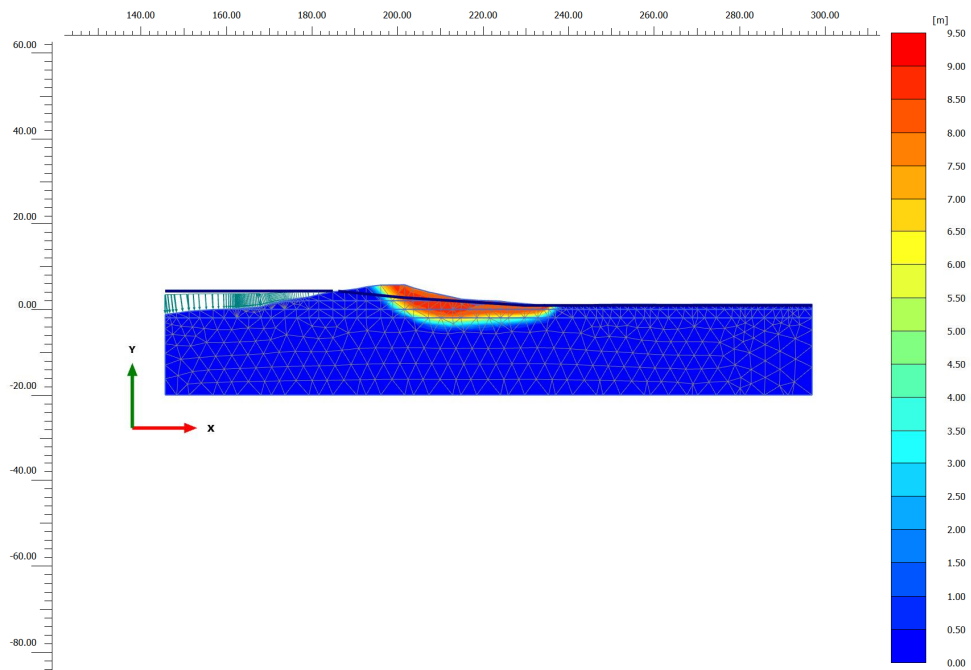
In Figuur 6.16 is het waterspanningsveld afgebeeld dat volgt uit een driedimensionale DgFlow berekening voor het tijdstip 0 d en Figuur 6.17 laat de totale vervorming zien die volgt uit een stabiliteitsanalyse waarbij het waterspanningsveld is opgelegd. Het waterspanningsveld dat bepaald is met het tweedimensionale model is afgebeeld in Figuur 6.18 en het bijbehorende verplaatsingsveld is weergegeven in Figuur 6.19.

In Tabel 6.4 zijn de veiligheidsfactoren voor de Ameland case verzameld. Een tijdsafhankelijke berekening geeft een stabiliteitsfactor die 12% hoger is dan een stationaire beschouwing. De driedimensionale berekening geeft een lagere waarde van de veiligheidsfactor dan een tweedimensionale berekening. Dit is vooral het gevolg van een hogere ligging van de freatische lijn. De polderrandvoorwaarden zijn aan het driedimensionale model bij deze case op een zelfde manier toegekend als aan het tweedimensionale model; de stijghoogte is opgelegd aan de bovenrand. Daardoor konden de materiaaleigenschappen voor beide modellen gelijk gekozen worden. De lagere waarde van de stabiliteitsfactor, die bij de driedimensionale beschouwing wordt gevonden, kan verklaard worden uit de geometrie van het probleem (gebogen vorm van het dijklichaam). Beide modellen zijn gekalibreerd op waterstanden die variëren tussen NAP -1,00 m en NAP +2,00 m en de voorspelling extrapoleert het stijghoogteveld met een buitenwaterstand van NAP +4,00 m waarbij oppervlaktewater door een groter oppervlak de dijk in stroomt.

6 september 2017, definitief

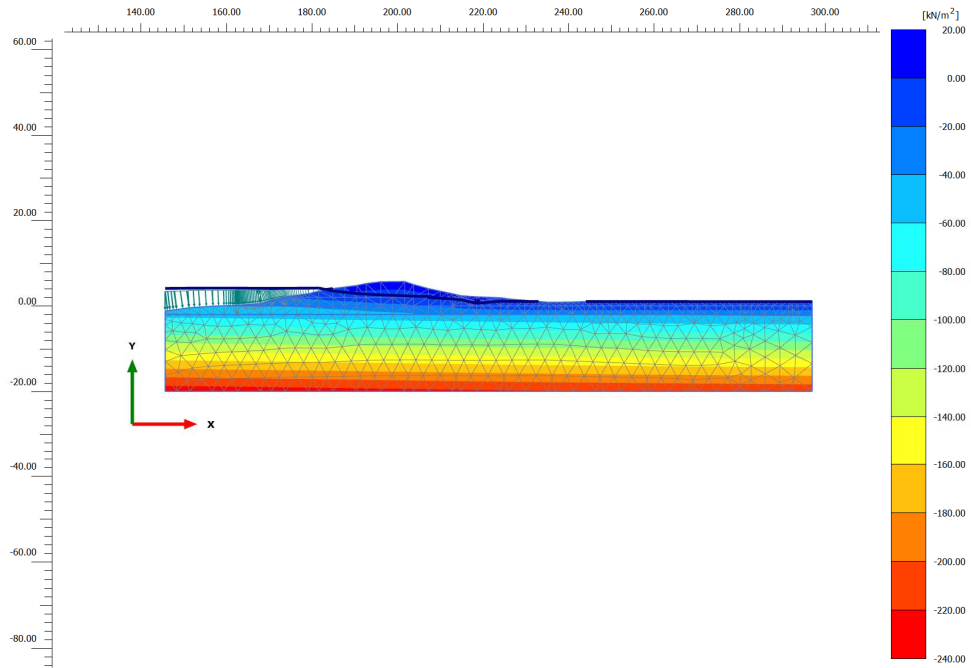


Figuur 6.14 Waterspanningen ontwerpberekening Ameland.

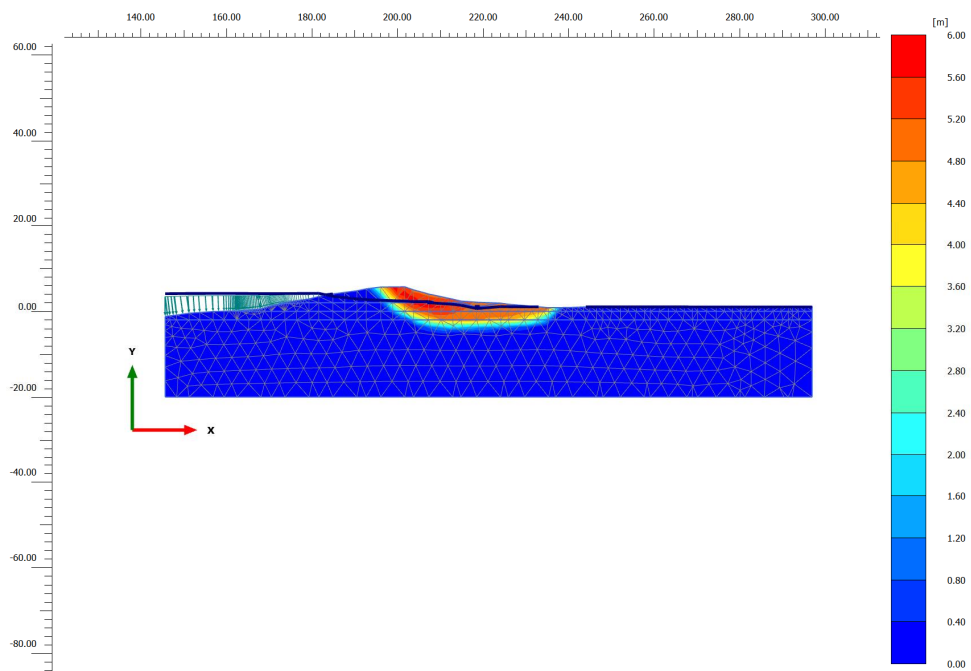


Figuur 6.15 Vervormingen ontwerpberekening na phi-c reductie Ameland.

6 september 2017, definitief

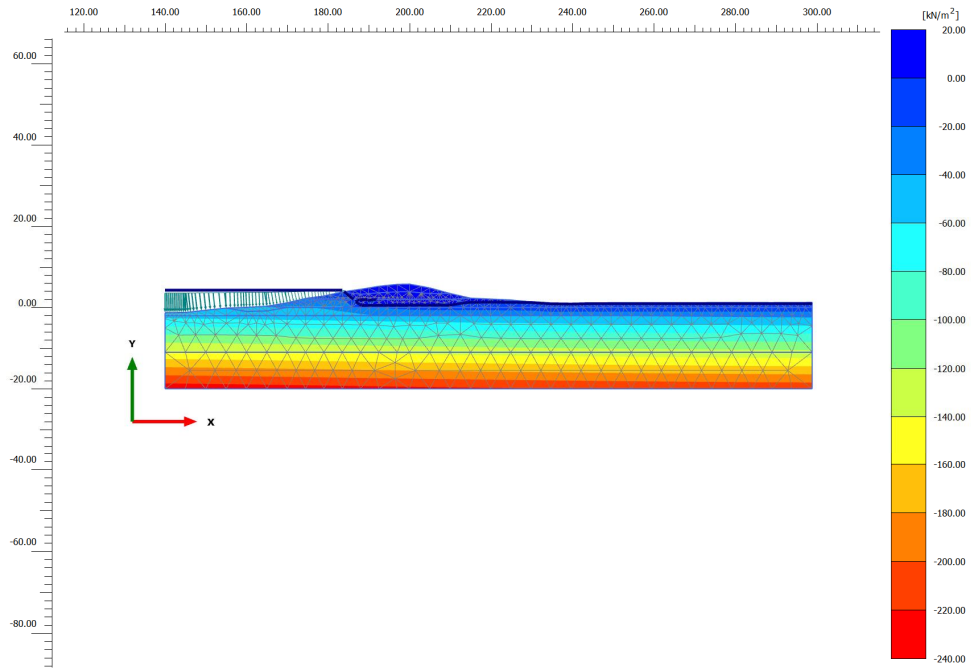


Figuur 6.16 Waterspanningen Plaxis2D-DgFlow3D Ameland.

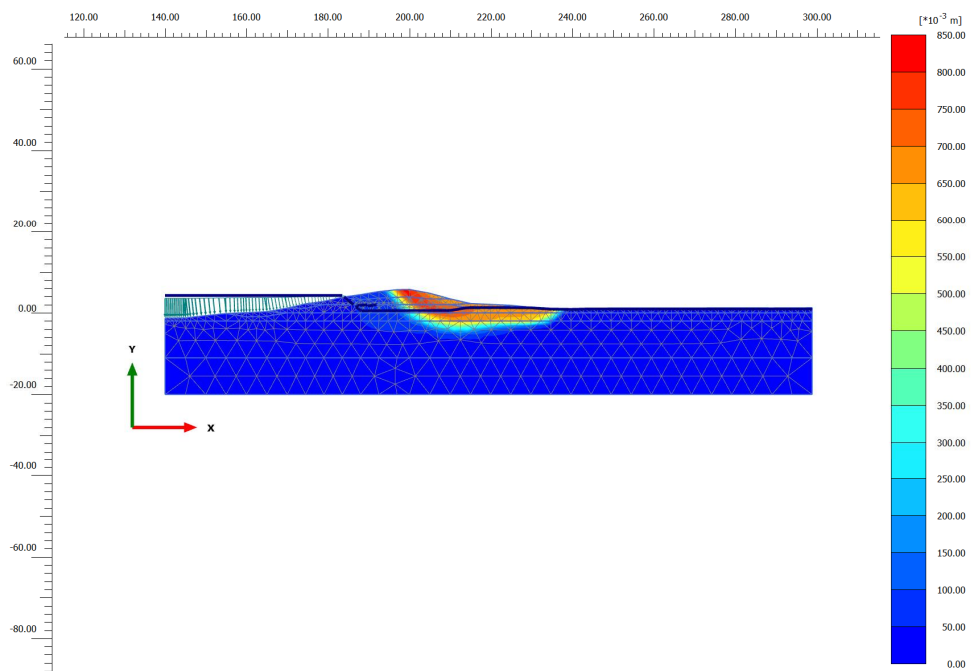


Figuur 6.17 Vervormingen Plaxis2D-DgFlow3D na phi-c reductie Ameland.

6 september 2017, definitief



Figuur 6.18 Waterspanningen Plaxis2D-DgFlow2D Ameland.



Figuur 6.19 Vervormingen Plaxis2D-DgFlow2D na phi-c reductie Ameland.

6 september 2017, definitief

tijd (d)	waterstand (m NAP)	F _{ontwerp} (-)	F _{stat} 2D (-)	F _{tijdsafh} 2D (-)	F _{tijdsafh} 3D (-)
0,000	4,25	1,89	1,91	2,16	2,05
0,042	4,14			2,16	2,05
0,083	3,83			2,16	2,07

Tabel 6.4 Veiligheidsfactoren Ameland.

7 Aaldijk Nieuw Beijerland

De Aaldijk bij Nieuw Beijerland ligt in het benedenrivierengebied langs het Spui. In Figuur 7.1 is de onderzoekslocatie afgebeeld met de meetraai waarin twee waterspanningsmeters zijn geplaatst. In het kader van de Wet op de waterkeringen is een systematisch onderzoek van de Brielse dijkkring uitgevoerd (Rozing 1999) waarbij naar geotechnische aspecten als opdrijven / opbarsten, piping, macro-stabiliteit van het binnen en buitentalud en afschuiven van de vooroever is gekeken.



Figuur 7.1 Onderzoekslocatie Aaldijk km 22.7.

7.1 Waterspanningsmetingen

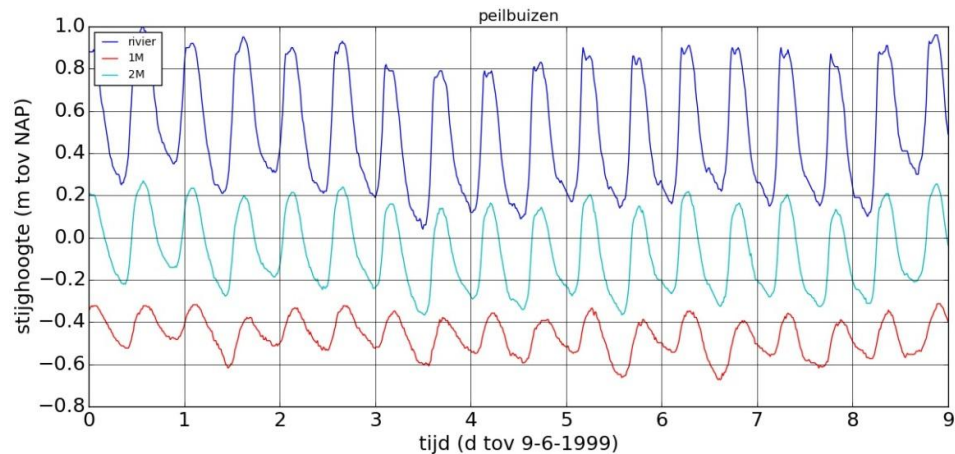
In dit POV onderzoek worden waterspanningsmetingen die zijn uitgevoerd binnen het traject HMP 22,50 – HMP 24,97: Aaldijk (Rozing 1999) gebruikt voor het kwantificeren van het effect van tijdsafhankelijke stroming op de macrostabiliteit van het dijklichaam. De posities van de waterspanningsmeters in raai 22,77 km zijn opgenomen in Tabel 7.1.

naam	x (m)	y (m)	z (m)
M1	84120,00	426251,00	-7,47
M2	84094,00	426172,00	-8,17

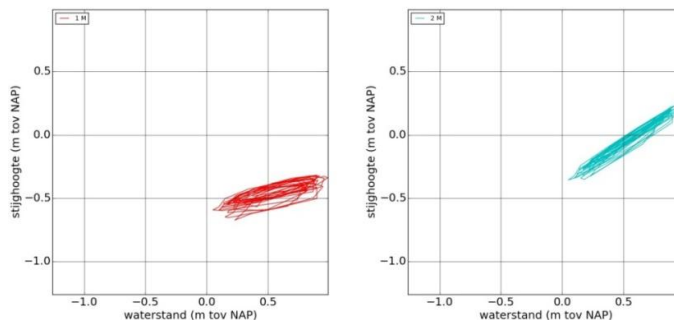
Tabel 7.1 Meetlocaties Aaldijk.

6 september 2017, definitief

De gemeten stijghoogtes in de waterspanningsmeters en het verloop van de buitenwaterstand is voor een periode van 9 dagen afgebeeld in Figuur 7.2 en de stijghoogte per meetpunt als functie van de buitenwaterstand is weergegeven in Figuur 7.3.



Figuur 7.2 Peilbuismetingen Aaldijk 9 juni 1999 tot 18 juni 1999.

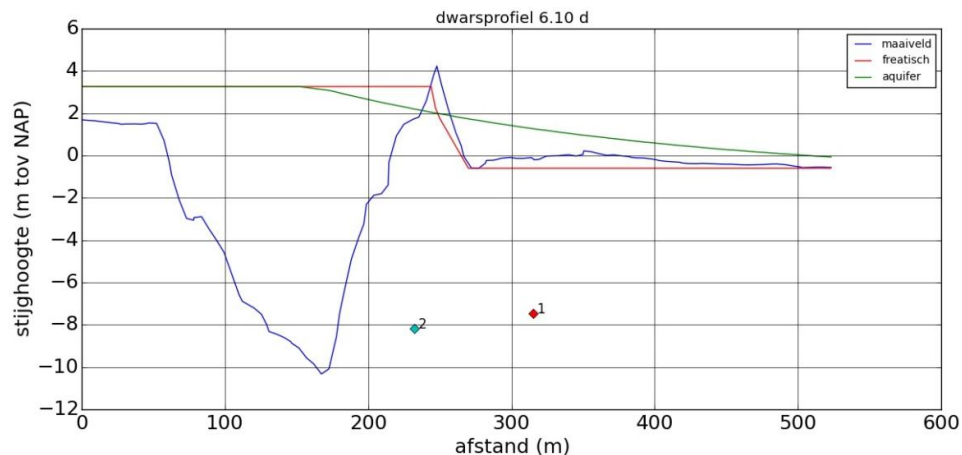


Figuur 7.3 Peilbuismetingen Aaldijk 9 juni 1999 tot 18 juni 1999 als functie van de buitenwaterstand.

In Figuur 7.4 is het stijghoogteverloop afgebeeld dat volgt uit het gebruik van de ontwerprichtlijnen. Hierbij wordt de procedure uit bijlage B.2 van de leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken TAW (1985) voor stationaire stroming gecombineerd met de procedure die in bijlage b3.4 van het technisch rapport waterspanningen bij dijken (TRW 2004) wordt beschreven. Bij deze gecombineerde methode wordt gebruik gemaakt van een stationaire en een cyclische lekfactor. De cyclische lekfactor volgt uit een grafische weergave van de buitenwaterstand als functie van de peilbuiswaarnemingen waarvan de helling wordt bepaald; de slankheid van de ellips wordt daarbij niet in rekening gebracht. Daarvoor moeten peilbuismetingen en buitenwaterstandsmetingen worden uitgevoerd over een periode van 13 uur of langer. De stationaire lekfactor volgt uit de kalibratie van de gesuperponeerde analytische oplossingen waarbij het intredepunt wordt bepaald. Vervolgens wordt de cyclische lekfactor geschaald naar de golf bij maatgevend hoog water en wordt de stijghoogte in het goed doorlatend pakket als functie van de plaats berekend. Voor deze case is de stationaire lekfactor 204 m en de tijdsafhankelijke lekfactor op basis van de metingen 152 m. De hoogwatergolf is opgesplitst in twee delen met een duur van 10 d en 2 d en bijbehorende

6 september 2017, definitief

amplitude van 1.5 m en 1.26 m. De tijdsafhankelijke lekfactoren zijn vastgesteld op 377 m en 252 m. Het freatisch vlak is bepaald met de procedure die in bijlage 1 (b1.3.3) van het technisch rapport waterspanningen bij dijken (TRW 2004) is voorgesteld.

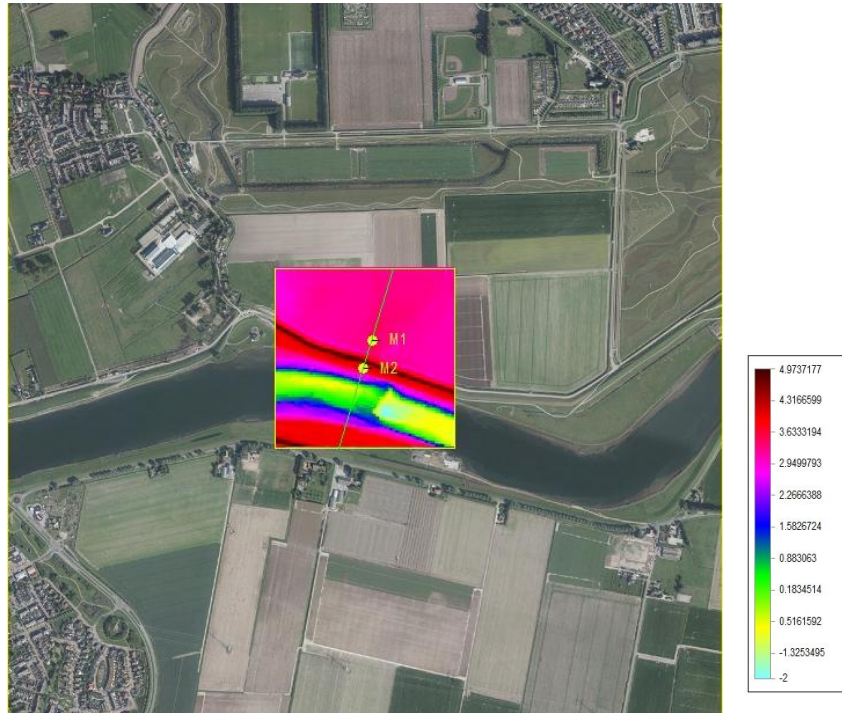


Figuur 7.4 Stijghoogteverloop Aaldijk volgens ontwerprichtlijn.

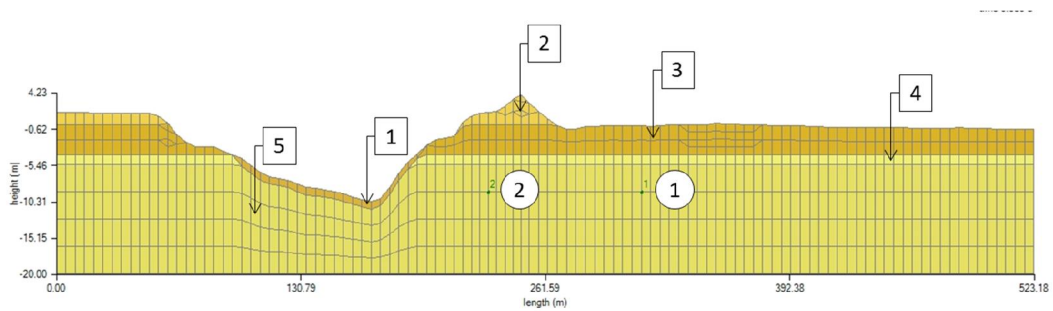
7.2 Lokaal geohydrologisch model

Het driedimensionale DgFlow model heeft een afmeting van 500 bij 500 meter en ligt in het kaartvlak (83850,425950) - (84350,426450). Na kalibratie van het model bleek dat het domein eigenlijk te klein gekozen is om de instroom van grondwater door de verticale modelranden te kunnen verwaarlozen. De weerstand van de deklaag bedraagt namelijk 34 d en de transmissiviteit van de aquifer is 1280 m²/d waarmee een spreidingslengte 208 m gevonden wordt en waaruit vervolgens een modelgrootte van 625 m volgt. De hoogtekaart van het modelgebied is afgebeeld in Figuur 7.5. De positie van het maaiveld is afgeleid van het actueel hoogtebestand Nederland en de ligging van de rivierbodem volgt uit Rijkswaterstaatmetingen. In de figuur is de ligging van de meetraai, waarin tweedimensionale DgFlow berekeningen worden uitgevoerd, eveneens afgebeeld. Figuur 7.6 geeft de doorsnede langs de meetraai weer en Figuur 7.7 presenteert het ondergrondmodel.

6 september 2017, definitief



Figuur 7.5 Hoogtekaart DgFlow model Aaldijk.



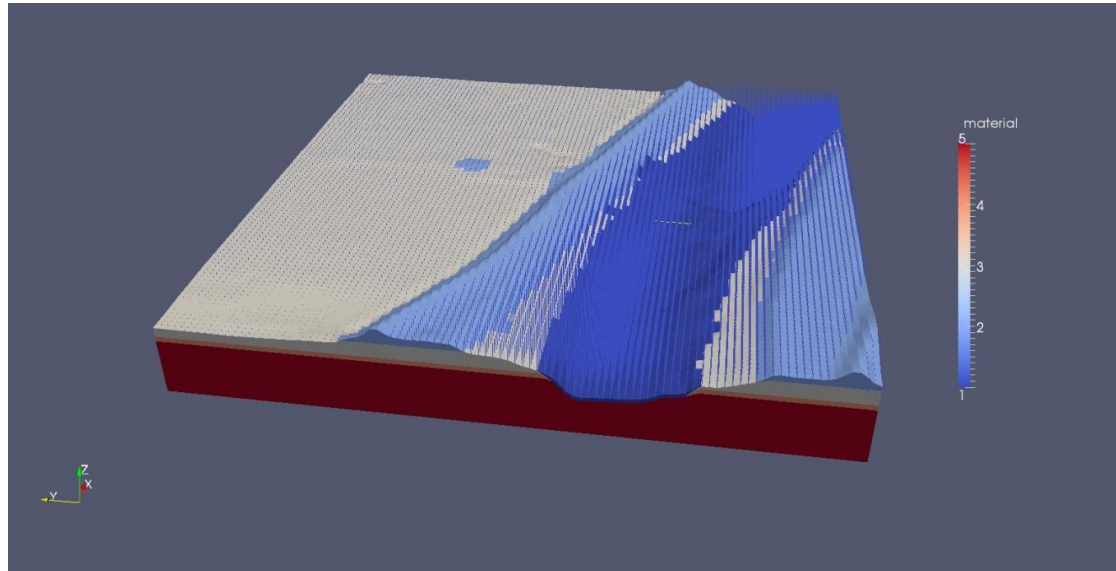
Figuur 7.6 Dwarsprofiel DgFlow model Aaldijk.

Driedimensionale berekeningen zijn alleen uitgevoerd met het driedimensionale DgFlow model. De doorlatendheid en samendrukbaarheid van de materialen waaruit de ondergrondlagen zijn opgebouwd, zijn weergegeven in Tabel 7.2.

Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	0,22	10^{-5}
2	0,1	10^{-5}
3	0,1	10^{-4}
4	10	10^{-5}
5	79	10^{-5}

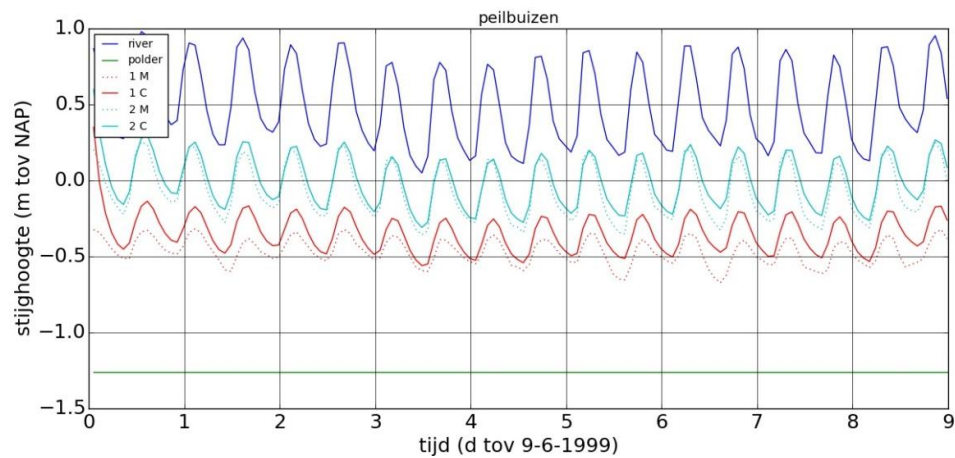
Tabel 7.2 Materiaaleigenschappen DgFlow3D model Aaldijk.

6 september 2017, definitief



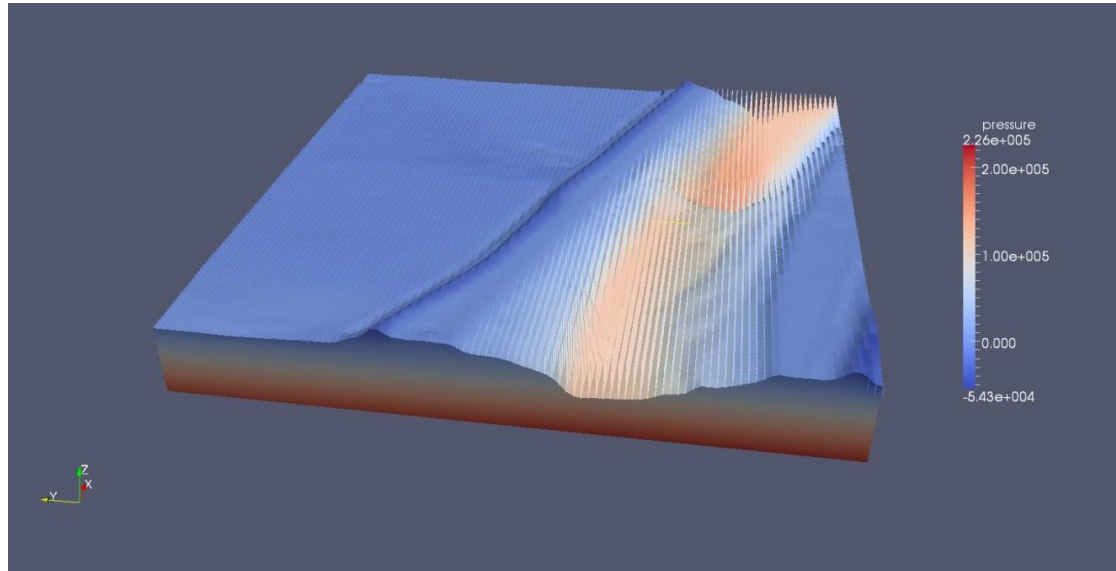
Figuur 7.7 Ondergrondschematisatie DgFlow3D model Aaldijk.

Het stijghoogteverloop in de peilbuizen, dat is berekend met het gekalibreerde rekenmodel, is weergegeven in Figuur 7.8. De metingen worden redelijk goed met de berekeningen gereproduceerd hoewel de maximale fout 20 cm bedraagt. Het waterspanningsveld bij een buitenwaterstand van NAP +1,55 m is afgebeeld in Figuur 7.9 en de waterspanningen bij het maatgevende hoogwater van NAP +3,26 m in Figuur 7.10.

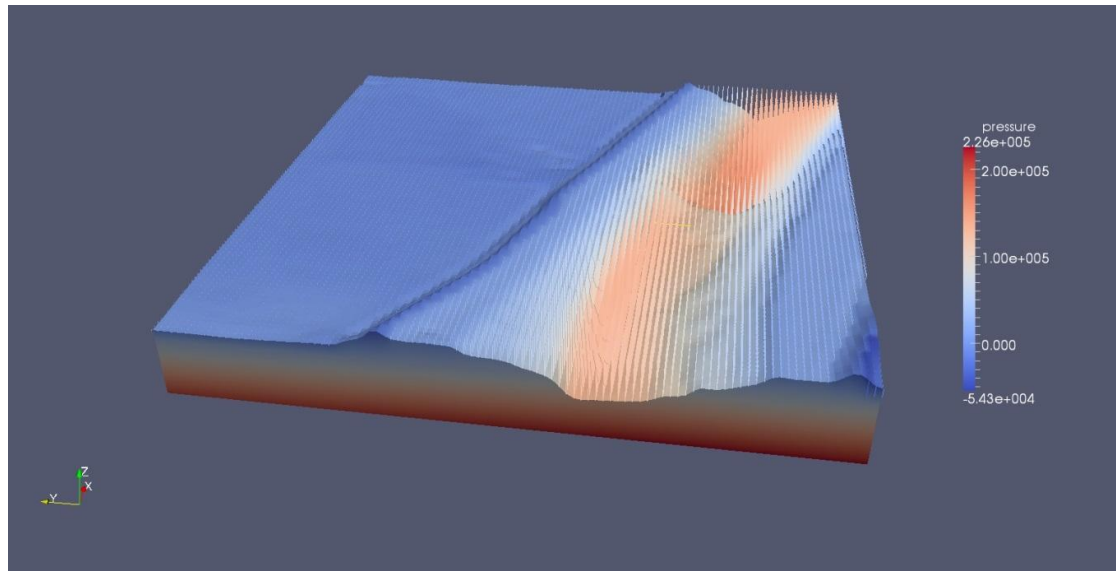


Figuur 7.8 Stijghoogteverloop peilbuizen Aaldijk volgens een DgFlow3D berekening.

6 september 2017, definitief



Figuur 7.9 Waterspanningen Aaldijk, DgFlow3D berekening bij een buitenwaterstand van NAP +1,55 m.



Figuur 7.10 Waterspanningen Aaldijk, DgFlow3D berekening bij maatgevend hoogwater NAP +3,26 m.

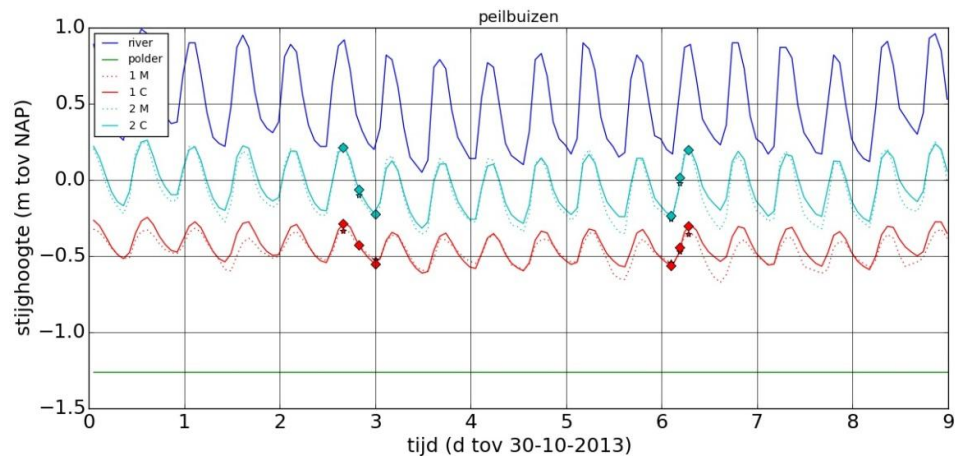
De tweedimensionale berekeningen zijn gekoppeld en ontkoppeld uitgevoerd. De materiaalparameters volgen uit een kalibratie met het gekoppelde stroming-deformatie model en zijn weergegeven in Tabel 7.3.

6 september 2017, definitief

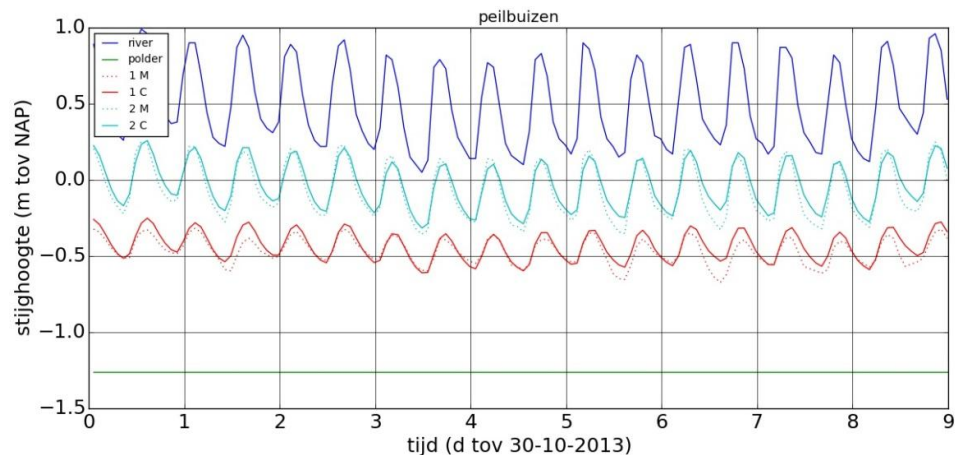
Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	0,22	10^{-5}
2	0,1	10^{-5}
3	0,1	10^{-4}
4	10	10^{-5}
5	79	10^{-5}

Tabel 7.3 Materiaaleigenschappen DgFlow2D model Aaldijk.

Het stijghoogteverloop dat volgt uit de stromingsberekening is afgebeeld in Figuur 7.11 en het verloop volgens de gekoppelde stromings-deformatieberekening is weergegeven in Figuur 7.12.



Figuur 7.11 Stijghoogteverloop peilbuizen Aaldijk volgens een DgFlow2D berekening.

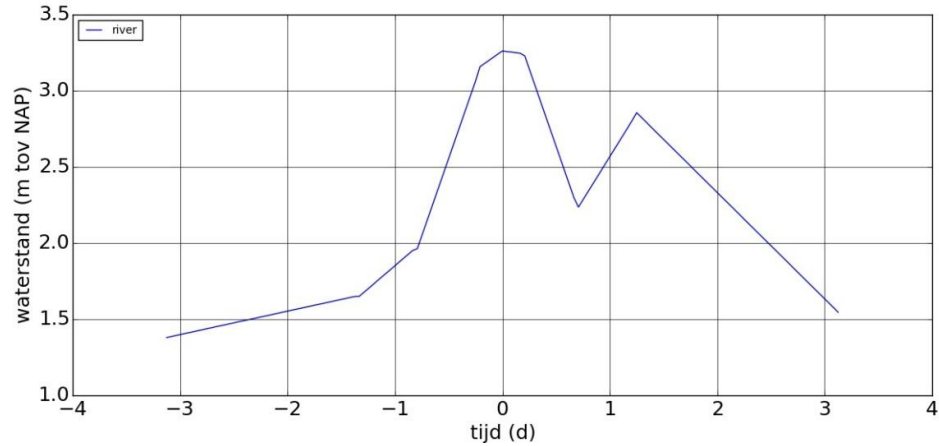


Figuur 7.12 Stijghoogteverloop peilbuizen Aaldijk volgens een DgFlow2Dc berekening.

7.3 Geotechnisch model

In Figuur 7.13 is de maatgevende hydraulische belasting voor de Aaldijk nabij Nieuw Beijerland afgebeeld. De hoogwatergolf heeft een duur van 6 dagen en het maximale verschil met het polderpeil bedraagt 4,521 m.

6 september 2017, definitief

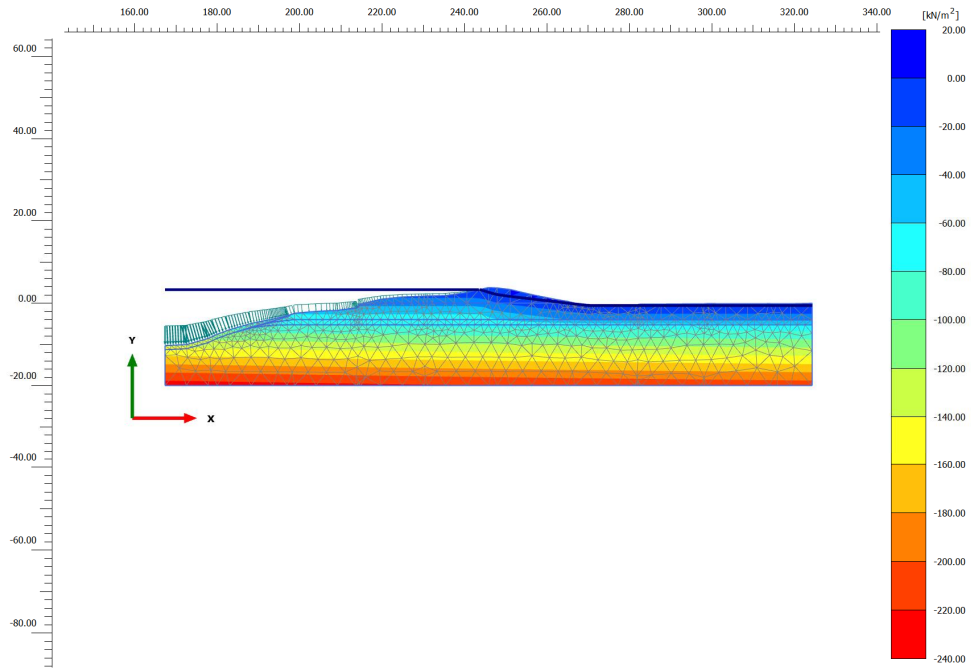


Figuur 7.13 Maatgevende hydraulische belasting Aaldijk.

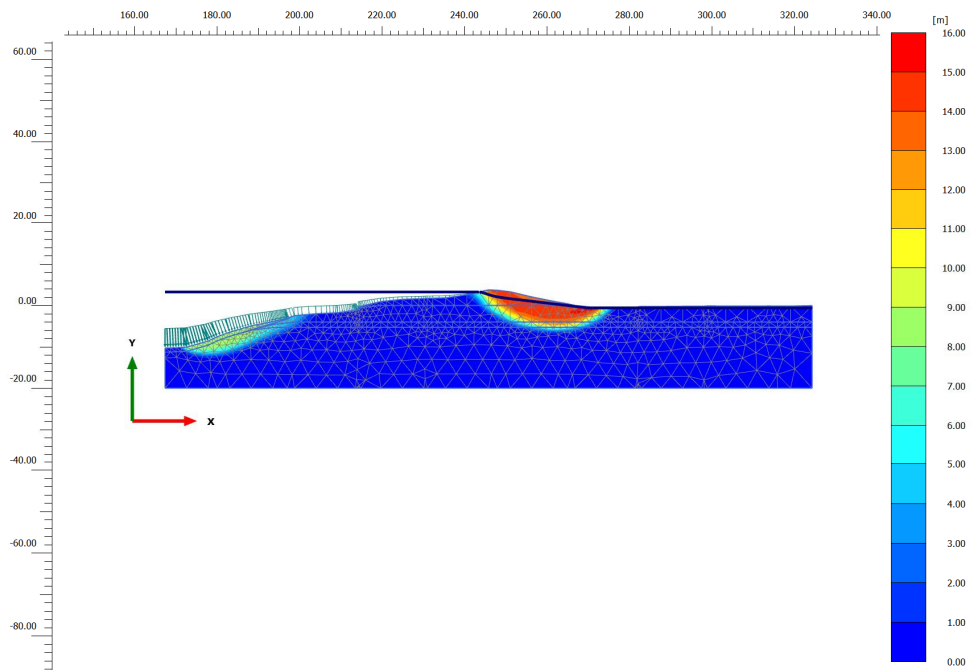
De waterspanningen, die volgen uit een driedimensionale berekening op tijdstip 0 d, zijn als waterlijnen opgelegd in Plaxis en afgebeeld in Figuur 7.16. De totale verplaatsingen bij dit waterspanningsveld zijn afgebeeld in Figuur 7.17. Figuur 7.18 geeft het waterspanningsveld dat volgt uit een tweedimensionale stromingsberekening weer en Figuur 7.19 toont het bijbehorende verplaatsingsveld.

Een stationaire berekening geeft een veiligheidsfactor die 5% lager ligt dan de veiligheidsfactor die volgt uit een tijdsafhankelijke berekening. De grondwaterstroming heeft een tweedimensionaal karakter en de tweedimensionale berekening geeft nagenoeg dezelfde resultaten als de driedimensionale berekening. De waarden van de stabiliteitsfactoren zijn verzameld in Tabel 7.4.

6 september 2017, definitief

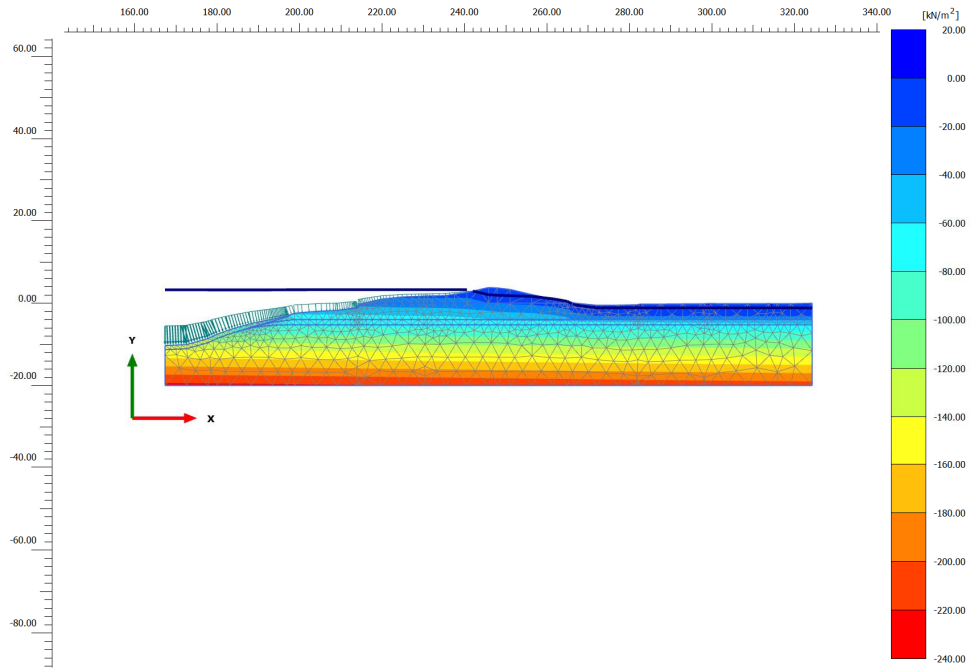


Figuur 7.14 Waterspanningen ontwerpberekening Aaldijk.

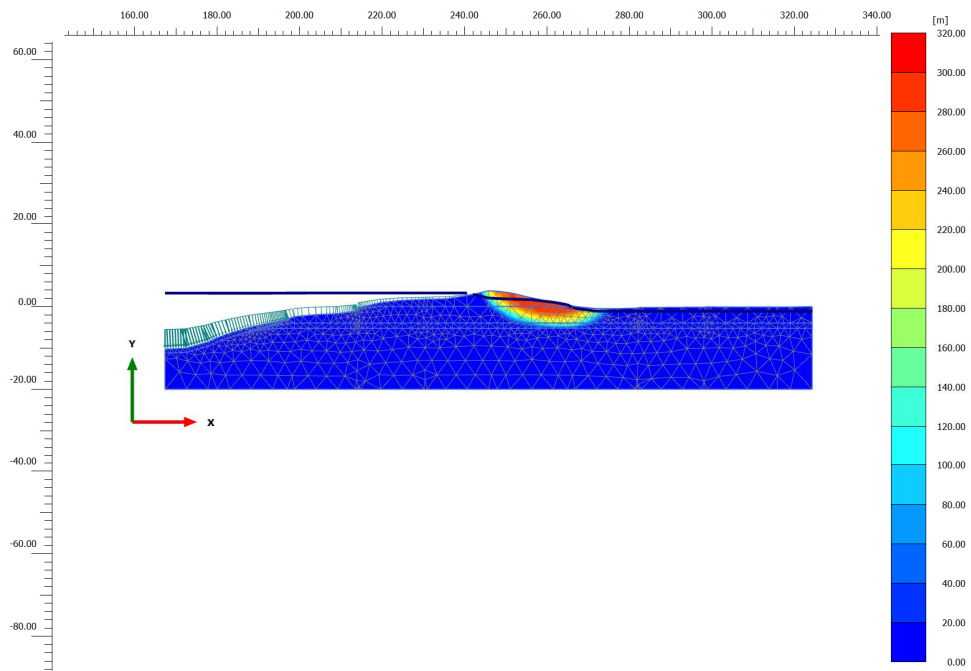


Figuur 7.15 Vervormingen ontwerpberekening na phi-c reductie Aaldijk.

6 september 2017, definitief

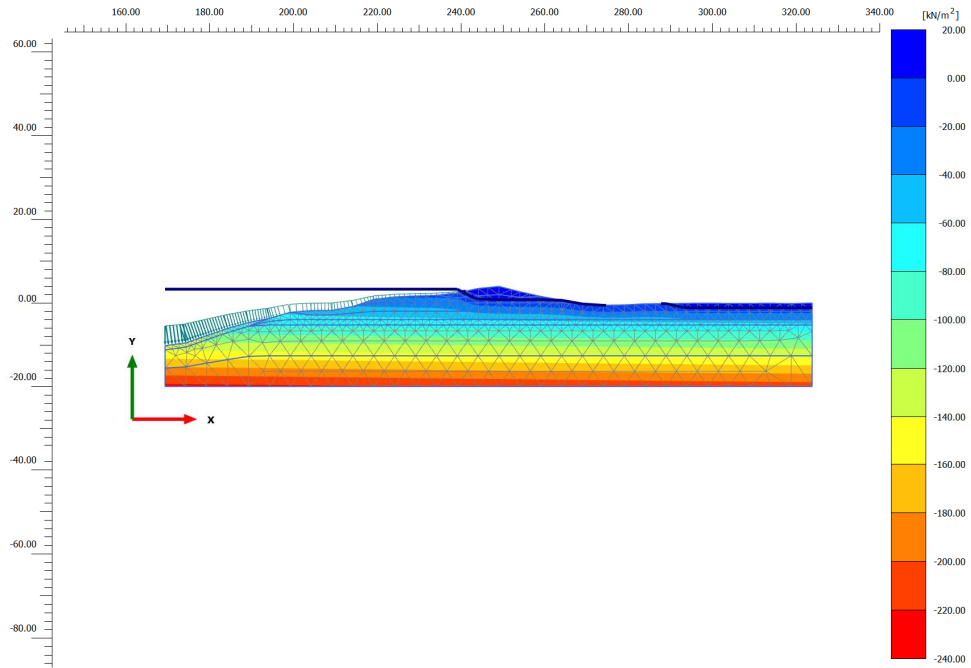


Figuur 7.16 Waterspanningen Plaxis2D-DgFlow3D Aaldijk.

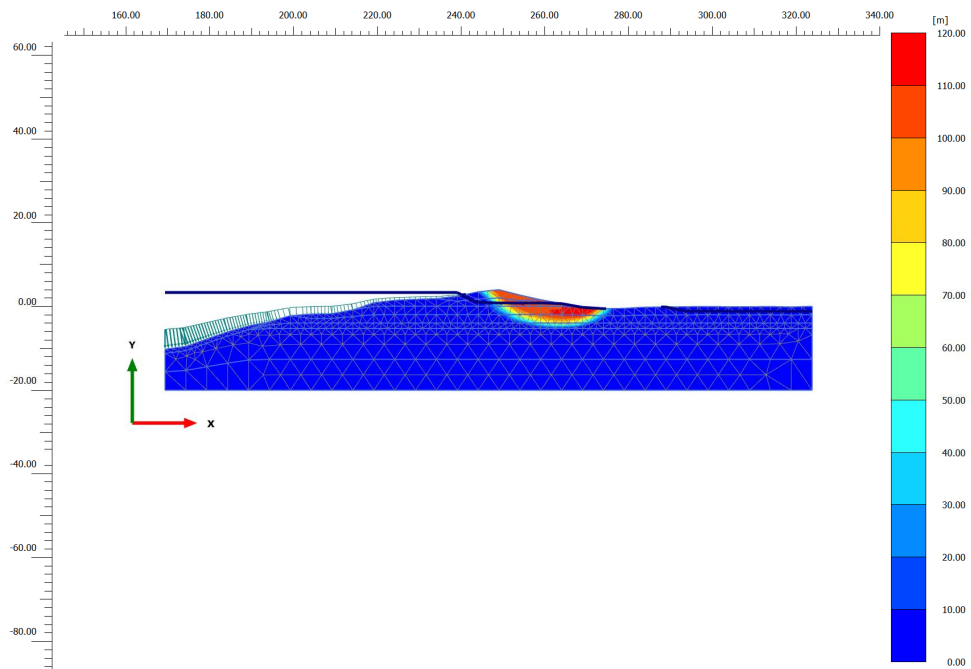


Figuur 7.17 Vervormingen Plaxis2D-DgFlow3D na phi-c reductie Aaldijk.

6 september 2017, definitief



Figuur 7.18 Waterspanningen Plaxis2D-DgFlow2D Aaldijk.



Figuur 7.19 Vervormingen Plaxis2D-DgFlow2D na phi-c reductie Aaldijk.

6 september 2017, definitief

tijd (d)	waterstand (m NAP)	F _{ontwerp} (-)	F _{stat} 2D (-)	F _{tijdsafh} 2D (-)	F _{tijdsafh} 3D (-)
0,000	3,26	1,74	1,56	1,64	1,68
0,167	3,25			1,64	1,68
0,333	2,98			1,63	1,70

Tabel 7.4 Veiligheidsfactoren Aaldijk.

6 september 2017, definitief

8 Markermeerdijk Uitdam

In Figuur 8.1 is de onderzoekslocatie aan het Markermeer bij Uitdam afgebeeld. In de meetraai zijn een tiental waterspanningsmeters geplaatst die in dit onderzoek worden gebruikt om het stijghoogteverloop onder de dijk bij maatgevend hoogwater te voorspellen.



Figuur 8.1 Onderzoekslocatie Markermeerdijk.

8.1 Waterspanningsmetingen

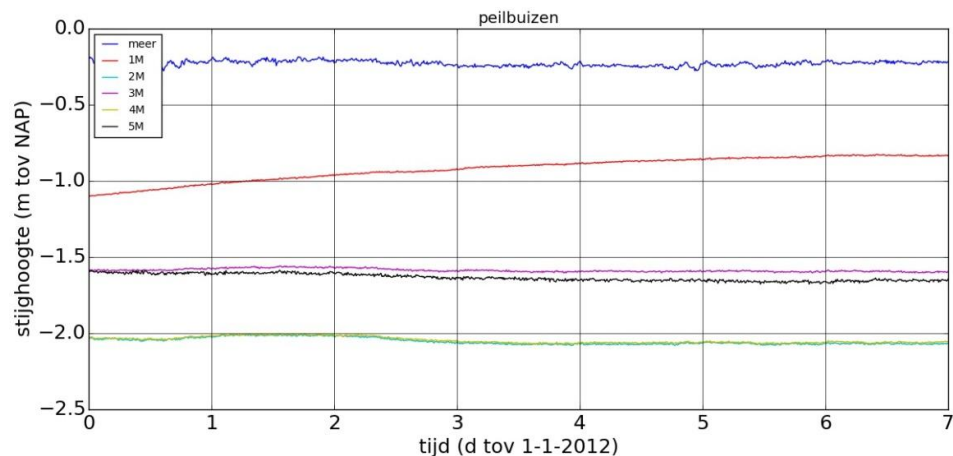
De locaties van de waterspanningsmeters en de dieptes van het meetpunt ten opzichte van NAP zijn opgenomen in Tabel 8.1. In Figuur 8.8 worden de waterspanningsmeters afgebeeld in de meetraai.

6 september 2017, definitief

naam	x (m)	y (m)	z (NAP m)
m1	133620,90	492875,80	-5,13
m2	133621,10	492876,60	-10,78
m3	133587,30	492865,60	-5,06
m4	133588,40	492865,80	-13,58
m5	133562,30	492857,00	-4,97
m6	133563,70	492857,30	-19,16
m7	131095,00	493156,10	-13,80
m8	131094,80	493155,00	-13,11
m9	133660,80	492884,30	-6,01
m10	133660,90	492884,30	-4,71

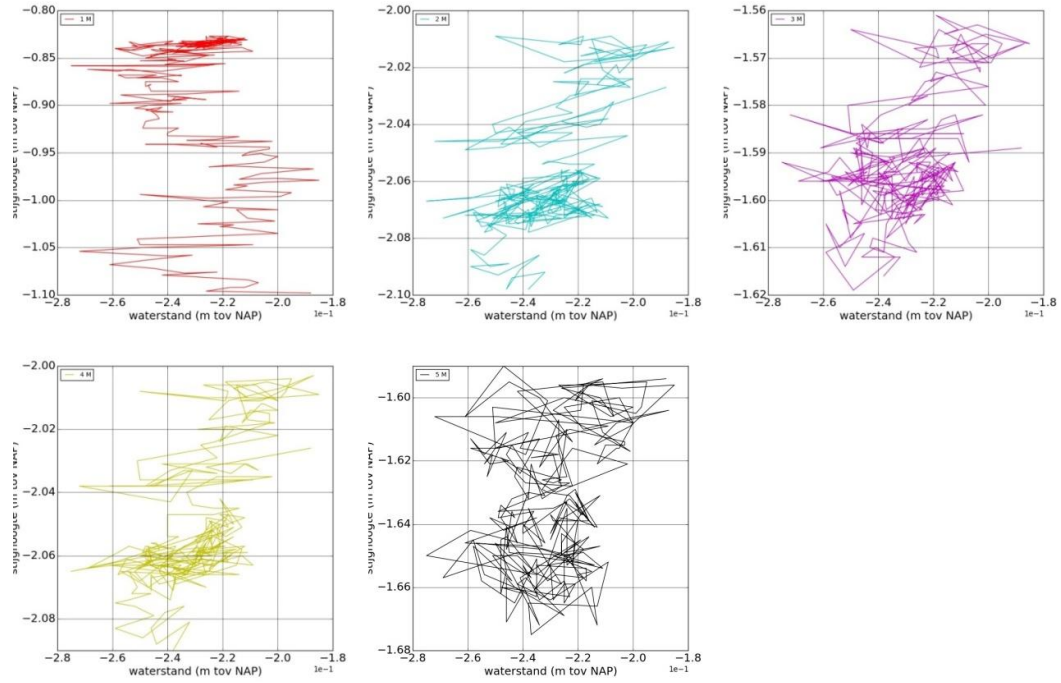
Tabel 8.1 Meetlocaties Markermeerdijk.

Uit het gemeten stijgheighteverloop, dat is afgebeeld in Figuur 8.2, wordt de invloed van de bemaling van diepe polders in de omgeving zichtbaar. Het meerpeil is vrijwel constant en de stroming stationair waardoor er niet een duidelijke relatie tussen buitenwaterstand en gemeten stijgheighte kan worden weergegeven. Figuur 8.3 en Figuur 8.4 laten zien dat de buitenwaterstandsvariatie 6 cm bedraagt en de variatie in stijgheighten zo'n 80 cm is.

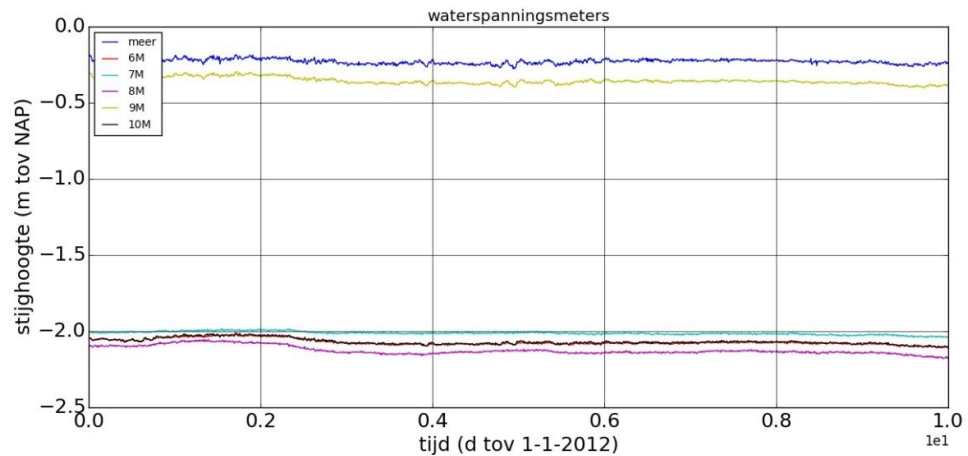


Figuur 8.2 Stijgheightemetingen Markermeerdijk 1 Januari 2012 tot 8 Januari 2012.

6 september 2017, definitief

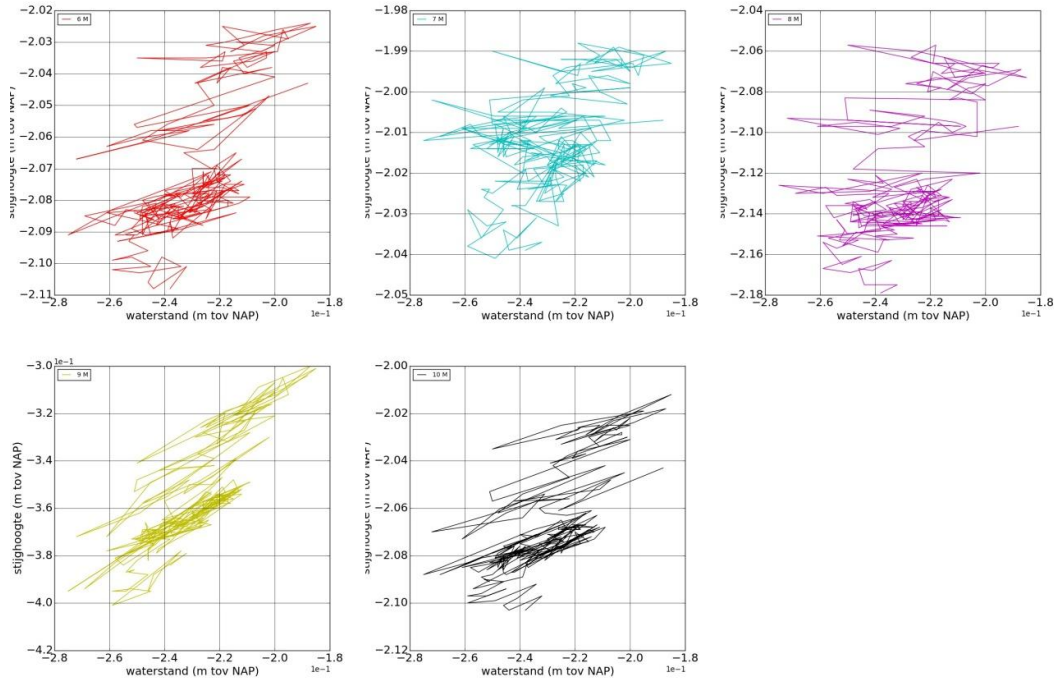


Figuur 8.3 Stijghoogtemetingen Markerveerdijk 1 januari tot 8 januari 2012.



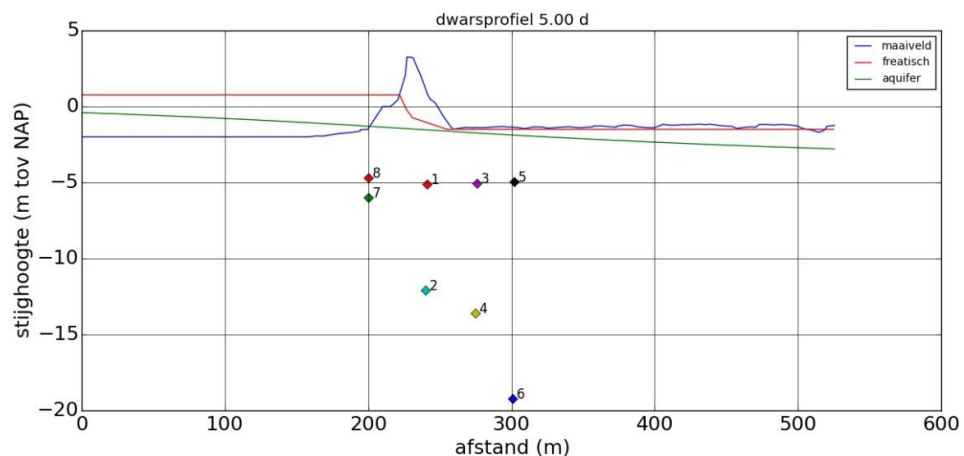
Figuur 8.4 Waterspanningsmetingen Markerveerdijk 1 Januari 2012 tot 8 Januari 2012.

6 september 2017, definitief



Figuur 8.5 Waterspanningsmetingen Markermeerdijk 1 januari tot 8 januari 2012.

In Figuur 8.6 is het stijghoogteverloop dat volgt uit de procedure die in bijlage B.2 van de leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken TAW (1985) wordt beschreven, afgebeeld. Het maatgevend hoog water is daarbij op 0,76 m en het polderpeil op -4,00 m gesteld. De lengte van het voorland bedraagt 4000 m met een spreidingslengte van 350 m en de lengte van het achterland is 4000 m met een spreidingslengte van 400 m. De basis van het dijklichaam heeft een afmeting van 60 m en de transmissiviteit van de aquifer bedraagt $1250 \text{ m}^2/\text{d}$. Het freatisch vlak is bepaald met de procedure die in bijlage 1 (b1.3.3) van het technisch rapport waterspanningen bij dijken (TRW 2004) is voorgesteld.

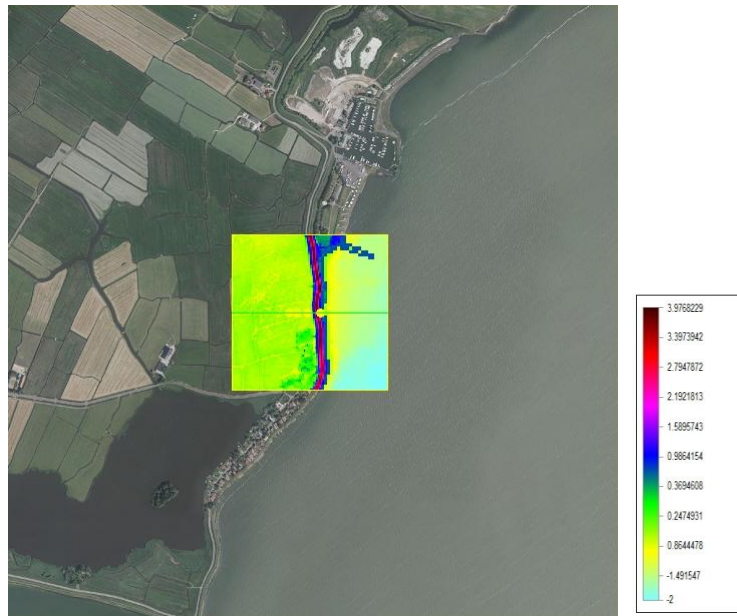


Figuur 8.6 Stijghoogteverloop Markermeerdijk volgens ontwerprichtlijn.

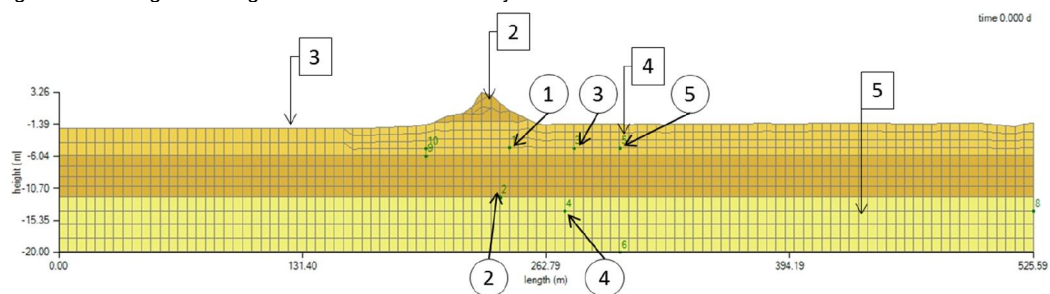
6 september 2017, definitief

8.2 Lokaal geohydrologisch model

Het driedimensionale DgFlow model heeft een afmeting van 500 bij 500 meter en ligt in het kaartvlak (133350,492550) - (133850,493050). De hoogtekaart van het gebied is samengesteld uit AHN en Rijkswaterstaat metingen en afgebeeld in Figuur 8.7. De dwarsdoornede langs de meetraai is afgebeeld in Figuur 8.8 en het ondergrondmodel in Figuur 8.9.



Figuur 8.7 Hoogtekaart DgFlow model Markermeerdijk



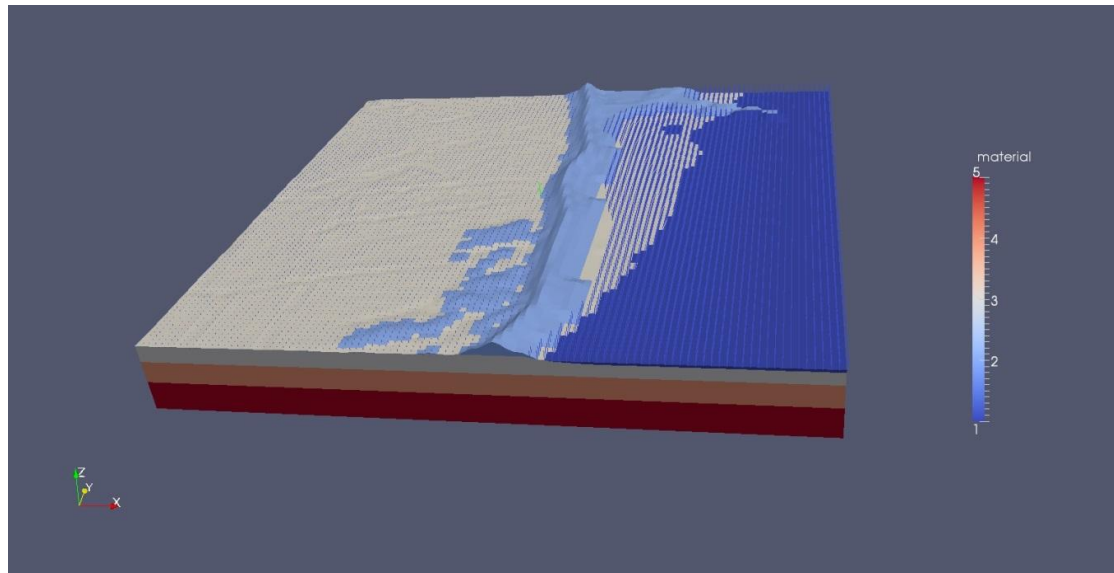
Figuur 8.8 Dwarsprofiel DgFlow model Markermeerdijk.

De materiaalparameters die zijn bepaald uit een inverse analyse met het driedimensionale stromingsmodel zijn opgenomen in Tabel 8.2.

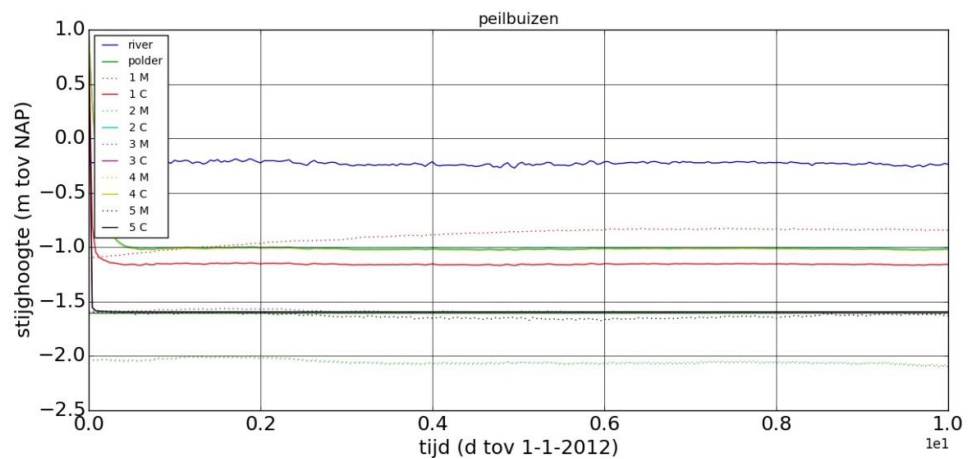
6 september 2017, definitief

Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	1	10^{-5}
2	1	10^{-5}
3	1	10^{-5}
4	0,01	10^{-5}
5	100	10^{-5}

Tabel 8.2 Materiaaleigenschappen DgFlow3D model Markermeerdijk.



Figuur 8.9 Ondergrondschematisatie DgFlow3D model Markermeerdijk.

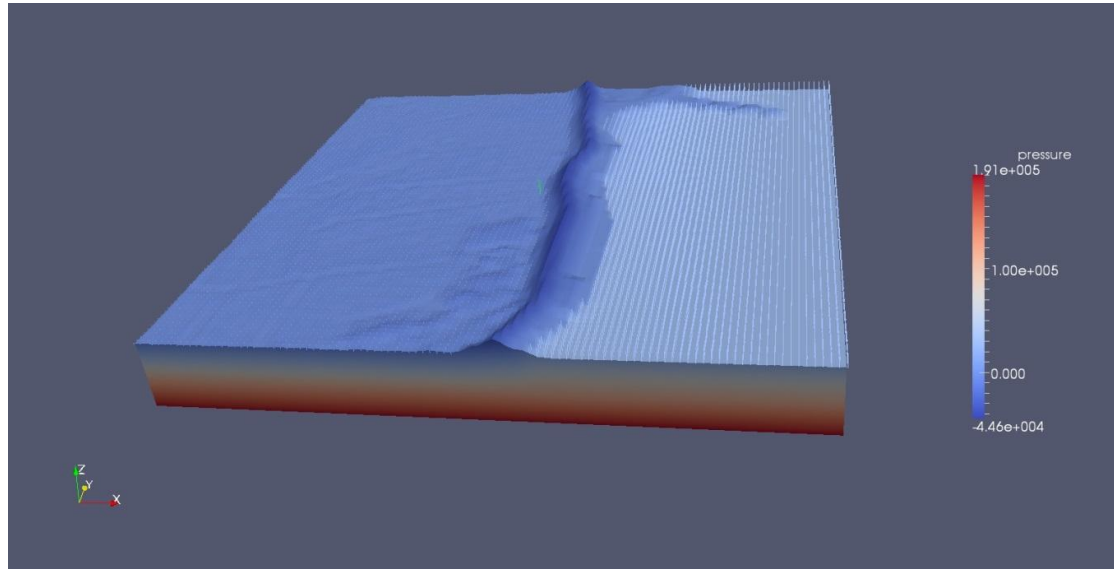


Figuur 8.10 Stijghoogteverloop peilbuizen Markermeerdijk volgens een DgFlow3D berekening.

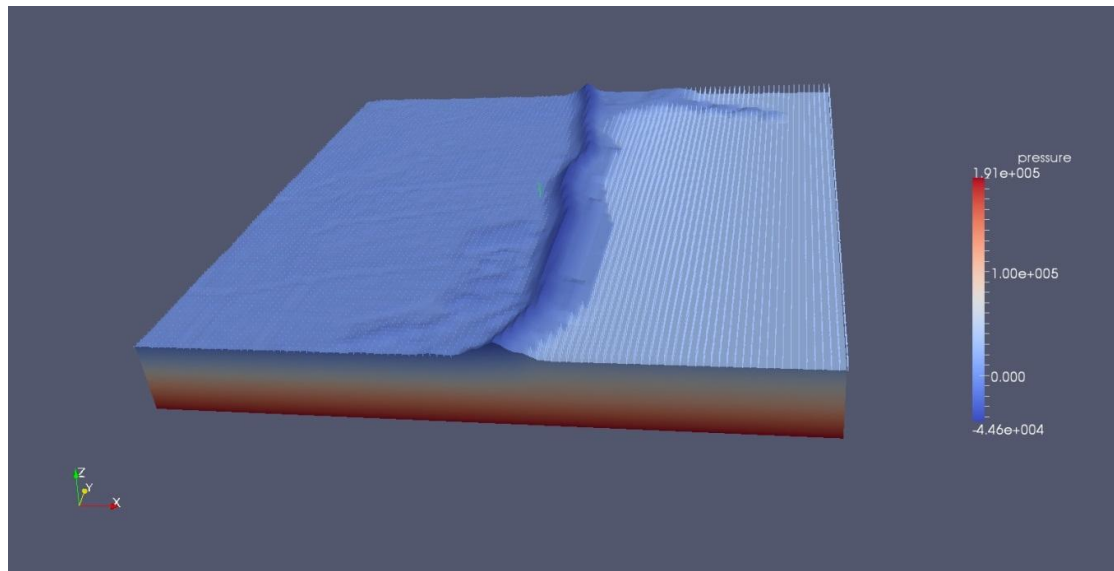
In Figuur 8.10 wordt het berekende stijghoogteverloop vergeleken met het berekende stijghoogteverloop. De grafiek laat zien dat de metingen niet goed te reproduceren kunnen worden en het lijkt erop dat meetpunt 3 en 5 verwisseld zijn. Het

6 september 2017, definitief

waterspanningsveld bij een meerpeil van NAP +0,76 m is afgebeeld in Figuur 8.11 en het waterspanningsveld bij maatgevend hoogwater wordt gegeven in Figuur 8.12.



Figuur 8.11 Waterspanningen Markermeerdijk DgFlow3D berekening meerpeil NAP +0,76 m.



Figuur 8.12 Waterspanningen Markermeerdijk DgFlow3D berekening maatgevend hoogwater NAP +0,76 m.

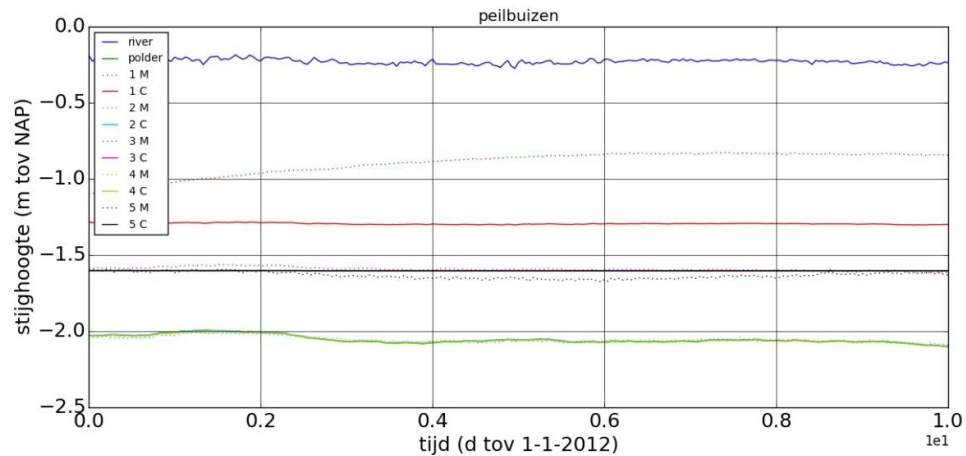
Met het tweedimensionale DgFlow model is een stromingsberekening en een gekoppelde stromings-deformatieberekening gemaakt. De materiaalparameters zijn bepaald met de gekoppelde berekening en verzameld in Tabel 8.3.

6 september 2017, definitief

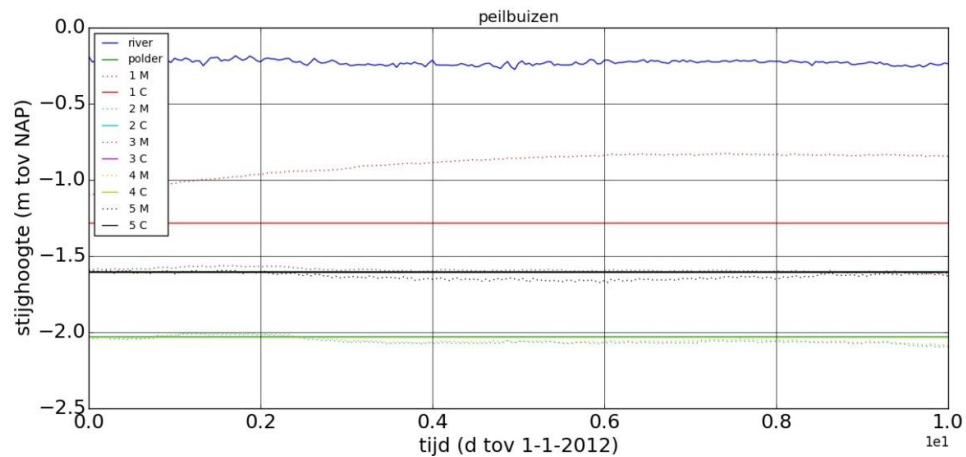
Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	1	10^{-5}
2	1	10^{-5}
3	1	10^{-5}
4	0,01	10^{-5}
5	100	10^{-5}

Tabel 8.3 Materiaaleigenschappen DgFlow2D model Markermeerdijk.

Het stijghoogteverloop dat is bepaald met de ontkoppelde berekening is afgebeeld in Figuur 8.13 en het verloop dat volgt uit de gekoppelde berekening is weergegeven in Figuur 8.14. De metingen zijn redelijk goed te reproduceren als de polderrandvoorwaarden die worden toegekend aan de bovenrand eveneens aan de rechter rand van het model wordt opgelegd. Bij de metingen wordt opgemerkt dat waterspanningsmeter 1 waarschijnlijk niet goed functioneert.



Figuur 8.13 Stijghoogteverloop peilbuizen Markermeerdijk volgens een DgFlow2D berekening.

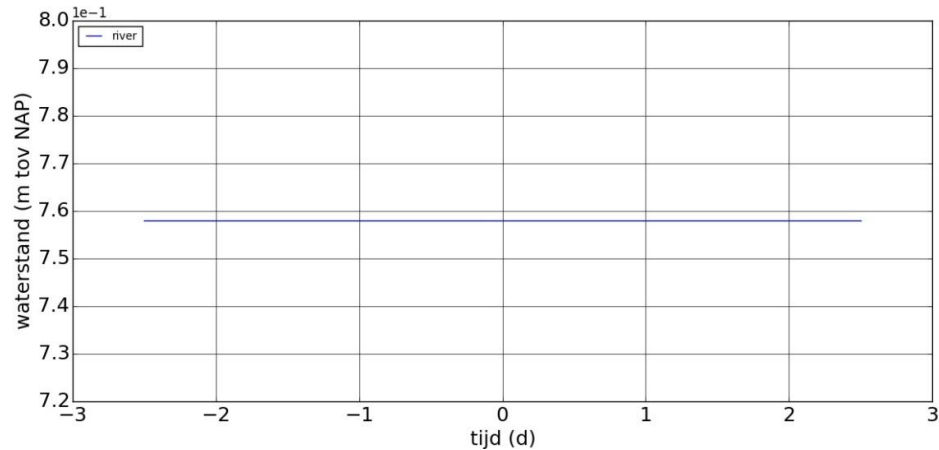


Figuur 8.14 Stijghoogteverloop peilbuizen Markermeerdijk volgens een DgFlow2Dc berekening.

6 september 2017, definitief

8.3 Geotechnisch model

De maatgevende belasting wordt weergegeven in Figuur 8.15. De hoogwatersituatie geeft een constante belasting in de tijd en is opgelegd met een duur van 6 dagen waarbij het maximale verschil met het polderpeil 2.358 m bedraagt.

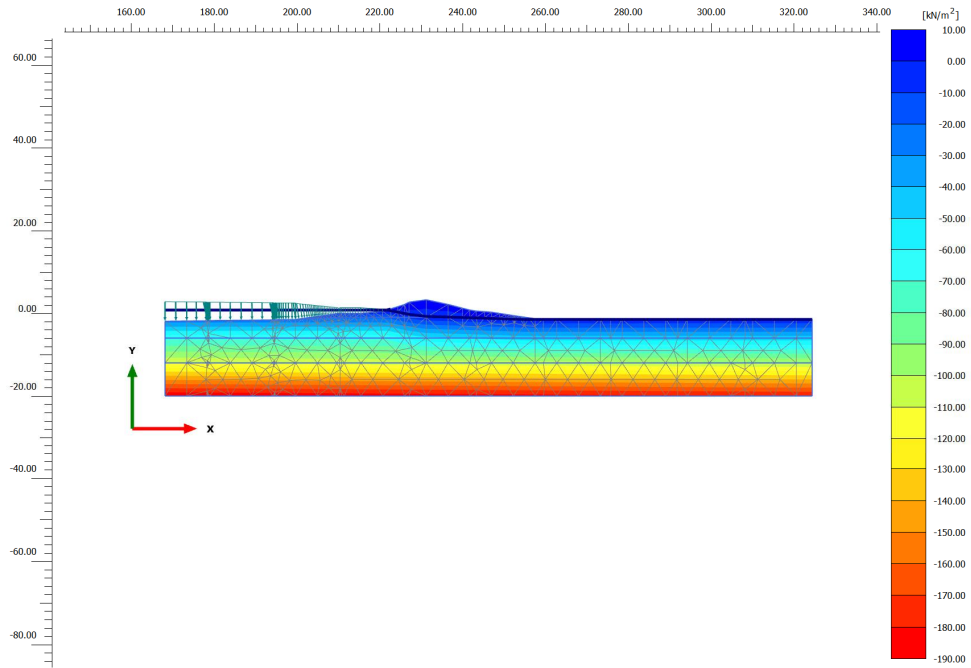


Figuur 8.15 Maatgevende hydraulische belasting Markermeerdijk.

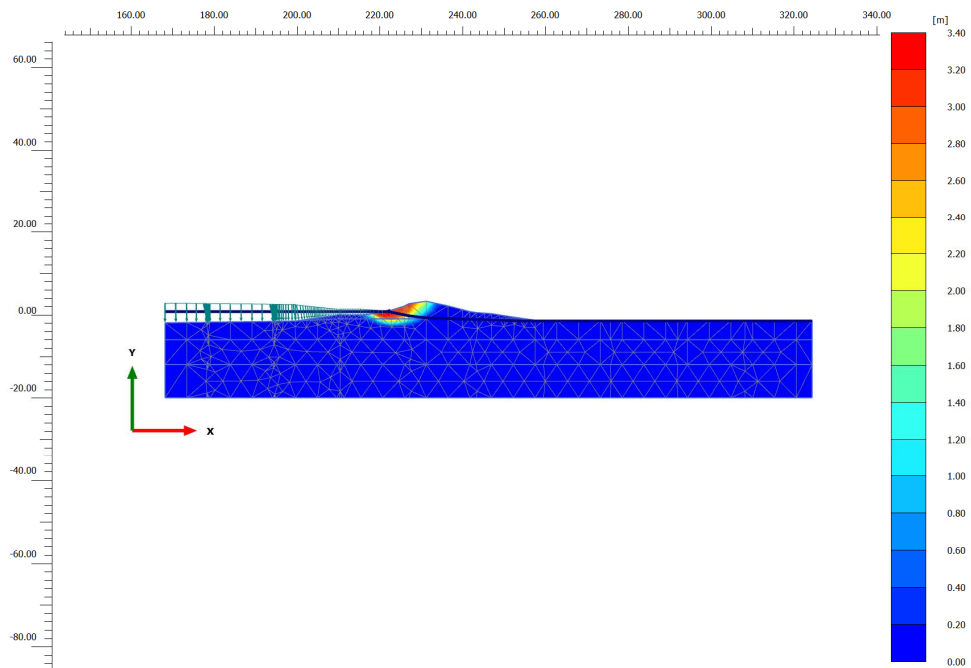
Het waterspanningsveld dat in Plaxis is opgelegd en volgt uit een driedimensionale DgFlow berekening is afgebeeld in Figuur 8.18, het bijbehorende verplaatsingsveld dat volgt uit een stabiliteitsanalyse wordt gepresenteerd in Figuur 8.19. Uit de figuren is op te maken dat de buitenwaterstand niet over de juiste lengte is opgelegd. De resultaten van een tweedimensionale stromingsberekening worden gepresenteerd in Figuur 8.20 en Figuur 8.21. De grondwaterstroming heeft een tweedimensionaal karakter.

De resultaten van de driedimensionale en tweedimensionale stabiliteitsberekening zijn onderling niet goed te vergelijken. In het eerste geval treedt macro-instabiliteit op in het buitentalud maar is de instabiliteit in het binnentalud dominant. In het tweede geval wordt het buitentalud instabiel. Voor het geval van de meerdijk levert een stationaire berekening dezelfde waarde van de veiligheidsfactor. De resultaten zijn samengevat in Tabel 8.4.

6 september 2017, definitief

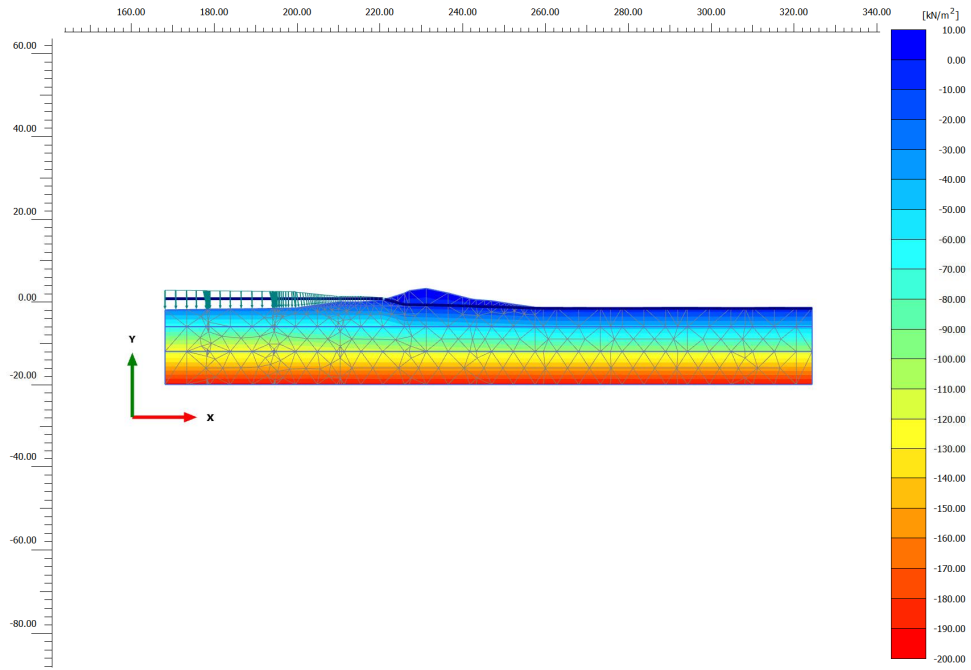


Figuur 8.16 Waterspanningen ontwerpberekening Markermeerdijk.

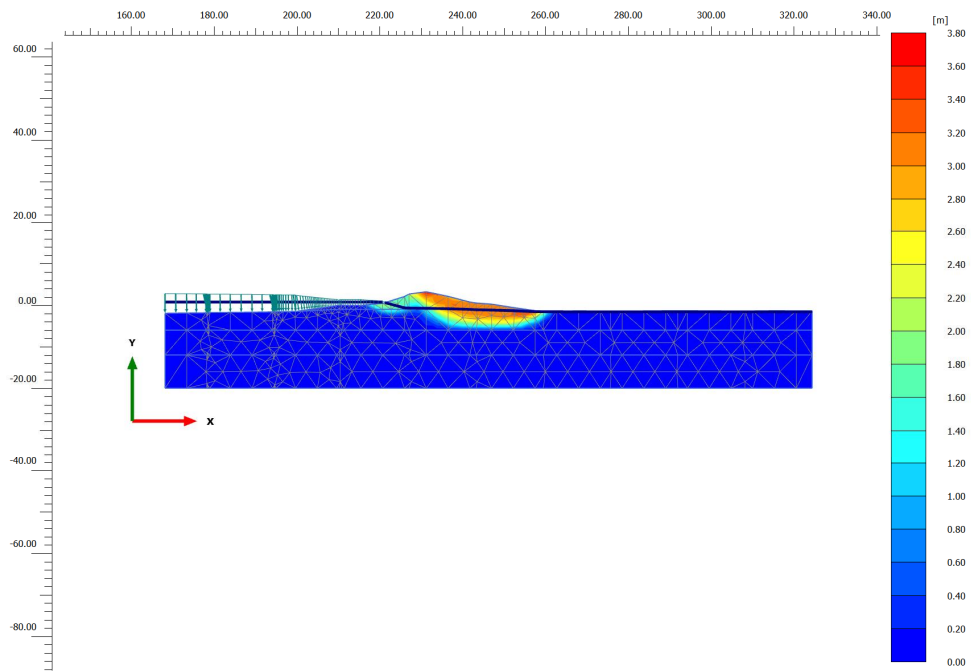


Figuur 8.17 Vervormingen ontwerpberekening na phi-c reductie Markermeerdijk.

6 september 2017, definitief

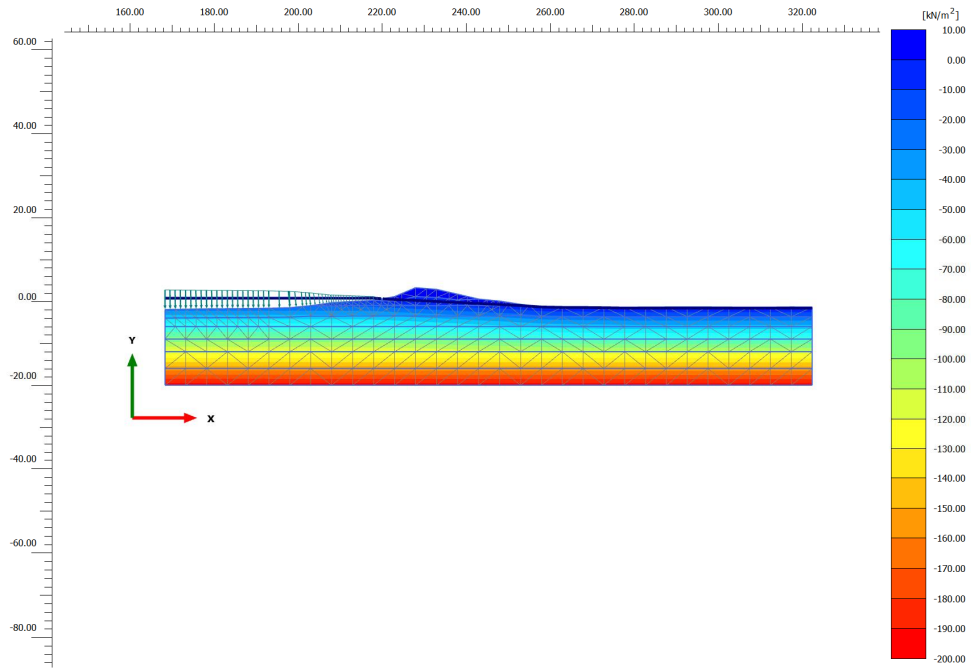


Figuur 8.18 Waterspanningen Plaxis2D-DgFlow3D Markermeerdijk.

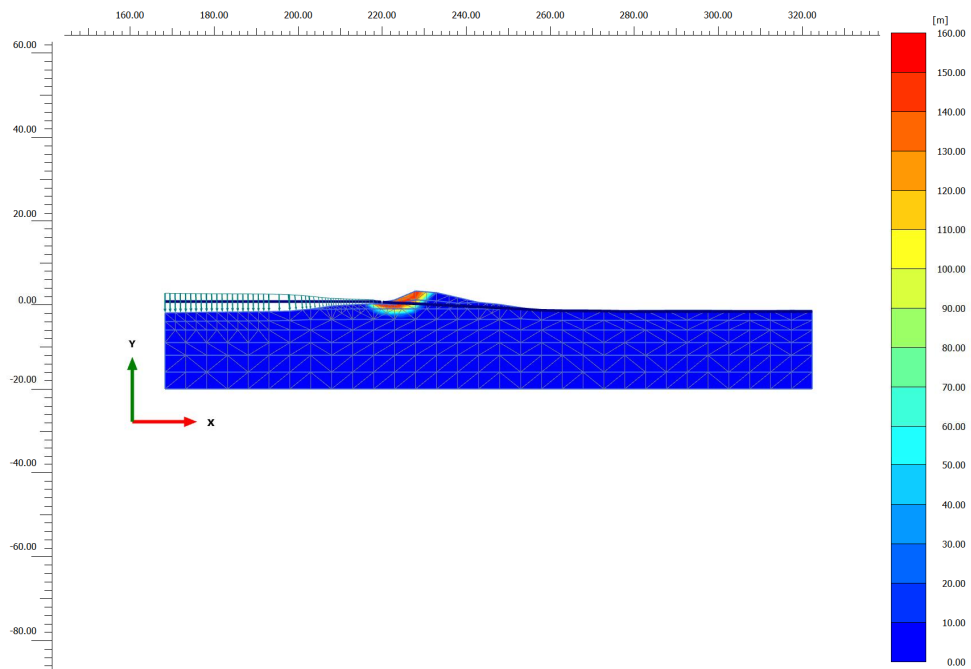


Figuur 8.19 Vervormingen Plaxis2D-DgFlow3D na phi-c reductie Markermeerdijk.

6 september 2017, definitief



Figuur 8.20 Waterspanningen Plaxis2D-DgFlow2D Markermeerdijk.



Figuur 8.21 Vervormingen Plaxis2D-DgFlow2D na phi-c reductie Markermeerdijk.

6 september 2017, definitief

tijd (d)	waterstand (m NAP)	F _{ontwerp} (-)	F _{stat} 2D (-)	F _{tijdsafh} 2D (-)	F _{tijdsafh} 3D (-)
0,000	0,76	2,06	1,91	1,91	2,18
0,042	0,76			1,92	2,17
0,083	0,76			1,92	2,17

Tabel 8.4 Veiligheidsfactoren Markermeerdijk.

9 Conclusie

In dit rapport wordt onderzoek naar het niet-stationaire driedimensionale grondwaterstromingsgedrag in en onder de Waaldijk voor drie onderzoekslocaties in het bovenrivierengebied beschreven. De bovenstroomse locatie 'Waaldijk Opijnen' kent een complex driedimensionaal stromingsbeeld. In het onderzoeksgebied ligt een zandwininput waarvan het oppervlaktewater via een breed voorland in contact staat met de rivier de Waal. De grondwaterstroming in de benedenstrooms gelegen locatie 'Waaldijk Herwijnen' heeft slechts een lokaal driedimensionaal karakter door een verlaging van het voorland aan de westzijde van de meetlocatie. In het onderzoeksgebied 'Waaldijk Vuren' is de grondwaterstroming overwegend tweedimensionaal. Het stromingsbeeld is berekend met de grondwaterstromingsmodellen Modflow en DgFlow en de voorspellingen zijn vergeleken met stijghoogtemetingen. Hiervoor zijn de metingen in peilbuizen en waterspanningsmeters gebruikt die in het kader van het HWBP dijkversterkingsproject zijn geïnstalleerd.

Aanvullend is de grondwaterstroming in de zeedijk op Ameland, in en om de Aaldijk in het benedenrivierengebied langs het Spui en in de Meerdijk aan het Markermeer onderzocht om meer generieke uitspraken te kunnen doen over het niet-stationaire driedimensionale karakter van grondwaterstroming in en rond dijken in Nederland. De locatie op Ameland kent een driedimensionaal stromingsbeeld doordat het voorland droogvalt bij eb en doordat er een sterk gekromde getijdegeul voor de waterkring aanwezig is. De grondwaterstroming onder de Aaldijk is hoofdzakelijk tweedimensionaal en de stroming onder de Markermeerdijk heeft een regionaal karakter door de aanwezigheid van diepe polders in de omgeving.

In de periode januari-februari 2015 is een hoogwatergolf met een duur van 25 dagen en amplitude van 2.1 meter ter plaatse van profiel TG175 waargenomen. Deze hoogwatergolf wordt gevolgd door een tweede golf met een duur van 10 dagen en een amplitude van 0.8 meter. De invloed van het getij is daarbij nauwelijks waarneembaar. Benedenstrooms, ter plaatse van profiel TG356, blijft de duur van de hoogwatergolven ongewijzigd maar neemt de amplitude af tot 1,6 en 0,7 meter. De beïnvloeding van de rivierwaterstand door het getij is op deze locaties wel duidelijk waarneembaar. Stijghoogtemetingen in het pleistocene pakket en waterspanningsmetingen in de holocene deklaag laten een faseverschuiving van hooguit enkele uren zien ten opzichte van gemeten rivierwaterstanden. Daaruit kan geconcludeerd worden dat niet-stationaire effecten door berging in de ondergrond en het dijklichaam in het bovenrivierengebied klein zijn. Grondwaterstromingsberekeningen bevestigen deze conclusie tijdens een hoogwatersituatie. Voor de onderzochte locaties is het effect van berging bij de voortplanting van rivierpeilvariaties in de ondergrond beperkt en kan dus worden volstaan met een stationaire grondwaterstromingsberekening.

6 september 2017, definitief

Het in rekening brengen van het niet-stationaire karakter van grondwaterstroming geeft in potentie wel een reductie van de versterkingsopgave voor rivierdijken in het benedenrivierengebied en zeedijken waar de belasting in de tijd sterker varieert. Voor de onderzoekslocatie in het benedenrivierengebied 'Aaldijk' werd een stabiliteitsfactor gevonden die 5% hoger is bij een tijdsafhankelijke beschouwing en voor de onderzochte zeedijk in Ameland is de stabiliteitsfactor 12% hoger dan bij een stationaire beschouwing van de grondwaterstroming.

9.1 Waterspanningsmetingen

Een peilbuis in het voorland, een peilbuis in de kruin en een peilbuis in het achterland geven over het algemeen een goed beeld van het stijghoogteverloop in de pleistocene zandlaag. In situaties waar het stromingsbeeld sterk driedimensionaal is heeft het de voorkeur om extra peilbuizen te plaatsen op een afstand van 100 à 200 meter aan weerszijden van de meetraai. Waterspanningsmeters kunnen het best geplaatst worden in de binnenteen (een of twee) waar de waterspanningsontwikkeling de stabiliteit van het talud sterk beïnvloedt. De meetfrequentie van 1 meting per 10 minuten geeft een compleet beeld voor een locatie waar het getij duidelijk waarneembaar is. Voor de berekeningen is met een frequentie van 1 observatie per uur gewerkt om de hoeveelheid gegevens te beperken. Voor het kalibreren van het rekenmodel is het niet van belang de metingen door te zetten bij laagwater.

Materiaalparameters als transmissiviteit van een goed doorlatende laag en stromingsweerstand van een slecht doorlatende deklaag zijn door middel van een inverse analyse met het stromingsmodel DgFlow bepaald. Daartoe is een Levenberg-Marquard algoritme aan de code toegevoegd waarmee de parameters volgens een niet-lineaire kleinste kwadraten methode uit gemeten stijghoogtes worden afgeleid. Die bepaling was echter niet triviaal. Ten eerste wordt opgemerkt dat de parameters op basis van stijghoogtes alleen niet uniek bepaald kunnen worden. Voor een systeem dat gekenmerkt wordt met een intreeweerstand aan de rivierzijde, een doorlatendheid van het watervoerend pakket en een uitreeweerstand aan de polderzijde is vastgesteld dat verschillende combinaties van parameterwaarden een even goede overeenstemming geven met gemeten stijghoogtes. Dit probleem is in dit onderzoek ondervangen met een regularisatie methode rond een initiële parameterset. Ten tweede zijn er parameters (zoals de doorlatendheid van de dijk zelf) waar het kalibratieproces ongevoelig voor is; een verhoging van de doorlatendheid van het dijkmateriaal geeft geen verandering van berekende stijghoogtes in het goed doorlatend pakket. Als deze parameter belangrijk is voor het bepalen van de stabiliteit van een dijklichaam dan moeten waterspanningen in het dijklichaam zelf worden gemeten.

9.2 Regionaal geohydrologisch model

Het MORIA model geeft een geohydrologische beschrijving van het beheergebied van Waterschap Rivierenland. De grondwaterstroming wordt gesimuleerd met de eindige differentie code Modflow waarbij gebruikt gemaakt wordt van een quasi-driedimensionale

6 september 2017, definitief

benadering; horizontale stroming door aquifers (goed doorlatende lagen) en verticale stroming door aquitards (slecht doorlatende lagen). MORIA berekeningen worden uitgevoerd met tijdstappen van 1 dag en de resultaten van dag 14 en 28 van iedere maand worden opgeslagen. De rekencellen zijn 25 bij 25 meter groot en de ondergrondinformatie (transmissiviteit van aquifers en stromingsweerstand van aquitards) wordt met cellen van 100 bij 100 meter beschreven. Iedere 'ondergrond' cel wordt dus opgedeeld in vier rekencellen met dezelfde eigenschappen. De dikte van de modelcellen varieert van enkele meters tot tientallen meters.

De Modflow modellen, die in dit onderzoek zijn opgesteld, zijn opgebouwd uit cellen van 5 bij 5 meter. De dikte van de cellen komt overeen met de laagdikte en er wordt geen onderscheid gemaakt tussen aquifers en aquitards; aan iedere cel wordt een doorlatendheid en een samendrukbaarheid toegekend. De grondeigenschappen van de cellen zijn afgeleid uit een driedimensionale schematisatie van de ondergrond die met het programma iMod is opgesteld. De schematisatie is gebaseerd op boor- en sondeergegevens die in het kader van het dijkversterkingsproject zijn verzameld. De Modflow berekeningen worden uitgevoerd met tijdstappen van een uur en de resultaten worden opgeslagen in intervallen van een dag.

Bij zowel het regionale MORIA model als het Modflow model wordt de onverzadigde zone buiten beschouwing gelaten en wordt een confined (volledig verzadigde) toestand verondersteld. De koppeling tussen Modflow en MORIA wordt afgehandeld in een iModflow module. Modflow berekeningen zijn uitgevoerd voor de periode januari-februari 2015 waarbij de randvoorwaarden volgen uit MORIA berekeningen van dezelfde periode in 2014 aangezien MORIA rekenresultaten voor 2015 ontbraken. Met deze procedure is het rekenconcept echter voldoende getoetst.

Voor het bovenstroomse profiel TG175 geeft een gekoppelde Modflow-MORIA berekening resultaten die beter overeenkomen met gemeten stijghoogtes dan een ontkoppelde Modflow berekening waarbij de verticale randen van het modelgebied gesloten zijn. De stijghoogte in de watervoerende laag aan de randen van het Modflow model die wordt afgeleid uit het MORIA model zijn namelijk significant lager dan stijghoogtes die worden bepaald met een ontkoppelde Modflow berekening. Voor de profielen TG356 en TG385 geven gekoppelde Modflow-MORIA berekeningen nagenoeg hetzelfde resultaat als ontkoppelde Modflow berekeningen; de modelgebieden zijn dus groot genoeg gekozen waardoor de stijghoogte aan de verticale modelranden de berekende stijghoogte in de doorsnede niet significant beïnvloedt. De horizontale afmeting van het modeldomein, de periode die is doorgerekend, het aantal cellen waarop de berekening is gebaseerd, het aantal tijdstappen dat is doorgerekend en de rekentijd die voor de berekening nodig was voor de Modflow berekening is per onderzoekslocatie samengevat in Tabel 9.1.

6 september 2017, definitief

Modflow	TG175	TG356	TG385
Domein (m)	1400x1400	1400x1450	1400x1500
Periode (d)	60	60	60
Cellen	470.400	487.200	504.000
Tijdstappen	1.440	1.440	1.440
Rekentijd (h)	1,8	2,3	2,1

Tabel 9.1 Modflow berekeningen resolutie 5x5 m, tijdstap 1 h.

Geconcludeerd is dat de meerwaarde van de Modflow-MORIA koppeling beperkt is door verschillen in ruimtelijke resolutie en tijd discretisatie; in de onderzochte gebieden worden in het MORIA model tot een diepte van NAP -15,00 m slechts twee grondlagen onderscheiden en er zijn slechts twee stijghoogtevelden per maand beschikbaar.

9.3 Lokaal geohydrologisch model

Het rekenmodel DgFlow beschrijft verzadigde en onverzadigde grondwaterstroming in combinatie met elastische vervorming van de ondergrond. De koppeling tussen DgFlow en Modflow is vrij complex omdat DgFlow gebaseerd is op de eindige elementen methode en Modflow een eindige differentie basis heeft. Bij de koppeling van de rekenmodellen moeten stijghoogtes, die met Modflow in cel centra zijn berekend, vertaald worden naar waarden in knopen die in de hoekpunten van de cellen liggen en fluxen die met DgFlow zijn berekend moeten van knoopwaarden naar celwaarden worden vertaald. De uitwisseling van stijghoogtes en debieten vindt plaats op dagbasis terwijl de programma's beide op uurbasis rekenen.

Het modelgebied van de onderzoekslocatie TG175, waarmee driedimensionale DgFlow berekeningen zijn uitgevoerd, is niet groot genoeg om de voeding van grondwater door de rivier te beschrijven. Een gekoppelde Modflow-DgFlow berekening geeft daarom betere resultaten dan een DgFlow berekening waarbij de verticale modelranden gesloten zijn. Dezelfde conclusie kan eveneens worden getrokken voor modelgebieden TG356 en TG385, hoewel de randeffecten daar minder groot zijn. De doorlatendheid van de deklaag is in de DgFlow berekeningen een factor 100 hoger gekozen dan in de Modflow berekeningen omdat het polderpeil, dat via randelementen in poldersloten wordt opgelegd, bij een DgFlow berekening aan de bovenzijde van de deklaag wordt toegekend terwijl deze randvoorwaarde bij een Modflow berekening aan de onderzijde van de deklaag wordt opgelegd. De gegevens van de driedimensionale DgFlow berekeningen zijn samengevat in Tabel 9.2.

6 september 2017, definitief

DgFlow3D	TG175	TG356	TG385
Domein (m)	400x400	400x550	400x500
Periode (d)	60	60	60
Knopen	35.788	53,732	48,598
Tijdstappen	1.440	1.440	1.440
Rekentijd (h)	2,6	3,6	3,6

Tabel 9.2 DgFlow3D berekeningen resolutie 5x5 m, tijdstap 1 h.

De gegevens van de driedimensionale DgFlow simulatie voor de berekening van waterspanningsvelden in en rond de zeedijk op Ameland, de Aaldijk in het benedenrivierengebied en de Markermeerdijk zijn samengevat in Tabel 9.3.

DgFlow3D	Ameland	Aaldijk	Meerdijk
Domein (m)	500x500	500x500	500x500
Periode (d)	7	9	10
Elementen	37.915	40.416	43.511
Knopen	48.397	50.684	54.070
Tijdstap	168	216	240
RekentijdU (h)	0,22	0,30	0,33

Tabel 9.3 DgFlow3D berekeningen resolutie 5x5 m, tijdstap 1 h.

Uit de dikte van de laag en de doorlatendheid van het materiaal, waaruit de laag is opgebouwd, kan de stromingsweerstand worden afgeleid. Deze stromingsweerstand is gebruikt voor het afschatten van de minimale grootte van de modelgebieden waarmee stromingsberekeningen worden gemaakt. Voor de onderzochte profielen TG175, TG356 en TG385 bedraagt deze afmeting van het modelgebied achtereenvolgens 1,2 km, 1,4 km en 1,7 km. Voor de zeedijk op Ameland is de benodigde lengte 312 m en voor de Aaldijk 612 m.

Bij tweedimensionale DgFlow berekeningen worden polderrandvoorwaarden toegekend aan de bovenrand van het model en niet aan sloten zoals bij Modflow of DgFlow3D het geval was. Aan verticale randen kan het rivierpeil en polderpeil (gedempt) worden toegekend. Sijpelrandvoorwaarden worden toegekend aan het dijklichaam waarmee uitstroom van water bij atmosferische condities wordt voorgeschreven en instroom wordt voorkomen. In Modflow is deze voorwaarde met drain condities beschreven. Bij de tweedimensionale DgFlow simulaties wordt de stromingsweerstand van rivierbodem toegekend aan elementen in het rivierbed en niet verdisconteerd met randelementen.

De tweedimensionale DgFlow modellen zijn voor de dijk in het benedenrivierengebied afgeleid uit doorsneden van het Modflow ondergrondmodel. Voor het profiel TG175 is de doorlatendheid van laag 3 verhoogd met een factor 2 en is de rivierrand direct aan de verticale rand van de watervoerende laag toegekend. De berekende stijghoogtes komen daarmee goed overeen met gemeten stijghoogtes. Voor de profielen TG356 en TG385 zijn de modelparameters (doorlatendheden en bergingscoëfficiënten) gelijk aan die van de Modflow berekening gekozen en is de overeenkomsten tussen stijghoogtemetingen

6 september 2017, definitief

en berekeningen goed. Voor alle gevallen geven gekoppelde stromingsdeformatieberekeningen nagenoeg dezelfde resultaten als ontkoppelde stromingsberekeningen. De gegevens van de tweedimensionale DgFlow berekeningen zijn samengevat Tabel 9.4.

DgFlow2D	TG175	TG356	TG385
Domein (m)	1801	1472	1698
Periode (d)	60	60	60
Knopen	4064	3492	3806
Tijdstappen	1440	1440	1440
RekentijdU (m)	6,0	4,4	5,3
RekentijdC (h)	2,9	1,8	3,0

Tabel 9.4 DgFlow2D berekeningen resolutie 5x5 m, tijdstap 1 h.

De gegevens van de tweedimensionale DgFlow simulatie voor de berekening van waterspanningsvelden in en rond de zeedijk (Ameland), de dijk in het benedenrivierengebied (Aaldijk) en de meerdijk (Markermeer) zijn samengevat in Tabel 9.5.

DgFlow2D	Ameland	Aaldijk	Meerdijk
Domein (m)	250	200	150
Periode	7	9	10
Elementen	788	860	1335
Knopen	789	856	1342
Tijdstap	169	216	240
RekentijdU (s)	3	4	7
RekentijdC (s)	39	30	74

Tabel 9.5 DgFlow2D berekeningen resolutie 5x5 m, tijdstap 1 h.

Ontkoppelde stromingsberekeningen hebben voor de onderzochte locaties de voorkeur omdat de rekentijden beperkt zijn en de resultaten van de gekoppelde en ontkoppelde berekeningen sterk met elkaar overeen komen.

9.4 Geotechnisch model

De maatgevende belasting van het dijklichaam bij hoogwater is bepaald met de hydraulische randvoorwaarden tool die geleverd wordt door de helpdesk van Rijkswaterstaat en ondergebracht is in het wettelijk beoordelingsinstrument (WBI).

De hydraulische belasting is opgegeven als randvoorwaarde aan de DgFlow stromingsmodellen waarna de waterspanningen zijn berekend. De stijghoogtes langs geometrielijnen (laagscheidingen) zijn vervolgens in de dwarsdoorsnede uit de modellen gefilterd en opgelegd in Plaxis2D. Voor de geotechnische berekening is het materiaalgedrag van de ondergrond en het dijklichaam beschreven met het Mohr-Coulomb model (undrained A), waarbij het onverzadigde volumiek gewicht van de grond 19,5 kN/m³, het verzadigde volumiek gewicht van de grond 20,5 kN/m³, de cohesie 1

6 september 2017, definitief

kN/m² en de hoek van inwendige wrijving 30° bedraagt. De berekende veiligheidsfactoren zijn samengevat in Tabel 9.6.

Case	ontwerp- berekening	stationair 2D	tijdsafhankelijk 2D	tijdsafhankelijk 3D
TG175	1,40	1,33	1,33	1,24
TG356	1,48	1,49	1,49	1,39
TG385	1,72	1,66	1,67	1,50
Ameland	1,89	1,91	2,16	2,05
Aaldijk	1,74	1,56	1,63	1,67
Markermeerdijk	2,06	1,91	1,91	2,18

Tabel 9.6 Veiligheidsfactoren bepaald met Plaxis 2D berekeningen.

Voor dijken in het bovenrivierengebied (TG175, TG356, TG385) en meerdijken (Meerdijk) leidt het in rekening brengen van elastische en freatische berging niet tot een verhoging van de veiligheidsfactor en is het effect van niet-stationaire grondwaterstroming op de stabiliteit van de kering te verwaarlozen. Voor de dijk in het benedenrivierengebied (Aaldijk) geeft een tijdsafhankelijke berekening een 5% hogere veiligheidsfactor en voor de zeedijk (Ameland) neemt de veiligheidsfactor met 13% toe ten opzichte van een de veiligheidsfactor die volgt uit een stationaire grondwaterstromingsberekening. De driedimensionale berekeningen geven een lagere veiligheidsfactor dan tweedimensionale berekeningen en dat wordt voornamelijk veroorzaakt door een hogere ligging van de freatische lijn in de waterkering dat het gevolg is van het verschil in elementgrootte; de onverzadigde zone wordt met een tweedimensionale berekening nauwkeuriger beschreven dan met de driedimensionale berekening. Ten slotte wordt erop gewezen dat de absolute waarde van de factoren hoog is als gevolg van het toekennen van relatief hoge sterkte eigenschappen aan het dijklichaam en de ondergrond. Voor het kwantificeren van het effect van tijdsafhankelijke grondwaterstroming op de stabiliteit van de grondconstructie is dit te rechtvaardigen omdat gekeken wordt naar onderlinge verschillen.

10 Aanbevelingen

Dit onderzoek toont aan dat waterspanningen in grondlagen waarop waterkerende grondconstructies zijn gefundeerd efficiënt gesimuleerd kunnen worden met Modflow modellen die zijn opgesteld voor een modelgebied van 2 bij 2 km. Daarbij worden onverzadigde stroming en waterspanningsgeneratie door vervorming van de ondergrond echter verwaarloosd. Met een DgFlow berekening worden deze processen wel gesimuleerd en wordt de ligging van de freatische lijn in het dijklichaam berekend. Door het beschrijven van meer fysische processen en het verdisconteren van complexe randvoorwaarden zoals sijpelcondities nemen de rekentijden echter sterk toe. Voorgesteld wordt daarom om de DgFlow modellen alleen toe te passen in een gebied van ongeveer 150 bij 150 meter waar waterspanningen relevant zijn voor stabiliteitsanalyses en de modellen te koppelen aan de Modflow modellen. De berekende waterspanningen kunnen vervolgens worden gebruikt voor een Plaxis berekening waarmee de stabiliteit van de kering wordt vastgesteld. Aanbevolen wordt om Modflow modellen die in het kader van het HWBP dijkversterkingsproject worden opgesteld en de daaraan gekoppelde DgFlow modellen op te nemen in het MORIA modelinstrumentarium zodat de modellen hergebruikt kunnen worden voor het ontwerp, de toetsing en het beheer van de waterkering.

De modellen worden geijkt op gemeten waterspanningen en stijghoogtes bij gemiddeld- of hoogwater. Daarna kunnen de modellen worden gebruikt bij ontwerpberekeningen om waterspanningen bij maatgevende hoge waterstanden te berekenen. Daarbij worden niet-lineaire effecten zoals: het bereiken van de grenspotential onder een slecht doorlatend pakket waardoor de stijghoogte niet verder toe kan nemen, het ontstaan van spanningswater bij het afnemen van de freatische berging en het onderlopen van het voorland waardoor de ondergrond op een andere manier hydraulisch belast wordt dan bij laag water, in rekening gebracht. Zonder grondwatermodel kunnen de waterspanningen tijdens een hoogwatersituatie niet uit gemeten waterspanningen en stijghoogtes worden afgeleid. Bij het beheer van de waterkering kunnen de verschillen tussen gemeten en berekende stijghoogten mogelijke veranderingen in modelparameters door bijvoorbeeld structuurvorming, baggerwerkzaamheden of het staken van een grondwateronttrekking detecteren, waarna de modelbeschrijving kan worden aangepast en mogelijke maatregelen getroffen kunnen worden. Bij het toetsen van de constructies is het mogelijk om de response op veranderende hydraulische belastingen snel te bepalen.

Op basis van stijghoogtemetingen wordt bij de modelkalibratie een niet-unieke set materiaalparameters gevonden. Warmtemetingen in glasvezelkabels kunnen waardevolle aanvullende informatie geven voor het kalibreren van de modellen omdat daarmee (net als bij een pompproef) eveneens stroomsnelheden bepaald kunnen worden.

6 september 2017, definitief

Literatuur

Barends, F.B.J. (1982), Transient flow in leaky aquifer systems, Int. Conf. on Modern Appr. Groundwater Resources Management, Capri, Italy.

Borren, W. en Hoogewoud, J., (2015), Pilot gebruik grondwatermodel MORIA voor vierde toetsronde, Deltares rapport 1209842-000-BGS-0007, Utrecht, Nederland.

Bouw, R., (2014), Waddenzeedijk Ameland Monitoringsproef km 6,8 – km 7,1, Witteveen en Bos, onderzoeksrapport AME5-4, Deventer, Nederland.

Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy, S., Swolfs, W.M., (2015), Plaxis 2015, Delft, Nederland.

Van Esch, J.M., (2013), Modeling transient groundwater flow under dikes and dams for stability assessment, Comgeo, Krakow, Poland.

Oudega, R.M., (2015a), Waterspanningsmetingen HWBP project 1e tranche, traject 22G Waardenburg – Opijnen, Wiertsema & Partners rapport VN-59651-3.

Oudega, R.M., (2015b), Waterspanningsmetingen HWBP project 1e tranche, traject 22A Fort Vuren, Wiertsema & Partners rapport VN-59478-3.

Rozing, A.P.C., (1999), Veiligheidsbeoordeling Brielse dijkring, Geodelft rapport 386090/30, Delft, Nederland.

Schoofs, S., Van Duinen, T.A., (2006), Indringing van waterspanningen in samendrukbare lagen, Geotechniek.

TAW Technische adviescommissie voor de waterkeringen, (2004) Technisch rapport waterspanningen bij dijken TRW, Delft, Nederland.

TAW Technische adviescommissie voor de waterkeringen, (2001) Technisch rapport waterkerende grondconstructie, TRWG, Technische adviescommissie voor de waterkeringen, Delft, Nederland.

TAW Technische adviescommissie voor de waterkeringen, (1985), Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, Deel 1 – Bovenrivierengebied, Technische adviescommissie voor de waterkeringen, Delft, Nederland.

TAW Technische adviescommissie voor de waterkeringen, (1989), Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, Deel 2 – Benedenrivierengebied, Technische adviescommissie voor de waterkeringen, Delft, Nederland.



6 september 2017, definitief

Van den Berg, F., Van, M., Van de Hoef, J., Jelier, W., Roks, E., Van Schie, D., Termaat, R., (2015), Projectoverstijgende Verkenning Macrostablieiteit; plan van aanpak, Tiel, Nederland.

Van Esch, J.M., ea. (2013a), Modeling transient groundwater flow under dikes and dams for stability assessment, Computational Geomechanics editors Pande G.N. and Pietruszczak, S, Taylor & Francis Group.

Van Esch, J.M., ea. (2013b) Modeling transient groundwater flow and piping under dikes and dams, Computational Geomechanics editors Pande G.N. and Pietruszczak, S., Taylor & Francis Group.

Verruijt, A., (1990), Grondmechanica, Delftse uitgevers maatschappij, Delft, Nederland.

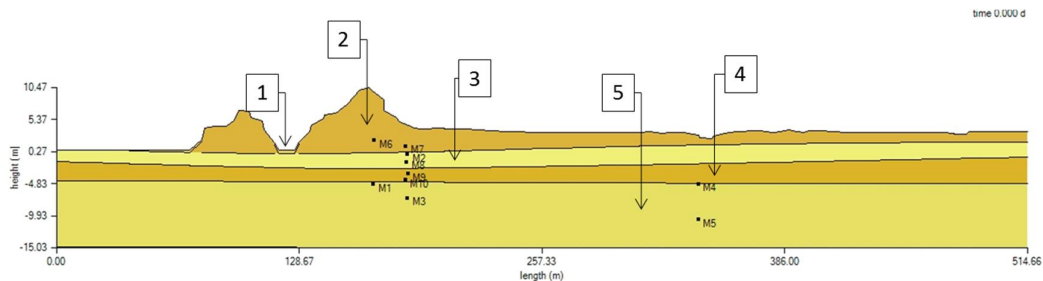
Verruijt, A., (1986), grondwatermechanica, Technische Universiteit Delft, Delft, Nederland

A Gevoeligheidsonderzoek

In deze appendix worden de resultaten van een gevoeligheidsonderzoek gepresenteerd dat zich richt op de verandering van de stijghoogte als gevolg van parametervariaties.

A.1 Waaldijk Opijnen

Figuur A.1 geeft het dwarsprofiel van profiel TG175 weer met de laagnummering. In Tabel A.1 zijn vervolgens de gemiddelde parameterwaarden verzameld.



Figuur A.1 DgFlow2D ondergrondmodel Waaldijk TG175.

Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	100	10^{-4}
2	0,01	10^{-4}
3	0,01	10^{-5}
4	50	10^{-5}
5	100	10^{-5}

Tabel A.1 Gekalibreerde materiaaleigenschappen TG175.

Gekalibreerd model (Figuur A.2)

Een verhoging van de doorlatendheid in het dijklichaam (Figuur A.4). Een verhoging van de samendrukbaarheid in het dijklichaam (Figuur A.8).

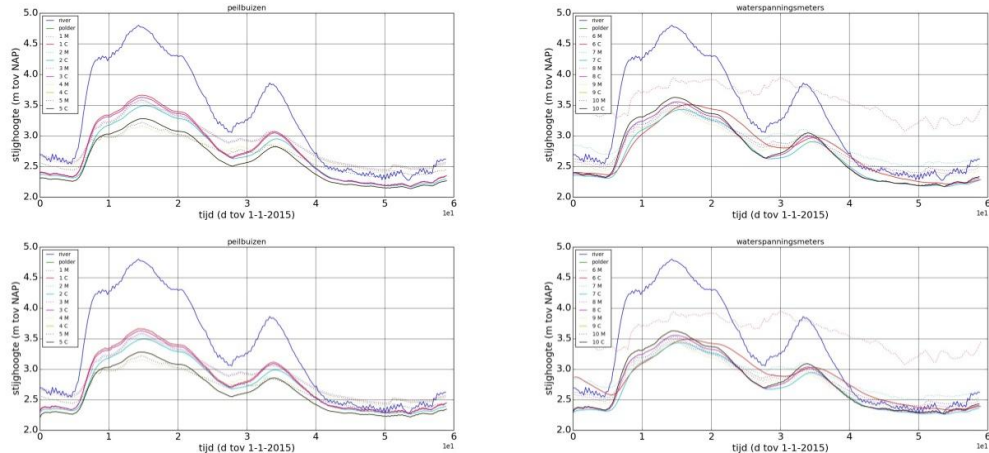
Een verhoging van de doorlatendheid in laag 2 (Figuur A.4). Een verhoging van de samendrukbaarheid in laag 2 (Figuur A.9).

Een verhoging van de doorlatendheid in laag 3 (Figuur A.5). Een verhoging van de samendrukbaarheid in laag 3 (Figuur A.10).

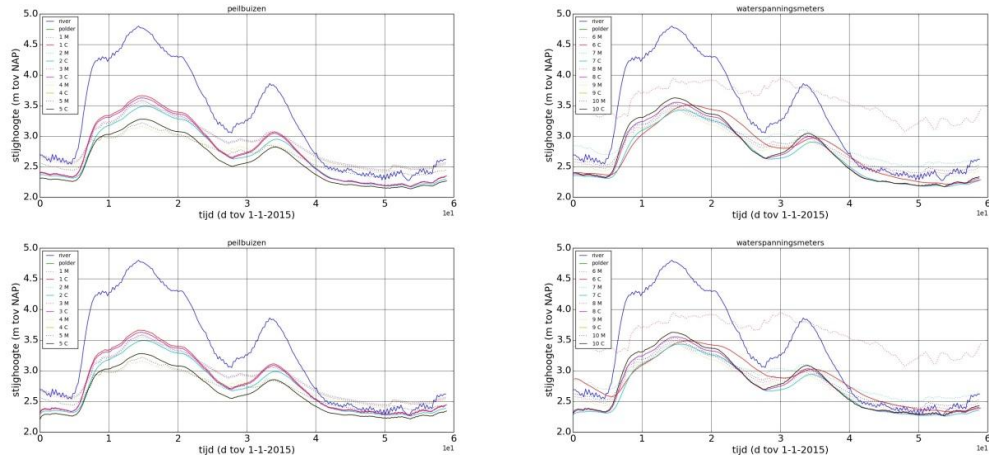
Een verhoging van de doorlatendheid in laag 4 (Figuur A.6). Een verhoging van de samendrukbaarheid in laag 4 (Figuur A.11).

6 september 2017, definitief

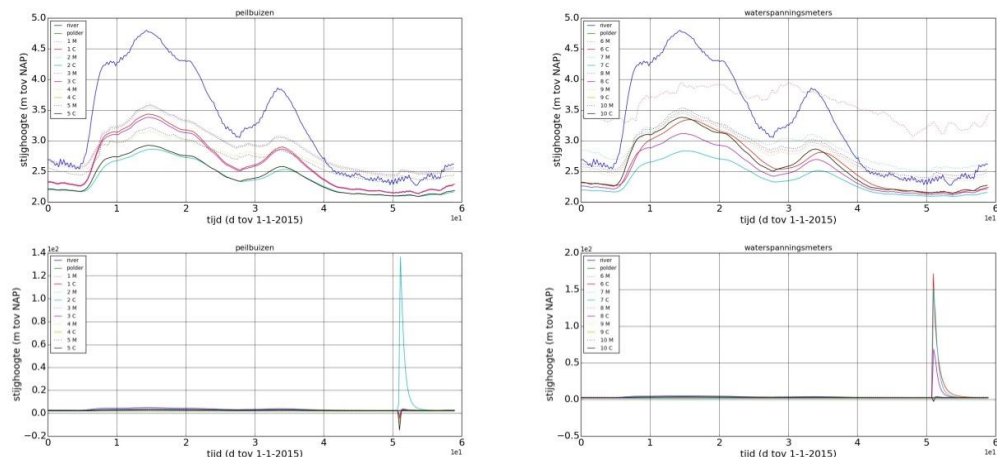
Een verhoging van de doorlatendheid in laag 5 (Figuur A.7). Een verhoging van de samendrukbaarheid in laag 5 (Figuur A.12).



Figuur A.2 DgFlow2D resultaten gemiddeld, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

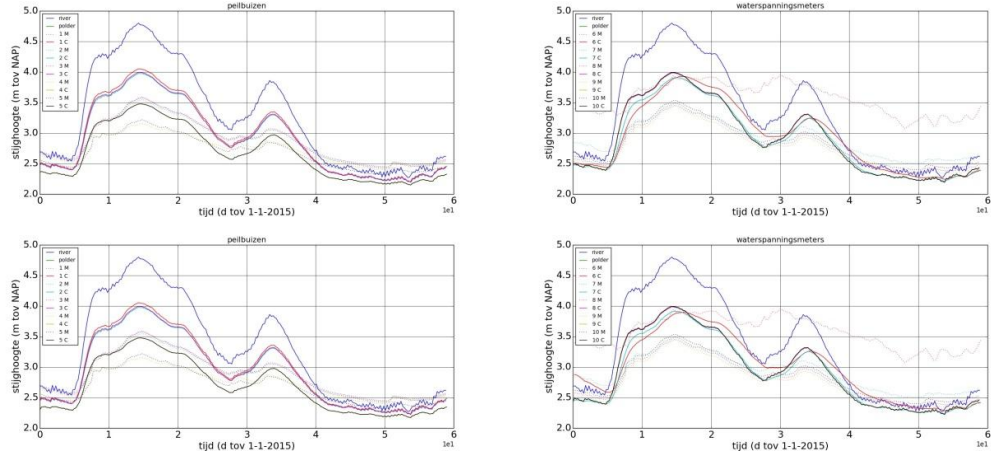


Figuur A.3 DgFlow2D resultaten $k_1 = 1000$ m/d, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

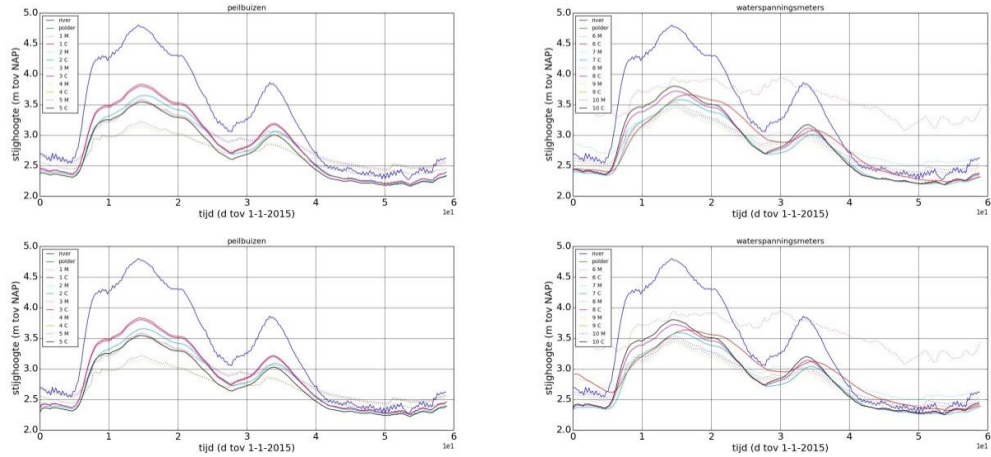


Figuur A.4 DgFlow2D resultaten $k_2 = 0.001$ m/d, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

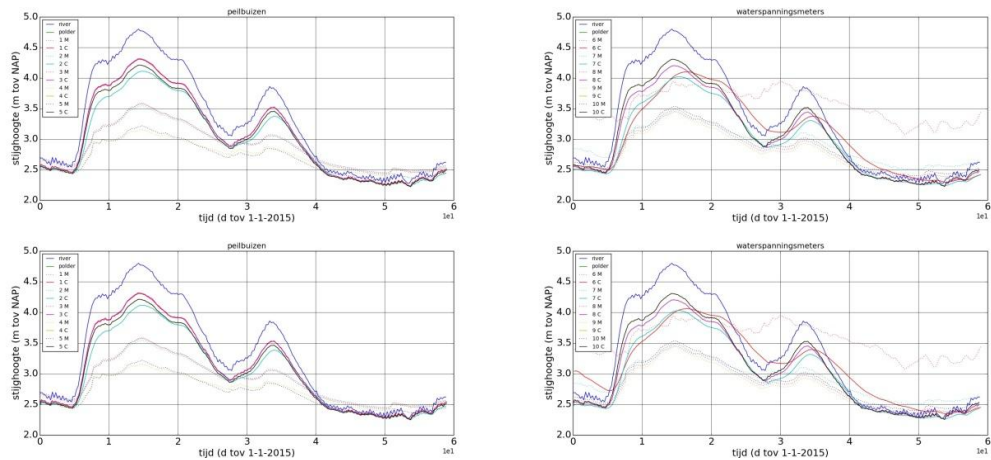
6 september 2017, definitief



Figuur A.5 DgFlow2D resultaten $k_3 = 0.001$ m/d, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

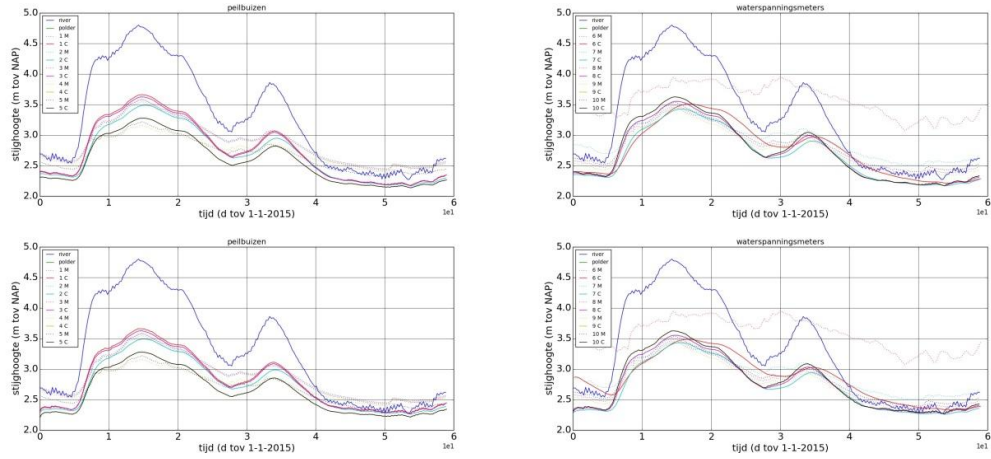


Figuur A.6 DgFlow2D resultaten $k_4 = 500$ m/d, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

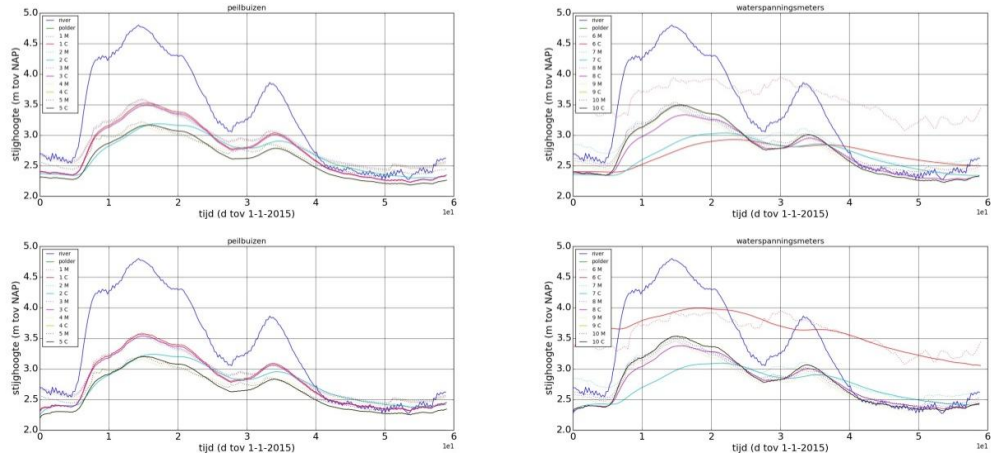


Figuur A.7 DgFlow2D resultaten $k_5 = 1000$ m/d, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

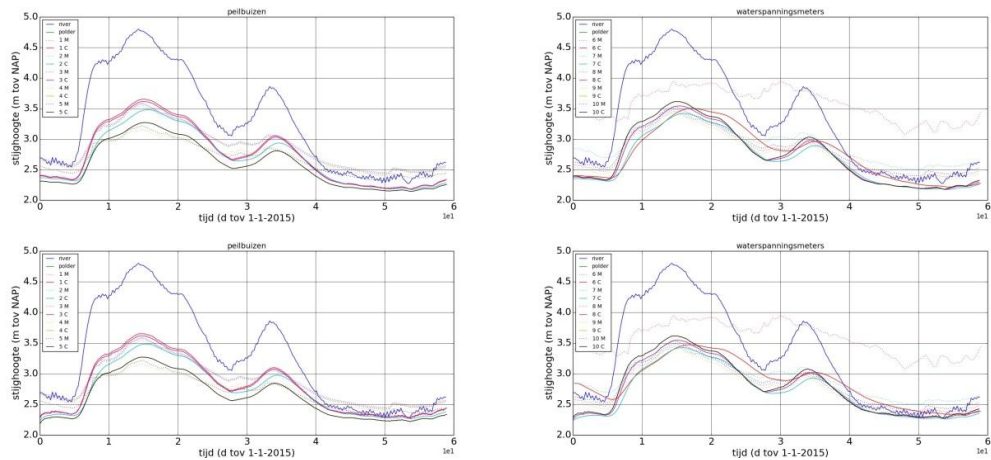
6 september 2017, definitief



Figuur A.8 DgFlow2D resultaten $mv1 = 10^{-3} 1/Pa$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

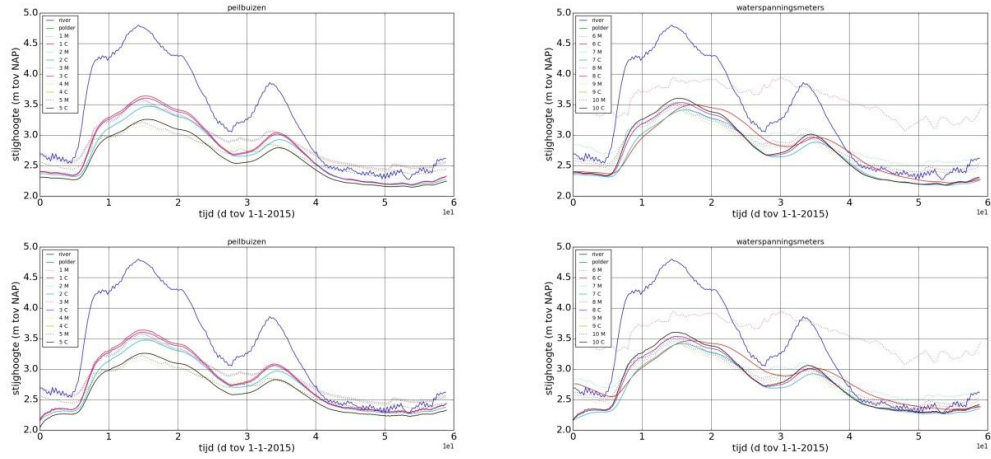


Figuur A.9 DgFlow2D resultaten $mv2 = 10^{-3} 1/Pa$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

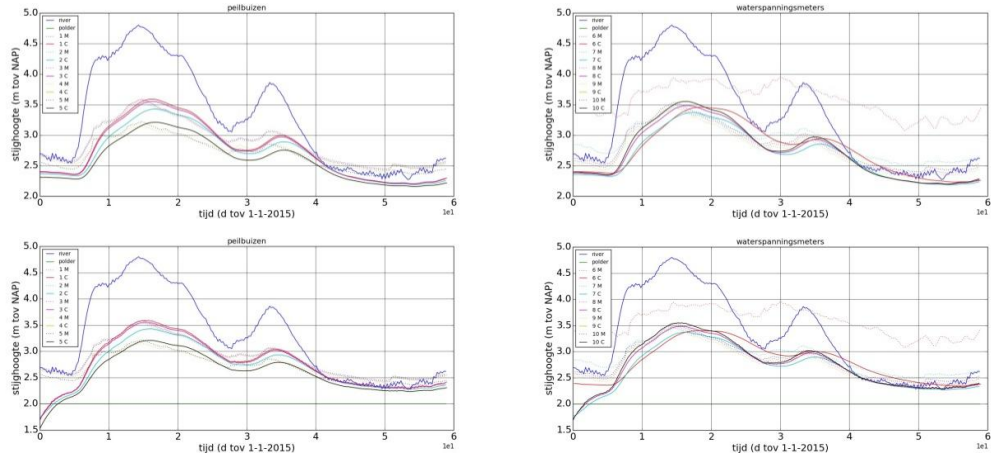


Figuur A.10 DgFlow2D resultaten $mv3 = 10^{-4} 1/Pa$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

6 september 2017, definitief



Figuur A.11 DgFlow2D resultaten $mv4 = 10^{-4} \text{ 1/Pa}$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

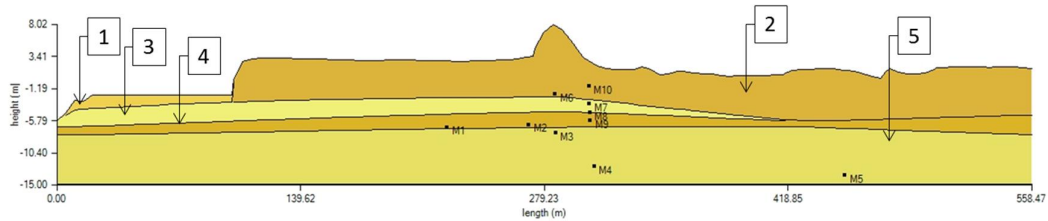


Figuur A.12 DgFlow2D resultaten $mv5 = 10^{-4} \text{ 1/Pa}$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

6 september 2017, definitief

A.2 Waaldijk Herwijnen

Figuur A.13 geeft het dwarsprofiel van profiel TG356 weer met de laagnummering. In Tabel A.2 zijn vervolgens de gemiddelde parameterwaarden verzameld.



Figuur A.13 DgFlow2D ondergrondmodel Waaldijk TG356.

Laag	K (m/d)	m_v (m^2/kN)
1	100	10^{-4}
2	0,01	10^{-4}
3	100	10^{-5}
4	50	10^{-5}
5	50	10^{-5}

Tabel A.2 Gekalibreerde Materiaaleigenschappen TG356.

Gekalibreerd model (Figuur A.14)

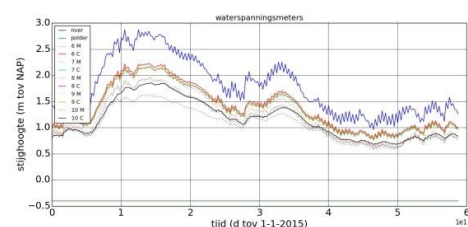
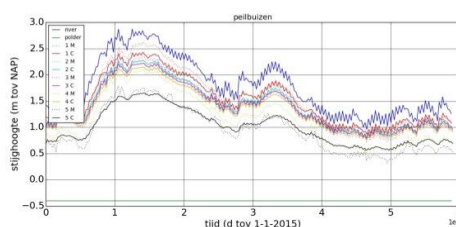
Een verhoging van de doorlatendheid in het dijklichaam (Figuur A.15). Een verhoging van de samendrukbaarheid in het dijklichaam (Figuur A.20)

Een verhoging van de doorlatendheid in laag 2 (Figuur A.16). Een verhoging van de samendrukbaarheid in laag 2 (Figuur A.21).

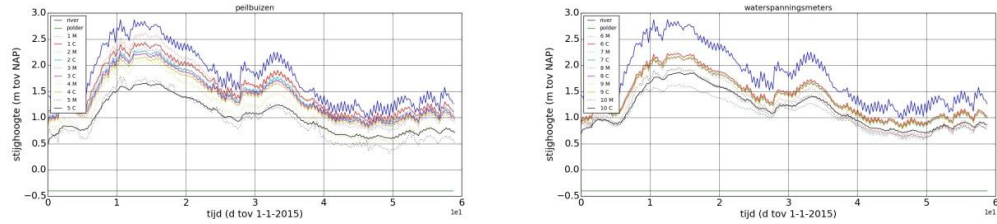
Een verhoging van de doorlatendheid in laag 3 (Figuur A.17). Een verhoging van de samendrukbaarheid in laag 3 (Figuur A.22).

Een verhoging van de doorlatendheid in laag 4 (Figuur A.18). Een verhoging van de samendrukbaarheid in laag 4 (Figuur A.23).

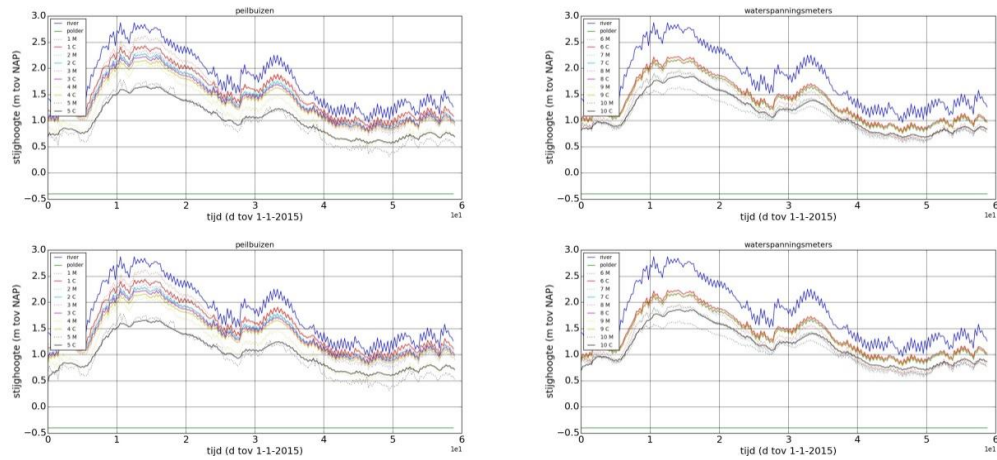
Een verhoging van de doorlatendheid in laag 5 (Figuur A.19). Een verhoging van de samendrukbaarheid in laag 5 (Figuur A.24).



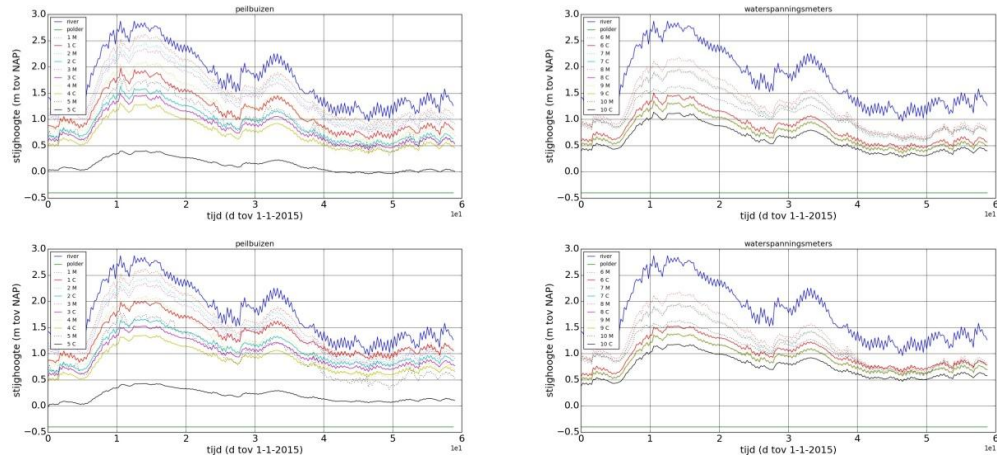
6 september 2017, definitief



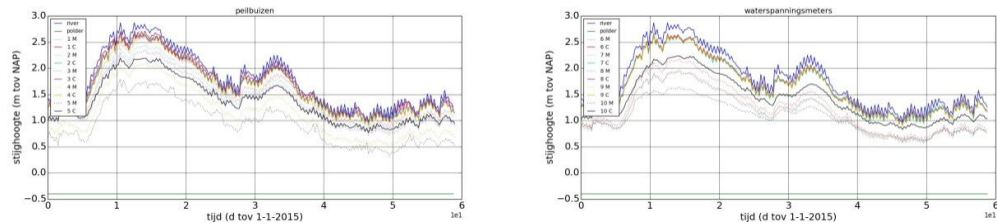
Figuur A.14 DgFlow2D resultaten gemiddeld, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



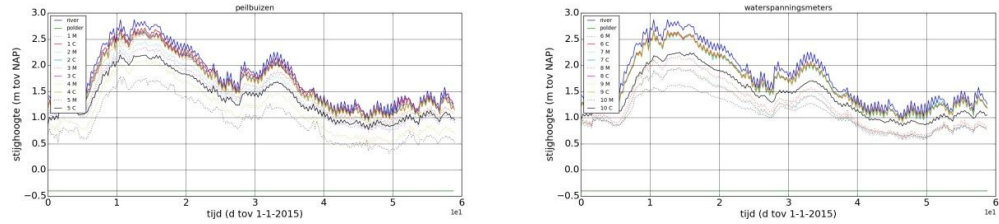
Figuur A.15 DgFlow2D resultaten $k_1 = 1000 \text{ m/d}$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



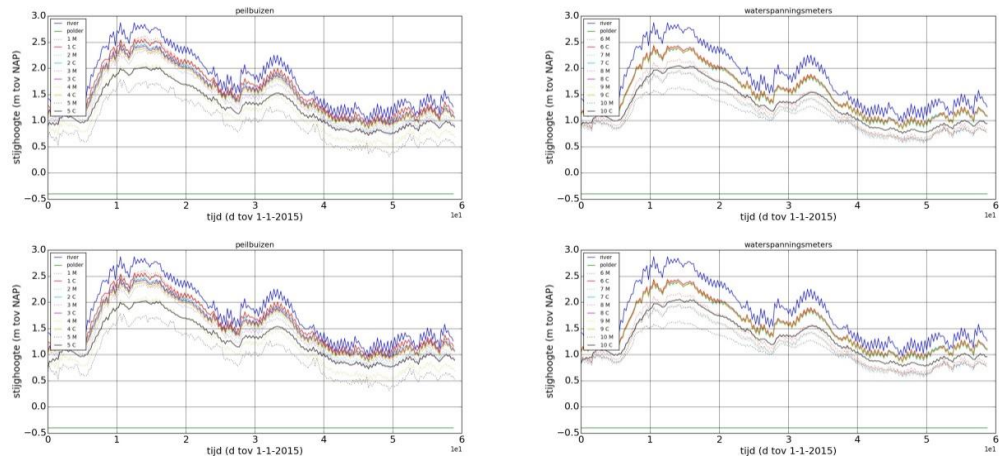
Figuur A.16 DgFlow2D resultaten $k_2 = 0.001 \text{ m/d}$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



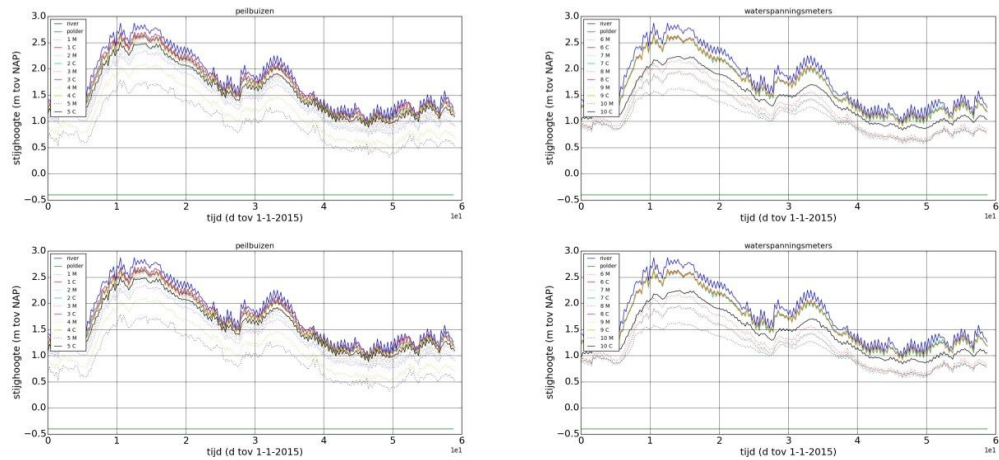
6 september 2017, definitief



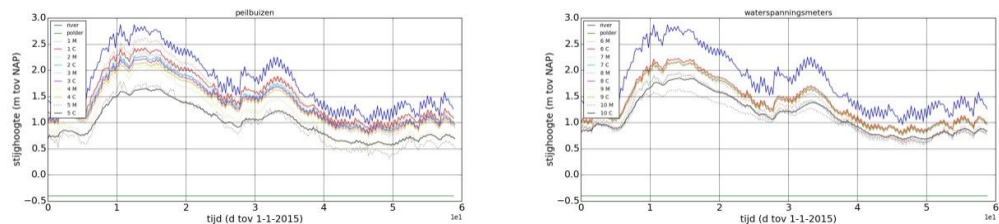
Figuur A.17 DgFlow2D resultaten $k3 = 1000$ m/d, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



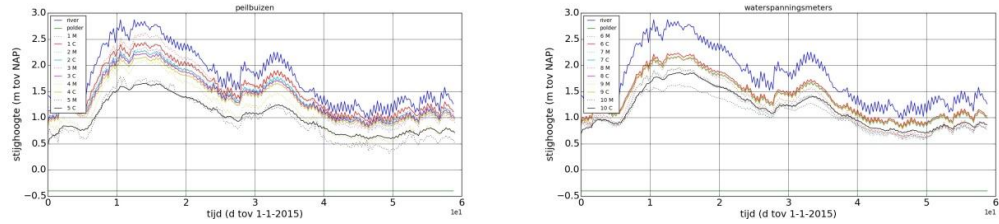
Figuur A.18 DgFlow2D resultaten $k4 = 500$ m/d, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



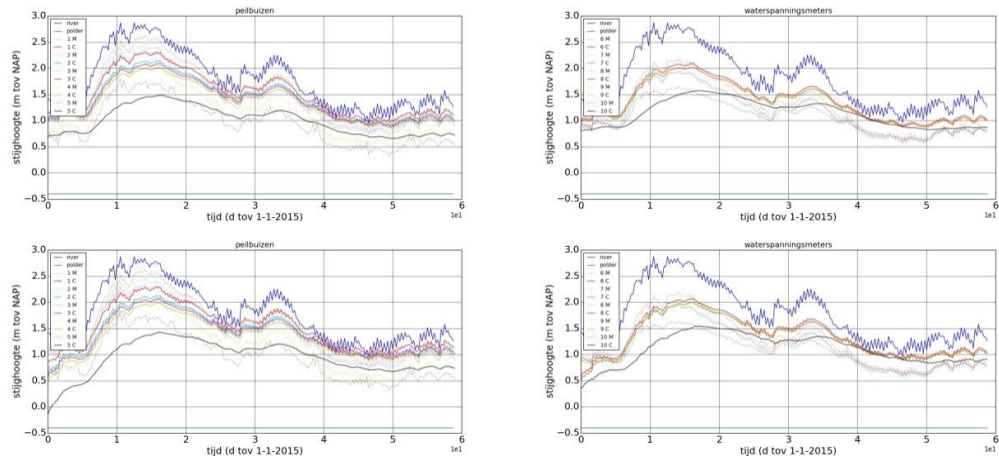
Figuur A.19 DgFlow2D resultaten $k5 = 500$ m/d, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



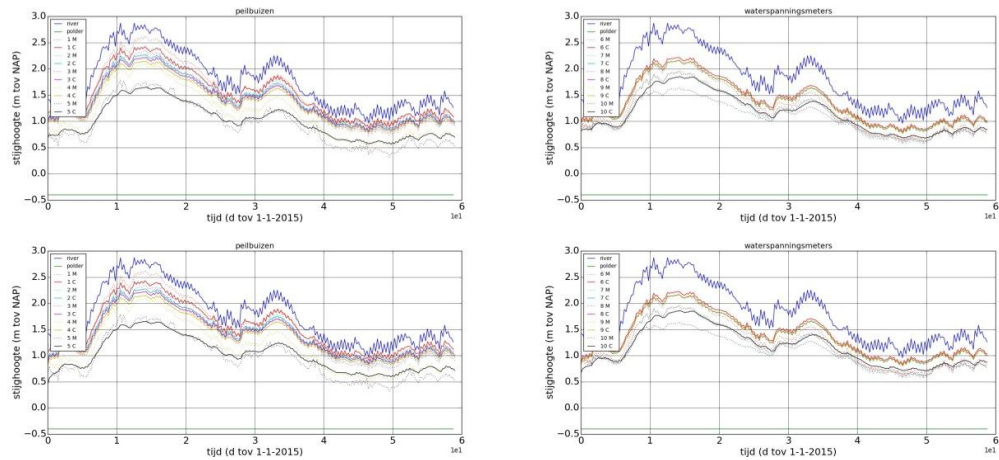
6 september 2017, definitief



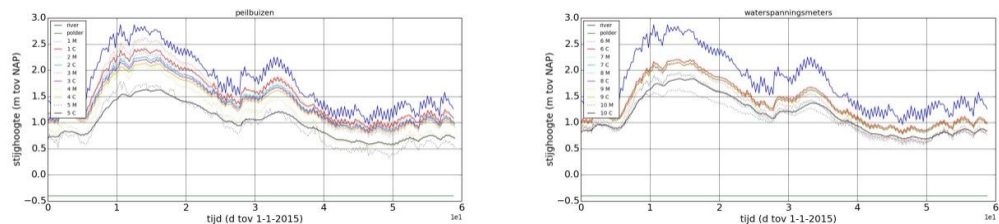
Figuur A.20 DgFlow2D resultaten $mv1 = 10^{-3} 1/Pa$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



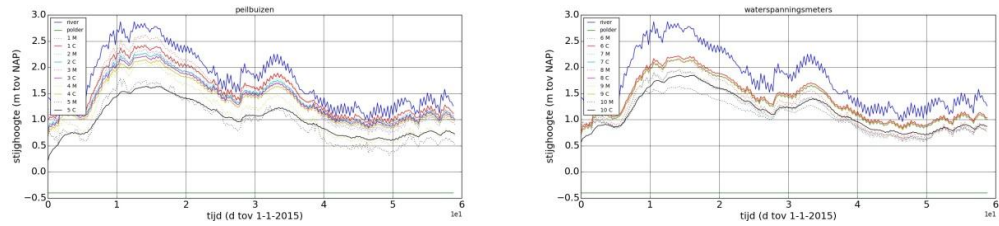
Figuur A.21 DgFlow2D resultaten $mv2 = 10^{-3} 1/Pa$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



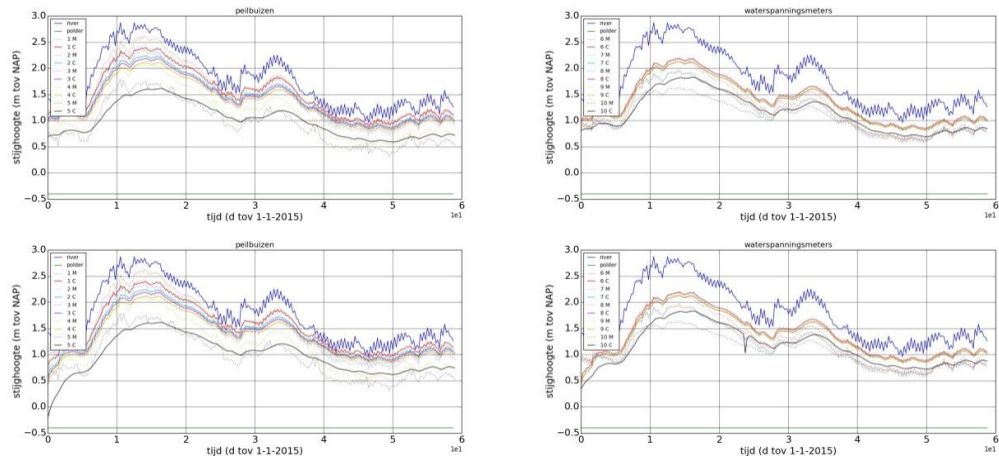
Figuur A.22 DgFlow2D resultaten $mv3 = 10^{-4} 1/Pa$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



6 september 2017, definitief



Figuur A.23 DgFlow2D resultaten $mv4 = 10^{-4} 1/Pa$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

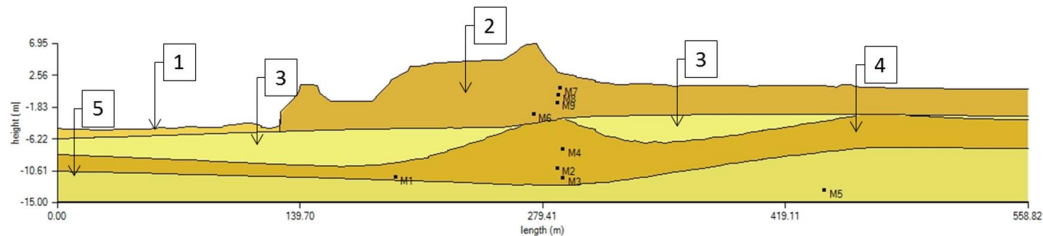


Figuur A.24 DgFlow2D resultaten $mv5 = 10^{-4} 1/Pa$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

6 september 2017, definitief

A.3 Waaldijk Vuren

Figuur A.25 geeft het dwarsprofiel van profiel TG385 weer met de laagnummering. In Tabel A.3 zijn vervolgens de gemiddelde parameterwaarden verzameld.



Figuur A.25 DgFlow2D ondergrondmodel Waaldijk TG385.

Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	100	10^{-4}
2	0,005	10^{-4}
3	100	10^{-5}
4	50	10^{-5}
5	50	10^{-5}

Tabel A.3 Gekalibreerde materiaaleigenschappen TG385.

Gekalibreerd model (Figuur A.26).

Een verhoging van de doorlatendheid in het dijklichaam (Figuur A.27). Een verhoging van de samendrukbaarheid in het dijklichaam (Figuur A.32).

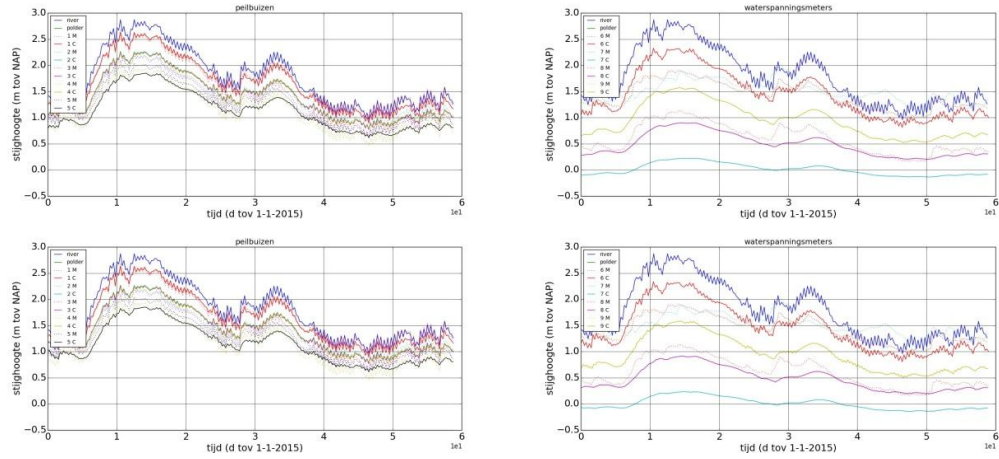
Een verhoging van de doorlatendheid in laag 2 (Figuur A.28). Een verhoging van de samendrukbaarheid in laag 2 (Figuur A.33).

Een verhoging van de doorlatendheid in laag 3 (Figuur A.29). Een verhoging van de samendrukbaarheid in laag 3 (Figuur A.34).

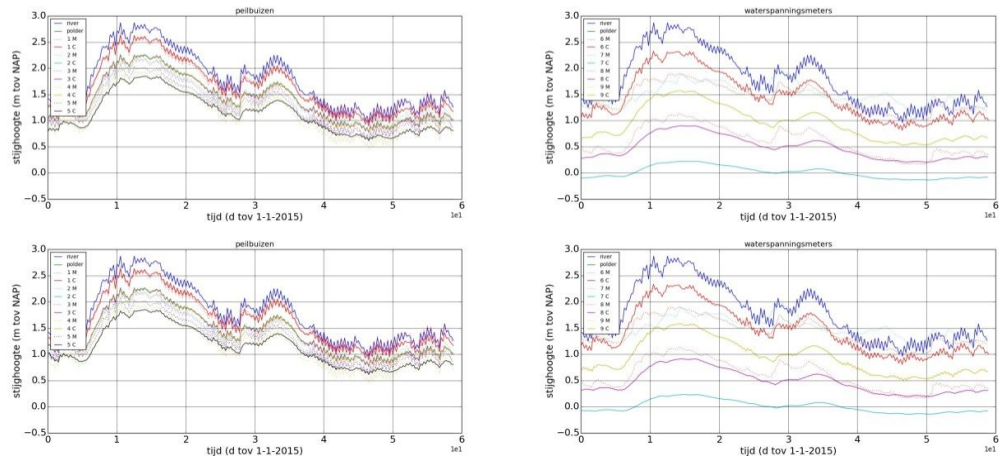
Een verhoging van de doorlatendheid in laag 4 (Figuur A.30). Een verhoging van de samendrukbaarheid in laag 4 (Figuur A.35).

Een verhoging van de doorlatendheid in laag 5 (Figuur A.31). Een verhoging van de samendrukbaarheid in laag 5 (Figuur A.36).

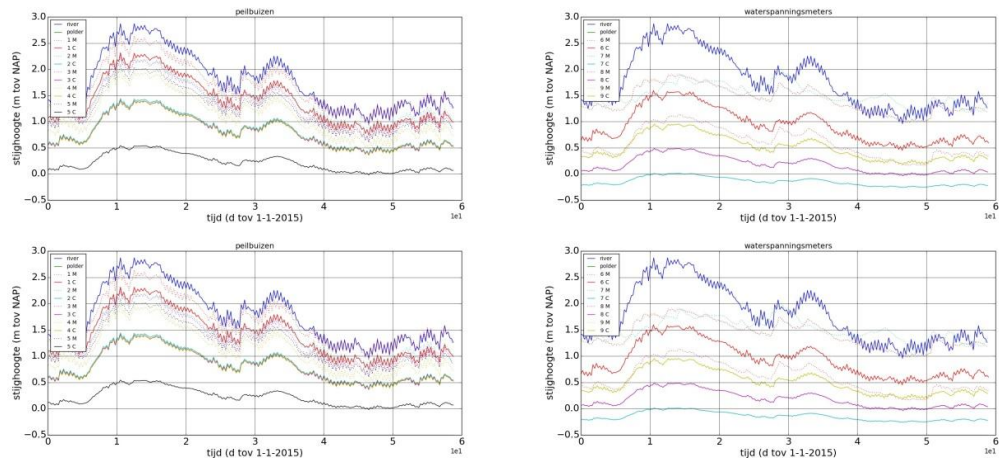
6 september 2017, definitief



Figuur A.26 DgFlow2D resultaten gemiddeld, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

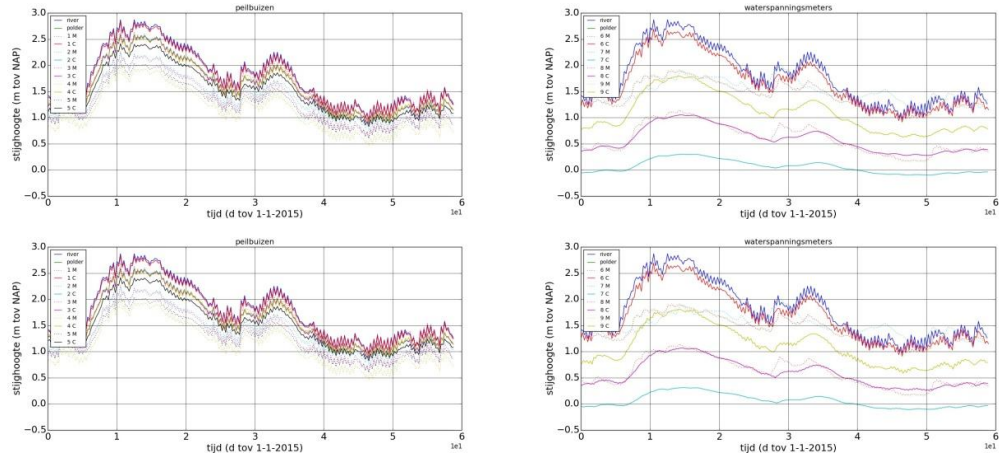


Figuur A.27 DgFlow2D resultaten $k_1 = 1000 \text{ m/s}$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

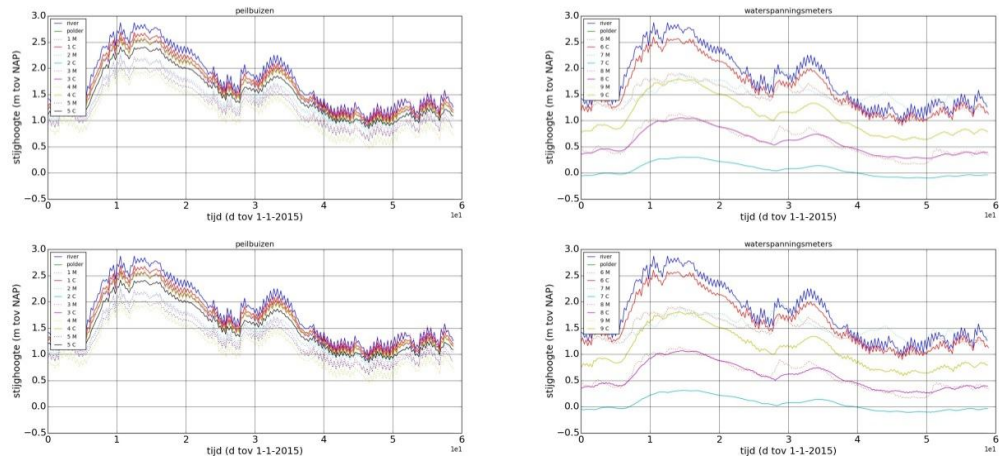


Figuur A.28 DgFlow2D resultaten $k_2 = 0.0005 \text{ m/s}$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

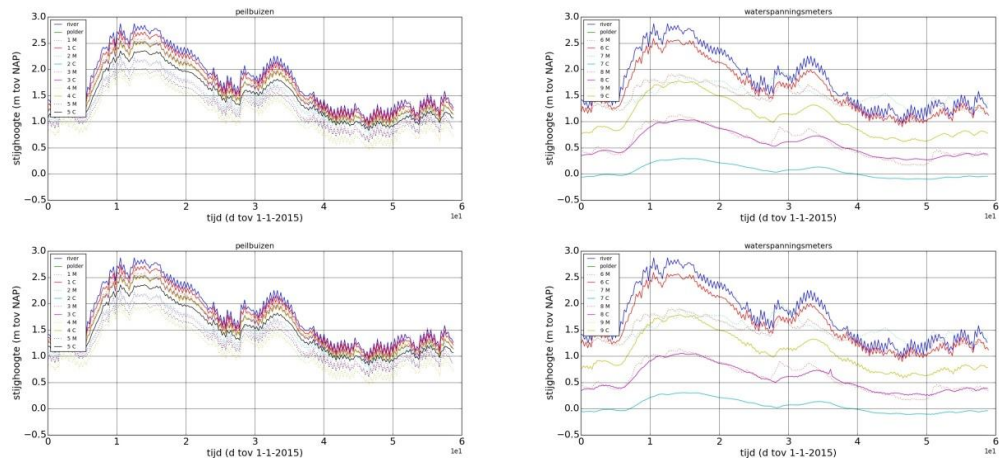
6 september 2017, definitief



Figuur A.29 DgFlow2D resultaten $k_3 = 1000$ m/s, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

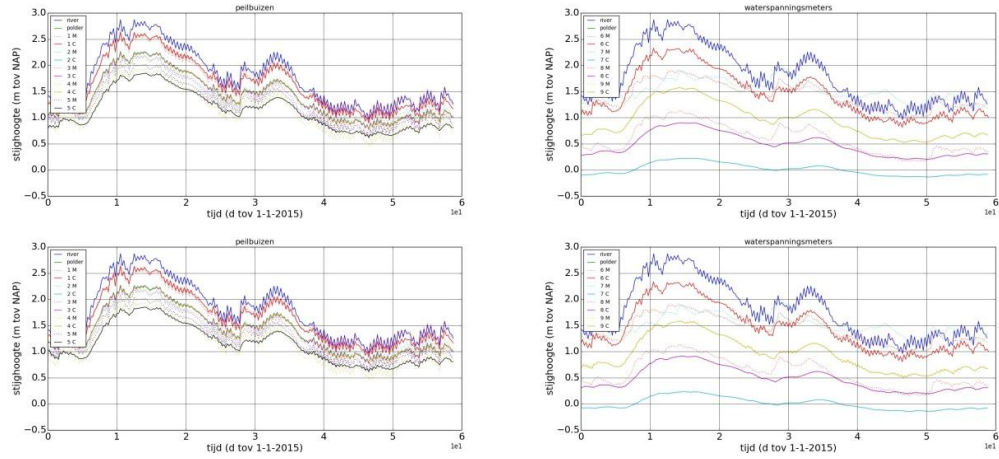


Figuur A.30 DgFlow2D resultaten $k_4 = 500$ m/s, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

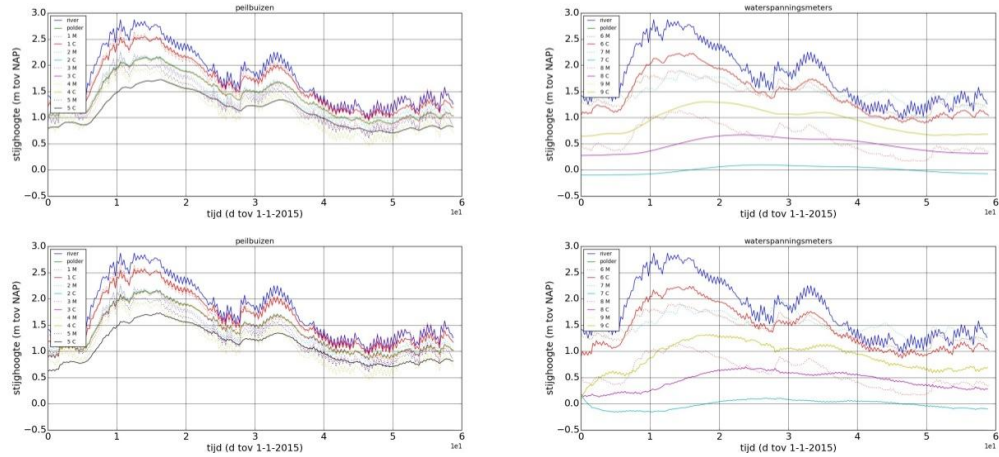


Figuur A.31 DgFlow2D resultaten $k_5 = 500$ m/s, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

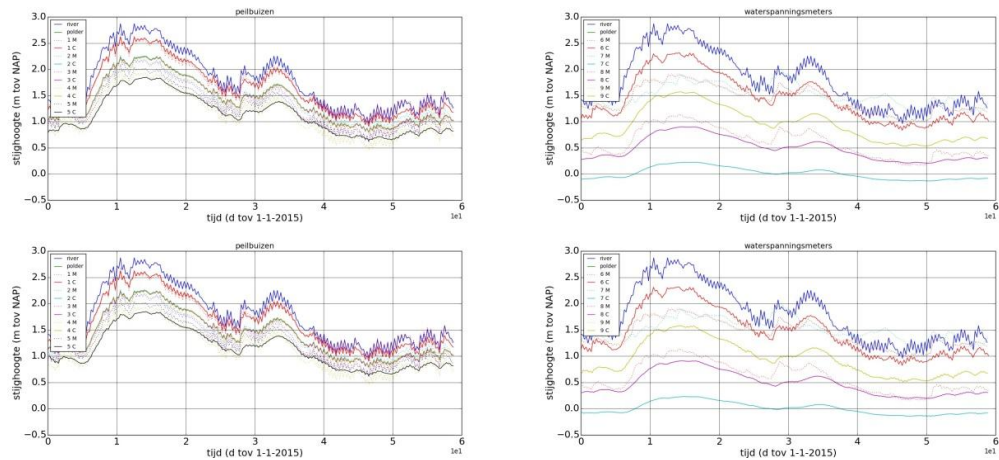
6 september 2017, definitief



Figuur A.32 DgFlow2D resultaten $mv1 = 10^{-3} 1/Pa$, onkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

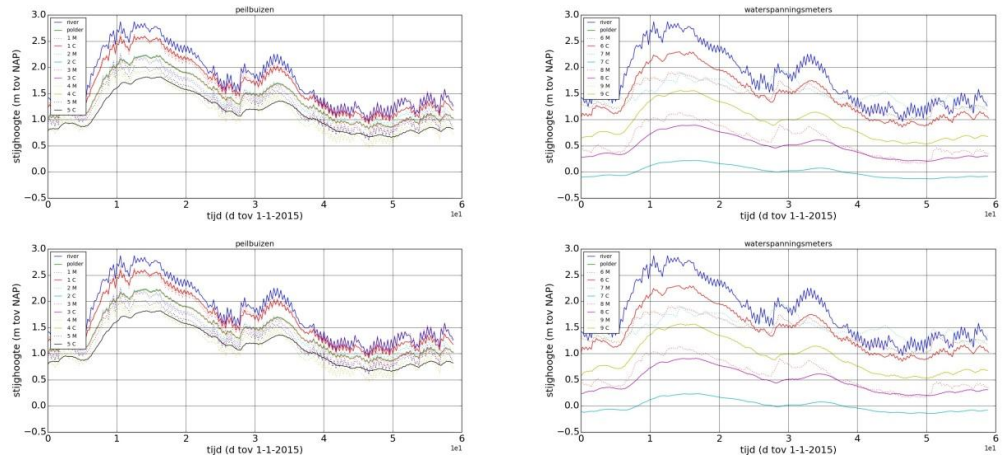


Figuur A.33 DgFlow2D resultaten $mv2 = 10^{-3} 1/Pa$, onkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

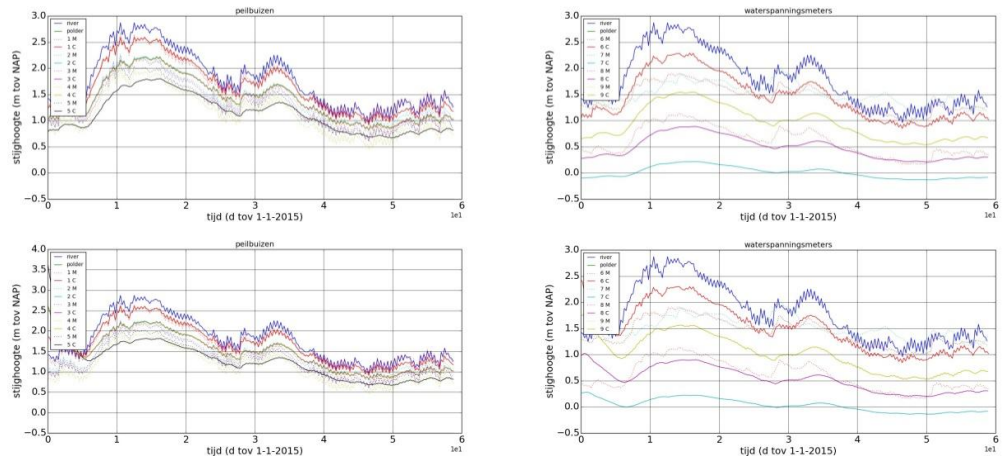


Figuur A.34 DgFlow2D resultaten $mv3 = 10^{-4} 1/Pa$, onkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

6 september 2017, definitief



Figuur A.35 DgFlow2D resultaten $mv4 = 10^{-4} 1/Pa$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

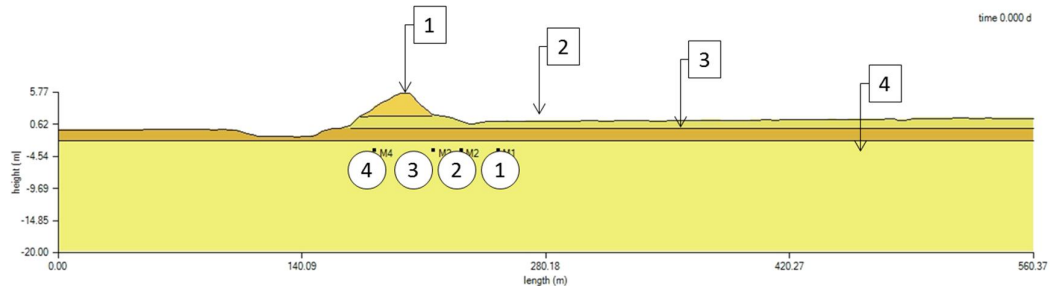


Figuur A.36 DgFlow2D resultaten $mv5 = 10^{-4} 1/Pa$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

6 september 2017, definitief

A.4 Zeedijk Ameland

Het ondergrondmodel van de zeedijk op Ameland is afgebeeld in Figuur A.37, de gemiddelde parameterwaarden zijn verzameld in Tabel A.4.



Figuur A.37 DgFlow2D ondergrondmodel Ameland.

Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	0,1	10^{-5}
2	4	10^{-5}
3	0,1	10^{-5}
4	30	10^{-5}

Tabel A.4 Gekalibreerde materiaaleigenschappen Ameland.

De stromingsberekening met het gekalibreerde model (Figuur A.38) laat een kleine faseverschuiving zien tussen de stijghoogtes in de observatiepunten en de buitenwaterstand. De gekoppelde stromings-deformatie berekening laat dit niet zien.

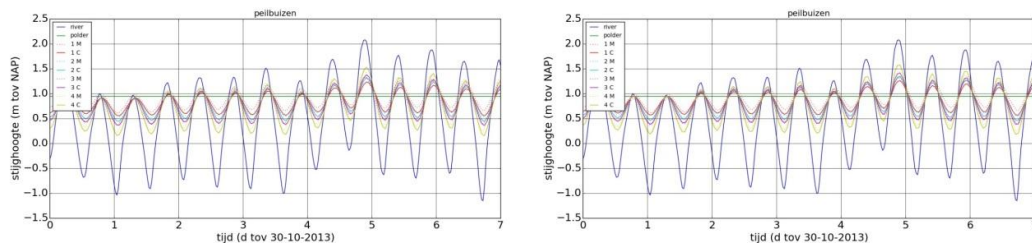
Een verhoging van de doorlatendheid in het dijklichaam heeft geen effect op de voorspelde stijghoogtes in de observatiepunten (Figuur A.39). De ontkoppelde berekening geeft een kleine faseverschuiving. Een verhoging van de samendrukbaarheid in het dijklichaam heeft geen effect (Figuur A.43) op de stijghoogteontwikkeling.

Een verhoging van de doorlatendheid in laag 2 (Figuur A.40) vergroot de amplitude waarbij de toppen nagenoeg op dezelfde plaats blijven liggen. De stromingsberekening geeft een kleine faseverschuiving. Een verhoging van de samendrukbaarheid in de toplaag heeft nagenoeg geen effect op de ontwikkeling van de waterspanningen (Figuur A.44).

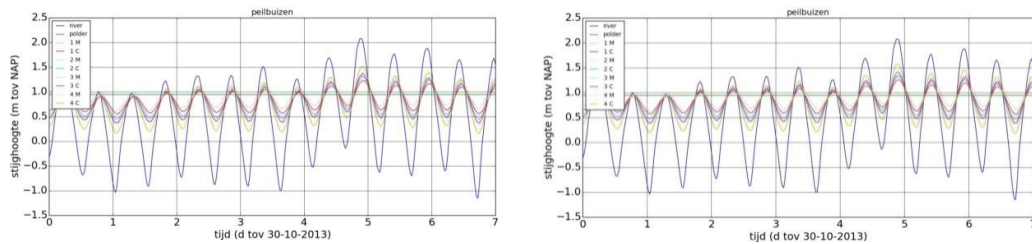
Omdat de laag aan beide zijden van het dijklichaam aanwezig is geeft een verhoging van de doorlatendheid in laag 3 (Figuur A.41) een vergroting van de amplitude in het meetpunt aan de buitenwaterzijde en een reductie van de amplitude in het meetpunt aan de binnenzijde. De gekoppelde berekening geeft een grotere amplitude en een verschuiving omlaag voor alle observatiepunten maar geen merkbare verschuiving in de tijd. Een verhoging van de samendrukbaarheid in laag 3 (Figuur A.45) geeft nagenoeg hetzelfde resultaat als het resultaat met het gekalibreerde model.

6 september 2017, definitief

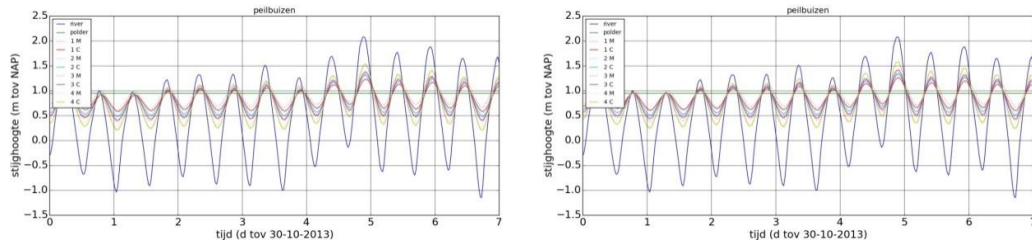
Een hogere doorlatendheid in laag 4 geeft nagenoeg hetzelfde resultaat als de voorspelling met het gekalibreerde model (Figuur A.42). Het contrast in doorlatendheid tussen de watervoerende lagen en de deklaag is groot en de gradiënt van de stijghoogtes langs de meetpunten wordt door de weerstand van de deklaag bepaald. Een verhoging van de samendrukbaarheid in laag 4 (Figuur A.46) geeft demping en vertraging voor zowel de gekoppelde als de ontkoppelde berekening. De gekoppelde stromingsdeformatieberekening geeft echter een significant grotere amplitude en verschuiving omlaag voor alle observatiepunten geen merkbare verschuiving in de tijd.



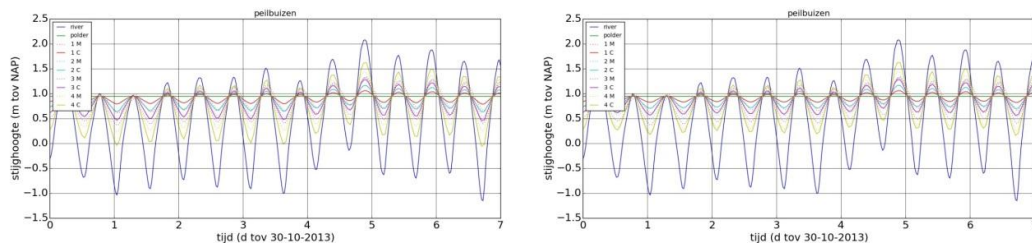
Figuur A.38 DgFlow2D resultaten gemiddeld, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



Figuur A.39 DgFlow2D resultaten $k_1 = 1 \text{ m/d}$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

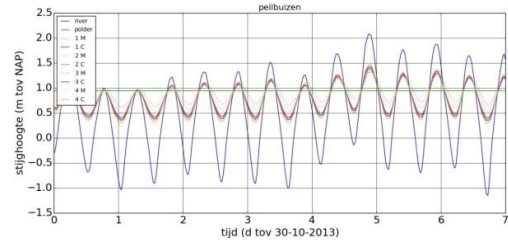
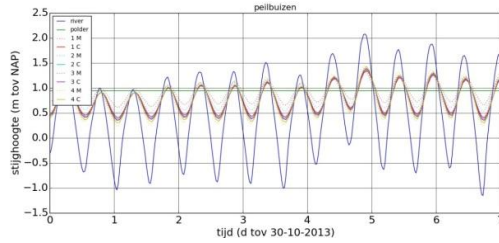


Figuur A.40 DgFlow2D resultaten $k_2 = 40 \text{ m/d}$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

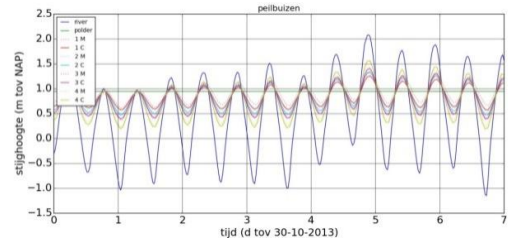
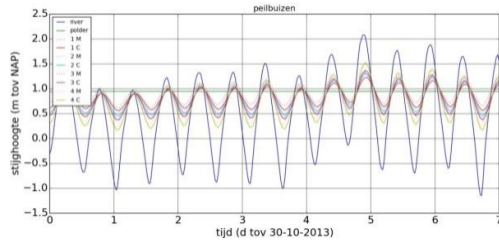


Figuur A.41 DgFlow2D resultaten $k_3 = 1 \text{ m/d}$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

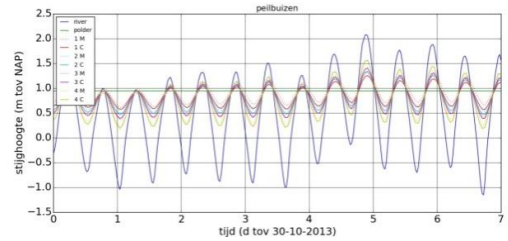
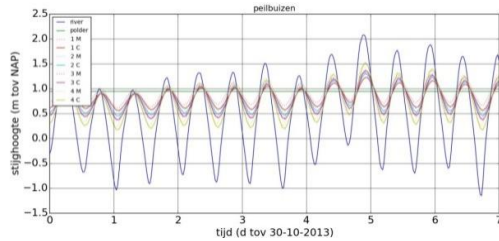
6 september 2017, definitief



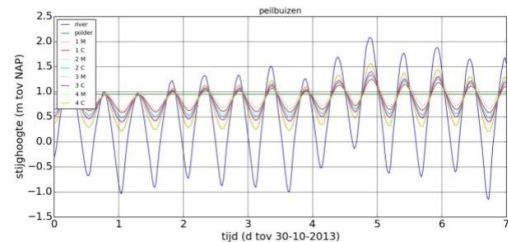
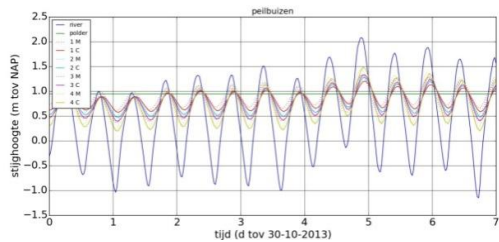
Figuur A.42 DgFlow2D resultaten $k_4 = 300$ m/d, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



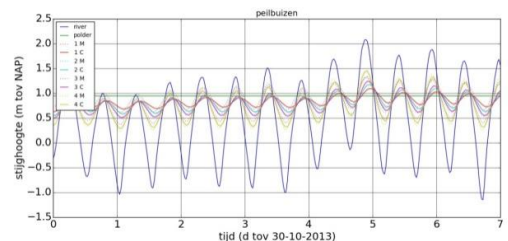
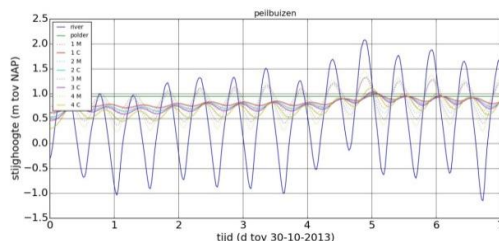
Figuur A.43 DgFlow2D resultaten $mv_1 = 10^{-4}$ kPa⁻¹, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



Figuur A.44 DgFlow2D resultaten $mv_2 = 10^{-4}$ kPa⁻¹, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



Figuur A.45 DgFlow2D resultaten $mv_3 = 10^{-4}$ kPa⁻¹, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

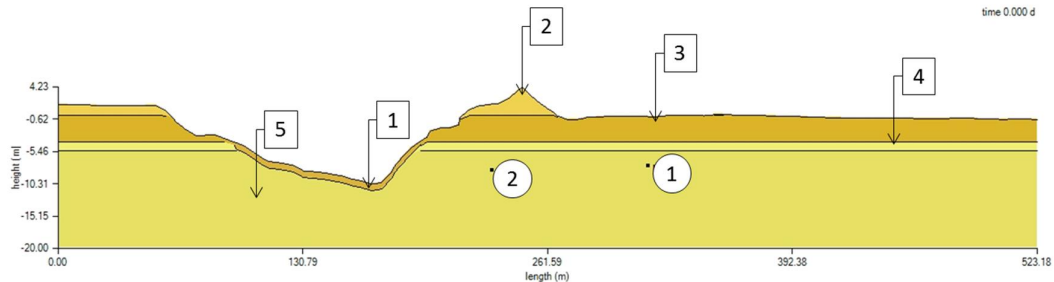


Figuur A.46 DgFlow2D resultaten $mv_4 = 10^{-4}$ kPa⁻¹, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

6 september 2017, definitief

A.5 Aaldijk Nieuw Beijerland

Het ondergrondmodel van de onderzochte sectie van Aaldijk lang het Spui is afgebeeld in Figuur A.47, de gekalibreerde parameterwaarden zijn opgenomen in Tabel A.5.



Figuur A.47 DgFlow2D ondergrondmodel Aaldijk.

Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	0,22	10^{-5}
2	0,1	10^{-5}
3	0,1	10^{-4}
4	10	10^{-5}
5	79	10^{-5}

Tabel A.5 Gekalibreerde materiaaleigenschappen Aaldijk.

Het gekalibreerde model (Figuur A.48) geeft het beginpunt van het gevoeligheidsonderzoek. De resultaten van het gevoeligheidsonderzoek laten zien dat een gekoppelde stromings-deformatie berekening dezelfde resultaten geeft als een ontkoppelde berekening. Dit is mede het gevolg van de geringe dikte van de sliblaag in de rivier en de discretisatie met een enkel element in de hoogte.

Een verhoging van de doorlatendheid in laag 1; de sliblaag in de rivier (Figuur A.49) verhoogt de amplitude en het gemiddelde in de observatiepunten. Een verhoging van de samendrukbaarheid van de sliblaag heeft geen invloed op de stijghoogteontwikkeling in de observatiepunten (Figuur A.54).

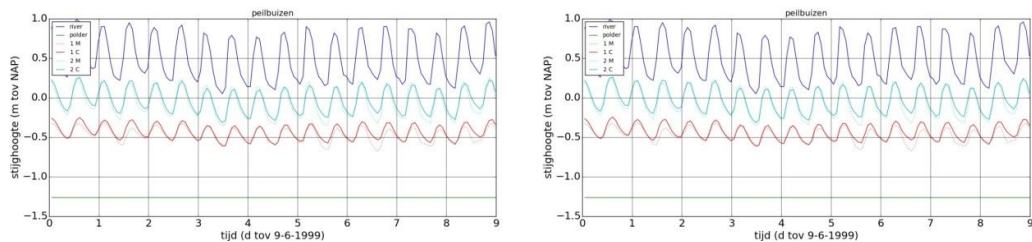
Een verhoging van de doorlatendheid in laag 2; het dijklichaam (Figuur A.50) beïnvloedt de resultaten niet. Een verhoging van de samendrukbaarheid van het dijklichaam (Figuur A.55) beïnvloedt de uitkomsten niet.

Door een verhoging van de doorlatendheid in laag 3; de deklaag (Figuur A.51) neemt de invloed van het polderpeil op voorspelde stijghoogtes toe. Het gemiddelde neemt af en de amplitude van het signaal neemt af. Deze afname is sterker voor het observatiepunt dat meer landinwaarts ligt. Een verhoging van de samendrukbaarheid in de deklaag (Figuur A.56) reduceert de amplitude van het meetsignaal in observatiepunt 1 met een factor twee en in observatiepunt 2 met een factor 1.5 daarnaast treedt vertraging op. De gemiddelden van beide signalen blijven ongewijzigd.

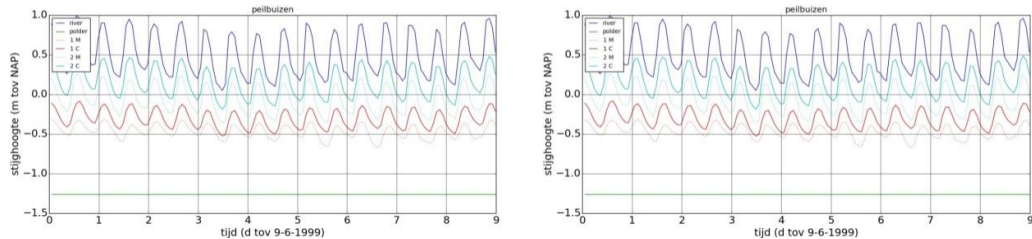
6 september 2017, definitief

De uitkomsten zijn niet gevoelig voor een verhoging van de doorlatendheid in laag 4; de tussendeklaag (Figuur A.52) dit is het gevolg van de geringe dikte van de laag. Een verhoging van de samendrukbaarheid de tussendeklaag (Figuur A.57) heeft, door de geringe dikte van de laag, vrij weinig effect op de stijghoogteontwikkeling in de observatiepunten.

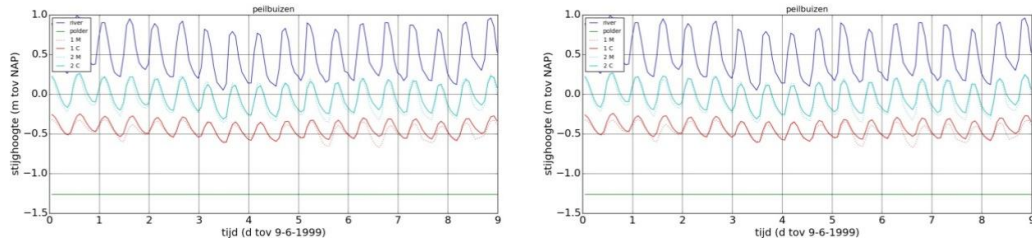
Een verhoging van de doorlatendheid in laag 5; de goed doorlatende laag (Figuur A.53) beïnvloedt de uitkomsten sterk. De voorspelde signalen liggen dichter bij elkaar en doordat de invloed van de deklaag groter is dan die van de sliblaag heeft de rivier meer invloed op de uitkomsten en neemt het gemiddelde en de amplitude toe. Een verhoging van de samendrukbaarheid in de goed doorlatende laag (Figuur A.58) geeft een reductie van de amplitude in beide signalen. Het gemiddelde verschuift hierdoor ook met maximaal 10 centimeter; met name de dalen worden gedempt.



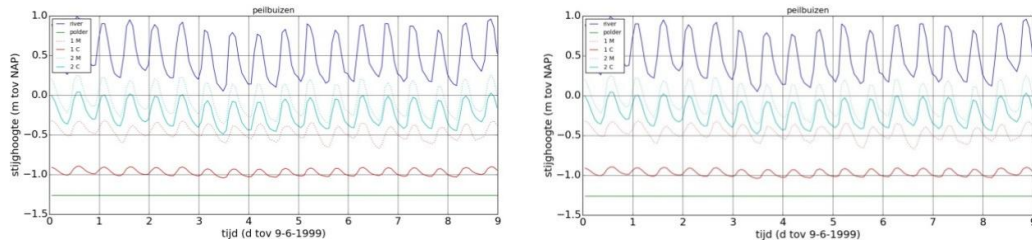
Figuur A.48 DgFlow2D resultaten gemiddeld, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



Figuur A.49 DgFlow2D resultaten $k_1 = 2.2$ m/d, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

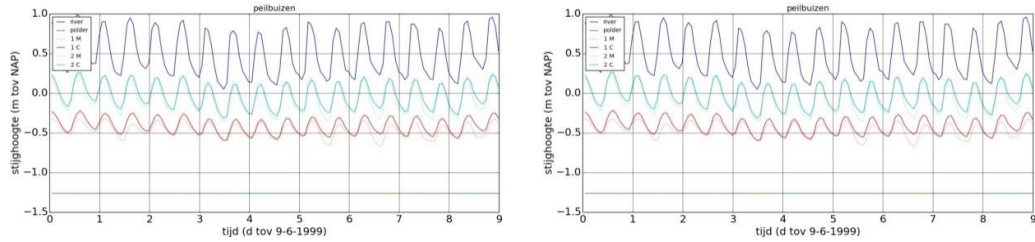


Figuur A.50 DgFlow2D resultaten $k_2 = 1.0$ m/d, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

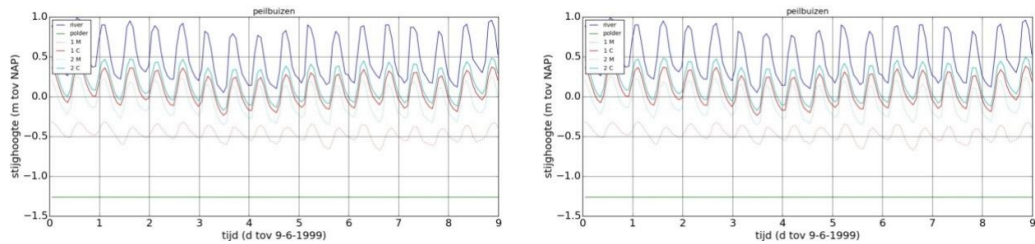


6 september 2017, definitief

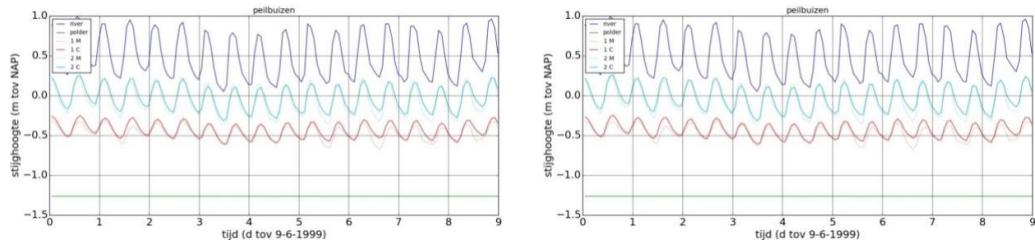
Figuur A.51 DgFlow2D resultaten $k3 = 1.5$ m/d, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



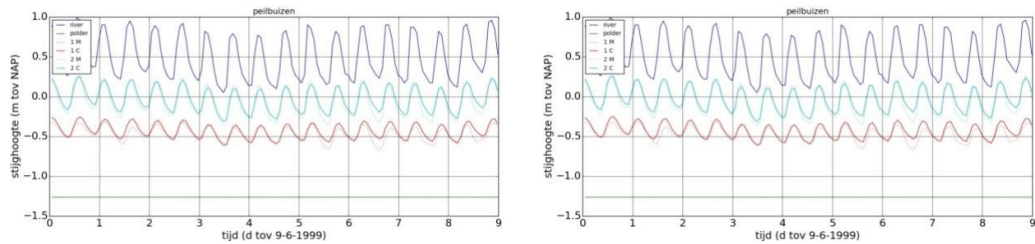
Figuur A.52 DgFlow2D resultaten $k4 = 100$ m/d, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



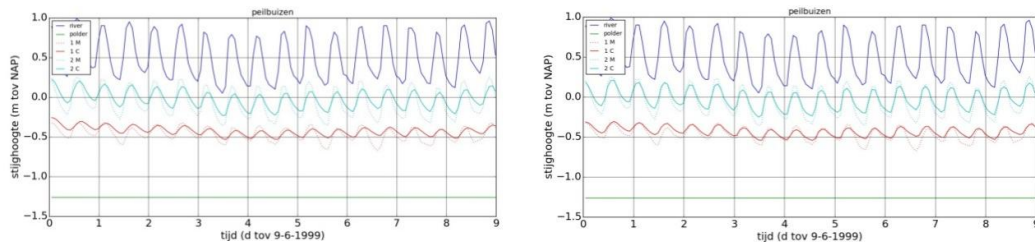
Figuur A.53 DgFlow2D resultaten $k5 = 780$ m/d, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



Figuur A.54 DgFlow2D resultaten $mv1 = 10^{-4}$ kPa-1, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

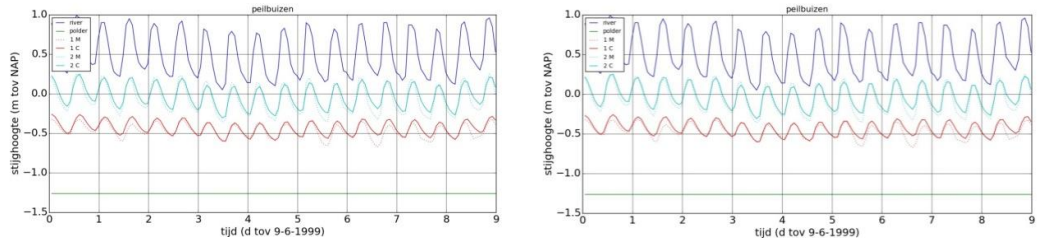


Figuur A.55 DgFlow2D resultaten $mv2 = 10^{-4}$ kPa-1, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

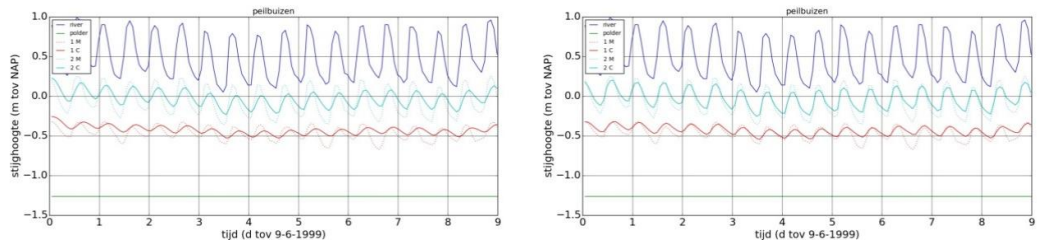


Figuur A.56 DgFlow2D resultaten $mv3 = 10^{-3}$ kPa-1, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

6 september 2017, definitief



Figuur A.57 DgFlow2D resultaten mv4 = 10-4 kPa-1, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

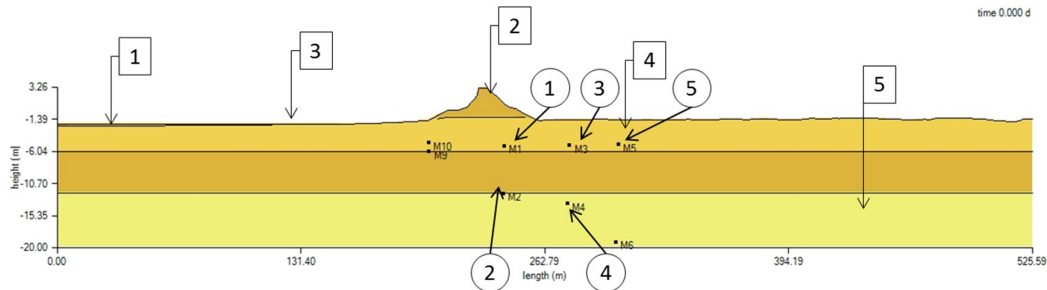


Figuur A.58 DgFlow2D resultaten mv5 = 10-4 kPa-1, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

6 september 2017, definitief

A.6 Markermeerdijk Uitdam

In Figuur A.59 is het ondergrondmodel van de onderzoekslocatie lang het Markermeer afgebeeld, de gekalibreerde parameterwaarden zijn weergegeven in Tabel A.6.



Figuur A.59 DgFlow2D ondergrondmodel Markermeerdijk.

Laag	K (m/d)	m_v (m ² /kN)
1	1	10 ⁻⁵
2	1	10 ⁻⁵
3	1	10 ⁻⁵
4	0,01	10 ⁻⁵
5	100	10 ⁻⁵

Tabel A.6 Gekalibreerde materiaaleigenschappen Markermeerdijk.

Gekalibreerd model (Figuur A.60). Uit de gevoeligheidsstudie volgt dat de rekenresultaten alleen gevoelig zijn voor variaties in de doorlatendheid van de deklagen en het watervoerende pakket. Stromingsberekeningen en stromings-deformatie berekeningen geven binnen een marge van een centimeter gelijke resultaten.

Een verhoging van de doorlatendheid in de sliblaag (Figuur A.61), Een verhoging van de samendrukbaarheid in het dijklichaam (Figuur A.66)

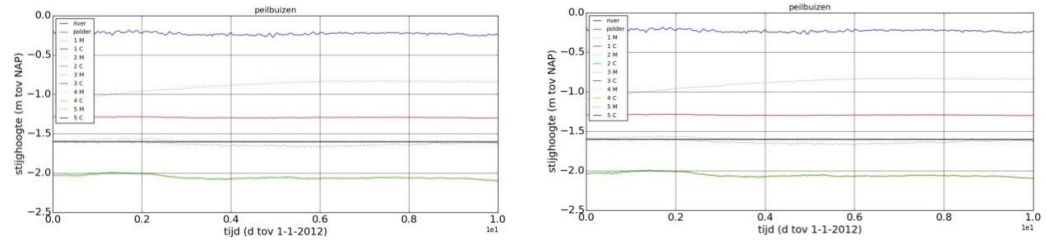
Een verhoging van de doorlatendheid in het dijklichaam (Figuur A.62) meetpunt 1 +12 cm.
Een verhoging van de samendrukbaarheid in laag 2 (Figuur A.67)

Een verhoging van de doorlatendheid in het bovenste deel van de deklaag (Figuur A.63).
Een verhoging van de samendrukbaarheid in laag 3 (Figuur A.68)

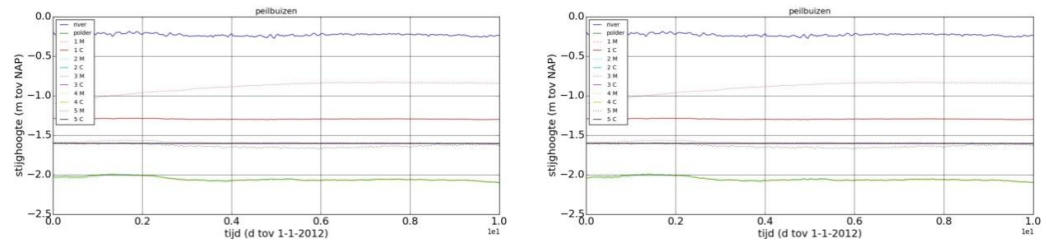
Een verhoging van de doorlatendheid in het onderste deel van de deklaag (Figuur A.64)
meetpunt 1 -17 cm, 2 +38 cm, 4 +34 cm. Een verhoging van de samendrukbaarheid in laag 4 (Figuur A.69)

Een verhoging van de doorlatendheid in de watervoerende laag (Figuur A.65) meetpunt 2 +7 cm, 4 -7cm. Een verhoging van de samendrukbaarheid in laag 5 (Figuur A.70)

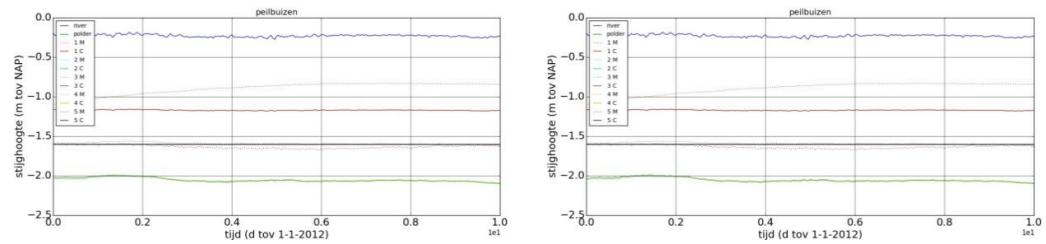
6 september 2017, definitief



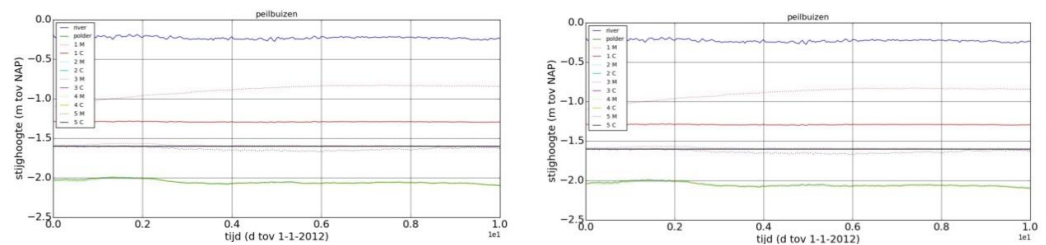
Figuur A.60 DgFlow2D resultaten gemiddeld, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



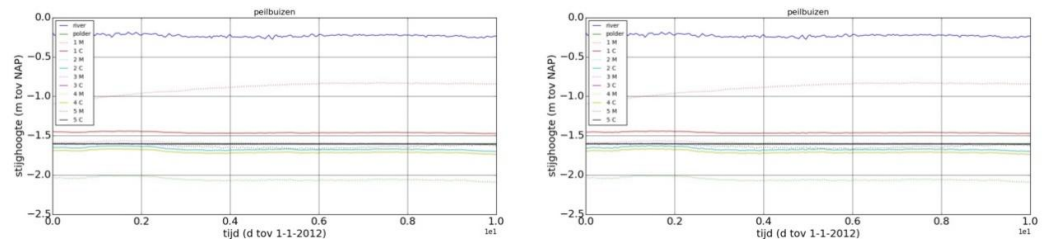
Figuur A.61 DgFlow2D resultaten $k_2 = 10$ m/d, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



Figuur A.62 DgFlow2D resultaten $k_3 = 10$ m/d, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

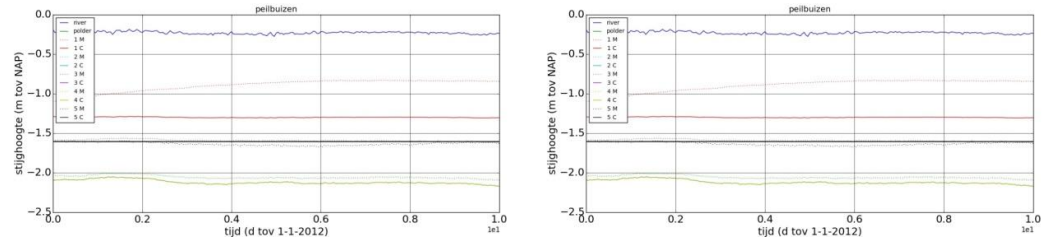


Figuur A.63 DgFlow2D resultaten $k_4 = 0.1$ m/d, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

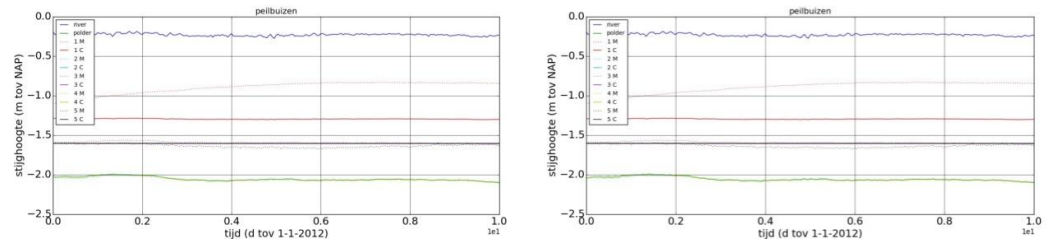


Figuur A.64 DgFlow2D resultaten $k_4 = 0.1$ m/d, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

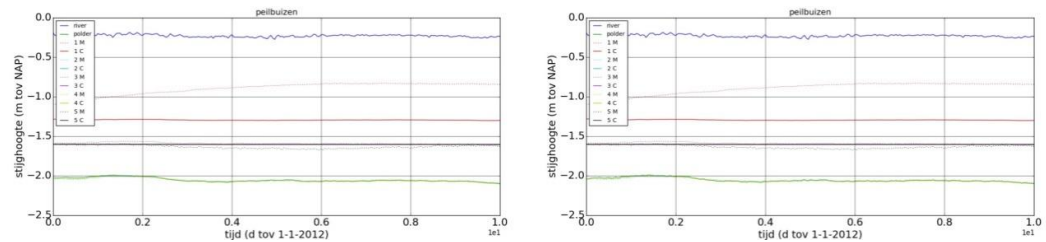
6 september 2017, definitief



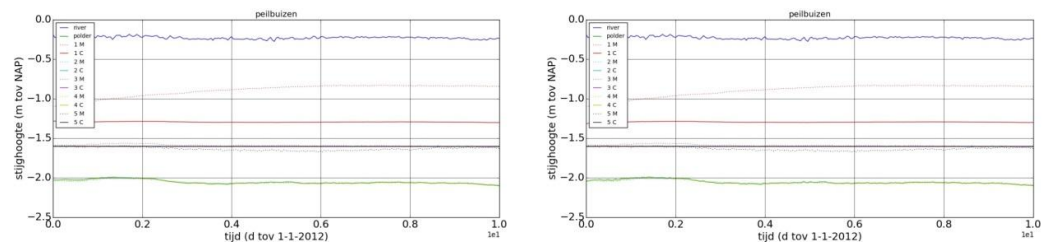
Figuur A.65 DgFlow2D resultaten $k5 = 1000 \text{ m/d}$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



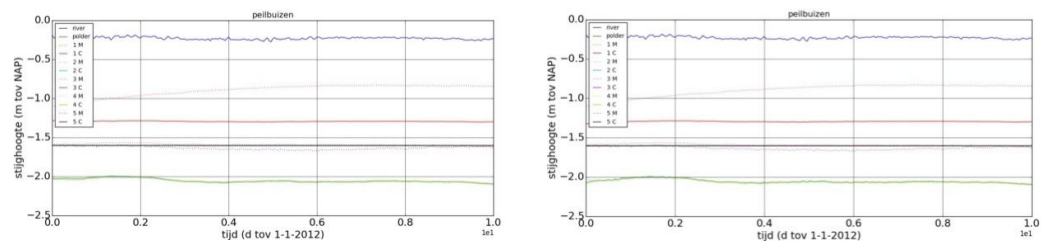
Figuur A.66 DgFlow2D resultaten $mv1 = 10^{-4} \text{ kPa-1}$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



Figuur A.67 DgFlow2D resultaten $mv2 = 10^{-4} \text{ kPa-1}$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

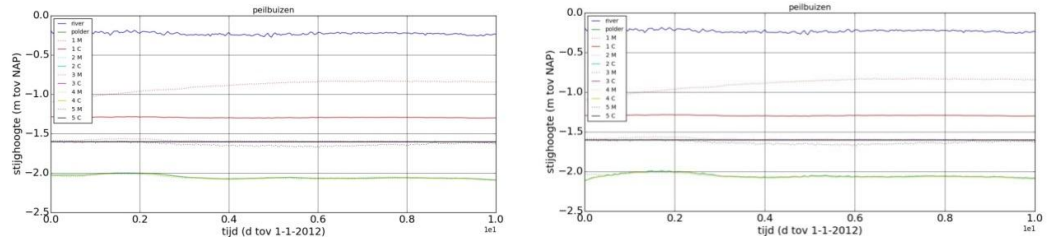


Figuur A.68 DgFlow2D resultaten $mv3 = 10^{-4} \text{ kPa-1}$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.



Figuur A.69 DgFlow2D resultaten $mv4 = 10^{-4} \text{ kPa-1}$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

6 september 2017, definitief



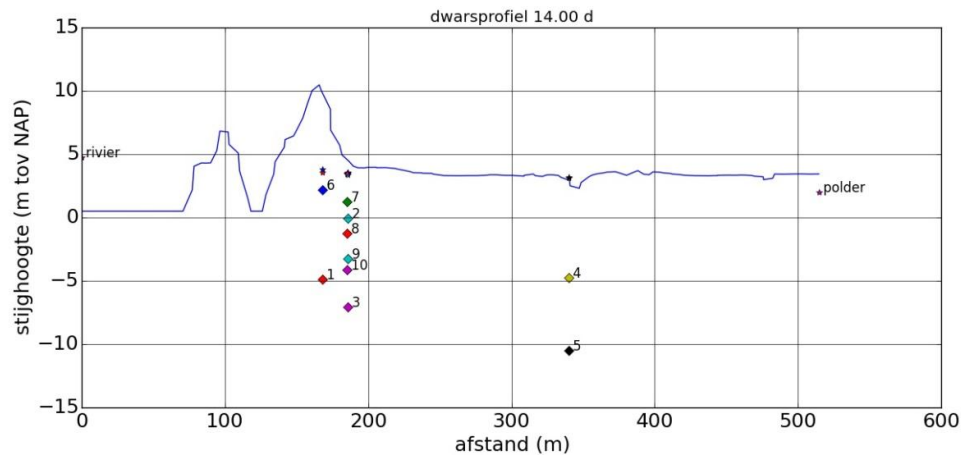
Figuur A.70 DgFlow2D resultaten $mv5 = 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}$, ontkoppelde berekening versus gekoppelde berekening.

6 september 2017, definitief

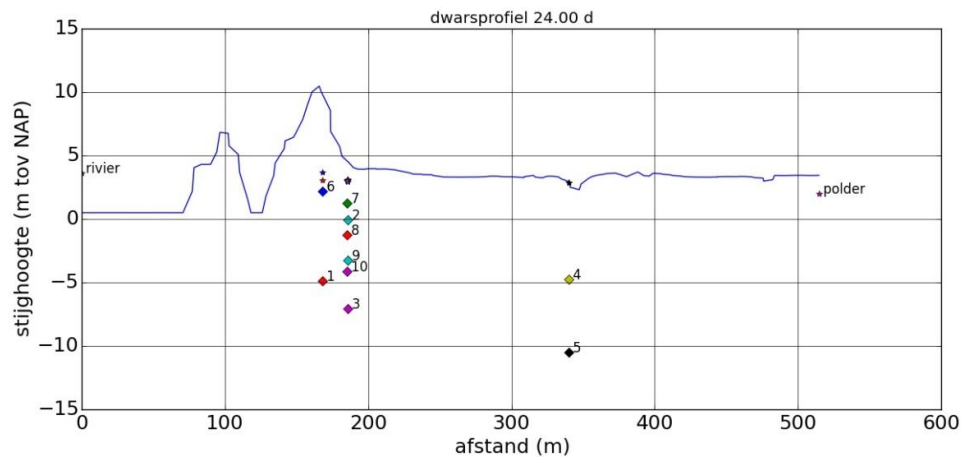
B Waterspanningsmetingen

In deze appendix worden de resultaten van een gevoeligheidsonderzoek gepresenteerd dat zich richt op de verandering van de stijghoogte als gevolg van parameter variaties.

B.1 Waaldijk Opijnen

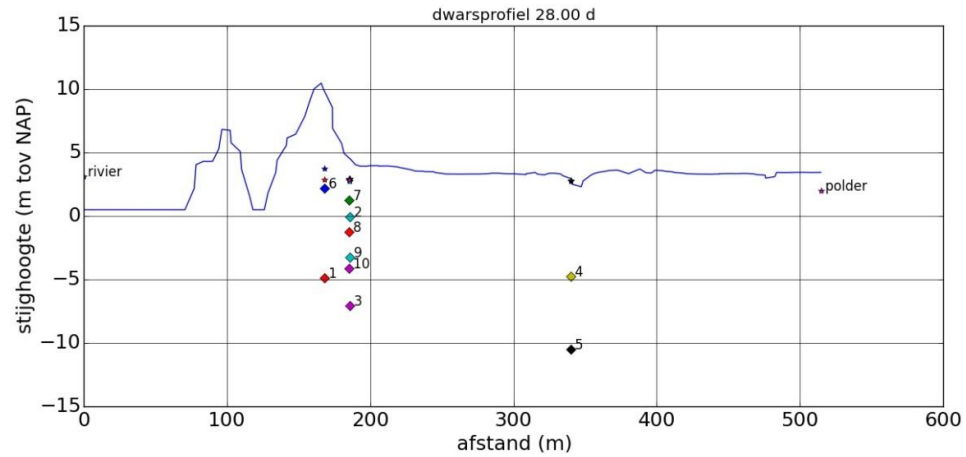


Figuur B.1 Stijghoogtemetingen Opijnen dag 14.

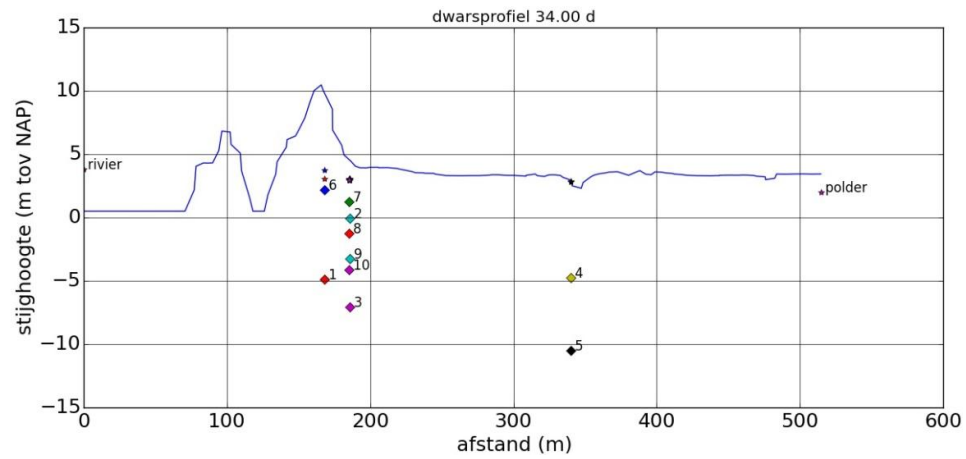


Figuur B.2 Stijghoogtemetingen Opijnen dag 24.

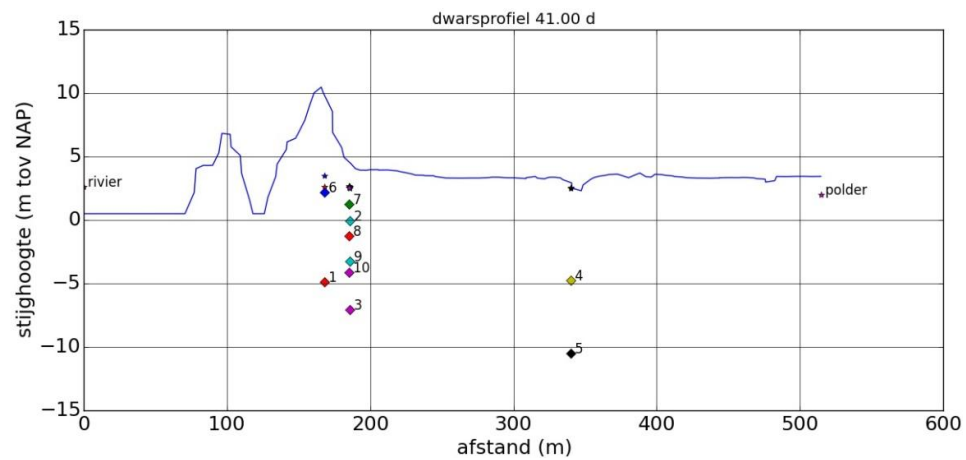
6 september 2017, definitief



Figuur B.3 Stijghoogtemetingen Opijnen dag 28.

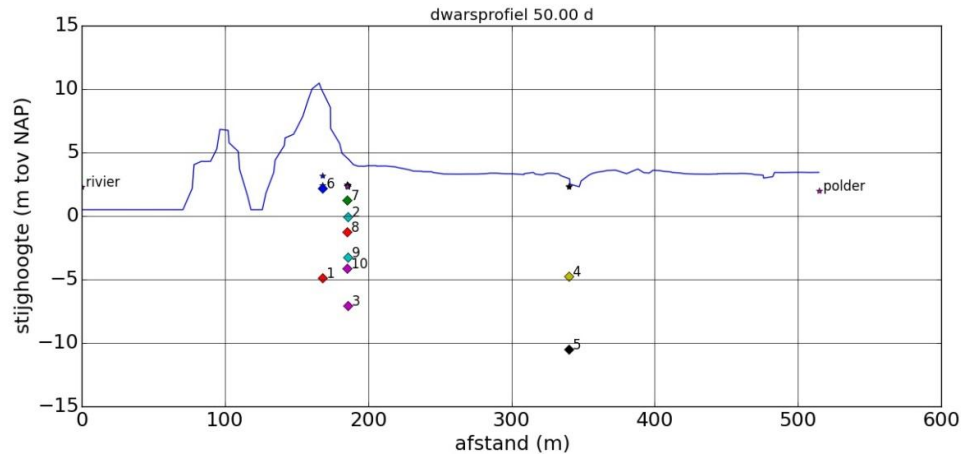


Figuur B.4 Stijghoogtemetingen Opijnen dag 34.



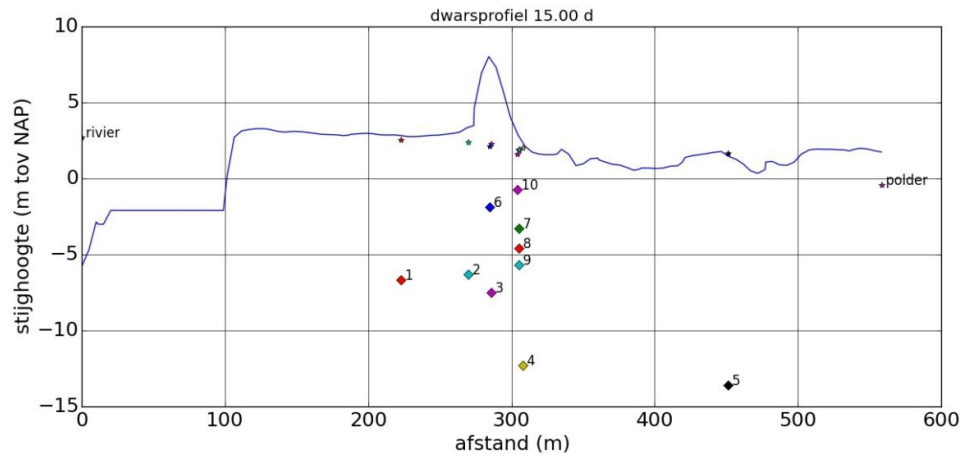
Figuur B.5 Stijghoogtemetingen Opijnen dag 41.

6 september 2017, definitief

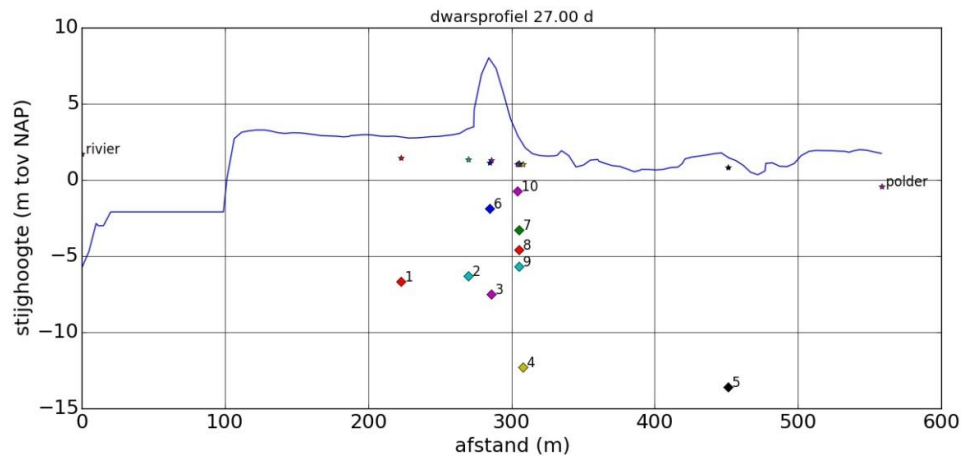


Figuur B.6 Stijghoogtemetingen Opijnen dag 50.

B.2 Waaldijk Herwijnen

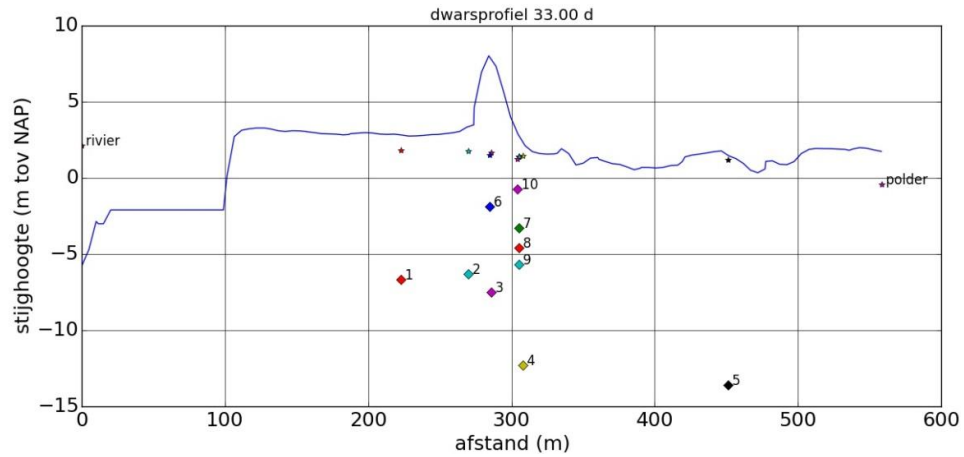


Figuur B.7 Stijghoogtemetingen Herwijnen dag 15.

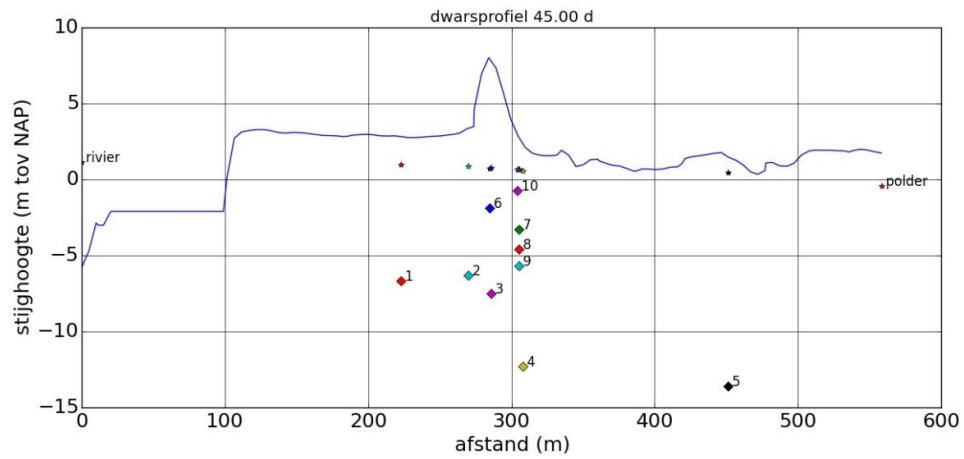


Figuur B.8 Stijghoogtemetingen Herwijnen dag 27.

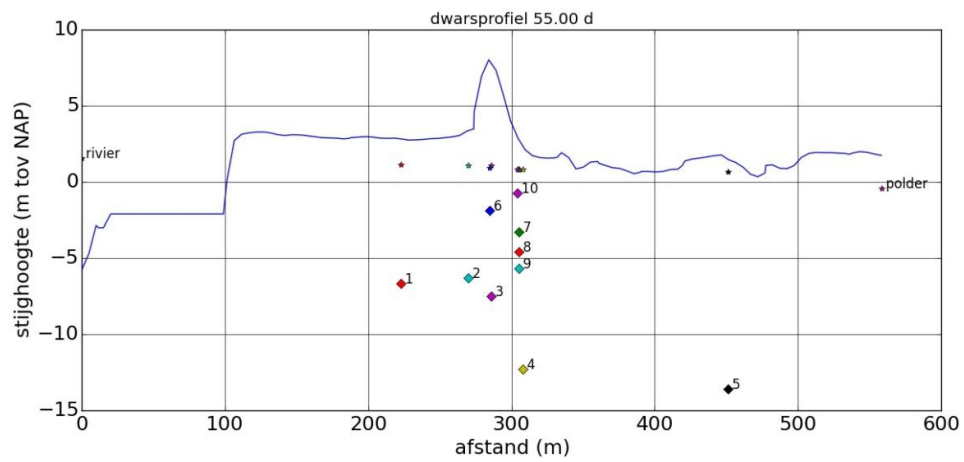
6 september 2017, definitief



Figuur B.9 Stijghoogtemetingen Herwijnen dag 33.



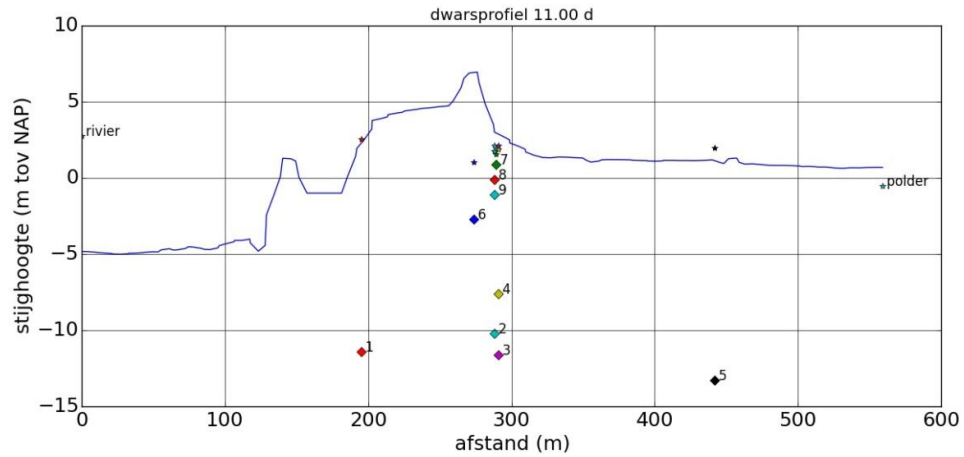
Figuur B.10 Stijghoogtemetingen Herwijnen dag 45.



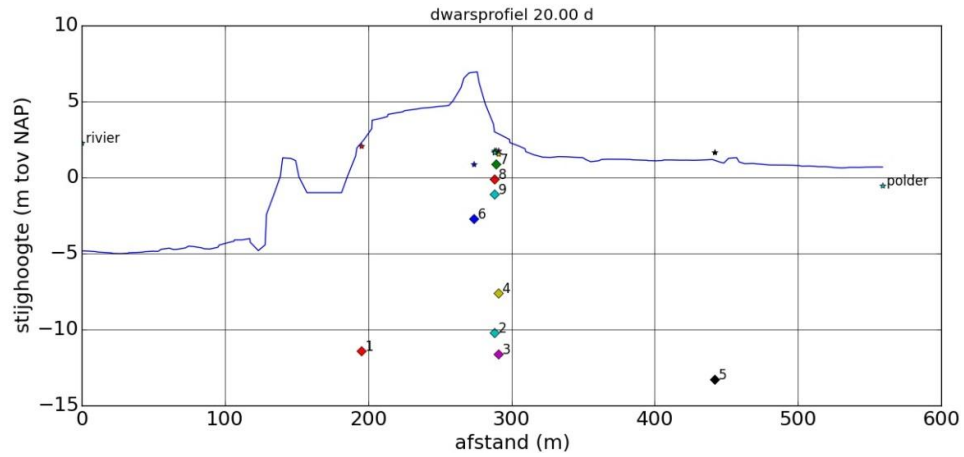
Figuur B.11 Stijghoogtemetingen Herwijnen dag 55.

6 september 2017, definitief

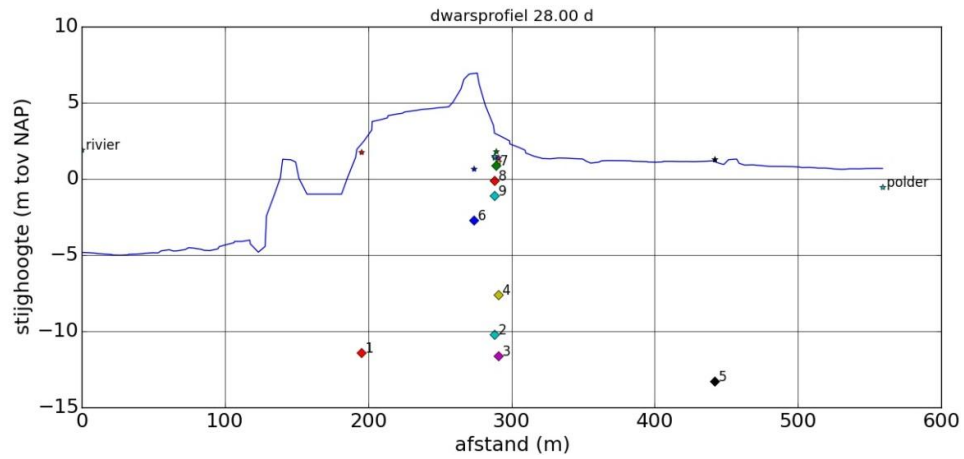
B.3 Waaldijk Vuren



Figuur B.12 Stijghoogtemetingen Vuren dag 11.

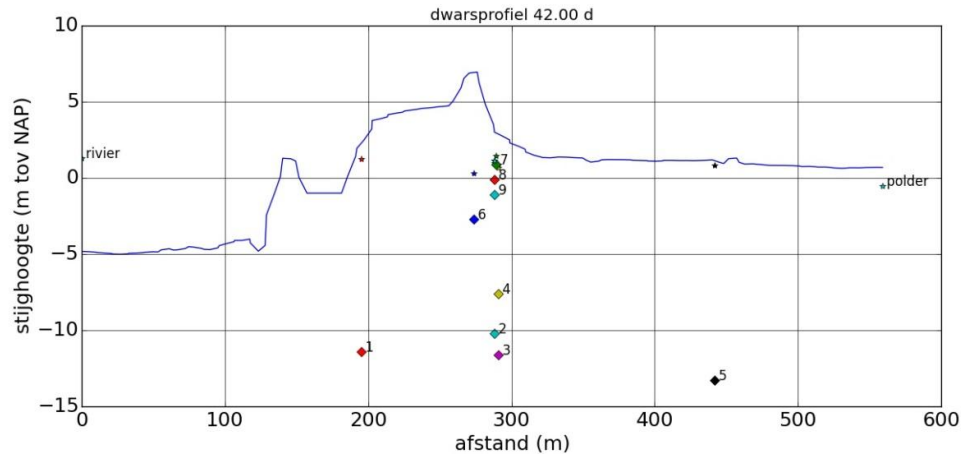


Figuur B.13 Stijghoogtemetingen Vuren dag 20.

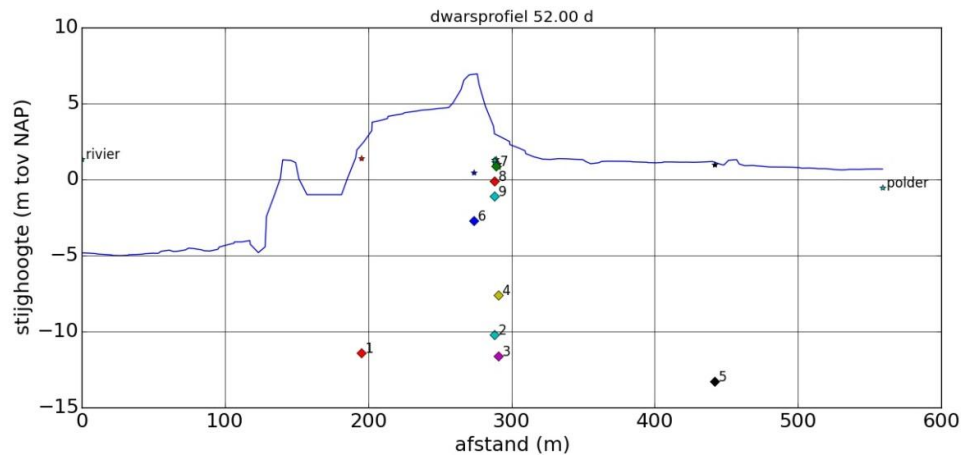


Figuur B.14 Stijghoogtemetingen Vuren dag 28.

6 september 2017, definitief

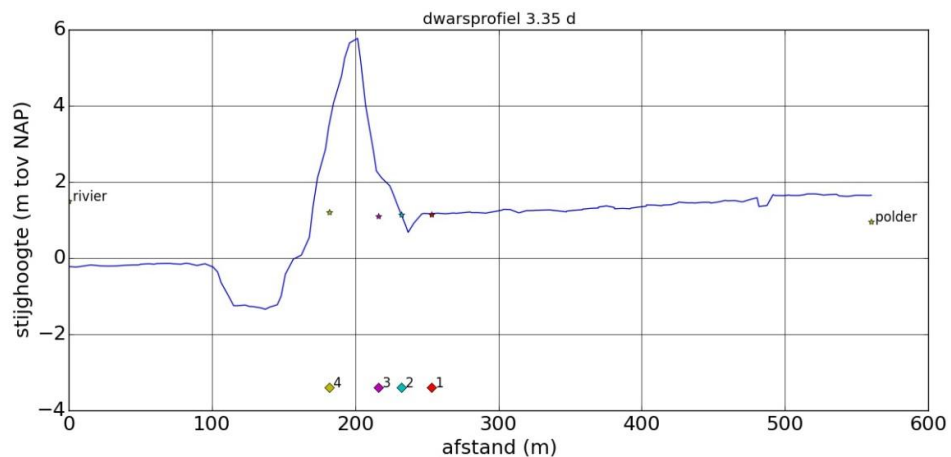


Figuur B.15 Stijgthoogtemetingen Vuren dag 42.



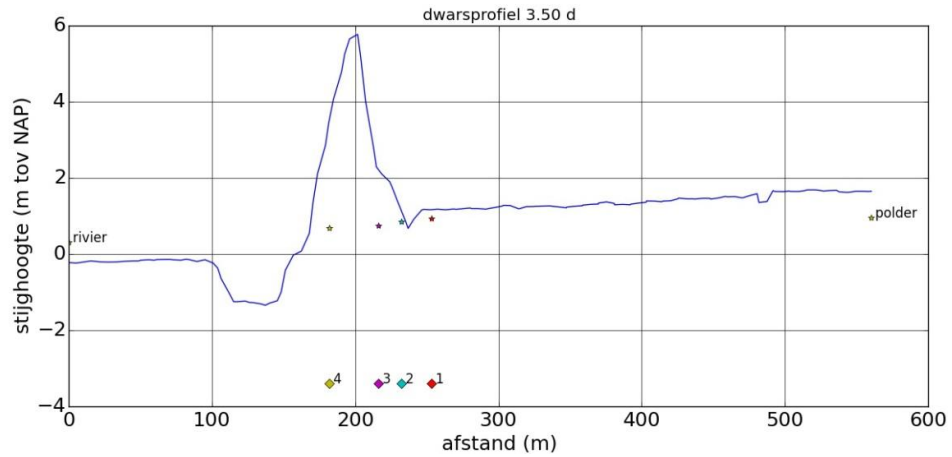
Figuur B.16 Stijgthoogtemetingen Vuren dag 52.

B.4 Zeedijk Ameland

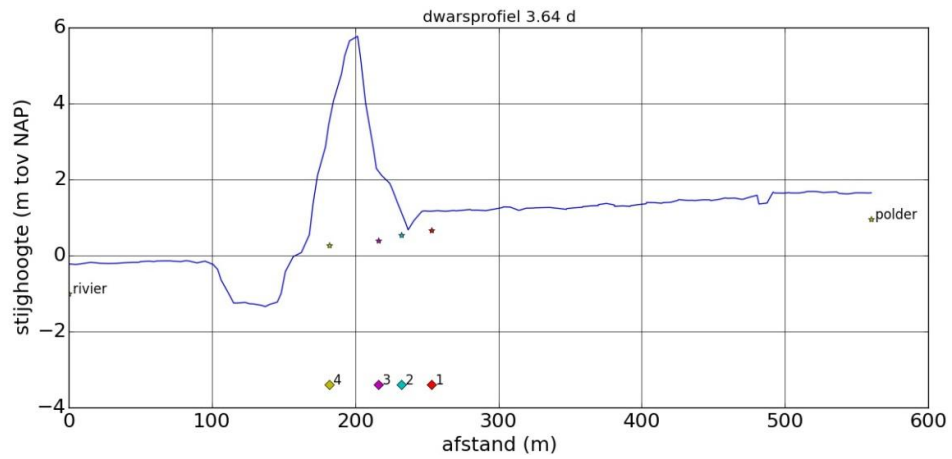


Figuur B.17 Stijgthoogtemetingen Ameland voor tijdstip 3.35 d.

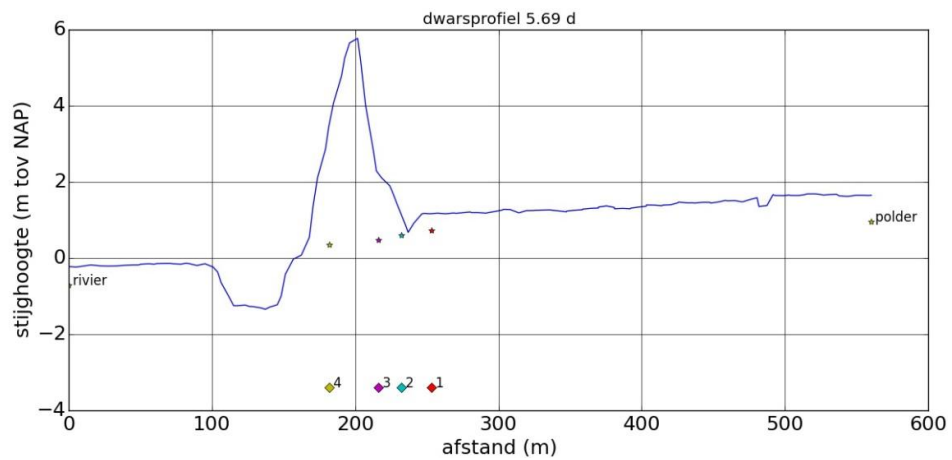
6 september 2017, definitief



Figuur B.18 Stijghoogtemetingen Ameland voor tijdstip 3.50 d.

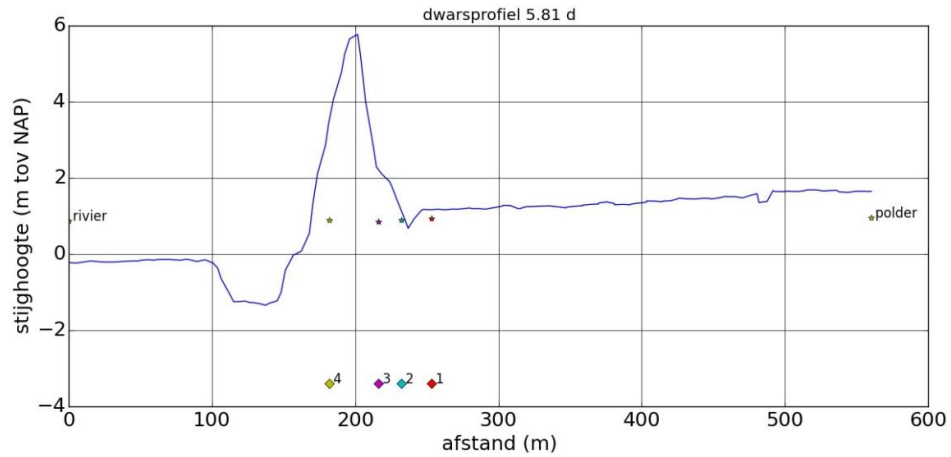


Figuur B.19 Stijghoogtemetingen Ameland voor tijdstip 3.64 d.

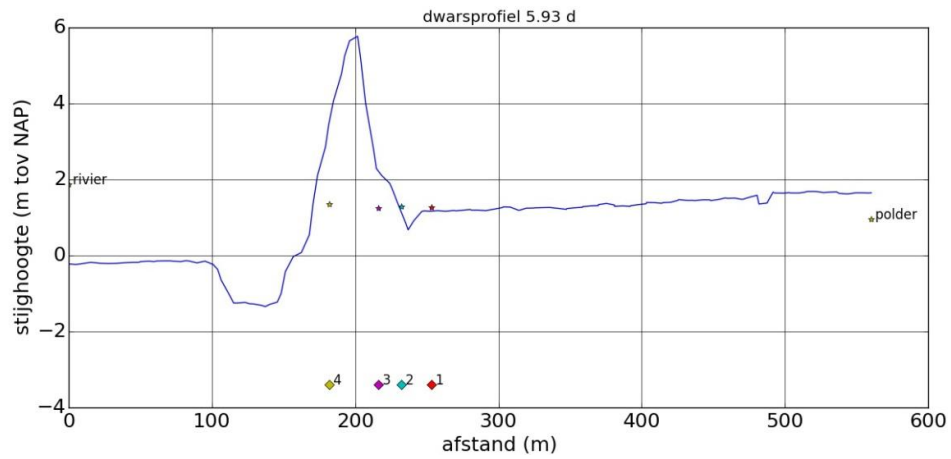


Figuur B.20 Stijghoogtemetingen Ameland voor tijdstip 5.69 d.

6 september 2017, definitief

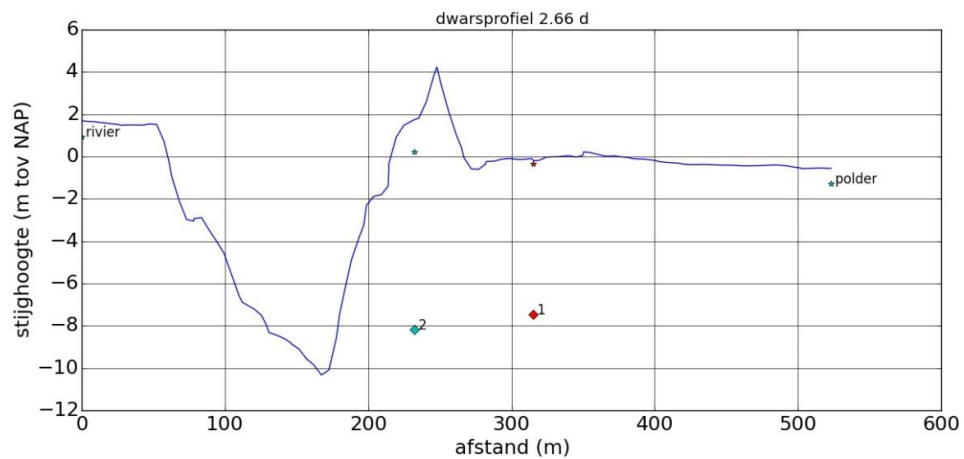


Figuur B.21 Stijghoogtemetingen Ameland voor tijdstip 5.81 d.



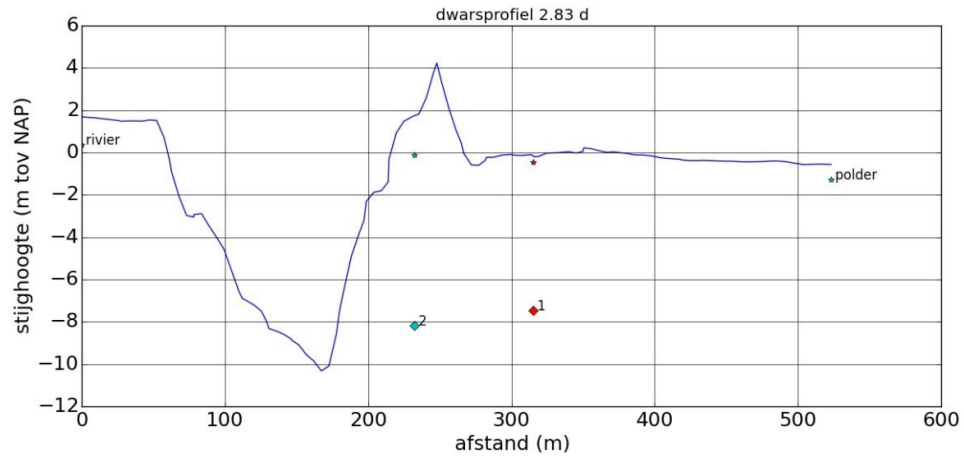
Figuur B.22 Stijghoogtemetingen Ameland voor tijdstip 5.93 d.

B.5 Aaldijk Nieuw Beijerland

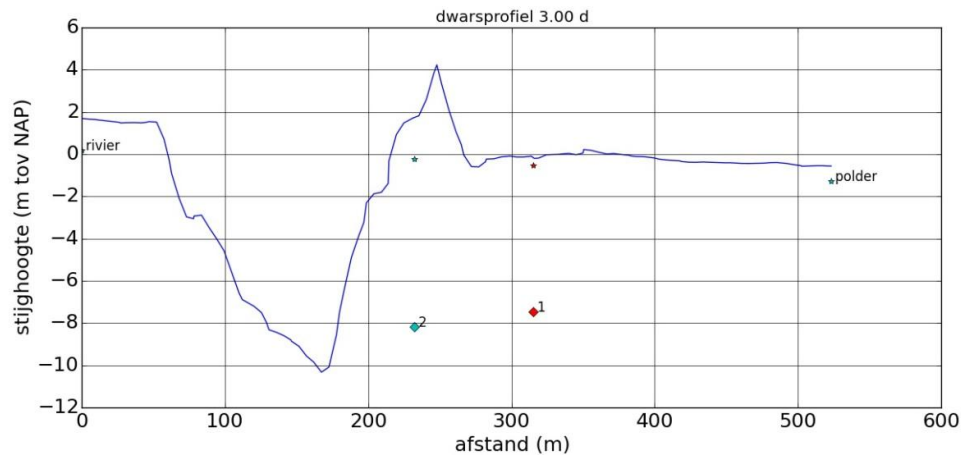


Figuur B.23 Stijghoogtemetingen Nieuw Beijerland voor tijdstip 2.66 d.

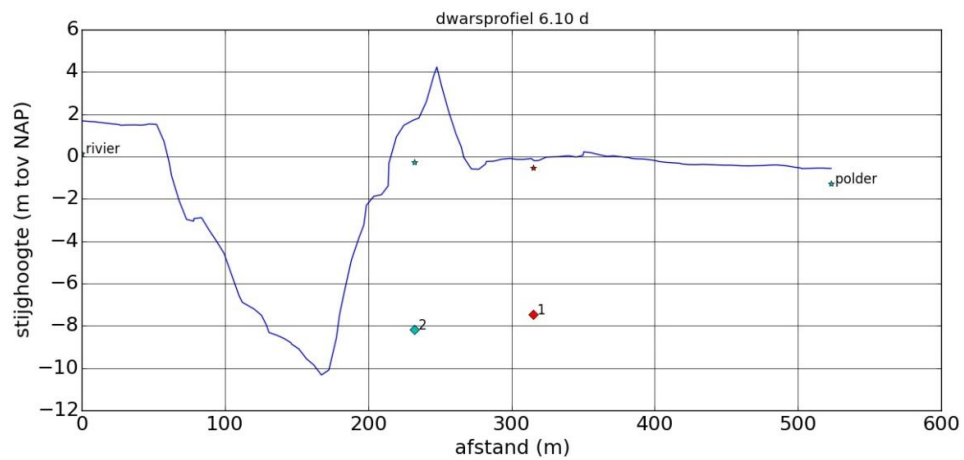
6 september 2017, definitief



Figuur B.24 Stijghoogtemetingen Nieuw Beijerland voor tijdstip 2.83 d.

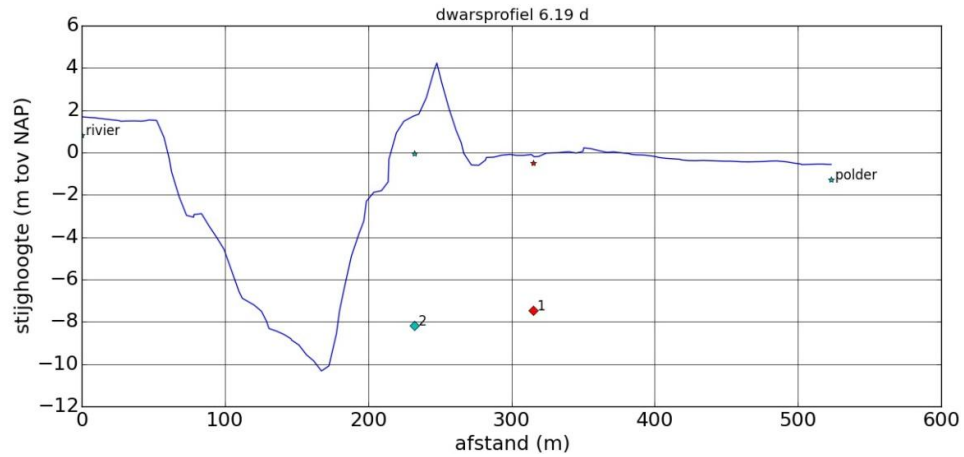


Figuur B.25 Stijghoogtemetingen Nieuw Beijerland voor tijdstip 3.00 d.

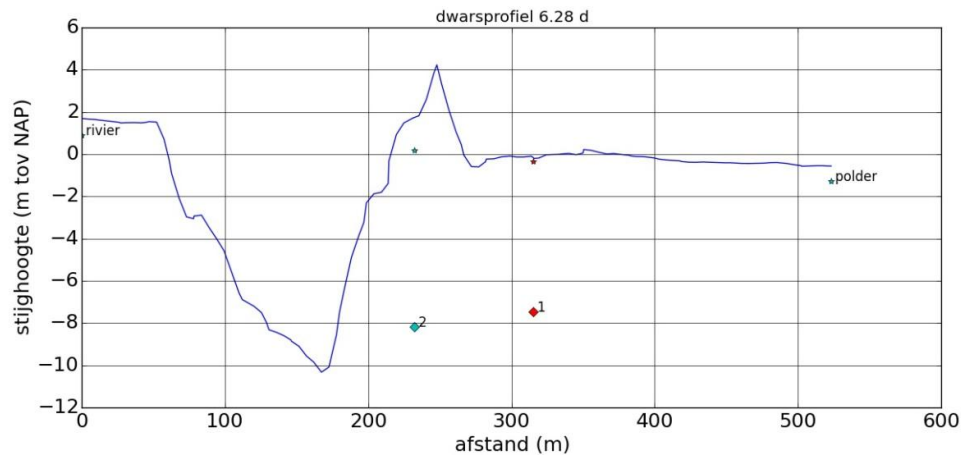


Figuur B.26 Stijghoogtemetingen Nieuw Beijerland voor tijdstip 6.10 d.

6 september 2017, definitief

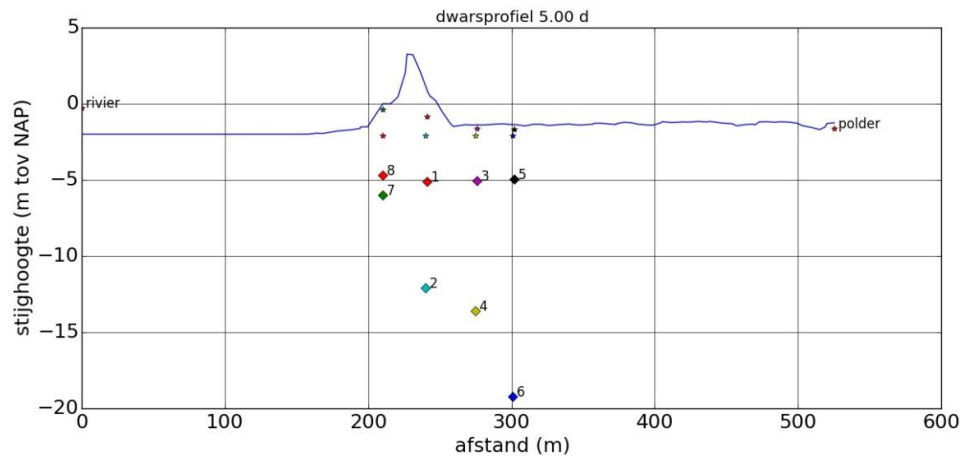


Figuur B.27 Stijghoogtemetingen Nieuw Beijerland voor tijdstip 6.19 d.



Figuur B.28 Stijghoogtemetingen Nieuw Beijerland voor tijdstip 6.28 d.

B.6 Markermeerdijk Uitdam



Figuur B.29 Stijghoogtemetingen Uitdam voor tijdstip 5.00 d.