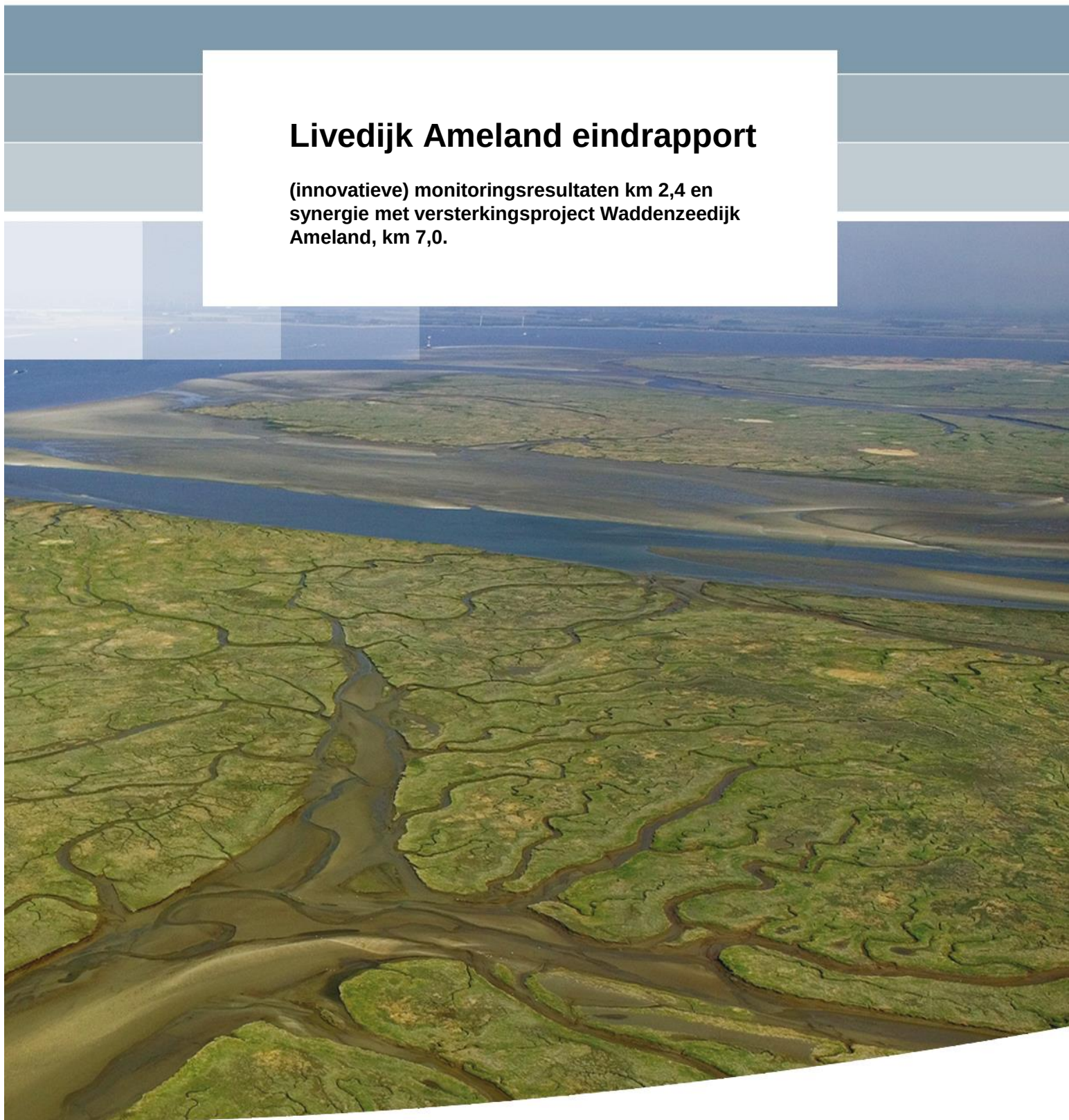


Livedijk Ameland eindrapport

(innovatieve) monitoringsresultaten km 2,4 en
synergie met versterkingsproject Waddenzeedijk
Ameland, km 7,0.



Livedijk Ameland eindrapport

**(innovatieve) monitoringsresultaten km 2,4 en synergie met
versterkingsproject Waddenzeedijk Ameland, km 7,0.**

Sophia Luijendijk

1206727-000

Titel

Livedijk Ameland eindrapport

Opdrachtgever

FloodControl IJkdijk

Project

1206727-000

Kenmerk

1206727-000-GEO-0013-
gbh

Pagina's

70

Trefwoorden

Livedijk Ameland, monitoring, waterspanningen, ondiepe temperatuurmetingen, infrarood camera, synergie met versterkingsproject Waddenzeedijk Ameland, Ameland km 2,4, Ameland km 7,0.

Samenvatting

De Waddenzeedijk van Ameland is in de tweede toetsronde (2001-2006) deels afgekeurd, onder andere op het faalmechanisme piping. Om te bepalen of over een lengte van 300 m de voorziene maatregelen (damwand, berm) kunnen worden heroverwogen door nader onderzoek uit te voeren, is Livedijk Ameland opgezet in combinatie met het versterkingsproject Waddenzeedijk Ameland van advies- en ingenieurbureau Witteveen en Bos. Belangrijk is het effect van de niet-stationaire belasting (tijdsafhankelijkheid) van het buitenwater op de reductie van de benodigde kwelweglengte. Dit kan leiden tot een beter dijkversterkingsontwerp. Daartoe is op km 7,0 een monitoringstraject ingezet met waterspanningsmeters. De monitoring op km 2,4 dient als referentielocatie, om aanvullende informatie te leveren, die bruikbaar is voor km 7,0. Daarnaast zijn innovatieve monitoringstechnieken, zoals temperatuurmetingen aan de oppervlakte (infraroodcamera) en ondiepe temperatuurmetingen, in de voor piping maatgevende zandlaag ingezet. De monitoringsperiode duurde van september 2013 tot augustus 2015, inclusief drie hoogwatersituaties.

Duidelijk is dat de monitoring van waterspanningen op km 2,4 die op km 7,0 ondersteunt, de geul bij km 7,0 geeft een verminderde weerstand. De belangrijkste conclusie is dat uit de inzichten van de aanvullende waterspanning monitoring, traject km 6,8-7,1 voldoet voor het dijkfaalmechanisme piping. Daarnaast laten de temperatuurmetingen aan het oppervlak zien dat er tijdens twee stormen met hoge buitenwaterstanden, geen uittredend kwelwater is waargenomen. Het is tevens duidelijk dat de ondiepe temperatuur van het grondwater circa een kwart seizoen achterloopt ten opzichte van de buitenwatertemperatuur van de Waddenzee. Dit betekent dat de temperatuurveranderingen onder de dijk, in de ondergrond, zich langzaam aanpassen en er kennelijk geen preferente grondwaterstromingsbanen zijn, laat staan pipingkanaaltjes, ter plaatse van de meetraaien.

Titel

Livedijk Ameland eindrapport

Opdrachtgever

FloodControl IJkdijk

Project

1206727-000

Kenmerk

1206727-000-GEO-0013-
gbh

Pagina's

70

Summary

The Wadden Sea dike of the Dutch island Ameland is not fully approved in the test for primary water retaining structures, e.g. for the dike failure mechanism piping, in the period between 2001-2006.

The project Livedijk Ameland is set up to determine, whether the planned mitigation measures over a length of 300 m consisting of sheet piling with a short berm could be reconsidered. The research has been carried out in collaboration with 'versterkingsproject Waddenzeedijk Ameland' by the engineering consultancy company Witteveen en Bos. The effect of the non-stationary behavior of high water levels on the Wadden Sea might be important to reduce the seepage length required, so the design of the water retaining structure could be improved. Therefore a monitoring trajectory is set up on location km. 7.0 with water pressure meters. The monitoring on location km 2.4 is a reference location, to supply location km 7.0 with additional information about the development of water pressures. Besides that, innovative monitoring techniques, e.g. temperature measurements (infrared camera) and shallow temperature measurements in the sand layer which is dominant for piping were carried out. The monitoring period was from September 2013 to August 2015, including three high water situations.

It is clear that the monitoring of the water pressure on location km 2.4 supports the monitoring at km 7.0. The gully at the coast on location km 7.0 gives less resistance. The most important conclusion is that with the insights gained from the water pressure monitoring, trajectory km 6.8-7.1 can be approved regarding the dike failure mechanism of piping. Besides that, the temperature measurements of the surface showed, during two storms with high water levels, that there was no seepage water at the dike at polder side. It is also clear from the shallow temperature measurements that the temperature of groundwater had a delay of a quarter season with respect to the temperature of the Wadden Sea. This means that the temperature changes below the dike, in the shallow subsurface, will adjust slowly and that along the investigated dike stretch there were no preferent groundwater paths or pipes.

Versie Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
apr. 2016	M.S. Luijendijk, M.Sc.		dr.ir. A.R. Koelewijn		ir. L Voogt	

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Probleemomschrijving	1
1.3	Doelstelling	2
1.4	Leeswijzer	2
2	Beschikbaar onderzoek	3
2.1	Eerder uitgevoerd onderzoek	3
2.2	Aanvullend geotechnisch onderzoek op km 6,8-7,1	3
2.3	Geotechnisch profiel	3
2.4	Tussentijdse resultaten	3
3	Waterspanningen km 2,4	5
3.1	Algemeen	5
3.2	Locatie, diepte en type waterspanningsmetingen	5
4	Ondiepe temperatuurmetingen	9
4.1	Algemeen	9
4.2	Locatie, diepte en type temperatuursensor	9
4.3	Temperatuur oppervlaktewater	9
5	Temperatuurmetingen aan oppervlakte	11
5.1	Algemeen	11
5.2	Locatie, meetoppervlak, type	11
6	Resultaten waterspanningsmetingen	13
6.1	Algemeen	13
6.2	Storm 6 december 2013	13
6.3	Rustige periode – medio september 2014	17
6.4	Storm 22 oktober 2014	21
6.5	Storm 11 januari 2015	25
6.6	Storm 11 januari 2015 raai 1 t/m 4	29
6.7	Rustige periode augustus 2015	33
7	Resultaten ondiepe temperatuurmetingen	37
7.1	Algemeen	37
7.2	Temperatuur per locatie	37
7.3	Temperatuur per raai	40
8	Resultaten temperatuurmetingen aan oppervlakte	43
8.1	Algemeen	43
8.2	Nulmeting 17 april 2014	43
8.3	Hoogwater 5/6 december 2013	44
8.4	Hoogwater 10 januari 2015	45
9	Waterspanningen – vergelijking met km 7,0	47
9.1	Algemeen	47

9.2	Storm 6 december 2013	47
9.3	Rustige periode – medio september 2014	51
9.4	Storm 22 oktober 2014	55
9.5	Storm 11 januari 2015	59
10	Discussie	63
10.1	Waterspanningen km 2,4	63
10.1.1	Aantal meetraaien	63
10.1.2	Afwijking sensor A1-3 en V1-4	63
10.1.3	Stijghoogten hoger dan stijghoogte buitenwater	64
10.2	Ondiepe temperatuurmetingen	64
10.3	Temperatuur aan oppervlakte	65
10.4	Synergie km 2,4 en km 7,0	66
11	Conclusie	67
11.1	Algemeen	67
11.2	Waterspanningen en synergie met km 7,0	67
11.3	Ondiepe temperatuurmetingen	67
11.4	Temperatuurmetingen aan oppervlakte	68
	Literatuur	1
	Bijlage(n)	
A	Geotechnisch profiel km 2,4 (uit 2001, GeoDelft CO-376710)	A-1
B	Waterspanningen gedurende meetperiode dec 2013 – aug 2015 per locatie	B-1

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De Waddenzeedijk van Ameland is in de tweede toetsronde (2001-2006) deels afgekeurd, onder andere op het faalmechanisme piping. Wetterskip Fryslân is de beheerder van de waterkering en wil bepalen of er over een lengte van 300 m de voorziene maatregelen (damwand, berm) kunnen worden heroverwogen door nader onderzoek uit te voeren. In dit nadere onderzoek wordt gebruik gemaakt van de nieuwste inzichten, mede ontwikkeld in het kader van het SBW-onderzoek naar piping [6]. Opgemerkt wordt dat deze niet vigerend zijn. Belangrijk hierbij is het effect van de niet-stationaire belasting (tijdsafhankelijkheid) van het buitenwater op de reductie van de benodigde kwelweglengte. Dit kan leiden tot een beter ontwerp van de dijkversterking ter plaatse.

Hiervoor is binnen het versterkingsproject Waddenzeedijk Ameland (W2-049) een monitoringstraject met waterspanningsmeters ingezet op het traject km 6,8 tot km 7,1. Het Wetterskip Fryslân heeft Witteveen en Bos opdracht gegeven voor het uitvoeren van deze monitoringsproef. Hierbij fungeren Deltares (adviserende rol) en Fugro als onderaannemers van Witteveen en Bos.

Omdat zich een geul bevindt voor de kust ter plaatse van het traject km 6,8 – 7,1 heeft het Wetterskip Fryslân Stichting Floodcontrol IJkdijk opdracht gegeven om ter plaatse van km 2,4 (met grofweg dezelfde bodemopbouw, geometrie, zonder geul) een vergelijkbare monitoringsproef uit te voeren, waarbij Deltares, InTech en Fugro als onderaannemers fungeren. Hiermee kan de invloed van de geul op de veiligheid tegen piping worden vastgesteld.

In overleg met de Stichting Floodcontrol IJkdijk is vastgesteld dat innovatieve meettechnieken wellicht extra informatie kunnen leveren met betrekking tot het detecteren van piping, zodanig dat de onderbouwing van een eventueel meer optimale versterkingsmaatregel betrouwbaarder wordt, maar tevens in de tussenliggende periode als instrument kan worden gebruikt voor het inzichtelijk maken van het werkelijke pipingrisico bij hoogwatersituaties.

Livedijk Ameland houdt monitoring in van waterspanningen, ondiepe temperatuur en temperatuur aan de oppervlakte. De monitoring heeft plaatsgevonden in de periode van september 2013 tot en met augustus 2015.

Deltares is verantwoordelijk voor de synergie tussen beide monitoringslocaties en de analyse van de meetresultaten op km 2,4, in opdracht van Stichting Floodcontrol IJkdijk.

1.2 Probleemomschrijving

Op het traject van km 6,8-7,1 (bij de Ballumerbocht) is niet duidelijk of de dunne kleilaag onder de dijk doorloopt tot in het voorland, zodat het ook niet duidelijk is of er nu werkelijk een risico op piping bestaat zoals in de toetsing is bepaald. Bij de toetsing is er vanuit gegaan dat er wel een doorlopende kleilaag aanwezig is. Dit betekent dat er piping kan optreden direct onder de kleilaag, als deze opbarst. Uit de toetsing blijkt een kwelweglengtetekort, zodat er een risico is op piping. Om deze reden is in eerste instantie gedacht aan versterking door middel van een damwand of berm. Om tot een meer optimaal (goedkoper) dijkontwerp te komen, is voorgesteld de tijdsafhankelijke effecten van hoogwater op de mogelijke reductie van de benodigde kwelweglengte te onderzoeken.

Om het effect van de tijdsafhankelijkheid van de grondwaterstroming bij hoogwater in kaart te brengen, is het noodzakelijk om waterspanningen te meten in de dwarsdoorsnede van de dijk in het watervoerende pakket. De grondwaterstroming wordt immers veroorzaakt door verschillen in waterdruk. Door waterspanningen onder de dijk te meten, komt detailinformatie beschikbaar die meer inzicht in de grondwaterstroming oplevert, dan alleen metingen van de buitenwaterstand en het slootpeil.

Omdat zich bij traject km 6,8- 7,1 een geul bevindt voor de kust, en de remmende invloed van de geul op de waterspanningsmetingen niet duidelijk is en het niet mogelijk was om de geul nader te inspecteren, zijn er ook waterspanningen gemeten ter plaatse km 2,4. Deze moeten de invloed van de geul op de waterspanningen duidelijk maken en zo de meetresultaten op km 6,8-7,1 ondersteunen, dan wel verwerpen.

Het risico op piping hangt sterk van de ondergrond opbouw af, maar omdat deze vaak niet zeer gedetailleerd bekend is en het kostbaar is alle details in kaart te brengen via grondonderzoek, kan worden gekeken naar innovatieve maatregelen om piping te detecteren.

Temperatuurmetingen op ondiepe diepte kunnen aanvullende informatie geven over de grondwaterstroming. Tijdens de doorstroming past de temperatuur van het grondwater zich ten dele aan de omgevingstemperatuur aan – hoe sneller het water stroomt, hoe minder. Mogelijk is piping in een vroeg stadium te detecteren door veranderingen in de grondwatertemperatuur. Hoe dit in het geval bij wisselende waterstanden werkt, wordt in deze studie onderzocht. Door middel van gecombineerde temperatuur/waterspanningssensoren zijn op dezelfde (geringe) diepte metingen uitgevoerd.

Met temperatuurmetingen door middel van een infraroodcamera kunnen eventuele plaatsen waar grondwater uittreedt worden gedetecteerd, zodat het risico op piping kan worden verkleind door bijvoorbeeld tijdig maatregelen te nemen. In deze studie is de infraroodcamera toegepast bij stormsituaties waarbij hoogwater optreedt, om te kijken of er sprake is van uittredend grondwater.

1.3 Doelstelling

De bedoeling is dat met Livedijk Ameland de volgende doelstellingen worden behaald:

1. Monitoren van de dijk op km 2,4, met als doel vroegtijdig te kunnen waarschuwen wanneer pipingrisico optreedt (totdat de dijk verbeterd is).
2. Monitoring op traject km 6,8-7,1 ondersteunen, zodat het effect van het voorliggende wad op de intreeweerstand duidelijk wordt.
3. Het leveren van aanvullende lokale ondergrondinformatie door inzet van infrarood camera/temperatuurmetingen aan oppervlak (detecteren uittredend grondwater) en temperatuurmetingen op geringe diepte (detecteren veranderingen in grondwaterstroming). Dit ten behoeve van het optimaliseren van de eventuele versterkingsmaatregelen.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is uiteengezet wat er eerder is onderzocht en de tussentijdse resultaten van dit project worden besproken. In hoofdstuk 3 t/m 5 worden de verschillende meetmethoden uitgelegd – waterspanningen, ondiepe temperatuurmetingen en temperatuurmetingen aan oppervlakte. In hoofdstuk 6 t/m 8 zijn de resultaten hiervan terug te vinden. In hoofdstuk 9 worden de waterspanningen op km 2,4 vergeleken met die op km 7,0. In hoofdstuk 10 is de discussie te vinden en ten slotte is de conclusie in hoofdstuk 11 te vinden.

2 Beschikbaar onderzoek

2.1 Eerder uitgevoerd onderzoek

In 2003 is de Waddenzeedijk op Ameland getoetst door Deltares (toen GeoDelft) op piping. Voor een groot deel van het dijktraject kon bij de toetsing worden volstaan met het toepassen van de methode Bligh. Voor enkele dijkvakken is de methode Sellmeijer toegepast. Voor de meest kritische dijkvakken is piping getoetst rekening houdend met de respons van de stijghoogte in de watervoerende zandlaag onder de dijk op het getijde (gemeten met peilbuizen bij km 3.8, getijgegevens van 31-1-2003 t/m 5-2-2003) [1 en 2].

Recenter, in 2011, zijn de trajecten van 2003 getoetst met de vigerende toetspeilen (HR 2006) en de vigerende rekenregel van Sellmeijer, om de scope te bepalen van de dijkversterking op Ameland met betrekking tot piping [3]. Hierbij is rekening gehouden met de weerstand van het wad, zoals in het onderzoek van 2003 is gedaan. Gebruik is gemaakt van de geotechnische lengteprofielen en dwarsprofielen uit het onderzoek van 2003.

Daarnaast is de nieuwe rekenregel van Sellmeijer toegepast in het onderzoek, evenals het lengte-effect, op basis van [6].

2.2 Aanvullend geotechnisch onderzoek op km 6,8-7,1

In opdracht van Witteveen en Bos in het kader van het versterkingsproject heeft Fugro in september 2011 twintig sonderingen uitgevoerd langs de dijk nabij Nes [4] op het traject km 6,8 tot 7,1. Hiermee is gedetailleerder informatie over de aan- en afwezigheid van kleilagen op dit traject vastgesteld. De resultaten zijn terug te vinden in het rapport van Witteveen en Bos [5]. Hieruit is duidelijk geworden dat zich onder het buitentalud een kleilaag bevindt op een diepte van circa NAP -2 m, van ongeveer 0,5 m tot 1 m dikte.

2.3 Geotechnisch profiel

In Bijlage A is het geotechnisch profiel te vinden het traject waarin km 2,4 zich bevindt. Op dit profiel is te zien dat de ondergrond bestaat uit zand en klei. De kleilaag bevindt zich op km 2,4 op circa NAP -1,7 en is ongeveer 0,5 à 1 m dik. Onder deze dunne kleilaag bevindt zich het zandpakket waarin het faalmechanisme piping kan optreden.

De dunne kleilaag is aanwezig binnendijks en in de kern van de dijk. In het voorland zijn geen metingen uitgevoerd, dit was te kostbaar. Zo is niet bekend of deze dunne kleilaag doorloopt tot in het voorland. Uit conservatief oogpunt is uit gegaan van dat deze wel doorloopt, zodat er risico op piping bestaat.

2.4 Tussentijdse resultaten

Door Witteveen en Bos is in mei 2014 is een workshop georganiseerd met pipingexperts van Deltares en Rijkswaterstaat over de tussenresultaten van de monitoring. Tijdens deze workshop is besloten om de invloed van de kleilaag waaronder piping kan optreden, te onderzoeken op de scheiding van het geohydrologische systeem. Dit is onderzocht door het plaatsen van drie peilbuizen boven de kleilaag, over een periode van vier weken. Het resultaat van dit onderzoek staat beschreven in [5] en kort samengevat komt het er op neer dat er een duidelijke scheiding is van het geohydrologische systeem. Er is dus een doorgaande kleilaag aanwezig, ter plaatse van de kern van de dijk en de binnenteensloot.

In november 2014 is een tweede workshop georganiseerd door Witteveen en Bos, met dezelfde pipingexperts als in mei 2014, om het concept-onderzoeksrapport van Witteveen en

Bos te bespreken. Deze workshop had als doel te bepalen of Wetterskip Fryslân een damwand of een alternatieve oplossing in moet zetten in het dijkverbeteringstraject km 6,8 – 7,1, waarvan de aanbesteding eind 2014 is gebeurd. Een korte analyse van km 2,4 en een vergelijking met km 7,0 zijn gepresenteerd door Deltares. In deze rapportage wordt de analyse uitgebreider toegelicht en aangevuld met een update. Tijdens deze workshop is geconcludeerd dat op basis van de monitoring op km 7,0 alleen al geconcludeerd kon worden, dat er geen sprake meer is van een kwelweglengtetekort, zodat er geen piping maatregel nodig is op km 6,8-7,1. Dit komt door het in rekening brengen van het tijdsafhankelijke effect van het hoogwater op piping.

3 Waterspanningen km 2,4

3.1 Algemeen

Ter plaatse van km 2,4 is de bodemopbouw en de geometrie van de waterkering in grote lijnen gelijk aan die op traject km 6,8 – 7,1. Dit is afgeleid uit de geotechnische lengte- en dwarsprofielen (uit 2003). Andere locaties hadden een meer afwijkende bodemopbouw en/of geometrie van de waterkering, waardoor deze minder geschikt waren om als vergelijking te dienen voor de meetresultaten van de waterspanningen op km 6,8 – 7,1.

Voor de meetresultaten van de waterspanningen op km 6,8 – 7,1 wordt verwezen naar het rapport van Witteveen en Bos [5].

Na inspectie ter plaatse op Ameland in maart 2013 bleek dat zich een ondiepe geul bevindt vlak voor de dijk nabij km 2,4. Deze is gegraven op verzoek van Staatsbosbeheer, om zo een vogelsoort voldoende (broed)rust te gunnen. Dit geultje wordt onderhouden op NAP +0,44 m en er is een stalen damwand geplaatst, zodat het geultje niet droog valt. De orde van grootte van dit geultje is enkele meters breed en enkele tientallen meters lang (veel kleiner dan die op km 6,8-7,1). De bodem van het geultje bevindt zich ruim boven de kleilaag (NAP -1,5 tot -2,5 m), zodat dit vrijwel geen invloed zal hebben op de waterspanningsmetingen direct onder de kleilaag.

3.2 Locatie, diepte en type waterspanningsmetingen

Een viertal meetraaien met elk vijf waterspanningsmeters is geplaatst op km 2,4.

Figuur 3.1 geeft een indicatie van de locatie van km 2,4 op Ameland.

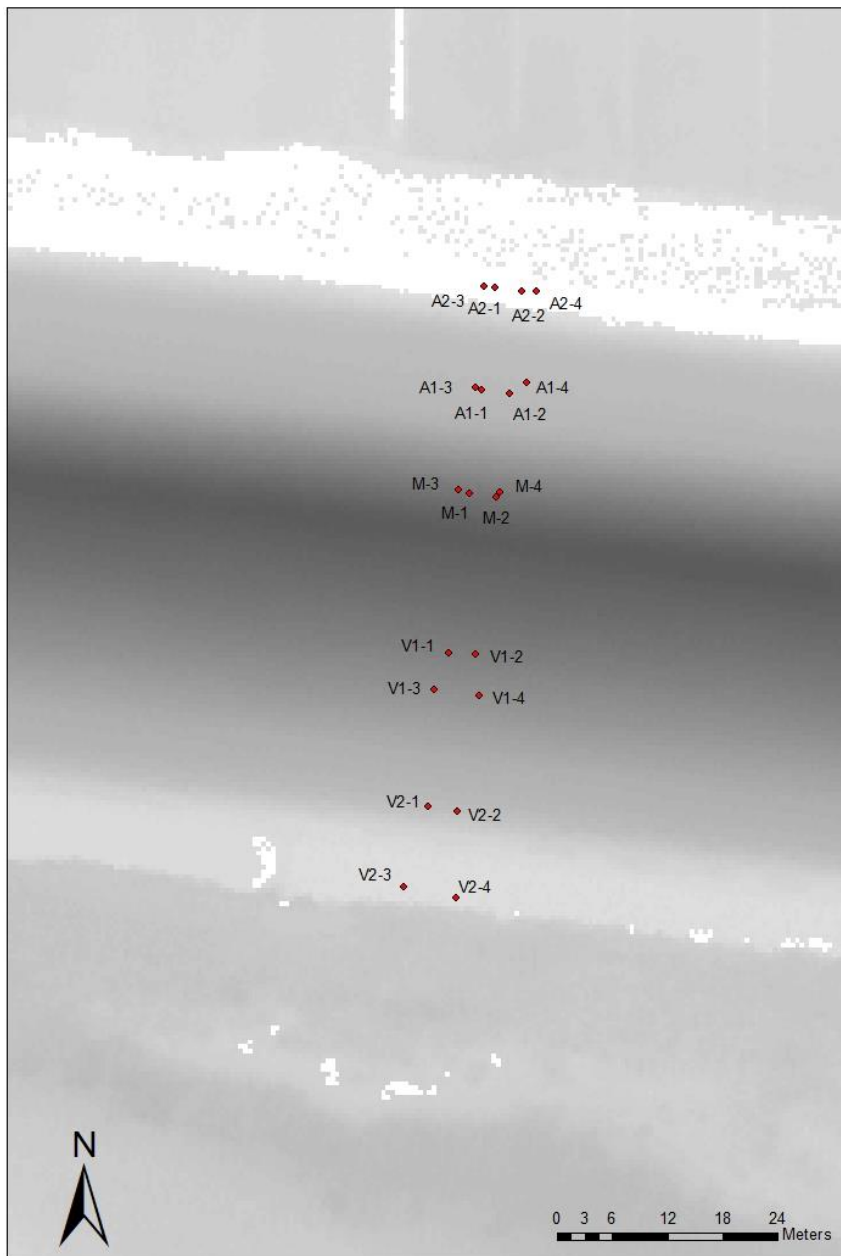


Figuur 3.1 Globale locatie km 2,4 op Ameland. Uit Google Maps, ©2014

Meetraai 1 en 2 liggen parallel aan elkaar met een afstand van circa 5 m tussen de meetraaien. Zie ook Figuur 3.2.

Tijdens de meetperiode tussen 2013 en 2015 zijn er twee raaien bijgeplaatst ter hoogte van km 2,4, omdat achteraf bleek dat de sensoren in raai 1 en 2 onbedoeld verloren waren geplaatst, zonder inmeting ten opzichte van NAP. Raai 3 is geplaatst op 4 april 2014 en raai 4

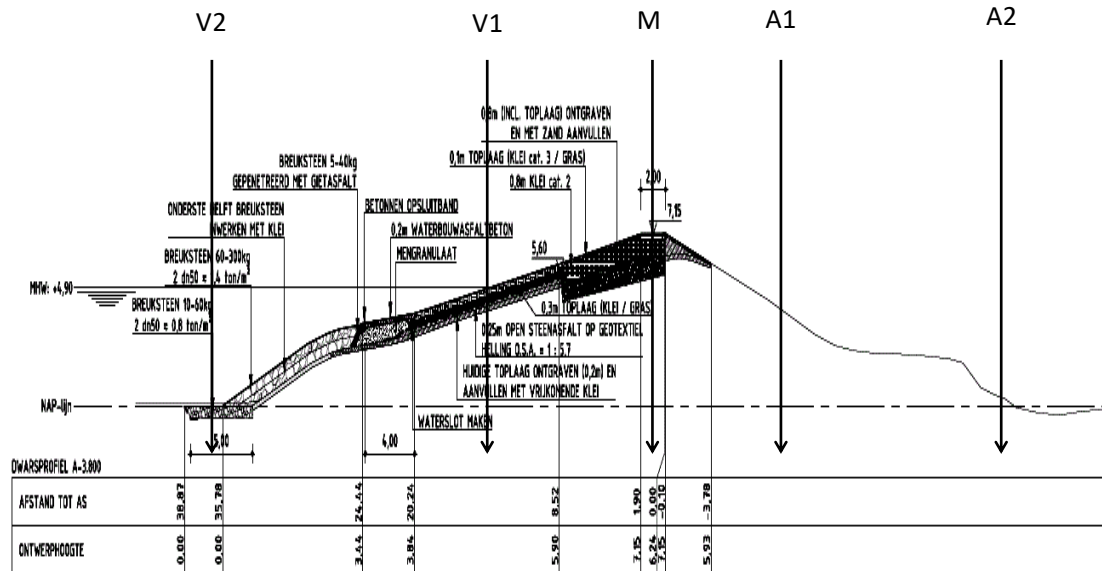
op 15 augustus 2014, met in totaal tien sensoren op dezelfde locatie en op een bekende diepte. Op basis van de metingen zijn de dieptes van sensoren in raai 1 en 2 geschat. Alle locaties zijn vermeld in Tabel 3.1.



Figuur 3.2 Locatie waterspanningsmeters op km 2.4

In Figuur 3.3 is geïllustreerd wat de ligging is van de waterspanningsmeters in de meetraai: één in de insteek van de binnendijkse sloot aan de kant van de dijk, één ter plaatse van de binnenteen, één ter plaatse van de kruin, één ter plaatse van de buitenkruin en één zo dichtbij als mogelijk bij de buitendijkse geul, zo ver mogelijk het 'voorland' in. De afstand van deze waterspanningsmeter (V2 in Figuur 3.3) is circa 35 m uit de kruin van de dijk. Daarbij geldt dat bij het installeren van meetraai 3 en 4 de waterspanningsmeters in het voorland,

V2-3 en V2-4, iets verder zeewaarts zijn geplaatst, met een afstand van 45 m uit de kruin van de dijk.



Figuur 3.3 Locatie waterspanningsmeters in de meetraai

De waterspanningsmeters meten de waterspanning in het zand onder de dunne kleilaag (ca. 1 m dik, circa NAP -1,5 tot -2,5 m). Aangegeven is de waterspanningsmeters te installeren direct onder de kleilaag met afstand van circa 30 cm vanaf de onderkant van de kleilaag. De meters zijn daarna geïnstalleerd door Fugro op een diepte van circa NAP -4,5 a -6 m in de zandlaag. Deze zandlaag is maatgevend voor het pipingmechanisme op traject km 2,4 en 6,8 – 7,1.

Het type waterspanningsmeters dat is toegepast op km 2,4 is een zogenaamde 'vibrating wire sensor' met een maximale afwijking van 0,05% van het totale meetbereik, dat ligt tussen 0 en 4,5 bar (absoluut). Dat komt neer op een maximale afwijking van 1,75 cm waterkolom. De sensoren zijn voorzien van een ingebouwde NTC thermistor (zie volgende hoofdstuk) [7].

Opgemerkt wordt dat in het monitoringsplan [11] dat de basis vormde onder de uitvraag, een relatieve meetnauwkeurigheid in de orde van 0,01 kPa (1 mm waterkolom – dus één orde van grootte nauwkeuriger dan toegepast) was geëist en een absolute nauwkeurigheid in de orde van 0,1 kPa (1 cm waterkolom). Het laatste omvat alle onnauwkeurigheden bij elkaar, dus ook de plaatsingsnauwkeurigheid. Aan deze nauwkeurigheden is bij lange na niet voldaan.

Locatie	code	diepte (m NAP)	x coördinaat	y coördinaat
binnenkruin raai 1	A1-1	-5,02*	172908.650	604509.497
binnenkruin raai 2	A1-2	-4,37*	172911.662	604509.174
binnenkruin raai 3	A1-3	-4,76	172908.020	604509.786
binnenkruin raai 4	A1-4	-4,99	172913.477	604510.334
insteek sloot raai 1	A2-1	-5,11*	172910.053	604520.688
insteek sloot raai 2	A2-2	-3,54*	172913.040	604520.209
insteek sloot raai 3	A2-3	-5,89	172908.942	604520.814
insteek sloot raai 4	A2-4	-5,75	172914.534	604520.301
kruin raai 1	M-1	-4,98*	172907.236	604498.277
kruin raai 2	M-2	-5,15*	172910.232	604497.898
kruin raai 3	M-3	-5,47	172906.164	604498.697
kruin raai 4	M-4	-6,08	172910.589	604498.461
buitenkruin raai 1	V1-1	-4,68*	172905.046	604481.032
buitenkruin raai 2	V1-2	-4,80*	172907.998	604480.794
buitenkruin raai 3	V1-3	-5,60	172903.433	604477.072
buitenkruin raai 4	V1-4	-6,37	172908.343	604476.370
voorland raai 1	V2-1	-4,38*	172902.791	604464.280
voorland raai 2	V2-2	-4,93*	172905.934	604463.846
voorland raai 3	V2-3	-5,97	172900.102	604455.622
voorland raai 4	V2-4	-5,96	172905.826	604454.408

* schatting

Tabel 3.1 Locatie, code en diepte van sensoren op km 2,4

4 Ondiepe temperatuurmetingen

4.1 Algemeen

Als afgeleide van de grondwaterstroming kan ook de grondwatertemperatuur worden bepaald. Tijdens de doorstroming past de temperatuur van het grondwater zich deels aan de omgevingstemperatuur aan. Hoe sneller het grondwater stroomt, hoe minder de temperatuur van het grondwater zich kan aanpassen aan de omgevingstemperatuur.

Binnen dit project is nagegaan hoe en in hoeverre ook bij wisselende waterstanden de temperatuurmetingen een rol kunnen spelen bij de detectie van piping. Hiervoor is een vergelijking nodig van de temperatuur van het buitenwater, de grondwatertemperatuur en de temperatuur van het slootwater.

De temperatuur van het grondwater is gemeten op dezelfde locaties en dieptes als de waterspanningen. Deze metingen zijn iedere 5 minuten uitgevoerd in de periode tussen september 2013 en augustus 2015 (voor meetraai 1 en 2). Voor meetraai 3 is tussen april 2014 tot en met augustus 2015 de temperatuur iedere 5 minuten gemeten en voor meetraai 4 is dit gedaan tussen augustus 2014 en augustus 2015.

4.2 Locatie, diepte en type temperatuursensor

Vier meetraaien met elk vijf temperatuursensoren zijn geplaatst op km 2,4, op dezelfde locatie en diepte als de waterspanningsmeters. Zie hoofdstuk 2 voor de indicatie van de locatie van km 2,4 op Ameland en de ligging van de temperatuursensoren in de meetraaien.

De temperatuursensoren meten de veranderingen in de temperatuur van het water onder de dunne kleilaag (ca. 1 m dik, circa NAP -1,5 tot -2,5 m) op een diepte van circa NAP -4,5 à -6 m met een uitschieter van NAP -3,5 voor sensor A2-2. Deze zandlaag is maatgevend voor het pipingmechanisme op traject km 6,8 – 7,1.

Het type temperatuursensor dat is toegepast op km 2,4 zijn NTC thermistoren met een meetnauwkeurigheid van circa 0,2°C.

De plaatsingsdieptes zijn echter niet zeer nauwkeurig bepaald in raai 1 en 2. Voor raai 3 en 4 zijn de plaatsingsdieptes nauwkeuriger. Op de schaal van dit onderzoek heeft dit geen vergaande invloed, de temperatuurvariaties op een plaatsingsdiepte 10 cm hoger of lager zullen zo klein zijn, dat deze geen invloed hebben op het algehele temperatuur beeld in de meetperiode tussen september 2013 en augustus 2015. De resolutie van de temperatuurmetingen in het geleverde bestand, waarop geen correctiefilter is toegepast, is 0,001 °C.

4.3 Temperatuur oppervlaktewater

Door Rijkswaterstaat wordt de temperatuur het oppervlaktewater gemeten op een aantal meetstations. Het dichtstbijzijnde meetstation bij de projectlocatie is Nes. Van dit meetstation zijn de watertemperaturen van elk uur opgevraagd. De bemonsteringshoogte is NAP -2,5 m. Er is vermoedelijk geen directe lineaire relatie tussen de temperatuur van het oppervlaktewater en de grondwatertemperatuur op grotere diepte, de verwachting is dat het grondwater op grotere diepte minder fluctueert dan het oppervlaktewater en zich langzamer aanpast aan de omgevingstemperatuur. Immers, het oppervlaktewater wordt meer beïnvloed door de atmosferische temperatuurvariaties en door stromingen dan het dieper gelegen grondwater.

Deze metingen zijn puur opgevraagd voor het illustreren van de temperatuurschommelingen van het oppervlaktewater in relatie tot de temperatuurschommelingen van het grondwater op diepte.

5 Temperatuurmetingen aan oppervlakte

5.1 Algemeen

De infraroodcamera is gebruikt om de temperatuurveranderingen te meten ter plaatse van km 2,4 in de sloot en aan de teen van de dijk, de zones waar uittredend grondwater te verwachten is in het geval dat het faalmechanisme piping optreedt.

De infraroodcamera meet op afstand de uitstraling van infrarood (met long wave) en een thermische gevoeligheid van 0,05 graad. Dit houdt in dat de veranderingen in temperatuur zichtbaar worden door middel van de camera. De veranderingen in temperatuur kunnen ter plaatse ontstaan door uittredend grondwater dat in de winter duidelijk warmer is dan de omgevingstemperatuur.

Binnen km 2,4 is de infraroodcamera ingezet door InTech via een mobiele opstelling. De camera is over een bepaalde afstand gesleept en heeft opnames gemaakt op drie verschillende tijdstippen, inclusief een nulmeting:

- Storm 5/6 december 2013.
- Referentiemeting 16 april 2014 (door omstandigheden niet gelukt in 2013 voorafgaand aan de storm).
- Storm 10 januari 2015.

5.2 Locatie, meetoppervlak, type

De temperatuurmetingen zijn uitgevoerd met een IR-systeem, ontwikkeld door InTech Dike Security systems. Dit systeem is op een meetvoertuig geplaatst. Het voertuig was voorzien van GPS, infrarood sensor, visuele camera, energievoorziening en een telescoopmast met bijbehorend stabilisatiesysteem, zie Figuur 5.1

De infrarooddata is bewerkt tot een png formaat, gekoppeld aan rijksdriehoekcoördinaten. De meetnauwkeurigheid van de infraroodsensor is 0,05 graden Celsius.

De data, in de vorm van foto's, is beschikbaar gesteld via het Dijk Data Service Centrum (DDSC). In Figuur 5.2 is te zien hoe het beeld er ongeveer uit ziet wanneer er uittredend kwelwater is waar te nemen door de infrarood camera. Deze figuur dient als voorbeeld en is gebaseerd op metingen elders.



Figuur 5.1 IR-systeem op meetvoertuig



Figuur 5.2 Infrarood camera detectie van uittredend kwelwater, infrarood foto is over visuele foto geplaatst. Rode vlek geeft (significant) temperatuurverschil aan in slootwater – indicatie van uittredend kwelwater

6 Resultaten waterspanningsmetingen

6.1 Algemeen

Van september 2013 tot en met augustus 2015 zijn drie stormen geweest waarbij de waterstand hoger dan NAP +3,0 m was. Die stormen zijn van groot belang voor een complete analyse. De complete analyse houdt in dat gekeken wordt of er verschillen zijn in de metingen op km 2,4 en km 7,0 en of deze de invloed van de voorliggende geul op km 7,0 laten zien. Hierin is ook het normale verloop van de waterspanningen meegenomen in de tussenliggende (rustige) perioden.

Voor de analyse is gebruik gemaakt van het door Fugro geleverde, gecorrigeerde databestand. De data zijn van meetwaarde naar stijghoogte t.o.v. NAP omgezet, gecorrigeerd voor de luchtdruk (op km 2,4 met een barometer op locatie). Deze data zijn niet verder bewerkt door Deltares.

Er zijn vijf representatieve meetperioden gerapporteerd. Eerst is gecontroleerd of de meetresultaten van raai 1 t/m 4 overeenkomen per locatie (zie bijlage A). De uitkomst is dat de meetresultaten op locatie V2 (voorland), M (kruin) en A2 (sloot) overeenkomen. Voor locatie V1 (buitenkruin) geldt dat V1-4 afwijkende resultaten laat zien: de meetresultaten lijken te hoog en zijn niet in lijn met V1-1, V1-2 en V1-3. Voor de binnenkruin geldt dit voor A1-3, terwijl A1-1 en A1-2 weer wat te laag lijken te zijn.

Waar mogelijk is de voorkeur gegeven aan de resultaten van meetraai 3 en 4, aangezien hier de diepte van de sensoren vrijwel zeker is. De diepten van de sensoren op meetraai 1 en 2 zijn geschat en daardoor ontstaat het gevaar dat de meetresultaten niet geheel juist zijn (immers, de stijghoogte wordt berekend met de plaatsingsdiepte van de sensoren). Daarnaast is het niet overzichtelijk als de meetresultaten van alle vier de meetraaien worden gerapporteerd in één grafiek. Voor de storm van 11 januari 2015 is dit wel gedaan, om dit te illustreren hoe de meetresultaten zich verhouden in elke raai ten opzichte van elkaar, zie paragraaf 6.6.

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van de afwijkend lijkende sensoren wel weergegeven, maar in de analyse buiten beschouwing gelaten.

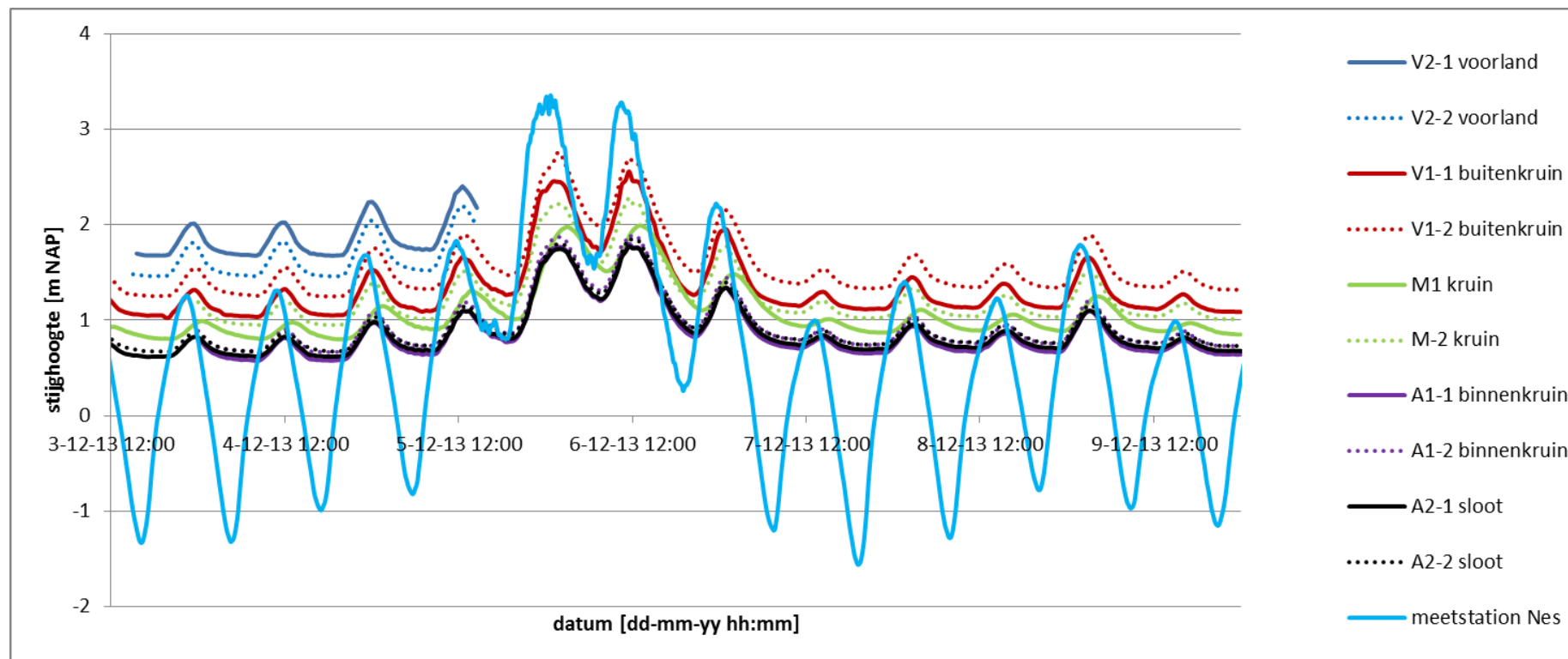
6.2 Storm 6 december 2013

Tijdens de storm van 6 december 2013 waren alleen sensoren in meetraai 1 en 2 geïnstalleerd en daarvan zijn de meetresultaten weergegeven in Figuur 6.1.

De waterspanningen (en dus stijghoogten) van meetraai 1 en 2 rond 6 december 2013 komen met elkaar overeen qua grootte van de amplitude en periode. Dit is naar verwachting. Zie ook Figuur 6.1. Het hoogwater heeft een waterstand van circa NAP + 3,3 m bereikt (bron: Rijkswaterstaat, meetstation Nes).

De trend die zichtbaar is in Figuur 6.1, is dat sensor V2-1 en V2-2, in het voorland, een hogere stijghoogte meten dan op de andere locaties, met een dalende trend naar het achterland toe. Opmerkelijk is de uitval van de metingen op locatie V2-1 en V2-2 per 5-12-2013 13:00, in het voorland. Dit had te maken met een technisch defect in de loggerkast, als gevolg van kortsluiting kort nadat de loggerkast onder water kwam te staan. Specifieker is rond 5 en 6 december de invloed van het hoogwater terug te zien in de hoge meetwaarden (rondom NAP + 2 m). Binnen raai 1 geeft sensor M-1 (kruin) een kleine faseverschuiving ten opzichte van de andere sensoren. Dit ligt vermoedelijk aan de tijdregistratie van deze sensor.

Daarnaast is te zien in Figuur 6.1 dat V2-1, V2-2 en V1-2 in de aanloop naar het hoogwater hogere stijghoogten hebben dan de stijghoogten van het buitenwater. Dit geldt ook voor een aantal tijdstippen na de storm.



Figuur 6.1 Stijghoogten op km 2,4 tijdens de storm rond 6 december 2013

6.3 Rustige periode – medio september 2014

De waterspanningen (en dus stijghoogten) van meetraai 3 en 4 zijn geselecteerd voor deze tijdsperiode, vanwege hun betrouwbaarheid qua diepteligging. Raai 1 en 2 zijn buiten beschouwing gelaten (zie paragraaf 6.1).

In Figuur 6.2 is de data weergegeven. Hierbij valt op dat V1-4 hoge waarden geeft. In Bijlage B, figuur B.2, is terug te zien dat deze sensor over de gehele tijdsperiode gemiddeld hogere waarden geeft, hoger dan de andere sensoren op dezelfde locatie. Om deze reden wordt getwijfeld aan de betrouwbaarheid van sensor V1-4 en wordt deze buiten beschouwing gelaten bij de analyse. Aan de andere kant kunnen de meetwaarden qua diepteligging worden gecorrigeerd, waardoor de meetwaarden meer in lijn te komen liggen met de andere sensoren. Deze correctie is niet uitgevoerd, aangezien er data beschikbaar zijn van drie sensoren en daarnaast is de correctie lastig uit te voeren – vraag is wat de juiste diepteligging is t.o.v. NAP.

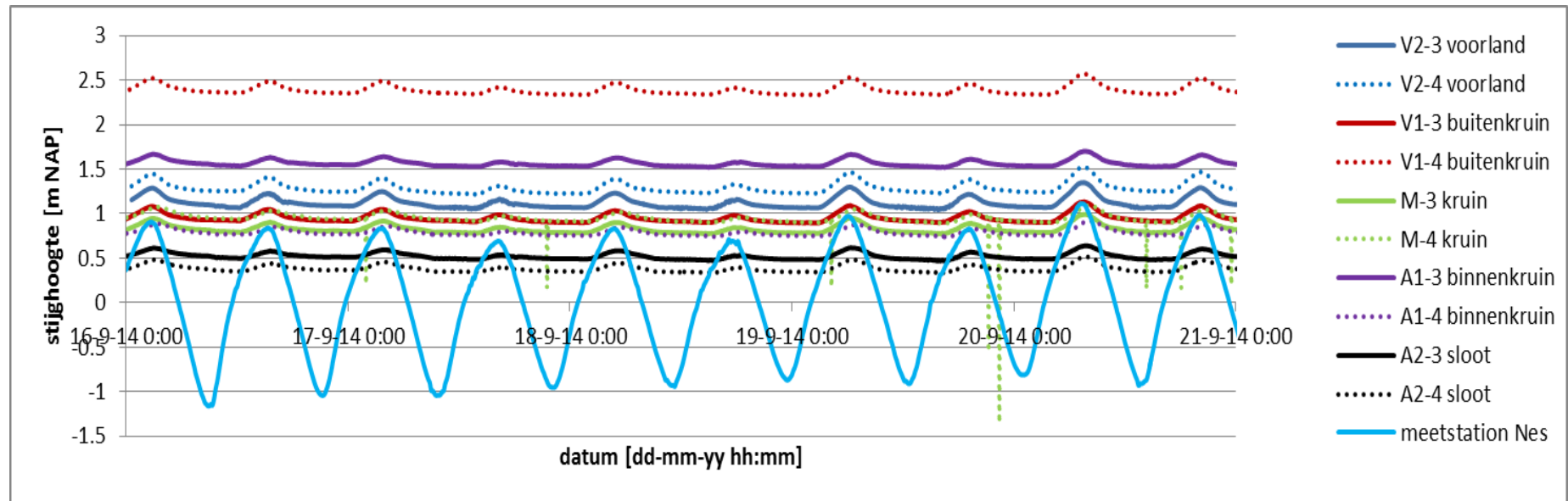
Verder valt op dat sensor M-4 hier en daar negatieve waarden geeft, deze zijn niet representatief (zie ook bijlage B, figuur B.3).

Daarnaast lijkt sensor A1-3 te hoge waarden geven. In Bijlage B, figuur B.4, is te zien dat deze sensor gemiddeld hogere waarden geeft, gedurende de gehele tijdsperiode, dan de andere sensoren op dezelfde locatie. Sensor A1-4 geeft ook gemiddeld hogere waarden dan sensor A1-1 en A1-2. Wat ook opvalt zijn de wat vreemde meetwaarden van A1-4 aan het begin van de meetreeks.

Wanneer sensoren V1-4, M-4 en A1-3 buiten beschouwing wordt gelaten, valt op dat de waterspanningen bij het voorland rond 1,3 m NAP liggen en deze nemen af richting de locatie van sensor A2-3 en A2-4 (sloot), tot circa 0,5 m NAP. Er is een dempende trend zichtbaar.

Het is duidelijk dat de sinusvorm van de sensoren zonder tijdsvertraging overeenkomt met de buitenwaterstand, dat wil zeggen, op hetzelfde tijdstip is een toe- of afname in de stijghoogte.

Daarnaast is te zien dat de stijghoogten van het voorland en buitenkruin hoger dan de stijghoogten van het buitenwater gedurende de gehele rustige periode tussen 16 en 21 september 2014. (Hierbij wordt sensor V1-3 en A1-3 buiten beschouwing gelaten.)



Figuur 6.2 Stijghoogten op km 2,4, in raai 3 en 4 van 16-9-2014 tot 21-9-2014

6.4 Storm 22 oktober 2014

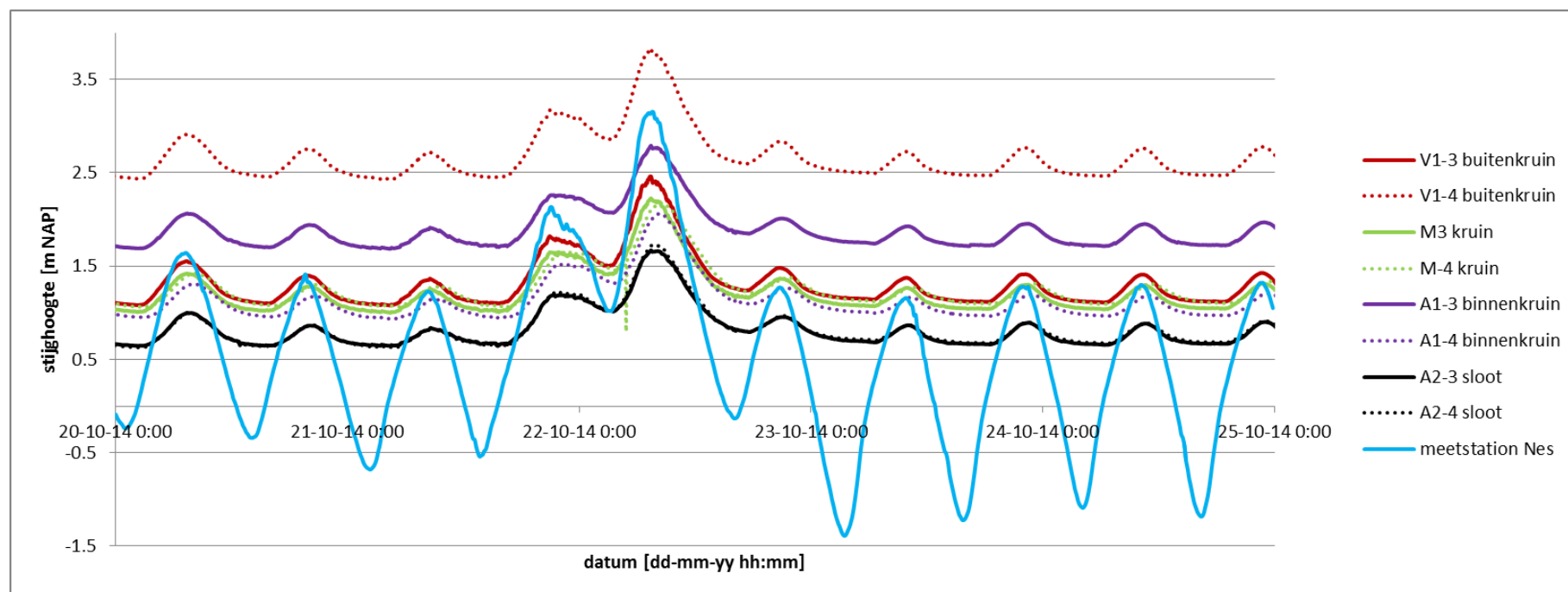
Voor de analyse van de waterspanningen rondom de storm op 22 oktober 2014 is gebruik gemaakt van de meetgegevens op raai 3 en 4, vanwege de betrouwbaarheid betreffende de diepteligging van de sensoren. Raai 1 en 2 zijn buiten beschouwing gelaten (zie paragraaf 6.1).

In Figuur 6.3 valt op dat de voorland sensoren (V2-3, V2-4) afwezig zijn. De metingen van V2-3 en V2-4 zijn niet beschikbaar gesteld in de door Fugro bewerkte databestand. Daarop is gekeken naar V2-1 en V2-2, echter deze waren ook niet beschikbaar. Vermoedelijk is er sprake van uitval van deze sensoren, aangezien op 21 november de betreffende meetkast is vervangen (zie [7]).

Ook hier lijkt de V1-4 sensor te hoge waarden te geven, zie Figuur 6.3 en Bijlage B, figuur B.2). Hetzelfde geldt voor sensor A1-3. Wanneer deze sensoren buiten beschouwing worden gelaten, is dezelfde trend zichtbaar als in de voorgaande tijdspannen, genoemd in de voorgaande paragrafen: de stijghoogten zijn bij de buitenkruin hoger, circa NAP +1,0 m en deze nemen af richting achterland, ter plaatse van de sloot, sensor A2-3/A2-4 tot circa NAP +0,7 m.

Specifieker is rond 22 oktober de invloed van het hoogwater terug te zien in de hoge meetwaarden van rondom NAP + 1,5 à 2,5 m. De meetwaarden zijn circa 1 m toegenomen, terwijl de buitenwaterstand circa 1,5 m is gestegen. De buitenwaterstand was maximaal NAP +3,1 m (bron: Rijkswaterstaat, meetstation Nes). De meetwaarden volgen dezelfde trend als de buitenwaterstand qua amplitude, vorm en frequentie.

Daarnaast valt op dat in de aanloop naar de storm de stijghoogten van het voorland hoger zijn dan de stijghoogten van het buitenwater. Dit geldt ook voor de periode na de storm. (Hierbij wordt sensor V1-3 en A1-3 buiten beschouwing gelaten.)



Figuur 6.3 Stijghoogten op km 2,4, raai 3 en 4, rond de storm van 22 oktober 2014

6.5 Storm 11 januari 2015

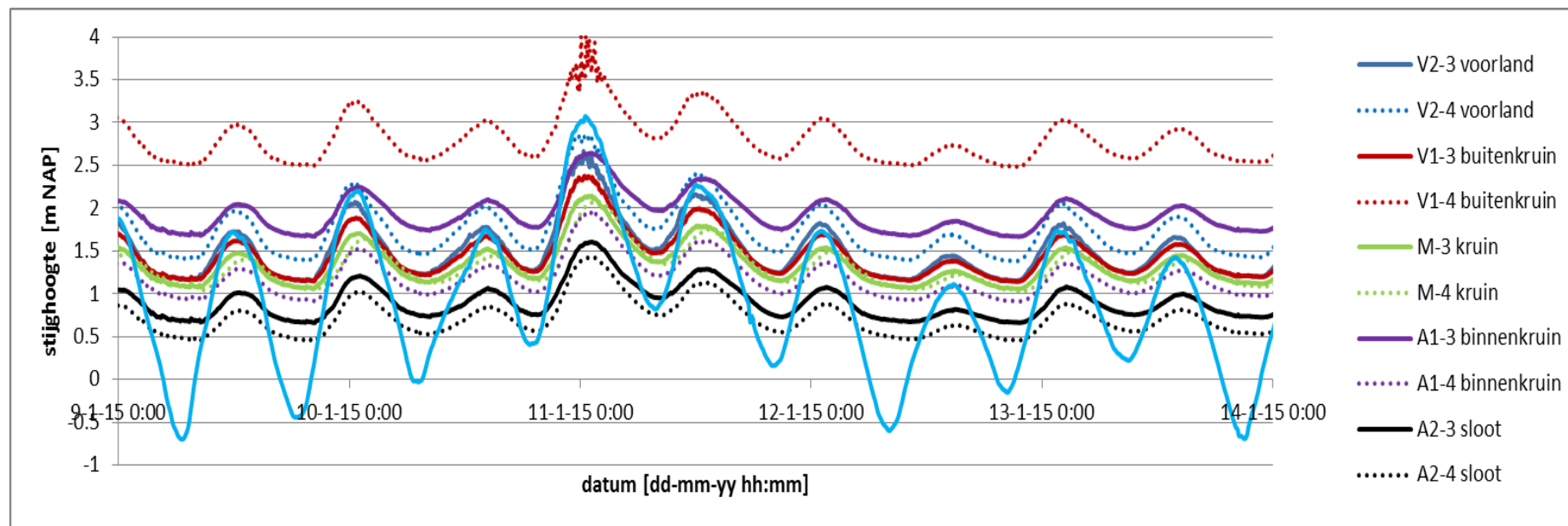
Voor de analyse van de waterspanningen rondom de storm op 11 januari 2015 is gebruik gemaakt van de meetgegevens op raai 3 en 4, vanwege de betrouwbaarheid betreffende de diepteligging van de sensoren. Raai 1 en 2 zijn buiten beschouwing gelaten, zie paragraaf 6.1.

Opvallend is dat sensor V1-4 hogere meetwaarden geeft, zie Figuur 6.4 en Bijlage B, figuur B.2. Hetzelfde geldt voor sensor A1-3. Wanneer deze sensoren buiten beschouwing worden gelaten, is dezelfde trend zichtbaar als in de voorgaande tijdsperioden, genoemd in voorgaande paragrafen: de stijghoogten zijn bij het voorland hoger (ca. NAP +1,5 m) en deze nemen af richting achterland, ter plaatse van de sloot, sensor A2-3/A2-4 (ca. NAP +0,7 m).

Specifieker is rond 11 januari de invloed van het hoogwater terug te zien in de hoge meetwaarden van rondom NAP + 1,5 à 2,5 m. De waterspanningen zijn rond de storm circa 1 m gestegen, terwijl de buitenwaterstand circa 1,5 m is gestegen. De buitenwaterstand was maximaal NAP +3,1 m (bron: Rijkswaterstaat, meetstation Nes). De meetwaarden volgen dezelfde trend als de buitenwaterstand qua amplitude, vorm en frequentie.

Daarnaast valt op dat sensor V2-4 (voorland) hogere stijghoogten geeft in de aanloop naar de storm dan de stijghoogten van het buitenwater. Voor V2-3 geldt dat het verschil minimaal is. Dit geldt ook voor de periode na de storm.

(Hierbij worden sensoren V1-3 en A1-3 buiten beschouwing gelaten.)



Figuur 6.4 Stijghoogten op km 2,4, raai 3 en 4 rond de storm van 11 januari 2015

6.6 Storm 11 januari 2015 raai 1 t/m 4

Voor de analyse van de waterspanningen rondom de storm op 11 januari 2015 is gebruik gemaakt van de meetgegevens op raai 3 en 4, vanwege de betrouwbaarheid betreffende de diepteligging van de sensoren. Raai 1 en 2 zijn buiten beschouwing gelaten, zie paragraaf 6.1. Echter, voor de volledigheid zijn van deze storm alle meetgegevens geïllustreerd in Figuur 6.5. Hierin wordt dan duidelijk hoe de meetresultaten zich ten opzichte van elkaar verhouden.

Gekozen is voor deze storm, omdat de metingen rond de storm van 5 december 2013 alleen op meetraai 1 en 2 zijn uitgevoerd en bij de storm van 22 oktober 2014 ontbreken de metingen in het voorland. Van de storm van 11 januari 2015 zijn in alle vier de meetraaien waterspanningen gemeten.

In Figuur 6.5 is te zien dat de metingen in het voorland (V2-1, V2-2, V2-3 en V2-4, blauwe lijnen) in elkaars buurt liggen. Het verschil tussen deze sensoren is maximaal 0,5 m.

De metingen bij de buitenkruin (V1-1 t/m V1-4, rode lijnen) liggen ook in elkaars buurt, uitgezonderd V1-3 dat vrij hoog ligt ten opzichte van de andere sensoren. Het verschil tussen deze sensoren, uitgezonderd V1-3, is circa 0,2 m.

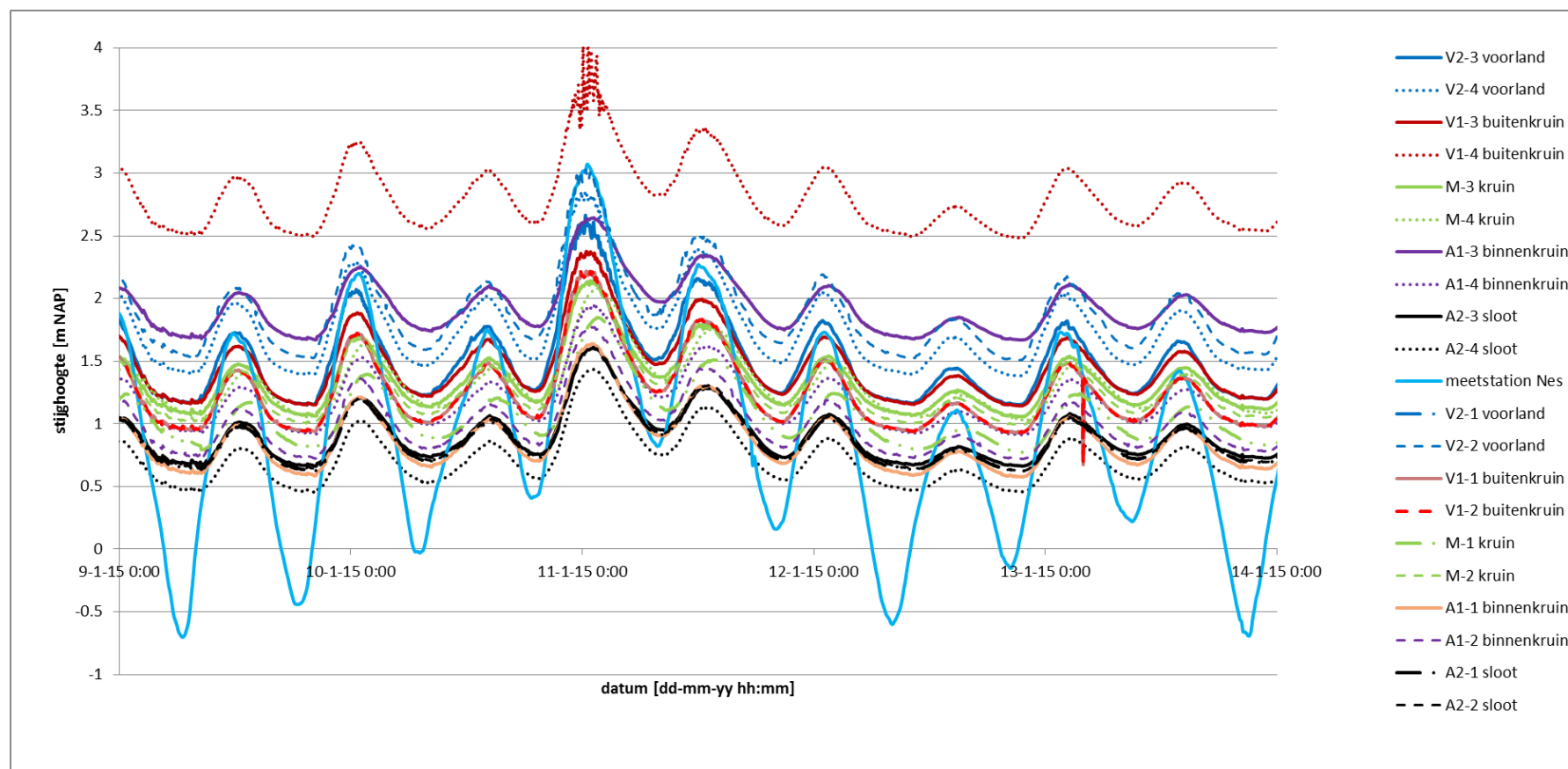
De metingen bij de kruin (M-1 t/m M-4, groene lijnen) liggen tevens in elkaars buurt met een maximaal verschil van 0,2 m tussen deze sensoren.

De metingen bij de binnenkruin (A1-1 t/m A1-4, paarse lijnen) liggen ook in elkaars buurt, uitgezonderd A1-3, met een maximaal verschil van 0,2 m.

De metingen bij de sloot (A2-1 t/m A2-4, zwarte lijnen) liggen ten slotte in elkaars buurt. Het verschil tussen deze sensoren is maximaal 0,2 m.

De algehele trend die duidelijk is dat de stijghoogten in het voorland hoger liggen en richting de binnendijkse sloot afnemen (dempende trend).

Ten slotte geven de sensoren in het voorland hogere stijghoogten in de aanloop naar de storm dan de stijghoogten van het buitenwater. Dit geldt ook voor de periode na de storm. (Hierbij worden sensor V1-3 en A1-3 buiten beschouwing gelaten.)



Figuur 6.5 Stijgheugten van alle meetraaien tijdens storm 11 januari 2015 op km 2,4

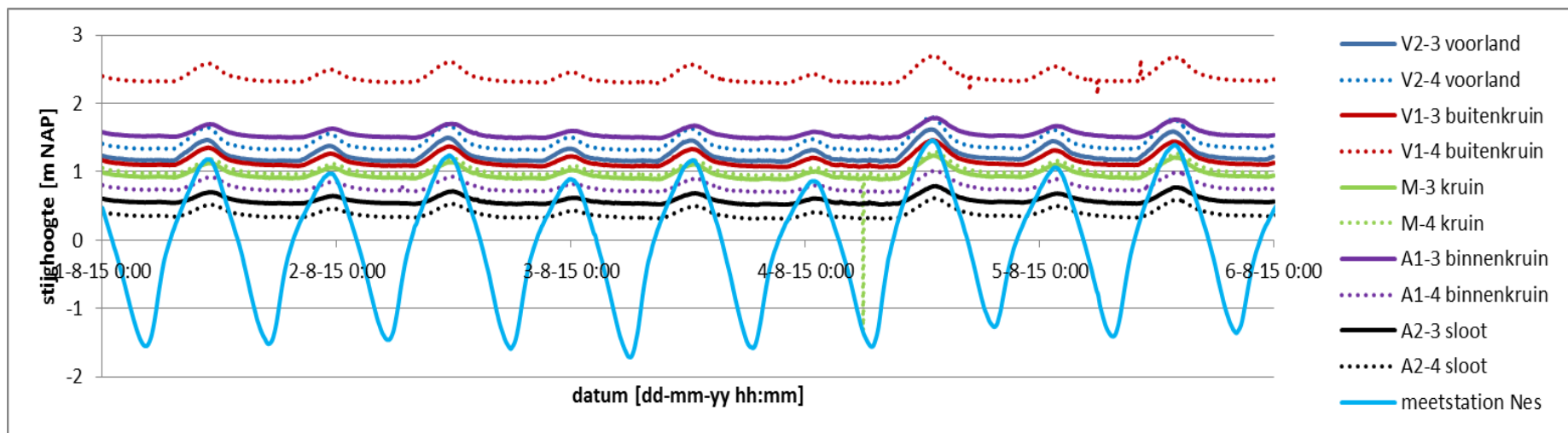
6.7 Rustige periode augustus 2015

Voor de analyse van de waterspanningen van de rustige periode van 1 augustus 2015 tot 6 augustus 2015 is gebruik gemaakt van de meetgegevens op raai 3 en 4, vanwege de betrouwbaarheid betreffende de diepteligging van de sensoren. Raai 1 en 2 zijn buiten beschouwing gelaten, zie paragraaf 6.1.

In Figuur 6.6 is te zien dat sensor V1-4 gemiddeld hogere waarden geeft, net als sensor A1-3 (binnenkruin). Wanneer deze sensoren buiten beschouwing worden gelaten, is dezelfde dempende trend zichtbaar als in de voorgaande tijdsperioden, genoemd in voorgaande paragrafen: de stijghoogten zijn bij het voorland hoger (ca. NAP +1,2 m) en deze nemen af richting achterland, ter plaatse van de sloot, sensor A2-3/A2-4 (ca. NAP +0,7 m).

Het is duidelijk dat de sinusvorm van de sensoren zonder tijdsvertraging overeenkomt met de buitenwaterstand, dat wil zeggen, op hetzelfde tijdstip is een toe- of afname in de stijghoogte.

Daarnaast is te zien dat de sensoren in het voorland en de buitenkruin hogere stijghoogten hebben dan de buitenwaterstand. Dit geldt voor de gehele rustige periode tussen 1 en 6 augustus 2015. (Hierbij worden sensor V1-3 en A1-3 buiten beschouwing gelaten.).



Figuur 6.6 Stijghoogten op km 2,4, raai 3 en 4 tijdens rustige periode augustus 2015

7 Resultaten ondiepe temperatuurmetingen

7.1 Algemeen

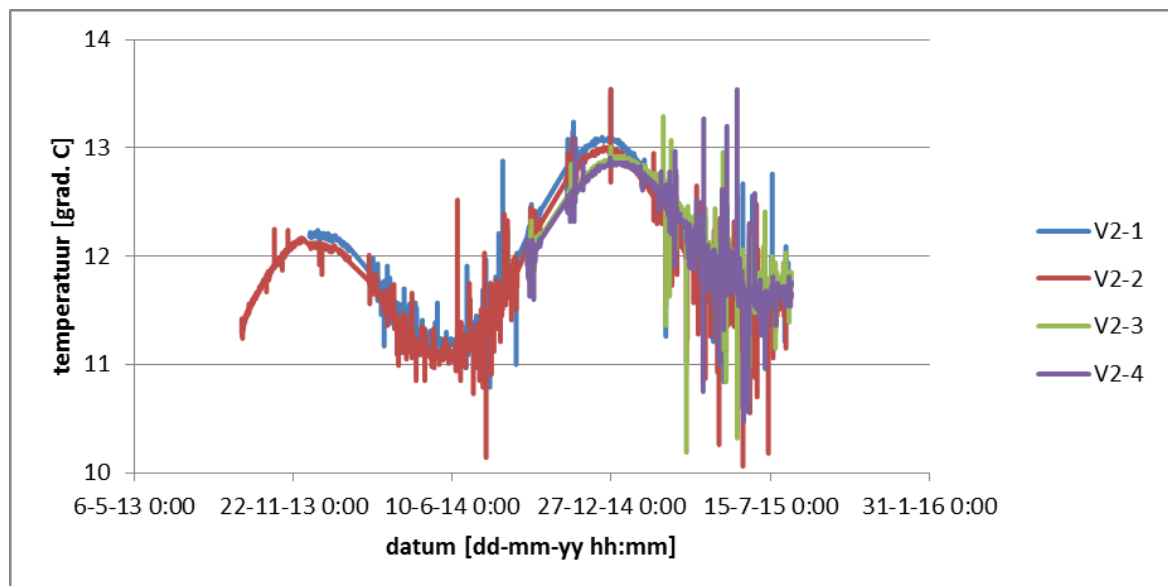
De ondiepe temperatuur (circa NAP -4,5 a -6 m) is iedere vijf minuten gemeten in de periode van december 2013 tot augustus 2015 in raai 1 en 2. Voor raai 3 en 4 geldt dat de temperatuur is gemeten vanaf de plaatsing van de instrumenten (respectievelijk april en augustus 2014) tot augustus 2015.

Opgemerkt wordt dat de resultaten niet gecorrigeerd zijn geleverd door Fugro en handmatig ernstige afwijkingen in de temperatuurdata, die niet in lijn zijn met andere temperatuurdata van dezelfde locatie, zijn verwijderd door Deltares.

7.2 Temperatuur per locatie

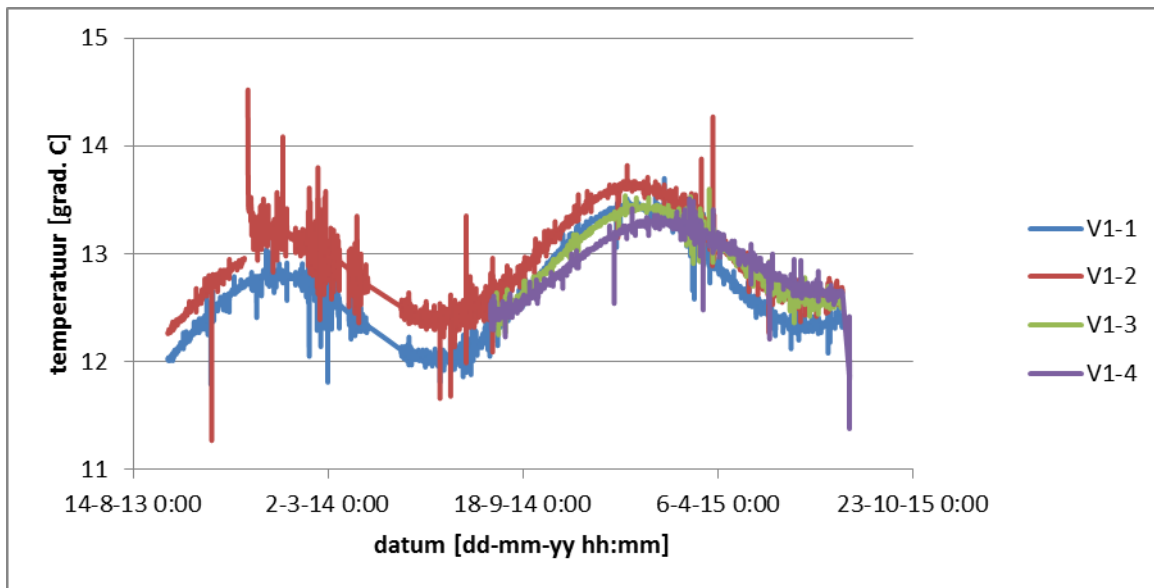
Per locatie is de temperatuur gemeten in alle vier de raaien. De resultaten zijn per locatie weergegeven in Figuur 7.1, Figuur 7.2, Figuur 7.3, Figuur 7.4 en Figuur 7.5.

In Figuur 7.1 is te zien dat de temperatuur metingen in de V2-locaties overeen komen in de vier meetraaien, nabij het voorland. Ook is te zien dat de temperatuur in de zomerperiode het laagst is en in de winterperiode het hoogst is. De variatie is circa 2 graden Celsius tussen zomer en winter. Aan het einde van de meetperiode zijn grotere fluctuaties te zien in de temperatuur. Vermoedelijk ligt dit aan de instrumentatie zelf.



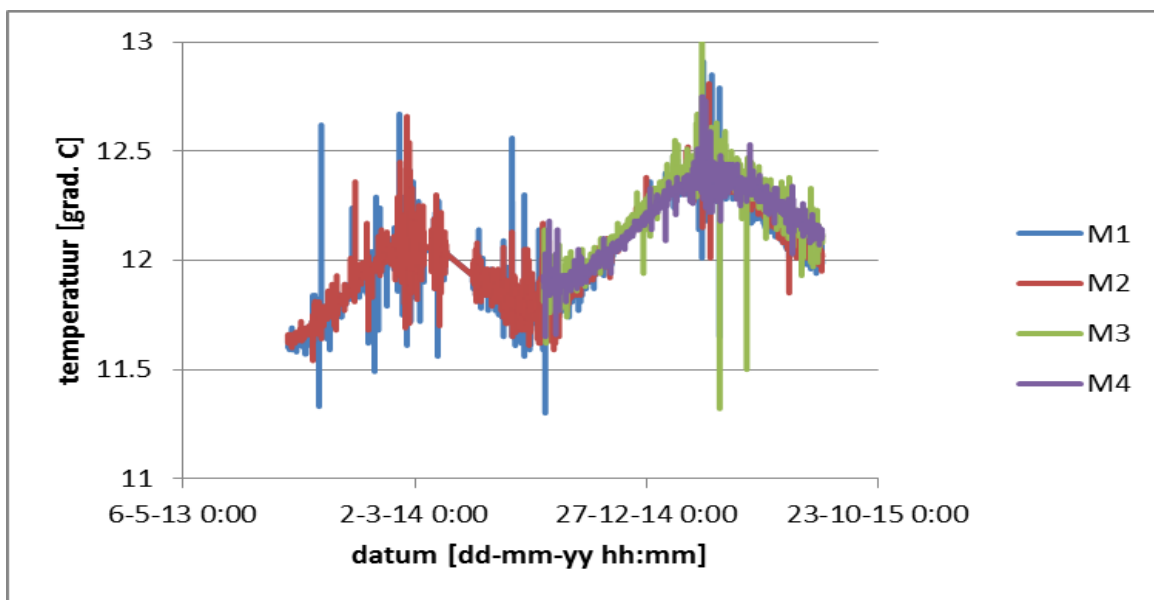
Figuur 7.1 Temperatuur op locatie V2, voorland, tussen december 2013 en augustus 2015

In Figuur 7.2, de temperatuur ter plaatse van de binnenkruin is te zien dat de metingen op deze locatie in de vier raaien overeenkomt, met hier en daar een kleine afwijking (minder dan een 0,5 graad Celsius). Ook hier is te zien dat de temperatuur in de winter op zijn hoogst is en in de zomer het laagst. De variatie tussen zomer en winter is iets minder dan 2 graden Celsius.



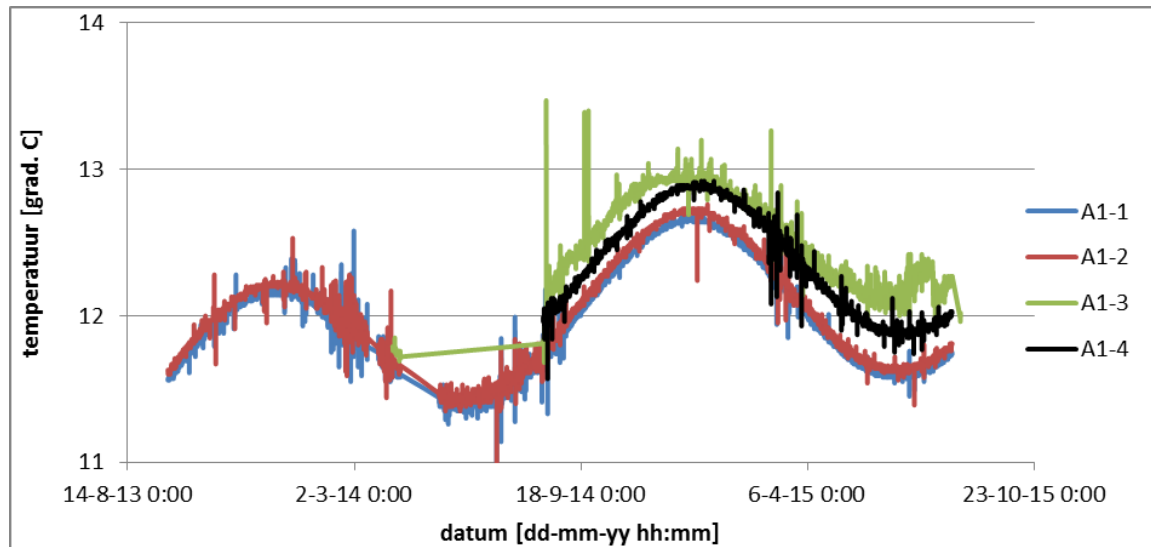
Figuur 7.2 Temperatuur op locatie V1, binnenkruin, tussen december 2013 en augustus 2015

In Figuur 7.3, ter plaatse van de kruin, is te zien dat de temperatuur in de vier raaien overeenkomt. Er is nauwelijks afwijking in de temperatuur tussen de raaien op deze locatie. Hier geldt ook dat de temperatuur in de winter op zijn hoogst is en in de zomer op zijn laagst. De variatie tussen zomer en winter is circa 1 graad.



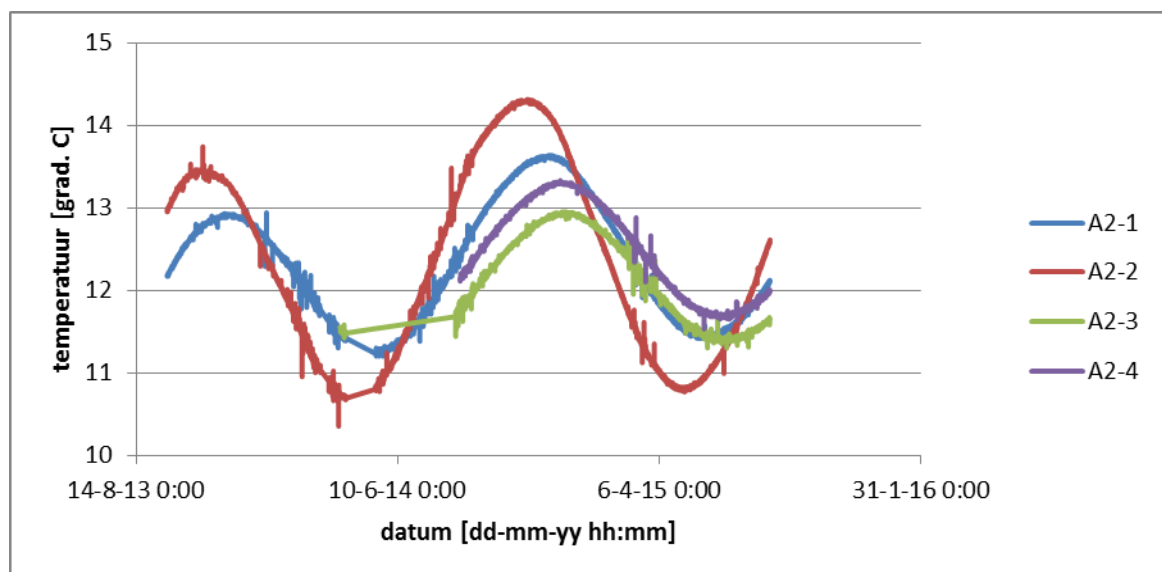
Figuur 7.3 Temperatuur op locatie M1, kruin, tussen december 2013 en augustus 2015

In Figuur 7.4, ter plaatse van de binnenkruin, is te zien dat de temperatuur in de vier raaien overeenkomt met hier en daar een kleine afwijking, minder dan een 0,5 graad Celsius (raai 3 en 4). Ook hier geldt dat de temperatuur in de winter het hoogst is en in de zomer het laagst, het verschil is circa 1,5 graad Celsius.



Figuur 7.4 Temperatuur op locatie A1, binnenkruin, tussen december 2013 tot augustus 2015

In Figuur 7.7, ter plaatse van de sloot aan de kant van de dijk, is te zien dat de temperatuur in de vier raaien meer verschilt dan in voorgaande figuren. De afwijking in de temperatuur tussen raai 2 (A2-2) en raai 3 (A2-3) is in de winterperiode van 2014/2015 circa 1 graad Celsius. Dit is de grootste afwijking. Gezien de voorgaande figuren, valt dit verschil meer op. Daarnaast is hier tevens te zien dat de temperatuur in de winterperiode op zijn hoogst is en in de zomerperiode op zijn laagst. Het verschil in de temperatuur tussen zomer en winter is circa 2 a 3 graden Celsius. Dit wordt verder besproken in het hoofdstuk 10 Discussie.



Figuur 7.5 Temperatuur op locatie A2, sloot dijkkant, tussen december 2013 en augustus 2015

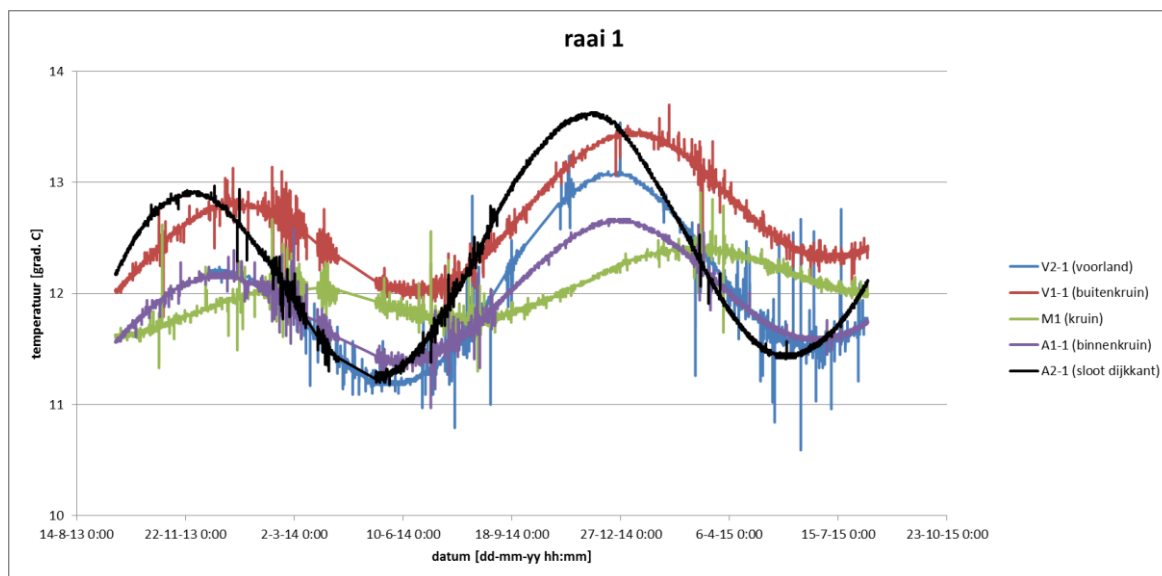
7.3 Temperatuur per raai

Om een duidelijk beeld te krijgen van het temperatuurverloop van voorland (zeezijde) tot aan de binnendijkse sloot zijn de volgende figuren gemaakt met temperatuur data van meetraai 1 en 2. Meetraai 3 en 4 zijn in dit beeld buiten beschouwing gelaten, aangezien in de vorige paragraaf is gebleken dat deze min of meer overeenkomen met raai 1 en 2 en bovendien is de meetperiode van raai 3 en 4 slechts minder dan 1 jaar. Getracht is hierbij de figuren overzichtelijk te houden.

Het gaat om een tweedimensionaal beeld, in gedachten houdende dat de temperatuur-variaties echter driedimensionaal zijn (net als grondwaterstroming).

In Figuur 7.6, raai 1, is te zien dat het temperatuur in de tijd een seizoensgebonden verloop laat zien in alle locaties, waarbij de sensor ter plaatse van de kruin (M1, groene lijn) een meer gedempte en vertraagde verloop laat zien dan de andere sensoren. De sensor A2-1, ter plaatse van de sloot aan dijkkant, laat een grotere amplitude en een iets grotere frequentie zien.

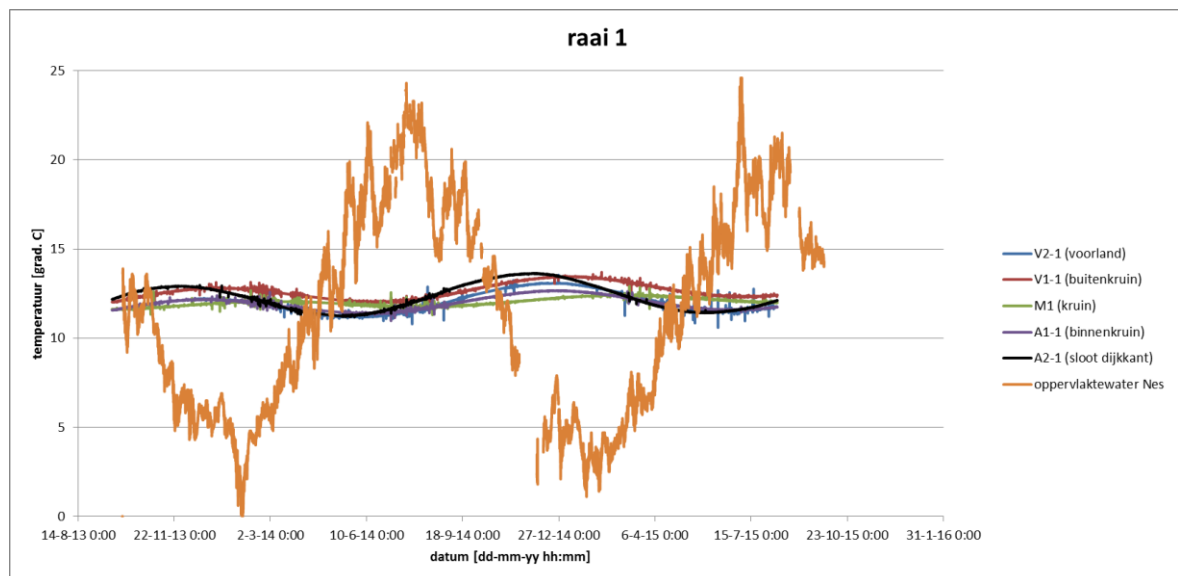
Wat verder opvalt is dat de temperatuur bij V1-1, rode lijn, circa 0,5 graad Celsius hoger ligt dan de overige sensoren. Aan de andere kant moet bedacht worden dat de meetnauwkeurigheid circa 0,2 graad Celsius is.



Figuur 7.6 Temperatuurverloop in raai 1, tussen december 2013 en augustus 2015

De temperatuur data van meetstation Nes, dat circa 6 km ten oosten ligt van km 2,4, zijn opgevraagd bij KNMI en geplot in Figuur 7.7. Dit om een beeld te krijgen van de ontwikkeling van de temperatuur van het buitenwater enerzijds en de ontwikkeling van de temperatuur van het grondwater in de ondiepe ondergrond anderzijds.

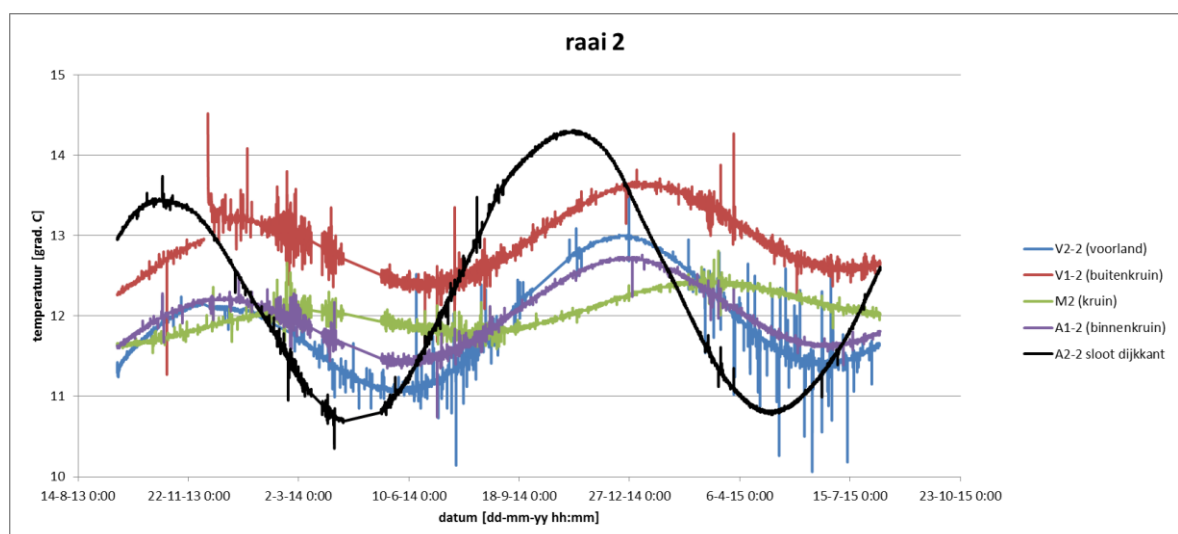
In Figuur 7.7 is te zien dat de buitenwatertemperatuur (oranje lijn) sterker fluctueert en een significant grotere amplitude heeft dan de temperatuur van het ondiepe grondwater. Ook is een tegengesteld effect te zien, het buitenwater heeft in de winter een lage temperatuur en in de zomer een hoge temperatuur, bij het grondwater in de ondiepe ondergrond is dit andersom.



Figuur 7.7 Temperatuurverloop in raai 1 met buitenwater temperatuur, tussen december 2013 en augustus 2015

In de parallel aan raai 1 gelegen raai 2 (5 m afstand ten opzichte van elkaar), is hetzelfde beeld te zien in Figuur 7.8. In raai 2 is de amplitude van A2-2, ter plaatse van de sloot aan de kant van de dijk, groter dan die van de andere sensoren, en bovendien ook groter dan in raai 1. Dit gaat om een verschil van ca. 3,5 graad Celsius tussen winter en zomerperiode. In raai 1 is dat ca. 2 graad Celsius. Echter, aan de meetresultaten van sensor A2-2 kan worden getwijfeld, omdat de amplitude groter is in tegenstelling tot de andere sensoren op dezelfde locatie als A2-2.

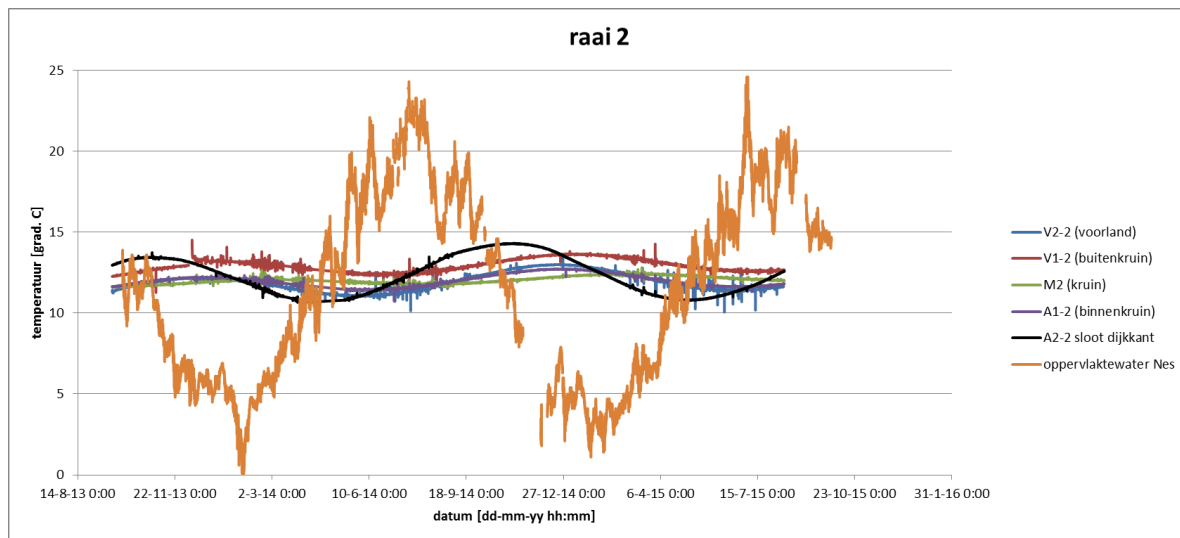
Voor de overige sensoren geldt dat de temperatuur in raai 2 gemiddeld gelijk zijn aan die in raai 1. Opvallend is wel dat de temperatuur ter plaatse van de buitenkruin (V1-2, rode lijn) gedurende de meetperiode gemiddeld hoger ligt dan de andere sensoren, in beide meetraaien. Ook ligt de temperatuur ter plaatse van de buitenkruin hoger dan die van het voorland (V2-1 en V2-2, blauwe lijn)



Figuur 7.8 Temperatuurverloop in raai 2 van voorland naar sloot dijkkant, tussen december 2013 en augustus 2015

In Figuur 7.9 is te zien in raai 2 dat de buitenwater temperatuur (meetstation Nes, ca. 6 km ten oosten van km 2,4), oranje lijn, sterker fluctueert en een significant grotere amplitude heeft dan de temperatuur van het ondiepe grondwater. Zo is een tegengesteld effect te zien, het buitenwater heeft in de winter een lage temperatuur en in de zomer een hoge temperatuur, bij het grondwater in de ondiepe ondergrond is dit andersom. Hetzelfde beeld was te zien in raai 1.

Hieruit volgt dat het ondiepe grondwater een vertraagde reactie laat zien en langzaam reageert op de temperatuurveranderingen in het buitenwater, die sterk worden beïnvloed door klimatologische veranderingen.



Figuur 7.9 Temperatuurverloop in raai 2 met buitenwater temperatuur, van december 2013 tot augustus 2015.

8 Resultaten temperatuurmetingen aan oppervlakte

8.1 Algemeen

In de projectperiode tussen december 2013 en augustus 2015 zijn op drie momenten met infraroodcamera opnamen gemaakt langs km 2.4. In de volgende paragrafen wordt een voorbeeld van het resultaat gegeven.

De meetresultaten van de drie meetmomenten zijn gecontroleerd in DDSC, waarbij gekeken is naar opvallende temperatuur uitschieters. Dit moet dan duidelijk worden in het beeld, zie ook Figuur 5.2. Het gaat om honderden beelden en om die reden zijn die beelden niet opgenomen in dit rapport.

8.2 Nulmeting 17 april 2014

De nulmeting is op 16 april 2014 uitgevoerd overdag. Op dit moment was er sprake van rustig, zonnig weer en een waterstand van maximaal NAP +1m. Op het tijdstip van de beeldopnamen is geen uittredend kwelwater waargenomen door de infraroodcamera, zie bijvoorbeeld Figuur 8.1 en Figuur 8.2.



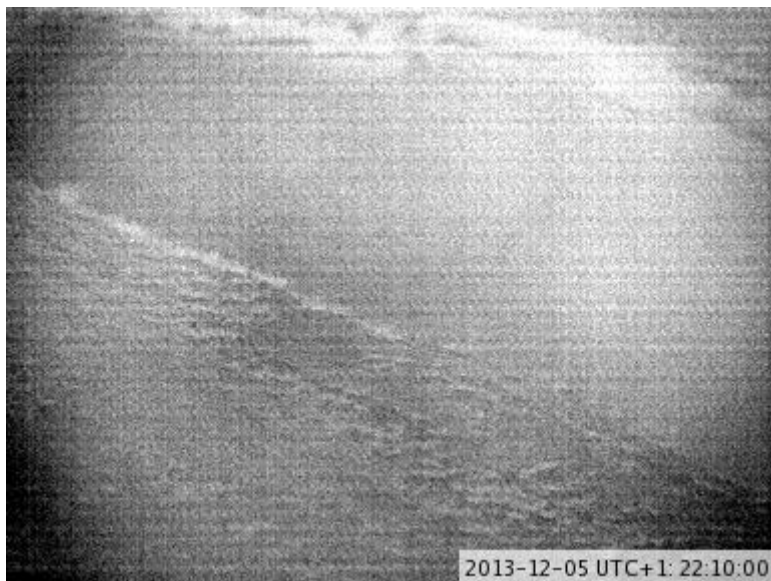
Figuur 8.1 Infraroodbeeld locatie x, genomen op 16 april 2014



Figuur 8.2 Real time beeld locatie x, genomen op 16 april 2014

8.3 Hoogwater 5/6 december 2013

Tijdens het hoogwater van 5/6 december 2013 zijn er metingen uitgevoerd met de infraroodcamera, van 21.30 uur tot 12.00 uur. Er zijn visueel geen wellen waargenomen. Met de infraroodcamera zijn ook geen opvallende temperatuurveranderingen waargenomen, wat een indicatie zou kunnen zijn van uittredend kwelwater. De opnames staan in het DDSC, in Figuur 8.3 een beeld ter illustratie en in Figuur 8.4 op dezelfde locatie, maar op een ander tijdstip (op de terugweg).



Figuur 8.3 Infraroodbeeld locatie y, genomen op 5-12-2013, 22:10 (AMEL_CP27)



Figuur 8.4 Kleurenbeeld locatie y, genomen op 5-12-2013, 12:02 (AMEL_CP27)

8.4 Hoogwater 10 januari 2015

Tijdens het hoogwater van 10 januari 2015 zijn er metingen uitgevoerd met de infrarood camera, van 23.00 uur tot 3.00 de volgende dag. Er zijn visueel geen wellen waargenomen en met de infraroodcamera zijn er geen opvallende temperatuurveranderingen waargenomen, wat een indicatie zou kunnen zijn van uittredend kwelwater.

Een voorbeeld is te zien in Figuur 8.5.



Figuur 8.5 Infraroodbeeld locatie z, genomen op 11 januari 2015, 2:43 (AMEL_CP32)

9 Waterspanningen – vergelijking met km 7,0

9.1 Algemeen

De meetresultaten op km 7,0 zijn door Witteveen en Bos gerapporteerd [5]. In dat rapport staan tevens de locatiegegevens van de sensoren op km 7,0. Binnen dat traject is, net zoals op km 2,4, een dempende invloed zichtbaar in de stijghoogten van voorland naar achterland. Op km 7,0 zijn de stijghoogten gemeten direct onder de dunne kleilaag ter plaatse van de buitenkruin, binnenkruin, insteek sloot en achterland op een diepte van circa NAP -3 m.

Voor een vergelijking met de meetresultaten van km 2,4 is gekeken naar vergelijkbare locaties waar de sensoren zijn geïnstalleerd (op circa dezelfde diepte, in dezelfde bodemlaag), dat wil zeggen, de stijghoogte metingen ter plaatse van de buitenkruin op km 2,4 worden vergeleken met die van de buitenkruin op km 7,0 enzovoort. Ter plaatse van de kruin en voorland zijn op km 2,4 wel metingen verricht, maar niet op km 7,0. De meetresultaten daarvan worden niet gepresenteerd in dit hoofdstuk, zie daarvoor hoofdstuk 6.

9.2 Storm 6 december 2013

Rond 6 december 2013 is een storm geweest, waarbij de buitenwaterstand maximaal circa NAP + 3,3 m was (bron: Rijkswaterstaat, meetstation Nes).

De meest representatieve metingen van km 2,4 zijn vergeleken met de meest representatieve metingen op km 7,0. Uit [5] volgt dat voor km 7,0 raai 2 het meest representatief is. Voor km 2,4 zijn de meest logische metingen geselecteerd uit de meetraai 1 en 2 (destijds was meetraai 3 en 4 nog niet geïnstalleerd), zodat een opvolging te zien is van buitenkruin, binnenkruin naar sloot.

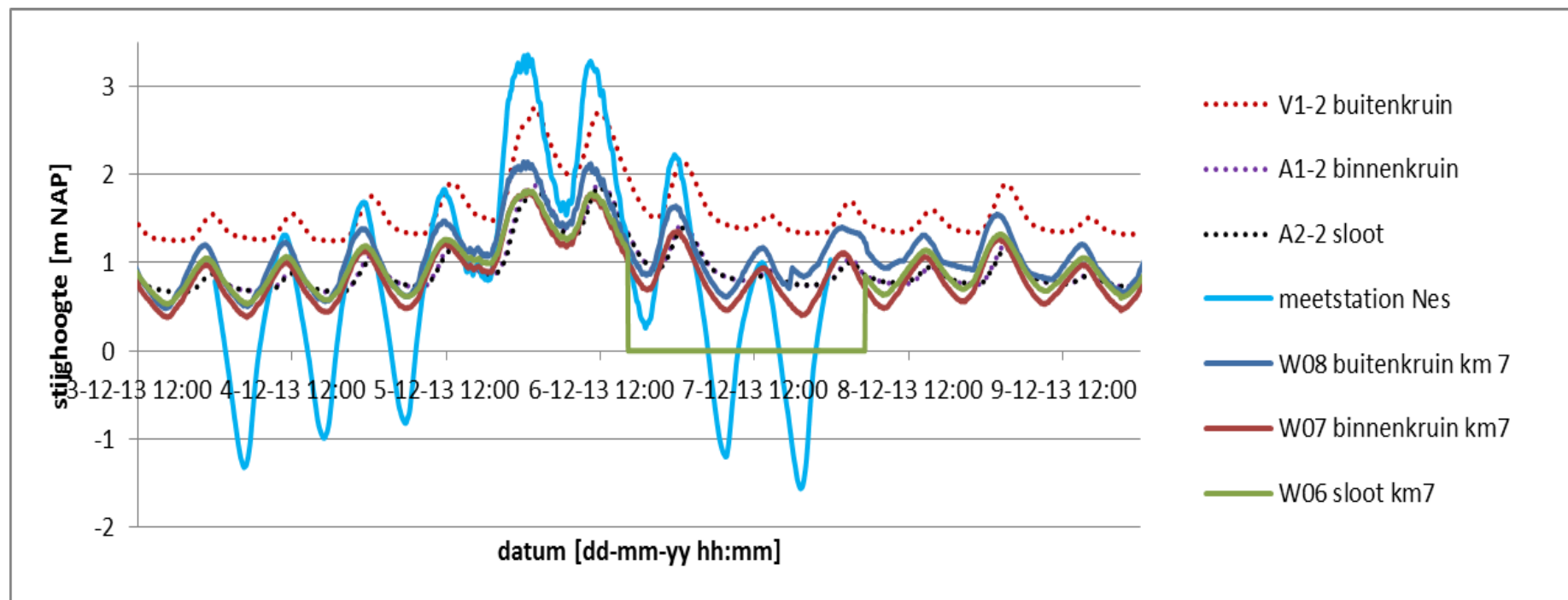
In de meetresultaten (zie Figuur 9.1) is de storm goed terug te zien in een hoge piek in de stijghoogten, op zowel km 2,4 en km 7,0, die gemiddeld circa 1 m hoger is dan in de 'rustige' voorafgaande en opvolgende tijdsperioden. Ter vergelijking, de buitenwaterstand is gemiddeld 2 m hoger.

De stijghoogten op km 2,4 en 7,0 komen ter plaatse van de insteek van de sloot en de binnenkruin redelijk overeen, de amplituden zijn iets kleiner op km 2,4 dan op km 7,0.

Ter plaatse van de buitenkruin liggen de stijghoogten op km 2,4 voor en na de storm gemiddeld iets hoger (circa 0,2 m).

Op km 7,0 zijn er enige onregelmatigheden in de metingen zichtbaar. Er wordt verwezen naar [5] voor uitleg over de metingen aldaar. De stijghoogte van het buitenwater is in de aanloop naar de storm hoger dan de stijghoogten op km 7,0.

Bekend is tevens dat de plaatsingsdieptes van meetraai 1 en 2 op km 2,4 niet nauwkeurig zijn, wat als gevolg kan hebben dat de stijghoogten in feite nog iets hoger of lager kunnen liggen. Dit is in hoofdstuk 6 besproken.



Figuur 9.1 Stijghoogten op km 2,4 (raai2) en km 7,0 (raai2) rond storm 6 december 2013

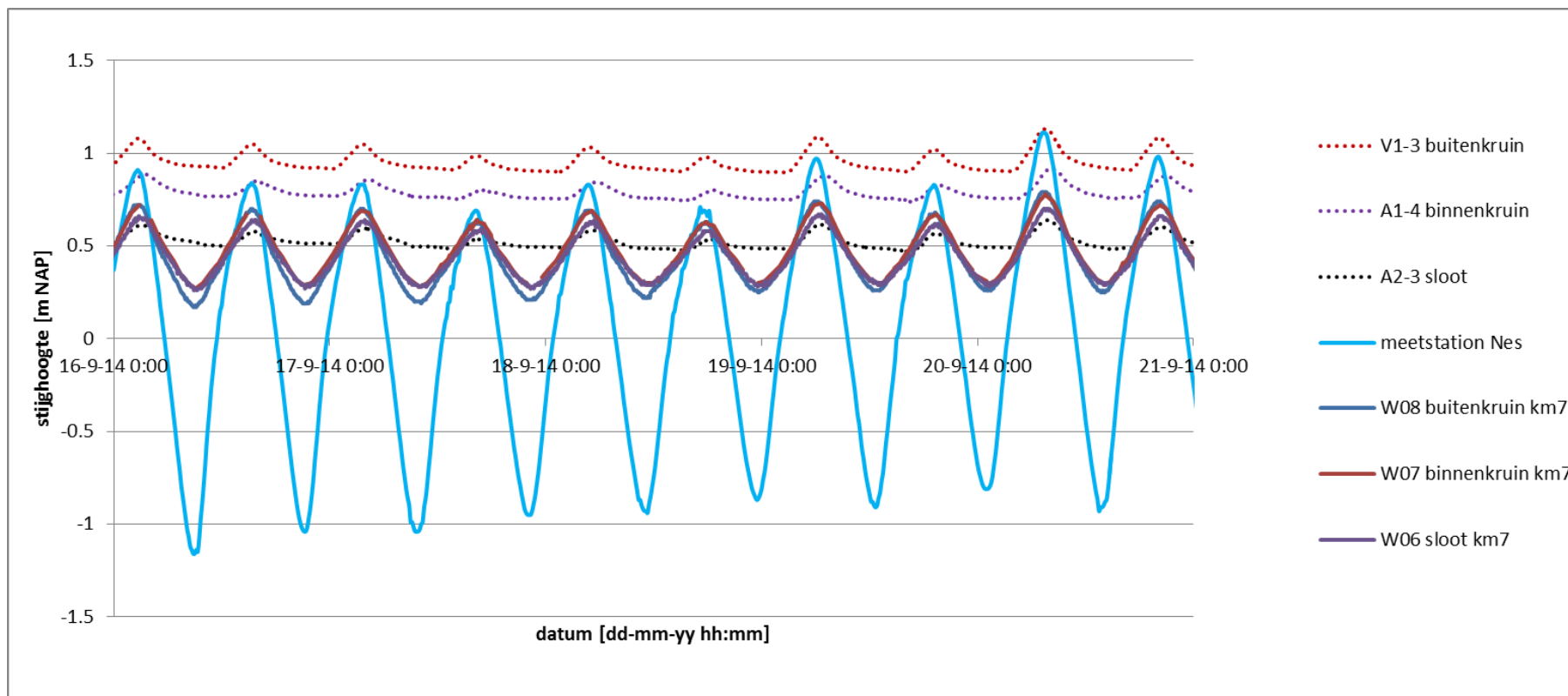
9.3 Rustige periode – medio september 2014

Van medio september 2014 zijn de meetresultaten in Figuur 9.2 weergegeven. In deze periode is geen hoogwatersituatie geweest.

De meest representatieve metingen van km 2,4 zijn vergeleken met de meest representatieve metingen op km 7,0. Uit [9] volgt dat voor km 7,0 raai 2 het meest representatief is. Voor km 2,4 zijn de meest logische metingen geselecteerd uit de meetraai 3 en 4.

Duidelijk is te zien dat de stijghoogten op km 2,4 gemiddeld hoger liggen dan de stijghoogten op km 7,0. Opmerkelijk is dat de amplitude op km 2,4 kleiner is dan de amplitude op km 7,0 (circa driemaal kleiner; terwijl dit tijdens de storm vergelijkbaar was – zie voorgaande paragraaf). Ter plaatse van de insteek van de sloot (sensor W06 en A2-3) is de gemiddelde stijghoogte op km 2,4 vergelijkbaar met km 7,0, wel met een flink kleinere amplitude.

Wat betreft de stijghoogte van het buitenwater, deze is hoger op piekmomenten dan de stijghoogten op km 7,0, maar lager dan de buitenkruin stijghoogten van km 2,4.



Figuur 9.2 Stijghoogten op km 2,4 (raai 3, 4) en op km 7,0 (raai 2) van 16-9-2014 tot 21-9-2014

9.4 Storm 22 oktober 2014

Rond 22 oktober 2014 is een storm geweest, waarbij de buitenwaterstand maximaal NAP +3,1 m bereikte (bron: Rijkswaterstaat, meetstation Nes).

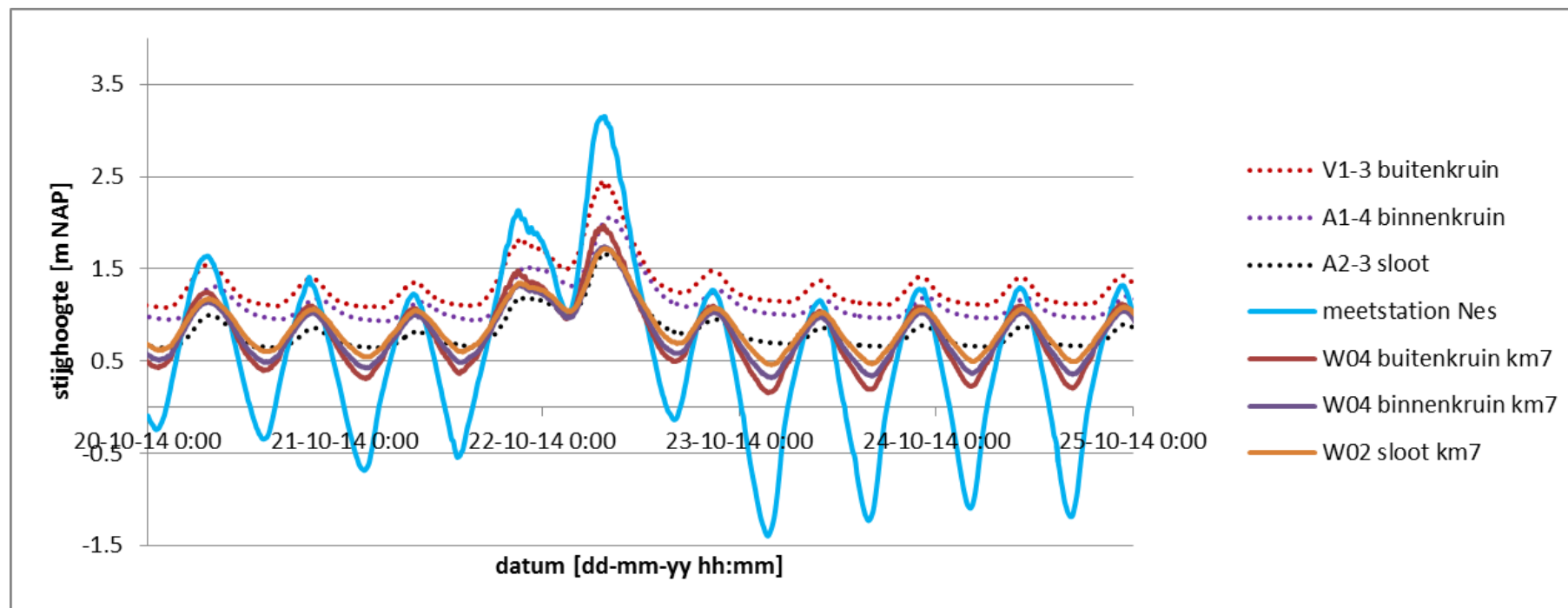
De meest representatieve metingen van km 2,4 zijn vergeleken met de meest representatieve metingen op km 7,0. Uit [9] volgt dat voor km 7,0 raai 1 het meest representatief is. Voor km 2,4 zijn de meest logische metingen geselecteerd uit de meetraai 3 en 4.

In de meetresultaten (zie Figuur 9.3) is de storm goed terug te zien in een hoge piek in de stijghoogten, op zowel km 2,4 en km 7,0. De stijghoogte is gemiddeld circa 0,7 m hoger dan in de rustige voorafgaande en opvolgende perioden (ter vergelijking, de buitenwaterstand is gemiddeld circa 2 m hoger).

De stijghoogten op km 2,4 en 7,0 komen ter plaatse van de insteek van de sloot overeen. Ter plaatse van de binnenkruin en buitenkruin liggen de stijghoogten op km 2,4 tijdens de storm iets hoger (circa 0,1 tot 0,2 m).

Direct voor en na de storm laten de stijghoogten hetzelfde patroon zien als in de rustige perioden, namelijk dat op km 2,4 de stijghoogten gemiddeld hoger liggen dan de stijghoogten op km 7,0 (behalve ter plaatse van de insteek van de sloot).

Daarnaast is te zien dat in de aanloop naar en na de storm de stijghoogte van de buitenkruin op km 2,4 iets hoger is dan de stijghoogte van het buitenwater (tijdens sommige tijdsmomenten). Voor de overige sensoren geldt dat deze lager is dan de stijghoogte van het buitenwater.



Figuur 9.3 Stijghoogten op km 2,4 (raai 3,4) en op km 7,0 (raai 1) rond storm 22 oktober 2014

9.5 Storm 11 januari 2015

Rond 11 januari 2015 is een storm geweest, waarbij de buitenwaterstand maximaal NAP +3,1 m bedroeg (bron: Rijkswaterstaat, meetstation Nes).

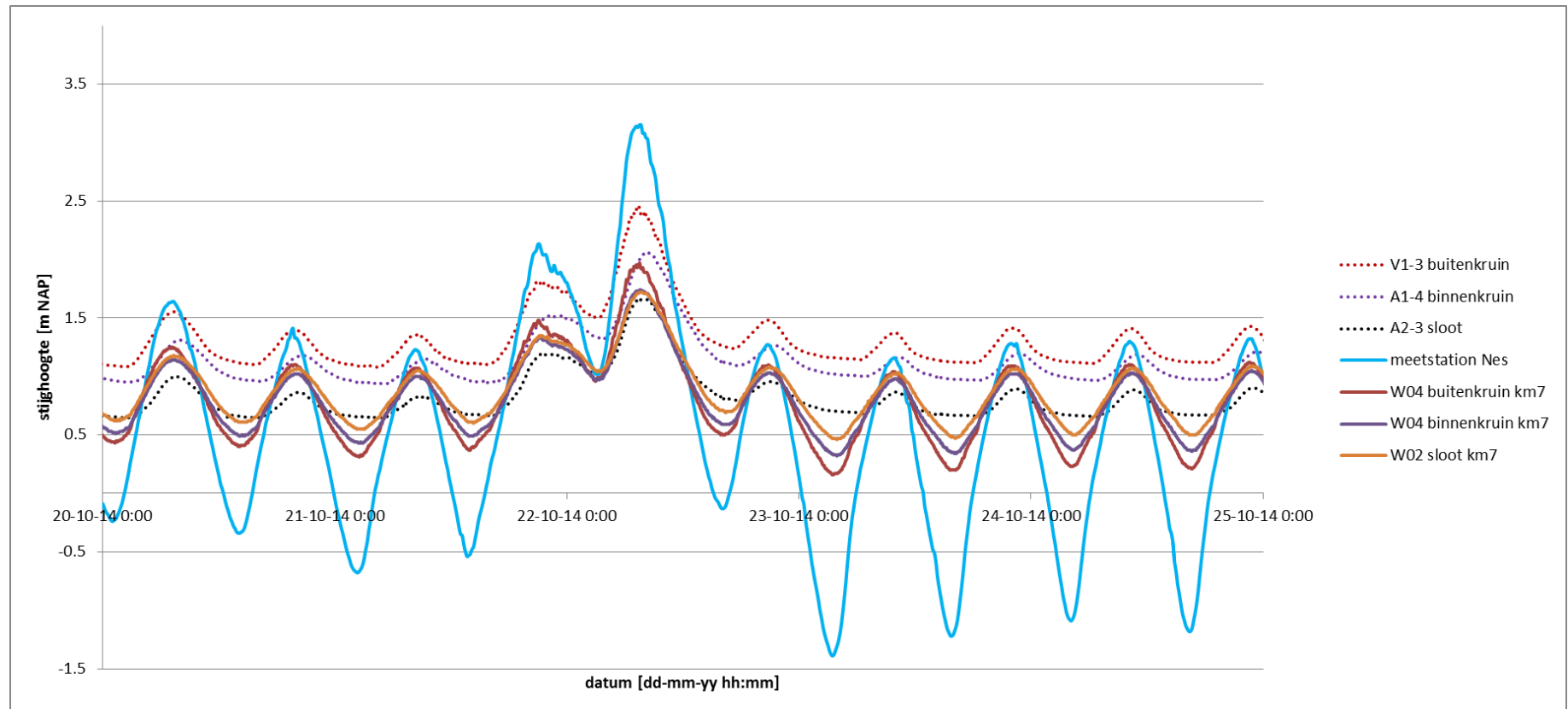
De meest representatieve metingen van km 2,4 zijn vergeleken met de meest representatieve metingen op km 7,0. Uit [10] volgt dat voor km 7,0 raai 1 het meest representatief is. Voor km 2,4 zijn de meest logische metingen geselecteerd uit de meetraai 3 en 4.

In de meetresultaten (zie Figuur 9.4) is de storm goed terug te zien in een hoge piek in de stijghoogten, op zowel km 2,4 en km 7,0. De stijghoogte is gemiddeld circa 0,7 m hoger dan in de rustige voorafgaande en opvolgende perioden (ter vergelijking, de buitenwaterstand is gemiddeld circa 2 m hoger).

De stijghoogten op km 2,4 en 7,0 komen ter plaatse van de insteek van de sloot overeen. Ter plaatse van de binnenkruin en buitenkruin liggen de stijghoogten op km 2,4 tijdens de storm iets hoger (circa 0,1 tot 0,2 m).

Direct voor en na de storm laten de stijghoogten hetzelfde patroon zien als in de rustige perioden, namelijk dat op km 2,4 de stijghoogten gemiddeld hoger liggen dan de stijghoogten op km 7,0 (behalve ter plaatse van de insteek van de sloot).

Daarnaast laat de figuur zien dat de stijghoogte van de buitenkruin iets hoger is in de aanloop naar en na de storm, dan de stijghoogte van het buitenwater (tijdens sommige tijdsmomenten). Voor de overige sensoren geldt dat de stijghoogte lager is dan de stijghoogte van het buitenwater.



Figuur 9.4 Stijghoogten op km 2,4 (raai 3,4) en op km 7,0 (raai 1) tijdens storm 11 januari 2015

10 Discussie

10.1 Waterspanningen km 2,4

10.1.1 Aantal meetraaien

Er zijn vier meetraaien in plaats van twee meetraaien geplaatst op km 2,4. In het rapport van Fugro [7] wordt uitgelegd wat de redenen zijn. De diepte op meetraai 1 en 2 is niet nauwkeurig en geschat. Wanneer wordt gekeken naar de meetresultaten, lijken deze over het algemeen niet ernstig af te wijken met de meetresultaten van meetraai 3 en 4. Aangezien een nauwkeurige diepte essentieel is voor een goede analyse van de waterspanningen, is gekozen om de resultaten van meetraai 3 en 4 te bekijken, met uitzondering van de storm van 6 december 2013.

10.1.2 Afwijking sensor A1-3 en V1-4

Sensor A1-3 en V1-4 lijken hogere meetresultaten te geven dan is te verwachten, aan de hand van de meetresultaten van de andere sensoren op dezelfde locatie (in alle vier de meetraaien).

Daarop is opnieuw gekeken naar de diepte van deze sensoren. In Bijlage B is te zien dat de meetresultaten in het voorland redelijk overeenkomen, terwijl er toch een diepteverschil van bijna 1 m is tussen V2-1 en V2-4. Voor locatie V1, buitenkruin geldt, dat de meetresultaten van V1-4 niet overeenkomen met de andere drie sensoren op dezelfde locatie. De diepte van V1-4 is NAP -6,37 m, terwijl de diepte van de overige sensoren eerder bij NAP -5 m in de buurt liggen. Wanneer wordt gekeken naar locatie M, kruin, lijken de meetresultaten weer meer in lijn te liggen, terwijl het plaatsingsdiepte verschil circa 1 m is tussen sensor M1 en M4 (dit mondt uit in stijghoogteverschil van circa 0,5 m).

Voor locatie A1, binnenkruin geldt dat A1-3 circa 1 m hoger ligt dan de overige sensoren op deze locatie, terwijl de plaatsingsdieptes minder dan 0,5 m verschillen. Ter plaatse van de sloot, locatie A2, liggen de meetresultaten redelijk overeen, met grote verschillen in plaatsingsdieptes. Dit betekent dat de oorzaak van de afwijkingen niet alleen in de plaatsingsdieptes kan worden gezocht.

Wanneer wordt gekeken naar het geotechnisch profiel en de geologie van Ameland is duidelijk dat de ondiepe ondergrond bij Ameland bestaat uit afwisselende klei/leem laagjes met zandlaagjes er tussen, er is geen eenduidig beeld (wadafzettingen). In het geotechnisch profiel zijn niet alle aanwezige klei/leemlaagjes geïdentificeerd.

Wanneer de waterspanning wordt gemeten onder of naast zo'n klei/leemlaagje, betekent dat de waterdrukken op deze specifieke locatie iets hoger kunnen oplopen. Dit zorgt dan voor een hoger gemeten stijghoogte. Wanneer dan gekeken wordt naar de geografische ligging van V1-4, dan blijkt dat deze circa 3 m hemelsbreed verder ligt dan de andere sensoren met dezelfde locatie codering (V1-1, V1-2, V1-3). Voor A1-3, blijkt deze pal naast A1-1 te liggen, terwijl de meetresultaten niet overeenkomen, sensor A1-1 ligt meer in lijn met sensor A1-2 en A1-4. Dit betekent dat er een andere oorzaak mee moet spelen, dan alleen het plaatselijk aanwezig zijn van een klei/leemlaagje. Volgens Fugro [7] zijn er geen aanwijzingen dat een meetinstrument in de kleilaag zit.

Mogelijk speelt een klein defect in de meetinstrumentatie mee. In 2013 is tijdens een locatiebezoek tijdens de installatie van de waterspanningsmeters geconstateerd dat er niet voldoende volgens protocol werd gewerkt op een momentopname, zie daarvoor ook [8]. Later bij het installeren van meetraai 3 en 4 (waaronder sensoren A1-3 en V1-4), is geen toezicht geweest en is onbekend of volgens protocol is gewerkt. In 2013 werd gesproken over het niet

goed ontluichten van de sensoren en twijfels over het voldoende verzadigen. Mogelijk kan dit ook het geval zijn geweest bij het installeren van meetraai 3 en 4 en hebben bijgedragen aan 'te hoge' meetwaarden van sensoren A1-3 en V1-4. Of dit werkelijk een medeoorzaak is geweest, is moeilijk te achterhalen, aangezien de meetraaien ten tijde van het opstellen van dit rapport al zijn ontmanteld in het kader van de dijkversterkingswerken.

10.1.3 Stijghoogten hoger dan stijghoogte buitenwater

Duidelijk is geworden uit de analyse dat de stijghoogten ter plaatse van het voorland en soms ter plaatse van de buitenkruin op km 2,4 hoger liggen dan de stijghoogten van het buitenwater. Dit is tijdens sommige tijdsperioden het geval. In het midden van de storm zelf, is de stijghoogte van het buitenwater hoger dan de stijghoogten ter plaatse van het voorland/buitentalud. Dit fenomeen is niet terug te zien in de metingen bij km 7,0. Het belangrijkste verschil tussen deze trajecten is de aanwezigheid van een diepe geul voor de kust bij km 7,0.

Bekend is uit onderzoek in het verleden [12] dat er sprake kan zijn van interne setup in het voorland/buitentalud van de dijk. Dit houdt in dat golfaanvallen ervoor zorgen dat de interne grondwaterniveau in de dijk een toename en een afname in sinusvorm laat zien. Wanneer het buitenwater niveau zakt, zakt het waterniveau in de dijk niet geheel mee. Er blijft dan een hogere waterdruk over in de dijk, deze neemt wel tegelijkertijd af met de waterdruk van het buitenwater, maar er blijft dus een iets hogere waterdruk aanwezig ter plaatse van het voorland/buitentalud. Voor Ameland zal dit in de orde van 0,1 tot 0,3 m stijghoogte verschil zijn.

Stel dat aangenomen wordt dat er inderdaad sprake is van interne berging, dan verklaard dit mede de hogere stijghoogten ter plaatse van het voorland. Ter plaatse van het buitentalud is dit verschil kleiner. Op locatie km 7,0 is alleen gemeten ter plaatse van het buitentalud en daar is dan ook geen interne berging terug te zien in de meetresultaten.

Bovendien is op locatie km 7,0 een dieper insnijdende geul aanwezig, waardoor de drukken in de voor piping maatgevende zandlaag sterker gedomineerd worden door de drukken in de geul. Er vindt vanuit die geul vermoedelijk veel instroming plaats naar de zandlaag, dat zorgt er voor dat er nauwelijks interne setup zichtbaar is op die locatie.

Het verschil in stijghoogte is geringer dan de metingen laten zien, dus er moeten meerdere oorzaken mee spelen.

Vermoedelijk speelt de plaatsingsdiepte mee, dat deze niet nauwkeurig genoeg is bepaald in raai 3 en 4 ter plaatse van voorland/buitenkruin.

Ook kan mogelijk de driedimensionale grondwaterstroming een rol spelen in de wat hogere stijghoogten op km 2,4 voor het voorland/buitenkruin.

De grotere amplitudes op locatie km 7,0 dan op km 2,4 worden dan waarschijnlijk veroorzaakt door de verminderde weerstand in de geul.

Dit zou nader onderzocht kunnen worden, maar is voor het doel van dit rapport minder van belang.

10.2 Ondiepe temperatuurmetingen

Ondiepe temperatuurmetingen kunnen aanvullende informatie geven over de grondwaterstroming. Tijdens de doorstroming past de temperatuur van het grondwater zich ten

dele aan de omgevingstemperatuur aan – hoe sneller het water stroomt, hoe minder sprake is van aanpassing. Hiermee zouden preferente stromingsbanen gevonden kunnen worden; pipes vormen daar een extreme vorm van.

Uit de resultaten volgt dat het ondiepe grondwater een vertraagde reactie laat zien en langzaam reageert op de temperatuurveranderingen in het buitenwater, die sterk worden beïnvloed door klimatologische veranderingen. Dat buitenwater infiltreert aan buitendijkse zijde en zal de temperatuur afgeven aan de omgeving, waardoor het grondwater ter plaatse van de kruin (midden onder de dijk) minder warm/koud is dan het geïnfiltreerde water ter plaatse van de buitenkruin.

Vervolgens is te zien dat de temperatuur van het grondwater ter plaatse van de binnenkruin nog meer afneemt (wel met dezelfde amplitude en frequentie), om bij de sloot weer sterk te fluctueren en een snellere respons heeft.

Het is bekend dat grondwaterstroming in 3D richting verplaatst en niet puur in 2D richting. Wanneer gekeken wordt naar de 2D patroon, is de verwachting dat de temperatuur ter plaatse van de sloot juist gedempter is dan ter plaatse van de kruin. Dit was niet het geval. Daaruit blijkt dat het grondwater zo langzaam moet stromen dat convectie dominant is en niet advection.

Het water in de sloot kan de omgevingstemperatuur aannemen, die sterk fluctueert (net als dat van buitenwater). Vermoedelijk infiltreert het slootwater richting de dieper gelegen sensor (A2-1 en A2-2) en kan plaatselijk de kleilaag ontbreken, waardoor het grondwater bij sensor A2-1 en A2-2 sterk fluctueert, sterker dan bij de overige sensoren. Hierbij is dan vanuit gegaan dat de kleilaag in het voorland afwezig is, zodat het buitenwater kan infiltreren in de maatgevende (voor piping) zandlaag.

Om hier zekerheid over te krijgen is nader onderzoek nodig. Voor een driedimensionaal beeld zijn meerdere raaien nodig en is een groter studiegebied belangrijk. Echter, wanneer slootwater infiltreert naar het dieper gelegen zandpakket, betekent dit nog niet meteen risico voor piping, aangezien er dan ook zandtransport plaats moet vinden hetgeen een sterke grondwaterstroming vereist. Dit is niet gedetecteerd en bovendien is uit de toetsing [3] gebleken dat dit traject voldoet, er is voldoende kwelweglengte aanwezig.

Aan de andere kant is de vraag te stellen of deze ondiepe temperatuurmetingen geschikt zijn als 'snelle' detectiemaatregel voor piping, aangezien voor het optreden van piping, naast een veranderend grondwaterstromingspatroon ook zandtransport nodig is. Dit is niet alleen af te leiden uit temperatuurveranderingen. Wel is het geschikt als ondersteunende maatregel, eventueel nader uitgewerkt in 3D beeld. Zeker omdat is gebleken dat de temperatuur van het grondwater zich langzaam aanpast aan de buitenwatertemperatuur, de vertraging is in weken/maanden in deze situatie waar piping niet van belang blijkt te zijn. Wanneer er wel sprake is van piping zou dit ook moeten zijn op te sporen met temperatuursveranderingen, zoals elders wel is gebleken.

10.3 Temperatuur aan oppervlakte

Uit de drie meetmomenten tussen december 2013 en augustus 2015 met de infraroodcamera zijn er geen duidelijke verschillen in de temperatuur waargenomen. InTech heeft alle beelden gecontroleerd en Deltares heeft dit steekproefsgewijs gedaan, het gaat om honderden beelden. Wanneer er wel wat waarneembaar zou moeten zijn, zou dit terug moeten te zijn zien zoals in voorbeeld Figuur 5.2. Dit was niet het geval.

Vooraf was dit verwacht, aangezien de kans dat piping optreedt op dit traject klein werd geacht (het traject rond km 2,4 was goedgekeurd op het faalmechanisme piping op basis van Sellmeijer II, [3]). Tijdens twee stormen is gecontroleerd of dit klopte. Dit betekent dat de infrarood metingen ondersteunend zijn en geschikt zijn als voortijdig waarschuwingssysteem, mits de beelden per direct beschikbaar zijn.

Dat was binnen dit project niet het geval, ook bleken de beelden lastig te bestuderen in het DDSC. Als dit verbeterd kan worden, lijkt de infraroodcamera potentieel geschikt als snelle detectiemaatregel.

10.4 Synergie km 2,4 en km 7,0

Voor het tonen van de invloed van de geul voor de kust op km 7,0 zijn de stijghoogten van km 2,4 en km 7,0 over elkaar gelegd van vier verschillende tijdsperioden, waaronder drie stormen. Daarin is te zien dat de stijghoogten iets verschillen.

Duidelijk is dat de stijghoogten op km 2,4 gemiddeld hoger liggen dan op km 7,0 en dat de amplitudes van de stijghoogten op km 2,4 onder dagelijkse omstandigheden kleiner (circa driemaal) zijn dan op km 7,0. Er zijn geen noemenswaardige faseverschillen.

Dit geeft een indicatie dat op km 7,0 een verminderde weerstand aanwezig is. Deze verminderde weerstand wordt vermoedelijk veroorzaakt door de geul die vlak voor de kust ligt bij km 7,0, deze is namelijk niet aanwezig op km 2,4.

Het resultaat is al eerder in concept besproken in de workshop van november 2014 met de opdrachtgever. De analyse uit dit rapport verandert de conclusies die in november 2014 zijn gedaan niet. Het betekent dat de metingen op km 2,4 de metingen op km 7,0 ondersteunen. Voor km 7,0 is al geconcludeerd dat de weerstand bij hoogwater in rekening kan worden gebracht en dat daarmee traject km 6,8 – 7,1 voldoet voor het faalmechanisme piping.

11 Conclusie

11.1 Algemeen

De bedoeling is dat met Livedijk Ameland de volgende doelstellingen worden behaald:

1. Monitoren van de dijk op km 2,4, met als doel vroegtijdig te kunnen waarschuwen wanneer pipingrisico optreedt (totdat de dijk verbeterd is).
2. Monitoring op traject km 6,8-7,1 ondersteunen, zodat het effect van het voorliggende wad op de intreeweerstand duidelijk wordt.
3. Het leveren van aanvullende lokale ondergrondinformatie door inzet van infrarood camera/temperatuurmetingen aan oppervlak (detecteren uittredend grondwater) en temperatuurmetingen op diepte (detecteren veranderingen in grondwaterstroming). Dit ten behoeve van het optimaliseren van de eventuele versterkingsmaatregelen.

Per monitoringsinstrument worden apart de conclusies genoemd in de volgende paragrafen.

11.2 Waterspanningen en synergie met km 7,0

- Waterspanningsmetingen op km 2,4 laten zien dat er een dempende trend is, van metingen ter plaatse van het voorland richting het achterland. Dit is in de lijn met de verwachting en komt overeen met de metingen op km 7,0.
- Duidelijk is dat de metingen op km 2,4 gedempter en gemiddeld hoger zijn dan op km 7,0. Dit betekent dat de metingen op km 7,0 een verminderde weerstand, vermoedelijk veroorzaakt door de geul, weergeven.
- Niet duidelijk is waarom de stijghoogten in het voorland/buitenkruin op km 2,4 iets hoger liggen dan de buitenwaterstand zelf. Hiervoor is nader onderzoek nodig.
- Vanuit het onderzoek bij km 7,0 is al geconstateerd dat de situatie daar dankzij de inzichten uit de aanvullende monitoring voldoet voor wat betreft piping. De dijk bij km 2,4, die al voldeed aan de eisen, heeft zodoende nog wat meer reserve voor dit faalmechanisme.
- De innovatieve monitoring op km 2,4 (Livedijk Ameland) ondersteunt de meetresultaten op km 7,0. De temperatuurmetingen aan oppervlakte met infraroodcamera tijdens twee stormen laten zien dat er binnendijs geen wateraanvoer via preferente stroombanen aanwezig was gedurende betreffende stormen. Dit betekent dat er ook geen sprake was van een pipingproces, dat immers zou moeten starten aan de binnendijkse zijde. Daarnaast laten de ondiepe temperatuurmetingen zien dat het buitenwater zich langzaam beweegt door de dijk heen in de voor piping maatgevende zandlaag. Dit betekent dat de innovatieve monitoring op km 2,4 de resultaten op km 7,0 nog sterker ondersteunen, dan alleen de waterspanningsmetingen op km 2,4. Deze constatering geven geen garanties voor wat er bij maatgevend hoogwater zou kunnen gebeuren, maar de vereiste veranderingen zijn vrij groot terwijl de opgetreden stormen al betrekkelijk fors waren.

11.3 Ondiepe temperatuurmetingen

- De temperatuurmetingen geven aan dat de temperatuur circa een kwart seizoen achterloopt ten opzichte van het buitenwater temperatuur. Dit betekent dat de temperatuurveranderingen onder de dijk, in de ondergrond, zich langzaam aanpassen en er kennelijk geen preferente grondwaterstromingsbanen zijn, laat staan pipingkanaaltjes, ter plaatse van de meetraaien.

- De kleine variatie in de metingen ter plaatse van de kruin, geven aan dat er geen duidelijke conclusie mogelijk is over de grondwaterstroming, zonder dat de 3D situatie in beschouwing wordt genomen.

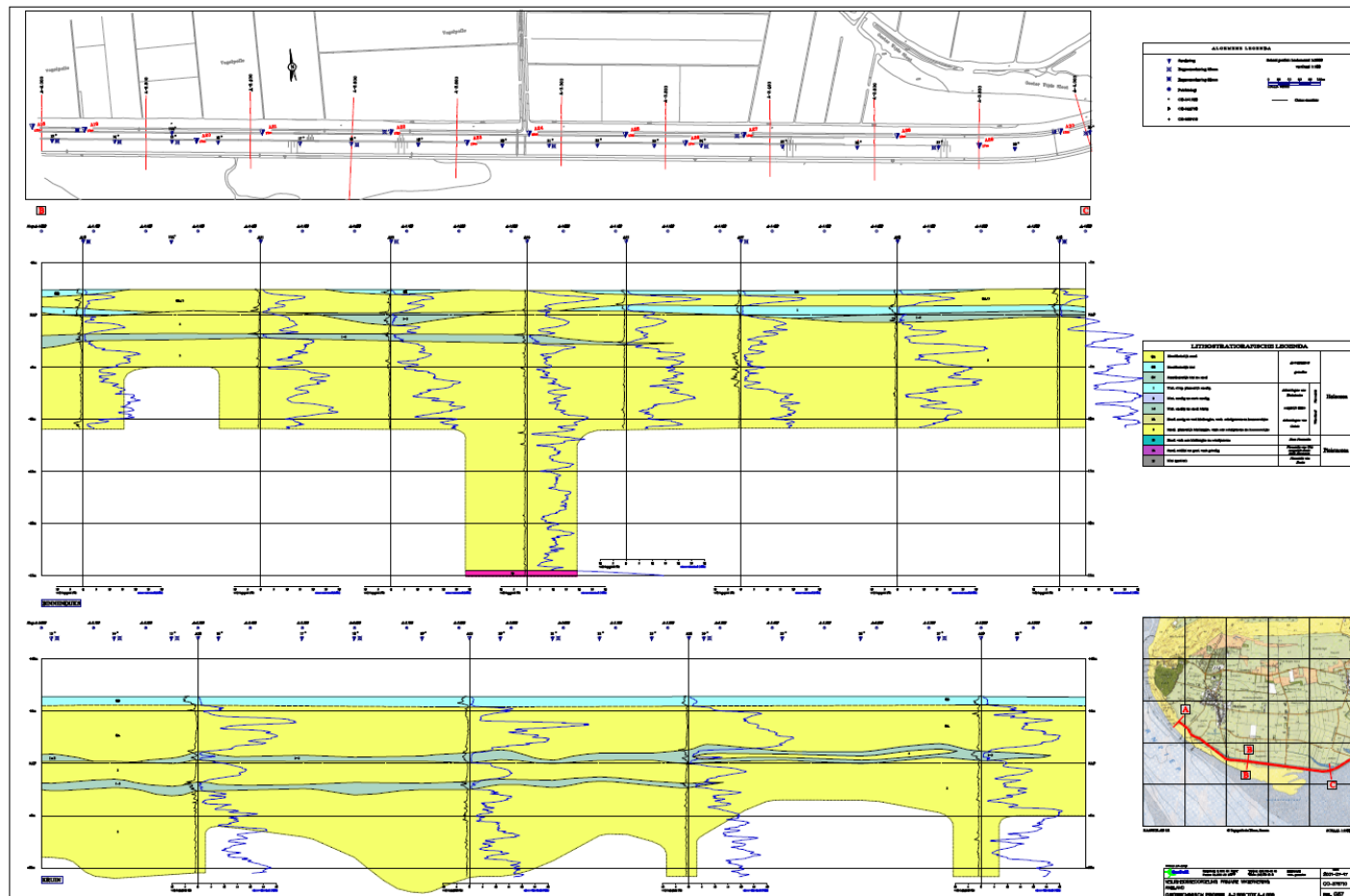
11.4 Temperatuurmetingen aan oppervlakte

- De temperatuurmetingen aan het oppervlak geven aan dat er geen uittredend kwelwater was gedurende drie perioden, waaronder gedurende twee stormen waarbij de buitenwaterstand hoger was dan NAP +3,0 m.
- Als monitoringsmaatregel lijken de temperatuurmetingen aan oppervlakte geschikt te zijn met een mobiele installatie. Een kanttekening is dat de dataverwerking vrijwel meteen moet gebeuren, om tijdig maatregelen te kunnen nemen indien uittredend kwelwater wordt gedetecteerd.

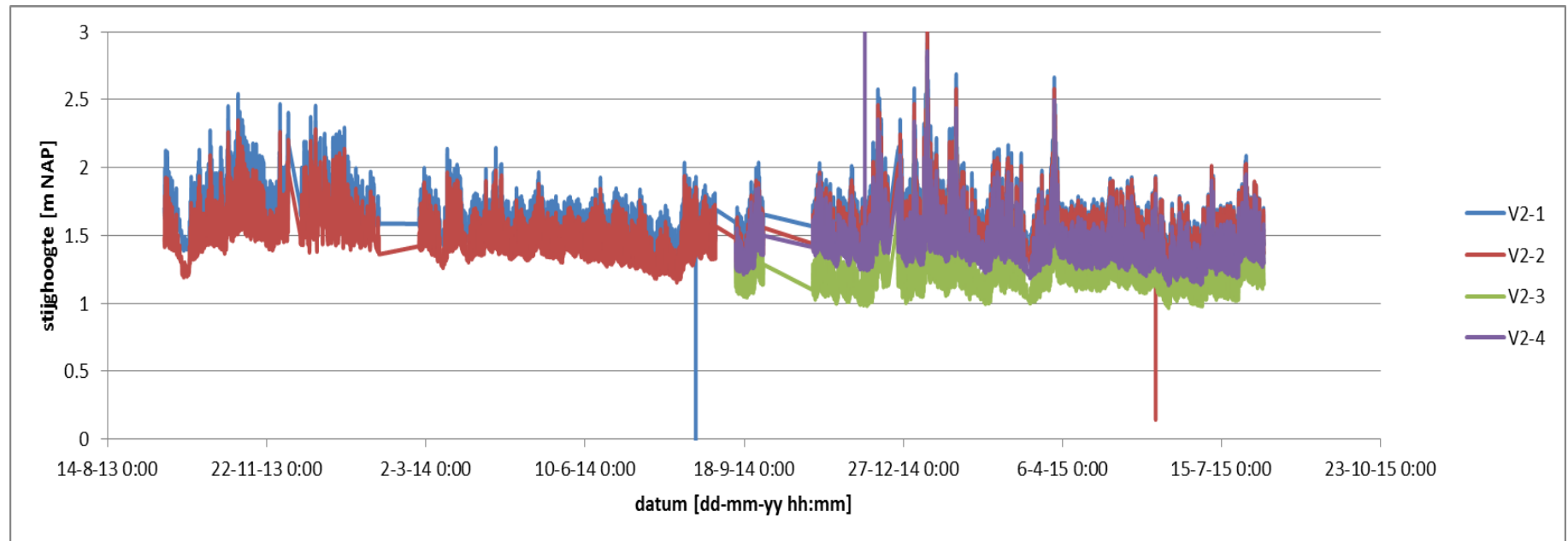
Literatuur

- [1] Duinen, T.A. van. (dec 2003) *Veiligheidsbeoordeling Waddenzeedijk Ameland*. Deltares. Projectnr. CO-376710-0482.
- [2] Duinen, T.A. van. (nov 2003) *Toetsing Waddenzeedijk Ameland, Gedetailleerde toets Piping en Microstabiliteit*. Deltares. Projectnr CO-376710-484.
- [3] Luijendijk, M.S. (2011) *Toetsing vigerende en nieuwe pipingregel op Ameland*. Deltares. Kenmerk 1204707-000-GEO-0007.
- [4] Geotechnisch onderzoek langs de dijk nabij Nes (Ameland). Fugro GeoServices B.V. Geo Advies Noord Nederland. Opdrachtnummer: 5011-0275-000
- [5] Bouw, R. (mrt. 2015) *Waddenzeedijk Ameland Monitoringsproef km 6,8 – km 7,1. Onderzoeksrapport*. Witteveen en Bos. Projectcode AME5-4/15-004.993.
- [6] Förster, U., e.a. (2012) *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen (2012)*, Deltares. Kenmerk 1202123-003-GEO-0002.
- [7] Hogervorst, F. (2015) *Meetrapport waterspanning en temperatuur Ameland km 2,4*. Fugro GeoServices B.V. Projectnr: 5013-0189-010. Eindrapportage, 23/12/2015.
- [8] Peters, D. (2013) *Kwaliteitstoezicht installatie waterspanningsmeters*. Deltares memo, 11 september 2013.
- [9] Boersma, J.H. (2015) *Datacontrole 18 augustus tot 16 november 2014*. Witteveen en Bos. AME5-4/15-000.131, 6 januari 2015.
- [10] Boersma, J.H. (2015) *Datacontrole 16 november 2014 tot 1 april 2015*. Witteveen en Bos. AME5-4/15-007.966, 12 mei 2015.
- [11] Luijendijk, M.S. (2013) *Monitoringsplan Livedijk Ameland*. Deltares rapport, kenmerk 1206727-000-GEO-0003, januari 2013.
- [12] Barends, F.B.J., van Hoven, A. (2007) *Internal setup in porous dams and dikes*. Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (pp. 821-826

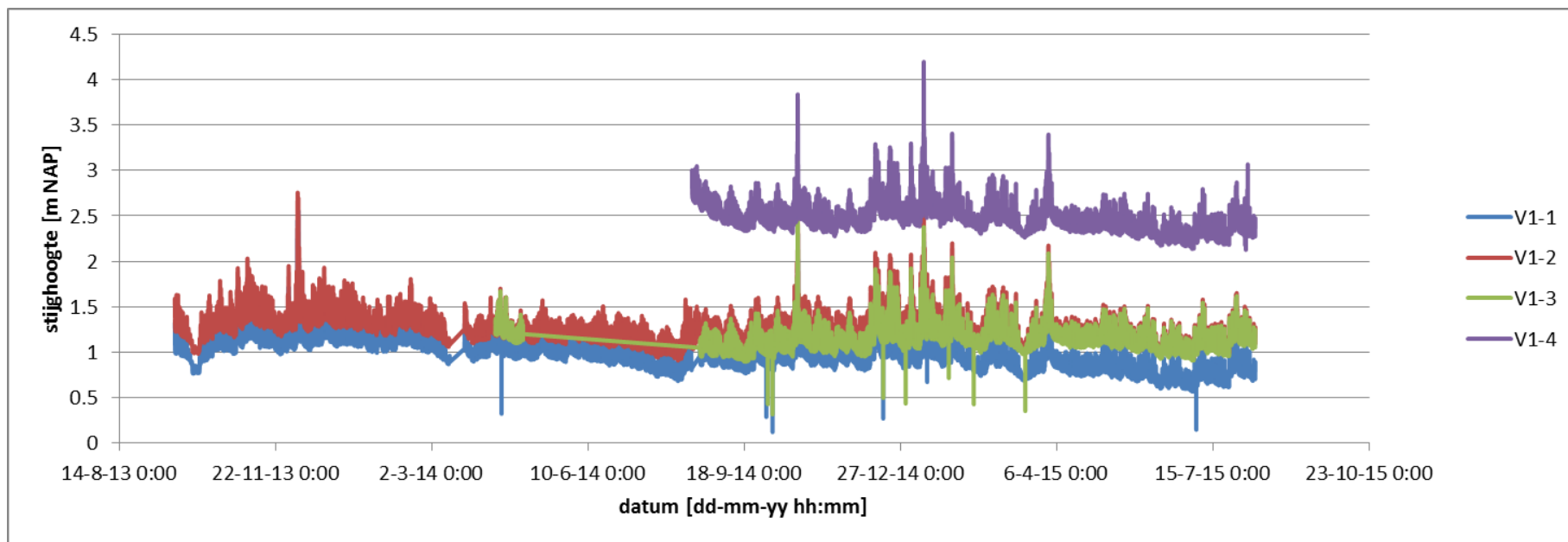
A Geotechnisch profiel km 2,4 (uit 2001, GeoDelft CO-376710)



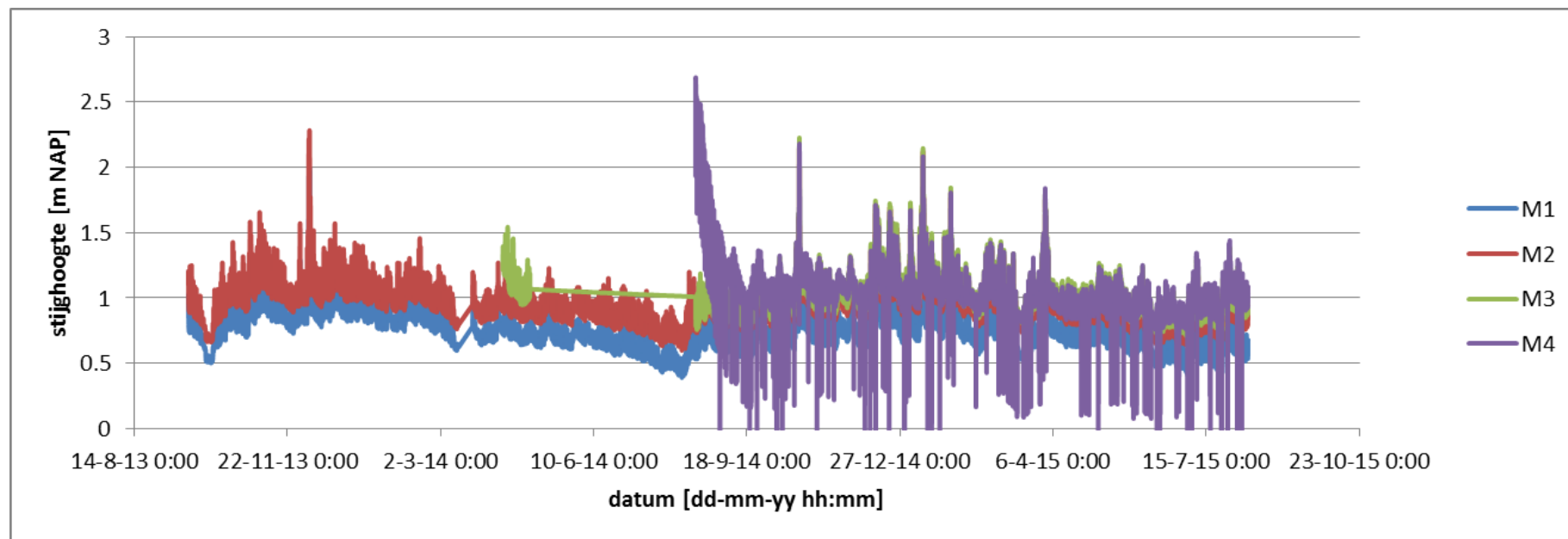
B Waterspanningen gedurende meetperiode dec 2013 – aug 2015 per locatie



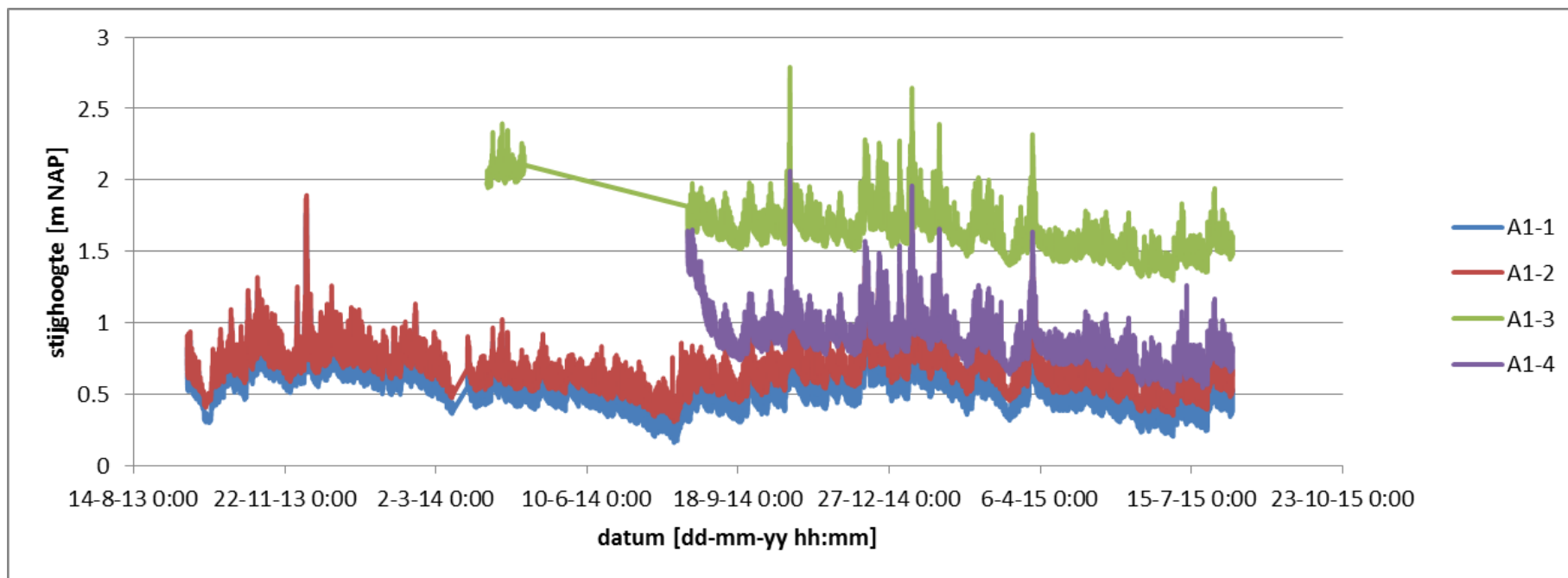
Figuur B.1 Stijghoogte locatie V2, voorland



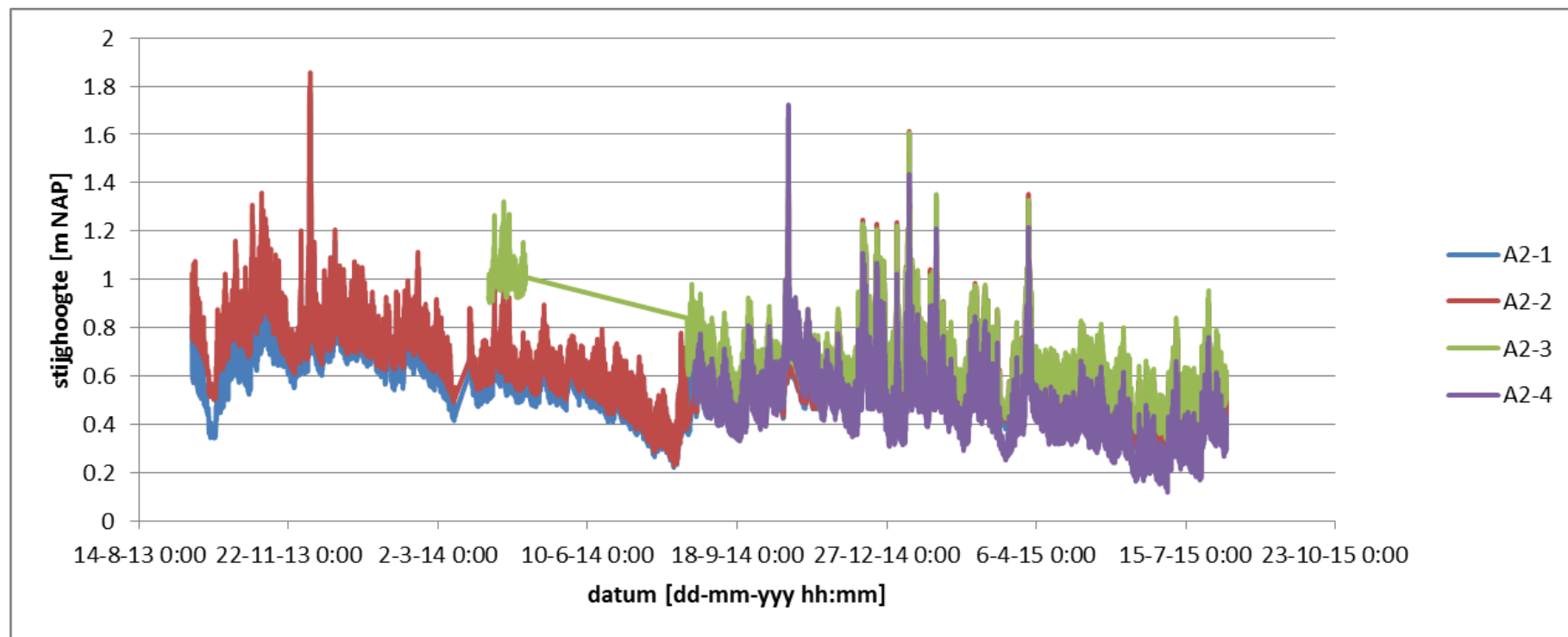
Figuur B.2 Stijghoogte locatie V1, buitenkruin



Figuur B.3 Stijghoogte locatie M, kruin



Figuur B.4 Stijghoogte locatie A1, binnenkruin



Figuur B.5 Stijghoogte locatie A2, insteek sloot aan dijkkant