

LiveDijk Eemshaven

Analyse metingen

ing. B.J. van der Kolk

1200888-001

Titel

LiveDijk Eemshaven

Opdrachtgever

Stichting IJkdijk
Postbus 424
9700 AK Groningen

Project

1200888-001

Kenmerk

1200888-001-GEO-0006

Pagina's

33

Trefwoorden

Monitoring, waterkeringen, waterspanning, glasvezel

Samenvatting

In het najaar van 2009 zijn metingen gestart op een dijkvak aan de noordwestkant van de Eemshaven: het project LiveDijk Eemshaven. In dit rapport worden de metingen na één jaar geëvalueerd.

De metingen zijn beoordeeld naar:

- technische haalbaarheid en toepasbaarheid (datacontinuïteit, aanbrengmethode, insteltijd);
- technische bruikbaarheid van de metingen (nauwkeurigheid, ruis en ruimtelijk meetbereik);
- bruikbaarheid voor sterktebepaling (normaal gedrag, (on)misbaarheid sensoren, stabiliteitsfactor).

De opvallendste punten zijn het gebrek aan een significante (storm)belasting in het eerste meetjaar en de vele storingen die gedurende kortere of langere tijd opgetreden zijn.

Naar aanleiding van de bevindingen zijn specifieke en algemene conclusies getrokken en enkele aanbevelingen gedaan.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
2	jan. 2011	ing. B.J. van der Kolk		dr. ir. A.R. Koelewijn		ing. A.T. Aantjes	

Status

concept

Dit document is een concept en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 LiveDijk Eemshaven	1
1.2 Doelstelling	1
1.3 LiveDijk algemeen: meten aan dijken en andere waterkeringen	1
1.4 Leeswijzer	2
2 Beschikbare gegevens en werkwijze	3
2.1 Inleiding	3
2.2 LiveDijk meetdata	3
2.2.1 Alert Solutions	4
2.2.2 GTC Kappelmeyer	4
2.3 Aanvullende informatie	5
2.3.1 Gegevens KNMI	5
2.3.2 Gegevens Rijkswaterstaat	5
2.4 Selectie periodes	5
2.5 Selectie Instrumenten	6
3 Technische haalbaarheid en toepasbaarheid	7
3.1 Datacontinuïteit	7
3.2 Beoordeling van de aanbrengmethode	8
3.3 Insteltijd sensoren	9
4 Technische bruikbaarheid van de metingen	11
4.1 Nauwkeurigheid van de metingen	11
4.1.1 Waterspanningen	11
4.1.2 Temperatuur	12
4.1.3 Verplaatsing	13
4.1.4 GTC Kappelmeyer	15
4.2 Bepalen van mogelijke achtergrondruis en acties om die ruis weg te filteren	18
4.3 Beschouwen van het ruimtelijke meetbereik van de sensoren	19
5 Bruikbaarheid monitoringsysteem voor sterktebepaling	21
5.1 Bepaling van het normale gedrag van de dijk	21
5.2 Bepaling van cruciale sensoren in het kader van actuele sterktebepaling	22
5.3 Berekende 'actuele' stabiliteitsfactor vergelijken met stabiliteitsfactor uit de toetsing	23
6 Conclusies en aanbevelingen	25
6.1 Conclusies specifiek ten aanzien van het project LiveDijk Eemshaven	25
6.2 Conclusies ten behoeve van dijkmonitoring: LiveDijken	25
6.3 Aanbevelingen	25

Bijlage(n)

A gegevens KNMI	A-1
B Metingen Rijkswaterstaat	B-1

C Insteltijd sensoren

C-1

1 Inleiding

1.1 LiveDijk Eemshaven

In het najaar van 2009 is het LiveDijk Eemshavenproject van start gegaan. De officiële opening heeft plaatsgevonden op 15 oktober, maar al sinds het begin van de installatie van de meetapparatuur, op 26 september, worden er realtime metingen uitgevoerd.

Deze metingen worden uitgevoerd op een dijkvak met een lengte van ongeveer 800 meter aan de noordwestkant van de Eemshaven. Het geïnstumenteerde dijkgedeelte ligt direct aan het Wad en was voor de aanleg van de Eemshaven de primaire waterkering. Het wordt momenteel nog steeds als primaire waterkering beheerd. Deze dijk is aangelegd omstreeks 1970 en is een zanddijk met aan de buitenzijde een steen- en asfaltbekleding en aan de boven- en binnenzijde een bekleding van klei met gras. De ondergrond van de dijk bestaat uit een mariene afzetting bestaande uit zand en kleilagen.

In dit rapport is een steekproef van de beschikbare metingen geanalyseerd op toepasbaarheid voor het monitoren van dijken en is gekeken naar verbeteringen voor toekomstige LiveDijken.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van het project LiveDijk Eemshaven is om inzicht te krijgen in de relevantie en bruikbaarheid van de huidige metingen. Deze rapportage, die tussentijds gemaakt is, heeft verder als doel vast te stellen waar verbeteringen mogelijk zijn voor zowel dit specifieke project als voor toekomstige LiveDijken.

1.3 LiveDijk algemeen: meten aan dijken en andere waterkeringen

De afgelopen jaren is in beperkte mate ervaring opgedaan met het monitoren van dijken door middel van sensortechnologie. In 2008 en 2009 hebben grootschalige proeven op de IJkdijk te Booneschans (Oost-Groningen) plaatsgevonden waar een groot aantal monitoringssystemen op bruikbaarheid is getest in dijken zonder waterkerende functie die tot aan bezwijken zijn belast. Daarna is slechts op geringe schaal verdere ervaring opgedaan met deze systemen.

De LiveDijk Eemshaven is de eerste dijk waaraan langdurig realtime gemeten wordt met behulp van een combinatie van verschillende sensorsystemen. Er is nog weinig ervaring met langdurig realtime meten aan een dijk met de toegepaste sensoren, daarom is het van belang dat de gemeten waarden worden geanalyseerd op relevantie en betrouwbaarheid. Op basis hiervan kan, indien nodig, bijsturing plaatsvinden en er kunnen aanbevelingen worden gedaan voor toekomstige LiveDijken – dijken met een waterkerende functie waaraan intensieve monitoring plaatsvindt om meer te leren over die specifieke dijk, over vergelijkbare dijken en over de praktijk van dijkmonitoring. Vanzelfsprekend kan de monitoring van kaden hier ook toe gerekend worden.

Zodra hier enige ervaring mee opgedaan is, kunnen meer complexe vraagstukken worden aangepakt, zoals kunstwerken. Bij oude, of ‘historische’, kunstwerken zoals sluisjes uit de 19e eeuw kunnen metingen gedurende langere tijd mogelijk de enige niet-destructieve manier vormen om vast te stellen of er bijvoorbeeld wel of niet een kwelscherm onder aanwezig is – kennis hierover ontbreekt veelal doordat tekeningen en andere gegevens over

de constructie verloren zijn gegaan. Ook kan een ooit aangebracht scherm inmiddels zijn vergaan.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de beschikbare gegevens en de gevolgde werkwijze voor de analyse. In hoofdstuk 3 komt de technische haalbaarheid en toepasbaarheid aan de orde. Hoofdstuk 4 gaat in op technische bruikbaarheid van de beschikbare metingen. Daarna wordt in hoofdstuk 5 ingegaan op de bruikbaarheid van het monitoringssysteem voor de bepaling van de sterkte van de kering. Tenslotte worden in hoofdstuk 6 de conclusies en aanbevelingen gepresenteerd.

2 Beschikbare gegevens en werkwijze

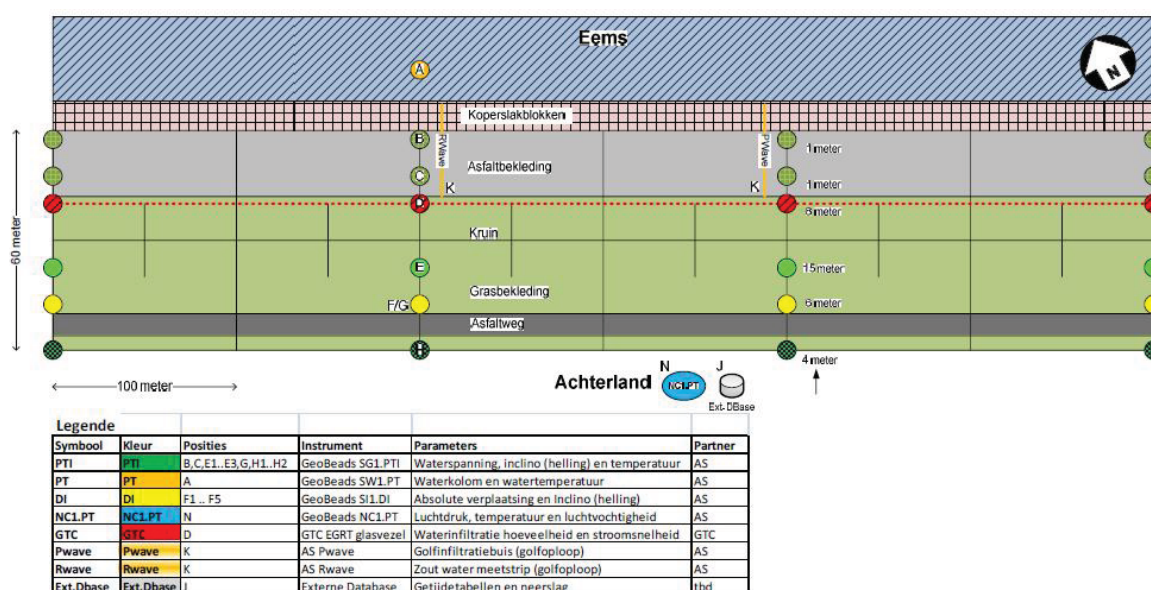
2.1 Inleiding

Het analyseren van meetgegevens is voor de LiveDijk op de in dit hoofdstuk beschreven manier uitgevoerd. De uitdaging van het analyseren van data afkomstig van intensieve monitoringsprojecten is om dit op een efficiënte manier te doen. Voor deze analyse was het niet mogelijk om alle data in detail te bekijken, hiervoor waren de hoeveelheid sensoren en de meetfrequentie simpelweg te groot. Behalve data van de LiveDijk zelf is ook gekeken naar relevante data verzameld door Rijkswaterstaat en het KNMI, te weten de waterstand, watertemperatuur, golfgegevens en meteorologische gegevens.

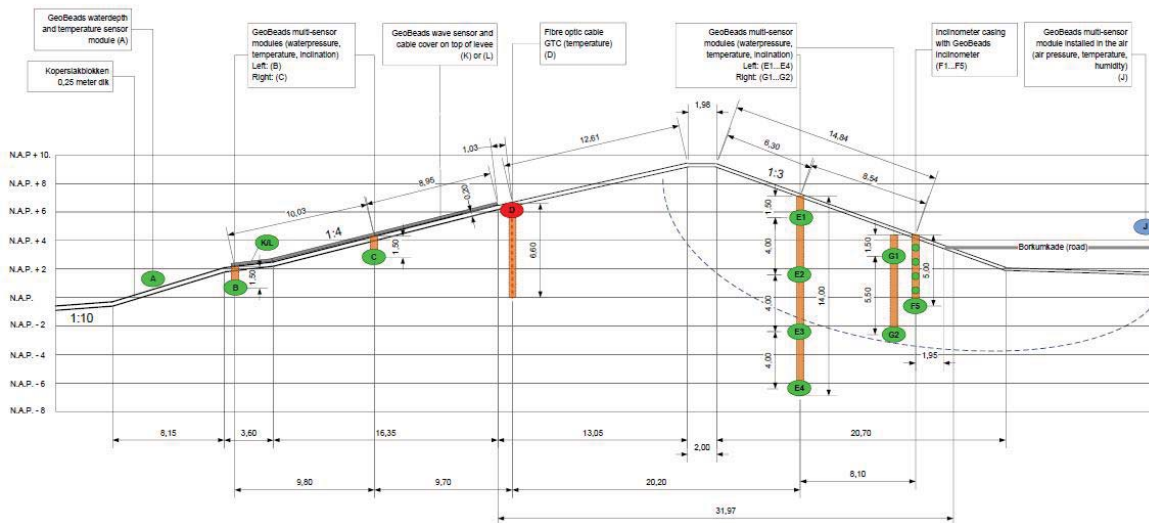
2.2 LiveDijk meetdata

In de LiveDijk zitten in 4 meettraaien in totaal 208 sensoren, met daarbij een glasvezelkabel van tweemaal ruim 800 meter met iedere halve meter een (fictieve) meetzone. De instrumenten zijn schematisch weergegeven in figuur 2.1, 2.2 en 2.3.

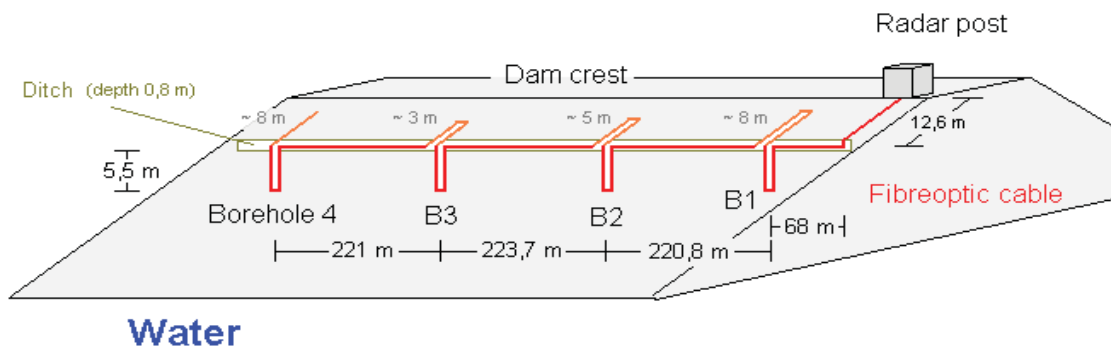
De locaties zijn zodanig gekozen dat niet alleen tijdens dagelijkse omstandigheden, maar ook bij stormcondities zinvolle meetwaarden geregistreerd zouden kunnen worden. Hierbij moet primair gedacht worden aan stormcondities zoals die gemiddeld ieder jaar wel voorkomen, niet aan maatgevende omstandigheden. Daarnaast speelden praktische aspecten een rol: plaatsing van instrumenten in of onder de asfaltbekleding is veel lastiger dan in of onder de grasbekleding. Daarom is de glasvezelkabel net boven de asfaltbekleding gepland; een locatie die nog betrekkelijk hoog ligt, waardoor dus een vrij zware storm vereist is om dit langgerekte meetinstrument echt tot z'n recht te laten komen.



Figuur 2.1 Schematisch bovenaanzicht met sensorlocaties



Figuur 2.2 Dwarsdoorsnede met sensorlocaties



Figuur 2.3 Ligging glasvezel kabel

De meetfrequentie is eens per 5 minuten. Dit betekent dat er in een jaar tijd bijna 200 miljoen meetwaarden worden geregistreerd (namelijk $208 + 1654 = 1862$ meetpunten maal $365 \times 24 \times 12$ meetmomenten).

De geregistreerde data is beschikbaar via de Anysense database van TNO-ICT. Daarin is van iedere sensor de gemeten waarde op te vragen. Deze database is toegankelijk via Internet.

2.2.1 Alert Solutions

In de dijk zijn door Alert Solutions de zogenoemde Geobeads geplaatst. Deze Geobeads meten (indirect) een aantal verschillende grootheden, te weten luchtdruk, waterdruk, temperatuur, inclinatie, verplaatsing, luchtvochtigheid.

2.2.2 GTC Kappelmeyer

In een sleuf net boven het asfalt, dus onderaan de grasbekleding aan de buitenzijde van de dijk, is door GTC Kappelmeyer een glasvezel kabel in de grond aangebracht. In deze kabel kan iedere halve meter de temperatuur van de glasvezelkabel worden gemeten.

2.3 Aanvullende informatie

2.3.1 Gegevens KNMI

Voor het analyseren van de LiveDijk metingen is het van belang om weersinvloeden mee te nemen. Het dichtstbijzijnde meetstation van het KNMI is Lauwersoog. Van dit station zijn de volgende gegevens beschikbaar: neerslaghoeveelheid, neerslagduur, windsnelheid, windrichting, temperatuur en relatieve luchtvochtigheid. Een aantal van deze gegevens is weergegeven in Bijlage A.

2.3.2 Gegevens Rijkswaterstaat

Bij Rijkswaterstaat zijn gegevens opgevraagd met betrekking tot waterstanden en golfhoogtes. De verkregen informatie betreft:

- waterstand in de Eemshaven,
- watertemperatuur in de Eemshaven,
- significante golfhoogte ter plaatse van Schiermonnikoog-Noord,
- significante golfperiode ter plaatse van Schiermonnikoog-Noord,
- significante golfhoogte ter plaatse van Schiermonnikoog-Westgat,
- significante golfperiode ter plaatse van Schiermonnikoog-Westgat.

De golfgegevens zijn niet direct toepasbaar, maar kunnen samen met de gemeten windsnelheid en windrichting wel een indicatie geven van verhoogde golfslag ter plaatse van de LiveDijk. Een aantal metingen van RWS is weergegeven in bijlage B.

2.4 Selectie periodes

Sinds 25 september 2009 wordt er met een interval van 5 minuten continue gemeten. Hierdoor is het aantal metingen enorm en is het zonder speciale software onmogelijk om alle metingen in detail te analyseren. Er is daarom aanvankelijk voor gekozen om een aantal beperkte periodes te selecteren om de metingen binnen te analyseren. Gezocht is naar tijdreeksen met de onderstaande omstandigheden:

- direct na installatie van de sensoren;
- tijdens een periode van rustig weer;
- tijdens een periode van veel neerslag;
- tijdens een periode van storm;
- tijdens een perioden van storm en veel neerslag.

Op basis van de gegevens van het KNMI en Rijkswaterstaat zijn tijdreeksen gekozen. Deze zijn in onderstaande tabel aangegeven.

Tabel 2.1 Geselecteerde periodes

Periode	Begin datum	Eind datum
Direct na installatie	AlertSolutions GTC Kappelmeyer	25-09-2009 Geen data
Rustig weer	21-06-2010	26-06-2010
Veel neerslag	10-07-2010	13-07-2010
Storm	14-10-2009	18-10-2009
Storm en veel neerslag	05-03-2010	08-03-2010

Hier wordt alvast opgemerkt dat mede vanwege ten dele ontbrekende data (zie §3.1) de analyse uiteindelijk niet beperkt is gebleven tot deze periodes.

2.5 Selectie Instrumenten

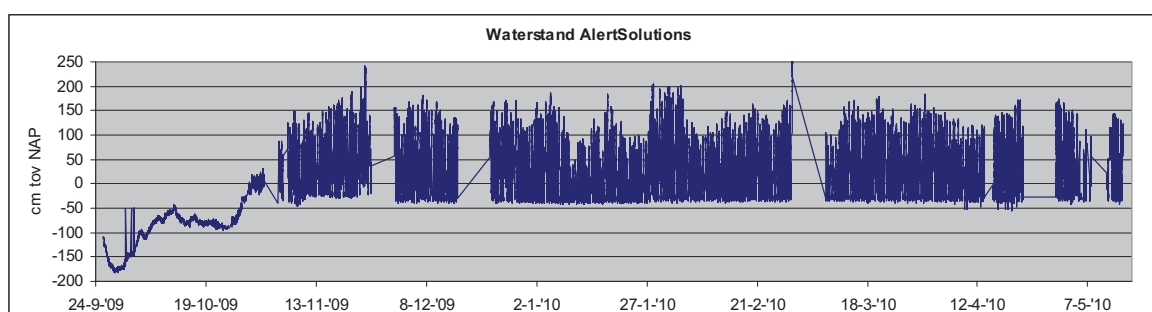
Niet alle metingen zijn tot in detail geanalyseerd. Onderstaand is aangegeven welke instrumenten steekproefsgewijs wel zijn geanalyseerd:

- waterspanningsmeters C1 t/m C4;
- waterspanningsmeters 1E1 t/m 4E4;
- alle instrumenten uit raai 2;
- de meters B, F, G uit raai 4;
- de volgende delen van de glasvezelkabel:
 - 30.0 - 30.5m;
 - 70.0 - 105.0m;
 - 202.0 - 205.0m;
 - 280.0 - 281.0m;
 - 320.0 - 345.0m;
 - 410.0 - 411.0m;
 - 565.0 - 589.5m;
 - 700.0 - 701.0m;
 - 808.0 - 832.0m;
 - 963.0m - 964.0m;
 - 1253.0m - 1254.0m.

3 Technische haalbaarheid en toepasbaarheid

3.1 Datacontinuïteit

Met een potentiële LiveDijk toepassing als dijkbewaking is het van groot belang dat meetdata ten alle tijde wordt gegenereerd, verwerkt en beschikbaar is. Het LiveDijk systeem heeft een aantal keer met storingen te maken gehad. De problemen lagen op het vlak van communicatie tussen verschillende systemen en het ophalen van data. Ook zijn er problemen met individuele sensoren gemeld. In onderstaande grafiek is goed te zien dat er periodes zonder metingen zijn.



Figuur 3.1 Gemeten waterstand over de hele beschikbare periode.

Er zijn storingen gemeld rond 29 april 2010 en rond 5 juli 2010. Verder zijn er in de geanalyseerde data 'gaten' gesignaleerd op de volgende momenten:

Sensor	Begin	Eind	Storingsduur [dagen]
Alert Solutions Waterstand	01-11-2009 07:32	04-11-2009 05:04	3
	05-11-2009 13:22	06-11-2009 11:34	1
	25-11-2009 12:57	30-11-2009 17:59	5
	15-12-2009 01:36	22-12-2009 11:15	7
	01-03-2010 00:24	08-03-2010 10:31	7
	13-04-2010 14:48	15-04-2010 14:56	2
	22-04-2010 08:31	29-04-2010 19:12	7
	07-05-2010 19:13	11-05-2010 11:51	4
GTC Kappelmeyer	31-10-2009 18:14	03-11-2009 14:36	3
	03-11-2009 14:36	06-11-2009 11:42	3
	07-12-2009 16:42	09-12-2009 15:42	2
	14-12-2009 10:42	22-12-2009 11:41	8
	01-03-2010 00:31	08-03-2010 10:31	7
	20-03-2010 21:31	09-04-2010 09:33	20
	22-04-2010 14:34	29-04-2010 18:35	7
	07-05-2010 07:36	11-05-2010 11:36	4
	19-05-2010 14:37	27-05-2010 09:38	8

Tabel 3.1 Gesignaleerde 'gaten' in de geanalyseerde data.

Omdat niet de metingen van elke sensor afzonderlijk zijn bekeken is het mogelijk dat er naast bovengenoemde periodes nog meer periodes zijn waarvan de meetresultaten ten dele ontbreken.

Uit de tabel blijkt dat een aantal storingen niet lang duurt maar dat er ook een aantal storingen van lange duur zijn. Aanbevolen wordt om hier passende maatregelen voor te nemen: de uitval is soms zo lang dat dit niet alleen voor een calamiteitendetectiesysteem veel te lang is, maar ook in het kader van beheer en informatieinwinning ten behoeve van toetsing en/of ontwerp.

3.2 Beoordeling van de aanbrengmethode

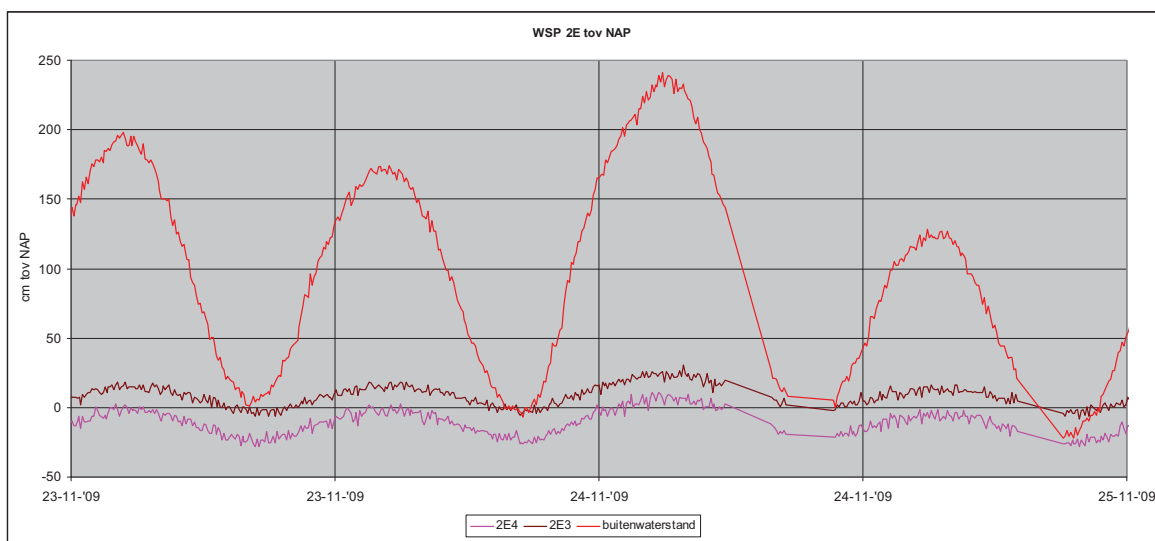
In deze paragraaf wordt ingegaan op de methode waarop de sensoren zijn aangebracht en de mogelijke invloed daarvan op de metingen.

Voorafgaand aan de bespreking van met name de waterspanningsmetingen eerst het volgende: In de Anysense-database wordt de gemeten absolute druk in de waterspanningsmeters gepresenteerd. Om deze te kunnen beoordelen zal deze *altijd* gecorrigeerd moeten worden voor de (eveneens gemeten) luchtdruk. Dit zorgt voor een onnodige complicatie bij de interpretatie. Vanuit meettechnisch standpunt is dit weliswaar te begrijpen, maar voor de verwerking door deskundigen met een civiele achtergrond (ook van bijvoorbeeld een waterschap) werkt deze ten dele onverwerkte¹ opslag van meetdata nodeloos ingewikkeld.

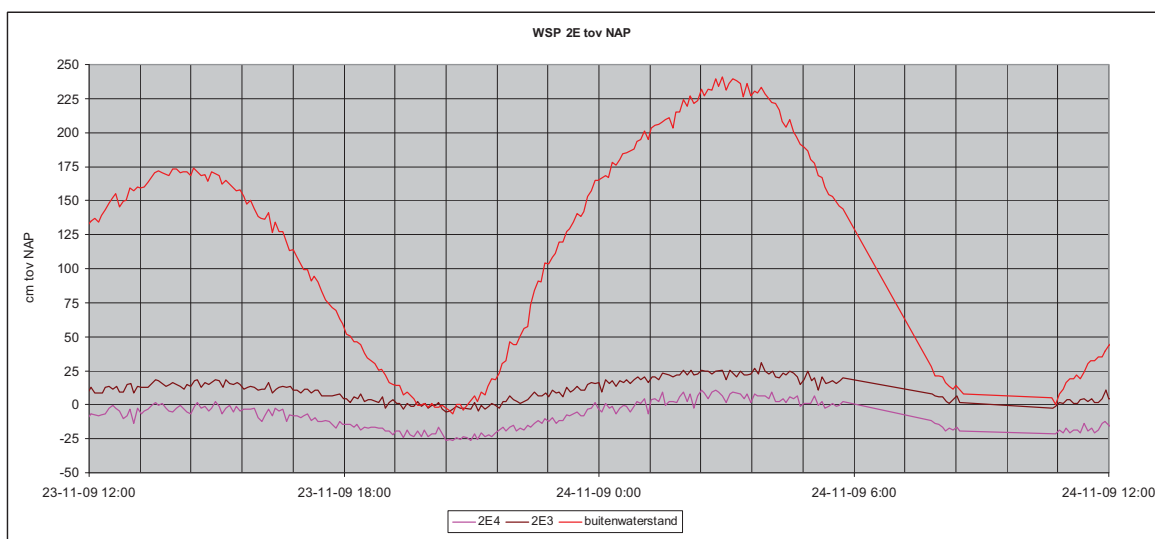
Het aanbrengen van de sensoren is niet van dichtbij gevolgd. Doordat de wijze van aanbrengen in het veld van groot belang is, is het niet goed mogelijk om de aanbrengmethode en de eventuele gevolgen daarvan op de metingen te beoordelen. In het algemeen kan gezegd worden dat de gehanteerde 'Sonicdrillmethode' voor het aanbrengen van de Geobeads een potentieel risico van kortsluiting tussen verschillende watervoerende grondlagen met zich meebrengt. Daarnaast zijn de boven elkaar gelegen Geobeads in één boorgat geplaatst, welke opgevuld is met zogenaamde zwelklei-korrels. De juiste (afsluitende) werking hiervan is niet verzekerd. Hier is een risico van onvoldoende afsluiting en 'kortsluiting' aanwezig waardoor de verschillende sensoren niet representatief zijn voor diepte waar ze zich bevinden. Ditzelfde geldt ook voor de "dieptelussen" van de glasvezelkabel van GTC Kappelmeyer.

In onderstaande grafiek is een detail weergegeven van waterspanningsmetingen in raai 2, van twee boven elkaar gelegen instrumenten. Te zien is dat er ten opzichte van de buitenwaterstand een kleine vertraging in de toe- en afnemende waterspanning. De waterspanningsmeters daarentegen reageren tegelijk. Vanwege de grote afstand tot het buitenwater is de vertraging logisch. De looptijd tot aan de verschillende sensoren kan toevallig hetzelfde zijn, waarmee ook de vertraging hetzelfde is. In dit geval lijkt er geen kortsluiting te zijn, doordat de lokale piekjes verschillend zijn. In het algemeen vormen overeenkomende piekjes een indicatie voor kortsluiting.

¹ Een eerste omrekeningsslag, van de werkelijk gemeten waarden naar kPa's, heeft immers al plaatsgevonden.



Figuur 3.2 Detail waterspanningsmetingen raai 2, locatie E, en buitenwaterstand



Figuur 3.3 Waterspanningsmetingen raai 2, locatie E, en buitenwaterstand in nader detail

3.3 Insteltijd sensoren

Voor het correct gebruiken van metingen kan het van belang zijn om een goed beeld te hebben van de beginsituatie. Het is daarom van belang om te weten hoeveel tijd er nodig is voordat een sensor na installatie betrouwbare waarden geeft.

Getracht is om dit te bepalen, maar in de AnySense database zijn geen gegevens beschikbaar uit de periode direct na installatie (20 t/m 25-09-2009) tot 20-10-2009. Van AlertSolutions zijn wel de gegevens van de waterspanningsmeters geleverd. Er is gemeten vanaf 25-09-2009 19:25 uur, terwijl de sensoren in de periode van 20 t/m 25 september zijn geïnstalleerd. Dit betekent dat er van een onbekend aantal sensoren geen metingen direct na installatie bekend zijn.

Voor de waterspanningssensoren 1E1 t/m 4E4 is in onderstaande tabel de insteltijd genoteerd. Deze insteltijd is bepaald op basis van metingen vanaf 25 september 2009. Doordat niet bekend is op welke dag deze sensoren daadwerkelijk geïnstalleerd zijn, gaat het

hier om minimumtijden. Overigens zijn deze maximaal 5 dagen langer dan hier vermeld. Deze metingen zijn in bijlage C in grafieken weergegeven.

Raai	E1	E2	E3	E4
1	$\geq 2^*$	$\geq 2^*$	≥ 12	≥ 0
2	$\geq 2^*$	$\geq 2^*$	≥ 0	≥ 0
3	$\geq 2^*$	$\geq 2^*$	?	?
4	$\geq 2^*$	$\geq 2^*$	?	?

Tabel 3.2 Minimale insteltijd in dagen van sensoren E

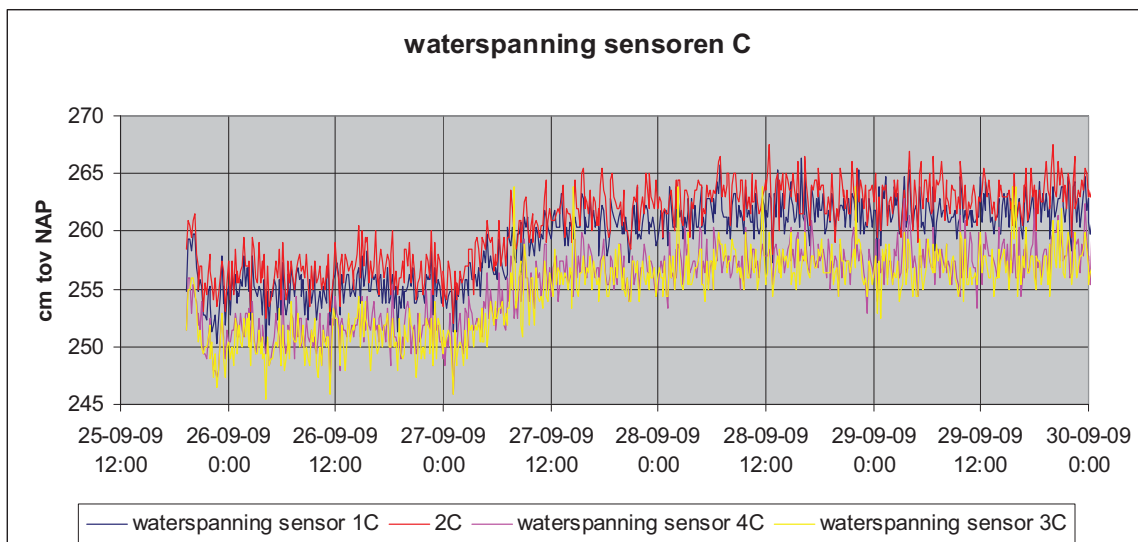
0: er is geen duidelijke verschil in de meetreeks zichtbaar

?: vreemde meting waardoor geen insteltijd is te bepalen

*: sensoren E1 en E2 staan overal droog, waardoor de bepaling meer onzeker is

Opmerkelijk is dat vanaf 30 september 2009 om 4:00 uur de metingen voor 4E4 met circa 1000cm stijgen. Gaat dit om een storing, een toename waterspanning door lekkage of iets dergelijks, of een fout in de correctie van de luchtdruk? Opvallend is verder dat de aanvankelijk duidelijke schommeling overeenkomstig het getij dan ook verdwijnt.

In onderstaande grafiek zijn de metingen van de waterspanningsmeters C weergegeven. Te zien is dat er ook hier na ongeveer twee dagen een stabiel gemiddelde wordt bereikt. Overigens staan ook deze sensoren over het algemeen droog – het monitoringsplan was er namelijk mede op gericht om bij een stevige storm significante metingen te doen en de instrumenten niet (alleen) te concentreren rond de fluctuaties van het dagelijks getij.



Figuur 3.4 Waterspanningen in alle sensoren op niveau C

4 Technische bruikbaarheid van de metingen

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de vraag in hoeverre de metingen bruikbaar zijn: wat is de nauwkeurigheid, in hoeverre speelt ruis een rol en zijn de metingen representatief voor een voldoende groot gebied?

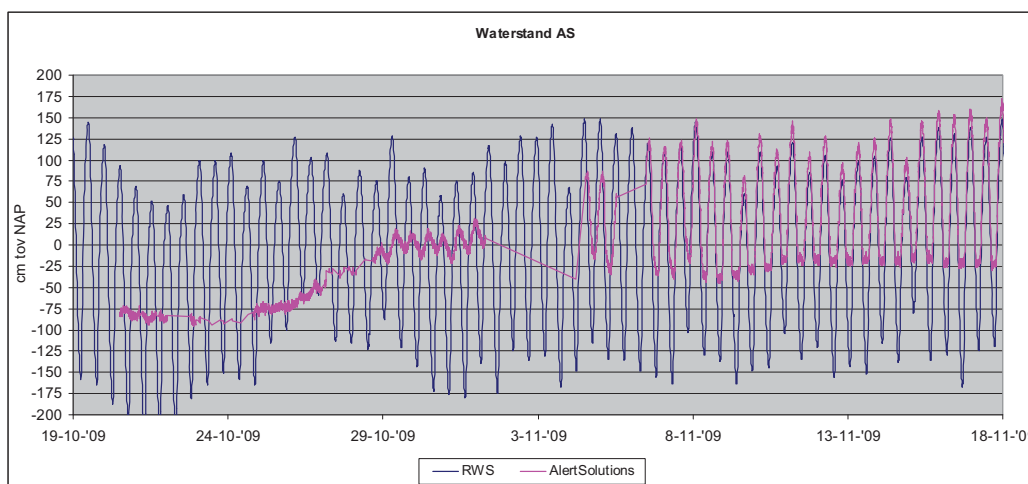
4.1 Nauwkeurigheid van de metingen

De nauwkeurigheid wordt per type meting afzonderlijk bepaald.

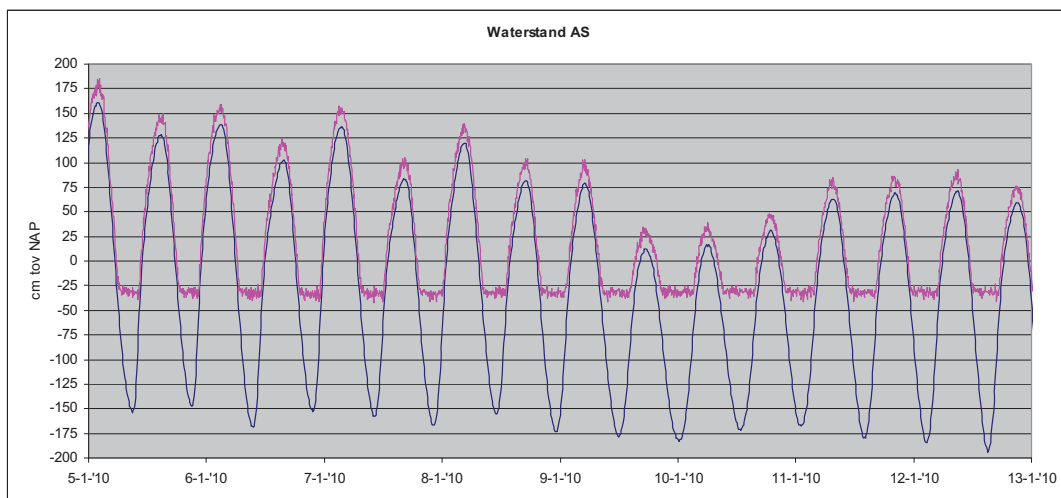
4.1.1 Waterspanningen

Om een eerste indruk te krijgen van de correctheid van de metingen is gekeken naar buitenwaterstand. Deze is zowel gemeten door Rijkswaterstaat als door Alert Solutions.

In Figuur 4.1 is te zien dat de meting van Alert Solutions aan het begin van de meetperiode niet klopt, maar na een correctie de metingen van Rijkswaterstaat (RWS) gaat volgen. Figuur 4.2 laat zien dat de voor de LiveDijk geregistreerde waterstand netjes de lijn van de Rijkswaterstaatsmeting volgt. De door Alert Solutions gemeten waterstand ligt echter wel iets hoger dan de Rijkswaterstaatsmeting. Het verschil is niet constant en kan zodoende niet verklaard worden uit een onnauwkeurige inmeting ten opzichte van het NAP. Het kan fysisch verklaard worden uit een geringe opstuwing op het wad, dus ook ter plaatse van de sensor. Daarnaast is te zien dat de sensor bij een waterstand van circa 30 cm onder NAP droogvalt.



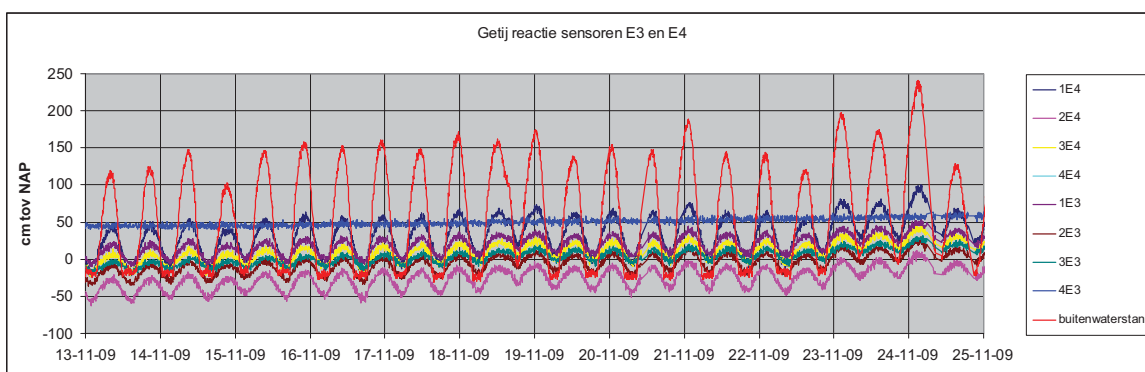
Figuur 4.1 Vergelijking waterstandsmetingen Rijkswaterstaat en Alert Solutions in beginperiode



Figuur 4.2 Vergelijking waterstandmetingen Rijkswaterstaat en Alert Solutions begin januari 2010

Figuur 4.3 laat zien dat de waterspanningssensoren 1E3 t/m 3E4 de invloed van het getij goed registreren. Uiteraard is de amplitude kleiner dan de getijde-amplitude vanwege demping. De waarden lijken aannemelijk, over de absolute nauwkeurigheid is verder niet zo heel veel te zeggen. De data is op centimeters nauwkeurig. Deze nauwkeurigheid is op zichzelf voldoende voor waterspanningsmetingen ten behoeve van toepassing voor macrostabiliteitsanalyses en detectie van erosie van bekleding. Voor pipingdetectie is het echter nadrukkelijk onvoldoende. Het is de vraag of dit komt door datafiltering of dat de GeoBeads echt niet nauwkeuriger kunnen meten.

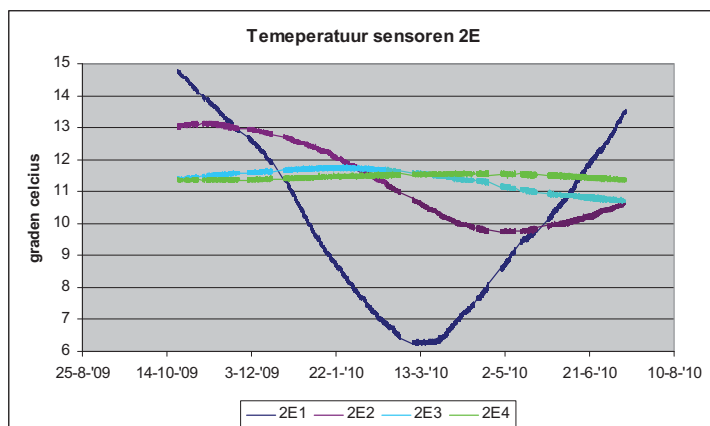
Sensor 4E3 reageert om de een of andere reden niet op het getij, terwijl de sensor niet droog staat. Mogelijk staat deze sensor toevallig in een kleilens of iets dergelijks. Dit illustreert wel dat functionele uitval van instrumenten nooit op voorhand uit te sluiten is en niet alleen afhangt van het instrument zelf.



Figuur 4.3 Getijreactie sensoren E3 en E4

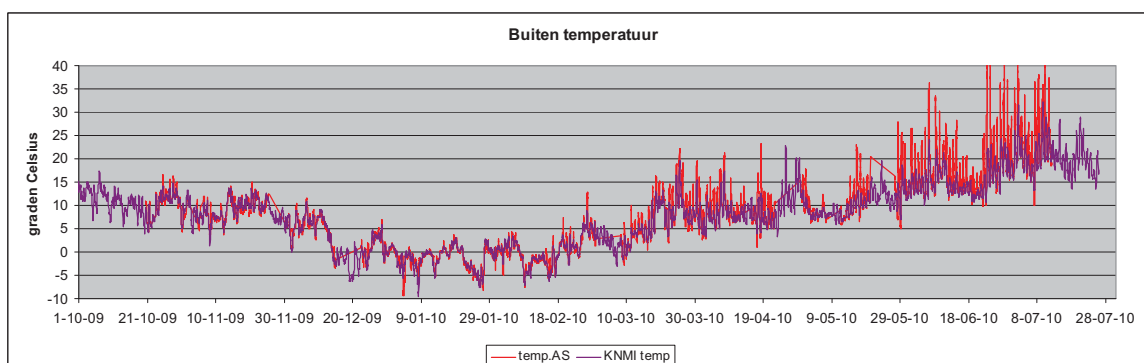
4.1.2 Temperatuur

Het temperatuurverloop voor de sensoren E in de tweede raai is in onderstaande grafiek weergegeven. Te zien is dat de sensor die bovenin de meetbuis zit het grootste temperatuurverschil laat zien en dat hoe verder de sensor naar beneden is geplaatst hoe constanter het temperatuurverloop is. Hieruit valt af te leiden dat de temperatuur van de buitenlucht de temperatuur van de sensoren sterk beïnvloedt.



Figuur 4.4 Temperatuursensoren 2E

In onderstaande grafiek is de buitentemperatuur weergegeven zoals gemeten door de sensor van Alert Solutions en het KNMI. De meting van Alert Solutions is niet volledig representatief voor de buitentemperatuur doordat de sensor aan een gebouwtje vast zit en daarmee ook de warmte van dat object registreert. Dit is aan de metingen te zien doordat de temperatuur een aantal keer veel hoger is dan de metingen van het KNMI en zelfs ruim boven de 35 graden Celsius uitkomt. Waarschijnlijk treedt dit probleem alleen op bij zonnig weer.



Figuur 4.5 Buitentemperatuur volgens KNMI en volgens Alert Solutions

4.1.3 Verplaatsing

In raai F zijn automatische hellingmeetbuizen geplaatst om verplaatsingen te meten onder het oppervlak. Voordat op de metingen wordt ingegaan, volgt eerst enige uitleg over de werking van een dergelijk systeem.

Het meten van verplaatsingen in de diepte met behulp van een hellingmeetbuis is mogelijk wanneer een buis zo diep in de grond wordt geplaatst dat de onderkant als een vast punt kan worden beschouwd. Doorgaans gebeurt dit door de onderkant een eindje in een zandlaag te plaatsen. Handmatige metingen worden uitgevoerd door een star element met een zekere lengte, bijvoorbeeld een halve meter, in de buis te laten zakken en iedere halve meter de hellingshoek van het segment te meten ten opzichte van de verticaal. Bij automatische metingen is er een streng van gekoppelde elementen permanent in de buis aanwezig. De hellingshoek wordt in twee onderling loodrechte (horizontale) richtingen gemeten.

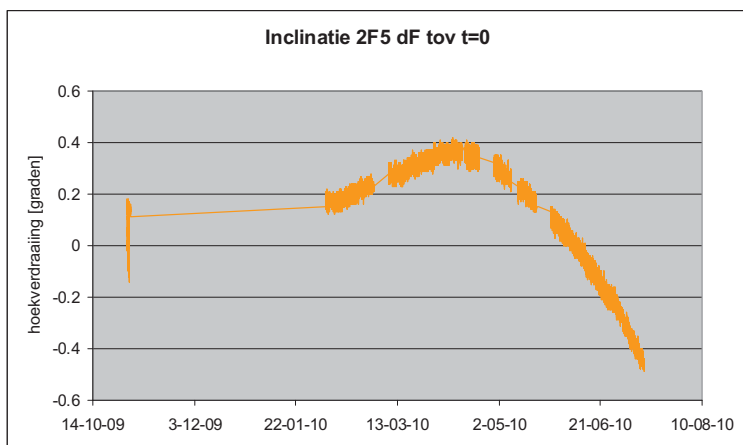
Door aan te nemen dat het onderste punt niet verplaatst, kan, van onder naar boven rekenend, de verplaatsing op de opeenvolgende meetpunten (de knikpunten tussen de starre elementen) worden berekend volgens de formule:

verplaatsing huidige punt = verplaatsing onderliggende punt
+ segmentlengte * sinus (hoek t.o.v. verticaal)

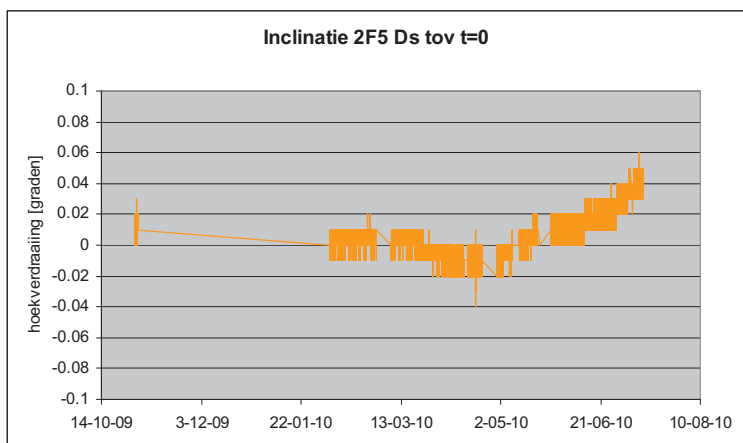
Op deze manier kan het verplaatsingsprofiel over de hoogte worden verkregen. Essentieel in deze systematiek is dat het onderste punt niet verplaatst. Dit wordt doorgaans geverifieerd door te controleren of de rotatie van het onderste segment niet verandert in de loop van de tijd (overigens zijn er dan nog steeds aanzienlijke verplaatsingen mogelijk, bijvoorbeeld wanneer het gehele grondlichaam als star lichaam verschuift).

Bij de LiveDijk Eemshaven zijn in raai F meetstrengen aanwezig met telkens vijf elementen boven elkaar, met een segmentlengte van 1 meter.

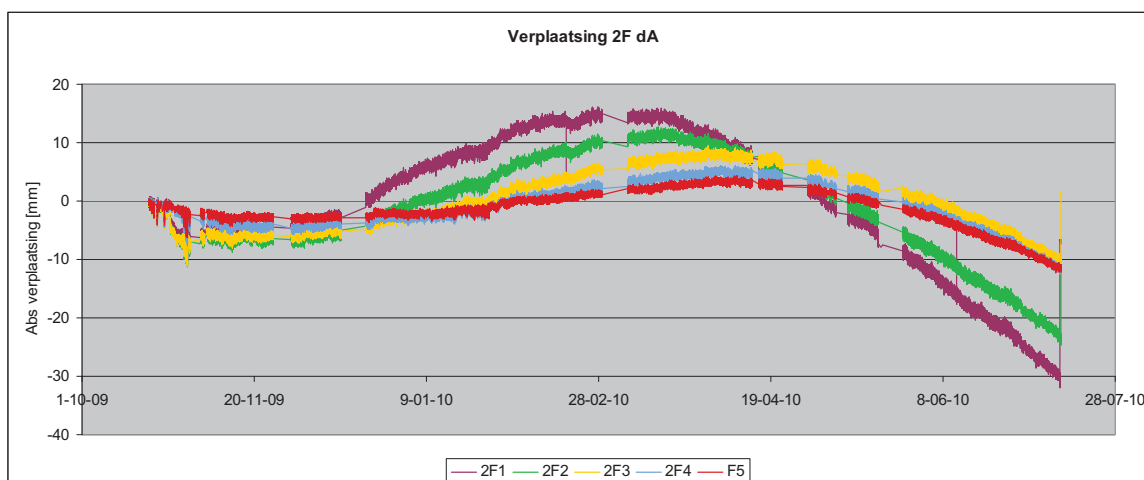
In Figuur 4.6 en Figuur 4.7 is de rotatie weergegeven van het onderste element in beide, onderling loodrechte richtingen. Met een totale verdraaiing van 0,47 resp. 0,05 graden lijkt dit alleszins bescheiden. Over een hoogte van 5 meter leidt dit echter tot een verplaatsing van $5 \cdot \sin(0,47) = 0,041$ meter, hetgeen vrij aanzienlijk is. Hierdoor kan niet worden vastgesteld of er sprake is van een vast punt onderin. De in Figuur 4.8 en Figuur 4.9 gepresenteerde verplaatsingen moeten dan ook als onbetrouwbaar worden gekwalificeerd. Het is onzeker op welke diepte er wel sprake zou zijn van een min of meer vast punt.



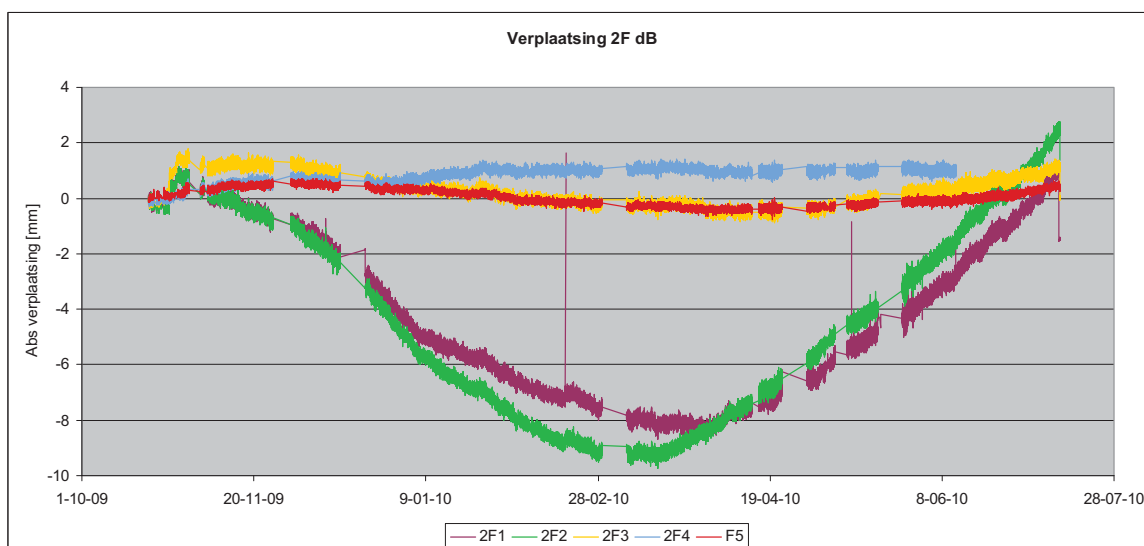
Figuur 4.6 Rotatie van element 2F5 in F-richting



Figuur 4.7 Rotatie van element 2F5 in s-richting



Figuur 4.8 Totale verplaatsingen per segment in raai 2F in A-richting (oppervlakte-verplaatsing: 2F1)

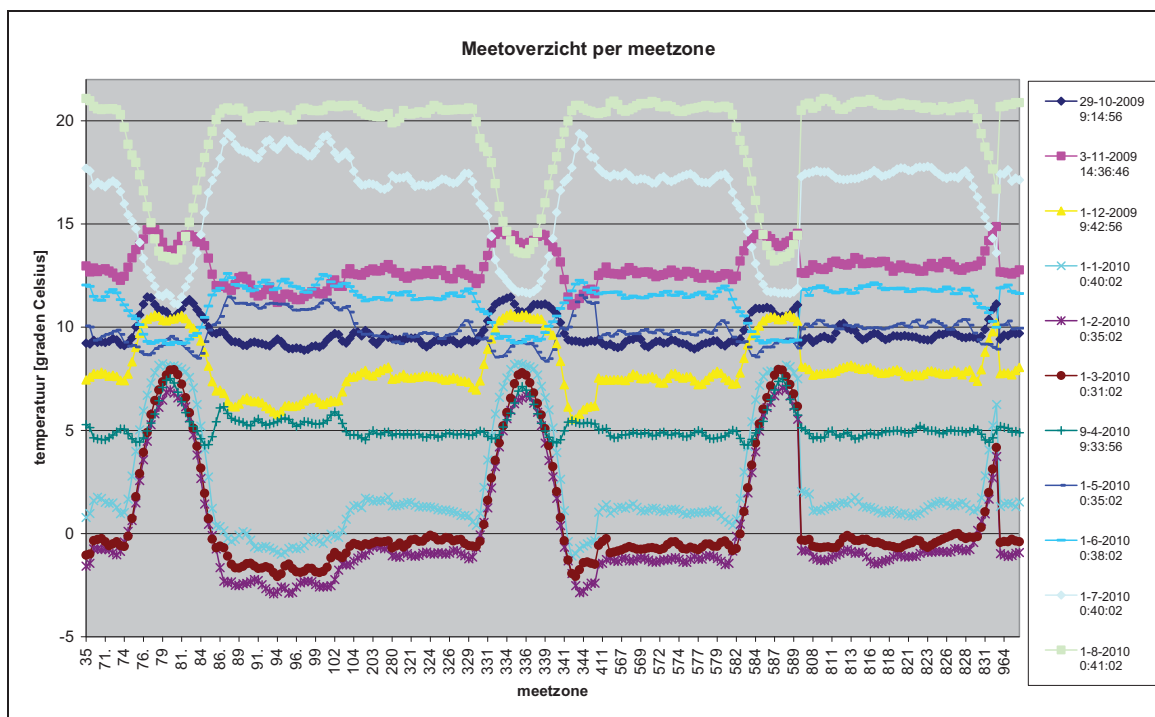


Figuur 4.9 Totale verplaatsingen per segment in raai 2F in B-richting (oppervlakte-verplaatsing: 2F1)

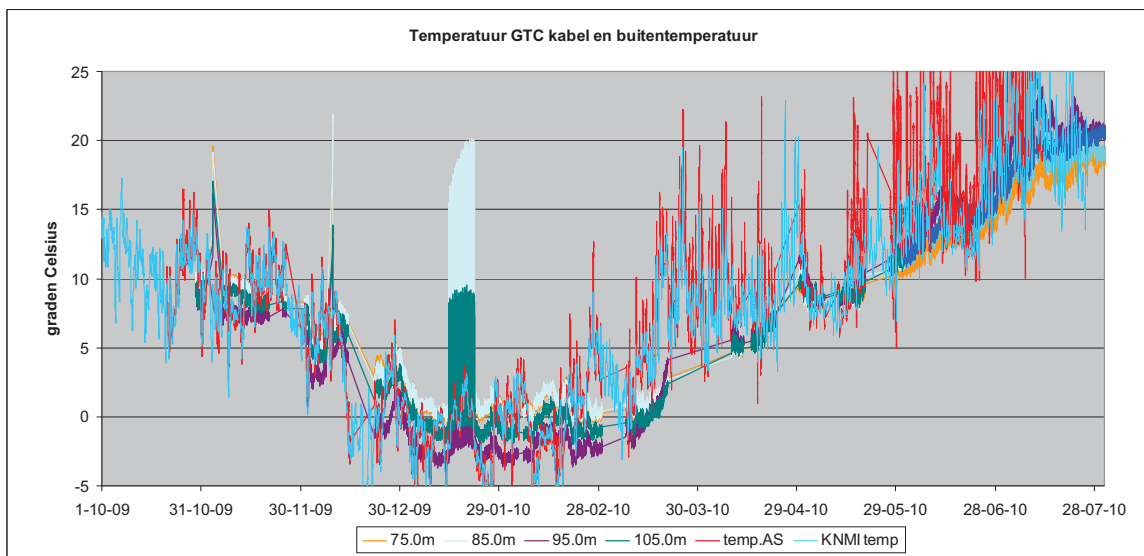
4.1.4 GTC Kappelmeyer

De metingen van GTC worden uitgevoerd met behulp van een glasvezel kabel die 80cm onder het maaiveld ligt. In deze kabel wordt de temperatuur gemeten. Figuur 4.10 geeft de temperatuur ten opzichte van de meetlocatie voor 11 meetmomenten weer. Dit betreft telkens de eerste meting van iedere maand. De boreholes zijn te zien als pieken en dalen. Opvallend is dat later in het jaar de temperatuur stijgt en die in de boreholes achterblijft. Er zijn ook enkele merkwaardige lokale sprongen, zoals tussen 99m en 104m.

Figuur 4.11 geeft voor een viertal meetpunten het temperatuurverloop weer. Daarbij is ook de buitentemperatuur gepresenteerd. Wat goed te zien is dat de temperatuur in de glasvezelkabel de temperatuur van de buitenlucht volgt. De grote piek in de metingen is een periode van 13 tot 22 januari 2010 waarin de kabel een aantal maal verwarmd is om de grondwaterstroming nauwkeuriger te kunnen meten.

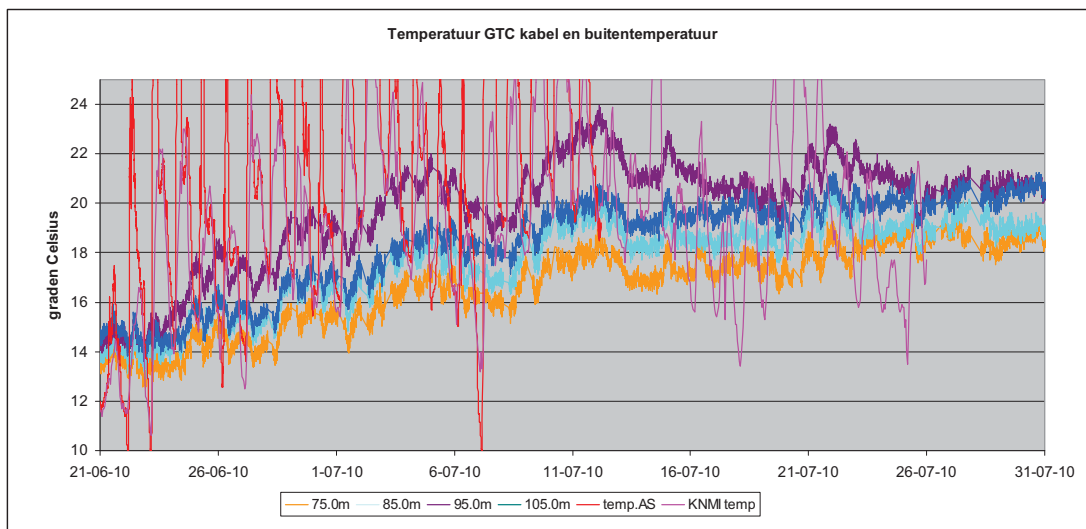


Figuur 4.10 Metingen per maand voor alle beschikbare meetzone's

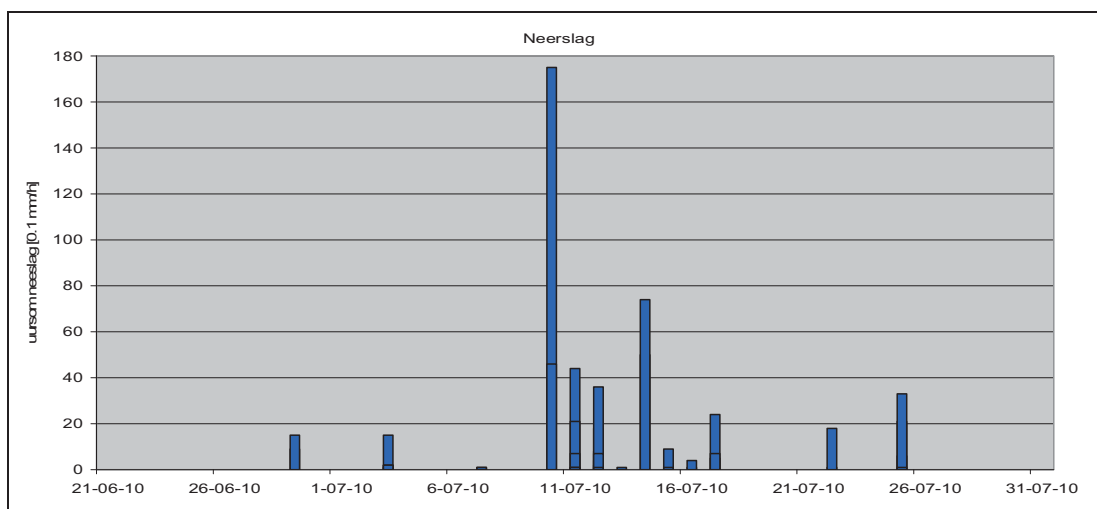


Figuur 4.11 Temperatuurmetingen in de tijd

In Figuur 4.12 is het temperatuurverloop weergegeven van eind juni en juli 2010. Te zien is dat er een aantal schommelingen in de gemeten grondtemperatuur aanwezig zijn. Als daar de neerslaggrafiek van dezelfde periode onder gezet wordt (Figuur 4.13), is te zien dat de temperatuur niet alleen beïnvloed wordt door de buitenlucht, maar waarschijnlijk ook door neerslag en het daarbijbehorende indringende regenwater.

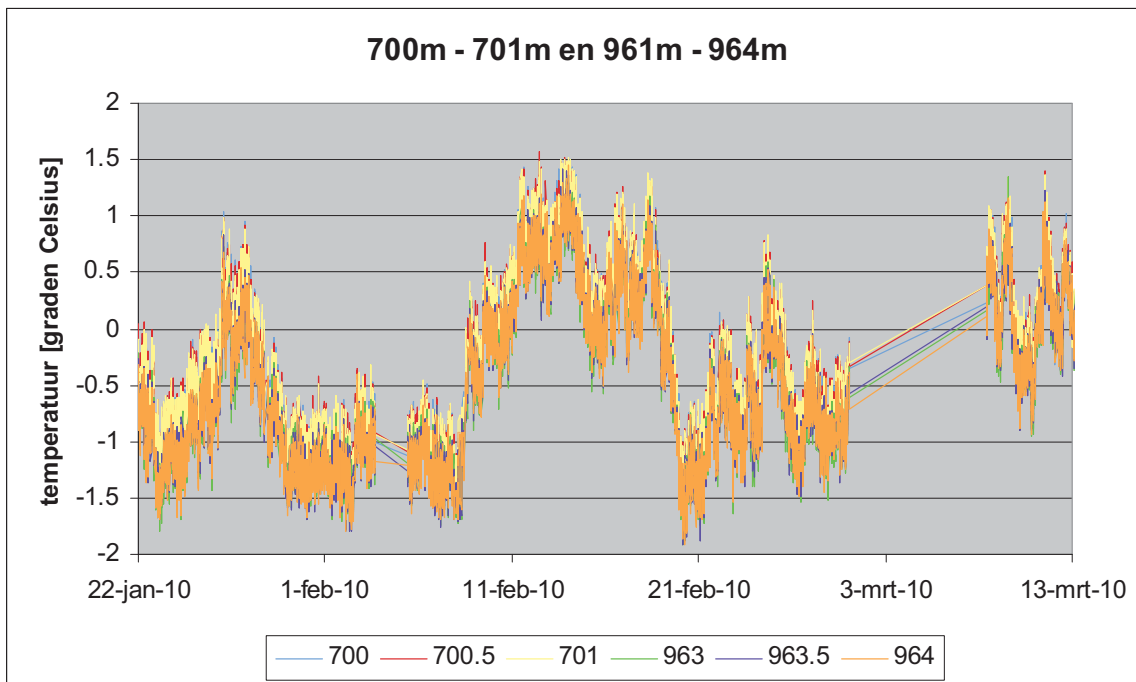


Figuur 4.12 Schommelingen in de temperatuurmeting

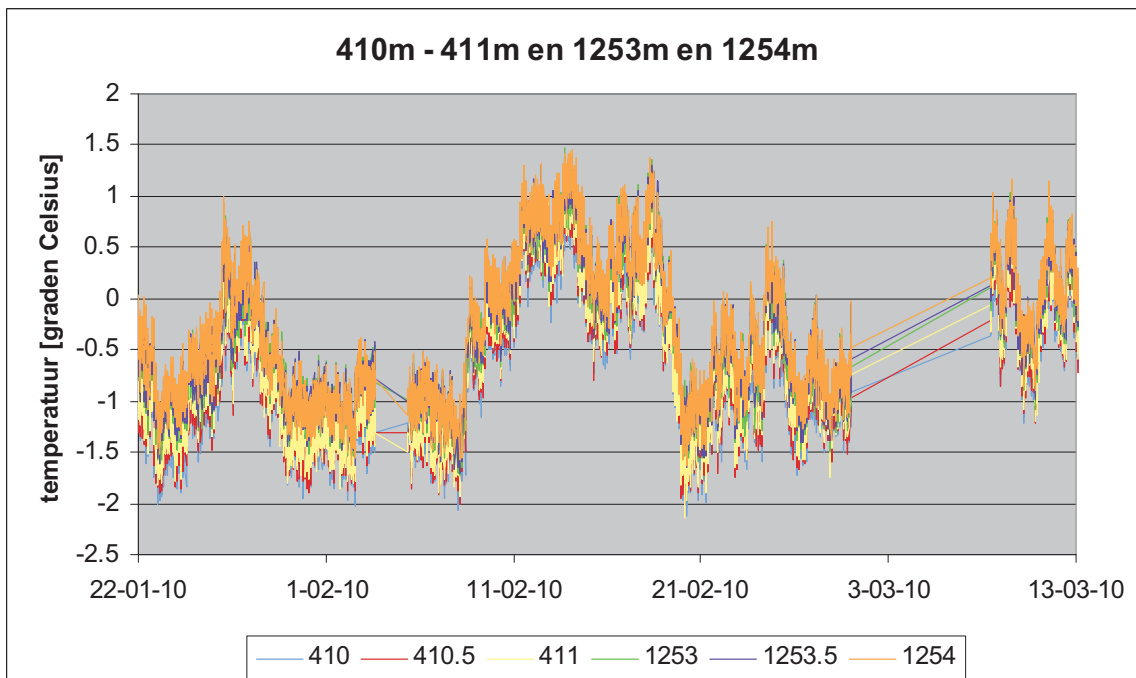


Figuur 4.13 Neerslag te Lauwersoog (bron: KNMI)

De glasvezelkabel ligt in een lus over de dijk (zie figuur 2.3). De ene helft ligt vanaf het startpunt (bij de radarpost) tot raai 4 en vervolgens ligt er in dezelfde sleuf de andere helft van de kabel van raai 4 terug naar het startpunt. Dit betekent dat er van elke strekking LiveDijk twee temperatuurmetingen zijn. In Figuur 4.14 en Figuur 4.15 zijn van twee overlappende gedeeltes de temperatuurmetingen weergegeven. In beide grafieken geven beide metingen ongeveer hetzelfde beeld. Opvallend is echter dat wanneer naar de verschillende lijnen wordt gekeken ter plaatse van het "datagat" te zien is dat er wel een verschil is in gemeten temperatuur. Het verschil in metingen bedraagt circa 0,25 graden. Of dit verschil te veel is voor het detecteren van infiltratie door golfoploop is moeilijk te zeggen.



Figuur 4.14 Detail temperatuurmetingen voor overlappend gedeelte tpv 700-701m



Figuur 4.15 Detail temperatuurmetingen voor overlappend gedeelte tpv 410-411m

4.2 Bepalen van mogelijke achtergrondruis en acties om die ruis weg te filteren

Er is weinig aandacht besteed aan het bepalen van achtergrondruis. De hoeveelheid data is te groot om dusdanig te analyseren dat van elke verandering in de metingen kan worden vastgesteld of het om achtergrondruis gaat of om iets anders. Daar komt bij dat de raaien zo

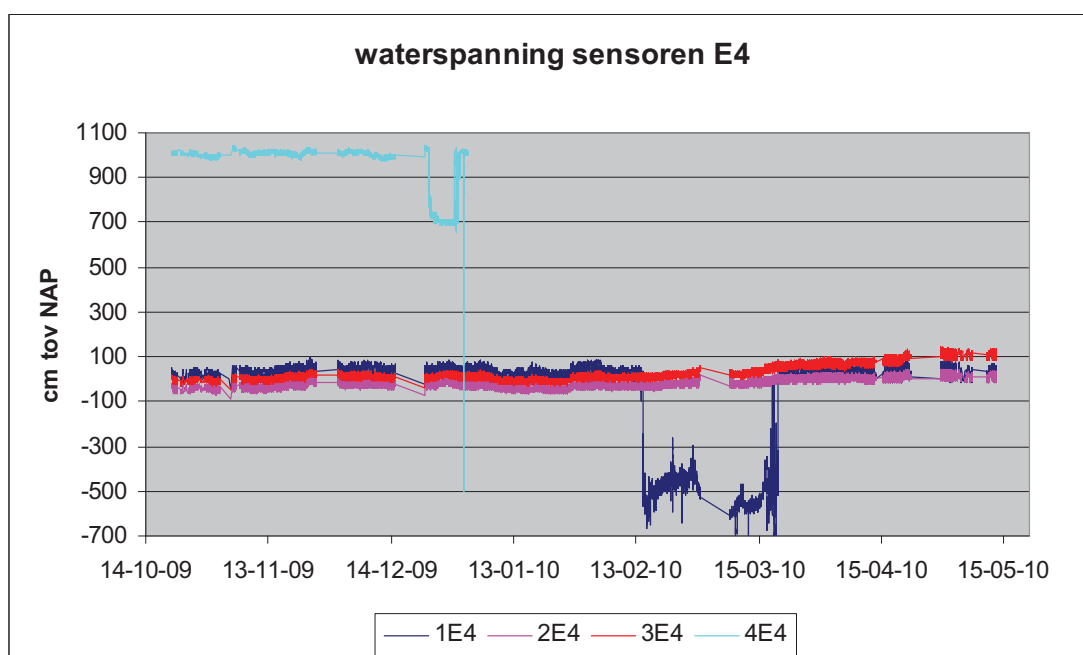
zijn geplaatst dat ze zover mogelijk van de te verwijderen windmolens stonden waarvan ruis verwacht werd. De afstand tot de windmolens bedroeg ruim honderd meter. Tijdens het verwijderen van deze windmolens is naar de meetresultaten gekeken en daarin werden geen veranderingen waargenomen. De invloed van externe mechanische belastingen is daarom gering tot verwaarloosbaar.

Lokaal worden wel kleine variaties in de meetwaarden gezien die niet 1:1 te relateren zijn aan de externe oorzaak – zoals de sprongetjes in de waterspanningen zoals weergegeven in figuur 3.2 en figuur 3.3. Dit is te wijten aan de introdeweerstand en lokale verschillen ten gevolge van inhomogeniteiten in de ondergrond.

4.3 Beschouwen van het ruimtelijke meetbereik van de sensoren

Voor de gemeten waterspanningen is onderzocht of er iets is te zeggen van het bereik van de sensoren. Het is namelijk van belang om te weten hoever meetraaien uit elkaar kunnen staan om een voldoende nauwkeurig beeld van de gebeurtenissen in en op de dijk te hebben.

Voor de sensoren E4 in de vier meetraaien is gekeken of ze een vergelijkbaar beeld geven van de gemeten waterspanning. In navolgende grafieken zijn de gemeten waarden in de tijd uitgezet. Figuur 4.16 laat een lange tijdreeks zien en opvallend daarin is dat sensor 4E4 niet goed gecorrigeerd lijkt te zijn voor de luchtdruk. Verder zit er een “dip” in de metingen van 1E4. Na deze dip liggen de meetresultaten van 1E4 niet meer boven de andere metingen maar er tussenin.

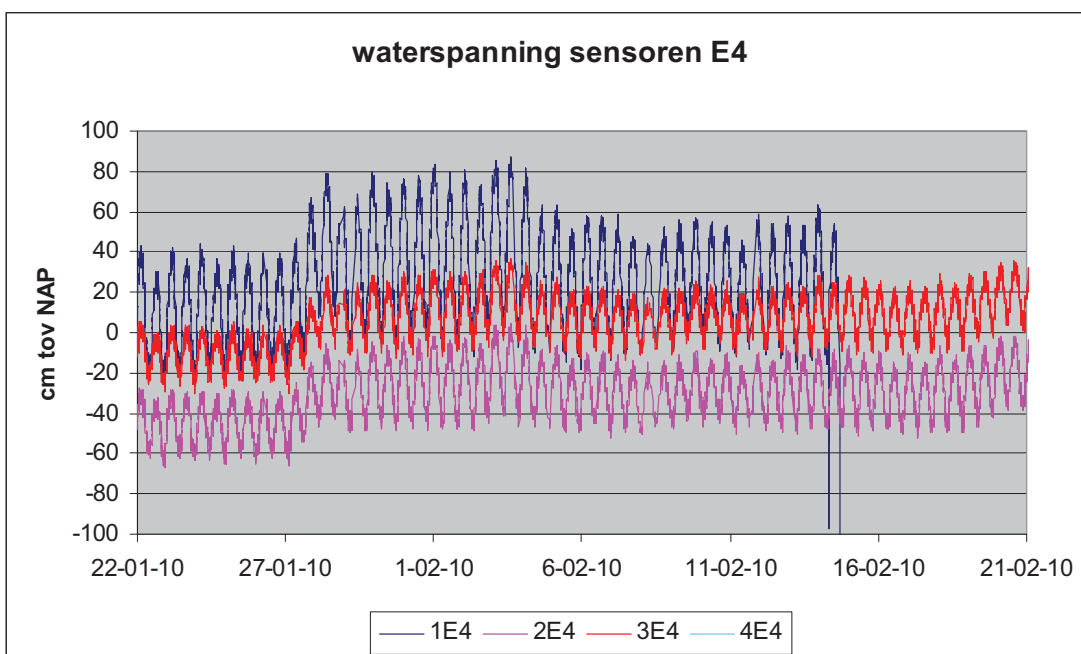


Figuur 4.16 Waterspanningsmetingen van de sensoren E4

Figuur 4.17 is een weergave van een kortere tijdreeks. Opvallend in deze grafiek is dat de meetresultaten behoorlijk uit elkaar liggen. De metingen volgen allemaal de zelfde trend, maar wel met een verschil van 40 cm of meer. Omdat de sensoren volgens de gegevens allemaal op ongeveer dezelfde diepte liggen, zou verwacht worden dat de sensoren ook ongeveer dezelfde meetwaarden geven. Dat hier een groot verschil in zit is enerzijds te verklaren uit het feit dat ook de LiveDijk een heterogene grondopbouw heeft en dat daardoor de doorlatendheid verschilt, en anderzijds dat de diepte locatie van de sensoren niet exact bekend is en enkele decimeters van de bepaalde diepte kan afwijken, gelet op de gebruikte

plaatsbepalingmethode (GPS). Deze combinatie maakt het moeilijk om een goede uitspraak te doen over het meetbereik van de sensoren. Het is in ieder geval met deze metingen niet mogelijk om door middel van interpolatie van twee metingen de tussenliggende meting te bepalen.

Voor dijkveiligheidsanalyses is deze constatering echter van groot belang: tussen een representatief te achten waterspanningsmeting en de werkelijke waarde in hetzelfde dijkvak, iets verderop, kan dus zomaar enkele decimeters verschil zitten. Voor de meer geavanceerde analyses is dit een significant verschil.



Figuur 4.17 Detail waterspanningsmetingen sensoren E4 (4E4 geeft geen meting meer)

5 Bruikbaarheid monitoringsysteem voor sterktebepaling

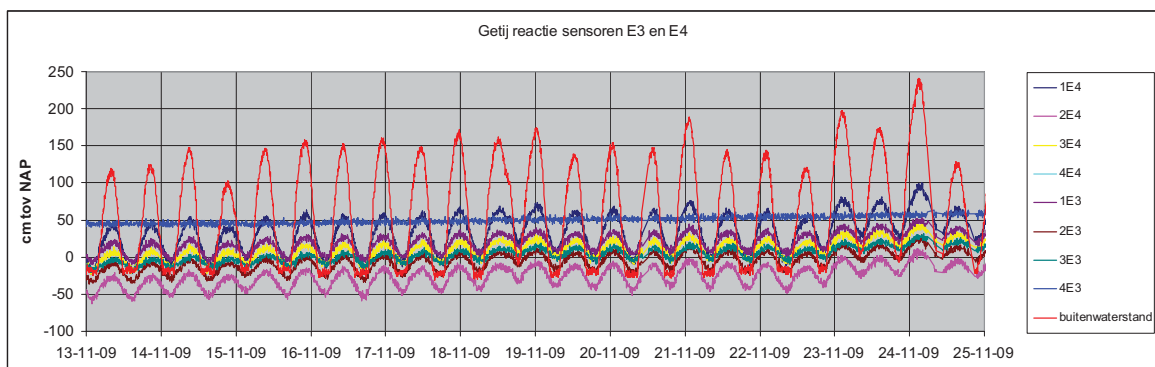
In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de bruikbaarheid van het monitoringssysteem voor de bepaling van de sterkte van de dijk. De sterkte van de dijk, in het kader van bestendigheid tegen doorbraak, kent diverse facetten: de sterkte van de asfaltbekleding, de sterkte van de grasbekleding aan de buitenzijde, de bovenzijde en de binnenzijde, de stabiliteit (zowel binnen- als buitenwaarts) en de weerstand tegen zandmeevoerende wellen (piping). Dat laatste punt is bij deze dijk overigens niet relevant, omdat het niet mogelijk is dat er een groot waterstandsverschil ontstaat over deze dijk, die in feite een strekdam is van een havenbekken.

5.1 Bepaling van het normale gedrag van de dijk

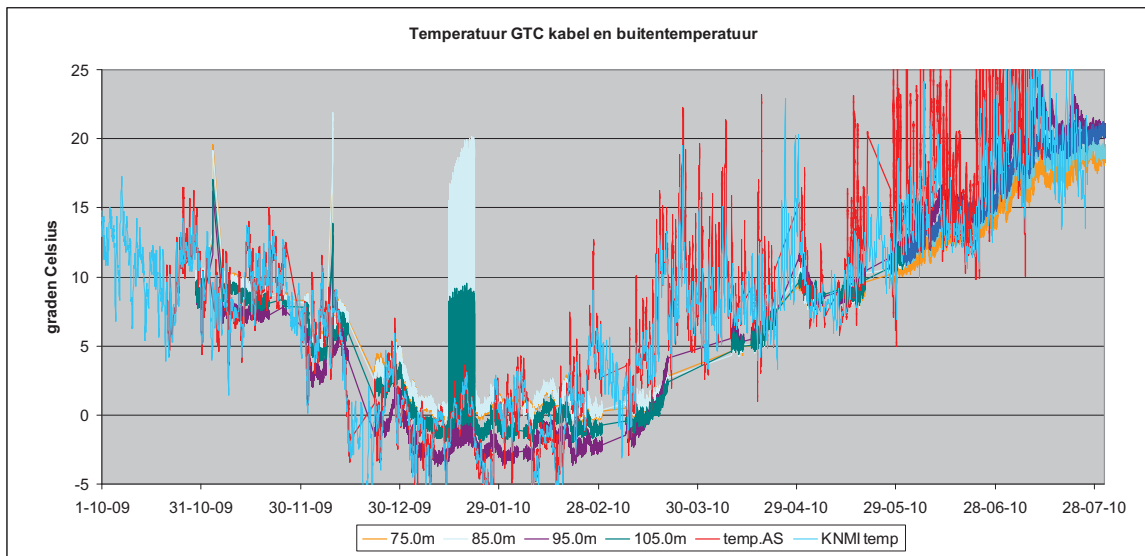
Het gaat er hierbij om of verschijnselen als uitzetting en krimp, waterstandverloop, waterspanningsverloop en beweging te detecteren zijn.

In eerdere paragrafen is de vertraagde reactie op de buitentemperatuur al besproken. De vervormingen in de hellingmeetbuis kunnen gezien worden als achtereenvolgens krimp en uitzetting. Net als bij de temperatuurmetingen is hierin een duidelijke jaarcyclus zichtbaar. Toch zijn hier ook wel opvallende elementen in te onderkennen, zoals de schijnbaar blijvende verplaatsing (of: hoekverdraaiing) in raai 2F (figuur 4.8).

Een ander merkwaardig verschijnsel is te zien in de waterspanningsmetingen, zie figuur 5.1. In deze figuur zijn alle waterspanningsmeters in raai E op de twee onderste niveaus getoond, samen met de buitenwaterstand. Te zien is dat alle instrumenten met een slechts geringe vertraging reageren op de buitenwaterstand. Per instrument is de reactie steeds min of meer in een vaste verhouding ten opzichte van de amplitude van het getij. Merkwaardig genoeg lopen de waterspanningen langzaam op. Dit verschijnsel is niet alleen in november 2009 waargenomen, maar is ook daarna zichtbaar in de waterspanningsmetingen. Dat betekent dat of de waterdrukken in de dijk steeds verder oplopen, of dat er een algemene drift optreedt.



Figuur 5.1. Getijreactie sensoren E3 en E4.



Figuur 5.2. Temperatuur GTC kabel in vergelijking met de buitentemperatuur.

5.2 Bepaling van cruciale sensoren in het kader van actuele sterktebepaling

De aangebrachte sensoren kunnen naar de meetwaarden tot dusverre in drie categorieën worden verdeeld:

- sensoren die de dagelijkse omstandigheden meten;
- sensoren die bij hardere wind ook iets registreren;
- sensoren die alleen bij (zware) storm mogelijk iets registreren.

Onder extreme omstandigheden zouden sensoren die ook bij dagelijkse omstandigheden fluctuaties meten mogelijk onvoldoende representatief zijn voor de dijkgedeelten die bij extreme omstandigheden met water verzadigd raken; reden om ook hogerliggende sensoren te installeren. Voor het meten van de dagelijkse omstandigheden zijn vooral de sensoren A, E3 en E4 van belang. Zoals in het vorige hoofdstuk is geconstateerd, treden er significante verschillen op tussen onderling identieke sensoren. Dit onderstreept het nut van meerdere meetraaien. De variaties over de hoogte (zie bijvoorbeeld figuur 5.1) tonen het nut aan van meerdere instrumenten boven elkaar – van een lineaire drukverdeling lijkt geen sprake. Onder zwaardere omstandigheden dan zich in het beschouwde meetjaar hebben voorgedaan zijn dan ook ondiepere instrumenten waardevol, zoals E1 en E2. De meetwaarden zijn van belang voor stabiliteitsmodellen, en tevens voor de modellering van ondoorlatende bekledingen – hiervoor zijn vooral sensoren B en C van belang.

Uit meetwaarden van glasvezelkabel D (zie figuren 2.1 t/m 2.3) kan golfploop en –indringing worden bepaald en tevens de variatie daarvan over de lengte van de dijk. Dit vergt wel een interpretatieslag, omdat alleen de temperaturen worden gemeten. Wanneer die echter beschikbaar is, kan hiermee bij een zware storm een inzichtelijk beeld worden verkregen van de toestand van de dijk juist boven de asfaltbekleding.

Vanwege al deze factoren – relevante verschillen tussen vergelijkbare sensoren, variaties over de hoogte, specifieke metingen voor deel-doelen – is het niet eenvoudig om een beperkt aantal sensoren als cruciaal aan te wijzen. Daarvoor komen de diepste waterspanningsmeters (E4) echter het meest in aanmerking. Gelet op de problematiek rond lokale beschadigingen bij dergelijke zeedijken onder zware stormcondities is de glasvezelkabel potentieel een goede tweede om als ‘cruciaal’ te worden aangemerkt, al

ontbreken meetwaarden (en observaties van (beginnende) schade) om dit vermoeden met hard cijfermateriaal te onderbouwen.

Een nog niet genoemde factor die ook een rol speelt is mogelijke uitval. Vermoedelijk door blikseminslag zijn in de zomer van 2010 circa 15 GeoBeads-instrumenten uitgevallen, met name de instrumenten die permanent in het water stonden. Cruciaal voor dit onderzoeksproject is dan ook dat één of meer sensoren op E4-niveau worden herplaatst.

5.3 Berekende 'actuele' stabiliteitsfactor vergelijken met stabiliteitsfactor uit de toetsing

Er is geen vergelijking gemaakt tussen de berekende actuele sterkte en de sterkte uit de dijktoetsing. Dit is niet gedaan omdat de benodigde tijd voor een goede vergelijking niet beschikbaar was. Waarschijnlijk zouden beide stabiliteitsberekeningen geanalyseerd en bewerkt moeten worden om tot een eerlijke vergelijking te komen.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies specifiek ten aanzien van het project LiveDijk Eemshaven

De meetfrequentie kan over het algemeen aanzienlijk lager, naar bijvoorbeeld eens per uur meten, maar met automatische verhoging van de meetfrequentie (tot de huidige frequentie van eens per vijf minuten) bij windsnelheden van 7 Bft en meer uit windrichtingen tussen west en noord-oost (over noord).

Voor een goede, volledige analyse moet de data op een dusdanige manier opgeslagen en verwerkt kunnen worden dat deze gericht kan worden op het eigenlijke doel, in plaats van dat er veel tijd verloren gaat met de databewerking.

De hellingmetingen zijn niet bruikbaar, doordat het onderste deel van de hellingmeetbuis niet in een vaste laag blijkt te staan.

Opvallend is de stijgende trend in waterspanningsmetingen, een verklaring hiervoor is niet gevonden.

De uitval van vooral de diepergelegen sensoren maakt (gedeeltelijke) vervanging noodzakelijk voor de voortzetting van dit onderzoeksproject.

6.2 Conclusies ten behoeve van dijkmonitoring: LiveDijken

Meer algemeen kan worden geconcludeerd dat er bij opschaling naar grotere dijktrajecten zeer zorgvuldig gekeken zal moeten worden naar de meetfrequenties, de wijze van dataopslag en de benaderbaarheid van de data, evenals de databewerkingsmogelijkheden.

Een andere belangrijke constatering naar aanleiding van deze evaluatie is dat er kennelijk significante verschillen in stijghoogte kunnen bestaan tussen overeenkomstige instrumenten in een overigens gelijke dijkopbouw. Dit kan oplopen tot meerdere decimeters. Hieruit blijkt de potentieel sterke invloed van inhomogeniteiten binnen eenzelfde grondlaag. Dit vergroot de potentiële onzekerheid ten aanzien van de waterspanningen in een dijk, zelfs in geval er in beperkte mate gemeten wordt; pas bij meerdere gelijksoortige en gelijke metingen zal deze onzekerheid verkleind kunnen worden.

Een meer specifieke algemene conclusie naar aanleiding van deze metingen is dat de nauwkeurigheid van de waterspanningsmetingen met GeoBeads op zichzelf voldoende is voor waterspanningsmetingen ten behoeve van toepassing voor macrostabiliteitsanalyses en detectie van erosie van bekleding. Voor pipingdetectie is het echter nadrukkelijk onvoldoende. Het is de vraag of dit komt door datafiltering of doordat de GeoBeads echt niet nauwkeuriger kunnen meten.

6.3 Aanbevelingen

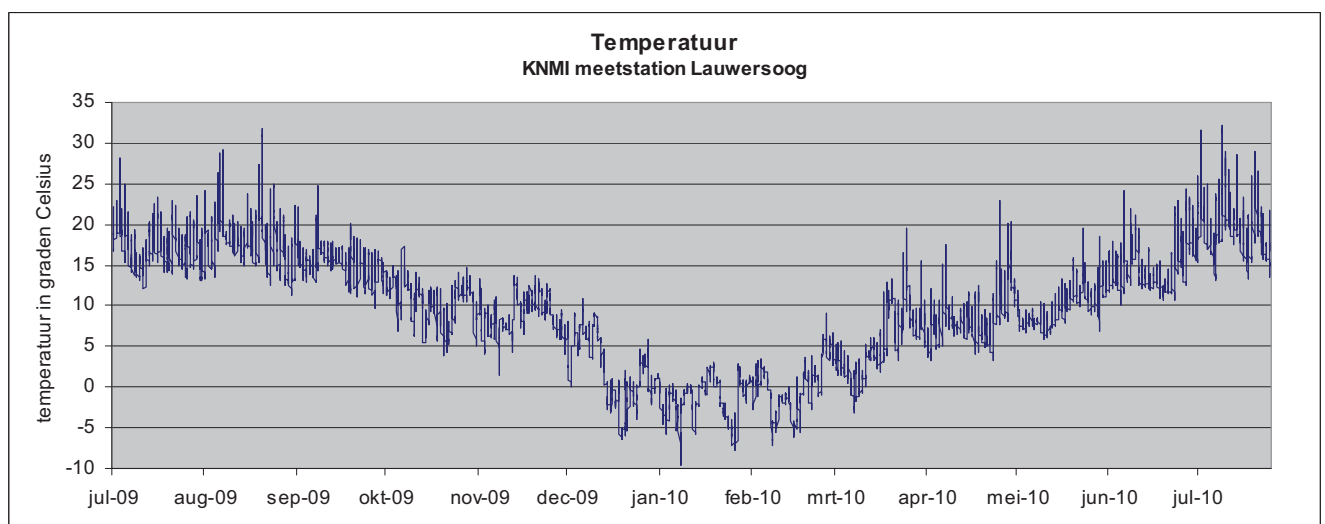
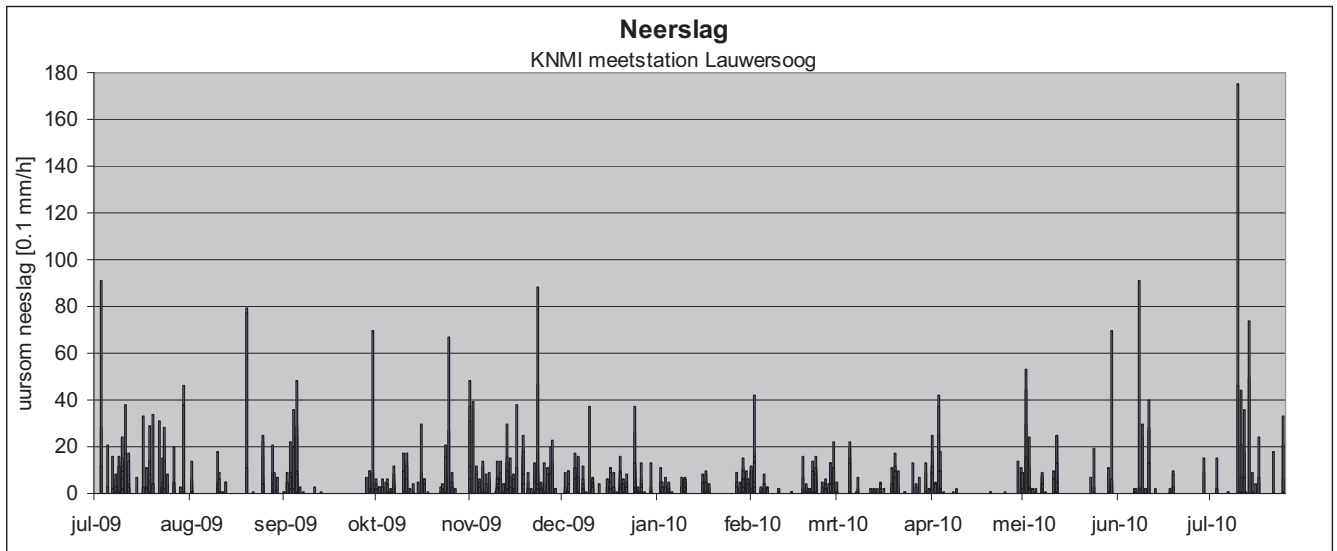
De data die gemeten wordt in de dijk moet op een betere en makkelijker wijze gepresenteerd kunnen worden. Snelle analyses van de metingen zijn nu niet mogelijk omdat er eerst veel werk gaat zitten in databewerking en dataverwerking. Een voorbeeld hiervan is de noodzakelijke correctie van de waterspanningsmetingen voor de luchtdruk. Dit zorgt nu voor een onnodige complicatie bij de interpretatie. Vanuit meettechnisch standpunt is gescheiden opslag van beide meetwaarden weliswaar te begrijpen, maar voor de verwerking door

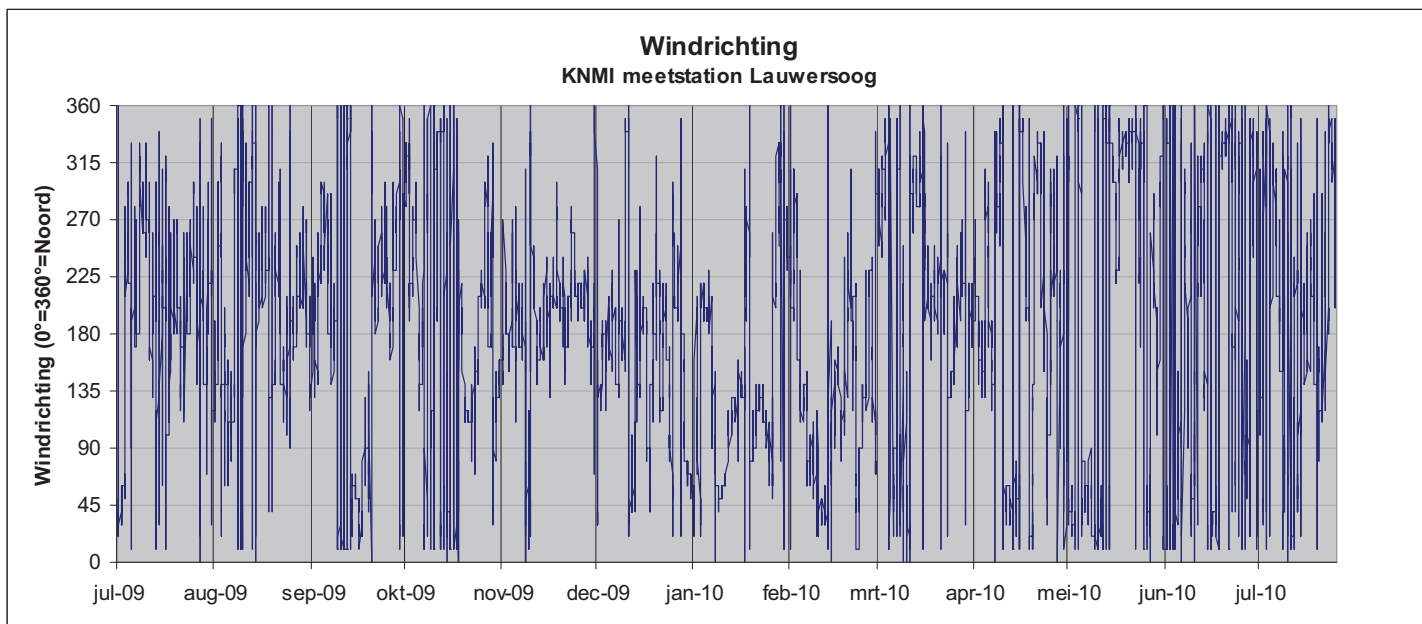
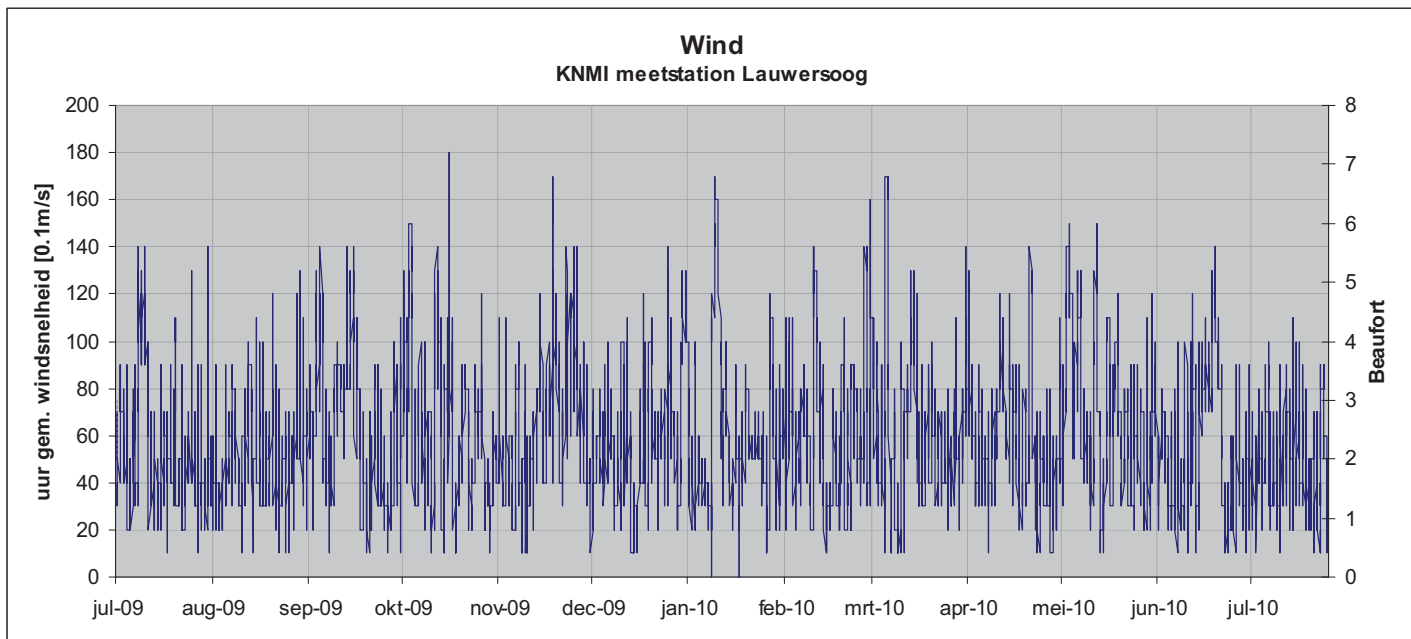
deskundigen met een civiele achtergrond (ook van bijvoorbeeld een waterschap) werkt dit nodeloos ingewikkeld.

Uit de tabel in §3.1 blijkt dat een aantal storingen niet lang duren maar dat er ook een aantal storingen van lange duur zijn. Aanbevolen wordt om hier maatregelen tegen te treffen.

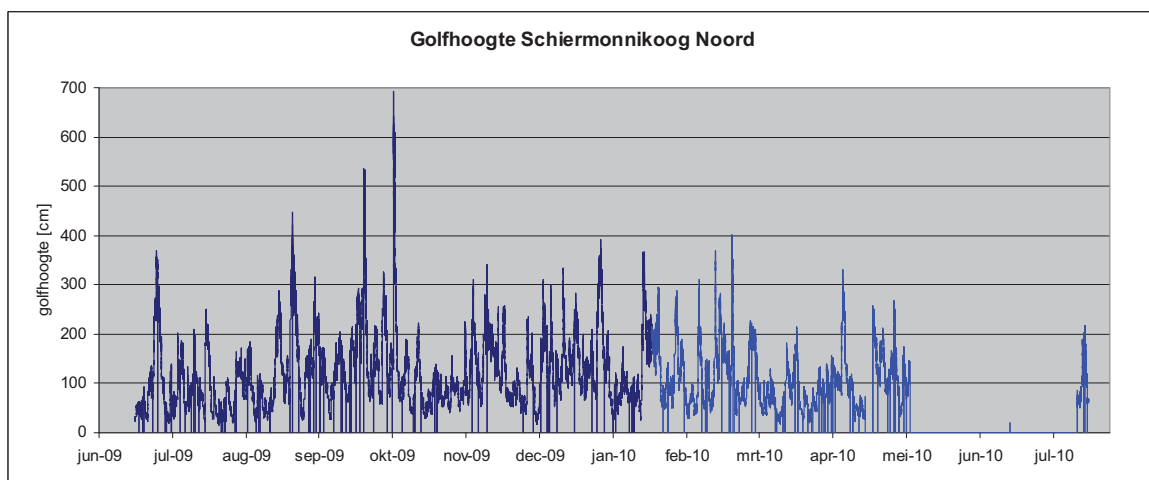
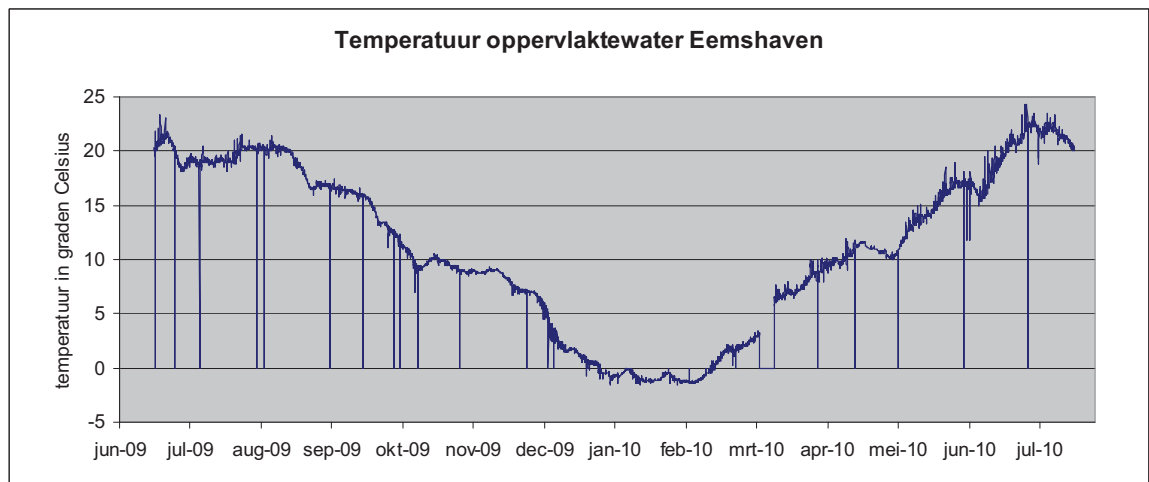
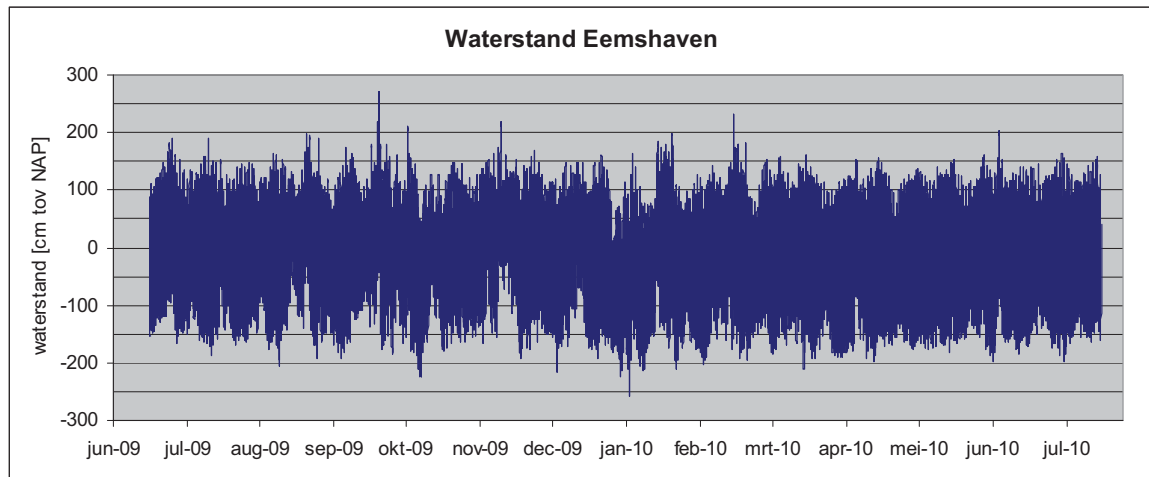
Tenslotte wordt aanbevolen om enkele diepere meetinstrumenten die in de zomer van 2010 zijn uitgevallen te vervangen.

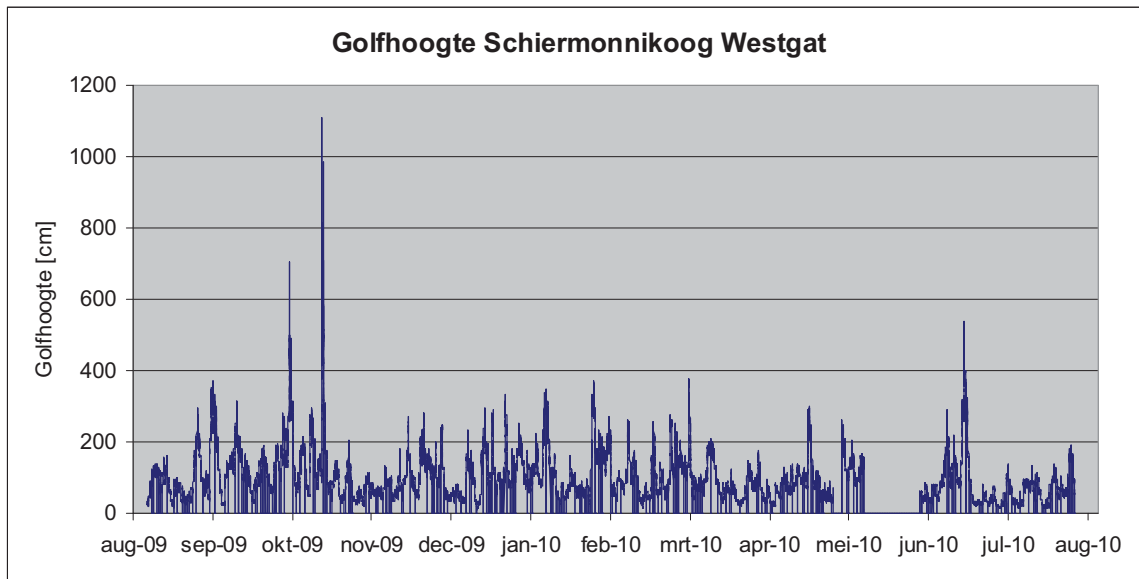
A gegevens KNMI





B Metingen Rijkswaterstaat





C Insteltijd sensoren

