


# **POVM Beter benutten actuele sterkte KIJK**

Activiteit 4 –  
Schematisering waterspanningen  
Definitief

**POV**

MACRO  
STABILITEIT



**Auteur: A. van Hoven  
Datum: november 2016**




**Versie: 2**

**Project**  
1220518-004

**Pagina's**  
39

**Samenvatting**

Deze rapportage behandelt de schematisering van de waterspanningen in vier profielen langs de Hollandse IJssel in de Krimpenerwaard. Het betreft vier profielen die eerder zijn gekozen als kansrijke profielen voor het uitvoeren van een studie naar het beter benutten van actuele sterkte. Het nauwkeurig meten van waterspanningen in het profiel betreft één van de onderdelen van de studie. In dit memo wordt per profiel de voorgestelde schematisering gegeven op basis van de uitgevoerde metingen.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
01	juni 2016						
02	nov 2016	Ir. A. van Hoven		Ing. A.P.C. Rozing		Ir. L. Voogt	

**Status**

Definitief

23 november 2016, definitief

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Globaal beeld waterspanningen onder dagelijkse omstandigheden</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Analyse waterspanning per profiel</b>	<b>5</b>
3.1	Inleiding	5
3.1.1	Dagelijkse omstandigheden	5
3.1.2	Extreme neerslag	6
3.1.3	Maatgevend hoogwater	7
3.2	Profiel 1 26.275	13
3.2.1	Dagelijkse omstandigheden	13
3.2.2	Extreme neerslag	16
3.2.3	Maatgevend hoogwater	16
3.3	Profiel 2 33.462	17
3.3.1	Dagelijkse omstandigheden	17
3.3.2	Extreme neerslag	19
3.3.3	Maatgevend hoogwater	19
3.4	Profiel 4 36.951	20
3.4.1	Dagelijkse omstandigheden	20
3.4.2	Extreme neerslag	21
3.4.3	Maatgevend hoogwater	22
3.5	Profiel 5 40.55	23
3.5.1	Dagelijkse omstandigheden	23
3.5.2	Extreme neerslag	25
3.5.3	Maatgevend hoogwater	26
<b>4</b>	<b>Referenties</b>	<b>27</b>

## Bijlagen

Bijlage A	Correctie voor luchtdruk gemeten door barometer
Bijlage B	Neerslagstatistiek STOWA / KNMI
Bijlage C	Getij en gemiddelde waterstand Krimpen en Gouda
Bijlage D	Waterspanningsmetingen en schematiseringswaarde per raai

## 1 Inleiding

Deze rapportage behandelt de schematisering van de waterspanningen in vier profielen langs de Hollandse IJssel in de Krimpenerwaard (Figuur 1.1). De schematisering is opgesteld binnen het project POVM Beter benutten actuele sterkte.

Het betreft vier profielen die eerder zijn gekozen als kansrijke profielen voor het uitvoeren van een studie naar het beter benutten van actuele sterkte. Het nauwkeurig meten van waterspanningen in het profiel betreft één van de onderdelen van de studie. Naast de waterspanningen worden de vier profielen intensief onderzocht met sonderingen, boringen, laboratoriumonderzoek naar de grondeigenschappen en rekentechnieken.



*Figuur 1.1 IJsseldijk Krimpenerwaard Krimpen – Gouda (geel – HM aanduidingen dijkkruin; rood scope KJK oktober 2015; (5) rode sterren dwarsprofielen die als case dienen; het middelste profiel is afgefallen*

De metingen zijn gerapporteerd door Inpijn [1] en zijn live beschikbaar via [www.Avsion.me](http://www.Avsion.me). De metingen worden elke 10 minuten gelogd in de periode 10 februari 2016 tot heden. Naast de waterspanningsmetingen zijn ook de neerslag en de luchtdruk gemeten.

Voor het interpreteren en analyseren van de metingen is gebruik gemaakt van [1] en van metingen geëxporteerd naar csv files welke inleesbaar zijn in Microsoft Excel. Er is gebruik gemaakt van recenter metingen dan gerapporteerd in [1].

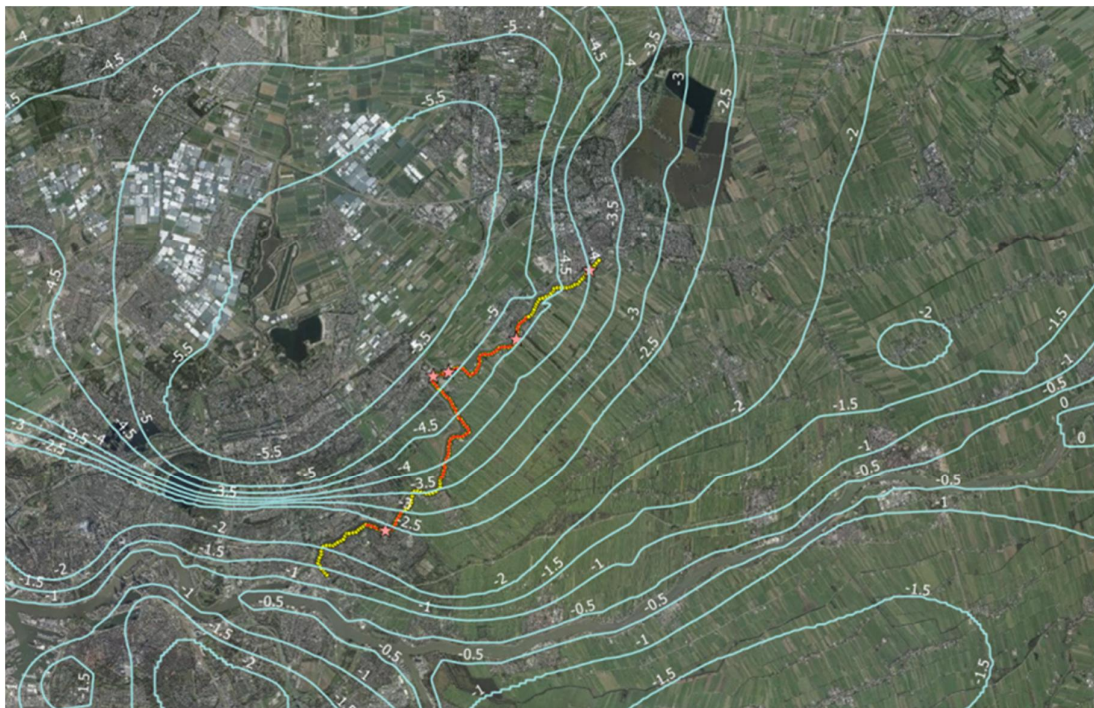
In deze rapportage wordt per profiel de voorgestelde schematisering gegeven op basis van de uitgevoerde metingen.



## 2 Globaal beeld waterspanningen onder dagelijkse omstandigheden

Op basis van de bekende gegevens over dijkopbouw, polderpeilen, buitenwaterstand en de gemiddelde grondwaterstand in het eerste watervoerende pakket bestaat er een verwachting van de waterspanningen in het dwarsprofiel onder dagelijkse omstandigheden.

De vier profielen betreffen een dijk hoofdzakelijk bestaande uit klei (slechts de toplaag in de kruin bestaat uit min of meer doorlatend materiaal (zand puin e. d.) met een dikte van 1 a 2,5 m, op een slappe lagenpakket van veen en klei op het pleistocene zand. Het pleistocene zand is het eerste watervoerende pakket. De bovenkant hiervan ligt op ca. NAP – 10 à -15 m. De stijghoogte in het eerste watervoerende pakket wordt bepaald door de diepe polders westelijk van de IJssel enerzijds en de rivier de Lek anderzijds. De stijghoogte onder de dijk is vrij laag (zie Figuur 2.1).



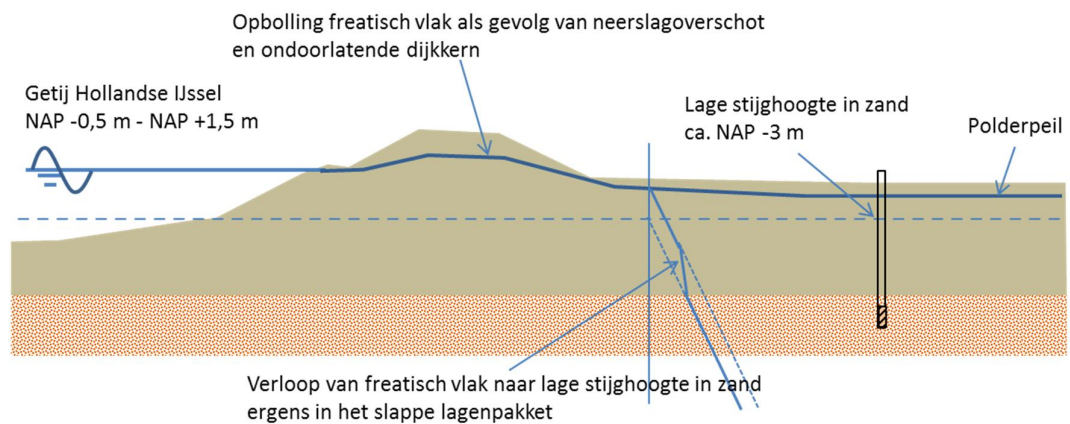
Figuur 2.1 Stijghoogte (m NAP) in het eerste watervoerende pakket (TNO Grondwaterkaart shape file WVP1 28-04-1995)

De geul van de Hollandse IJssel snijdt niet in het eerste watervoerende pakket. Indringing van het getij op de Hollandse IJssel in dit watervoerende pakket is daardoor gering. Het buitenwater heeft een getijslag tussen ca. NAP -0,5 m en NAP +1,5 m en de gemiddelde buitenwaterstand is circa NAP +0,3 m. Dit geldt voor zowel Gouda als voor Krimpen a/d IJssel.

Binnendijks wordt in de huidige situatie gestreefd naar de volgende polderpeilen:

Profiel 1	26.275	Peilgebied Krimpen	NAP -2,05 m
Profiel 2	33.462	Peilgebied De Nesse	NAP -2,60 m
Profiel 4	36.951	Peilgebied Kattendijksblok en Achterbroek	NAP -2,60 m
Profiel 5	40.55	Peilgebied Stolwijk en Berkenwoude	NAP -2,20 m

Dit leidt tot het onderstaande globale beeld van de waterspanningen onder dagelijkse omstandigheden (Figuur 2.2).



Figuur 2.2 Schematische weergave verwachting waterspanningen in typisch profiel langs de Hollandse IJssel

### 3 Analyse waterspanning per profiel

#### 3.1 Inleiding

De waterspanningen worden geschematiseerd voor drie situaties:

- 1 Dagelijkse omstandigheden
- 2 Extreme neerslag
- 3 Maatgevend hoogwater

In onderstaande paragrafen 3.2, 3.3, 3.4 en 3.5 wordt per profiel de schematisering aan de hand van de uitgevoerde metingen behandeld. Hierbij is gebruik gemaakt van de schematisering van grondlagen zoals verwerkt in D-Geostability berekeningen. Dit op basis van de geotechnische dwarsprofielen. Eerst worden algemene uitgangspunten en randvoorwaarden gegeven.

##### 3.1.1 Dagelijkse omstandigheden

De waterspanningsmetingen zijn ontleend aan [1]. Er is gemeten in de periode vanaf 10 februari 2016 tot juni 2016. In [1] zijn naast de naar stijghoogte omgerekende druk ook de buitenwaterstand bij Gouda en Krimpen a/d IJssel en de neerslag (sensor bij Raai 4) opgenomen.

Buitendijks is de waterstand van de Hollandse IJssel van belang, binnendijks de polderpeilen. De gemiddelde waterstand, laagwater en hoogwater van het getij wordt gegeven in Tabel 3.1 en bijlage C.

Tabel 3.1 Aangehouden getijgegevens en gemiddeld waterpeil op de IJssel en binnendijkse polderpeilen

	1 (25,27) mNAP	2 (33,46) mNAP	4 (36,95) mNAP	5 (40,55) mNAP
Gemiddeld peil	0.29	0.29	0.27	0.27
Gemiddeld laagwater	-0.27	-0.27	-0.36	-0.36
Gemiddeld hoogwater	1.24	1.24	1.48	1.48
Polderpeil	-2,05	-2,60	-2,55	-2,20

De waterspanningsmeters [1] meten een absolute druk in de poriën in de grond. Dit is de waterdruk, maar ook de atmosferische druk die weer op het water drukt. De drukmetingen worden daarom gecorrigeerd voor de atmosferische druk door deze te meten met een barometer en deze af te trekken van de gemeten druk van de waterspanningsmeter.

$$h_{wsm} = z_{wsm} + \frac{(p_{wsm} - p_{baro})}{g \rho_w}$$

Waarin:

- $h_{wsm}$  stijghoogte waterspanningsmeter (mNAP)
- $z_{wsm}$  plaatshoogte waterspanningsmeter (mNAP)
- $p_{wsm}$  druk gemeten door de waterspanningsmeter (Pa)
- $p_{baro}$  druk gemeten door de barometer (Pa)
- $g$  zwaartekrachtsversnelling ( $m/s^2$ )
- $\rho_w$  soortelijke massa water ( $kg/m^3$ )



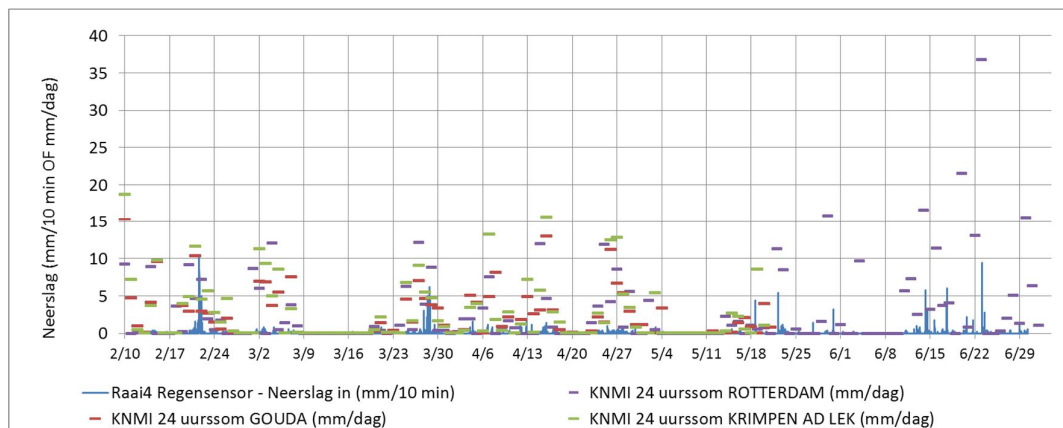
De luchtdrukcorrectie, de gemiddelde atmosferische druk en de schommelingen hier omheen als gevolg van depressies en hoge drukgebieden, bleek in elk van de waterspanningsmeters zichtbaar, waardoor wordt getwijfeld of de luchtdrukcorrectie in dit geval terecht en is. In bijlage A wordt hier nader op ingegaan. Voor de analyse van de respons op neerslag is gekeken naar de metingen zonder luchtdrukcorrectie.

### 3.1.2 Extreme neerslag

Onder extreme neerslag wordt in dit rapport verstaan 22 mm regen per dag gedurende 7 dagen, of 154 mm in 7 dagen [2] (Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken). Volgens [2] is de kans dat deze hoeveelheid gedurende één jaar wordt overschreden  $2,5 \times 10^{-4}$ . Recentere neerslagstatistiek is te vinden in [3], waarvan Tabel 1 is opgenomen in Bijlage B. Hieruit blijkt dat de kans op deze neerslag groter is geworden en verwacht wordt dat de kans in de toekomst groter wordt in verband met de ontwikkeling van het klimaat. Er wordt van uitgegaan dat de maatgevende neerslag uit vigerend [2] tot en met het zichtjaar 2035 voldoende is.

Bij raai 4 (40,55, nabij Gouda) is een regensensor geplaatst. De regensensor laat een piek zien van 10,2 mm in 10 minuten op 21 februari 2016. Die dag viel volgens de regensensor zelfs 178 mm, wat een extreme gebeurtenis is. Volgens de 24-uursmetingen van de KNMI viel op 21 februari gedurende de hele dag 10,3 mm. Het is onwaarschijnlijk dat deze extreme meting van de regensensor correct is en de absolute waarde is daarom genegeerd.

Voor de schatting van de neerslag langs de Hollandse IJssel is uitgegaan van de KNMI metingen bij station Gouda en Krimpen ad Lek tot mei 2016 (Figuur 3.1). Deze stations worden vertraagd doorgegeven door KNMI. Voor recente neerslaggegevens wordt gebruik gemaakt van station Rotterdam, welke wel dagelijks wordt doorgegeven. De neerslag gedurende de meetperiode is niet extreem geweest in vergelijking met wat hiervoor wordt aangehouden in [2]. Met een maximale dagsom van 37 mm in juni (Rotterdam) en een aantal keer meer dan 10 mm is het 'nat' geweest. Op 23 juni was de som van de afgelopen 7 dagen totaal 80 mm, wat ongeveer de helft is van wat gezien wordt als extreme neerslag in 7 dagen.



Figuur 3.1 Neerslag (mm) per 10 min regensensor bij raai 4 [1] en de horizontale streepjes: KNMI stations Gouda, Krimpen ad Lek en Rotterdam 24 uren som (mm)

Enkele van de meest ondiep geplaatste waterspanningsmeters reageren op neerslag. De reactie is in de orde van enkele decimeters stijghoogte (zie navolgende paragrafen). De onderliggende waterspanningsmeters reageren niet op de neerslag. Bij de analyse van de

reactie op neerslag was het van belang om de barometercorrectie alleen uit te voeren voor de gemiddelde barometerstand. Vanwege de correlatie tussen slecht (en nat) weer en lage luchtdruk lijken alle waterspanningsmeters een reactie te geven, terwijl dit alleen een gevolg is van de barometercorrectie en niet van de neerslag.

Een nauwkeurige modelmatige beschrijving van de correlatie tussen neerslag en de waterspanning in de bovenste grondlagen op basis van de metingen is zeer lastig. Zo variëren de ondiepe waterspanningsmeters in één profiel nooit allemaal en degene die reageren, reageren in verschillende mate. Ook is niet goed na te gaan in hoeverre het één bui is die de waterspanning laat toenemen of een aantal buien achter elkaar en hoe een reeks van buien en droge periodes zich verhouden tot 'extreme neerslag'.

Voor de schematisering van de situatie bij 'extreme neerslag' is daarom uitgegaan van de volgende eenvoudige praktische modellering:

- Stijging freatisch vlak (PL-line 1) is 2x de reactie in stijghoogte op de neerslag rondom 23 juni 2016; zijnde ca. 80 mm in 7 dagen. Dat is namelijk de helft van wat in [2] wordt gehanteerd als extreme neerslag.
- Minimale geschematiseerde stijging is 0,5 m [2].
- Ca. 2 m boven de onderzijde van het slappe lagenpakket, reageert de grond niet op neerslag. Vanaf dit niveau en daaronder wordt de waterspanning bepaald door de stijghoogte in het watervoerende pakket onder dagelijkse omstandigheden. Op dit niveau is de stijghoogte gemodelleerd met PL line 2. Tussen het freatisch vlak en het hierboven genoemde niveau volgt de geschematiseerde reactie op neerslag uit lineaire interpolatie (optie 99 in D-Geostability).

### 3.1.3 Maatgevend hoogwater

De maatgevende waterstanden zijn ontleend aan [4], de bijhorende waterstandverlooptlijn aan [5]. Uitgangspunten bij de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden, bijvoorbeeld over de (on)zekerheid van sluiting van de stormvloedkeringen en het gehanteerde klimaatscenario, staan in de referenties. Enkele worden onderstaand herhaald.

- Dijktraject 15-3 KIJK: 'signaalkans' 1/10.000 per jaar
- Maximaal toelaatbare overstromingskans 1/3.000 per jaar.
- De waterstand voor overige mechanismen (dan overloop en overslag), waaronder macrostabiliteit binnenwaarts, wordt bepaald bij de kans van 1/3.000 per jaar.
- Er is 0,3 m onzekerheidstoeslag opgeteld bij de waterstanden.
- Als gevolg van klimaatverandering is de waterstand afhankelijk van het 'zichtjaar'. Beschouwd zijn 2015, 2035, 2050 en 2100. De stabiliteitsanalyses worden uitgevoerd voor het zichtjaar 2035.

Voor de bepaling van de waterstand in de beschouwde profielen 2 en 4 is lineair geïnterpoleerd tussen de punten waar de waterstand is berekend. Voor de profielen 1 en 5 is lineair geëxtrapoleerd. De waterstanden bij de verschillende zichtjaren staan in Tabel 3.2.

Tabel 3.2 *Maatgevende waterstanden bij verschillende zichtjaren (inclusief 0,3 m onzekerheidstoeslag)*

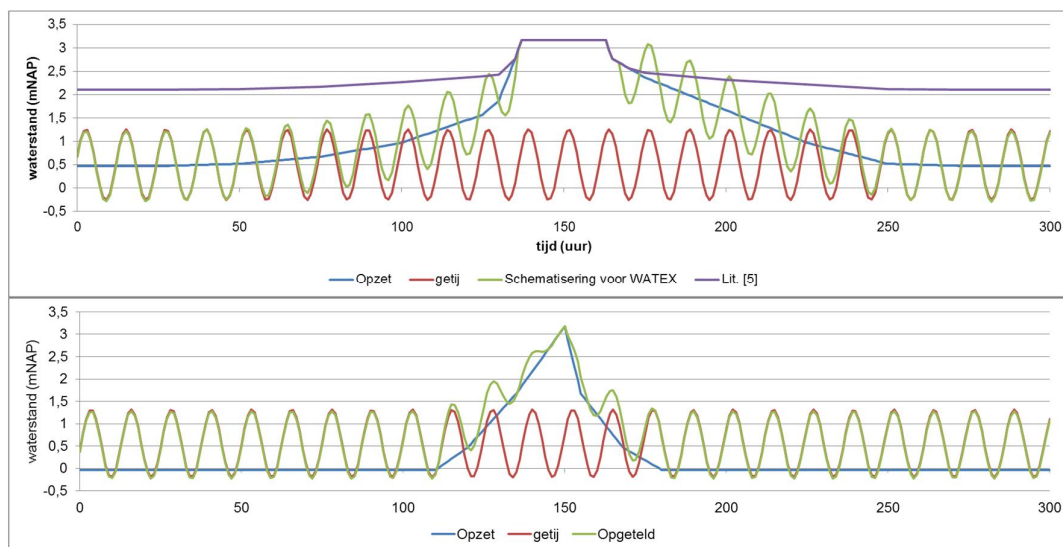
Zichtjaar	1 (25,27) mNAP	2 (33,46) mNAP	4 (36,95) mNAP	5 (40,55) mNAP
2015	3,08	3,13	3,19	3,29
2035	3,17	3,22	3,29	3,36
2050	3,24	3,30	3,35	3,39
2100	3,37	3,43	3,51	3,55

**Let op** dat binnen het project KIJK de autonome maaiveldaling van 0,22 m is verrekend in de stabiliteitsberekeningen door 0,22 m bij de waterstand op te tellen. Bij de hier gepresenteerde waarden is dit niet gedaan.

Het waterstandverloop is afhankelijk van het al dan niet gesloten zijn van de Europoortkering en de Hollandse IJsselkering. Er zijn vier scenario's denkbaar [5]:

- Gesloten kering Hollandse IJssel en gesloten Europoortkering
- Gesloten kering Hollandse IJssel en open Europoortkering
- Open kering Hollandse IJssel en gesloten Europoortkering
- Open kering Hollandse IJssel en open Europoortkering

De eerste twee scenario's geven hetzelfde waterstandverloop. De derde en de vierde geven een wezenlijk ander verloop. Verschillende scenario's hebben verschillende kansbijdragen aan het optreden van de maatgevende waterstand. Het is momenteel niet bekend welke kansbijdragen de verschillende scenario's geven. Wel wordt gesteld dat scenario 3 dominant is voor zichtjaren 2015-2050 en scenario 4 voor zichtjaar 2100. Onbekend is echter hoe dominant dit is. In [5] wordt geadviseerd om bij het ontwerp van de waterkering rekening te houden met elk van de drie mogelijke waterstandsverlopen. Voor onderhavige POVM studie wordt uitgegaan van het zichtjaar 2035 en waterstandverlooptlijnen bij scenario 1, 2 (gelijk) en 3 (Figuur 3.2).



Figuur 3.2 *Geschematiseerd waterstandverloop bij scenario's 1, 2 (gesloten kering Hollandse IJssel) en 3 (open kering Hollandse IJssel)*

Voor de schematisering van het getij is uitgegaan van een sinusoïde. In werkelijkheid is dit asymmetrisch, waardoor de (smalle) pieken hoger zijn dan de (brede) dalen. Voor de schematisering van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket in WATEX is deze mate van detail echter nauwelijks relevant.

Ten opzichte van [5] (paarse lijn in Figuur 3.2) is de gemiddelde waterstand in de aanloop naar het maatgevend hoogwater en na afloop van het hoogwater 'op het oog' verlaagd (blauwe lijn). Dit was nodig, omdat anders de buitenwaterstand gemiddeld NAP +2 m zou zijn, terwijl dat in werkelijkheid ca. NAP +0,3 m is. Bij de aanloop naar en na afloop van het hoogwater is het getij opgeteld bij de gemiddelde waterstandsverandering. Tijdens de gesloten periode van de kering is een constante hoge buitenwaterstand aangehouden.

De verhoging van de buitenwaterstand heeft gevolgen voor de waterspanningen in heel de dijk en de ondergrond. Dit wordt geschematiseerd door:

- a) Verhoging van het freatisch vlak in de dijk.
- b) Verhoging van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket.
- c) Verhoging van de stijghoogte in de tussenliggende grondlagen.

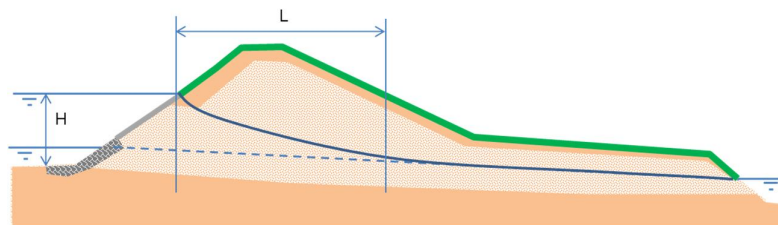
#### Ad a) Verhoging van het freatisch vlak in de dijk

De verhoging van het freatisch vlak in de dijk zal een gevolg zijn van de indringing van water door het buitentalud en de kern van de dijk. Indien er zandlagen en lagen puinhoudend zand in de kern aanwezig zijn, dan zal de stijging in deze lagen relatief snel kunnen gaan. De indringingslengte van een verhoging van het freatisch vlak  $L$  (m) wordt grofstoffelijk geschat met de formule [2] (Figuur 3.3).

$$L = \sqrt{\frac{2HkT}{n}}$$

Waarin:

- L indringingslengte (m)
- H karakteristieke hoogte van de grond waardoor het water naar binnen stroomt (m)
- k doorlatendheid 'zandkern' (m/s)
- T karakteristieke periode hoogwater (s)
- n porositeit zandkern (-)



Figuur 3.3 Principeschets indringing verhoging freatisch vlak in een dijk als gevolg van een tijdelijk verhoogde buitenwaterstand

De cohesieve natuurlijk afgezette grondlagen onder de dijk langs de Hollandse IJssel zijn relatief ondoorlatend ten opzichte van het dijkmateriaal en kunnen worden gezien als een ondoorlatende basis. De hoogte waarover het water naar binnen stroomt wordt gedefinieerd als de hoogwaterstand ten opzichte van de ondoorlatende basis.

Afhankelijk van de geschiedenis van het dijksmateriaal en de verdichting bij aanleg zal de kern van de dijk een doorlatendheid hebben in de orde van  $10^{-6}$  m/s. De buitenste kleilagen tot ca. 1 m onder het maaiveld kan een doorlatendheid hebben in de orde van  $10^{-4}$  à  $10^{-5}$  m/s. Eventueel aanwezige (puin houdende) zandlagen in de vorm van oude wegfunderingen hebben een geschatte hogere doorlatendheid in de orde van  $2 \times 10^{-4}$  m/s. Deze waarden zijn grove schattingen op basis van ervaring en dus niet gebaseerd op lokale metingen of laboratoriumproeven.

De porositeit van de grond, ofwel de mate waarin water kan worden geborgen in de vrije ruimte tussen de grondkorrels, is in de orde van 0,4. In de kern van de dijk is het mogelijk dat de vrije ruimte voor de berging van water kleiner is dan de gangbare porositeit. Om inzicht te krijgen in de gevoeligheid hiervoor is de indringing ook berekend bij een porositeit van 0,1.

Deze parameters leiden tot de volgende geschatte indringingslengtes (Tabel 3.3).

Tabel 3.3 Schatting Indringingslengtes L (m) voor verschillende scenario's

Scenario	T (uur)	k (m/s)	H (m)	L (m)
Normaal getij Kleibekleding	12	$10^{-5}$ à $10^{-4}$	4	3-9
Normaal getij kleikern	12	$10^{-6}$	4	1
Hoogwater	45	Kleikern – n=0,4	4	2
Hoogwater	45	Kleikern – n=0,1	4	4
Hoogwater boven NAP+2 m	20	Zandlaag boven NAP + 2 m	1,5	10

Uitgaande van de geschatte parameters laten de berekeningen zien dat de bovenste laag van een dijk, de kleibekleding van ca. 1 m dikte, met ontwikkelde bodemstructuur, onder invloed van getij en of hoogwater volledig volstroomt. De indringingslengte van 3-9 m is aanzienlijk meer dan de laagdikte. Het freatisch vlak in deze buitenste kleilaag op het buitentalud zal toenemen als gevolg van hoogwater tot ongeveer het niveau van het hoogwater.

De kleikern is naar verwachting veel dichter. De indringingslengte is in het geval van normaal getij ca. 1 m en tijdens hoogwater ca. 2 tot 4 m. Onder dagelijkse omstandigheden wordt overigens ook geen reactie gezien op het getij van de waterspanningsmeters in de buitenkruinlijn.

Voor de schematisering van waterspanningen moet de verhoging als gevolg van een hoogwater worden opgeteld bij de opbolling die onder dagelijkse omstandigheden wordt gemeten. Dit beeld is vergelijkbaar met de standaard schematisering van de toename van het freatisch vlak bij een maatgevende waterstand volgens [2].

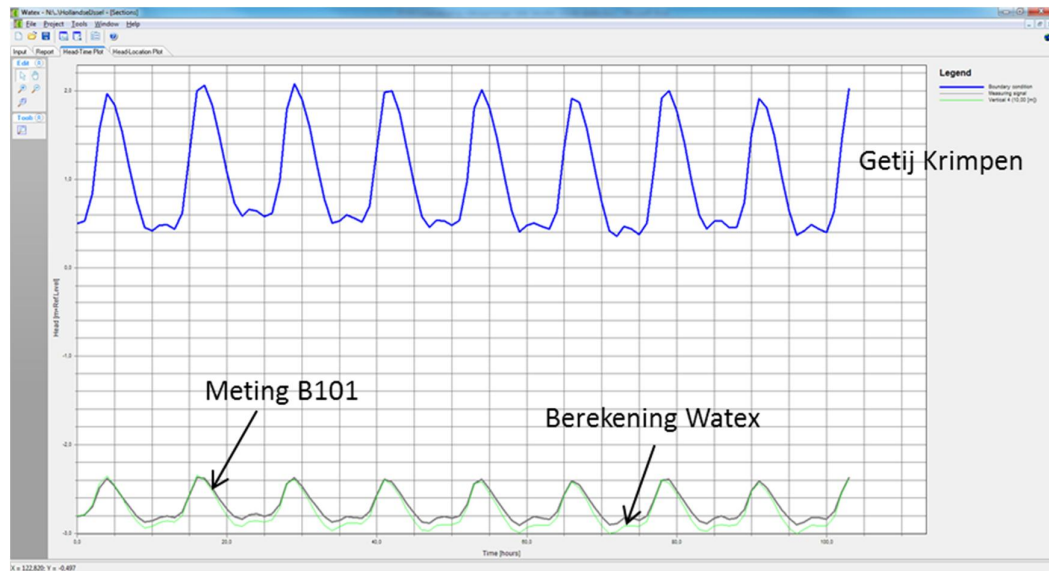
Indien er bovenin de dijk een zandlaag aanwezig is, al dan niet puinhoudend, dan zal het water makkelijker in de dijk dringen. Voor het scenario waarbij boven NAP + 2 m een zandlaag aanwezig is wordt een indringing berekend van 10 m, wat in het geval van de dijken langs de Hollandse IJssel tot aan het binnentalud zal zijn.

Bij de schematisering per profiel is nagegaan in hoeverre de bovenstaande scenario's van toepassing zijn en is op basis hiervan een profiel-specifieke schematisering aangehouden.

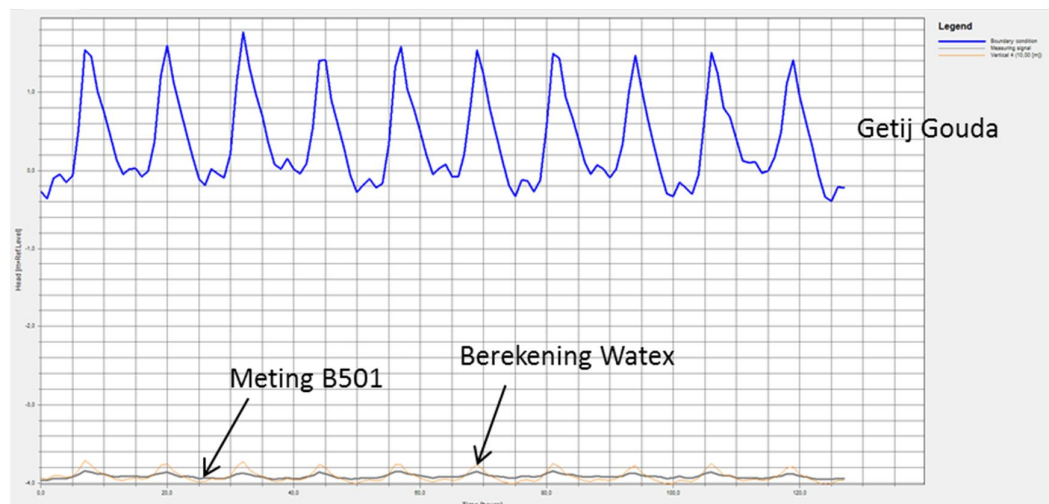
**Ad b) Verhoging van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket.**

De stijghoogte in het eerste watervoerende pakket wordt beïnvloed door de buitenwaterstand. Met behulp van peilbuizen wordt op de hele strekking tussen Krimpen en Gouda een respons gemeten op het dagelijks getij.

In het kader van deze studie wordt de verhoging van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket berekend met het 2D grondwaterstromingssoftware WATEX. De benodigde parameters, dikte en doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket, en de dikte doorlatendheid en consolidatiecoëfficiënt van de cohesieve lagen ter plaatse van de rivierbodem, voorland, dijk en achterland, zijn grof geschat. De schattingen zijn vervolgens aangescherpt door de peilbuismetingen te fitten op de berekeningen. Een voorbeeld hiervan wordt gegeven in Figuur 3.4 en Figuur 3.5 voor respectievelijk profiel 1 en profiel 5.

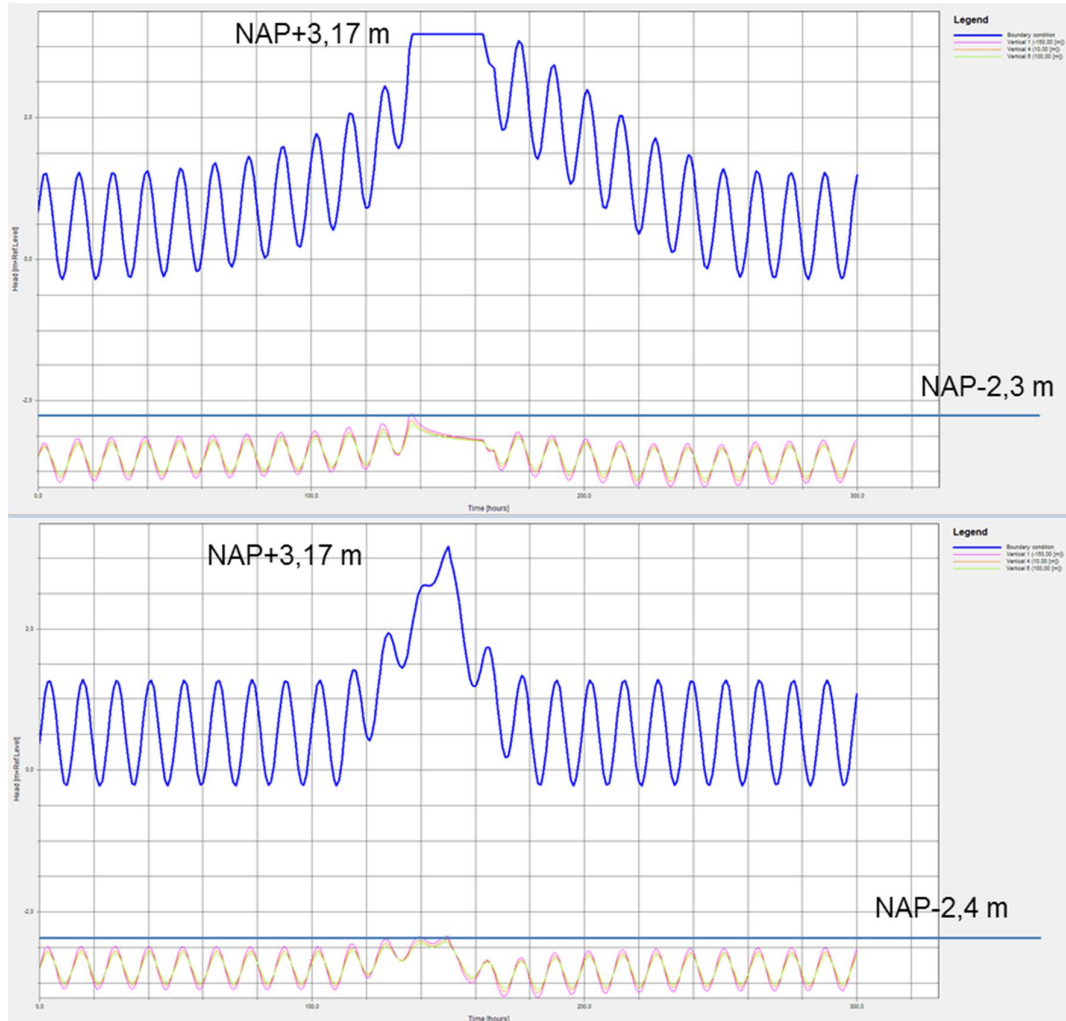


Figuur 3.4 Buitenwaterstand bij Krimpen (RWS; blauwe lijn), de met WATEX berekende stijghoogte (mNAP) (groene lijn) en de peilbuismeting (zwarte lijn) voor profiel 1



Figuur 3.5 Buitenwaterstand bij Gouda (RWS; blauwe lijn), de met WATEX berekende stijghoogte (mNAP) (rode lijn) en de peilbuismeting (zwarte lijn) voor profiel 5

De waterstandverlooptlijnen bij het maatgevend hoogwater zijn vervolgens ingevoerd in WATEX om de stijghoogte in het zandpakket te berekenen. Een voorbeeld voor profiel 1 wordt gegeven in Figuur 3.6.



Figuur 3.6 Watex berekening stijghoogte eerste watervoerende pakket (mNAP) bij MHW voor zichtjaar 2035 voor profiel 1 bij scenario 1 en 2 (boven) en 3 (onder)

Voor geen van de vijf profielen leidt het MHW tot een zodanige stijghoogte in het zand dat dit leidt tot opdrijven of zelfs een significantie invloed op de macrostabiliteit binnenwaarts. De stijghoogte wordt wel wat hoger ten gevolge van hoogwater, maar blijft relatief laag.

Opmerking:

- De berekeningen zijn gemaakt met het 2D WATEX model, terwijl met name bij Krimpen en De Nesse de stijghoogte ook door de waterstand op de Nieuwe Maas wordt beïnvloed. Indirect zit dit effect verwerkt bij het fitten van de parameters, omdat ook onder dagelijkse omstandigheden de stijghoogterespons wordt beïnvloed door de waterstand op de Nieuwe Maas. De 2D parameter zijn wat dat betreft zodanig aangepast dat ze fitten op de 3D situatie. De nauwkeurigheid van de extrapolatie wordt

door het 3D effect echter verkleind. Gezien de resultaten van de 2D berekeningen wordt echter geen significante invloed verwacht op de macrostabiliteit binnenwaarts.

**Ad c) Verhoging van de stijghoogte in de tussenliggende grondlagen.**

Onderin het slappe lagenpakket is een grens geschematiseerd waarvoor de zogenaamde PL-line 2 geldt. Deze overgang zit één tot enkele meters boven de bovenkant van het zandpakket, afhankelijk van het beschouwde profiel.

Voor profielen waar onder dagelijkse omstandigheden in de diepe waterspanningsmeters ter hoogte van deze overgang een respons wordt waargenomen op het getij is de stijghoogte hier ca. 2x de amplitude op het getij verhoogt. Anders is de PL-line 2 gelijk gehouden aan die onder dagelijkse omstandigheden.

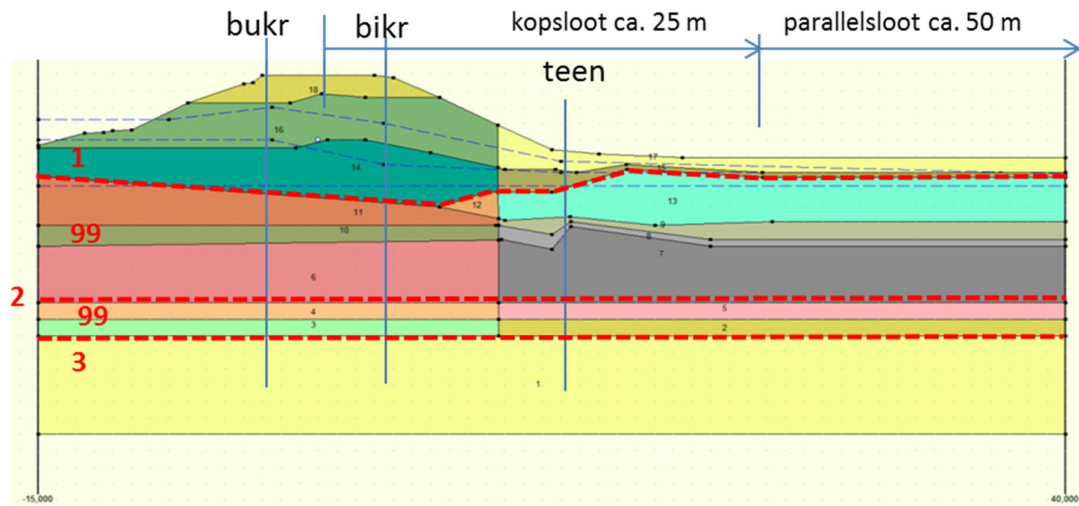
Boven deze grens wordt de stijghoogte lineair geïnterpoleerd tot aan de grondlagen waarin de waterspanning hydrostatisch is ten opzichte van het (verhoogde) freatisch vlak. Onder de grens wordt lineair geïnterpoleerd tot aan de (verhoogde) stijghoogte in het zand.

**3.2 Profiel 1 26.275**

De exacte schematisering staat in de meegeleverde D-Geostability files.

**3.2.1 Dagelijkse omstandigheden**

De geschematiseerde grondlagen en PL-lines onder dagelijkse omstandigheden staan in Figuur 3.7. De meetpunten zijn globaal in het geschematiseerde profiel gezet.



Figuur 3.7 Schematisering grondlagen in D-Geostability profiel 1

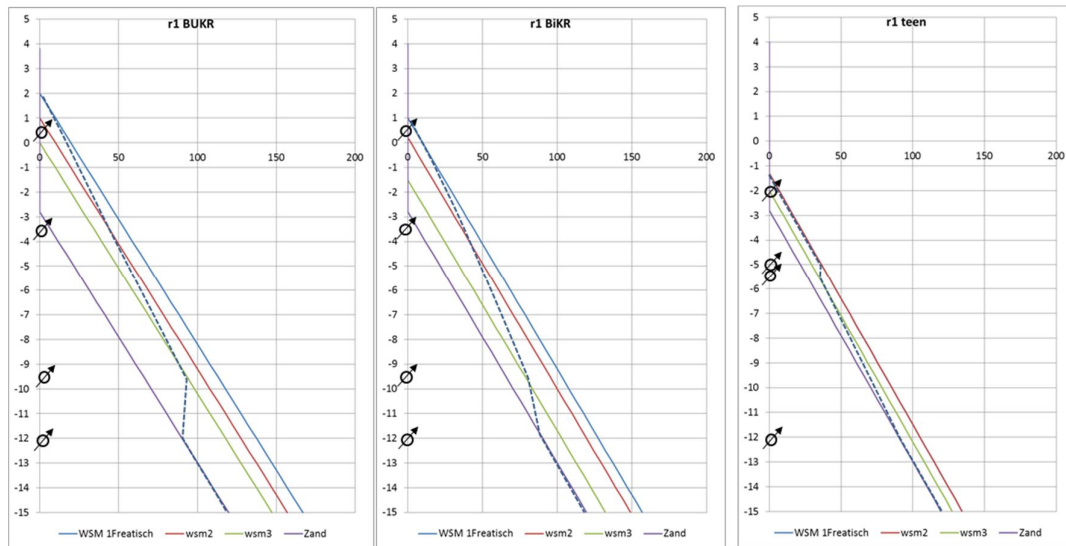
Ter hoogte van het dwarsprofiel is een kopsloot aanwezig op 25 m van de as (x=0) van de dijk, welke uitkomt op een parallelsloot op ca. 50 m. De parallelsloot komt ten oosten van het profiel tot op ca. 25 m bij de dijk. Het polderpeil is NAP -2,05 m.

Van de metingen [1] is het gemiddelde bepaald over de afgelopen tijd, nadat eventuele waterspanningen als gevolg van de installatie waren verdwenen. Deze waarden zijn samengevat in Tabel 3.4 en in Figuur 3.8. Het globale beeld van de metingen in een grafiek van stijghoogte tegen tijd wordt gegeven in Bijlage C.



Tabel 3.4 Samenvatting stijghoogtes (mNAP) en dieptes wsm's (mNAP) profiel 1

	Bukr		Bikr		Teen	
	Stijghoogte (mNAP)	Hoogte (mNAP)	Stijghoogte (mNAP)	Hoogte (mNAP)	Stijghoogte (mNAP)	Hoogte (mNAP)
maaiveld		3,8		4		-0,7
WSM1	2,0	0,5	1,0	0,5	-1,3	-2,02
WSM2	1,0	-3,6	0,2	-3,5	-1,3	-4,95
WSM3	0	-9,7	-1,5	-9,6	-2	-5,45
PB / zand	-2,8	-12	-2,8	-12	-2,8	-12



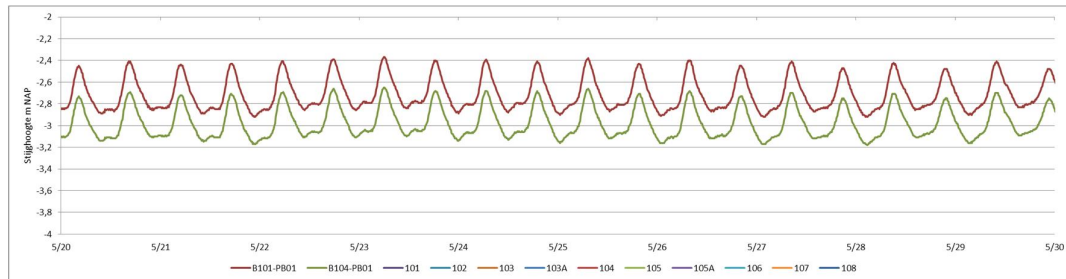
Figuur 3.8 Visualisatie gemiddelde waterspanning (kPa) in de drie vertikalen in profiel 1

De geschematiseerde ligging van het freatisch vlak (PL-line 1) onder dagelijkse omstandigheden is gebaseerd op de gemiddelde ligging van de stijghoogte van wsm 101, 104 en 107 (de hoogste waterspanningsmeters per verticaal), een gemiddelde hoogwaterstand van het buitenwater NAP +1,24 m en het polderpeil van NAP -2,05 m, op 40 m van de dijk.

De opbolling in de dijk volgt uit de metingen van 101 (buitenkruin) en 104 (binnenkruin), beide met een plaatshoogte van NAP +0,5 m. Gemiddeld over de meetperiode geven ze een stijghoogte van respectievelijk NAP +2,0 m en NAP +1,0 m.

Wsm 101 loopt zonder aanwijsbare reden sinds enkele weken op tot inmiddels ca. NAP +3,2 m (bijlage C). Aangenomen wordt dat dit niet een gevolg is van een werkelijk toenemende waterspanning. De hoge (en nog toenemende) stijghoogte is hoger dan de onderzijde van het zandcunet ter plaatse van de kruin. Als dit cunet gevuld zou zijn met water, dan zou ter plaatse van de binnenkruin ook een hogere stijghoogte worden verwacht. Ook WSM 102, geplaatst onder 101 op een diepte van NAP -3,6 m laat geen stijging zien. Bij de schematisering is daarom uitgegaan van een stijghoogte die iets hoger is dan het gemiddelde over de min of meer stationaire periode, maar die de stijging van de afgelopen weken niet meeneemt.

Het eerste watervoerende pakket ligt op een diepte van ca. NAP -12 m. Voor de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket onder dagelijkse omstandigheden is de gemiddelde waarde van NAP -2,8 m aangehouden. De stijghoogte in het eerste watervoerende pakket is volgens Figuur 2.1 gemiddeld iets lager; ca. NAP -2,5 m. Het globale beeld van een lage stijghoogte in dit gebied wordt echter bevestigd door twee drukopnemers in peilbuizen bij profiel 1: B101 in de buitenkruinlijn en peilbuis B104 in de teen van de dijk (Figuur 3.9).



Figuur 3.9 Stijghoogte eerste watervoerende pakket peilbuis B101 en B104 bij profiel 1

Gemiddeld is de stijghoogte bij de buitenkruin NAP -2,7 m en bij de teen NAP -2,95 m. Dit betekent een gemiddeld verval van 0,25 m over 15 m afstand in polderwaartse richting, wat groot is, gezien de het globale beeld in Figuur 2.1. Mogelijk is is deze behoorlijke gradiënt aanwezig door een lokale heterogeniteit in het watervoerende pakket en/ of is er sprake van enige onnauwkeurigheid in absolute hoogte van de meting. Er wordt bij de schematisering echter uitgegaan van het gemiddelde. De invloed van dit uitgangspunt op de berekende stabiliteit is nihil, omdat het kritische glijvlak relatief oppervlakkig ligt.

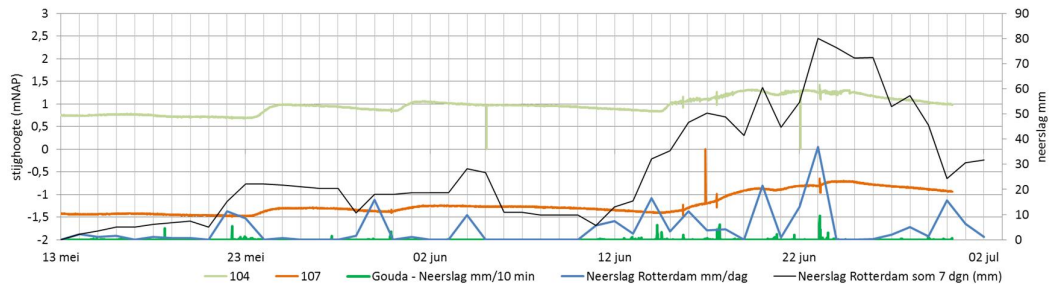
De (dubbele) amplitude van de respons op het getij is gelijk voor beide peilbuizen en bedraagt circa 0,45 m op een getijslag van circa 1,7 m. Ondanks deze amplitude van de stijghoogte in het zand als respons op het getij wordt, vanwege de lage stijghoogte, niet verwacht dat dit van significante invloed is op de macrostabiliteit van het binnentalud.

WSM's 102 (NAP -3,6 m), 105 (NAP -3,5 m), 106 (NAP -9,6 m) en 108 (NAP -4,95 m) variëren iets met het getij op de Hollandse IJssel. 102, 105 en 108 liggen ruim boven het zand en zijn geplaatst in humeuze klei en veen. Waarschijnlijk gaat het om ongedraineerd grondgedrag als reactie op de wisselende druk op de dijk ten gevolge van de wisselende buitenwaterstand. De wisselende druk tegen de dijk drukt de dijk bij elk getij een klein beetje naar binnen, waarop de grond ongedraineerd reageert. In de schematisering van de waterspanningen onder dagelijkse omstandigheden wordt hiermee verder geen rekening gehouden, omdat de variaties zeer klein zijn en nauwelijks invloed hebben op de effectieve spanning in deze grondlagen. Het laat overigens wel zien dat de grond ongedraineerd reageert op waterstandsvariaties met een periode van 12 uur wat langer is dan de periode waarin een afschuiving optreedt. Daarmee wordt de keuze voor het modelleren van een ongedraineerde schuifsterkte van de grond in stabiliteitsanalyses ondersteund.

De overgang tussen het freatisch vlak (relatief hoog) en de stijghoogte in het zand (relatief laag) vindt vooral plaats over de onderzijde van het slappe lagenpakket. Voor profiel 1 is dit geschematiseerd door een PL-lijn (2) te definiëren op de overgang tussen de laag basisveen en 'klei planten (Echteld)'. Tussen de grondlagen gelegen onder het freatisch vlak en de bovenzijde van het basisveen wordt lineair geïnterpoleerd. Ook tussen de bovenkant van het basisveen en de bovenkant van het zand wordt de stijghoogte lineair geïnterpoleerd (zie Figuur 3.7).

### 3.2.2 Extreme neerslag

De meeste neerslag tijdens de meetperiode viel in de periode midden juni toen over een periode van 7 dagen 80 mm viel, ongeveer de helft van extreme neerslag [2]. Alleen de waterspanningsmeters 104 en 107, resp. ondiep t.p.v. binnenkruin en ondiep t.p.v. teen, reageerde op de neerslag (Figuur 3.10).



Figuur 3.10 Neerslag (rechter verticale as) en stijghoogte (mNAP) voor wsm 104 en 107 (alleen correctie voor gemiddelde luchtdruk).

De stijghoogte gemeten door WSM 104 ter plaatse van de binnenkruin steeg in de orde van 0,3 m ten opzichte van de geschematiseerde gemiddelde stand van NAP +1 m; wsm 107 ter plaatse van de teen steeg in de orde van 0,6 m ten opzichte van de geschematiseerde gemiddelde stand van NAP -1,3 m.

Voor de schematisering tijdens maatgevende neerslag vertaalt dit zich naar een verhoging van het freatisch vlak van 0,5 m bij de buitenkruinlijn, 0,6 m ter plaatse van de binnenkruinlijn en 1,2 m ter plaatse van de teen (zie paragraaf 3.1.2). Omdat bij de teen het freatisch vlak bij deze stijging boven het maaiveld zou uitstijgen is de stijging hier gelimiteerd tot het maaiveld. (zie paragraaf 3.1.2).

De druktoename als gevolg van neerslag wordt in de lager gelegen grondlagen (WSM 105 en 108) niet gemeten. Bij de schematisering wordt hiermee rekening gehouden door alleen het freatisch vlak (PL-line 1) te verhogen. De schematisering van de overige PL-lines is gelijk aan die onder dagelijkse omstandigheden.

### 3.2.3 Maatgevend hoogwater

Het maatgevend hoogwater is gelijk aan NAP +3,17 m voor het zichtjaar 2035 (zie paragraaf 3.1.3).

De stijging van het freatisch vlak in de dijk wordt beïnvloed door een zandlaag in de dijk op een hoogte van ca. NAP +2,5 m, ofwel 0,7 m lager dan het MHW. Het is waarschijnlijk dat zowel binnen- als buitendijs klei op het talud aanwezig is, waardoor het zand hier niet aan het oppervlak ligt, maar het is ook waarschijnlijk dat deze klei een ontwikkelde bodemstructuur heeft en dus veel beter doorlatend is dan de kleikern. De indringingslengte wordt daarom geschat in de orde van 10 m (paragraaf 3.1.3).

De stijging van het freatisch vlak is geschematiseerd door de MHW stand over 2 m horizontaal de dijk in te laten lopen. Het freatisch vlak is ter plaatse van de binnenkruin op 9 m van het snijpunt met het buitentalud verhoogd met 0,5 m (tot NAP +1,5 m) en ter plaatse van de teen is het freatisch vlak verhoogd met 0,2 m tot net onder het maaiveld. Opgemerkt

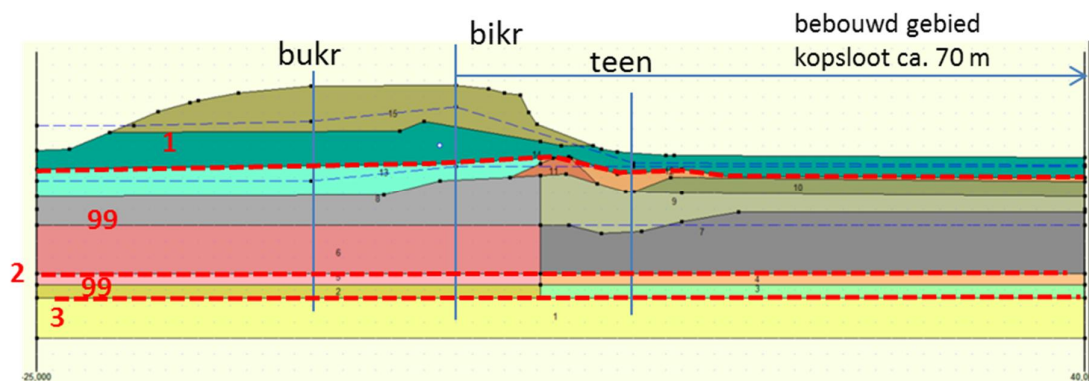
wordt dat voor buitenwaterstanden onder NAP + 2,5 m, dus onder het niveau van de zandlaag, er geen stijging van het freatisch vlak onder de kruin en het binnentalud wordt verwacht.

Met behulp van WATEX is berekend dat voor scenario 1 en 2 (gesloten kering Hollandse IJssel) de stijghoogte in het zand net iets hoger wordt dan voor scenario 3 (open kering Hollandse IJssel). Voor de schematisering is uitgegaan van scenario 1 en 2. Als gevolg van het hoogwater neemt de stijghoogte in het zand toe met 0,5 m tot NAP -2,3 m.

PL-line 2 is niet gewijzigd ten opzichte van dagelijkse omstandigheden.

### 3.3 Profiel 2 33.462

De geschematiseerde grondlagen en PL-lines onder dagelijkse omstandigheden staan in Figuur 3.11. De meetpunten zijn globaal in het geschematiseerde profiel gezet.



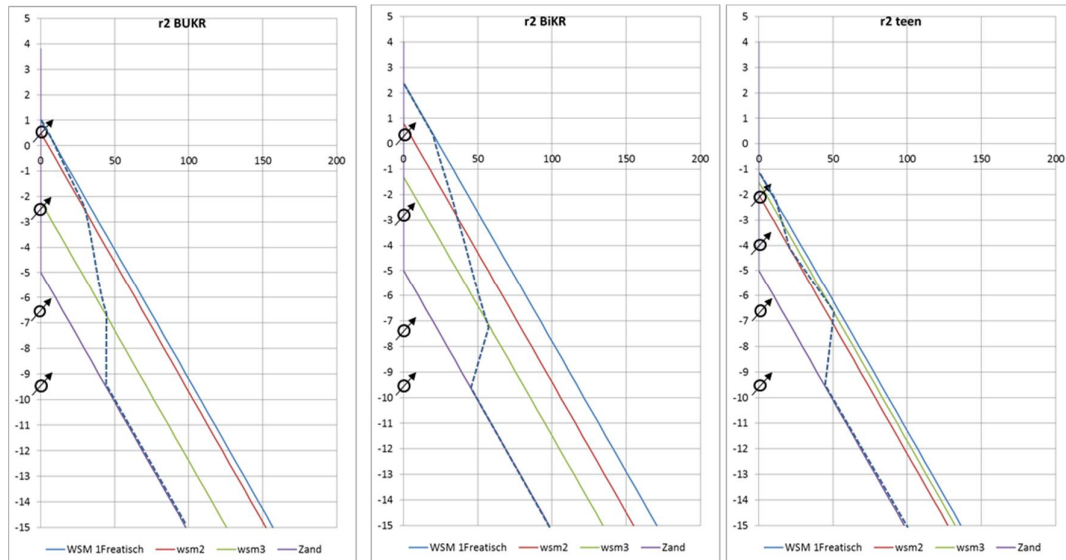
Figuur 3.11 Schematisering grondlagen in D-Geostability profiel 2

#### 3.3.1 Dagelijkse omstandigheden

Van de metingen [1] is het gemiddelde bepaald over de afgelopen tijd, nadat eventuele waterspanningen als gevolg van de installatie waren verdwenen. Deze waarden zijn samengevat in Tabel 3.5 en in Figuur 3.12.

Tabel 3.5 Samenvatting stijghoogtes (mNAP) en dieptes wsm's (mNAP) profiel 2

	Stijghoogte Bukr (mNAP)	Hoogte (mNAP)	Stijghoogte Bikr (mNAP)	Hoogte (mNAP)	Stijghoogte teen (mNAP)	Hoogte (mNAP)
maaiveld	0	3,7	0	3,7	0	-0,5
WSM1	1	0,44	2,4	0,45	-1,1	-2,08
WSM2	0,5	-2,63	0,8	-2,86	-2	-3,99
WSM3	-2,2	-6,7	-1,3	-7,27	-1,5	-6,75
zand	-5	-9,5	-5	-9,5	-5	-9,5



Figuur 3.12 Visualisatie gemiddelde waterspanning (kPa) in de drie vertikalen in profiel 2

De geschematiseerde ligging van het freatisch is gebaseerd op de gemiddelde ligging van de stijghoogte van wsm 201, 201A, 204A en 207. Dit is per meetpunt de bovenste waterspanningsmeter. 201A en 204A zijn bijgeplaatst om 201 en 204 te verifiëren.

Wsm 201 en 201A (beide NAP +0,4 m) staan ongeveer halverwege het dijklichaam, waar vanuit geometrische overweging de grootste opbolling wordt verwacht. Beide wsm's geven een naar stijghoogte omgerekende druk van NAP + 1m. Ter hoogte van de binnenkruin staat 204A (NAP +0,4 m) welke na plaatsing een hoge waterspanning gaf, maar zich nu aanpast naar ca. NAP +2,4 m. Wsm 204 gaf een onwaarschijnlijk hoge druk en wordt niet meer beschouwd. De opbolling aan de binnenkant van de dijk is hoger dan aan de buitenkant. Een mogelijke oorzaak is dat de dijk aan de buitenzijde is opgebouwd uit materiaal met een hogere doorlatendheid (mogelijk zand) waardoor het grondwater makkelijker richting de IJssel draineert.

Wsm 207 (NAP -2,1 m) in de teen van de dijk geeft een naar stijghoogte omgerekende druk van ca. NAP -1,1 m, wat net onder maaiveld is. Een grondwaterstand gelijk aan het polderpeil (NAP -2,6 m) zal verder van de dijk worden bereikt. De eerste sloot ligt op ca. 70 m van de dijk. Aan het einde van de schematisering in D-Geostability (x=40 m) wordt NAP -1,5 m aangehouden onder dagelijkse omstandigheden.

De stijghoogte in het zand is hier gemeten in het kader van het project KIJK. Gemiddeld is de stijghoogte hier NAP -4,7 m. Dit is min of meer conform het globale beeld zoals gegeven in Figuur 2.1.

Net als bij profiel 1 vindt het grootste deel van het verhang van het freatisch vlak naar de lage stijghoogte in het zandpakket plaats over het onderste deel van het slappe lagenpakket. Dit kan worden geschematiseerd door het definiëren van een stijghoogtelijn op de overgang tussen de laag hollandveen en de klei – met planten (Echteld). Tussen grondlagen gelegen onder het freatisch vlak en de bovenzijde van het basisveen wordt geïnterpoleerd. Ook tussen de bovenkant van het basisveen en de bovenkant van het zand wordt de stijghoogte geïnterpoleerd (zie Figuur 3.11).

### 3.3.2 Extreme neerslag

De hevige neerslag rondom 20 juni 2016 geeft alleen in WSM 201A een respons van 0,3 m. De overige waterspanningsmeters in dit profiel geven geen of een veel lagere respons op de neerslag.

Extreme neerslag wordt geschematiseerd door een verhoging van het freatisch vlak in de buitenkruin van 0,6 m ten opzichte van de gemiddelde ligging van NAP + 1 m. Verder is het freatisch vlak verhoogd met 0,5 m tenzij dit werd gelimiteerd door het maaiveld, namelijk bij de binnenteen.

### 3.3.3 Maatgevend hoogwater

Het maatgevend hoogwater is NAP +3,22 m (zichtjaar 2035).

De stijging van het freatisch vlak in de dijk wordt beïnvloed door een zandlaag in de dijk op een hoogte van NAP + 1 m. Het dijkprofiel is echter vrij breed, ook het profiel met een hoogte boven MHW. Door deze breedte wordt de invloed van het MHW aan de binnenzijde van de dijk beperkt.

Net als bij profiel 1 is het waarschijnlijk dat zowel binnen- als buitendijks klei op het talud aanwezig is, waardoor het zand hier niet aan het oppervlak ligt, maar het is ook waarschijnlijk dat deze klei een ontwikkelde bodemstructuur heeft en dus veel beter doorlatend is dan de kleikern. Uitgaande van  $H=2,2$  m,  $k=2 \times 10^{-4}$  m/s,  $n=0,4$  en een tijdsduur van 40 uur, wordt een indringingslengte geschat van bijna 20 m (paragraaf 3.1.3).

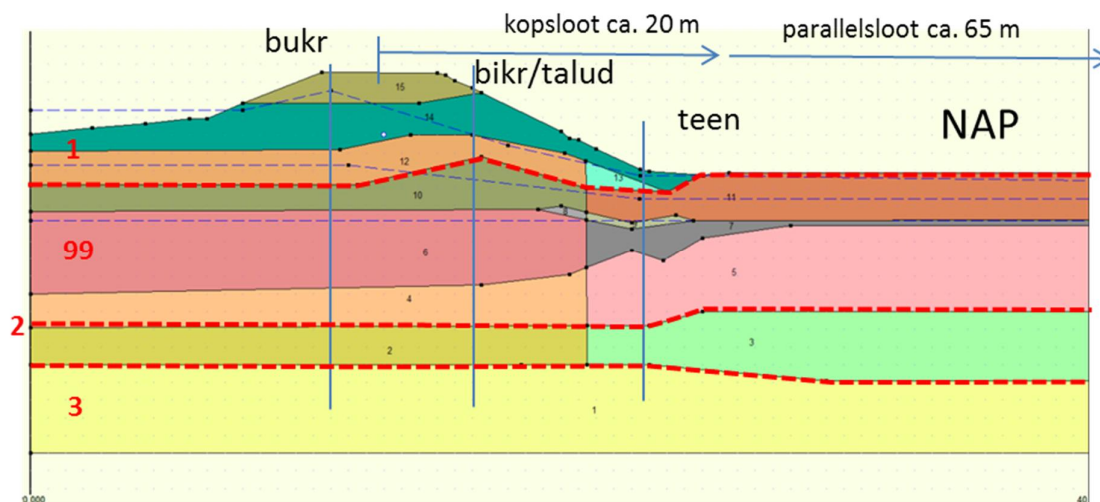
De stijging van het freatisch vlak is geschematiseerd door de MHW stand over 4 m horizontaal de dijk in te laten lopen. Het freatisch vlak is ter plaatse van de binnenkruin op 14 m van het snijpunt met het buitentalud verhoogd met 0,3 m (tot NAP +2,7 m) en ter plaatse van de teen is het freatisch vlak verhoogd met 0,4 m tot net onder het maaiveld.

De stijging in het eerste watervoerende pakket is, vergelijkbaar met profiel 1, verhoogd met 0,4 m tot NAP -4,3 m. Er zijn hier geen peilbuismetingen uitgevoerd en er is geen aparte WATEX berekening gemaakt. De invloed op de binnenwaartse macrostabiliteit is zeer gering.

PL-line 2 is niet verhoogd ten opzichte van dagelijkse omstandigheden.

### 3.4 Profiel 4 36.951

De geschematiseerde grondlagen staat in Figuur 3.13. De meetpunten zijn globaal in het geschematiseerde profiel gezet.



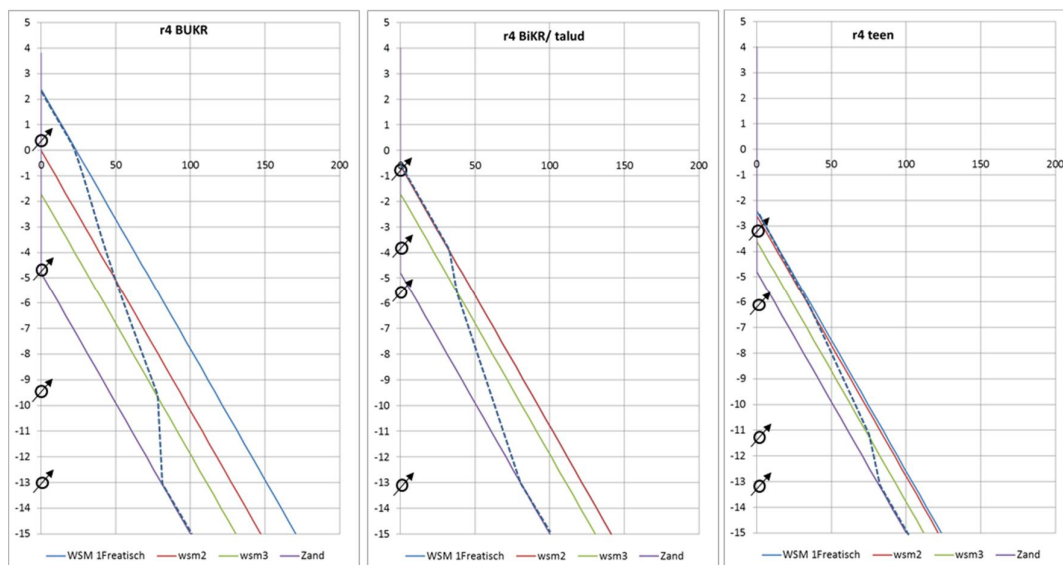
Figuur 3.13 Schematisering grondlagen in D-Geostability profiel 4

#### 3.4.1 Dagelijkse omstandigheden

Van de metingen [1] is het gemiddelde bepaald over de afgelopen tijd, nadat eventuele waterspanningen als gevolg van de installatie waren verdwenen. Deze waarden zijn samengevat in Tabel 3.6 en Figuur 3.14. Een globaal beeld van de metingen tegen tijd staan in bijlage C.

Tabel 3.6 Samenvatting stijghoogtes (mNAP) en dieptes wsm's (mNAP) profiel 4

	Stijghoogte <b>Bukr</b> (mNAP)	Hoogte (mNAP)	Stijghoogte <b>Talud</b> (mNAP)	Hoogte (mNAP)	Stijghoogte <b>teen</b> (mNAP)	Hoogte (mNAP)
maaiveld	0	3,7	0	2,7	0	-2,1
WSM1	2,5	0,3	-0,6	-0,87	-2,3	-3,11
WSM2	0	-4,8	-0,6	-3,82	-2,6	-6,1
WSM3	-1,7	-9,39	-1,7	-5,77	-3,6	-11,1
zand	-4,8	-13	-4,8	-13	-4,8	-13



Figuur 3.14 Visualisatie gemiddelde waterspanning (kPa) in de drie vertikalen in profiel 4

De geschematiseerde ligging van het freatisch vlak onder dagelijkse omstandigheden is gebaseerd op de gemiddelde ligging van de stijghoogte van wsm 401, 404 en 407. Afwijkend van profielen 1 en 2 is bij profiel 4 het meetpunt bij de binnenkruinlijn verschoven richting het talud. Dit omdat het door de aanwezigheid van vele leidingen niet mogelijk bleek om het meetpunt t.p.v. de binnenkruin te plaatsen.

De opbolling volgt uit de metingen van 401 (buitenkruin) en 404 (binnenkruin/talud), geplaatst op resp. NAP +0,3 m en NAP -0,9 m. Wsm 401 gaf circa 3 maanden een vrij constante waarde van ca. NAP +1 m, maar is opgelopen naar ca. NAP +2,5 m en is sindsdien ongeveer drie maanden lang deze waarde. De wsm onder 401, namelijk 402 (diepte NAP -5,3 m), geeft een stijghoogte van ca. NAP +0,3 m en laat geen stijging zien over de laatste maanden.

Wsm 407 (NAP -3,11 m) geeft ter plaatse van de teen een stijghoogte van NAP -2,4 m. Verder polderwaarts zal het freatisch vlak afnemen tot polderpeil (NAP -2,6 m).

De stijghoogte in het zand laat een kleine respons zien op het getij met een amplitude van ca. 0,15 m. De gemiddelde stijghoogte is ongeveer NAP -4,8 m, hetgeen ook is aangehouden als schematisering.

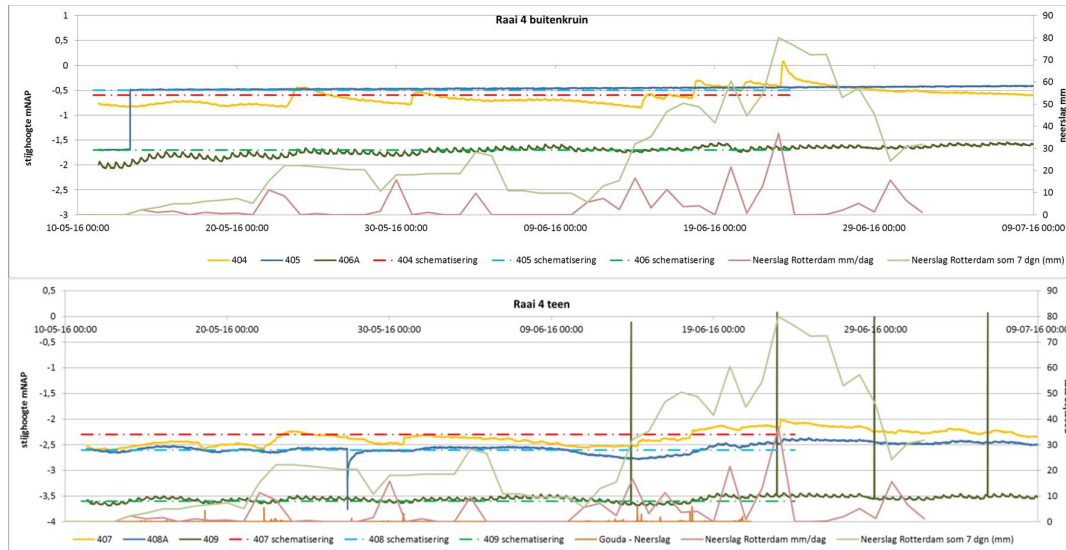
Net als bij profiel 1 en 2 vindt het grootste deel van het verhang van het freatisch vlak naar de lage stijghoogte in het zandpakket plaats over het onderste deel van het slappe lagenpakket. Dit is geschematiseerd door het definiëren van een stijghoogtelijn (PL-line 2) op de grens tussen het Hollandveen en de laag klei – met planten (Echteld). Voor de grondlaag onder deze grens wordt lineair geïnterpoleerd tussen PL-line 2 en de stijghoogte in het zand. Voor de grondlagen boven deze grens wordt lineair geïnterpoleerd tussen het freatisch vlak en PL-line 2. (zie Figuur 3.13).

### 3.4.2 Extreme neerslag

De meeste neerslag tijdens de meetperiode viel in de periode midden juni toen over 7 dagen 80 mm viel, ongeveer de helft van extreme neerslag [2]. Alleen de waterspanningsmeters 404



en 407, resp. ondiep tpv het talud en ondiep tpv teen, reageerde op de neerslag (Figuur 3.15).



Figuur 3.15 Neerslag (rechter verticale as) en stijghoogte (mNAP) voor wsm 404 en 407 (alleen correctie voor gemiddelde luchtdruk).

De stijghoogte gemeten door WSM 404 ter plaatse van de binnenkruin steeg in de orde van 0,35 m ten opzichte van de geschematiseerde gemiddelde stand van NAP -0,6 m; wsm 407 ter plaatse van de teen steeg in de orde van 0,25 m ten opzichte van de geschematiseerde gemiddelde stand van NAP -2,3 m. Op 17 juni wordt de 7-daagse som van 80 mm neerslag bereikt. Daarvoor was er echter een periode van enkele weken droog waar, waarin de gemeten waterspanning iets lager was dan de geschematiseerde gemiddelde stijghoogte. De stijghoogte ging ten opzichte van de droge periode respectievelijk 0,5 (WSM 404) en 0,35 m (WSM 407) omhoog als gevolg van de neerslag.

Voor de schematisering tijdens maatgevende neerslag vertaalt dit zich naar een verhoging van het freatisch vlak van 0,5 m bij de buitenkruinlijn, 0,7 m ter plaatse van de binnenkruinlijn en 0,5 m ter plaatse van de teen ten opzichte van de gemiddelde geschematiseerde stijghoogte. Er is hierbij dus geen rekening gehouden met een stijging vanaf de droge periode. Omdat bij de teen het freatisch vlak bij deze stijging boven het maaiveld zou uitstijgen is de stijging hier gelimiteerd tot het maaiveld.

De druktoename als gevolg van neerslag wordt in de lager gelegen grondlagen niet gemeten. Bij de schematisering wordt hiermee rekening gehouden door alleen het freatisch vlak (PL-line 1) te verhogen. De schematisering van de overige PL-lines is gelijk aan die onder dagelijkse omstandigheden. De invloed van neerslag neemt daarmee lineair af tot het niveau van PL-line 2.

### 3.4.3 Maatgevend hoogwater

Het maatgevend hoogwater is NAP +3,29 m.

In dit profiel is een zandlaag aanwezig boven ca. NAP + 1,8 m. Ook hier is het aannemelijk dat er klei aanwezig is op de talud, maar het is ook aannemelijk dat deze klei als gevolg van structuurvorming relatief doorlatend is. Gegeven de hoogte van de zandlaag wordt een

indringingslengte geschat van ca. 10 m, uitgaande van  $H=1,5$  m,  $k=2 \times 10^{-4}$  m/s,  $n=0,4$  en een tijdsduur van 20 uur (paragraaf 3.1.3). De zandlaag zal relatief makkelijk kunnen vollopen.

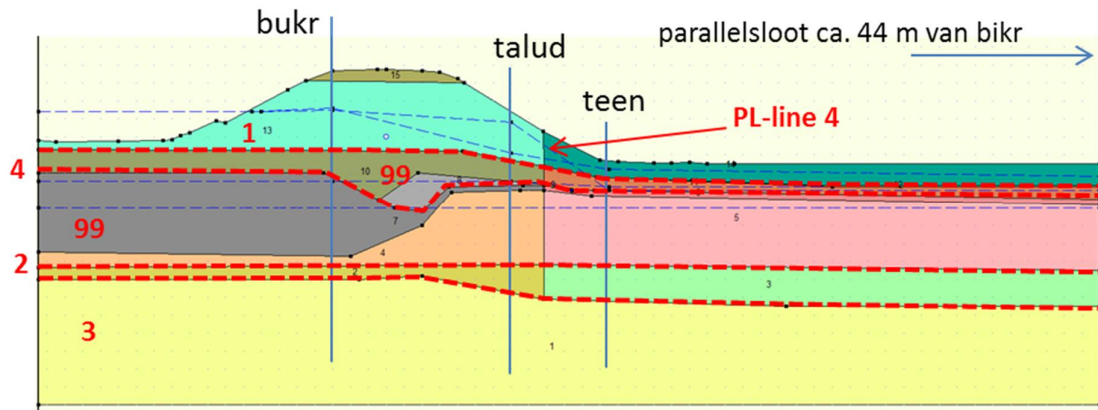
De stijging van het freatisch vlak is daarom geschematiseerd door een lineaire afname van NAP +3,22 m naar NAP +2,2 m op een afstand van ca. 10 m van het intredepunt. Vanaf dit punt loopt het freatisch vlak tot vlak onder het maaiveld bij de binnenteen. Hiermee wordt geschematiseerd dat de zandlaag relatief snel volloopt en via de binnendijkse klei met bodemstructuur, de bovenste meter, binnenwaarts kan draineren.

PL-line 2 is verhoogd met 0,3 m ter hoogte van de buitenkruinlijn en 0,4 m ter hoogte van het talud en binnenwaarts hiervan ivm de waargenomen reactie op het getij in de diepe waterspanningsmeters ter plaatse van het talud en de teen.

De stijging in het eerste watervoerende pakket is, vergelijkbaar met profiel 1, verhoogd met 0,4 m tot NAP -4,4 m. Er is geen aparte WATEX berekening gemaakt. De invloed hiervan op de binnenwaartse macrostabiliteit is nihil.

### 3.5 Profiel 5 40.55

De geschematiseerde grondlagen staat in Figuur 3.16. De meetpunten zijn globaal in het geschematiseerde profiel gezet.



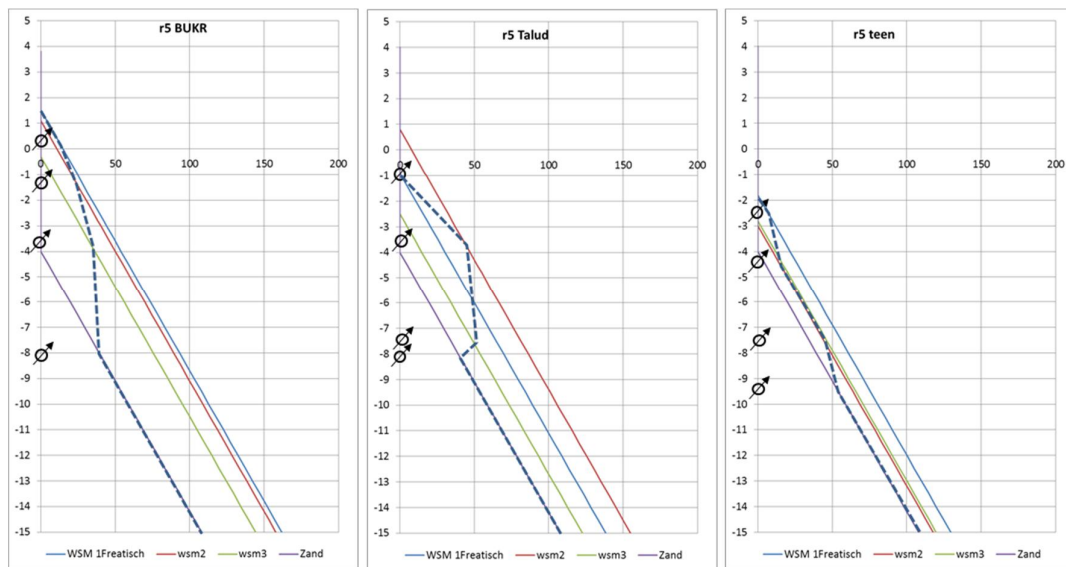
Figuur 3.16 Schematisering grondlagen in D-Geostability profiel 5

#### 3.5.1 Dagelijkse omstandigheden

Van de metingen [1] is het gemiddelde bepaald over de afgelopen tijd, nadat eventuele waterspanningen als gevolg van de installatie waren verdwenen. Deze waarden zijn samengevat in Tabel 3.7 en Figuur 3.17. De stijghoogte tegen tijd staat in Bijlage C.

Tabel 3.7 Samenvatting stijghoogtes (mNAP) en dieptes wsm's (mNAP) profiel 5

	Stijghoogte Bukr (mNAP)	Hoogte (mNAP)	Stijghoogte talud (mNAP)	Hoogte (mNAP)	Stijghoogte teen (mNAP)	Hoogte (mNAP)
maaiveld	0	3,7	0	3,7	0	-1,5
WSM1	1,6	0,35	-0,9	-1,03	-1,8	-2,29
WSM2	1,1	-1,25	0,8	-3,74	-3	-4,4
WSM3	-0,3	-3,85	-2,5	-7,34	-2,8	-7,51
zand	-4	-8	-4	-8	-4	-9,3



Figuur 3.17 Visualisatie gemiddelde waterspanning (kPa) in de drie vertikalen in profiel 5

De ligging van het freatisch vlak is gebaseerd op de gemiddelde ligging van de stijghoogte van wsm 501, 504, 504A en 507. De opbolling volgt uit de metingen van 501 (buitenkruin) en 504 en 504A (beide talud), geplaatst op resp. NAP +0,35 m en NAP -1,1 m. 504A is later bijgeplaatst op dezelfde plek en diepte als 504 om de meting van 504 te verifiëren. De metingen komen nagenoeg overeen.

Wsm 501 in de buitenkruinlijn varieert weinig en geeft momenteel een stijghoogte van circa NAP +1,5 m. WSM 504 en 504A ter plaatse van het talud geven een stijghoogte van circa NAP -0,9 m. Opvallend is dat 504 een zwakke respons van 0,05 m waterkolom geeft op het getij, wat verklaarbaar is door een ongedraineerde reactie van de grond op de wisselende druk op de dijk als gevolg van het getij. Een deel van deze polderwaartse druk wordt opgevangen door een drukverhoging in de poriën van de grond ter plaatse van WSM 504. Overigens wordt er in het meetpunt in de buitenkruinlijn geen respons gemeten. Het al dan niet meten van een beperkte respons op het getij wordt waarschijnlijk bepaald door een combinatie van de stijfheid en doorlatendheid van de grond waarin de waterspanningsmeter staat (reageert dit gedraineerd of ongedraineerd op de belasting) en de gevoeligheid van de sensor. Bij een luchtinsluiting rondom de sensor of in het poreuze medium zal de wsm trager

reageren en mogelijk niet reageren op de relatief kortdurende wisselende waterspanning als gevolg van de belasting door getij.

Wsm 507 (NAP -2,3 m) varieert tussen NAP -1,5 m en NAP -2,1 m. Een deel van deze variaties wordt veroorzaakt door de luchtdrukcorrectie (bijlage A). Voor de schematisering is uitgegaan van NAP -1,8 m. Verder polderwaarts zal het freatisch vlak afnemen tot polderpeil (NAP -2,2 m).

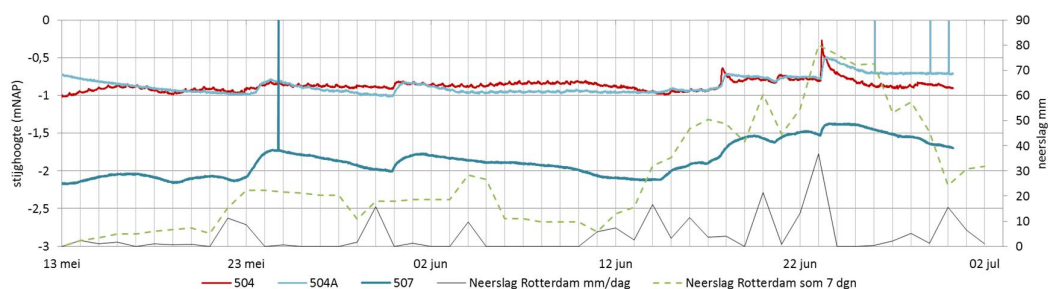
De stijghoogte in het zand is gemeten met twee peilbuizen. De respons op het getij is zeer gering, in de orde van ca. 0,1 m. De gemiddelde stijghoogte in het zand is NAP -4 m, hetgeen ook voor de schematisering is gebruikt.

Net als bij de andere profielen is op de grens tussen de laag klei met planten (Echteld) en Hollandveen een PL-line 2 gedefinieerd met een stijghoogte op basis van de onderste waterspanningsmeters.

Bijzonder aan profiel 5 is dat er ter plaatse van het talud een waterspanning aanwezig is die in verticale richting sneller toeneemt dan hydrostatisch. Er is als het ware een wateroverspanning aanwezig die wordt gemeten op een diepte van ca. NAP -3,7 m. Bij de meetpunten in de teen en de buitenkruinlijn wordt deze wateroverspanning niet gemeten. Omdat aanvankelijk werd getwijfeld aan deze 'wateroverspanning' is een tweede waterspanningsmeter in deze laag gezet om de meting te verifiëren (wsm's 505 en 505A). De wateroverspanning is geschematiseerd door het definiëren van een 4<sup>de</sup> PL-line die gelijk is aan het freatisch vlak, alleen onder het talud een hogere stijghoogte geeft (zie Figuur 3.16).

### 3.5.2 Extreme neerslag

De meeste neerslag tijdens de meetperiode viel in de periode midden juni toen over 7 dagen 80 mm viel, ongeveer de helft van extreme neerslag [2]. Alleen de waterspanningsmeters 504, 504A en 507, resp. ondiep tpv het talud en ondiep tpv teen, reageerde op de neerslag (Figuur 3.18).



Figuur 3.18 Neerslag (rechter verticale as) en stijghoogte (mNAP) voor wsm 504(A) en 507 (alleen correctie voor gemiddelde luchtdruk).

De stijghoogte gemeten door WSM 504 en 504A ter plaatse van de binnenkruin steeg in de orde van 0,5 m ten opzichte van de geschematiseerde gemiddelde stand van NAP -0,9 m; wsm 507 ter plaatse van de teen steeg in de orde van 0,4 m ten opzichte van de geschematiseerde gemiddelde stand van NAP -1,8 m.

Voor de schematisering tijdens maatgevende neerslag vertaalt dit zich naar een verhoging van het freatisch vlak van 0,5 m bij de buitenkruinlijn, 1,0 m ter plaatse van de binnenkruinlijn en 0,9 m ter plaatse van de teen. Omdat bij de teen het freatisch vlak bij deze stijging boven het maaiveld zou uitstijgen is de stijging hier gelimiteerd tot het maaiveld.

De druktoename als gevolg van neerslag wordt in de lager gelegen grondlagen niet gemeten. Bij de schematisering wordt hiermee rekening gehouden door alleen het freatisch vlak (PL-line 1) te verhogen. De schematisering van de overige PL-lines is gelijk aan die onder dagelijkse omstandigheden.

### 3.5.3 Maatgevend hoogwater

Het maatgevend hoogwater is NAP +3,36 m.

In dit profiel is een zandlaag aanwezig boven ca. NAP +3,1 m. Ook hier is het aannemelijk dat er klei aanwezig is op het talud, maar het is ook aannemelijk dat deze klei als gevolg van structuurvorming relatief doorlatend is. Gegeven de hoogte van de zandlaag, welke maar net boven MHW ligt, wordt maar een beperkte invloed van de zandlaag verwacht op de waterspanningen in de dijk.

De stijging van het freatisch vlak is geschematiseerd door een verhoging van de stijghoogte ter plaatse van de buitenkruinlijn van 1 m tot NAP +2,6 m en een verhoging ter plaatse van het talud met 0,5 m en ter plaatse van de teen 0,3 m tot net onder maaiveld. De verhoging aan de binnenzijde van de dijk is geschematiseerd vanwege de respons van WSM 504 op het getij. Waarschijnlijk neemt als gevolg van ongedraineerd grondgedrag bij het horizontaal polderwaarts drukken van de dijk bij hoogwater de waterspanning ter plaatse van de binnenteen toe. De effectieve verticale spanning welke wordt gebruikt in de D-Geostability berekeningen neemt daardoor af, wat in dit geval wordt geschematiseerd door een verhoging van het freatisch vlak.

De stijghoogte in het eerste watervoerende pakket is met 0,3 m verhoogd tot NAP -3,7 m. Dit volgt uit een berekening met WATEX voor scenario 1 en 2 met een gesloten kering voor de Hollandse IJssel.

PL-line 2 is niet verhoogd ten opzichte van dagelijkse omstandigheden.

## 4 Referenties

- [1] Grondonderzoek actuele sterkte tussen Gouda en Capelle a/d IJssel, Installatie monitoringsnet en meetdata t/m 25-05-2016, documentnummer 06P002127-RG-01, Inpijn Blokpoel
- [2] Technische Rapport Waterspanningen bij Dijken, TAW 1 september 2004, ISBN-90-369-5565-3
- [3] Nieuwe Neerslagstatistieken voor het Waterbeheer, STOWA, 2015 10A
- [4] Dijkversterking KIJK – Hydraulische belastingen, Royal Haskoning DHV, ref. WATBE2432R001F03, versie 03/ Finale versie, 29 maart 2016
- [5] Memo Waterstandverlooppijnen Hollandse IJssel, Deltares kenmerk 1230090-009-GEO-0001, 14 maart 2016



## Bijlage A Correctie voor luchtdruk gemeten door barometer

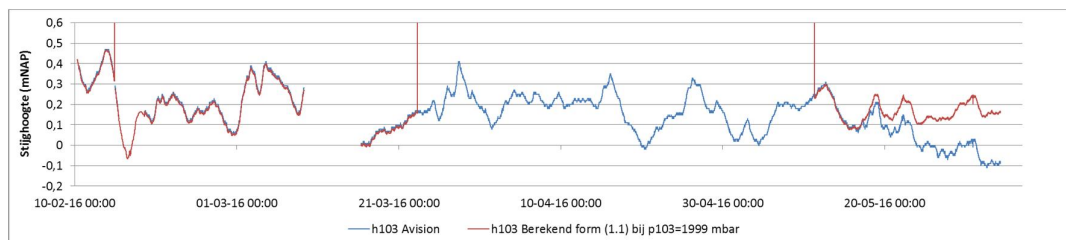
De waterspanningsmeters geven een absolute druk, de waterdruk in de grond plus de atmosferische druk. De spanning in het korrelskelet van de grond wordt opgenomen door het poreuze medium dat zich voor de meetsensor bevindt en wordt daarom niet gemeten. Voor de schematisering van de waterspanningen wordt gebruik gemaakt van de stijghoogte in de grond. Om deze te verkrijgen wordt van de gemeten totaal druk de luchtdruk zoals gemeten door de barometer afgetrokken en wordt de resterende waterdruk omgerekend naar een stijghoogte. In formulevorm:

$$h_{wsm} = z_{wsm} + \frac{(P_{wsm} - P_{baro})}{g \rho_w} \quad (1.1)$$

Waarin:

- $h_{wsm}$  stijghoogte van de betreffende waterspanningsmeter (wsm) (mNAP)
- $z_{wsm}$  plaatshoogte van de betreffende waterspanningsmeter (mNAP)
- $P_{wsm}$  drukmeting waterspanningsmeter (Pa) (1 mbar = 100 Pa  $\approx$  0,01 meter waterkolom)
- $P_{baro}$  drukmeting barometer (Pa) (1 mbar = 100 Pa  $\approx$  0,01 meter waterkolom)
- $g$  zwaartekrachtversnelling ( $m/s^2$ )
- $\rho_w$  soortelijke massa water ( $kg/m^3$ )

Eén van de waterspanningsmeters (103) gaf gedurende lange tijd de maximale waarde van het meetbereik, namelijk 1999 mbar. De gemeten druk  $P_{wsm}$  was dus constant, echter de gepresenteerde stijghoogte varieerde enigszins als gevolg van een variërende  $P_{baro}$ , zie formule (1.1) en Figuur 4.1 (Opm. bij de figuur, wanneer geen barometring beschikbaar was, is aan de berekende stijghoogte de waarde 999 toegekend).

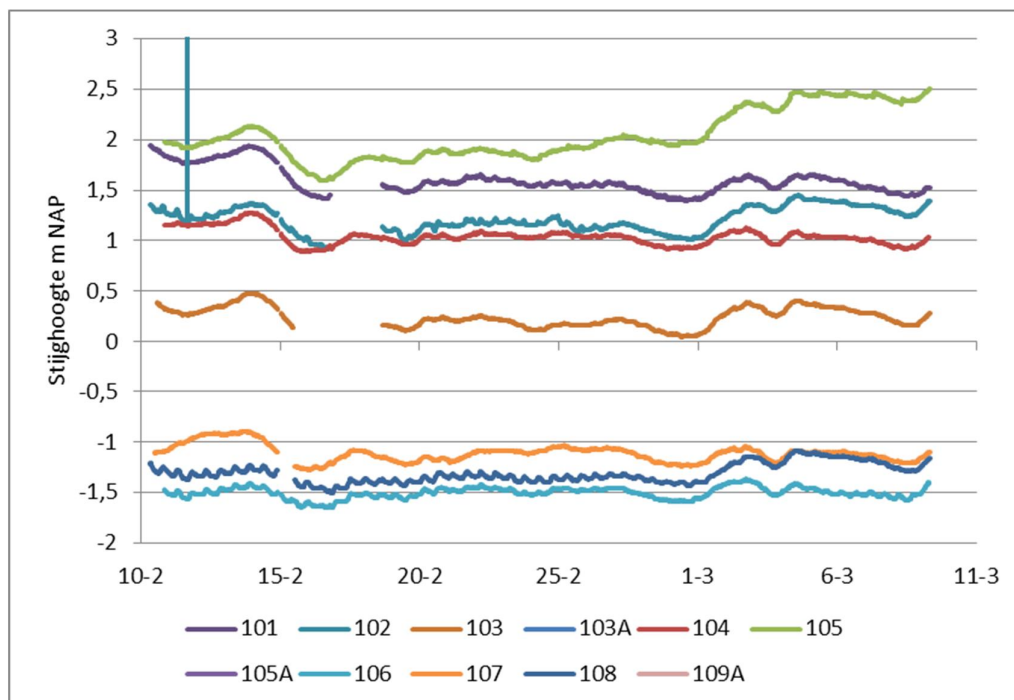


Figuur 4.1  $h_{103}$  (mNAP) uit Avision en  $h_{103}$  (mNAP) volgens formule 1.1 uitgaande van  $p_{103} = 1999$  mbar en  $g \cdot \rho_w = 10 \text{ kN/m}^3$

Aan het einde van de periode, eind mei, is de totaalspanning (water + lucht) gedaald tot onder het maximale meetbereik van de opnemer. De waarde in Avision neemt dan af ten opzichte van het rekenresultaat uitgaande van een constante  $p_{103} = 1999$  mbar.

Opvallend was echter dat de kleine variaties in stijghoogte, tot enkele decimeters waterkolom, voortkomend uit de variaties in luchtdruk ook in te zien zijn in de stijghoogtes van de andere waterspanningsmeters (Figuur 4.2). De vraag is of de luchtdrukcorrectie in deze gevallen goed gaat. Er zal zeker moeten worden gecorrigeerd voor de gemiddelde luchtdruk van ca. 1 bar (anders zou de stijghoogte ca. 10 m boven NAP liggen), echter de metingen lijken niet te reageren op de door de barometer gemeten fluctuaties in luchtdruk met een periode van dagen.

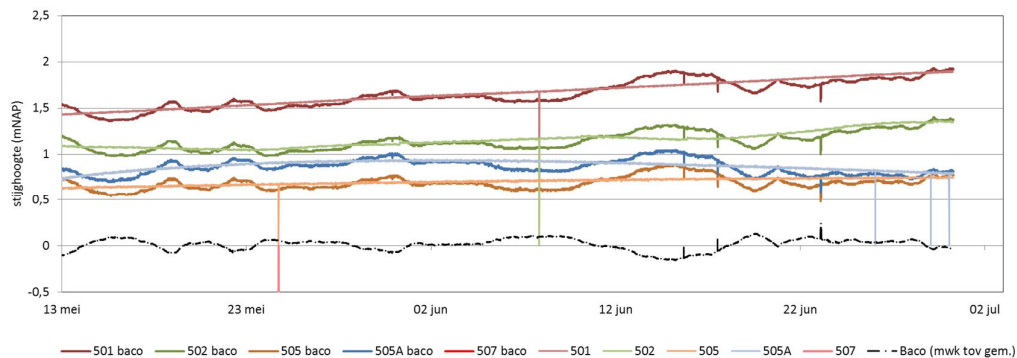




Figuur 4.2 Stijghoogtes in Raai 1, inclusief 103, welke in deze periode een constante druk mat en dus alleen variaties in luchtdruk weergeeft.

In Figuur 4.3 is de laatste maand van de meetperiode beschouwd. Enkele van de waterspanningsmeters in raai 5 zijn omgerekend naar stijghoogte en gecorrigeerd voor de barometer meting (WSM's met toevoeging baco -barometercorrectie). Deze waarden komen overeen met de gepresenteerde waarden in Avison. In dezelfde grafiek staan tevens de metingen, waarbij alleen is gecorrigeerd voor de gemiddelde barometerstand over de meetperiode. (WSM's zonder toevoeging). Deze lijnen missen de fluctuaties en zijn nagenoeg 'glad'. In dezelfde grafiek staat ook de barometerstand in meter waterkolom ten opzichte van de gemiddelde barometerstand (streep-stippellijn), waarmee de correctie is uitgevoerd. Te zien is dat de variatie in de barometerstand (de correctiefactor) bijna gelijk (maar gespiegeld) is aan de variaties in de gecorrigeerde stijghoogte van de waterspanningsmeters. Dit betekent dat de correctie de oorzaak is van (een groot deel van) de fluctuaties. De fluctuaties worden niet gemeten door de waterspanningsmeters, maar komen voort uit de correctie.

Geconcludeerd wordt dat de waterspanningsmeters niet of nauwelijks reageren op de relatief kortdurende (orde dagen) schommelingen in de luchtdruk, zoals gemeten door de barometer. Dit is enigszins merkwaardig, omdat de luchtdrukcorrectie in de praktijk vrij algemeen wordt toegepast. Mogelijke oorzaken kunnen liggen in, traagheid van de waterspanningsmeter (al dan niet door insluiting van een klein beetje lucht in de waterspanningsmeter), gedeeltelijk gedragen worden van luchtdrukschommelingen door het korrelskelet, omdat voor de indringing van druk in de onverzadigde zone enige stroming van lucht nodig is. Mogelijk dat er echter nog andere oorzaken achter zitten.



*Figuur 4.3 Stijghoogte (m NAP) gecorrigeerd voor barometermeting (BC) en correctie voor alleen het gemiddelde van de gemeten luchtdruk tijdens deze meetperiode voor wsm's 101-102 en 103*

De variaties in luchtdruk, uitgedrukt in meter waterkolom zijn in de orde van enkele decimeters en daarmee niet van enorme invloed op de schematisering van de waterspanningen. Bij het schematiseren van de waterspanningen zijn de kleine fluctuaties als gevolg van de luchtdrukcorrectie niet meegenomen.

Bij het herkennen van de reactie van de waterspanningsmeters op neerslag is de correctie wel van belang. Neerslag vindt in het algemeen, en zo ook gemeten, plaats in perioden van lage luchtdruk. Een relatief lage luchtdruk geeft een correctie omhoog. De waterspanningsmeter lijkt daardoor op neerslag te reageren, maar doet dit in feite niet. Bij de schematisering van de waterspanningen op de metingen is met dit fenomeen rekening gehouden.



## Bijlage B Neerslagstatistiek STOWA / KNMI

**TABEL 1**

Neerslaghoeveelheid (in mm) die eens in de 10, 50 of 100 jaar wordt overschreden gedurende 24 uur, 4 en 8 dagen in het huidige klimaat en in het klimaat rond 2050, op basis van jaarstatistiek.

KLIMAAT	Huidig <sup>a)</sup>			2050		
HERHALINGSTIJD (JAAR)	10	50	100	10	50	100
Duur = 24 uur						
2004-2014 lit. 2, <sup>b)</sup>	54	71	79	57-66	75-86	84-96
2015 lit. 1, <sup>c)</sup>	59	77	85	58-68	76-90	85-100
Duur = 4 dagen						
2004-2014 lit. 2, <sup>b)</sup>	80	100	109	83-93	104-116	113-127
2015 lit. 1, <sup>c)</sup>	89	112	122	90-101	112-128	122-140
Duur = 8 dagen						
2004-2014 lit. 2, <sup>b)</sup>	103	124	133	105-117	127-141	136-151
2015 lit. 1, <sup>c)</sup>	116	140	150	117-129	141-157	151-168

a) In de periode 2004-2014 werd met huidig de historische periode vanaf 1906 bedoeld, zonder correctie voor trend. Bij 2015 wordt met huidige klimaat het klimaat rond 2014 bedoeld (historische reeks, maar met de trend eruit gefilterd).

b) Neerslagstatistiek voor 2050 was in 2004 nog niet beschikbaar, maar is in dit overzicht gelijk gesteld aan de neerslagstatistiek voor 2050 die in 2012 in Meteobase opgenomen is (lit. 3). Regio G, scenario 2050 G+ - 2050 W. 2050 G+ levert de laagste neerslagsommen op, 2050W de hoogste.

c) Voor Regio G is weergegeven de laagste resp. hoogste neerslagsom uit vier klimaatscenario's ( $G_L$ ,  $G_M$ ,  $W_L$  en  $W_h$ ) en drie schattingen per scenario ('lower', 'center' en 'upper').

Neerslagstatistiek STOWA 2015 10a [3]

jaar	uren				dagen			
	4	8	12	24	2	4	8	9
10x per jaar	9	12	13	15	19	-	-	-
5x per jaar	12	15	17	21	26	33	43	45
2x per jaar	16	20	23	28	35	45	61	64
1x per jaar	21	24	27	33	41	52	71	75
1x per 2 jaar	25	29	32	39	48	60	81	86
1x per 5 jaar	31	36	40	47	58	71	94	99
1x per 10 jaar	36	41	46	54	65	80	103	109
1x per 20 jaar	41	47	52	61	73	89	113	118
1x per 25 jaar	43	49	54	63	75	91	115	121
1x per 50 jaar	49	56	61	71	84	100	124	130
1x per 100 jaar	55	62	68	79	92	109	133	138
1x per 200 jaar	61	69	75	87	101	118	141	146
1x per 500 jaar	71	79	86	98	113	130	152	156
1x per 1000 jaar	78	88	95	108	123	140	159	163

*Tabel 1 Neerslaghoeveelheden (mm) gebaseerd op de neerslagreeks 1906-2003 voor het gehele jaar, voor uren van 4 uur tot 9 dagen voor overschrijdingsfrequenties van gemiddeld 10 keer per jaar tot gemiddeld 1 keer per 1000 jaar.*

Neerslagstatistiek STOWA/ KNMI 2004 26a

## Bijlage C Getij en gemiddelde waterstand Krimpen en Gouda

Bron: <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterdata-en-waterberichtgeving/metingen/waternormalen/index.aspx>

# Krimpen a/d IJssel (Hollandsche IJssel)

## Slotgemiddelden 1998.0

### Algemene gegevens

1935	Aanvang waarnemingen
1938	Peilschrijver geplaatst
1 feb 1989	DNM geplaatst

### Gemiddelde waterstanden bij gemiddelde afvoer ( 2200 m<sup>3</sup>/s)

type tij	HW-stand in cm + NAP	LW-stand in cm + NAP	tijverschil in cm
gemiddeld tij	124	-27	151
springtij	136	-25	161
doodtij	108	-28	136
gemiddelde waterstand		29	

### Gemiddelde havengetallen bij gemiddelde afvoer ( 2200 m<sup>3</sup>/s)

type tij cq grootheid	HW-tijd u:min	tijd u:min	LW-tijd u:min
gemiddeld tij	03:13		11:27
springtij	03:22		11:36
doodtij	02:52		10:05
duur rijzing		04:11	
duur daling		08:14	

# Gouda brug (Hollandsche IJssel)

## Slotgemiddelden 1998.0

### Algemene gegevens

1854	Aanvang waarnemingen
1 sept 1911	Peilschrijver geplaatst
10 dec 1987	DNM geplaatst

### Gemiddelde waterstanden bij gemiddelde afvoer ( 2200 m<sup>3</sup>/s)

type tij	HW-stand in cm + NAP	LW-stand in cm + NAP	tijverschil in cm
gemiddeld tij	148	-36	184
springtij	164	-36	200
doodtij	126	-33	159
gemiddelde waterstand		27	

### Gemiddelde havengetallen bij gemiddelde afvoer ( 2200 m<sup>3</sup>/s)

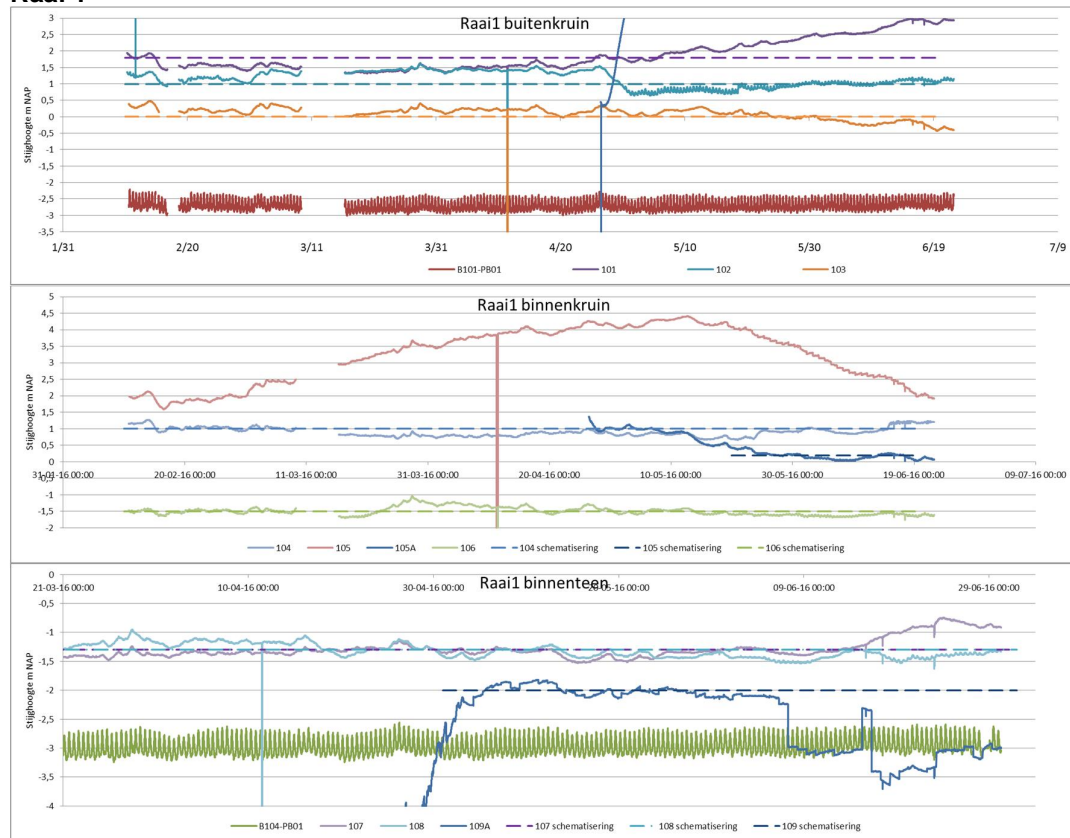
type tij cq grootheid	HW-tijd u:min	tijd u:min	LW-tijd u:min
gemiddeld tij	03:32		12:16
springtij	03:41		12:25
doodtij	03:08		10:11
duur rijzing		03:39	
duur daling		08:46	

### Gemiddelde over- en onderschrijdings frequentie per jaar

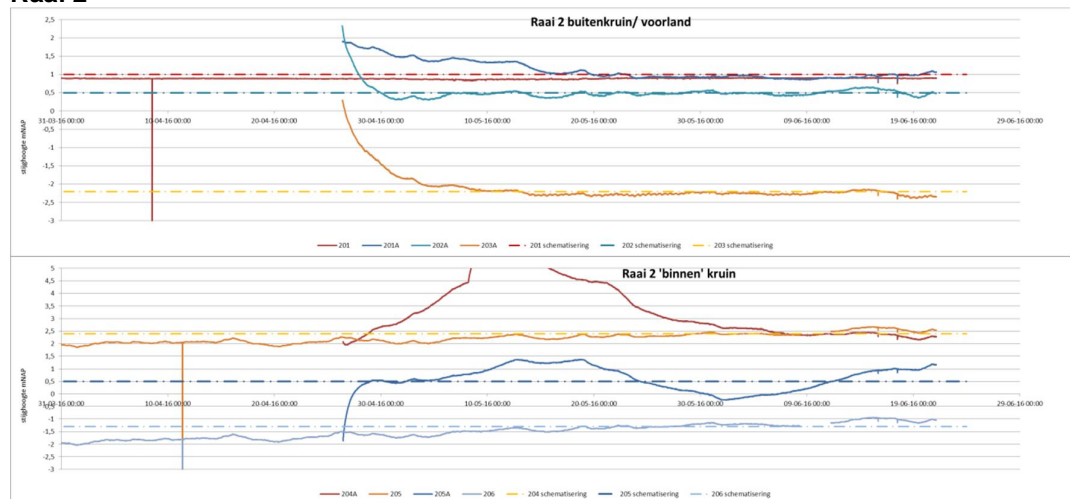
overschrijding hoogwaterstanden		onderschrijding laagwaterstanden	
	stand in cm + NAP		stand in cm + NAP
frequentie		frequentie	
Voor dit meetpunt zijn		1x per 10 jaar	-115
geen overschrijdings-		1 x per jaar	-95
waarden van hoogwater-			
standen bepaald		OLW 1991.0	-60

## Bijlage D Waterspanningsmetingen en schematiseringswaarde per raai

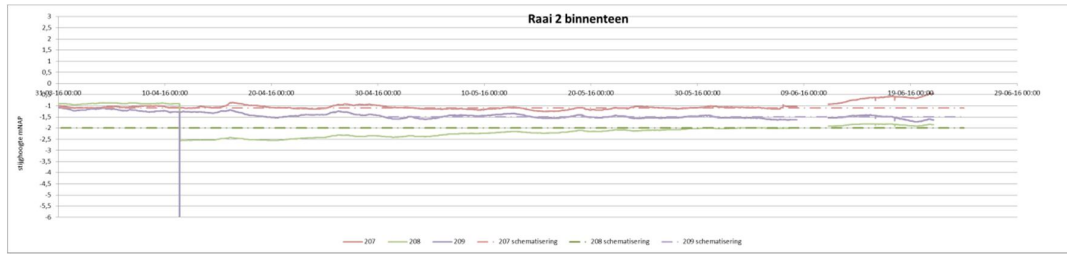
### Raai 1



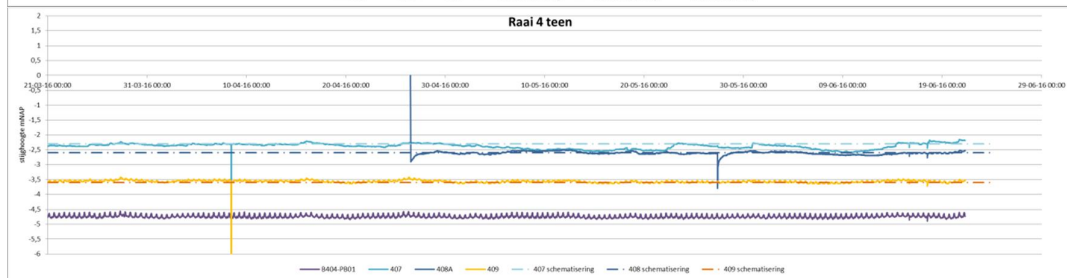
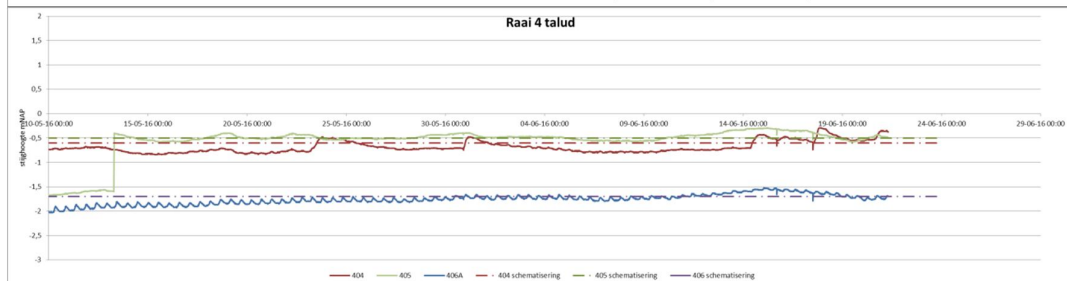
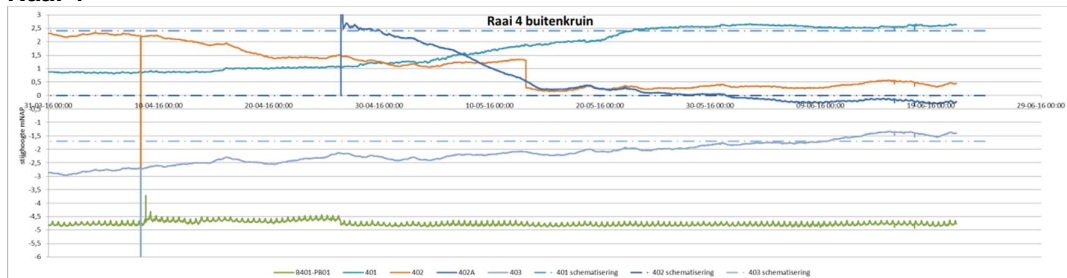
### Raai 2







**Raai 4**



**Raai 5**

