

## Onderzoek oorzaken vernatting (onderdeel A)

Onderzoek dijkversterking Kinderdijk-Schoonhovenseveer (KIS), fase 3



## **Onderzoek oorzaken vernatting (onderdeel A)**

Onderzoek dijkversterking Kinderdijk-Schoonhovenseveer (KIS), fase 3

### **Auteur(s)**

Arno Rozing

Negar Moghtaderi Asr

Ton Peters

### **Foto voorpagina**

Cees van der Wal

## Onderzoek oorzaken vernatting (onderdeel A)

Onderzoek dijkversterking Kinderdijk-Schoonhovenseveer (KIS), fase 3

<b>Opdrachtgever</b>	Waterschap Rivierenland
<b>Contactpersoon</b>	de heer Van den Elzen
<b>Referenties</b>	Deltares. (Juli 2021). Spoedadvies Analyse waterveiligheid Kinderdijk-Schoonhovenseveer, kenmerk 11207207-002-GEO-0004. Deltares. (Februari 2022). Rapport Analyse waterveiligheid Kinderdijk-Schoonhovenseveer, met kenmerk 11207207-005-GEO-0016.
<b>Trefwoorden</b>	Dijkversterking Kinderdijk-Schoonhovenseveer, boorpalenwand, waterveiligheid, vernatting, lekkage, hydraulische kortsluiting, vervorming, monitoring, hydrochemisch onderzoek, hellingmeetbuis, peilbuis

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	3.0
<b>Datum</b>	12 september 2024
<b>Projectnummer</b>	11208554-003
<b>Document ID</b>	11208554-003-GEO-0013
<b>Pagina's</b>	258
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Arno Rozing	
	Negar Moghtaderi Asr	
	Ton Peters	

***Gebruik van deze Tabel is voor de controle van de juiste uitvoering door Deltares van de opdracht. Ieder ander klantgebruik en externe verspreiding is niet toegestaan.***

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
3.0	Arno Rozing	Meindert Van	Harm Aantjes

# Begrippenlijst

Afspankracht	De ontwerpkracht waarmee een ankerstreng wordt aangetrokken t.o.v. de boorpalen en gording. Ook wel voorspankracht genoemd.
Ankerlichaam	Het (grout)lichaam van de verankering dat de uittreккеerstand dient te mobiliseren.
Autonome bodemdaling	Doorgaande maaiveld daling ten opzichte van een referentiepeil als gevolg van het inklinken van slappe lagen door oxidatie en/of verdichting.
Barettewand	Een wand opgebouwd uit diepwandpanelen, die niet met een voegconstructie met elkaar verbonden zijn, maar los van elkaar staan.
Betoneergrafiek	Een grafiek die het verbruikte volume gestort beton over de lengte van een boorpaal vergelijkt met het theoretische volume.
Bezwijken	Het optreden van verlies van inwendig evenwicht (bijvoorbeeld afschuiven) en/of het optreden van verlies van samenhang in materiaal (bijvoorbeeld het verweken) en/of het optreden van ontoelaatbaar grote vervormingen van de waterkering
BOI	Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium
Blow-out	Tijdens het installeren van de boorpaal kan door onvoldoende wateroverdruk in de casing (lager dan de waterdruk in de ondergrond in met name de zandlagen) een plotselinge lekkage ontstaan van grondwater naar de casing. Hierdoor zal materiaal zand de casing instromen.
Boorpalenwand	Een langsconstructie in de waterkering bestaande uit boorpalen, gording en verankering die tot doel heeft de weerstand tegen instabiliteit te vergroten.
Buitenwaterstand	De waterstand aan de waterzijde (buitenzijde) van de kering, die direct onder invloed staat van waterstand op zee of de grote rivieren.
Controleproef verankering	Een belastingproef op het anker om te controleren dat een anker een bepaalde ontwerpbelasting kan houden.
D-Geo Stability	Software voor glijvlakberekeningen.
Discontinue wanden	Wanden waar de constructieve wandelementen niet aaneengesloten in het verlengde van elkaar worden aangebracht maar wel onderling met elkaar zijn verbonden door middel van een doorlopende gording.
Diepwand	Een verticaal in de grond geplaatste doorgaande wand die bestaat uit betonnen gewapende panelen, die tegen elkaar zijn gestort.
Dijkvak	Een deel van een dijktraject waarin voor het te toetsen faalmechanisme min of meer gelijke geometrie, dijkopbouw, ondergrond en hydraulische belastingen mogen worden verondersteld.
Doorgaande wand	Een doorgaande langsconstructie waar de onderlinge elementen aansluitend zijn geplaatst en in zekere mate met elkaar zijn verbonden.
Eindige-Elementen Methode	(EEM) Numerieke methode voor het bij gegeven belastingen berekenen van spanningen, vervormingen en waterspanningen



	in grond en/of constructies, door middel van discretisatie in ruimte en tijd.
Extreme hydraulische belastingcondities	De omstandigheden waarbij het in rekening te brengen waterspanningsverloop moet worden bepaald. Deze omstandigheden zijn verschillend voor binnenwaartse en buitenwaartse stabiliteit.
Faalmechanisme	De wijze waarop de waterkering zijn kerende functie verliest, bijvoorbeeld door macro-instabiliteit.
Falen	Het overschrijden van een grenstoestand.
Freatische vlak	De vrije grondwaterspiegel, waar de waterdruk gelijk is aan nul.
Gemiddelde hoog water (GHW)	De gemiddelde hoogte van hoogwater op een locatie over een periode van 19 jaar (in een getijdegebied)
Groene dijk	Een dijk die zijn sterkte uitsluitend aan grond ontleent, zonder toepassing van constructieve elementen.
Geschiktheidsproef verankering	Een controleproef met een verlengde tijdsduur van de belasting op het anker.
Grenspotentiaal	De stijghoogte in de watervoerende zandlaag achter de dijk (aan polderzijde) waarbij er nog juist verticaal evenwicht is tussen het gewicht van het erboven liggende pakket slappe lagen en de genoemde stijghoogte.
Heave	Situatie waarbij verticale korrelspanningen in een zandlaag wegvallen onder invloed van een verticale grondwaterstroming.
Hydraulische kortsluiting	In dit rapport wordt hiermee bedoeld op een kortsluiting (lekkage) tussen de pleistocene zandlaag en de tussenzandlaag. Dit kan als gevolg van de installatie van de boorpalenwand optreden of heeft een natuurlijke oorsprong als gevolg van geologische processen.
Indringingslaag/Indringingszone	De verticale of horizontale afstand waarover in slappe lagen het effect van een hoogwatergolf op de waterspanning in rekening wordt gebracht.
Inklinking	Verticale vervorming van grond als gevolg van volumevermindering door onttrekken van grondwater en dicht drücken van poriën
Karakteristieke waarde	Waarde van een stochastisch variabele met een voorgeschreven onder- of overschrijdingskans. De karakteristieke sterkte van grond is bijvoorbeeld de sterkte met 5 % onderschrijdingskans.
Kruipvervorming	Doorgaande (plastische) vervormingen van de grond bij gelijkblijvende belasting
Kruipmetingen	Onderdeel van controle- en geschiktheidsproeven is het meten van de verplaatsing van de ankerstreng wanneer deze maximaal wordt belast.
Kortsluiting	Het aanwezig zijn van een al dan niet op natuurlijke wijze ontstane verbinding tussen verschillende watervoerende zandlagen of een verbinding tussen een watervoerende zandlaag en freatisch grondwater. Het is mogelijk dat er door menselijk handelen kortsluiting optreedt tussen verschillende watervoerende zandlagen, bijvoorbeeld tussen de tussenzandlaag en de pleistocene diepgelegen zandlaag.
LBO	Landelijke Beoordelingsronde
Lekkage	Een (veelal geconcentreerde) stroming door een slecht doorlatende laag als gevolg van een verbinding (kortsluiting) tussen verschillende watervoerende lagen. Voorbeelden zijn

	lekkage langs het anker of de boorpaal van het watervoerende pakket naar de freatische grondwaterstand.
Macro-instabiliteit	Het afschuiven van grote delen van het grondlichaam van een dijk langs rechte of gebogen glijvlakken, dan wel het evenwichtsverlies ten gevolge van het ontstaan van grote plastische zones.
MHW	Maatgevende Hoogwaterstand. Buitenwaterstand die wordt gehanteerd voor beoordeling of ontwerp van een waterkering.
Opbarsten	Scheuren (bezwijken) van de binnendijs gelegen afdekkende laag, die is opgedreven als gevolg van een te grote wateroverspanning in de daaronder gelegen watervoerende laag.
Opdrijven	Opdrijven (hydraulische grondbreuk) treedt op als de waterdruk in de bodem groter wordt dan het gewicht van het bovenliggende grondpakket.
OSPW	Ontwerphandleiding Stabiliteitsschermen in Primaire Waterkeringen
Overstromingskans	De kans dat een gebied overstroomt doordat een dijktraject zijn kerende functie verliest.
Palenwand	Een wand bestaande uit losstaande boorpalen, waarbij tussen de afzonderlijke palen bewust nog grond zit.
Pastas	Open source tijdreeksanalyse-software Pastas die veelal wordt gebruikt om voor analyse van peilbuismetingen.
Planperiode (PP)	De periode waarvoor het plan of de beoordeling geldig is (ook wel zichtperiode genoemd)
Plaxis	De eindige-elementensoftware die veelal wordt gebruikt voor geotechnische analyse van langsconstructies
Pleistocene zandlaag (PL)	Watervoerende zandlaag behorende tot het Pleistoceen waarin de stijghoogten van het grondwater reageren op de hoogte van de buitenwaterstand.
POP	Pre Overburden Pressure
PPE	POVM Publicatie 'EEM toepassing binnen het ontwerp'
PPL	POVM Publicatie 'Stabiliteitsverhogende Langsconstructies'
Referentiehoogte	De referentiehoogte ofwel peil waaraan hoogtemetingen worden gerelateerd. Het Normaal Amsterdams Peil (meestal afgekort tot NAP) is de referentiehoogte in Nederland.
Representatieve waarde	De waarde die door toepassing van een partiële factor tot een rekenwaarde leidt. Doorgaans gelijk aan de ongunstig gekozen karakteristieke waarde.
Rekenwaarde	De rekenwaarde is de representatieve waarde gedeeld door (sterkte) - of vermenigvuldigd met (belasting) - een partiële veiligheidsfactor.
Respons	De respons is de reactie van de stijghoogte in een watervoerende zandlaag op het rivierpeil (het getij) rivierpeil.
Responsfactor	De responsfactor is het verschil tussen de hoogste en laagste stijghoogte in een watervoerende zandlaag gedeeld door het verschil in hoog- en laagwater op de rivier tijdens een getijcyclus.
Risico	De kans van optreden van een ongewenste gebeurtenis maal de potentiële gevolgen van het optreden ervan.
Soft Soil Creep (SSC)	Het kruipmodel geïmplementeerd in Plaxis
Snijden	Het lokaal bezwijken van grond rond (of tussen) de constructieve elementen.

Strenganker	Verankering van een constructie doormiddel van een bundel strengren die aan één zijde vast is gezet in de constructie en aan de andere zijde vast zit in een groutlichaam. Het strenganker is al dan niet afgespannen afhankelijk van het type.
Transmissiviteit	Het gemak waarmee grondwater door een granulaire laag (in dit geval een zandlaag) kan stromen, gelijk aan het product van de waterdoorlatendheid en de laagdikte (is kD-waarde)
Tussenzandlaag (TZ)	Watervoerende zandlaag van over het algemeen geringe dikte (KIS: enkele meters) waarin de stijghoogten van het grondwater reageren op de hoogte van de buitenwaterstand
Unity Check	De verhouding tussen de rekenwaarde en de maximaal toelaatbare waarde van spanningen, krachten en momenten in constructies.
Verankering	De constructie waarmee een langsconstructie aan bovenzijde wordt vastgezet door verbinding met een dieper gelegen ankerlichaam.
Verdroging	Vergroting van de ontwateringsdiepte (de diepte van maaiveld tot het freatisch vlak of grondwaterstand) t.o.v. de initiële situatie.
Vernatting	Een structurele afname van de afstand tussen het maaiveld en de freatische grondwaterstand (of vrije waterspiegel). De afstand tussen het maaiveld en de freatische grondwaterstand is de ontwateringsdiepte. We spreken van vernatting bij afname van de ontwateringsdiepte, dus bij het dalen van het maaiveld bij een gelijkblijvende freatische grondwaterstand, bij het stijgen van de freatische grondwaterstand bij gelijkblijvend peil van het maaiveld, of bij een combinatie van deze effecten.
Verwachtingswaarde	Het gewogen gemiddelde van een stochastische variabele.
Volumieke Rek (VR)	Een methode in Plaxis om een volume verandering in verticale, horizontale of hoogte door te voeren.
WBN	Waterstand Bij de Norm
WBI	Wettelijk Beoordelings Instrumentarium
Zetting	Verticale verplaatsing door kruip van samendrukbare lagen in de ondergrond, als gevolg van een bovenbelasting, de eigen massa en verdere oorzaken.

# Samenvatting

## Inleiding

Het dijktraject Kinderdijk Schoonhovenseveer (KIS) is ruim 20 km lang en gelegen in het westelijk deel van het beheergebied van Waterschap Rivierenland (WSRL). In de periode van 2013 tot 2018 is 10 km van dit traject versterkt. Tijdens en na afronding van de dijkversterking zijn er klachten ontstaan bij de omwonenden, variërend van wateroverlast tot schade aan een aantal huizen. Ook zijn er vragen gesteld of dit consequenties heeft voor de beoordeling van de waterveiligheid van de gerealiseerde dijkversterking.

Naar aanleiding hiervan is door Deltares, in opdracht van Waterschap Rivierenland (WSRL) in 2 fasen onderzoek uitgevoerd om de volgende vragen te beantwoorden:

- Fase 1 (2021): Is de waterveiligheid van de dijk op orde?
- Fase 2 (2022): Is de dijkversterking op de juiste manier is uitgevoerd en heeft dit geleid tot schade en overlast in de omgeving?

Na afronding van deze onderzoeken is het resultaat voorgelegd aan het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW). Het ENW was van mening dat Deltares in haar analyses met betrekking tot de waterveiligheid vertrouwd heeft op de kwaliteit van de toegepaste boorpalenwand, zonder een sluitende verklaring te geven voor de waargenomen vernatting en vervormingen. Het ENW deed de aanbeveling om, mede met behulp van monitoring, de oorzaken hiervan beter te begrijpen. Dit heeft geleid tot aanvullend (fase 3) onderzoek.

De doelstelling van fase 3 is het uitvoeren van onderzoek naar de integriteit en waterveiligheid van de boorpalenwand in relatie tot de effecten op de omgeving, zoals vernatting, vervorming en schade. Het onderzoek bestaat uit de volgende onderdelen:

- A. Onderzoek naar de oorzaken van de vernatting in het gebied langs de dijk.
- B. Het onderzoeken of er technische maatregelen of mogelijkheden zijn om overlast door vernatting te beperken.
- C. De beschouwing van de kans en het gevolg van een mindere kwaliteit van de boorpalenwand voor de waterveiligheid van de dijk na dijkversterking.
- D. Het beoordelen van de waterveiligheid van de dijkversterking met een boorpalenwand in relatie tot de opgetreden vervormingen.

Het onderzoek "Onderdeel A" wordt behandeld in dit rapport en is omvangrijk en complex. Op hoofdlijnen zijn de volgende deelonderzoeken (zie ook Figuur 1) te onderscheiden:

- Introductie en hypothesen geohydrologische beïnvloeding als gevolg van de boorpalenwand.
- Monitoringsonderzoek (onder andere overlastmeldingen, peilbuizen, hellingmeetbuizen en hydrochemisch onderzoek).
- Grondwaterstromingsberekeningen om lekkages te modelleren en te extrapoleren naar hoogwaterstanden.

De uitkomsten van het onderzoek onderdeel A leveren resultaten en uitgangspunten op voor andere delen van het onderzoek, met name voor onderdeel B (technische maatregelen beperken vernatting) en onderdeel D (beoordeling waterveiligheid).

Het doel van het onderzoek van onderdeel A is om oorzaken van vernatting en effecten op de waterveiligheid van de constructie (de boorpalenwand) vast te stellen. Voor onderdeel A zijn de volgende 5 onderzoeksvragen geformuleerd ([zie blauwe tekst](#)) en beantwoord.

## Beantwoording Onderzoeksvragen 1 t/m 5

### Onderzoeksvraag 1:

*Op welke locaties zijn er meldingen van wateroverlast of vernatting? Welke van deze locaties zijn mogelijk te relateren aan installatie van de boorpalenwand?*

Na afloop van de dijkversterking is bij iets minder dan de helft (6) van de 13 secties met een boorpalenwand laag in het talud een schademelding geconstateerd die kon worden gerelateerd aan vernatting. Bij 7 van deze secties blijkt tijdens de aanleg van de boorpalenwand uittredend water te zijn geconstateerd tijdens de installatie van de verankering bij het naastliggende anker. Hierbij moet de kanttekening worden gemaakt dat er ook gevallen zijn waarbij uittredend water tijdens installatie is geconstateerd maar geen vernatting is gemeld. Wateruitreding betekent overigens niet dat het anker niet voldoet. Uit deze analyse volgt dat er een 11 locaties zijn waar een mogelijk verband kan worden gelegd tussen wateroverlast en de boorpalenwand.

### Onderzoeksvraag 2:

*Op welke locaties is het zinvol om monitoringsonderzoek uit te voeren om betere uitspraken te kunnen doen over vernatting of lekkages die mogelijk door de boorpalenwand worden veroorzaakt?*

Uit de analyse van de meldingen van wateroverlast volgt dat er een aantal locaties zijn waar een verband kan worden gelegd tussen wateroverlast en de boorpalenwand. Dit is gebruikt in de keuze van de locaties voor nader onderzoek ter plaatse van de boorpalenwanden. De locaties van het monitoringsonderzoek zijn geselecteerd op basis van 3 criteria:

- Aanwezigheid van een tussenzandlaag (TZ).
- Locatie van de boorpalenwand laag in het talud.
- Bereikbaarheid van de locatie voor aanleg van het monitoringsysteem. Het criterium schade door vernatting is daarbij niet expliciet meegenomen.

Op basis hiervan is in 3 dwarsdoorsneden een monitoringsysteem geïnstalleerd om lekkage langs de boorpalen en ankers vast te kunnen stellen. De dwarsdoorsneden die zijn gekozen voor de monitoring zijn de secties F1-1, F2-2 en H2. Aanvullend voor het duiden van de vernatting zijn visuele inspecties verricht op nog eens 6 locaties.

### Onderzoeksvraag 3:

*Kan er een relatie worden gevonden tussen de maaiveldhoogte en de waterdrukken in watervoerende zandlagen?*

Voor de beantwoording van deze vraag is beschouwd of door een veronderstelde hogere stijghoogte ten gevolge van lekkages/vernatting langs de boorpalen of ankers extra zettingen of zwellingen zouden kunnen optreden. De conclusie is dat er geen relatie kon worden gelegd omdat er op dit moment geen voldoende meerjarige tijdreeksen van waterspanningen beschikbaar zijn. Daarnaast bleek deze vraag tijdens de loop van het onderzoek niet meer relevant.

### Onderzoeksvraag 4a:

*Kan op basis van het monitoringsonderzoek een uitspraak worden gedaan over de invloed van hydraulische kortsluiting langs de boorpalen en de ankers tussen de pleistocene zandlaag (PL) en de tussenzandlaag (TZ)?*

Uit het onderzoek volgt dat waarschijnlijk<sup>1</sup> in 3 van de 6 raaien een mate van hydraulische kortsluiting is opgetreden als gevolg van de installatie van de boorpalen en de ankers. Dit treed op tussen de PL en de TZ langs de boorpalen en de ankers. Het betreft locatie F1-1 bij raai 2 en locatie F2-2 bij de raaien 3 en 4.

Tijdens de dijkversterking KIS zijn er bij 13 secties boorpalenwanden laag in het talud gemaakt met in totaal circa 1300 palen en ankers. Omdat op enkele monitoringslocaties

---

<sup>1</sup> Kansuitspraak/waarschijnlijkheidsaanduiding volgens Willems et al (2020).



hydraulische kortsluiting waarschijnlijk is, kan het zijn dat hydraulische kortsluiting tussen de PL en de TZ ook bij andere secties met een TZ lokaal aanwezig is.

Het uitgevoerde onderzoek is statistisch gezien namelijk een steekproef met een bias (voorkeur) omdat de onderzoekslocaties zijn gekozen op plekken waar de kans op hydraulische kortsluiting of vernatting mogelijk groter is (o.a. boorpalenwand laag in het talud). Gesteld kan worden dat de gegeven verwachtingen van het optreden van hydraulische kortsluiting daarmee conservatief zijn. De invloed beperkt zich tot de diepere watervererende lagen en heeft geen invloed op de hoogte van het freatisch vlak (vernatting). De hydraulische kortsluiting bepaald de stijghoogte in de TZ en is een factor bij de analyse van de waterveiligheid van de boorpalenwand, omdat een verandering van de stijghoogte de mate van stabiliteit beïnvloed. Deze invloed op waterveiligheid is in onderdeel D verder beschouwd.

In het onderzoeksgebied is ook sprake van hydraulische kortsluiting door natuurlijke oorzaken. De afsluitende kleilaag tussen de TZ en PL ontbreekt namelijk plaatselijk of is plaatselijk zeer dun of doorlatend. Dit is af te leiden uit het verloop van de respons op de buitenwaterstand in de peilbuizen over de verschillende raaien en de hydraulische kortsluiting treedt vooral op in het achterland van de onderzochte locaties.

#### *Onderzoeksvraag 4b en 4c:*

*Kan op basis van het monitoringsonderzoek een uitspraak worden gedaan over de invloed van vernatting als gevolg van lekkage langs (4b) de boorpalen of (4c) de ankers van de TZ (of de PL als de TZ ontbreekt) naar de deksloof?*

Uit het monitoringsonderzoek volgt dat:

- Bij 2 van de 6 onderzochte raaien het waarschijnlijk dan wel zeer waarschijnlijk is dat lekkage langs de ankers van de TZ naar de deksloof optreedt. Het betreft locaties F1-1 en F2-2 bij de raaien 2 respectievelijk 3.
- Bij 3 van de 6 raaien lekkage langs de boorpalen niet is uit te sluiten. Het betreft de locaties F1-1 en F2-2 bij de raaien 1, 2 en 3.
- Het optreden van lekkage langs de ankers waarschijnlijker is dan langs de boorpalen.

Zoals ook bij onderzoeksvraag 4a is aangegeven zijn bij 13 secties boorpalenwanden gemaakt (laag in het talud) met in totaal circa 1300 boorpalen en ankers. Omdat op enkele monitoringslocaties vernatting waarschijnlijk dan wel zeer waarschijnlijk is, mag worden verwacht dat dit ook bij andere secties voorkomt. Het is waarschijnlijker dat dit plaatsvindt langs de ankers hoewel lekkage langs de boorpalen niet is uit te sluiten. Het uitgevoerde onderzoek op enkele locaties is statistisch gezien een steekproef met een bias (voorkeur). Als vernatting of op de gemonitorde locaties is vastgesteld, mag worden verwacht dat dit bij meerdere boorpalen en/of ankers voorkomt. Gesteld kan worden dat de gegeven verwachtingen van het optreden van vernatting daarmee conservatief zijn. Enige mate van lekkage of vernatting bij de boorpalenwanden hoeft niet persé te leiden tot effecten rondom bebouwing (zoals vernatting en vochtschade).

Er zijn grondwaterstromingsberekeningen uitgevoerd voor raai 2 (locatie F1-1) waarmee de effecten van lekkage en vernatting langs de boorpaal of het anker van de TZ naar de PL zijn gemodelleerd. Uit het scenario waarbij alle ankers lekken volgt uit de berekeningen voor de dagelijkse situatie dat de lekkagedebieten variëren tussen 0,45 en 0,85 m<sup>3</sup>/dag per strekkende meter dijk. Dit is een worst case inschatting. Het freatisch vlak stijgt als gevolg van deze lekkages met maximaal 0,3 m van NAP - 1,05 m tot NAP - 0,75 m. De lekkage veroorzaakt alleen vernatting in de directe omgeving tot enkele meters rond de deksloof. Men spreekt van vernatting als de ontwateringsdiepte ten opzichte van de initiële situatie is verminderd. Dit kan in specifieke gevallen, met een geringe ontwateringsdiepte of heterogeniteiten in de ondergrond, natte plekken aan het maaiveld veroorzaken. Op de monitoringslocaties is dit overigens niet waargenomen.

De vernatting heeft geen invloed op de te hanteren waterspanningen voor berekening van de waterveiligheid van de boorpalenwand. Dit komt omdat het invloedsgebied van de lekkage aanmerkelijk kleiner is dan het gebied waarin de hoogte van het freatisch vlak invloed heeft op de stabiliteit van de dijk (stabiliteitsgebied).

#### *Onderzoeksvraag 5:*

*Welke grondwaterstanden en stijghoogten van het grondwater in de TZ en de PL dienen te worden gehanteerd voor een herberekening van de boorpalenwand, al dan niet rekening houdende met lekkages?*

In dit rapport zijn de stijghoogten in de TZ en de PL gekwantificeerd voor een berekening van de stabiliteit van de boorpalenwand in sectie F1-1. Deze locatie is gekozen voor de boorpalenwand omdat:

- Op deze locatie de meeste discussie is ontstaan over de integriteit van boorpalenwand.
- Er een TZ aanwezig is waardoor een hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL een nadelige invloed kan hebben op de waterveiligheid van de boorpalenwanden.
- De invloed van de grondwateronttrekking op de stijghoogten in de TZ en de PL op deze locatie het grootst is.

Tevens is de te hanteren minimale hoogte van het freatisch vlak bepaald. Het bepalen van de veiligheid van de boorpalenwand zelf wordt in onderdeel D behandeld en maakt geen deel uit van dit rapport. Deze stijghoogten zijn gegeven voor de situatie mét en zónder lekkages. Voor de situatie mét hydraulische kortsluiting is het invloedsgebied groter dan vanaf 20 m voor tot 20 m na de boorpaal waardoor de stijghoogten in de TZ invloed hebben op de stabiliteit van de dijk (stabiliteitsgebied).

De grondwateronttrekking voor drinkwaterwinning door Oasen te Nieuw Lekkerland heeft grote invloed op de stijghoogte in de tussenzandlaag en pleistocene zandlaag. Voor de bepaling van waterveiligheid wordt gerekend met een stopgezette drinkwaterwinning. Dit is een beleidsmatige (en conservatieve) keuze. In de gegeven stijghoogten is hiermee rekening gehouden.

#### **Hoofdconclusies onderzoek**

Als gevolg van de aanleg van de boorpalenwand is het waarschijnlijk dat lokaal een hydraulische kortsluiting is ontstaan tussen de tussenzandlaag en het Pleistocene zand. De duiding 'waarschijnlijk' betekent: 'een grote kans van optreden'. De invloed beperkt zich tot de diepere watervoerende lagen en heeft geen consequenties voor de hoogte van het freatisch vlak en vernatting. Bij hoogwater leidt dit tot andere stijghoogten in de tussenzandlaag en daarmee beïnvloeding van de waterveiligheid. In het uitvoeringsontwerp is echter al rekening gehouden met een hogere maatgevende stijghoogte in de TZ.

Daarnaast is het waarschijnlijk dat de aanleg heeft geleid tot lekkage langs de ankers vanuit de tussenzandlaag naar het maaiveld. In één geval bleek dit zelfs zeer waarschijnlijk. Lekkage langs de boorpalen tot aan het maaiveld is minder waarschijnlijk maar niet uit te sluiten. Het gevolg is vernatting (een stijging van het freatisch vlak) van beperkte omvang tot enkele meters rond de deksloof. Dit kan in specifieke gevallen natte plekken aan het maaiveld veroorzaken bij bijvoorbeeld een geringe ontwateringdiepte of heterogeniteit in de ondergrond. Dit hoeft niet per definitie te leiden tot schade in de omgeving. Op de monitoringslocaties zijn de natte plekken overigens niet waargenomen. De lekkage heeft geen invloed op de waterveiligheid omdat het invloedsgebied van de lekkage aanmerkelijk kleiner is dan het gebied waarin de hoogte van het freatisch vlak invloed heeft op de stabiliteit van de dijk (stabiliteitsgebied).

Als gevolg van de installatie van de boorpalenwand is lokaal wateroverlast opgetreden en dat heeft tot schademeldingen geleid. Bij het boren van de verankering is wateruittrekking bij naastliggende ankers waargenomen.

De grondwateronttrekking voor drinkwaterwinning door Oasen te Nieuw Lekkerland heeft grote invloed op de stijghoogte in de tussenzandlaag en pleistocene zandlaag vooral bij locatie F1-1. Voor de analyse van de waterveiligheid van de boorpalenwand (onderdeel D) wordt gerekend met een stopgezette drinkwaterwinning. Dit is een beleidsmatige (en conservatieve) keuze.

# Inhoud

	<b>Begrippenlijst</b>	<b>4</b>
	<b>Samenvatting</b>	<b>8</b>
	<b>Inhoud</b>	<b>13</b>
<b>1</b>	<b>Doelstelling onderzoek</b>	<b>17</b>
1.1	Inleiding	17
1.2	Doelstelling onderzoek fase 3	18
1.3	Opzet onderzoek vernatting boorpalenwand en leeswijzer	19
<b>2</b>	<b>Resultaten wateroverlast fase 1 en 2 onderzoek</b>	<b>22</b>
<b>3</b>	<b>Toelichting lekkage, vernatting en hydraulische kortsluiting</b>	<b>24</b>
3.1	Ontstaan van vernatting en hydraulische kortsluiting	24
3.2	Generieke bronnen vernatting	27
3.3	Hypothesen geohydrologische beïnvloeding als gevolg van de boorpalenwand	29
3.3.1	Nadere beschrijving hypothesen	29
3.3.2	Effecten en invloedsgebieden van de vernatting in het algemeen	31
<b>4</b>	<b>Monitoringsonderzoek</b>	<b>33</b>
4.1	Opzet monitoringsonderzoek	33
4.1.1	Doel en verwachtingen monitoringsonderzoek	33
4.1.2	Opzet monitoringsonderzoek	35
4.1.3	Inventarisatie meldingen van overlast	37
4.1.4	Locatiekeuze	38
4.2	Uitvoering veldwerkzaamheden	42
4.2.1	3 Monitoringslocaties	42
4.2.2	Visuele inspectie aanvullende onderzoekslocaties	44
4.3	Peilbuismetingen	44
4.3.1	Peilbuismetingen monitoringslocaties F1-1, F2-2 en H2	44
4.3.2	Tijdreeksanalyse	48
4.3.3	Peilbuismetingen ADCIM bij boorpalenwand F1-1	54
4.4	Hydrochemisch onderzoek	57
4.5	Hellingmeetbuizen bij boorpalen	60
4.6	Samenvatting van conclusies uit het monitoringsonderzoek	62
<b>5</b>	<b>Grondwaterstromingsberekeningen</b>	<b>68</b>
5.1	Opzet grondwaterstromingsberekeningen	68
5.1.1	Doel van de grondwaterstromingsberekeningen	68
5.1.2	Opzet grondwaterstromingsberekeningen	69
5.2	Uitgangspunten en beschouwing gemaakte keuzes	70

5.3	Resultaten berekeningen	71
5.3.1	Invloed lekkages	71
5.3.2	Extrapolatie naar WBN	72
5.4	Conclusie berekeningen	78
5.4.1	Conclusies lekkages en hydraulische kortsluiting	78
5.4.2	Conclusies extrapolatie WBN2023 en WBN2115	80
5.4.3	Uitgangspunten voor analyse waterveiligheid boorpalenwand in raai 2 (locatie F1-1) in onderdeel D	82
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>84</b>
6.1	Inleiding	84
6.2	Conclusies onderzoeksvragen	84
6.2.1	Inventarisatie meldingen van overlast in relatie tot de boorpalenwanden	84
6.2.2	Monitoringslocaties en visuele inspectie aanvullende onderzoekslocaties	85
6.2.3	Relatie maaiveldhoogte en waterdrukken in watervoerende zandlagen	85
6.2.4	Hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL	86
6.2.5	Kwel/lekkage langs anker en boorpaal naar maaiveld	87
6.2.6	Extrapolatie WBN2023 en ontwerp	90
6.3	Samenvatting hoofdconclusies onderzoek	91
6.4	Aanbevelingen voor continuering van het monitoringsonderzoek	92
	<b>Bijlagen</b>	<b>93</b>
<b>A</b>	<b>Monitoringslocaties en ondergrondopbouw</b>	<b>94</b>
A.1	Situatie projectgebied en locaties monitoring	94
A.2	Principeprofiel met locaties monitoringonderzoek	94
A.3	Dwarsprofielen raai 1 t/m 6 met locaties monitoringonderzoek	95
A.4	Locaties aanvullend veldonderzoek	102
<b>B</b>	<b>Stijghoogtemetingen ADCIM 2018-2019</b>	<b>103</b>
B.1	Peilbuismetingen ADCIM 2018-2019, AW169 nabij de panden Lekdijk 355/356 en 357	103
B.2	Hysteresegrafieken peilbuismetingen ADCIM 2018-2019 (relatie peilbuisstand met neerslag/getij) voor Peilbuis 1, 2, 7 en 8	105
<b>C</b>	<b>Waterstandsverlooptlijnen Lek voor Kinderdijk Schoonhoven</b>	<b>109</b>
C.1	MHW en waterstandsverlooptlijnen Lek voor KIS	109
C.2	WBN en waterstandsverlooptlijnen Lek voor KIS	110
<b>D</b>	<b>Peilbuismetingen raai 1 t/m 6</b>	<b>113</b>
D.1	Samenvatting	113
D.1.1	Samenvatting peilbuismetingen	113
D.1.2	Mogelijke correlatie met neerslag	118
D.1.3	Drinkwateronttrekking Oasen te Nieuw Lekkerland:	119
D.2	Meetwaarden en conclusies per raai	120
D.2.1	Raai 1	121
D.2.1.1.	Meetwaarden	121



D.2.1.2.	Conclusies n.a.v. de meetwaarden	125
D.2.2	Raai 2	128
D.2.2.1.	Meetwaarden	128
D.2.2.2.	Conclusies n.a.v. de meetwaarden	131
D.2.3	Raai 3	133
D.2.3.1.	Meetwaarden	133
D.2.3.2.	Conclusies n.a.v. de meetwaarden	136
D.2.4	Raai 4	139
D.2.4.1.	Meetwaarden	139
D.2.4.2.	Conclusies n.a.v. de meetwaarden	142
D.2.5	Raai 5	145
D.2.5.1.	Meetwaarden	145
D.2.5.2.	Conclusies n.a.v. de meetwaarden	148
D.2.6	Raai 6	150
D.2.6.1.	Meetwaarden	150
D.2.6.2.	Conclusies n.a.v. de meetwaarden	153
<b>E</b>	<b>Hellingmeetbuizen bij boorpalen</b>	<b>155</b>
E.1	Algemeen	155
E.2	Scheefstand hellingmeetbuizen	155
E.3	Horizontale vervormingen	159
E.4	Conclusies n.a.v. de metingen	163
E.5	Aanbevelingen	166
E.6	Meetresultaten in grafiekvorm	166
<b>F</b>	<b>Hydrochemisch onderzoek</b>	<b>184</b>
F.1	Inleiding	184
F.2	Beschrijving Hydro geologische opbouw	184
F.3	Monitoringopzet	185
F.4	Resultaten	187
F.4.1	Resultaten grondwatermonsters en temperatuurmetingen	187
F.4.1.1.	Parameters uit laboratorium onderzoek	187
F.4.1.2.	Correlatie tussen de laboratoriumparameters	190
F.4.2	Temperatuurmetingen	192
F.4.3	Conclusies naar aanleiding van de resultaten	195
F.5	Resultaten meetcampagne november 2023	198
F.6	Conclusie en aanbevelingen:	199
<b>G</b>	<b>Overbetonering</b>	<b>201</b>
G.1	Sectie F1-1	202
G.2	Sectie F2-2	203
G.3	Sectie H2	204
<b>H</b>	<b>Lekkage ankers na realisatie</b>	<b>206</b>
<b>I</b>	<b>Aanvullingen Logboek uitvoering installatie monitoring 3 locaties</b>	<b>208</b>

I.1	Generieke constatering	208
I.2	Sectie F1-1	209
I.3	Sectie F2-2	210
I.4	Sectie H2	211
<b>J</b>	<b>Grondwaterstromingsberekeningen</b>	<b>214</b>
J.1	Inleiding	214
J.2	Opzet berekeningen	214
J.3	Uitgangspunten en randvoorwaarden	215
J.3.1	Keuze berekeningsmodellen	215
J.3.2	Dwarsprofiel Plaxis analyses	219
J.3.3	(Onder)grondopbouw	219
J.3.4	Waterstanden en stijghoogten	220
J.3.5	Geohydrologische parameters	222
J.3.6	Modelleren hydraulische kortsluiting van PL naar TZ en lekkages/vernatting langs boorpaal en anker	222
J.4	Berekeningsresultaten	226
J.4.1	Raai 2 Plaxis	226
J.4.1.1.	Kalibratie model	226
J.4.1.2.	Invloed lekkages	231
J.4.1.3.	Simulatie/extrapolatie voor WBN2023, WBN2115 en MHW2065	237
J.4.2	Extrapolatie met Extrapol voor WBN2023, WBN2115 en MHW2065	244
J.4.3	Simulatie/extrapolatie voor WBN2023 met Tijdreeksanalyse met Pastas, raa1 1 t/m 6	246
J.5	Samenvatting resultaten en conclusies	247
J.5.1	Invloed lekkages	247
J.5.2	Simulatie/extrapolatie voor WBN2023, WBN2115 en MHW2065	248
<b>K</b>	<b>Bijlage referenties</b>	<b>255</b>
<b>L</b>	<b>Digitaal dossier</b>	<b>257</b>

# 1 Doelstelling onderzoek

## 1.1 Inleiding

Het dijktraject Kinderdijk Schoonhovenseveer (KIS) is ruim 20 km lang en gelegen in het westelijk deel van het beheergebied van Waterschap Rivierenland (WSRL). In de periode van 2013 tot 2018 is 10 km van dit traject versterkt. Bij deze versterking zijn verschillende versterkingsvarianten toegepast: grondbermen, stalen damwanden, diepwanden, barettenwanden en boorpalenwanden. In de keuze voor deze versterkingen was de aanwezigheid van lintbebouwing langs de dijk leidend. Tijdens en na afronding van de dijkversterking zijn er klachten ontstaan bij de omwonenden, variërend van wateroverlast tot schade aan een aantal huizen.

In het rapport 'de Lekdijk Lekgestoken!' (Baars S. v., April 2021) wordt een relatie gelegd tussen de werkzaamheden die uitgevoerd zijn ten behoeve van de dijkversterking en de gemelde schades. Daarnaast wordt in dit rapport de installatie van de boorpalenwand in verband gebracht met de vernatting achter de dijk. Naast wateroverlast wordt gesteld dat de waterveiligheid in het geding is bij een met boorpalenwand versterkte dijk.

In april 2021 was dit aanleiding voor Waterschap Rivierenland (WSRL) om Deltares te vragen een onafhankelijk onderzoek uit te voeren naar de waterveiligheid van de dijk en de uitvoering van de dijkversterking. Het onderzoek van Deltares heeft bestaan uit twee fases. De meest urgente vraag, of er sprake is van een acuut waterveiligheidsrisico, is onderzocht in fase 1.

De belangrijkste conclusie uit dit onderzoek (Deltares, Juli 2021) was:

*"Uit het door Deltares uitgevoerde onderzoek van de waterveiligheid van de dijk tussen Kinderdijk – Schoonhovenseveer zijn er geen aanwijzingen gevonden dat er sprake is van een acuut waterveiligheidsrisico. Ook met inachtneming van nieuwe inzichten voor waterspanningen en realisatie van de constructieve elementen voldoet de huidige dijk nu (ruim) aan de destijds geldende norm en ontwerpmethodiek met betrekking tot de waterveiligheid op basis waarvan deze in de periode van 2013 tot 2018 is versterkt."*

In fase 2 van het onderzoek is onderzocht of de dijkversterking op de juiste manier is uitgevoerd en of dit mogelijk heeft geleid tot schade en overlast in de omgeving. De belangrijkste conclusie uit dit onderzoek (Deltares, Februari 2022) was:

*"Er is besloten de toelaatbare vervormingen van de panden te verruimen. Dit door van een maximaal toelaatbare absolute verplaatsing over te gaan op een maximaal toelaatbaar verschil in verplaatsing over een bepaalde afstand (hoekverdraaiing). Het monitoringsplan is hierbij niet aangepast. Er is niet frequent genoeg en niet op voldoende plaatsen gemonitord. Dat schade aan panden is opgetreden lijkt het gevolg van het toelaten van meer vervorming en het ontbreken van mogelijkheden om via monitoring adequaat bij te sturen."*

Het Deltares onderzoek is door het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW) geëvalueerd. In haar advies (ENW, December 2021) wordt het volgende zorgpunt aangegeven: *"Hoewel boorpalen vaker worden toegepast, is de goede kwaliteit niet bij elke bodemopbouw vanzelfsprekend. Bij Kinderdijk-Schoonhovenseveer betreft het een eerste toepassing bij een dijkversterking."*

Voor wat betreft de waterveiligheid wordt hieraan toegevoegd:

*“De waargenomen vernatting en vervorming, in combinatie met de specifieke kenmerken van de omgeving, maken dat naar het oordeel van het ENW niet zonder meer op de goede kwaliteit van de boorpalen gerekend mag worden. Het is naar mening van het ENW onbevredigend dat in de analyse van Deltares op de kwaliteit van de boorpalen wordt vertrouwd zonder sluitende verklaring voor de vernatting en de vervormingen. Voor een definitief oordeel over de waterveiligheid wordt onderzoek naar de oorzaak van de vernatting en de gerealiseerde kwaliteit van de boorpalen aanbevolen.”*

Naar aanleiding van het ENW advies heeft Waterschap Rivierenland Deltares gevraagd de kwaliteit van de boorpalenwand nader te beschouwen. Dit is een onderdeel van fase 3 van het onderzoek Kinderdijk-Schoonhovenseveer.

## 1.2 Doelstelling onderzoek fase 3

De doelstelling van fase 3 is het uitvoeren van onderzoek naar de integriteit en waterveiligheid van de boorpalenwand in relatie tot de effecten op de omgeving, zoals vernatting, vervorming en schade. Het onderzoek in deze fase bestaat uit de volgende onderdelen:

- A. **Onderzoek naar de oorzaken van de vernatting** in het gebied langs de dijk (Werkpakket 2, afgekort WP2).
- B. Het onderzoeken of er technische maatregelen of mogelijkheden zijn om overlast door vernatting te beperken (WP5).
- C. De beschouwing van de kans en het gevolg van een **mindere kwaliteit van de boorpalenwand** voor de waterveiligheid van de dijk na dijkversterking (WP3).
- D. Het **beoordelen van de waterveiligheid** van de dijkversterking met een boorpalenwand in relatie tot de opgetreden vervormingen (WP4).

In dit rapport wordt onderdeel A gerapporteerd. Doel van dit onderzoek is om in generieke zin een uitspraak te doen naar de meest aannemelijke oorzaak van vernatting en om de effecten op de waterveiligheid van de constructie (de boorpalenwand) vast te stellen.<sup>2</sup>

Het ENW deed de aanbeveling om, mede door monitoring, de oorzaken van de vernatting beter te begrijpen (zie ENW, Februari 2022). De vernatting en vervorming kunnen verschillende oorzaken hebben. Het is daarom van belang om de stijghoogten in en rond de waterkering en de horizontale vervormingen van de ondergrond en de boorpalen in een aantal dwarsprofielen te meten. Dit is binnen dit onderdeel A uitgevoerd.

Ten behoeve van onderdeel D is het van belang om te bepalen welke waterspanningen moeten worden gehanteerd om de veiligheid van de boorpalenwand-constructie te kunnen bepalen. Vooral de geëxtrapoleerde waterspanningen bij de Waterstand bij de norm (WBN) zijn hierbij van belang. Deze waterspanningen worden in dit rapport bepaald.

Op basis van de onderzoeksdoelen zijn voor onderdeel A de volgende onderzoeksvragen opgesteld:

1. Op welke locaties zijn er meldingen van wateroverlast of vernatting? Welke van deze locaties zijn mogelijk te relateren aan installatie van de boorpalenwand?
2. Op welke locaties is het zinvol om monitoringsonderzoek uit te voeren om beter uitspraken te kunnen doen over vernatting of lekkages die mogelijk door de boorpalenwand worden veroorzaakt?

---

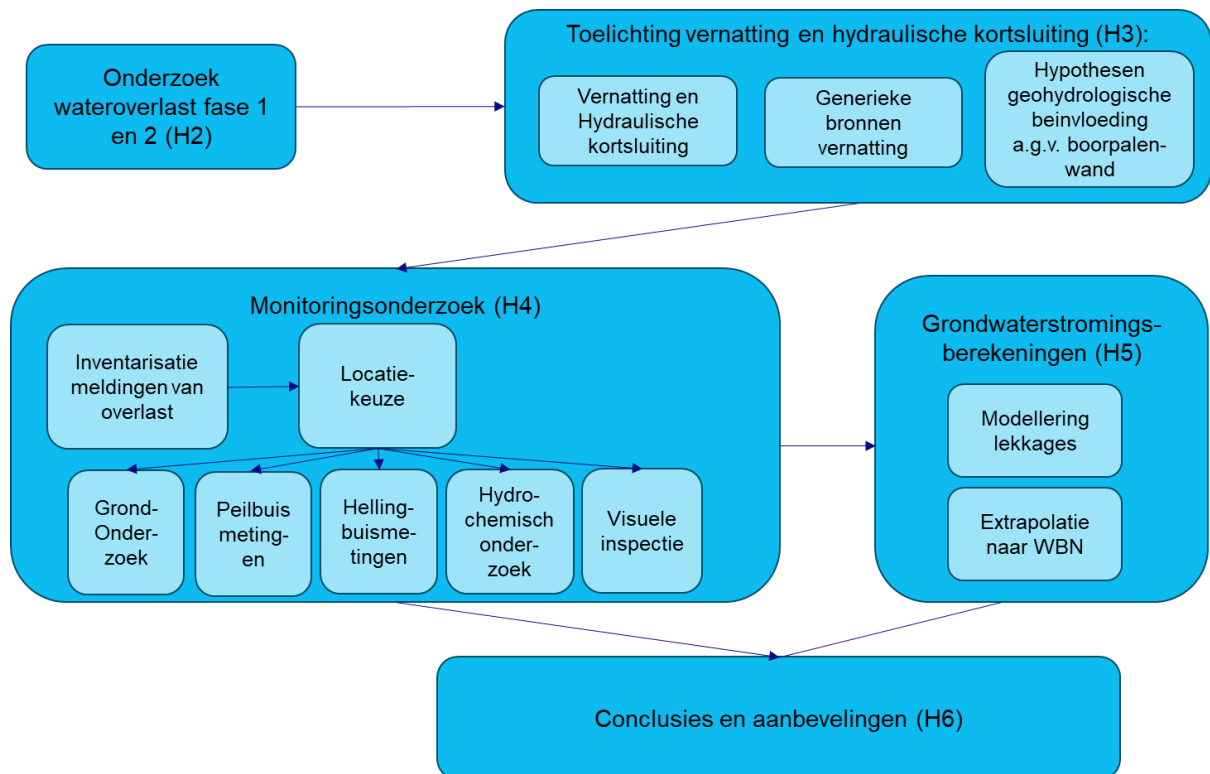
<sup>2</sup> Noot: de individueel gemelde schadegevallen naar aanleiding van de dijkversterking vormen geen specifiek onderdeel van dit onderzoek, deze worden binnen de onderzoeken naar de individuele schadeafhandeling opgepakt. Overkoepelende fenomenen die leiden tot schade en overlast welke worden geconstateerd op basis van de individuele schadegevallen worden separaat beschouwd buiten het kader van het Deltares onderzoek van fase 3. Tendensen van schadegevallen worden meegenomen in de keuze van onderzoeklocaties. .

3. Kan er een relatie worden gevonden tussen de maaiveldhoogte en de waterdrukken in watervoerende zandlagen?
4. Kan op basis van het monitoringsonderzoek een uitspraak worden gedaan over de aannemelijkheid en de invloed van de volgende lekkages op vernatting en waterveiligheid? Daarbij zijn de volgende scenario's beschouwd:
  - a. Hydraulische kortsluiting langs de boorpalen of ankers tussen het Pleistocene zand (PL) en een eventueel aanwezige tussenzandlaag (TZ).
  - b. Vernatting als gevolg van lekkage langs de boorpalen van de TZ (of PL als de TZ ontbreekt) naar maaiveld.
  - c. Vernatting als gevolg van lekkage langs de ankers van de TZ (of PL als de TZ ontbreekt) naar maaiveld.
5. Welke grondwaterstanden en stijghoogten van het grondwater in de TZ en de PL dienen te worden gehanteerd voor een herberekening van de boorpalenwand, al dan niet rekening houdende met lekkages?

Het beantwoorden van deze onderzoeksvragen levert resultaten en uitgangspunten op voor andere delen van het onderzoek, met name voor de beoordeling van de waterveiligheid (onderdeel D). Zoals in Paragraaf 1.2 is aangegeven zal in onderdeel B worden bekeken of er technische maatregelen of mogelijkheden zijn om overlast door vernatting te beperken.

### 1.3 Opzet onderzoek vernatting boorpalenwand en leeswijzer

De volgende werkzaamheden/activiteiten zijn uitgevoerd (zie Figuur 1):



Figuur 1: Visualisatie werkzaamheden/activiteiten onderdeel A.



### **Eerder uitgevoerd onderzoek**

Voor dit onderdeel wordt eerst teruggegrepen op het eerder uitgevoerde onderzoek van fase 1 en fase 2. De resultaten die hierin staan vermeld met betrekking tot de wateroverlast worden overgenomen en kort geanalyseerd. In Hoofdstuk 2 is hiervan verslag gedaan.

### **Ontstaan van vernatting en hydraulische kortsluiting**

Om de verschillende bronnen en hypothesen van vernatting en hydraulische kortsluiting te kunnen duiden is het van belang om het ontstaan van vernatting te beschrijven. Eerst wordt in Hoofdstuk 3 beschreven wat onder vernatting en andere daarmee samenhangende begrippen wordt verstaan. Daarbij is het van belang om het geohydrologisch systeem langs de Lekdijk toe te lichten en de invloed die de mens en vervolgens de dijkversterking daarop heeft. Vervolgens zijn in Hoofdstuk 3 de voornaamste bronnen van vernatting in generieke zin gegeven. Vervolgens zijn de hypothesen van vernatting en hydraulische kortsluiting beschreven als gevolg van de installatie van de boorpalenwand (inclusief verankering). Het risico dat tijdens het installeren van de boorpalen grindnesten zijn ontstaan, of blow-outs zijn opgetreden, wordt behandeld in onderdeel C. In voorliggend rapport wordt wel de invloed van grindnesten of blow-outs op de geohydrologie onderzocht.

### **Monitoringsonderzoek**

Belangrijk onderdeel van dit onderzoek betreft het monitoringsonderzoek dat is uitgevoerd op 3 locaties langs de dijk (totaal 6 raaien). Hiermee wordt namelijk een uitspraak gedaan over:

- De oorzaken van vernatting (of de boorpalenwand lekkage en daarmee vernatting veroorzaakt).
- De invloed van eventuele lekkage langs de boorpalen en/of ankers op de veiligheid van de constructie (de boorpalenwand).

De resultaten van dit monitorings- onderzoek zijn beschreven in Hoofdstuk 4.

### **Inventarisatie van de meldingen van wateroverlast**

In het fase 1 en 2 onderzoek is al een inventarisatie uitgevoerd van de meldingen van wateroverlast. Deze inventarisatie is uitgebreid met het toegepaste dijkversterkingsalternatief. Er is in de meldingen ook een onderverdeling aangebracht naar correlatie met neerslag en hoogwater. Doel is te onderzoeken of er een verband is tussen melding van wateroverlast en neerslag of hoogwater. Ook speelt de vraag of er een verband is vast te stellen tussen melding van wateroverlast en het dijkversterkingsalternatief. Deze bureaustudie is grotendeels door WSRL uitgevoerd en opgenomen in Paragraaf 4.1.3.

De resultaten van deze inventarisatie zijn gebruikt bij de inrichting van de monitoring en keuze van de onderzoekslocaties. Het monitoringnetwerk bestaat uit peilbuizen en hellingmeetbuizen. Met de peilbuisgegevens zijn tijdreeksanalyses uitgevoerd. Daarnaast is hydrochemisch onderzoek uitgevoerd op watermonsters met als doel de herkomst van water te achterhalen. In het kader van onderzoek naar de boorpalenwand (onderdeel C) zijn tijdens opgravingen bij de boorpalenwand visuele inspecties verricht naar vernattingsverschijnselen.

### **Grondwaterstromingsberekeningen**

Voor het onderzoek naar de lekkages en de vernatting zijn, vooral aan de hand van de peilbuismetingen, grondwaterstromingsberekeningen en tijdreeksanalyses uitgevoerd. Dit met het doel de hypothesen voor de vernatting en hydraulische kortsluiting als gevolg van de boorpalenwand (zoals genoemd in Hoofdstuk 3) te onderbouwen. Hiervoor zijn berekeningen met Plaxis en tijdreeksanalyses met Pastas uitgevoerd. Voor de resultaten wordt verwezen naar Hoofdstuk 5. Tevens zijn extrapolaties uitgevoerd waarmee de stijghoogten in de TZ en de PL zijn bepaald ten behoeve van de beoordeling van de veiligheid van de boorpalenwand. Beoordeling van de veiligheid van de boorpalenwand zelf wordt in het kader van onderdeel D uitgevoerd.

## **Conclusies en aanbevelingen**

In Hoofdstuk 6 zijn de conclusies gegeven voor de 3 hypothesen op basis van een samenvoeging van de verschillende deelonderzoeken die in dit rapport zijn weergegeven. Ook worden aanbevelingen gepresenteerd voor de continuering van de monitoring.

Bij dit rapport is een digitaal dossier toegevoegd. Dit dossier bestaat vooral uit meetresultaten en berekeningsresultaten. Een overzicht van het digitaal dossier is in Bijlage L weergegeven.

## 2 Resultaten wateroverlast fase 1 en 2 onderzoek

In de eerder uitgevoerde onderzoeken van fase 1 en 2 is al ingegaan op lekkages en hydraulische kortsluiting ter plaatse van de boorpalenwand en de invloed hiervan op de wateroverlast en waterveiligheid. In dit hoofdstuk wordt teruggegrepen op de resultaten en conclusies van dit eerder uitgevoerde onderzoek en wordt dit kort geanalyseerd. Doel hiervan is om te bezien of dit met de nieuwe inzichten (onderdeel A, fase 3) aanleiding zou geven tot een aangepast Plan van Aanpak (PvA), aanvullend onderzoek of andere of aanvullende conclusies. De bevindingen van fase 1 en 2 zijn meegenomen in het PvA van fase 3.

Ten aanzien van de dijkversterking KIS (Kinderdijk – Schoonhovenseveer) heeft Deltares in een tweetal fasen onderzoek gedaan naar (met name) de boorpalenwand.

### Fase 1

In fase 1 was de vraag aan de orde of er sprake was van een acuut veiligheidsprobleem. De conclusie in de rapportage 'Spoedadvies Analyse waterveiligheid KIS' (Deltares, 2021) is dat dit niet aan de orde is. De conclusies en aanbevelingen voor wat betreft de wateroverlast en lekkage worden hier kort samengevat.

Vraag 1: zijn de gemeten waterspanningen en de veronderstelde lekkages door kieren langs de langsconstructies aanleiding om de destijds uitgevoerde ontwerpberoeeningen aan te scherpen?

- **Conclusie:**  
Na de uitgevoerde bereoeeningen voor de boorpalenwand sectie F1-1 kwam het volgende naar voren:
  - Een mogelijke lekkage langs de boorpalen geeft een hogere freatisch lijn en potentiaal in de TZ (indien aanwezig). Dit heeft een negatieve invloed op de sterkte van de boorpalenwand met als gevolg een kortere ontwerplevensduur dan 100 jaar.
  - Op dit moment (2021) voldoet de constructie wel aan de huidige waterveiligheidseisen.
  - Er is geen acuut waterveiligheidsprobleem.
- **Aanbeveling:**  
Geadviseerd werd om de ontwikkelingen gedurende de levensduur te monitoren (denkende aan waterspanningen in de zandlagen en horizontale vervormingen van de palenwand en de ondergrond) omdat mogelijk de levensduur van de constructie minder zou zijn dan de ontwerplevensduur van 100 jaar.

Vraag 2: voldoet het ontwerp aan de destijds geldende norm en ontwerpmethodiek, ook bij eventuele nieuwe inzichten betreffende de waterspanningsuitgangspunten? Ook vanuit latere metingen en nieuwe inzichten betreffende het "snijden" van grond door de openingen bij niet doorgaande langsconstructies, zoals bij KIS is toegepast.

- **Conclusies:**
  - De uitgevoerde peilbuismetingen (ADCIM 2018-2019) geven aan dat hier (locatie F1-1) geen sprake is van lekkage door kieren.
  - De kans wordt uitgesloten dat er kortsluitingen zijn ontstaan langs de palen in het holocene pakket boven de holocene zandlaag.
  - Er is een kleine kans dat er kortsluitingen langs de palen zijn ontstaan tussen de twee zandlagen. Met name daar waar er verschil is geweest in de potentialen tijdens het trekken van de boorcasing over de zone van de kleilaag die tussen de twee zandlagen in ligt.

- Er is een kans op onvoldoende afdichting via een groutprop langs de ankers aan de onderzijde van het slappe lagenpakket, gelet op de overmaat aan sterkte, die nu via de constructie aanwezig is, zal de lekkage via de verankeringen niet leiden tot een acuut waterveiligheidsprobleem. Een onvoldoende afdichting van de ruimte langs het anker kan wel tot wateroverlast leiden.
- Aanbevelingen:
  - Gezien het laatste punt werd aanbevolen om, op basis van de ontwerp- en uitvoeringsgegevens van de palenwanden en het beschikbare grondonderzoek, nader te analyseren in welke secties er mogelijk onvoldoende afdichting aanwezig is aan de onderkant van het slappe lagenpakket.
  - Bij stijve constructies in combinatie met zeer slappe grond is het, door bijvoorbeeld 3D- en kruipeffecten, niet ondenkbaar dat de grond tussen de palen meer vervormt dan de palen zelf. Dit zou tot kiervorming achter de palen kunnen leiden. Deze onzekerheid kan worden beheerst door het continueren en uitbreiden van de (waterspannings-)monitoring. Voor de levensduur van de palenwand is beschouwing van deze kennisvraag relevant, echter niet t.a.v. de korte termijn waterveiligheid.

## **Fase 2**

In fase 2 is nader onderzoek gedaan naar een aantal vragen die zijn opgeroepen in het rapport van Van Baars (Van Baars, 2021). Dit is gerapporteerd in 'Analyse waterveiligheid KIS' (Deltares, 2022). In het onderzoek van fase 1 stond waterveiligheid centraal. In het onderzoek van fase 2 stond vooral de schade aan de woningen centraal. De vragen en conclusies voor wat betreft de wateroverlast waren vooral in het fase 1 onderzoek al behandeld. Wel is in het fase 2 onderzoek herbevestigd dat een monitoringsplan dient te worden uitgevoerd. Hiermee kunnen de onzekerheden worden verkleind met betrekking tot het ontstaan van kortsluitingen tussen de onderlinge zandlagen, de aanwezigheid van onvoldoende afdichting bij de verankeringen ter voorkoming van kwel en het op termijn kunnen ontstaan van een kier langs de boorpalen.

## **Fase 3, onderdeel A**

De fase 1 en fase 2 rapporten van Deltares zijn beoordeeld door ENW (Expertise Netwerk Waterveiligheid), zie ENW 2022. Op basis van de aanbevelingen van ENW en de aanbevelingen van onderzoeken in fase 1 en 2 is een Plan van Aanpak (PvA) opgesteld. Dit rapport behandelt onderdeel A (vernatting) van dit onderzoek.

Onderdeel van fase 3 is een diepgaande gegevensverzameling en analyse. Hierdoor is het mogelijk dat de eerder opgestelde conclusies van fase 1 en 2 door dit onderzoek vervallen of juist versterkt worden.

## 3 Toelichting lekkage, vernatting en hydraulische kortsluiting

Zoals in Paragraaf 1.2 is aangegeven is het doel van het onderzoek in onderdeel A om de oorzaken van vernatting en de effecten op de waterveiligheid vast te stellen.

Om de verschillende bronnen en hypothesen van vernatting te kunnen duiden is het van belang om eerst het ontstaan van vernatting te beschrijven. In Paragraaf 3.1 wordt beschreven wat onder vernatting en andere daarmee samenhangende begrippen zoals kortsluiting wordt verstaan. Daarbij is het ook van belang om het geohydrologisch systeem langs de Lekdijk toe te lichten en de invloed die de mens daarop heeft.

De oorzaak van de vernattingsproblematiek is op basis van de beschouwde schadegevallen (zie ook Paragraaf 4.1.3) niet eenduidig vast te stellen. Dit omdat het schadeproces tot doel heeft de schade te compenseren en niet om de oorzaak vast te stellen. Op basis van een beschouwing van de voornaamste vernatting gerelateerde schadegevallen en de bevindingen van de reeds uitgevoerde onderzoeken, zijn in Paragraaf 3.2 de voornaamste bronnen van vernatting in generieke zin gegeven. In Paragraaf 3.3 zijn vervolgens de hypothesen van vernatting en hydraulische kortsluiting beschreven als gevolg van de installatie van de boorpalenwand (zie Paragraaf 3.3.1). In Paragraaf 3.3.2 zijn de effecten en invloedsgebieden van de vernatting van deze hypothesen, in het algemeen, beschreven.

De nadere uitwerking van de hypothesen en vernatting op basis van het monitoringsonderzoek en de grondwaterstromingsberekeningen is in de hoofdtukken 4 en 5 weergegeven.

### 3.1 Ontstaan van vernatting en hydraulische kortsluiting

#### **Wat verstaan we onder vernatting**

Men spreekt van vernatting wanneer de ontwateringsdiepte, de diepte van maaiveld tot het freatisch vlak of grondwaterstand, ten opzichte van een initiële situatie is verminderd (zie Figuur 2). Dit kan het gevolg zijn van een stijging van de freatische lijn of een daling van het maaiveld, danwel bij een combinatie van deze effecten. In deze context is de initiële situatie de situatie vóór de dijkversterking KIS in de periode vóór 2013-2018.

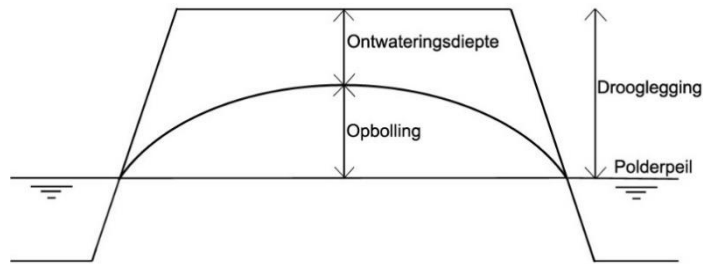
In relatie tot de problematiek van dijkversterking KIS is het aantonen dan wel uitsluiten van vernatting lastig omdat we de initiële situatie niet kennen en dus ook niet kunnen vaststellen wat de oorzaak is van vernatting. Met de vergaarde gegevens uit de monitoring is het alleen mogelijk om op basis van afwijkingen een uitspraak te doen. Daarom spreken we van de meest waarschijnlijke oorzaak of een combinatie van oorzaken van vernatting.

Als op een plek vernatting optreedt, dan kan dat effecten hebben op de omgeving, bijvoorbeeld natuur, nabijgelegen woningen of waterveiligheid. Bij vernatting zijn er bijvoorbeeld veranderingen zichtbaar in de plantengroei of in het uiterste geval natte plekken en/of uittredend water op het maaiveld. Het effect op de omgeving is onzeker omdat het invloedsgebied en de mate van de vernatting afhangt van veel factoren. Deze factoren zijn bijvoorbeeld de mate van lekkage, de eigenschappen van de grond, de heterogeniteit van de ondergrond, de geometrie en de initiële situatie.

Specifiek bij woningen kan vernatting tot vochtschade leiden, maar dat hoeft niet. Per woning verschilt de mate van 'weerstand' tegen vocht. Dit komt door het verschillende materiaal waaruit een gevel en/of kelder is opgebouwd of omdat de weerstand tegen optrekkend vocht kan veranderen.



Door veroudering of kleine vervormingen kunnen bijvoorbeeld scheurtjes (ook wel craquelé-effect genoemd) ontstaan in een gevel of kelderwand waardoor indringing van vocht gemakkelijker kan plaatsvinden. Dit laatste komt vooral voor bij kelders. Dus ook zonder verandering in de geohydrologische situatie (geen vernatting of verdroging) kan vochtschade of overlast door vocht optreden bij woningen.

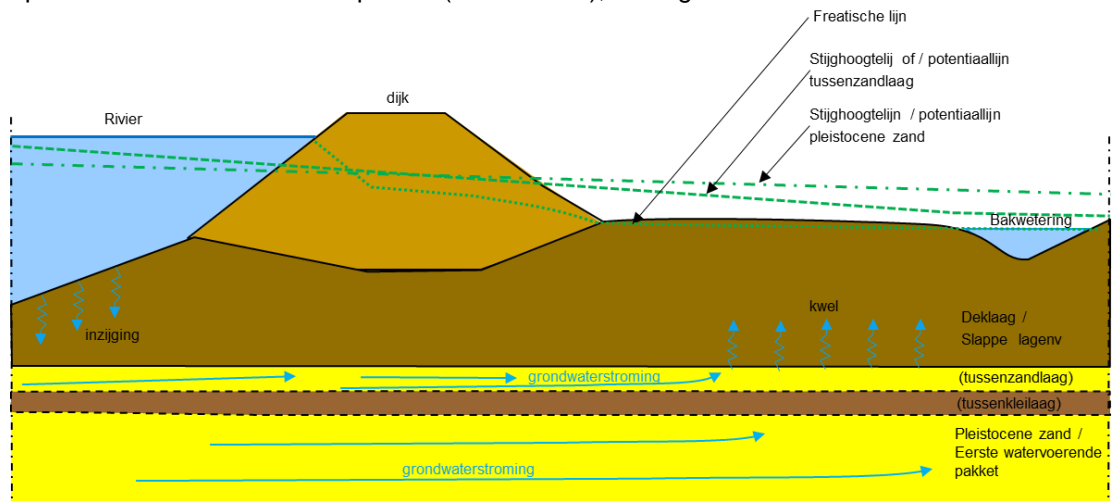


Figuur 2: Geohydrologische begrippen gerelateerd aan vernatting (bron:

<https://nl.wikipedia.org/wiki/Ontwateringsdiepte>).

### Geohydrologisch systeem langs de Lekdijk van de Alblasserwaard

De ondergrond onder de Lekdijk in de Alblasserwaard kent een bijzondere ontstaansgeschiedenis. Over het algemeen ligt er een dikke afsluitende deklaag (Holoceen) op het eerste watervoerende pakket (Pleistoceen), zie Figuur 3.



Figuur 3: Geohydrologische systeem KIS (met of zonder tussenzandlaag).

Door de eeuwenlange bemaling van de Alblasserwaard ligt het maaiveld vanaf de binnenteen lager dan de stijghoogte in het watervoerende pakket. Dit betekent dat er altijd sprake is van een kwelsituatie, al is de kwel door de dikke deklaag minimaal of zelfs niet meetbaar. De bodemopbouw is zeer heterogeen (verschillend) en er kunnen, bijvoorbeeld door scheurvorming zwakke plekken in de deklaag ontstaan. Een bekend fenomeen in het gebied is kwel in sloten die daardoor niet dichtvriezen.

De deklaag bestaat uit verschillende grondlagen met elk andere eigenschappen. In de toplaag, die vooral uit kleiig of antropogeen materiaal bestaat, wordt het grootste deel van het freatisch water afgevoerd. Hieronder bevindt zich een veenlaag met een variabele dikte. Veen heeft de bijzondere eigenschap dat het horizontaal veel meer water kan transporteren dan verticaal en dat eigenschappen variabel zijn. Onder de veenlagen bevinden zich over het algemeen holocene kleilagen, de basisveenlaag en de kleilaag van Wijchen.

Afwijkingen in de algemene bodemopbouw bestaan uit tussenzandlagen, geulopvullingen, crevasses<sup>3</sup> en rivierduinen (donken). Op delen van de Lekdijk is de tussenzandlaag watervoerend.

Door de dikke deklaag is er een scheiding tussen freatisch grondwater en het grondwater in het watervoerende zandpakket. Dit betekent dat de stijghoogte in het midden van de deklaag vrijwel constant is en over het algemeen niet wordt beïnvloed door regenval of de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket. De stijghoogte in het eerste watervoerende pakket en de eventueel aanwezige tussenzandlaag staat onder invloed van de rivierwaterstand en in Nieuw-Lekkerland ook door de drinkwaterwinning. Op de rivierbodem van de Lek is een weerstand biedende laag aanwezig waardoor veranderingen in de rivierwaterstand gedempt doordringen in het eerste watervoerende pakket en de eventueel aanwezige tussenzandlaag.

### **Wat is lekkage en hydraulische kortsluiting**

Kortsluiting is het aanwezig zijn van een al dan niet op natuurlijke wijze ontstane verbinding tussen verschillende watervoerende zandlagen of een verbinding tussen een watervoerende zandlaag en freatisch grondwater.

In dit rapport wordt de term hydraulische kortsluiting gebruikt als een watervoerend pakket door menselijk ingrijpen in directe verbinding komt met een ander watervoerend pakket (in dit geval de tussenzandlaag). Ook op natuurlijke wijze, door geologische processen, kan hydraulische kortsluiting zijn ontstaan. De invloed beperkt zich over het algemeen tot de diepere watervoerende lagen en heeft geen invloed op de hoogte van het freatisch vlak (vernatting).

In de Alblasserwaard is de stijghoogte in het watervoerende pakket vrijwel altijd hoger dan het maaiveld. Als er kortsluiting (direct contact) optreedt tussen een watervoerende pakket en het maaiveld, betekent dit dat er een continue stroom van water (lekkage) naar het maaiveld stroomt, bijvoorbeeld bij het uitvoeren van een diepe boring.

Lekkage is een (veelal geconcentreerde) stroming door een slecht doorlatende laag als gevolg van een verbinding (kortsluiting) tussen verschillende watervoerende lagen.

Voorbeelden zijn lekkage langs het anker of de boorpaal van het watervoerende pakket naar de freatische grondwaterstand.

### **Invloed van de mens op het geohydrologisch systeem**

In de huidige situatie heeft de mens grote invloed op het geohydrologische systeem. De dijk ligt veel hoger dan het achterland. Regenwater dat op het polderwaartse gedeelte van de dijk valt, stroomt via het maaiveld en de toplaag af naar het oppervlaktewater. In dit geval de bakwetering die het polderpeil in de Alblasserwaard bepaalt. In dorpskernen zijn er voorzieningen die regenwater van de weg direct afvoeren op de bakwetering.

Over de tijd zijn op meerdere plekken drainagevoorzieningen aangebracht die de freatische grondwaterstand beïnvloeden. Ook aanbermingen of opritten met een zandkern hebben invloed op de freatische grondwaterstand.

Recentere woningen zijn veelal op palen gebouwd. Deze palen zijn door de afsluitende deklaag heen in het Pleistoceen gefundeerd. In veel gevallen omsluit de ondergrond de paal en is er geen directe verbinding tussen het eerste watervoerende pakket of eventueel aanwezige tussenzandlaag en het freatische systeem. Door vervormingen in de ondergrond over de tijd is het mogelijk dat er een mate van lekkage optreedt en dat dit de oorzaak is van de vernatting.

In Nieuw-Lekkerland vindt drinkwaterwinning plaats door middel van een onttrekking uit het eerste watervoerende pakket. Deze winning heeft invloed op de stijghoogte in de watervoerende zandlagen tot op honderden meters van deze onttrekking en reikt tot en met de Lekdijk te Nieuw-Lekkerland.

---

<sup>3</sup> Een crevasse-afzetting is een geulafzetting die is ontstaan uit een doorbraak van een rivier die niet heeft doorgezet.

## 3.2 Generieke bronnen vernatting

Dijkversterkingen hebben invloed op het geohydrologische systeem. Deze invloeden kunnen bestaan uit vernatting of verdroging. Deze alinea beschrijft de invloed van vernatting op de omgeving. Hierbij ligt de nadruk op gebieden met bebouwing omdat invloeden (effecten) hier het eerst merkbaar zijn.

In de invloedssfeer van woningen zijn verschillende dijkversterkingsmethodes toegepast die invloed hebben op het geohydrologische systeem.

Ter plaatse van bebouwing is een verminderde ontwateringsdiepte door (een combinatie van) een stijging van de freatische lijn en/of een daling van het maaiveldniveau een belangrijke oorzaak van vernattingsschade. Ook een verminderde waterdichtheid van de woningen (kelders) speelt hierbij een rol.

De mogelijke bronnen van deze verminderde ontwateringsdiepte zijn:

1. Ten eerste zijn er binnendijks bermen aangelegd. Hierdoor is het maaiveld opgehoogd en heeft daardoor invloed op de afstroming van regenwater en dus het freatisch niveau. In het geval de woning achter de berm staat, is het einde van de berm dichterbij de woning komen te liggen. Hierdoor is de hogere freatische lijn in de berm ook dichterbij de woning komen te liggen waardoor de freatische lijn bij de woning, ten opzichte van de oorspronkelijke initiële ligging, kan stijgen met vernatting als mogelijk gevolg.
2. Door aanpassing van het bestaande dijkprofiel waarbij bijvoorbeeld een nieuwe kleilaag op het talud wordt aangebracht zal de infiltratiecapaciteit veranderen. Vooral in de eerste jaren na aanleg zal deze minder zijn door het ontbreken van structuurvorming in de klei. Bij regenval zal de afstroming over het talud groter zijn waardoor meer water in de binnenteen aanwezig is en dat zorgt tevens voor een verhoogd freatisch vlak. Een verandering van het dijkprofiel waarbij, bijvoorbeeld als gevolg van een andere verkanting<sup>4</sup> in het wegdek, meer afstroming naar het binnentalud plaatsvindt, kan bovengenoemd effect versterken. Om dit effect te voorkomen zijn hiervoor bij de dijkversterking KIS eisen gesteld. Door zettingen kan de verkanting ook de ongewenste kant op bewegen.  
Ook door het dempen van kopsloten of het verleggen van de bakwetering kan bovengenoemd effect worden versterkt omdat het regenwater van de dijk een langere weg moet afleggen waardoor mogelijk vernatting op kan treden.
3. Zakking van het maaiveld bij een gelijkblijvend freatische grondwaterstand:  
De oorzaak is daling van het maaiveld, bijvoorbeeld door zettingen als gevolg van de dijkversterkings-werkzaamheden of autonome bodemdaling.
4. Een verhoging van de grondwaterstand nabij een deksloof van een boorpalenwand door vorm en opbouw van de constructie:  
Het freatische water uit de dijk wordt gedeeltelijk tegengehouden ter plaatse van de deksloof. De bron van dit water is de regenval die infiltreert in het dijklichaam. Een variant op deze bron is als de zandlaag onder de werkvloer in verbinding staat met bijvoorbeeld een wegfundering.
5. Lekkage vanuit het diepere watervoerende pakket en/of de TZ via de ankerstangen van de boorpalenwand naar de deksloof:  
De oorzaak is kortsluiting met het watervoerende pakket (TZ en/of PL). In het watervoerende pakket heerst een grotere stijghoogte dan de maaiveldhoogte in de polder. Verhoging van het freatisch vlak kan alleen optreden als in het watervoerende pakket een grotere stijghoogte heerst dan het freatisch vlak ter plaatse van de deksloof. De veelal aanwezige veenlaag kent in verhouding tot kleilagen een grotere (horizontale) doorlatendheid waardoor een overdruk uit het diepere watervoerende pakket en/of de TZ zich makkelijker kan verspreiden. Het gevolg is vernatting ter plaatse van de boorpalenwand.

---

<sup>4</sup> Verkanting is de helling van het wegdek in het dwarsprofiel.

6. Lekkage langs de boorpalen:  
De bron is grondwater uit het watervoerende pakket. Hierbij wordt opgemerkt dat een eventuele lekkage wellicht niet over de gehele boorpaal hoeft op te treden. Evenals bij punt 5 geldt ook hier dat een verhoging van het freatisch vlak alleen kan optreden als in het watervoerende pakket een grotere stijghoogte heerst dan het freatisch vlak ter plaatse van de deksloof. Zoals ook bij punt 5 is aangegeven, kan een wateroverdruk zich in een veenlaag makkelijker verspreiden. Het gevolg is vernatting ter plaatse van de boorpalenwand.
7. Hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL:  
In de PL heerst in het algemeen een andere stijghoogte dan in de TZ. Door lekkage langs de boorpaal en het anker kan de stijghoogte vooral in de TZ veranderen. Bij een hogere stijghoogte in de PL zal de stijghoogte in de TZ ook verhogen. Dit is lokaal ter plaatse van de lekkage merkbaar en heeft nauwelijks tot geen invloed op vernatting.
8. Lekkage langs funderingspalen van bestaande woningen:  
De bron is grondwater uit het watervoerende pakket. Door grondvervormingen tijdens de uitvoering van de dijkversterking zijn bestaande funderingspalen vervormd. Hierdoor zou mogelijk kiervorming kunnen ontstaan langs bestaande funderingspalen met lekkage (extra kwel) tot gevolg. Evenals bij punt 5 en 6 kan dit alleen optreden als in het watervoerende pakket een grotere stijghoogte heerst dan het freatisch vlak ter plaatse. Een wateroverdruk kan zich in een eventueel aanwezig veenlaag makkelijker verspreiden. Het gevolg is vernatting.
9. Consolidatieprocessen door ophogingen:  
De deklaag in KIS is dermate dik dat deze processen meer dan 10 jaar na het aanbrengen van de ophoging door wateroverspanningen in de ondergrond aanwezig kunnen zijn. De bron is grondwater uit het holocene pakket slappe lagen, niet uit het diepere watervoerende pakket.
10. Een veranderde geohydrologische gesteldheid door morfologische processen van de rivier:  
De geohydrologie van het gebied wordt gekenmerkt door een dikke deklaag die ook onder de rivierbodem voor een scheiding zorgt tussen de rivierwaterstand en de stijghoogte in het watervoerende pakket. Door natuurlijke oorzaken en/of menselijke ingrepen kan de morfologie van de rivierbodem veranderen. Hierdoor kan bijvoorbeeld de hydraulische weerstand van de rivierbodem afnemen waardoor de stijghoogte in het watervoerende zandpakket toeneemt.
11. Verandering van de gemiddelde grondwaterstand in het watervoerende zandpakket door veranderingen van grote drinkwateronttrekkingen in de omgeving:  
Afhankelijk van de opbouw van de deklaag kunnen deze veranderingen effect hebben op het verloop van de waterspanningen in de deklaag en daarmee ook op de kwel.
12. Een verandering van preferente stroombanen in de deklaag:  
Een dijkversterking op slappe ondergrond brengt altijd vervormingen met zich mee. Deze vervormingen, hoe klein ook, kunnen leiden tot scheurvorming in de ondergrond waardoor preferente stroombanen in de deklaag ontstaan of juist veranderen. Dit fenomeen is bekend, maar nog niet goed begrepen en daardoor zeer lastig vast te stellen als oorzaak.
13. Verminderde werking van drains:  
Ter vergroting van de ontwateringsdiepte zijn als mitigerende maatregel veelal drainages toegepast. Door een verminderde werking of verkeerde aanleg van deze drainages kan de grondwaterstand stijgen, ten opzichte van de situatie met een goedwerkende drainage, met vernatting als mogelijk gevolg.
14. Wateroverspanningen door het maken van een boorpaal:  
Het installeren van een boorpaal leidt tot wateroverspanningen in de ondergrond en navolgende consolidatie geeft zettingen. De wateroverspanningen kunnen in een beperkt invloedsgebied (denkende aan enkele meters rond de paal) tijdelijk vernatting

veroorzaken. Gezien de zeer beperkte invloed wordt deze bron van vernatting verder niet behandeld.

### 3.3 Hypothesen geohydrologische beïnvloeding als gevolg van de boorpalenwand

In deze paragraaf wordt de installatie van de boorpalenwand (boorpalen inclusief verankering) nader beschouwd in relatie tot de vernatting en effecten op de omgeving. De oorzaken 4 tot en met 7 zoals genoemd in Paragraaf 3.2 hebben een relatie met de boorpalenwand. De overige oorzaken zijn weliswaar niet uit te sluiten, maar het onderzoek richt zich op de hoofdoorzaken die een relatie hebben met de boorpalenwand om een generieke uitspraak (niet locatie specifiek) te kunnen doen.

Gezien de vraagstelling van het onderzoek, zoals weergegeven in Paragraaf 1.2 is het relevant om deze oorzaken nader te beschrijven, vooral in relatie tot waterveiligheid en effecten op de omgeving. In Paragraaf 3.3.1 zijn deze 4 hypothesen beschreven en in Paragraaf 3.3.2 zijn de effecten en invloedsgebieden van de vernatting van deze hypothesen beschreven.

De uitwerking van de hypothesen en vernatting op basis van het monitoringsonderzoek en de grondwaterstromingsberekeningen is in de Hoofdtukken 4 en 5 weergegeven.

#### 3.3.1 Nadere beschrijving hypothesen

##### 1. Verhoging grondwaterstand bij deksloof door vorm en opbouw constructie

Bij toepassing van een boorpalenwand liggen de woningen al dicht bij de binnenteen van de dijk. De boorpalenwanden zijn geplaatst in de kruin (hoog in het talud) of in de binnenteen (laag in het talud). De boorpalen zijn verbonden door een betonnen deksloof. De boorpalenwand heeft invloed op de ligging van de freatische lijn. De constructie vormt een barrière. Door de vorm en opbouw van de constructie ontstaat een verhoging van de grondwaterstand nabij de deksloof van een boorpalenwand. De boorpalenwand is namelijk voor 50% een 'open' constructie omdat de boorpalen met een gemiddelde diameter van 1,07 m h.o.h. 2,14 m uit elkaar staan. Feitelijk wordt dus het freatische water uit de dijk gedeeltelijk tegengehouden door de deksloof en de boorpalen die een barrière vormen. In het algemeen zal hierdoor aan de dijkzijde een vernatting plaatsvinden en aan de polderzijde een verdroging. Tevens kan het water de zandlaag onder de werkvloer van de deksloof vullen. De bron is dan regenval dat infiltreert in het dijklichaam. Een variant op deze bron is als de zandlaag onder de werkvloer gevuld wordt met water uit een wegfundering.

In het ontwerp (zie CDVM, Juli 2016 en CDVM, Oktober 2016) is generiek de invloed van de boorpalenwand op de omgeving geschat. Hieruit volgde een invloed ter plaatse van de wand van minder dan 0.25 m en bij de woningen minder dan 0.05 m. Dit theoretische effect is in het veld niet vaak terug gezien door de grote verschillen in eigenschappen van de grond rondom de deksloof. Het optreden van een verhoging van de grondwaterstand bij de deksloof door vorm en opbouw constructie is ook sterk afhankelijk van de lokale eigenschappen en detaillering bij de uitvoering. Deze verhoging van het freatisch vlak door vorm en opbouw constructie is in het ontwerp al meegenomen en wordt in dit rapport niet verder behandeld.

##### 2. Hydraulische kortsluiting tussen de PL en de TZ (hypothese A)

De installatie van de boorpalen kan leiden tot een hydraulische kortsluiting tussen de PL en de TZ. Hoewel het werkproces van de installatie van de boorpaal er op gericht was om dit risico te beheersen, is het mogelijk dat door grindnesten of een blow-out er een hydraulische kortsluiting ontstaat. In het geval van een blow-out tijdens het trekken van de casing is het risico op kortsluiting het grootst als er tijdens de installatie een verschil in stijghoogte is tussen de PL en de TZ. Als gevolg van kieren langs de boorpalen ontstaat een lekkage langs de boorpalen ter hoogte van de tussenkleilaag. Dit zal een verhoging van de gemiddelde stijghoogte (en de respons op de Lek) in de TZ geven als deze onder

normale omstandigheden lager is dan in de PL (zie ook Figuur 4 en Figuur 5). Daarnaast zal dit een verlaging van de gemiddelde stijghoogte (en mogelijk ook de respons op de Lek) in de PL geven. Deze verlaging in de PL zal vermoedelijk echter gering zijn gezien de grotere transmissiviteit (kD-waarde) van de PL. De kD-waarde is de doorlatendheid van de laag vermenigvuldigd met de dikte. De dikte van het watervoerende pakket (PL) is circa 15 m, terwijl de dikte van de TZ gemiddeld 1 m is. Hydraulische kortsluiting tussen de PL en de TZ heeft effect op waterveiligheid via de belasting (waterspanningen) en worden in dit rapport beschouwd.

Effecten op vernatting door hydraulische kortsluiting tussen de PL en de TZ zijn verwaarloosbaar en worden in dit rapport niet verder behandeld.

3. **Lekkage langs het anker naar de deksloof (hypothese B)**

Ten opzichte van eerdere onderzoeken is de geohydrologische beïnvloeding van de verankering van de boorpalen een nieuw aspect in dit onderzoek. Het boorgat van deze ankers is bewust groter aangehouden dan de diameter van de ankerstreng. Dit levert een voordeel op in de belasting op de boorpalenwand, maar vergroot de kans op lekkage vanuit het watervoerende pakket. In het ontwerp is hier generiek een beheermaatregel voor uitgevoerd door de groutkolom 2 meter in het afsluitende pakket te laten doorlopen. Echter door de heterogeniteit van de ondergrond en de gehanteerde ontwerpuitgangspunten bestaat de kans dat de beheermaatregel onvoldoende werkt. Er is een kans dat de groutprop onvoldoende afdicht.

Als gevolg hiervan zal een lekkage langs de ankerstrengen ontstaan van het watervoerende pakket naar de deksloof. Dit kan vernatting ter plaatse van de deksloof geven indien het freatisch vlak onder normale omstandigheden lager is dan de stijghoogte in de TZ of de PL als geen TZ aanwezig is. Zie ook Figuur 5. Daarnaast is de verwachting dat een grote lekkage langs het anker invloed heeft op de stijghoogte in de TZ of de PL.

4. **Lekkage langs de boorpaal naar de deksloof (hypothese C)**

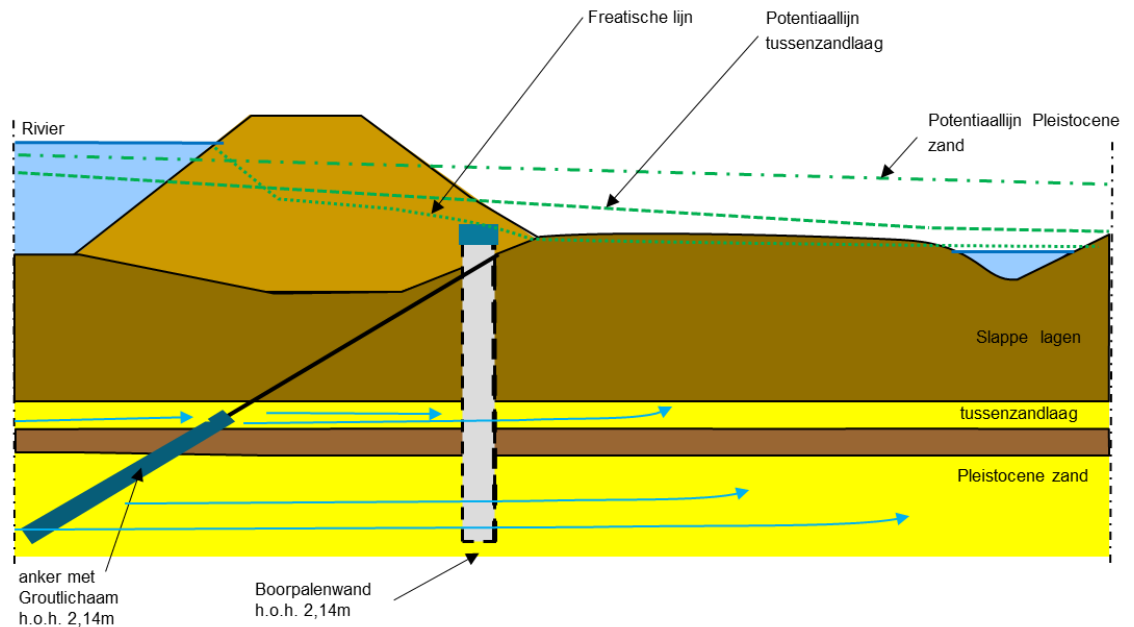
Het werkproces van de installatie van de boorpaal is erop gericht, zoals ook bij hypothese A is aangegeven, om het risico van hydraulische kortsluiting maar ook lekkage langs de boorpaal naar de deksloof te voorkomen. De kans dat door grindnesten of blow-outs lekkage langs de paal van watervoerende zandlaag naar de deksloof is ontstaan is zeer klein.

De boorpalen zijn in de grond gemaakt. In eerdere fases van het onderzoek is hier al veel aandacht aan besteed. Bij stijve constructies (zoals een boorpalenwand met verankering) in combinatie met zeer slappe grond is het, door bijvoorbeeld 3D- en kruipeffecten, denkbaar dat de grond tussen de palen meer vervormt dan de palen zelf. Dit zou tot kiervorming achter de palen kunnen leiden. Ook kunnen verticale uitsparingen aan de wand van de boorpaal zijn gevormd (door een te grote consistentie van de beton).

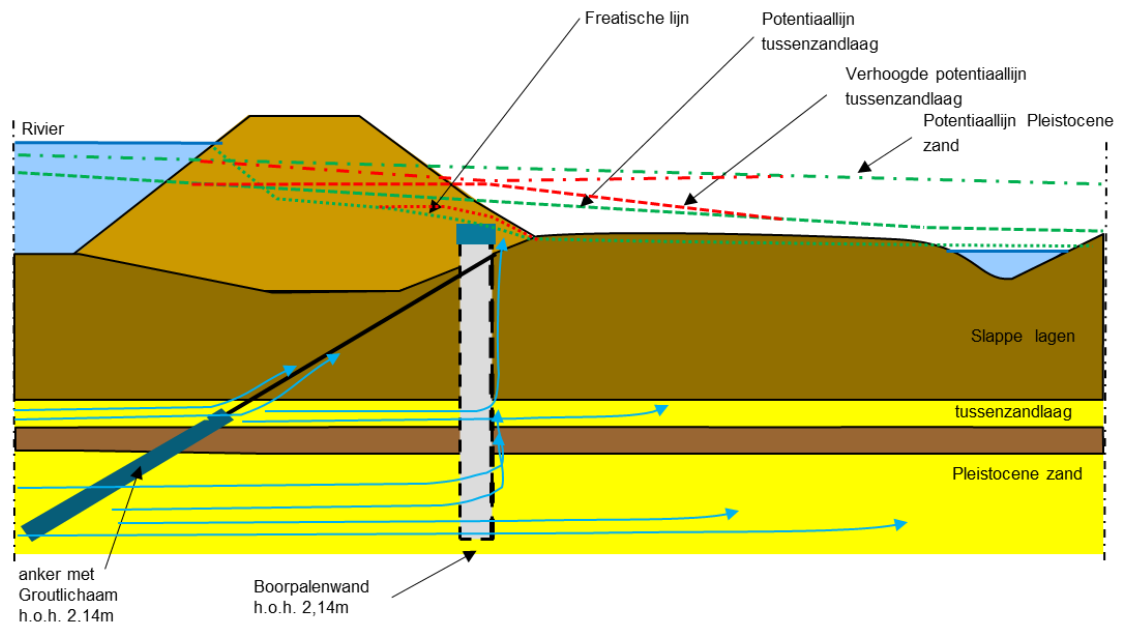
Via deze kieren ontstaat vervolgens een lekkage vanuit het watervoerende pakket naar het freatische vlak indien het freatisch vlak onder normale omstandigheden lager is dan de stijghoogte in de TZ (of de PL als geen TZ aanwezig is). Zie ook Figuur 5. Lekkage langs de boorpalen kan dus leiden tot een verhoging van het freatisch vlak en daarmee zorgen voor vernatting. De omvang en invloedsgebied van de vernatting is naar verwachting beperkt en wordt in dit rapport beschouwd. De kans op lekkage langs de boorpaal door kruipprocessen neemt theoretisch toe over de tijd, maar deze uitspraak kent een grote onzekerheid. Deze kennisleemte is geen onderdeel van deze rapportage. De verwachting is dat pas na meerdere jaren monitoring een uitspraak gedaan kan worden over het kruipgedrag van de grond langs de palen en de effecten daarvan op vernatting en waterveiligheid.

Evenals bij lekkage langs het anker is de verwachting dat een grote lekkage langs het anker invloed heeft op de stijghoogte in de TZ of de PL.





Figuur 4: Principe dwarsprofiel zonder lekkages langs de boorpalenwand. De blauwe lijnen geven de stoomlijnen aan van het grondwater in de TZ en PL. Met de groene lijnen zijn de freatische lijn en de stijghoogten (potentiaallijnen) van het grondwater in de TZ en de PL weergegeven.



Figuur 5: Principe dwarsprofiel met lekkages langs de boorpaal en ankerstreng. De blauwe lijnen geven de stoomlijnen aan van het grondwater in de TZ en de PL. Met de rode lijnen is de veranderde hoogte van het freatisch vlak en de stijghoogten (potentiaallijnen) in de TZ en de PL als gevolg van lekkages weergegeven.

### 3.3.2 Effecten en invloedsgebieden van de vernatting in het algemeen

Vernatting heeft effect op de omgeving. In hoofdlijn kunnen effecten worden opgedeeld in effecten op waterveiligheid en effecten op omgeving en bebouwing. Ten aanzien van waterveiligheid kan op basis van de gehanteerde ontwerpuitgangspunten een uitspraak worden gedaan. De mate van lekkage is gerelateerd aan de mate van vernatting en het invloedsgebied daarvan. Het invloedsgebied van de vernatting bepaalt het effect op de omgeving en daarmee ook de invloed op de functie van de betreffende omgeving. Een



bepaalde hoeveelheid vernatting hoeft voor de functie 'waterkeren' geen probleem op te leveren terwijl diezelfde hoeveelheid voor de dagelijkse beleving van bewoners als overlast manifesteert. Enkele decimeters verhoging van het freatisch vlak heeft bijvoorbeeld weinig invloed op het waterkerende vermogen van de constructie. Eenzelfde verhoging van het freatisch vlak kan bij woningen vochtoverlast of vochtschade geven. Deze verschillende perspectieven spelen een rol bij de dijkversterking KIS.

In het algemeen heeft een dijkversterking tot doel om de waterveiligheid te vergroten, rekening houdend met de omgeving. De geohydrologische beïnvloeding van een dijkversterking in de Alblasserwaard is door de grote onzekerheden (zie generieke bronnen in Paragraaf 3.2) lastig kwantificeerbaar en daardoor mogelijk onderbelicht.

Er zijn verschillende generieke bronnen van vernatting die in Paragraaf 3.2 zijn behandeld. Voor de boorpalenwand zijn de bronnen van vernatting en hydraulische kortsluiting in meer detail weergegeven in Paragraaf 3.3. Bij de boorpalenwand bepaalt de mate van lekkage de mate van vernatting. Het invloedsgebied is onzeker. Daarbij speelt ook dat in de nabijheid van de boorpalenwand generieke bronnen ook invloed hebben en niet kunnen worden uitgesloten.

Ten aanzien van waterveiligheid kan op basis van de gehanteerde ontwerppunten een uitspraak worden gedaan. In dit onderzoek zijn voor de effecten op de omgeving, bebouwing en waterveiligheid de volgende 3 aspecten van belang:

a) **De ligging van de freatische lijn**

Voor waterveiligheid is in het ontwerp van de dijkversterking is al rekening gehouden met de aanwezigheid van een relatief hoge freatische lijn in de dijk.

Het is de vraag of deze nog hoger zou kunnen worden als gevolg van vernatting.

Vernatting (een verminderde ontwateringsdiepte) kan ook tot wateroverlast of schade bij bebouwing leiden. Bij het vaststellen van vernatting speelt ook de eventuele verminderde waterdichtheid van de woningen een rol.

b) **De hoogte van de potentiaal in de TZ en de PL en opdrijven**

Een hogere potentiaal in de TZ heeft een negatieve invloed op waterveiligheid, omdat de belasting op de constructie toeneemt. Bij het ontstaan van een kortsluiting tussen de twee zandlagen (TZ en PL), wordt vooral de potentiaallijn in de TZ beïnvloed, zoals dit is weergegeven in Figuur 5. Door de kortsluiting zal de potentiaallijn in de TZ bij de boorpalen hoger kunnen worden. De mate van verhoging is afhankelijk van de weerstand ter plaatse van de kortsluiting en de berging en doorlatendheid van de TZ. Voor het ontwerp is door de aannemer veiligheidshalve uitgegaan van een stijghoogte bij MHW in de TZ gelijk aan die in de PL waardoor het effect van hydraulisch kortsluiting niet groot is. Als deze gelijk zijn gekozen, dan is het ook van belang of er sprake is van het bereiken van een grenspotentiaal vanuit de TZ door het opdrijven van het achterland. De grenspotentiaal zal in de TZ immers eerder worden bereikt dan in de PL. Hiermee dient dan rekening te worden gehouden bij de te maken berekeningen voor de waterveiligheid. Als de potentialen (gemiddelde waarden en responsen) in de twee zandlagen gelijk zijn en niet beïnvloed worden door het bereiken van een grenspotentiaal, dan zal een kortsluiting tussen de twee zandlagen geen invloed hebben op het ontwerp. Het is dus van belang om de potentialen in de PL en de TZ te bepalen zowel met als zonder hydraulische kortsluiting.

c) **Het potentiaalverloop in de deklaag**

Als gevolg van een hogere freatische lijn (zie a) en een hogere potentiaal in de TZ zal ook het potentiaalverloop over de deklaag verhogen, vooral in de buurt van het maaiveld en in de indringingslaag, wat een negatieve invloed op waterveiligheid geeft. Het veranderde potentiaalverloop in de deklaag heeft (in principe) geen negatieve invloed op de omgeving. Zoals bij punt 11 in Paragraaf 3.2 is aangegeven kan een verandering van de preferente stroombanen een effect op de omgeving hebben. Hierdoor kan vernatting optreden.

## 4 Monitoringsonderzoek

Belangrijk onderdeel van het onderzoek betreft het monitoringsonderzoek dat is uitgevoerd op 3 locaties langs de dijk (totaal 6 raaien). Het monitoringsonderzoek is de kern van het geohydrologische onderzoek van onderdeel A. In een latere fase, tijdens het vernattings- en ankerkoppenonderzoek (dat valt onder onderdeel C) zijn aanvullende locaties onderzocht. Voor de leesbaarheid van dit hoofdstuk zijn zoveel mogelijk details, zoals tekeningen, metingen, berekeningen en analyses, in bijlagen ondergebracht waardoor dit hoofdstuk relatief compact is gebleven.

In Paragraaf 4.1 worden eerst het doel en de verwachtingen van het monitoringsonderzoek uiteengezet. Op basis van de onderzoeksvragen, die in Paragraaf 1.2 zijn gegeven, is een opzet van het monitoringsonderzoek opgesteld. Na een inventarisatie van meldingen van wateroverlast zijn deze (mede) gebruikt bij de inrichting van de monitoring en keuze van de onderzoekslocaties.

In Paragraaf 4.2 is de uitvoering van de veldwerkzaamheden beschreven waarbij de 3 monitoringlocaties ter plaatse van F1-1, F2-2 en H2 worden behandeld. In het kader van onderzoek naar de boorpalenwand (onderdeel C) zijn tijdens opgravingen bij de boorpalenwand visuele inspecties verricht naar vernattingsverschijnselen en de ankerkoppen.

Het monitoringnetwerk bestaat onder andere uit peilbuizen die op de drie eerdergenoemde monitoringlocaties zijn geïnstalleerd. In Paragraaf 4.3.1 zijn de peilbuismetingen, de meetresultaten, analyse en de bevindingen weergegeven. Met de peilbuisgegevens zijn tijdreeksanalyses uitgevoerd waarvan de resultaten en conclusies in Paragraaf 4.3.2 worden behandeld. De eerder uitgevoerde peilbuismetingen van ADCIM uit 2018-2019 worden in Paragraaf 4.3.3 beschouwd.

Daarnaast is hydrochemisch onderzoek uitgevoerd op watermonsters uit vooral de peilbuizen met als doel de herkomst van water te achterhalen. De aanpak, analyseresultaten en conclusies hiervan zijn in Paragraaf 4.4 weergegeven.

Het monitoringonderzoek heeft tevens bestaan uit hellingmeetbuizen om, op basis van de gemeten horizontale vervormingen van de ondergrond en de boorpaal, eventuele kiervorming langs de boorpalen te kunnen bepalen. Voor de metingen, analyseresultaten en conclusies op basis van deze metingen wordt verwezen naar Paragraaf 4.5.

In Paragraaf 4.6 zijn de resultaten van de bovengenoemde deelonderzoeken samengebracht. Hierbij zijn de conclusies van de effecten als gevolg van de installatie van de boorpalenwand, die betrekking hebben op vernatting en die van belang zijn voor de analyse van de waterveiligheid van de boorpalenwand (onderdeel D), samengevat.

### 4.1 Opzet monitoringsonderzoek

#### 4.1.1 Doel en verwachtingen monitoringsonderzoek

##### **Doel monitoringsonderzoek**

Het doel is om door middel van metingen de geohydrologische beïnvloeding van de boorpalenwand en de effecten daarvan op de omgeving in beeld te brengen. Effecten hebben betrekking op vernatting en waterveiligheid. Op basis van de onderzoeksvragen (zie Paragraaf 1.2) en inventarisatie van meldingen (zie Paragraaf 4.1.3) is een monitoringsplan opgesteld. De werkzaamheden zijn uitgevoerd door Wiertsema en Partners.

Dit onderzoek heeft zich gericht op het meten van de waterdrukken, gronddeformaties en de samenstelling van het grondwater. Het onderzoek heeft plaatsgevonden op enkele maatgevende en representatieve locaties ter plaatse van de boorpalenwanden.

Met peilbuizen zijn de waterdrukken gemeten in de PL, de TZ, en in het holocene pakket slappe lagen. Daarbij zijn ook de waterpeilen in de rivier de Lek en de bakwetering (binnendijkse watergang) gemeten. De monitoring en analyse daarvan richt zich vooral op de eventuele hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL ter plaatse van de boorpalen. Ook is eventuele lekkage langs de boorpalen en ankers naar de deksloof onderzocht. Dit is gedaan door de waterdrukken in de verschillende lagen met elkaar te vergelijken en de reactie van deze waterdrukken op neerslag en het getij vanuit de rivier te analyseren.

Tevens is de chemische samenstelling van watermonsters uit de peilbuizen en drainage onderzocht en met elkaar vergeleken met als doel om de herkomst van het water vast te stellen. Zie Paragraaf 4.4.

De horizontale gronddeformaties ter plaatse van de boorpalen zijn met hellingmeetbuizen gemeten. Hiermee is getracht het ontstaan van een kier (en daardoor mogelijk lekkage) langs de boorpaal vast te stellen. De resultaten hiervan zijn in Paragraaf 4.5 weergegeven.

### **Verwachtingen monitoringsonderzoek**

De verwachting is dat met de in dit plan voorgestelde monitoring zo goed mogelijk aan de (onderzoeks-)vragen wordt voldaan. Met de monitoring kunnen na een korte meetperiode (enkele maanden) en/of op langere termijn (denkende aan jaren) eventuele lekkages, kortsluiting of kieren langs de palenwand en ankers worden geconstateerd.

De conclusies op basis van de monitoring houden enige onzekerheid vanwege de volgende punten:

- Er zijn bij 13 secties binnen de dijkversterking KIS boorpalenwanden gemaakt laag in het talud met in totaal circa 1300 palen. Niet alle secties zijn gemonitord omdat dit tot (onacceptabele) hoge kosten zou leiden. Vooraf is een inschatting gemaakt van de meest kritieke en representatieve secties waar vervolgens is gemonitord. Binnen de gekozen monitoringsecties is een steekproef uitgevoerd door bij de palen te meten die de grootste afwijkingen vertonen. Op deze gekozen locaties wordt het grootste effect op waterveiligheid verwacht. Tevens is de verwachting dat het optreden van vernatting op deze locaties het meest waarschijnlijk is en het optreden daarvan het grootste effect heeft op de omgeving. Voor een nader onderbouwing van de keuze van de te monitoren secties wordt verwezen naar de Paragraaf 4.1.4.
- Op basis van het onderzoek op deze locaties kunnen we een uitspraak doen voor deze secties en kunnen we een verwachting uitspreken voor de overige secties. Als geen vernatting of hydraulische kortsluiting op de gemonitorde locaties is vastgesteld is het volledig uitsluiten hiervan bij andere secties theoretisch niet mogelijk. Het is statistisch gezien een steekproef met een bias (voorkeur) omdat de onderzoekslocaties zijn gekozen op plekken waar de kans op hydraulische kortsluiting of vernatting mogelijk groter is (o.a. boorpalenwand laag in het talud). Als wel vernatting of hydraulische kortsluiting op de gemonitorde locaties is vastgesteld, mag worden verwacht dat dit bij meerdere boorpalen en/of ankers voorkomt. Gesteld kan worden dat de gegeven verwachtingen van het optreden van hydraulische kortsluiting en vernatting daarmee conservatief zijn.

#### 4.1.2 Opzet monitoringsonderzoek

Het onderzoek heeft plaatsgevonden op enkele maatgevende en representatieve locaties ter plaatse van de boorpalenwanden. Per locatie is het principe van de onderzoeksopzet in een dwarsprofiel met bovenaanzicht weergegeven in Bijlage A.2.

Opgemerkt wordt dat lopende het onderzoek, ná het plaatsen van de peilbuizen, duidelijk werd dat niet alleen mogelijke lekkage langs de boorpalen maar vooral ook langs de ankers een risico is. Met de uitgevoerde monitoringopzet, met name het peilbuizenonderzoek, is gezocht naar mogelijkheden om ook lekkage langs de ankers te kunnen meten. Navolgend wordt onder het punt 'Peilbuizen' een nadere toelichting gegeven.

Per monitoringsinstrument wordt hierna ingegaan op locatie, diepte en doel.

#### Sonderingen en boringen

Ter nadere bepaling van de opbouw van de ondergrond, de filterdiepten van de peilbuizen en de diepte van de hellingmeetbuizen zijn boringen en sonderingen uitgevoerd. Vooral ter plaatse van de boorpalenwand is de bepaling van de exacte locaties van de filters t.o.v. de palenwand (met vermeende lekkage) van belang. Daarom is van de boringen en sonderingen ter plaatse van de palenwand ook de helling en richting bepaald.

#### Peilbuizen

Navolgend wordt specifiek ingegaan op de locaties, filterdieptendiepten en doel van de peilbuismetingen:

- Er zijn zo dicht mogelijk langs de palenwand en op 10 tot 15 m afstand van de palenwand per raai totaal 6 peilbuizen geplaatst. Drie in de PL en drie in de TZ (indien aanwezig). Doel (onderzoeksvraag) is om vast te kunnen stellen of nu of in de toekomst kortsluiting, als gevolg van een eventuele kier langs de boorpaal, tussen de PL en de TZ plaatsvindt. De peilbuizen op 10 tot 15 m afstand zijn als referentie geplaatst daar waar de invloed van een eventuele kortsluiting ter plaatse van de palenwand niet of beperkt merkbaar zal zijn<sup>5</sup>. Ook zijn 2 peilbuizen op 50 tot 65 m afstand binnenwaarts van de palenwand geplaatst en als referentie gebruikt. Tezamen met de peilbuizen op 10 tot 15 m aan weerszijden van de palenwand wordt hiermee een raai gevormd waarmee de waterspanning kan worden bepaald ter plaatse van de palenwand, ervan uitgaande dat geen lekkage optreedt. Opgemerkt wordt dat de afstand van de referentiepeilbuizen tot de peilbuizen ter plaatse van de palenwand enerzijds zo kort mogelijk is gehouden om zo min mogelijk verschil tussen beide locaties te meten als geen sprake zou zijn van kortsluiting. Anderzijds dient zoals aangegeven de afstand groot genoeg te zijn om bij kortsluiting buiten het invloedgebied te blijven. Ook dient de afstand groot genoeg te zijn om bij een klein verhang niet binnen de meetnauwkeurigheid te blijven. Niet alleen mogelijke lekkage langs de boorpalen maar vooral ook langs de ankers is een risico gebleken. De uitgevoerde monitoringopzet met peilbuizen is hier niet volledig op ingericht omdat geen peilbuizen waren voorzien met de filters in de TZ ter plaatse van de ankers maar op 15 m uit de boorpalenwand richting rivier. (Zie hierboven). Voor de raaien 1 en 2 (locatie F1-1) blijkt de locatie van de peilbuisfilters op 15 m uit de boorpalenwand gelukkigerwijze samen te vallen met de locatie van het anker in de TZ. Voor de raaien 5 en 6 (locatie H2) valt dit bijna samen en voor de raaien 3 en 4 (locatie F2-2) is dit halverwege de boorpalenwand en het anker.
- Er is zo dicht mogelijk langs de palenwand (aan de polderzijde van de paal) een peilbuis geplaatst in het slappe lagenpakket. Doel is (onderzoeksvraag) om vast te kunnen stellen of nu of in de toekomst kortsluiting, lekkage als gevolg van een eventuele kier langs de

---

<sup>5</sup> Met uitgevoerde grondwaterstromingsberekeningen (zie paragraaf 5.4.1 onder punt 3) is ingeschat wat het invloedgebied van een lekkage is. Op 20 m afstand van de lekkage is de respons van de stijghoogte in de TZ slechts 20% t.o.v. de respons exact bij de lekkage.

paal, in het holocene slappe lagenpakket zal optreden. Deze peilbuis (de filteromhulling) maakt contact met de boorpaal.

Tevens is een peilbuis geplaatst met het filter halverwege het pakket slappe lagen. Dit is op de locatie circa 2 m uit de wand aan polderzijde op de dezelfde hoogte als eerstgenoemde peilbuis.

Deze metingen zijn vergeleken met de metingen van de peilbuis die halverwege het pakket slappe lagen ter plaatse van de boorpaal staat. Als er geen spleet langs de paal aanwezig is mag eenzelfde reactie in beide peilbuizen worden verwacht. Als er wel een spleet en lekkage is zullen de reacties mogelijk verschillend zijn.

- Er is zo dicht mogelijk langs de palenwand (aan de rivierzijde van de wand) een peilbuis geplaatst in de drainagezandlaag onder de deksloof bij een anker (indien de drainagezandlaag aanwezig c.q. aangetroffen is). Doel is (onderzoeksvraag) om vast te kunnen stellen of kwel/lekkage, als gevolg van een eventuele kortsluiting langs de boorpaal of het anker plaatsvindt.
- Bij boorpalenwanden laag in het talud is een zandcunet met een drain aangebracht aan de dijkzijde langs de boorpalen tot het niveau van de aansluiting met de ankers in de betonnen deksloof. De gedachte was dat deze, indien nodig kon worden aangesloten op een afwateringsvoorziening. Maar dat is meestal nog niet nodig geacht. Voor sectie of dijkvak F1-1 (zie Paragraaf 4.1.4) is ook een drainageconstructie aangelegd, deze is vanwege geconstateerde vernatting wel aangesloten op een afwateringsvoorziening.

### **Watermonsters**

Door het bepalen van de (chemische) watersamenstelling van grondwatermonsters uit de diverse peilbuizen, is de herkomst van dit water vastgesteld o.a. door dit te vergelijken met de watersamenstelling uit de rivier en de bakwetering. Voor het nemen van de grondwatermonsters is het protocol 2002 gehanteerd van SIKB (SIKB 2018), inclusief het wijzigingsblad (SIKB 2019).

### **Drainageconstructie sectie F1-1**

Specifiek voor sectie F1-1 is een drainagevoorziening aangelegd ten behoeve van de wateroverlast. Deze voorziening is nader geïnspecteerd op werking. Tevens zijn watermonsters genomen ter bepaling van de chemische samenstelling. Tezamen met de resultaten van de analyses van de overige monitoringdata ter plaatse van sectie F1-1 zal dit informatie geven waarmee de kans op lekkage langs de ankers of langs de boorpalen kan worden gededd.

### **Hellingmeetbuizen**

Er zijn per meetraai 3 hellingmeetbuizen geplaatst teneinde het verschil van de horizontale gronddeformaties tussen de boorpalen en de deformatie van de palen zelf te bepalen. Dit om in de toekomst mogelijk snijden van de ondergrond tussen de palen en daarmee het ontstaan van een kier aan de polderzijde van de paal vast te kunnen stellen. Hiervoor is één hellingmeetbuis ter plaatse van de paal aan de rivierzijde, één aan de polderzijde en één precies tussen twee palen aan de polderzijde geplaatst. Met de eerste is beoogd de paalverplaatsingen te meten. Het verschil tussen de tweede en derde geeft de grondverplaatsingen ter plaatse van en tussen de palen. Een eventueel verschil zal bepalen in hoeverre er sprake is van een kier tussen paal en grond en daarmee een mogelijke toekomstige lekkage.

Opgemerkt wordt dat het onzeker bleek of alleen een hellingmeetbuis aan de rivierzijde van de boorpaal de vervorming van de paal en eventuele kiervormig bepaald. Mede naar aanleiding van overleg met de reviewcommissie d.d. 02-11-2022 is besloten ook de hellingmeetbuis aan de polderzijde ter plaatse van de paal te plaatsten.

Mogelijk dat de boorpalenwand vervormd tijdens hoogwater, zowel richting polder als daarna weer richting rivier. Daarom is voorgesteld om zowel voor, tijdens als na hoogwater te meten. Om op termijn een uitspraak te kunnen doen over het ontstaan van een mogelijke kier langs de palen dient de meetduur meerdere jaren te bedragen waarbij wordt uitgegaan van 10 jaar. De verwachting is namelijk dat een korte meetperiode van bijvoorbeeld een half jaar onvoldoende is om hierover een uitspraak te kunnen doen.

#### **Visuele inspectie**

Voor het plaatsen van met name de monitoring in de nabijheid van de boorpalenwand is de deksloof ontgraven over een lengte van circa 6 m waarbij o.a. de ankerkoppen zichtbaar waren. Er is tijdens de ontgravingswerkzaamheden een visuele inspectie uitgevoerd. Tijdens deze werkzaamheden is specifiek gelet op de staat van de ankerkoppen (eventuele corrosie, scheuren, etc.) en zijn per ankerkop de nodige foto's genomen. Ook zijn eventuele natte plekken of lekkages (langs de palen, ankers) vastgelegd en is eenmalig de ligging van de grondwaterstand bepaald, zie (Deltares, Februari 2024).

#### **4.1.3 Inventarisatie meldingen van overlast**

In het fase 1 en 2 onderzoek (Deltares, Juli 2021 en Deltares, Januari 2022-1) is al een inventarisatie uitgevoerd van de meldingen van wateroverlast. Deze inventarisatie is uitgebreid met toegepast dijkversterkingsalternatief. Er wordt in de meldingen ook een onderverdeling aangebracht naar correlatie met neerslag en hoogwater. Doel is te onderzoeken of er een verband is tussen melding van wateroverlast en neerslag of hoogwater. Ook speelt de vraag of er een verband is vast te stellen tussen melding van wateroverlast en het dijkversterkingsalternatief. Deze bureaustudie is grotendeels door WSRL uitgevoerd omdat zij het beste zicht hebben op de relevante en actuele schadegevallen.

Voor de resultaten van dit onderzoek wordt verwezen naar (WSRL, April 2024). Op basis van de oorzaken die een relatie hebben met de boorpalenwand zijn criteria opgesteld teneinde de locaties te bepalen waar nader onderzoek het meest relevant. Deze criteria zijn:

- Locaties waar de deksloof van de boorpalenwand laag ligt in het talud.
- Locaties met actuele vernattingschade in één of meerdere nabijgelegen woningen binnen deze sectie.
- Locaties waar vanuit de omgeving is aangegeven dat er tijdens de aanleg van de palenwand sprake is van vernatting.
- Locaties met waargenomen lekkage tijdens installatie van de verankering bij het naastliggende anker.

Vervolgens zijn van deze locaties de schadegevallen gerelateerd aan vernatting en bijzonderheden uit de omgeving tijdens de uitvoering nader geanalyseerd en vervolgens zijn de beschikbare uitvoeringsgegevens geanalyseerd.

In de macroanalyse van WSRL (WSRL, April 2024) is een tabel opgenomen met de resultaten van deze analyse. Deze tabel is, inclusief overzichtskaarten met het type schade en het type dijkversterking, in het digitaal dossier opgenomen. In Bijlage L is een overzicht gegeven van het digitaal dossier behorende bij dit rapport. Uit deze analyse volgt dat er een aantal locaties zijn waar een mogelijk verband kan worden gelegd tussen wateroverlast en de boorpalenwand. Deze locaties zijn:

- Sectie F1-1.
- Sectie F2-2.
- Sectie H2.
- Sectie L.
- Sectie N.
- Sectie P-Q1.



- Sectie R2.
- Sectie X-Y.
- Sectie AB.
- Sectie AF.
- Sectie AH.

Dit is meegenomen in de afweging van de keuze van de locaties van nader onderzoek ter plaatse van de boorpalenwanden. In Paragraaf 4.1.4 wordt nader op deze locaties ingegaan.

#### 4.1.4 Locatiekeuze

Er zijn totaal 13 secties waar palenwanden zijn toegepast laag in het talud. Op een aantal van deze locaties is eveneens wateroverlast geconstateerd. In Paragraaf 4.1.3 zijn de resultaten weergegeven van de meldingen van wateroverlast. Op basis hiervan is ingeschat of een verband kan worden gelegd tussen deze lekkages (die verschillende oorzaken kan hebben en lekkage langs de boorpalen en/of ankers.

Op basis hiervan zijn de onderzoekslocaties vastgesteld. De initiële scope omvatte 3 monitoringslocaties die nodig waren voor het opstellen van een definitief oordeel waterveiligheid. In de loop van het onderzoek zijn op 6 aanvullende locaties visuele inspecties na ontgraving uitgevoerd. De onderbouwing van al deze locaties is hierna verder uitgewerkt.

##### Locatiekeuze 3 monitoringslocaties

Als uitwerking van eerdere fases van het onderzoek is op 3 locaties monitoring geïnstalleerd om de oorzaken van vernatting en hydraulische kortsluiting beter te begrijpen. Het uitvoeren van monitoring op alle secties met boorpalen is niet acceptabel, gezien het aantal secties en omvang van het aantal boorpalen.

De geselecteerde locaties zijn gekozen op plekken waar lekkage langs de boorpalen de grootste invloed heeft op de waterveiligheid. Ze dragen daarmee bij aan de beantwoording van de hoofdvraag van dit onderzoek: voldoen de met boorpalenwanden versterkte secties aan de vereiste waterveiligheid?

De locaties van het monitoringsonderzoek zijn bepaald op basis van de criteria:

1. Aanwezigheid van een TZ.
2. Locatie van de boorpalenwand laag in het talud.
3. Bereikbaarheid van de locatie. Het criterium schade door vernatting is daarbij niet expliciet meegenomen omdat in de initiële vraagstelling de focus lag op waterveiligheid.

Ad 1:

Uit het onderzoek van fase 1 en 2 volgt dat, in het geval er een TZ aanwezig is, eventuele kiervorming/lek langs de boorpalen de grootste impact heeft op waterveiligheid. Een TZ is vooral aanwezig van circa AW 167 tot AW 171. Van de 3 benoemde locaties (sectie F1-1, F2-2 en H2) is van de locatie F2-2 bekend dat er geen vernattingsproblematiek speelt. Door de aanwezigheid van de TZ bij sectie F2-2 is dit desalniettemin een ideale referentielocatie voor het onderzoek.

Ad 2:

Meest relevante secties in dit verband zijn secties waar de palenwand relatief laag (in het talud) is geplaatst. Bij lekkage of kwel kunnen de gevolgen hier groter zijn. Er treedt immers alleen kwel op als de stijghoogte in de TZ of de PL hoger is dan het freatisch vlak ter plaatse van de constructie. Tevens zal bij een grotere verschil in stijghoogte de kwel of lekkage groter zijn. De boorpalenwanden hebben in het algemeen een hoogte van NAP + 0,5 tot + 3,0 m (bovenkant deksloof boorpalenwand).



Ad 3:

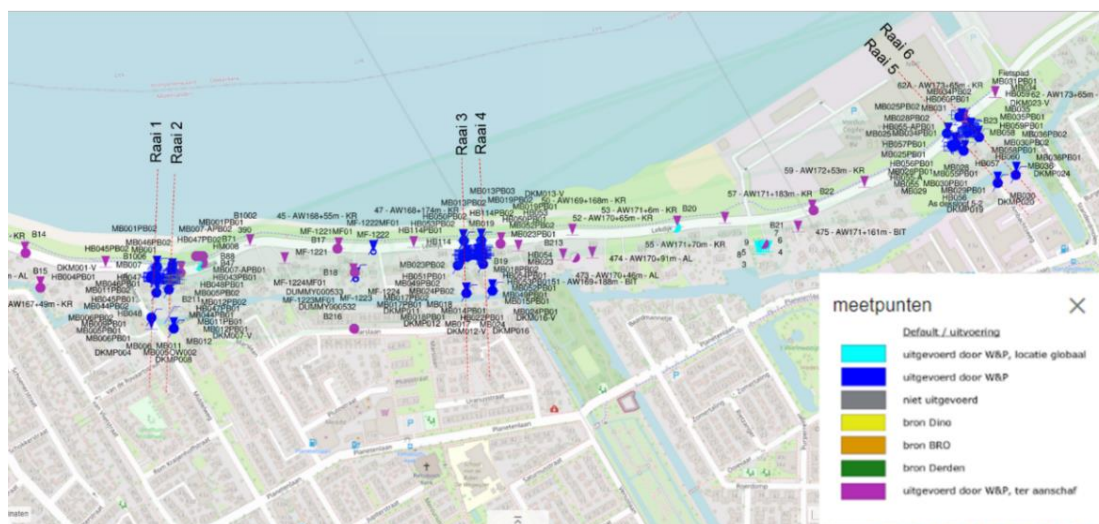
Ten behoeve van de uitvoering is ook de toegankelijkheid van de locatie beoordeeld. Op korte onderlinge afstand dient namelijk relatief veel grondonderzoek en monitoring plaats te vinden.

De locaties zijn weergegeven in Tabel 1. In Figuur 6 is een overzicht van het projectgebied en de 3 monitoringslocaties weergegeven.

Tabel 1: Locatiekeuze 3 monitoringslocaties.

Sectie	Dijkpaal:	tussenzand laag aanwezig	toegankelijkheid	hoogte bovenkant deksloof [m+NAP]	opmerkingen	Voorstel monitoring
F1-1	167+100 tot 167+170	ja	voldoende	1,06/0,08	Wateroverlast lekkage tijdsuitvoering geconstateerd. 1); Kapot anker is meegetrokken bij graven diepwand; continue wel in bakwetering.	ja
F2-2	169+100 tot 196+160	ja	voldoende	0,50/-0,90	deksloof (oostelijk deel zeer laag)	ja
H2	172+170 tot 173+020	nee	goed	1,00	uittredend water bij installatie ankers	ja

1) Dit is ook de locatie die prominent in het rapport van Van Baars (Baars, S.v. april 2021) wordt genoemd.



Figuur 6: Projectgebied met 3 monitoringslocaties (met raainummers 1 t/m 6) en locaties onderzoekspunten (in blauw) uitgevoerd door Wiertsema&Partners (bron kaart Geoloket.nl).

### Dwarsprofielen (raaien) binnen de secties

Er is voor gekozen om binnen een sectie niet 1 maar 2 dwarsprofielen of raaien te voorzien van meetinstrumenten. Door het uitvoeren van metingen bij slechts één paal per sectie zijn eventueel afwijkende resultaten minder gemakkelijk te verklaren. Tevens dient de monitoring gedurende lange tijd operationeel te blijven waardoor betreffende het aantal meetpunten rekening moet worden gehouden met enige uitval op termijn.

Hellingmeetbuizen kunnen moeilijk worden vervangen omdat een nulmeting dan ontbreekt. Peilbuizen kunnen weliswaar worden vervangen maar het is gezien de impact op de omgeving wenselijk om zo min mogelijk met voertuigen en apparatuur het erf te betreden. Het bleek van belang om, vooral binnen de gekozen locaties, de raaien zodanig te kiezen dat deze representatief zijn voor een aantal palen binnen de gehele palenwand. Daarbij is gekeken naar:

- Over-betonnering bij de boorpalen, zie Bijlage G.

- Ankers die al dan niet tijdens de uitvoering (vermeende) lekkage vertoonden, zie Bijlage H.
- Het kapot trekken van het anker A26 van de palenwand in de sectie F1.1, zie CDVM 04-08-2016.
- In het verleden zijn ter plaatse van vak F1-1 peilbuismetingen verricht door ADCIM. Voor deze resultaten wordt verwezen naar Paragraaf 4.3.3 en Bijlage B.

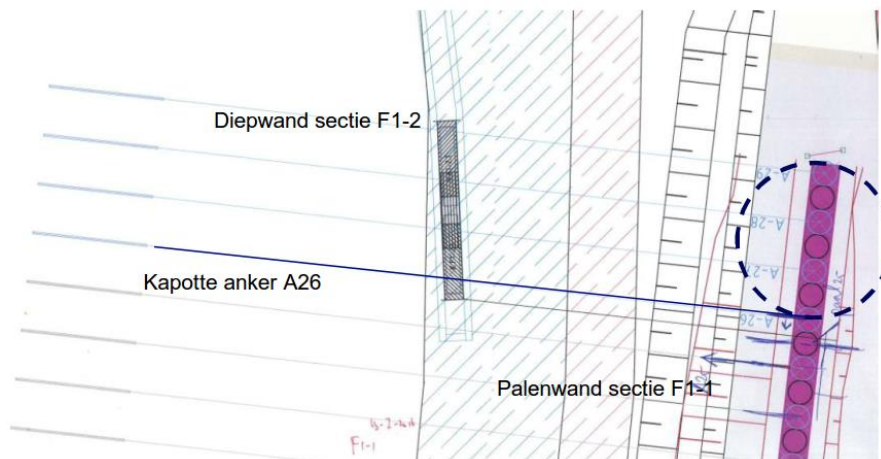
Op basis van bovengenoemde is de monitoring binnen de 3 secties in de volgende dwarsprofielen geïnstalleerd:

- Sectie F1-1:

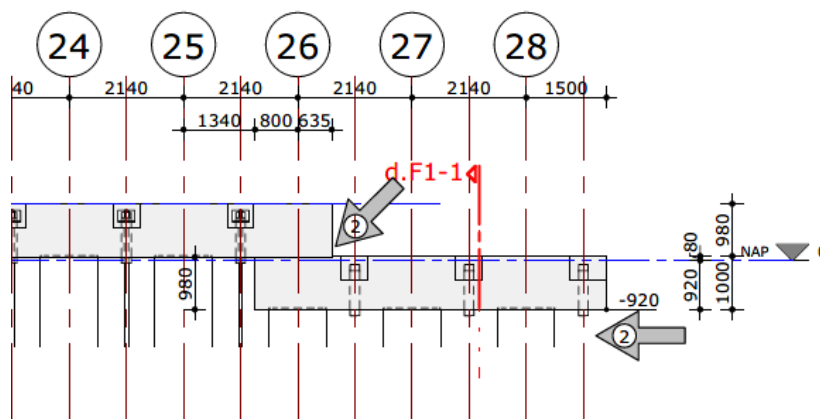
Raai 1 is ter plaatse van AW 167+116 m (circa anker nr. A16 en paal nr. 16) omdat hier ter plaatse van de palenwand lekkages zouden zijn opgetreden (zie ADCIM 2019).

Raai 2 is ter plaatse van AW 167+135 m (circa anker nr. A25 en paal nr. 25) omdat hier een anker kapot is gegaan. Dit anker is opgegraven tijdens het maken van de diepwand (barettenwand).

Het kapotte anker is geraakt op een diepte van circa NAP – 20 m. Dit betreft het laatste anker met het nummer A26 van de palenwand. Een detailtekening van de situatie bij het kapotte anker is weergegeven in Figuur 7. Tevens is hier vernatting opgetreden. Specifiek gaat het om het gebied rondom de 3 meest oostelijke boorpalen waar de deksloof een lager niveau heeft (NAP + 0,08 m).



Figuur 7: Situatie bij het kapotte anker A26 van de palenwand bij sectie F1-1 (CDVM, 04-08-2016).



Figuur 8: Lengte doorsnede oostelijk deel boorpalenwand sectie F1-1 (bron: [1] P16131475-OWN-NL-CO-UO-DT-00780.pdf).

Ondanks dit kapotte anker wordt in het Deltares rapport van fase 1 (Deltares, Juli 2021) geconcludeerd dat het niet waarschijnlijk is dat het kapottrekken van het anker A26 door de diepwandgrijper invloed heeft gehad op de afdichting van de groutprop aan de onderzijde van het slappe lagenpakket.

Uit de betonneringsgrafieken blijkt dat het oververbruik van de palen in de directe omgeving van de gekozen raaien in sectie F1-1 (palen nr. 16 en 25) het hoogste is en het meeste afwijkt van de overige palen (vergelijk Figuur 99 in Bijlage G.1 met de eerste figuur in Bijlage A.3).

- Sectie F2-2:

Raai 3 ter plaatse van AW 169+122 m (circa anker nr. A6 en paal nr. 6).

Raai 4 ter plaatse van AW 169+141 m (circa anker nr. A17 en paal nr. 17).

Uit de betonneringsgrafieken blijkt dat het oververbruik van de palen 1 t/m 13 vrijwel stabiel is. De gekozen raai 3 kan daarmee worden gezien als representatief voor die palen. De palen 23 en 24 hebben het hoogste betonverbruik en de palen 15 t/m 19 het minste (met 5 tot 8%). Laatstgenoemde palen laten wellicht een gering onderverbruik zien van NAP – 9 m tot NAP – 21 m waardoor ervoor is gekozen om bij deze palen te monitoren.

- Sectie H2:

Raai 5 ter plaatse van AW 172+192 m (circa anker nr. A5 en paal nr. 5).

Raai 6 ter plaatse van AW 173+010 m (circa anker nr. A18 en paal nr. 18).

Uit de registratiegegevens van de ankers in sectie H2 volgt dat uit de ankers 2 t/m 10 water stroomde na de installatie (zie Bijlage H). Uit de betonneringsgrafieken blijkt dat het betonverbruik vrij stabiel is, afgezien van de palen 5, 9 en 13. Deze wijken enigszins af.

Omdat paal 9 dicht tegen de oprit aan ligt en uitvoering daardoor lastig is, is ervoor gekozen niet deze maar ter plaatse van paal 5 te monitoren.

Palen 16 t/m 18 laten mogelijk iets onderverbruik zien vanaf NAP – 7 m. Gezien deze afwijking t.o.v. de overige palen is de monitoring hier geïnstalleerd (palen 16 en 18).

### Locatiekeuze aanvullend onderzoek

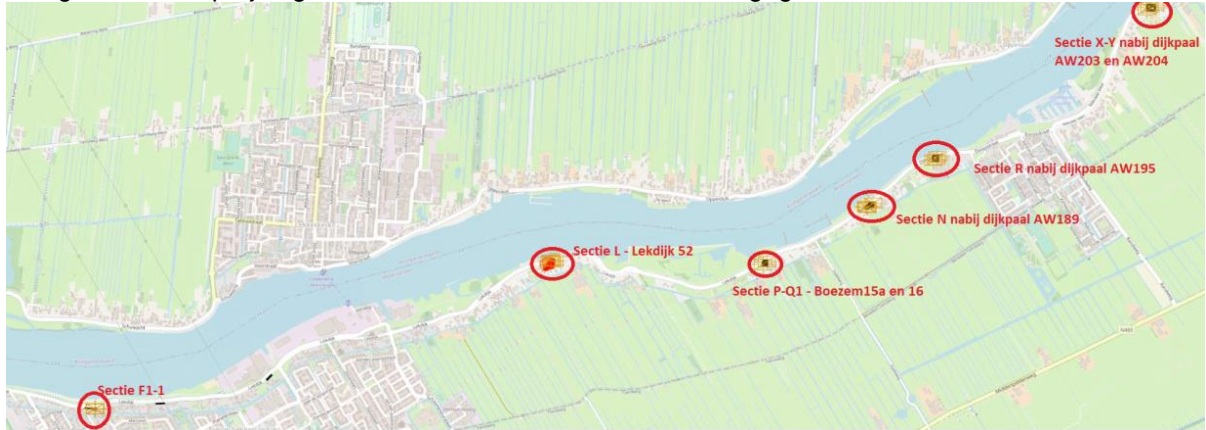
Naar aanleiding van de meldingen van wateroverlast en de conclusies van een expertsessie over de kwaliteit van de boorpalenwand is een extra veldonderzoek ingelast. In dit onderzoek is op zes locaties de boorpalenwand ontgraven tot ongeveer 20 centimeter onder de onderkant van de deksloof om vast te kunnen stellen of de wiggen van de strengankers vastzitten en of er tekenen zijn van vernatting of lekkages langs de boorpalen of ankers. De onderbouwing van de keuze van deze locaties is weergegeven in de macroanalyse van WSRL (WSRL, April 2024) en is in een eerste stap gebaseerd op de inventarisatie van meldingen uit de omgeving van vernatting tijdens de aanleg van de boorpalenwand en vernattingsschade aan woningen. Het onderzoek concentreert zich daarbij op de secties met een boorpalenwand laag in het talud, rond de NAP + 1,0 m. Dat is bij 13 van de 16 boorpalenwanden het geval. Iets minder dan de helft (6x) van deze secties kent een schademelding gerelateerd aan vernatting. In de volgende stap is een selectie gemaakt naar uittredend water bij de installatie van de verankering. Hieruit is een evenredige steekproef genomen: de helft van deze secties met uittredend water bij installatie van de verankering zijn opgenomen in de scope van het aanvullend onderzoek. In de laatste stap zijn waarnemingen tijdens installatie van de boorpalen meegenomen, in het geval dat daarbij vernatting werd geconstateerd is de betreffende locatie toegevoegd aan de scope van aanvullend onderzoek.

Op basis van bovenstaande criteria zijn de volgende locaties geselecteerd waar dit aanvullend onderzoek is uitgevoerd:

1. Sectie F1-1 (Lekdijk 385-386, Nieuw-Lekkerland).
2. Sectie L (Lekdijk 52, Nieuw-Lekkerland).
3. Sectie N (Lekdijk 17-19, Nieuw-Lekkerland).
4. Sectie P-Q1 (Boezem 14-15, Streefkerk).

5. Sectie R (Boezem 3, Streefkerk).
6. Sectie X-Y (Nieuw Veer 50, Streefkerk).

In Figuur 9 is het projectgebied met de onderzoeklocaties weergegeven.



Figuur 9: Projectgebied met 6 aanvullende onderzoekslocaties t.b.v. uitvoeren visuele inspecties boorpalenwand (bron: Wiertsema Augustus 2023).

Bij de keuze voor deze locaties horen een aantal opmerkingen:

- Voor locatie F1-1 is in de eerste fase onderzoek verricht bij het kapotte anker (zie toelichting eerder in deze paragraaf). Tijdens de aanleg van de boorpalenwand bleek dat op basis van fotomateriaal het oostelijk deel van deze boorpalenwand vernatting vertoonde. Specifiek gaat het om het gebied rondom de 3 meest oostelijke boorpalen waar de gording een lager niveau heeft (bovenkant op NAP + 0,08 m). In de tweede fase is vooral bij deze 3 boorpalen ontgraven en een visuele inspectie uitgevoerd.
- In de ruimtelijke analyse is geen correlatie gevonden tussen waargenomen lekkage bij ankers in de uitvoering en vernattingsschade bij huizen. Bij alle gevallen van vernattingsschade bij huizen in de omgeving van een boorpalenwand bleek dat er geen sprake was van waargenomen lekkage bij ankers.

De locaties waar in het kader van schadeafhandeling vervolgonderzoeken plaatsvinden zijn niet geselecteerd.

Voor een nader toelichting en de nodige details over deze onderzoekslocaties wordt verwezen naar Bijlage 1 van (Wiertsema, Januari 2024).

## 4.2 Uitvoering veldwerkzaamheden

### 4.2.1 3 Monitoringslocaties

#### Logboek en aanvullingen

Voor het installeren van de monitoring en het uitvoeren van een visuele inspectie op de 3 locaties in de nabijheid van de boorpalenwand is de deksloof over een lengte van circa 6 m ontgraven. Tijdens de uitvoering zijn diverse zaken in het veld geconstateerd die van belang kunnen zijn voor het onderzoek. Een groot deel van deze constatering is door Wiertsema & Partners vastgelegd in een logboek. Hierbij zijn tevens de nodige foto's gemaakt en diverse parameters, zoals scheefstand van sonderingen en boringen, vastgelegd. Voor dit logboek wordt verwezen naar (Wiertsema, November 2023-1) en het digitaal dossier. In Bijlage L is een overzicht gegeven van het digitaal dossier behorende bij dit rapport.

In aanvulling op dit logboek zijn ook Door WSRL en Deltares bijzonderheden geconstateerd en opmerkingen gemaakt tijdens de uitvoering. Dit is in Bijlage I weergegeven.



Een samenvatting van de belangrijkste constatering voor het vernattingsonderzoek zijn hieronder weergegeven:

- De intentie was om de peilbuizen en hellingmeetbuizen in de buurt van de boorpalenwand zo dicht mogelijk tegen de wand te plaatsen (zie Paragraaf 7.1.2). De boorpalen kunnen, zoals verwacht echter uitstulpingen hebben en de werkvloer van de deksloof is soms aanmerkelijk breder dan de deksloof zelf. Hierdoor is plaatsing exact langs de palen niet mogelijk gebleken. Eén hellingmeetbuis is hierdoor niet geplaatst omdat deze anders te ver ( $> 0,5$  m) van de wand zou komen. Ook zijn hierdoor diverse peilbuizen, vooral de peilbuizen in de TZ en de PL, op wat grotere afstand geplaatst dan gepland. Dit bleef echter wel binnen een afstand van 2 m vanaf de boorpalenwand. Voor de peilbuizen is gesteld dat een afstand tot de wand kleiner dan 2 m acceptabel is en hiermee is indien nodig rekening gehouden bij het geohydrologisch onderzoek. Ter plaatse van enkele sonderingen en boringen is vastgesteld dat deze niet dieper konden worden uitgevoerd omdat deze op een afstand van 0,4 tot 0,8 m uit de rand van de paal op betonuitstulpingen stuitten.
- De scheefstand en de richting van de scheefstand van de relevante boringen en waar peilbuizen zijn geïnstalleerd is bepaald teneinde de afstand van de peilbuisfilters tot de boorpalen te bepalen. Indien nodig is hiermee rekening gehouden bij de analyse. Hetzelfde geldt voor de hellingmeetbuizen.
- Puin tijdens ontgraving: tijdens de ontgravingswerkzaamheden is op diverse locaties puin in de ondergrond aangetroffen. Dit is afgevoerd en vervangen door geschikte klei.
- Drainagevoorziening: In raai 1, 2, 3 en 5 is de drainagevoorziening langs de deksloof niet aangetroffen.
- In de zandlaag onder de werkvloer van de deksloof is vaak sprake van 'overspannen' water omdat deze zandlaag volledig is ingekast door klei. Deze hogere waterspanning ontstaat door een hoger freatisch vlak aan rivierzijde van de deksloof.
- De stijghoogte in de PL en in de TZ is zodanig dat deze aanmerkelijk hoger is dan het binnendijkse maaiveld. Deze peilbuizen zijn daarom voorzien van afsluitende doppen.

### **Uitstromend water anker A-08 raai 3**

Ter plaatse van anker A-08 in raai 3 is uitstromend water geconstateerd waarvan het debiet is gemeten en watermonsters zijn genomen voor het uitvoeren van chemische analyse in het laboratorium. Doel van dit onderzoek is om de herkomst van het grondwater vast te stellen, namelijk uit het diepe zand, water uit de dijk kern of neerslag.

Vervolgens is hiermee vastgesteld of een lekkage langs het anker vanuit de TZ of de PL naar maaiveld aannemelijk is.

In (Deltares, Mei 2023) wordt verslag gedaan van de feitelijke waarnemingen en constatering. Samengevat volgt hieruit dat:

- D.d. 21-03-2023 en 22-03-2023 is uitstromend water uit de ankerkop van anker A08 bij raai 3 (sectie F2-2) geconstateerd. In het vulgat in de ankerkop (ankermuts) ten behoeve van het grouten, was geen grout zichtbaar.
- De bovenkant van de deksloof ligt op NAP – 0,9 m en er stond bij de inspectie water op 15 centimeter onder bovenkant deksloof. Dit was alleen het geval in de directe omgeving bij het lekkende anker. Debietmetingen op beide dagen geven aan dat circa 12 tot 15 l/uur uitstroomt.
- Er zijn 2 watermonsters genomen voor het uitvoeren van chemische analyse in het laboratorium. Voor de resultaten hiervan wordt verwezen naar Paragraaf 4.4.
- Ter plaatse van anker A-08 is aan de rivierzijde van de deksloof een peilbuis geplaatst. Uit deze peilbuis is op later tijdstip ook een watermonster genomen en geanalyseerd.

Opgemerkt wordt dat na het opnieuw grouten van het anker (in maart 2023) de lekkage van uitstromend water langs het anker is gestopt.

#### 4.2.2 Visuele inspectie aanvullende onderzoekslocaties

Voor het aanvullende onderzoek is in augustus en september 2023 op de 6 locaties de deksloof ten behoeve van de visuele inspectie over een lengte van circa 20 m ontgraven. Opgemerkt wordt dat locatie F1-1 over een geringere lengte is ontgraven omdat alleen de 3 meest oostelijke boorpalen zijn ontgraven. Ook zijn een aantal van de ankerkoppen geopend voor inspectie. Het doel hiervan is om vast te stellen of de strengankers vastzitten en om eventuele lekkages bij de boorpalenwand te kunnen constateren. Voor het feitelijk verslag van dit veldwerk wordt verwezen naar (Deltares, Februari 2024).

Voor wat betreft dit oorzakenonderzoek naar vernatting (onderdeel A) is laatstgenoemde doelstelling van belang. De resultaten hiervan zijn:

- In totaal zijn 54 ankers bloot komen te liggen. Ter info: in totaal zijn circa 1300 ankers geïnstalleerd voor de 13 secties binnen dijkversterking KIS waarbij de boorpalen wand laag in het talud is geïnstalleerd.
- Bij geen van de locaties in het aanvullend onderzoek van augustus/september 2023 is lekkage of een indicatie van mogelijke lekkage gevonden.<sup>6</sup>
- Op basis van de uitgevoerde handboringen is een inschatting gemaakt van de grondwaterstanden ter plaatse van de deksloof. Hieruit blijkt dat een grondwaterstand aan polderzijde van de deksloof wordt gevonden die sterk varieert, namelijk tussen de NAP – 0,15 tot – 1,41 m. Ter plaatse van locatie L2 is dit significant hoger namelijk tot NAP + 0,23 m.

### 4.3 Peilbuismetingen

Voor dit onderzoek zijn door Wiertsema & Partners op de 3 monitoringslocaties in totaal 74 peilbuizen geïnstalleerd en gemonitord. De resultaten zijn in Paragraaf 4.3.1 weergegeven. Voor de analyse en interpretatie van deze metingen is een tijdreeksanalyse uitgevoerd door Artesia Water waarvan de resultaten in Paragraaf 4.3.2 zijn gegeven. Bij de boorpalenwand F1-1 zijn in eerder stadium al peilbuismetingen uitgevoerd in 2018-2019 (ADCIM, 2019). Deze metingen zijn vergeleken met de recente metingen (2023). De resultaten hiervan zijn in Paragraaf 4.3.3 weergegeven. In Paragraaf 4.6 zijn de conclusies naar aanleiding van bovengenoemde resultaten gegeven.

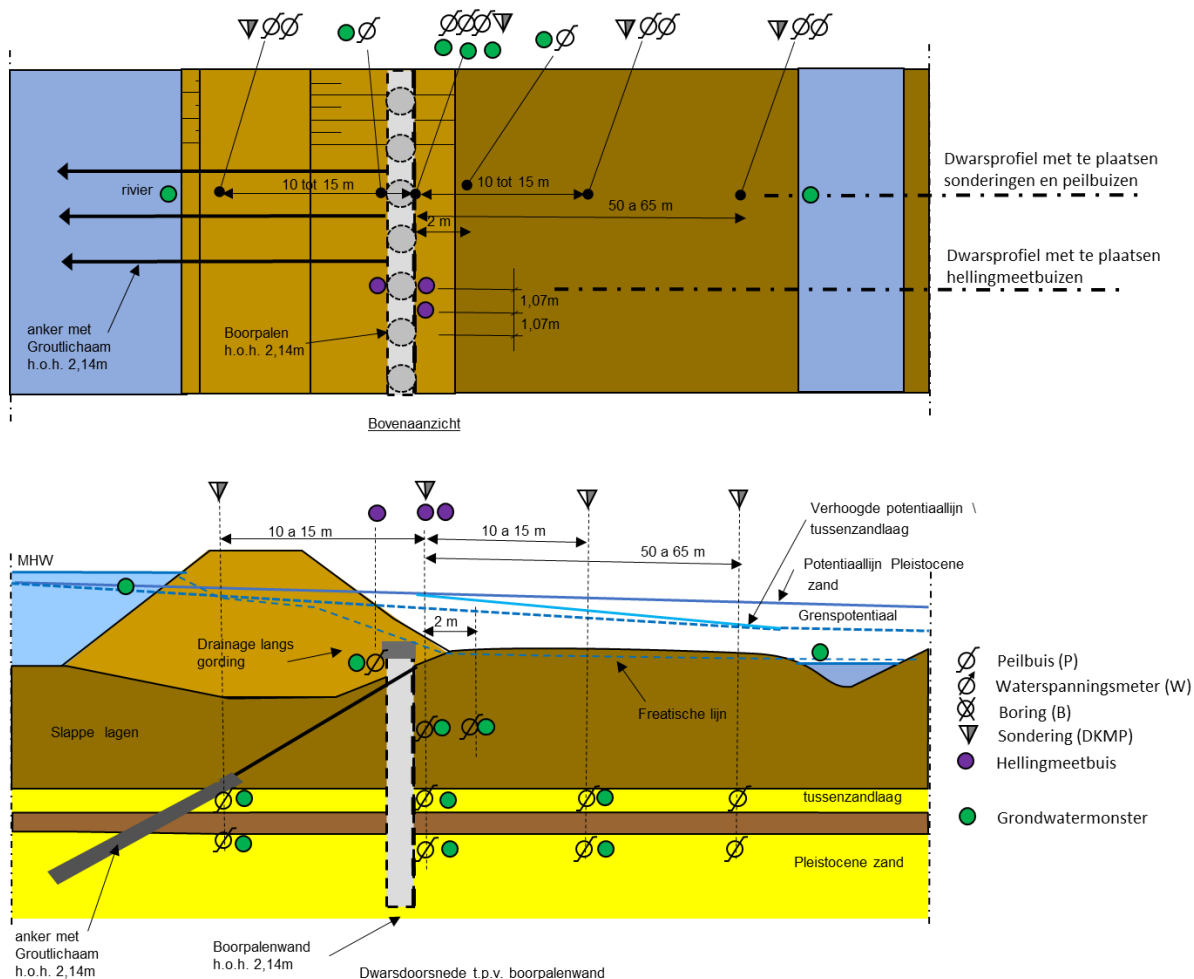
#### 4.3.1 Peilbuismetingen monitoringslocaties F1-1, F2-2 en H2

##### Algemeen

Het principe van de inrichting van de peilbuismonitoring wordt gepresenteerd in Figuur 10. De exacte locaties van de peilbuizen (inclusief filterdiepten) in de raaien is in detail weergegeven in Bijlage A.3. Voor nadere informatie over het onderzoek uitgevoerd door Wiertsema & Partners wordt verwezen naar (Wiertsema, November 2023-1).

---

<sup>6</sup> In Paragraaf 4.2.1 is aangegeven dat wel op een van de 3 monitoringslocaties (F2-2) ter plaatse van anker A-08 in raai 3 uitstromend water is geconstateerd.



Figuur 10: Principe bovenaanzicht en dwarsprofiel met locaties en filterdiepten van de peilbuizen, sonderingen en locaties grondwatermonsters.

### Meetresultaten

De peilbuizen zijn voorzien van dataloggers (zogenaamde Divers) waarmee elke 10 minuten de waterdruk en temperatuur is gemeten. Ook zijn met deze Divers de rivierwaterstand en de waterstand in de bakwetering met dezelfde frequentie gemeten. Daarnaast is de data van peilmeetstation RWS meetpunt Krimpen aan de Lek voor een deel van de meetperiode beschouwd. De neerslagdata is betrokken van het KNMI station Rotterdam. De meeste peilbuizen zijn gemeten vanaf maart 2023. Voor het onderzoek zoals verwoord in dit rapport is in eerste instantie de data tot en met oktober 2023 gebruikt. Later is mede op advies van de reviewcommissie besloten deze periode te verlengen tot en met februari 2024 om ook verhoogde waterstanden in de Lek mee te kunnen nemen in de analyses.

Er zijn 74 peilbuizen gemonitord. Voor de resultaten van alle afzonderlijke metingen wordt verwezen naar (Wiertsema, November 2023-1). Om deze meetdata inzichtelijk te krijgen is de data verwerkt in overzichtelijke grafieken en tabellen die in Bijlage D van dit rapport zijn weergegeven.

Bij het verwerken en analyseren van de metingen wordt onderscheid gemaakt in peilbuizen die wel en niet cyclisch reageren op de rivier. Hierbij zijn de peilbuizen ingedeeld in 3 verschillende categorieën. Peilbuizen waarvan op voorhand mag worden verwacht dat ze cyclisch reageren op de rivier zijn de peilbuizen in de TZ en de PL (categorie 1 respectievelijk, 2 volgens Tabel 10 in Bijlage D).

De overige peilbuizen zijn veelal freatische peilbuizen die, op een geringe diepte (categorie 4), langs de deksloof van de boorpalenwand zijn geplaatst.



Daarnaast zijn peilbuizen op enige diepte in het holocene pakket van slappe lagen geplaatst met het filter tegen de boorpaal en, op dezelfde hoogte, op 2 m afstand van de boorpalen (categorie 3a, respectievelijk 3b).

### **Generieke bevindingen**

De bevindingen per meetraai zijn in Bijlage D.2 weergegeven.

De generieke bevindingen zijn hieronder weergegeven. Hierbij wordt vooraf opgemerkt dat onderstaande bevindingen alleen zijn gebaseerd op deze peilbuismetingen. Voor de conclusies is het noodzakelijk ook de resultaten van de eerder uitgevoerde peilbuismetingen van ADCIM en vooral de tijdreeksanalyse te beschouwen. Deze conclusies zijn in Paragraaf 4.6 weergegeven.

Resultaten peilbuizen in de TZ en de PL (categorie 1 en 2):

- De TZ is alleen aanwezig bij raai 1 t/m 4. Binnen deze raaien ontbreekt de TZ op enkele locaties, of is deze zeer dun of erg kleilig ontwikkeld.
- 3D situatie en hydraulische kortsluiting:  
In een uniforme 2D situatie mag worden verwacht dat in de TZ zowel de gemiddelde peilbuisstand als de respons op het getij afneemt richting de polder. Dit is bij de hier gepresenteerde metingen voor locatie F1-1 en F2-2 niet altijd het geval. Dit is soms te wijten aan meetonnauwkeurigheden, maar kan daarnaast diverse andere oorzaken hebben, waaronder:
  - Een hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL. Dit kan een geologische kortsluiting zijn (natuurlijke processen) of een kortsluiting als gevolg van de installatie van de boorpalenwand.
  - Het gebied is qua ondergrond niet homogeen. Dit volgt uit de voor dit onderzoek uitgevoerde boringen en sonderingen, uit het geotechnisch lengteprofiel van de ondergrond ter plaatse van de dijk en het achterland en uit de geologische kaarten van het gebied.
  - De TZ en de kleilaag tussen de TZ en de PL hebben een gemiddelde dikte van circa 1 m, maar kunnen lokaal een andere dikte en doorlatendheid hebben. Aannemelijk is dat dit vooral wordt veroorzaakt door een geologische hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL in het achterland of een in het achterland dunnere tussenkleilaag (tussen de TZ en de PL).
- Respons op het getij:  
De respons van de peilbuismetingen op het getij is de amplitude van het getij gedeeld door de amplitude van de peilbuismeting. In de PL varieert de respons van 0,53 tot 0,32 en is daarmee aanmerkelijk groter dan in de TZ, waar de respons varieert van 0,09 tot 0,05. De responsen zijn weergegeven in Tabel 11 t/m Tabel 12 van Bijlage D.1.1.
- Correlatie neerslag:  
Uit de peilbuismetingen blijkt dat soms een zwakke correlatie wordt gezien tussen de dagsom neerslag en de stijghoogte in de PL en de TZ. Verklaring hiervoor is dat veelal tijdens of net na een periode van neerslag het rivierpeil stijgt. In Bijlage D.1.2 is dit onderbouwd (zie ook Figuur 42 van Bijlage D.1.2).
- Drinkwaterwinning Oasen:  
Opmerkelijk aan de metingen is dat vanaf circa 12-06-2023 de stijghoogten in zowel de TZ als de PL in enkele dagen tijd circa 25 tot 55 cm dalen. Dit wordt veroorzaakt door een groot verschil in onttrekkingsdebiet van de drinkwaterwinning van Oasen te Nieuw-Lekkerland van vóór en ná d.d. 12-06-2023. Voor deze datum was de onttrekking 2500 tot 3500 m<sup>3</sup>/d en daarna circa 8000 m<sup>3</sup>/d. De analyse van de invloed van deze onttrekking op de stijghoogten in de PL en de TZ zijn in Bijlage D.1 gegeven. Hieruit volgt voor raai 1 en 2 een gemiddelde stijghoogteverhoging in de TZ en de PL van circa 0,9 m als het onttrekkingsdebiet van 8000 naar 0 m<sup>3</sup>/d wordt verlaagd. Voor raai 3 en 4 is dit 0,7 m en voor raai 5 en 6 is dit 0,4 m.

Opgemerkt wordt dat met behulp van de tijdreeksanalyse (zie Paragraaf 4.3.2) deze invloed ook is onderzocht waaruit nagenoeg dezelfde stijghoogteverhogingen volgen.

Resultaten freatische peilbuizen ter plaatse van de deksloof van de palenwandconstructie (categorie 4):

- Zoals eerder aangegeven zijn deze peilbuizen zowel aan de rivierzijde als aan de polderzijde van de deksloof geplaatst. De hoogte van het freatisch vlak is aan polderzijde in het algemeen lager dan aan rivierzijde. Het verschil is overigens veelal niet groot. De hoogte van het freatisch vlak varieert in de raaien 1 en 2 tussen NAP + 0 m en NAP – 1.1 m. Bij raai 3 en 4, waar de palenwand lager in het talud is geïnstalleerd, is het freatisch vlak lager namelijk NAP – 0,9 m tot -1,5 m. In raai 5 en 6 varieert de hoogte tussen NAP - 0,2 tot -1,0 m.
- De respons van deze peilbuizen op de Lek is op basis van de metingen moeilijk te kwantificeren. Er is nauwelijks of geen respons op Lek zichtbaar. Deze invloed is met behulp van de tijdreeksanalyse ook onderzocht (zie Paragraaf 4.3.2), waaruit volgt dat dit in enkele gevallen een respons op de Lek mogelijk is. De respons van deze peilbuizen op neerslag is op basis van de metingen zichtbaar maar over het algemeen moeilijk te kwantificeren.
- Uit de metingen volgt nauwelijks een respons op de drinkwaterwinning van Oasen. Ook hiervoor geldt dat op basis van de tijdreeksanalyse deze invloed minimaal is gebleken.

Resultaten peilbuizen in Holoceen ter plaatse van de boorpalen en op 2 m afstand op dezelfde hoogte (categorie 3a, respectievelijk 3b):

- Uit de metingen volgt dat in het algemeen de stijghoogte langs de boorpaal hoger is dan op 2 m afstand van de boorpaal richting de polder. Deze verschillen zijn in het algemeen klein, namelijk tot 0,3 m. Dit is niet onlogisch omdat mag worden verwacht dat de hoogte van het freatisch vlak in het talud van een kleidijk (zoals hier) richting de polder afneemt. Bij raai 3 en 4 is dit verschil echter groter namelijk 0,4 tot 0,5 m. Dit kan worden verklaard door een iets grotere barrière-werking van de deksloof (zie hypothese 1 in Paragraaf 3.3).
- De respons van deze peilbuizen op de buitenwaterstand (Lek), neerslag en de drinkwaterwinning van Oasen is op basis van de metingen niet eenvoudig te bepalen. Deze invloed is ook met behulp van de tijdreeksanalyse onderzocht (zie Paragraaf 4.3.2). Het is niet onlogisch dat deze peilbuizen weinig respons geven omdat de filters vrij diep in het holocene pakket staan. Voor de referentie van de peilbuis op 2 m afstand van de boorpaal wordt zelfs geen respons verwacht, ongeacht eventuele lekkage langs de boorpaal.

#### **Detail bevindingen en conclusies per raai:**

In Bijlage D.2 zijn per raai de conclusies naar aanleiding van de meetresultaten weergegeven. Een samenvatting van deze conclusies is tezamen met de conclusies naar aanleiding van onder andere de tijdreeksanalyse en de peilbuismetingen van ADCIM weergegeven in Paragraaf 4.6.

## 4.3.2 Tijdreeksanalyse

### Algemeen

De gemeten peilbuis-meetreeksen van grondwaterstanden zijn door Artesia geanalyseerd met behulp van de opensource tijdreeksanalyse-software Pastas. Hiervoor waren aanvankelijk de reeksen tussen maart en oktober 2023 gebruikt. In de periode november 2023 tot en met februari 2024 zijn hogere rivierstanden opgetreden (circa 0,75 m verhoging) dan de periode daarvoor. Mede naar aanleiding van een tussentijds klankbordoverleg met de Review-Commissie is een verlengde tijdreeksanalyse uitgevoerd waarbij de invloed van de hogere rivierstanden zijn beschouwd. De resultaten van deze tijdreeksanalyse zijn in het rapport (Artesia, Februari 2024) weergegeven. Deze resultaten zijn gebruikt om de volgende vragen te beantwoorden:

- Wat is de respons van de peilbuismetingen op de verklarende reeksen van de Lek, de drinkwaterwinning van Oasen en neerslag + verdamping. In hoeverre kunnen de peilbuismetingen hierdoor verklaard worden. Vraag is welke peilbuizen afwijken en in hoeverre kan hiermee een lekkage langs de boorpalenwand of de ankers aannemelijk worden gemaakt?
- Wat is het effect van de drinkwaterwinning van Oasen te Nieuw-Lekkerland op de stijghoogten in de PL, de TZ en de freatische peilbuizen? Dit is van belang voor bepaling van de stijghoogten bij WBN2023 omdat bij deze extrapolatie naar WBN rekening dient te worden gehouden met verminderde drinkwaterwinning. Dit is een veilige aanname voor de sterkteberekeningen van de boorpalenwand die in onderdeel D wordt behandeld.
- Wat zijn de verwachte stijghoogten tijdens hoogwater (WBN2023) voor vooral de peilbuizen in de PL en de TZ? Opgemerkt wordt dat voor raai 2 tevens de verwachte stijghoogten voor WBN2115 zijn bepaald.

In deze paragraaf zijn vooral de eerste en tweede onderzoeksvraag behandeld. De derde onderzoeksvraag wordt behandeld in Paragraaf 5.3.2. (Voor de onderzoeksvragen wordt verwezen naar Paragraaf 1.2.

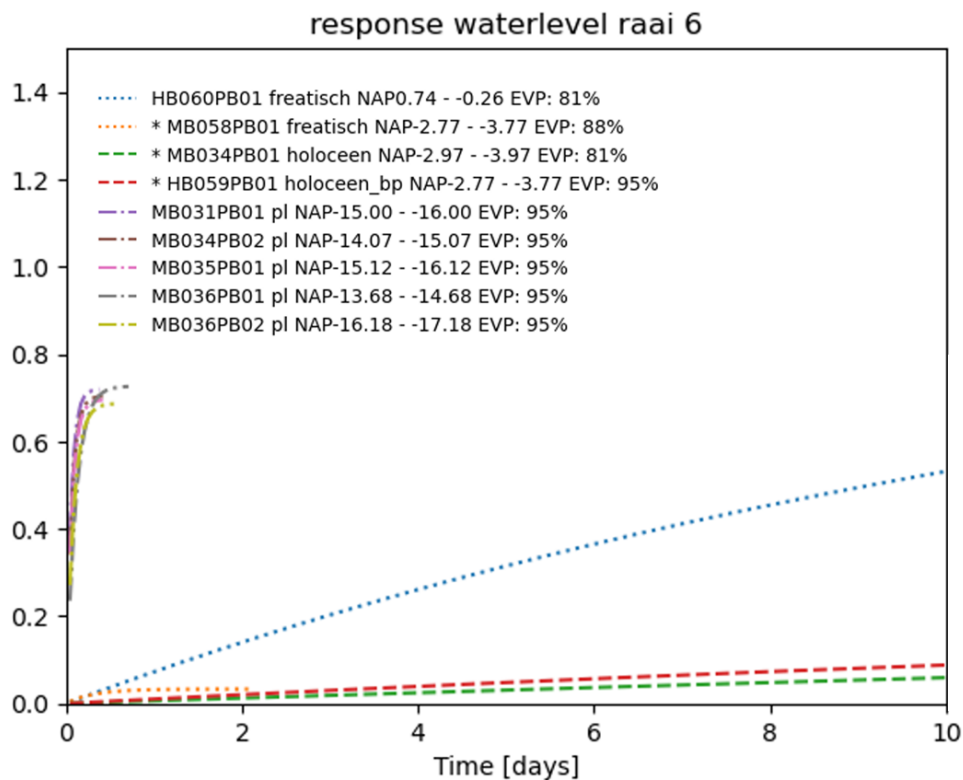
Voor alle meetreeksen zijn verschillende scenario's beschouwd waarvoor een tijdreeksmodel is gemaakt. In de tijdreeksanalyse is voor iedere verklarende variabele een exponentiele responsfunctie gebruikt. Een scenario is een configuratie van verschillende 'bronnen' die invloed hebben op de gemeten stijghoogte. De verschillende bronnen zijn de Neerslag en Verdamping (N+V), het waterpeil in de Lek (Lekpeil) en de grondwateronttrekking van Oasen (Oasen). Er mag bijvoorbeeld worden verwacht dat de freatische peilbuizen vooral worden beïnvloed door N+V en minder door Lekpeil tenzij sprake is van een lekkage. Zo mag ook worden verwacht dat de stijghoogten in de TZ en de PL vooral worden beïnvloed door Lekpeil.

Een tijdreeksmodel is een rekenmodel waarmee de stijghoogten of grondwaterstanden kunnen worden berekend waarbij de invloed van de verschillende scenario's is gemodelleerd. Uit de analyses blijkt dat het scenario waarbij de 3 bovengenoemde bronnen worden gebruikt (scenario 3) en het scenario waarbij alleen 'Lekpeil' en 'Oasen' worden gebruikt (scenario 6) de beste modellen opleveren. In beide scenario's worden zowel het peil in de Lek als de onttrekking van Oasen meegenomen. Per meetreeks is vervolgens het best scorende model gebruikt. Hierbij moet echter worden opgemerkt dat niet alle meetreeksen waarbij deze modellen zijn gebruikt door de checks komen. Het blijkt dat vooral de freatische peilbuizen (met het filter ondiep geplaatst in de buurt van de deksloof) en de peilbuizen in het holoceen (met het filter tegen de boorpaal en op dezelfde hoogte op 2 m afstand) minder goed scoren. De betrouwbaarheid kan met deze tijdreeksmodellen niet in alle gevallen worden vastgesteld vanwege de hoge autocorrelatie in de metingen en de correlatie tussen de modelparameters onderling. Bij de interpretatie van de resultaten is hiermee rekening gehouden.

Uit de rapportage van Artesia volgt dat voor 10 van de 32 (freatische) peilbuizen de betrouwbaarheid voldoende is. De resultaten van alle peilbuizen zijn echter wel gepresenteerd waarbij met het teken '\*' duidelijk is aangegeven of deze wel of niet voldoende betrouwbaar zijn. Dit is het geval als uit nadere analyse van het model volgt dat verklaarde variantie (evp) acceptabel is (evp > 0,70) en de berekende stijghoogte van het model een redelijke fit geeft van de meting.

### Resultaten m.b.t. lekkage /vernating langs de boorpaal of anker naar deksloof

De resultaten zijn in (Artesia, Februari 2024) gepresenteerd in diverse grafieken waarbij de respons van de grondwaterstand is uitgezet tegen de tijd. In Figuur 11 is als voorbeeld de respons op het Lekpeil weergegeven voor de peilbuizen in raai 6.



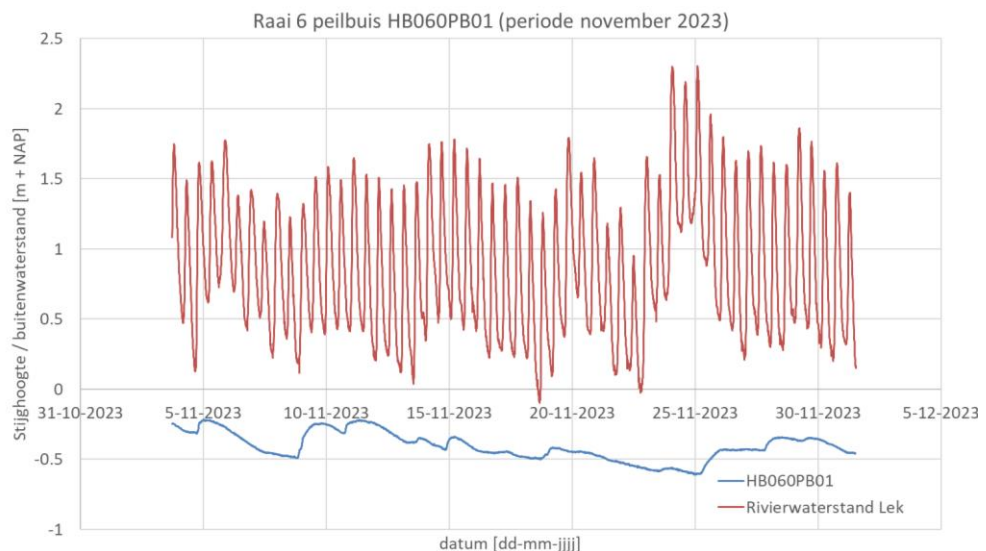
Figuur 11: Voorbeeld van respons van de grondwaterstand op het peil van de Lek voor raai 6 (model 3). De response van scenario 3 is getoond bij de peilbuizen waar geen model is geselecteerd volgens de methode beschreven in Hoofdstuk 3. Deze buizen zijn aangemerkt met een \* in de legenda. Lijnstijl verschilt per grondlaag: Stippellijn voor freatisch, gestreepte lijn voor holoceen, streep-stip-lijn voor PL.

Uit dit voorbeeld in Figuur 11 volgt voor raai 6 met betrekking tot eventuele lekkage langs de boorpaal of anker naar maaiveld het volgende:

- De 5 peilbuizen in de PL reageren snel en allen nagenoeg hetzelfde op een plotselinge verhoging van het Lekpeil met een waarde van 1 (bijvoorbeeld 1 m). De uiteindelijke respons is circa 0,7. Dit betekent dat bij 1 m verhoging (constant) van het Lekpeil de stijghoogte uiteindelijk 0,7 m wordt verhoogd.
- Uit de peilbuizen met het filter tegen de boorpaal (HB059PB01, rood) en op dezelfde hoogte op 2 m afstand (MB034PB01, groen) volgt dat er nauwelijks een respons is (0,1). Lekkage langs de boorpaal naar de deksloof is daarmee onwaarschijnlijk.

Van de 2 freatisch peilbuizen, met het filter ondiep geplaatst in de buurt van de deksloof, namelijk HB060PB01 (blauw) en MB058PB01 (oranje) volgt dat de eerste een redelijke grote maar trage respons vertoont (0,5). De andere peilbuis vertoont nauwelijks respons maar het filter staat aanmerkelijk dieper. Lekkage langs het anker naar het maaiveld zou op basis van peilbuis HB060PB01 niet zijn uit te sluiten. Echter, uit nadere analyse volgt dat de model-fit voor de eerste periode tot half november 2023 vrij slecht is. De simulatie bevat allerlei dynamiek die in de metingen niet is terug te zien. Dat wil zeggen dat in het tijdreeksmodel wordt aangenomen dat het Lekpeil en de neerslag een bepaalde dynamiek in de grondwaterstand veroorzaken, terwijl deze er in werkelijkheid niet is. Dit is een indicatie dat de invloed van het Lekpeil en de neerslag niet goed kan worden ingeschat (ondanks een voldoende EVP en het feit dat het tijdreeksmodel van deze peilbuis goed door de checks komt). De reactie op de onttrekking (zie Figuur 14) is voor peilbuis HB060PB01 groter dan de diepe peilbuizen in het zand die wel reageren op een verandering in de onttrekking. Dit is zeer twijfelachtig. Als er een grote respons zou zijn op de Lek zou dit ook zichtbaar moeten zijn in de metingen. Uit Figuur 12 volgt dat dit niet het geval is. Uit de trend van de metingen volgt namelijk niet een reactie die vergelijkbaar is met de peilbuizen in het zand. Uit onderstaande figuur volgen niet verklaarbare reacties waarbij zowel een negatieve als positieve respons wordt gevonden (positief in de periode van bijvoorbeeld 5 tot 23 november en negatief in de periode van 23 tot 27 november).

De simulatie / het tijdreeksmodel is voor deze peilbuis dus onbruikbaar en op basis hiervan kunnen geen conclusies worden getrokken over lekkages.

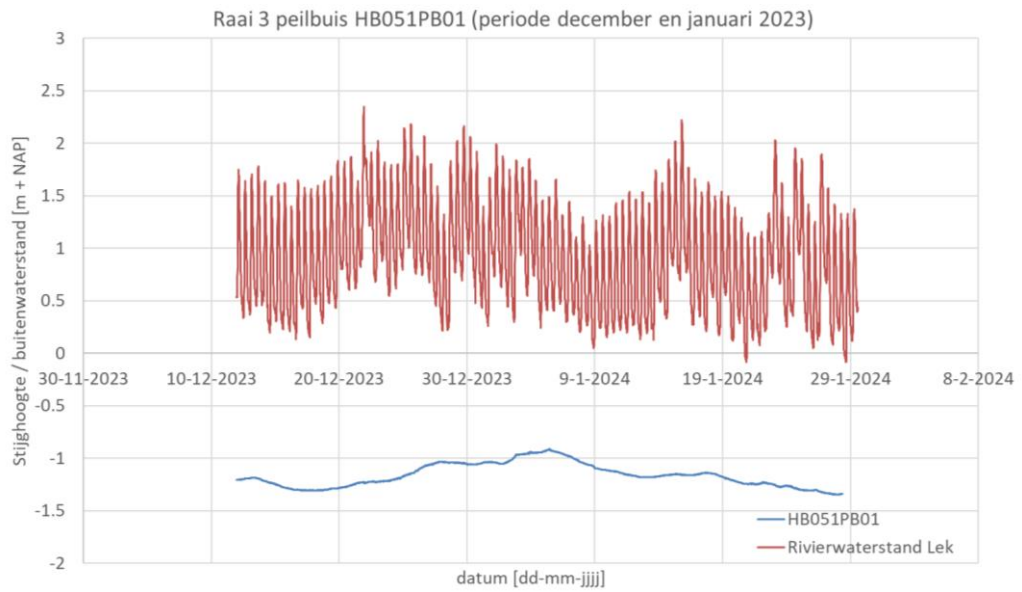


Figuur 12: Peilbuismeting HB060PB01 in relatie met de buitenwaterstand op de Lek

Conclusie is dat lekkage langs het anker en de boorpaal ter plaatse van raai 6 op basis van de tijdreeksanalyse onwaarschijnlijk is. Deze conclusie is echter onzeker omdat de freatische peilbuizen zowel correleren met N+V als Lekpeil omdat het gemiddelde Lekpeil correleert met neerslag. Zie Bijlage D.1.2. voor een nadere toelichting.

Op gelijke wijze zijn alle peilbuizen voor alle raaien geanalyseerd. De resultaten en conclusies hiervan zijn weergegeven in Tabel 2. Voor raai 3 volgt hieruit dat lekkage langs de boorpaal naar het maaiveld mogelijk is. Dit vooral op basis van peilbuis HB051PB01 aangezien de respons op het Lekpeil daar vrij groot is terwijl peilbuis HB016PB01, die op circa dezelfde hoogte op 2 m afstand in het pakket slappe lagen staat, nauwelijks reactie vertoont.

De modelfit voor Peilbuis HB051PB01 is goed en de metingen laten een duidelijke positieve respons zien op de buitenwaterstand, zij het dat deze peilbuis vrij traag reageert op de buitenwaterstand (zie Figuur 13). Deze conclusies zijn onzeker omdat het op basis van de ander peilbuizen onwaarschijnlijk is dat lekkage optreed gezien de lage responsen.



Figuur 13: Peilbuismeting HB051PB01 in relatie met de buitenwaterstand op de Lek.



Tabel 2: Resultaten lekkage/vernattig langs de boorpaal of anker naar deksloof op basis tijdreeksanalyse.

locatie	raai nr.	resultaten freatisch peilbuizen				resultaten peilbuizen met het filter tegen de boorpaal en op dezelfde hoogte op 2 m afstand				Conclusie evt. lekkage langs boorpaal of anker naar gording	opm
		peilbuis 1) 3)	respons op Lek	EVP	bevinding lekkage	peilbuis 3)	respons op Lek	EVP	bevinding lekkage		
F1-1	1	geen			(geen uitspraak mogelijk op basis peilbuismetingen).	geen			(geen uitspraak mogelijk op basis peilbuismetingen).	(geen uitspraak mogelijk op basis peilbuismetingen).	
	2	HB010PB01	0.3	0.77	onwaarschijnlijk	geen			(geen uitspraak mogelijk op basis peilbuismetingen).	zeer onwaarschijnlijk	
		HM047PB01 MB009PB01	0.05 0.05	0.66 0.80		4)					
F2-2	3	HB050PB01	0.15	0.91		HB016PB01	0.1	0.89		mogelijk (maar onzeker) lekkage langs boorpaal vooral op basis van HB016PB01 en HB051PB01	2)
		HB050PB02	0.15	0.91	onwaarschijnlijk	HB051PB01 bp	0.55	0.89	mogelijk		
		HB114PB01	0.4	0.89	onwaarschijnlijk						
		HB114PB02	0.15	0.92							
		MB015PB01	0.15	0.89	onwaarschijnlijk						
	4	HB053PB01	0.4	0.84		HB022PB01	0.05	0.86		zeer onwaarschijnlijk	2)
		HB053PB02 MB040PB01	0.1 0.1	0.89 0.90	onwaarschijnlijk	HB054Pb01 bp	0.05	0.85	onwaarschijnlijk		
H2	5	HB055-APB01	0.2	0.93		MB028PB01	0.2	0.68		zeer onwaarschijnlijk	2)
		HB056PB01	0.2	0.85	onwaarschijnlijk	HB057PB01 bp	0.2	0.85	onwaarschijnlijk		
	6	HB060PB01	0.5	0.81	5) onwaarschijnlijk (maar onzeker)	MB034PB01	0.05	0.81		zeer onwaarschijnlijk	5)
		HB058PB01	0.05	0.88		HB059PB01 pb	0.08	0.95	onwaarschijnlijk		

1) Alleen de relevante peilbuizen zijn hier beschouwd. Niet relevant peilbuizen zijn peilbuizen met  $EVP < 0,70$

2) Deze conclusie is dus onzeker omdat de freatische peilbuizen zowel correleren met N+V als Lekpeil omdat het gemiddelde Lekpeil correleert met neerslag. Zie bijlage D.1.2 voor een nadere toelichting.

3) De met rode tekst weergegeven peilbuizen zijn niet door de checks gekomen waardoor het model hiervoor onzeker is. Hiervoor is model 3 gekozen.

4) De analyse voor deze peilbuis is onbruikbaar. De metingen zijn onjuist omdat deze voor een groot deel van de meetperiode lager zijn dan de loggerdiepte.

5) Aan de resultaten van de tijdreeksanalyse van het model voor peilbuis HB060PB01 kunnen geen conclusies worden ontleend.

**Opmerkingen:**

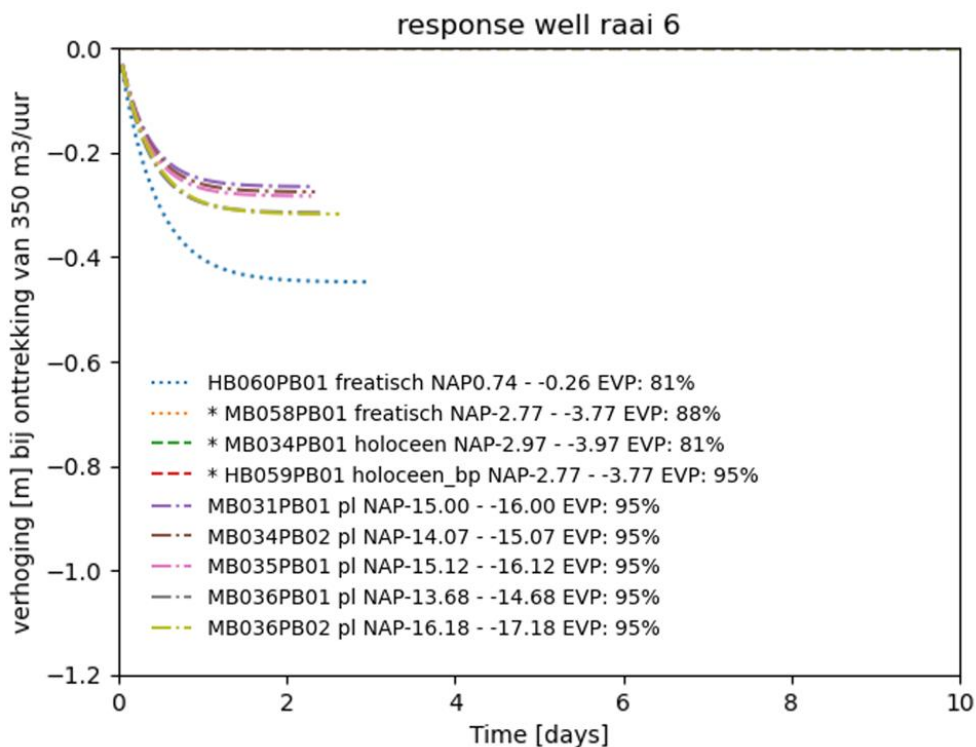
- N+V en Lekpeil zijn deels gecorreleerd, zie Bijlage D.1 voor een nader toelichting. Deze invloeden zijn moeilijk te scheiden waardoor de respons van de freatische peilbuizen op N+V enerzijds en op Lekpeil anderzijds onzeker zijn. De meeste freatische peilbuizen (28 van de 32) komen niet door de zogenaamde (betrouwbaarheids-)checks in de tijdreeksanalyse. Hierdoor zijn de conclusies soms onzeker. Door de tijdreeksanalyse uit te voeren voor een periode waarbij N+V minimaal is (bijvoorbeeld de periode van half mei tot half juni, zie eerste figuur in Bijlage D.2.1) wordt in principe alleen de respons van Lekpeil op de freatisch peilbuizen bepaald. Deze meetperiode is echter erg kort en ook de sprong van de drinkwaterwinning van Oasen (van circa 3000 m<sup>3</sup>/d naar 8000 m<sup>3</sup>/d) valt in deze periode. Hierdoor wordt verwacht dat de nauwkeurigheid van de bepaalde respons gering is.
- De peilbuizen die door de checks zijn gekomen (dus alleen de dikgedrukte) en de peilbuizen waarvan de evp > 0,7 zijn in de tabel weergegeven. Vergelijking tussen de meetreeks en de simulatie geven niet altijd nauwkeurige model-fits te zien. Van 3 van deze 10 peilbuizen die door de checks zijn gekomen is de respons op het rivierpeil vrij groot (> 0,5) maar zijn de model-fits puur op basis van een visuele beoordeling redelijk of matig waardoor op basis van deze peilbuizen voorzichtige conclusies moeten worden getrokken. Dit uit zich in de tabel door een kansuitspraak dat dat lekkage mogelijk (maar onzeker) zou kunnen zijn.



De andere peilbuizen (7 van de 10) geven redelijk tot goede fits maar lage responswaarden (0,1 tot 0,4) waardoor de kansuitspraak volgt dat op basis van deze peilbuizen lekkage onwaarschijnlijk is.

### Resultaten m.b.t. invloed van de onttrekking van Drinkwaterwinning Oasen

In Figuur 14 is als voorbeeld de respons van de grondwaterstand op de drinkwaterwinning van Oasen te Nieuw Lekkerland weergegeven voor raai 6.



Figuur 14: Voorbeeld van respons van de grondwaterstand op de onttrekking van Oasen voor raai 6 (model 3). Lijnstijl verschilt per grondlaag: Stippellijn voor freatisch, gestreepte lijn voor holoceen, streepstip-lijn voor PL.

Uit Figuur 14 volgt voor raai 6 voor de invloed van de onttrekking van Oasen:

- De 5 peilbuizen in de PL reageren met een daling van de stijghoogte van circa 0,3 m op de onttrekking van Oasen. Deze onttrekking is 350 m<sup>3</sup>/u hetgeen overeenkomt met 8400 m<sup>3</sup>/dag.
- De respons van de freatische peilbuizen en de peilbuizen in het holoceen is zeer klein (in de figuur liggen de lijnen op de horizontale as bij een waarde van 0,0). Voor de freatische peilbuis HB060PB01 echter, die met het filter aan de rivierzijde langs de deksloof is geplaatst is de verlaging van de stijghoogte circa 0,45 m bij een onttrekking van 8400 m<sup>3</sup>/dag. Dit kan worden verklaard door lekkage langs het anker naar de deksloof.

Op gelijke wijze zijn met de tijdreeksanalyses de invloeden van de drinkwaterwinning van Oasen met alle peilbuizen voor alle raaien geanalyseerd. De resultaten en conclusies hiervan zijn weergegeven in Tabel 3 (kolom 3 tot en met 5). In de tabel zijn tevens de resultaten weergegeven op basis van de peilbuismetingen door analyse van de stijghoogten in relatie met de onttrekking (zie kolom 6 en 7). De verschillen tussen beide analysemethoden zijn gering. Voor raai 1 en 2 volgt een gemiddeld stijghoogteverschil in de TZ en de PL van circa 0,9 m als het onttrekkingsdebiet van 8000 naar 0 m<sup>3</sup>/d wordt verlaagd. Voor raai 3 en 4 is dit 0,7 m en voor raai 5 en 6 is dit 0,4 m. Raai 1 en 2 bevinden zich op een afstand van circa 625 m vanaf de onttrekking. Voor de andere locaties is de afstand groter.

Dit is van belang voor bepaling van de stijghoogten bij WBN2023 omdat bij deze extrapolatie naar WBN rekening dient te worden gehouden met verminderde drinkwaterwinning. Dit is een veilige aanname voor de sterkteberekeningen van de palenwandconstructie die in onderdeel D wordt behandeld. Opgemerkt wordt dat op basis van analyse van de peilbuismetingen (zie Paragraaf 4.3.1) deze invloed ook is onderzocht waaruit nagenoeg dezelfde conclusie volgt.

Tabel 3: Resultaten invloed op de stijghoogte van de onttrekking van Oasen bij een onttrekking van 0 naar circa 8400 m<sup>3</sup>/dag op basis tijdreeksanalyse.

raai nr.	TZ of PL	Gemiddelde stijghoogteverlaging bij onttrekking van 0 naar circa 8400m <sup>3</sup> /dag in m.				
		Op basis van tijdreeksanalyse			Op basis analyse peilbuismetingen	
		t/m okt 2023	t/m feb 2024	gemiddeld	t/m okt 2023	
1	TZ	0.90 tot 1.00	0.95 tot 1.00	raai 1 en 2 gemiddeld 0.95m	0.82	raai 1 en 2 gemiddeld 0.85m
	PL	0.85 tot 1.00	0.80 tot 0.95		0.89	
2	TZ	0.90 tot 1.00	0.95 tot 1.00		0.82	
	PL	0.90 tot 1.05	0.80 tot 1.00		0.89	
3	TZ	0.65 tot 0.75	0.65 tot 0.75	raai 3 en 4 gemiddeld 0.75m	0.63	raai 3 en 4 gemiddeld 0.70m
	PL	0.65 tot 0.90	0.65 tot 0.85		0.81	
4	TZ	0.50 tot 0.80	0.50 tot 0.80		0.63	
	PL	0.70 tot 0.90	0.65 tot 0.85		0.81	
5	PL	0.35 tot 0.40	0.30 tot 0.35	raai 5 en 6	0.41	raai 5 en 6
6	PL	0.30 tot 0.35	0.25 tot 0.35	gemiddeld 0.35m	0.41	gemiddeld 0.40m

### 4.3.3 Peilbuismetingen ADCIM bij boorpalenwand F1-1

#### Algemeen

Bij de boorpalenwand F1-1 zijn na afloop van de dijkversterking grondwaterstandmetingen uitgevoerd door ADCIM, (zie ADCIM, 2019). Dit betreft de periode 2018-2019. Deze metingen zijn geanalyseerd in het fase 1 onderzoek (Deltares, Juli 2021). In Hoofdstuk 3 van het bovengenoemde rapport is de nadere analyse weergegeven en in Bijlage A en B van dat fase 1 rapport (Deltares, Juli 2021) is de meetdata weergegeven.

Er zijn 10 peilbuizen geplaatst nabij AW167+150 m (nummers 1 t/m 6, 9 en 10), waarvan de filters in het pakket slappe lagen zijn geplaatst. Hiermee is de hoogte van het freatisch vlak gemeten (de zogenaamde freatische peilbuizen).

De peilbuizen 7 en 8 zijn door Wiertsema geïnstalleerd met de filters in het diepe zand (PL) respectievelijk de TZ. De peilbuizen 7 en 8 staan op een afstand van circa 250 m in oostelijke richting van locatie F1-1, namelijk ter plaatse van AW 169+005, nabij pand Lekdijk 357.

De intentie in het kader van dit onderzoek was om de 2 freatische peilbuizen, die op korte afstand aan weerszijden van de boorpalenwand waren geplaatst, nogmaals te monitoren. Deze peilbuizen bleken echter niet meer bruikbaar. Wel zijn de reeds uitgevoerde ADCIM-metingen vergeleken met de metingen ter plaatse van de nieuwe monitoringlocaties (zie Paragraaf 4.3). De nieuwe monitoringslocaties ter plaatse van sectie F1-1 (raai 1 en 2) staan op geringe afstand (<10 m) van de ADCIM-peilbuizen (vergelijk de eerste figuur van Bijlage B.1 met de eerste figuur in Bijlage A.3).

Doel hiervan is om te onderzoeken in hoeverre deze metingen vergelijkbaar zijn met de peilbuismetingen ter plaatse van de boorpalenwanden (nieuwe monitoringslocaties) en om te bepalen of met de nieuwe metingen en inzichten de conclusies van het fase 1 rapport aanpassing behoeven.

## Bevindingen fase 1 rapport

In het rapport (Deltares, Juli 2021) is de vraag beantwoord of de waterspanningen in (freatische) peilbuizen, gemeten door ADCIM, zijn veroorzaakt door lekkage door kieren langs de boorpalenwand. Hiervoor was de conclusie dat bij zo'n lekkage langs de boorpalen naar maaiveld, de freatische waterstanden bij de boorpalenwand een respons moeten laten zien op de rivierwaterstand. Een vergelijking tussen de getijdebeweging van de rivierwaterstand en de freatische peilbuismetingen bij de boorpalenwand liet zien dat er nauwelijks tot geen correlatie is. Wel werd een duidelijke correlatie tussen neerslag en de peilbuismetingen waargenomen. Hieruit is destijds op basis van de waarnemingen in de peilbuizen geconcludeerd dat er op moment van schrijven van het fase 1 rapport geen sprake is van lekkage door kieren langs de boorpalen op die locatie.

In de freatische peilbuizen 1 en 2 (Deltares, Juli 2021) wordt gedurende de (relatief korte) getij-periode, waarbij het grootste verschil in buitenwaterstand optreedt, een verhoging van de stijghoogte van slechts 0,09 m respectievelijk 0,06 m gemeten. Zie hysteresegrafieken zoals weergegeven in Bijlage B.2. Voor de peilbuizen 1 en 2 (ter plaatse van de boorpalenwand) blijkt dus nauwelijks een correlatie tussen getij en peilbuisstand aanwezig. De filters van de peilbuizen zijn echter in kleilagen geplaatst, waardoor eventuele snellere fluctuaties door de invloed van het getij op de rivier, lastiger waarneembaar zijn. Teneinde de eventuele invloed te kunnen bepalen is het beschouwen van een langere periode dan het getij nodig.

Bij het beschouwen van de invloed van neerslag op de peilbuisstand is een positieve correlatie gevonden met een 3-daagse neerslagsom. Het mag worden verwacht dat bij het beschouwen van een gemiddelde buitenwaterstand over eenzelfde periode (3 dagen) ook een correlatie wordt gevonden. Als dit verband wordt beschouwd (zie de blauwe puntenwolk in de figuren in Bijlage B.2 van dit rapport) volgt echter een onduidelijke correlatie, maar gesteld kan wel worden dat het freatisch vlak wordt beïnvloed door zowel neerslag als de buitenwaterstand. Welk aandeel in de stijghoogte aan beide kan worden toegekend is uit de metingen niet te halen.

Voor de peilbuizen die in de PL en in de TZ staan wordt in (Deltares, Juli 2021) aangegeven dat deze ook lijken te reageren op neerslag. Dit kan evenwel worden verklaard doordat tijdens de neerslagperiode ook de (gemiddelde) waterstand in de Lek iets hoger is door hogere afvoer. Een nadere duiding is in Paragraaf 4.3.1 en in Bijlage D.1.2 weergegeven.

## Vergelijking ADCIM met nieuwe metingen

Freatische peilbuizen:

De nieuwe freatische peilbuizen in sectie F1-1 in raai 2, zijn zoals hierboven aangegeven op geringe afstand van de ADCIM peilbuizen geïnstalleerd. In Tabel 4 is de hoogte van het freatisch vlak weergegeven op basis van de ADCIM peilbuizen (conform Deltares, Juli 2021) en de nieuwe metingen in sectie F1-1 raai 2 (zie Paragraaf 4.3.1). Dit zonder noemenswaardige neerslag en met neerslag (tijdens de meetperiode). Hieruit volgt dat de geïnterpreteerde hoogte van het freatisch vlak ter plaatse van de boorpalenwand ( $x$ =circa 24 m) op basis van de ADCIM metingen iets hoger is. Het verschil is echter gering, namelijk circa 0,3 m.

Tabel 4: Freatisch vlak op basis van peilbuismetingen ADCIM en nieuwe metingen.

X-coördinaat (afstand vanaf buitenkruin) [m]	Omschrijving	Peilbuismetingen 2023 (sectie F1-1 raai 2)		Peilbuismetingen ADCIM 2018-2019	
		zonder neerslag	met neerslag	zonder neerslag	met neerslag
		[m+NAP]	[m+NAP]	[m+NAP]	[m+NAP]
21	Peilbuis 3 ADCIM / HB010PB01			-0.15	0.6
23	rivierzijde palenwand HB047Pb01 en MB09PB01	-1.1	-0.9	-	-
24	polderzijde palenwand Peilbuis 3 ADCIM			-0.75	-0.3
24	polderzijde palenwand PB047Pb01 1) en MB09PB02	< -0,90	-0,60		
38	Peilbuis 3 ADCIM			-1.7	-1.45
65	bakwetering	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2
1) peilbuis staan gedeelte van de periode droog					

Peilbuizen in de TZ en de PL:

De ADCIM peilbuizen in de TZ en de PL staan op circa 200 m oostelijk van de nieuwe peilbuizen in sectie F1-1. Uit het grondonderzoek volgt dat de TZ ter plaatse van de kruin en binnendijs daar aanmerkelijk dikker is namelijk circa 5 m. Ter plaatse van de nieuwe monitoringslocaties bij sectie F1-1 (raai 1 en 2) en F2-2 (raai 3 en 4) is de dikte circa 1 m. Hieruit volgt dat mag worden verwacht dat de respons van de peilbuis in vooral de TZ ter plaatse van de nieuwe monitoringslocaties kleiner zal zijn. In Bijlage B.2, Tabel 9 zijn de resultaten van de metingen weergegeven. In Bijlage D zijn de resultaten van de metingen van de nieuwe monitoringslocaties weergegeven. Hieruit volgt dat de responsfactor van de peilbuizen in de PL voor beide locaties vergelijkbaar zijn (circa 0,4). De responsfactoren voor het getij voor de TZ zijn bij de nieuwe monitoringslocaties (raai 1 t/m 4) zoals verwacht iets kleiner (responsfactor 0,03 tot 0,09) dan op de locatie waar de TZ aanmerkelijk dikker is bij de peilbuizen 7 en 8 (responsfactor 0,08 tot 0,11).

### Bevindingen

In (Deltares, Juli 2021) werd gesteld dat de freatische peilbuizen niet of nauwelijks reageren op het getij. Als echter een gemiddelde buitenwaterstand over langere periode wordt beschouwd blijkt wél enige correlatie tussen de buitenwaterstand en de hoogte van het freatische vlak. De buitenwaterstand correleert echter ook met neerslag. De invloeden van neerslag enerzijds en het Lekpeil anderzijds op de hoogte van het freatisch vlak zijn hierdoor niet van elkaar te scheiden. Dit volgt eveneens uit de analyse van de nieuwe peilbuismetingen (zie Paragraaf 4.3.1). Hierdoor is niet eenduidig vast te stellen of er een respons is van de freatische peilbuizen op het (gemiddelde) Lekpeil.

Op basis van de ADCIM metingen (de freatische peilbuismetingen) is ook niet eenduidig te concluderen of wél of geen lekkage vanuit de TZ naar het maaiveld ter plaatse van de palenwandconstructie in sectie F1-1 optreedt.

De peilbuismetingen van de peilbuizen 7 en 8 in de PL en de TZ geven geen indicaties over enige vorm van lekkage langs de boorpalen.

Verder wordt opgemerkt (zie Deltares, Juli 2021, Paragraaf 3.1) dat in het rapport van ADCIM is aangegeven dat er voor de aanleg van de drain bij Lekdijk 385 stelselmatig sprake was van water op het maaiveld. Na de aanleg van de drain kwam dit niet meer voor. Door de bewoners is echter aangegeven dat zij achter de dijk kwel en vernatting hebben geconstateerd na aanleg van de drainage.

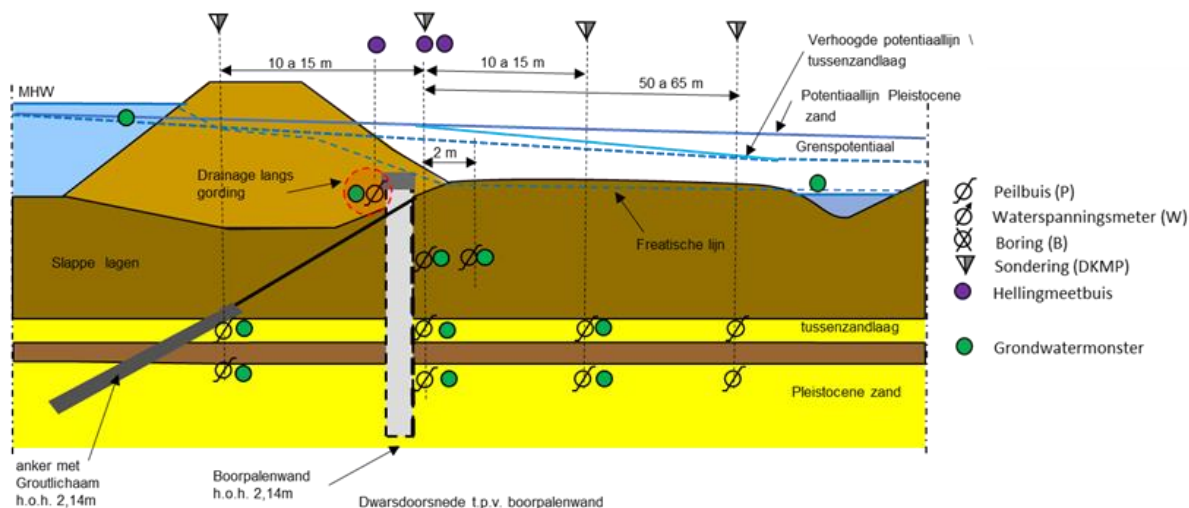
De peilbuismetingen van ADCIM geven echter geen indicatie dat de kwel en vernatting door lekkage via de boorpalen of ankers tot stand komt.

## 4.4 Hydrochemisch onderzoek

### Algemeen

Rondom de dijk bevindt zich een complexe freatische hydrologie met grondwaterstromingen vanuit de Lek, diep kwelwater (deels lek) en neerslag. De samenstelling van het water op chemisch niveau wordt beïnvloed door de omgeving en kan op deze manier inzicht geven in de herkomst van het water op verschillende dieptes. Met de resultaten van dit hydrochemisch onderzoek is de kans op lekkage langs de ankers en langs de boorpalen geduid.

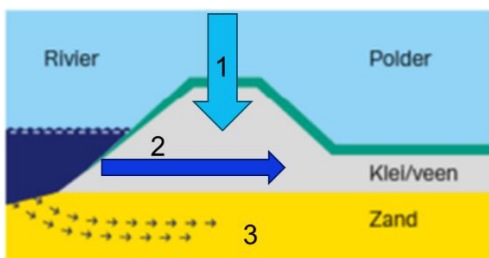
De chemische samenstelling van watermonsters uit de peilbuizen is onderzocht en met elkaar vergeleken. In de navolgende schematische doorsnede (zie Figuur 15) is aangegeven waar de grondwatermonsters zijn genomen.



Figuur 15: Principe dwarsprofiel met locaties genomen watermonsters (zie groene bolletjes).

Er kan onderscheid worden gemaakt in de volgende stromingen die dus een afwijkende chemische samenstelling kunnen hebben (zie Figuur 16):

- Tussen de rivier en poldersloot kan regenwater infiltreren. Dit regenwater zal deels indampen en stoffen oplossen (of verliezen) in de passerende klei/veen en zandlagen.
- Sinds de aanleg van de polder infiltreert de Lek en kwelt dit water in de aangrenzende polder, vooral in de langs de dijk gelegen poldersloten Figuur 16.
- Op grotere diepte kan zich ook nog ouder grondwater bevinden. Grondwater dat niet met infiltratie van de Lek te maken heeft (inclusief zeewater).



Figuur 16: Infiltratie van water uit de Lek in de polder (1 Infiltrerend regenwater; 2 Stroming door wadzandlaag (rivier); 3 Stroming door PL (rivier)).

Bij hydraulische kortsluiting langs de boorpalen zou er ook een aanzienlijke instroom kunnen zijn van grondwater uit de TZ of de PL en het hydrochemisch profiel meer eigenschappen vertonen van deze pakketten. Deze instroom kan alleen plaatsvinden op het moment dat de stijghoogte van het grondwater in de TZ of de PL hoger is dan het freatisch vlak ter plaatse.

De watermonsters kunnen in verschillende groepen worden ingedeeld zodat de eigenschappen (parameters) van een specifiek watermonster met een van deze groepen kan worden vergeleken. De watermonsters zijn ingedeeld in zogenaamde holocene monsters (watermonsters uit de freatische peilbuizen en de peilbuizen op iets grotere diepte in de deklaag langs de boorpaal en op 2 m daaruit), monsters uit de tussenzandlaag en monsters uit de pleistocene zandlaag. Ook zijn er watermonsters van de Lek en de bakwetering genomen.

Daarnaast zijn er watermonsters genomen uit de drainagevoorziening bij sectie F1-1. Specifiek voor sectie F1-1 is een drainagevoorziening aangelegd ten behoeve van de wateroverlast. Het water in het dijklichaam is waarschijnlijk een mix van regenwater en infiltrerend rivierwater, aangezien het drainagesysteem onder het rivierwaterpeil ligt en boven het peil van de Bakwetering.

Tot slot zijn er watermonsters genomen van de lekkage uit de ankerkop (Anker A08 in raai 3).

## Resultaten

De resultaten van de analyses zijn in detail in Bijlage F weergegeven. Daarbij zijn de chemische analyses per watermonster vergeleken met chemische analyses van watermonsters uit het Holoceen, de TZ en de PL. Dit door middel van de per raai bepaalde correlaties met de watermonsters.

## Conclusies

De conclusies van dit onderzoek zijn per raai in Bijlage F.6 weergegeven. Hieruit volgt dat op de in Tabel 5 weergegeven locaties lekkage of hydraulische kortsluiting waarschijnlijk is.

Tabel 5: Conclusies op basis van het hydrochemisch onderzoek.

Watermonster	Locatie	Hydraulische kortsluiting/lekkage	Conclusie alleen op basis van hydrochemisch onderzoek
HB010PB01	Rivierzijde raai 2	Van TZ naar Holoceen	Lek langs anker is <b><u>waarschijnlijk</u></b> .
HB053PB01	Rivierzijde raai 4	Van TZ naar Holoceen	Lek langs boorpaal of anker is zeer onwaarschijnlijk.
HB057PB01	Langs boorpaal raai 5	Van PL naar Holoceen	o.b.v. aanvullend onderzoek: lek zeer onwaarschijnlijk.
MB017PB01	Polderwaaarts raai 3	Van PL naar TZ	Lek zeer onwaarschijnlijk.
MB023PB01	Polderwaaarts raai 4	Van PL naar TZ	Lek zeer onwaarschijnlijk.
MB052PB01	Boorpaal raai 4	Van PL naar TZ	Lek langs boorpaal is <b><u>waarschijnlijk, maar geringe lekkage</u></b> .
MB023PB02	Polderwaaarts raai 4	Van PL naar TZ	Lek zeer onwaarschijnlijk.
MB046PB02	Boorpaal raai 2	Van PL naar TZ	Lek langs boorpaal is <b><u>waarschijnlijk, maar geringe lekkage</u></b> .
DP01, DP03 en DP04.	Drainage raai 1 en 2	Van TZ naar Holoceen	Vertoont geen duidelijk hydrochemisch profiel, maar er is een zwakke positieve relatie. Lekkage langs boorpaal <b><u>is mogelijk</u></b> .



Watermonster	Locatie	Hydraulische kortsluiting/lekkage	Conclusie alleen op basis van hydrochemisch onderzoek
2023-018-001	anker raai 3	Van TZ naar Holoceen	Geen duidelijk hydrochemisch profiel, maar wel aannemelijk dat menging van water uit TZ en Holoceen plaatsvindt. Hierdoor is een lek <b>langs het anker zeer <u>waarschijnlijk</u></b> .
<b>Kansuitspraak/waarschijnlijkheidsaanduiding volgens Willems et al (2020):</b>		<b>Omschrijving/interpretatie:</b>	
Zeer onwaarschijnlijk		Bijna onmogelijke kans van optreden (kans circa 0,05)	
Mogelijk		Gebeurtenis kan mogelijk optreden (kans circa 0,50)	
Waarschijnlijk		Grote kans van optreden (kans circa 0,80)	
Zeer waarschijnlijk		Zeer grote kans van optreden (kans circa 0,95)	

Onderstaand zijn de locaties waar lekkage of hydrologische kortsluiting (zeer) waarschijnlijk is nader toegelicht.

Raai 2: Lekkage langs het anker naar maaiveld:

Bij HB010PB01 (rivierzijde raai 2), kan worden gesteld dat lekkage langs het anker naar maaiveld waarschijnlijk is.

Voor het zogenaamde holocene watermonster uit de peilbuis aan rivierzijde van boorpalenwand (dus bij het anker), is enige (maar geen sterke) correlatie met andere Holocene-monsters. Het holocene watermonster van de bemonsteringslocatie ten noorden van de palenwand zou mogelijk water uit de TZ kunnen laten opkomen en mengen met het Holoceenwater.

Raai 2 en 4: hydraulische kortsluiting langs boorpaal van de TZ naar de PL:

Bij meetpunt MB052PB01 (de TZ ter plaatse van de boorpaal in raai 4) en bij MB046PB02 (de PL ter plaatse van de boorpaal in raai 2) vertonen de watermonsters uit de TZ bij de boorpaal sterke overeenkomsten met monsters uit de PL op dezelfde locatie, wat mogelijk duidt op een lek langs de boorpaal tussen de PL en de TZ. Uit de peilbuismetingen volgt dat de responsen in de TZ en de PL erg veel van elkaar afwijken hetgeen in basis niet duidt op een hydraulische kortsluiting, maar een hydraulische kortsluiting niet uitsluit. Gezien de conclusie uit de hydrochemische analyses betekent dit dat een lekkage waarschijnlijk is maar gering zal zijn.

Watermonsters uit drainagesysteem raai 1 en 2:

In het correlatiediagram (zie Bijlage F.4.1.2) laten de monsters van het water uit het drainagesysteem een zwakke positieve relatie zien tussen de Pleistocene monsters. Er is verschil tussen de ondiepe grondwatersamenstelling in de polder en het dijklichaam. Dit kan te maken hebben met een bijvoorbeeld een grotere regenwaterlens in het dijklichaam of verdunning door infiltrerend rivierwater.

Er valt gezien bovengenoemde niet uit te sluiten dat dit drainagesysteem lokaal ook kwelwater afvoert als gevolg van hydraulische kortsluiting langs de boorpaal. Lekkage langs de boorpaal is dus mogelijk.

Raai 3: Lekkage bij Anker nr. 08 naar maaiveld:

Bij Anker A08 (raai 3) is lekkage geconstateerd. Het monster lekkagewater bij Anker 08 in raai 3 vertoont met geen van de pakketten TZ, PL of Holoceen een duidelijke hoge correlatie, hoewel het water wel op een aantal kenmerken overeenkomt met dat van de TZ.

Het anker heeft een behoorlijke lengte in de Holocene lagen; de lengte van het anker vanaf de TZ naar de ankerkop bedraagt orde grootte 13 m.

Door de installatieprocedure van een anker is er ruimte tussen de ankerstrengen en de omliggende grond. Grondwater in de Holocene lagen kan daardoor in deze ruimte verzamelen. Bij een eventuele lekkage vanuit de TZ langs het anker kan het water in het ankergat zich dan ook mengen met water uit de TZ. Het onderzochte lekkagewater heeft kenmerken van zowel TZ als Holoceen. Verklaring hiervoor is dat er menging van water van deze 2 pakketten is opgetreden. Het is gezien bovengenoemde erg waarschijnlijk dat de lekkage moet zijn veroorzaakt door grondwaterstroming vanuit het diepe zand langs het anker naar het maaiveld. Uit de observaties tijdens de visuele inspectie van februari 2023 (Deltares, Mei 2023) en de daarbij uitgevoerde debietmeting volgt dat lekkage vanuit de TZ via het anker naar de deksloof aannemelijk is.

De bovenkant van de deksloof ligt op een hoogte van NAP – 0,90 m. De uitstroomopening van het ankergat in de deksloof ligt circa 0,25 m lager op NAP – 1,15 m. Dit is lager dan de gemiddelde stijghoogte in de TZ, in de periode dat de lekkage is geconstateerd (gemiddeld NAP – 0,30 m tot – 0,80 m).

Uit de observaties van de uitgevoerde debietmeting bij Anker A-08 en het hydrochemisch onderzoek blijkt dat het zeer waarschijnlijk is dat de lekkage is veroorzaakt door grondwaterstroming vanuit het diepe zand langs het anker.

Een uitspraak over hydraulische kortsluiting of lekkage alleen op basis van dit hydrochemisch onderzoek geeft onvoldoende zekerheid. Hiervoor dienen tevens de resultaten van het andere monitoringsonderzoek, zoals de peilbuismetingen, hellingmeetbuis metingen en de tijdreeksanalyse, te worden beschouwd.

## 4.5 Hellingmeetbuizen bij boorpalen

Om inzicht in te krijgen in eventuele kiervorming langs de boorpalen in de toekomst worden met hellingmeetbuizen de horizontale vervormingen gemeten. Met de buizen worden de horizontale gronddeformaties ter plaatse van de funderingspalen en tussen de palen gemonitord.

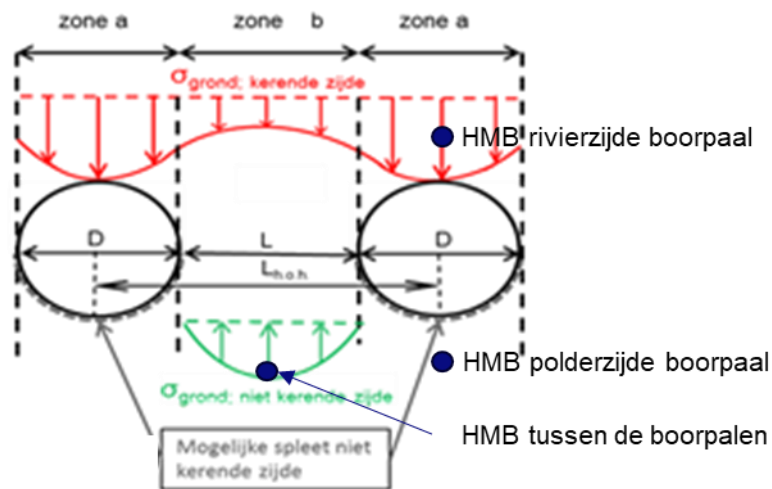
In Figuur 17 is als voorbeeld voor raai 1 en 2 aangegeven waar de hellingmeetbuizen zijn geïnstalleerd. Voor de locaties in de overige resultaten wordt verwezen naar Bijlage E.2



*Figuur 17: Locatie 01 (Raai 01 en 02) sectie F1-1. Bolletjes en lijnen zijn de boorpalen en ankerstrengen. Bolletjes met pijlen erdoor zijn de HellingMeetBuizen (HMB), De pijlen geven de twee richtingen van de meting aan.*

Van de 3 buizen per raai is één buis tussen de 2 boorpalen geplaatst, één ter plaatse van de paal aan de rivierzijde en één ter plaatse van de paal aan polderzijde. (zie ook Figuur 18). De buis tussen de boorpalen meet de horizontale grondvervormingen tussen de palen. De buis aan polderzijde van de boorpaal meet de horizontale grondverplaatsingen ter plaatse van de boorpaal. Als de verschilverplaatsing wordt berekend tussen deze twee buizen en het verschil verandert op termijn dan is het aannemelijk dat de grond tussen de palen verplaatst (snijden van de grond) en zal mogelijk een kier ontstaan achter de paal aan polderzijde.

De buis aan rivierzijde van de boorpaal meet weliswaar de grondverplaatsingen, maar omdat deze dicht tegen de boorpaal is geplaatst kan worden gesteld dat dat deze vervormingen representatief zijn voor de horizontale vervorming van de boorpaal. Vergelijking van de gemeten waarden van de hellingbuizen kan een goed inzicht geven in het eventuele verschil in de horizontale verplaatsing van de ondergrond en de boorpaal en geeft daarmee inzicht in het eventueel ontstaan van een kier tussen grond en boorpaal. Bij een doorgaande kier zou lekkage kunnen optreden.



Figuur 18: Principe bovenaanzicht boorpalenwand met locaties hellingmeetbuizen. Toename horizontale grondspanningen bij boorpalenwand (HMB= Hellingmeetbuis).

### Resultaten metingen

Op moment van schrijven van dit rapport zijn op 4 tijdstippen metingen uitgevoerd in de periode van 08-03-2023 tot 14-11-2023.

### Conclusies op basis van de metingen

Geconcludeerd wordt dat de gemeten horizontale vervormingen tot nu toe zeer klein zijn en in dezelfde orde-grootte liggen als de nauwkeurigheid van het meetsysteem. Op basis van de gemeten, zeer kleine verschilvervormingen tussen de buizen aan rivier- en polderzijde, wordt geconcludeerd dat op dit moment geen sprake is van vergroting van een kier langs de boorpalen.

Op basis van deze metingen kan echter niet worden aangegeven of er al vanaf de installatie sprake was van een kier. De boorpalenwand is namelijk medio 2018 geplaatst. De nulmetingen van de hellingmeetbuizen zijn uitgevoerd in maart 2023. De laatste metingen die zijn verwerkt in dit rapport zijn uitgevoerd op 14-11-2023.

## 4.6 Samenvatting van conclusies uit het monitoringsonderzoek

In deze paragraaf worden eerst de hoofdconclusies uit het monitoringsonderzoek voor de 6 meetraaien gegeven en wordt ingegaan op de redenen dat de conclusies zijn beschreven met een kansuitspraak of waarschijnlijkheidsaanduiding. Daarna wordt een toelichting van de conclusies per locatie gegeven.

Opgemerkt wordt dat in de Paragrafen 6.2.4 en 6.2.5 de generieke conclusies voor dijkversterking KIS zijn getrokken.

### **Conclusies monitoringsonderzoek:**

De conclusies uit het monitoringsonderzoek voor de 6 meetraaien en de 3 hypothesen A, B en C (zie Paragraaf 3.3), op basis van de conclusies uit de deelonderzoeken, te weten de peilbuismetingen, de tijdreeksanalyse, het hydrochemisch onderzoek en de hellingmeetbuizen zijn:

- Het optreden van een mate van hydraulische kortsluiting (hypothese A) tussen de PL en de TZ is in 3 van de 6 raaien waarschijnlijk en treed op langs de boorpalen en de ankers. Dit betreft locatie F1-1 bij raai 2 en locatie F2-2 bij de raaien 3 en 4.
- Vernatting als gevolg van lekkage langs de ankers (hypothese B) of de boorpalen (hypothese C) is waarschijnlijk, dan wel zeer waarschijnlijk in 2 raaien. Het betreft Locaties F1-1 en F2-2 bij de raaien 2 respectievelijk 3. Op één locaties is niet uit te sluiten dat lekkage optreedt. Dit betreft de locaties F1-1 bij raai 1.

In Tabel 6 zijn de deze conclusies samengevat.

De waarschijnlijkheid van de lekkages en hydraulische kortsluiting is in de tabel aangeduid in kleurcodes. De betekenis van de kleurcodes is in de legenda onderaan de tabel weergegeven. Deze kansuitspraak of waarschijnlijkheidsaanduiding is gebaseerd op (Willems et al 2020).

Voor de locaties waar vernatting of hydraulische kortsluiting mogelijk, waarschijnlijk of zeer waarschijnlijk is, is na Tabel 7 per locatie een toelichting gegeven.

In een aantal gevallen was het lastig om conclusies te trekken of is de stelligheid van de conclusies gering hetgeen ook met de kleurcodes in Tabel 6 wordt aangegeven. Dit heeft diverse redenen die hieronder zijn aangegeven:

- De invloed van een lekkage of hydraulische kortsluiting op veranderde peilbuismetingen is vaak zeer gering. De verschillen zijn subtiel, hetgeen bij aanvang van het onderzoek niet de verwachting was. Het is bijvoorbeeld duidelijk dat bij een lekkage langs het anker of de boorpaal exact ter plaatse van deze lekkage de stijghoogte verandert. Dit volgt ook duidelijk uit de uitgevoerde grondwaterstromingsberekeningen (zie Paragraaf 5.3.1). Als de lekkage echter relatief klein is betekent dit dat de gemeten gemiddelde stijghoogte en respons op enige afstand van de lekkage nauwelijks merkbaar/meetbaar verandert. (De peilbuisfilters in de TZ en de PL staan op enige afstand uit de boorpaal of het ankerlichaam.
- Voor de watermonsters zijn zeer veel chemische parameters bepaald waarbij vooraf de verwachting was dat deze een duidelijk onderscheid zouden geven tussen water uit de TZ, de PL en freatische water. Dit blijkt niet altijd het geval en de metingen van de verschillende chemische parameters geven soms ook tegenstrijdige resultaten waardoor de conclusies vanuit het hydrochemisch onderzoek onzeker zijn.
- Op basis van de tijdreeksanalyse werd verwacht dat vooral de invloed van neerslag + verdamping ('N+V') enerzijds en de waterstand in de Lek ('Lek') anderzijds, in de freatische peilbuismetingen voldoende onderscheid zou geven. Hiermee werd verwacht duidelijkheid te verkrijgen of een freatische peilbuis duidelijk correleert met neerslag (geen lekkage/vernatting) of juist met het Lekpeil (wel lekkage/vernatting).

Dit blijkt voor enkele modellen (lees 'tijdsreeksanalyse-model van een peilbuis') tegen te vallen omdat N+V en Lekpeil deels gecorreleerd zijn en enkele modellen wellicht mede hierdoor niet door de zogenoemde modelchecks komen waaruit volgt dat het model voor de betreffende peilbuis onvoldoende nauwkeurig is. Door de tijdreeksanalyse uit te voeren voor de meetreeks van maart 2023 tot en met februari 2024 (in plaats van maart tot en met oktober 2023) zijn meer tijdreeksen (peilbuizen) door de model-checks gekomen. Uit de rapportage van Artesia volgt dat weliswaar voor 10 van de 32 (freatische) peilbuizen de betrouwbaarheid voldoende is, maar dit is een gering aantal. Hierdoor zijn de conclusies op basis van de tijdreeksanalyse over lekkage/vernatting van boorpaal of anker naar de deksloof onzeker.

Mede gezien bovengenoemde is de totaalconclusie per raai en binnen de raai per hypothese vooral gebaseerd op de meest conservatieve conclusie uit het deelonderzoek. Het resultaat van het ene deelonderzoek sluit het resultaat van het andere deelonderzoek namelijk niet uit. De locaties, en binnen de locaties de raaien, waar vermatting of hydraulische kortsluiting mogelijk, waarschijnlijk of zeer waarschijnlijk is, zijn in Tabel 7 weergegeven.

Tabel 6: Samenvatting conclusies uit monitoringsonderzoek.

Locatie	raai nr.	Hypothese of bron vernatting/lekkage 1)	Conclusies op basis van deelonderzoek:					Totaal conclusie	
			Peilbuismetingen				Hydrochemisch onderzoek		Helling-meetbuizen
			Kwalitatieve analyse peilbuismetingen	Visuele inspecties	ADCIM (2018-2019)	Tijdreeksanalyse			
F1-1	1	A: Hydraulische kortsluiting tussen PL en TZ.	zeer onwaarschijnlijk				zeer onwaarschijnlijk	nergens vergroting van een kier achter de boorpaal, als deze er al zou zijn 3)	zeer onwaarschijnlijk
		B: Lekkage (vermatting) langs het anker	zeer onwaarschijnlijk	tijdens visuele inspecties februari 2023 (monitoringslocatie) geen lekkage waargenomen		(geen uitspraak mogelijk op basis peilbuismetingen).	zeer onwaarschijnlijk		zeer onwaarschijnlijk
		C: Lekkage (vermatting) langs de boorpaal	lekkage mogelijk, maar geringe lekkage. Deze conclusie is erg onzeker.				geen duidelijk hydrochemisch profiel maar lekkage langs boorpaal is mogelijk		lekkage langs boorpaal niet uit te sluiten
	2	A	zeer onwaarschijnlijk				waarschijnlijk hydraulische kortsluiting langs boorpaal, maar geringe lekkage.		waarschijnlijk hydraulische kortsluiting langs boorpaal
		B	zeer onwaarschijnlijk	tijdens visuele inspecties in februari 2023 (monitoringslocatie) en september 2023 (aanvullende locatie bij Lekdijk 385/386) is geen lekkage waargenomen.	geen eenduidige conclusie te trekken. De peilbuismetingen van ADCIM geven echter geen indicatie dat lekkage via de boorpalen of ankers tot stand komt.	zeer onwaarschijnlijk	waarschijnlijk lekkage		waarschijnlijk lekkage langs anker
		C	lekkage mogelijk, maar geringe lekkage. Deze conclusie is erg onzeker.				zeer onwaarschijnlijk		lekkage langs boorpaal niet uit te sluiten
F2-2	3	A	waarschijnlijk dat hydraulische kortsluiting aanwezig is tussen PL en TZ bij het anker, niet aannemelijk bij de boorpaal.				zeer onwaarschijnlijk		waarschijnlijk hydraulische kortsluiting bij het anker
		B	(geen uitspraak mogelijk op basis peilbuismetingen).	lekkage is waargenomen.			zeer waarschijnlijk		zeer waarschijnlijk lekkage langs anker
		C	mogelijk enige lekkage langs de boorpaal. Deze conclusie is erg onzeker. 2)	tijdens visuele inspecties februari 2023 (monitoringslocatie) geen lekkage langs de boorpaal waargenomen.		mogelijk (maar onzeker) lekkage langs boorpaal, vooral op basis van peilbuis HB016PB01 en HB051PB02	zeer onwaarschijnlijk		lekkage langs boorpaal niet uit te sluiten
	4	A	zeer onwaarschijnlijk				waarschijnlijk hydraulische kortsluiting, maar geringe lekkage.		waarschijnlijk hydraulische kortsluiting
		B	zeer onwaarschijnlijk	tijdens visuele inspecties februari 2023 (monitoringslocatie) geen lekkage waargenomen.		zeer onwaarschijnlijk	zeer onwaarschijnlijk		zeer onwaarschijnlijk
		C	zeer onwaarschijnlijk				zeer onwaarschijnlijk		zeer onwaarschijnlijk
H2	5	A	n.v.t. (geen tussenzandlaag aanwezig)				zeer onwaarschijnlijk		zeer onwaarschijnlijk
		B	zeer onwaarschijnlijk	tijdens visuele inspecties februari 2023 (monitoringslocatie) geen lekkage waargenomen.		zeer onwaarschijnlijk	zeer onwaarschijnlijk		zeer onwaarschijnlijk
		C	zeer onwaarschijnlijk				zeer onwaarschijnlijk		zeer onwaarschijnlijk
	6	A	n.v.t. (geen tussenzandlaag aanwezig)				zeer onwaarschijnlijk		zeer onwaarschijnlijk
		B	zeer onwaarschijnlijk	tijdens visuele inspecties februari 2023 (monitoringslocatie) geen lekkage waargenomen.		zeer onwaarschijnlijk	zeer onwaarschijnlijk		zeer onwaarschijnlijk
		C	zeer onwaarschijnlijk				zeer onwaarschijnlijk		zeer onwaarschijnlijk
6 aanvullende locaties	B en C		tijdens visuele inspecties in september 2023 (aanvullende locaties) is geen lekkage waargenomen.					zeer onwaarschijnlijk	
<b>Betekenis kleurcode:</b>		<b>Kleur: Kansuitspraak/waarschijnlijkheidsaanduiding volgens Willems et al (2020):</b>		<b>Omschrijving/interpretatie:</b>					
		<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 40%;"> <p>zeer onwaarschijnlijk</p> <p>mogelijk</p> <p>waarschijnlijk</p> <p>zeer waarschijnlijk</p> </div> <div style="width: 60%;"> <p>Bijna onmogelijke kans van optreden (kans circa 0,05)</p> <p>Gebeurtenis kan mogelijk optreden (kans circa 0,50)</p> <p>Grote kans van optreden (kans circa 0,80)</p> <p>Zeer grote kans van optreden (kans circa 0,95)</p> </div> </div>							
1)		A: Hydraulische kortsluiting tussen PL en TZ B: Lekkage (vermatting) langs het anker naar maaveld C: Lekkage (vermatting) langs de boorpaal naar het maaveld							
2)		Ook volgt op basis van de peilbuismetingen in de TZ op x=75 (50 m van de boorpaal volgt dat kortsluiting tussen het TZ met de Bakwetering aannemelijk is. Een lekkage op deze locatie (de bakwetering) heeft echter geen invloed op de boorpalenwandconstructie. Gezien het beperkte invloedsgedebied hiervan.							
3)		Op basis van deze metingen kan echter niet worden aangegeven of er al sprake was van een kier of spleet vóór installatie van de hellingmeetbuizen.							



### Toelichting van de conclusies in de tabel

Hierbij wordt opgemerkt dat voor de deelconclusies uit de verschillende onderzoekssporen vooral wordt verwezen naar de Paragrafen 4.3.1 (peilbuismetingen), 4.3.2 (tijdreeksanalyse) en 4.4 (hydrochemische analyse).

- Locatie F1-1, raai 1, C: Lekkage(vernatting) langs de boorpaal naar het maaiveld:
  - Op basis van de peilbuismetingen volgt dat lekkage niet aannemelijk is maar dat een geringe lekkage niet is uit te sluiten. Uit het hydrochemisch onderzoek volgt dat lekkage mogelijk is (dit op basis van de watermonsters uit de drainage in sectie F1-1). Tijdens de uitgevoerde visuele inspectie in februari 2023 is geen lekkage waargenomen. Ook als geen lekkage is waargenomen kan in principe vernatting optreden door een (niet zichtbare) stijging van het freatisch vlak als het freatisch vlak (zoals hier) in bepaalde perioden lager ligt dan de gemiddelde stijghoogte in de TZ. Totaalconclusie is dat lekkage langs de boorpaal niet is uit te sluiten.
- Locatie F1-1, raai 2, A: Hydraulische kortsluiting tussen de PL en de TZ:
  - Uit het hydrochemisch onderzoek volgt dat dat hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL waarschijnlijk is bij de boorpaal. Uit de peilbuismetingen volgt dat de responsen in de TZ en de PL erg veel van elkaar afwijken hetgeen een hydraulische kortsluiting niet uitsluit maar gezien de conclusie uit de hydrochemische analyses betekent dit dat de lekkage gering zal zijn.
- Locatie F1-1, raai 2, B: Lekkage (vernatting) langs het anker naar maaiveld:
  - De peilbuismetingen van ADCIM geven geen indicatie dat de kwel en vernatting door lekkage via de boorpalen of ankers tot stand komt. Op basis van analyse van de nieuwe peilbuismetingen volgt dat lekkage langs het anker niet is uit te sluiten. Uit de tijdreeksanalyse volgt dat het zeer onwaarschijnlijk is. Uit het hydrochemisch onderzoek volgt dat waarschijnlijk lekkage optreedt. Dit op basis van de watermonsters uit de drainage in sectie F1-1, maar ook op basis van de correlatie tussen het watermonster uit de TZ met het freatische water. Tijdens de uitgevoerde visuele inspectie in februari 2023 is geen lekkage waargenomen.
- Locatie F1-1, raai 2, C: Lekkage (vernatting) langs de boorpaal naar maaiveld:
  - Op basis van de peilbuismetingen volgt dat een geringe lekkage mogelijk is. De gemiddelde stijghoogte ter plaatse van de boorpaal is iets hoger en er lijkt hier minder correlatie met neerslag te zijn dan op 2 m afstand, wat op lekkage zou kunnen duiden. Dit is echter onzeker door tegenstrijdige argumenten (zie Bijlage D.2.2.2). Uit de tijdreeksanalyse volgt dat lekkage onwaarschijnlijk is. De peilbuismetingen van ADCIM geven geen indicatie dat de kwel en vernatting door lekkage via de boorpalen of ankers tot stand komt. Tijdens de uitgevoerde visuele inspectie in februari 2023 is geen lekkage waargenomen. Totaalconclusie is dat lekkage langs de boorpaal niet is uit te sluiten.
- Locatie F2-2, raai 3, A: Hydraulische kortsluiting tussen de PL en de TZ:
  - Op basis van de peilbuismetingen volgt dat hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL aannemelijk is bij het anker en niet bij de boorpaal. De peilbuis in de TZ reageert sterk op het getij. Uit het hydrochemisch onderzoek volgt hydraulische kortsluiting onwaarschijnlijk is.
- Locatie F2-2, raai 3, B: Lekkage (vernatting) langs het anker naar maaiveld:
  - Uit het hydrochemisch onderzoek volgt dat het waarschijnlijk is dat de lekkage moet zijn veroorzaakt door grondwaterstroming vanuit het diepe zand langs het anker naar het maaiveld. Uit de peilbuismetingen volgt niet duidelijk dat vernatting als gevolg van lekkage uit het anker is opgetreden. Gezien de observaties tijdens de visuele inspectie van februari 2023 en de daarbij uitgevoerde debietmeting is lekkage vanuit de TZ via het anker naar de deksloof zeer waarschijnlijk.  
De bovenkant van de deksloof ligt op een hoogte van NAP – 0,90 m. De uitstroomopening van het anker gat in de deksloof ligt circa 0,25 m lager, op NAP – 1,15 m. Dit is lager dan de gemiddelde stijghoogte in de TZ, in de periode dat de lekkage is geconstateerd (gemiddeld NAP – 0,30 m tot – 0,80 m).

Samenvattend wordt geconcludeerd dat het zeer waarschijnlijk is dat de lekkage is veroorzaakt door grondwaterstroming vanuit het diepe zand langs het anker.

- Locatie F2-2, raai 3, C: Lekkage (vernatting) langs de boorpaal naar maaiveld:
  - Uit de tijdreeksanalyse volgt dat lekkage mogelijk is. Dit vooral op basis van peilbuis HB051PB01 omdat de respons op het Lekpeil daar sterk is terwijl peilbuis HM016PB01, die op circa dezelfde hoogte op 2 m afstand in het pakket slappe lagen staat, nauwelijks reactie vertoont. Dit is onzeker omdat het op basis van andere freatische peilbuizen in deze raai onwaarschijnlijk is dat lekkage optreed gezien de lage responsen.  
Uit de peilbuismetingen volgt dat de responsfactor in de TZ ter plaatse van de boorpaal kleiner is dan op de andere plaatsen in de TZ, terwijl de responsfactor in de PL geleidelijk afneemt in de richting van de polder. Dit zou kunnen duiden op enige lekkage langs de boorpaal naar het maaiveld. Tijdens de uitgevoerde visuele inspectie in februari 2023 is geen lekkage waargenomen. Totaalconclusie is dat lekkage langs de boorpaal niet is uit te sluiten.
- Locatie F2-2, raai 4, A: Hydraulische kortsluiting tussen de PL en de TZ:
  - Uit de peilbuismetingen volgt dat de responsen in de TZ en de PL erg veel van elkaar afwijken hetgeen in eerste instantie niet wijst op hydraulische kortsluiting tussen de PL en de TZ, maar tegelijkertijd sluit dit (een geringe) hydraulische kortsluiting ook niet uit. Laatst wordt eveneens ondersteund door de grondwaterstromingsanalyses met Plaxis.
  - Op basis van hydrochemisch onderzoek volgt evenwel dat hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL waarschijnlijk is bij de boorpaal.
- Locatie H2, raai 6, B: Lekkage (vernatting) langs het anker naar maaiveld:
  - Op basis van de tijdreeksanalyse volgt dat lekkage mogelijk is vooral op basis van peilbuis HB060PB01. De respons van deze peilbuis op het Lekpeil is hoog en het model is nauwkeurig. Totaalconclusie is dat lekkage langs het anker niet is uit te sluiten.

### **Conclusies invloed ten aanzien van Blow-outs**

Op locaties waar een blow-out tijdens de uitvoering heeft plaatsgevonden is het waarschijnlijk dat hydraulische kortsluiting zou zijn ontstaan tussen de TZ en de PL, als er een TZ aanwezig zou zijn. Zie ook Paragraaf 10.3.2 van het fase 2 rapport (Deltares, Januari 2022-1). Uit het afwijkingenregister van de aannemer (RAP-01186 Afwijkingenregister) blijkt dat dergelijke situaties niet zijn opgetreden. Enige melding is dat bij paal nr. 31 (sectie AB) het zogenoemde fietspomp-effect is opgetreden, doordat tijdens de uitvoering het zand omhoog is gezogen vanuit de pleistocene zandlaag. Op deze locatie is de TZ niet aangetroffen waardoor hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL niet kan zijn opgetreden. Zie ook (Deltares, Juli 2021), Paragraaf 2.4.4.5 en Tabel 2-9.

### **Conclusies invloed drinkwaterwinning Oasen**

De grondwateronttrekking van de drinkwaterwinning van Oasen te Nieuw Lekkerland heeft grote invloed op de stijghoogte in vooral de TZ en de PL. Dit is van belang voor bepaling van de stijghoogten bij WBN2023 en WNB2115 omdat bij deze extrapolaties naar WBN rekening dient te worden gehouden met een stopgezette drinkwaterwinning van Oasen. Dit is een beleidsmatige (en conservatieve) keuze voor de sterkteberekeningen van de palenwandconstructie die in onderdeel D zal worden uitgewerkt. Uit de analyse van de peilbuismetingen volgt voor raai 1 en 2 een gemiddelde stijghoogteverhoging in de TZ en de PL van circa 0,9 m als het onttrekkingsdebiet van 8000 naar 0 m<sup>3</sup>/d wordt verlaagd. Voor raai 3 en 4 is dit 0,7 m en voor raai 5 en 6 is dit 0,4 m. Opgemerkt wordt dat met behulp van de tijdreeksanalyse deze invloed ook is onderzocht waaruit nagenoeg dezelfde conclusie volgt.

De conclusies van het monitoringonderzoek (uit de verschillende deelonderzoeken) en grondwaterstromingsberekeningen (zie Hoofdstuk 5) voor wat betreft hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL en lekkage langs ankers en boorpaal naar het maaiveld worden in Hoofdstuk 6 overall beschouwd.

Omdat de invloed van de drinkwaterwinning op de stijghoogten in de TZ en de PL bij locatie F1-1 (de raaien 1 en 2) het grootst is wordt aanbevolen om deze locatie te kiezen voor nader onderzoek naar de waterveiligheid van de boorpalenwand.

## 5 Grondwaterstromingsberekeningen

Het onderzoek naar de lekkages en de vernatting is vooral aan de hand van de peilbuismetingen, grondwaterstromingsberekeningen en tijdreeksanalyses uitgevoerd. Dit met het doel de hypothesen voor de vernatting en hydraulische kortsluiting als gevolg van de boorpalenwand (zoals genoemd in Paragraaf 3.3) te onderbouwen. Dit hoofdstuk beschrijft de grondwaterstromingsberekeningen die zijn uitgevoerd.

In Paragraaf 5.1 wordt eerst het doel en de opzet van de berekeningen beschreven. De gehanteerde uitgangspunten en randvoorwaarden voor de berekeningen worden in Paragraaf 5.2 behandeld. Daarbij wordt tevens ingegaan op de gemaakte keuzes voor de berekeningsmodellen (Plaxis 2D, Extrapol en tijdreeksanalyse-software Pastas). In Paragraaf 5.3 zijn de berekeningsresultaten weergegeven. Eerst wordt ingegaan op de van de analyses met Plaxis 2D waarbij de verschillende hypothesen van vernatting en hydraulische kortsluiting zijn gemodelleerd en de invloeden daarvan op de stijghoogten in de TZ en de PL en hoogte van het freatisch vlak zijn bepaald. Vervolgens zijn de resultaten weergegeven van de extrapolaties naar WBN. Deze dienen namelijk te worden gehanteerd voor een berekening van de waterveiligheid van de boorpalenwand die in onderdeel D wordt behandeld.

De conclusies naar aanleiding van de berekeningsresultaten zijn in Paragraaf 5.4 weergegeven. Deze zijn onderverdeeld in de conclusies ten aanzien van de lekkages en hydraulische kortsluiting en ten aanzien van de extrapolatie naar WBN. Vervolgens wordt ingegaan op de uitgangspunten voor de Plaxis analyse ter bepaling van de waterveiligheid van de dijk met de boorpalenwand.

### 5.1 Opzet grondwaterstromingsberekeningen

#### 5.1.1 Doel van de grondwaterstromingsberekeningen

Het hoofddoel van de grondwaterstromingsberekeningen is om de veronderstelde hypothesen van vernatting en hydraulische kortsluiting (zie Paragraaf 3.3) te verifiëren. De grondwaterstromingsberekeningen geven daarmee een nadere onderbouwing van de conclusies over de oorzaak van de vernatting, die in Paragraaf 4.6 zijn gepresenteerd. De grondwaterstromingsberekeningen zijn zowel mét als zonder lekkages uitgevoerd waarmee de invloed van deze lekkages op de stijghoogten in vooral de TZ en de PL worden bepaald.

Daarnaast is bepaald welke grondwaterstanden en stijghoogten van het grondwater in de TZ en de PL optreden bij WBN en ontwerppeil en wat de invloed is van veronderstelde lekkages op de geëxtrapoleerde grondwaterstanden. Deze dienen namelijk te worden gehanteerd voor een berekening van de waterveiligheid van de boorpalenwand die in onderdeel D wordt behandeld. Hiermee wordt de invloed van eventuele lekkages langs de boorpalen en ankers op de (water)veiligheid van de constructie bepaald en vergeleken met het ontwerp van de aannemer. De extrapolaties zijn eerder door Wi+Bo in 2013 uitgevoerd ten behoeve van het ontwerp van de dijkversterking, zie (WSRL, 2013). Deze zijn later ook door de aannemer gebruikt voor het definitief ontwerp van de boorpalenwand.

De resultaten van de grondwaterstromingsberekeningen zijn weergegeven in Bijlage J. Tevens zijn de resultaten opgenomen in het digitale dossier. In Bijlage L is een overzicht gegeven van het digitaal dossier behorende bij dit rapport.

## 5.1.2 Opzet grondwaterstromingsberekeningen

In Bijlage J.2 is de opzet en aanpak van de uitgevoerde berekeningen in detail weergegeven. Er zijn diverse modellen gebruikt voor de analyses. Onderbouwing van de keuze van de modellen is in Bijlage J.3.1 weergegeven. In hoofdlijn is de volgende aanpak gevolgd.

### Plaxis 2D

Er zijn eerst berekeningen uitgevoerd waarmee de veronderstelde hypothesen van vernatting en hydraulische kortsluiting (zie Paragraaf 3.3) zijn geverifieerd. De berekeningen zijn uitgevoerd voor de locatie ter plaatse van F1-1 raai 2, om de volgende redenen:

- Op deze locatie is de meeste discussie ontstaan over de integriteit van boorpalenwand. Er zijn hier schademeldingen van wateroverlast en met betrekking van vervorming van panden gedaan.
- Hier is een TZ aanwezig waardoor een hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL een nadelige invloed kan hebben op de waterveiligheid van de boorpalenwand. Uit het onderzoek volgt dat in raai 2 het optreden van hydraulische kostsluiting en vernatting waarschijnlijk is (zie Paragraaf 4.6).
- Invloed van de grondwateronttrekking op de stijghoogten in de TZ en de PL is bij deze locatie het grootst (zie Paragraaf 4.3.2). In het uitvoeringsontwerp is vermoedelijk met deze invloed onvoldoende rekening gehouden.

De berekeningen zijn uitgevoerd met Plaxis 2D. Er is daarvoor een model opgezet van raai 2 (Locatie F1-1) en dat is gekalibreerd aan de betreffende peilbuismetingen. Alleen met dit model kunnen lekkages worden gemodelleerd. Voor de keuze van deze locatie wordt verwezen naar Paragraaf 5.2. Een overzicht van de berekeningen is als volgt:

- Voor de hypothesen A, B en C (zie Paragraaf 3.3) zijn de invloeden op de stijghoogten in de TZ en de PL en hoogte van het freatisch vlak bepaald voor de situatie onder dagelijkse omstandigheden. Hierbij zijn de berekeningen dus zowel met als zonder lekkages en hydraulische kortsluiting uitgevoerd. Met dit gekalibreerde model zijn vervolgens gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd waarbij o.a. de invloedsafstand van een hydraulische kortsluiting bij de boorpaal of het anker is onderzocht. Dit is o.a. van belang voor een herberekening van de waterveiligheid van de boorpalenwand die in onderdeel D wordt uitgevoerd.
- Vervolgens zijn met dit model simulaties uitgevoerd waarbij de stijghoogten in de watervoerende zandlagen de TZ en de PL zijn berekend als gevolg van een hoogwatergolf (WBN2023, WBN2115 en MHW2065). Hierbij is de simulatie zowel met als zonder hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL uitgevoerd. De invloed van de hydraulische kortsluiting dient namelijk te worden gebruikt voor een berekening van de waterveiligheid de boorpalenwand .

### Extrapol

Met een analytisch model in Excel (Extrapol) zijn voor alle raaien extrapolaties (simulaties) uitgevoerd waarbij de stijghoogten in de watervoerende zandlagen zijn berekend als gevolg van de eerdergenoemde hoogwatergolven. Dit is uitgevoerd voor de raaien 1 t/m 6. Met dit model kunnen geen lekkages worden gemodelleerd omdat slechts een zogenaamde 1D ondergrond bestaande uit een deklaag en een watervoerend zandpakket, kan worden gemodelleerd.

### Tijdreeksanalyses met Pastas

Tevens zijn simulaties uitgevoerd met de opensource tijdreeksanalyse-software Pastas, de modellen (per peilbuis wordt een tijdreeksmodel gemaakt) zijn beschreven in het rapport "Tijdreeksanalyse Lekdijk, update april 2024" (Artesia, 2024). Hierbij zijn de stijghoogten berekend als gevolg van een hoogwatergolf (WBN2023) waarbij de onttrekking van Oasen is uitgezet. Dit is uitgevoerd voor de raaien 1 t/m 6. Met deze modellen is de invloed van toekomstige lekkages niet meegenomen. Wel wordt rekening gehouden met de huidige mate van uitwisseling tussen de TZ en de PL en holoceen.

## 5.2 Uitgangspunten en beschouwing gemaakte keuzes

Voor de gehanteerde uitgangspunten en randvoorwaarden van de berekeningen wordt verwezen naar Bijlage J.3. De volgende gemaakte keuzes geven inzicht in de waarde van de resultaten:

- Plaxis voor locatie F1-1 raai 2:  
Alleen voor locatie F1-1 raai 2 zijn uitgebreide berekeningen met Plaxis uitgevoerd. Deze locatie is gekozen omdat hier, als gevolg van hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL, de grootste invloed op waterveiligheid mag worden verwacht en omdat de geometrie representatief is voor secties met een boorpalenwand laag in het talud. Locatie F2-2 kent ook een TZ, maar de hoogte van deze wand is echter uitzonderlijk laag (bovenkant op NAP + 0,50 m tot NAP – 0,90 m) in vergelijking met alle overige 13 secties met boorpalenwanden. Locatie F2-2 is daarmee minder representatief. Daarnaast is de meeste discussie over de boorpalenwand ontstaan bij sectie F1-1. Op de andere locatie bij sectie H2 is geen TZ aanwezig.  
Het hoofddoel van de Plaxis berekeningen is vooral om het effect en de invloed van hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL te bepalen. Uit de peilbuismetingen voor raai 1 en 2 (maar tot op zekere hoogte ook in de raaien 3 en 4) volgt dat de responsen van de peilbuizen toenemen met de afstand tot de dijk in polderwaartse richting. In Paragraaf 4.3.1 is aangegeven dat dit mogelijk wordt veroorzaakt door een geologische hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL of een dunnere tussenkleilaag (tussen de TZ en de PL) in het achterland. In basis is dit in Plaxis te modelleren. Omdat dit onzeker is en als kortsluiting aanwezig is, het onbekend is waar in het achterland dit zou zijn en omdat het voor het hoofddoel niet relevant is dit te modelleren is in het Plaxis model de tussenkleilaag ononderbroken gemodelleerd. Hierdoor is het Plaxis model minder geschikt voor de extrapolatie naar WBN, ook al is de implementatie in basis fysisch correct. Ter bepaling van het effect en de invloed van de lekkages en de hydraulische kostsluiting is dit model echter waardvol.
- Extrapol en tijdreeksanalyse met Pastas voor alle locaties:  
Voor de overige locaties inclusief F1-1 raai 2 zijn de analyses uitgevoerd met Extrapol en met de opensource tijdreeksanalyse-software Pastas. Met deze modellen kunnen geen lekkages worden gemodelleerd.  
Met Extrapol wordt een analytische oplossing berekend, zoals weergegeven in Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken (TAW 2004) in Bijlage B4.5. Hierbij wordt de stijghoogte in één zandpakket berekend in geval van tijdsafhankelijke stroming. Hierin kan één zandlaag worden gemodelleerd terwijl voor locatie F1-1 en F2-2 (raai 1 t/m 4) zowel een TZ als PL aanwezig is waardoor de resultaten voor deze raaien in basis minder bruikbaar zijn. Voor de extrapolatie in de TZ zijn de berekende stijghoogte te optimistisch (te laag) maar voor de PL zijn de resultaten enigszins te conservatief (maar veilig).
- Modelling hydraulische kortsluiting van de PL naar de TZ en lekkages/vernating langs boorpaal en anker:  
Alleen met het Plaxis-model zijn de lekkages te modelleren. Beperking van de gekozen aanpak is dat tweedimensionale berekeningen zijn uitgevoerd terwijl een lekkage langs de boorpaal of het anker een typisch driedimensionaal probleem is.



Het gevolg van de 2D-modellering is dat in de berekeningen ervan wordt uitgegaan dat alle boorpalen of alle ankers lekken. Dit is een conservatief uitgangspunt.

## 5.3 Resultaten berekeningen

De resultaten van de analyses zijn in detail in Bijlage J.4 weergegeven en in Bijlage J.5 samengevat. In deze paragraaf zijn enkele kenmerkende resultaten gegeven.

### 5.3.1 Invloed lekkages

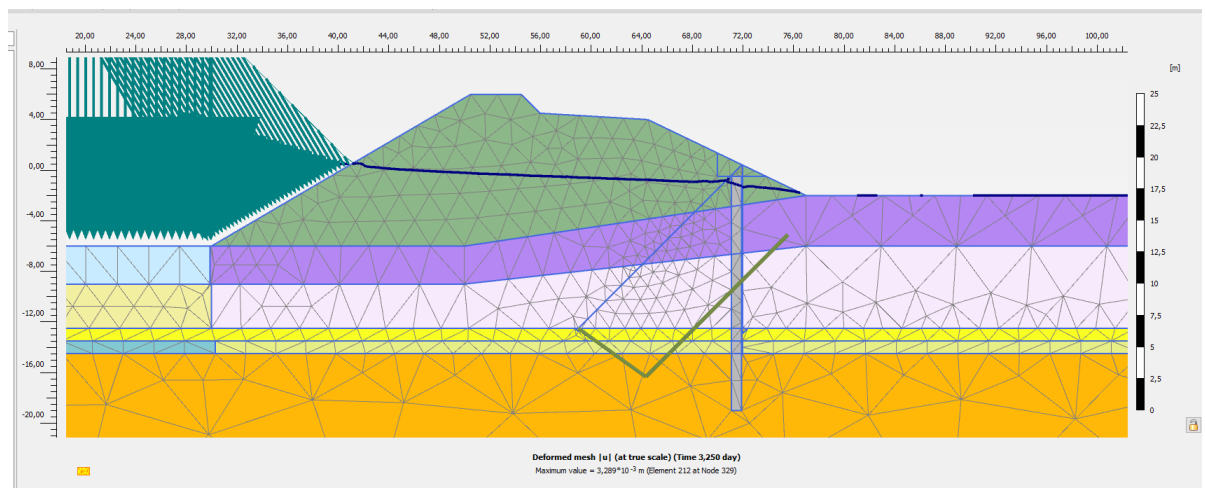
Met Plaxis 2D zijn voor raai 2 berekeningen uitgevoerd waarbij de verschillende hypothesen van vernatting en hydraulische kortsluiting zijn geverifieerd en de invloeden daarvan op de stijghoogten in de TZ en de PL en hoogte van het freatisch vlak zijn bepaald.

Hierbij is zoals aangegeven in Paragraaf J.3.6 onderscheid gemaakt in:

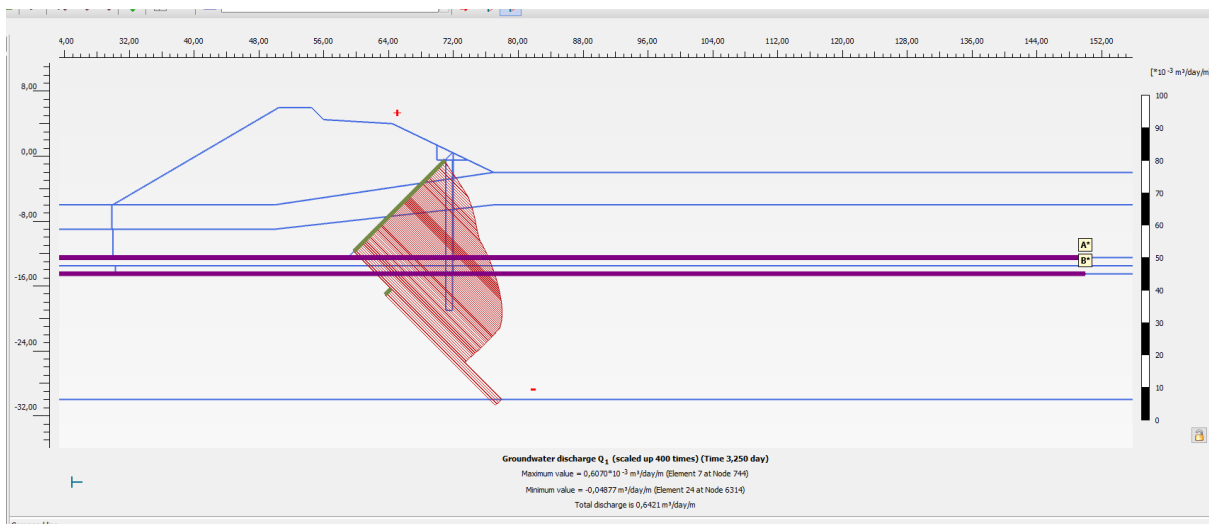
1. Modellering lekkage/vernatting rond het anker van de TZ naar de deksloof.
2. Modellering lekkage/vernatting langs de boorpaal van de TZ naar de deksloof.
3. Modellering hydraulische kortsluiting langs de boorpaal van de PL naar de TZ.

#### 1. Lekkage/vernatting rond het anker van de TZ naar de deksloof (zie Bijlage J.4.1.2)

Als voorbeeld van deze invloed is in Figuur 19 de invloed van een lekkage bij het anker op de verandering van de hoogte van het freatisch vlak gegeven. Hieruit volgt dat als gevolg van de lekkage het freatisch vlak lokaal tot op enkele meters rond de deksloof is verhoogd met 0,25 m van NAP – 1,05 m tot circa NAP – 0,80 m (zie Figuur 19), uitgaande van een open spleet (geen zand). Het debiet bedraagt 0,64 m<sup>3</sup>/dag/m (zie Figuur 20).



Figuur 19: Berekende hoogte freatisch vlak (donkerblauwe lijn) van NAP – 0,80 m (Plaxis file Detailed Model raai 2 v23) lokaal ter plaatse van de deksloof bij dagelijkse omstandigheden en gemiddeld getij.



Figuur 20: Berekende debiet van  $0,64 \text{ m}^3/\text{dag}/\text{m}$  (Plaxis file Detailed Model raai 2 v23) langs het anker bij dagelijkse omstandigheden en gemiddeld getij.

## 2. Lekkage/vernatting langs de boorpaal van de TZ naar de deksloof

Op soortgelijke wijze is ook de invloed van een lekkage bij de boorpaal op de verandering van de hoogte van het freatisch vlak gegeven. Voor de resultaten van deze analyses wordt verwezen naar Bijlage J.4.1.2.

Voor dit geval, waarbij lekkage langs de boorpaal van de TZ naar de deksloof is gemodelleerd, is een vergelijkbare verhoging van het freatisch vlak berekend, namelijk  $0,3 \text{ m}$  van NAP –  $1,05 \text{ m}$  tot circa NAP -  $0,75 \text{ m}$  uitgaande van een open spleet (geen zand). Het debiet bedraagt dan  $0,74 \text{ m}^3/\text{dag}/\text{m}$ .

## 3. Modellerings hydraulische kortsluiting langs de boorpaal van de PL naar de TZ

Voor de resultaten van deze analyses wordt ook verwezen naar Bijlage J.4.1.2. Als gevolg van de hydraulische kortsluiting wordt geen verhoging van het freatisch vlak berekend. Wel wordt vooral de stijghoogte in de TZ verhoogd. Uit de berekeningen volgt dat ter plaatse van de boorpaal de gemiddelde stijghoogte in de TZ tot  $13 \text{ cm}$  is toegenomen t.o.v. de situatie zonder hydraulische kortsluiting (voor de gevallen met losgepakt zand en water in de spleet). De amplitude van de stijghoogte in de TZ (reactie op het getij) is toegenomen van  $0,08 \text{ m}$  naar  $0,21 \text{ m}$ .

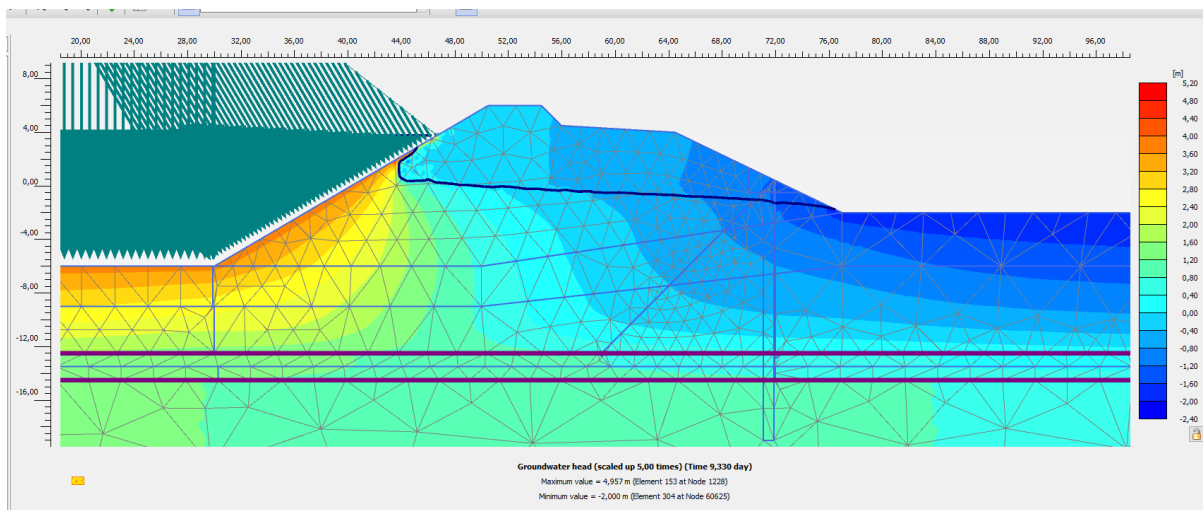
Uit de berekeningsresultaten volgt dat op een afstand van circa  $20 \text{ m}$  voor en  $20 \text{ m}$  na de boorpaal (de boorpaal staat op  $x=72 \text{ m}$ ) circa  $20\%$  stijghoogteverschil merkbaar is t.o.v. de situatie zonder hydraulische kortsluiting.

### 5.3.2 Extrapolatie naar WBN

Met de diverse rekenmodellen zijn simulaties/extrapolaties uitgevoerd voor de raaien 1 t/m 6 waarbij de stijghoogten in de TZ en de PL zijn berekend als gevolg van een hoogwatergolf (WBN2023, WBN2115 en MHW2065). Als voorbeeld zijn de resultaten gegeven voor de extrapolatie in raai 2 voor Plaxis, Extrapol en met de tijdreeksanalyse in Pastas. Voor de resultaten van de overige raaien 1 en 3 t/m 6, wordt verwezen naar Bijlage J.5.2.

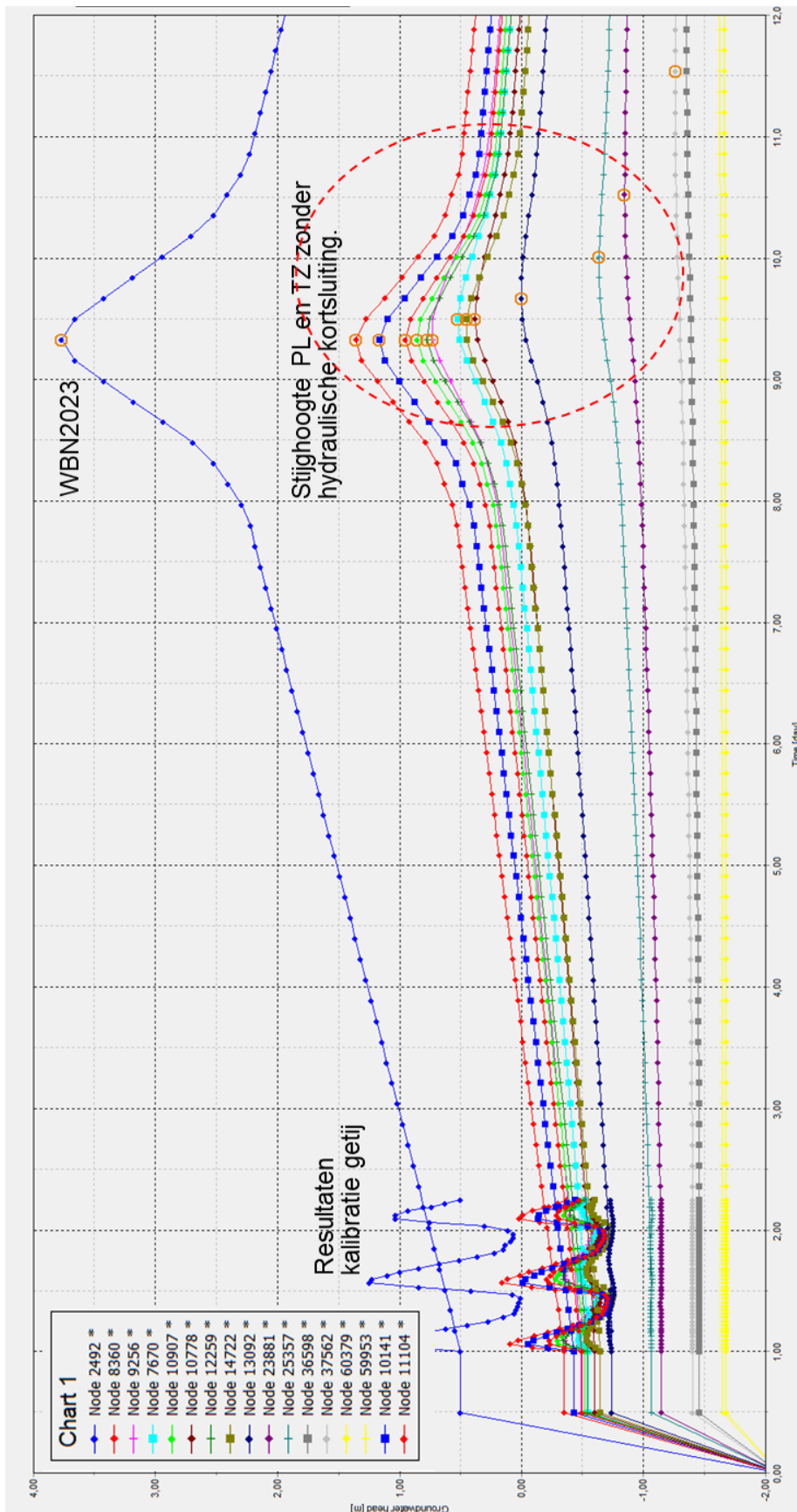
#### Extrapolatie voor WBN2023 met Plaxis (raai 2)

Als voorbeeld is navolgend het resultaat weergegeven van de extrapolatie naar WBN2023 met het Plaxis-2D model. Dit is voor raai 2 uitgevoerd. Dit is zowel gedaan voor de situatie zonder als met hydraulische kortsluiting tussen TZ en PL. De hoogte van het freatisch vlak zonder hydraulische kortsluiting ter plaatse van de boorpaal is NAP –  $1,05 \text{ m}$ . Als gevolg van de hydraulische kortsluiting blijft het freatisch vlak nagenoeg onveranderd.



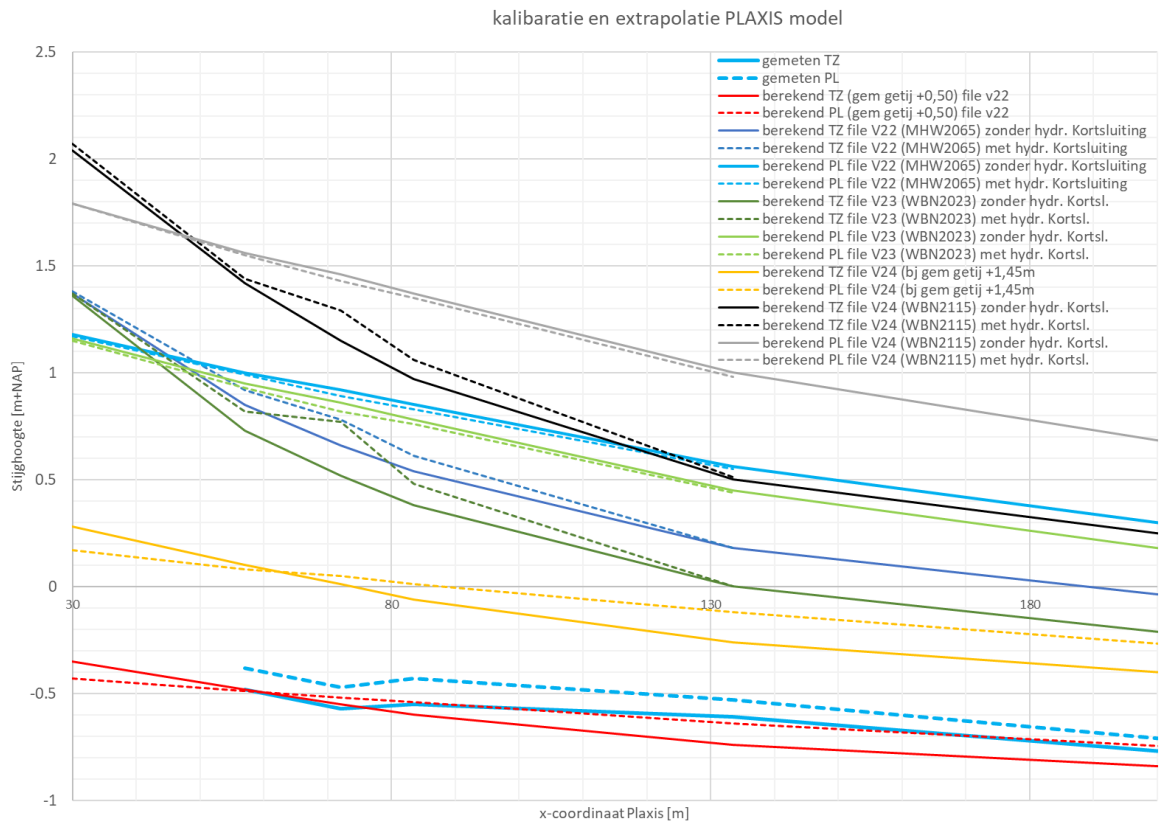
Figuur 21 Plaxis berekening WBN2023. Berekende hoogte freatisch vlak (donkerblauwe lijn) is NAP – 1,05 m. (Plaxis file Detailed Model raai 2 v23). Scenario zonder hydraulische kortsluiting.

In Figuur 22 zijn de berekende stijghoogten in de TZ en de PL gegeven zonder hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL. Op de horizontale as is de tijd weergegeven en op de verticale as de stijghoogte. De verschillende lijnen geven de berekende stijghoogten in de TZ en de PL.



Figuur 22 Plaxis berekening WBN2023. Berekende stijghoogten in de TZ en de PL zonder hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL (Plaxis file Detailed Model raai 2 v23).

In Figuur 23 zijn de resultaten in grafiekvorm weergegeven waarbij op de horizontale as de x-coördinaat (Plaxis-model) is gegeven ( $X = 22$  m komt overeen met de locatie van de boorpaal) en op de y-as de berekende stijghoogten voor de verschillen hoogwatergolven (WBN2023, WBN2115 en MHW2065). Dit zowel voor het scenario met hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL (gestippelde lijn) en voor het scenario zonder hydraulische kortsluiting (doorgetrokken lijn).



*Figuur 23 Samenvatting berekeningsresultaten raai 2 voor extrapolatie (simulatie) naar WBN2023, WBN2115 en MHW2065.*

Verder volgt uit de berekeningen dat bij WBN een indringdiepte wordt berekend van 4,0 m. De indringdiepte is de verticale afstand waarover in slappe lagen (in dit geval vanaf de bovenzijde van de TZ) door het optreden van een hoogwatergolf de waterspanning worden verhoogd.

**Extrapolatie voor WBN2023 met Extrapol (raai 2):**

Als voorbeeld is in Figuur 24 het berekeningsresultaat van de extrapolatie weergegeven voor de TZ in raai 2. Voor de PL is het resultaat in Figuur 25 weergegeven. Hiervoor is de peilbuisdata van 10-05-2023 tot 11-05-2023 gebruikt waarbij de drinkwaterwinning gemiddeld 3419 m<sup>3</sup>/dag was. Uit de berekening volgt dat de stijghoogte bij WBN2023 ter plaatse van de boorpaal ( $x=22$ m) in de TZ NAP + 0,44 m is. (Merk op dat met Plaxis voor deze situatie NAP + 0,52 m is berekend (zie Tabel 34). In de PL is hier stijghoogte van NAP + 1,49 m berekend. (Merk op dat met Plaxis voor deze situatie NAP + 0,86 m is.

Extrapolatie stijghoogte m.b.v. peilbuiswaarnemingen							
Traject : KiS Raai 2 Tussenzandlaag, data 10-05-2023 tot 11-05-2023							
<b>Geometrie gegevens</b>			<b>Meetgegevens</b>			<b>Kalibratie</b>	
afstand uit buitenkruinlijn van de dijk			rivier			lambda meting	
peilbuis 1	22	m	stationair deel	0,51	m	stationair	1495
peilbuis 2	34	m	amplitude	0,58	m	amplitude	208
peilbuis 3	84	m	duur amplitude	0,26	dagen		
intreepunt uit de as van de dijk			peilbuizen stijghoogte t.o.v. NAP			calibratie respons	
stationair	800	m	stationair deel pb 1	-0,61	m	-0,60	m
amplitude	500	m	stationair deel pb 2	-0,60	m	-0,61	m
<b>M.H.W. gegevens</b>			stationair deel pb 3	-0,67	m	-0,66	m
golf 1			peilbuizen respons			calibratie respons	
duur	16,7	dagen	amplitude peilbuis 1	0,035	m	0,047	m
amplitude	1,74	m	amplitude peilbuis 2	0,041	m	0,044	m
golf 2			amplitude peilbuis 3	0,045	m	0,035	m
duur	1,88	dagen	randvoorwaarde polderzijde t.o.v. NAP			<b>lambda M.H.W.</b>	
amplitude	1,52	m	stijghoogte	-2,12	m	golf 1	588
<b>Potentiaalverloop bij M.H.W. zonder opdrijven</b>						golf 2	340
						WBN	3,77
bijdrage	stijghoogte op [m] uit as van de dijk						
	-20	7	22	34	84	350	700
stationair	-0,56	-0,59	-0,60	-0,61	-0,66	-0,90	-1,16
golf 1	0,77	0,73	0,72	0,70	0,64	0,41	0,23
golf 2	0,37	0,34	0,33	0,32	0,27	0,13	0,04
totaal	0,58	0,49	0,44	0,40	0,25	-0,37	-0,89

Figuur 24: Berekeningsresultaat Extrapol voor extrapolatie (simulatie) naar WBN2023 voor de TZ voor periode 10-05-2023 tot 11-05-2023.

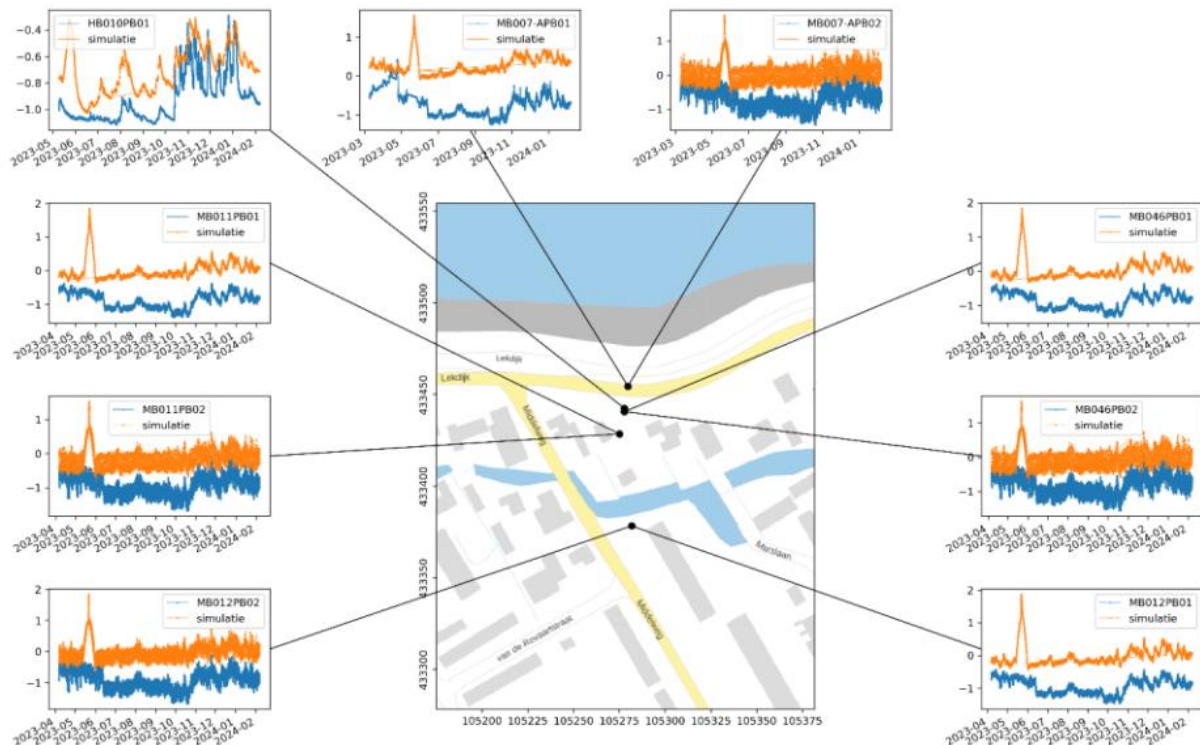
Extrapolatie stijghoogte m.b.v. peilbuiswaarnemingen							
Traject : KiS Raai 2 Pleistocene zandlaag, data 10-05-2023 tot 22-05-2023							
<b>Geometrie gegevens</b>			<b>Meetgegevens</b>			<b>Kalibratie</b>	
afstand uit de as van de dijk			rivier			lambda meting	
peilbuis 1	21	m	stationair deel	0,51	m	stationair	1632
peilbuis 2	34	m	amplitude	0,58	m	amplitude	408
peilbuis 3	84	m	duur amplitude	0,26	dagen		
intreepunt uit de as van de dijk			peilbuizen stijghoogte t.o.v. NAP			calibratie respons	
stationair	800	m	stationair deel pb 1	-0,55	m	-0,53	m
amplitude	400	m	stationair deel pb 2	-0,51	m	-0,54	m
<b>M.H.W. gegevens</b>			stationair deel pb 3	-0,60	m	-0,59	m
golf 1			peilbuizen respons			calibratie respons	
duur	16,7	dagen	amplitude peilbuis 1	0,207	m	0,21	m
amplitude	1,74	m	amplitude peilbuis 2	0,200	m	0,20	m
golf 2			amplitude peilbuis 3	0,178	m	0,18	m
duur	1,88	dagen	randvoorwaarde polderzijde t.o.v. NAP			<b>lambda M.H.W.</b>	
amplitude	1,52	m	stijghoogte	-2,12	m	golf 1	1156
<b>Potentiaalverloop bij M.H.W. zonder opdrijven</b>						golf 2	669
						WBN	3,77
bijdrage	stijghoogte op [m] uit as van de dijk						
	-20	7	22	34	84	350	700
stationair	-0,49	-0,52	-0,53	-0,54	-0,59	-0,82	-1,07
golf 1	1,25	1,22	1,21	1,20	1,15	0,91	0,67
golf 2	0,86	0,83	0,81	0,80	0,74	0,50	0,29
totaal	1,62	1,53	1,49	1,45	1,29	0,58	-0,11

Figuur 25: Berekeningsresultaat Extrapol voor extrapolatie (simulatie) naar WBN2023 voor de PL voor periode 10-05-2023 tot 11-05-2023.



## Extrapolatie voor WBN2023 met tijdreeksanalyse-software Pastas. (raai 2)

Als voorbeeld is in Figuur 26 het berekeningsresultaat van de simulatie weergegeven voor de TZ en de PL in raai 2.



Figuur 26: Berekeningsresultaten simulatie WBN2023 voor raai 2 voor de TZ en de PL. Zonder onttrekking van Oasen (de blauw lijn geeft de gemeten stijghoogte en de oranje lijn de simulatie).

Uit de berekening in raai 2 volgt dat de stijghoogte bij WBN2023 ter plaatse van de boorpaal in de TZ NAP + 1,84 m is (zie peilbuis MB046PB01 in Figuur 26). In de PL is hier een stijghoogte van NAP + 1,63 m berekend (zie peilbuis MB046PB02 in Figuur 26). Met Pastas wordt in raai 2 op 15 m van de boorpaal richting de polder een fors lagere stijghoogte in de PL berekend van NAP +1.54 m. Dit is onlogisch omdat hier een wat hogere stijghoogte wordt verwacht, maar een verklaring hiervoor is niet gevonden. De overige berekening resultaten met Pastas zijn betrouwbaar en in lijn der verwachting.

### Samenvatting resultaten extrapolaties raai 2

In Tabel 7 zijn de resultaten gegeven van de extrapolaties met de verschillende modellen voor raai 2. De berekeningsresultaten (stijghoogten) zijn gecorrigeerd voor de grondwateronttrekking van Oasen, dat wil zeggen geen grondwateronttrekking. Voor de resultaten van de overige raaien wordt verwezen naar de tabellen in Bijlage J.5.2. De geohydrologische situatie met de aanwezigheid van een tussenzandlaag bij raai 1 en 2 is complex. Met de verschillende modellen worden verschillende resultaten berekend. Daarnaast wordt opgemerkt dat bij het uitvoeren van extrapolaties de onzekerheid sowieso groot is omdat de meetresultaten ver verwijderd zijn van de hoogwater situatie waarvoor de stijghoogten benodigd zijn.

Opmerkingen bij de tabellen:

- Met een gele arcering zijn de stijghoogten gemarkeerd zoals berekend in de TZ ter plaatse van de boorpaal en op circa 15 m afstand richting de polder. Met een oranje markering is hetzelfde gedaan voor de stijghoogten in de PL. Dit zijn namelijk de locaties die het meest belangrijk zijn voor de sterkteberekening van de boorpalenwand.

- In de tabellen zijn ook de door de aannemer geëxtrapoleerde en gehanteerde stijghoogten weergegeven en oranje gearceerd (laatste 2 kolommen).

Tabel 7: Resultaten extrapolaties raai 2.

locatie	Afstand vanaf buitenkruin [m]	Extrapolatie						Ontwerp aannemer	
		WBN2023 =NAP+3,77m		WBN2115 =NAP+4,72m		MHW2065 =NAP +3,60	MHW2115 =NAP +4,26m	2065 dagelijks	2115 dagelijks
		TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	PL [m+NAP]	PL [m+NAP]		
Extrapol mei en juni 2023									
	-20.0	0.94	2.01	1.60	2.82	2.08			
circa anker	7.0	0.85	1.90	1.49	2.70	1.98			
boorpaal	21.0	0.80	1.84	1.43	2.64	1.93			
14,5m uit boorpaal	33.5	0.76	1.79	1.39	2.59	1.89			
	83.5	0.61	1.61	1.21	2.39	1.72			
Extrapol december 2023									
	-20.0	1.14	2.11	1.77	2.95	2.09			
circa anker	7.0	1.06	2.00	1.68	2.82	1.99			
boorpaal	21.0	1.01	1.93	1.63	2.75	1.93			
14,5m uit boorpaal	33.5	0.98	1.89	1.59	2.75	1.89			
	83.5	0.85	1.69	1.21	2.59	1.71			
Ontwerp aannemer zie BIND-B Nota Technische uitgangspunten									
	-30.0				2.23	2.59			
circa anker	5.0				2.14	2.49			
boorpaal	20.0				2.10	2.45			
14,5m uit boorpaal	30.0				2.07	2.42			
	70.0				1.97	2.31			
Plaxis									
	-20.0	1.66	1.46	2.34	2.09	1.48	2.09		
circa anker	7.0	1.03	1.25	1.72	1.86	1.30	1.86		
boorpaal	21.0	0.82	1.16	1.45	1.76	1.22	1.76		
14,5m uit boorpaal	33.5	0.68	1.08	1.27	1.67	1.15	1.67		
	83.5	0.30	0.75	0.80	1.30	0.86	1.30		
Plaxis met hydr kortsluiting									
	-20.0	1.67	1.45	2.37	2.09				
circa anker	7.0	1.12	1.23	1.74	1.85				
boorpaal	21.0	1.07	1.12	1.59	1.73				
14,5m uit boorpaal	33.5	0.78	1.06	1.36	1.65				
	83.5	0.30	0.74	0.81	1.28				
PASTAS Artesia Water (data t/m okt 2023)									
	-20.0								
circa anker	7.0		1.39						
boorpaal	21.0	1.18	1.26						
14,5m uit boorpaal	33.5	1.34	1.02						
	83.5	1.59	1.21						
PASTAS Artesia Water (data t/m febr 2024)									
	-20.0								
circa anker	7.0	1.57	1.75	2.08	2.27				
boorpaal	21.0	1.84	1.63	2.52	2.17				
14,5m uit boorpaal	33.5	1.85	1.54	2.57	2.27				
	83.5	1.87	1.84	2.57	2.37				

## 5.4 Conclusie berekeningen

### 5.4.1 Conclusies lekkages en hydraulische kortsluiting

De conclusies naar aanleiding van de berekeningsresultaten zijn weergegeven in Bijlage J.5.1. Navolgend zijn de belangrijkste conclusies weergegeven. Hierbij is onderscheid gemaakt in:

- Lekkage/vernatting langs boorpaal van de TZ naar deksloof.
- Lekkage/vernatting rond het anker van de TZ naar deksloof.
- Hydraulische kortsluiting langs boorpaal van de PL naar de TZ.

#### 1 en 2 Modelleren lekkage/vernatting langs boorpaal en anker van de TZ (of van de PL als geen TZ aanwezig is) naar deksloof

Uit de berekeningen in raai 2 voor lekkage/vernatting langs boorpaal of het anker van de TZ naar deksloof volgt dat de lekkagedebieten variëren tussen 0,45 en 0,85 m<sup>3</sup>/dag per strekkende meter dijk. Het freatisch vlak stijgt als gevolg van deze lekkages in de berekeningen met maximaal 0,3 m van NAP – 1,05 m tot NAP – 0,75 m en is volgens de berekening alleen in de directe omgeving binnen enkele meters rond de deksloof merkbaar, zie Paragraaf 5.3.1.

Bij de berekening is ervan uitgegaan dat alle ankers of alle boorpalen lekken (2D) en is derhalve conservatief. Het invloedsgebied van de lekkage is aanmerkelijk kleiner dan het gebied waarin de hoogte van het freatisch vlak invloed heeft op de stabiliteit van de dijk (stabiliteitsgebied).

In het ontwerp is het niet nodig om rekening te houden met lekkages (hypothese B en C ofwel 3 en 4 volgens Paragraaf 3.3.1).

In het ontwerp is het wel van belang om de invloed van de boorpalenwand op de omgeving mee te nemen zoals in het oorspronkelijke ontwerp ook is gedaan (zie CDVM, Juli 2016 en CDVM, Oktober 2016). Dit betreft de invloed zoals bij hypothese 1 (volgens Paragraaf 3.3.1) is beschreven. Hieruit volgde een invloed ter plaatse van de wand van minder dan 0,25 m en bij de woningen minder dan 0,05 m. Deze verhoging van het freatisch vlak van 0,25 m is in het ontwerp meegenomen.

Voor berekening van de waterveiligheid van de boorpalenwand is het dus voldoende om alleen uit te gaan van de verhoging van het freatisch vlak van 0,25 m.

Opgemerkt wordt dat, tijdens de ontgravingswerkzaamheden ten behoeve van het plaatsen van de monitoring in raai 3, lekkage langs het anker is waargenomen (Deltares, Mei 2023). Het gemeten debiet (uit één anker met h.o.h. afstand van 2,14 m) was circa 0,3 m<sup>3</sup>/d. Ook vanuit het uitgevoerde hydrochemisch onderzoek volgt dat het zeer waarschijnlijk is dat lekkage vanuit de TZ naar maaiveld via het anker plaatsvindt. Dit debiet is een factor 2 lager dan berekend met Plaxis-2D maar heeft gezien dit relatief geringe verschil dezelfde orde van grootte.

In de berekeningen is de stijging van het freatisch vlak en de omvang daarvan (enkele meters rondom de lekkage) beperkt. Deze vernatting kan in een werkelijke situatie groter zijn door de aanwezigheid van inhomogene ondergrond en gestructureerde toplagen. Het debiet lijkt in eerste instantie gering maar kan vooral door het continue karakter van de afstroming over het talud of door stroming door het dijklichaam en ondergrond voor wateroverlast zorgen. Anderzijds kan de klei-aanvulling rondom het anker ervoor zorgen dat de effecten op de omgeving beperkt zijn. In het waargenomen geval van een lekkend anker in raai 3 is geconcludeerd dat het invloedsgebied door de klei-aanvulling zeer beperkt was en niet tot meldingen van vochtschade heeft geleid.

Opgemerkt wordt dat het debiet en de ligging van het freatisch vlak bij langdurig hogere waterstanden (denk aan enkele weken hoogwater) hoger zal zijn. Dit is een tijdelijke situatie, geen structurele verandering en daardoor niet van belang voor het bepalen van (langduriger) vernatting.

### **3 Hydraulische kortsluiting langs boorpaal van de PL naar de TZ**

Met Plaxis is het effect en invloedsgebied van een hydraulische kortsluiting tussen PL en TZ onderzocht. Ter plaatse van de hydraulische kortsluiting neemt de stijghoogte in de TZ toe tot maximaal de stijghoogte in de PL (zonder kortsluiting). Het invloedsgebied van een hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL is vrij groot. Uit de analyses volgt dat op 20 m afstand een stijghoogteverandering van het getij van 20% merkbaar is.

De stijghoogteverandering is vooral merkbaar in de TZ. De stijghoogte in de PL verandert nauwelijks. Dit kan worden verklaard door de geringe dikte van de TZ (gemiddeld 1 m) ten opzichte van de dikte van de PL (circa 15 m). Als gevolg van het optreden van langdurig hoogwater zal zowel de stijghoogteverandering en de grootte van het invloedsgebied toenemen (zie Paragraaf 5.4.2).

Door volledige hydraulische kortsluiting kan de stijghoogte in de TZ maximaal de stijghoogte in het PL worden. De relatief langdurig hoge lekwaterstanden afgelopen winter lieten zien dat de druk in de TZ zich makkelijker opbouwt dan in het PL. Dit komt de door de lagere transmissiviteit van de TZ. Het gevolg is dat bij de extrapolatie naar WBN de stijghoogte in de

TZ hoger is dan het PL. Hierdoor is het effect van hydraulische kortsluiting op waterveiligheid zeer beperkt.

De invloed van hydraulische kortsluiting beperkt zich tot de diepere watervoerende lagen en heeft geen invloed op de hoogte van het freatisch vlak en dus ook op vernatting/verdroging.

De berekening is twee dimensionaal opgesteld waarmee de invloed berekend wordt alsof ter plaatse van alle boorpalen (of alle ankers) lekkage of hydraulische kortsluiting optreedt. De verhoging van de stijghoogten in de TZ, verhoging van het freatisch vlak of de vernatting (debiet) zijn in werkelijkheid lager. Met deze berekeningen wordt een bovengrensbepaling gevolgd.

#### 5.4.2 Conclusies extrapolatie WBN2023 en WBN2115

Een samenvatting van alle berekeningsresultaten en de conclusies naar aanleiding van de berekeningsresultaten zijn weergegeven in Bijlage J.5.2. Navolgend zijn de belangrijkste conclusies weergegeven.

##### Hoogte freatisch vlak:

- WBN2023:  
Het Plaxis model geeft een realistische inschatting van de hoogte van het freatisch vlak onder dagelijkse omstandigheden ter plaatse van de boorpaal. Model en veldwaarnemingen komen goed overeen. De hoogte van het freatisch vlak ter plaatse van de boorpaal tijdens WBN2023 is met Plaxis berekend op NAP – 1,05 m (zie Figuur 127 in Paragraaf J.4.1.3) en daarmee verandert de hoogte van het freatisch vlak nauwelijks ten opzichte van dagelijks omstandigheden. Aangezien de dijk uit vrij ondoorlatende klei bestaat is dit goed verklaarbaar en sluit aan bij de ervaringen in dit gebied.
- WBN2115:  
Door zeespiegelstijging zal de gemiddelde rivierwaterstand met circa 0,95 m gestegen zijn in 2115. Dit heeft invloed op de hoogte van het freatisch vlak onder dagelijkse omstandigheden. De modelberekening (zie Figuur 127 in Paragraaf J.4.1.3) verwacht een stijging ter plaatse van de boorpaal 0,45 m tot een niveau van NAP -0,60 m. Hieruit kan worden afgeleid dat in de komende decennia er rekening mee gehouden moet worden dat ook door autonome ontwikkelingen vernatting mogelijk is, ongeacht of er sprake is van lekkage langs anker/boorpaal.
- Invloed hydraulische kortsluiting:  
Hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL heeft geen invloed op de ligging van het freatisch vlak.
- Lekkage langs anker /boorpaal:  
In de ontwerpberoeeningen van de boorpalenwand is rekening gehouden met een conservatieve aanname van de hoogte van het freatisch vlak (zie CDVM, Juli 2016 en CDVM, Oktober 2016). Ter plaatse van de boorpaal is uitgegaan van een verhoging van 0,25 m en bij de woningen minder dan 0,05 m (zie Paragraaf 5.4.1 onder punt 1 en 2). Hierbij is geen rekening gehouden met lekkage langs de boorpalenwand. Lekkage langs anker/boorpaal heeft wel effect op het freatisch vlak ter plaatse van de deksloof. Uit de modelmatige berekeningen volgt dat moet rekening moet worden gehouden met een stijging van 0,30 m, maar dit is alleen in de binnen enkele meters rond de deksloof merkbaar. Zoals in Paragraaf 5.4.1 is weergegeven behoeft met deze invloed geen rekening te worden gehouden. Voor berekening van de waterveiligheid van de boorpalenwand is het dus voldoende conservatief om alleen uit te gaan van de verhoging van het freatisch vlak van 0,25 m.

### **Stijghoogten PL en TZ (zonder hydraulische kortsluiting):**

- Verschil stijghoogte tussen TZ en PL:  
Uit de peilbuismetingen en de grondwaterstromingsberekeningen volgt dat het stijghoogteverschil tussen de TZ en de PL onder dagelijkse omstandigheden gering is, tot circa 10 cm ter plaatse van de boorpaal en het anker.  
Onder maatgevende omstandigheden neemt dit verschil toe tot circa 0,3 m.  
Door de geringe dikte van de tussenkleilaag tussen de TZ en de PL én de relatieve lange tijdsduur van een hoogwater is er meer uitwisseling tussen beide zandlagen. Hierdoor mag verwacht worden dat de stijghoogten in de TZ en PL dichter bij elkaar komen te liggen. Het Extrapol model houdt geen rekening met deze interactie en onderschat daarmee de geëxtrapolerde stijghoogte in de TZ. Plaxis en Pastas houden (impliciet) wel rekening met deze interactie.

### **Vergelijking MHW2065 Extrapol en extrapolatie door de aannemer t.b.v. ontwerp**

De berekende stijghoogten voor MHW2065 zijn vergeleken met de door de aannemer uitgevoerde extrapolaties ten behoeve van het ontwerp:

- Als de resultaten met Extrapol worden vergeleken met de resultaten van de aannemer (zie 7<sup>e</sup> kolom in de tabellen) volgt dat voor de raaien 1 t/m 4 vergelijkbare stijghoogten worden berekend in de PL. Door de aannemer zijn geen extrapolaties uitgevoerd voor de TZ en is voor de sterkteberekeningen van de boorpalenwand, in de TZ uitgegaan van de berekende stijghoogten in PL.
- Voor de raaien 5 en 6 is het verschil groter waarbij met Extrapol circa 0,4 m hogere stijghoogten in de PL worden berekend dan de aannemer voor de situatie bij MHW2065. Omdat hier geen TZ aanwezig is, zijn de stijghoogten die door de aannemer zijn gehanteerd minder conservatief dan in het dit rapport weergegeven en berekende waarden.
- Door zeespiegelstijging zullen de stijghoogten in de TZ en de PL onder dagelijks omstandigheden in de toekomst toenemen. Hierdoor wordt de sterkte vooral in de onderzijde van de deklaag lager ten opzichte van de huidige situatie. Deze invloed zal worden meegenomen in de sterkteberekening (waterveiligheid) van de boorpalenwand die in onderdeel D wordt uitgevoerd.

### **Stijghoogten PL en TZ (met hydraulische kortsluiting):**

- Verandering stijghoogte TZ door hydraulische kortsluiting:  
De verhoging van de stijghoogte in de TZ ter plaatse van de hydraulische kortsluiting is gelimiteerd tot de stijghoogte in de PL.  
Bij normaal gepakt zand in de spleet is de toename van de stijghoogte in de TZ circa 75% van het verschil tussen de stijghoogte in de TZ en de PL zonder kortsluiting (berekend met Plaxis voor raai 2).
- Verandering stijghoogte in de PL door hydraulische kortsluiting:  
De stijghoogteverandering is vooral merkbaar in de TZ. De stijghoogte in de PL verandert nauwelijks. Dit kan worden verklaard door de geringe dikte van de TZ (gemiddeld 1 m) t.o.v. de dikte van de PL (circa 15 m). Als gevolg van het optreden van langdurig hoogwater zal zowel de stijghoogteverandering en de grootte van het invloedgebied toenemen. Voor raai 2 is deze invloed met Plaxis gekwantificeerd en in Paragraaf 5.4.1 weergegeven.
- Invloedgebied:  
Door hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL zal vooral de stijghoogte in de TZ hoger worden. Uit de Plaxis berekeningen volgt dat het invloedgebied bij het optreden van langduriger hoogwaterstanden groter is dan het gebied vanaf 20 m voor tot 20 m na de boorpaal en daarmee groter dan het gebied waarin de stijghoogten in de TZ invloed hebben op de stabiliteit van de dijk (stabiliteitsgebied). Hierdoor zal dit een negatieve invloed hebben op de mate van stabiliteit van de boorpalenwand.



- Invloed 3D:  
In de hier uitgevoerde Plaxis berekeningen is de hydraulische kortsluiting twee dimensionaal gemodelleerd. Daarmee simuleren de berekeningsresultaten het geval dat ter plaatse van alle boorpalen of alle ankers hydraulische kortsluiting optreedt. Dit is een conservatieve aanname. De werkelijke verandering van stijghoogte in de TZ zal hierdoor geringer zijn.

#### 5.4.3 **Uitgangspunten voor analyse waterveiligheid boorpalenwand in raai 2 (locatie F1-1) in onderdeel D**

In deze paragraaf worden de achtergronden en uitgangspunten voor de waterspanningen weergegeven ten behoeve van de analyse (met Plaxis) van de waterveiligheid, die in onderdeel D wordt behandeld.

##### **Stijghoogten in TZ en PL:**

Ter bepaling van de stijghoogten onder maatgevende omstandigheden (WBN2023 en WBN2115) zijn verschillende modellen gebruikt, namelijk Plaxis, Extrapol en Pastas.

Geconcludeerd wordt dat de geohydrologische situatie met de aanwezigheid van een tussenzandlaag bij raai 1 en 2 complex is. Met de verschillende modellen worden verschillende resultaten berekend. De bespreking van de waarde en de keuze van de modellen is in Bijlage J.3.1 weergegeven. Daarnaast wordt opgemerkt dat bij het uitvoeren van extrapolaties de onzekerheid sowieso groot is omdat de meetresultaten ver verwijderd zijn van de hoogwater situatie waarvoor de stijghoogten benodigd zijn. De uitgevoerde analyses met Pastas houden impliciet rekening met de interactie tussen de TZ en de PL. Er is voldoende vertrouwen in de resultaten van de uitgevoerde extrapolaties met Pastas omdat met Pastas rekening wordt gehouden met 1) impliciete interactie tussen de TZ en de PL, 2) ten opzichte van Extrapol is de stijghoogte in de TZ het hoogst (conservatief). Voor de sterkteberekeningen van de boorpalenwand in -onderdeel D wordt dan ook aanbevolen de met Pastas geëxtrapoleerde stijghoogten aan te houden.

Voor de situatie WBN2115 worden de stijghoogten gehanteerd door de stijghoogte bij WBN2023 te verhogen met het de berekende stationaire effect als gevolg van een buitenwaterstandverhoging van 0,95 m. (WBN2023 = NAP + 3,77 m en WBN2115 = NAP + 4,72 m). Er is van uitgegaan dat de verhoging van WBN2023 naar WBN 2115 vooral wordt bepaald door zeespiegelstijging. Met Pastas is de respons per model (peilbuis) bepaald. Hiervoor wordt verwezen naar Figuur 10 van (Artesia, April 2024). Voor de TZ is de respons 70% en voor de PL 55%. Dit stationaire effect is daarmee circa 0,7 m voor de TZ en circa 0,5 m voor de PL.

Voor de situatie met hydraulische kortsluiting als gevolg van de installatie van de boorpalen of de ankers zal de stijghoogte in de TZ afnemen omdat de stijghoogte in de TZ zonder hydraulische kortsluiting hoger is dan in de PL. Deze situatie levert dus een conservatiever uitgangspunt voor het ontwerp. Beschouwing van deze situatie in onderdeel D is dus niet nodig.

De te hanteren stijghoogten zijn weergegeven in Tabel 8. Hierbij is rekening gehouden met een stopgezette drinkwaterwinning van Oasen. Dit is een beleidsmatige (en conservatieve) keuze voor de sterkteberekeningen. Voor Raai 1 en 2 is de invloed van de drinkwaterwinning het grootst<sup>7</sup>. Dit is een reden om juist voor raai 2 de berekeningen voor de waterveiligheid

---

<sup>7</sup> Voor de raaien 1 en 2 is het verschil in stijghoogte bij een stopgezette drinkwaterwinning en een drinkwaterwinning van circa 8000m<sup>3</sup>/d circa 0,9 m (in zowel de TZ en de PL). Voor de raaien 5 en 6 is dit verschil circa 0,4 m (zie Paragraaf 4.6).



van de boorpalenwand uit te voeren (zie ook Paragraaf 5.1.2. waarin de keuze voor deze berekeningslocatie nader is toegelicht).

Bij de weergegeven stijghoogten is geen rekening gehouden met opdrijven tijdens het optreden van WBN. Als opdrijven wordt bereikt, dit zal vooral bij de bakwetering het geval zijn, dient in de berekeningen de grenspotential te worden gehanteerd.

Tabel 8: Te hanteren stijghoogten voor locatie F1-1 raai voor analyse waterveiligheid boorpalenwand onderdeel D.

Omschrijving locatie	Afstand vanaf buitenkruin [m]	Stijghoogte op basis extrapolatie met Pastas (peilbuisdata t/m febr 2024)							
		WBN2023		WBN2115		2023 dagelijks		2115 dagelijks	
		TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]
circa anker	7.0	1.57	1.75	2.08	2.27	-0.25	-0.20	0.23	0.32
boorpaal	21.0	1.84	1.63	2.52	2.17	-0.25	-0.20	0.42	0.32
14,5m uit boorpaal	33.5	1.85	1.75	2.57	2.27	-0.25	-0.25	0.42	0.27
	83.5	1.87	1.84	2.57	2.37	-0.30	-0.30	0.37	0.22

### Hoogte freatisch vlak:

De te hanteren hoogte van het freatisch vlak is gelijk als in het uitvoeringsontwerp. Door CDVM zijn analyses uitgevoerd waarmee de invloed van de boorpalenwand op de hoogte van het freatisch vlak is berekend (zie CDVM, Juli 2016 en CDVM, Oktober 2016). Ter plaatse van de boorpaal is uitgegaan van een verhoging van 0,25 m en bij de woningen minder dan 0,05 m (zie Paragraaf 5.4.1 onder punt 1 en 2). De in de ontwerpberekeningen aangehouden hoogte van het freatisch vlak ter plaatse van boorpalenwand is in lijn met de peilbuismetingen in 2023/2024 ter plaatse van de deksloof die variëren tussen NAP – 0,5 tot – 1,0 m.

### Stijghoogte in deklaag:

In de Plaxis analyses voor de sterkteberekening van de boorpalenwand wordt voor de waterspanningen in de deklaag (afgezien van de indringdiepte aan de onderzijde van de deklaag bij WBN) de gebruikelijke aanname gedaan dat onder dagelijkse omstandigheden de waterspanningen lineair verlopen tussen het freatisch vlak en de stijghoogte in het zand (in het geval van sectie F1-1 de tussenzandlaag). Uit de peilbuismetingen in de deklaag voor raai 1 en 2 (en vooral raai 3 en 4) met de filters op een diepte van NAP - 3,0 tot - 4,0 m volgt dat deze aanname conservatief is.

Bij WBN zal de stijghoogte vanaf de onderzijde van de deklaag (boven de TZ) tot de indringdiepte worden verhoogd. Uit de grondwaterstromingsberekeningen volgt een indringdiepte van 4,0 m (zie Paragraaf 5.3.2).

## 6 Conclusies en aanbevelingen

### 6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van verschillende onderdelen van het onderzoek samengevoegd om tot een totaalconclusie te komen over de oorzaken van vernatting.

Het ENW deed de aanbeveling om, mede door het uitvoeren van monitoring, de oorzaken van de vernatting en vervorming beter te begrijpen. Het is daarom van belang om de stijghoogten in en rond de waterkering en de horizontale vervormingen van de ondergrond en de boorpalen in een aantal dwarsprofielen te meten. Dit rapport gaat in op deze aanbevelingen en betreft onderdeel A van het fase 3 onderzoek.

Ten behoeve van de beschouwing van de waterveiligheid van de boorpalenwand (die in onderdeel D wordt onderzocht) is het van belang om te bepalen welke grondwaterstanden en stijghoogten van het grondwater in de TZ en de PL moeten worden gehanteerd Deze waterspanningen, al dan niet rekening houdende met lekkages en hydraulische kortsluiting zijn in dit rapport bepaald.

### 6.2 Conclusies onderzoeksvragen

#### 6.2.1 Inventarisatie meldingen van overlast in relatie tot de boorpalenwanden

*Onderzoeksvraag 1:*

*Op welke locaties zijn er meldingen van wateroverlast of vernatting? Welke van deze locaties zijn mogelijk te relateren aan installatie van de boorpalenwand?*

Deze onderzoeksvraag is uitgewerkt in Paragraaf 4.1.3. In het onderzoek fase 1 en 2 (Deltares, Juli 2021 en Deltares, Januari 2022-1) is een beperkte inventarisatie uitgevoerd van meldingen van vernatting en wateroverlast. Aan deze inventarisatie is informatie toegevoegd over het uitgevoerde dijkversterkingsalternatief (waaronder een boorpalenwand) en gegevens over neerslag en hoogwater en is onderzocht of er een verband is met de meldingen van wateroverlast. Het onderzoek heeft zich geconcentreerd op de 13 secties met een boorpalenwand laag in het talud, rond de NAP + 1 m. Dit betreft een bureaustudie die in nauwe samenwerking met, maar vooral door WSRL is uitgevoerd en gerapporteerd (WSRL, April 2024).

Na afloop van de dijkversterking is bij iets minder dan de helft (6 van de 13) van deze secties een schademelding geconstateerd die kon worden gerelateerd aan vernatting. Bij 7 van de 13 secties blijkt tijdens de aanleg van de boorpalenwand uittredend water te zijn geconstateerd tijdens de installatie van de verankering bij het naastliggende anker. Bij deze installatie wordt waterinjectie gebruikt om het gat voor de verankering te boren. Hierbij moet de kanttekening worden gemaakt dat er ook gevallen zijn waarbij uittredend water tijdens installatie is geconstateerd maar geen vernatting is gemeld. Wateruittreding betekent overigens niet dat het anker niet voldoet.

Uit deze analyse volgt dat er 11 locaties zijn waar een mogelijk verband kan worden gelegd tussen wateroverlast en de boorpalenwand. Deze locaties zijn:

- Sectie F1-1.
- Sectie F2-2.
- Sectie H2.
- Sectie L.
- Sectie N.

- Sectie P-Q1.
- Sectie R2.
- Sectie X-Y.
- Sectie AB.
- Sectie AF.
- Sectie AH.

## 6.2.2 Monitoringslocaties en visuele inspectie aanvullende onderzoekslocaties

### *Onderzoeksvraag 2:*

*Op welke locaties is het zinvol om monitoringsonderzoek uit te voeren om beter uitspraken te kunnen doen over vernatting of lekkages die mogelijk door de boorpalenwand worden veroorzaakt?*

Uit de analyse van de meldingen van wateroverlast volgt dat er een aantal locaties zijn waar een verband kan worden gelegd tussen wateroverlast en de boorpalenwand. Dit is gebruikt in de keuze van de locaties voor nader onderzoek ter plaatse van de boorpalenwanden. De locaties van het monitoringsonderzoek zijn geselecteerd op basis van drie criteria:

- Aanwezigheid van een TZ.
- Locatie van de boorpalenwand laag in het talud.
- Bereikbaarheid van de locatie voor aanleg van het monitoringssysteem. Het criterium schade door vernatting is daarbij niet expliciet meegenomen.

Op basis hiervan is in 3 dwarsdoorsneden een monitoringssysteem geïnstalleerd om kwel, kortsluiting of kieren langs de boorpalen en ankers vast te kunnen stellen. De geselecteerde locaties zijn gekozen op plekken waar lekkage langs de boorpalen of ankers de grootste invloed zal hebben op de waterveiligheid. Ze dragen daarmee bij aan de beantwoording van de hoofdvraag van dit onderzoek: voldoen de met boorpalenwanden versterkte secties aan de vereiste waterveiligheid?

Het betreft de secties F1-1, F2-2 en H2. Binnen 3 locaties is vervolgens onderzocht welke dwarsprofielen, in feite welke boorpalen/ankers, het meest relevant zijn voor onderzoek. Daarbij is gekeken naar over-betonning bij de boorpalen en (vermeende) lekkage bij de ankers die al dan niet tijdens de uitvoering optrad. Hieruit volgde per locatie 2 representatieve of maatgevende raaien.

In een later stadium van het onderzoek is aanvullend onderzoek verricht op nog eens 6 locaties. Aanleiding waren tussenresultaten uit onderzoek naar de kwaliteit van de verankering van de boorpalenwand (onderdeel C). Op deze locaties is de deksloof vrij gegraven voor visuele inspectie. Daarbij is in het kader van dit onderzoek ook mogelijke vernatting of lekkage van de boorwand in kaart gebracht.

De nadere details betreffende deze onderzoeksvraag zijn uitgewerkt in Paragraaf 4.1.4.

## 6.2.3 Relatie maaiveldhoogte en waterdrukken in watervoerende zandlagen

### *Onderzoeksvraag 3:*

*Kan er een relatie worden gevonden tussen de maaiveldhoogte en de waterdrukken in watervoerende zandlagen?*

Voor de beantwoording van deze vraag is beschouwd of door een veronderstelde hogere stijghoogte ten gevolge van lekkages en vernatting langs de boorpalen en ankers extra zettingen of zwellingen zouden kunnen optreden. Bij langdurige verandering van de stijghoogte in de ondergrond kan door verandering van de korrelspanningen zetting of zwelling optreden. De conclusie is dat er geen relatie kon worden gelegd omdat er op dit moment geen meerjarige tijdreeksen van de waterspanningen beschikbaar zijn. Daarnaast bleek deze vraag tijdens de loop van het onderzoek niet meer relevant.

## 6.2.4 Hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL

### Onderzoeksvraag 4a:

*Kan op basis van het monitoringsonderzoek een uitspraak worden gedaan over de invloed van hydraulische kortsluiting langs de boorpalen en de ankers tussen de pleistocene zandlaag (PL) en de tussenzandlaag (TZ)?*

### Conclusie

Uit het onderzoek volgt dat waarschijnlijk<sup>8</sup> in 3 van de 6 raaien een mate van hydraulische kortsluiting is opgetreden als gevolg van de installatie van de boorpalen en de ankers. Dit treed op tussen de PL en de TZ langs de boorpalen en de ankers. Het betreft locatie F1-1 bij raai 2 en locatie F2-2 bij de raaien 3 en 4.

Tijdens de dijkversterking KIS zijn er bij 13 secties boorpalenwanden laag in het talud gemaakt met in totaal circa 1300 palen en ankers. Omdat op enkele monitoringslocaties hydraulische kortsluiting waarschijnlijk is kan het zijn dat hydraulische kortsluiting tussen de PL en de TZ ook bij andere secties met een TZ lokaal aanwezig is. Het uitgevoerde onderzoek is statistisch gezien namelijk een steekproef met een bias (voorkeur) omdat de onderzoekslocaties zijn gekozen op plekken waar de kans op hydraulische kortsluiting mogelijk groter is (o.a. boorpalenwand laag in het talud). Gesteld kan worden dat de gegeven verwachtingen van het optreden van hydraulische kortsluiting daarmee conservatief zijn.

De hydraulische kortsluiting bepaalt de stijghoogte in de TZ en is een factor bij de analyse van de waterveiligheid van de boorpalenwand. Deze invloed op de waterveiligheid wordt in onderdeel D verder onderzocht. De invloed van hydraulische kortsluiting beperkt zich tot de diepere watervoerende lagen en heeft geen invloed op de hoogte van het freatisch vlak en vernatting/verdroging.

### Onderbouwing

De resultaten zijn afkomstig uit de volgende deelonderzoeken: een kwalitatieve analyse van de peilbuismetingen, bevindingen tijdens de visuele inspecties, de uitgevoerde tijdreeksanalyse en het hydrochemisch onderzoek. Het resultaat van de analyse van de verschillende deelonderzoeken is weergegeven in Tabel 6 in Paragraaf 4.6 en hieronder samengevat voor de locaties waar hydraulische kortsluiting waarschijnlijk is:

- Raai 2 en 4:  
Uit het hydrochemisch onderzoek volgt dat op deze locaties het water in de TZ overeenkomsten heeft met grondwater uit de PL. Uit de peilbuismetingen volgt dat de responsen in de TZ en de PL erg veel van elkaar afwijken maar een hydraulische kortsluiting niet uitsluiten. Gezien de conclusie uit de hydrochemische analyses betekent dit dat de lekkage gering zal zijn waardoor ook de invloed op de stijghoogte in de TZ beperkt zal zijn.
- Raai 3:  
Op basis van de peilbuismetingen volgt dat hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL aannemelijk is bij het anker en niet bij de boorpaal. De peilbuis in de TZ reageert sterk op het getij.

Door grondwaterstromingsberekeningen uit te voeren, zijn de veronderstelde hypothesen van hydraulische kortsluiting onderzocht en is de invloed daarvan op de stijghoogten in de TZ en PL en het freatisch vlak bepaald. Voor de conclusies naar aanleiding van deze berekeningsresultaten wordt verwezen naar Paragraaf 5.4.1. Door volledige hydraulische kortsluiting kan de stijghoogte in de TZ maximaal de stijghoogte in het PL worden. De relatief

---

<sup>8</sup> Kansuitspraak of waarschijnlijkheidsuitspraak volgens Willems et al (2020).

langdurig hoge lekwaterstanden afgelopen winter lieten zien dat de druk in de TZ zich makkelijker opbouwt dan in het PL.

Dit komt de door de verminderde transmissiviteit. Het gevolg is dat bij de extrapolatie naar WBN de stijghoogte in de TZ hoger is dan het PL. Hierdoor is het effect van hydraulische kortsluiting op waterveiligheid zeer beperkt.

Uit de modelanalyses blijkt dat het invloedgebied van een hydraulische kortsluiting tussen TZ en PL vrij groot is. Uit de analyses volgt dat op 20 m afstand van de hydraulische kortsluiting een stijghoogteverandering van het getij van 20% merkbaar is. De stijghoogteverandering is vooral merkbaar in de TZ. De stijghoogte in het PL verandert nauwelijks. Dit kan worden verklaard door de geringe dikte van de TZ (gemiddeld 1 m) ten opzichte van de dikte van de PL (circa 15 m). Als gevolg van het optreden van langdurig hoogwater (denkende aan enkele weken) zal zowel de stijghoogteverandering en de grootte van het invloedgebied naar verwachting toenemen. De invloeden zijn tweedimensionaal gemodelleerd. Daarmee simuleren de berekeningsresultaten het geval dat ter plaatse van alle boorpalen of alle ankers lekkage optreedt. Dit is een conservatieve aanname waardoor de verhoging van de stijghoogten in de TZ in werkelijkheid lager zal zijn dan hier berekend.

Opmerkingen:

- De resultaten van de kwalitatieve analyse en het hydrochemisch onderzoek zijn niet altijd eenduidig waarbij we dit conservatief interpreteren. Het resultaat van het ene deelonderzoek sluit het resultaat van het andere deelonderzoek namelijk niet uit.
- Doordat de initiële situatie niet bekend is, doen we een kansuitspraak. Vaststellen of uitsluiten van hydraulische kortsluiting op de onderzochte locaties is niet mogelijk.
- In het onderzoeksgebied is ook sprake van hydraulische kortsluiting door natuurlijke oorzaken. De afsluitende kleilaag tussen de TZ en PL ontbreekt namelijk plaatselijk of is plaatselijk zeer dun of doorlatend. Dit is af te leiden uit het verloop van de respons op de buitenwaterstand in de peilbuizen over de verschillende raaien en de kortsluiting treedt vooral op in het achterland van de onderzochte locaties.

## 6.2.5 Kwel/lekkage langs anker en boorpaal naar maaiveld

*Onderzoeksvragen 4b en 4c:*

*Kan op basis van het monitoringsonderzoek een uitspraak worden gedaan over de invloed van vernatting als gevolg van lekkage langs (4b) de boorpalen of (4c) de ankers van de TZ (of de PL als de TZ ontbreekt) naar de deksloof?*

### Conclusie

Uit het monitoringsonderzoek volgt dat:

- Bij 2 van de 6 onderzochte raaien waarschijnlijk, dan wel zeer waarschijnlijk is dat lekkage langs de ankers van de TZ naar de deksloof optreedt. Het betreft Locaties F1-1 en F2-2 bij de raaien 2 respectievelijk 3.
- Bij 3 van de 6 raaien lekkage langs de boorpalen niet is uit te sluiten. Het betreft de locaties F1-1 en F2-2 bij de raaien 1, 2 en 3.
- Het optreden van lekkage langs de ankers waarschijnlijker is dan langs de boorpalen.

Zoals ook bij onderzoekvraag 4a is aangegeven zijn bij 13 secties boorpalenwanden gemaakt (laag in het talud) met in totaal circa 1300 boorpalen en ankers. Omdat op enkele monitoringslocaties vernatting waarschijnlijk dan wel zeer waarschijnlijk is, mag worden verwacht dat dit ook bij andere secties voorkomt. Het is waarschijnlijker dat dit plaatsvindt langs de ankers hoewel lekkage langs de boorpalen niet is uit te sluiten. Het uitgevoerde onderzoek op enkele locaties is statistisch gezien een steekproef met een bias (voorkeur). Als vernatting of op de gemonitorde locaties is vastgesteld, mag worden verwacht dat dit bij meerdere boorpalen en/of ankers voorkomt. Gesteld kan worden dat de gegeven

verwachtingen van het optreden van vernatting daarmee conservatief zijn. Enige mate van lekkage of vernatting bij de boorpalenwanden hoeft niet persé te leiden tot effecten rondom bebouwing (zoals vernatting, wateroverlast of vochtschade).

Er zijn grondwaterstromingsberekeningen uitgevoerd voor raai 2 waarmee de effecten van lekkage en vernatting langs de boorpaal of het anker van de TZ naar de deksloof zijn gemodelleerd. De berekeningen zijn uitgevoerd voor de locatie ter plaatse van F1-1 raai 2, omdat (1) op deze locatie de meeste discussie is ontstaan over de integriteit van boorpalenwand, en (2) er is een TZ aanwezig waardoor een hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL een nadelige invloed kan hebben op de waterveiligheid van de boorpalenwanden. Uit het scenario waarbij alle ankers lekken volgt uit de berekeningen voor de dagelijkse situatie dat de lekkagedebieten variëren tussen 0,45 en 0,85 m<sup>3</sup>/dag per strekkende meter dijk. Dit is een worst case inschatting. Het freatisch vlak stijgt als gevolg van deze lekkages met maximaal 0,3 m van NAP - 1,05 m tot NAP - 0,75 m. De lekkage veroorzaakt alleen vernatting in de directe omgeving tot enkele meters rond de deksloof. Men spreekt van vernatting als de ontwateringsdiepte ten opzichte van de initiële situatie is verminderd. De stijging van het freatisch vlak en de omvang daarvan is beperkt tot enkele meters rond de deksloof. Dit kan in specifieke gevallen, met een geringe ontwateringsdiepte of heterogeniteiten in de ondergrond, natte plekken aan het maaiveld veroorzaken. Op de monitoringslocaties is dit overigens niet waargenomen.

De vernatting heeft geen invloed op de te hanteren waterspanningen voor de berekening van de waterveiligheid van de boorpalenwand omdat het invloedsgebied van de lekkage aanmerkelijk kleiner is dan het gebied waarin de hoogte van het freatisch vlak invloed heeft op de stabiliteit van de dijk (stabiliteitsgebied).

### Onderbouwing

In Paragraaf 4.6 en Tabel 6 is een onderbouwing gegeven dat op 3 locaties namelijk raai 1, 2, en 3 deze vorm van lekkage kan optreden. De conclusies zijn gebaseerd op een kwalitatieve analyse van de peilbuismetingen, tijdreeksanalyse, hydrochemisch onderzoek en de visuele inspecties. Het meest conservatieve (deel)resultaat is gehanteerd als eindconclusie. Het resultaat van het ene deelonderzoek sluit het resultaat van het andere deelonderzoek namelijk niet uit.

Bij de dijkversterking KIS is het aantonen dan wel uitsluiten van vernatting lastig gebleken omdat we de initiële situatie niet kennen en dus ook niet met volledige zekerheid kunnen vaststellen of vernatting wordt veroorzaakt door de dijkversterking. Met de uitgevoerde monitoring kunnen we alleen afwijkingen vaststellen ten opzichte van een verwachte gemiddelde situatie. Daarom spreken we van de meest waarschijnlijke oorzaak of een combinatie van oorzaken van vernatting. Het is ook niet mogelijk om uit te sluiten dat een waargenomen of gemeten effect door de dijkversterking is veroorzaakt.

Het resultaat van de analyse voor raaien waar lekkage speelt is hieronder samengevat. Voor een nadere toelichting wordt verwezen naar Paragraaf 4.6.

- Raai 1:
  - Lekkage langs de boorpaal is niet uit te sluiten.  
Op basis van de peilbuismetingen volgt dat lekkage langs de boorpaal niet aannemelijk is maar dat een geringe lekkage niet is uit te sluiten. Uit het hydrochemisch onderzoek volgt dat lekkage mogelijk is (dit op basis van de watermonsters uit de drainage in sectie F1-1). Tijdens de uitgevoerde visuele inspectie in februari 2023 is geen lekkage waargenomen.
- Raai 2:
  - Lekkage langs het anker is waarschijnlijk.  
De peilbuismetingen van ADCIM geven geen indicatie dat de kwel en vernatting door lekkage via de boorpalen of ankers tot stand komt. Uit de tijdreeksanalyse volgt dat



lekkage zeer onwaarschijnlijk is. Uit het hydrochemisch onderzoek volgt dat waarschijnlijk lekkage optreedt langs het anker.

Dit op basis van de watermonsters uit de drainage in sectie F1-1, maar ook op basis van de correlatie tussen het watermonster uit de TZ met het freatische water.

- Lekkage langs de boorpaal is niet uit te sluiten.

De peilbuismetingen van ADCIM geven geen indicatie dat de kwel en vernatting door lekkage via de boorpalen of ankers tot stand komt. Op basis van de peilbuismetingen volgt dat een geringe lekkage langs de boorpaal mogelijk is. De gemiddelde stijghoogte ter plaatse van de boorpaal is iets hoger en er lijkt hier minder correlatie met neerslag te zijn dan op 2 m afstand, wat op lekkage zou kunnen duiden. Dit is echter onzeker door tegenstijdige argumenten (zie Bijlage D.2.2.2). Uit de tijdreeksanalyse volgt dat lekkage onwaarschijnlijk is.

- Raai 3:

- Lekkage langs het anker is zeer waarschijnlijk.

Uit het hydrochemisch onderzoek volgt dat het waarschijnlijk is dat de lekkage moet zijn veroorzaakt door grondwaterstroming vanuit het diepe zand langs het anker naar het maaiveld. Uit de peilbuismetingen volgt niet duidelijk dat vernatting als gevolg van lekkage uit het anker is opgetreden. Gezien de observaties tijdens de visuele inspectie van februari 2023 en de daarbij uitgevoerde debietmeting is lekkage vanuit de TZ via het anker naar de deksloof zeer waarschijnlijk. De bovenkant van de deksloof ligt op een hoogte van NAP – 0,90 m. De uitstroomopening van het ankerगत in de deksloof ligt circa 0,25 m lager op NAP – 1,15 m. Dit is lager dan de gemiddelde stijghoogte in de TZ, in de periode dat de lekkage is geconstateerd (gemiddeld NAP - 0,30 m tot – 0,80 m).

- Lekkage langs de boorpaal is niet uit te sluiten.

Uit de tijdreeksanalyse volgt dat lekkage mogelijk is. Dit vooral op basis van peilbuis HB051PB01 omdat de respons op het Lekpeil daar sterk is terwijl peilbuis HM016PB01, die op circa dezelfde hoogte op 2 m afstand in het pakket slappe lagen staat, nauwelijks reactie vertoont. Dit is onzeker omdat het op basis van andere freatische peilbuizen in deze raai onwaarschijnlijk is dat lekkage optreedt gezien de lage responsen.

Uit de peilbuismetingen volgt dat de responsfactor in de TZ ter plaatse van de boorpaal kleiner is dan op de andere plaatsen in de TZ, terwijl de responsfactor in de PL geleidelijk afneemt in de richting van de polder. Dit zou kunnen duiden op enige lekkage langs de boorpaal naar het maaiveld. Tijdens de uitgevoerde visuele inspectie in februari 2023 is geen lekkage waargenomen.

### Opmerkingen

Het debiet en de hoogte van het freatisch vlak, als gevolg van een lekkage langs de boorpaal of het anker, zullen bij langdurig hogere waterstanden (denk aan enkele weken hoogwater) hoger uitvallen. Dit is echter een tijdelijke situatie en geen structurele verandering en daardoor dus niet van belang voor het bepalen van (langdurige) vernatting.

Tijdens de ontgravingswerkzaamheden ten behoeve van het plaatsen van de monitoring in raai 3, is lekkage langs het anker waargenomen (Deltares, Mei 2023). Het gemeten debiet uit één anker was circa 0,3 m<sup>3</sup>/d. Ook vanuit het uitgevoerde hydrochemisch onderzoek volgt dat het daar zeer aannemelijk was dat lekkage vanuit de TZ naar maaiveld via het anker plaatsvindt. Dit debiet is een factor 2 lager dan berekend met Plaxis-2D maar heeft gezien dit relatief geringe verschil dezelfde orde van grootte.

Kiervorming en vergroting van de kiervorming langs de boorpalen is niet vastgesteld omdat de gemeten horizontale grondvervormingen zeer klein zijn. De boorpalenwand is medio 2018 geplaatst en de metingen worden uitgevoerd sinds maart 2023. Op basis van deze metingen kan dus niet worden bepaald of in de periode 2018 - 2023 een kier is ontstaan.

## 6.2.6 Extrapolatie WBN2023 en ontwerp

### Onderzoeksvraag 5:

*Welke grondwaterstanden en stijghoogten van het grondwater in TZ en de PL dienen te worden gehanteerd voor een herberekening van de boorpalenwand, al dan niet rekening houdende met lekkages?*

In dit rapport zijn de stijghoogten in de TZ en de PL gekwantificeerd voor een berekening van de stabiliteit van de boorpalenwand in sectie F1-1. Deze locatie is gekozen voor de boorpalenwand om de volgende redenen:

- Op deze locatie is de meeste discussie ontstaan over de integriteit van boorpalenwand. Er zijn hier schademeldingen van wateroverlast en met betrekking van vervorming van panden gedaan.
- Hier is een TZ aanwezig waardoor een hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL een nadelige invloed kan hebben op de waterveiligheid van de boorpalenwand. Uit het onderzoek volgt dat in raai 2 het optreden van hydraulische kostsluiting en vernatting waarschijnlijk is (zie Paragraaf 4.6).
- De invloed van de grondwateronttrekking door Oasen te Nieuw Lekkerland op de stijghoogten in de TZ en de PL is bij deze locatie het grootst (zie Paragraaf 4.3.2). In het uitvoeringsontwerp is vermoedelijk met deze invloed onvoldoende rekening gehouden.

Tevens is de te hanteren minimale hoogte van het freatisch vlak bepaald. Het bepalen van de veiligheid van de boorpalenwand zelf wordt in onderdeel D behandeld en maakt geen deel uit van dit rapport. Deze stijghoogten zijn gegeven voor de situatie mét en zónder lekkages.

### **Te hanteren waterspanningen in raai 2 (locatie F1-1) voor analyse waterveiligheid boorpalenwand in onderdeel D.**

#### **Stijghoogten in TZ en PL**

Ter bepaling van de stijghoogten onder maatgevende omstandigheden (WBN2023 en WBN2115) zijn verschillende modellen gebruikt, namelijk Plaxis, Extrapol en Pastas. Een toelichting op de verschillen van de modellen wordt in Paragraaf 5.4.2 gepresenteerd. Geconcludeerd wordt dat de geohydrologische situatie met de aanwezigheid van een TZ bij raai 1 en 2 complex is. Met verschillende modellen worden verschillende resultaten berekend. Daarnaast wordt opgemerkt dat bij het uitvoeren van extrapolaties de onzekerheid sowieso groot is omdat de meetresultaten ver verwijderd zijn van de hoogwater situatie waarvoor de stijghoogten benodigd zijn. De uitgevoerde analyses met Pastas houden impliciet rekening met de interactie tussen de TZ en de PL. Er is voldoende vertrouwen in de resultaten van de uitgevoerde extrapolaties met Pastas. Voor de sterkteberekeningen van de boorpalenwand in onderdeel D wordt dan ook de met Pastas geëxtrapoleerde stijghoogten aangehouden. Deze keuze wordt onderbouwd door 1) de impliciete interactie tussen de TZ en de PL, en 2) omdat, ten opzichte van Extrapol, de stijghoogte in de TZ het hoogst is (conservatieve keuze).

Voor de situatie WBN2115 wordt bepaald dat de stijghoogten van WBN2023 moeten worden verhoogd met het berekende stationaire effect als gevolg van een buitenwaterstandverhoging van 0,95 m. (WBN2023 = NAP + 3,77 m en WBN2115 = NAP + 4,72 m).

De te hanteren stijghoogten zijn weergegeven in Tabel 7 van Paragraaf 5.3.2. Deze stijghoogten zijn gegeven voor de situatie mét en zónder lekkages. Voor de situatie mét hydraulische kortsluiting is het invloedgebied groter dan vanaf 20 m voor tot 20 m na de boorpaal waardoor de stijghoogten in de TZ invloed hebben op de stabiliteit van de dijk (stabiliteitsgebied). Bij het bepalen van de stijghoogten is rekening gehouden met een stopgezette drinkwaterwinning van Oasen. Dit is een beleidsmatige (en conservatieve) keuze

voor de sterkteberekeningen. Bij de weergegeven stijghoogten is geen rekening gehouden met opdrijven tijdens het optreden van WBN. Als opdrijven wordt bereikt, dit zal vooral bij de bakwetering het geval zijn, wordt in de berekeningen de grenspotential gehanteerd.

### **Hoogte freatisch vlak**

De te hanteren hoogte van het freatisch vlak is gelijk als in het uitvoeringsontwerp. Door CDVM zijn analyses uitgevoerd waarmee de invloed van de boorpalenwand op de hoogte van het freatisch vlak is berekend (zie CDVM, Juli 2016 en CDVM, Oktober 2016). Ter plaatse van de boorpaal is uitgegaan van een verhoging van 0,25 m en bij de woningen minder dan 0,05 m.

### **Stijghoogte in de deklaag**

Voor de te hanteren waterspanningen in de deklaag wordt, afgezien van de indringdiepte aan de onderzijde van de deklaag bij MHW, de gebruikelijke aanname gedaan dat onder normale omstandigheden de waterspanning lineair verloopt tussen het freatisch vlak en de stijghoogte in het zand. In het geval van sectie F1-1 is dit de tussenzandlaag. Uit de peilbuismetingen volgt dat deze aanname conservatief is. Bij WBN zal de stijghoogte vanaf de onderzijde van de deklaag (boven de TZ) tot de indringdiepte worden verhoogd. Uit de grondwaterstromingsberekeningen volgt een indringdiepte van 4,0 m.

## **6.3 Samenvatting hoofdconclusies onderzoek**

Als gevolg van de aanleg van de boorpalenwand is het waarschijnlijk dat lokaal een hydraulische kortsluiting is ontstaan tussen de tussenzandlaag en het pleistocene zand. De duiding 'waarschijnlijk' betekent: 'een grote kans van optreden'. De invloed beperkt zich tot de diepere watervoerende lagen en heeft geen consequenties voor de hoogte van het freatisch vlak en vernatting. Bij hoogwater leidt dit tot andere stijghoogten in de tussenzandlaag en daarmee beïnvloeding van de waterveiligheid. In het uitvoeringsontwerp is echter al rekening gehouden met een hogere maatgevende stijghoogte in de TZ.

Daarnaast is het waarschijnlijk dat de aanleg heeft geleid tot lekkage langs de ankers vanuit de tussenzandlaag naar het maaiveld. In één geval bleek dit zelfs zeer waarschijnlijk. Bij het boren van de verankering is wateruitreding bij naastliggende ankers waargenomen. Lekkage langs de boorpalen tot aan het maaiveld is minder waarschijnlijk maar niet uit te sluiten. Het gevolg is vernatting (een stijging van het freatisch vlak) van beperkte omvang tot enkele meters rond de deksloof. Dit kan in specifieke gevallen natte plekken aan het maaiveld veroorzaken bij bijvoorbeeld een geringe ontwateringdiepte of heterogeniteit in de ondergrond. Dit hoeft niet per definitie te leiden tot schade in de omgeving. Er zijn na installatie wel schades gemeld. Op de monitoringslocaties zijn de natte plekken overigens niet waargenomen. De lekkage heeft geen invloed op de waterveiligheid omdat het invloedsgebied van de lekkage aanmerkelijk kleiner is dan het gebied waarin de hoogte van het freatisch vlak invloed heeft op de stabiliteit van de dijk (stabiliteitsgebied).

De grondwateronttrekking voor drinkwaterwinning door Oasen te Nieuw Lekkerland heeft grote invloed op de stijghoogte in de tussenzandlaag en pleistocene zandlaag vooral bij locatie F1-1. Voor de analyse van de waterveiligheid van de boorpalenwand (Onderdeel D) wordt gerekend met een stopgezette drinkwaterwinning. Dit is een beleidsmatige (en conservatieve) keuze.

## 6.4 Aanbevelingen voor continuering van het monitoringsonderzoek

### **Metten waterspanningen:**

De in dit onderzoek uitgevoerde peilbuismetingen, en de daarmee bepaalde stijghoogten onder dagelijkse en hoogwateromstandigheden, wijken af van de waarden die door de aannemer zijn bepaald ten behoeve van het uitvoeringsontwerp.

Voor bijvoorbeeld de raaien 5 en 6 (sectie H2) zijn de met Extrapol bepaalde stijghoogten conservatiever dan de door de aannemer voor het uitvoeringsontwerp gehanteerde stijghoogten (zie Paragraaf 5.4.2). Dit heeft vooral invloed op de waterveiligheid van de boorpalenwand op langere termijn. Het is daarom van belang om de stijghoogten, vooral bij hoogwater en extreme regenval, te blijven meten om daarmee te kunnen bepalen of deze zich ontwikkelen zoals we verwachten. Deze inzichten kunnen dan worden meegenomen bij toekomstige beoordelingen.

### **Metten horizontale vervormingen:**

Aanbevolen wordt om de hellingmeetbuizen de komende jaren te blijven meten en de metingen uitgebreid te analyseren als uit de metingen volgt dat deze significant (stel >5 mm) zijn toegenomen met betrekking tot het aspect kiervorming. Als de metingen aangeven dat significante vervorming zijn opgetreden worden de conclusies mogelijk anders ten aanzien van kier- of spleetvorming achter de boorpalen. In Paragraaf E.5 wordt een meetfrequentie voor de toekomst voorgesteld.

Op basis van de resultaten van de analyses van de waterveiligheid van de boorpalenwand (onderdeel D) kan worden gesteld dat de boorpalenwand tot circa 2058 aan de waterveiligheidseisen voldoet. Voor de periode na 2058 is de mate van vervormingen, die leidt tot een belastingtoename op de boorpalen, bepalend of de palenwand blijft voldoen aan de norm (zie resultaten onderdeel D). Daarom wordt aanbevolen om, naast het monitoren van de waterspanningen, de optredende horizontale vervormingen van de ondergrond en de boorpalen te blijven monitoren en de kennis omtrent lange termijn vervormingen te verbeteren. Te zijner tijd kan hiermee de waterveiligheid ook na 2058 worden aangetoond.

# Bijlagen

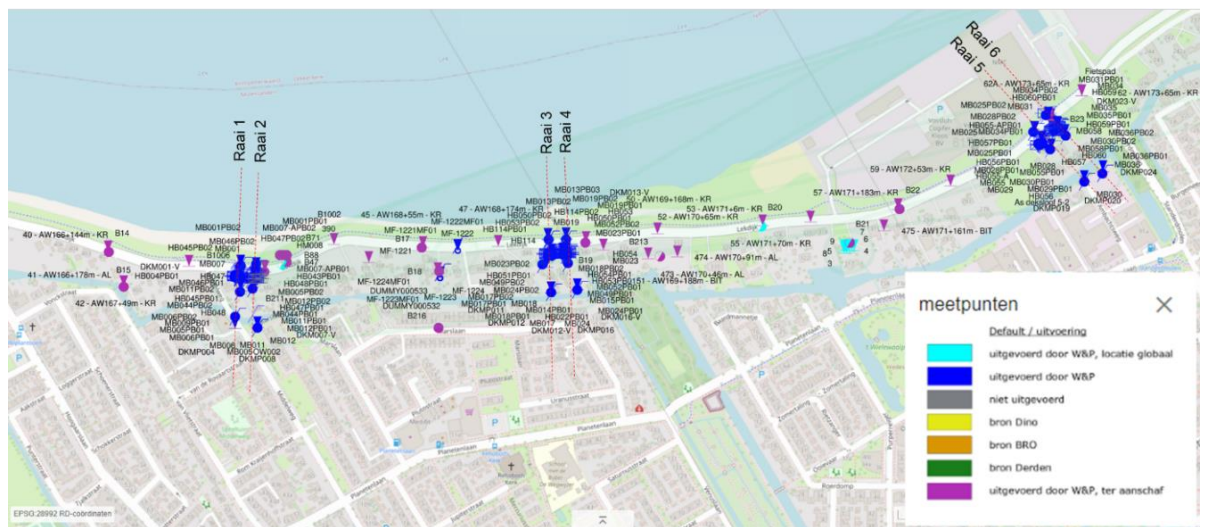
# A Monitoringslocaties en ondergrondopbouw

In deze bijlage is een overzicht gegeven van de 3 monitoringslocaties waar o.a. de peilbuizen en hellingmeetbuizen zijn geplaatst.

In Bijlage A.1 is een overzicht van het projectgebied en de 3 monitoringslocaties weergegeven. In Bijlage A.2 is een bovenaanzicht en dwarsdoorsnede gegeven met de globale monitoringsopzet. Hierin zijn o.a. de locaties van de sonderingen, peilbuizen, en hellingmeetbuizen weergegeven. In Bijlage A.3 zijn de dwarsprofielen gegeven van achtereenvolgens de raaien 1 t/m 6. In de dwarsprofielen zijn in detail de locaties van de boringen, sonderingen, peilbuizen (inclusief filterdieptes), hellingmeetbuizen en locaties van de genomen grondwatermonsters weergegeven. Tot slot zijn in Bijlage A.4 de 6 locaties aangegeven waar het aanvullend onderzoek t.b.v. van het uitvoeren van visuele inspecties van boorpalenwand is uitgevoerd.

## A.1 Situatie projectgebied en locaties monitoring

In Figuur 27 is een overzicht van het projectgebied en de monitoringslocaties weergegeven.

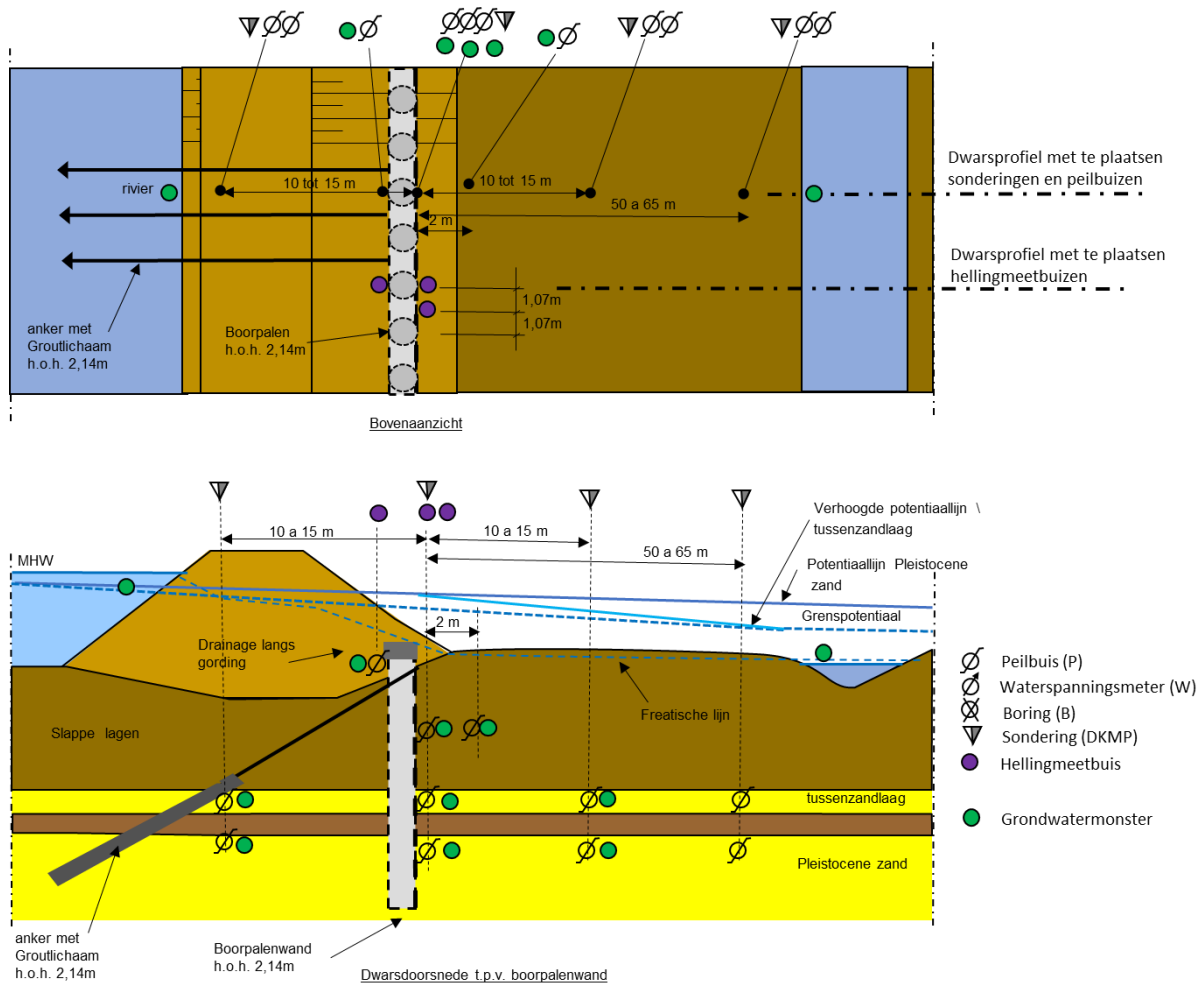


Figuur 27: Projectgebied met raai nummers 1 t/m 6 en locaties onderzoekspunten (in blauw) uitgevoerd door Wiertsema&Partners (bron Geoloket.nl).

## A.2 Principeprofiel met locaties monitoringonderzoek

In Figuur 28 is een bovenaanzicht en dwarsdoorsnede gegeven met de globale monitoringsopzet. Hierin zijn o.a. de locaties van de sonderingen, peilbuizen, en hellingmeetbuizen weergegeven.

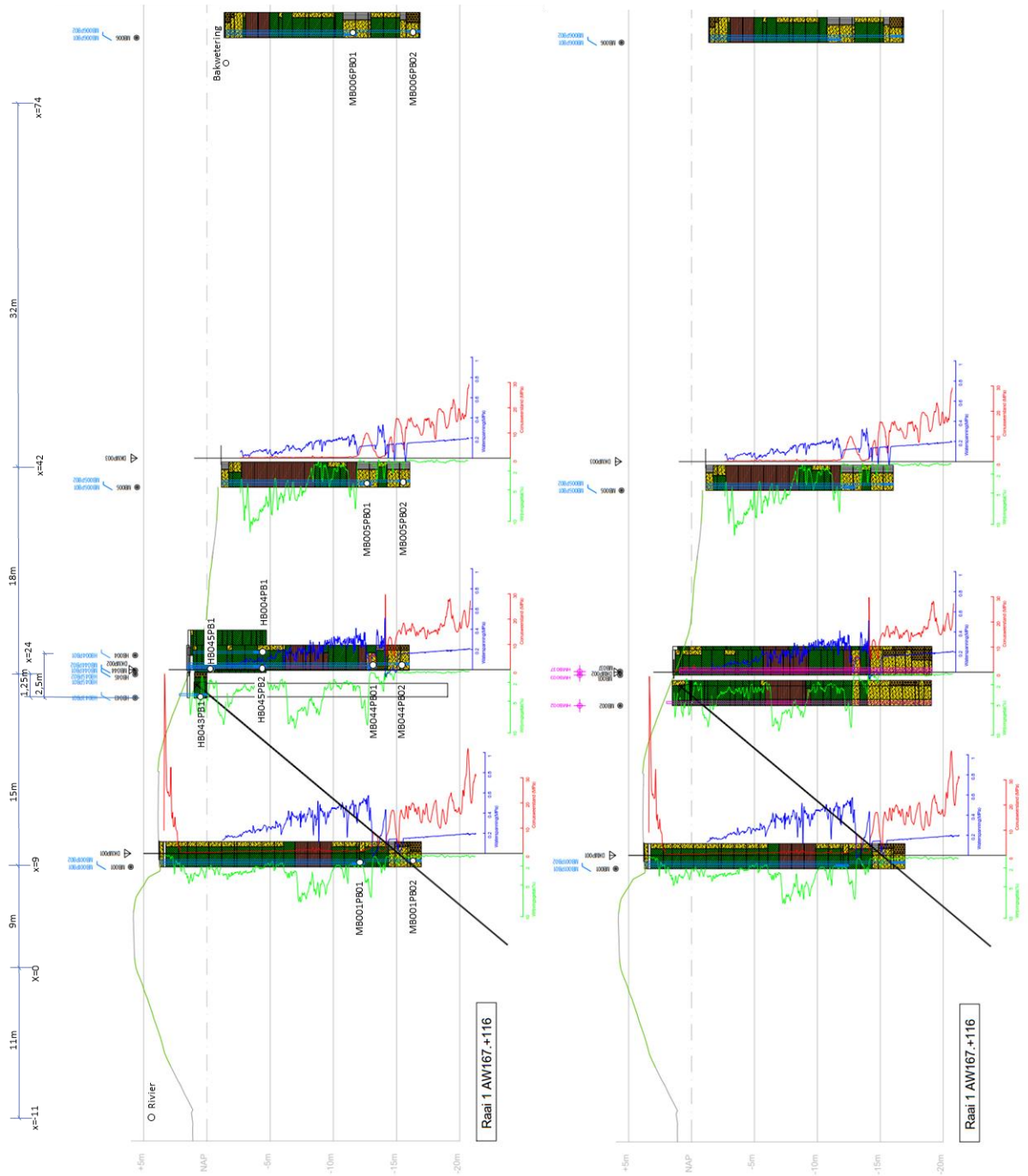
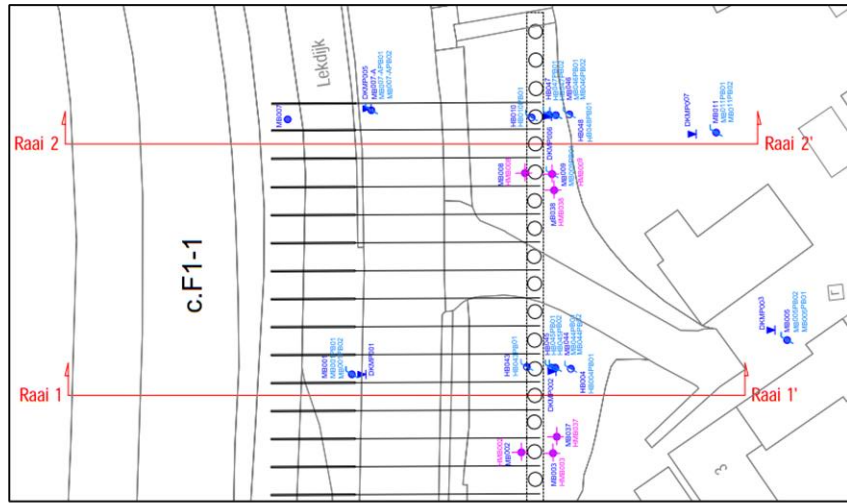


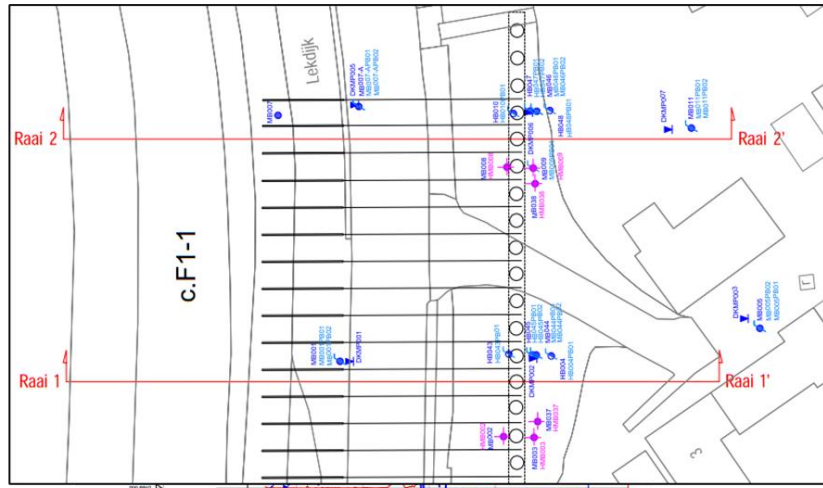


Figuur 28: Principe bovenaanzicht en dwarsprofiel met locaties en filterdieptes van de peilbuizen, sonderingen en locaties grondwatermonsters.

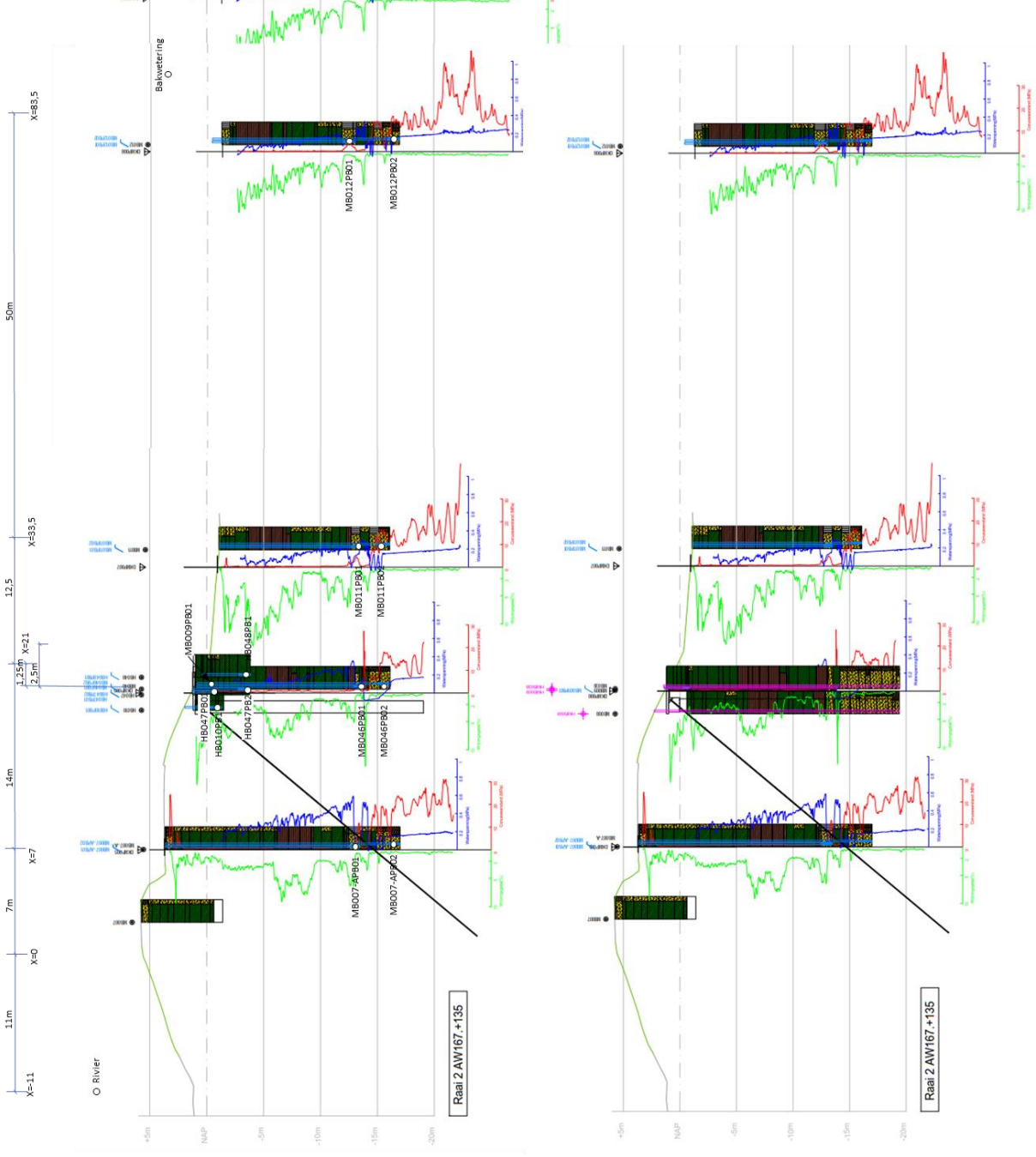
### A.3 Dwarsprofielen raai 1 t/m 6 met locaties monitoringonderzoek

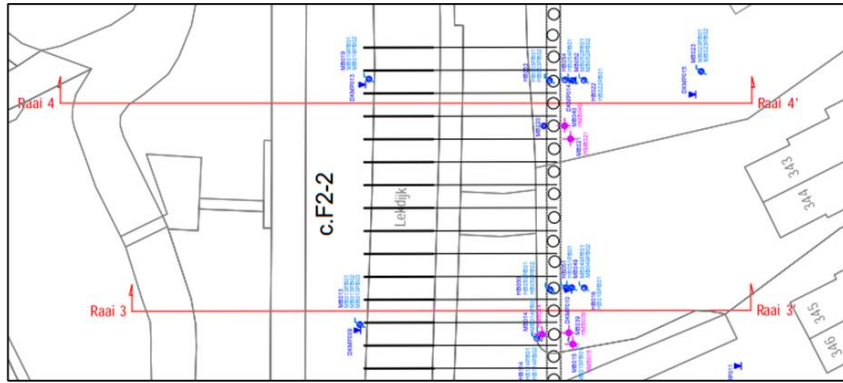
In de volgende figuren zijn 6 dwarsprofielen gegeven van achtereenvolgens de raaien 1 t/m 6. In de dwarsprofielen zijn in detail de locaties van de boringen, sonderingen, peilbuizen (inclusief filterdieptes), hellingmeetbuizen en locaties van de genomen grondwatermonsters weergegeven. Voor nadere informatie over het onderzoek uitgevoerd door Wiertsema & Partners wordt verwezen naar (Wiertsema, November 2023-1).





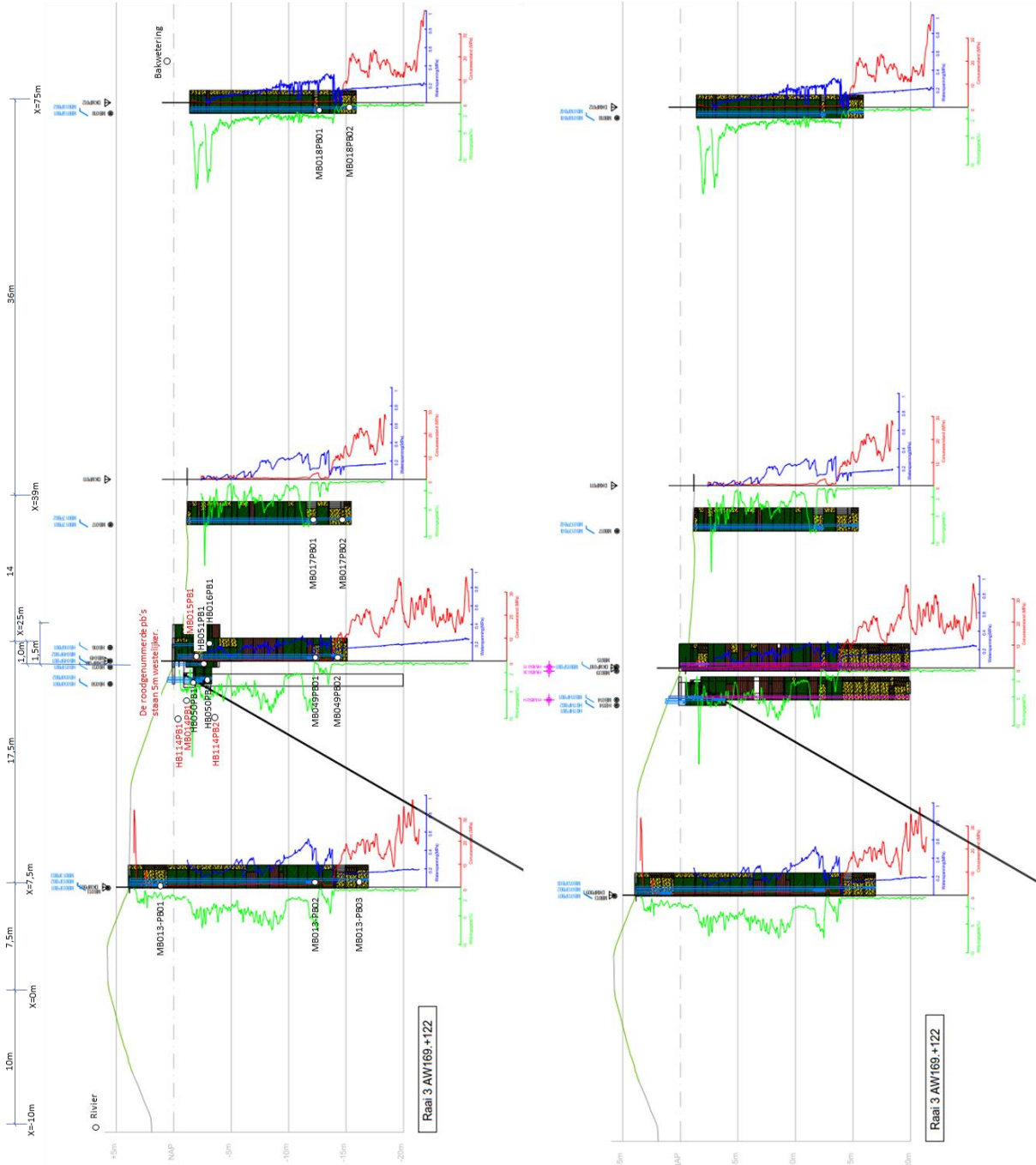
- LEGENDA**
- DNMP Disponering met plaatselijke wijziging en esterspanning
  - HB Handbooring met peilbus
  - IG Mechanische boring
  - MB Mechanische boring met peilbus
  - HMB Hellingmeetbus
  - Localis Localis zwaartepunt



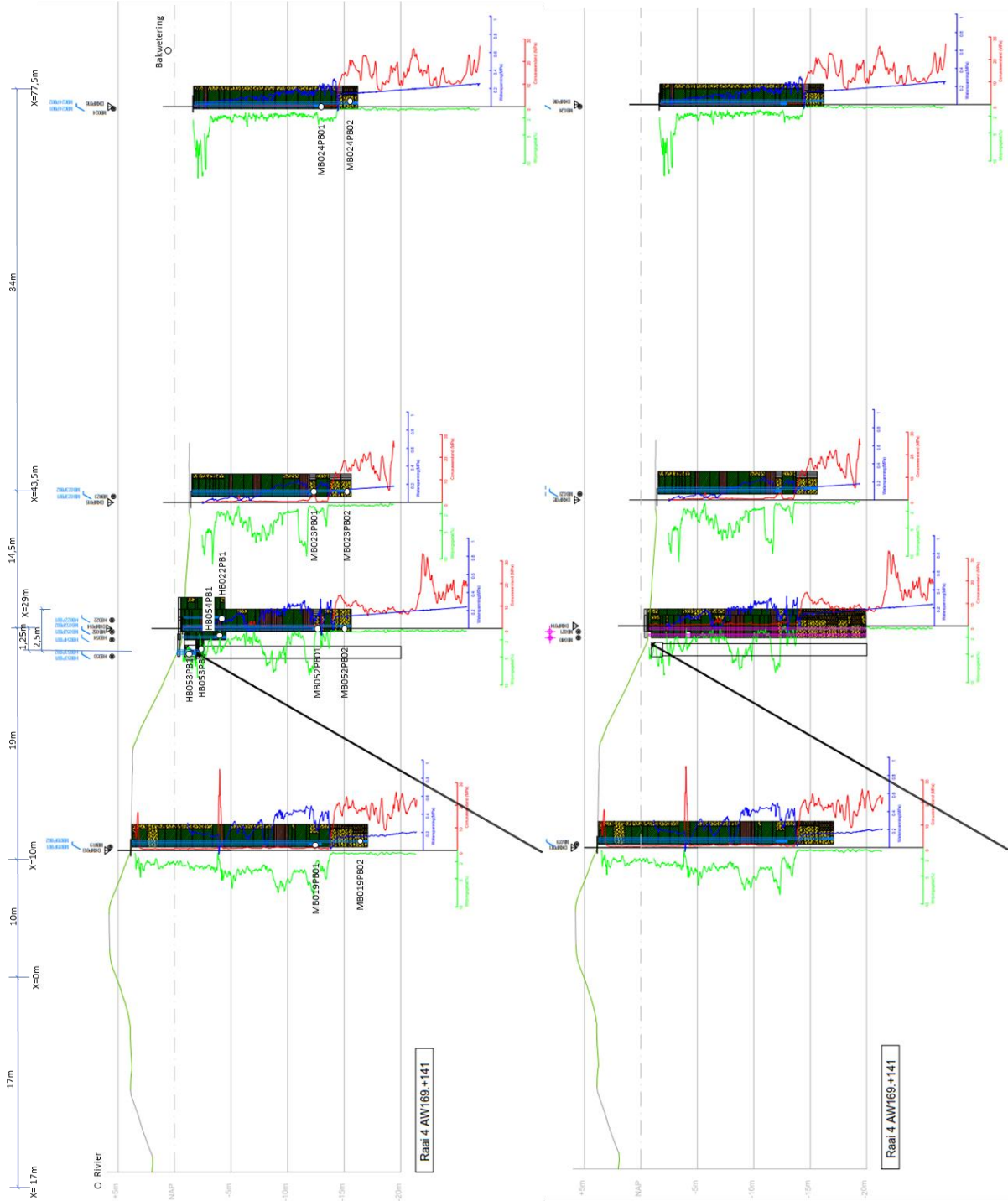
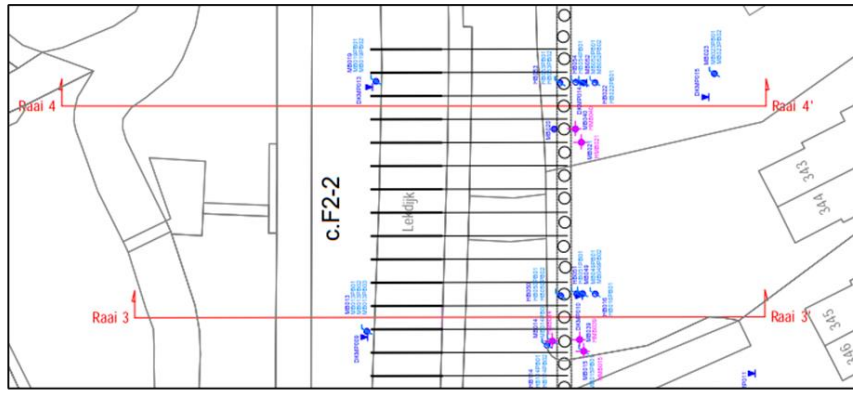


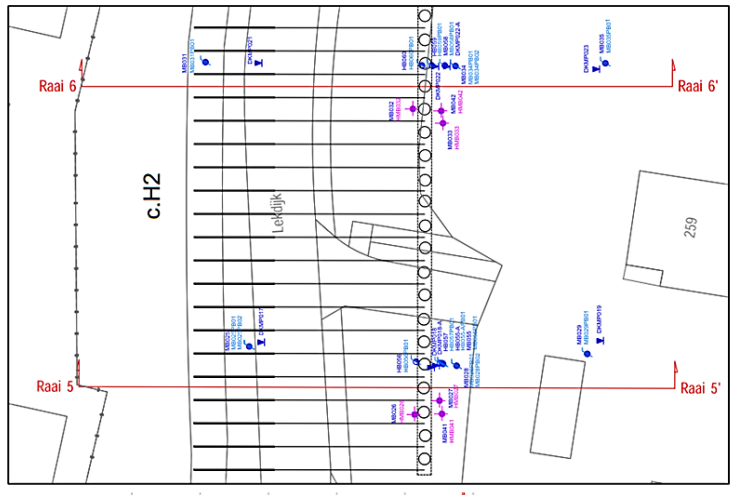
**LEGENDA**

- DIMP Dispersie met plaatselijke verlenging en wateropgang
- HB Handboring met peubus
- MB Mechanische boring
- MB Mechanische boring met peubus
- HMB Hellingreubus
- Locatie overproef

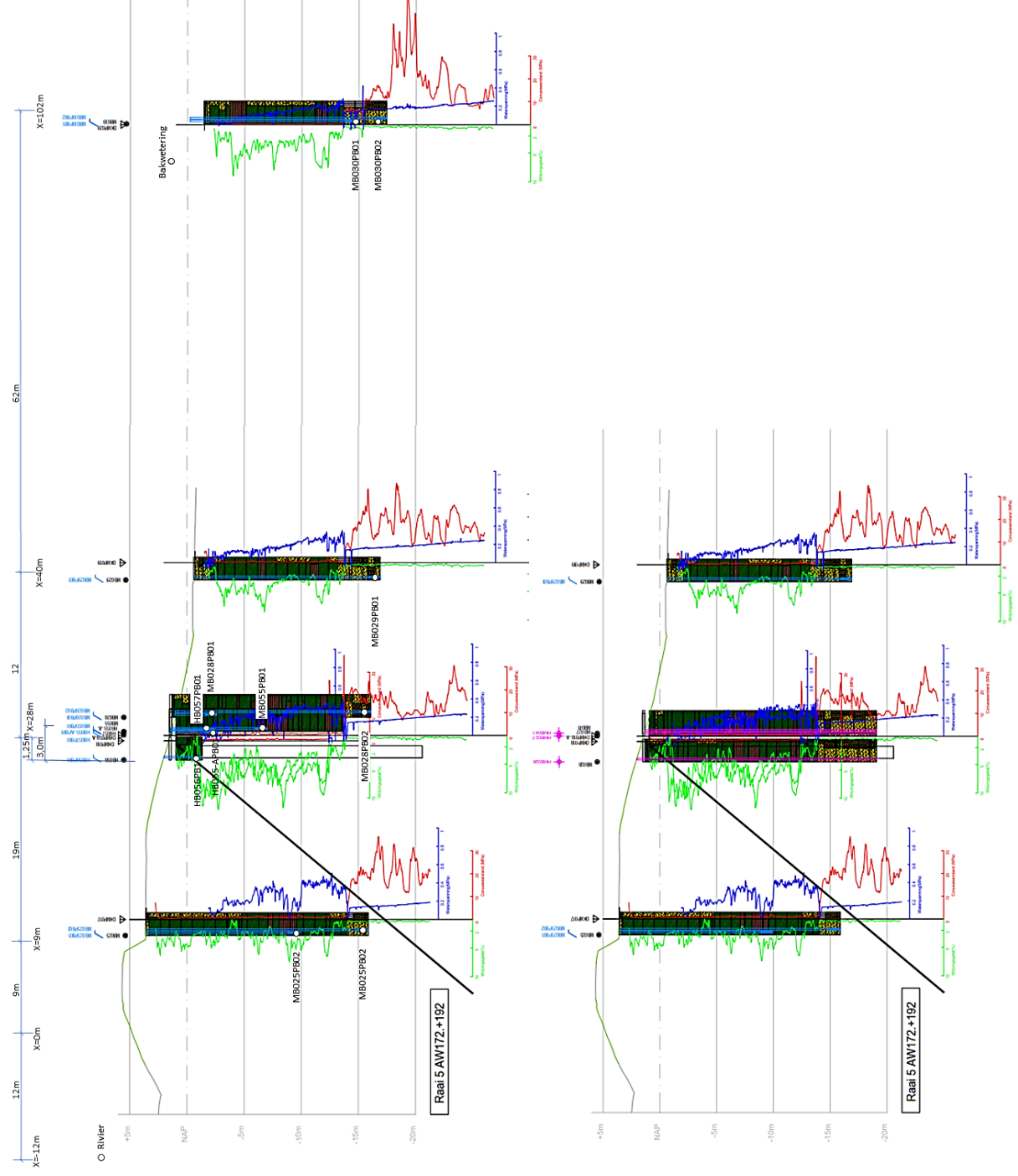




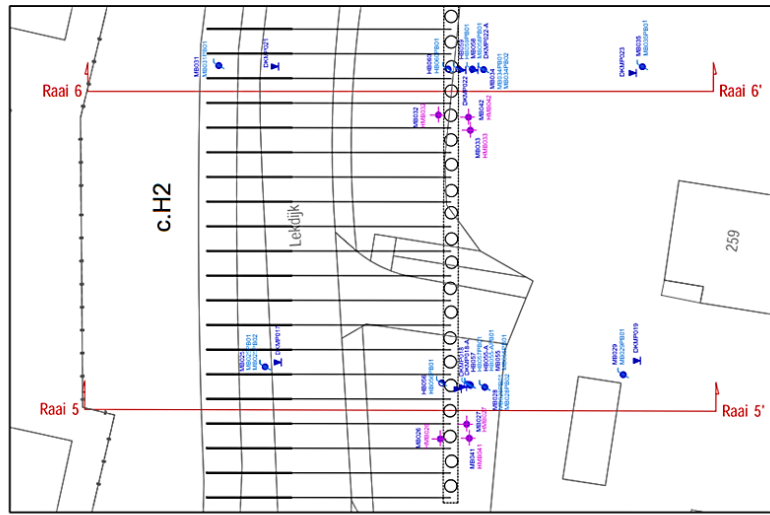




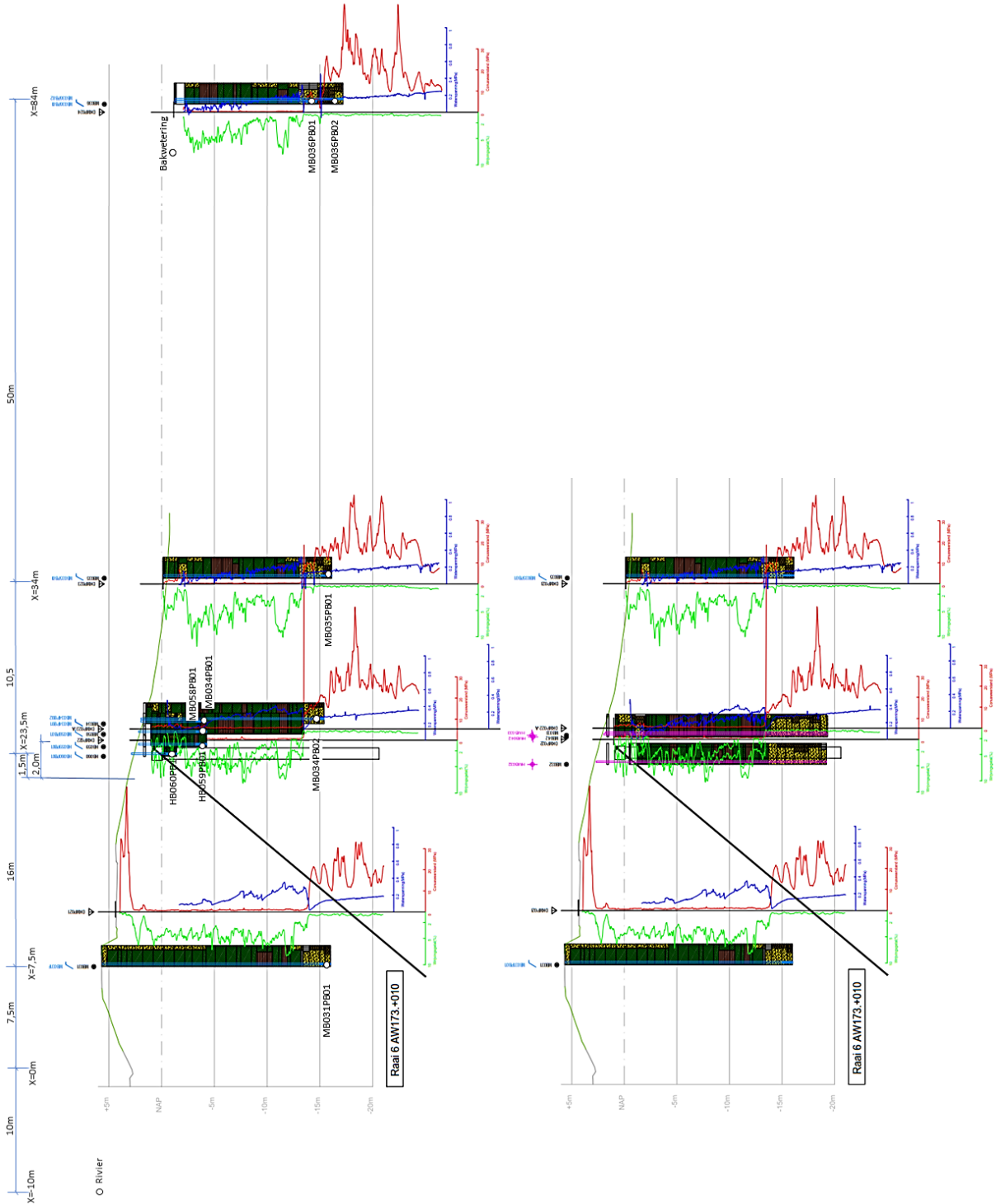
- LEGENDA**
- DNMP Dispersiering met plaatselijke wijziging en wateropvang
  - HB Hartboring met pelbus
  - MB Mechanische boring
  - MBH Mechanische boring met pelbus
  - HMB Hellingmetris
  - Locale dwarsprofiel



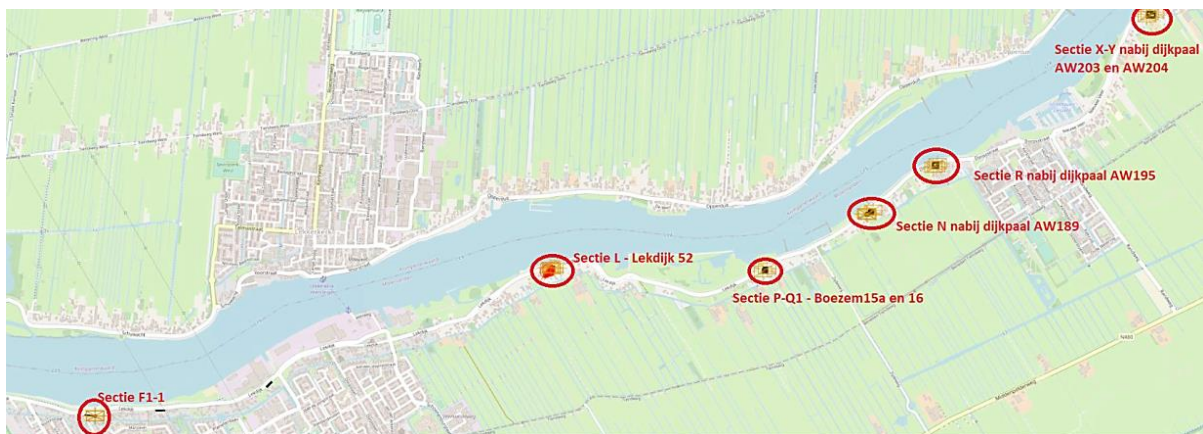




- LEGENDA**
- DKNP Deposering met plaatselijke wijziging en waterspanning
  - HB Handbooring met peilbus
  - MB Mechanische booring
  - HMB Mechanische booring met peilbus
  - Heiligmeubus
  - Locatie dwarsprofiel



## A.4 Locaties aanvullend veldonderzoek



Figuur 29: Projectgebied met 6 aanvullende onderzoekslocaties t.b.v. uitvoeren visuele inspecties boorpalenwand (bron: Wiertsema, Augustus 2023).

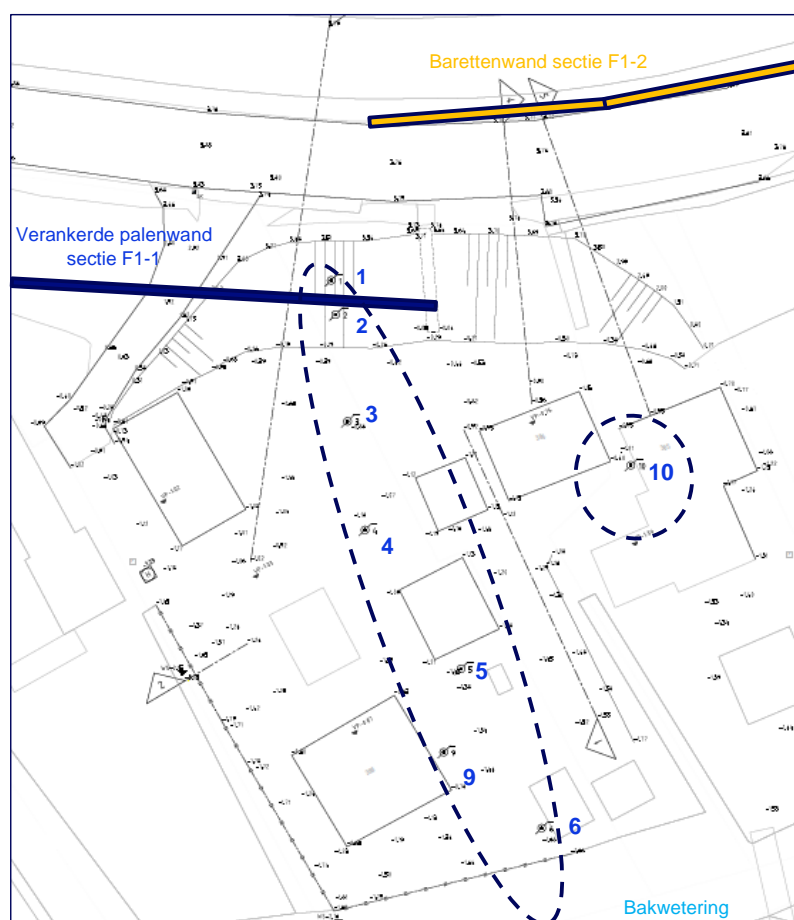
## B Stijghoogtemetingen ADCIM 2018-2019

Ter plaatse van de panden Lekdijk 355/356 en 357 zijn in 2018/2019 de destijds in 2012 door Wiertsema geplaatste Peilbuizen opnieuw gemeten in 2018-2019.

Deze ADCIM-metingen zijn uitgevoerd ter plaatse van locatie F1-1. Er zijn 10 peilbuizen geplaatst ter plaatse circa AW167+150 m (nummers 1 t/m 6, 9 en 10), waarvan de filters in het pakket slappe lagen zijn geplaatst. Voor de locaties van deze peilbuizen wordt verwezen naar Figuur 30 in deze bijlage. Hiermee is de hoogte van het freatisch vlak gemeten (de zogenaamde freatische peilbuizen).

De peilbuizen 7 en 8 zijn door Wiertsema geïnstalleerd met de filters in het diepe zand (PL) respectievelijk de TZ. De peilbuizen 7 en 8 staan op een afstand van circa 250 m in oostelijke richting van locatie F1-1 (namelijk ter plaatse van AW 169+005, nabij pand Lekdijk 357).

### B.1 Peilbuismetingen ADCIM 2018-2019, AW169 nabij de panden Lekdijk 355/356 en 357

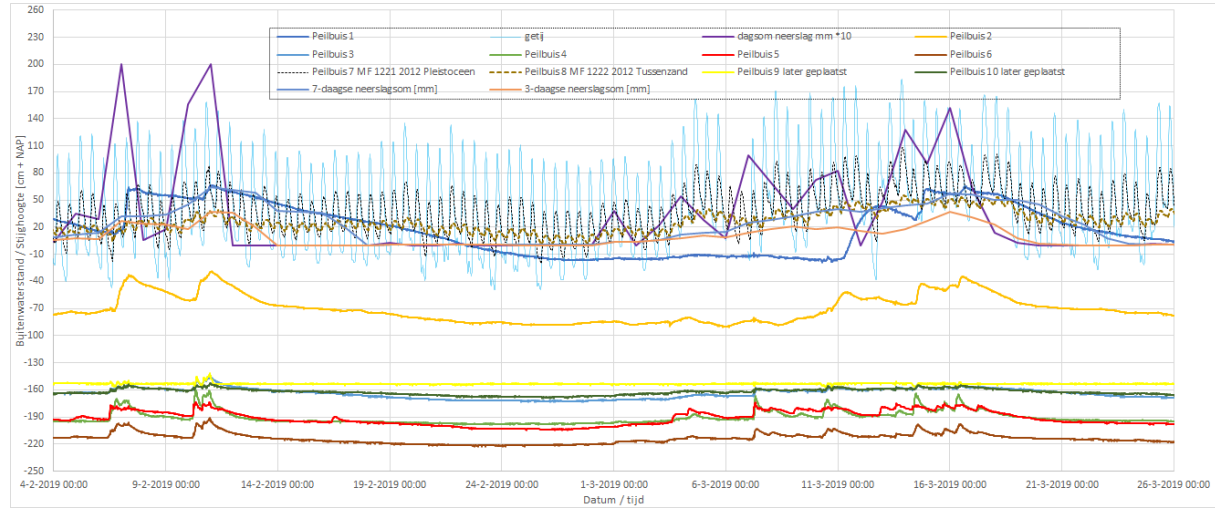


*Figuur 30: Situatie van de peilbuizen van ADCIM in sectie F1-1 bij Nieuw-Lekkerland (ADCIM, 2019). De peilbuizen 1 t/m 6 en 9 zijn in een raai geplaatst binnen de grote gearceerde lijn. Peilbuis 10 is geplaatst ca. 30 m ten oosten van peilbuis 4 en is aangegeven binnen de kleine gearceerde cirkel. De peilbuizen 7 en 8 zijn gesitueerd bij AW169, nabij Lekdijk 357 en zijn niet weergegeven in de figuur.*

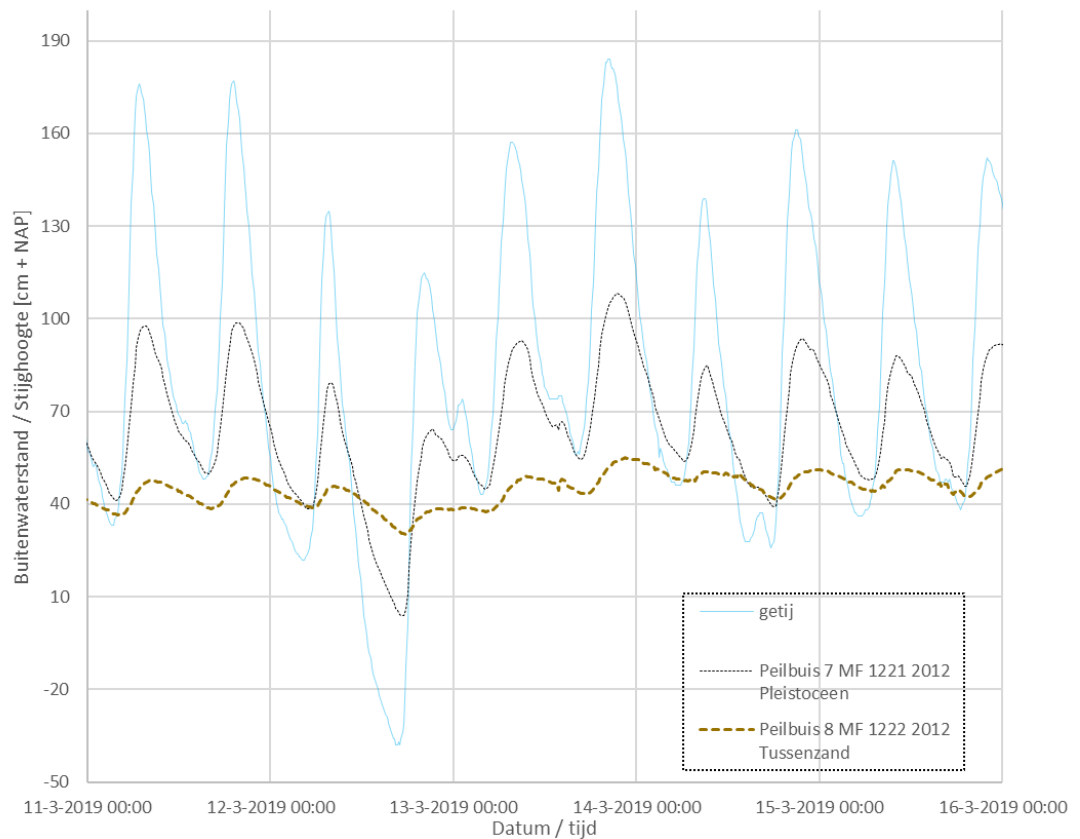
In Figuur 31 zijn de buitenwaterstand en de stijghoogten van de peilbuizen 7 en 8 weergegeven voor de periode van 11-03-2019 t/m 15-03-2019:

- Peilbuis 7 (ADDCIM) = MF 1221 2012 (PL).
- Peilbuis 8 (ADCIM) = MF 1222 2022 (TZ).

In Tabel 9 zijn de gemeten buitenwaterstanden en stijghoogten voor peilbuizen MF-1221 t/m 1224 (Wiertsema & Partners), 7 en 8 ADCIM weergegeven.



Figuur 31: Gemeten buitenwaterstand en stijghoogten peilbuizen 1 t/m 10 ADCIM 2019.



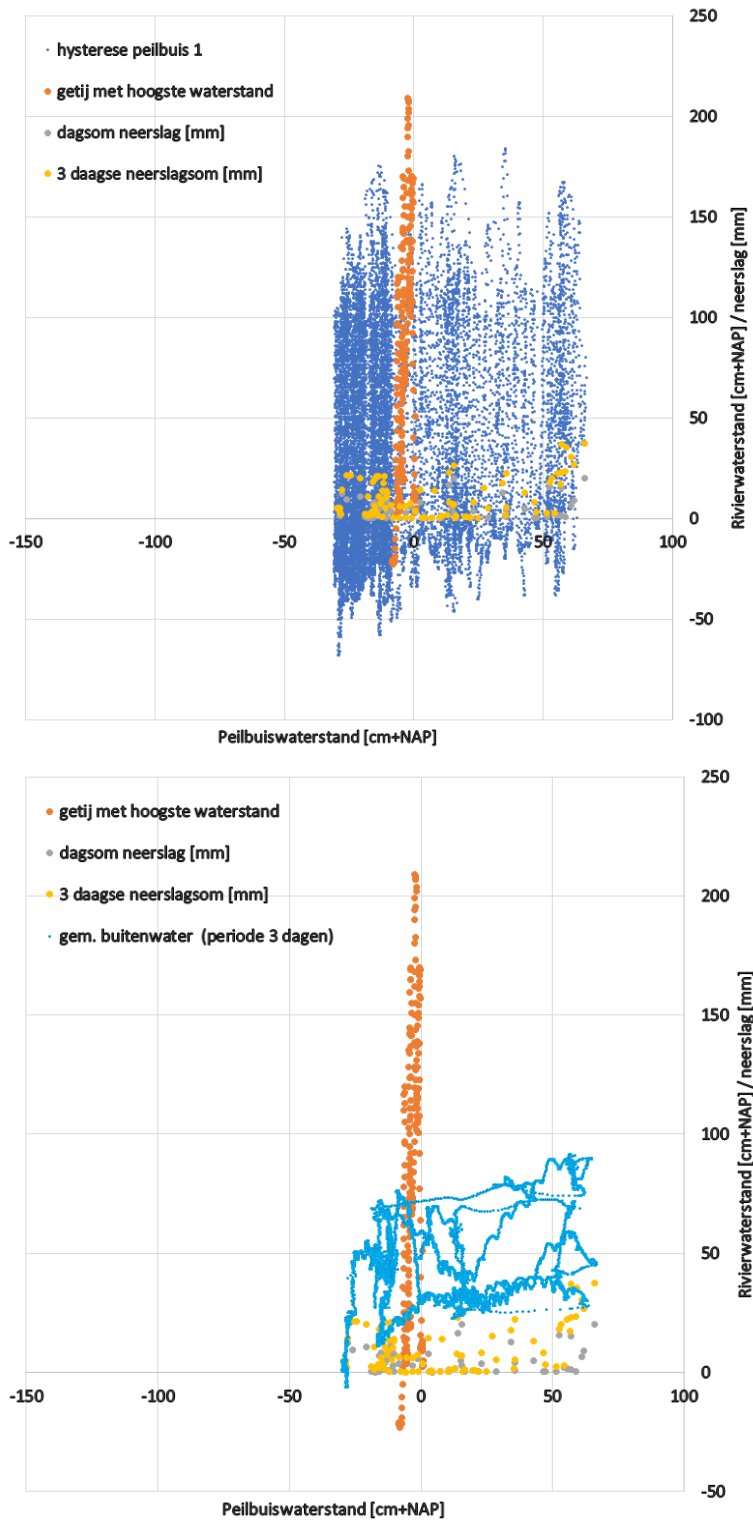
Figuur 32: Gemeten buitenwaterstand en stijghoogten peilbuizen 7 en 8 ADCIM 2019.

Tabel 9: Gemeten buitenwaterstand en stijghoogten peilbuizen MF-1221 t/m 1224 (Wiertsema&Partners), 7 en 8 ADCIM.

raai MF AW 168+197m AL en AW W169+5m KR		peilbuizen in TZ en PL: (periode dec 2012)			peilbuizen in TZ en PL: (periode 2018-2019)	
raai	omschrijving	getij	peilbuis kruin	peilbuis achterland	getij	peilbuis kruin
TZ	peilbuis nr.		MF-1222	MF-1224		ADCIM peilbuis 8
	gem. stijghoogte [m+NAP]	0,57	-0,55	-0,55	0,94	0,43
	2*amplitude [m] 2)	1,33	0,14	0,14	1,44	0,12
	responsfactor		0,11	0,11		0,08
PL	peilbuis nr.		MF-1221	MF-1223		ADCIM peilbuis 7
	gem. stijghoogte [m+NAP]	0,57	-0,26	-0,32	0,94	0,70
	2*amplitude [m]	1,33	0,57	0,52	1,44	0,57
	responsfactor		0,43	0,39		0,40

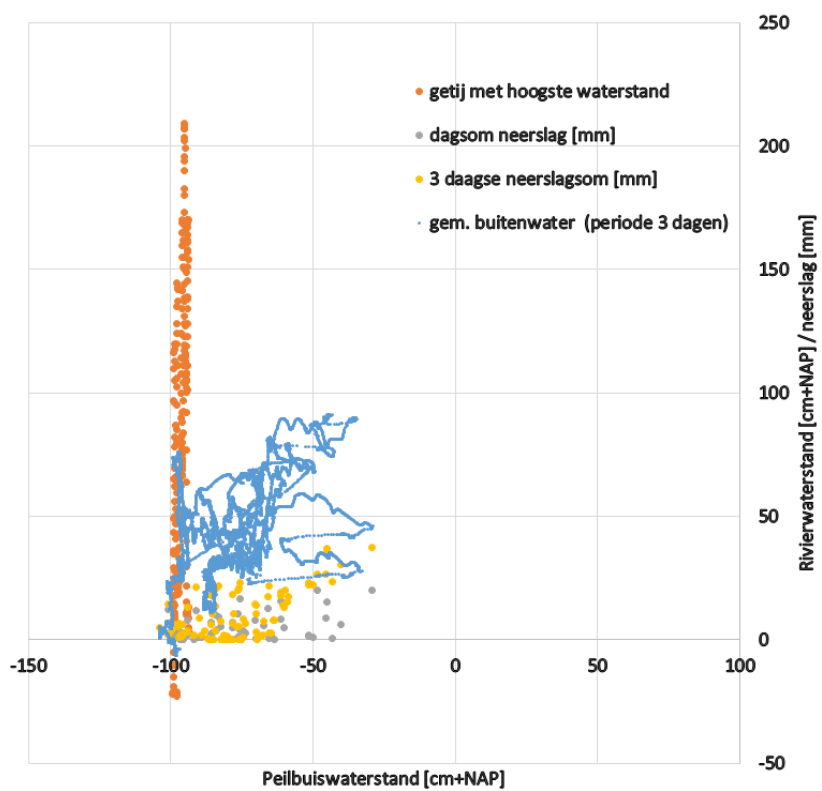
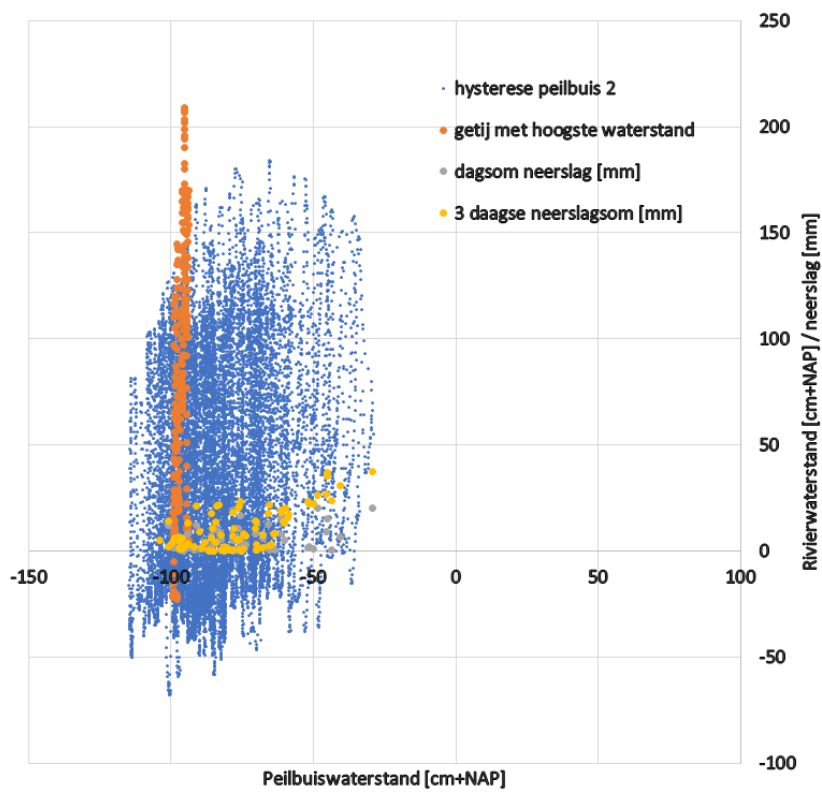
## B.2 Hysteresegrafieken peilbuismetingen ADCIM 2018-2019 (relatie peilbuisstand met neerslag/getij) voor Peilbuis 1, 2, 7 en 8

In onderstaande figuren (Figuur 33 tot en met Figuur 36) zijn de zogenaamde hysteresegrafieken weergegeven van de peilbuizen 1, 2, 7 en 8. In deze grafieken is het verband tussen de stijghoogte in de peilbuis en het getij weergegeven. Ook is in deze grafieken het verband tussen neerslag en de stijghoogte weergegeven. Hiervoor is zowel de dagsom neerslag als de 3-daagse neerslagsom gekozen.

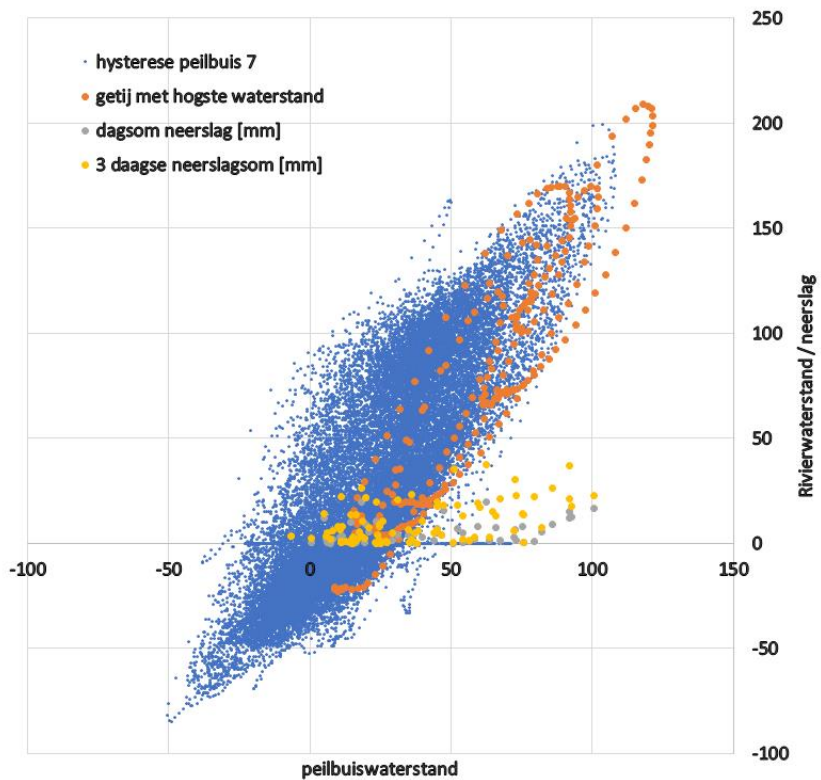


Figuur 33: Hysteresegrafieken peilbuis 1.

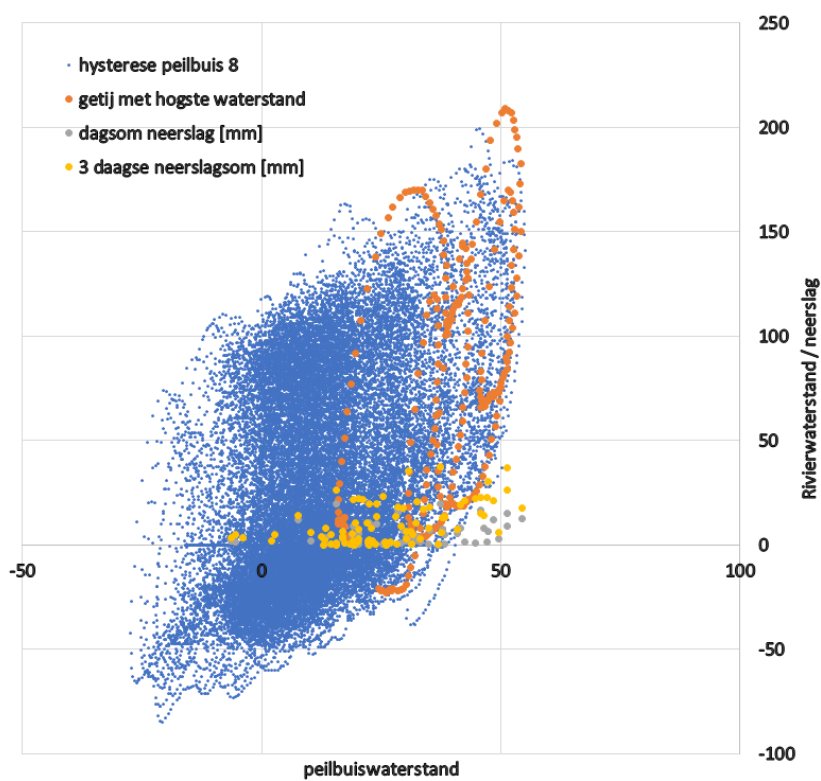




Figuur 34: Hysteresegrafieken peilbuis 2.



Figuur 35: Hysteresegrafieken peilbuis 7.



Figuur 36: Hysteresegrafieken peilbuis 8.

# C Waterstandsverlooptlijnen Lek voor Kinderdijk Schoonhoven

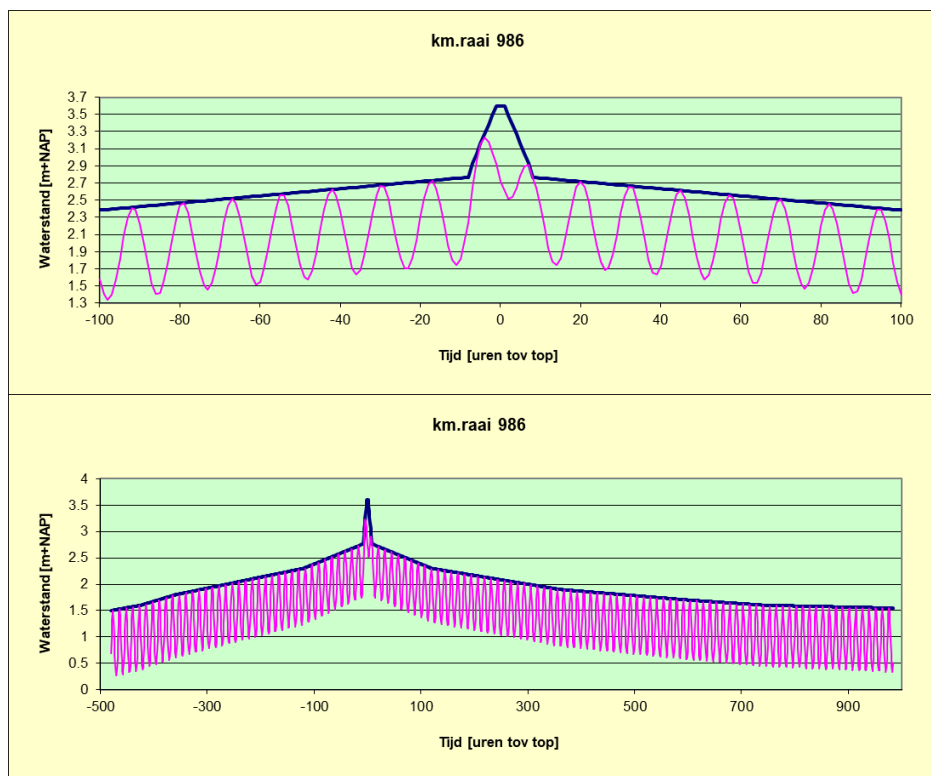
Het bepalen van de veiligheid van de boorpalenwand in sectie F1-1 wordt in onderdeel D behandeld en maakt geen onderdeel uit van dit rapport. Voor deze herberekening wordt de situatie beschouwd bij ontwerpomstandigheden. Dit zijn o.a. de situaties bij het optreden van WBN2023 en WBN2115. In de volgende paragrafen zijn de hoogten van WBN2023 en WBN2115 weergegeven alsmede de waterstandsverlooptlijnen. In dit rapport zijn voor deze situaties de stijghoogten gekwantificeerd in de TZ en de PL.

## C.1 MHW en waterstandsverlooptlijnen Lek voor KIS

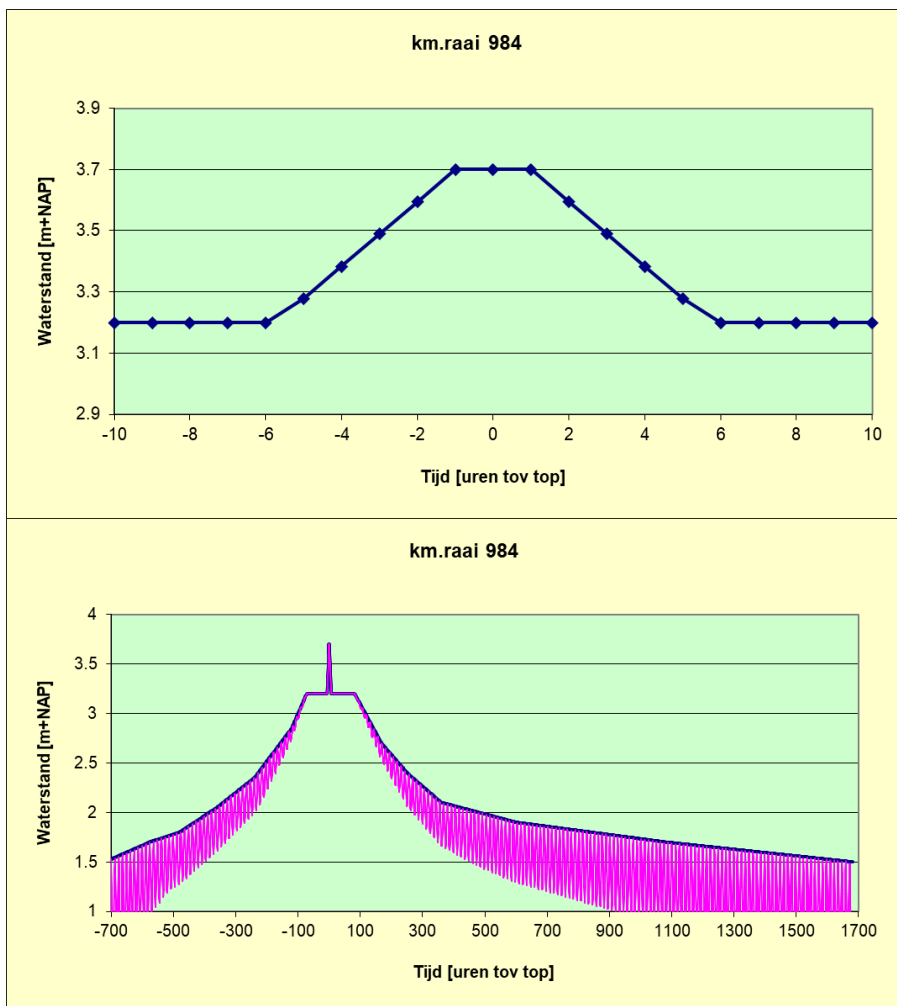
Uit H2 en Bijlage 2 en 3 van het document (Waterschap Rivierenland 2013) volgt:

- Ontwerpwaterstand 2065 oever Kmr 985/986 is NAP + 3,60 m.
- Ontwerpwaterstand 2115 oever Kmr 985/986 is NAP + 4,35 m (verschil is 0,75 m).
- MHW 1996 is dus NAP + 4,34 – 1 m = NAP + 3,35 m.

Locatie F1-1 bevindt zich ter hoogte van kmr 986 en locatie H2 bevindt zich ter plaatse van kmr 984. Uit Bijlage 4 van eerdergenoemd document volgen de volgende waterstandsverlooptlijnen voor de ontwerpwaterstanden.



Figuur 6-37 Waterstandsverlooptlijn kmr 986 voor jaar 2065 (inclusief 30cm.)



Figuur 6-38 Waterstandverlooptlijn kmr 984 voor jaar 2065 (inclusief 30cm).

## C.2 WBN en waterstandsverlooptlijnen Lek voor KIS

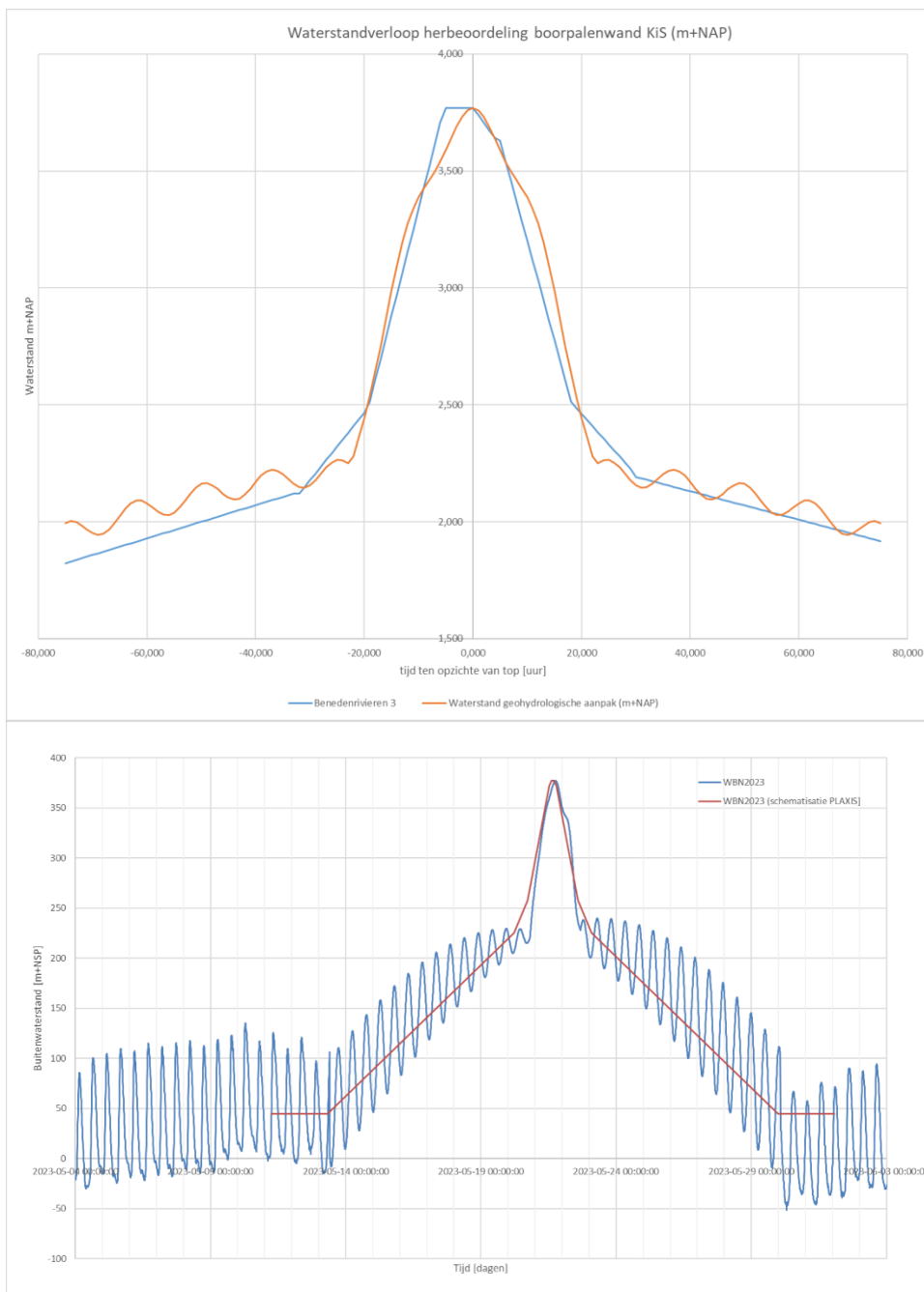
WBN2023:

Voor het verkrijgen van een definitief oordeel waterveiligheid van de boorpalenwanden in dijkversterking Kinderdijk Schoonhovense veer worden herberekeningen uitgevoerd. In memo (WSRL, Oktober 2023) zijn de uitgangspunten vastgelegd die nodig zijn voor het bepalen van de waterspanningen in het watervoerende pakket onder hoogwatercondities. Specifiek gaat het daarbij om het waterstandverloop en de bijdrage van de verschillende belastingcomponenten, namelijk de bijdrage van respectievelijk de rivierafvoer, stormopzet en getijde.

Conform memo (WSRL, Oktober2023): bladzijde 5, 2e kolom volgt hieruit voor WBN2023:

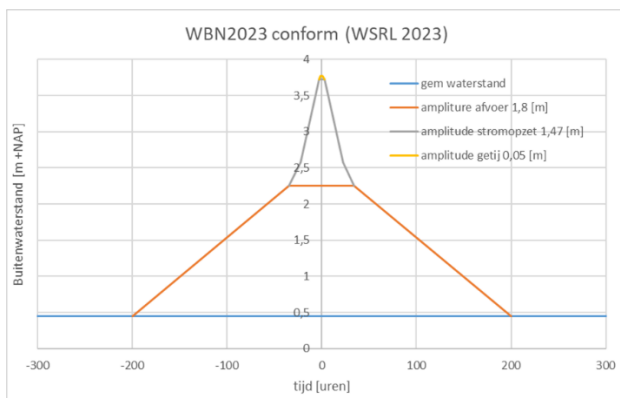
- Gemeten getij is NAP + 0,45.
- Rivierafvoer is 400 uur, amplitude is 1,8 m.
- Stormduur is 45 uur, stormopzet is 1,47 m.
- Getijduur is 6,21 uur en amplitude is 0,05 m.

Op basis van bovenstaande volgt voor 2023 het volgende geschematiseerde waterstandsverloop (terugkeertijd 30.000 jaar) waarbij het WBN een hoogte heeft van NAP + 3,77 m:



Figuur 39 Waterstandverloop herbeoordeling boorpalenwand KIS (bron WSRL oktober 2023).

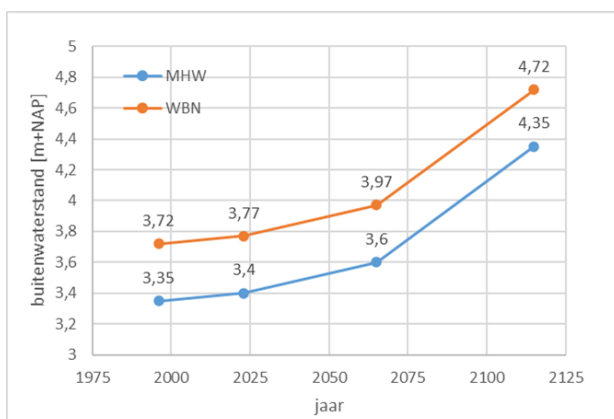
Ten behoeve van de grondwaterstromingsberekeningen is dit geschematiseerd zoals in Figuur 40 weergegeven.



Figuur 40 Schematisatie Waterstandverloop herbeoordeling boorpalenwand KIS locatie F1-1 (raai 2) WBN= NAP +3.77 t.b.v. grondwaterstromingsanalyses.

Voor bepaling WBN 2115 en WBN2175 kan zelfde uitgangspunt worden gehanteerd als bij ontwerp. Voor jaar 2065 (planperiode 50 jaar) en voor jaar 2115 (planperiode 100 jaar) volgt dat vooral de zeespiegel stijgt. In dit project is het volgende aangehouden:

- WBN = NAP + 3,77.
- Ontwerppeil nieuw 2065 = NAP + 3,77 + 0,2= NAP + 3,97 m.
- Ontwerppeil nieuw 2115 = Ontwerppeil nieuw 2065 + 0,75m = NAP + 4,72 m.



Figuur 41 Gehanteerde WBN en ontwerpwaterstanden.



## D Peilbuismetingen raai 1 t/m 6

### D.1 Samenvatting

#### D.1.1 Samenvatting peilbuismetingen

Ten behoeve van dit onderzoek zijn 74 peilbuizen gemonitord in raai 1 t/m 6 van de secties F1-1, F2-2 en 2. Voor de resultaten van alle afzonderlijke metingen wordt verwezen naar (Wiertsema, November 2023). Om deze meetdata inzichtelijk te krijgen is de data verwerkt in overzichtelijke grafieken en Tabellen in Paragraaf D.2.1 t/m D.2.6. Voor de locaties van de dwarsprofielen, peilbuizen en filterdiepten wordt verwezen naar Bijlage A.

Bij het verwerken van de metingen wordt onderscheid gemaakt in peilbuizen die wel of niet cyclisch reageren op de rivier. Hierbij zijn de peilbuizen ingedeeld in verschillende categorieën (zie Tabel 10). Peilbuizen waarvan op voorhand mag worden verwacht dat ze cyclisch reageren op de rivier zijn de peilbuizen in de TZ en de PL. De overige peilbuizen zijn veelal freatische peilbuizen die langs de deksloof van de boorpalenwand zijn geplaatst op geringe diepte staan in het holocene pakket slappe lagen of in het dijklichaam. Daarnaast zijn peilbuizen op enige diepte het holocene pakket slappe lagen geplaatst met het filter tegen de boorpaal op 2 m afstand van de boorpalen op dezelfde hoogte. In Tabel 10 is het onderscheid in bovengenoemde categorieën weergegeven.

Tabel 10: Peilbuizen met onderscheid in categorieën.

peilbuis nr.	raai nr	categorie	TZ	PL	holoceen		freatisch	opm
					t.p.v. boorpaal	2m uit boorpaal		
HB004PB01	1	3b	holoceen					
HB010PB01	2	4	freatisch				1	
HB016PB01	3	3b	holoceen			1		
HB022PB01	4	3b	holoceen			1		
HB043PB1	1	4	freatisch				1	droog
HB045PB1	1	4	freatisch				1	droog
HB045PB02	1	3a	holoceen		1			
HB047PB01	2	4	freatisch				1	
HB047PB02	2	3a	holoceen		1			
HB048PB01	2	3b	holoceen			1		
HB050PB01	3	4	freatisch				1	
HB050PB02	3	4	freatisch				1	
HB051PB01	3	3a	holoceen		1			
HB053PB01	4	4	freatisch				1	
HB053PB02	4	4	freatisch				1	
HB054PB01	4	3a	holoceen		1			
HB055-APB01	5	4	freatisch				1	
HB056PB01	5	4	freatisch				1	
HB057PB01	5	3a	holoceen		1			
HB059PB01	6	3a	holoceen		1			
HB060PB01	6	4	freatisch				1	
HB114PB01	3	4	freatisch				1	
HB114PB02	3	4	freatisch				1	
MB001PB01	1	1	tz	1				
MB001PB02	1	2	pl		1			
MB005PB01	1	1	tz	1				
MB005PB02	1	2	pl		1			
MB006PB01	1	1	tz	1				
MB006PB02	1	2	pl		1			
MB007-APB01	2	1	tz	1				
MB007-APB02	2	2	pl		1			
MB009PB01	2	4	freatisch				1	
MB011PB01	2	1	tz	1				
MB011PB02	2	2	pl		1			
MB012PB01	2	1	tz	1				
MB012PB02	2	2	pl		1			
MB013PB01	3	4	freatisch				1	kruin
MB013PB02	3	1	tz	1				
MB013PB03	3	2	pl		1			
MB015PB01	3	4	freatisch				1	
MB017PB01	3	1	tz	1				
MB017PB02	3	2	pl		1			
MB018PB01	3	1	tz	1				
MB018PB02	3	2	pl		1			
MB019PB01	4	1	tz	1				
MB019PB02	4	2	pl		1			
MB023PB01	4	1	tz	1				
MB023PB02	4	2	pl		1			
MB024PB01	4	1	tz	1				
MB024PB02	4	2	pl		1			
MB025PB01	5	3b	holoceen			1		kruin
MB025PB02	5	2	pl		1			
MB028PB01	5	3b	holoceen			1		
MB028PB02	5	2	pl		1			
MB029PB01	5	2	pl		1			
MB030PB01	5	2	pl		1			
MB030PB02	5	2	pl		1			
MB031PB01	6	2	pl		1			
MB034PB01	6	3b	holoceen			1		
MB034PB02	6	2	pl		1			
MB035PB01	6	2	pl		1			
MB036PB01	6	2	pl		1			
MB036PB02	6	2	pl		1			
MB040PB01	4	4	freatisch				1	
MB044PB01	1	1	tz	1				
MB044PB02	1	2	pl		1			
MB046PB01	2	1	tz	1				
MB046PB02	2	2	pl		1			
MB049PB01	3	1	tz	1				
MB049PB02	3	2	pl		1			
MB052PB01	4	1	tz	1				
MB052PB02	4	2	pl		1			
MB055PB01	5	3b	holoceen			1		diep
MB058PB01	6	4	freatisch				1	
OW001			rivier de Lek					
OW002			sloot bakwetering					
			subtotaal:	16	26	6	8	18
			totaal:		32			

Omschrijving categorieën:

1. TZ: Tussenzandlaag: (Alle peilbuizen met filter globaal van NAP - 10 m tot -13,5 m.
2. PL: Pleistocene zand (Alle peilbuizen met filters globaal van NAP - 14 m tot -17 m.
3. Holoceen: Per raai 2 peilbuizen die in het holoceen staan met filters globaal van NAP - 2 tot - 4 één tegen de boorpaal (categorie 3a en één op 2m afstand op dezelfde hoogte categorie 3b).
4. Freatische peilbuizen NAP 0 m tot – 3,5 m.

In onderstaande 3 tabellen (Tabel 11 tot en met Tabel 13) is een samenvatting gegeven van de meetwaarden van de peilbuizen die zijn geplaatst in de TZ (alleen voor raai 1 t/m 4 aanwezig) en de peilbuizen in de PL (raai 1 t/m 6). Dit voor 2 verschillende perioden, namelijk vóór en na een groot verschil in onttrekkingsdebiet van de grondwater onttrekking van Oasen te Nieuw Lekkerland.

Tabel 11: Samenvatting meetwaarden peilbuizen in de TZ en de PL sectie F1-1, raai 1 en 2.

raai 1 en 2	peilbuizen in TZ en PL: (periode na 15-06 tot 24-06-2023) 4)						periode 10-05 tot 22-05-2023 3)				
		Rivier	peilbuis 15 tot 20 m rivierwaarts van boorpaal	boorpaal	peilbuis 15 tot 20 m polderwaarts van boorpaal	peilbuis in achterland	Rivier	peilbuis 15 tot 20 m rivierwaarts van boorpaal	boorpaal	peilbuis 15 tot 20 m polderwaarts van boorpaal	peilbuis in achterland
1	x-coördinaat [m] 1)	-175	9	24	42	74	-175	9	24	42	74
TZ	peilbuis nr	OW001	MB001PB01 5)	MB044PB01	MB005PB01 6)	MB006PB01	OW001	MB001PB01	MB044PB01	MB005PB01 7)	MB006PB01
	gem. stijghoogte [m+NAP]	0.39	0.55	-1.11	-1.10	-1.16	0.51	0.57	-0.62	-0.50	-0.66
	amplitude [m] 2)	0.61	0.005	0.039	0.045	0.053	0.58	0.004	0.036	0.045	0.048
	responsfactor		0.008	0.064	0.074	0.087		0.007	0.062	0.078	0.083
PL	peilbuis nr.	OW001	MB001PB02	MB044PB02	MB005PB02	MB006PB02	OW001	MB001PB02	MB044PB02	MB005PB02	MB006PB02
	gem. stijghoogte [m+NAP]	0.39	-0.93	-1.01	-1.03	-1.16	0.51	-0.45	-0.50	-0.51	-0.61
	amplitude [m] 2)	0.61	0.223	0.214	0.203	0.190	0.58	0.215	0.208	0.197	0.184
	responsfactor		0.37	0.35	0.33	0.31		0.37	0.36	0.34	0.32
2	x-coördinaat [m] 1)	-175	7	21	33.5	83.5		7	21	33.5	83.5
TZ	peilbuis nr	OW001	MB007PB01	MB046PB01	MB011PB01	MB012PB01	OW001	MB007PB01 8)	MB046PB01	MB011PB01	MB012PB01
	gem. stijghoogte [m+NAP]	0.39	-1.02	-1.11	-1.09	-1.17	0.51	-0.70	-0.61	-0.60	-0.67
	amplitude [m] 2)	0.61	0.029	0.038	0.045	0.053	0.58	0.030	0.035	0.041	0.049
	responsfactor		0.048	0.062	0.074	0.087		0.052	0.060	0.071	0.084
PL	peilbuis nr.	OW001	MB007PB02	MB046PB02	MB011PB02	MB012PB02	OW001	MB007PB02	MB046PB02	MB011PB02	MB012PB02
	gem. stijghoogte [m+NAP]	0.39	-0.96	-1.06	-1.04	-1.17	0.51	-0.46	-0.55	-0.51	-0.60
	amplitude [m] 2)	0.61	0.221	0.213	0.206	0.183	0.58	0.216	0.207	0.200	0.178
	responsfactor		0.36	0.35	0.34	0.30		0.37	0.36	0.34	0.31

Opmerkingen:

- 1) X=0 is buitenkruinlijn.
  - 2) Gemiddelde van een periode.
  - 3) Dit is de periode voor de hoge grondwater onttrekking van Oasen te Nieuw Lekkerland ca. 3419 m3/d.
  - 4) Dit is de periode van de hoge grondwater onttrekking van Oasen te Nieuw Lekkerland ca. 7946 m3/d.
  - 5) Staat in zandige kleilaag 1 m boven de PL. Uit het grondonderzoek volgt dat op een afstand van 15 rivierwaarts van de boorpalenwand de TZ ontbreekt of deze is mogelijk zeer dun (< 0,1 m) of sterk kleilig ontwikkeld. De peilbuis reageert nauwelijks op kortdurende buitenwaterstands verschillen (getij) maar wel enigszins op een langduriger veranderingen van de buitenwaterstand, maar dit is gering.
  - 6) Voor deze periode is geen data beschikbaar wel voor periode 16-07 tot 26-07-2023.
  - 7) Voor deze periode is geen data beschikbaar wel voor periode 8-04 tot 16-04-2023.
  - 8) Voor deze periode is geen data beschikbaar wel voor periode 10-06-12-06-2023.
- De waarden in rood betreffen onzekere waarden.

Tabel 12: Samenvatting meetwaarden peilbuizen in de TZ en de PL sectie F2-2 raai 3 en 4.

raai 3 en 4	peilbuizen in TZ en PL: (periode na 15-06 tot 24-06-2023) 4)						periode 10-05 tot 22-05-2023 3)				
raai		Rivier	peilbuis 15 tot 20 m rivierwaarts van boorpaal	boorpaal	peilbuis 15 tot 20 m polderwaarts van boorpaal	peilbuis in achterland	Rivier	peilbuis 15 tot 20 m rivierwaarts van boorpaal	boorpaal	peilbuis 15 tot 20 m polderwaarts van boorpaal	peilbuis in achterland
3											
	x-coördinaat [m] 1)	-175	7.5	25	39	75		7.5	25	39	75
TZ	peilbuis nr	OW001	MB013PB02	MB049PB01 5)	MB017PB01	MB018PB01	OW001	MB013PB02	MB049PB01 5)	MB017PB01	MB018PB01
	gem. stijghoogte [m+NAP]	0.39	-0.78	-1.15	-1.23	-1.73	0.51	-0.33	-0.80	-0.84	-1.37
	amplitude [m] 2)	0.61	0.215	0.030	0.054	0.028	0.58	0.223	0.031	0.053	0.030
	responsfactor		0.35	0.05	0.09	0.05		0.38	0.05	0.09	0.05
PL	peilbuis nr.	OW001	MB013PB03	MB049PB02 5)	MB017PB02	MB018PB02	OW001	MB013PB03	MB049PB02 5)	MB017PB02	MB018PB02
	gem. stijghoogte [m+NAP]	0.39	-0.78	-0.80	-0.89	-1.04	0.51	-0.33	niet beschikb.	-0.40	-0.51
	amplitude [m] 2)	0.61	0.270	0.250	0.246	0.227	0.58	0.259	niet beschikb.	0.237	0.220
	responsfactor		0.44	0.41	0.40	0.37		0.45	-	0.41	0.38
4											
	x-coördinaat [m] 1)	-175	10	29	43.5	77.5		10	29	43.5	77.5
TZ	peilbuis nr	OW001	MB019PB01	MB052PB01 5)	MB023PB01	MB024PB01	OW001	MB019PB01	MB052PB01 5)	MB023PB01	MB024PB01 6)
	gem. stijghoogte [m+NAP]	0.39	-0.69	-1.14	-1.37	-1.36	0.51	-0.30	-0.87	-1.10	-0.88
	amplitude [m] 2)	0.61	0.027	0.025	0.037	0.123	0.58	0.017	0.019	0.037	0.114
	responsfactor		0.04	0.04	0.06	0.20		0.03	0.03	0.06	0.20
PL	peilbuis nr.	OW001	MB019PB02	MB052PB02	MB023PB02	MB024PB02	OW001	MB019PB02	MB052PB02	MB023PB02	MB024PB02
	gem. stijghoogte [m+NAP]	0.39	-0.73	-0.81	-0.89	-1.00	0.51	-0.28	-0.34	-0.41	-0.47
	amplitude [m] 2)	0.61	0.271	0.255	0.247	0.228	0.58	0.26	0.246	0.238	0.22
	responsfactor		0.44	0.42	0.40	0.37		0.45	0.42	0.41	0.38

Opmerkingen:

- 1) X = 0 is buitenkruinlijn.
- 2) Gemiddelde van een periode van enkele dagen.
- 3) Dit is de periode voor de hoge grondwater onttrekking van Oasen te Nieuw Lekkerland ca. 3419 m3/d.
- 4) Dit is de periode van de hoge grondwater onttrekking van Oasen te Nieuw Lekkerland ca. 7946 m3/d.
- 5) Voor deze periode is geen data beschikbaar wel voor periode 10-08 tot 25-08-2023.
- 6) afwijkende resultaten voor de beschouwde periode.  
De waarden in rood betreffen onzekere waarden.

Tabel 13: Samenvatting meetwaarden peilbuizen in de TZ en de PL sectie H2 raai 5 en 6.

raai 5 en 6	peilbuizen in TZ en PL: (periode na 15-06 tot 24-06-2023) 4)						periode 10-05 tot 22-05-2023 3)				
		Rivier	peilbuis 15 tot 20 m rivierwaarts van boorpaal	boorpaal	peilbuis 15 tot 20 m polderwaarts van boorpaal	peilbuis in achterland	Rivier	peilbuis 15 tot 20 m rivierwaarts van boorpaal	boorpaal	peilbuis 15 tot 20 m polderwaarts van boorpaal	peilbuis in achterland
5	x-coördinaat [m] 1)	-175	9	28	40	102		9	28	40	102
PL	peilbuis nr.	OW001	MB025PB02	MB028PB02	MB029PB01 6)	MB030PB01 en PB030PB02	OW001	MB025PB02	MB028PB02	MB029PB01 6)	MB030PB01 en PB030PB02
	gem. stijghoogte [m+NAP]	0.39	-0.30	-0.35	-0.29	-0.41	0.51	-0.05	-0.10	-0.03	-0.14
	amplitude [m] 2)	0.61	0.313	0.303	0.296	0.253	0.58	0.300	0.290	0.283	0.241
	responsfactor		0.51	0.50	0.49	0.41		0.52	0.50	0.49	0.42
6	x-coördinaat [m] 1)	-175	7.5	23.5	34	84		7.5	23.5	34	84
PL	peilbuis nr.	OW001	MB031PB01	MB034PB02	MB035PB01	MB036PB01 en MB036PB02	OW001	MB031PB01	MB034PB02	MB035PB01	MB036PB01 en MB036PB02
	gem. stijghoogte [m+NAP]	0.39	-0.20	-0.29	-0.27	-0.36	0.51	0.04	-0.05	-0.03	0.00
	amplitude [m] 2)	0.61	0.324	0.308	0.301	0.300	0.58	0.311	0.295	0.298	0.300
	responsfactor		0.53	0.50	0.49	0.49		0.54	0.51	0.51	0.52

Opmerkingen:

- $X = 0$  is buitenkruinlijn.
- Gemiddelde van een periode van enkele dagen.
- Dit is de periode voor de hoge grondwater onttrekking van Oasen te Nieuw Lekkerland ca. 3,419 m<sup>3</sup>/d.
- Dit is de periode van de hoge grondwater onttrekking van Oasen te Nieuw Lekkerland ca. 7946 m<sup>3</sup>/d.

De overige peilbuizen staan in het holocene pakket slappe lagen of in het dijklichaam. Deze staan allen in de directe omgeving van de boorpalenwand. De ondiepe peilbuizen in het holocene pakket of het dijklichaam zullen in het algemeen niet cyclisch reageren op het getij maar vermoedelijk wel op neerslag. Als gevolg van lekkage langs de boorpalen of de ankers naar het maaiveld bestaat echter wel de mogelijkheid dat deze cyclische reageren op het getij.

De peilbuizen op enige diepte in het holocene slappe pakket zullen in het algemeen niet cyclisch reageren op het getij en vermoedelijk ook niet reageren op neerslag. Dit zijn de peilbuizen die met het filter tegen de boorpaal zijn geplaatst en de peilbuizen op 2 m afstand van de boorpalen op dezelfde hoogte. In Tabel 14 zijn de resultaten van deze peilbuizen weergegeven.

Tabel 14: Samenvatting meetwaarden freatische peilbuizen langs de deksloof en peilbuizen in holoceen langs de boorpaal en op 2 m afstand.

Raai nr	Peilbuizen in holoceen pakket slappe lagen bij deksloof						
	Langs boorpaal	Op 2m afstand	rivierzijde langs deksloof			polderzijde langs deksloof	
1							
peilbuis nr.	HB045PB2	HB004PB1	HB043PB1 1)				HB045PB1 1)
filterdiepte [m+NAP]	-4.3	-4.2	0.0				-0.6
gem stijghoogte [m+NAP]	-0.5	-0.7	<0.0				<-0.5
2							
peilbuis nr.	HB047PB02	HB048PB1	HB010PB1				HB047PB01
filterdiepte [m+NAP]	-3.27	-3.33	-1.3				-0.77
gem stijghoogte [m+NAP]	-0,7 / -0,9	-1,0/-1,2	-0,9 / -1,1				van +0,28 tot -0,75 -0,6 / < -0,9 -0,7 / < -0,75
3							
peilbuis nr.	HB051PB1	HB016PB1	HB114PB1 2)	HB114PB2	HB050PB1	HB050PB2	MB015PB1
filterdiepte [m+NAP]	-2.52	-2.9	-0.4	-3.36	-1.96	-2.79	-1.9
gem stijghoogte [m+NAP]	-1.5	-1.9	-1.2	-1.20 tot -1.4	-1.3 tot -1.4	-0.8 tot -1.3	-1,20 tot -1,50
4							
peilbuis nr.	HB054PB01	HB022PB1	HB053PB1	HB053PB2			MB040PB01
filterdiepte [m+NAP]	-4.03	-3.93	-1.53	-2.33			-1.72
gem stijghoogte [m+NAP]	-1.30 tot -1.80	-1.5 tot -2.3	-0.9 tot -1.3	-0.9 tot -1.4			-0,7 tot -1,20
5							
peilbuis nr.	HB057PB01	MB028PB01	HB056PB1				HB055-APB01
filterdiepte [m+NAP]	-2.1	-2.1	-0.8				-1.9
gem stijghoogte [m+NAP]	-0.4 tot -0.75	-0.6 tot -0.8	-0.2 tot -0.4				-0.6 tot -0.75
6							
peilbuis nr.	HB059PB01	MB034PB01	HB060PB1				MB058PB01
filterdiepte [m+NAP]	-3.8	-3.8	-0.9				-3.8
gem stijghoogte [m+NAP]	-1.2	-0.6 tot -0.8	-1				-0.3 tot -0.5

1) Peilbuis HB043PB01 (staat droog op NAP + 0,06 m) en HB045PB1 (staat droog op NAP - 0,50 m).

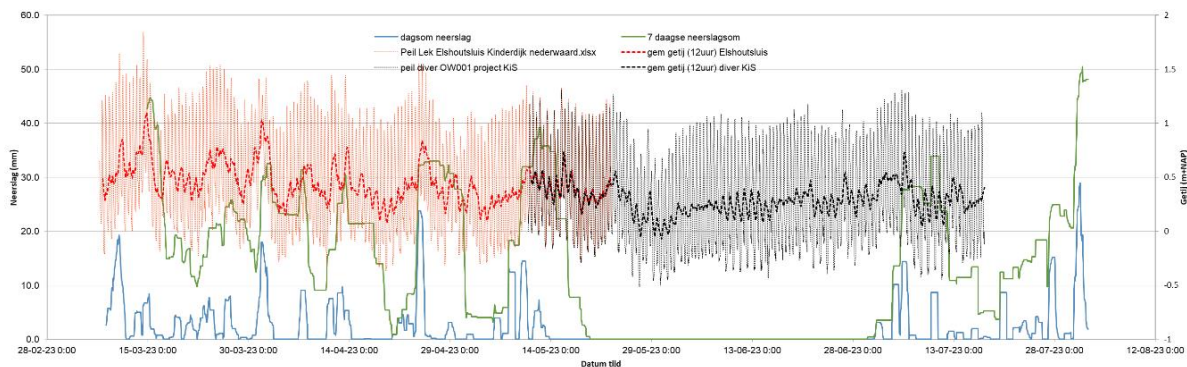
2) Voor deze peilbuis is de gemeten stijghoogte lager dan de filterdiepte. Dit lijkt niet te kloppen. Vermoedelijk is deze peilbuis van een dop voorzien waardoor een onderdruk kan worden geregistreerd. Deze waarnemingen zijn echter niet betrouwbaar.

#### D.1.2 Mogelijke correlatie met neerslag

In de zogenaamde hysteresegrafieken (zie Bijlage D.2) is het verband tussen de stijghoogte in de peilbuis en het getij weergegeven. Ook is in deze grafieken het verband tussen neerslag en de stijghoogte weergegeven. Hiervoor is zowel de dagsom neerslag als de 7-daagse neerslagsom gekozen. Voor het overzicht zijn al de hysteresegrafieken per raai in één figuur weergegeven in deze bijlage. Voor een duidelijk beeld van de afzonderlijke hysteresegrafieken wordt verwezen naar het digitaal dossier (zie Bijlage L). Afhankelijk van het geohydrologische systeem zal de waterspanning of stijghoogte van het grondwater in de ondergrond (vooral in de dijk) sneller of langzamer reageren op neerslag. Bij relatief doorlatend dijksmateriaal (bijvoorbeeld zandige klei) is de ervaring dat de waterspanning vrij snel reageert (bijvoorbeeld binnen 1 dag). Bij het relatief ondoorlatende dijklichaam (klei) zal de reactie trager zijn (bijvoorbeeld 3 of 7 dagen).

Uit de peilbuis metingen (zie Bijlage D.2) blijkt dat soms een zwakke correlatie wordt gezien tussen de dagsom neerslag en de stijghoogte in de PL en de TZ. Verklaring hiervoor is dat veelal tijdens of net na een periode van neerslag het rivierpeil stijgt. Zie de onderstaande grafiek in Figuur 42 waarin het getij en neerslag is uitgezet tegen de tijd. Als het verband tussen neerslag en (gemiddeld) rivierpeil nader wordt geanalyseerd blijkt dit verband inderdaad te bestaan. Dit is te zien door de dagsom neerslag met gemiddeld getij te vergelijken zoals in onderstaande figuur is weergegeven. Evenzo volgt uit peilbuismetingen (zie Bijlage D.2) dat soms een correlatie wordt gezien tussen het Lekpeil en het freatisch vlak (freatische peilbuizen en peilbuizen in holoceen). De verklaring hiervoor is dat het freatische vlak in werkelijkheid wellicht reageert op neerslag en niet op het Lekpeil. Omdat het Lekpeil en neerslag blijken te correleren geeft dit dus soms een vertekend beeld.



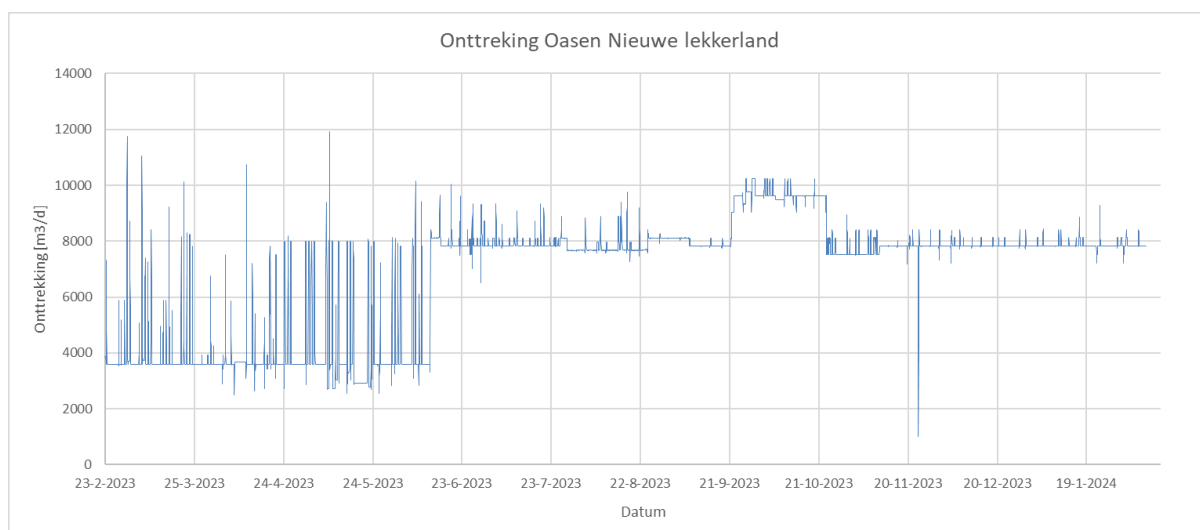


Figuur 42: Correlatie neerslag en getij.

### D.1.3

#### Drinkwateronttrekking Oasen te Nieuw Lekkerland:

Uit de peilbuismetingen (zie Bijlage D.2) volgt dat vanaf circa 12-06-2023 de stijghoogten in zowel de TZ als de PL in enkele dagen fors dalen. Dit wordt veroorzaakt door een groot verschil in onttrekkingsdebiet van de drinkwaterwinning van Oasen te Nieuw Lekkerland van voor en na d.d. 12-06-2023. Voor deze datum was de onttrekking 2500 tot 3500 m<sup>3</sup>/d en daarna circa 8000 m<sup>3</sup>/d. De onttrekkingsgegevens zijn weergegeven in Figuur 43.

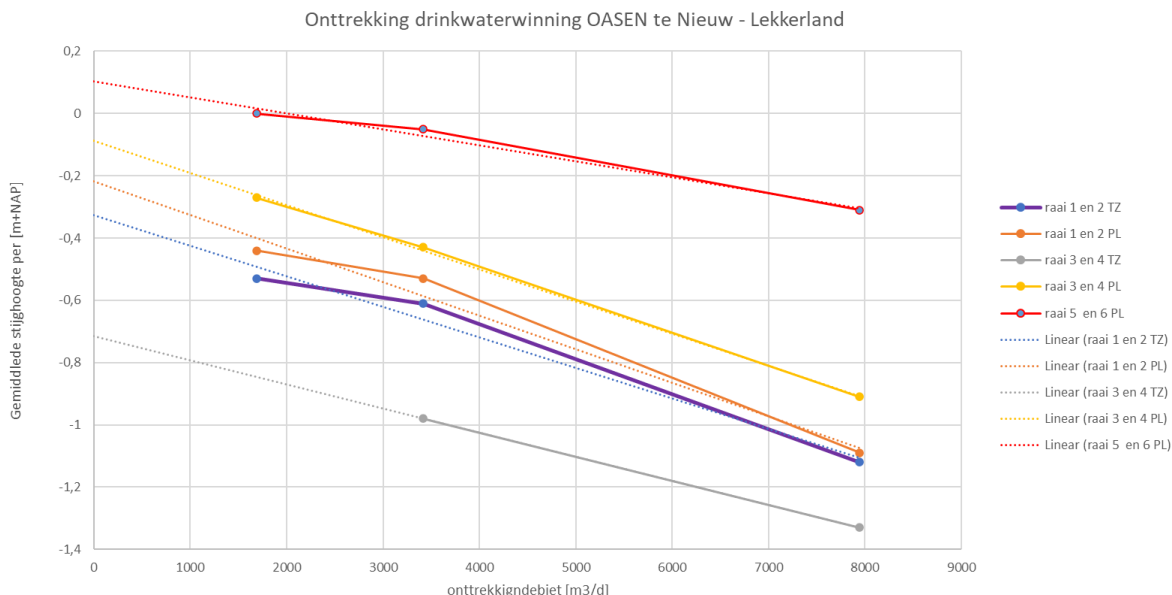


Figuur 43: Grondwateronttrekkingsgegevens van locatie De Put Oasen Drinkwater van februari 2023 t/m januari 2024. De locatie van de put is Middelweg 82 2957TH, Nieuw-Lekkerland.

De locatie van de onttrekking bevindt zich op een afstand van circa 625 m van de dijk te Nieuw Lekkerland ter hoogte van monitoringslocatie F-1-1. De invloed strekt zich radiaal uit waardoor mag worden verwacht dat de invloed het grootst is in Nieuw Lekkerland en richting het oosten zal afnemen. Om dit inzichtelijk te krijgen is voor 3 perioden met een verschillend onttrekkingsdebiet bepaald wat de gemiddelde stijghoogten in de peilbuizen is. De resultaten zijn per raai en voor zowel de TZ als de PL in Tabel 15 en Figuur 44 weergegeven.

Tabel 15: Stijghoogte in de TZ en de PL afhankelijk van onttrekkingsdebiet Oasen.

periode		onttrekkings- debiet	gemiddelde stijghoogte					
van	tot		raai 1 en 2 TZ	raai 1 en 2 PL	raai 3 en 4 TZ	raai 3 en 4 PL	raai 5 en 6 PL	
[dd/mm/jj]	[dd/mm/jj]	[m <sup>3</sup> /d]	[m+NAP]	[m+NAP]	[m+NAP]	[m+NAP]	[m+NAP]	
1-4-2023	15-4-2023	1686	-0,53	-0,44			-0,27	0
10-5-2023	12-5-2023	3419	-0,61	-0,53	-0,98		-0,43	-0,05
12-6-2023	28-6-2023	7946	-1,12	-1,09	-1,33		-0,91	-0,31



Figuur 44: Stijghoogte in de TZ en de PL afhankelijk van onttrekkingsdebiet Oasen.

Uit de resultaten voor raai 1 en 2 volgt een gemiddeld stijghoogteverschil in de TZ en de PL van circa 0,85 m als het onttrekkingsdebiet van 8000 naar 0 m<sup>3</sup>/d wordt verlaagd. Voor raai 3 en 4 is dit 0,70 m en voor raai 5 en 6 is dit 0,40 m.

## D.2 Meetwaarden en conclusies per raai

De meetwaarden zijn per raai weergegeven in de volgende paragrafen. Daarbij worden tevens de conclusies n.a.v. de metingen weergegeven:

- Raai 1 zie Paragraaf D.2.1.
- Raai 2 zie Paragraaf D.2.2.
- Raai 3 zie Paragraaf D.2.3.
- Raai 4 zie Paragraaf D.2.4.
- Raai 5 zie Paragraaf D.2.5.
- Raai 6 zie Paragraaf D.2.6.

Per raai is de stijghoogte van de peilbuizen, de buitenwaterstand en het peil in de bakwetering uitgezet tegen de tijd (y-as). Voor raai 1 is dit weergegeven in Figuur 45. Daarbij is tevens de dagsom neerslag en 7 daagse som (van de periode voorafgaan aan de stijghoogtemetingen) gegeven. Dit is voor de gehele meetperiode weergegeven. Tevens is een representatieve periode van 1 tot 2 weken gekozen waarvoor deze data in een aparte grafiek is verwerkt. Voor raai 1 is dit weergegeven in Figuur 46.

Tevens zijn per raai grafieken gepresenteerd met op de x-as de x-coördinaat van het betreffende dwarsprofiel (raai) en op de y-as achtereenvolgens de gemiddelde stijghoogte voor de peilbuizen in de TZ en de PL voor een bepaalde representatieve periode. Voor raai 1 is dit weergegeven in Figuur 48. Per peilbuis is daarbij de voor de betreffende meetperiode bepaalde karakteristieke boven- en ondergrenswaarde, de minimale en maximale waarde weergegeven. Boven deze grafiek is telkens het dwarsprofiel van de betreffende raai gegeven met daarin het uitgevoerde grondonderzoek bestaande uit de boringen, sonderingen en de locaties van de filters van de peilbuizen. Voor raai 1 is dit weergegeven in Figuur 47.

De te kiezen perioden zijn voor raai 1, 2, 5, en 6 periode 09-04-2023 t/m 18-04-2023 en voor raai 3 en 4 periode 25-04-2023 t/m 03-05-2023.

Hierdoor wordt peilbuis MB049PB02 in raai 3 (staat in PL) niet weergegeven omdat deze niet in de bewuste periode is gemeten. Hetzelfde geldt voor de peilbuizen MB024PB1 en MB024PB2 (van raai 4) die op een x-coördinaat van 77,5 m staan.

Tot slot zijn per peilbuis de zogenaamde hysteresegrafieken gemaakt waarbij de peilbuisstand (x-as) tegen het getij (y-s) is uitgezet. Daarbij is ook de dagsom neerslag en 7 daagse neerslagsom (y-as) weergegeven. Voor raai 1 zijn deze grafieken weergegeven in Figuur 49.

Per meetraai in de navolgende paragrafen de conclusies naan aanleiding van de metingen geformuleerd. In eerste instantie zijn de bevindingen over de peilbuismetingen in de TZ en de PL gegeven. Daarna volgen de bevindingen over de van de metingen van de peilbuizen in het holocene pakket slappe lagen ter plaatse van de boorpaal.

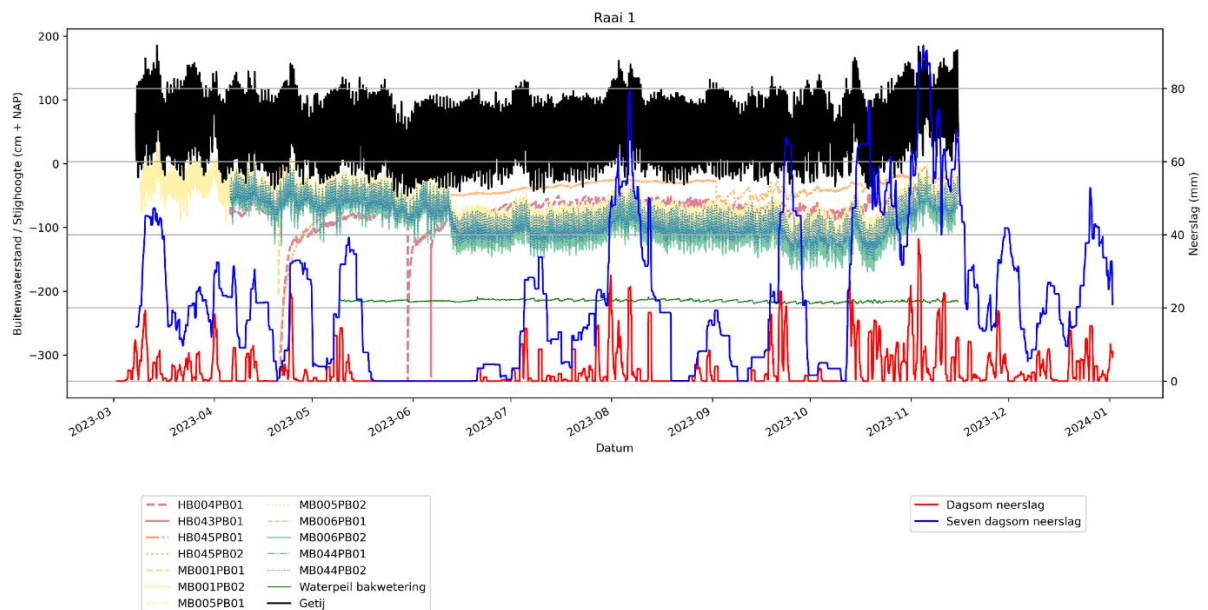
Vervolgens zijn de conclusies gegeven voor wat betreft:

- Mogelijke hydraulische kortsluiting PL en TZ.
- Mogelijk lekkage/vernating van TZ naar maaiveld bij boorpaal.
- Mogelijk lekkage/vernating van PL naar maaiveld bij anker.

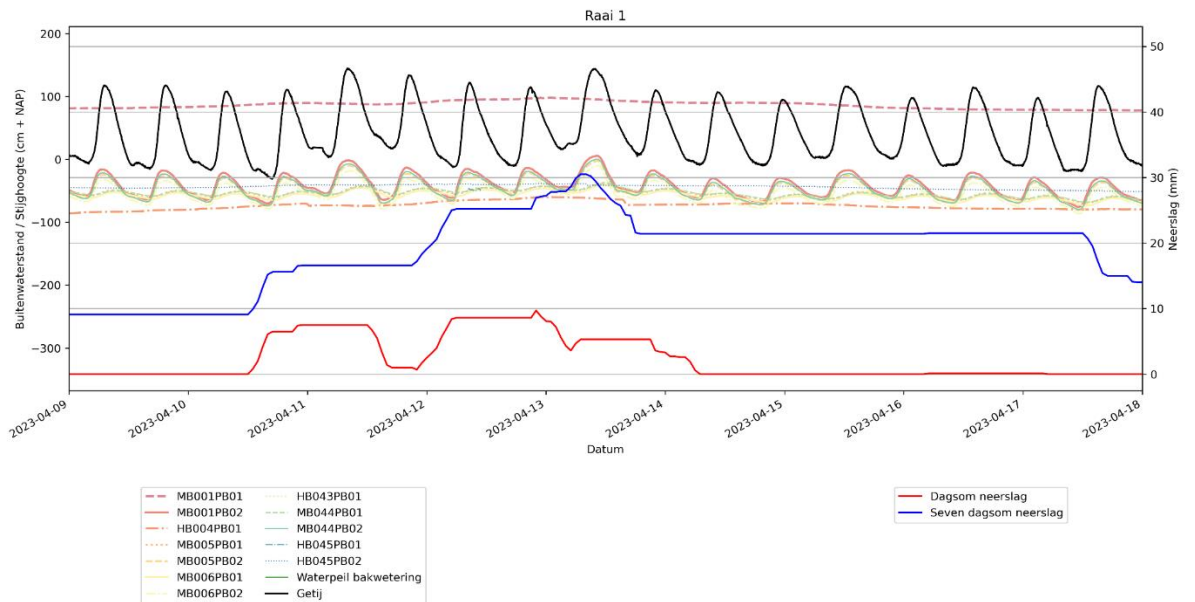
Daarbij is gebruik gemaakt van de bij de hypothesen in Paragraaf 3.3 (zie hoofdrapport) aangegeven invloeden op de stijghoogten in de TZ en de PL als ook de invloed daarvan op het freatische vlak.

## D.2.1 Raai 1

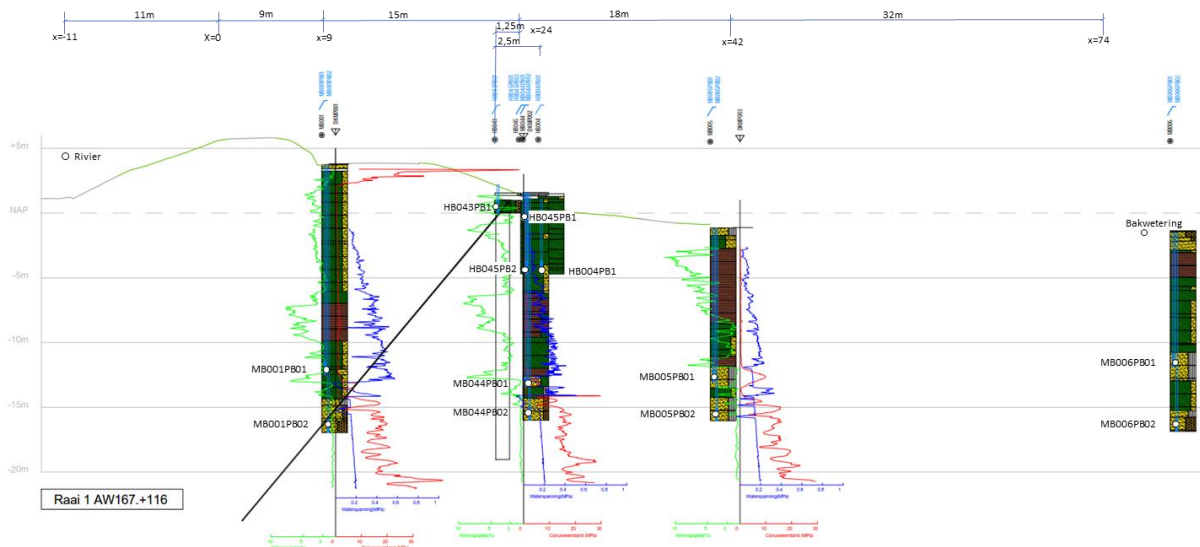
### D.2.1.1. Meetwaarden



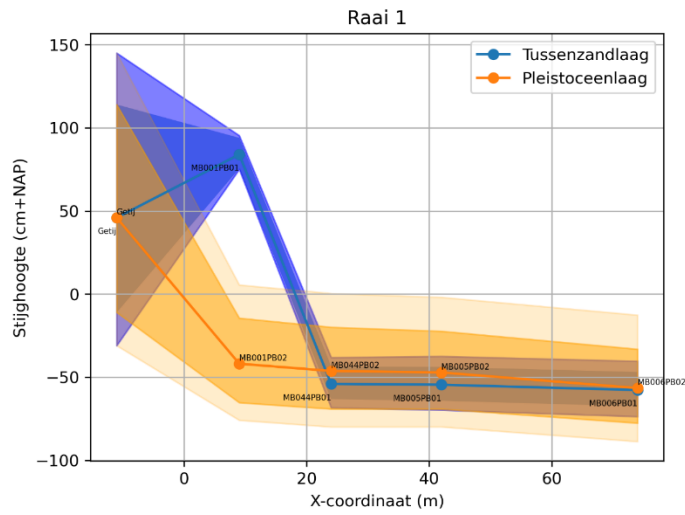
Figuur 45: De stijghoogte van de peilbuizen, de buitenwaterstand en het peil in de bakwetering uitgezet tegen de tijd (y-as) van raai 1 (gehele meetperiode).



Figuur 46: De stijghoogte van de peilbuizen, de buitenwaterstand en het peil in de bakwetering uitgezet tegen de tijd (y-as) van raai 1 (periode 9-04-2023 tot 18-04-2023).

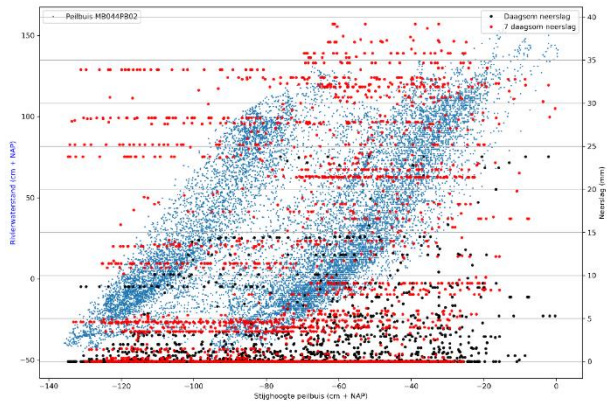
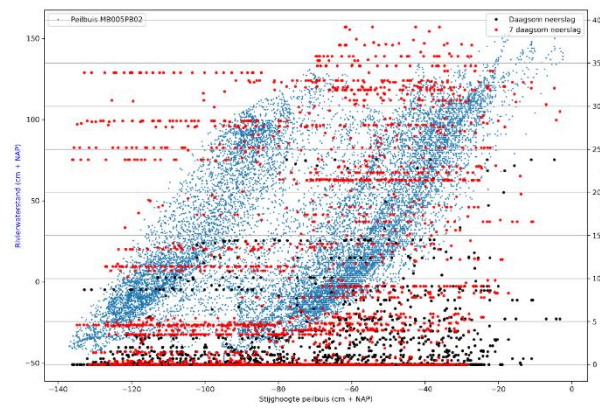
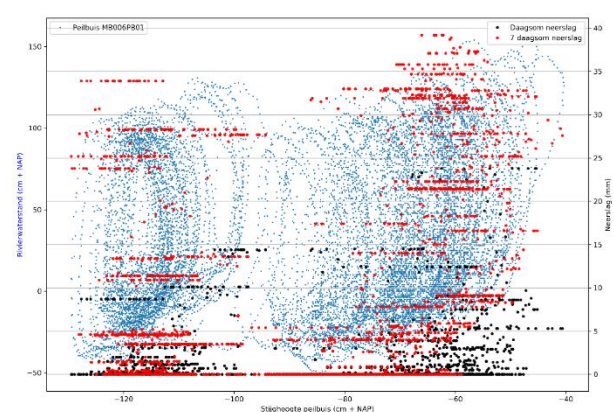
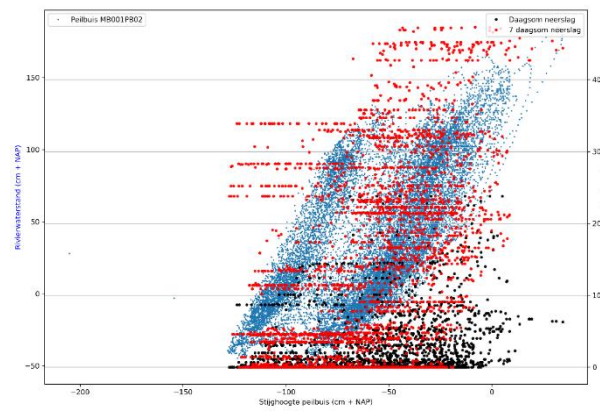
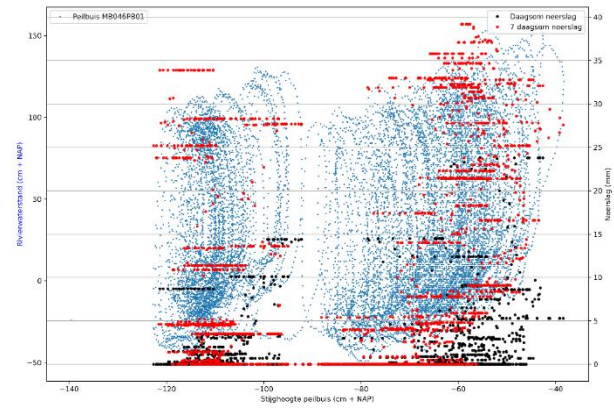
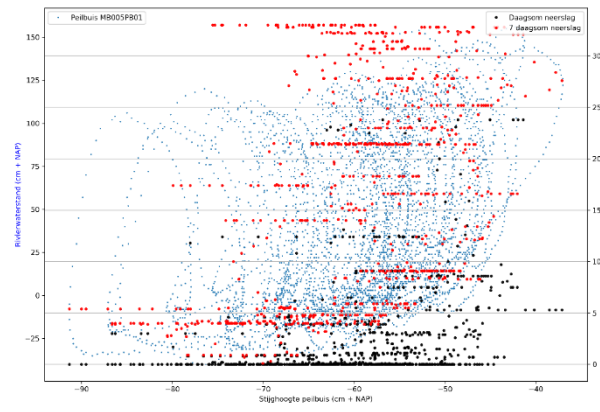
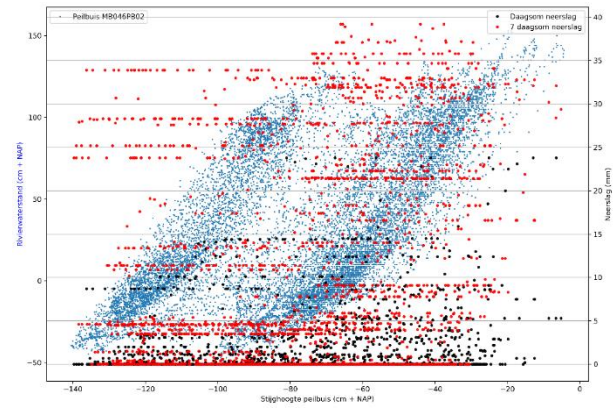
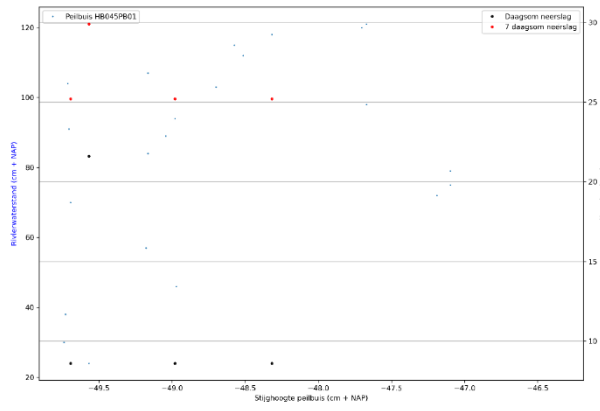


Figuur 47: Dwarsprofiel raai 1 met uitgevoerde grondonderzoek bestaande uit de boringen, sonderingen en de locaties van de filters van de peilbuizen.

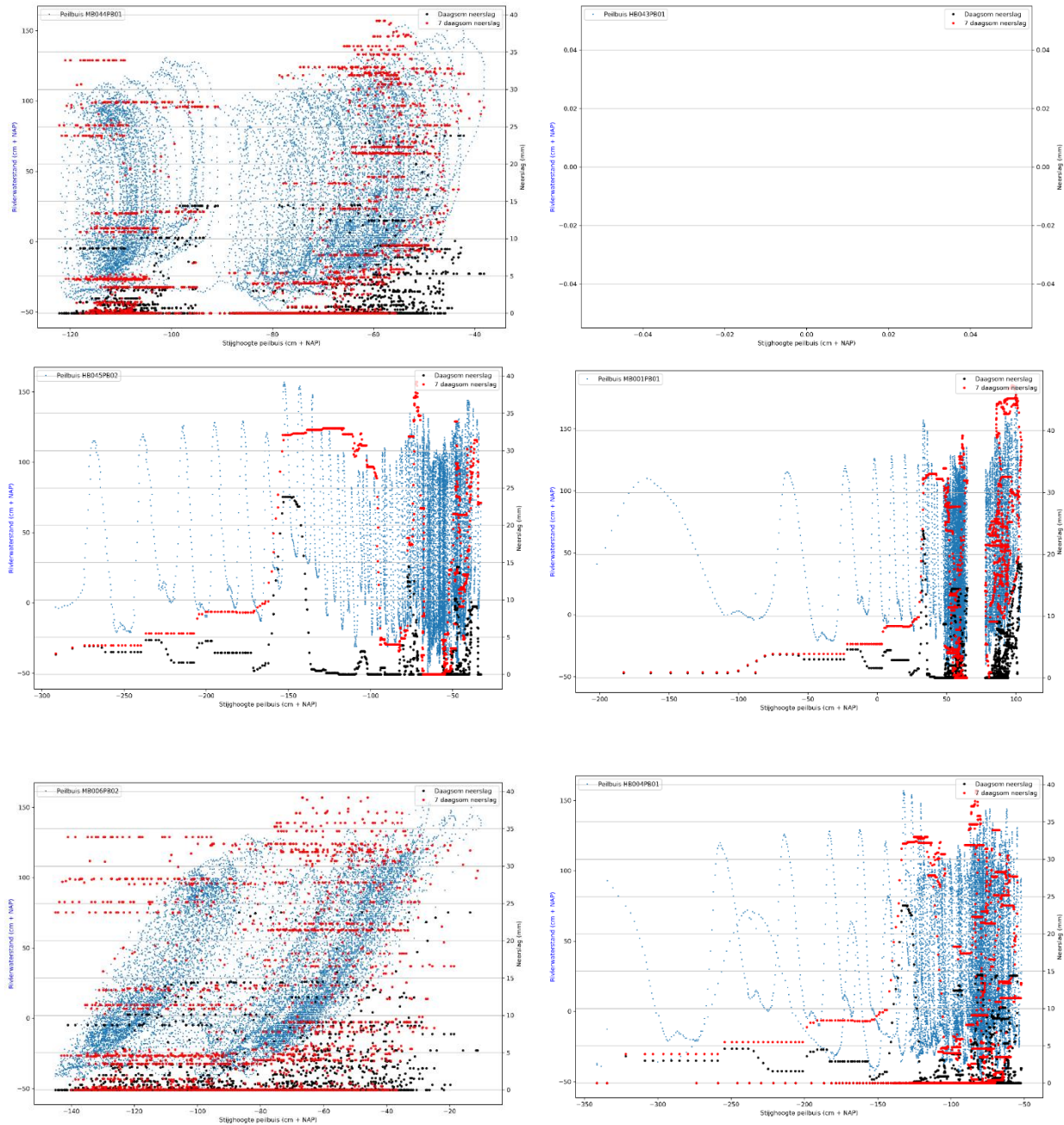


*Figuur 48: Gemiddelde stijghoogte in de TZ en de PL voor raai 1 voor een bepaalde representatieve periode (Per peilbuis is voor de betreffende meetperiode de karakteristieke boven- en ondergrenswaarde, de minimale en maximale waarde in de meetperiode weergegeven).*









Figuur 49: Hysteresisgrafieken peilbuizen raai 1, waarbij de peilbuisstand (x-as) tegen het getij (linker y-s) is uitgezet. Inclusief dagsom neerslag en 7 daagse neerslagsom (rechter y-as). Voor het overzicht zijn al de hysteresisgrafieken per raai in één figuur weergegeven. Voor een duidelijk beeld van de afzonderlijke grafieken wordt verwezen naar het opleverdossier.

#### D.2.1.2. Conclusies n.a.v. de meetwaarden

Uit de metingen van de peilbuizen in de PL en de TZ volgt:

- Er zijn 7 peilbuizen met het filter in de watervoerende zandlagen geplaatst waarvan 4 in de PL en 3 in de TZ (zie Figuur 47 voor de dwarsprofielen met de locaties van de peilbuizen en filterdiepten).
- Uit het grondonderzoek volgt (zie Figuur 47) dat op een afstand van 15 rivierwaarts van de boorpalenwand de TZ ontbreekt of deze is mogelijk zeer dun (< 0,1 m) of sterk kleilig ontwikkeld.

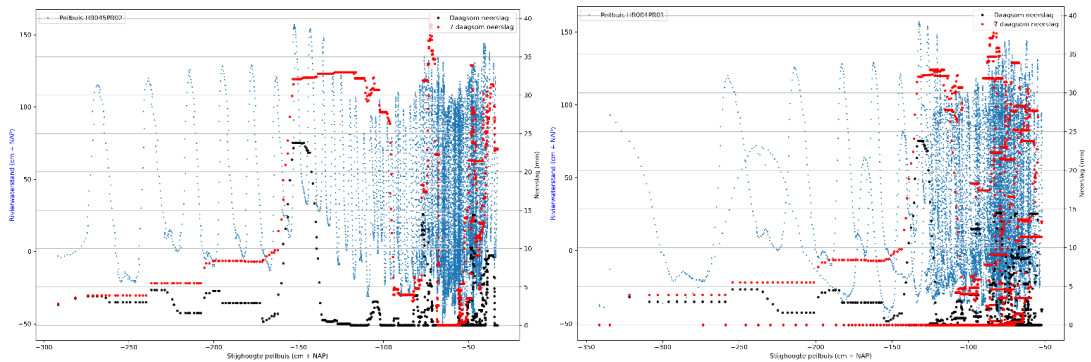
De peilbuis (zie Figuur 46) reageert nauwelijks op kortdurende buitenwaterstands verschillen (getij) maar wel enigszins op een langduriger veranderingen van de buitenwaterstand, maar dit is gering.

- De respons op de stijghoogte in de PL op het getij is ook aanmerkelijk sterker dan in de TZ (zie Figuur 46 en Tabel 11). Dit is circa een factor 5 tot 6. Opmerkelijk is wel dat de respons van de stijghoogte in de TZ op het getij iets groter is op grotere afstand richting de polder.
- De gemiddelde stijghoogte van de metingen in de PL en de TZ laten zien dat de stijghoogten vergelijkbaar zijn (zie Figuur 48) Het verschil tussen de PL en de TZ is kleiner dan 10 cm.
- Drinkwaterwinning Oasen: opmerkelijk aan de metingen is dat vanaf circa 12-06-2023 de stijghoogten in zowel de TZ als de PL in enkele dagen tijd circa 55 cm dalen (zie Figuur 45). Voor de peilbuis in de TZ (MB005PB01) zijn helaas geen metingen beschikbaar vanaf 09-05-2023. Verwacht mag echter worden dat ook bij deze peilbuis na circa 12-06-2023 een circa 0,5 m lagere stijghoogte wordt gemeten. Zoals ook in Paragraaf D.1 is aangegeven wordt dit veroorzaakt door een groot verschil in onttrekkingsdebit van de drinkwaterwinning van Oasen te Nieuwe Lekkerland van voor en na 12-06-2023. Voor deze datum was de onttrekking circa 3500 m<sup>3</sup>/d en daarna circa 8000 m<sup>3</sup>/d (zie Figuur 43).
- Mogelijke correlatie met neerslag: in de zogenaamde hysteresegrafieken, die in Figuur 49 zijn weergegeven, is naast de correlatie tussen de stijghoogte in de peilbuis en het getij ook het verband tussen neerslag en de stijghoogte weergegeven. Uit de metingen volgt een zeer zwakke correlatie tussen neerslag en de stijghoogte in de peilbuizen in het watervoerende zandlagen. Hoogstens dat enige correlatie aanwezig is tussen de dagsom neerslag en de stijghoogte (zie bijvoorbeeld peilbuis MB001PB02). De verklaring hiervoor is in Paragraaf D.1.2 gegeven.

Uit de metingen van de peilbuizen in het holocene pakket slappe lagen ter plaatse van de boorpaal volgt (zie Tabel 13):

- Er zijn 4 peilbuizen in het holocene pakket slappe lagen ter plaatse van de boorpaal geplaatst.
- Twee van de 4 peilbuizen staan ter plaatse van de deksloof HB043PB1 en HB045PB1: Hieruit volgt dat het freatisch vlak tijdens de meetperiode op circa NAP – 0,5 of lager ligt (peilbuis HB043PB01 staat droog op NAP + 0,0 m en HB045PB1 (staat droog op NAP - 0,50).
- Tevens staat 1 peilbuis langs (tegen) de boorpaal en 1 op dezelfde hoogte op 2 m afstand uit de boorpaal (HB045PB2 respectievelijk HB004PB1). De eerstgenoemde peilbuis is daar geplaatst om mogelijke lekkage langs de boorpaal (spleet langs de paal) te detecteren. Dit tezamen met de laatstgenoemde peilbuis. Als er geen lekkage is (geen spleet langs de paal) mag verwacht worden dat beide peilbuizen dezelfde reactie geven. Als er lekkage langs de boorpaal aanwezig is worden van elkaar afwijkende reacties verwacht. Bij lekkage langs de boorpaal mag namelijk worden verwacht dat er een correlatie is met de stijghoogte van de peilbuis in het zand (of het getij). Uit de metingen lijkt te volgen dat de reacties vergelijkbaar zijn (zie Figuur 50) waaruit volgt dat geen sprake is van lekkage langs de boorpaal. Daarbij wordt overigens opgemerkt dat de stijghoogten van de peilbuizen onder het niveau van NAP – 1 m niet betrouwbaar zijn omdat de peilbuizen enige dagen nodig hebben gehad om zich aan te passen aan de werkelijke stijghoogten.

Opgemerkt wordt dat lekkage langs de ankers in principe niet met de peilbuis langs de boorpaal zal worden gedetecteerd. Hiervoor zijn alleen de freatisch peilbuizen langs de deksloof bruikbaar.



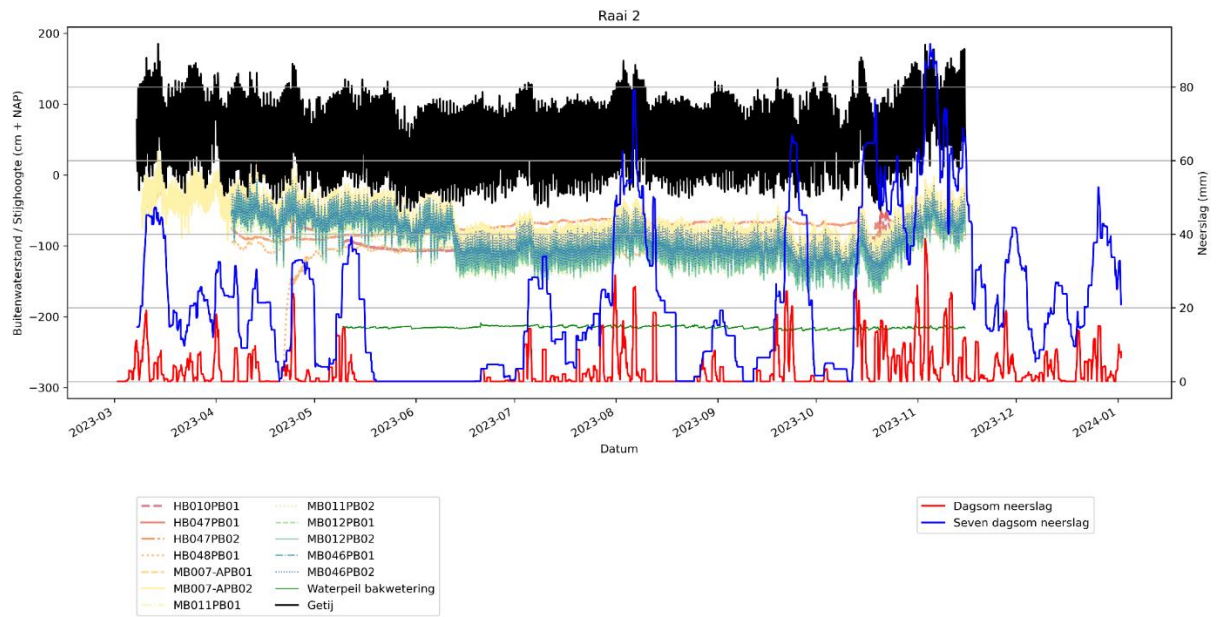
Figuur 50: Hysteresegrafieken peilbuis HB045PB02 (links) en HB004PB01 (rechts).

#### Conclusies:

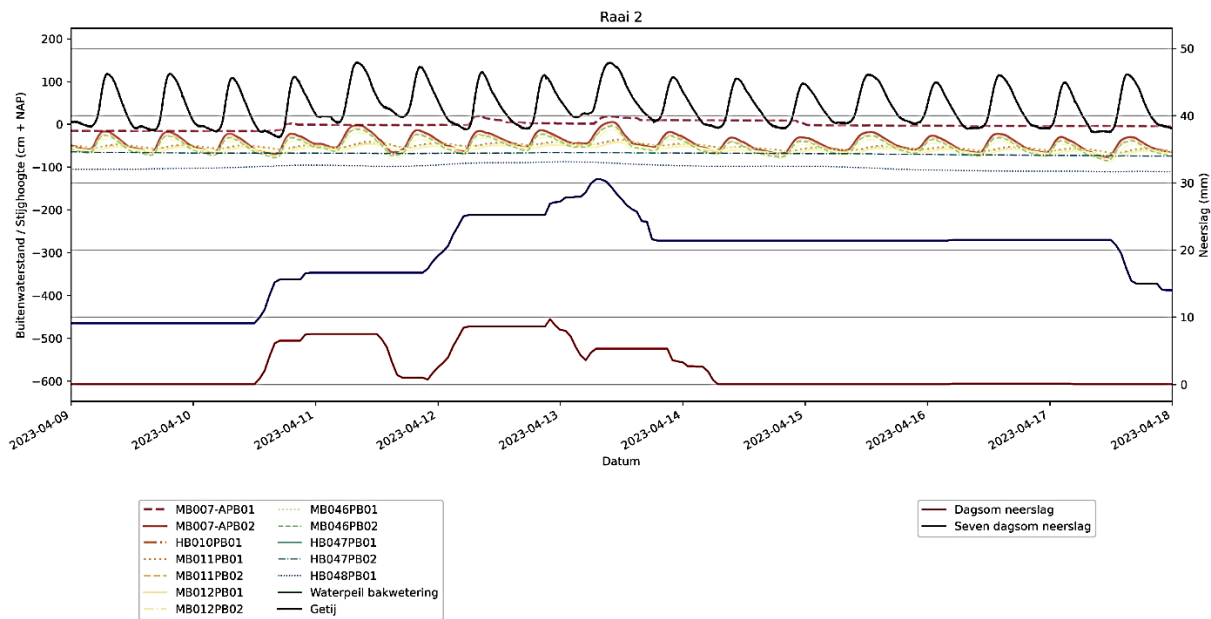
- Mogelijke hydraulische kortsluiting tussen PL en TZ:**  
 De gemiddelde stijghoogte in de PL is over het algemeen vergelijkbaar met die in de TZ (zie Tabel 11). Op 15 m van de boorpaal (richting polder) is de stijghoogte in de TZ aanmerkelijk hoger dan in de PL. De TZ ontbreekt hier echter, of erg kleiig ontwikkeld. De reactie op het getij van de peilbuizen in de PL is overal aanmerkelijk hoger dan in de TZ en wijkt ter plaatse van de boorpaal niet af ten opzichte van de overige locaties. Hierdoor is het op basis van de peilbuismetingen niet aannemelijk dat hydraulische kortsluiting aanwezig is tussen de PL en de TZ bij de boorpaal (of op een andere meetlocatie).
- Mogelijk lekkage/vernatting van TZ naar maaiveld bij boorpaal:**  
 Op basis van de gemiddelde peilbuisstand in de TZ ter plaatse van de boorpaal (in vergelijking met de andere metingen) is het niet aannemelijk dat lekkage langs de boorpaal van de TZ naar maaiveld optreedt. De stijghoogte is vergelijkbaar met die in de peilbuizen verder polderwaarts. De respons van de peilbuizen in de TZ ter plaatse van de boorpaal is wel iets lager dan de overige peilbuizen in de TZ, het verschil is echter gering. Dit zou kunnen duiden op enige lekkage naar het maaiveld ter plaatse van de boorpaal. Uit de 2 peilbuizen die in het holocene pakket slappe lagen staan waarvan een tegen de boorpaal en een op 2 m afstand op dezelfde hoogte volgt een gelijke reactie waaruit het niet aannemelijk lijkt dat lekkage langs de boorpaal aanwezig is.
- Op basis van de peilbuizen ter plaatse van de deksloof volgt dat het freatisch vlak tijdens de meetperiode op circa NAP – 0,5 m of lager ligt. Dit is vergelijkbaar met de stijghoogte in de TZ in de meetperiode vóór 12-06-2023 (NAP – 0,50 m). Uitgaande van een freatisch vlak op NAP -0,50 m zal, bij stijghoogten in de TZ die gemiddeld hoger zijn dan NAP – 0,5 m, vernatting kunnen optreden (als er een spleet zou ontstaan). Hierdoor zou ook de freatische lijn kunnen stijgen. Onder gemiddelde dagelijkse omstandigheden zou vernatting dus kunnen optreden als er in de toekomst een spleet zou ontstaan. Overall conclusie is dat lekkage niet aannemelijk is, maar door tegenstrijdige argumenten is een geringe lekkage niet uit te sluiten.
- Mogelijke lekkage/vernatting van PL naar maaiveld bij anker:**  
 Peilbuis MB001PB02 staat met het filter in de PL en vrij dicht bij het anker. De reactie van de peilbuis wijkt nauwelijks af van de reacties van de overige peilbuizen in de PL. De gemiddelde stijghoogte is iets hoger ter plaatse van het anker. Uit de plaatsingsformulieren van het anker blijkt dat tijdens het spoelen van naastgelegen ankers geen water uit dit anker stroomde. Overall conclusie is dat lekkage naar het maaiveld (mv) niet aannemelijk is op basis van de metingen.

## D.2.2 Raai 2

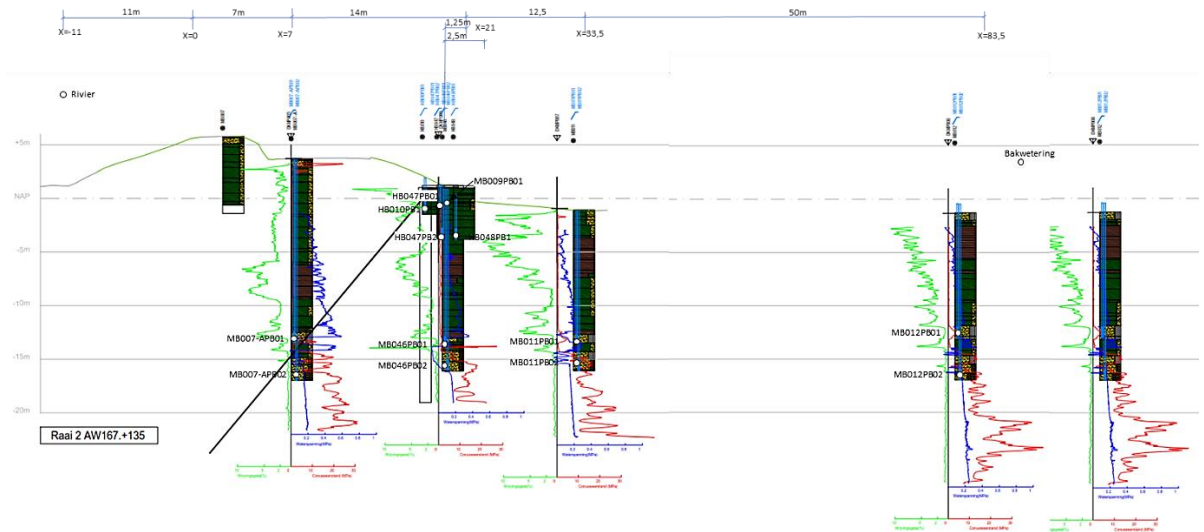
### D.2.2.1. Meetwaarden



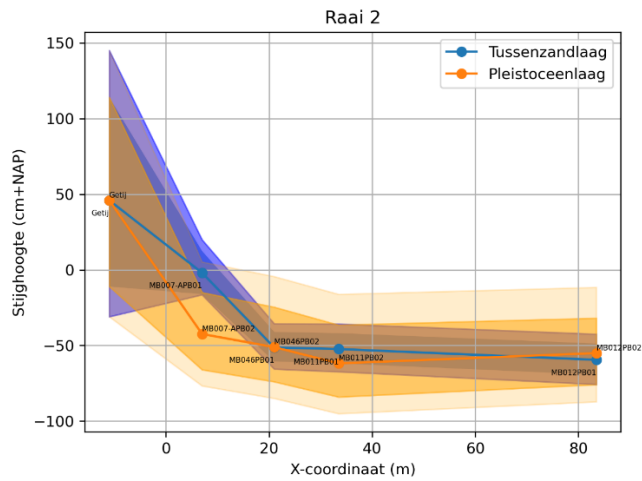
Figuur 51: De stijghoogte van de peilbuizen, de buitenwaterstand en het peil in de bakwetering uitgezet tegen de tijd (y-as) van raai 2 (gehele meetperiode).



Figuur 52: De stijghoogte van de peilbuizen, de buitenwaterstand en het peil in de bakwetering uitgezet tegen de tijd (y-as) van raai 1 (periode 9-04-2023 tot 18-04-2023).

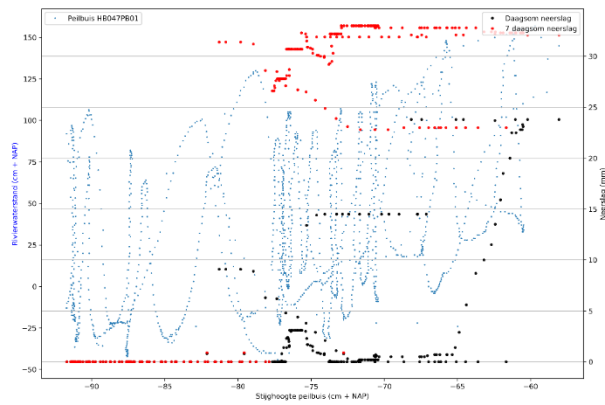
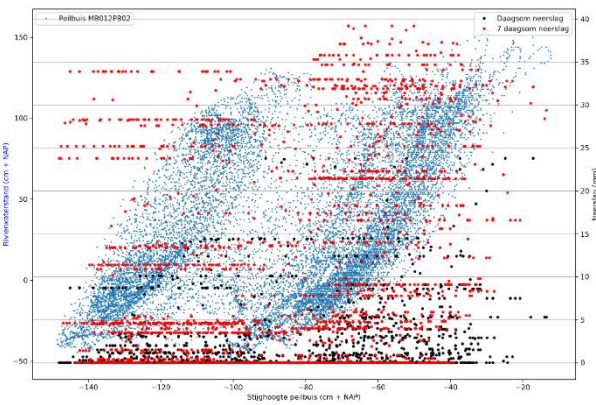
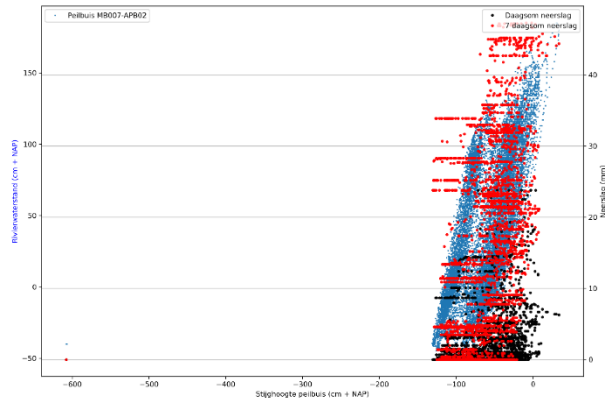
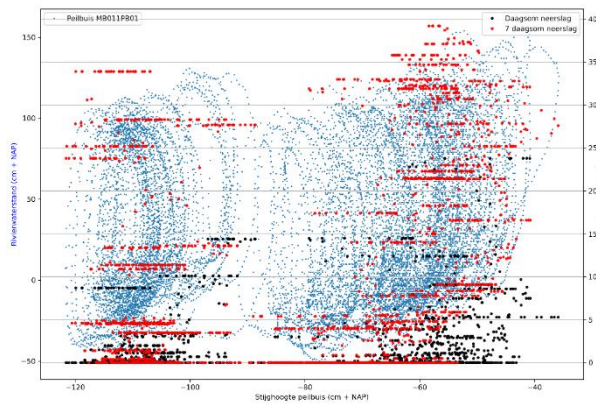
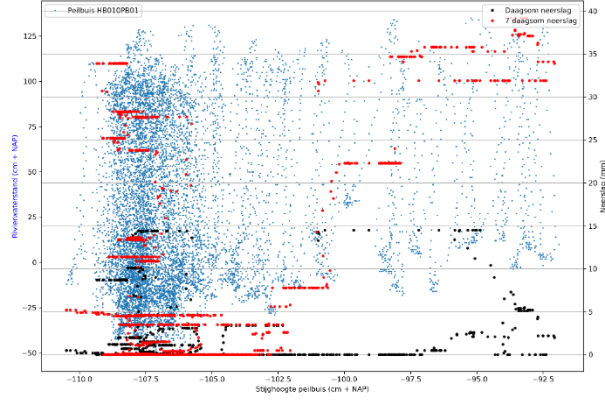
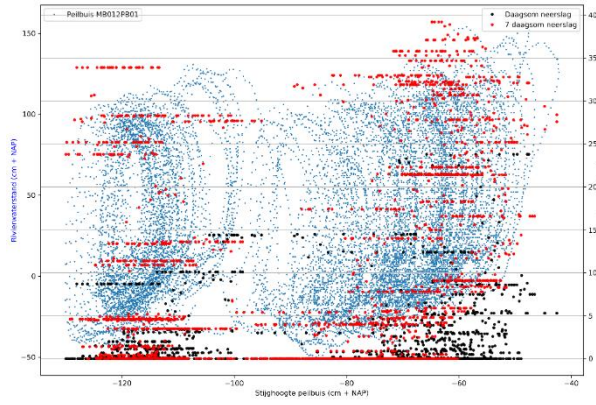
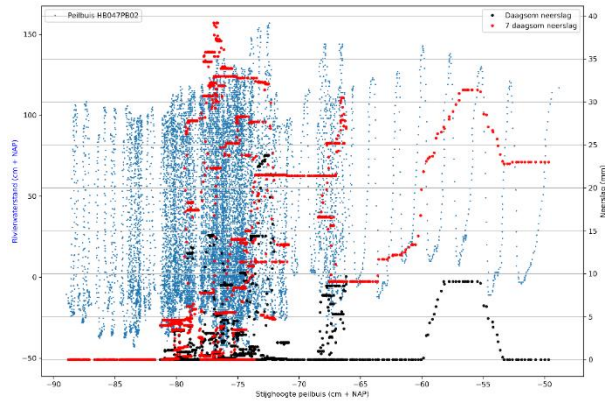
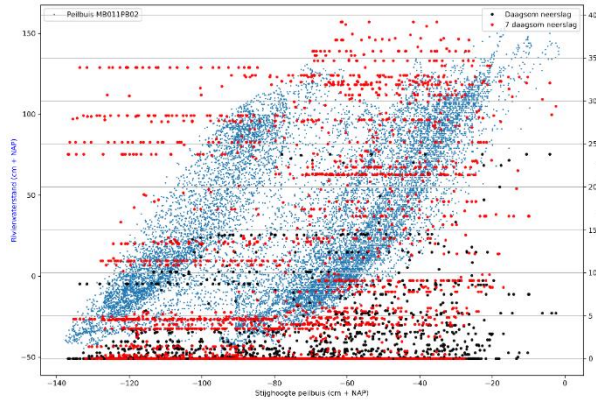


Figuur 53: Dwarsprofiel raai 2 met uitgevoerde grondonderzoek bestaande uit de boringen, sonderingen en de locaties van de filters van de peilbuizen.

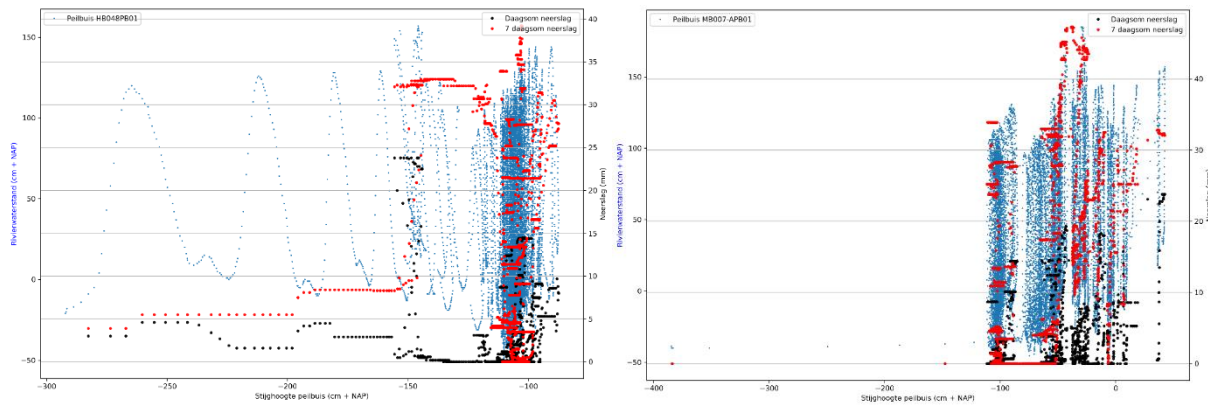


Figuur 54: Gemiddelde stijghoogte in de TZ en de PL voor raai 2 voor een bepaalde representatieve periode (Per peilbuis is voor de betreffende meetperiode de karakteristieke boven- en ondergrenswaarde, de minimale en maximale waarde in de meetperiode weergegeven).









Figuur 55: Hysteresegrafieken peilbuizen raai 2, waarbij de peilbuisstand (x-as) tegen het getij (linker y-s) is uitgezet. Inclusief dagsom neerslag en 7 daagse neerslagsom (rechter y-as). Voor het overzicht zijn al de hysteresegrafieken per raai in één figuur weergegeven. Voor een duidelijk beeld van de afzonderlijke grafieken wordt verwezen naar het opleverdossier.

#### D.2.2.2. Conclusies n.a.v. de meetwaarden

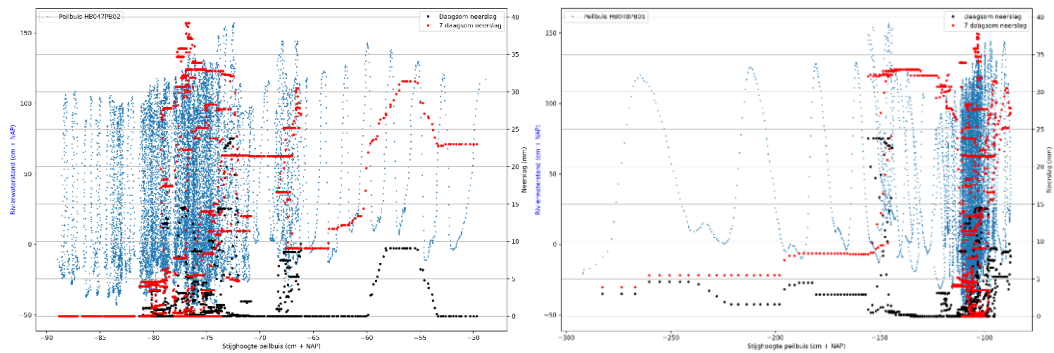
Uit de metingen van de peilbuizen in de PL en de TZ valt het volgende af te leiden:

- Uit het grondonderzoek volgt (zie Figuur 53) dat bij raai 2 (in afwijking van raai 1) wel de TZ overal aanwezig is. Dit betekent dat 8 peilbuizen beschikbaar zijn in de TZ en de PL.
- De gemiddelde stijghoogte van de metingen in zowel de PL als de TZ is vanaf de boorpaal tot verder polderwaarts nagenoeg gelijk (zie Figuur 54 en Tabel 11). De stijghoogte in PL is net iets hoger, maar dit is gering namelijk minder dan 10 cm. De reactie op het getij van de peilbuizen in de PL is overal aanmerkelijk hoger dan in de TZ. Dit is circa een factor 5 tot 6.
- De metingen zijn gezien bovengenoemde erg vergelijkbaar met die van raai 1. De grafiek waarin de gemiddelde stijghoogte is uitgezet t.o.v. de x-coördinaat (zie Figuur 54) geeft echter een enigszins vertekend beeld. De reactie op een enkele getij amplitude is namelijk minder dan de overige peilbuizen in de TZ (dit is goed te zien in de grafiek waar de stijghoogte tegen de tijd zijn uitgezet (zie Figuur 52). Hier wordt geconstateerd dat de TZ weliswaar aanwezig is maar sterk kleinig ontwikkeld is (enigszins vergelijkbaar met raai 1).
- Uit de metingen volgt een zeer zwakke correlatie tussen neerslag en de stijghoogte in de peilbuizen in het watervoerende zandlagen (zie de zogenaamde hysteresegrafieken in Figuur 55). Hoogstens dat enige correlatie aanwezig is tussen de dagsom neerslag en de stijghoogte (zie bijvoorbeeld peilbuis MB011PB01). Evenals voor raai 1 is de verklaring hiervoor in Paragraaf D.1.2 gegeven.

Uit de metingen van de peilbuizen in het holocene pakket slappe lagen ter plaatse van de boorpaal valt het volgende af te leiden (zie Tabel 14). Er zijn 5 peilbuizen in het holocene pakket slappe lagen ter plaatse van de boorpaal geplaatst.

- 3 van de 5 peilbuizen staan ter plaatse van de deksloof HB010PB1, HB047PB1 en MB09PB01: hieruit volgt dat het freatisch vlak op circa NAP – 0,8 of lager ligt (peilbuis HB010PB1 gem NAP – 1,0 m) en peilbuis HB047PB01 (staat droog op NAP – 0,80 m).
- Tevens staat 1 peilbuis langs (tegen) de boorpaal en 1 op dezelfde hoogte op 2 m afstand uit de boorpaal (HB047PB02 respectievelijk HB048PB1). De eerstgenoemde peilbuis is daar geplaatst om mogelijke lekkage langs de boorpaal (spleet langs de paal) te detecteren. De stijghoogte in de peilbuis bij de paal is hoger. Uit de metingen volgt dat de reacties ook iets van elkaar afwijken (zie Figuur 56).

In de peilbuis langs de paal lijkt geen correlatie tussen neerslag en stijghoogte gevonden. Opmerkelijk is dat voor de peilbuis op 2 m afstand er enige correlatie met neerslag lijkt te zijn als de stijghoogte in de peilbuis vanaf circa NAP -1,2 m worden beschouwd (zie Figuur 56) alsook de grafiek waarbij de metingen in de tijd zijn uitgezet (zie Figuur 54).



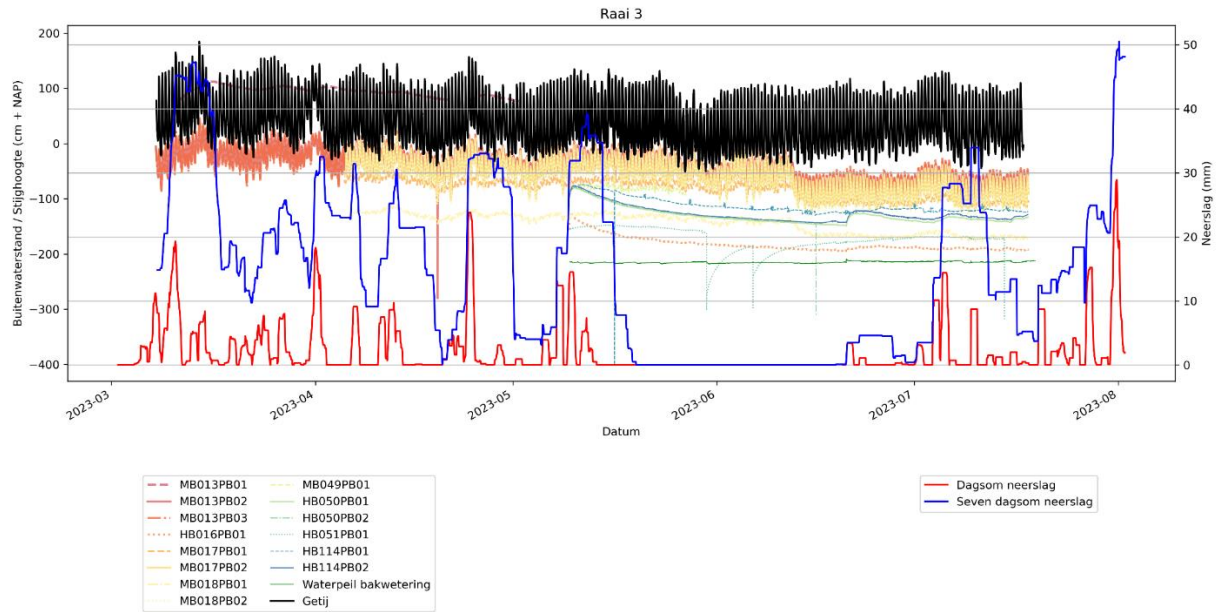
Figuur 56: Hysteresisgrafieken peilbuis HB047PB01 (links) en HB048PB01 (rechts).

#### Conclusies:

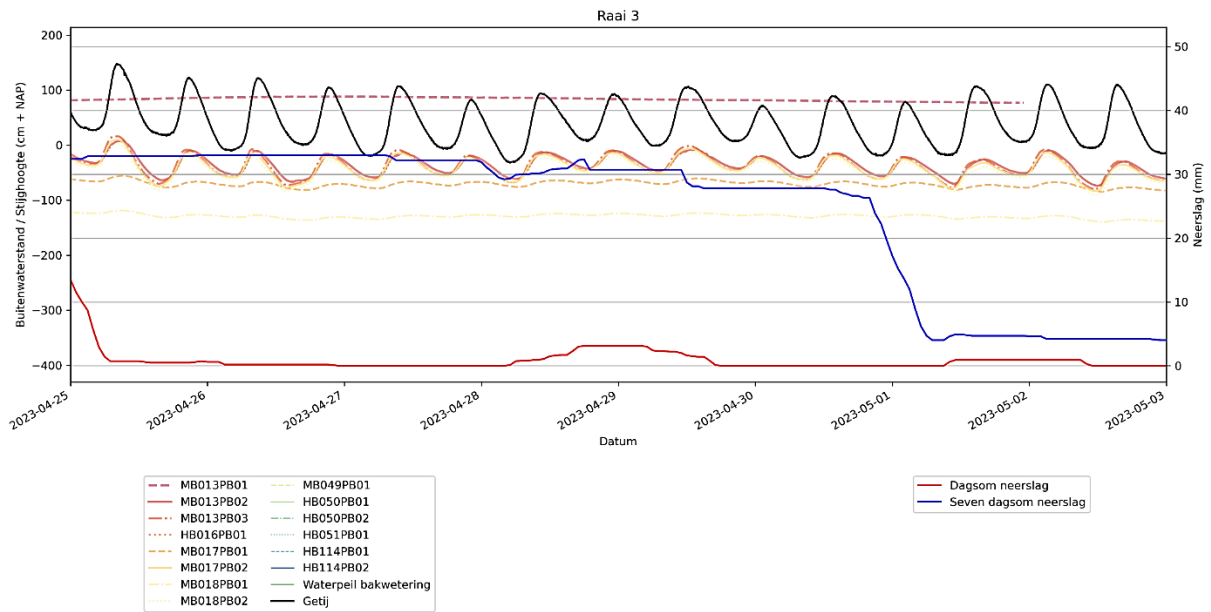
- Mogelijke hydraulische kortsluiting tussen de PL en de TZ:  
De gemiddelde stijghoogte in de PL is vergelijkbaar met die in de TZ (zie Tabel 11). De reactie op het getij van de peilbuizen in de PL is overal aanmerkelijk hoger dan in de TZ en wijkt ter plaatse van de boorpaal niet af ten opzichte van de overige locaties. Hierdoor is het niet aannemelijk dat hydraulische kortsluiting aanwezig is tussen de PL en de TZ bij de boorpaal (of op een andere meetlocatie).
- Mogelijke lekkage/vernating van de TZ naar maaiveld bij de boorpaal:  
Vooral op basis van de gemiddelde peilbuisstand in de TZ ter plaatse van de boorpaal (in vergelijking met de andere metingen) is het niet aannemelijk dat lekkage langs de boorpaal van de TZ naar maaiveld optreedt.  
Uit de 2 peilbuizen die in het holocene pakket slappe lagen staan waarvan een tegen de boorpaal en een op 2 m afstand op dezelfde hoogte volgt dat beide niet of nauwelijks en op gelijke wijze op stijghoogteverandering in de TZ reageert. **De gemiddelde stijghoogte ter plaatse van de boorpaal is iets hoger en er lijkt hier minder correlatie met neerslag te zijn dan op 2 m afstand, wat op lekkage zou kunnen duiden.** Op basis van de peilbuizen ter plaatse van de deksloof volgt dat het freatisch vlak tijdens de meetperiode op een hoogte heeft van NAP – 0,6 tot – 1,1 m. Dit is lager dan de stijghoogte in de TZ in de periode voordat Oasen de onttrekking verhoogde naar 8000 m<sup>3</sup>/d. Omdat de stijghoogte in de TZ gemiddeld hoger is dan het freatisch vlak kan vernatting optreden (als er een spleet zou zijn). Hierdoor zou ook de freatische lijn kunnen stijgen. Overall conclusie is dat een geringe lekkage mogelijk is. Dit is echter onzeker, door tegenstrijdige argumenten.
- Mogelijk lekkage /vernating van de TZ naar maaiveld bij anker:  
Peilbuis MB007PB02 (PL) staat met het filter echter vrij dicht bij het anker. De gemiddelde stijghoogte en reactie van de peilbuis op het getij wijkt nauwelijks af van de reacties van de overige peilbuizen in de PL. Peilbuis MB007PB01 (TZ) staat met het filter vrij dicht bij het anker en de gemiddelde stijghoogte is vergelijkbaar met de overige peilbuizen in de TZ. Uit de plaatsingsformulieren van het anker blijkt dat tijdens het spoelen van naastgelegen ankers geen water uit dit anker stroomde. Overall conclusie is dat lekkage naar het maaiveld (mv) niet aannemelijk is op basis van deze metingen.

## D.2.3 Raai 3

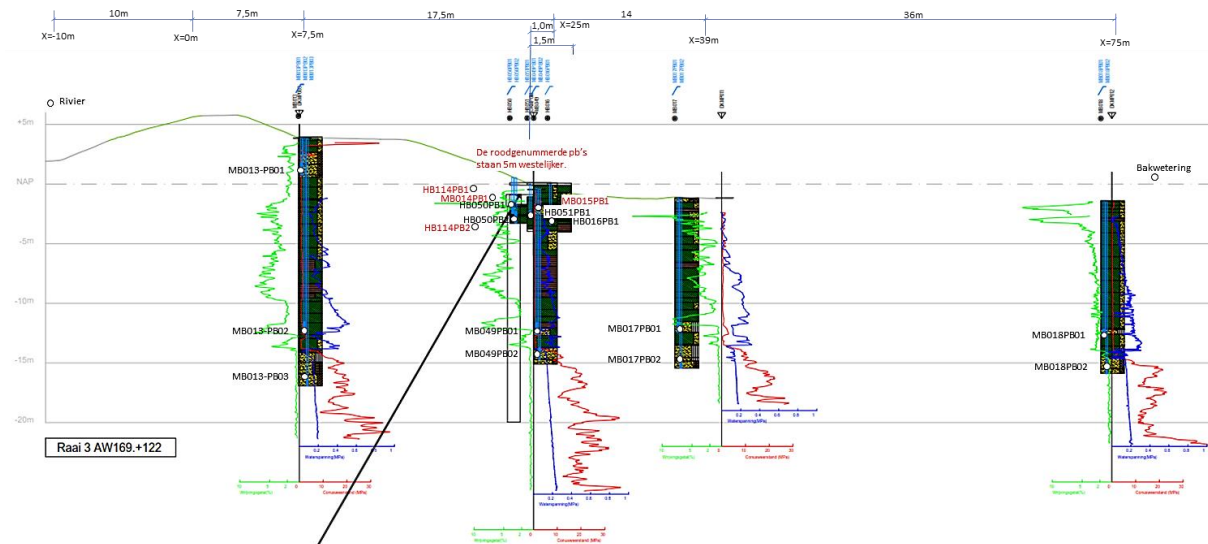
### D.2.3.1. Meetwaarden



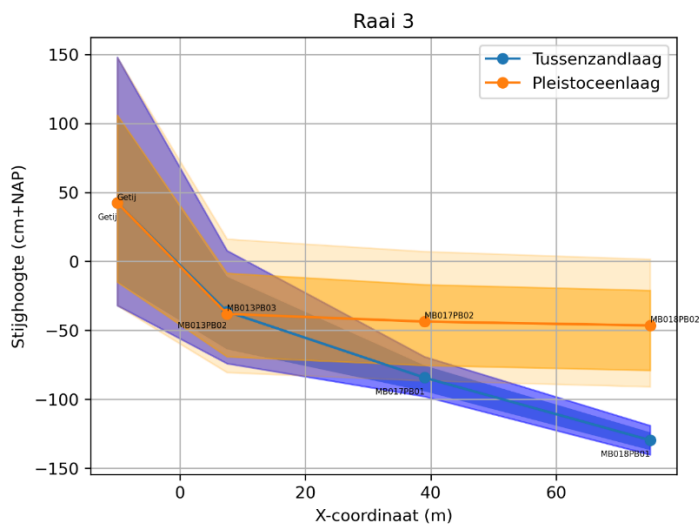
Figuur 57: De stijghoogte van de peilbuizen, de buitenwaterstand en het peil in de bakwetering uitgezet tegen de tijd (y-as) van raai 3 (gehele meetperiode).



Figuur 58: De stijghoogte van de peilbuizen, de buitenwaterstand en het peil in de bakwetering uitgezet tegen de tijd (y-as) van raai 3 (periode 25-04-2023 tot 3-05-2023).

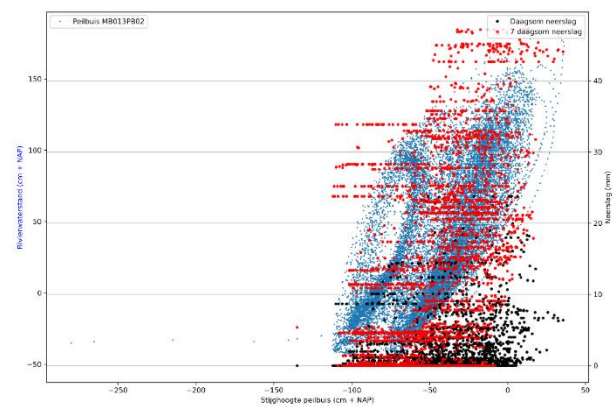
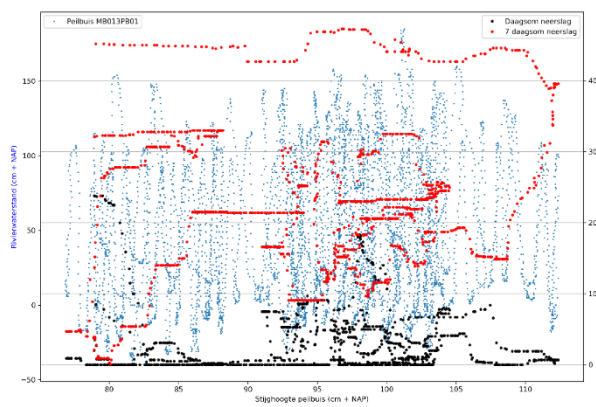
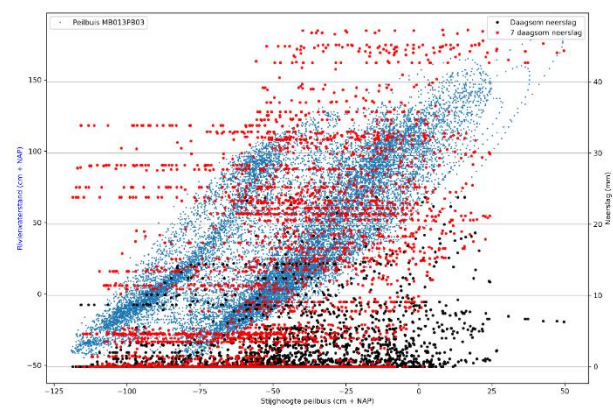
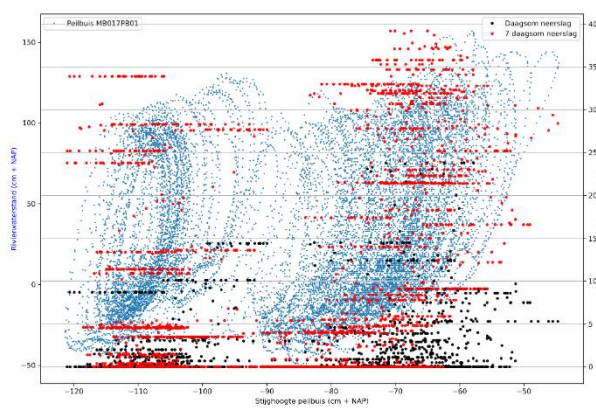
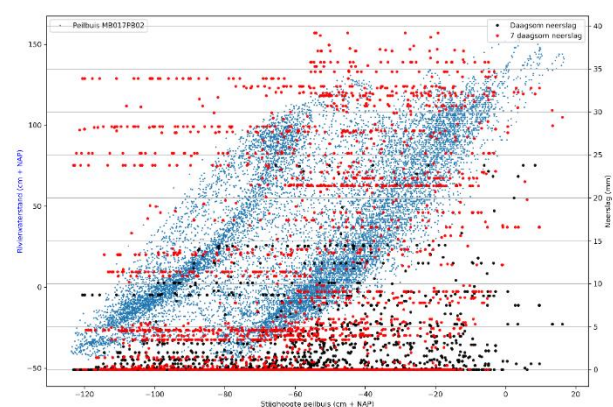
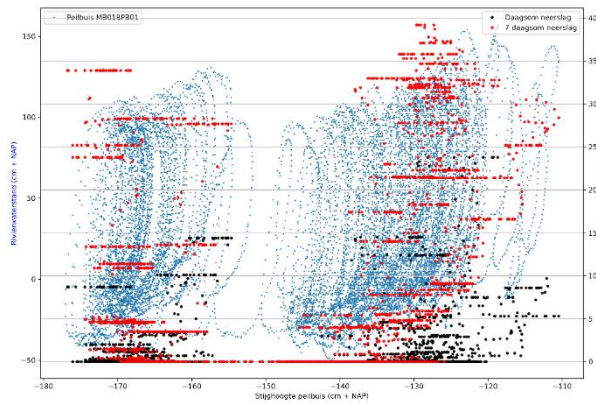
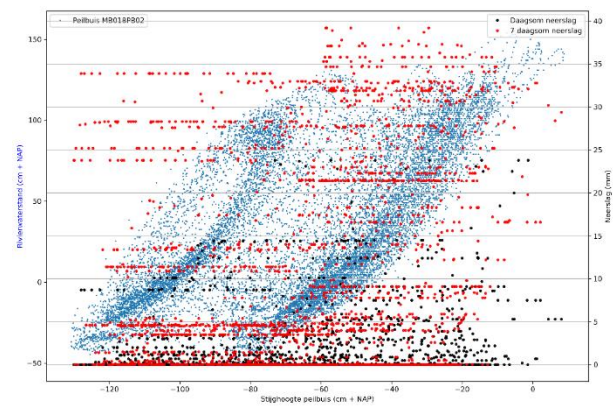
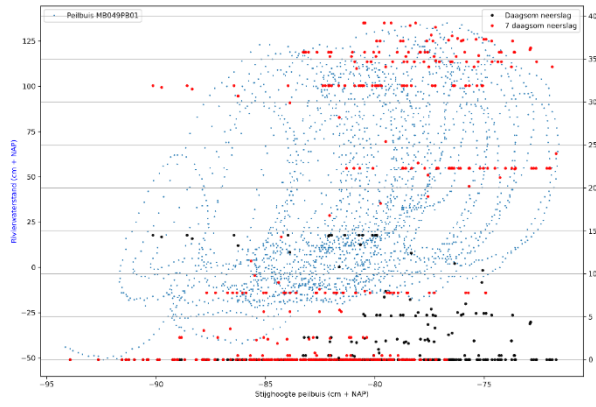


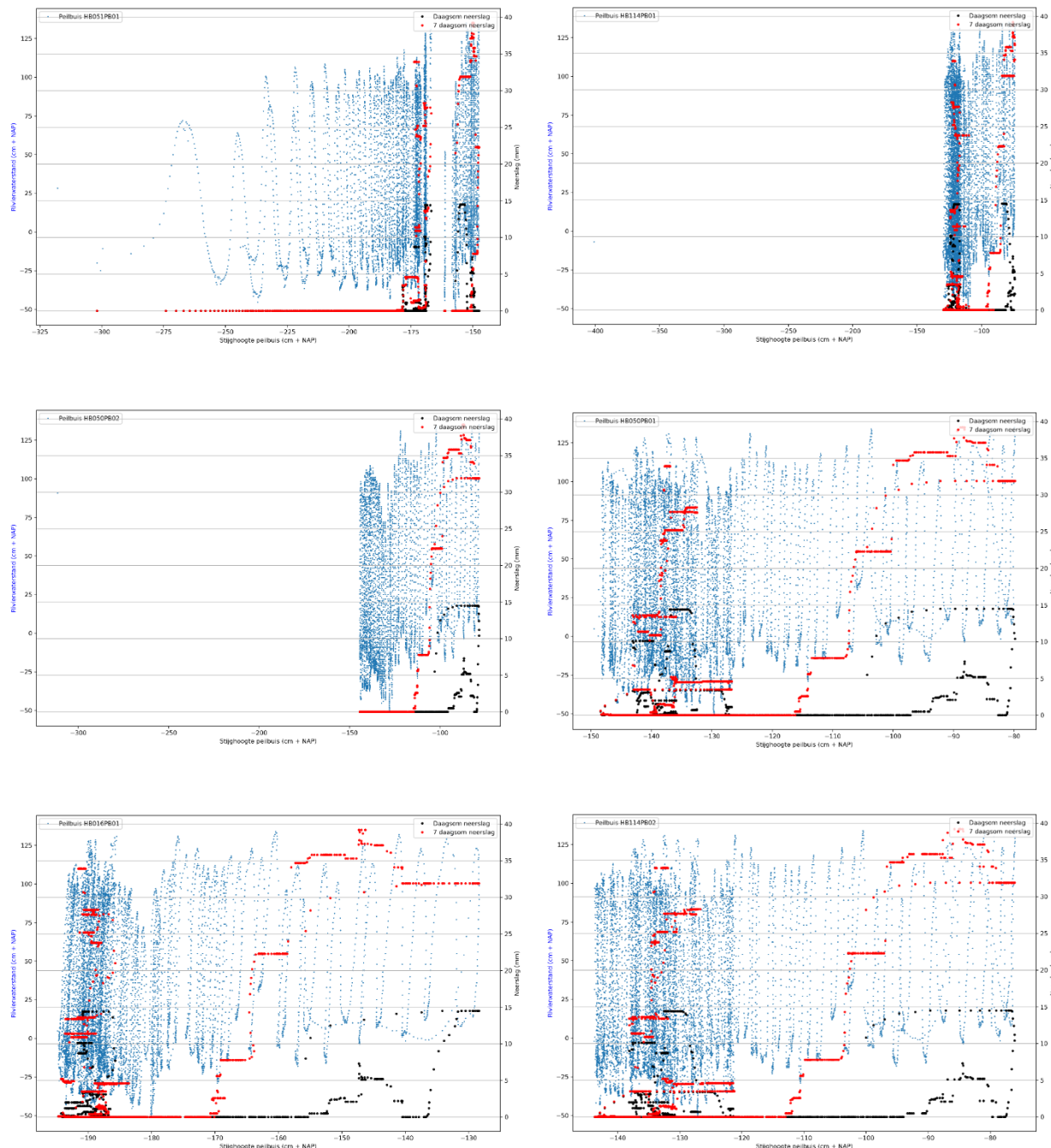
Figuur 59: Dwarsprofiel raai 3 met uitgevoerde grondonderzoek bestaande uit de boringen, sonderingen en de locaties van de filters van de peilbuizen.



Figuur 60: Gemiddelde stijghoogte in de TZ en de PL voor raai 3 voor een bepaalde representatieve periode (Per peilbuis is voor de betreffende meetperiode de karakteristieke boven- en ondergrenswaarde, de minimale en maximale waarde in de meetperiode weergegeven).







Figuur 61: Hysteresisgrafieken peilbuizen raai 3, waarbij de peilbuisstand (x-as) tegen het getij (linker y-s) is uitgezet. Inclusief dagsom neerslag en 7 daagse neerslagsom (rechter y-as). Voor het overzicht zijn al de hysteresisgrafieken per raai in één figuur weergegeven. Voor een duidelijk beeld van de afzonderlijke grafieken wordt verwezen naar het opleverdossier.

#### D.2.3.2. Conclusies n.a.v. de meetwaarden

Uit de metingen van de peilbuizen in de PL en de TZ volgt:

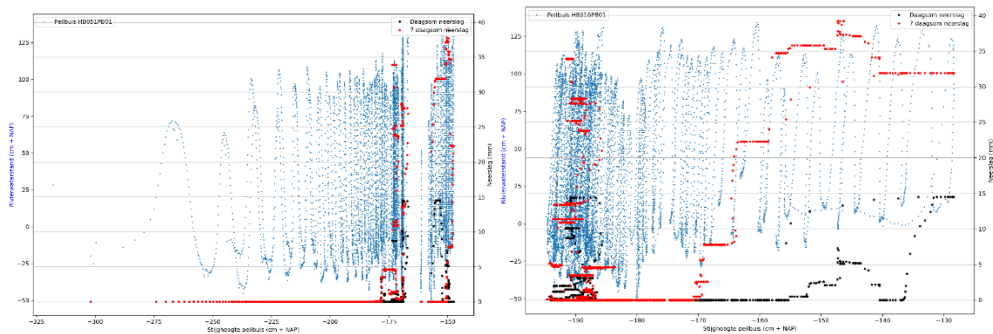
- Er zijn 8 peilbuizen met het filter in de watervoerende zandlagen geplaatst waarvan 4 in de PL en 4 in de TZ (zie Figuur 53).
- Uit het grondonderzoek volgt dat op een afstand van 14 m rivierwaarts van de boorpalenwand de TZ lijkt te ontbreken. De peilbuis (MB013PB02) die in een erg dunne zandlaag is geplaatst, reageert echter vrij sterk op het getij. Uit Tabel 12 volgt een responsfactor van 0,35. De TZ staat waarschijnlijk in verbinding te staan met de PL.



- De gemiddelde stijghoogte in de PL op een afstand van 14 uit de boorpaal (rivierwaarts) is NAP – 0,80 m en loopt richting de polder af tot NAP – 1,0 m op een afstand van 85 m uit de boorpaal. In de periode voor 12-06-2023 is dit echter circa 0,5 m hoger. De respons in de PL op het getij is overal vergelijkbaar (zie Tabel 12).
- De gemiddelde stijghoogte in de PL is hoger dan in de TZ hoewel dat op 15 m uit de boorpaal (rivierwaarts nagenoeg gelijk is). De stijghoogte in de TZ neemt aanmerkelijk af met de afstand tot de dijk. Vooral op een afstand van 75 m uit de boorpaal is de stijghoogte in de TZ laag (circa 0,8 tot 1,0 m lager dan in de overige peilbuizen). Opmerkelijk is dat deze peilbuis vlak bij de bakwetering staat. Het waterpeil in de bakwetering is circa NAP – 2,15 m). Hieruit volgt dat kortsluiting tussen de TZ met de Bakwetering aannemelijk is. Een lekkage op deze locatie heeft echter geen invloed op de boorpalenwandconstructie, gezien het beperkte invloedsgebied hiervan. De respons in de TZ op het getij is overal vrij gering ter plaatse van de boorpaal is de respons in de TZ echter kleiner dan rivier- en polderwaarts.
- Mogelijke correlatie met neerslag: in de zogenaamde hysteresegrafieken is naast de correlatie tussen de stijghoogte in de peilbuis en het getij ook het verband tussen neerslag en de stijghoogte weergegeven. Uit de metingen volgt een zeer zwakke correlatie tussen neerslag en de stijghoogte in de peilbuizen in het watervoerende zandlagen (zie Figuur 61). De verklaring hiervoor is in Paragraaf D.1.2 gegeven.

Uit de metingen van de peilbuizen in het holocene pakket slappe lagen ter plaatse van de boorpaal volgt (zie Tabel 14):

- Er zijn 7 peilbuizen in het holocene pakket slappe lagen ter plaatse van de boorpaal geplaatst. 4 ter plaatse van de raai en 3 op circa 5 m afstand van de raai). 5 van deze 7 peilbuizen staan ter plaatse van de deksloof waarvan 4 aan de rivierzijden en 1 aan de polderzijde. Uit de peilbuizen aan de rivierzijde volgt dat de gemiddelde hoogte van het freatisch vlak daar circa NAP – 1,20 m is. De peilbuis aan polderzij geeft gemiddeld een hoogte van NAP – 1,35 m.
- Op basis van de peilbuizen polderwaarts van de deksloof (die tegen de paal en op 2 m afstand) volgt een stijghoogte van NAP - 1,5 respectievelijk - 1,9 m. Van de bovengenoemde peilbuizen staat 1 peilbuis tegen de boorpaal en 1 op 2 m afstand. De eerstgenoemde peilbuis is daar geplaatst om mogelijke lekkage langs de boorpaal (spleet langs de paal) te detecteren. Dit tezamen met de laatstgenoemde peilbuis. Als er geen lekkage is (geen spleet langs de paal) mag verwacht worden dat beide peilbuizen dezelfde reactie geven. Als er lekkage langs de boorpaal aanwezig is worden van elkaar afwijkende reacties verwacht. Bij lekkage langs de boorpaal mag namelijk worden verwacht dat er een correlatie is met de stijghoogte van de peilbuis in het zand (of het getij). Uit de metingen volgt dat de reacties lastig zijn te interpreteren (zie Figuur 62). Daarbij wordt overigens opgemerkt dat de stijghoogten van peilbuis HB051Pb01 lager dan NAP – 1,75 m en van peilbuis HB016PB01 hoger dan NAP – 1,80 m niet betrouwbaar zijn omdat de peilbuizen geruime tijd nodig hebben gehad om zich aan te passen aan de werkelijke stijghoogten. Er is nauwelijks respons op getij en neerslag.



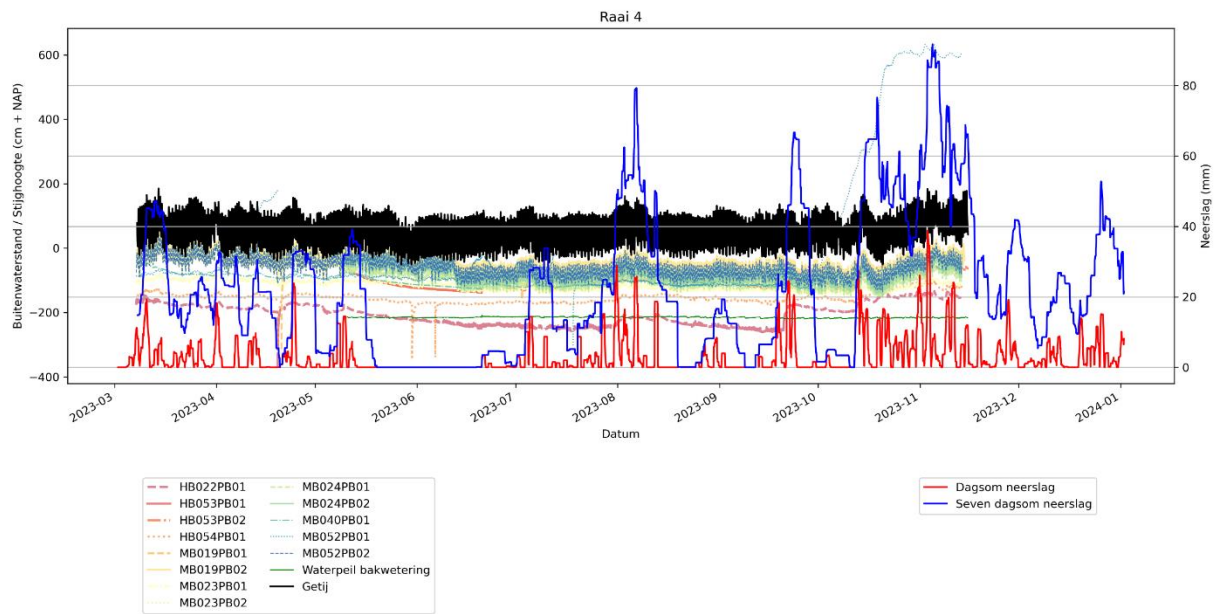
Figuur 62: Hysteresegrafieken peilbuis HB051PB01 (links) en HB016PB01 (rechts).

#### Conclusies:

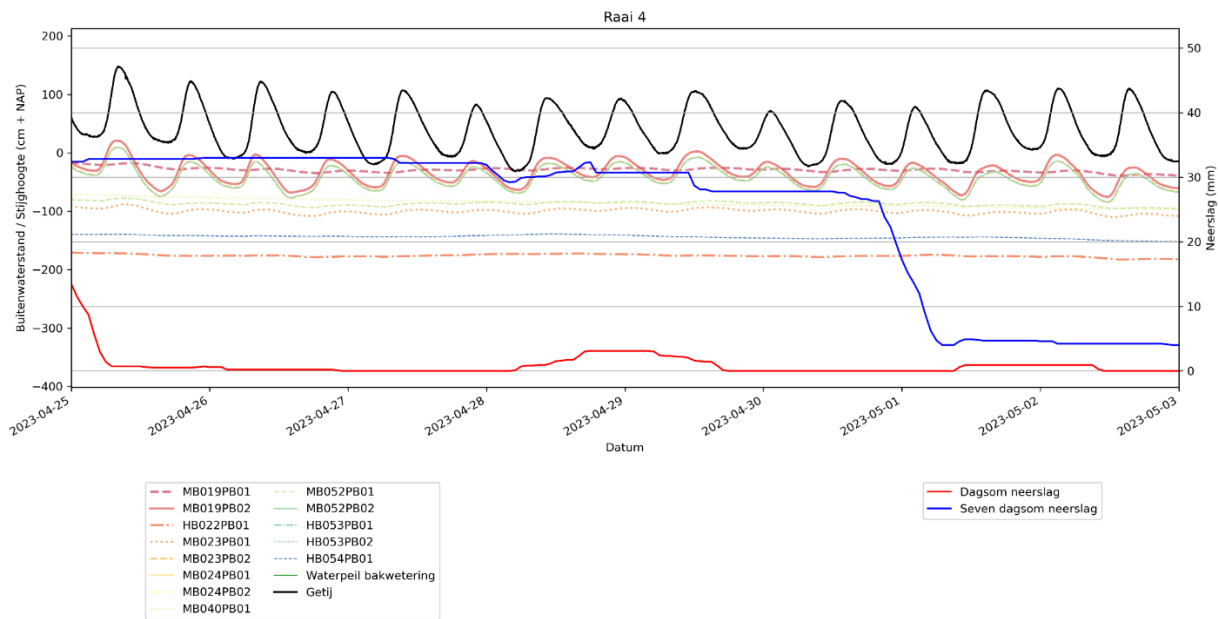
- Mogelijke hydraulische kortsluiting de PL en de TZ:  
Uit het grondonderzoek volgt dat op een afstand van 14 m rivierwaarts van de boorpalenwand de stijghoogte in de TZ een bijna gelijke respons op de het getij heeft als de PL. Mogelijk dat het groutlichaam van het anker hier een hydraulische kortsluiting heeft veroorzaakt of dat op geringe afstand (denkende aan enkele meters) geologische hydraulische kortsluiting aanwezig is. Ter plaatse van de boorpaal en verder polderwaarts is het verschil in respons tussen de TZ en de PL zeer groot. Hierdoor is het niet aannemelijk dat hydraulische kortsluiting aanwezig is tussen de PL en de TZ bij de boorpaal, maar wel ter plaatse van het anker.
- Mogelijke lekkage/vernatting van de TZ naar maaiveld bij boorpaal:  
Vooral op een afstand van  $x = 75$  m (circa 50 m uit de boorpaal in polderwaartse richting) in de buurt van de bakwetering is de stijghoogte in de TZ erg laag waardoor kortsluiting tussen de TZ met de Bakwetering aannemelijk is.  
Omdat de responsfactor in de TZ ter plaatse van de boorpaal kleiner is dat op de andere plaatsen in de TZ, terwijl de responsfactor in de PL geleidelijk afneemt in de richting van de polder, zou dit kunnen duiden op enige lekkage langs de boorpaal naar het maaiveld.
- Mogelijke lekkage/vernatting van de PL en de TZ naar maaiveld bij anker:  
Peilbuizen MB013PB02 (TZ) en MB013Pb03 (PL) staat met het filter op circa 8 m van het anker. De gemiddelde stijghoogte is gelijk en de responsen van de peilbuizen op het getij wijken iets van elkaar af. De gemiddelde stijghoogte in de TZ is aanmerkelijk hoger (zeker in de periode voor 12-06-2023) dan de hoogte van het freatisch vlak ter plaatse van de deksloof. Op basis van deze waarnemingen kan geen uitspraak worden gedaan over eventuele lekkage naar het maaiveld (mv). Tijdens de ontgravingswerkzaamheden t.b.v. de monitoring is echter lekkage uit de ankerkop wargenomen waardoor lekkage vanuit de TZ naar maaiveld aannemelijk is.

D.2.4 Raai 4

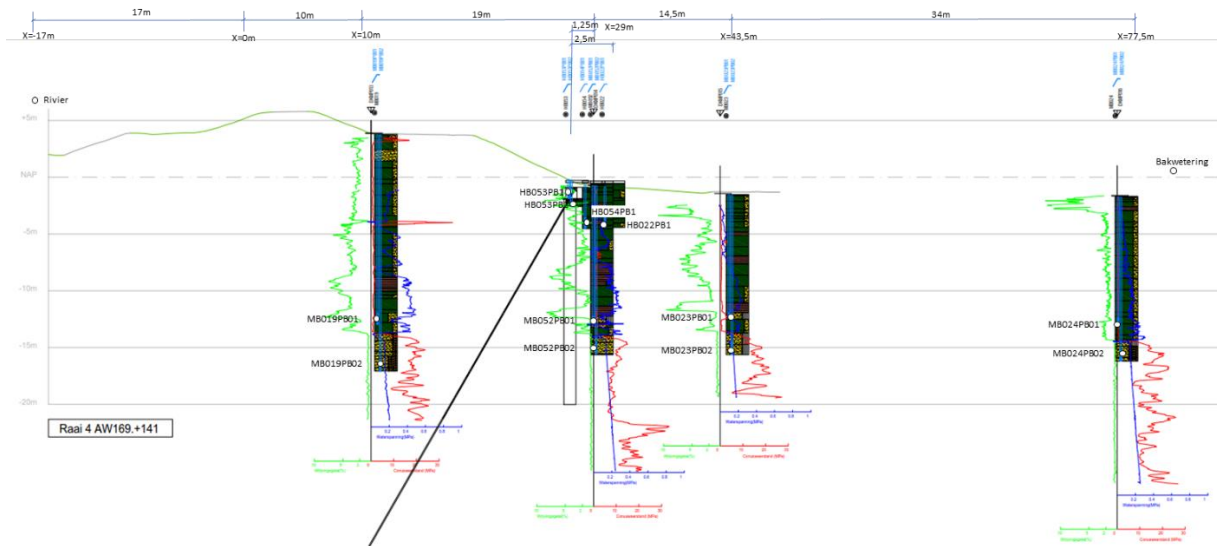
D.2.4.1. Meetwaarden



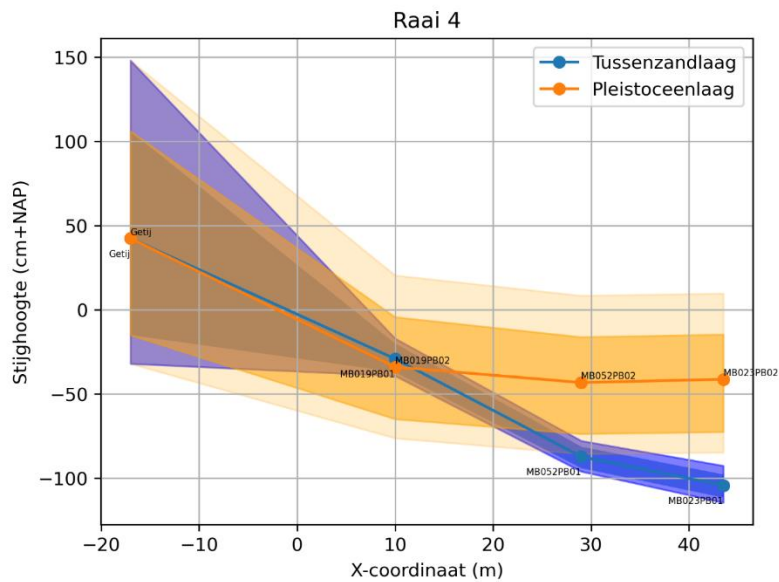
Figuur 63: De stijghoogte van de peilbuizen, de buitenwaterstand en het peil in de bakwetering uitgezet tegen de tijd (y-as) van raai 4 (gehele meetperiode).



Figuur 64: De stijghoogte van de peilbuizen, de buitenwaterstand en het peil in de bakwetering uitgezet tegen de tijd (y-as) van raai 4 (periode 25-04-2023 tot 3-05-2023).

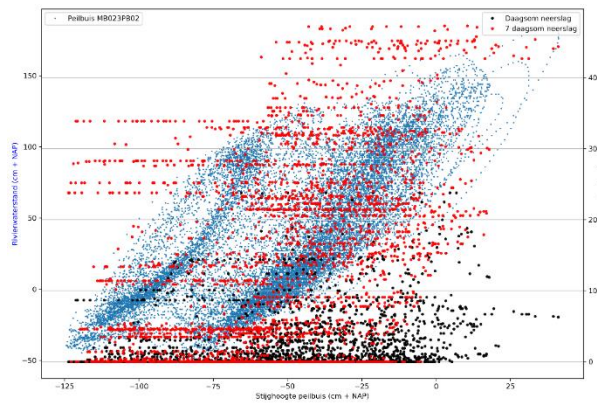
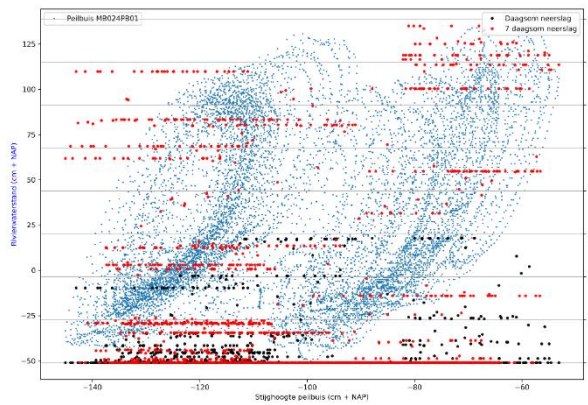
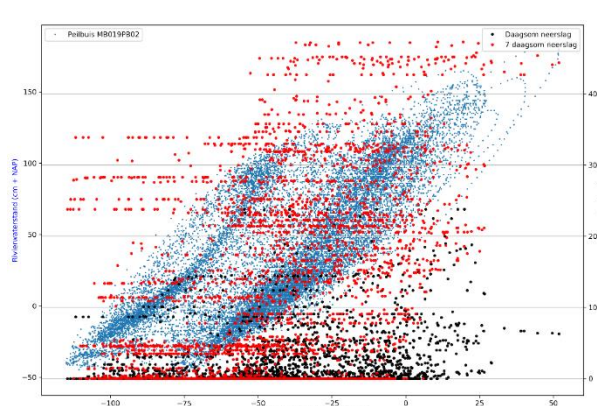
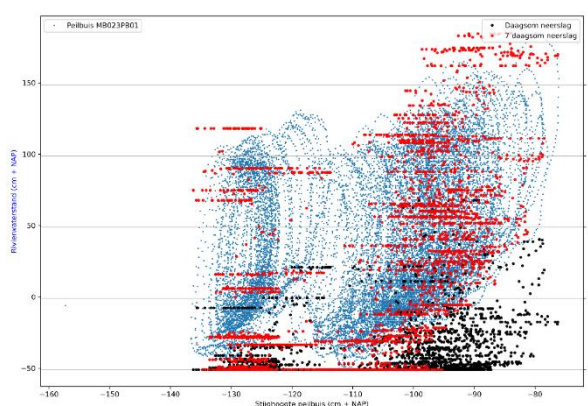
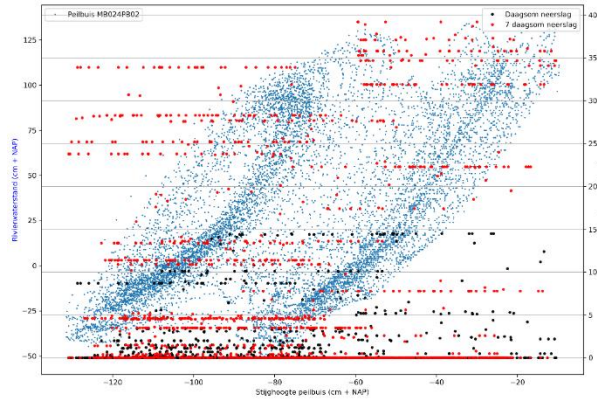
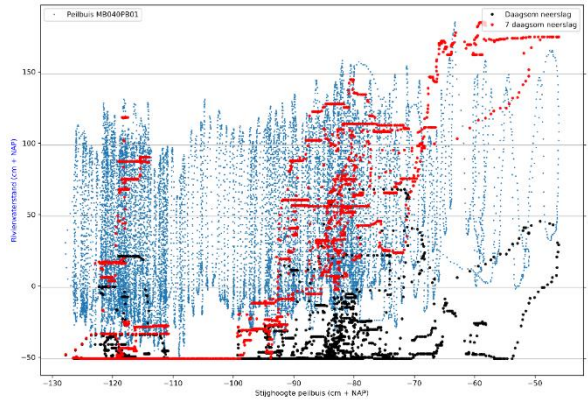
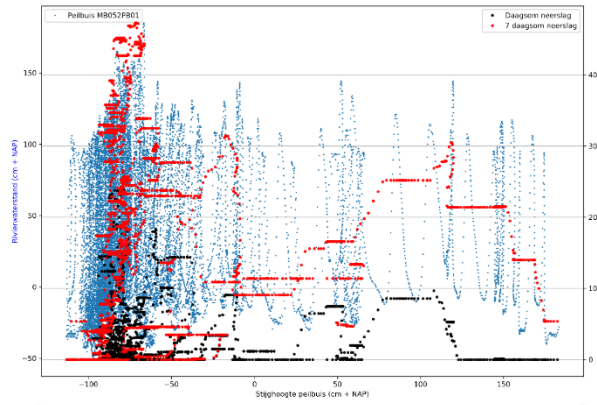
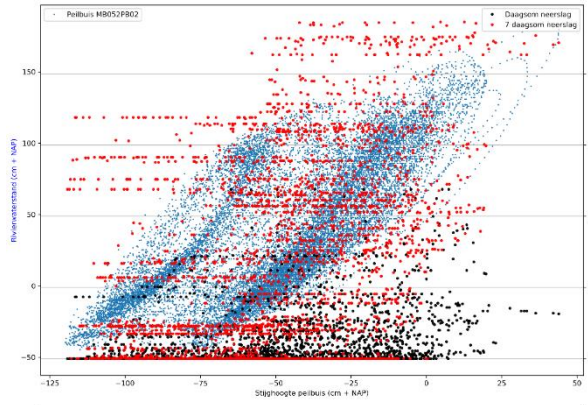


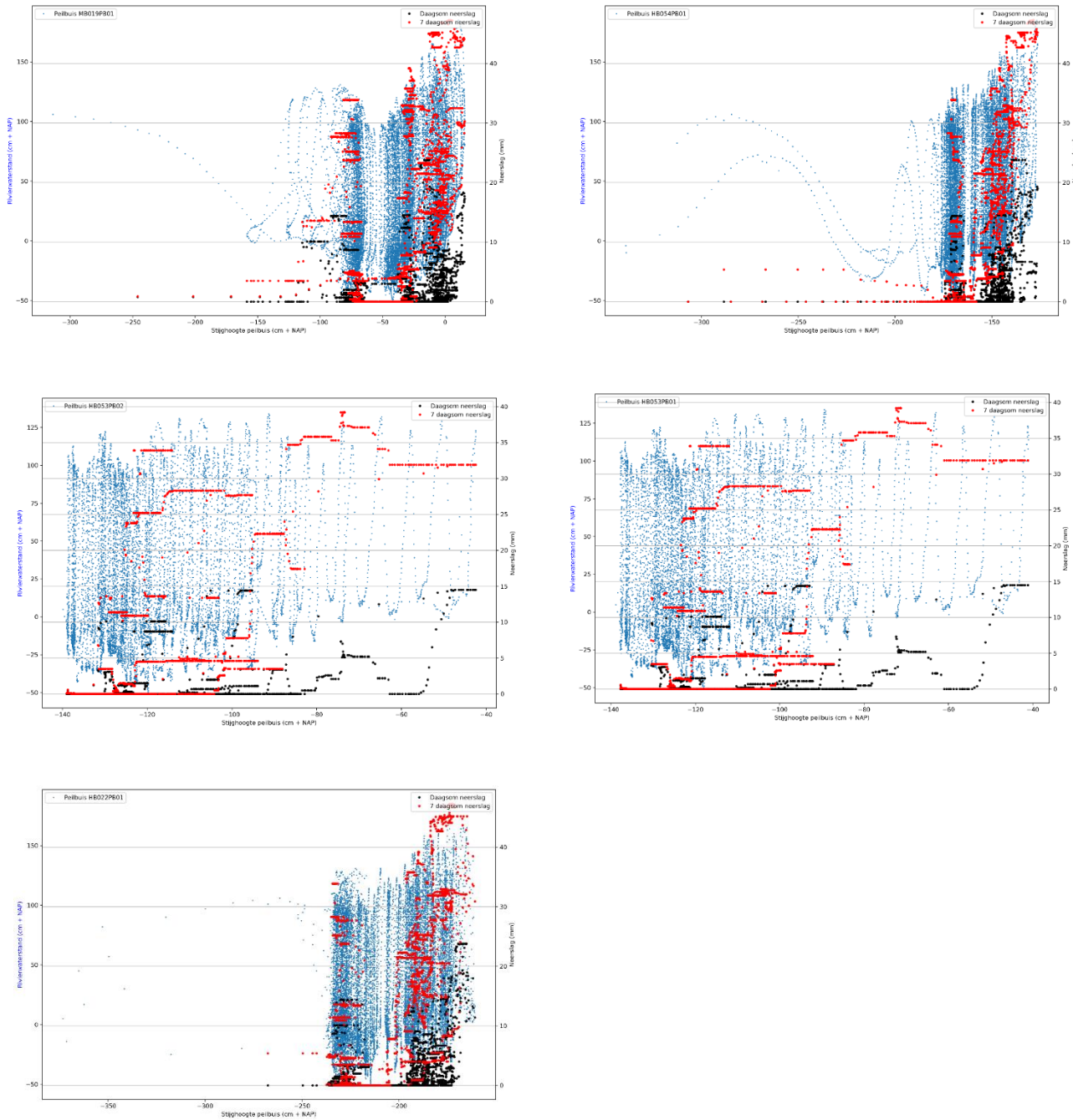
Figuur 65: Dwarsprofiel raai 4 met uitgevoerde grondonderzoek bestaande uit de boringen, sonderingen en de locaties van de filters van de peilbuizen.



Figuur 66: Gemiddelde stijghoogte in de TZ en de PL voor raai 4 voor een bepaalde representatieve periode (Per peilbuis is voor de betreffende meetperiode de karakteristieke boven- en ondergrenswaarde, de minimale en maximale waarde in de meetperiode weergegeven).







*Figuur 67: Hysteresisgrafieken peilbuizen raai 4, waarbij de peilbuisstand (x-as) tegen het getij (linker y-s) is uitgezet. Inclusief dagsom neerslag en 7 daagse neerslagsom (rechter y-as). Voor het overzicht zijn al de hysteresisgrafieken per raai in één figuur weergegeven. Voor een duidelijk beeld van de afzonderlijke grafieken wordt verwezen naar het opleverdossier.*

#### D.2.4.2. Conclusies n.a.v. de meetwaarden

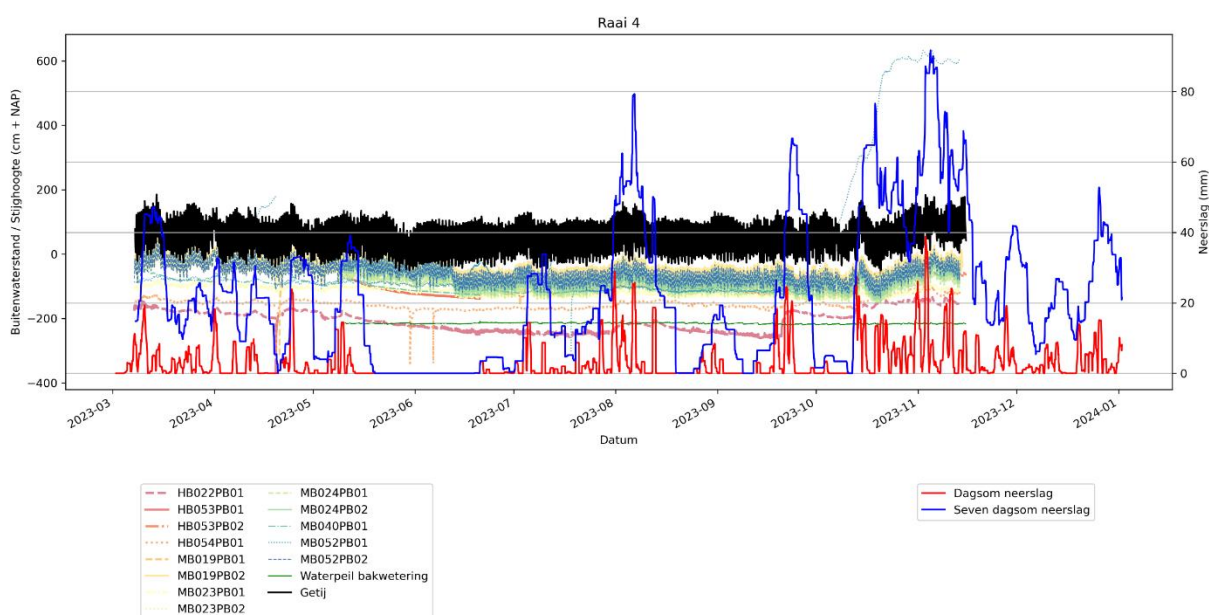
Uit de metingen van de peilbuizen in de PL en de TZ valt het volgende af te leiden:

- Er zijn 8 peilbuizen met het filter in de watervoerende zandlagen geplaatst waarvan 4 in de PL en 4 in de TZ. (Zie Figuur 65 en Figuur 47 voor de dwarsprofielen met de locaties van de peilbuizen en filterdiepten).
- Uit het grondonderzoek volgt dat op een afstand van 15 rivierwaarts van de boorpalenwand de TZ ontbreekt of deze is mogelijk zeer dun (< 0,1 m) of sterk kleilig ontwikkeld. De peilbuis (zie Figuur 64) reageert echter wel op zowel kortdurende

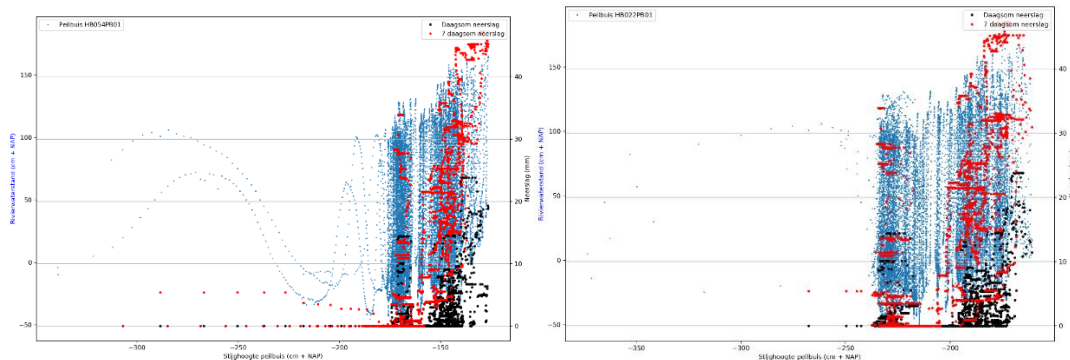


buitenwaterstands verschillen (getij) en op een langduriger veranderingen van de buitenwaterstand.

- De gemiddelde stijghoogten van de peilbuizen in de PL in de periode vanaf circa 15-06-2023 zijn nagenoeg gelijk. De reactie (amplitude) van de stijghoogte in de PL op het getij is vergelijkbaar als bij de overige raaien (1 t/m 3, zie Tabel 12).
- De gemiddelde stijghoogten van de peilbuizen in de TZ loopt richting de polder af. De respons in de TZ is aanmerkelijk lager dan in de PL (zie Figuur 66). Dit is circa een factor 5 à 6. De dikte van de TZ is vergelijkbaar met de overige raaien (1 t/m 3). Opmerkelijk is wel dat de reactie in de TZ op 77,5 m uit de dijk aanmerkelijk groter is dan in de overige peilbuizen in de TZ.
- Mogelijke correlatie met neerslag: in de zogenaamde hysteresegrafieken, die in Figuur 67 zijn weergegeven, is naast de correlatie tussen de stijghoogte in de peilbuis en het getij ook het verband tussen neerslag en de stijghoogte weergegeven. Uit de metingen volgt een zeer zwakke correlatie tussen neerslag en de stijghoogte in de peilbuizen in het watervoerende zandlagen. De verklaring hiervoor is in Paragraaf D.1.2 gegeven.
- Uit de metingen van de peilbuizen in het holocene pakket slappe lagen ter plaatse van de boorpaal volgt (zie Tabel 14): er zijn 3 peilbuizen in het holocene pakket slappe lagen ter plaatse van de boorpaal geplaatst.
- Twee van de 3 peilbuizen staan ter plaatse van de deksloof aan rivierzijde HB053PB01 en HB053PB02: Hieruit volgt een hoogte van het freatisch vlak van circa NAP – 0,9 tot – 1,30. Opmerkelijk is dat dit aan de polderzijde circa 0,2 m hoger is.
- Tevens staat 1 peilbuis langs (tegen) de boorpaal en 1 op dezelfde hoogte op 2 m afstand uit de boorpaal (HB054PB01 respectievelijk HB022PB1). De eerstgenoemde peilbuis is daar geplaatst om mogelijke lekkage langs de boorpaal (spleet langs de paal te detecteren). Uit de metingen volgt dat de reacties nagenoeg gelijk zijn. In beide peilbuizen wordt geen correlatie tussen de stijghoogte en het getij gevonden. Wel is de stijghoogte gecorreleerd met de dagsom neerslag (zie Figuur 69) alsook de grafiek waarbij de metingen in de tijd zijn uitgezet, zie Figuur 59 en Figuur 60.



Figuur 63 Figuur 68: De stijghoogte van de peilbuizen, de buitenwaterstand en het peil in de bakwetering uitgezet tegen de tijd (y-as) van raai 4 (gehele meetperiode).



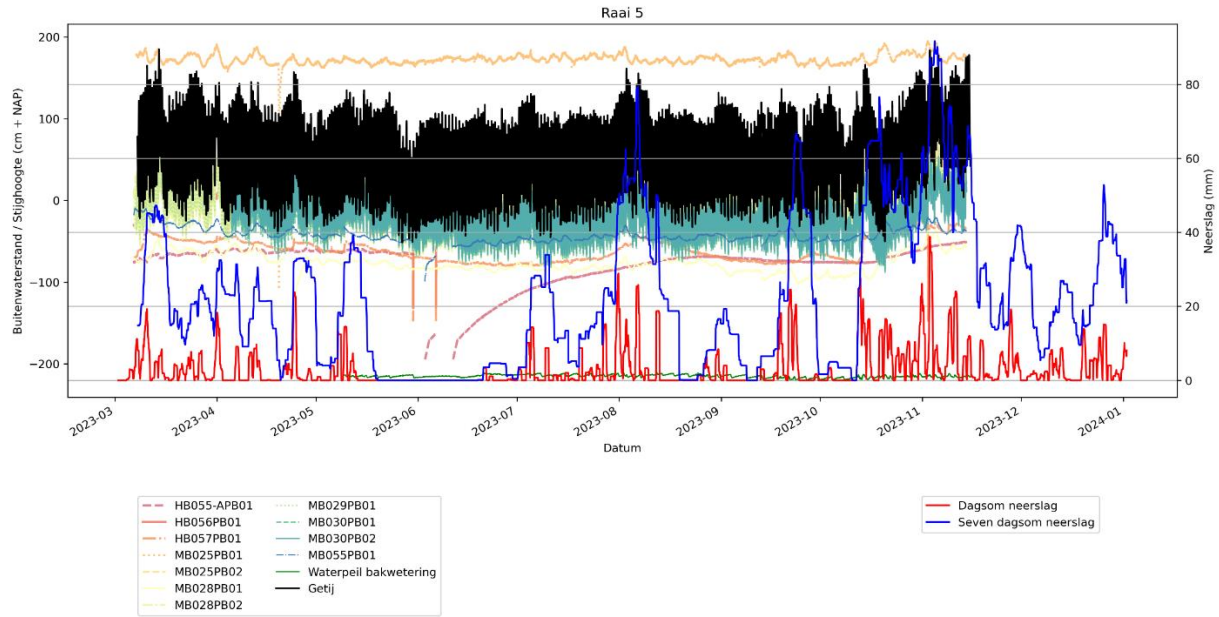
Figuur 69 Hysteresisgrafieken peilbuis HB054PB01 (links) en HB022PB01 (rechts).

#### Conclusies:

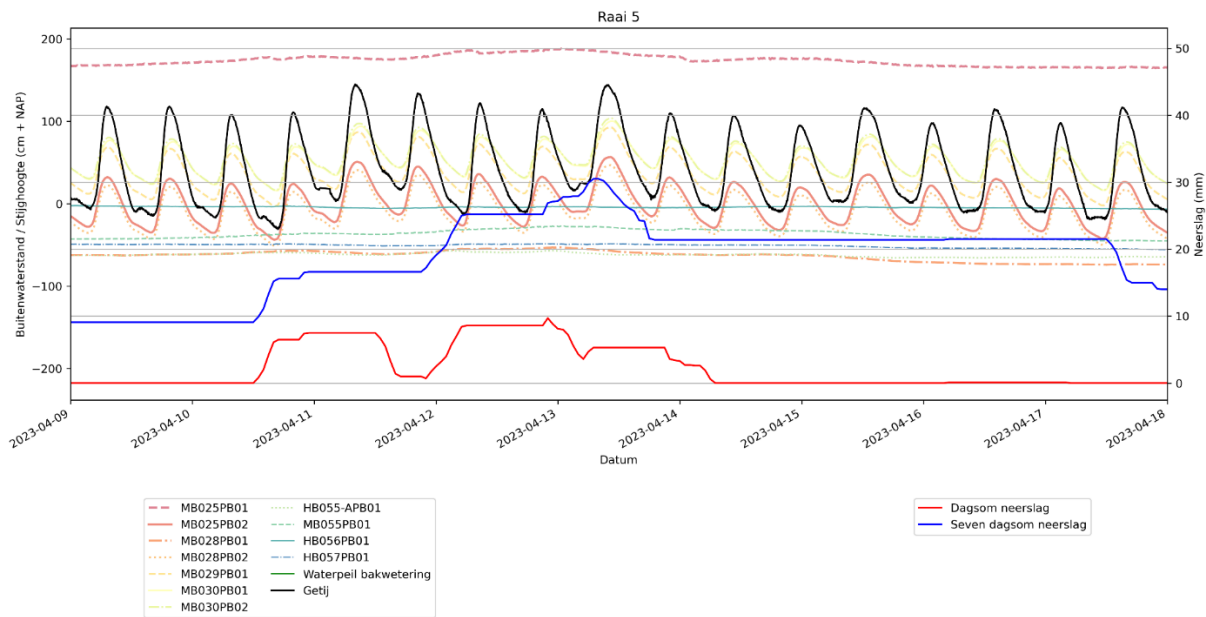
- Mogelijke hydraulische kortsluiting de PL en de TZ:  
Evenals bij raai 3 is op een afstand van 19 m rivierwaarts van de boorpaal de gemiddelde stijghoogte in PL en TZ nagenoeg gelijk wat zou kunnen duiden op hydraulische kortsluiting tussen TZ en PL ten plaatse van het anker. Het verschil in respons tussen de TZ en de PL is ter plaatse van de boorpaal (en de overige locaties in deze raai) echter zeer groot. De respons in de TZ is ter plaatse van de boorpaal en het anker kleiner dan verder polderwaarts (het verschil in respons met de PL is zelfs een factor 10). Overall conclusie is dat hydraulische kortsluiting niet aannemelijk is.
- Mogelijke lekkage /vernatting van de TZ naar maaiveld bij de boorpaal:  
Vooral op basis van de gemiddelde peilbuisstand in de TZ ter plaatse van de boorpaal (in vergelijking met de andere metingen) lijkt het niet aannemelijk dat lekkage langs de boorpaal van de TZ naar maaiveld optreedt. Uit de 2 peilbuizen die in het holocene pakket slappe lagen staan, waarvan een tegen de boorpaal en een op 2 m afstand op dezelfde hoogte, volgt dat beide op gelijke wijze op stijghoogteverandering in de TZ reageert, waaruit ook volgt dat niet aannemelijk is dat lekkage langs de boorpaal aanwezig is. Op basis van de peilbuizen ter plaatse van de deksloof volgt dat het freatisch vlak tijdens de meetperiode op circa NAP – 0,9 tot -1,3 m ligt. Dit is lager dan de gemiddelde stijghoogte in de TZ. Hierdoor zal (als er een spleet zou zijn) vernatting kunnen optreden waardoor ook de freatische lijn stijgt. Overall conclusie is dat het niet aannemelijk is dat lekkage optreedt.
- Mogelijke lekkage/vernatting van de TZ naar maaiveld bij het anker:  
Op basis van de peilbuismetingen kan lastiger een uitspraak worden gedaan over eventuele lekkage bij het anker. In de PL en de TZ ter plaatse van het anker zijn namelijk geen peilbuizen beschikbaar. Het is aannemelijk dat de stijghoogten in de PL en de TZ bij het anker vergelijkbaar zijn met de stijghoogten aan weerszijden van anker, namelijk NAP – 0,70 m in de periode na 12-06-2023 en NAP – 0,3 m voor 12-06-2023. Uit de plaatsingsformulieren van het anker blijkt dat tijdens het spoelen van naastgelegen ankers geen water uit dit anker stroomde. Gezien bovengenoemde is de conclusie voor mogelijke vernatting als gevolg van een lekkage langs het anker gelijk aan die bij de boorpaal en is lekkage naar het maaiveld (mv) niet aannemelijk.

## D.2.5 Raai 5

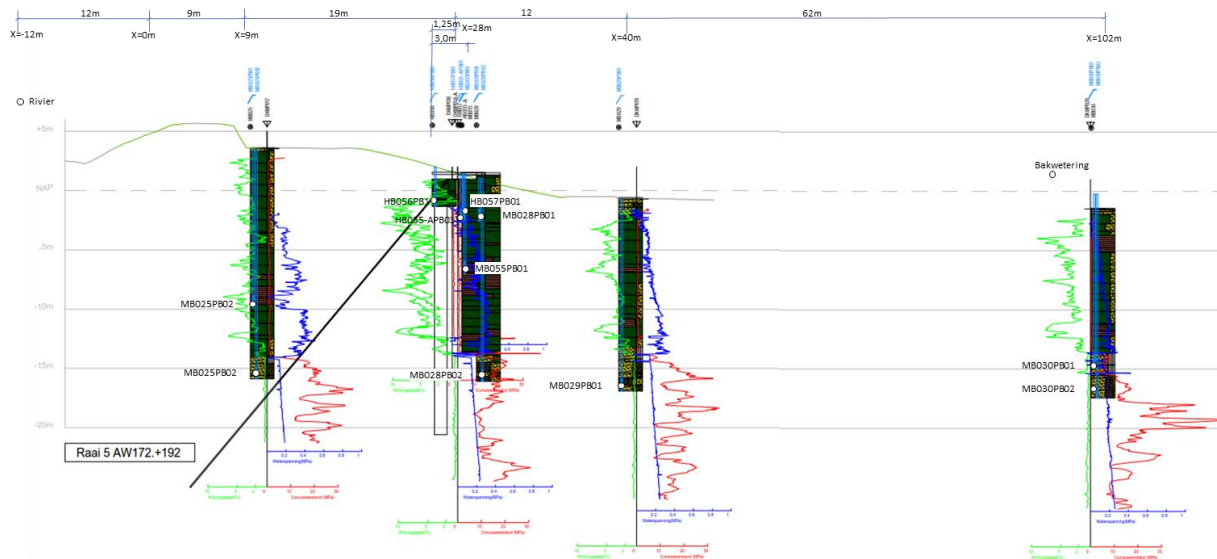
### D.2.5.1. Meetwaarden



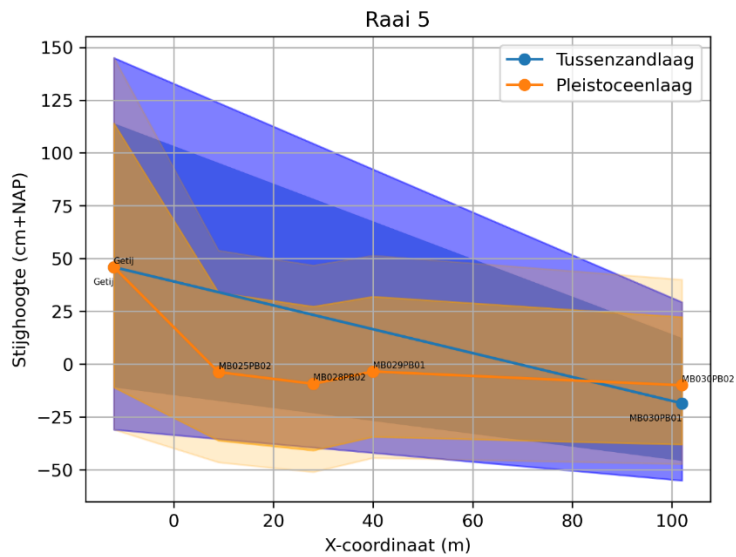
Figuur 70: De stijghoogte van de peilbuizen, de buitenwaterstand en het peil in de bakwetering uitgezet tegen de tijd (y-as) van raai 5 (gehele meetperiode).



Figuur 71: De stijghoogte van de peilbuizen, de buitenwaterstand en het peil in de bakwetering uitgezet tegen de tijd (y-as) van raai 5 (periode 09-04-2023 tot 18-04-2023).

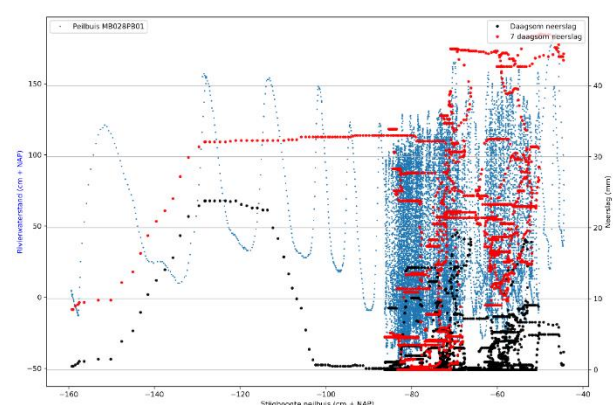
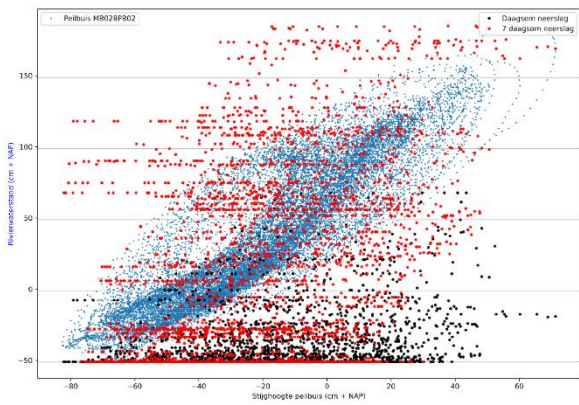
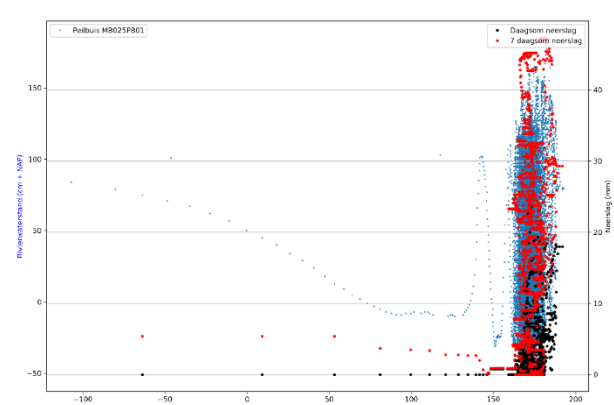
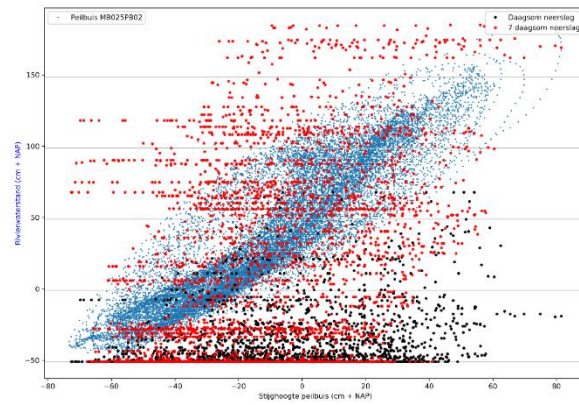
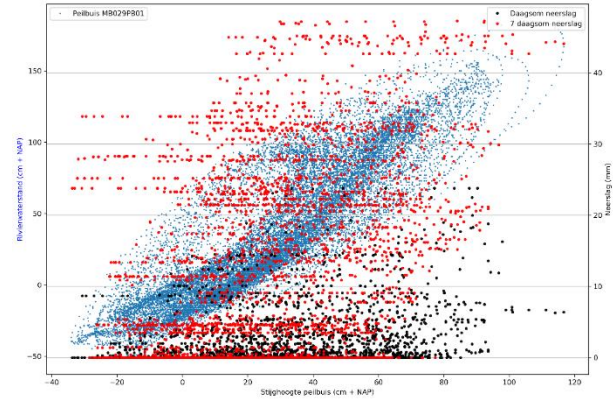
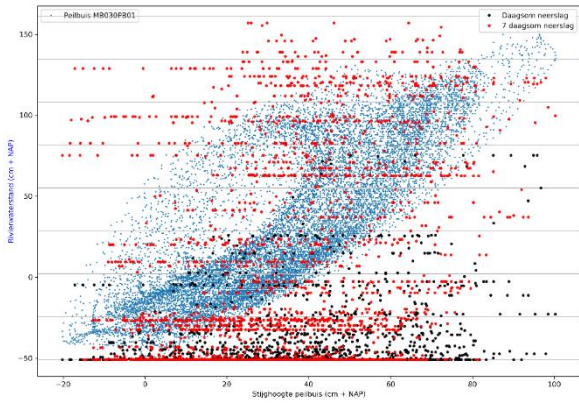
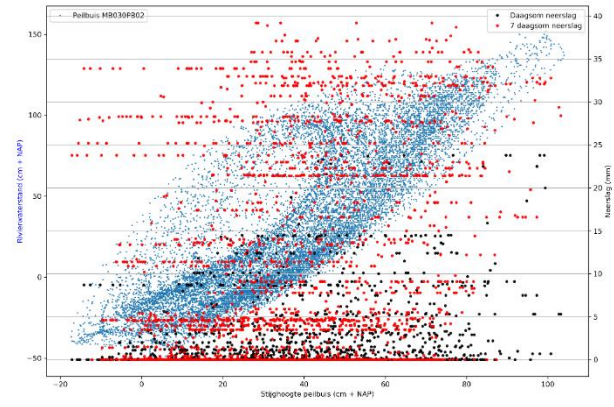
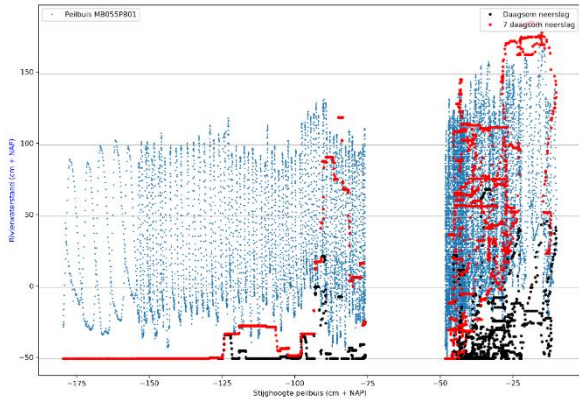


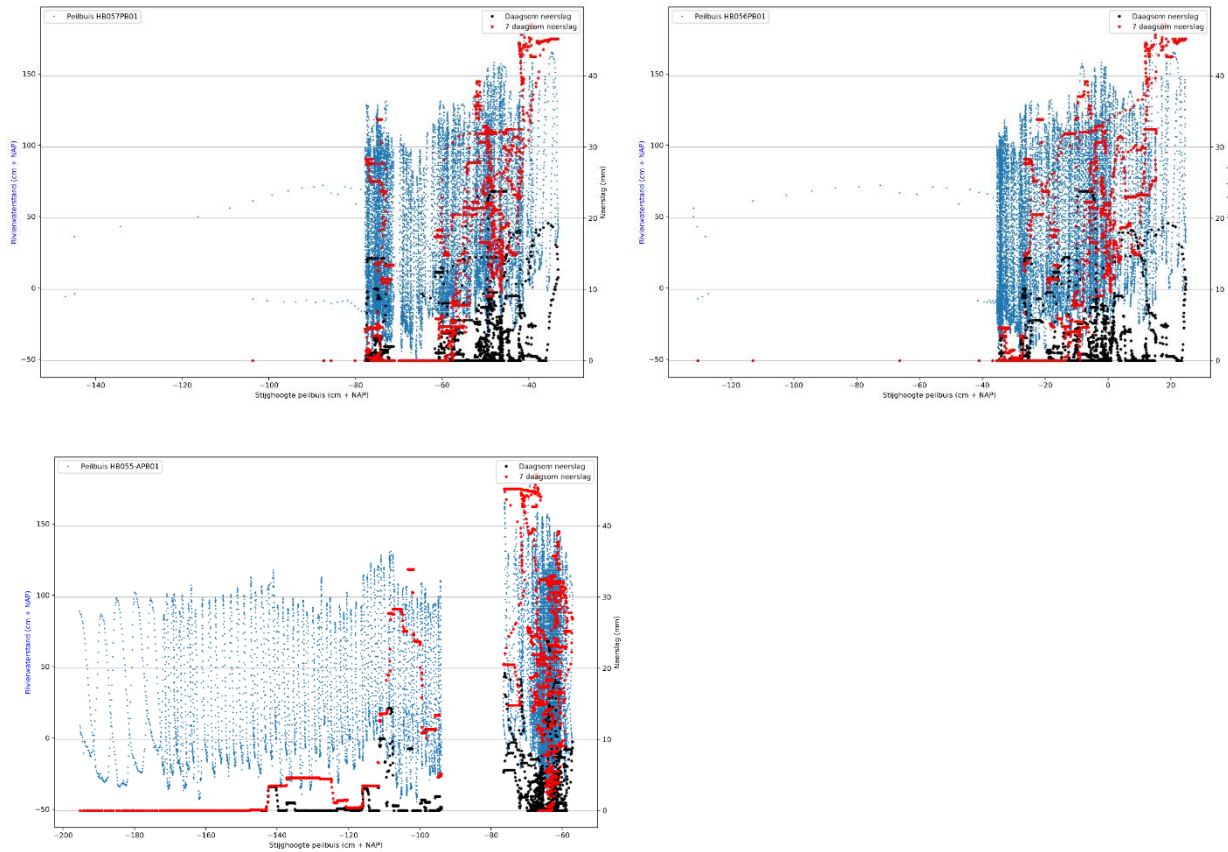
Figuur 72: Dwarsprofiel raai 5 met uitgevoerde grondonderzoek bestaande uit de boringen, sonderingen en de locaties van de filters van de peilbuizen.



Figuur 73: Gemiddelde stijghoogte in PL voor raai 5 voor een bepaalde representatieve periode (Per peilbuis is voor de betreffende meetperiode de karakteristieke boven- en ondergrenswaarde, de minimale en maximale waarde in de meetperiode weergegeven).







Figuur 74: Hysteresegrafieken peilbuizen raai 5, waarbij de peilbuisstand (x-as) tegen het getij (linker y-s) is uitgezet. Inclusief dagsom neerslag en 7 daagse neerslagsom (rechter y-as). Voor het overzicht zijn al de hysteresegrafieken per raai in één figuur weergegeven. Voor een duidelijk beeld van de afzonderlijke grafieken wordt verwezen naar het opleverdossier.

#### D.2.5.2. Conclusies n.a.v. de meetwaarden

Uit de metingen van de peilbuizen in PL volgt:

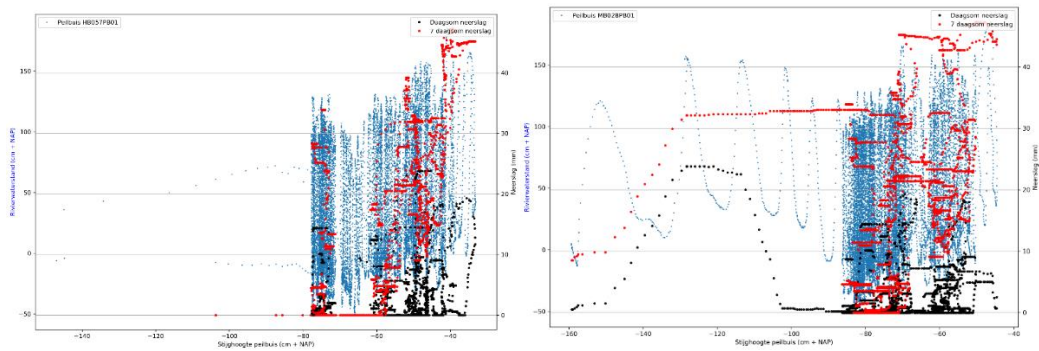
- Uit het grondonderzoek (zie Figuur 72) volgt dat de TZ hier ontbreekt. Er zijn 4 peilbuizen met het filter in de PL geplaatst.
- De gemiddelde stijghoogten in de peilbuizen lopen iets af richting te polder (zie Figuur 73 en Tabel 13). Het verhang is gering en vermoedelijk door meetonnauwkeurigheden wijkt dit soms iets af. De respons op het getij is hoog en neemt enigszins af in de richting van de polder.
- De gemiddelde stijghoogten in de periode voor 12-06-2023 zijn hoger dan in de periode daarna wanneer de stijghoogte circa 0,25 m lager ligt als gevolg van de veranderde onttrekking van de drinkwaterwinning van Oasen.
- De respons van de stijghoogte in de PL op het getij is vrij sterk (zie Figuur 71 en Tabel 13). Deze zijn vergelijkbaar met raai 6 (zie Bijlage D.2.6.1), maar slechts iets sterker dan de responsen in de overige raaien (1 t/m 4).
- Mogelijke correlatie met neerslag: uit de metingen volgt een zeer zwakke correlatie tussen neerslag en de stijghoogte in de peilbuizen in het watervoerende zandlagen (zie de zogenaamde hysteresegrafieken in Figuur 74). Hoogstens dat enige correlatie lijkt te worden gezien tussen de dagsom neerslag en de stijghoogte. De verklaring hiervoor is in Paragraaf D.1.2 gegeven.

Uit de metingen van de peilbuizen in het holocene pakket slappe lagen ter plaatse van de boorpaal valt het volgende af te leiden (zie Tabel 14):



Er zijn 4 peilbuizen in het holocene pakket slappe lagen ter plaatse van de boorpaal geplaatst.

- 3 van de 4 peilbuizen staan ter plaatse van de deksloof: Hieruit volgt dat het freatisch vlak op circa NAP – 0,4 tot – 0,8 m ligt aan polderzijde van de deksloof en op circa NAP – 0,2 tot – 0,4 m aan rivierzijde van de deksloof.
- Er is ook een peilbuis waarvan het filter dieper in het holoceen staan, namelijk MB055PB01 met het filter op NAP - 6,50 m, De gemiddelde stijghoogte is hier NAP – 0,2 m tot – 0,4 m.
- Van de peilbuizen HB057PB01 en MB028PB01 staat 1 peilbuis tegen de boorpaal en 1 op 2 m afstand. De eerstgenoemde peilbuis is daar geplaatst om mogelijke lekkage langs de boorpaal (spleet langs de paal) te detecteren. Dit tezamen met de laatstgenoemde peilbuis. Uit de metingen volgt dat de reacties niet vergelijkbaar zijn (zie Figuur 75). De stijghoogte in de peilbuis met het filter tegen de boorpaal geeft gemiddeld een circa 20 cm hogere stijghoogte. Daarbij wordt overigens opgemerkt dat de stijghoogten van de peilbuizen onder het niveau van NAP - 1 m niet betrouwbaar zijn omdat de peilbuizen enige dagen nodig hebben gehad om zich aan te passen aan de werkelijke stijghoogten. Voor de metingen in beide peilbuizen wordt geen correlatie en het getij gevonden. De stijghoogte in de peilbuis met het filter tegen de boorpaal correleert enigszins met neerslag (7-daagse neerslagsom). Dit in tegenstelling tot de peilbuis op 2 m afstand van de boorpaal.



Figuur 75: Hysteresisgrafieken peilbuis HB057PB01 (links) en MB028PB01 (rechts).

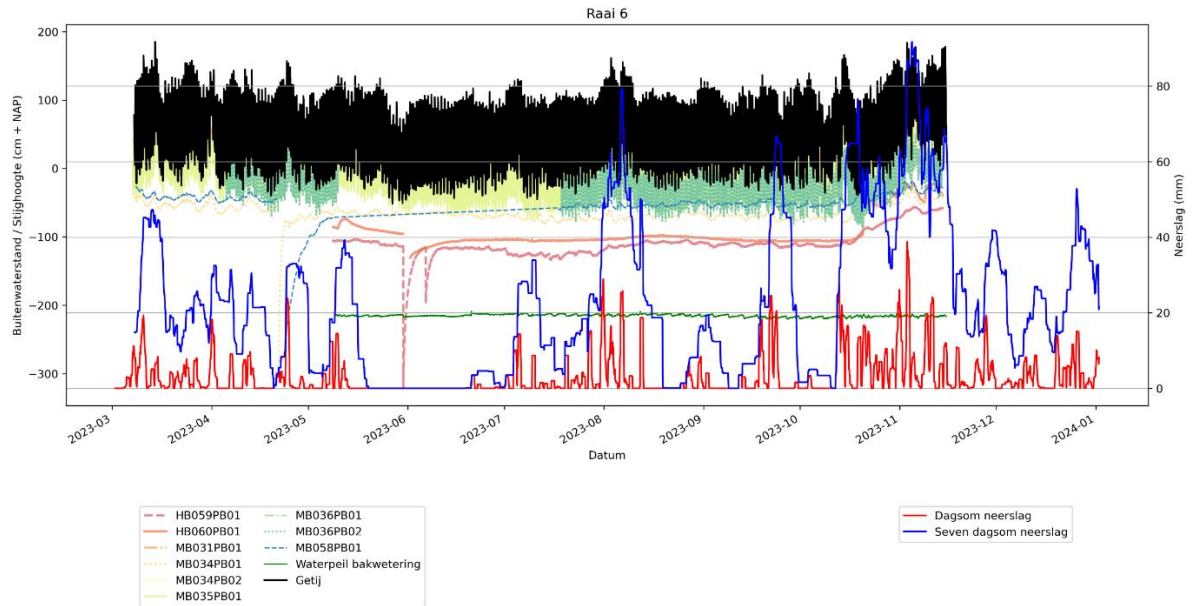
**Conclusies:**

- Mogelijke hydraulische kortsluiting de PL en de TZ:  
Op deze locatie is geen TZ aanwezig.
- Mogelijke lekkage/vernating van PL naar maaiveld bij boorpaal:  
Uit de 2 peilbuizen die in het holocene pakket slappe lagen staan waarvan een tegen de boorpaal en een op 2 m afstand op dezelfde hoogte volgt dat de stijghoogte ter plaatse van de boorpaal iets hoger is dan op 2m afstand (op dezelfde hoogte). Dit is echter gering.  
Op basis van de freatische peilbuizen ter plaatse van de deksloof volgt dat het freatisch vlak tijdens de meetperiode op NAP – 0,2 m tot – 0,4 m (rivierwaarts) tot NAP – 0,4 m tot – 0,8 m (polderwaarts) ligt. Dit is gemiddeld genomen lager dan de stijghoogte in de PL (NAP – 0,1 m) periode voor 12-06-2023) waardoor vernating zou kunnen optreden (als er een spleet is). De gemiddelde stijghoogte en de respons loopt over het algemeen iets af richting polder. Ter plaatse van de boorpaal ligt dit geheel in lijn der verwachting als geen lekkage naar maaiveld zou optreden. Het is hierdoor niet aannemelijk dat sprake is van lekkage/vernating naar het maaiveld.
- Mogelijke lekkage/vernating van PL naar maaiveld bij anker:  
Uit de plaatsingsformulieren van het anker blijkt dat tijdens het spoelen van naastgelegen ankers wel water uit dit anker stroomde. Ondanks deze potentiële lekweg loopt de gemiddelde stijghoogte en de respons bij benadering iets af richting polder. Ter plaatse

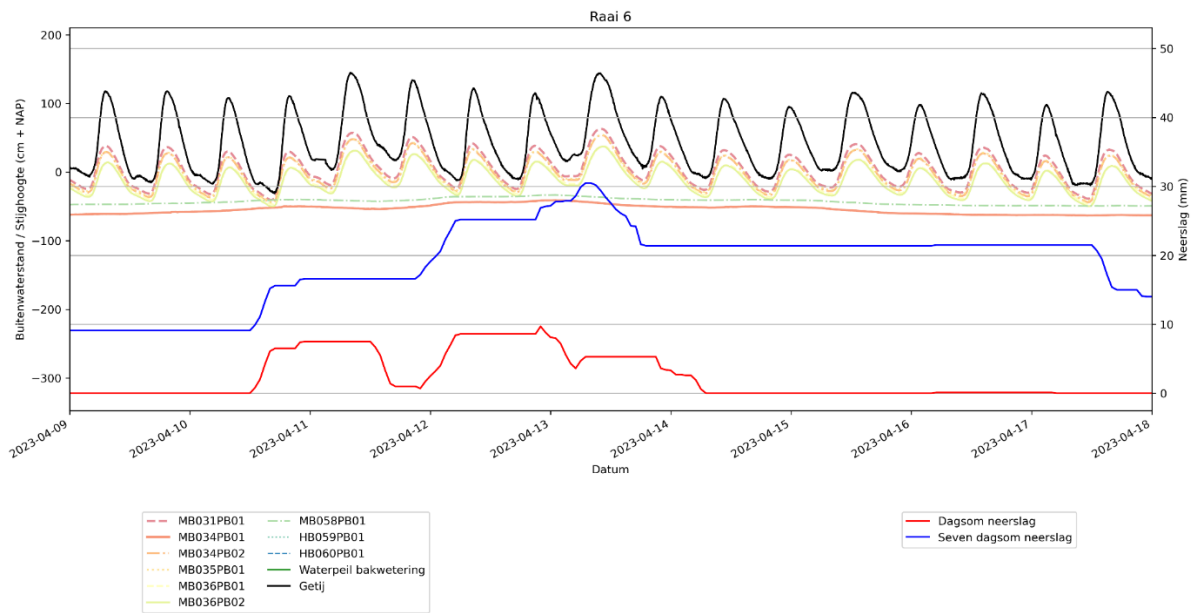
van het anker ligt dit evenals bij de boorpaal geheel in lijn der verwachting als geen lekkage naar maaiveld zou optreden. Het is hierdoor niet aannemelijk dat sprake is van lekkage/vernating naar het maaiveld.

## D.2.6 Raai 6

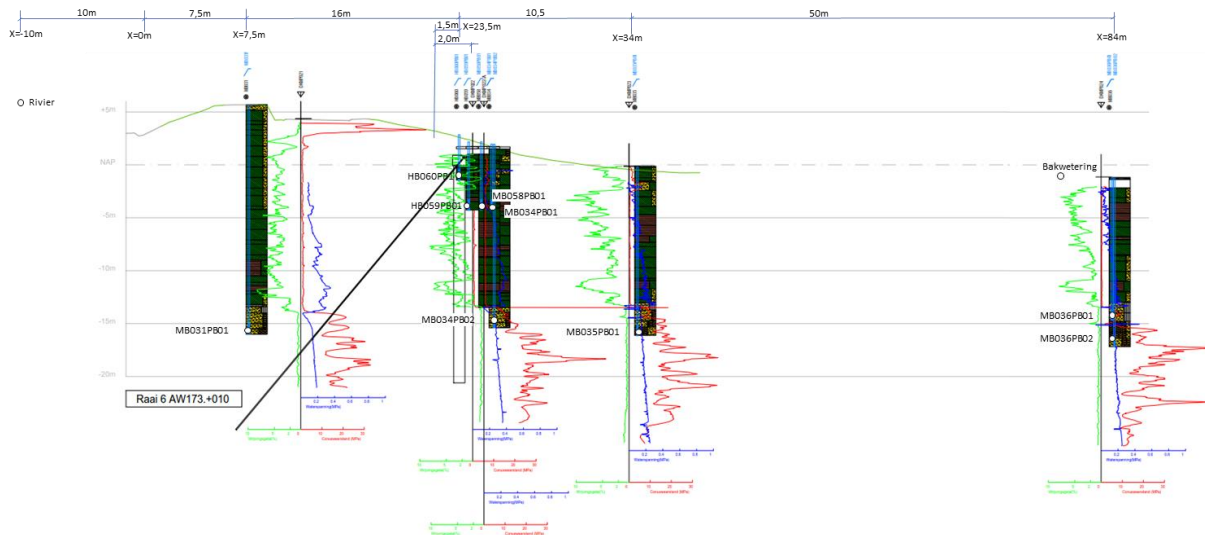
### D.2.6.1. Meetwaarden



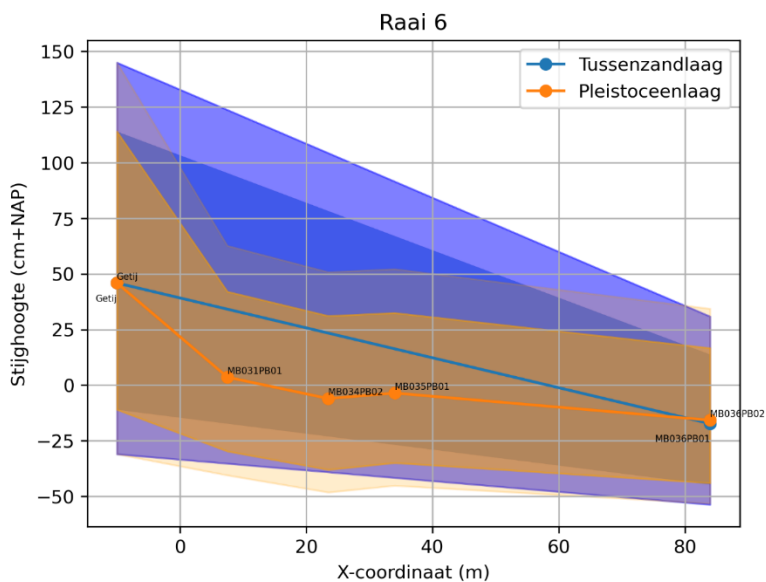
Figuur 76: De stijghoogte van de peilbuizen, de buitenwaterstand en het peil in de bakwetering uitgezet tegen de tijd (y-as) van raai 6 (gehele meetperiode).



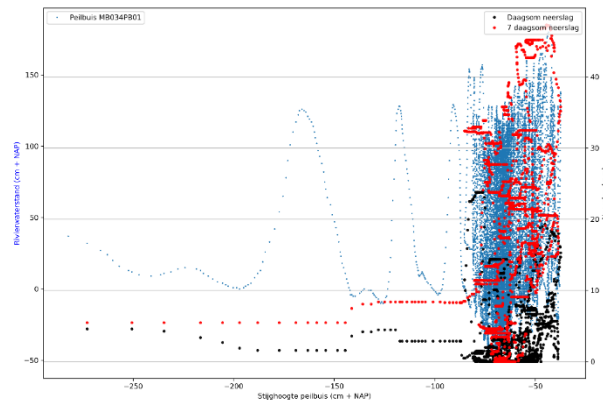
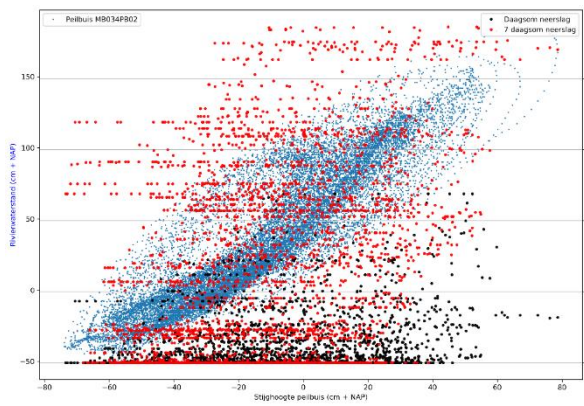
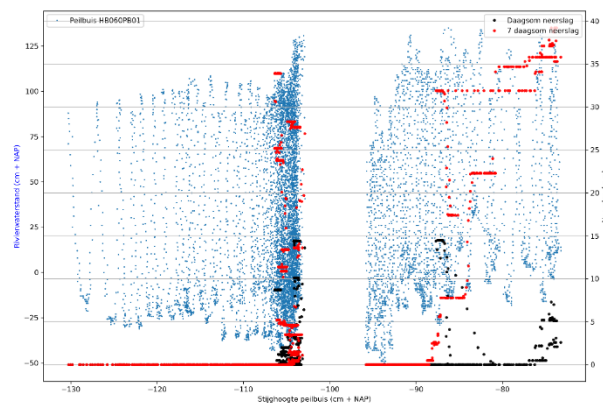
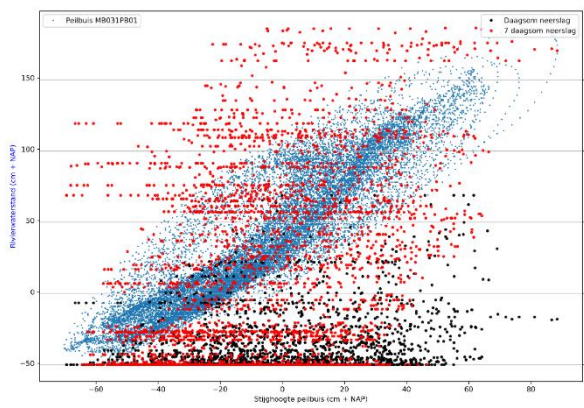
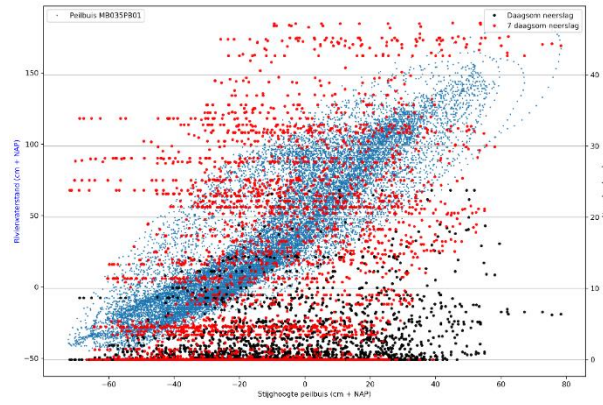
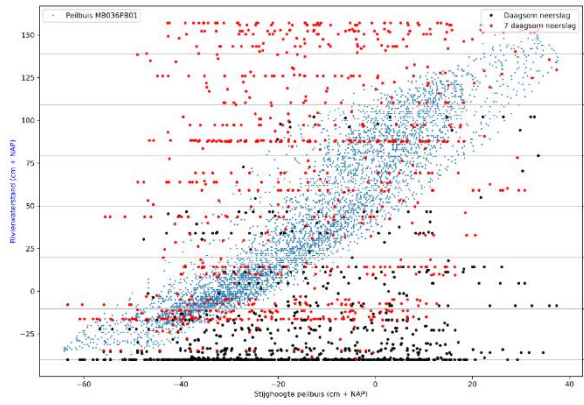
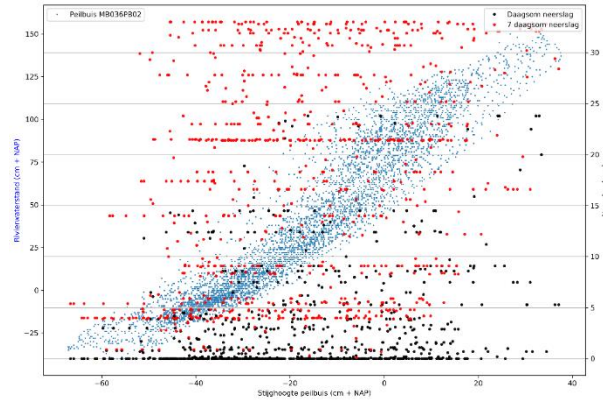
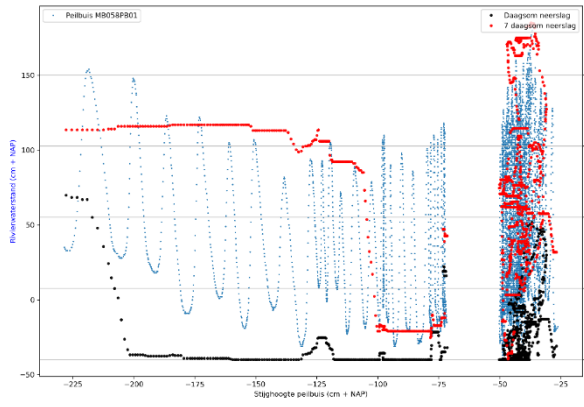
Figuur 77: De stijghoogte van de peilbuizen, de buitenwaterstand en het peil in de bakwetering uitgezet tegen de tijd (y-as) van raai 6 (periode 09-04-2023 tot 18-04-2023).



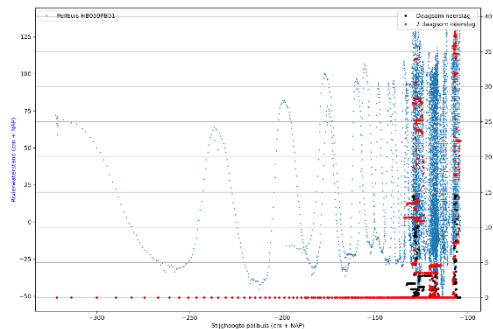
Figuur 78: Dwarsprofiel raai 6 met uitgevoerde grondonderzoek bestaande uit de boringen, sonderingen en de locaties van de filters van de peilbuizen.



Figuur 79: Gemiddelde stijghoogte in PL voor raai 6 voor een bepaalde representatieve periode (Per peilbuis is voor de betreffende meetperiode de karakteristieke boven- en ondergrenswaarde, de minimale en maximale waarde in de meetperiode weergegeven).







*Figuur 80: Hysteresegrafieken peilbuizen raai 6, waarbij de peilbuisstand (x-as) tegen het getij (linker y-s) is uitgezet. Inclusief dagsom neerslag en 7 daagse neerslagsom (rechter y-as). Voor het overzicht zijn al de hysteresegrafieken per raai in één figuur weergegeven. Voor een duidelijk beeld van de afzonderlijke grafieken wordt verwezen naar het opleverdossier.*

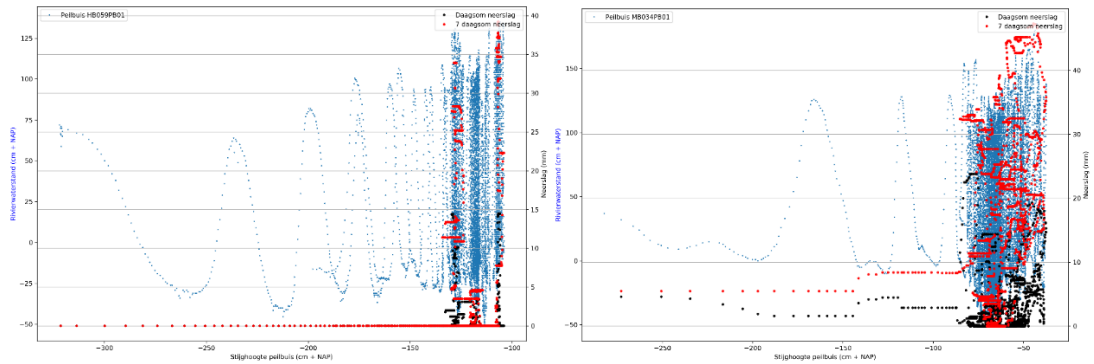
#### D.2.6.2. Conclusies n.a.v. de meetwaarden

Uit de metingen van de peilbuizen in PL het volgende af te leiden:

- Er zijn 4 peilbuizen met het filter in de PL geplaatst. Uit het grondonderzoek volgt dat de TZ hier ontbreekt (zie Figuur 78).
- De gemiddelde stijghoogten in de peilbuizen lopen iets af richting te polder (zie Figuur 79). Het verhang is gering en vermoedelijk door meeton nauwkeurigheden wijkt dit soms iets af. De respons op het getij is hoog en loopt enigszins af richting de polder. De respons van de stijghoogte is vergelijkbaar met raai 5 (zie D.2.5.1). Opmerkelijk is de lage respons in de twee peilbuizen op x=84 m. Vermoedelijk zijn deze in vrij ondoorlatende grondlagen geplaatst.
- Evenals bij raai 5 wordt ook hier een verschil in stijghoogte van circa 0,25 m gemeten als de perioden voor en na 12-06-2023 worden beschouwd. Dit is het gevolg van de veranderde onttrekking van de drinkwaterwinning van Oasen te Nieuw Lekkerland.
- Uit de metingen volgt een zeer zwakke correlatie tussen neerslag en de stijghoogte in de peilbuizen in het watervoerende zandlagen (zie de zogenaamde hysteresegrafieken in Figuur 80). Hoogstens dat enige correlatie lijkt te worden gezien tussen de dagsom neerslag en de stijghoogte. De verklaring hiervoor is in Paragraaf D.1.2 gegeven.

Uit de metingen van de peilbuizen in het holocene pakket slappe lagen ter plaatse van de boorpaal valt het volgende af te leiden (zie Tabel 14):

- Er zijn 4 peilbuizen in het holocene pakket slappe lagen ter plaatse van de boorpaal geplaatst.  
De peilbuizen staan ter plaatse van de deksloof: Hieruit volgt dat het freatisch vlak rivierwaarts van de deksloof op circa NAP – 1,0 m ligt en aan polderzijde circa NAP – 0,3 m tot – 0,8 m.
- De stijghoogte in de peilbuis met het filter tegen de boorpaal geeft gemiddeld een circa 0,5 m lagere stijghoogte dan de peilbuis op 2 m afstand uit de boorpaal op dezelfde hoogte (zie Figuur 81). Daarbij wordt overigens opgemerkt dat de stijghoogten van de peilbuizen onder het niveau van NAP – 0,8 m in MB034PB01 en onder NAP – 1,30 m in HB059PB1 niet betrouwbaar zijn omdat de peilbuis enige dagen nodig hebben gehad om zich aan te passen aan de werkelijke stijghoogten. In beide peilbuizen wordt geen correlatie tussen de stijghoogte en het getij gevonden. De stijghoogten in beide peilbuizen geven geen duidelijke correlatie met neerslag (7 -daagse neerslagsom).



Figuur 81: Hysteresegrafieken peilbuis HB059PB01 (links) en HB034PB01 (rechts).

#### Conclusies:

- Mogelijke hydraulische kortsluiting de PL en de TZ:  
Op deze locatie is geen TZ aanwezig.
- Mogelijke lekkage/vernating van de PL naar maaiveld bij boorpaal:  
De reactie van de stijghoogte in de peilbuis in de PL bij de boorpaal op het getij is gelijk aan die bij de overige peilbuizen in deze raai en die van de peilbuizen in raai 5. De gemiddelde peilbuisstand in de PL ter plaatse van de boorpaal is ook vergelijkbaar met de andere metingen in de peilbuizen op 15 m afstand (polderwaarts en rivierwaarts). Uit de 2 peilbuizen die in het holocene pakket slappe lagen staan, waarvan een tegen de boorpaal en een op 2 m afstand op dezelfde hoogte, volgt dat de stijghoogte ter plaatse van de boorpaal significant lager is dan op 2 m afstand (op dezelfde hoogte) en veel lager is dat de stijghoogte in het diepe zand en lager is dan het freatisch vlak bij de boorpaal. Het is hierdoor niet aannemelijk dat vernating is opgetreden als gevolg van een spleet langs de boorpaal.
- Mogelijke lekkage/vernating van PL naar maaiveld bij anker:  
De gemiddelde peilbuisstand in PL ter plaatse van het anker is niet nauwkeurig bekend (het filter van peilbuis MB031PB01 ligt namelijk op circa 7 m van het anker). Het is aannemelijk om ervan uit te gaan dat de stijghoogte gelijk aan of lager is dan NAP – 0,25 m (periode na 12-06-23). De reactie van de stijghoogte bij het anker op het getij is vermoedelijk gelijk aan die bij de overige peilbuizen in deze raai en die van de peilbuizen in raai 5). Uit de plaatsingsformulieren van het anker blijkt dat tijdens het spoelen van naastgelegen ankers geen water uit dit anker stroomde. Mede zien dit feit is het niet aannemelijk dat sprake is lekkage/vernating naar het maaiveld.



# E Hellingmeetbuizen bij boorpalen

## E.1 Algemeen

Om inzicht in te krijgen in eventuele kiervorming langs de boorpalen in de toekomst, worden met hellingmeetbuizen de horizontale vervormingen gemeten. Met de buizen worden de horizontale deformaties ter plaatse van de funderingspalen als de deformaties tussen de palen gemonitord. Hiervoor zijn tot een diepte van 20 m - mv 17 hellingmeetbuizen door Wiertsema & Partners aangebracht die periodiek worden ingemeten (zie Wiertsema, November, 2023-2). In elk van 6 meetraaien staan 3 hellingmeetbuizen (weergegeven in Figuur 82 t/m Figuur 84) behalve in raai 04. De hellingmeetbuis aan rivierzijde van de boorpaal kon niet worden geplaatst waardoor deze is vervangen door een verplaatsing meter (HMB040). Van de 3 buizen per raai is één buis tussen de 2 boorpalen geplaatst, één ter plaatse van de paal aan rivierzijde en één ter plaatse van de paal aan polderzijde. De buis tussen de boorpalen meet de horizontale grondvervormingen tussen de palen. De buis aan polderzijde van de boorpaal meet de horizontale grondverplaatsingen ter plaatse van de boorpaal. De buis aan rivierzijde van de boorpaal meet weliswaar de grondverplaatsingen, maar omdat deze dicht tegen de boorpaal is geplaatst kan worden gesteld dat dat deze vervormingen representatief zijn voor de horizontale vervorming van de boorpaal. Vergelijking van de gemeten waarden van de hellingbuizen kan een goed inzicht geven in het eventuele verschil in de horizontale verplaatsing van de ondergrond en de boorpaal en geeft daarmee inzicht in het eventueel ontstaan van een spleet of kier tussen grond en boorpaal.

## E.2 Scheefstand hellingmeetbuizen

Het is niet mogelijk om de hellingmeetbuizen absoluut verticaal te plaatsen. Hierdoor bestaat de mogelijkheid dat de buizen ter plaatse van de boorpaal niet zuiver voor en achter de boorpaal staan maar afwijken. Bij een te grote afwijking (vooral in de richting haaks op de vervormingsrichting van de grond richting de polder), wordt hierdoor niet de grondverplaatsing ter hoogte van de boorpaal maar eerder de grondvervorming tussen de boorpaal gemeten. Na de installatie is deze afwijking bepaald door de absolute horizontale plaatsing van de hellingmeetbuis zelf te meten. Hiermee dient te worden gecontroleerd of de ligging van de buis betrouwbaar is voor onze analyse. Gesteld is dat de afwijking kleiner dient te zijn dan 200 mm in B-richting. De maximale absolute verplaatsing tijdens de installatie van deze hellingmeetbuizen is weergegeven in Tabel 16.

Daarnaast wordt gekeken naar de absolute verplaatsing op drie dieptes:

- Top TZ.
- Top tussenklei.
- Top PL.

Deze dieptes verschillen per raai. Per raai is daarom de exacte diepte weergegeven in Tabel 17.

De horizontale verplaatsingen zijn in 2 richtingen gemeten. Richting A (positief) meet de verplaatsing richting de rivier en richting B is loodrecht daarop en positief betekent een verplaatsing in oostelijke richting (te zien in de volgende figuren).



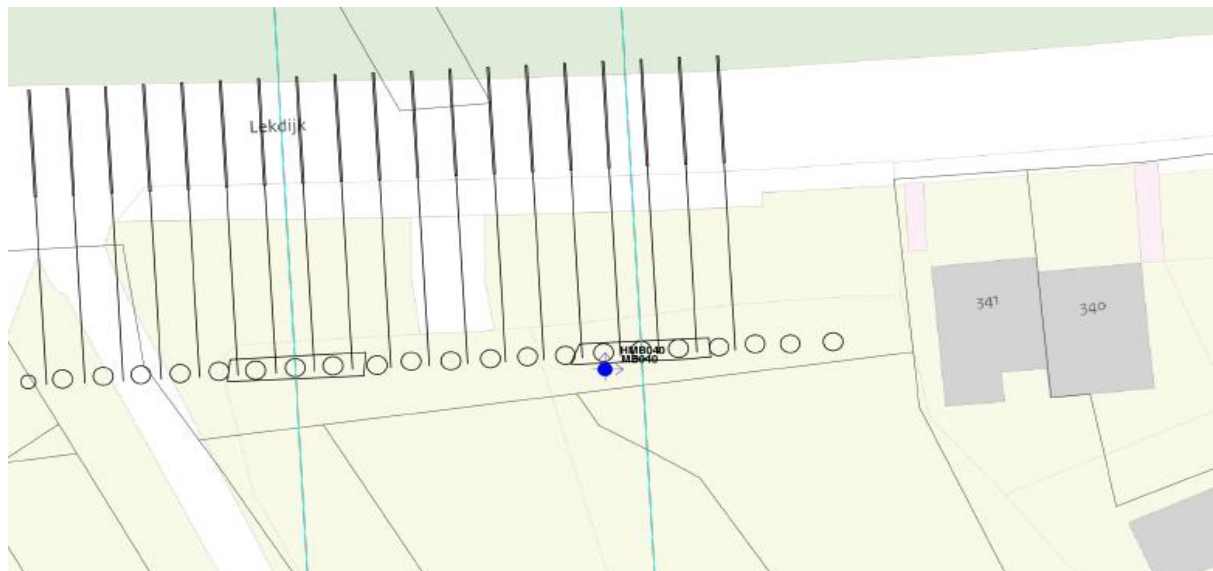
Figuur 82: Locatie01 (Raai 01 en 02) sectie F1-1.



Figuur 83: Locatie02 (Raai 03 en 04) sectie F2-2.



Figuur 84: Locatie03 (Raai 05 en 06) sectie H2.



Figuur 85: Locatie02 raai04 (verplaatsingmeter) sectie F2-2.

In Tabel 16 zijn de hellingmeetbuizen per raai en bijbehorende boring gegeven. De eerste hellingmeetbuis per raai is degene aan rivierzijde van de boorpaal en de volgende 2 zijn de buizen aan polderzijde van de boorpaal respectievelijk de buis tussen de boorpalen. De absolute waarden in richtingen A en B zijn de maximale verplaatsingen (op het diepste punt). De afstand is de totale horizontale afstand tussen de bodem van de buis en de top (resultante).

Tabel 16: Scheefstand hellingmeetbuizen.

Hellingmeetbuis	Locatie: Polder of rivierzijde	Scheefstand Absoluut A (mm)	Scheefstand Absoluut B (mm)	Afstand van (mm)	Boring nr.	Top van hellingmeetbuis (m+NAP)	Verplaatsing tussen NAP - 12 m en - 14 m (mm)	RAAI nr.
			Locatie 03	sectie H2				
HMB032	Rivier	-289,79	-167,48	334,71	MB032	1,2 3)		06
HMB042	Polder	-170,06	-53,79	178,36	MB042	1,2 3)		
HMB033	Polder 1)	-483,14	508,37	701,33	MB033	1,2 3)	-300A 400B 2)	
HMB026	Rivier	-544,35	-308,47	625,68	MB026	1,99	-370A -220B 2)	05
HMB041	Polder	-252,42	-2,43	252,43	MB041	1,20		
HMB027	Polder 1)	-300,29	324,8	442,35	MB027	1,28		
			Locatie 02	Sectie F2-2				
HMB040	Polder	-22,17	76,51	79,66	MB040	-0,70		04
HMB021	Polder 1)	-445,81	443,65	628,95	MB021	-0,79	-300A 300B 2)	
HMB014	Rivier	-404,39	-96,27	415,69	MB014	0,99	-300A 20B	03
HMB039	Polder	-189,54	35,52	192,84	MB039	-0,03		
HMB015	Polder 1)	-15,85	-210,69	211,29	MB015	-0,06		
			Locatie 01	Sectie F1-1				
HMB008	Rivier	-460,68	119,2	475,85	MB008	2,28	-300A 70B	02
HMB009 4)	Polder	-202,83	34,37	205,72	MB009	1,4		
HMB038	Polder 1)	-83,24	-179,02	197,43	MB038	1,45		
HMB002	Rivier	-337,79	53,48	475,85	MB002	1,99		01
HMB037	Polder	-42,04	-146,36	152,28	MB037	0,95		
HMB003	Polder 1)	89,86	-9,46	90,36	MB003	0,93		

- 1) Hellingmeetbuis tussen de twee boorpalen.
- 2) Horizontale verplaatsing > 200 mm.
- 3) De hoogte van de top van de hellingmeetbuis voor raaio6 is niet gegeven. Hier is gekeken naar de relatie van de hoogte met andere raaien met bijbehorende boring en de top is geschat.
- 4) Door een obstakel in de ondergrond kon deze buis niet dieper worden geplaatst (zie ook Tabel 17).

In Tabel 15 is de scheefstand met rode tekst gemarkeerd als deze groter is dan 200 mm. Uit Tabel 15 volgt dat voor 3 hellingmeetbuizen de afwijking in B-richting groter is dan 200 m waardoor deze als minder betrouwbaar wordt bestempeld voor de verdere analyse.

Tevens zijn de met HMB009 gemeten vervorming onbetrouwbaar omdat de hellingmeetbuis onvoldoende diep is geplaatst.

### E.3 Horizontale vervormingen

In Tabel 18 zijn de diepten gegeven waarop de horizontale vervormingen van belang zijn.

Tabel 17: Van belang zijnde diepten voor bepaling horizontale vervormingen.

Hellingmeetbuis	Top van hellingmeterbuis (m + NAP)	Top TZ (m + NAP)	Top tussenkleilaag (m + NAP)	Top PL (m + NAP)
HMB002	1,99	-12,77	-13,37	-13,97
HMB037	0,95	-12,7	-13,31	-14,2
HMB003	0,93	-12,7	-13,4	-14,2
HMB008	2,28	-12,9	-13,06	-14,2
HMB009	1,4	-12,88	-13,38	Obstakel 1)
HMB038	1,45	-13,12	-13,52	-14,12
HMB014	0,99	-11,97	-12,67	-14,07
HMB039	-0,03	-12,08	-12,58	-13,58
HMB015	-0,06	-12,20	-12,6	-13,6
HMB040	-0,70	-12,12	-12,52	-13,72
HMB021	-0,79	-12,2	-12,7	-13,5
HMB026	1,99	Geen	-12,29	-13,89
HMB027	1,28	Geen	-12,17	-14,27
HMB041	1,20	Geen	-12,07	-13,87
HMB032	1,2	Geen	-12,32	-13,72
HMB042	1,2	Geen	-12,13	-13,63
HMB033	1,2	Geen	-12,53	-13,93

1) Door een obstakel in de ondergrond kon deze buis niet dieper worden geplaatst.

In de volgende tabel zijn de horizontale verplaatsingen voor bovengenoemde 3 dieptes gegeven. Er zijn 3 tijdstippen gegeven voor raai 2 en 3, en er zijn 4 tijdstippen gegeven voor raai 4, 5 en 6. Tevens zijn de grafieken aangegeven met de gemeten verplaatsingen. De nulmeting is uitgevoerd op dezelfde dag van de eerste meting.

Tabel 18: Gemeten horizontale verplaatsingen.

Label	Diepte in slappe laag		Diepte in TZ		Diepte in tussenklei	
	Verplaatsing richting A (mm)	Verplaatsing richting B (mm)	Verplaatsing richting A (mm)	Verplaatsing richting B (mm)	Verplaatsing richting A (mm)	Verplaatsing richting B (mm)
<b>Raai01</b>						
<b>HMB002</b>	-7.38		-12.77		-13.67	
<b>10-5-2023</b>	-0.665	0.12	-0.325	0.16	-0.25	0.055
<b>1-8-2023</b>	-1.845	-0.73	-1.155	-0.23	-0.935	-0.215
<b>15-11-2023</b>	-1.4	0.08	-1.57	0.11	-0.7	0.01
<b>HMB003</b>	-6.815		-12.7		-13.8	
<b>10-5-2023</b>	0.17	0.145	0.125	0.085	0.085	0.115
<b>1-8-2023</b>	-0.285	-0.79	-0.02	-0.415	-0.03	-0.355
<b>15-11-2023</b>	-0.25	-0.6	0.06	-0.35	0.035	-0.28
<b>HMB037</b>	-6.825		-12.7		-13.755	
<b>10-5-2023</b>	0.43	0.02	0.285	0.165	0.245	0.13
<b>1-8-2023</b>	-1.085	-0.02	-0.42	0.015	-0.26	0.005
<b>15-11-2023</b>	-0.53	-0.01	-0.17	0.05	0.07	-0.13
<b>Raai02</b>						
<b>HMB008</b>	-7.59		-12.9		-13.63	
<b>10-5-2023</b>	0.385	0.48	0.17	0.325	0.19	0.275
<b>1-8-2023</b>	-0.805	1.015	-0.445	0.495	-0.375	0.38
<b>15-11-2023</b>	-1.46	1.08	-0.8	0.55	-0.58	0.34
<b>HMB009 1)</b>	-7.14		-12.88		-13.79	
<b>10-5-2023</b>	0.21	-0.245	0.05	-0.045	0	0
<b>1-8-2023</b>	-0.57	0.075	0.05	-0.11	0	0
<b>15-11-2023</b>	-0.88	0.085	-0.14	-0.08	0	0
<b>HMB038</b>	-7.285		-13.12		-13.82	
<b>10-5-2023</b>	0.8	-0.32	0.5	-0.12	0.45	-0.1
<b>1-8-2023</b>	-0.025	0.23	0.24	-0.05	0.245	-0.105
<b>15-11-2023</b>	-0.13	0.07	0.34	-0.13	0.36	-0.14
<b>Raai03</b>						
<b>HMB014</b>	-6.48		-11.97		-13.37	
<b>10-5-2023</b>	-1.55	-0.495	-0.885	-0.24	-0.695	-0.155



Label	Diepte in slappe laag		Diepte in TZ		Diepte in tussenklei	
Meetdatum	Verplaatsing richting A (mm)	Verplaatsing richting B (mm)	Verplaatsing richting A (mm)	Verplaatsing richting B (mm)	Verplaatsing richting A (mm)	Verplaatsing richting B (mm)
1-8-2023	-2.38	-0.945	-1.325	-0.565	-1.02	-0.485
14-11-2023	-2.62	-0.52	-1.48	-0.48	-1.1	-0.41
<b>HMB039</b>	-6.025		-12.08		-13.08	
10-5-2023	0.31	0.075	0.19	0.065	0.18	0.035
1-8-2023	-0.425	-0.965	-0.1	-0.44	-0.03	-0.365
14-11-2023	-1.34	-0.3	-0.34	-0.11	-0.25	-0.02
<b>HMB015</b>	-6.07		-12.2		-13.1	
10-5-2023	0.68	-0.09	0.345	0.005	0.305	0
1-8-2023	0.345	0.075	0.345	0.155	0.295	0.205
14-11-2023	0.75	-0.1	0.77	0.08	-0.65	0.12
<b>Raai04</b>						
<b>HMB040</b>	-5.71		-12.12		-13.12	
8-3-2023	-0.04	-0.295	0.005	-0.185	0.01	-0.21
10-5-2023	-1.14	1.1	-0.705	0.37	-0.685	0.445
1-8-2023	-1.545	1.56	-0.86	0.41	-0.785	0.5
14-11-2023	-0.19	1.07	-1.06	0.18	-0.96	0.37
<b>HMB021 2)</b>	-5.705		-12.2		-13.1	
8-3-2023	0.045	0.185	-0.02	0.17	-0.015	0.095
10-5-2023	0.605	2.535	-0.065	1.47	0.02	1.3
1-8-2023	0.305	3.13	-0.025	1.565	0.06	1.395
14-11-2023	-0.17	3.06	-0.39	1.59	-0.09	1.16
<b>Raai05</b>						
<b>HMB026 2)</b>	-7.14		Nvt	Nvt	-13.09	
8-3-2023	0.035	0.485	Nvt	Nvt	-0.005	0.07
10-5-2023	-2.125	3.305	Nvt	Nvt	-1.55	2.57
1-8-2023	-3.02	2.59	Nvt	Nvt	-1.95	2.45
14-11-2023	-3.09	2.98	Nvt	Nvt	-1.87	2.29
<b>HMB041</b>	-7.165				-13.23	
8-3-2023	-0.075	0.055	Nvt	Nvt	0.03	0.115
10-5-2023	0.215	0.71	Nvt	Nvt	-0.08	0.82

Label	Diepte in slappe laag		Diepte in TZ		Diepte in tussenklei	
Meetdatum	Verplaatsing richting A (mm)	Verplaatsing richting B (mm)	Verplaatsing richting A (mm)	Verplaatsing richting B (mm)	Verplaatsing richting A (mm)	Verplaatsing richting B (mm)
1-8-2023	0.57	-0.085	Nvt	Nvt	0.055	0.305
14-11-2023	0.1	0.45	Nvt	Nvt	0.16	0.09
<b>HMB027</b>	-6.725				-13.22	
8-3-2023	-0.155	0.1	Nvt	Nvt	-0.06	0.08
10-5-2023	-0.055	-1.46	Nvt	Nvt	0.34	-0.97
1-8-2023	-0.205	-1.67	Nvt	Nvt	0.145	-0.84
14-11-2023	-0.96	-1.3	Nvt	Nvt	-0.33	-0.65
<b>Raai06</b>						
<b>HMB032</b>	-7.51				-13.02	
8-3-2023	0.12	0.14	Nvt	Nvt	0.05	0.06
10-5-2023	-1.48	-0.915	Nvt	Nvt	-0.845	-0.155
1-8-2023	-1.97	-0.63	Nvt	Nvt	-1.1	-0.255
14-11-2023	-2.55	0.17	Nvt	Nvt	-1.24	0.02
<b>HMB042</b>	-7.015				-12.88	
8-3-2023	-0.03	0.03	Nvt	Nvt	-0.05	0.01
10-5-2023	-1.985	-0.79	Nvt	Nvt	-1.31	-0.87
1-8-2023	-2.345	-0.66	Nvt	Nvt	-1.56	-0.865
14-11-2023	-2.5	-0.96	Nvt	Nvt	-1.65	-0.88
<b>HMB033 2)</b>	-7.165				-13.23	
8-3-2023	-0.075	0.055	Nvt	Nvt	0.03	0.115
10-5-2023	0.215	0.71	Nvt	Nvt	-0.08	0.82
1-8-2023	0.57	-0.085	Nvt	Nvt	0.055	0.305
14-11-2023	-0.38	-0.18	Nvt	Nvt	-0.5	0.41

- 1) De met HMB009 gemeten vervorming is onbetrouwbaar omdat de hellingmeetbuis onvoldoende diep is geplaatst.
- 2) Horizontale verplaatsing(scheefstand hellingmeetbuis) > 200mm waardoor deze metingen als onvoldoende betrouwbaar worden bestempeld.

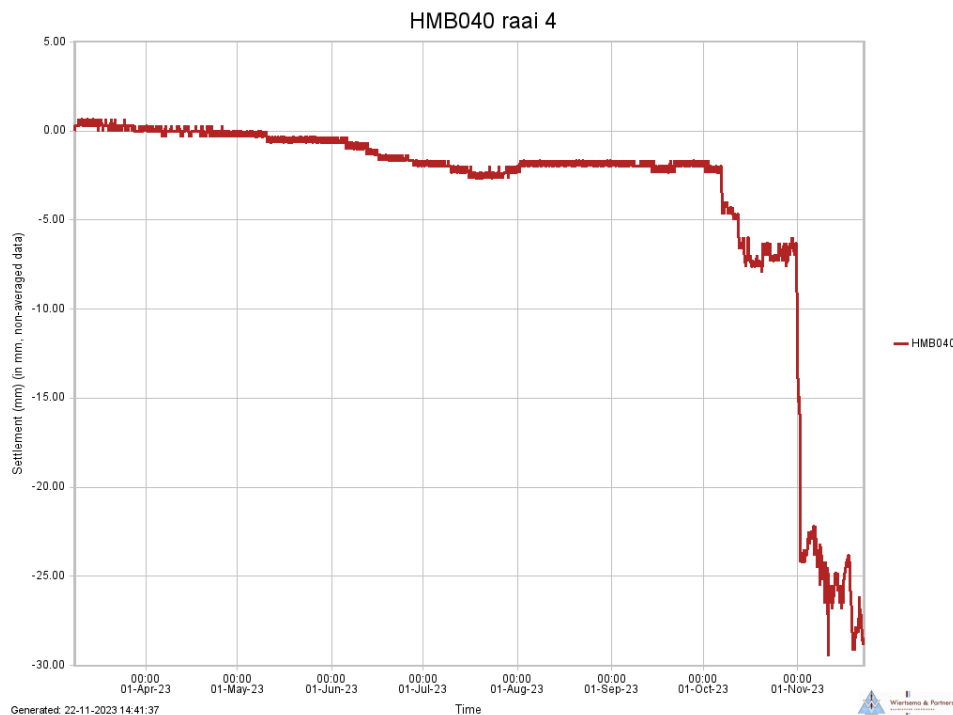
Zoals aangegeven is voor raai 04 de hellingmeetbuis aan rivierzijde ter plaatse van de boorpaal niet geplaatst en vervangen door een verplaatsing meter (HMB040). Voor monitoring van de verplaatsing is gebruik gemaakt van een van verplaatsingsopnemers type 130503-02 (REV.100) van Leiderdorp Instrumenten B.V.

De verplaatsing wordt met een vooraf bepaalde tijdsinterval gemeten. Met een vaste kabel aansluiting is de verplaatsingsopnemer op een Ellitrack-L aangesloten. Hierin worden de

waarden die de verplaatsingsopnemer registreert opgeslagen. Middels de geplaatste verplaatsingsopnemer wordt de horizontale afstand van de deksloof t.o.v. de hellingmeetbuis gedurende circa 8 jaar (vanaf april 2023) met een meetinterval één maal per uur geregistreerd. Figuur 85 toont de horizontale verplaatsing van april 2023 tot november 2023. Het is opmerkelijk dat met tijd de verplaatsing is toegenomen en abrupt toeneemt op 1 november.

Er is geen reden gevonden voor de scheefstand en mogelijk is dit door menselijk handelen veroorzaakt.

Een negatieve waarde correspondeert met een deformatie richting het achterland. Een positieve waarde correspondeert een beweging richting de rivier. Uit de metingen volgt dat de afstand tussen de hellingmeetbuis en deksloof groter wordt richting het achterland.



Figuur 86 Horizontale verplaatsing in mm (HMB040).

## E.4 Conclusies n.a.v. de metingen

### Betrouwbaarheid hellingmeetbuizen door absolute scheefstand

Er zijn enkele hellingmeetbuizen waarvan de scheefstand zodanig is dat deze als minder betrouwbaar worden bestempeld voor de verdere analyse. (zie Tabel 1). Dit betreft:

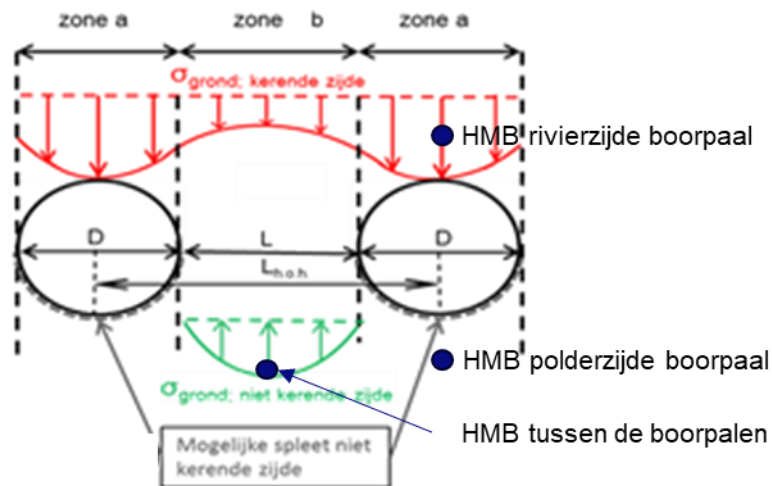
- HMB 033 ter plaatse van raai 6: deze buis staat echter tussen de twee boorpalen waardoor de afwijking waarschijnlijk minder invloed heeft op de metingen.
- HMB026 ter plaatse van raai 5: deze buis staat aan rivierzijde voor de boorpaal waardoor deze als minder betrouwbaar wordt bestempeld voor de verdere analyse.
- HMB021 ter plaatse van raai 4: deze buis staat aan polderzijde van de boorpaal waardoor ook deze als minder betrouwbaar wordt bestempeld voor de verdere analyse.

De verplaatsing meter (HMB040) ter plaatse van raai 4 geeft op twee tijdstippen vrij plotseling grote verplaatsingen, namelijk op 6 oktober en vooral op 1 november. Een verklaring hiervoor is niet beschikbaar. Er wordt echter niet verwacht dat de grondverplaatsing hier plotseling is toegenomen. Dit wordt tevens ondersteund door de metingen van de hellingmeetbuizen in raai 4 die nauwelijks verplaatsing laten zien (zie Tabel 9 en de grafiek van HMB040A met de gemeten verplaatsingen in de diepte).

HMB009 is door een obstakel in de ondergrond tot slechts een diepte van NAP - 14 m geplaatst. Dit is tot circa de bovenzijde van de PL. Omdat de onderkant hierdoor onvoldoende is ingeklemd kan ook de onderkant van de buis vervormen waardoor er geen referentie is. De metingen met deze buis moeten hierdoor als onvoldoende betrouwbaar worden bestempeld.

## Interpretatie metingen

De hypothese is dat door vervorming/kruip van het dijklichaam, die grotendeels wordt tegengehouden door de boorpalenwand, in de toekomst mogelijk een kier/spleet zou kunnen ontstaan aan de polderzijde van de boorpaal (zie Figuur 84).



Figuur 87 Principe bovenaanzicht boorpalenwand met locaties hellingmeetbuizen Toename horizontale grondspanningen bij boorpalenwand.

De hellingmeetbuis aan rivierzijde van de boorpaal meet de horizontale grondverplaatsingen. Ervan uitgaande dat de afstand tussen deze buis en de paal gering is kan worden gesteld dat de paalverplaatsingen worden gemeten. De hellingmeetbuis tussen de boorpalen meet de grondverplaatsing tussen de palen. Als verschilverplaatsing wordt gemeten tussen deze twee buizen (de afstand wordt kleiner) is het aannemelijk dat de grond tussen de palen verplaatst (snijden van de grond) en is mogelijk een kier/spleet ontstaan achter de paal aan polderzijde. Tevens is een hellingmeetbuis aan polderzijde van de boorpaal geplaatst die de grondverplaatsingen meet. Ervan uitgaande dat de afstand tussen deze buis en de paal gering is kan worden gesteld dat de grootte van de kier gelijk is aan de verschilverplaatsing tussen de metingen van de buizen aan rivier- en polderzijde ter plaatse van de boorpaal.

De boorpalenwand is in medio 2018 geplaatst. De nulmetingen zijn uitgevoerd in maart 2023. De laatste metingen zijn uitgevoerd op 14-11-2023. Uit de metingen volgt dat, mede gezien de korte meetperiode, slechts geringe horizontale verplaatsingen zijn gemeten. In de A richting (loodrecht op de boorpalenwand) zijn de verplaatsingen 2 tot 4 mm. In principe worden geen horizontale verplaatsingen in de richting B verwacht (evenwijdig aan de boorpalenwand). Dit is namelijk loodrecht op de vervormingsrichting en de peilbuizen staan bij benadering symmetrisch voor en achter de boorpalen. Hiervan uitgaande kunnen de gemeten waarden in deze richting als meeton nauwkeurigheid worden gezien. Gemeten zijn waarden van 1 tot 2 mm in de B-richting waardoor geconcludeerd wordt dat de te verwachten nauwkeurigheid van de metingen in A-richting eveneens 1 tot 2 mm is. Dit komt overeen met de ervaringen bij het meten van hellingmeetbuizen waarbij de nauwkeurigheid veelal 1 tot 2 mm is bij een lengte van de buis van 20 m.

Uit de metingen van de buizen ter plaatse van de boorpaal volgt dat de verplaatsing in nagenoeg alle gevallen richting de polder is. Behalve voor HMB041. Hier is de vervorming weliswaar richting de rivier, maar dit is echter zeer klein (tot 0,6 mm) en valt binnen de onnauwkeurigheid van de metingen (1 tot 2 mm). Ook volgt dat de verplaatsing aan de rivierzijde groter of gelijk is dan aan de polderzijde. Opmerkelijk is dat de verplaatsing tussen de palen zeer gering (<1,0 mm) is en soms in de richting van de rivier is.

Geconcludeerd wordt dat de gemeten horizontale vervormingen zeer klein zijn. Voor deze meetperiode dient 50% of meer van de meetwaarde te worden gezien als meeton nauwkeurigheid (de meeton nauwkeurigheid is 1 tot 2 mm). Mede gezien de meeton nauwkeurigheid kan op basis van gemeten verschilvervormingen tussen de buizen aan rivier- en polderzijde worden geconcludeerd dat op dit moment (voor meetperiode tussen 08-03-2023 en 14-11-2023) er geen sprake is van vergroting van de kier of spleet langs de boorpalen als er al een kier of spleet zou zijn.

## E.5 Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om de komende jaren te blijven meten en de metingen uitgebreid te analyseren als uit de metingen volgt dat deze significant zijn toegenomen. Aanbevolen wordt om bij een toename van meer dan 5 mm de eventuele invloed daarvan op de conclusies betreffende kiervorming in dit rapport opnieuw te beschouwen.

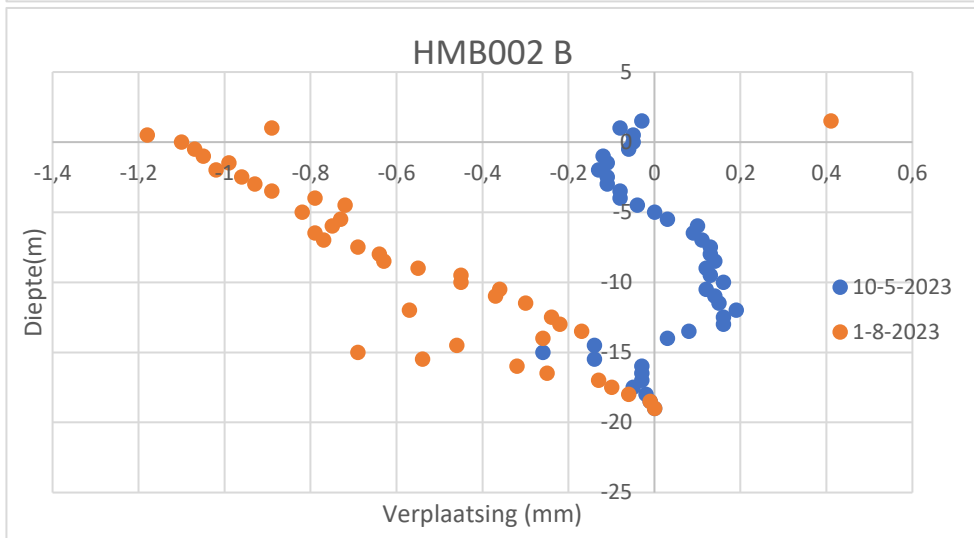
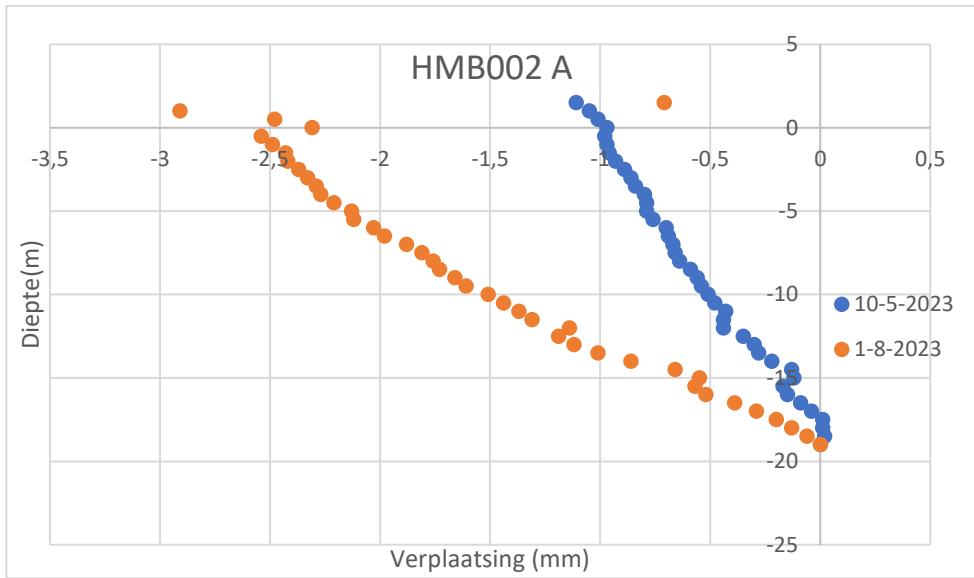
Op basis van de huidige resultaten wordt een volgende meetfrequentie voor de toekomst voorgesteld. Hierbij wordt opgemerkt dat de meetfrequentie mogelijk aanpassing behoeft als de meetresultaten daar aanleiding toe geven:

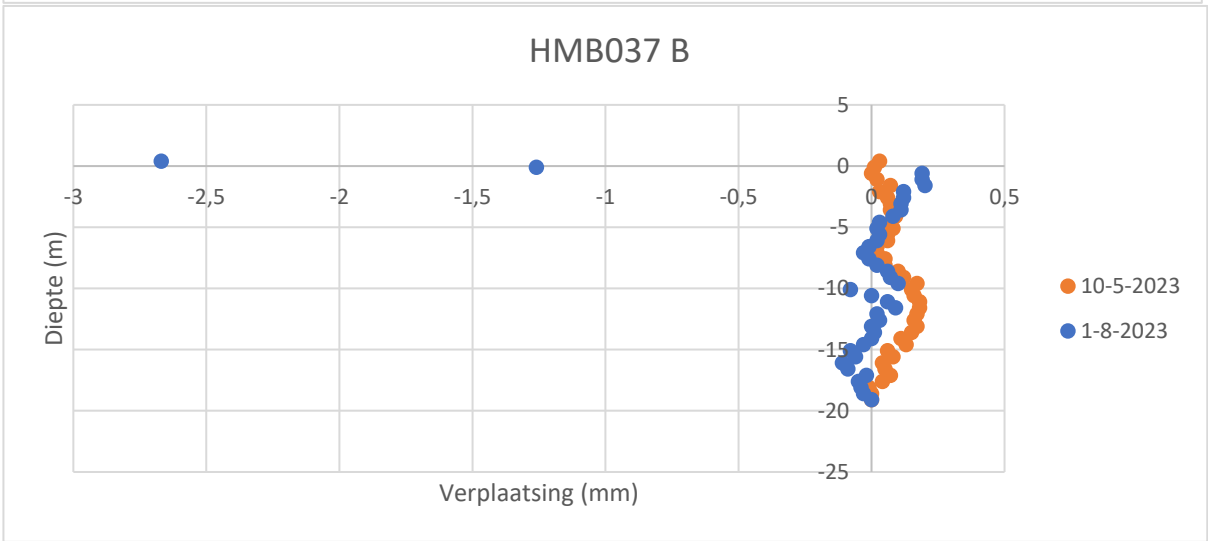
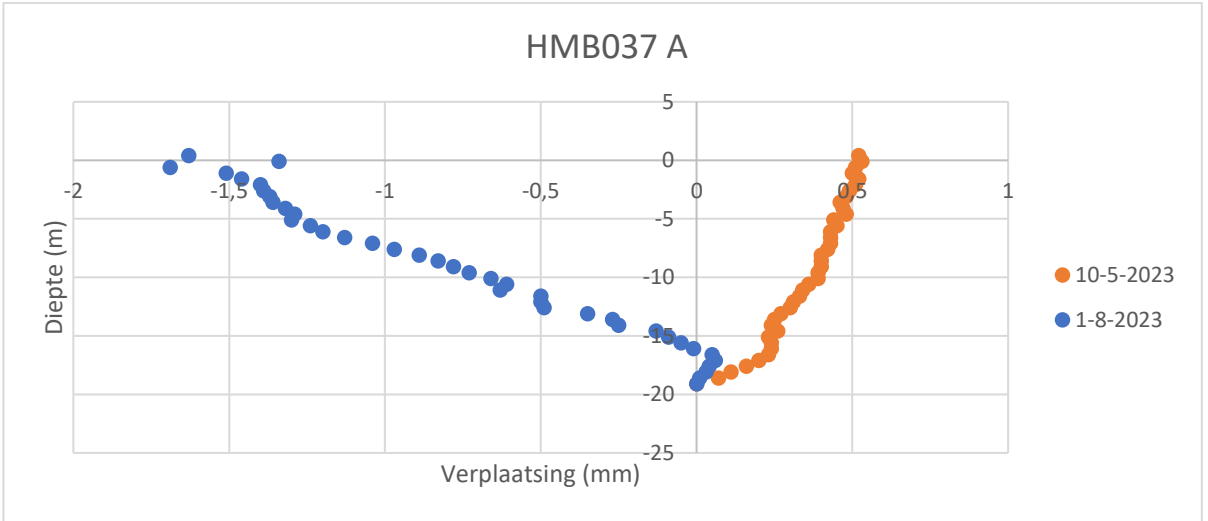
- Voor en tijdens een hoge buitenwaterstand meten (verwachting is dan vooral bij schaaldijken (raai 1 t/m 4) elastische vervorming van het dijklichaam optreedt als gevolg van de waterbelasting tegen het buitentalud. Hoewel deze vervormingen grotendeels worden tegengehouden door de starre boorpalenwand kan deze vervorming significant zijn. Uit de Plaxis berekeningen volgt een elastische horizontale vervorming van circa 20 mm van de binnenteen van de dijk (raai 2), als gevolg van een gemiddeld getij en waarbij de vervormingen ongehinderd worden door de boorpalenwand).
- 2 maal per jaar (in 2024) wordt er gemeten, dit i.v.m. mogelijke seizoensinvloed. De gedachte hierachter is dat in een winterperiode mogelijk andere meetresultaten volgen dan in een (droge) zomerperiode.
- Afhankelijk van de meetresultaten hiervan, zal daarna 1 maal per jaar metingen worden uitgevoerd. Deze jaarlijkse meting zal worden doorgezet voor een periode van 10 jaar.

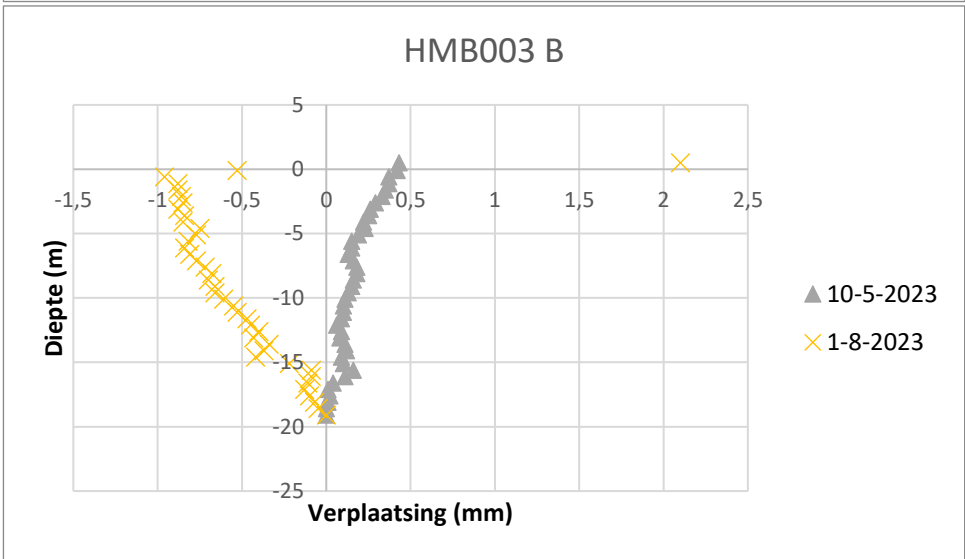
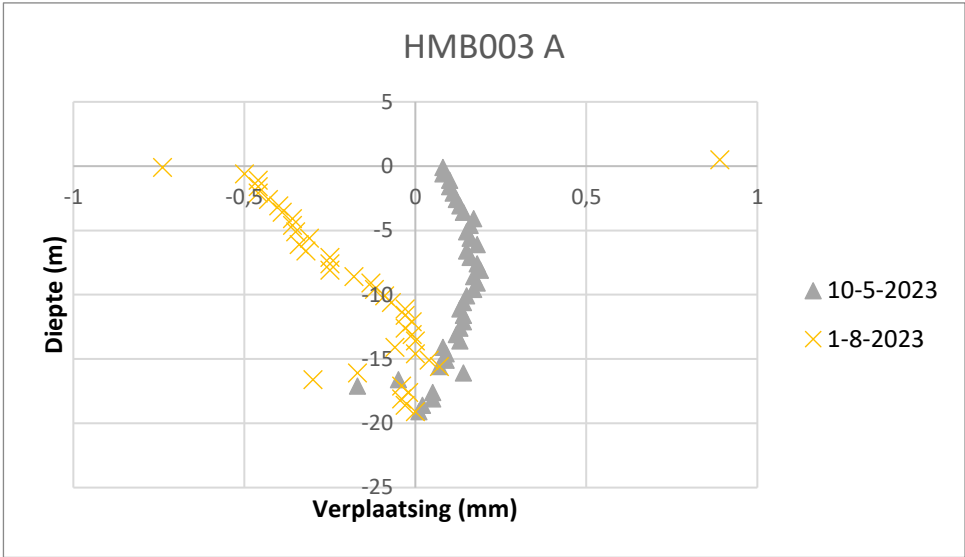
## E.6 Meetresultaten in grafiekvorm

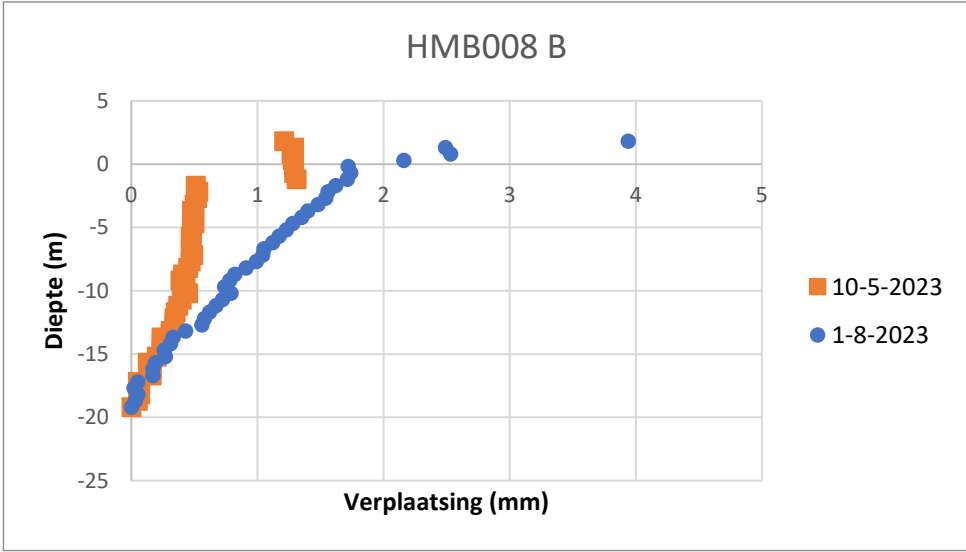
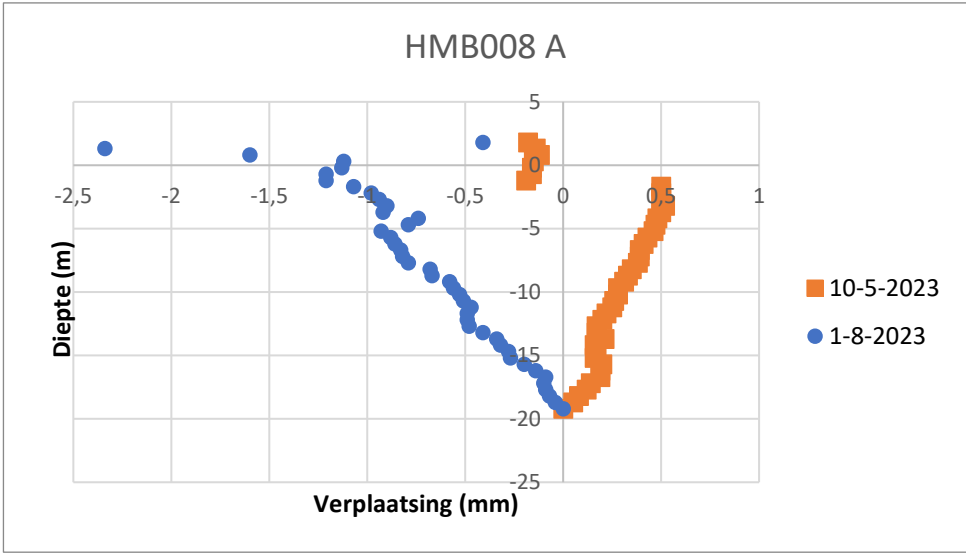
Hieronder zijn de resultaten van alle metingen van de hellingmeetbuizen in grafiekvorm opgenomen. Voor de digitale resultaten wordt verwezen naar het digitaal dossier (zie Bijlage L).

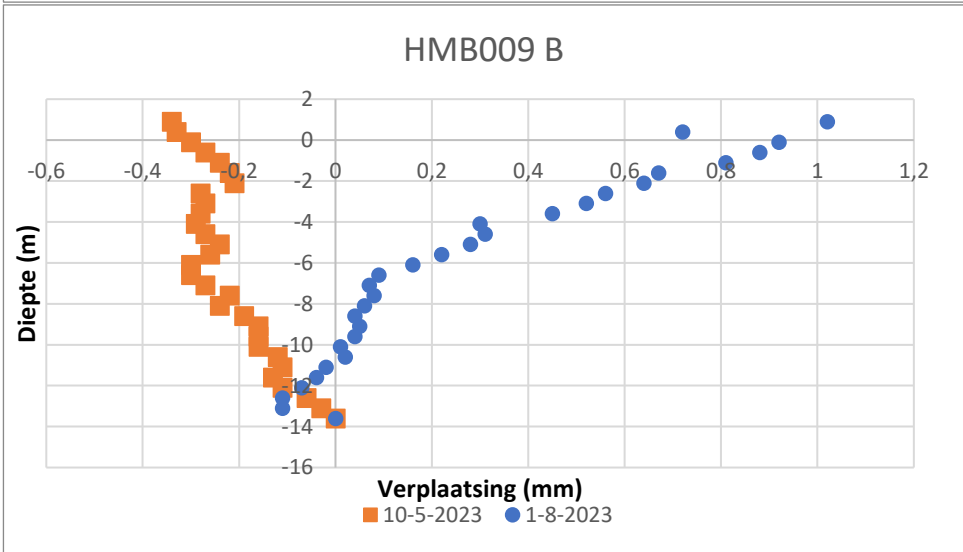
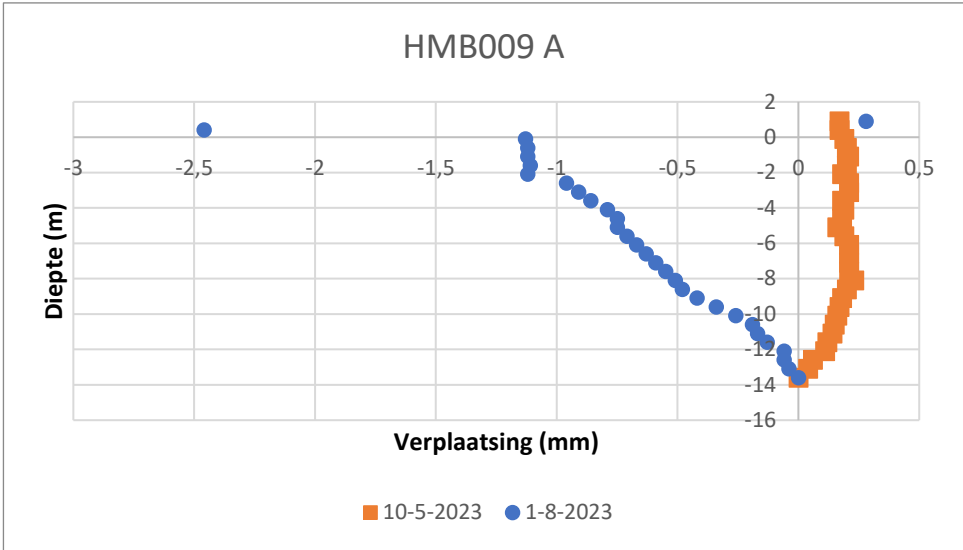


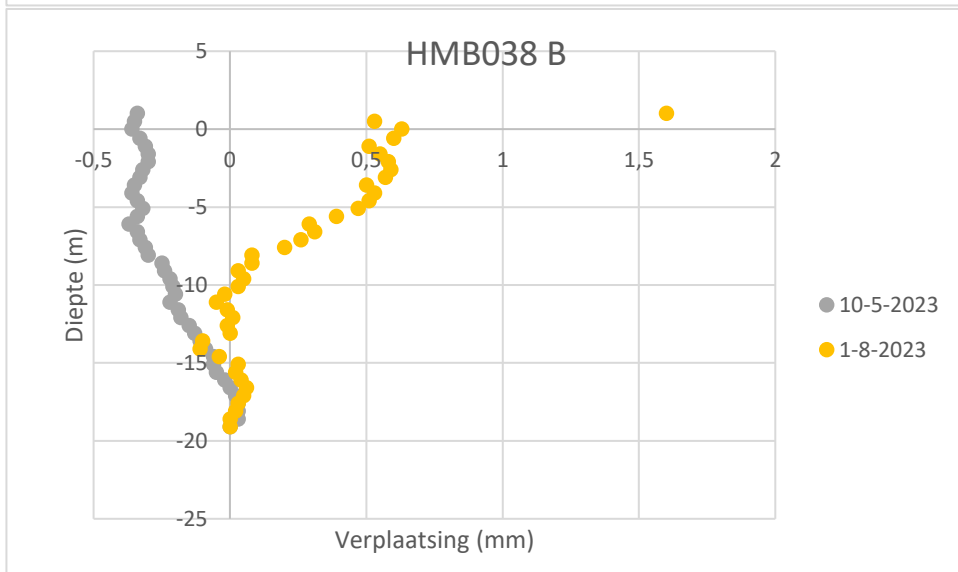
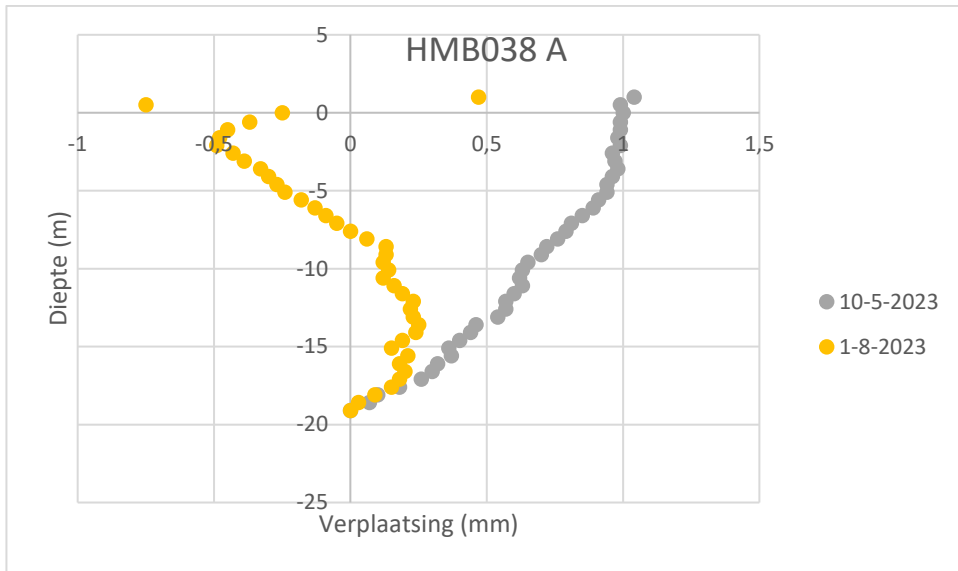




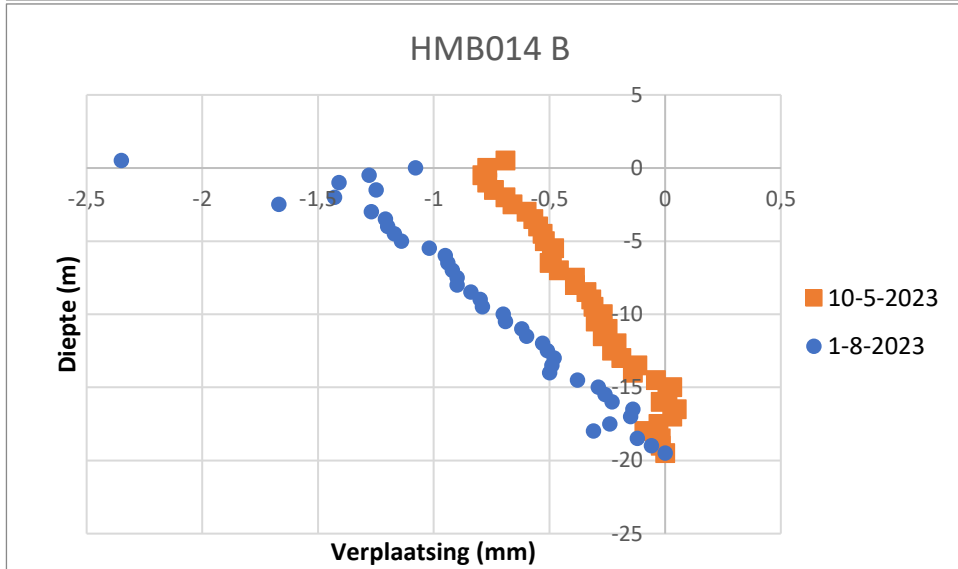
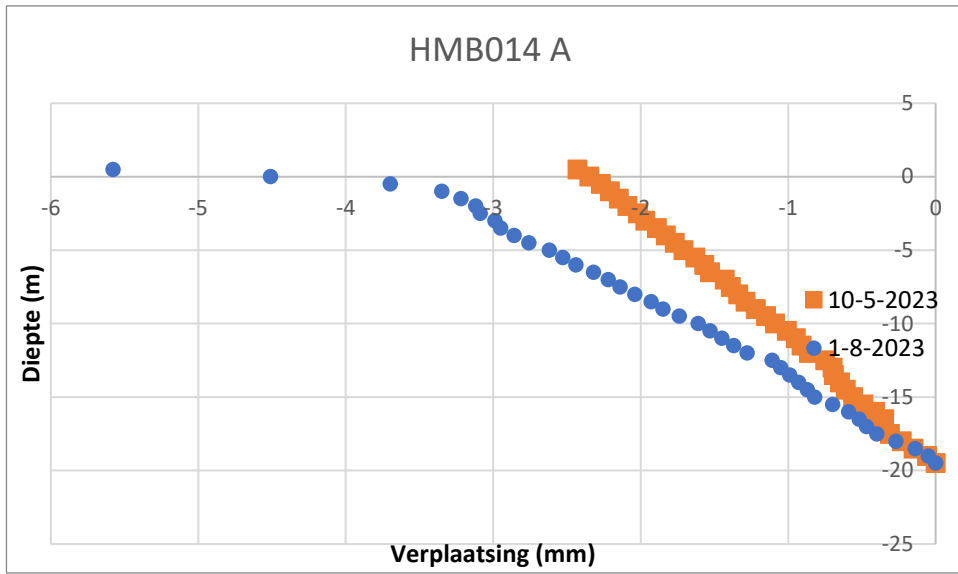


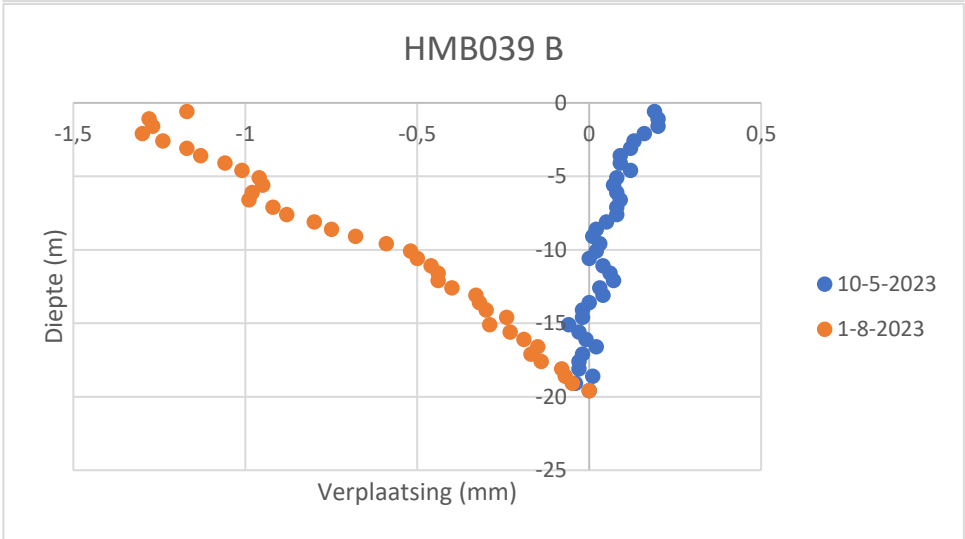
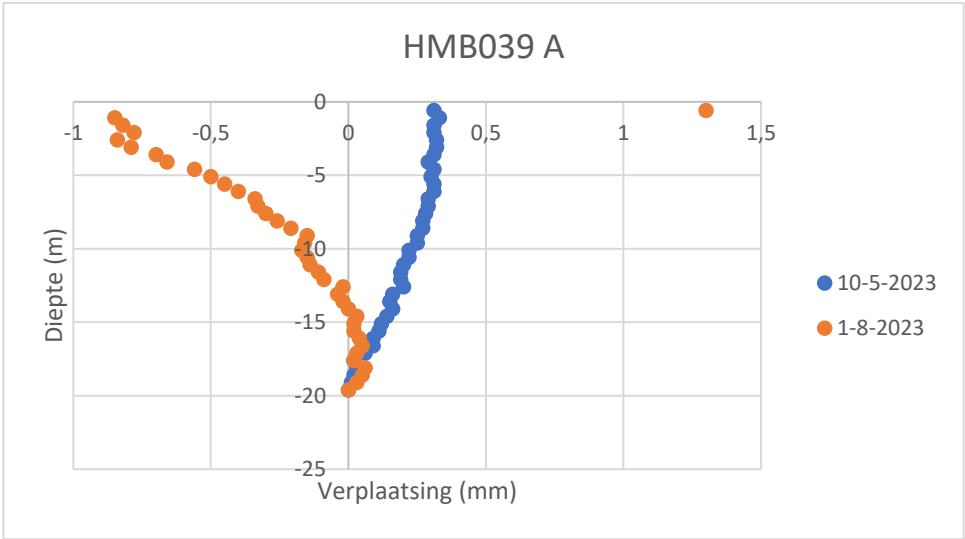


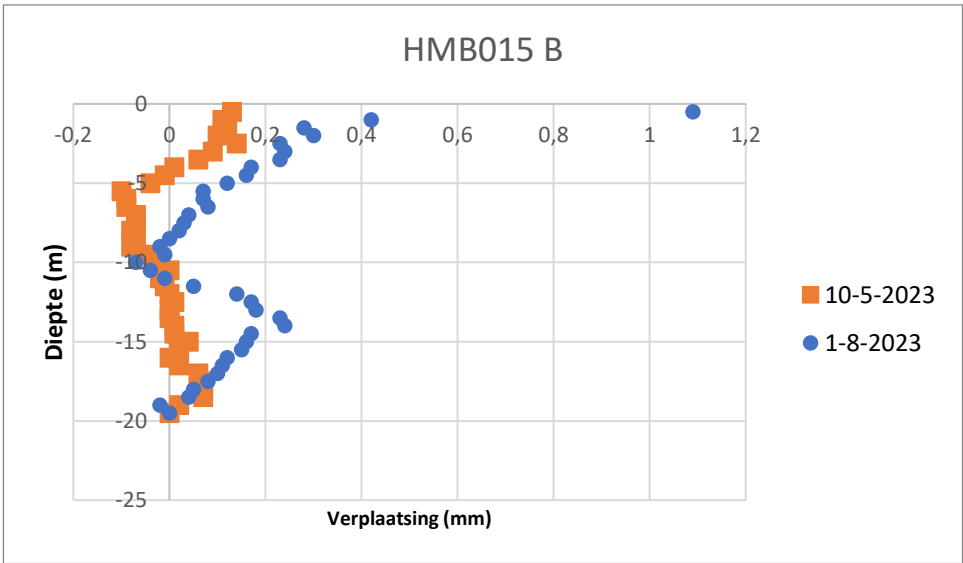
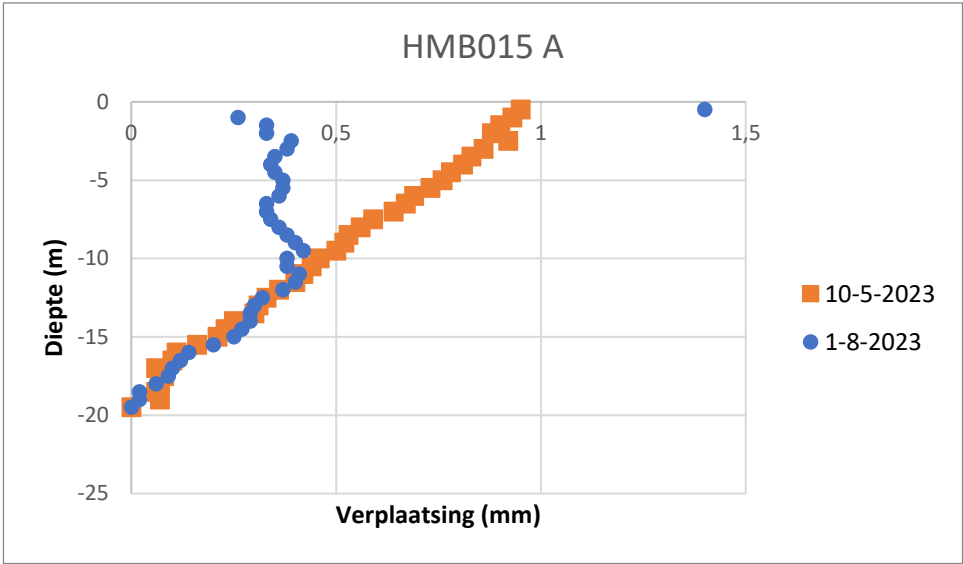


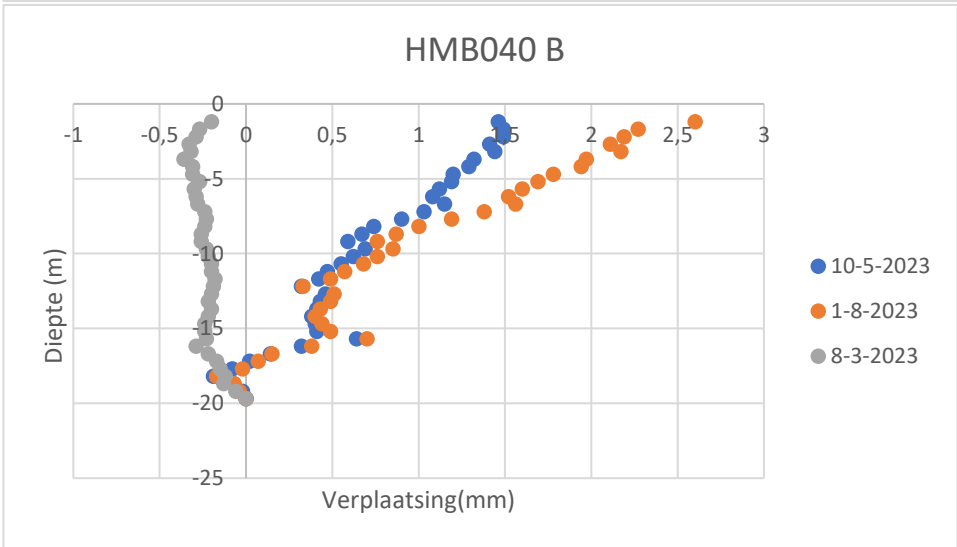
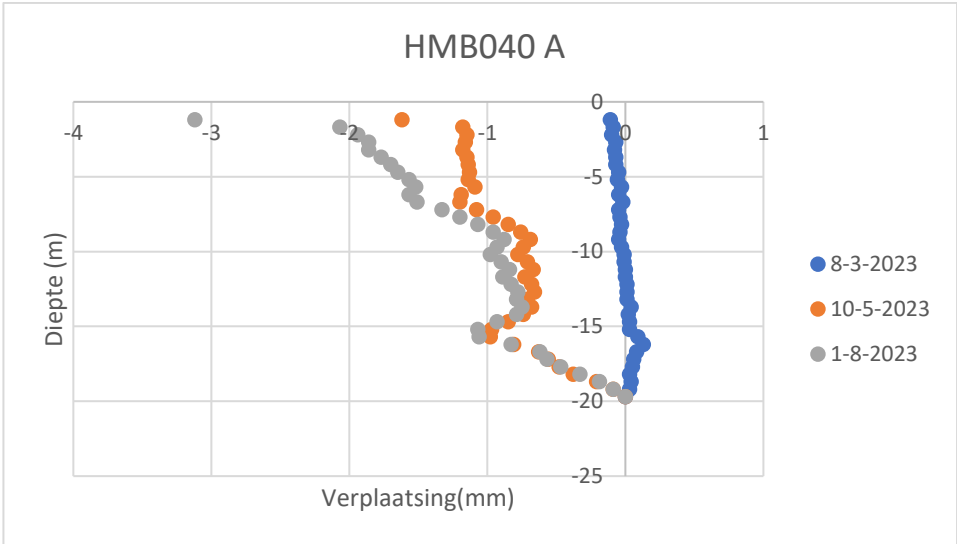


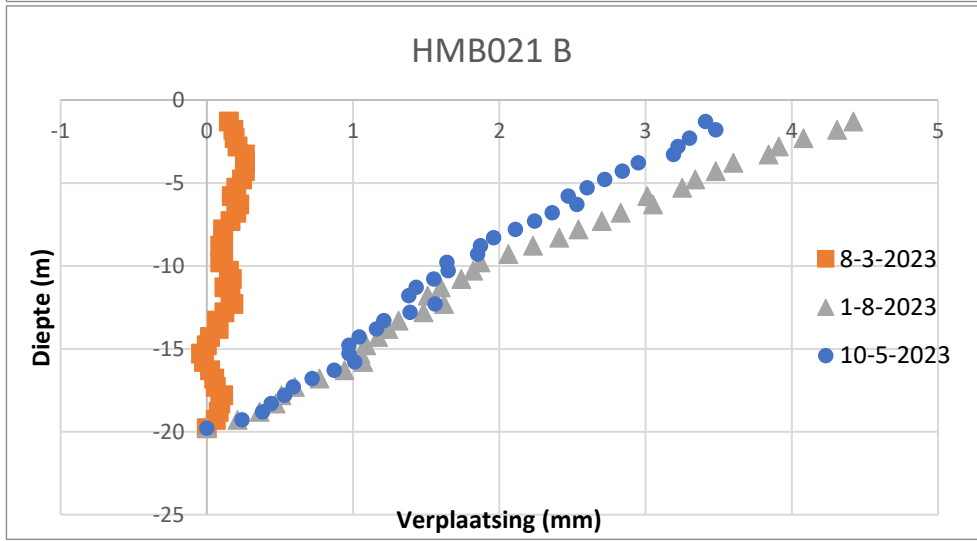
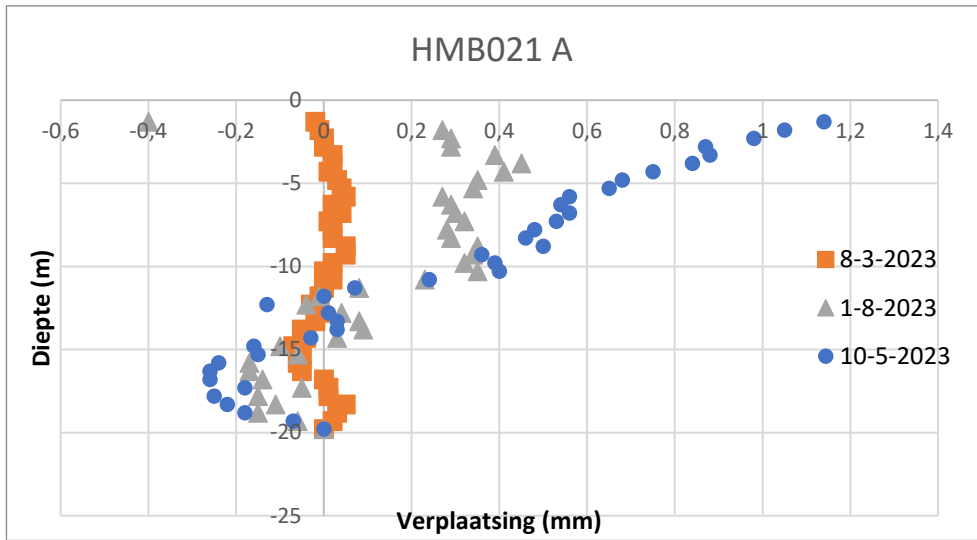


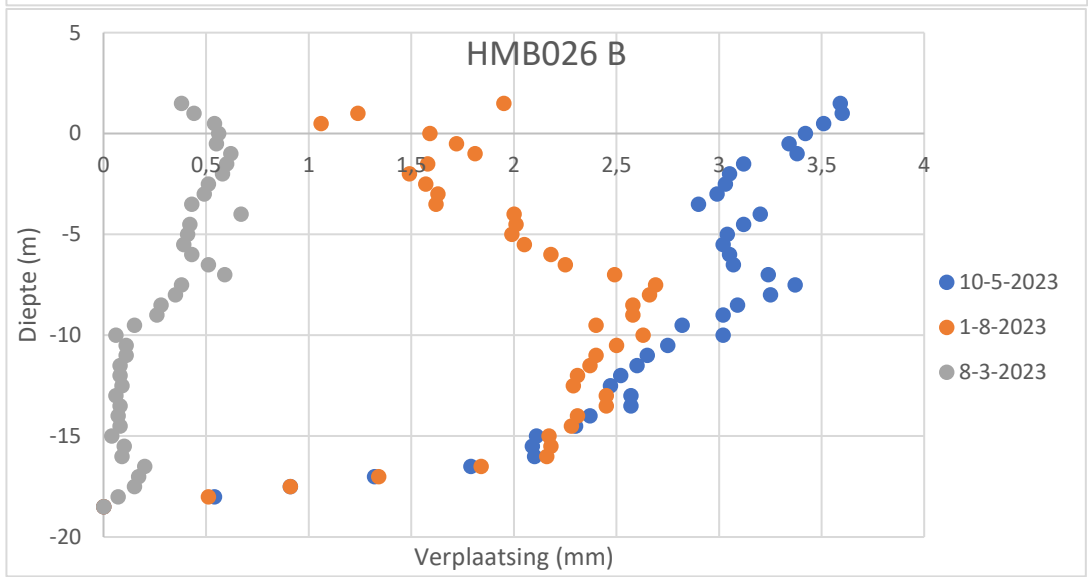
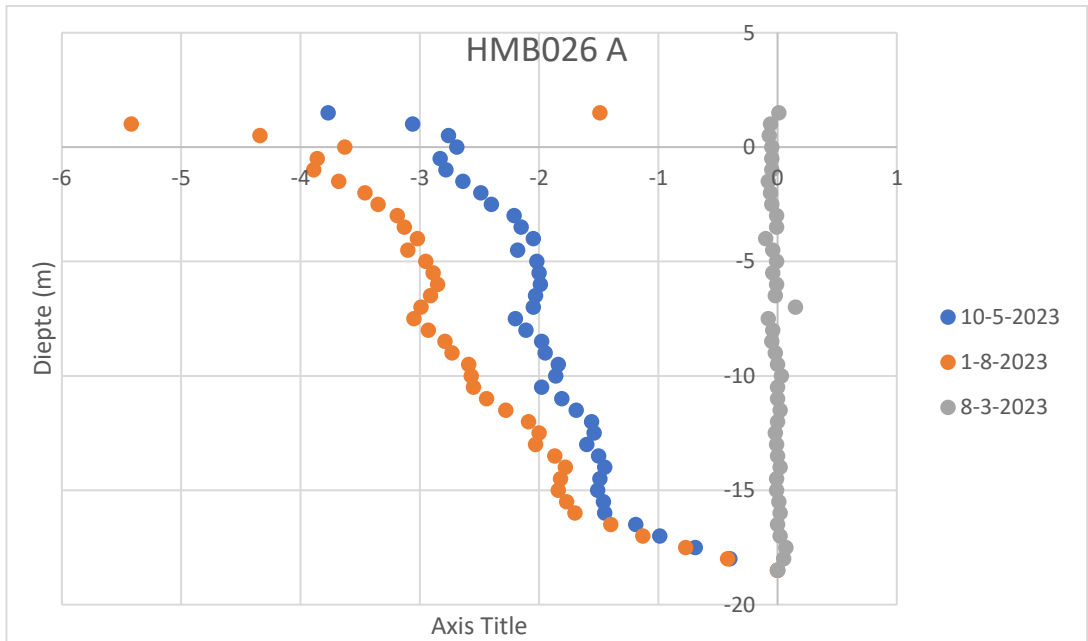




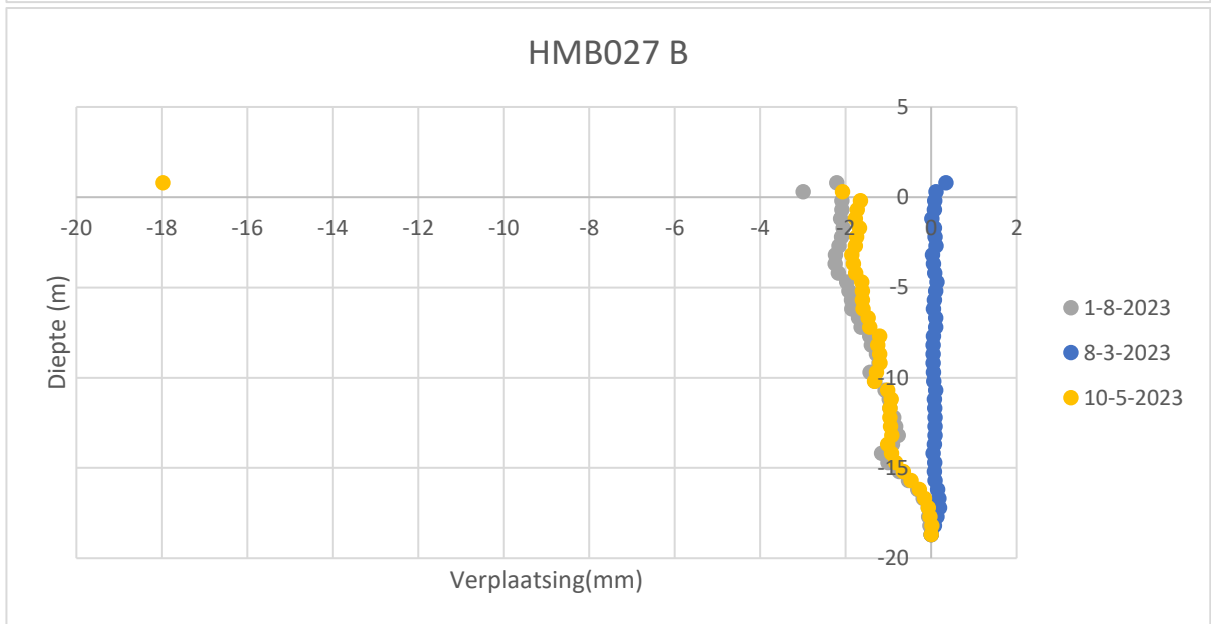
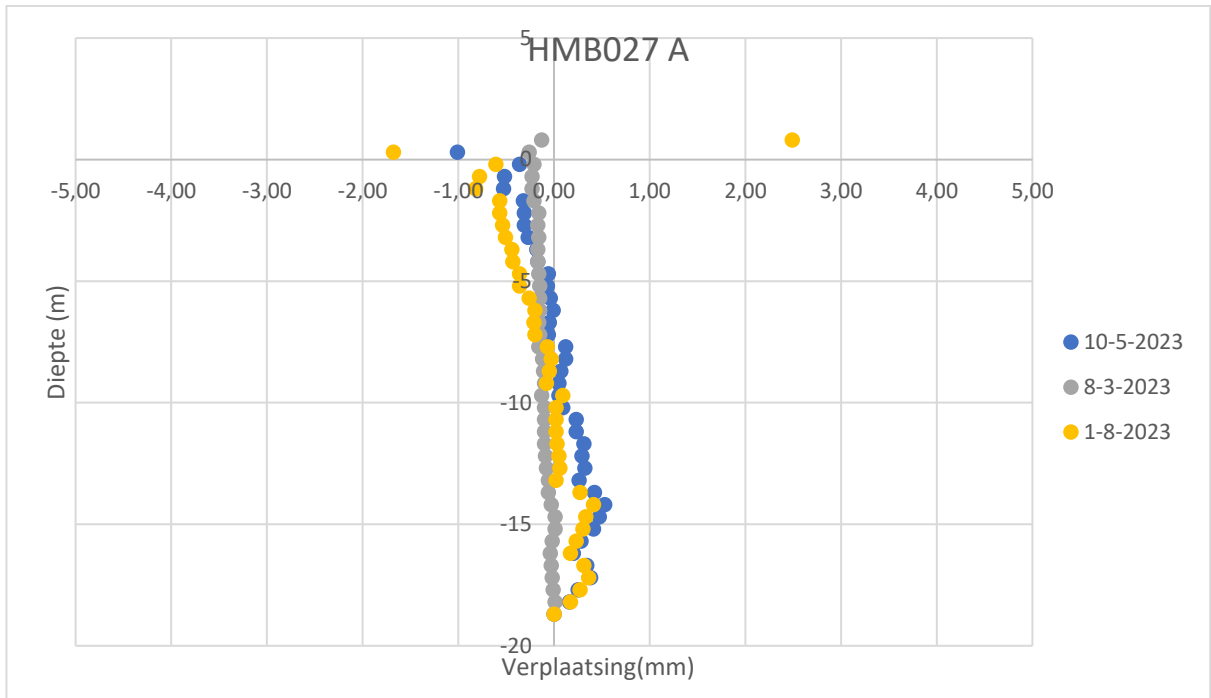




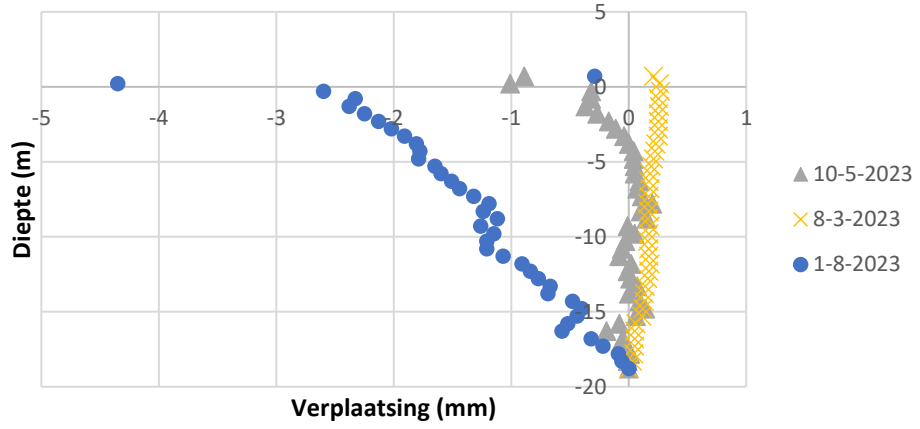




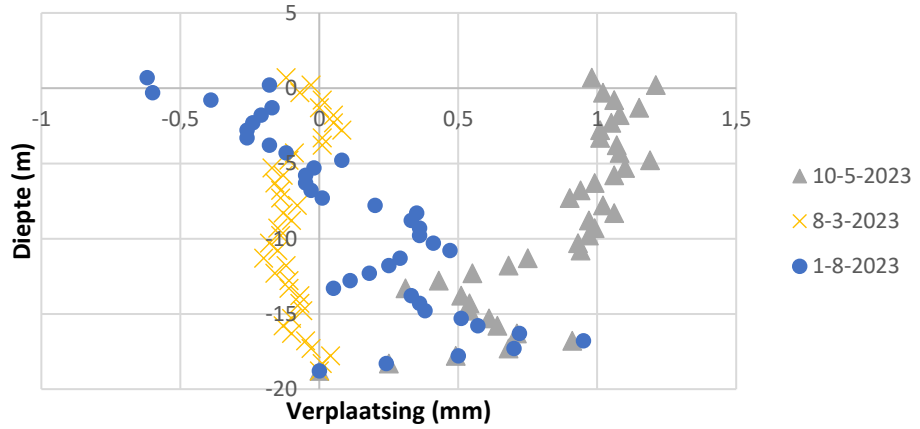




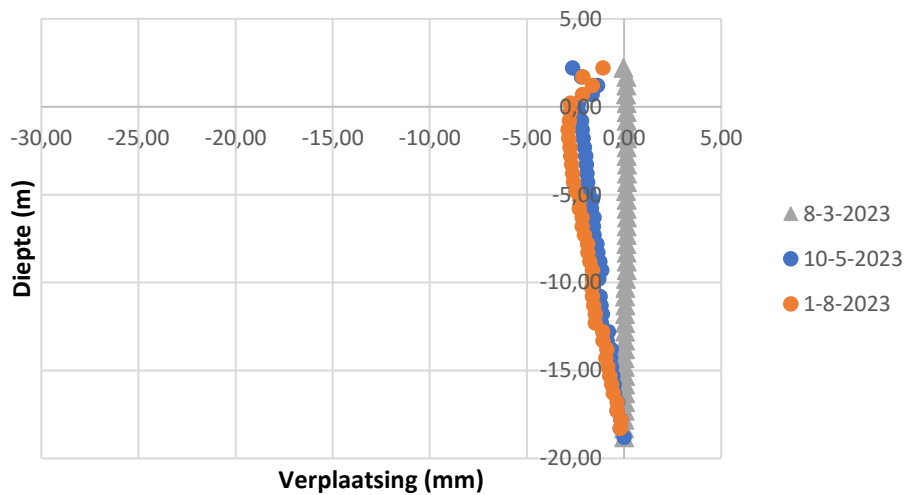
### HMB041 A



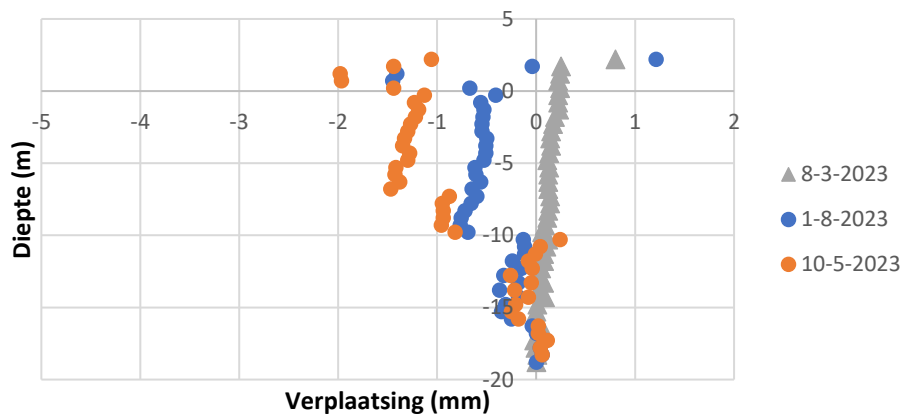
### HMB041 B



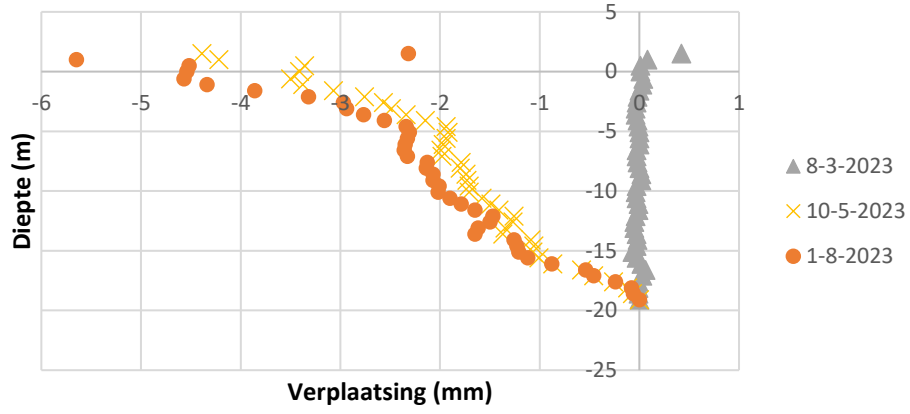
### HMB032 A



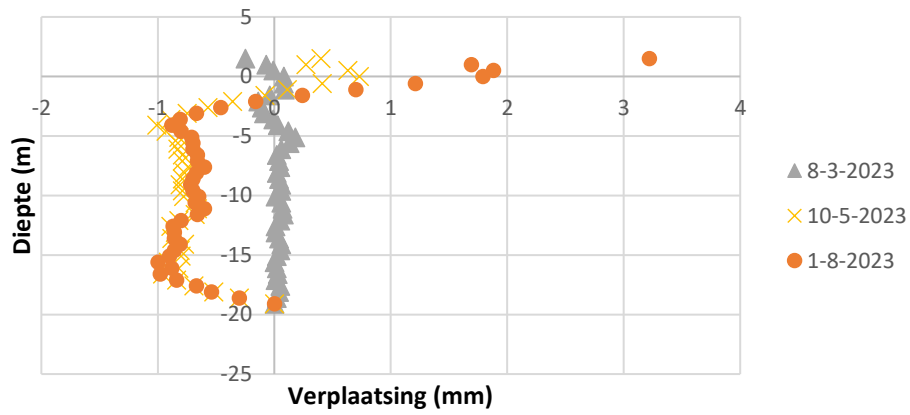
### HMB032 B



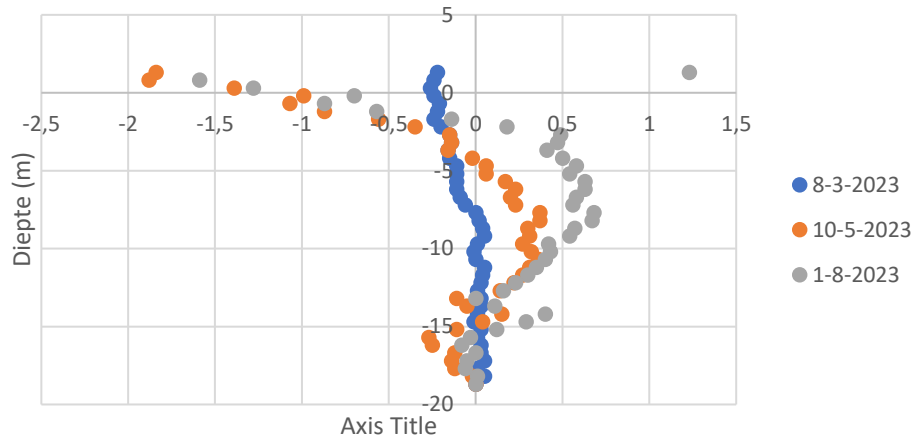
### HMB042 A



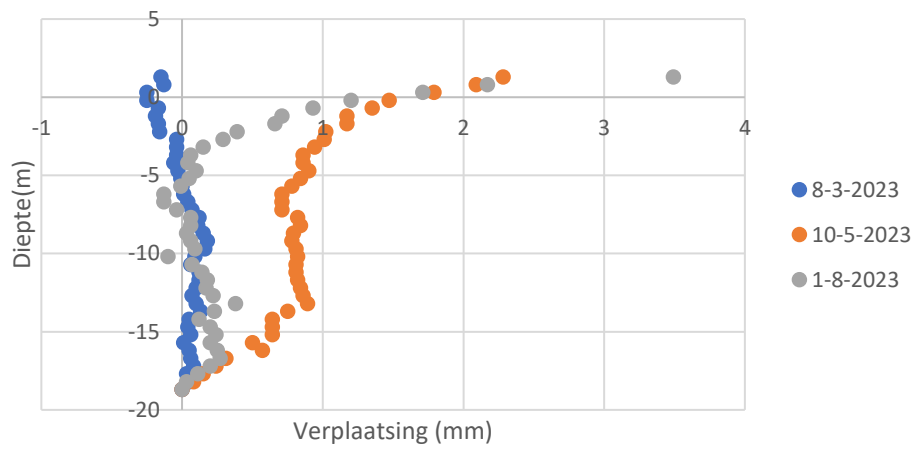
### HMB042 B



### HMB033 A



### HMB033 B



# F Hydrochemisch onderzoek

## F.1 Inleiding

Om een uitspraak te kunnen doen over de oorzaken van vernatting en de effecten op de waterveiligheid van de constructie (de boorpalenwand) wordt een hydrochemisch monitoringplan uitgevoerd. Dit plan richt zich onder andere op het bepalen van de samenstelling van het grondwater en de temperatuur. De monitoring en analyse daarvan richt zich vooral op:

1. De eventuele lekkage langs de boorpalen van de TZ naar maaiveld bij raai 1 t/m 4 of van PL naar maaiveld bij raai 5 en 6 (ter plaatse van raai 5 en 6 ontbreekt de TZ).
2. De eventuele lekkage langs de ankers van de TZ naar maaiveld bij raai 2 t/m 4 of van PL naar maaiveld bij raai 1, 5 en 6 (ter plaatse van raai 5 en 6 ontbreekt de TZ en bij raai 1 ontbreekt de TZ in de buurt van het anker of de TZ is kleilig ontwikkeld).
3. De eventuele hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL ter plaatse van de boorpalen. Dit geldt voor raai 1 t/m 4 (ter plaatse van raai 5 en 6 ontbreekt de TZ).

Door de chemische samenstelling van watermonsters (uit de geplaatste peilbuizen) met elkaar te vergelijken kan de herkomst mogelijk worden vastgesteld (rivierwater, neerslag, water uit de PL of de TZ).

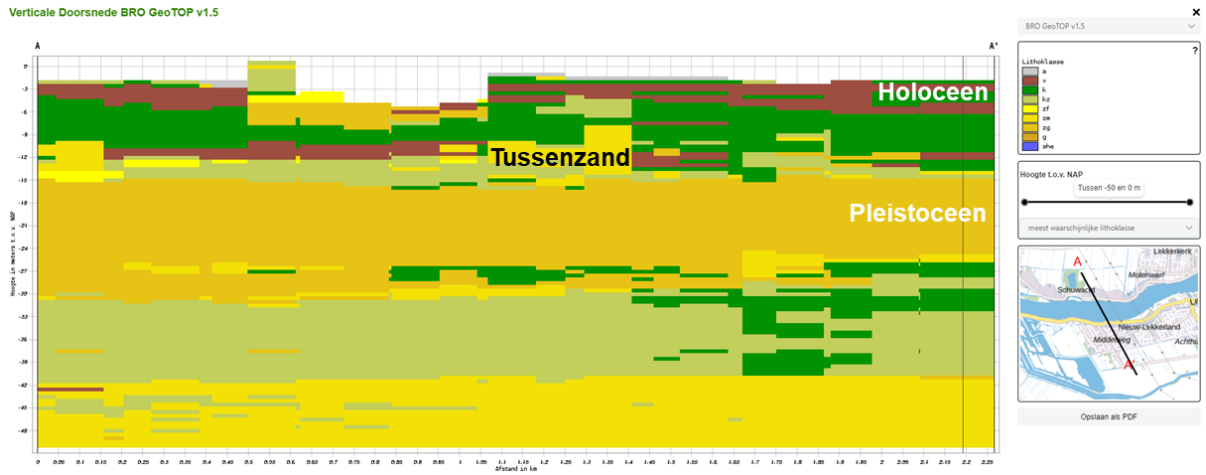
In Bijlage F.2 is eerst een beschrijving gegeven van de hydro-geologische opbouw in het projectgebied. Vervolgens is in Bijlage F.3 de monitoringopzet gegeven waarbij o.a. is aangegeven waar welke watermonsters zijn genomen. In Bijlage F.4 en F.5 zijn de resultaten van het onderzoek weergegeven. In Bijlage F.6 worden tenslotte de conclusies gegeven. Opgemerkt wordt dat conclusies in deze bijlage betreffende een eventuele hydraulische kortsluiting of lekkage alleen de resultaten van dit hydrochemisch onderzoek betreffen en later nog gecombineerd moet worden met de andere gegevens in dit rapport om zo tot voldoende zekere uitspraken te komen. Hiervoor dienen dus de resultaten van het andere monitoringsonderzoek, zoals de peilbuismetingen, hellingmeetbuis metingen en de tijdreeksanalyse nog nader te worden beschouwd om zo tot een totaal uitspraak te komen betreffende hydraulische kortsluiting of lekkage.

Opgemerkt wordt dat een uitspraak over eventuele hydraulische kortsluiting of lekkage alleen op basis van dit onderzoek onvoldoende zekerheid geeft. Hiervoor dienen tevens de resultaten van het andere monitoringsonderzoek, zoals de peilbuismetingen, hellingmeetbuis metingen en de tijdreeksanalyse, te worden beschouwd.

## F.2 Beschrijving Hydro geologische opbouw

De hydro-geologische opbouw in het projectgebied is als volgt (zie ook Figuur 88). De Holocene deklaag bestaat uit slecht doorlatende veen- en kleilagen (Formatie Nieuwkoop en Echteld: hierna Holoceen), bovenop watervoerende TZ (Formatie Echteld). De ondiepe pleistocene afzettingen omvatten het watervoerend zandpakket (Formatie Boxtel en Kreftenheye). In het projectgebied is geen grootschalige directe connectie tussen rijnafzettingen en Pleistocene pakket (mogelijk lokaal wel). Rivierwater levert waarschijnlijk wel een belangrijke grondwateraanvulling.



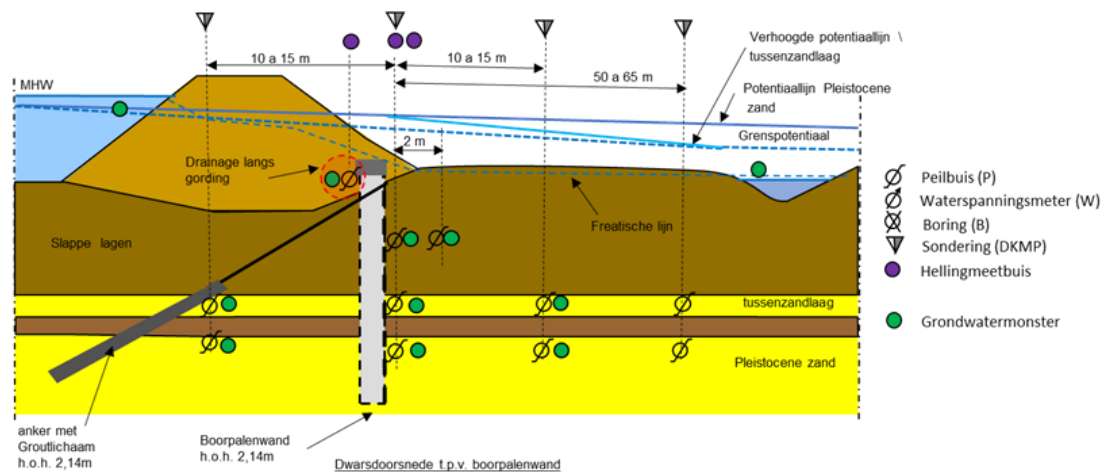


Figuur 88: grondlagenopbouw projectgebied (bron BRO/Dinoloket).

### F.3 Monitoringopzet

In het kader van het huidige fase 3 onderzoek worden de stijghoogten van het grondwater middels peilbuizen gemeten op de locaties die in Bijlage A van dit rapport zijn weergegeven. De watermonsters zijn genomen op 3 locaties (secties F1-1, F2-2 en H2). Daarnaast zijn tevens enkele watermonsters op andere locaties genomen (sectie N en Y). Deze zijn onderdeel van het aanvullende onderzoek naar mogelijke vernatting en kwaliteit van ankers op 6 locaties.

Of op die locaties lekkage langs de palen of ankers optreedt kan mogelijk worden vastgesteld door grondwatermonsters te nemen uit enkele peilbuizen (en de specifieke drainagevoorziening in sectie F1-1), en deze in het laboratorium te laten analyseren op samenstelling. Door de samenstelling van het drainwater te vergelijken met rivierwater en grondwater uit de PL en de TZ, kan de oorsprong van het drainage water mogelijk worden vastgesteld (is het neerslag of grondwater uit het diepe zand of de TZ). In de navolgende schematische doorsnede is aangegeven waar de grondwatermonsters zijn genomen.



Figuur 89: Principe locatie genomen watermonsters (zie groene bolletjes).

In april en mei 2023 zijn de volgende locaties bemonsterd:

- Alle peilbuizen behalve uit de peilbuizen die op 50 tot 60 m afstand in de polder zijn geplaatst.
- Uit de rivier is 1 monster genomen, net als uit de bakwetering (de bakwetering is de binnendijkse sloot op circa 40 m uit de binnenteen van de dijk).
- Uit de drainagevoorziening bij sectie F1-1 (raai 1 en 2) zijn monsters genomen ter plaatse van de 2 afvoeren op de watergang en 2 doorspuitputten. In totaal zijn 4 grondwatermonsters genomen, hierbij wordt opgemerkt dat de daadwerkelijke 4 monsters op iets andere locaties zijn betrokken (zie Figuur 90).
- Raai 3 (locatie F2-2) bij anker nummer 08 zijn monsters genomen. Hier zijn 2 watermonsters genomen van het water dat uit de ankerkop stroomde. Zie ook Deltares (2023-1) 'Feitelijk verslag mogelijk Lekkende anker A08, sectie F2-2 raai 3.

In november 2023 zijn op basis van de concept resultaten nog een aantal locaties bemonsterd. Dit betreft:

- Raai 2 ter hoogte van boorpaal één monster uit de TZ (MB046PB01) en één monster uit de PL (MB046PB02). Een ondiep monster uit de freatisch peilbuis was hier niet mogelijk in verband het droogstaan van deze peilbuis.
- Raai 5 HB057PB01 (langs boorpaal in holoceen raai 5) en MB028PB02 (langs boorpaal in holoceen raai 5).
- Monster uit rivierwater uit de Lek en water uit de Bakwetering (binnendijkse sloot).
- Monster uit de drainage ter plaatse van locatie (sectie) N en L2.

In Figuur 91 is een overzicht van de locaties van de genomen watermonsters weergegeven. Voor het nemen van de grondwatermonsters is het protocol 2002 gehanteerd van SIKB (SIKB 2018), inclusief het wijzigingsblad (SIKB 2019).



*Figuur 90: Specifiek voor sectie F1-1 gemaakte drainagevoorziening (zie groene lijnen) (bron ADCIM 2019, Bijlage 10). Ter plaatse van de rood omcirkelde locaties diende de grondwatermonsters te worden genomen voor laboratoriumbeproeving. De werkelijke monsterlocaties zijn in de figuur rechts weergegeven.*



Figuur 91: Overzicht van de genomen watermonsters in de raaien 1 t/m 6.

## F.4 Resultaten

### F.4.1 Resultaten grondwatermonsters en temperatuurmetingen

Het bepalen van de samenstelling van grondwatermonsters heeft bestaan uit een standaard analyse pakket (bestaande uit bepaling van veldparameters (pH, temp, EC) en in het laboratorium de zogenaamde IC, ICP-OES en ICP-MS (incl. sporenelementen). Voor een nadere omschrijving van de diverse parameters wordt verwezen naar de 6 deelrapporten van SGS Environmental Analytics (SGS 2023-1 (4 deelrapporten) en DGS 2023-2 (2 aanvullende rapporten). Tevens is in het digitale dossier (zie bijlage L) een Excelbestand beschikbaar met de resultaten (zie Analyseresultaten (81722) – rev 4.xlsm).

#### F.4.1.1. Parameters uit laboratorium onderzoek

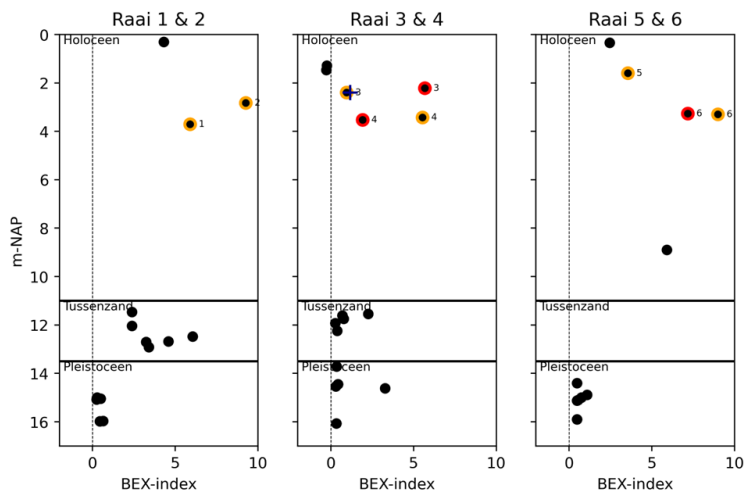
##### Verziltig en verzoeting

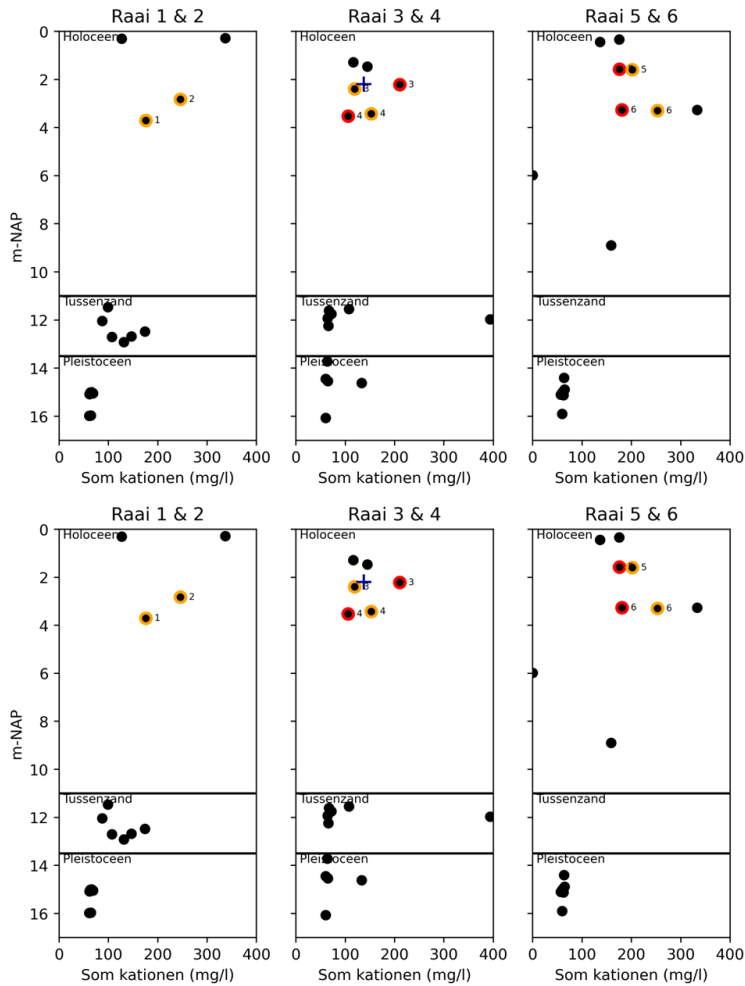
BEX-index (base-exchange index, Stuyfzand, 1993):  $BEX = [Na^+ + K^+ + Mg^{2+}]_{measured} - 1.0716[Cl^-]$  :

- BEX-index is een maat voor uitwisseling tussen marine kationen en Chloride-anion.
- BEX < 0: kationen-tekort t.o.v. zeewater: verziltig.
- BEX > 1: kationen-overschot t.o.v. zeewater, verzoeting.

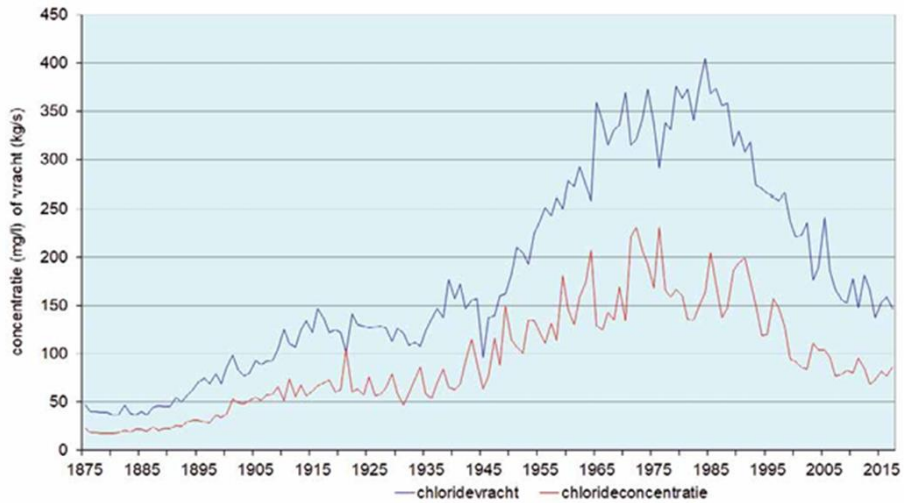
\*\* Kalium is gemeten als  $K_2O$ , gecorrigeerd voor massafractie 0,83.

“De BEX-Index toont hoge gehalten in het ondiepe grondwater. Dit wijst op “verrijking” van ondiep geïnfiltrerd regenwater”.





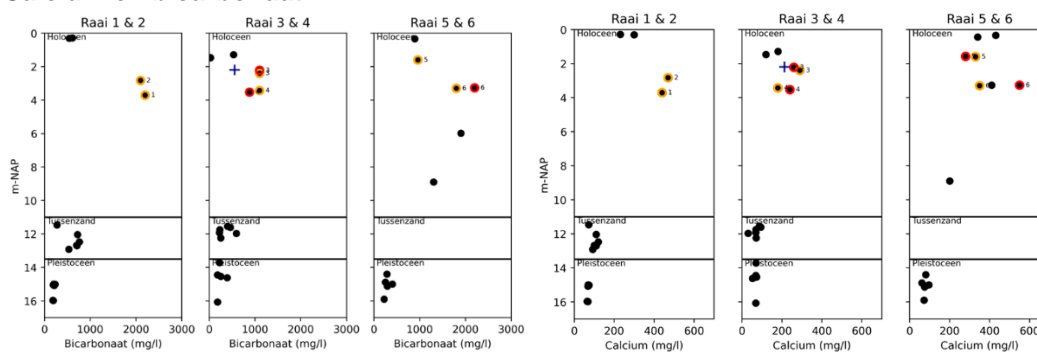
Punten in rood: Direct langs paalwand; punten in oranje: 2 m afstand paalwand; blauwe kruis geeft watermonster dat uit ankerkop stroomde van anker A8 raai 3.



Figuur 92: De gemiddelde chlorideconcentratie (rode lijn) en de gemiddelde chloridevracht (blauwe lijn) bij Lobith per jaar over de periode 1875 – 2017.

- Monsters tonen constante chloride-concentraties in de TZ en de PL, vergelijkbaar met Lek-Rijnwater (zie ook bovenstaande Figuur 90).
- Holocene deklaag heeft meer variabele chloride-concentraties, lokaal licht brak ( $[Cl^-] > 150 \text{ mg/L}$ ).
- De BEX-index duidt op verzoeting van het Holocene pakket (overschot kationen). Het kan ook zijn dat kationen hier een andere oorsprong hebben, bijvoorbeeld antropogeen dijkmateriaal.
- Er is geen goede meting voor de peilbuis direct langs de boorpaal voor raai 5 beschikbaar.
- Wel is een apart monster van water dat langs het anker 08 bij raai 3 opwelt geanalyseerd. Wat betreft BEX-index is dit monster sterk vergelijkbaar met het punt op 2m afstand van de boorpaal. Op basis van zoutconcentraties is er geen evident lek.

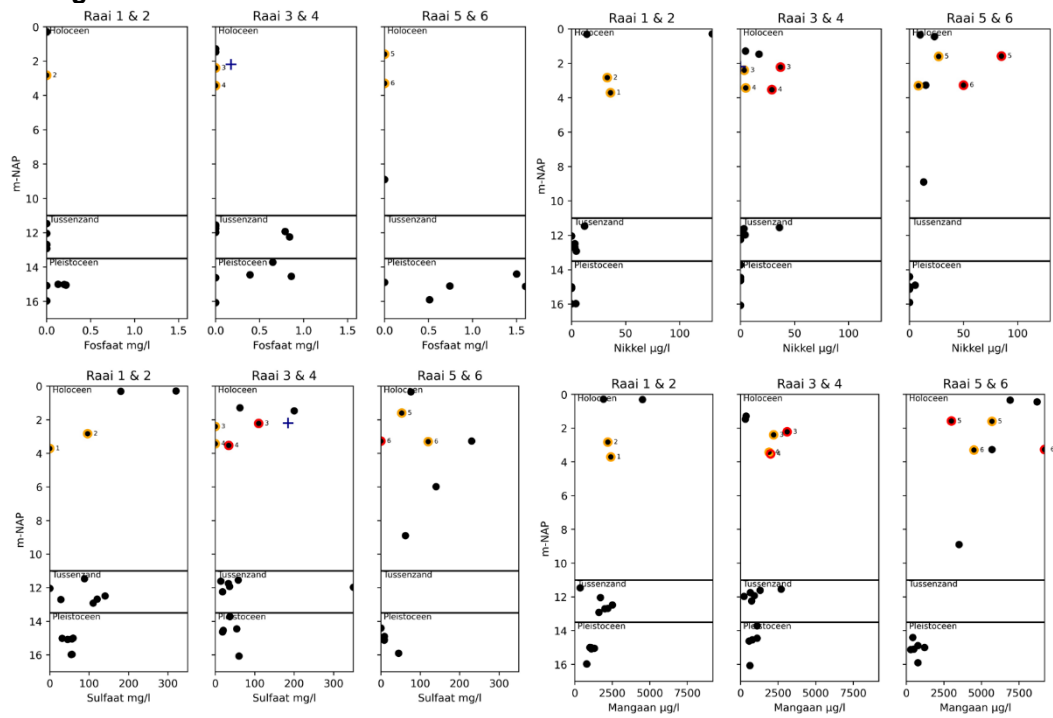
### Calcium en bicarbonaat:



Punten in rood: Direct langs paalwand; punten in oranje: 2m afstand paalwand; blauwe kruis geeft watermonster dat uit ankerkop stroomde van anker A8 raai 3.

- Voor zowel calcium als bicarbonaat geldt dat deze in de ondiepe holocene monsters in hoogste concentraties voorkomen.
- De concentraties lijken in verhouding te zijn. Deze ondiepe concentraties zijn hoger dan die van Lekwater en het diepe grondwater, en zullen waarschijnlijk te maken met de antropogene dijkopbouw.
- De relatief lage bicarbonaat en calcium concentratie van het kwelwater rondom het anker nr. 08 raai 3 zou kunnen duiden op oorsprong uit diepere laag (TZ).

### Overige tracers:



Punten in rood: Direct langs paalwand; punten in oranje: 2m afstand paalwand; blauwe kruis geeft watermonster dat uit ankerkop stroomde van anker A8 raai 3.

- Concentratie zink, nikkel en molybdeen in monster direct lang boorpaal in raai 5 valt op. Deze metalen komen echter niet in hoge concentraties voor in de TZ en de PL.
- Hoge sulfaat concentratie in MB019PB01 (raai 4, 19 m rivierwaarts boorpaal) valt op in de TZ. De ondiepe hogere sulfaatconcentraties zijn waarschijnlijk antropogeen veroorzaakt. Bijvoorbeeld als gevolg van pyrietoxidatie, maar ook door oplossing van andere stoffen van antropogene herkomst (bijvoorbeeld gips). De diepe waarden komen overeen met Lek-Rijnwaarden.
- Fosfaat, levert geen informatie.
- Mangaan kan ondiep in oplossing komen door een hogere zuurgraad en diep als oxidator in redox-processen.

#### F.4.1.2. Correlatie tussen de laboratoriumparameters

In Tabel 19 is de genormaliseerde correlatie van de individuele punten (watermonsters) met de gemiddelden per pakket gegeven. Met pakket wordt hier bedoeld op de gemiddelde van de watermonsters uit Holocene, TZ, PL en het watermonster dat uit ankerkop stroomde van anker A8 in raai 3. Uitgangspunten daarbij zijn:

- Alle metingen (ongeacht raai) zijn gebruikt om per pakket een gemiddeld profiel op te stellen.
- Punt metingen zijn genormaliseerd op basis van gemiddelde en standaarddeviatie:

$$\frac{[conc]_i - [conc]}{\sigma([conc])}$$

- De correlatie-coëfficiënt is berekend per meting per pakket.

Een groene kleur in de tabel geeft aan dat er een positieve correlatie is gevonden tussen het betreffende watermonster en alle monsters in het betreffende pakket (holocene, TZ of PL) en met een rode kleur wordt een negatieve correlatie aangegeven. De intensiteit van de kleur is een maat van de sterkte van de correlatie.



Monsters in Holoceen			
1-HB045PB01-1	0.11	0.28	-0.07
1-HB004PB01-1	0.74	-0.22	-0.63
2-HB010PB01-1	-0.34	-0.16	-0.035
2-HB048PB01-1	0.76	-0.21	-0.7
3-HB050PB01-1	-0.041	0.12	-0.0041
3-HB051PB01-1	0.36	-0.17	-0.37
3-HB016PB01-1	0.4	-0.56	-0.26
4-HB053PB01-1	-0.24	-0.25	0.2
4-HB022PB01-1	0.38	0.16	-0.31
4-HB054PB01-1	0.63	-0.24	-0.48
5-HB056PB01-1	0.55	-0.64	-0.44
5-HB057PB01-1	-0.28	-0.11	0.47
5-HB057PB01-2	0.35	-0.35	0.018
5-MB028PB01-1	0.69	-0.52	-0.51
5-MB025PB01-1	0.31	0.4	-0.41
6-HB059PB01-1	0.78	-0.45	-0.69
6-MB058PB01-1	0.67	-0.011	-0.82
6-MB034PB01-1	0.73	-0.14	-0.81
Monsters in Tussenzand			
1-MB001PB01-1	-0.76	0.19	0.41
1-MB005PB01-1	0.13	0.41	-0.11
1-MB044PB01-1	0.14	0.48	-0.16
2-MB007-APB01	0.11	0.6	-0.27
2-MB011PB01-1	-0.0041	0.77	-0.16
2-MB046PB01-1	-0.012	0.77	-0.14
2-MB046PB01-2	-0.61	-0.12	0.84
3-MB013PB02-1	0.07	0.31	-0.022
3-MB049PB01-1	-0.016	0.35	0.15
3-MB017PB01-1	-0.59	0.17	0.79
4-MB023PB01-1	-0.65	0.022	0.91
4-MB019PB01-1	-0.16	0.55	-0.12
4-MB052PB01-1	-0.59	-0.097	0.88
Monsters in Pleistoceen			
1-MB044PB02-1	-0.61	-0.043	0.73
1-MB005PB02-1	-0.58	-0.082	0.72
1-MB001PB02-1	-0.76	0.08	0.7
2-MB046PB02-1	-0.63	-0.083	0.85
2-MB046PB02-2	0.12	0.46	-0.031
2-MB011PB02-1	-0.32	0.28	0.47
2-MB007-APB02	-0.75	0.41	0.87
3-MB049PB02-1	-0.65	0.037	0.89
3-MB017PB02-1	-0.71	0.063	0.85
4-MB052PB02-1	-0.59	-0.11	0.89
4-MB023PB02-1	-0.39	0.53	0.42
4-MB019PB02-1	-0.71	0.14	0.81
5-MB025PB02-1	-0.65	0.28	0.72
5-MB028PB02-1	-0.78	-0.0034	0.7
5-MB028PB02-2	-0.7	-0.011	0.75
5-MB029PB01-1	-0.72	0.053	0.92
6-MB034PB02-1	-0.5	-0.075	0.86
6-MB031PB01-1	-0.32	0.023	0.57
6-MB035PB01-1	-0.52	-0.02	0.87
Monster in drainage raai 2			
DP01	-0.69	-0.13	0.39
DP02	0.36	-0.22	-0.32
DP03	-0.34	-0.36	0.13
DP04	-0.35	-0.4	0.11
Overige monsters			
Bakwetering	-0.71	0.039	0.37
Lek	-0.7	-0.0048	0.37
anker_monster	-0.36	-0.061	0.3
	Holoceen	Tussenzand	Pleistoceen

Tabel 19: Correlatiecoëfficiënt tussen individuele watermonster en gemiddelde per pakket (eerste getal links geeft raainummer aan, laatste getal geeft meetcampagne aan; 1: april/mei 2023, 2: november 2023).

In Tabel 20 is eveneens de genormaliseerde correlatiecoëfficiënt weergegeven voor de watermonsters in het Holoceen direct langs de boorpaal en op 2 m afstand van de boorpaal op dezelfde hoogte.

Evenals bij Tabel 19 is in Tabel 20 met een groene kleur aangegeven dat er een positieve correlatie is gevonden tussen het betreffende watermonster en alle monsters in het

betreffende pakket (holoceen, TZ of PL). Met een rode kleur wordt een negatieve correlatie aangegeven. De intensiteit van de kleur is een maat van de sterkte van de correlatie.

1-op 2m afstand-1	0.72	-0.24	-0.63
2-op 2m afstand-1	0.75	-0.21	-0.7
3-langs boorpaal-1	0.39	-0.16	-0.34
3-op 2m afstand-1	0.43	-0.54	-0.22
4-langs boorpaal-1	0.63	-0.26	-0.49
4-op 2m afstand-1	0.35	0.14	-0.34
5-langs boorpaal-1	-0.27	-0.1	0.38
5-langs boorpaal-2	0.35	-0.36	-0.014
5-op 2m afstand-1	0.7	-0.5	-0.48
6-langs boorpaal-1	0.77	-0.46	-0.68
6-op 2m afstand-1	0.72	-0.13	-0.79
	Holoceen	Tussenzand	Pleistoceen

Tabel 20: Correlatiecoëfficiënt tussen individuele watermonster in het Holoceen direct langs de boorpaal en op 2m afstand van de boorpaal (eerste getal links geeft raainummer aan, laatste getal geeft meetcampagne aan 1: april/mei 2023, 2: november 2023).

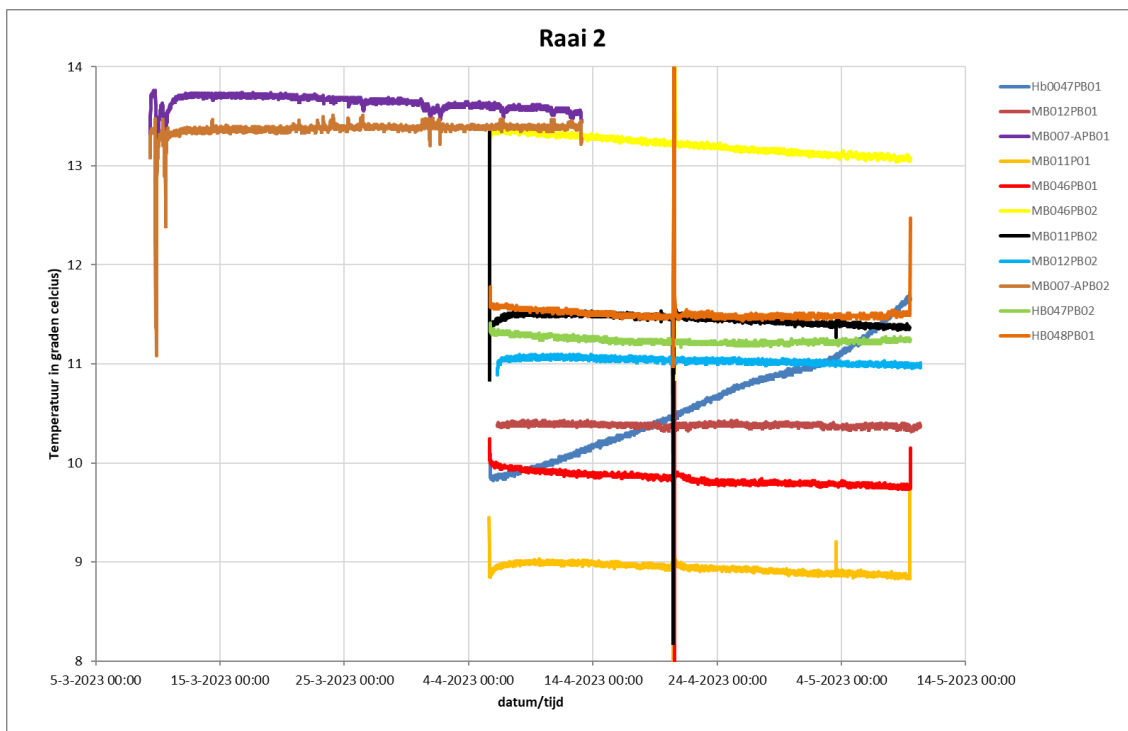
#### F.4.2 Temperatuurmetingen

De temperatuur van het water in de peilbuizen is ook gemeten met de divers (zie Tabel 21). Dit kan samen met de chemische samenstelling van het water extra informatie geven over de herkomst van het water.

De fluctuatie van de watertemperatuur tijdens de meetperiode is over het algemeen gering. Daar waar vanaf begin tot eind relatief grote temperatuurfluctuaties zijn gemeten is dit aangegeven. Soms zijn de metingen in een diver vrij constant en wijkt de temperatuur van begin tot eind slechts 0,2 graden Celsius af. Voor raai 2 zijn alle metingen in de tijd uitgezet (zie Figuur 93). De temperatuur is dus op een vaste hoogte (de afhanghoogte van de diver) gemeten.

Tabel 21: Temperatuurmetingen met divers in de peilbuizen.

Onderzoekspunt	mv hoogte [NA]	raai	Filterdiepte - NAP	diver-diepte t.o.v. NAP	temperatuur [Celcius]	meet periode	Bijzonderheden
HB045PB01	1,53	1	0,28 - 0,58	-0,5	11,3	5-04/9-05	peilbuis staat droog
HB043PB01	2,18	1	0,93+ - 0,03+	NA			
MB006PB01	-1,49	1	10,86 - 11,86	-14,8	9,8	6-04/11-05	
MB001PB01	3,65	1	11,46 - 12,46	-5,3	13,1	9-03/9-05	
MB005PB01	-1,21	1	12,04 - 13,04	-4,8	11,7	5-04/9-05	
MB044PB01	1,47	1	12,70 - 13,40	-3,6	10,4	5-04/9-05	
MB044PB02	1,43	1	15,00 - 16,00	-5	13,7	5-04/9-05	
MB005PB02	-1,23	1	15,04 - 16,04	-15,1	9,8	5-04/9-05	
MB006PB02	-1,52	1	15,86 - 16,86	-14,8	11,4	6-04/11-05	
MB001PB02	3,63	1	15,96 - 16,96	-5,8	10,9	9-03/9-05	
HB045PB02	1,48	1	3,68 - 4,68	-2,8	11,6	5-04/9-05	
HB004PB01	1,06	1	3,71 - 4,71	-3,3	10,2	5-04/9-05	
MB009PB01	1,4	2	0,28 - 0,78	NA			
HB010PB01	1,9	2	0,30 - 1,30	NA			
HB047PB01	1,19	2	0,37 - 0,77	-0,7	10 tot 11,6	5-04/9-05	
MB012PB01	-0,41	2	11,97 - 12,97	-5	10,4	6-04/10-05	
MB007-APB01	3,65	2	12,48 - 13,48	-3,8	12,5 tot 13,5	9-03/10-05	
MB011PB01	-1,16	2	12,68 - 13,48	-5,9	8,8	5-04/9-05	
MB046PB01	0,87	2	12,91 - 13,41	-3,6	10	5-04/9-05	
MB046PB02	0,86	2	15,01 - 16,01	-4,5	13,1	5-04/9-05	
MB011PB02	-1,17	2	15,08 - 16,08	-6,6	11,4	5-04/9-05	
MB012PB02	-0,44	2	15,97 - 16,97	-5	11	6-04/10-05	
MB007-APB02	3,62	2	15,98 - 16,98	-6,2	12,5 tot 13,5	9-03/10-05	
HB047PB02	1,18	2	2,77 - 3,77	-2,8	11,3	5-04/9-05	
HB048PB01	0,42	2	2,83 - 3,83	-3,1	11,5	5-04/9-05	
HB114PB01	1,3	3	0,26 - 0,46	NA			
MB014PB01	0,99	3	0,87 - 1,87	NA			
MB015PB01	-0,06	3	1,40 - 2,40	NA			
HB050PB01	0,56	3	1,46 - 2,46	NA			
MB013PB01	3,86	3	1,76+ - 0,76+	0,8	11,9	7-03/8-05	
MB013PB02	3,84	3	11,54 - 12,54	-4,4	14	7-03/8-05	
MB049PB01	-0,36	3	11,61 - 12,61	NA			
MB017PB01	-1,2	3	11,74 - 12,44	-5,4	10,7	5-04/9-05	
MB018PB01	-1,48	3	12,19 - 12,59	-6,5	11,9	5-04/9-05	
MB049PB02	-0,41	3	13,71 - 14,71	NA			
MB017PB02	-1,22	3	14,44 - 15,44	-4,4	geen temp gemeten	5-04/9-05	peilbuis staat droog
MB018PB02	-1,5	3	14,89 - 15,89	-4,4	8,4	5-04/9-05	
MB013PB03	3,82	3	15,94 - 16,94	-5,3	13,4	7-03/8-05	
HB051PB01	-0,12	3	2,22 - 2,72	NA	0		
HB050PB02	0,52	3	2,29 - 3,29	NA	0		
HB016PB01	-0,73	3	2,40 - 3,40	NA	0		
HB114PB02	1,26	3	2,86 - 3,86	NA	0		
HB053PB01	-0,22	4	1,28 - 1,88	NA	0		
MB023PB01	-1,566	4	11,92 - 12,42	-5,9	8,8	7-03/8-05	
MB019PB01	3,72	4	11,97 - 12,97	-4,8	12,3	7-03/8-05	
MB052PB01	-0,75	4	12,24 - 12,94	-4,6	12,4	7-03/8-05	
MB024PB01	-1,75	4	12,39 - 12,89	NA	0		
MB052PB02	-0,77	4	14,54 - 15,54	-6,1	12,8	7-03/8-05	
MB023PB02	-1,6	4	14,62 - 15,62	-7,5	9	7-03/8-05	
MB024PB02	-1,79	4	15,19 - 16,19	NA	0		
MB019PB02	3,71	4	16,07 - 17,07	-5,2	13,4	7-03/8-05	
HB053PB02	-0,23	4	2,08 - 2,58	NA			
HB022PB01	-0,85	4	3,43 - 4,43	-4,3	11,8	7-03/8-05	
HB054PB01	-0,69	4	3,53 - 4,53	-3,4	10,5	7-03/8-05	
MB040PB01	0	4	0	-2,2	8,1 tot 10,4	7-03/8-05	
HB056PB01	2	5	0,34 - 1,34	-1,2	11,2	6-03/8-05	
HB055-APB01	1,39	5	1,39 - 2,39	-2	10	6-03/8-05	
HB057PB01	1,4	5	1,58 - 2,58	-1,4	11,2	6-03/8-05	
MB028PB01	1,07	5	1,60 - 2,60	-2,3	11,5	6-03/8-05	
MB030PB01	-0,23	5	13,94 - 14,94	-4,4	10,4	5-04/10-05	
MB025PB02	3,45	5	14,89 - 15,89	-1,6	11,5	7-03/8-05	
MB028PB02	1,04	5	15,10 - 16,10	-1,8	11,2	6-03/8-05	
MB029PB01	-0,689	5	15,90 - 16,90	-3,2	11	7-03/8-05	
MB030PB02	-0,23	5	16,44 - 17,44	-4,3	8,5	5-04/10-05	
MB055PB01	1,39	5	5,98 - 6,98	-2,2	10	6-03/8-05	
MB025PB01	3,509	5	8,89 - 9,89	-1	11,5 tot 10,6	7-03/8-05	
HB060PB01	2,844	6	0,44 - 1,44	NA			
MB036PB01	-1,216	6	13,68 - 14,68	-4,9	10,6	5-04/10-05	
MB034PB02	1,954	6	14,40 - 15,40	-3,2	10,5	7-03/8-05	
MB031PB01	5,59	6	15,00 - 16,00	-3,4	12,6	7-03/8-05	
MB035PB01	-0,19	6	15,12 - 16,12	-3,2	10,6	7-03/8-05	
MB036PB02	-1,267	6	16,18 - 17,18	-4,9	11,4	5-04/10-05	
HB059PB01	2,162	6	3,27 - 4,27	NA			
MB058PB01	2,186	6	3,27 - 4,27	-2,3	9,5	8-03/8-05	
MB034PB01	1,967	6	3,30 - 4,30	-2,9	12,1	7-03/8-05	



Figuur 93: Temperatuurmetingen in de peilbuizen van raai 2 met divers.

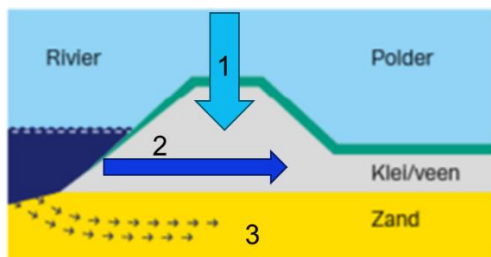
#### Bevindingen:

- Gesteld kan worden dat de temperatuur van het grondwater ter plaatse wordt beïnvloed door de temperatuur van het infiltrerende Lek water (4-24 graden Celsius), verticale warmtestroming van grote diepte en de invloed van de atmosfeer.
- De gemiddelde temperatuur in juli is uitgezet tegen de diepte van de diver (zie Figuur 94). De temperatuur op de locatie van de diver wordt beïnvloed door zowel de temperatuur van het water dat in contact staat met het watervoerende pakket, als door de directe omgevingstemperatuur. Dit laatste wordt ook beïnvloedt door grondwaterstroming, als ook type bodembedekking en de geleidbaarheid van het bodem zelf.
- De temperatuur gemeten met de divers in de Holocene peilbuizen hebben een sterke relatie met de diepte (hoe dieper, hoe lager de temperatuur). Deze relatie is anders voor divers in peilbuizen in de TZ en de PL, welke naar boven toe juist koeler lijken te zijn. Waarschijnlijk heeft dit te maken met seizoensale ouderdom van het water (is het Lekwater geïnfiltreerd in de winter of de zomer?)

Op basis van de gemeten temperatuur met divers kan geen eenduidige conclusie worden getrokken over mogelijke preferente uitwisselingsstromen. In verband met de geringe en constante diepte van divers biedt temperatuuranalyse op dit moment geen meerwaarde.



- Lekwater verschilt bijvoorbeeld van lokaal geïnfiltreerd regenwater door een hoger chloride- en calciumgehalte. Chloride is sinds 1995 onder de 100 mg/l. Ouder rivierwater met hoger chloridegehalte is wel geïnfiltreerd.
- Op grotere diepte kan zich ook nog ouder grondwater bevinden. Grondwater dat niet met infiltratie van de Lek te maken heeft (inclusief zeewater).



Figuur 95: Infiltratie van water uit de Lek in de polder (1 Infiltrerend regenwater; 2 Stroming door wadzandlaag (rivier); 3 Stroming door PL (rivier)).

Daarnaast is er ook een drainagesysteem aangelegd. Dit voert grondwater uit het dijklichaam af richting de Bakwetering. Het water in het dijklichaam is waarschijnlijk een mix van regenwater en infiltrerend rivierwater, aangezien het drainage systeem onder het rivierwaterpeil ligt en boven het peil van de Bakwetering.

Bij hydraulische kortsluiting langs de boorpalen zou er ook een aanzienlijke instroom kunnen zijn van grondwater uit de TZ of de PL en het hydrochemisch profiel meer eigenschappen vertonen van deze pakketten. Deze instroom kan alleen plaatsvinden op het moment dat de stijghoogte van het grondwater in de TZ of de PL hoger is dan het freatisch vlak ter plaatse.

#### Watermonsters in Holocene:

Zoals duidelijk is geworden bij het bespreken van individuele elementen (zie Paragraaf F.4.1.1) is de variatie het grootst in de ondiepe Holocene monsters. Dit verklaart deels de aanzienlijke spreiding in de correlatiegetallen.

Punten HB010PB01 (rivierzijde raai 2), HB053PB01 (rivierzijde raai 4), en HB057PB01 (langs boorpaal raai 5) vallen echter op vanwege de negatieve correlaties.

- HB010PB01 toont lagere concentraties van natrium, kalium, calcium en bicarbonaat vergeleken met andere Holocene-monsters. Hoewel er enige overeenkomst is tussen het chloridegehalte en andere ionen van monsters uit de TZ, ontbreekt een sterke correlatie. De bemonsteringslocatie ten noorden van de palenwand zou mogelijk water uit de TZ kunnen laten opkomen en mengen met het Holocene water. Uit de peilbuismetingen volgt een zwakkere respons in de TZ op 15 m uit de boorpaal richting rivier (ongeveer ter plaatse van het anker). Zwakker dan in de overige peilbuizen in de betreffende raai. In de meetperiode van 10-05-2023 tot 22-05-2023 is de stijghoogte in de TZ hier ook lager dan in de overige peilbuizen (richting de polder). Dit maakt het waarschijnlijk dat lekkage optreedt langs het anker naar maaiveld.
- HB053PB01 heeft lagere concentraties van kationen zoals kalium en ijzer, evenals micro-elementen barium en mangaan, in vergelijking met andere Holocene monsters. De chlorideconcentratie is echter wel vergelijkbaar met andere holocene monsters. Toch vertoont het monster geen sterke overeenkomsten met water uit de PL (de TZ is vrijwel afwezig rond deze locatie). Mogelijke lekkage langs de palenwand of het anker aan rivierzijde is hier mede gezien de hoge concentraties Kationen en chloride onwaarschijnlijk.
- HB057PB01 toont opvallend hoge concentraties van een aantal micro-elementen, zoals nikkel en zink. Deze micro-elementen zijn echter ook niet in hoge concentraties aanwezig in diepere lagen, dus dit wijst niet direct op een lek.

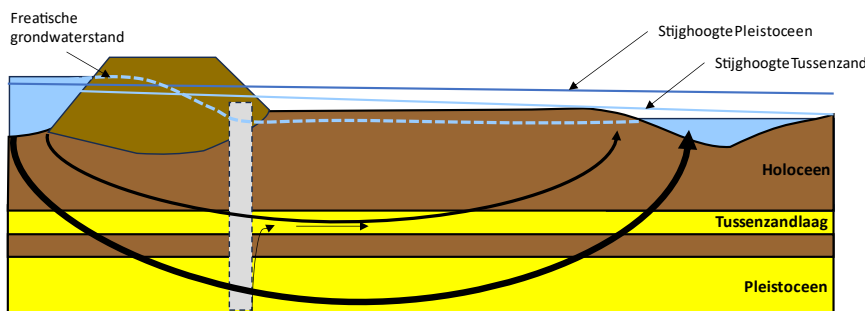


Echter, zal de relatief lage correlatiecoëfficiënt deels verklaard worden door ontbreken van enkele belangrijke elementen in de monsteranalyse.

### Watermonsters in de TZ

Punten MB046PB01 (boorpaal raai 2, TZ), MB017PB01 (polderwaarts raai 3, TZ), MB023PB01 (polderwaarts raai 4, TZ), en MB052PB01 (boorpaal raai 4, TZ) vallen echter op vanwege de negatieve correlaties met Tussenzand-monsters en de hoge positieve correlaties met Pleistoceenmonsters:

- MB017PB01 en MB023PB01 liggen beide polderwaarts op een afstand van ca. 14 m van de boorpalenwand. In theorie zou het water van een lekkage tussen de PL en de TZ bij de boorpalen polderwaarts kunnen zijn gestroomd (zie Figuur 96). Waarschijnlijker is dat er sprake is van een lokale kwelstroming direct vanuit de PL. Dit wordt ook ondersteund door het stijghoogteverschil op deze locatie. Uit de peilbuismetingen volgt dat de responsen erg veel van elkaar afwijken hetgeen niet duid op een lekkage.
- MB046PB01 en MB052PB01 vertonen een sterke overeenkomst met monsters uit de PL op dezelfde locatie, wat mogelijk duidt op een lek langs de boorpaal tussen de PL en de TZ. Uit de peilbuismetingen volgt dat de responsen in de TZ en de PL erg veel van elkaar afwijken hetgeen in basis niet duid op een hydraulische kortsluiting, maar een lekkage niet uitsluit Gezien de conclusies uit de hydrochemische analyses betekent dit dat de lekkage gering zal zijn. Laatste wordt eveneens ondersteund door de grondwaterstromingsanalyses met Plaxis.



Figuur 96: Principe lekkage tussen de PL en de TZ bij de boorpalen en afstroming in polderwaartse richting.

### Watermonsters in PL

Watermonster MB023PB02 (polderwaarts raai 4 op circa 15 m vanaf de boorpalenwand) valt op vanwege de relatief lage correlatie met overige monsters, de PL en een hogere correlatie met de TZ. Desondanks, gezien de locatie (niet ter plaatse van het anker of de boorpalenwand) en de onderdruk vanuit de TZ wordt deze locatie niet als reëel risicovol beschouwd.

Watermonsters MB046PB02 (boorpaal raai 2, PL), MB011PB02 (polderwaarts raai 2, PL) vallen ook op vanwege de relatief lage correlatie met overige monsters de PL en een hogere correlatie met de TZ.

Idem als bij watermonsters uit de TZ volgt uit de peilbuismetingen echter dat de responsen in de TZ en de PL erg veel van elkaar afwijken hetgeen in basis niet duid op een lekkage, maar gezien bovengenoemde aangeeft dat een lekkage gering zal zijn. Laatste wordt eveneens ondersteund door de grondwaterstromingsanalyses met Plaxis.

### Watermonsters uit drainagesysteem raai 1 en 2

In het correlatiediagram laten de monsters van het water uit het drainagesysteem geen sterke correlatie zien met een van de pakketten. Er is een zwakke positieve relatie tussen de pleistocene monsters en de monsters DP01, DP03 en DP04 uit de drainage.

Monster DP01 is een verzamelmonster van water uit de gehele deksloof (drainage loopt langs gehele deksloof) en het gebied rond de afrit tussen raai 1 en 2 dat hierop afwatert. Ook de molgoot van de weg watert hierop af. De monsters uit de drainage vallen op door de relatief lage concentraties van anionen en kationen, zoals magnesium, kalium en sulfaat. Deze waarden zijn echter niet uitzonderlijk laag en passen ook niet goed bij het karakter van de TZ en de PL. Ook hebben deze monsters lage waarden voor micro-elementen, zoals kobalt en nikkel, vergeleken met andere Holocene monsters in de buurt van deze raai. De relatief hoge concentraties van macro- en micro-elementen in de holocene peilbuizen zijn waarschijnlijk het gevolg van lokale (antropogene) bronnen. Het verschil tussen de ondiepe grondwatersamenstelling in de polder en het dijklichaam, kan te maken hebben met bijvoorbeeld een grotere regenwaterlens in het dijklichaam of verdunning door infiltrerend rivierwater. Er valt gezien bovengenoemde niet uit te sluiten dat dit drainage systeem lokaal ook kwelwater afvoert als gevolg van lekkage langs de boorpalenwand, maar dit ligt niet voor de hand. Uit analyse van de peilbuismetingen volgt dat lekkage langs het anker niet aannemelijk is waardoor lekkage langs de boorpaal de meest waarschijnlijke optie is.

### Watermonster dat uit de ankerkop stroomde (raai 3, locatie F2-2) bij anker nr. 08

Het monster lekkagewater bij anker 08 in raai 3 vertoont met geen van de pakketten TZ, PL of Holoceen een duidelijke hoge correlatie. Hoewel het water op een aantal kenmerken overeenkomt met dat van de TZ (e.g. lage concentratie Bicarbonaat en Calcium), heeft het bijvoorbeeld wel weer een hoog chloride-gehalte kenmerkend voor het Holocene pakket. Het anker heeft een behoorlijke lengte in de Holocene lagen; de lengte van het anker vanaf de TZ naar de ankerkop bedraagt orde grootte 13 m. Door de installatieprocedure van een anker is er ruimte tussen de ankerstrengen en de omliggende grond. Grondwater in de Holocene lagen kan daardoor in deze ruimte verzamelen. Bij een eventuele lekkage vanuit de TZ langs het anker kan het water in het anker gat zich dan ook mengen met water uit de TZ. Het onderzochte lekkagewater heeft kenmerken van zowel de TZ als het Holoceen, Hierdoor is het aannemelijk dat er menging van water van deze 2 pakketten is opgetreden. Extra bemonstering en analyse op typische Lek-Rijn tracers zou mogelijk nog meer inzicht kunnen hebben geleverd.

## F.5 Resultaten meetcampagne november 2023

	Meetcampagne november 2023 macro – elementen												
	Magnesium [mg/l]	Natrium [mg/l]	Kalium [mg/l]	Calcium [mg/l]	Bicarbonaat [mg/l]	Ijzer [mg/l]	Nitraat (N) [mg/l]	Ammonium (N) [mg/l]	Fosfaat [mg/l]	Sulfaat [mg/l]	NH <sub>4</sub> [mg/l]	NO <sub>3</sub> [mg/l]	Chloride [mg/l]
MB046PB01 Tussenwand	11.0	110.0	10.0	92.0	530.0	8.3	0.0	34.0	0.0	110.0	44.0	0.0	84.0
	11.0	49.0	4.6	76.0	230.0	1.1	0.0	2.8	0.6	37.0	3.6	0.0	91.0
MB046PB02 Pleistoceen	9.9	49.0	4.5	73.0	230.0	1.6	0.0	3.7	0.2	31.0	4.8	0.0	93.0
	14.0	120.0	12.0	120.0	740.0	29.0	0.0	46.0	3.4	28.0	59.0	0.0	60.0
HB057PB01 Holoceen	32.0	110.0	34.0	280.0				26.0			34.0		
	45.0	130.0	53.0	460.0	1900.0	130.0	0.0	20.0	20.0	0.0	26.0	0.0	150.0
MB028PB02 Pleistoceen	9.8	43.0	3.8	75.0	290.0	2.7	0.5	3.5	0.7	9.0	4.4	2.2	74.0
	9.3	36.0	3.6	80.0	310.0	0.0	0.3	2.8	1.4	8.0	3.6	1.2	51.0
Lek	10.0	38.0	5.3	64.0	170.0	0.0	3.3	0.3	0.2	65.0	0.3	15.0	59.0
Bakwetering	12.0	30.0	7.9	83.0	200.0	0.6	1.9	1.5	0.3	100.0	1.9	8.3	48.0
N	20.0	120.0	13.0	240.0	790.0	0.6	0.0	0.3	0.3	72.0	0.4	0.0	190.0
L2	30.0	79.0	11.0	330.0	1200.0	9.4	0.0	3.0	0.5	0.0	3.8	0.0	110.0

Figuur 97: Gemeten macro-elementen in monsters uit meetcampagne 1 (april/mei) telkens in bovenste rij, en meetcampagne 2 (november) telkens in onderste rij.

- Er zijn nieuwe watermonsters ter plaatse van MB046PB01 en MB046PB02 (langs de boorpaal in raai 2) genomen in verband met het ontbreken van een Holoceen monster op deze locatie.

Monsternamen in het Holoceen was hier echter niet mogelijk i.v.m. droogstaan van de peilbuis. De nieuwe monsters (TZ en PL), wijken sterk af van de eerdere meetcampagne. Dit geldt ook voor de micro-elementen (niet zichtbaar in een figuur). Waarschijnlijk zijn de monsters uit de PL en de TZ verwisseld bij de meetcampagne in november. In dat geval is er – net zoals bij de vorige meetcampagne – geen aanleiding voor een lekkage.

- Monster HB057PB01 (langs boorpaal in holoceen raai 5) is uitgevoerd in verband met het ontbreken van meetwaarden van een aantal stoffen bij de vorige meetcampagne. Het monster vertoont relatief hoge waarden Macro-elementen, maar niet ongebruikelijk voor een Holoceen monster. Zeker het Chloride-gehalte past goed bij het licht brakke karakter van het Holoceen water. Het monster vertoont ook niet langer hoge waarden in micro-elementen Nikkel, Zink en Molybdeen.  
Monster MB028PB020 is genomen op dezelfde locatie maar uit het Pleistocene pakket. Dit monster vertoont een vergelijkbaar beeld als het monster van de vorige meetcampagne. Er is niet langer aanleiding om op deze locatie uit te gaan van een lekkage.
- Monster N en L2: de monsters zijn genomen in het kader van aanvullend veldonderzoek (zie Paragraaf 4.6).
  - Bij locatie N zijn watermonsters genomen die zijn samengesteld. Het watermonster is afkomstig uit de drainage bij locatie N ongeveer ter hoogte van de ankers A17/A18.
  - Bij locatie L2 is een watermonster genomen uit de drainage langs de boorpalenwand en betreft freatisch water.

Verder zijn op deze locatie geen watermonsters genomen in TZ, PL en langs de boorpaal en holoceen. Hier is dus geen lokale referentie met TZ, PL of Holoceen waardoor interpretatie lastig is. Als deze monsters toch worden vergeleken met andere holoceen monsters dan vertonen ze wel enige gelijkenis in termen van relatief verhoogde macro en micro elementen duidend op antropogene verontreinigingen en dergelijke. Vooral nog wordt geen aanleiding voor hydraulische kortsluiting gezien maar deze conclusie is dun.

## F.6 Conclusie en aanbevelingen:

In deze studie is zowel procesmatig als via een hydrochemische clusteranalyse onderzocht of er sprake is van hydraulische kortsluiting langs palenwand of ankers in de raaien 1 t/m 6 (sectie F1-1, F2-2 en H2). De volgende watermonsters (zie Tabel 22) kunnen mogelijk in verband worden gebracht met hydraulische kortsluiting of lekkage.

Tabel 22: Conclusies op basis van het hydrochemisch onderzoek.

Water-monster	Locatie	Hydraulische kortsluiting/lekkage	Conclusie alleen op basis van hydrochemisch onderzoek
HB010PB01	Rivierzijde raai 2	Van TZ naar Holoceen	Lek langs anker is <b>waarschijnlijk</b> .
HB053PB01	Rivierzijde raai 4	Van TZ naar Holoceen	Lek langs boorpaal of anker is zeer onwaarschijnlijk.
HB057PB01	Langs boorpaal raai 5	Van PL naar Holoceen	o.b.v. aanvullend onderzoek: lek zeer onwaarschijnlijk.
MB017PB01	Polderwaa rts raai 3	Van PL naar TZ	Lek zeer onwaarschijnlijk.
MB023PB01	Polderwaa rts raai 4	Van PL naar TZ	Lek zeer onwaarschijnlijk.
MB052PB01	Boorpaal raai 4	Van PL naar TZ	Lek langs boorpaal is <b>waarschijnlijk, maar geringe lekkage</b> .
MB023PB02	Polderwaa rts raai 4	Van PL naar TZ	Lek zeer onwaarschijnlijk.

Water-monster	Locatie	Hydraulische kortsluiting/lekkage	Conclusie alleen op basis van hydrochemisch onderzoek
MB046PB02	Boorpaal raai 2	Van PL naar TZ	Lek langs boorpaal is <b><u>waarschijnlijk, maar geringe lekkage.</u></b>
DP01, DP03 en DP04.	Drainage raai 1 en 2	Van TZ naar Holoceen	Verstopt geen duidelijk hydrochemisch profiel, maar er is een zwakke positieve relatie. Lekkage langs boorpaal <b><u>is mogelijk.</u></b>
2023-018-001	anker raai 3	Van TZ naar Holoceen	Geen duidelijk hydrochemisch profiel, maar wel aannemelijk dat menging van water uit de TZ en het Holoceen plaatsvindt. Hierdoor is een lek <b>langs het anker zeer <u>waarschijnlijk.</u></b>

**Kansuitspraak/waarschijnlijkheidsaanduiding volgens Willems et al (2020):**

**Omschrijving/interpretatie:**

Zeer onwaarschijnlijk

Bijna onmogelijke kans van optreden (kans circa 0,05).

Mogelijk

Gebeurtenis kan mogelijk optreden (kans circa 0,50).

Waarschijnlijk

Grote kans van optreden (kans circa 0,80).

Zeer waarschijnlijk

Zeer grote kans van optreden (kans circa 0,95).

Op basis van het hydrochemisch onderzoek wordt geconcludeerd dat het waarschijnlijk is dat er op bepaalde locaties kortsluiting/lekkage is ontstaan. Deze conclusie geldt niet voor het gehele tracé van de gerealiseerde dijkversterking:

- Bij HB010PB01 (rivierzijde raai 2), kan worden gesteld dat lekkage langs het anker naar maaiveld waarschijnlijk is.
- Bij meetpunt MB052PB01 (ter plaatse van de boorpaal in raai 4) kan worden gesteld dat kortsluiting langs de boorpaal tussen de PL en de TZ erg waarschijnlijk is.
- Bij meetpunt MB046PB02 (ter plaatse van de boorpaal in raai 2) kan worden gesteld dat lekkage langs de boorpaal tussen de PL en de TZ waarschijnlijk is maar vermoedelijk gering zal zijn.
- Er valt niet uit te sluiten dat dit drainagesysteem lokaal ook kwelwater afvoert als gevolg van hydraulische kortsluiting langs de boorpaal. Lekkage langs de boorpaal is dus mogelijk.
- Bij de geconstateerde lekkage bij Anker A08 (raai3) is het zeer waarschijnlijk dat lekkage vanuit de TZ naar maaiveld plaatsvindt.

Opgemerkt wordt dat conclusies in deze bijlage betreffende een eventuele hydraulische kortsluiting of lekkage alleen de resultaten van dit hydrochemisch onderzoek betreffen en later nog gecombineerd moet worden met de andere gegevens in dit rapport om zo tot voldoende zekere uitspraken te komen. Hiervoor dienen dus de resultaten van het andere monitoringsonderzoek, zoals de peilbuismetingen, hellingmeetbuis metingen en de tijdreeksanalyse nog nader te worden beschouwd om zo tot een totaal uitspraak te komen betreffende hydraulische kortsluiting of lekkage.

## G Overbetonering

Uit het eerder uitgebrachte rapport van fase-1 (Deltares, Juli 2021) volgt dat mede gezien het oververbruik van beton van de boorpalen niet wordt verwacht dat tijdens de uitvoering kortsluitingen (kieren) zijn ontstaan langs de palen in het holocene pakket boven de holocene zandlaag.

Het oververbruik zal variëren langs het dijktraject, afhankelijk van de dikte en samenstelling van het slappe lagenpakket en ook van de positie van de boorpalen in de dwarsdoorsnede. Het oververbruik is gemiddeld 13 tot 20% per boorpaal. Dit betekent dat 13-20% meer beton in de boorpalen is verwerkt dan vanuit de inhoud van de boorpalen werd verwacht. Door dit verticaal uitzakken en horizontaal uitdijen van de beton wordt verwacht dat eventuele holle ruimte, die bij het boren van de stalen casing zou ontstaan, al tijdens het trekken van de casing wordt opgevuld.

Bij het boren is geboord met een ruimere boorkroon dan de diameter van de boorbuis zelf.

In Bijlage A van het eerder uitgebrachte fase 2 rapport (Deltares, Januari 2022-1) is het oververbruik weergegeven voor enkele secties. In Tabel 22 is dit herhaald.

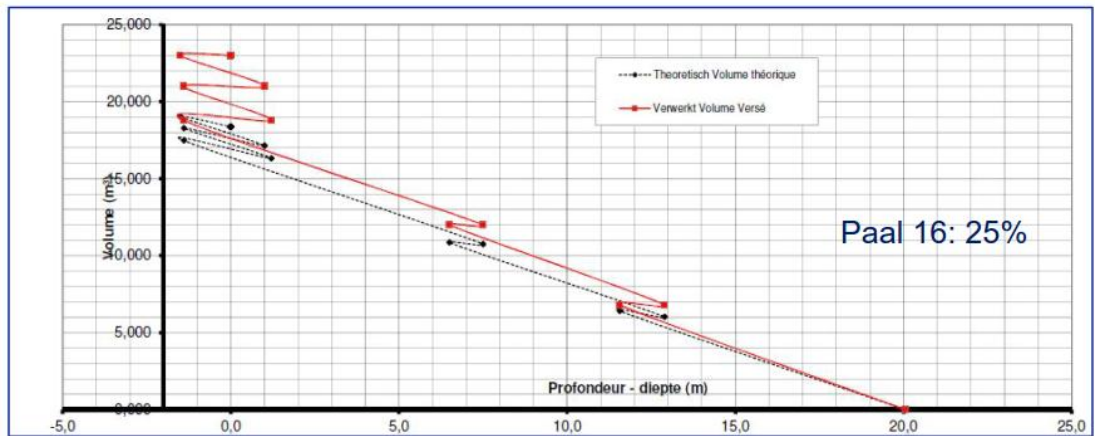
Tabel 23 Overzicht van het oververbruik van het betonverbruik bij een aantal secties waar boorpalen zijn gemaakt (Waterschap Rivierenland, 2018) (bron Deltares 2022, Tabel 2-11).

Sectie	Hoeveelheid palen	Oververbruik, gemiddeld (%)	Hoeveelheid extra betonverbruik [m <sup>3</sup> ]	Bovenkant paal [m t.o.v. NAP]	Onderkant slappe lagen (m t.o.v. NAP)	Dikte slappe lagen teen dijk [m]
F1-1	28	19,7	3,6	0,1 / -0,9	-12,2	11,3
F2-2	24	13,1	2,2	-0,4 / -1,8	-8,6	7,2
F3-G	126	12 - 15	2,5 – 3,0	2,5 / 3,0	-10,0	9,0
AH	34	14,5 <sup>1)</sup>	2,9	1,3	-8,3	8,0

1) Bij de boorpalen 28 t/m 34 is het gemiddelde betonverbruik 26,7%

Uit (Deltares, Juli 2021) blz. 63 volgt:

Tijdens het betonneren vindt er registratie van het betonverbruik in de diepte plaats. Hierdoor is het inzichtelijk waardoor het oververbruik ontstaat. Het oververbruik is o.a. afhankelijk van de grondsoort, de gronddruk, de betonconsistentie en de uitvoeringswijze. In de volgende Figuur is een voorbeeld gegeven van een dergelijke registratie. Dit betreft de registratie van het betonverbruik bij paal nummer 16 bij sectie F1-1. Bij deze paal is het oververbruik vastgesteld op 25%. Uit de grafiek volgt dat er nauwelijks sprake is van een oververbruik in de vaste lagen (zand, onderste circa 7 à 8 m) en dat er sprake is van een vrij geleidelijke toename van het oververbruik in het slappe lagenpakket. Dit betreft de bovenste circa 12 à 13 m van de paal.



Figuur 98: Betoneergrafiek van paal nummer 16 bij sectie F1-1. de registratie vindt plaats van onder naar boven (Deltares bron figuur 2-63)(Waterschap Rivierenland, 2018).

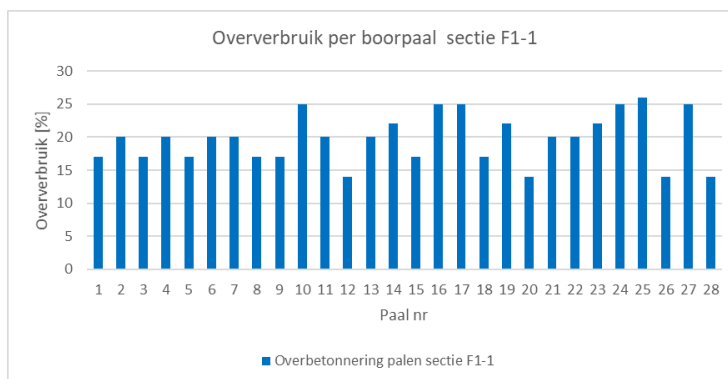
Opgemerkt wordt dat het betonverbruik niet elke meter wordt geregistreerd maar voor paal 16 bij sectie F1-1 per 5 tot 8 m. In de volgende 3 paragrafen wordt ingezoomd op de afzonderlijke palen binnen de 3 secties.

Geconcludeerd wordt dat er gezien bovengenoemde een kleine kans is dat er kortsluitingen langs de palen zijn ontstaan tussen de twee zandlagen, als gevolg van een verschil in de potentialen, tijdens het trekken van de boorcasing over de zone van de kleilaag die tussen de twee zandlagen in ligt.

Het wordt dus niet wordt verwacht dat het oververbruik aanwijzingen geeft voor verhoogde kans lekkage langs de boorpaal. Mede op advies van de reviewcommissie is echter gekeken naar palen waar het betonverbruik afwijkt. Gedachte is dat bij afwijkingen van palen binnen de secties de kans op lekkage bij deze palen mogelijk groter zou kunnen zijn.

## G.1 Sectie F1-1

In Figuur 99 is het oververbruik van de hoeveelheid beton per boorpaal bij sectie F1-1 weergegeven. De details zijn in Tabel 24 weergegeven.



Figuur 99 Oververbruik beton per boorpaal voor sectie F1-1.



Tabel 24 Oververbruik beton per boorpaal voor sectie F1-1.

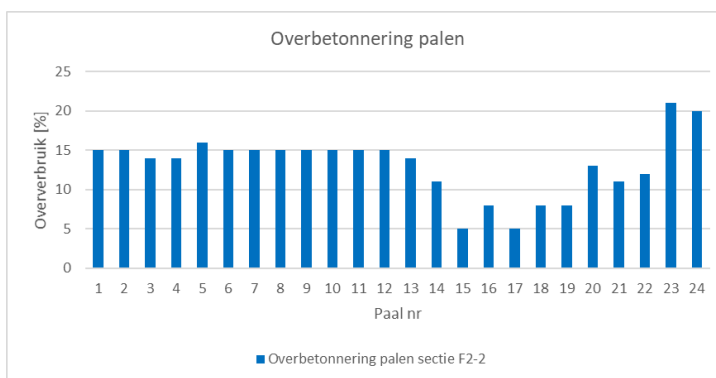
Overbetonnering palen sectie F1-1			
paal nr	overbetonnering %	opm	
1	17		
2	20		
3	17		
4	20		
5	17		
6	20		
7	20		
8	17		
9	17		
10	25		
11	20		
12	14		
13	20		
14	22	1)	ook oververbruik globaal tussen bij NAP -12 tot -8
15	17		
16	25	1)	ook oververbruik globaal tussen bij NAP -12 tot -8
17	25	1)	ook oververbruik globaal tussen bij NAP -12 tot -8
18	17		
19	22	1)	ook oververbruik globaal tussen bij NAP -12 tot -8
20	14		
21	20	1)	ook oververbruik globaal tussen bij NAP -12 tot -8
22	20		
23	22		
24	25	1)	ook oververbruik globaal tussen bij NAP -12 tot -8
25	26	1)	ook oververbruik globaal tussen bij NAP -12 tot mv
26	14		
27	25	1)	ook oververbruik globaal tussen bij NAP -12 tot -8
28	14		
gem	19,8		

1) iets afwijkend gedrag t.o.v. de ander palen

Voor alle palen geldt overigens dat het grootste oververbruik wordt geregistreert als de de casing tot 2 a 3 m onder de top is gevuld. Dit verdient echter nog nadere uitleg van de registratietabel en grafieken.

## G.2 Sectie F2-2

In Figuur 100 is het oververbruik van de hoeveelheid beton per boorpaal bij sectie F2-2 weergegeven. De details zijn in Tabel 25 weergegeven.



Figuur 100 Oververbruik beton per boorpaal voor sectie F2-2.

Tabel 25 Oververbruik beton per boorpaal voor sectie F2-2.

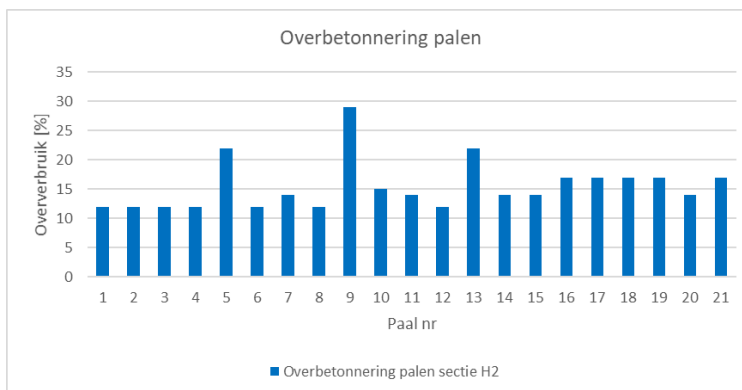
Overbetonning palen sectie F2-2			
paal nr	overbetonning	opm	
	%		
1	15		
2	15		
3	14		
4	14		
5	16		
6	15		
7	15		
8	15		
9	15		
10	15		
11	15		
12	15		
13	14		
14	11		
15	5	1)	wellicht iets onderverbruik van NAP -9 tot -21m
16	8	1)	wellicht iets onderverbruik van NAP -9 tot -21m
17	5	1)	wellicht iets onderverbruik van NAP -9 tot -21m
18	8	1)	wellicht iets onderverbruik van NAP -9 tot -21m
19	8	1)	wellicht iets onderverbruik van NAP -9 tot -21m
20	13		
21	11		
22	12		
23	21		
24	20		
gem	13.125		

1) iets afwijkend gedrag t.o.v. de ander palen

Voor alle palen geldt overigens dat het grootste oververbruik wordt geregistreert als de de casing tot 2 a 3 m onder de top is gevuld. Dit verdient echter nog nadere uitleg van de registratietabel en grafieken.

### G.3 Sectie H2

In Figuur 101 is het oververbruik van de hoeveelheid beton per boorpaal bij sectie H2 weergegeven. De details zijn in Tabel 26 weergegeven.



Figuur 101 Oververbruik beton per boorpaal voor sectie H2.

Tabel 26 Oververbruik beton per boorpaal voor sectie H2.

Overbetonning palen sectie H2		
paal nr	overbetonning %	opm
1	12	
2	12 1)	mogelijk iets onderverbruik van NAP -11 tot -21.5m
3	12 1)	mogelijk iets onderverbruik van NAP -11 tot -15.5m
4	12 1)	mogelijk iets onderverbruik van NAP -11 tot -15.5m
5	22	
6	12	
7	14 1)	mogelijk iets onderverbruik van NAP -11 tot -15.5m
8	12 1)	mogelijk iets onderverbruik van NAP -11 tot -15.5m
9	29 1)	ook oververbruik globaal tussen NAP -7 tot -10m
10	15	
11	14	
12	12	
13	22 1)	ook oververbruik globaal tussen NAP -7 tot -10m
14	14	
15	14	
16	17 1)	ook oververbruik globaal tussen NAP -7 tot -10m
17	17 1)	ook oververbruik globaal tussen NAP -11 tot -21m
18	17 1)	mogelijk iets onderverbruik van NAP -11 tot -15.5m
19	17	
20	14	
21	17	
gem	15.6	
1) iets afwijkend gedrag t.o.v. de ander palen		
Voor alle palen geldt overigens dat het grootste oververbruik wordt geregistreert als de de casing tot 2 a 3 m onder de top is gevuld. Dit verdient echter nog nadere uitleg van de registratietabel en grafieken.		

## H Lekkage ankers na realisatie

Uit Paragraaf 2.5.4 (blz.70) van het Deltares rapport van fase 1 (Deltares, 2021) volgt dat bij een aantal secties van de boorpalenwanden in registratieformulieren van de ankers wordt opgemerkt dat er water uit (langs het anker) stroomt na de realisatie van de ankers. Dit wordt nader beschouwd in 3.2.3 van datzelfde rapport. Dit is m.n. geregistreerd bij de locaties van de ankers, die lager in het talud zijn geïnstalleerd. Zie ook de secties H2 (9 uit 22 ankers namelijk de nummers 2 tot en met 10), sectie AB1 (4 uit 46 ankers), AB2 (10 uit 17 ankers) en AH1 (7 uit 17 ankers). Enkele registratieformulieren van de realisatie van de ankers zijn weergegeven in Bijlage H (van het fase 1 rapport). Deze locaties staan lager in het binnentalud van de dijk, zie ook de volgende tabel.

Tabel 27: *Overzicht van locaties waar er melding is gemaakt van uitstromend water na de realisatie van ankers (bron Deltares 2021 Tabel 2.10).*

Sectie	Dijkpalen	Locatie in dwarsdoorsnede	Bovenkant betonnen gording	Antal meldingen van uitstromend water direct na realisatie ankers
H2	AW172+170 en AW173+020	Binnentalud	NAP + 1,00 m	9 van 22 ankers
AB1 AB2	AW211 - AW213	Binnentalud	NAP + 1,22 m NAP + 0,47 m	4 van 46 ankers 10 van 17 ankers
AH1	AW242+132 en AW244+000	Binnentalud	NAP + 2,00 m á NAP + 2,20 m	7 van 17 ankers

In Paragraaf 3.2.3 van het Deltares rapport van fase 1 is ingegaan op de kans op lekkage langs de verankeringen. Hieruit volgt dat bij sectie F1-1, maar ook de overige secties, het aannemelijk is dat het groutlichaam onvoldoende ver is doorgezet. Hierdoor is op deze locaties vermoedelijk sprake van en kwelweg.

Op basis van de beschouwingen in sectie F1-1 en op basis van de registratie van de ankers in andere secties, waar er kwelwater uitstroomde na de realisatie, volgt dat het aannemelijk is dat het groutlichaam niet overal voldoende ver is doorgezet in het holocene slappe lagenpakket om kwel langs de ankers te kunnen voorkomen. Dit aspect kan ook mede een oorzaak zijn geweest van de lekkage, die in sectie F1-1 tijdens de uitvoering heeft plaatsgevonden. Bij sectie F1-1 zal een dergelijke lekkage worden opgevangen via de drainagevoorziening, die langs de palenwand is aangelegd. Bij de lageregelegen locaties van de palenwanden bij de dijkversterking zal het eventuele kwelwater worden opgevangen in de doorlopende drainagevoorziening, die bij deze palenwanden zijn aangebracht langs de deksloof. Deze drainagevoorziening is nog niet aangesloten, waardoor eventueel kwelwater nog niet kan worden afgevoerd in de omgeving.

Indien de potentialen in de watervoerende zandlagen onder dagelijkse omstandigheden laag zijn, is de verwachting dat door de aanwezigheid van deze drainagevoorziening dit niet tot wateroverlast zal leiden. Als de potentialen in de watervoerende zandlagen langdurig hoog zijn (onder dagelijkse omstandigheden of tijdens langdurige hoogwaterstanden op de rivier denkende aan enkele weken) kan een dergelijke lekkage tijdelijk leiden tot wateroverlast. Lekkage zal alleen kunnen optreden als het freatisch vlak onder normale omstandigheden lager is dan de stijghoogte in de TZ (of de PL als geen TZ aanwezig is) (zie ook Paragraaf 3.3 in het hoofdrapport).

Deze lekkages langs de verankering zullen nauwelijks invloed zal hebben op de waterveiligheid, dit zal nader worden behandeld in onderdeel D.

Bij de palenwanden die hoger in het talud staan, zal de invloed van een lekkage mogelijk pas merkbaar zijn bij extremere waterstanden op de rivier.

Conclusies betreffend lekkage langs de ankers:

- Er is een kans op onvoldoende afdichting middels een groutprop aan de onderzijde van het slappe lagenpakket. In geval van een onvoldoende afdichting via een groutprop aan de onderzijde van het slappe lagenpakket, zal er wateroverlast ontstaan tijdens langdurig hogere waterstanden op de rivier denkende aan enkele weken.
- De inschatting is dat de invloed van de lekkage via de ankers op de waterveiligheid van de dijk gering zal zijn, dit wordt nader behandeld in Paragraaf 6.2.4 en 6.2.5 in het hoofdrapport.
- Het is niet waarschijnlijk dat het kapottrekken van het anker A26 door de diepwandgrijper invloed heeft gehad op de afdichting van de groutprop aan de onderzijde van het slappe lagenpakket.

# I Aanvullingen Logboek uitvoering installatie monitoring 3 locaties

In aanvulling op het door Wiertsema & Partners gemaakte logboek van de uitvoering (zie Wiertsema, November 2023-1) zijn ook door WSRL en Deltares bijzonderheden geconstateerd en opmerkingen gemaakt tijdens de uitvoering van het onderzoek op de 3 monitoringslocaties F1-1, F2-2 en H2. In Paragraaf I.1 zijn de geconstateerde zaken gegeven die voor alle locaties geldend en in de Bijlagen I.2 t/m I.4 zijn de locatie-specifieke zaken weergegeven.

## I.1 Generieke constatering

- Locaties onderzoekspunten in directe omgeving van de boorpalen:  
Het plan was om de peilbuizen en hellingmeetbuizen in de buurt van de boorpalenwand zo dicht mogelijk tegen de wand te plaatsen (zie Paragraaf 4.1.2). Omdat de boorpalen zoals verwacht uitstulpingen hebben (en omdat de werkvloer van de deksloof soms aanmerkelijk breder was dan de deksloof zelf), is plaatsing exact langs de palen niet mogelijk gebleken. Uit het logboek (zie Wiertsema, November 2023-1) volgt dat hierdoor 1 hellingmeetbuis niet is geplaatst omdat deze anders te ver ( $> 0,5$  m) van de wand zou komen. Ook zijn hierdoor diverse peilbuizen op grotere afstand vanaf de boorpalenwand geplaatst dan gepland (echter binnen een afstand van 2 m). Dit betreft vooral de peilbuizen in de TZ en de PL.  
Ter plaatse van enkele sonderingen en boringen is vastgesteld dat deze niet dieper konden worden uitgevoerd omdat deze op een afstand van 0,4 tot 0,8 m uit de rand van de paal op betonuitstulpingen stuitten.  
De scheefstand en de richting van de scheefstand van de boringen (in de directe omgeving van de deksloof) waar peilbuizen zijn geïnstalleerd is bepaald teneinde de afstand van de peilbuisfilters tot de boorpalen te bepalen. Ook is de scheefstand en de richting van de scheefstand van de hellingmeetbuis boringen bepaald teneinde de afstand van de hellingmeetbuis tot de boorpalen te bepalen. Dit is van belang voor de interpretatie van de peilbuis- en hellingmeetbuismetingen en hiermee is rekening gehouden bij de analyse.
- Puin tijdens ontgraving:  
Tijdens de ontgravingswerkzaamheden is op diverse locaties puin in de ondergrond aangetroffen. Dit is afgevoerd en vervangen door klei.  
Drainagevoorziening: in raai 1, 2, 3 en 5 is de drainagevoorziening langs de deksloof niet aangetroffen.
- Onder de werkvloer van de deksloof is vaak sprake van 'overspannen' water. Deze hogere waterspanning ontstaat door een hoger freatisch vlak aan rivierzijde van de deksloof.
- De stijghoogte in de PL en in de TZ is zodanig dat deze aanmerkelijk hoger is dan het binnendijkse maaiveld. Deze peilbuizen zijn daarom voorzien van afsluitende doppen.
- Ter plaatse van anker A-08 in raai 3 is uitstromend water geconstateerd waarvan het debiet is gemeten en watermonsters zijn genomen.



## I.2 Sectie F1-1

### Raai 1

- In Figuur 105 is de ontgraving van raai 1 weergegeven:



Figuur 102: Ontgravingswerkzaamheden bij raai 1.

- Geen drainagevoorziening langs de deksloof aangetroffen.
- Veel puin in ondergrond aangetroffen.



Figuur 103: Aangetroffen puin in ondergrond bij raai 1.

### Raai 2

In Figuur 104 is de ontgraving van raai 1 weergegeven:



Figuur 104: Werkplateau en ontgraving bij raai 2.

- Geen drainagevoorziening langs de deksloof aangetroffen.

## I.3 Sectie F2-2

### Raai 3

- Geen drainagevoorziening langs de deksloof aangetroffen.
- D.d. 8-03-2023 is op 0,15 m diepte onder maaiveld een gasleiding aangetroffen. De ligging is niet zoals op KLIC melding aangegeven.
- Bij Raai 3 is stromend water uit de repak waargenomen (zie video in digitaal dossier (zie Bijlage L) ).
- D.d. 21-03-2023 en 22-03-2023 is uitstromend water bij anker A-08 geconstateerd, Hiervan is het debiet gemeten en zijn watermonsters genomen voor het uitvoeren van chemische analyse in het laboratorium (zie feitelijk verslag in Deltares, Mei 2023. Met behulp van de chemische analyses vastgesteld of het water uit het diepe zand, water uit de dijkskern of eventueel neerslagwater betreft. Hiervoor wordt verwezen naar het hydrochemisch onderzoek in Paragraaf 4.4 van het hoofdrapport.
- Tevens is 21-03-2023 een peilbuis geplaatst aan de rivierzijde van de deksloof op 0,5 m afstand van het anker. Omdat de verwachting van Wiertsema was dat niet een gat door de werkvloer kan worden gemaakt wordt de peilbuis op 1m horizontale afstand van de deksloof geplaatst dat betekent 3,7 m onder de bovenkant deksloof. Hierdoor staat het filter van de peilbuis zo dicht mogelijk bij de ankerstang. Mogelijk levert deze peilbuis informatie over de stijghoogte onder de deksloof bij het anker.
- Tijdens het plaatsen van de peilbuis is naast de deksloof gegraven en tijdens de graafwerkzaamheden bleek dat het lekkage debiet bij de ankerkop toenam. Vermoeden is overspannen water dat tijdens de graafwerkzaamheden wordt uitgedreven. Het overspannen water onder de deksloof blijkt nu door de ankerkop naar buiten te komen.
- Op 20-03-2023 leek het vierde anker, zichtbaar in de ontgraving (meeste westelijke, dus anker nr. 10 of 11), ook te lekken. Op 21-03 is dit nader onderzocht dat de ankerkop goed schoon te spoelen en droog te maken. Hier bleek geen enkele lekkage op te treden of overspannen water uit te treden.

### Raai 4

- D.d. 9-03-2023 is de ontgraving van raai 4 weer aangevuld en afgewerkt.



*Figuur 105: Raai 4 afgewerkt na uitvoering installatie monitoring.*

- D.d. 25-04-2023 natte plek raai 4:  
D.d. 25-04 is via WSRL een melding gekregen van bewoner van Lekdijk 341 over natte plekken (geconstateerd d.d. 24-04-2023) op het talud ter plaatse van raai 4 ter plaatse van de peilbuizen. Bewoner kon niet aangeven hoeveel water er uit stroomde. Door Deltares is ter plaatse geconstateerd dat exact ter plaatse van de twee peilbuizen polderwaarts van de palenwand een natte plek aanwezig is. Het water is afkomstig uit de peilbuis putjes. De natte plek is een paar vierkante meter groot (zie eerste foto in Figuur 106) vanaf het bovenste putje tot voorbij het onderste putje. Na opening van de putjes stonden deze vol met water maar stroomde er nauwelijks of geen water uit.

Op het wateroppervlak in het putje dicht bij de palenwand (2 peilbuizen) was een mineraal laagje aanwezig hetgeen waarschijnlijk duidt op water vanuit het diepe zand. (Zie tweede foto in Figuur 106).

In het putje op circa 2 m afstand van de wand (de peilbuis staat hier op een diepte van circa NAP – 5 m) is geen mineraal laagje op het water aanwezig (zie derde foto in Figuur 106). Dit is logisch aangezien het filter van deze peilbuis niet in het diepe zand staat. Dit laatst genoemde putje zou ook vol kunnen zijn gestroomd met water wat uit het hoger gelegen putje afkomstig is. De doppen op de peilbuizen zijn vaster aangedraaid mede na overleg met Wiertsema & Partners.



Figuur 106: Raai 4 afgewerkt na uitvoering installatie monitoring, maar natte plekken op talud (links); 2 foto's rechts wat in peilbuisputjes.

## I.4 Sectie H2

### Raai 5

- In Figuur 107 is het werkplateau bij raai 5 weergegeven:



Figuur 107: Werkplateau bij raai 5.



- Waterstand aangetroffen op 60 cm onder bovenzijde deksloof aan rivierzijde van de deksloof en op 110 cm onder bovenzijde deksloof aan polderzijde:



*Figuur 108: Waterstand rivierzijde (links) en polderzijde (rechts ( van de deksloof).*

- Onder de werkvloer is vaak sprake van overspannend water. Deze hogere waterspanning ontstaat door een hoger freatisch vlak aan rivierzijde van de deksloof. Er lijkt weinig water toe te stromen als de druk er af is. Er is een overdruk gemeten van circa 0,5 m waterkolom ten opzichte van onderkant van de deksloof. Op deze locatie is tijdens installatie van de ankers melding gemaakt van uitredend water. Sectie H2 heeft de kop van de palenwand ook op NAP + 1,0 m.
- Geen drainagevoorziening langs de deksloof aangetroffen. Geconstateerd werd dat er echter wel voldoende drainerende werking is tijdens de uitvoering. Verwachting is dat wel een drainage aanwezig is langs de deksloof (die overigens niet aangesloten lijkt op de bakwetering) en goed werkt.

#### **Raai 6**

- In Figuur 109 is het werkplateau bij raai 5 weergegeven:



*Figuur 109: Werkplateau bij raai 6.*

- Kiervorming tussen constructie en grond. Niet over de gehele lengte Het is vrij droog.



*Figuur 110: Spleten langs de deksloof (aan polderzijde 15 cm breed en 60 cm diep (raai 6). Geen uittredend water waargenomen).*

# J Grondwaterstromingsberekeningen

## J.1 Inleiding

Door grondwaterstromingsberekeningen uit te voeren, kunnen de veronderstelde hypothesen van vernatting en hydraulische kortsluiting (zie Paragraaf 3.3) worden geverifieerd.

De grondwaterstromingsberekeningen geven een nadere onderbouwing van de conclusies over de oorzaak van de vernatting die in Paragraaf 4.6 zijn gegeven.

De grondwaterstromingsberekeningen zijn uitgevoerd met modellen waarin zowel lekkage en geen lekkage is gesimuleerd. Door het uitvoeren van gevoeligheidsberekeningen is de invloed van diverse aspecten bepaald.

Daarnaast is berekend welke grondwaterstanden en stijghoogten van het grondwater in de TZ en de PL optreden bij WBN (waterstand bij de Norm) en ontwerppeil, al dan niet met lekkages. Dit als voorbereiding op een herberekening van de waterveiligheid van de boorpalenwand die verder in de rapportage van onderdeel D is behandeld.

## J.2 Opzet berekeningen

Er zijn 3 verschillende modellen gebruikt voor de grondwaterstromingsberekeningen, namelijk: Plaxis-2D, Extrapol en Pastas.

Plaxis-2D:

Eerst zijn grondwaterstromingsberekeningen met Plaxis-2D uitgevoerd waarmee de veronderstelde hypothesen van vernatting en hydraulische kortsluiting (zie Paragraaf 3.3) zijn geverifieerd. De opzet van de berekeningen is als volgt:

1. Voor een representatief dwarsprofiel (zie Bijlage J.3) is op basis van geotechnisch, geologisch en geohydrologisch onderzoek een geohydrologische schematisatie gemaakt (dwarsprofiel met grondlagen, doorlatendheden, stijfheden (bergings- en consolidatie parameters).
2. Met deze schematisatie kan de respons worden berekend in de zandlagen (PL en TZ) als gevolg van een in de tijd variërende buitenwaterstand.
3. Met een eerste inschatting van de ondergrondparameters is vervolgens bepaald of de berekende stijghoogten bij de buitenwaterstand tijdens de metingen overeenkomt met de peilbuismetingen.
4. Bij afwijking van het modelresultaat met de metingen is vervolgens het model gekalibreerd door de ondergrondparameters zodanig aan te passen dat bij de opgelegde tijdsafhankelijke buitenwaterstand en de berekende stijghoogten ter plaatse van de peilbuizen overeenkomen met de peilbuismetingen. Hiervoor zijn de peilbuismetingen gebruikt waarvan mag worden aangenomen dat deze niet of nauwelijks worden beïnvloed door een lekkage. Dit zijn de peilbuizen op circa 15 m afstand van een eventuele lekkage. Met gevoeligheidsberekeningen (zie verder) is deze aanname geverifieerd.
5. Met dit gekalibreerde model zijn vervolgens gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd waarbij o.a. de volgende aspecten zijn onderzocht:
  - a. Invloed palenwand op geohydrologie in de TZ en de PL (zonder lekkages).
  - b. Invloed afstand modelrand.
6. Met dit gekalibreerde model zijn vervolgens berekeningen uitgevoerd waarbij de verschillende hypothesen van vernatting en hydraulische kortsluiting zijn geverifieerd en de invloeden daarvan (op de stijghoogten in de TZ en de PL en hoogte van het freatisch vlak) zijn bepaald. Dit voor de situatie onder normale omstandigheden.



7. Met dit gekalibreerde model zijn vervolgens gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd waarbij o.a. de volgende aspecten zijn onderzocht:
  - a. Invloed gestructureerde kleibekleding op talud.
  - b. Invloedsafstand lekkage:

Er is aangenomen dat de invloed van een eventuele hydraulische kortsluiting van de boorpaal/boorpalen en/of ankers niet significant is in de TZ op een horizontale afstand van 15 m van deze lekkage. De peilbuizen staan op circa 15 m vóór en 15 m achter de palenwand. Deze invloed is gekwantificeerd door de resultaten met en zonder lekkage ter plaatse van de eerdergenoemde peilbuizen op 15 m afstand met elkaar te vergelijken.
8. Vervolgens zijn met dit model simulaties uitgevoerd waarbij de stijghoogten in de watervoerende zandlagen (de TZ en de PL) zijn berekend als gevolg van een hoogwatergolf (onder andere WBN2023). Hierbij is de simulatie zowel met als zonder hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL uitgevoerd. De invloed van de hydraulische kortsluiting dient namelijk te worden gebruikt voor een berekening van de waterveiligheid van de boorpalenwand die in onderdeel D wordt uitgevoerd.

#### Extrapol:

Met een analytisch model in Excel (Extrapol) extrapolaties (simulaties) uitgevoerd waarbij de stijghoogten zijn berekend als gevolg van een hoogwatergolf (onder andere WBN2023). Dit is uitgevoerd voor zowel de TZ als de PL voor de raaien 1 t/m 6. Dit zijn de situaties zonder lekkage in het model, omdat met dit model kunnen geen lekkages worden gemodelleerd.

#### Tijdsreeksanalyses met Pastas:

Tevens zijn simulaties uitgevoerd met de opensource tijdreeks-software Pastas, met de modellen (per peilbuis wordt een tijdreeksmodel gemaakt) zoals genoemd in (Artesia, April 2024). Hierbij zijn de stijghoogten berekend als gevolg van een hoogwatergolf (WBN2023) waarbij de onttrekking van Oasen is uitgezet. Dit is uitgevoerd voor zowel de TZ als de PL voor de raaien 1 t/m 6. Met deze modellen is de invloed van lekkages ook niet meegenomen. In de tijdreeksanalyse is voor iedere verklarende variabele een exponentiele responsfunctie gebruikt.

Met betrekking tot het grondwaterstromingsmodel wordt het volgende opgemerkt:

- In werkelijkheid kan er sprake zijn van eventuele geologische kortsluiting tussen de PL en de TZ (natuurlijke oorsprong). Deze kortsluiting kan ontstaan door bijvoorbeeld het lokaal ontbreken van de tussenkleilaag tussen de zandlagen. Dit is niet gemodelleerd. Opgemerkt wordt dat deze geologische kortsluiting door middel van het uitgevoerde grondonderzoek (boringen en sonderingen) op de 3 monitoringslocaties nader is onderzocht. Met deze puntinformatie die slechts lokaal (globaal van de kruin van de dijk tot 75 m landinwaarts) is uitgevoerd kan het lokaal ontbreken van deze scheidende laag echter zijn gemist. Op basis van de peilbuismetingen is een eventuele geologische kortsluiting getracht vast te stellen. Hiervoor wordt verwezen naar in Paragraaf 4.3.
- In de analyses is de invloed van neerslag niet beschouwd. Dit is separaat van deze analyses in Paragraaf 4.3 beschouwd.

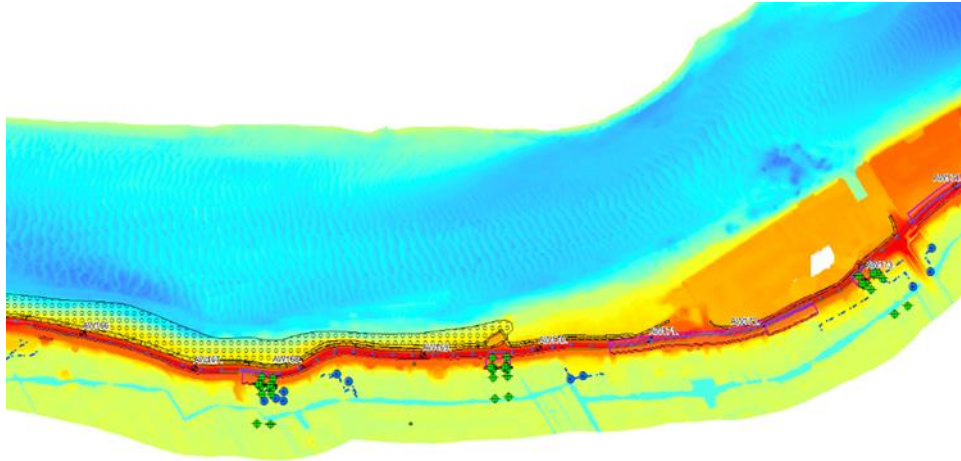
## J.3 Uitgangspunten en randvoorwaarden

### J.3.1 Keuze berekeningsmodellen

#### **Tweedimensionaal model:**

De rivierbodem snijdt niet in, in de TZ en de PL. De rivierbodem heeft namelijk een diepte van NAP - 5,0 m tot - 7,0 m (zie Figuur 111).

De bovenzijde van de TZ op de te onderzoeken locatie F1-1 (AW 167 + 150 m) varieert van NAP - 10,0 m tot -13,0 m en de PL met de bovenzijde op circa NAP - 14,0 m.

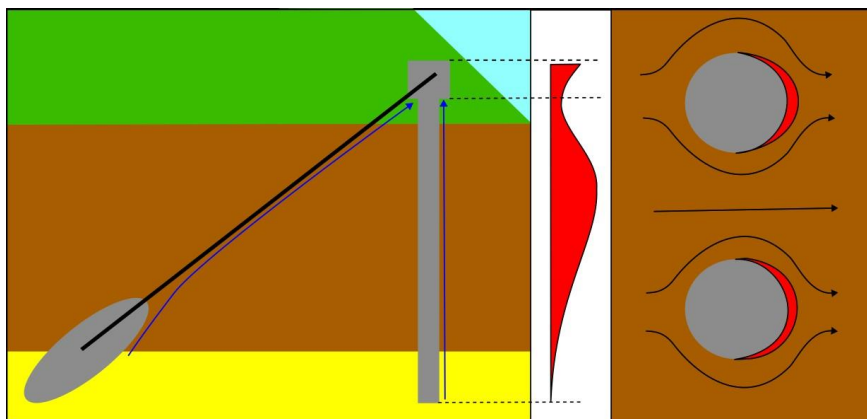


Figuur 111: Bodemniveau van de rivier (Bron WSRL): licht blauw ligt op NAP - 5,0 à NAP - 6,0 m, donker blauw ligt op NAP - 7,0 m, donkerste blauw rechtsboven ligt op NAP - 8,0 m.

Omdat op de rivierbodembodem een (deels) afsluitende laag aanwezig is mag worden verwacht dat niet alleen tijdsafhankelijke grondwaterstroming, maar ook water(over)spanning door vervorming van de ondergrond een belangrijk aandeel heeft in de stijghoogten in de zandlagen. Het gebruik van een de-coupled flow model geeft voor een dergelijke situatie geen goede resultaten.

Zowel met het grondwaterstromingsprogramma DG-Flow als Plaxis kunnen volledig gekoppelde tijdsafhankelijke grondwaterstromingsberekeningen worden uitgevoerd. Het grondwaterstromingsprogramma DG-Flow is niet formeel gevalideerd (gereleased) en bij validatie berekeningen bleek dit nog niet naar behoren te werken. Hierdoor is de keuze gevallen op Plaxis (zie Galavi 2010).

Vervolgens is gekozen hoe een lekkage vanuit het diepe zand kan worden gemodelleerd. Bij de boorpalenwand zijn er twee mogelijkheden voor lekkage vanuit het diepe zand. De eerste mogelijkheid is dat er een kier aan de polderzijde van de boorpalenwand ontstaat door het zetten/vervormen van de grond achter de boorpalenwand. De tweede mogelijkheid is dat er lekkage optreedt via het groutlichaam en langs de ruimte om het strenganker. Daarnaast kan ook een lekkage optreden langs de boorpaal van de PL naar de TZ (Hydraulische kortsluiting) De kier langs de boorpalen is schematisch weergegeven in Figuur 112.



Figuur 112: Principe ontstaan kier aan polderzijde langs boorpaal door vervormen ('snijden') van grond rond de boorpaal.

De situatie die gemodelleerd moet worden is de lekkage langs de boorpalenwand of een anker onder invloed van een tijdsafhankelijke buitenwaterstand (het getij). Dit betekent dat de grondwaterstroming in de dijksectie zal worden gemodelleerd en dat de (kleine) vervormingen van de dijk en ondergrond door veranderende waterstanden wordt gemodelleerd en dat de tijdsafhankelijke belasting veroorzaakt door het getij wordt meegenomen als randvoorwaarde in de berekening.

Zoals eerder aangegeven kunnen met Plaxis volledig gekoppelde tijdsafhankelijke grondwaterstromingsberekeningen worden uitgevoerd. Voor het modelleren van kieren en scheuren zijn er meerdere mogelijkheden die uiteenlopen in complexiteit:

- De scheur kan gemodelleerd worden als een open ruimte tussen de eindige elementen waardoor er een daadwerkelijke scheur in het model ontstaat.
- Op korrelniveau kan ook een model worden gemaakt wat gekoppeld is aan een numeriek stromingsmodel om lekkage en eventueel sedimenttransport op detailniveau te modelleren. Aangezien de uit te voeren analyses zijn bedoeld om het gedrag bij de lekkage op macro schaal te begrijpen, is op microniveau modelleren niet geschikt.
- Een andere optie is om in een eindig elementen model van de dijksectie specifieke sectie elementen te modelleren langs het anker of de boorpaal waarin de doorlatendheid hoger is dan voor de grond rondom de constructie. Hierdoor wordt er artificieel een lekweg aangebracht in het eindig elementen model. Deze aanpak staat bekend onder de Cubic law en baseert de doorlatendheid in deze sectie op basis van de aanname dat er Poisseulle stroming in deze sectie heerst. Deze methode maakt het mogelijk om naast een volledig open kanaal ook een kanaal op te delen in een hoog en laag doorlatend gedeelte.

Bij het modelleren van het lekkagekanaal zijn er meerdere opties, het gebruik van interface elementen om het kanaal te modelleren of volledig uit eindige elementen. De keuze tussen deze twee hangt af van de vereiste nauwkeurigheid en de tijd die beschikbaar is voor de numerieke berekening waarbij een model dat volledig uit eindige elementen bestaat het meeste tijd vergt maar nauwkeuriger is.

De boorpalenwand met verankering is een driedimensionaal complexe constructie waar kieren rondom de paal en het anker kunnen bestaan. Dit is zeer complex om te modeleren en zal ook leiden tot lange simulaties. Een tweedimensionaal model van de lekkage is een versimpeling van de werkelijkheid maar is uitermate geschikt om het principe van de lekkage te modeleren.

Conclusie:

- Geconcludeerd wordt dat de benodigde analyse voor KIS het meest effectieve kan worden gemodelleerd door een tijdsafhankelijk gekoppeld model voor grondwaterstroming en gronddeformatie te gebruiken. Hierin kan door de tijdsafhankelijkheid het cyclisch gedrag van het getij op de kering worden meegenomen en de effecten van de deformatie van de (onder)grond op de grondwaterstroming en vice versa.
- Het modelleren van de lekkage langs de boorpalenwand en het anker kan op deze manier met Plaxis-2D worden uitgevoerd waarbij de lekkages met zogenaamde interfaces kunnen worden gemodelleerd. Hierbij wordt de interactie tussen de TZ en de PL goed berekend. Dit zit expliciet in het model. In basis is hiermee een goede analyse uit te voeren die aansluit bij de werkelijkheid. De werkelijkheid is echter complex. In eerste instantie omdat voor raai 1 en 2 sprake is van een TZ en PL. In tweede instantie omdat uit de peilbuismetingen volgt dat de responsen op het getij in de TZ groter worden verder polderwaarts. Mogelijke verklaring hiervoor is dat op zekere afstand van de dijk in de polder de tussenkleilaag (deels) ontbreekt, of dunner/ doorlatender is dan ter plaatse van de dijk (een natuurlijke vorm van hydraulische kortsluiting).

Of dit daadwerkelijk zo is en zo ja op welke afstand tot de dijk, is onbekend. De variatie in laagopbouw mate van verbinding tussen de TZ en de PL maakt het modelleren in Plaxis onzeker.

- Tevens kunnen met dit model simulaties worden uitgevoerd voor de situatie tijdens een hoogwatergolf (WBN2023 en ontwerppeil). Gezien bovengenoemde zijn vooral de resultaten voor de extrapolaties met Plaxis onzeker.

### Drie-dimensionaal model

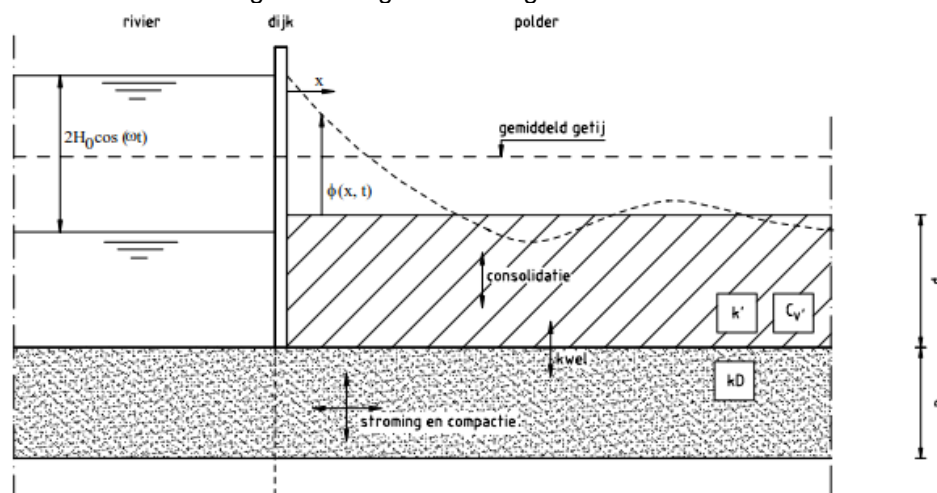
In het gekozen model (Plaxis-2D) zijn de lekkages twee-dimensionaal gemodelleerd. Dit betekent dat in de berekeningen wordt uitgegaan dat alle boorpalen of alle ankers lekken. Teneinde de driedimensionale invloed van een lekkage in te schatten zijn ook berekeningen uitgevoerd met het 3D- grondwaterstromingsprogramma Timm-ML.

### Berekeningen voor overige raaien met Extrapol en de tijdreeksanalyse software Pastas

De berekeningen voor de overige raaien (1 t/m 6) zijn uitgevoerd met een analytisch model in Excel (Extrapol). Hierbij zijn extrapolaties (simulaties) uitgevoerd voor een hoogwatergolf. Daarbij is gebruik gemaakt van de analytische oplossing, zoals weergegeven in Bijlage b4.5 van (TAW 2004(zie Figuur 113). Dit model is ontwikkeld en wordt veel toegepast voor het uitvoeren van tijdsafhankelijke extrapolaties voor gevallen met één zandlaag. De ervaring leert dat hiermee voor deze gevallen goede resultaten worden bereikt. Voor het geval dat alleen een pleistocene zandlaag aanwezig is, zoals bij raai 5 en 6 kan ervan worden uitgegaan dat de resultaten betrouwbaar zijn.

Voor de raaien 1 en 2 (ook 3 en 4) is een tussenzandlaag aanwezig en is dit model minder geschikt omdat voor de TZ en PL aparte berekeningen worden gedaan en er zodoende geen rekening wordt gehouden met interactie daartussen.

Met dit model kunnen geen lekkages worden gemodelleerd.



Figuur 113: Potentiaal in tweelagensysteem (bron (TAW 2004) Bijlage b4.5, Figuur b4.11).

- Tevens zijn voor de overige raaien analyses uitgevoerd met de open source tijdreeksanalyse software Pastas. Voor elke peilbuis is een tijdreeksanalysemodel gemaakt zoals genoemd bij de Tijdreeksanalyse (zie Artesia Februari 2024) waarbij de stijghoogten zijn berekend als gevolg van een hoogwatergolf. Dit is uitgevoerd voor zowel de TZ als de PL voor de raaien 1 t/m 6. Voor het geval dat alleen een pleistocene zandlaag aanwezig is, zoals bij raai 5 en 6 zien we dat de resultaten van zowel Extrapol als Pastas nagenoeg dezelfde resultaten geven, het verschil is slechts 10 tot 20 cm. Hoewel weinig ervaring is met het uitvoeren van extrapolaties met Pastas geeft dit vertrouwen in de simulaties/extrapolaties die met Pastas zijn uitgevoerd. Impliciet wordt met dit model rekening gehouden met de interactie tussen de TZ en de PL.

Met dit model kunnen ook geen lekkages worden gemodelleerd. Locatiekeuze Plaxis analyses.

Voor de geavanceerde berekeningen met Plaxis is het dwarsprofiel ter plaatse van sectie F1-1, raai 2 gebruikt. Onderbouwing is dat in ieder geval de analyses dienden plaats te vinden op een locatie met een TZ omdat hier als gevolg van hydraulische korsluiting tussen de TZ en de PL de grootste invloed op waterveiligheid mag worden verwacht. Als gevolg van deze hydraulische korsluiting zal de stijghoogte in de TZ namelijk worden verhoogd. Ter plaatse van de andere locatie met een TZ, F2-2, zijn de gemiddelde stijghoogten en responsen bij de boorpalenwand in de TZ en de PL redelijk vergelijkbaar met F1-1. Mogelijk dat het effect van vernatting bij F2-2 iets groter is omdat de boorpalenwand lager in het talud staat. De hoogte van deze wand is echter uitzonderlijk laag (NAP + 0,50 m tot NAP – 0,90 m) in vergelijking met al de overige 17 locaties met boorpalenwanden (bij F1-1 NAP + 1,06 tot NAP + 0,08 m en op de overige locaties varieert de hoogte tussen NAP + 0,50 m en NAP + 3,00 m). Locatie F2-2 is daarmee minder representatief en daarnaast is de meeste discussie over de boorpalenwand ontstaan bij sectie F1-1.

### J.3.2 Dwarsprofiel Plaxis analyses

Voor het dwarsprofiel van raai 2 wordt verwezen naar (zie Bijlage A.3). Buitendijks is nauwelijks voorland aanwezig (breedte 10 m) met een hoogte van circa NAP + 1,50 m. De kruin van de dijk ligt op NAP + 5,9 m en de weg op de binnenberm ligt op een hoogte van circa NAP + 3,9 m tot + 3,7 m. Vanaf de teen van de dijk loopt het maaiveld geleidelijk af tot de Bakwetering waar de maaiveldhoogte NAP - 1,80 m is.

De rivier heeft een breedte van circa 350 m. Het grondwaterstromingsmodel is hierdoor buitenwaarts gemodelleerd tot het hart van de rivier en dus 170 m uit de buitenteen van dijk. Invloedsfeer dijk:

De invloedssfeer van veranderingen van de buitenwaterstand op de stijghoogte in het diepe zand is ongeveer 3 maal de leklengte. Idealiter zou het gemodelleerde achterland deze lengte moeten hebben. Praktische (stationaire) leklengten voor de Nederlandse situatie kunnen variëren van 100 m tot 3000 m (zie ook TR Waterspanningen bij Dijken, Paragraaf 2.2.10 en Bijlage 3 en 4). Wanneer het tijdsafhankelijk effect van kortdurende hoge waterstanden in rekening wordt gebracht, leidt dit tot veel lagere waarden van de leklengte. De leklengte van het achterland wordt gegeven door:

$$L_{lek} = \sqrt{(K_z * D_z * D_t / K_t)}$$

Inschatting van de ondergrondparameters:

$K_z$  = Doorlatendheid zand (m/s) is  $2^e - 4$  m/s = 17 m/d.

$K_t$  = Doorlatendheid toplaag (m/s) is  $1^e - 7$  m/s.

$D_z$  = Dikte watervoerende zandlaag (m) is circa 12 m (van NAP – 14 tot NAP – 26).

$D_t$  = Dikte deklaag (m) is circa 10 m.

$$L_{lek} = \sqrt{(2 \text{ E-}4 * 12 * 10 / 1 \text{ E-}7)} = 490 \text{ m.}$$

In het model is vanwege model-redenen (het mesh) een lengte van het achterland gemodelleerd van 1500 m.

### J.3.3 (Onder)grondopbouw

De ondergrond opbouw voor het dwarsprofiel in raai 2 (zie Paragraaf 0) is ontleend aan de boringen en sonderingen die ten behoeve van het dit onderzoek zijn uitgevoerd (zie Bijlage A.3).

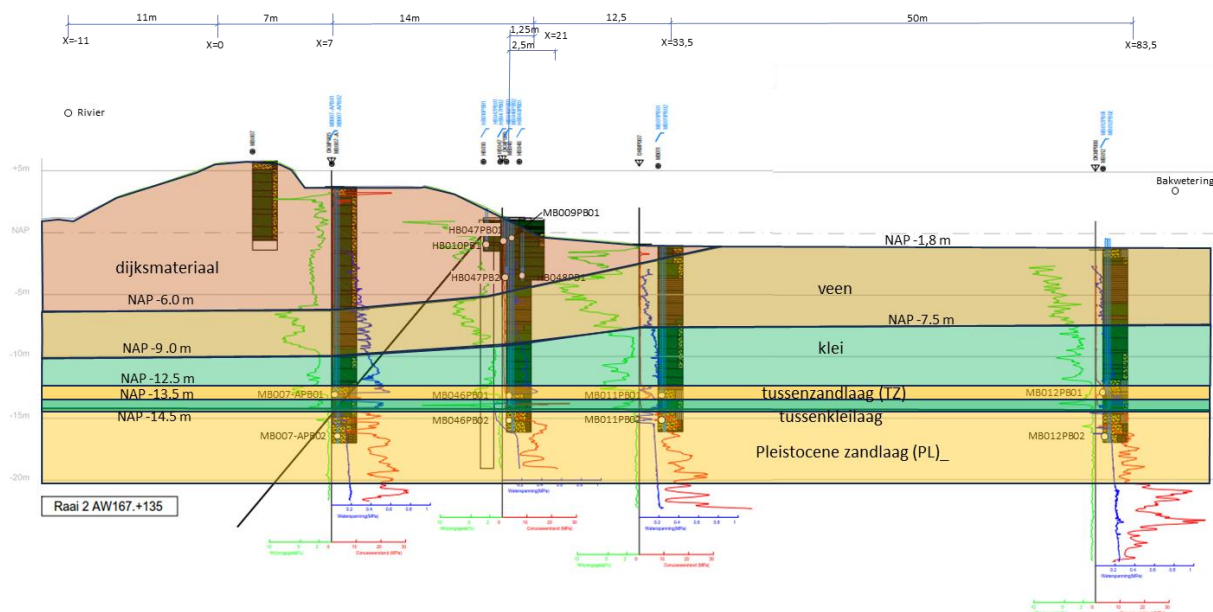
De TZ ligt op een diepte van NAP – 12,5 m tot NAP – 13,5 m en heeft een gemiddelde dikte van 1 m. De PL begint vanaf circa NAP - 14,5 m. Tussen de PL en de TZ is een afsluitende laag aanwezig die binnendijks een gemiddelde dikte heeft van 1 m.



Het pakket slappe lagen boven de TZ bestaat voor circa 6 m uit veenlagen in combinatie met kleiige veenlagen of sterk humeuze kleilagen. Opgemerkt wordt het pakket slappe lagen ten behoeve van het geohydrologische model in het algemeen als één laag wordt geschematiseerd (wel met mogelijk verschillende parameters in voor en achterland). In dit geval is de veenlaag in de ondergrond apart gemodelleerd omdat dit gezien de richtingsafhankelijke doorlatendheid van invloed kan zijn op de resultaten. De horizontale doorlatendheid is hierbij een factor 5 doorlatender verondersteld dan de verticale doorlatendheid.

De rivierbodem snijdt niet in, in de TZ en de PL. De rivierbodem heeft zoals eerder aangegeven namelijk een diepte van NAP - 5,0 m tot NAP - 7,0 m. Vanaf de rivierbodem zijn echter geulafzettingen aanwezig waarvan het meest waarschijnlijk is dat deze uit grof zand bestaan. Daarmee reduceert de hydraulische weerstand op de rivierbodem, voor F1-1 en F2-2 begint de afsluitende laag volgens Dinoloket op circa NAP - 8 m. Ter plaatse van alle monitoringslocaties (raai 1 t/m 6), lijkt wel een afsluitende laag onder de rivierbodem aanwezig (zie Universiteit Utrecht / Deltares 2011). Of beter gezegd dat er meer kans is dat daar afsluitende lagen aanwezig zijn. De onderkant van het 1e WVP ligt op circa NAP - 28 m. Daaronder ligt een scheidende laag Formatie van Peize en Formatie van Waalre (bron Dinoloket). Daarmee is de dikte van het 1<sup>e</sup> WVP hier circa 14 m.

In Figuur 114 is het dwarsprofiel met ondergrondopbouw gegeven.

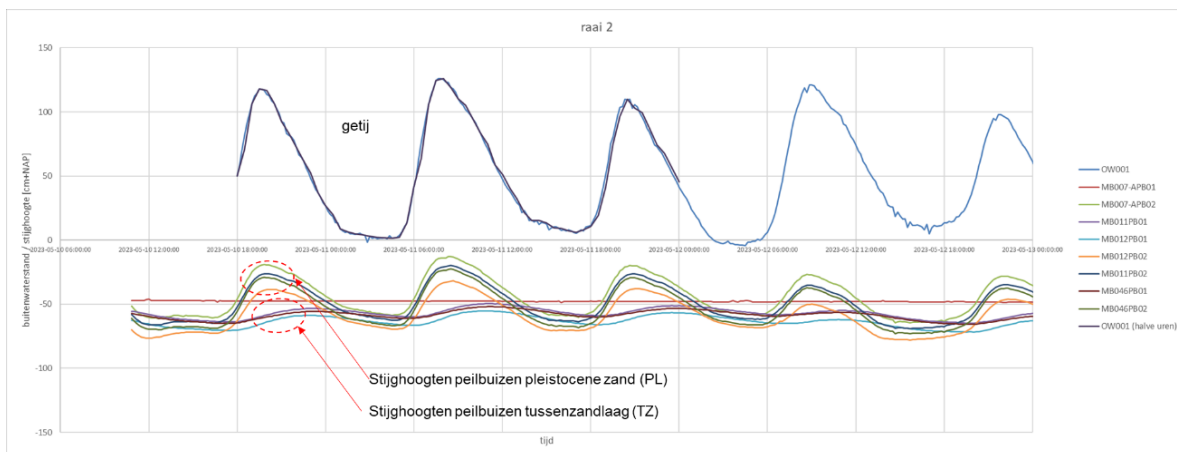


Figuur 114: Geschematiseerde dwarsprofiel in Plaxis met ondergrondopbouw (raai 2 locatie F1-1).

### J.3.4 Waterstanden en stijghoogten

- Voor de kalibratie is de buitenwaterstand (het getij) en zijn de stijghoogten in de peilbuizen genomen van d.d. 10 en 11-05-2023. (10-05-2023 18:00 uur – 12-05-2023 0:00 uur (totaal dus 30 uur = 1,25 dagen). Zie Bijlage D.2.2.1 en Figuur 118.





Figuur 115: Gemeten buitenwaterstand en stijghoogten in raai 2 d.d. 10 en 11-05-2023.

- De stationaire stijghoogten in de PL zijn gebaseerd op de isohypsen van het eerste watervoerende pakket van het LHM (Landelijk hydrologisch model) (bon [www.grondwatertools.nl](http://www.grondwatertools.nl)). Voor de hier uit te voeren analyses bij raai 2 wordt een waarde aangehouden van NAP – 1,25 m op 350 m en NAP – 1,50 m op een stand van 700 m (uitgaande van beperkte drinkwaterwinning van Oasen) zoals past bij de metingen vóór 2-06-2023. Dit resultaat IS met gemiddeld 2500 m<sup>3</sup>/uur drinkwaterwinning.
- De hoogte van het freatisch vlak ter plaatse van de deksloof in raai 2 varieert tussen NAP – 0,60 m en NAP – 1,10 m tijdens de metingen. Voor raai 1 varieert dit tussen NAP – 0,5 m tot – 0,7 m. Omdat voor analyse van de invloed van lekkages een laag freatisch vlak een conservatieve aanname is (grotere lekkage naar maaiveld) is dit in de berekeningen aangehouden.
- Het polderpeil in Nieuw Lekkerland is NAP – 2,12 m (winterpeil) en NAP – 2,22 m (zomerpeil). Het peil in de bakwetering is hieraan gekoppeld. Tijdens de meetperiode was dit circa NAP – 2,10 m.
- Bij de grondwaterstromingsanalyses wordt geen rekening gehouden met opdrijven. Het is echter mogelijk dat tijdens de metingen (of na extrapolatie naar WBN) de grenspotential optreedt. In 2013 is door Wi+Bo de grenspotential bepaald voor vak F. Op basis van de in deze berekening gegeven volumegewichten is voor raai 2 de grenspotential ingeschat voor de PL en de TZ. De resultaten zijn samengevat in Tabel 28. Omdat de bakwetering hier niet breder is dan circa 9m en de dikte van het pakket slappe lagen circa 10,5 m is wordt niet verwacht dat de sloot het opdrijven beïnvloed waardoor de grenspotential ter plaatse van de sloot circa NAP + 2,6 m is.

Tabel 28: Inschatting grenspotentialen raai 2 AW167.

Locatie in dwp	Maaiveldhoogte [m+NAP]	Grenspotential vanuit PL [m+NAP]	Grenspotential vanuit TZ [m+NAP]	Opmerking
Binnenteen	-1,50	5,0	3,1	
Slootrand	-1,80	4,5	2,6	
sloot	-3,0	3,5	0,7	Waterpeil NAP - 2,12 m

- De Waterstand bij en Norm (WBN) is gegeven in Bijlage C.2 dit voor zowel 2023 voor beoordeling van de palenwand voor de huidige situatie (WBN2023) als voor beoordeling van het ontwerp als zou het in 2015 zijn ontworpen voor een periode van 100 jaar (WBN2115).

### J.3.5 Geohydrologische parameters

Mede op basis van (Universiteit Utrecht / Oasen Drinkwater 2015) zijn de in Tabel 29 weergegeven doorlatendheden ingeschat.

De volumegewichten van de grondlagen, elasticiteitsmoduli en dwarscontractiecoëfficiënten zijn gebaseerd op de door de aannemer uitgevoerde Plaxis berekeningen ten behoeve van het ontwerp, in het dwarsprofiel ter plaatse van locatie F1-1.

De doorlatendheid van de grond ter plaatse van de boorpaal is in het model gemodelleerd als 50% van de doorlatendheid van de omringende grond. De boorpalen zelf zijn namelijk water-ondoorlatend, hebben een diameter van gemiddeld 1,07 m en een h.o.h. afstand van 2,14 m.

Tabel 29: Inschatting geohydrologische parameters.

Grondlaag	Volumiek gewicht [kN/m <sup>3</sup> ]	Doorlatendheid k [m/s – m/d]	Porositeit n [-]	Elasticiteits modulus E [N/m <sup>2</sup> ] onder/naast	Dwarscontractie coëfficiënt v [-]
Dijk	18	1 E-7 – 8 E-3	0.33	8000	0.2
Deklaag klei	16	1 E-7 - 8 E-3 5 E-8 - 5 E-3	0.33	5000 / 2500	0.2
Deklaag klei rivier	16	0.03 (kan ook 0.06)		2500	0.2
Deklaag veen	12	(kh=5*kv) kv= 1 E-7 - 8E-3 kh = 5 E-7 - 4E-2	0.33	6500 / 1400	0.2
TZ	20	1 E-4 – 10	0.33	20000	0.2
tussenkleilaag	19	1E-7 – 8 E-3		7000 / 6000	0.2
PL	20	2 E-4 – 20 6 E-4 - 60	0.33	30000	0.2

### J.3.6 Modelling hydraulische kortsluiting van PL naar TZ en lekkages/vernatting langs boorpaal en anker

Met behulp van grondwaterstromingsberekeningen zijn de verschillende hypothesen van vernatting en hydraulische kortsluiting gemodelleerd. Dit is gedaan om de invloeden daarvan op de stijghoogten in de TZ en de PL en op de hoogte van het freatisch vlak te bepalen. Hierbij is onderscheid gemaakt in:

1. Modelling lekkage/vernatting langs boorpaal van TZ naar deksloof.
2. Modelling lekkage/vernatting rond het anker van TZ naar deksloof.
3. Modelling hydraulische kortsluiting langs boorpaal van PL naar TZ.

#### Ad 1 en 2: Modelling lekkage/vernatting langs de boorpaal en anker van TZ naar deksloof

Voor pipingonderzoek (POVM 2019) zijn grondwaterstromingsberekeningen uitgevoerd (stationair) om de stroming in een wel te kunnen bepalen. Dit is 2D en 3D uitgevoerd. De spleet of een gat is in grondwaterstromingsmodellen te modelleren en de invloed hiervan is te berekenen. Vraag voor KIS is in eerste instantie hoe en waar een spleet langs de boorpaal zich zal ontwikkelen (zie ook Figuur 112 in Bijlage J.3.1). Hypothese is dat deze spleet zich door kruip van de ondergrond in de loop de tijd (jaren) zou kunnen ontwikkelen. De hypothese is in Paragraaf 3.3 weergegeven. De vraag daarbij is ook of de spleet zich over de gehele lengte van de paal zal ontwikkelen. Voor de hypothese wordt ervan uitgegaan dat de spleet zich gelijkmatig over de lengte van paal in het holocene pakket ontwikkeld.

Dit is conservatief omdat het aannemelijk is dat de kier aan onderzijde van het holocene pakket slappe lagen zich moeilijk kan ontwikkelen en omdat de in de grond gevormde paal diverse uitstulpingen zal hebben.

Voor de lekkage langs de ankers is de hypothese dat als gevolg van de uitvoering ruimte aanwezig is tussen ankerstang en boorgat. Daarnaast is in een aantal gevallen geconstateerd dat bij schoonspoelen van dit gat water uit het naastliggende ankergat is gespoeld nadat het groutanker daar was gemaakt. Geconcludeerd is dat de groutprop niet voldoende diep in het holocene slappe lagenpakket is voortgezet.

De vraag is wat er is gebeurd in de spleet (aan polderzijde langs de boorpaal) of het gat (rond het anker) afhankelijk van de stromingsdruk:

- Scenario 1: Spleet gevuld met water  
Bij weinig stromingsdruk zal mogelijk geen zand ter plaatse van de onderkant van de spleet in beweging komen en is de doorlatendheid in de spleet zelf heel hoog. In theorie kan berekend worden bij welk verval (of stroomsnelheid) bij de instroomopening) de zandkorrels niet in beweging komen. Hiervoor zijn in het verleden wel eens berekeningen uitgevoerd, maar de benodigde invoerparameters zijn niet goed bekend. Het aanstroomoppervlak is in dit geval dus beperkt tot de oppervlakte van de lekkage (instroomopening). Deze lekkage is vooral onder dagelijkse omstandigheden van belang (langdurig). Tijdens langdurig hoogwater (denkende aan enkele weken) zal het debiet groter zijn maar dit is tijdelijk en daarom minder van belang voor vernatting. (Deze lekkage heeft geen invloed op waterveiligheid). Lekkage zal alleen optreden als de stijghoogte in het zand hoger is dan de hoogte van het freatisch vlak ter plaatse van de uitstroomopening. De te modelleren doorlatendheid in de spleet of het gat is voor dit scenario zeer hoog. Uit POVM2019 volgde de bovengrens van de doorlatendheid in het opbarstkanaal uit de Poiseuille vergelijking, ( $K_{rep} = 8.18 E3 \text{ m/s}$ ) en werd toegepast in de scenario's waar het opbarst-kanaal als een opening werd gemodelleerd. Deze grote doorlatendheid betekent enkel dat de stroming door het gat weinig weerstand ondervindt, niet dat het water ook daadwerkelijk met deze snelheid door het gat zal stromen. (In de in dit rapport gepresenteerde grondwaterstromingsberekeningen zijn gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd waaruit de (geringe) invloed van de doorlatendheid in de spleet blijkt).
- Scenario 2: Spleet gevuld met losgepakt zand  
Bij hoge stromingsdruk zal de gradiënt bij de instroomopening op het grensvlak zandlaag en holocene slappe lagenpakket erg hoog zijn waardoor ervan kan worden uitgegaan dat het zand in beweging komt. Omdat nergens binnen het project KIS is geconstateerd dat zand uitstroomt bij het maaiveld zal het zand dat in beweging komt een maximaal volume hebben van de inhoud van de holte van het lekkagekanaal. Dit zand komt uit de PL of de TZ en vormt daar een holte waardoor het aanstroomoppervlak wordt verhoogd. De doorlatendheid in het lekkagekanaal is echter die van zeer licht gepakt zand (dat al dan niet nog enigszins in beweging is). De maximale grootte van deze holte (waarin de doorlatendheid erg hoog is) kan worden berekend. Dit is een 3D effect. Door dit 2D te modelleren waarbij tevens het uitgangspunt wordt gehanteerd dat alle palen of ankers tegelijkertijd lekken, kan ervan worden uitgegaan dat de berekende invloed een bovengrensbenadering is. Een bovengrens van de doorlatendheid is die van extreem los gepakt zand, waarvoor een conservatieve waarde wordt aangehouden van  $10^{-1}$  à  $10^{-2}$  m/s. (Zie ook POVM 2019).
- Voor het geval van KIS is becijferd wat de grootte van de bovengenoemde holte (uitgegaan wordt van een kegel) zou zijn (2D en 3D) voor zowel de lekkage langs de boorpaal (uitgaande van een spleetdikte van 1cm) en van het anker uitgaande van een diameter van de lekkage van 15 cm waarbinnen zich het anker met ribbelbuis met een diameter van 10 cm bevindt (effectief een lekkage met een diameter van circa 11cm).

Hieruit volgt dat de holte in Plaxis 2D kan worden gemodelleerd met een driehoek met een basis van 0,485 m en een hoogte van 24 cm (voor de boorpaal) en een driehoek met een basis van 0,75 m en een hoogte van 0,37 m (voor het anker).

- Scenario 3: Ander scenario is de situatie tussen scenario 1 en 2 waarbij een deel van de spleet of het gat gevuld is met zand waarbij de holte dan dus kleiner is. Door minder zand in de spleet zal het debiet toenemen maar door een kleinere instroomoppervlakte zal het debiet afnemen. Hoewel dit scenario reëel is en mogelijk maatgevend is, wordt verwacht dat de mate van invloed orde grote gelijk is aan scenario's 1 of 2 en is daardoor niet beschouwd.

#### Breedte spleet langs boorpaal

Als op termijn een spleet langs de boorpaal zou ontstaan wordt, zoals eerder aangegeven, aangenomen dat deze alleen aan de polderzijde van de paal ontstaat. In het model is deze spleet gemodelleerd, interface-element met een vaste breedte van 10cm (2D). Om de invloed van een 1cm brede spleet te berekenen voor lekkage bij alle boorpalen (met een diameter van gemiddeld 1,07 m en een h.o.h. afstand van 2,14 m dient de doorlatendheid van de spleet in het model een factor 20 te worden verlaagd ten opzichte van de werkelijke doorlatendheid (=oppervlakte spleet 2D-model / oppervlakte werkelijk =  $0,10 \text{ m} \times 2,14 \text{ m} / 0,01 \text{ m} \times 1,07 \text{ m} = 20$ ). De representatieve doorlatendheid wordt dan dus  $K_{\text{spleet-rep}} = K_{\text{spleet}} / 20$ .

In Plaxis dient voor het interface element een zogenaamde 'drainage conductivity dk' (in  $\text{m}^3/\text{dag}/\text{m}$ ) te worden opgegeven. Dit is de doorlatendheid vermenigvuldigd met de breedte van de spleet.

Uitgaande van losgepakt zand met en doorlatendheid van 0.01 m/s dient als drainage conductivity een waarde te worden gehanteerd van ( $K_{\text{spleet-rep}} \times \text{breedte spleet} = (K_{\text{spleet}} / 20 \times \text{breedte spleet} = 0,01 \text{ m/s} / 20 \times 0,10 \text{ m} = 0,0005 \text{ m}^2/\text{s} =) 4,3 \text{ m}^3/\text{dag}/\text{m}$ .

Om de spleet als leeg (zonder zand) te modelleren dient de doorlatendheid zoals eerder aangegeven zeer groot te zijn.

Deze grote doorlatendheid betekent enkel dat de stroming door het gat weinig weerstand ondervindt, niet dat het water ook daadwerkelijk met deze snelheid door het gat zal stromen. Ik de analyses is een waarde voor de drainage conductivity aangehouden van  $1000 \text{ m}^2/\text{d}$ .

#### Gat rond het anker

Als van lekkage langs de ankerstang wordt uitgegaan, zal het gat (langs het anker) waarschijnlijk beperkt van afmetingen zijn. In de analyses is uitgegaan van een diameter van de lekkage van 15 cm waarbinnen zich het anker met ribbelbuis met een diameter van 10 cm bevindt (effectief een lekkage met een diameter van circa 11 cm). De ankerstangen staan h.o.h. 2,14 m. In het Plaxis model is deze spleet gemodelleerd met een vaste breedte van 10 cm (2D). Om de invloed van een lekkage langs alle ankers te berekenen dient de doorlatendheid in de spleet in het model met circa een factor 23 te worden verlaagd ten opzichte van de werkelijke doorlatendheid ( $= 2,14 \text{ m} \times 0,10 \text{ m} / (0,24 \times \pi \times 0,11^2 = 23)$ ). De representatieve doorlatendheid wordt dan dus  $K_{\text{rep-gat-anker}} = K_{\text{gat-anker}} / 23$ . Uitgaande van losgepakt zand met en doorlatendheid van 0,01 m/s dient dit in Plaxis te worden gemodelleerd met een drainage conductivity van ( $K_{\text{rep-gat-anker}} \times \text{breedte spleet} = (K_{\text{gat-anker}} / 23 \times \text{breedte spleet} = 0,01 \text{ m/s} / 23 \times 0,10 \text{ m} = 0,00043 \text{ m}^2/\text{s} =) 3,7 \text{ m}^2/\text{d}$ .

### **Ad 3 Modelling hydraulische kortsluiting langs boorpaal van PL naar TZ**

De hypothese is in Paragraaf 3.3 weergegeven. Als gevolg van het ontstaan van grintnesten in de boorpalen en/of het tijdens het trekken van de boorcasing optreden van blow-outs is de geachte dat een spleet of gat zou kunnen ontstaan tussen de twee zandlagen (TZ en PL). Het maken van een inschatting van de grootte van de opening tussen deze twee zandlagen is lastig.

Tevens is het lastig in te schatten of in de ontstane opening wel of geen zand zal toetreden. Daarom zal worden uitgegaan van enkele scenario's. Ik het model is deze spleet vast gemodelleerd met een breedte van 10 cm (2D).

Om de invloed van een spleet met een werkelijke breedte van 10 cm te berekenen dient de doorlatendheid in de spleet in het model met circa een factor 2 te worden verlaagd ten opzichte van de werkelijke doorlatendheid (=  $0,10 \text{ m} * 2,14 \text{ m} / 0,10 \text{ m} * 1,07 \text{ m} = 2$ ). De representatieve doorlatendheid wordt dan  $K_{\text{spleet-rep}} = K_{\text{spleet}} / 2$ . Uitgaande van losgepakt zand met en doorlatendheid van 0,01 m/s dient dit in Plaxis te worden gemodelleerd met een drainage conductivity van ( $K_{\text{spleet-rep}} * \text{breedte spleet} = (K_{\text{spleet}} / 2 * \text{breedte spleet} = 0,01 \text{ m/s} / 2 * 0,10 \text{ m} = 0,0005 \text{ m}^2/\text{s} = 43 \text{ m}^2/\text{d}$ ).

In Tabel 30 zijn de verschillende scenario's met representatieve doorlatendheden weergegeven:

Tabel 30: Scenario's en daarbij te hanteren representatieve doorlatendheden voor spleet langs voorpaal of gat langs anker.

Omschrijving	Scenario	Breedte spleet of gat	Doorlatendheid in spleet of gat [m/s] en [m/d]	Representatieve doorlatendheid Krep [m/s] en [m/d]	Drainage conductivity interface in PLAXIS model [m2/d]
Spleet langs boorpaal naar maaiveld	1	1cm breed, volledig open	>>	\	1000
	2	1cm breed, losgepakt zand	0.01 / 864	0.0005 m/s = 43m/d	Interface 10cm breed levert drainage conductivity van 4.3 m2/d
Lekkage langs het anker:	3	Gat h.o.h. 2.14m effectieve diameter 11cm volledig open	>>	>>	1000
	4	Gat h.o.h. 2.14m effectieve diameter 11cm ,losgepakt zand	0.01 / 864	0,00043 m/s = 37 m/d	Interface 10cm breed levert drainage conductivity van 3,7 m2/d
Lekkage langs boorpaal, tussen Pleistoceen en tussenzandlaag	5	Gat/spleet 10cm breed volledig open	>>	>>	1000
	6	Gat/spleet 10cm breed normaal gepakt zand	0,0002 / 17	0.0001 m/s = 8,6 m/d	Interface 10cm breed levert drainage conductivity van 0,86 m2/d
	7	Gat/spleet 10cm breed losgepakt zand	0.01	0.005 m/s = 430 m/d	Interface 10cm breed levert drainage conductivity van 43 m2/d

Het dijklichaam is grotendeels opgebouwd uit klei en is daarmee relatief ondoorlatend. Vernatting vanuit de ondergrond kan alleen optreden als het freatisch vlak (zonder lekkage) lager is dan de stijghoogte in het diepe zand (zie ook Paragraaf 3.3). De mate van vernatting zal daarnaast afhangen van de doorlatendheid van de grond boven het uittredepunt van de lekkage. De deksloof in raai 2 is circa 1 m onder maaiveld afgewerkt. Boven de deksloof is een kleibekleding aanwezig. Verwacht mag worden dat deze kleibekleding gestructureerd is en daardoor een relatief grote relatieve doorlatendheid bezit. Op basis van ervaringsgegevens is bekend dat deze een relatieve doorlatendheid kan krijgen ter grootte van die van zand. In de analyses is hierdoor uitgegaan van een vrij conservatieve doorlatendheid van  $5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  voor de gestructureerde kleibekleding. Bij deze relatief hoge doorlatendheid zal meer vernatting worden berekend.

In de hierboven beschreven uit te voeren analyses (2D) wordt er vanuit gegaan dat er lekkage is langs alle palen of alle ankers. Dit is een conservatieve aanname in de berekeningen omdat er vanuit mag worden gegaan dat in werkelijkheid niet al palen of ankers tegelijkertijd lekken.

## J.4 Berekeningsresultaten

### J.4.1 Raai 2 Plaxis

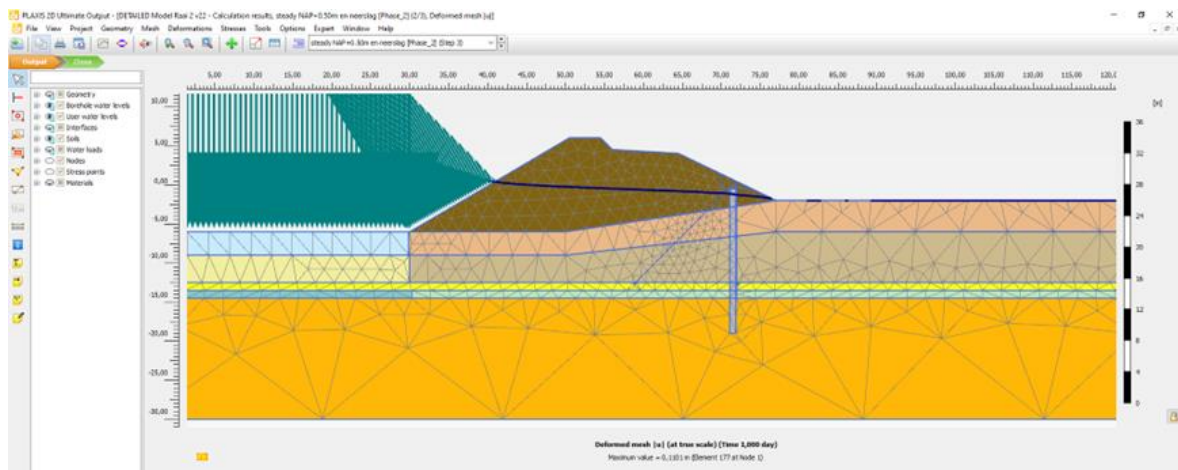
#### J.4.1.1. Kalibratie model

In eerste instantie is een modelschematisatie gemaakt waarbij de rand van het model aan polderzijde op een afstand van 750 m van de dijk lag. In dit model is een eerste inschatting van de ondergrondparameters ingevoerd en is vervolgens bepaald of de berekende stijghoogten bij de buitenwaterstand tijdens de metingen overeenkwamen met de peilbuismetingen. Op basis van deze berekeningen zijn de ondergrondparameters enigszins aangepast (zie Tabel 31) waarna de berekende stijghoogten in zowel de PL als de TZ en de hoogte van het freatisch vlak ter plaatse van de palenwand nagenoeg overeenkwamen met de metingen. In later stadium is gecontroleerd of de modelrand ver genoeg is aangenomen door de modelrand te verplaatsen naar 1500 m (circa 3 maal de Leklengte). Hoewel de verschillen minimaal bleken (zie onder gevoeligheidsberekeningen) zijn de vervolgberekeningen toch met het laatstgenoemde model uitgevoerd. Navolgend zijn de resultaten gegeven van de gekalibreerde parameters in het model waarbij de modelrand op 1500 m richting de polder ligt.

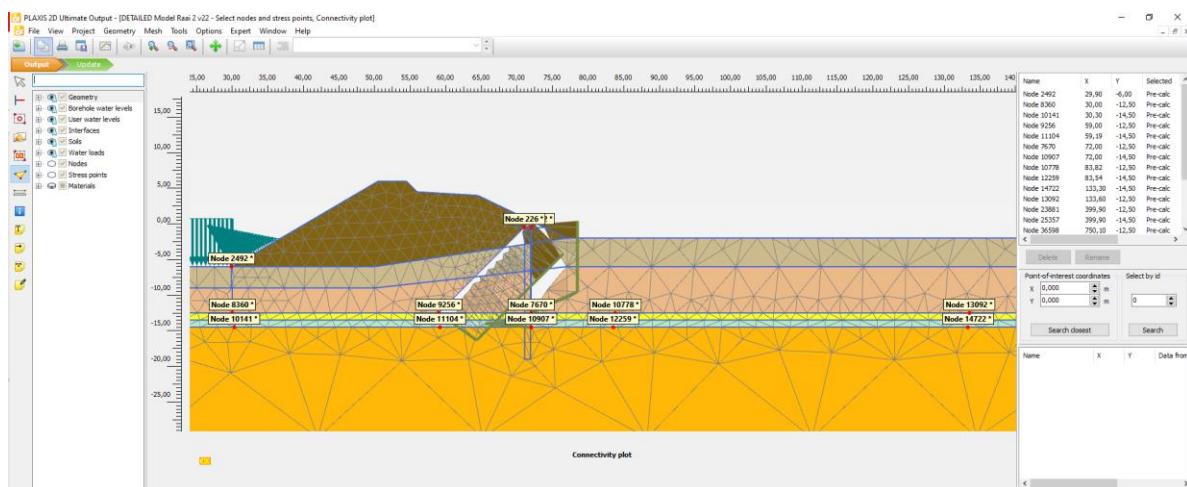
Tabel 31: Gekalibreerde geohydrologische parameters (Plaxis file: Detailed Model raai2 v22).

Grondlaag	Volumiek gewicht [kN/m <sup>3</sup> ]	Doorlatendheid d k [m/s – m/d]	Porositeit n [-]	Elasticiteitsmodulus E [N/m <sup>2</sup> ] onder/naast	Dwarscontractie coëfficiënt v [-]
Dijk	18	8 E-3	0.33	8000	0.2
Deklaag klei	16	8 E-3	0.33	1250	0.2
Deklaag klei rivier	16	0.04		2500	0.2
Deklaag veen	12	kv= 0.008 kh = 0.04 (kh=5*kv)	0.33	6500 / 1400	0.2
Deklaag veen rivier	12	kv= 0.04 Kh = 0.20 (kh=5*kv)	0.33	1400	0.2
TZ	20	10	0.36	20000	0.2
tussenklaag	19	8 E-3	0.33	7000 / 6000	0.2
Tussenklaag rivier	19	0.04	0.33	6000	0.2
PL	20	20	0.36	30000	0.2





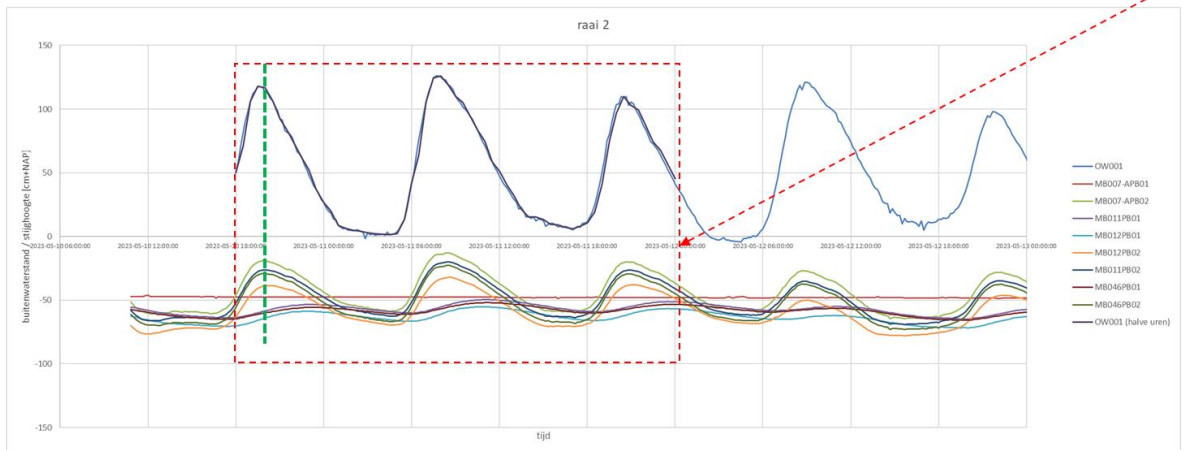
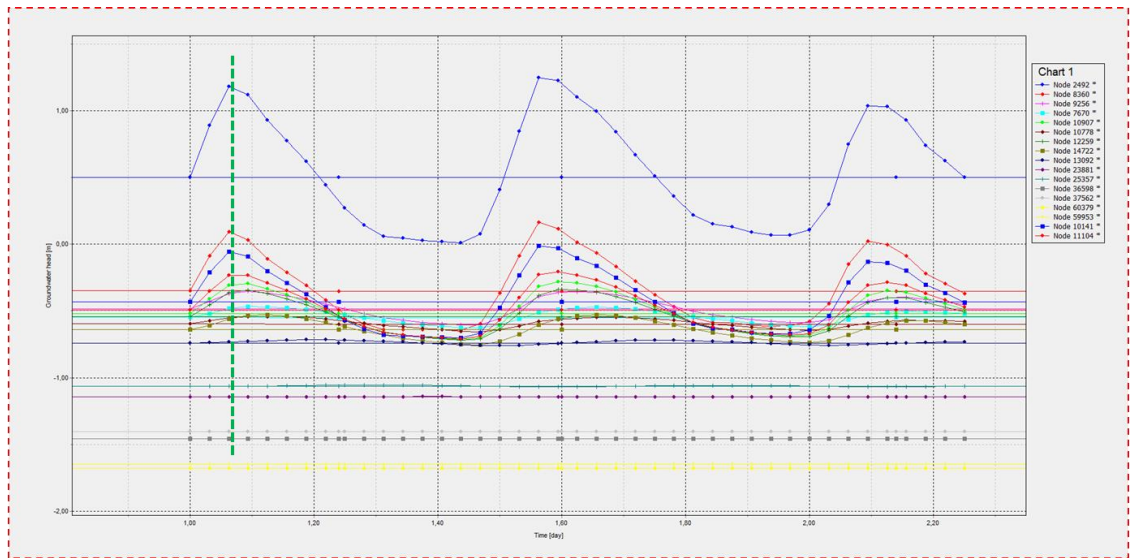
Figuur 116: Plaxis model (Plaxis file: Detailed Model raa2 v22) waarin aangegeven de boorpalenwand en ankers (hoogte freatisch vlak ter plaatse van boorpaal is NAP - 1,05 m).



Figuur 117: Plaxis model (file: Detailed Model raa2 v22) waarin aangegeven de locaties van de berekenings-knoppen in de TZ (geel) en de PL (oranje).

Uit de berekeningen volgt dat de hoogte van het freatisch vlak ter plaatse van de boorpaal op NAP -1,05 m ligt (zie ook Figuur 116). Dit komt goed overeen met de metingen waaruit volgt dat de hoogte varieert tussen NAP – 0,60 m en NAP - 1,10 m. Omdat voor analyse van de invloed van lekkages een laag freatisch vlak een conservatieve aanname is (grotere lekkage naar maaiveld) is dit een mooi (conservatief) resultaat.

In onderstaande Figuur 118 en Tabel 32 zijn de berekende en gemeten stijghoogten in de TZ en de PL weergegeven. Hieruit volgt dat gemeten en berekende waarden van de gemiddelde stijghoogten en responsen (amplitude) in de TZ en de PL ter plaatse van de boorpaal en 15 m uit de boorpaal richting de polder redelijk goed overeenkomen (zie geel gemarkeerde waarden in Tabel 32. Vooral deze locaties zijn van belang omdat vooral deze stijghoogten de waterveiligheid van de boorpalenwand bepalen. De gemiddelde berekende stijghoogte wijkt hier niet meer dan 5 cm af in de TZ en 11 cm in de PL. De berekende responsen in de TZ en de PL komen redelijk goed overeen en wijken niet meer dan 3cm respectievelijk 6 cm af. Op de andere locaties wijken de berekende waarden over het algemeen af van de gemeten waarden. Dit wordt echter minder van belang geacht.



Figuur 118: Resultaten Plaxis model (file: Detailed Model raai2 v22) met berekende stijgheugten (boven) en gemeten stijgheugten (onder).

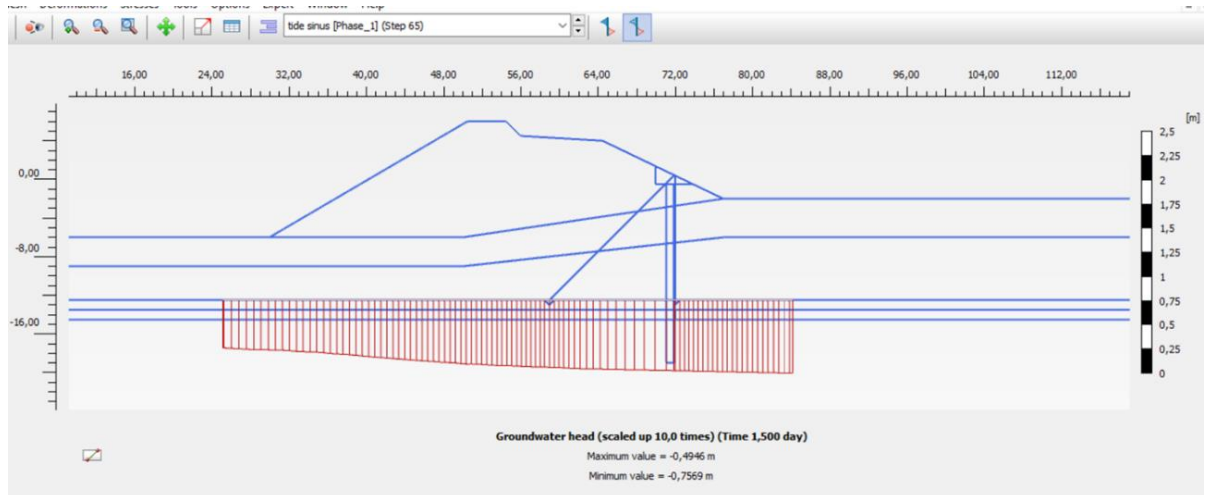
Tabel 32: Resultaten Plaxis model (file: Detailed Model raai2 v22) met berekende en gemeten stijghoogten (De geel gearceerde waarden betreffen de locaties ter plaatse van de boorpaal en op 15 m polderwaarts van de boorpaal).

locatie				diepte	Knoop nr. Plaxis	gemeten		Berekend x-eind is 1500m en gem getij	
Locatie	TZ of PL	X w erkelijk [m]	X PLAXIS model [m]	Y [m+NAP]		Gem. stijghoogte [m+NAP]	2*amplitude [m]	Gem. stijghoogte [m+NAP]	2*amplitude [m]
Buitenteen		-20	30	-6	2492	0,5	1,3	0,5	1,25
Buitenteen	TZ	-20	30	-12,5	8360			-0,35	
Pb- rivierw aarts = anker:	TZ	7	57	-12,5	9256	-0,48		-0,48	0,24
Pb boorpaal = boorpaal:	TZ	22	72	-12,5	7670	-0,57	0,13	-0,55	0,16
PB ca.15m uit boorpaal	TZ	33,5	83,5	-12,5	10778	-0,55	0,14	-0,6	0,11
Pb ca 75m uit boorpaal	TZ	83,5	133,5	-12,5	13092	-0,61	0,15	-0,74	0,045
Polder	TZ	350	400	-12,6	23881	-1,25		-1,14	0
Polder	TZ	700	750	-12,7	36598	-1,5		-1,46	0
Polder	TZ	1450	1500	-12,5	60379			-1,67	0
Buitenteen	PL	-20	30	-14,5	10141			-0,43	
Pb- rivierw aarts = anker:	PL	7	57	-14,5	11104	-0,38	0,47	-0,49	0,5
Pb boorpaal = boorpaal:	PL	22	72	-14,5	10907	-0,47	0,46	-0,52	0,43
PB ca.15m uit boorpaal	PL	33,5	83,5	-14,5	12259	-0,43	0,44	-0,54	0,38
Pb ca 75m uit boorpaal	PL	83,5	133,5	-14,5	14722	-0,53	0,39	-0,64	0,22
Polder	PL	350	400	-14,5	25357	-1,25		-1,06	0,015
Polder	PL	700	750	-14,5	37562	-1,5		-1,4	0
Polder	PL	1450	1500	-14,5	59953			-1,65	0

### Gevoeligheidsberekeningen:

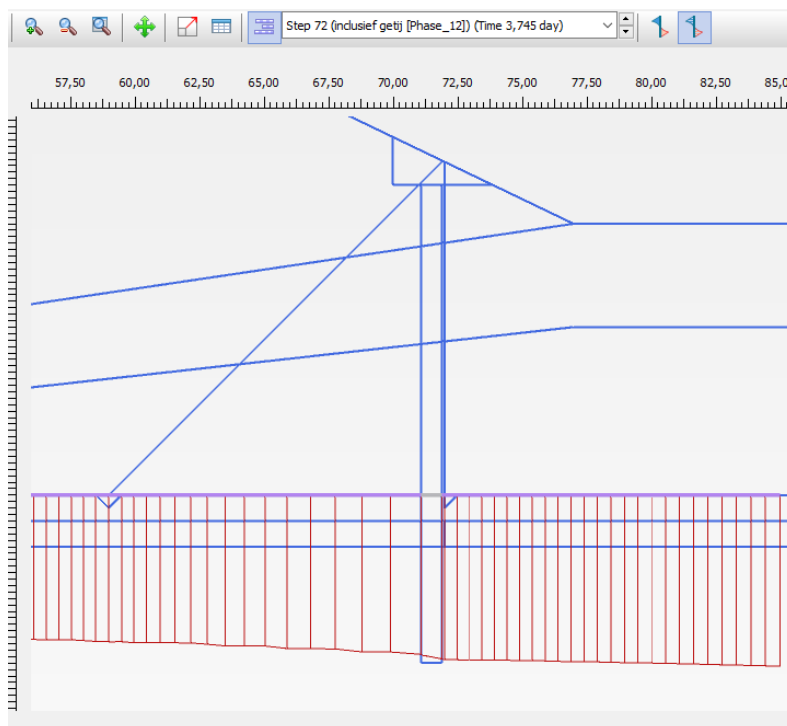
- Afstand modelrand:  
In eerste instantie is een modelschematisatie gemaakt waarbij de rand van het model aan polderzijde op een afstand van 750 m van de dijk lag. Teneinde vast te stellen of deze randvoorwaarde de resultaten beïnvloed is een model gemaakt waarbij deze afstand is verdubbeld tot 1500 m. Voor deze lengte van het achterland mag op voorhand worden verwacht dat de invloed verwaarloosbaar is omdat dit dan op circa 3 maal de leklengte ligt. Uit de berekeningen volgt dat ter plaatse van de boorpaal 0,06 m en 0,08 m hogere stijghoogten zijn berekend in de TZ respectievelijk PL bij de situatie MHW2065 in vergelijking met het model waarbij de randvoorwaarde op 750 m ligt. Voor de situatie bij een gemiddelde buitenwaterstand zal dit verschil kleiner zijn. Hoewel de verschillen minimaal zijn, zijn de vervolgberekeningen uitgevoerd met de randvoorwaarde op 1500 m. Daarbij zijn de doorlatendheden in de klei- en veenlagen aan rivierzijde met slechts 30% zijn verhoogd teneinde een goede kalibratie te verkrijgen (Plaxis file: Detailed Model raai2, v22).
- Invloed palenwand op geohydrologie in TZ en PL (zonder lekkages):  
In het model is ter bepaling van de invloed van de boorpalen op de geohydrologie (uitgaande van 'geen lekkage'), de doorlatendheid van het zand in de TZ en in de PL ter plaatse van en tot de diepte van de boorpalen met een factor 2 verlaagd, omdat als gevolg van de palen slechts 50% opening aanwezig is. Dit is in het dwarsprofiel gemodelleerd over de breedte van ongeveer de paaldiameter (in feite iets minder) loodrecht op de dijk. Daarmee is de gehele palenwand als 2D beschouwd.

Deze aanname (2D) is in feite onjuist omdat de palenwanden een beperkte breedte hebben van bijvoorbeeld 50 m evenwijdig aan de dijk. Om de invloed te bepalen is het stijghoogteverschil bepaald direct voor en direct achter de boorpalenwand. Deze gevoeligheidsberekeningen zijn uitgevoerd met het model waarbij de modelrand op 750 m ligt. De resultaten zijn in onderstaande twee figuren gegeven waarbij in Figuur 119 de stijghoogte in de TZ is gegeven tijdens gemiddeld getij (NAP + 0,50 m). De grondwaterstroming wordt weinig gehinderd door de palenwand. Het stijghoogteverschil is < 1 cm.



Figuur 119: Stijghoogte in d TZ tijdens gemiddeld getij.

Dit is beter zichtbaar als het resultaat wordt getoond op het moment dat het getij op het hoogste punt is (zie Figuur 120). Hier is voor en achter de palenwand een kleine sprong zichtbaar. Het stijghoogteverschil is met circa 2 cm echter gering.



Figuur 120: Stijghoogte in de TZ tijdens hoogwater.

#### J.4.1.2. Invloed lekkages

Met dit gekalibreerde model zijn vervolgens berekeningen uitgevoerd waarbij de verschillende hypothesen van vernatting en hydraulische kortsluiting zijn geverifieerd en de invloeden daarvan (op de stijghoogten in de TZ en de PL en hoogte van het freatisch vlak) zijn bepaald.

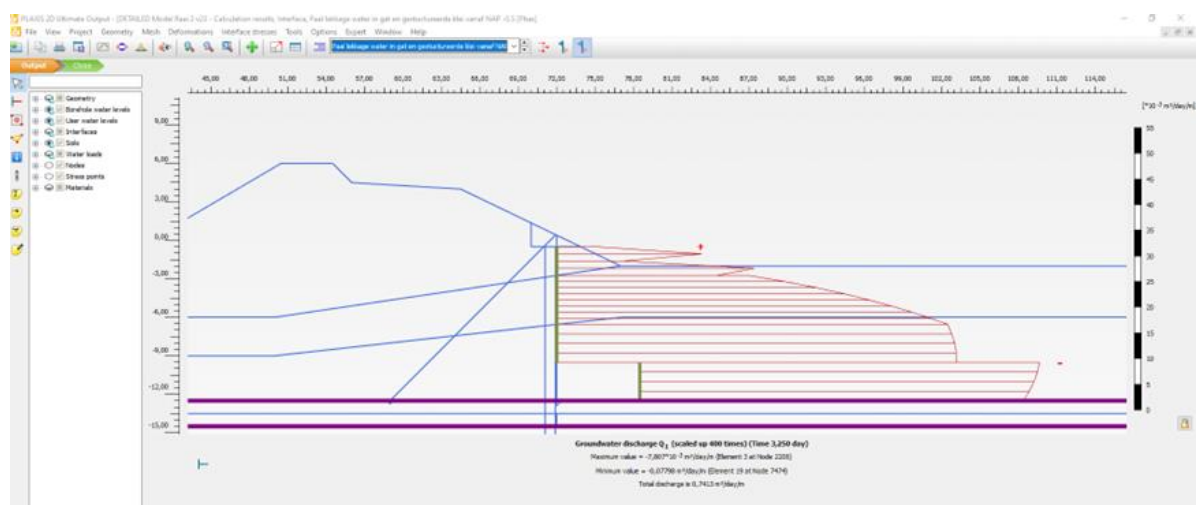
Hierbij is zoals aangegeven in Paragraaf J.3.6 onderscheid gemaakt in:

1. Modelling lekkage/vernatting langs boorpaal van TZ naar deksloof.
2. Modelling lekkage/vernatting rond het anker van TZ naar deksloof.
3. Modelling hydraulische kortsluiting langs boorpaal van PL naar TZ.

#### Ad 1: Modelling lekkage/vernatting langs boorpaal van TZ naar deksloof

Hiervoor zijn 2 scenario's berekend namelijk het scenario waarbij de spleet gevuld is met water en het scenario waarbij de spleet is gevuld met losgepakt zand.

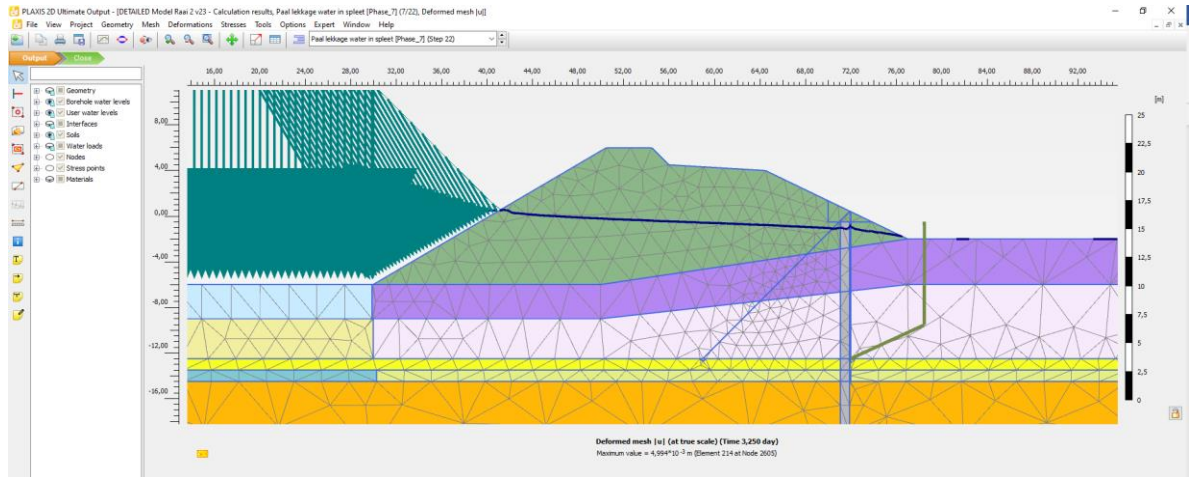
De invloed hiervan die van belang is, is de verhoging van het freatisch vlak en het debiet dat onder dagelijkse omstandigheden optreedt. Het berekeningsresultaat voor het eerste scenario is in onderstaande twee figuren weergegeven. Uit de berekeningen volgt een debiet van 0.74 m<sup>3</sup>/dag/m langs de boorpaal bij dagelijkse omstandigheden bij gem. getij (zie Figuur 121).



Figuur 121: Berekende debiet van 0,74 m<sup>3</sup>/dag/m (Plaxis file Detailed Model raai 2 v23) langs de boorpaal bij dagelijkse omstandigheden bij gemiddeld getij (spleet gevuld met water).

Onder normale omstandigheden is een hoogte van het freatisch vlak berekend van NAP - 1,05 m (zie Figuur 116). Als gevolg van de lekkage (spleet gevuld met water) is het freatisch vlak lokaal ter plaatse van de deksloof verhoogd tot circa NAP - 0,75 m (zie Figuur 122). Indien de spleet is gevuld met losgepakt zand bedraagt het debiet af naar 0,45 m<sup>3</sup>/dag/m en de hoogte van het freatisch vlak ter plaatse van de deksloof is bedraagt circa NAP - 0,85 m.





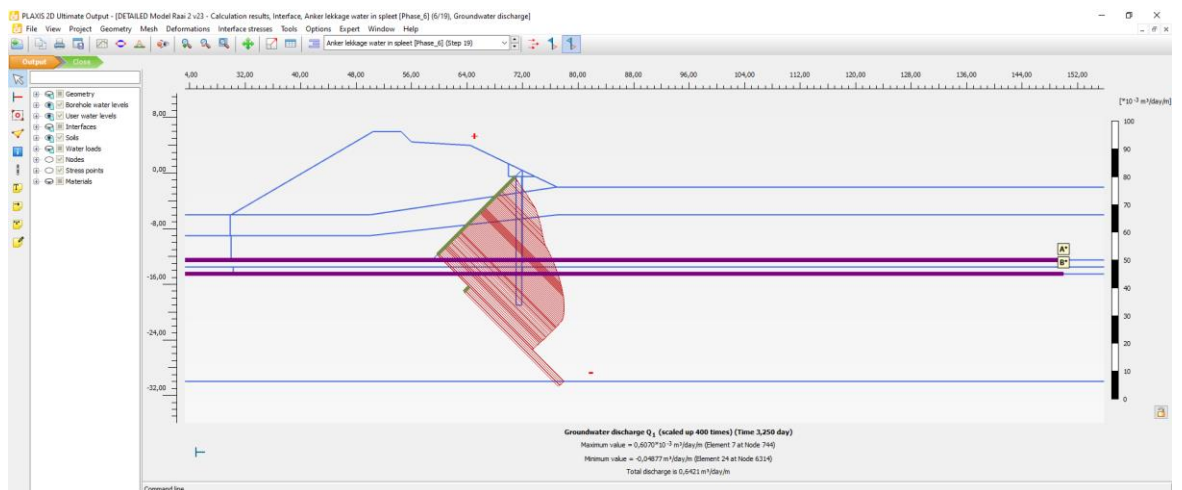
Figuur 122: Berekende hoogte freatisch vlak van NAP – 0,75 (Plaxis file Detailed Model raai 2 v23) lokaal ter plaatse van de deksloof bij dagelijkse omstandigheden bij gem getij (spleet gevuld met water).

### Gevoeligheidsberekeningen:

In Paragraaf J.3.6 is aangegeven dat voor de kleilaag boven de deksloof is uitgegaan van vrij doorlatende gestructureerde klei (doorlatendheid van  $5 \text{ E-4 m/s}$ ). Uit een gevoeligheidsberekening, waarbij de gestructureerde klei is vervangen door relatief ondoorlatende klei met een doorlatendheid gelijk aan die van het dijklichaam van  $1 \text{ E-7 m/s}$  volgt dat het debiet afneemt tot  $0,6 \text{ m}^3/\text{dag}/\text{m}$ . Dit is echter een geringe afname.

### Ad 2: Modelleren lekkage/vernatting rond het anker van TZ naar deksloof

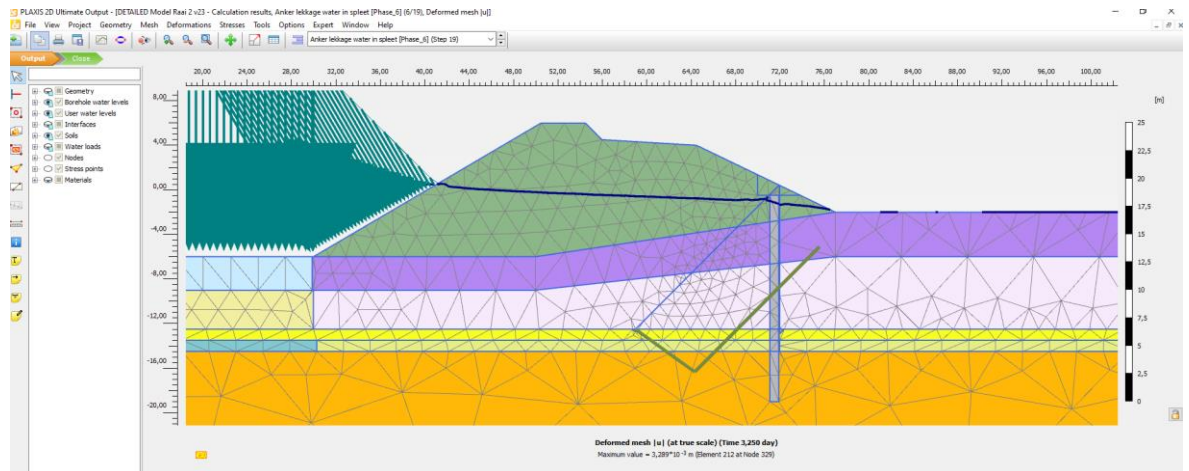
Hiervoor zijn ook 2 scenario's berekend namelijk het scenario waarbij het gat rond het anker gevuld is met water en het scenario waarbij het gat is gevuld met losgepakt zand. De invloed hiervan die van belang is, is (evenals bij lekkage langs de boorpaal van de TZ naar deksloof) de verhoging van het freatisch vlak en het debiet dat onder dagelijkse omstandigheden optreedt. Het berekeningsresultaat voor het eerste scenario is in onderstaande twee figuren weergegeven. Uit de berekeningen volgt een debiet van  $0,64 \text{ m}^3/\text{dag}/\text{m}$  langs de boorpaal bij dagelijkse omstandigheden bij gem getij (zie Figuur 123).



Figuur 123: Berekende debiet van  $0,64 \text{ m}^3/\text{dag}/\text{m}$  (Plaxis file Detailed Model raai 2 v23) langs de anker bij dagelijkse omstandigheden bij gemiddeld getij (gat gevuld met water).



Onder normale omstandigheden is een hoogte van het freatisch vlak berekend van NAP - 1,05 m (zie Figuur 116). Als gevolg van de lekkage (gat gevuld met water) is het freatisch vlak lokaal ter plaatse van de deksloof verhoogd tot circa NAP – 0,80 m (zie Figuur 124). Indien de spleet is gevuld met losgepakt zand bedraagt het debiet af naar 0,51 m<sup>3</sup>/dag/m en de hoogte van het freatisch vlak ter plaatse van de deksloof is bedraagt circa NAP – 0,80 m.



Figuur 124: Berekende hoogte freatisch vlak van NAP – 0,80 m (Plaxis file Detailed Model raai 2 v23) lokaal ter plaatse van de deksloof bij dagelijkse omstandigheden bij gem getij als gevolg van lekkage langs het anker (gat gevuld met water).

### Ad 3: Modelling hydraulische kortsluiting langs boorpaal van PL naar TZ

Hiervoor zijn 3 scenario's berekend namelijk het scenario waarbij de spleet of het gat rond de boorpaal gevuld is met water en de scenario's waarbij het gat is gevuld met enerzijds normaal gepakt zand en anderzijds met losgepakt zand.

De invloed die hierbij van belang is de verhoging van de stijghoogte in de TZ en de verlaging van de stijghoogte in de PL. De hoogte van het freatisch vlak in de dijk bij de deksloof zal hierdoor niet worden beïnvloed en het debiet dat van de PL naar de TZ optreedt is minder van belang.

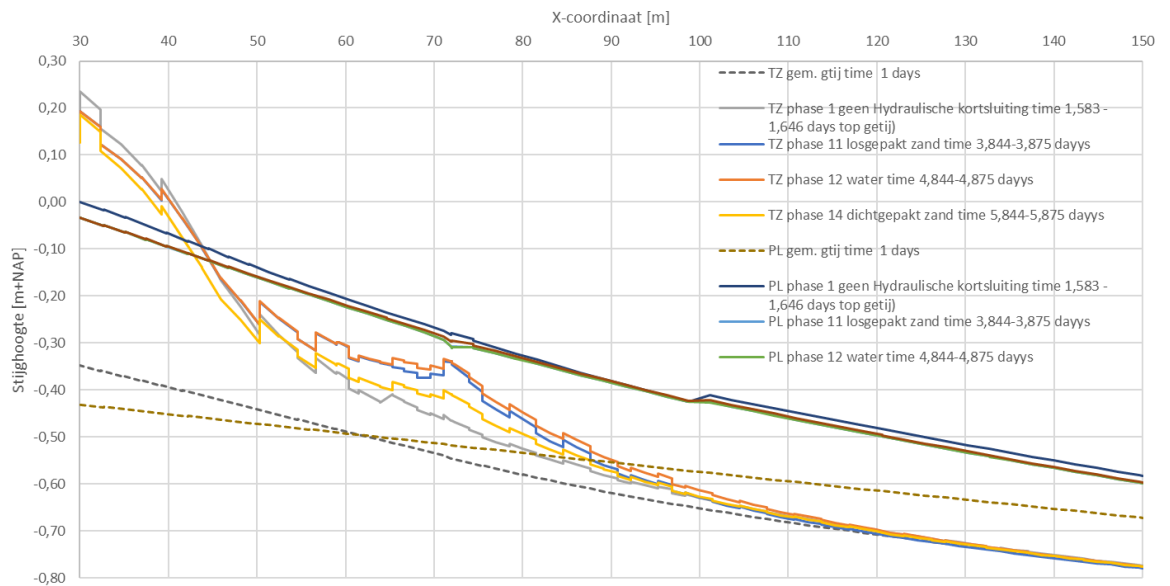
Voor de 3 scenario's is de invloed bepaald. Daarbij is het tevens van belang om het invloedgebied van deze lekkages te bepalen. Voor interpretatie van de peilbuismetingen is het van belang om te weten tot welke afstand van deze lekkage mag worden verwacht dat de peilbuizen worden beïnvloed. Daarnaast is het ook van belang om het invloedgebied van een lekkage in te kunnen schatten t.b.v. de sterkteberekeningen van de palenwandconstructie (waterveiligheid). Oftewel hoe groot is het gebied rond een lekkage waar een stijghoogteverandering merkbaar is.

In Figuur 125 zijn voor de situatie tijdens hoogwater (top van getijde) de berekende stijghoogten gegeven in de TZ en de PL. Voor de verschillende scenario's van hydraulische kortsluiting.

De verschillende scenario's zijn:

- Geen hydraulische kortsluiting.
- Spleet langs boorpalen met breedte van 10cm en gevuld met dichtgepakt zand ( $k=2 \times 10^{-4}$  m/s).
- Spleet langs boorpalen met breedte van 10 cm gevuld met losgepakt zand ( $k=0,01$  m/s).
- Spleet langs boorpalen met breedte van 10 cm en volledig openstaand (gevuld met water).

Stijghoogte in TZ met hydraulische kortsluiting tussen  
PL en TZ



Figuur 125: Berekende stijghoogte in de TZ en de PL met en zonder hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL

Uit de berekeningsresultaten volgt dat op een afstand van circa 20 m voor en 20 m na de boorpaal (de boorpaal staat op  $x=72$  m) circa 20% stijghoogteverschil merkbaar is t.o.v. de situatie zonder hydraulische kortsluiting.

Uit de berekeningen volgt ook dat ter plaatse van de boorpaal de gemiddelde stijghoogte in de TZ tot 13 cm is toegenomen t.o.v. de situatie zonder hydraulische kortsluiting (voor de gevallen met losgepakt zand en water in de spleet). De amplitude van de stijghoogte in de TZ (reactie op het getij) is toegenomen van 0,08 m naar 0,21 m.

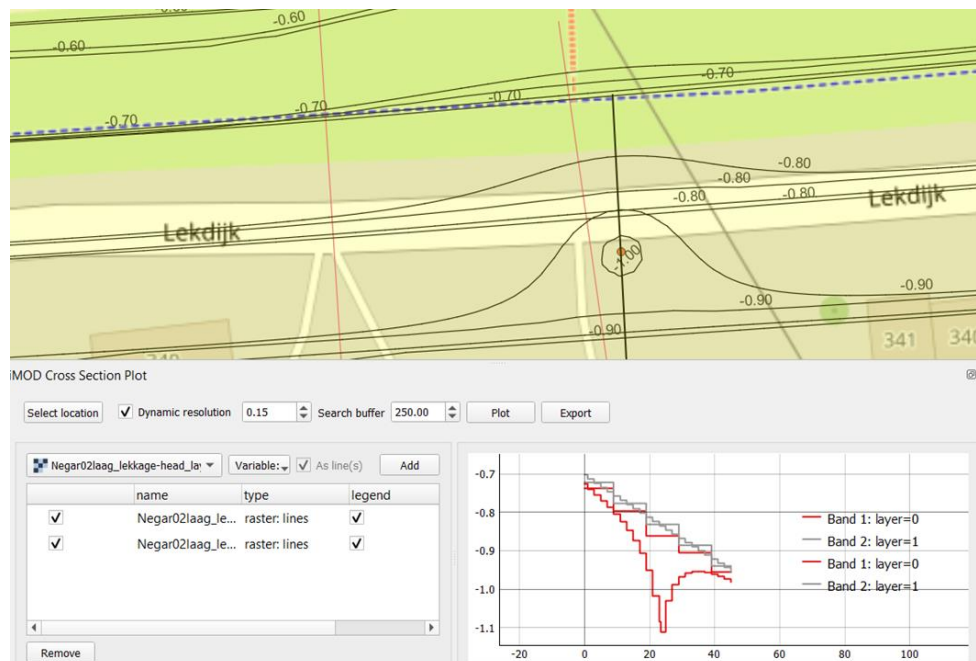
Op 15 m voor en na de boorpaal is de gemiddelde stijghoogte in de TZ circa tot 7 cm hoger. De amplitude is van de stijghoogte in de TZ (reactie op het getij) op 15 m voor de boorpaal circa 5 cm verhoogd (van 0,12 naar 0,17 m) en op 15 m na de boorpaal 4 cm (van 0,06 naar 0,10 m). De berekeningsresultaten zijn tevens samengevat in Tabel 33.

Tabel 33: Samenvatting berekeningsresultaten hydraulische kortsluiting langs boorpaal van de PL naar de TZ.

Omschrijving	Scenario	Breedte spleet of gat	berekend debiet [m <sup>3</sup> /dag/m]	verhoging freatisch vlak 1) [m]	verhoging stijghoogte in TZ t.p.v. boorpaal [m]	verhoging amplitude getij t.p.v. boorpaal [m]	verlaging stijghoogte in PL [m]
Spleet langs boorpaal naar maaiveld	1	1cm breed, volledig open	0,74	0,30 m (van NAP -1,05 m naar NAP -0,75 m)	niet van belang		niet van belang
	2	1cm breed, losgepakt zand	0,45	0,20 m (van NAP -1,05 m naar NAP -0,85 m)	niet van belang		niet van belang
Lekkage langs het anker:	3	Gat h.o.h. 2.14m effectieve diameter 11cm volledig open	0,64	0,25 m (van NAP -1,05 m naar NAP -0,80 m)	niet van belang		niet van belang
	4	Gat h.o.h. 2.14m effectieve diameter 11cm, losgepakt zand	0,51	0,25 m (van NAP -1,05 m naar NAP -0,80 m)	niet van belang		niet van belang
Lekkage langs boorpaal, tussen Pleistoceen en tussenzandlaag	5	Gat/spleet 10cm breed volledig open	niet van belang	niet van belang	0,13	van 0,08 toegenomen tot 0,21	nihil
	6	Gat/spleet 10cm breed normaal gepakt zand	niet van belang	niet van belang	0,06	van 0,08 toegenomen tot 0,13	nihil
	7	Gat/spleet 10cm breed losgepakt zand	niet van belang	niet van belang	0,13	van 0,08 toegenomen tot 0,21	nihil

Hieruit volgt ook dat mag worden verwacht dat, bij een lekkage langs de boorpaal, ter plaatse van de boorpaal de respons in de TZ aanmerkelijk hoger zal zijn (minimaal een factor 2, t.o.v. de situatie zonder hydraulische kortsluiting, volgens de analyses). In de PL is dit volgens de analyses nauwelijks merkbaar.

Op een afstand van 15 m uit de boorpaal, waar de peilbuizen aanwezig zijn is de invloed van een lekkage langs de boorpaal minder maar nog steeds aanmerkelijk (namelijk 20 tot 45%). Uitgangspunt in bovenstaande analyses is dat alle palen/ankers lekken. Indien één paal lekt zullen de bovengenoemde invloeden van de lekkage kleiner zijn. Om meer inzicht in het 3D effect te verkrijgen zijn met een relatief eenvoudig '3D' model Timm-ML analyses uitgevoerd waarbij een bron is gemodelleerd in de TZ. Hieruit volgt dat de invloed (zij het dat weliswaar 3D, maar niet tijdsafhankelijk is gerekend) vergelijkbaar is met Plaxis en ook als conservatief kan worden gezien.



Figuur 126: Berekende stijghoogte met Timm-ML in de TZ. Situatie zonder en met bron in de TZ (debiet 0,3 m<sup>3</sup>/d (bovenste rode lijn in grafiek) en 3 m<sup>3</sup>/d (onderste rode lijn).

Hoewel een tijdsafhankelijke 3D berekening (niet uitgevoerd) een kleiner invloedgebied zou geven, wordt verwacht dat bij extrapolatie naar WBN (gezien de aanzienlijk langere tijdsduur van deze hoogwatergolf t.o.v. een getijde) een aanmerkelijk groter invloedgebied zal worden berekend. Hierbij wordt er veiligheidshalve van uitgegaan dat dit groter zal zijn dan het gebied waarin de stijghoogten in de invloed hebben op de stabiliteit van de dijk (stabiliteitsgebied).

Verder wordt opgemerkt dat de lekkage langs het anker en langs de boorpaal naar de deksloof op eenzelfde wijze is gemodelleerd, zij het dat de zogenaamde hydraulische conductivity een factor 10 kleiner is dan de hydraulische kortsluiting tussen TZ en de PL. Gezien bovengenoemde is het zeer aannemelijk dat het invloedgebied langs het anker en langs de boorpaal naar de deksloof kleiner zal zijn.

#### Conclusies n.a.v. de berekeningen:

- Met Plaxis zijn berekeningen uitgevoerd waarbij de verschillende hypothesen van vernatting en hydraulische kortsluiting zijn geverifieerd en de invloeden daarvan (op de stijghoogten in de TZ en de PL en hoogte van het freatisch vlak) zijn bepaald:
  - Modelleren lekkage/vernatting langs boorpaal van TZ naar deksloof.
  - Modelleren lekkage/vernatting rond het anker van TZ naar deksloof.
  - Modelleren hydraulische kortsluiting langs boorpaal van PL naar TZ.
- Uit de berekeningen volgt dat deze verschillende vormen van lekkage goed zijn te modelleren met zogenaamde interfaces. Er is een validatieberekening uitgevoerd waarbij dit interface langs de boorpaal is vervangen door een fijn mesh met een breedte van 0.10 m. Uit de berekening volgde dat nagenoeg dezelfde waarden voor stijghoogte en debiet is berekend.
- Beperking van de gekozen aanpak is dat tweedimensionale berekeningen zijn uitgevoerd terwijl een lekkage langs boorpaal of anker een typisch driedimensionaal probleem is. In de berekeningen zijn de lekkages twee-dimensionaal gemodelleerd. Dit betekent dat in de berekeningen wordt uitgegaan dat alle boorpalen of alle ankers lekken. Dit is een conservatief uitgangspunt als er vanuit wordt gegaan dat niet alle palen lekken. In de berekeningen zal de invloed van de lekkage groter zijn.

### J.4.1.3. Simulatie/extrapolatie voor WBN2023, WBN2115 en MHW2065

Met het Plaxis-model zijn simulaties uitgevoerd voor raai 2 waarbij de stijghoogten in de TZ en de PL zijn berekend als gevolg van een hoogwatergolf (WBN2023, WBN2115 en MHW2065).

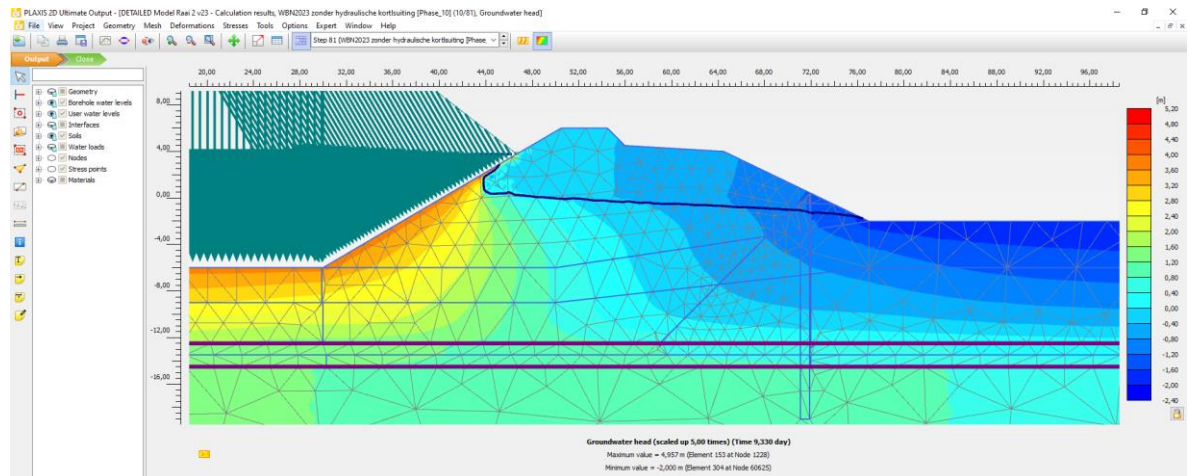
De berekende stijghoogten voor MHW2065 zijn vergeleken met de door de aannemer uitgevoerde extrapolaties. Met de resultaten van de simulaties van WBN2023 is in onderdeel D de sterktebeoordeling van de palenwandconstructie uitgevoerd. Met de resultaten van WBN2115 is in onderdeel D een herberekening van het ontwerp uitgevoerd.

De simulaties zijn zowel met als zonder hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL uitgevoerd. Ook zijn simulaties uitgevoerd met lekkage langs het anker en langs de boorpaal om daarmee de verhoging van het freatisch vlak in te schatten. Deze simulaties zijn uitgevoerd met het gekalibreerde model waarbij de drinkwaterwinning te Nieuw Lekkerland van Oasen gemiddeld 3419 m<sup>3</sup>/dag was (periode 10-05-2023 tot 22-05-2023).

Om de resultaten te verkrijgen uitgaande van een stopgezette drinkwaterwinning zijn de effecten daarvan separaat verdisconteerd.

#### Extrapolatie naar WBN2023:

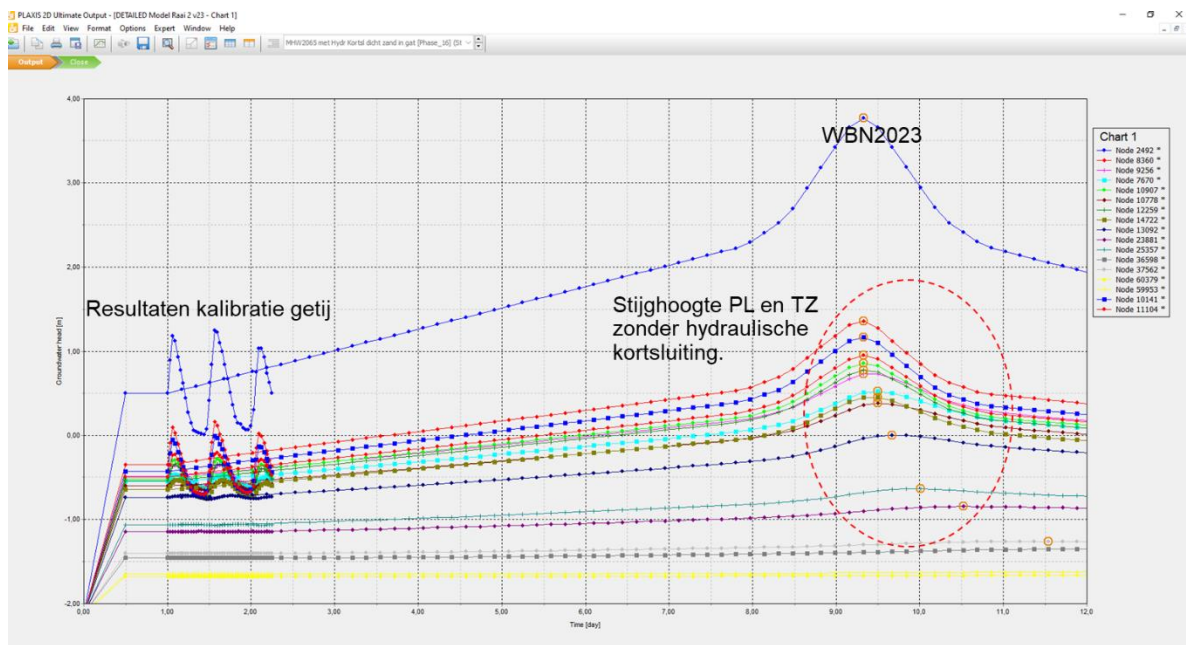
De hoogwatergolf is weergegeven in Bijlage C.2. De hoogte van de WBN2023 is NAP + 3,77 m. In Figuur 127 is het resultaat weergegeven van de Plaxis berekening voor het scenario waarbij geen hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL is gemodelleerd. De hoogte van het freatisch vlak ter plaatse van de boorpaal is NAP – 1,05 m en is daarmee niet verhoogd ten opzichte van de situatie bij gemiddelde buitenwaterstand van NAP + 0,50 m.



Figuur 127 Plaxis berekening WBN2023. Berekende hoogte freatisch vlak is NAP – 1,05 m. (Plaxis file Detailed Model raai 2 v23). Scenario zonder hydraulische kortsluiting.

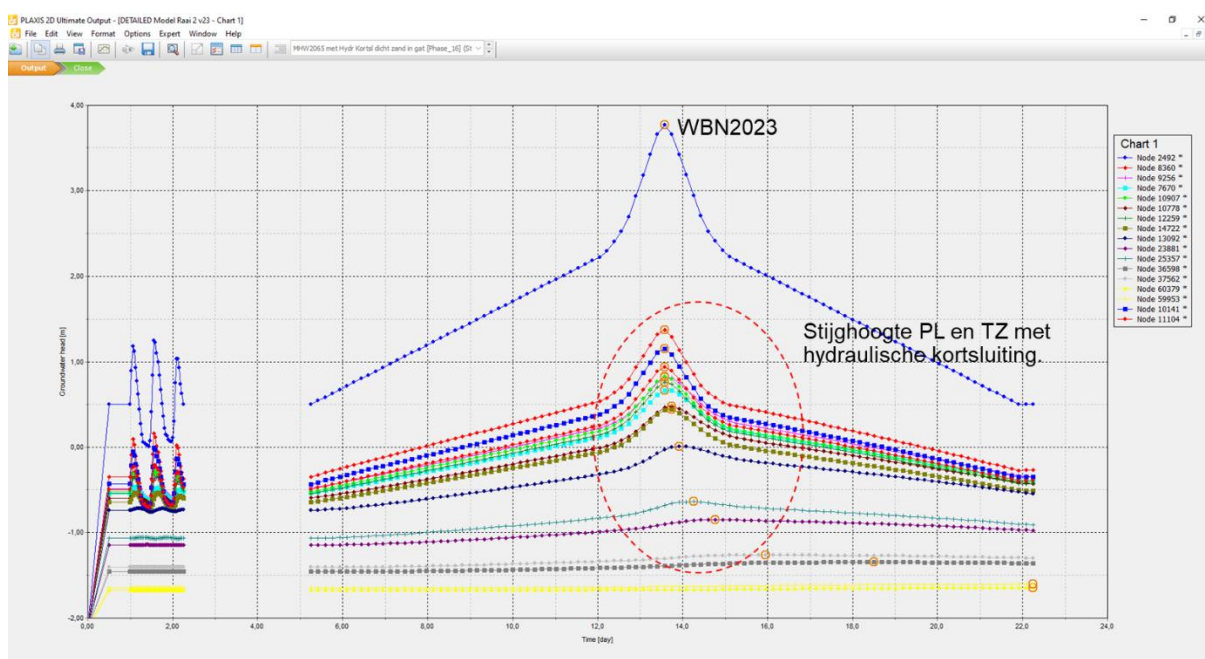
In Figuur 128 zijn de berekende stijghoogten in de TZ en de PL gegeven zonder hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL. (Opgemerkt wordt dat de duur van de hoogwatergolf 16,67 dagen is = 400 uur). Uit de figuur volgt dat de top van de hoogwatergolf (WBN) wordt bereikt op tijdstip 9,33 dagen. In de Plaxis berekening begint de berekening van de hoogwatergolf op t=1 dag).





Figuur 128 Plaxis berekening WBN2023. Berekende stijghoogten in de TZ en de PL zonder hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL (Plaxis file Detailed Model raai 2 v23).

In Figuur 129 zijn de resultaten weergegeven voor het scenario mét hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL. Daarbij is uitgegaan van een spleet/gat langs de boorpaal met een breedte van 10 cm dat is opgevuld met normaal gepakt zand. (scenario 6 volgens Tabel 30). (Opgemerkt wordt dat de duur van de hoogwatergolf 16,67 dagen is = 400 uur). Uit de figuur volgt dat de top van de hoogwatergolf (WBN) wordt bereikt op tijdstip 13,67 dagen. In de Plaxis berekening begint de berekening van de hoogwatergolf op t = 5,33 dagen).

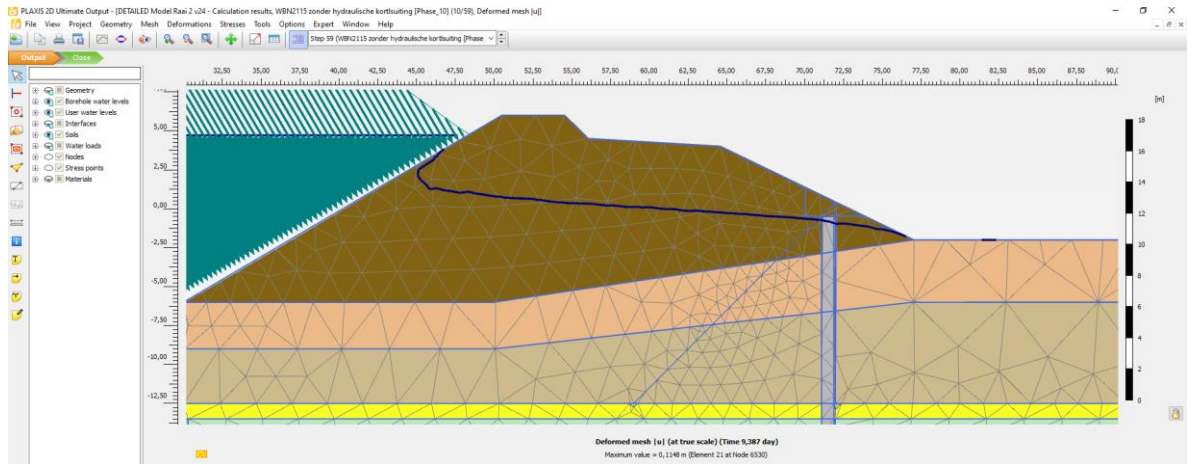


Figuur 129 Plaxis berekening WBN2023. Berekende stijghoogten in de TZ en de PL met hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL (Plaxis file Detailed Model raai 2 v23).



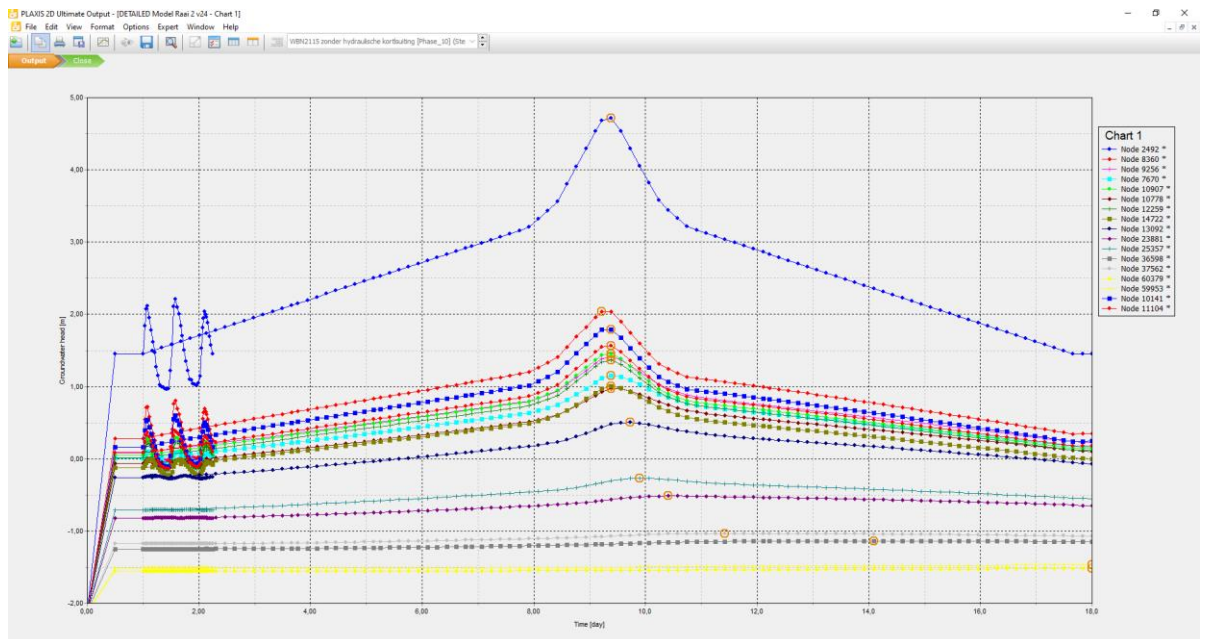
## Extrapolatie naar WBN2115

De hoogwatergolf is weergegeven in Bijlage C.2. De hoogte van de WBN2115 is NAP + 3,72 m. In Figuur 130 is het resultaat weergegeven van de Plaxis berekening voor het scenario waarbij geen hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL is gemodelleerd. De hoogte van het freatisch vlak ter plaatse van de boorpaal is NAP – 0,60 m.



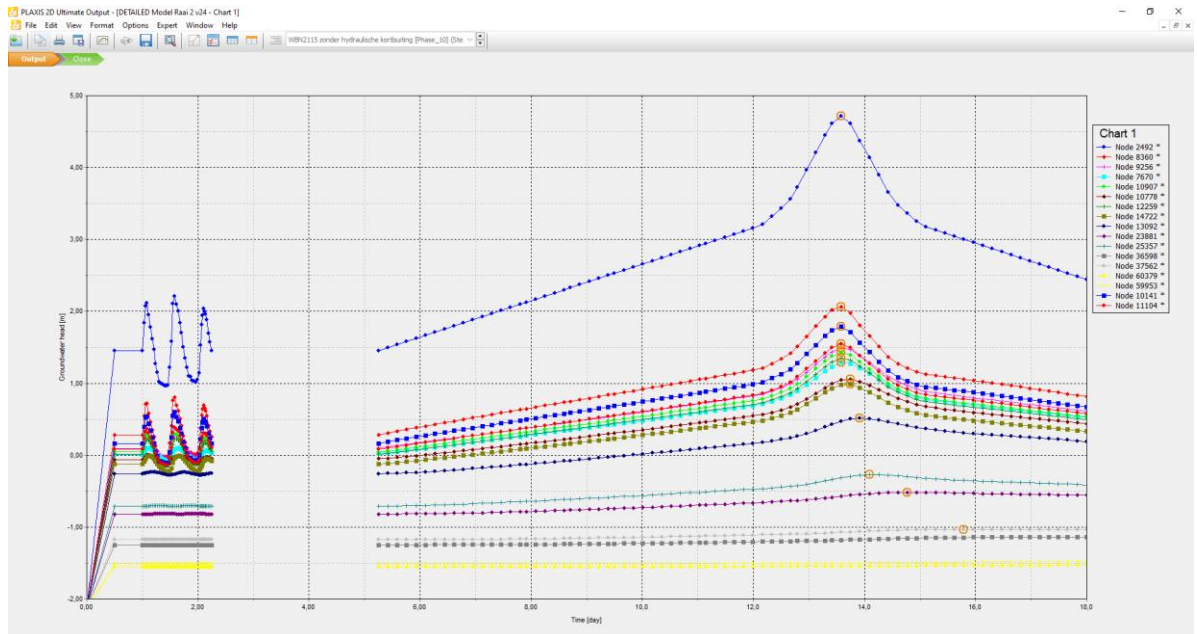
Figuur 130 Plaxis berekening WBN2115. Berekende hoogte freatisch vlak is NAP – 0,60 m. (Plaxis file Detailed Model raai 2 v24). Scenario zonder hydraulische kortsluiting.

In Figuur 131 zijn de berekende stijghoogten in de TZ en de PL gegeven zonder hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL. Voor een samenvatting van de berekende stijghoogten wordt verwezen naar Tabel 34.



Figuur 131 Plaxis berekening WBN2115. Berekende stijghoogten in de TZ en de PL zonder hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL (Plaxis file Detailed Model raai 2 v24).

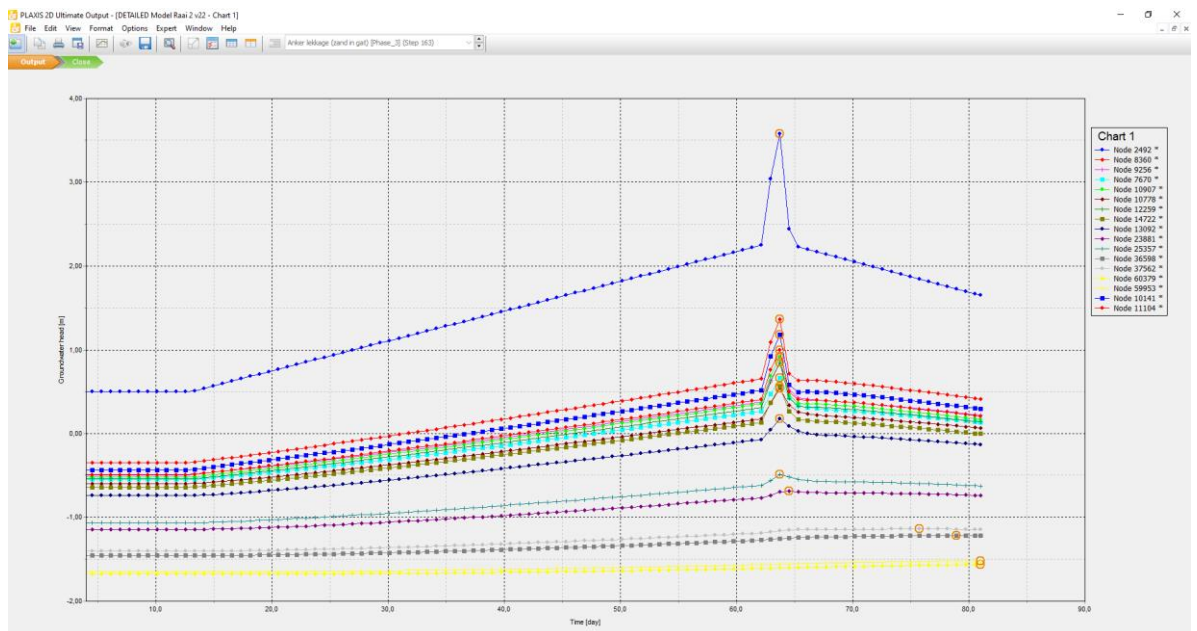
In Figuur 132 zijn de resultaten weergegeven voor het scenario mét hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL. Daarbij is uitgegaan van een spleet/gat langs de boorpaal met een breedte van 10 cm dat is opgevuld met normaal gepakt zand. (scenario 6 volgens Tabel 30).



Figuur 132 Plaxis berekening WBN2023. Berekende stijghoogten in de TZ en de PL met hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL (Plaxis file Detailed Model raai 2 v23).

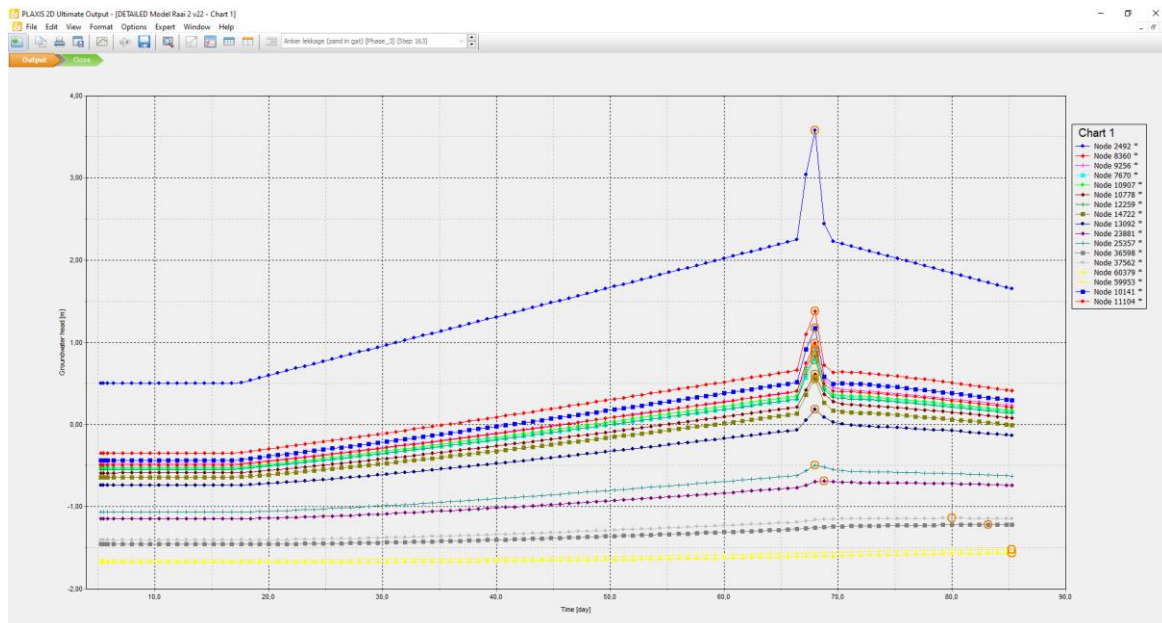
### Extrapolatie naar MHW2065

De hoogwatergolf is weergegeven in Bijlage C.1. MHW2065 is NAP + 3,60 m. In Figuur 133 zijn de berekende stijghoogten in de TZ en de PL gegeven zonder hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL. Voor een samenvatting van de berekende stijghoogten wordt verwezen naar Tabel 34.



Figuur 133 Plaxis berekening MHW2065. Berekende stijghoogten in de TZ en de PL zonder hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL (Plaxis file Detailed Model raai 2 v22).

In Figuur 134 zijn de resultaten weergegeven voor het scenario mét hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL. Daarbij is uitgegaan van een spleet/gat langs de boorpaal met een breedte van 10 cm dat is opgevuld met normaal gepakt zand. (Scenario 6 volgens Tabel 30).



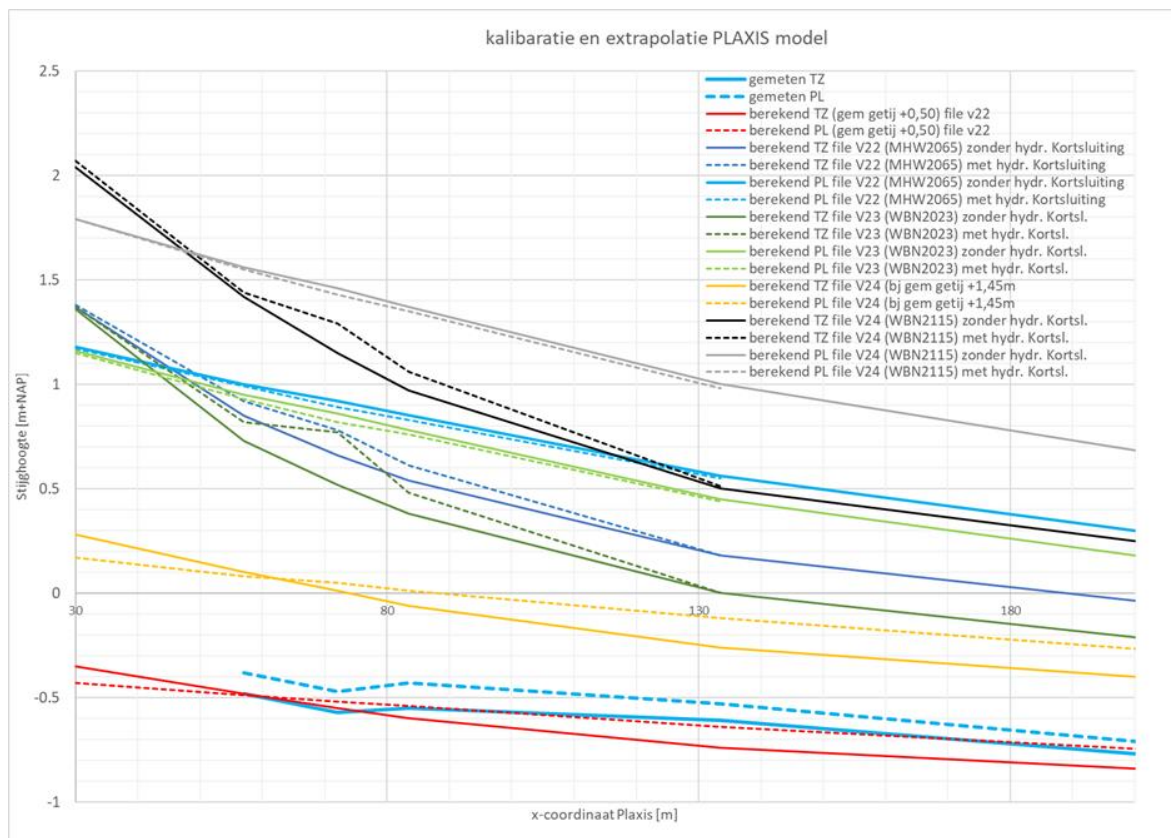
Figuur 134 Plaxis berekening MHW2065. Berekende stijghoogten in de TZ en de PL met hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL (Plaxis file Detailed Model raai 2 v22).

Tabel 34: Samenvatting berekeningsresultaten raai 2 voor extrapolatie (simulatie) naar WBN223, WBN2115 en MHW2065 (let op, hierbij is geen rekening gehouden met drinkwaterinringing Oasen (zie conclusies) (Voor de duidelijkheid zijn de resultaten bij de boorpaal en op 15 m afstand daarvan richting de polder geel gearceerd).

locatie				diepte	Knoop nr. Plaxis	Berekende stijghoogte MHW2065		Berekende stijghoogte WBN2023			Berekende stijghoogte WBN2115		
Locatie	TZ of PL	X werkelijk [m]	X PLAXIS model [m]	Y [m+NAP]		zonder hydr. kortsl. [m+NAP]	met hydr. kortsl. [m+NAP]	stijghoogte bij gem. getij [m+NAP]	zonder hydr. kortsl. [m+NAP]	met hydr. kortsl. [m+NAP]	stijghoogte bij gem. getij [m+NAP]	zonder hydr. kortsl. [m+NAP]	met hydr. kortsl. [m+NAP]
Buitenteen		-20	30	-6	2492	3,6	3,6	0,5	3,77	3,77	1,45	4,72	4,72
Buitenteen	TZ	-20	30	-12,5	8360	1,37	1,38	-0,35	1,36	1,37	0,28	2,04	2,07
Pb-rivierw aarts	TZ	7	57	-12,5	9256	0,85	0,92	-0,48	0,73	0,82	0,1	1,42	1,44
Pb boorpaal = boorpaal:	TZ	22	72	-12,5	7670	0,66	0,78	-0,55	0,52	0,77	0,01	1,15	1,29
PB ca. 15m uit boorpaal	TZ	33,5	83,5	-12,5	10778	0,54	0,61	-0,6	0,38	0,48	-0,06	0,97	1,06
Pb ca 75m uit boorpaal	TZ	83,5	133,5	-12,5	13092	0,18	0,18	-0,74	0	0	-0,26	0,5	0,51
Polder	TZ	350	400	-12,6	23881	-0,69	-0,69	-1,14	-0,85	-0,85	-0,82	-0,51	-0,51
Polder	TZ	700	750	-12,7	36598	-1,22	-1,22	-1,46	-1,35	-1,35	-1,25	-1,14	-1,14
Polder	TZ	1450	1500	-12,5	60379	-1,56	-1,57	-1,67	-1,66	-1,66	-1,55	-1,52	-1,52
Buitenteen	PL	-20	30	-14,5	10141	1,18	1,17	-0,43	1,16	1,15	0,17	1,79	1,79
Pb-rivierw aarts	PL	7	57	-14,5	11104	1	0,99	-0,49	0,95	0,93	0,08	1,56	1,55
Pb boorpaal = boorpaal:	PL	22	72	-14,5	10907	0,92	0,89	-0,52	0,86	0,82	0,05	1,46	1,43
PB ca. 15m uit boorpaal	PL	33,5	83,5	-14,5	12259	0,85	0,83	-0,54	0,78	0,76	0,01	1,37	1,35
Pb ca 75m uit boorpaal	PL	83,5	133,5	-14,5	14722	0,56	0,55	-0,64	0,45	0,44	-0,12	1	0,98
Polder	PL	350	400	-14,5	25357	-0,49	-0,49	-1,06	-0,63	-0,64	-0,71	-0,27	-0,27
Polder	PL	700	750	-14,5	37562	-1,14	-1,14	-1,4	-1,26	-1,26	-1,18	-1,03	-1,03
Polder	PL	1450	1500	-14,5	59953	-1,52	-1,52	-1,65	-1,6	-1,6	-1,51	-1,47	-1,47

De resultaten uit Tabel 34 zijn tevens grafisch weergegeven in Figuur 135 waarbij op de horizontale as de x-coördinaat (Plaxis-model) is gegeven en op de Y-as de berekende stijghoogten voor de verschillen hoogwatergolven (WBN2023, WBN2115 en MHW2065) en scenario's (met en zonder hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL).





Figuur 135 Samenvatting berekeningsresultaten raai 2 voor extrapolatie (simulatie) naar WBN2023, WBN2115 en MHW2065.

### Conclusies n.a.v. de Plaxis berekeningsresultaten

Hoogte freatisch vlak:

- Voor het scenario zonder hydraulische kortsluiting is de hoogte van het freatisch vlak ter plaatse van de boorpaal tijdens WBN2023 berekend op NAP – 1,05 m (zie Figuur 127) en is daarmee niet verhoogd t.o.v. de situatie bij gemiddelde buitenwaterstand van NAP + 0,50 m (zie Figuur 116).
- Als gevolg van WBN2115 gaat de buitenwaterstand met 0,95 m omhoog. Niet alleen het WBN maar ook het gemiddeld getij. Uit de berekeningen (zie Figuur 130) volgt dat het freatisch vlak hierdoor stijgt naar NAP – 0,60 m. Een verhoging van 0,45 m die wordt veroorzaakt door een circa 0,55 m hogere stijghoogte in de TZ en een 0,95 m hoger gemiddeld getij.

Stijghoogten PL en TZ:

- Hoewel het MHW2065 lager is dan het WBN2023 (NAP + 3,60 m respectievelijk NAP + 3,77 m) zijn de stijghoogten in de PL en de TZ hoger dan bij WBN2023. Dit kan worden verklaard door de aanmerkelijk langere duur van de rivierafvoer-component in het HMHW2065 van 2424 uur t.o.v. 400 uur bij WBN2023.
- De stijghoogten in de TZ en de PL voor WBN2115 nemen fors toe (circa 0,65 cm) t.o.v. WBN2023. Dit komt niet alleen door een verhoging van de topstand maar vooral door stijging van de zeespiegel.
- Uit de berekeningen volgt dat het stijghoogteverschil tussen de TZ en de PL onder dagelijkse omstandigheden gering is (ter plaatse van de boorpaal en het anker tot 0,10 m). Onder maatgevende omstandigheden neemt dit toe tot circa 0,30 m. Dit lijkt aanvankelijk gering gezien het grote responsverschil tussen TZ en PL tijdens dagelijkse omstandigheden (getij). Het verschil in respons is dan namelijk een factor 5 (zie Bijlage

D.1.1). De tussenkleilaag tussen TZ en PL is echter zeer gering in dikte (slechts 1 m) en de tijdsduur van het hoogwater relatief lang.

- De berekende stijghoogten voor MHW2065 zijn vergeleken met de door de aannemer uitgevoerde extrapolaties. Voor de resultaten van deze vergelijking wordt verwezen naar Paragraaf J.5.2.

Invloed hydraulische kortsluiting:

- Uit de berekeningen in Paragraaf J.4.1.2 volgde al dat bij hydraulische kortsluiting tussen TZ en PL vooral de stijghoogte in de TZ hoger wordt en dat het invloedgebied tijdens het optreden van het dagelijks getij beperkt is (uit Paragraaf J.4.1.2 volgt 'op een afstand van circa 20 m voor en 20 m na de boorpaal (de boorpaal staat op  $x=72$  m) is circa 20% stijghoogteverschil merkbaar is t.o.v. de situatie zonder hydraulische kortsluiting'). Uit Figuur 135 volgt dat dit invloedgebied bij het optreden van langduriger hoogwaterstanden (denkende aan enkele weken) groter is. Vergelijk de donkergroene stippellijn met de getrokken lijn voor bijvoorbeeld de berekende stijghoogte in de TZ bij WBN2023.

Opmerkingen:

- In de hier uitgevoerde Plaxis berekeningen is de hydraulische kortsluiting twee dimensionaal gemodelleerd. Daarmee simuleren de berekeningsresultaten het geval dat ter plaatse van alle boorpalen tegelijk hydraulische kortsluiting optreedt. Dit is een conservatieve aanname voor de verhoging van de stijghoogten in de TZ en de grootte van het invloedgebied ten opzichte van de situatie dat niet alle boorpalen lekken.
- Deze simulaties zijn uitgevoerd met het gekalibreerde Plaxis-model waarbij tijdens de peilbuismetingen de drinkwaterwinning te Nieuw Lekkerland van Oasen gemiddeld 3419 m<sup>3</sup>/dag was (periode 10-05-2023 tot 22-05-2023). Uit de analyses zoals weergegeven in Bijlage D.1.3 volgt dat de berekende stijghoogten met 0.30 m dienen te worden verhoogd om een inschatting te krijgen van de potentialen bij een stopgezette drinkwaterwinning. Om de resultaten te verkrijgen uitgaande van een stopgezette drinkwaterwinning zijn de effecten daarvan separaat verdisconteerd (zie Paragraaf J.5.2).

#### J.4.2 Extrapolatie met Extrapol voor WBN2023, WBN2115 en MHW2065

Met een analytisch model in Excel (Extrapol) zijn extrapolaties (simulaties) uitgevoerd waarbij de stijghoogten zijn berekend als gevolg van een hoogwatergolf. Dit is uitgevoerd voor zowel de TZ als de PL voor de raaien 1 t/m 6. Met dit model kunnen geen lekkages worden gemodelleerd.

Deze simulaties zijn uitgevoerd voor de situaties waarbij de drinkwaterwinning gemiddeld 3419 m<sup>3</sup>/dag was (periode 10-05-2023 tot 22-05-2023) en waarbij de drinkwaterwinning gemiddeld 7946 m<sup>3</sup>/dag was (periode 15-06-2023 tot 24-06-2023). Deze drinkwaterwinning heeft namelijk aanzienlijke invloed op de potentialen in de TZ en de PL (zie Bijlage D). Om de resultaten te verkrijgen uitgaande van een stopgezette drinkwaterwinning zijn de effecten daarvan separaat verdisconteerd.

De resultaten van alle berekeningen zijn in het digitaal dossier opgenomen (zie Bijlage L). Als voorbeeld is in Figuur 136 het berekeningsresultaat van de extrapolatie weergegeven voor de TZ in raai 2. Voor de PL is het resultaat in Figuur 137 weergegeven. Hiervoor is de peilbuisdata van 10-05-2023 tot 11-05-2023 gebruikt waarbij de drinkwaterwinning gemiddeld 3419 m<sup>3</sup>/dag was. Uit de berekening volgt dat de stijghoogte bij WBN2023 ter plaatse van de boorpaal ( $x=22$ m) in de TZ NAP + 0,44 m is. (Merk op dat met Plaxis voor deze situatie NAP + 0,52 m is berekend, zie Tabel 34).

In de PL is hier stijghoogte van NAP + 1,49 m berekend. (Merk op dat met Plaxis voor deze situatie NAP + 0,86 m is berekend, zie Tabel 34).



Extrapolatie stijghoogte m.b.v. peilbuiswaarnemingen							
Traject : KiS Raai 2 Tussenzandlaag, data 10-05-2023 tot 11-05-2023							
<b>Geometrie gegevens</b>			<b>Meetgegevens</b>			<b>Kalibratie</b>	
afstand uit buitenkruinlijn van de dijk			rivier			lambda meting	
peilbuis 1	22	m	stationair deel	0,51	m	stationair	1495
peilbuis 2	34	m	amplitude	0,58	m	amplitude	208
peilbuis 3	84	m	duur amplitude	0,26	dagen		
intreepunt uit de as van de dijk			peilbuizen stijghoogte t.o.v. NAP			calibratie respons	
stationair	800	m	stationair deel pb 1	-0,61	m	-0,60	m
amplitude	500	m	stationair deel pb 2	-0,60	m	-0,61	m
<b>M.H.W. gegevens</b>			stationair deel pb 3	-0,67	m	-0,66	m
golf 1			peilbuizen respons			calibratie respons	
duur	16,7	dagen	amplitude peilbuis 1	0,035	m	0,047	m
amplitude	1,74	m	amplitude peilbuis 2	0,041	m	0,044	m
golf 2			amplitude peilbuis 3	0,045	m	0,035	m
duur	1,88	dagen	randvoorwaarde polderzijde t.o.v. NAP			<b>lambda M.H.W.</b>	
amplitude	1,52	m	stijghoogte	-2,12	m	golf 1	588
<b>Potentiaalverloop bij M.H.W. zonder opdrijven</b>						golf 2	340
						WBN	3,77
bijdrage	stijghoogte op [m] uit as van de dijk						
	-20	7	22	34	84	350	700
stationair	-0,56	-0,59	-0,60	-0,61	-0,66	-0,90	-1,16
golf 1	0,77	0,73	0,72	0,70	0,64	0,41	0,23
golf 2	0,37	0,34	0,33	0,32	0,27	0,13	0,04
totaal	0,58	0,49	0,44	0,40	0,25	-0,37	-0,89

Figuur 136: Berekeningsresultaat Extrapol voor extrapolatie (simulatie) naar WBN223 voor de TZ voor periode 10-05-2023 tot 11-05-2023.

Extrapolatie stijghoogte m.b.v. peilbuiswaarnemingen							
Traject : KiS Raai 2 Pleistocene zandlaag, data 10-05-2023 tot 22-05-2023							
<b>Geometrie gegevens</b>			<b>Meetgegevens</b>			<b>Kalibratie</b>	
afstand uit de as van de dijk			rivier			lambda meting	
peilbuis 1	21	m	stationair deel	0,51	m	stationair	1632
peilbuis 2	34	m	amplitude	0,58	m	amplitude	408
peilbuis 3	84	m	duur amplitude	0,26	dagen		
intreepunt uit de as van de dijk			peilbuizen stijghoogte t.o.v. NAP			calibratie respons	
stationair	800	m	stationair deel pb 1	-0,55	m	-0,53	m
amplitude	400	m	stationair deel pb 2	-0,51	m	-0,54	m
<b>M.H.W. gegevens</b>			stationair deel pb 3	-0,60	m	-0,59	m
golf 1			peilbuizen respons			calibratie respons	
duur	16,7	dagen	amplitude peilbuis 1	0,207	m	0,21	m
amplitude	1,74	m	amplitude peilbuis 2	0,200	m	0,20	m
golf 2			amplitude peilbuis 3	0,178	m	0,18	m
duur	1,88	dagen	randvoorwaarde polderzijde t.o.v. NAP			<b>lambda M.H.W.</b>	
amplitude	1,52	m	stijghoogte	-2,12	m	golf 1	1156
<b>Potentiaalverloop bij M.H.W. zonder opdrijven</b>						golf 2	669
						WBN	3,77
bijdrage	stijghoogte op [m] uit as van de dijk						
	-20	7	22	34	84	350	700
stationair	-0,49	-0,52	-0,53	-0,54	-0,59	-0,82	-1,07
golf 1	1,25	1,22	1,21	1,20	1,15	0,91	0,67
golf 2	0,86	0,83	0,81	0,80	0,74	0,50	0,29
totaal	1,62	1,53	1,49	1,45	1,29	0,58	-0,11

Figuur 137: Berekeningsresultaat Extrapol voor extrapolatie (simulatie) naar WBN223 voor de PL voor periode 10-05-2023 tot 11-05-2023.

Uit de analyses zoals weergegeven in Bijlage D.1.3 volgt dat de berekende stijghoogten met 0,30 m dienen te worden verhoogd om een inschatting te krijgen van de potentialen bij een stopgezette drinkwaterwinning. Om de resultaten te verkrijgen uitgaande van een stopgezette drinkwaterwinning zijn de effecten daarvan separaat verdisconteerd. De resultaten van alle berekeningen zijn samengevat in Paragraaf J.5.2.

#### **Conclusies n.a.v. de berekeningen met Extrapol**

- Hoewel het MHW2065 lager is dan het WBN2023 (NAP + 3,60 m respectievelijk NAP + 3,77 m) zijn de stijghoogten in de PL en de TZ hoger dan bij WBN2023. Dit kan worden verklaard door de aanmerkelijk langere duur van de rivierafvoer-component in het HMHW2065 van 2424 uur t.o.v. 400 uur bij WBN2023.
- De stijghoogten in TZ en PL voor WBN2115 nemen fors toe (circa 0,65 m in de TZ en circa 0,80 m in de PL) ten opzichte van WBN2023. Dit komt niet alleen door een verhoging van de topstand maar vooral door stijging van de zeespiegel.
- Uit de berekeningen volgt dat het stijghoogteverschil tussen de TZ en de PL onder dagelijkse omstandigheden gering is (ter plaatse van de boorpaal en het anker tot 0,10 m). Onder maatgevende omstandigheden neemt dit fors toe tot circa 1,0 m. In de Plaxis-berekening voor raai 2 is dit slechts 0,3 m. Volgens de simulatie met Pastas is dit verschil vergelijkbaar als met Plaxis. De tussenkleilaag tussen de TZ en de PL is zeer gering in dikte (slechts 1 m) en de tijdsduur van het hoogwater relatief lang waardoor een gering verschil zoals uit de Plaxis berekening volgt, is te verklaren. De analytische berekeningen voor de TZ en de PL zijn gescheiden uitgevoerd en houden geen rekening met de invloed van de dunne tussenkleilaag. Hierdoor mag worden verwacht dat de werkelijke stijghoogten in TZ en PL dichter bij elkaar komen. De berekende stijghoogten in de TZ worden dus onderschat en de stijghoogten in de PL worden onderschat.
- De berekende stijghoogten voor MHW2065 zijn vergeleken met de door de aannemer uitgevoerde extrapolaties. Voor de resultaten van deze vergelijking wordt verwezen naar Paragraaf J.5.2.

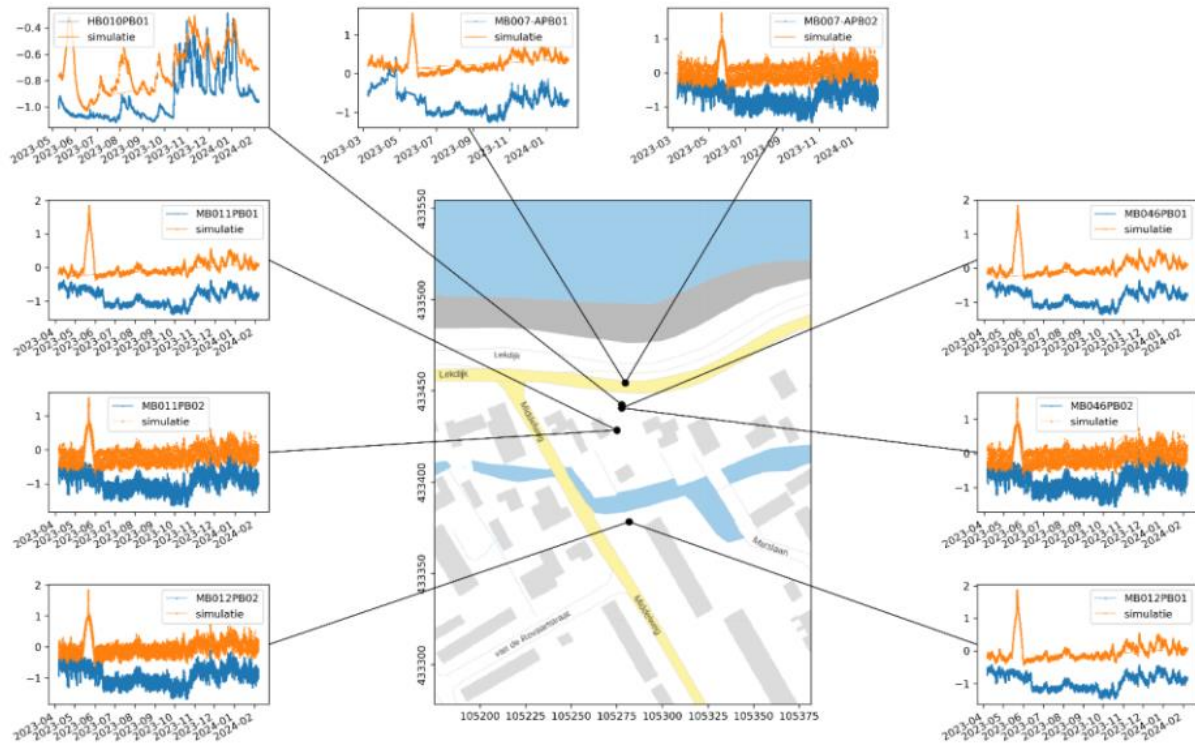
#### **J.4.3**

##### **Simulatie/extrapolatie voor WBN2023 met Tijdreeksanalyse met Pastas, raai 1 t/m 6**

Met de modellen zoals genoemd bij de Tijdreeksanalyse (zie Artesia, April 2024) zijn ook simulaties uitgevoerd voor de situatie tijdens WBN2023. Hierbij zijn de stijghoogten berekend als gevolg van een hoogwatergolf (WBN2023) waarbij de onttrekking van Oasen is uitgezet. Dit is uitgevoerd voor zowel de TZ als de PL voor de raaien 1 t/m 6. Met dit model is de invloed van lekkages ook niet meegenomen.

Voor de resultaten van de berekeningen wordt verwezen naar (Artesia, April 2024). Een samenvatting van de berekeningsresultaten van alle raaien is in Bijlage J.5.2 weergegeven. Voor een aantal locaties (peilbuizen) zijn geen waarden gegeven omdat hiervoor geen goede simulatie kon worden uitgevoerd. De resultaten van de berekeningen zijn ook in het digitaal dossier opgenomen (zie Bijlage L).

Als voorbeeld is in Figuur 138 het berekeningsresultaat van de simulatie weergegeven voor de TZ en de PL in raai 2.



Figuur 138 Berekeningsresultaten simulatie WBN2023 voor raai 2 voor de TZ en de PL. Zonder onttrekking van Oasen (De blauw lijn geeft de gemeten stijghoogte en de oranje lijn de simulatie).

Uit de berekening in raai 2 volgt dat de stijghoogte bij WBN2023 ter plaatse van de boorpaal in de TZ NAP + 1,84 m is (zie peilbuis MB046PB01 in Figuur 137). Met Plaxis voor deze situatie NAP + 0,52 m is berekend (zie Tabel 34). In de Plaxis-berekeningen is echter geen rekening gehouden met het stopzetten van de onttrekking van Oasen waardoor de stijghoogte met 0,30 m zal toenemen tot NAP + 0,82 m.

In de PL is hier stijghoogte van NAP + 1,63 m berekend (zie peilbuis MB046PB02 in Figuur 137). Met Plaxis voor deze situatie NAP + 0,86 m is berekend, zie Tabel 34.

Als rekening wordt gehouden met het stopzetten van de onttrekking zal de stijghoogte met 0,30 m toenemen tot NAP + 1,16 m. Hierdoor zijn de verschillen relatief klein.

## J.5 Samenvatting resultaten en conclusies

### J.5.1 Invloed lekkages

De verschillende hypothesen van vernatting en hydraulische kortsluiting zijn geverifieerd en de invloeden daarvan (op de stijghoogten in de TZ en de PL en hoogte van het freatisch vlak) zijn berekend. Hierbij is onderscheid gemaakt in:

1. Lekkage/vernatting langs boorpaal van TZ naar deksloof.
2. Lekkage/vernatting rond het anker van TZ naar deksloof.
3. Hydraulische kortsluiting langs boorpaal van PL naar TZ.

### **1 en 2: Modelling lekkage/vernatting langs boorpaal en anker van TZ naar deksloof:**

Uit de analyses volgt dat de invloeden van de verschillende hypothesen goed met Plaxis zijn te bepalen. De invloeden zijn echter twee-dimensionaal gemodelleerd. Daarmee simuleren de berekeningsresultaten het geval dat ter plaatse van alle boorpalen of ankers lekkage optreedt. Dit is een conservatieve aanname ter bepaling van de verhoging van het freatisch vlak of de vernatting (debiet), die in werkelijkheid vermoedelijk lager zal zijn dan hier berekend. Er wordt namelijk vanuit gegaan dat niet alle palen of ankers lekken.

Uit de berekeningen in raai 2 voor lekkage/vernatting langs boorpaal of het anker van de TZ naar deksloof (zie 1 en 2) volgt dat de lekkagedebieten variëren tussen 0,45 en 0,85 m<sup>3</sup>/dag per strekkende meter dijk. Of de spleet of het gat daarbij wordt gemodelleerd met een doorlatendheid van losgepakt zand of een volledige met water gevulde ruimte heeft slechts geringe invloed. Het freatisch vlak stijgt als gevolg van deze lekkages met maximaal 0,3 m van NAP – 1,05 tot NAP - 0,75 m en is volgens de berekening alleen in de directe omgeving tot op slechts enkele meters rond de deksloof merkbaar en is berekend ervan uitgaande dat alle ankers of alle boorpalen lekken (2D) en is derhalve conservatief. Het invloedsgebied van de lekkage is aanmerkelijk kleiner dan het gebied waarin de hoogte van het freatisch vlak invloed heeft op de stabiliteit van de dijk (stabiliteitsgebied).

### **3: Hydraulische kortsluiting langs boorpaal van PL naar TZ**

Ter plaatse van de kortsluiting neemt de stijghoogte in de TZ toe tot maximaal de stijghoogte in de PL (zonder kortsluiting). Het invloedsgebied van een hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL is vrij groot. Uit de analyses volgt dat op 20 m afstand de stijghoogteverandering van het getij van 20% merkbaar is.

De stijghoogte verandering is vooral merkbaar in de TZ. De stijghoogte in de PL verandert nauwelijks. Dit kan worden verklaard door de geringe dikte van de TZ (gemiddeld 1 m) t.o.v. de dikte van de PL (circa 15 m). Als gevolg van het optreden van langdurig hoogwater (denkende aan enkele weken) zal zowel de stijghoogteverandering en de grootte van het invloedsgebied toenemen (zie Paragraaf J.5.2).

De hier uitgevoerde Plaxis berekeningen is de hydraulische kortsluiting twee dimensionaal gemodelleerd. Daarmee simuleren de berekeningsresultaten het geval dat ter plaatse van alle boorpalen tegelijk hydraulische kortsluiting optreedt. Dit is conservatief uitgangspunt.

## **J.5.2**

### **Simulatie/extrapolatie voor WBN2023, WBN2115 en MHW2065**

De berekeningen met Plaxis en Extrapol en zijn gebaseerd op de peilbuismetingen bij een gemiddeld drinkwateronttrekking van Oasen van 3419 m<sup>3</sup>/d. De berekeningen van Extrapol zijn tevens uitgevoerd voor een situatie met een drinkwaterwinning van 7946m<sup>3</sup>/dag. Tijdens maatgevende omstandigheden (waterveiligheid) dient ervan te worden uitgegaan dat de drinkwaterwinning minimaal is. Dit is een conservatief uitgangspunt.

De berekeningsresultaten (stijghoogten) zijn daarom gecorrigeerd voor de grondwateronttrekking van Oasen, d.w.z. geen grondwateronttrekking. Dit betekent dat de berekende stijghoogte met Plaxis en Extrapol zijn verhoogd. In Tabel 35 zijn de correcties voor de stijghoogten gegeven op basis van de analyses in Paragraaf 4.3.2, Tabel 3.

De uitgevoerde simulaties met de modellen die zijn gebruikt voor de tijdreeksanalyse zijn reeds gebaseerd op een onttrekking van 0 m<sup>3</sup>/d waardoor deze niet behoeven te worden verhoogd om te compenseren voor een onttrekkingsdebiet hoger dan 0 m<sup>3</sup>/d.

Tabel 35: Invloed onttrekking Oasen op de stijghoogten in de TZ en de PL.

raainr	verschil stijghoogte TZ en PL	
	bij onttrekking van 3419 m3/d naar 0	bij onttrekking van 7946 m3/d naar 0
	[m]	[m]
1 en 2	0,30	0,85
3 en 4	0,25	0,70
5 en 6	0,15	0,40

In de onderstaande zes tabellen (Tabel 36 tot en met Tabel 41) zijn de berekende stijghoogten in de TZ en de PL per raai samengevat van de 3 gebruikte modellen waarmee de extrapolaties zijn uitgevoerd. Opmerkingen bij de tabellen:

- Met een gele arcering zijn de stijghoogten gemarkeerd zoals berekend in de TZ ter plaatse van de boorpaal en op circa 15 m afstand richting de polder. Met een oranje markering is hetzelfde gedaan voor de stijghoogten in de PL. Dit zijn namelijk de locaties die het meest belangrijk zijn voor de sterkteberekening van de boorpalenwand.
- In de tabellen zijn ook de door de aannemer geëxtrapoleerde en gehanteerde stijghoogten weergegeven en oranje gearceerd (laatste 2 kolommen).
- De Plaxis-analyses zijn alleen voor raai 2 uitgevoerd. In de Tabellen voor raai 2 zijn deze resultaten weergegeven waarbij zowel de resultaten zonder als met hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL zijn weergegeven.
- De resultaten zoals berekend met de modellen van de tijdreeksanalyse met Pastas zijn alleen beschikbaar op de locaties van de peilbuizen (dus niet op een afstand van 20 m uit de buitenkruinlijn richting de rivier (x=-20 in de tabellen). Voor een aantal locaties (peilbuizen) zijn geen waarden gegeven omdat hiervoor geen goede simulatie voor kon worden uitgevoerd.
- De resultaten zijn ook in het digitaal dossier opgenomen (zie Bijlage L).

Tabel 36: Resultaten extrapolaties raai 1.

locatie	Afstand vanaf buitenkruin [m]	Extrapolatie						Ontwerp aannemer	
		raai 1 WBN2023 =NAP+3,77m		raai 1 WBN2115 =NAP+4,72m		MHW2065 =NAP +3,60	MHW2115 =NAP +4,26m	2023 dagelijks	2065 dagelijks
		TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	PL [m+NAP]	PL [m+NAP]	TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]
Extrapol mei en juni 2023									
	-20.0	0.97	2.06	1.62	2.87	2.13			
circa anker	9.0	0.87	1.93	1.51	2.73	2.01			
boorpaal	24.0	0.82	1.86	1.45	2.66	1.95			
14,5m uit boorpaal	42.0	0.76	1.78	1.39	2.58	1.88			
	74.0	0.66	1.65	1.27	2.44	1.76			
Extrapol december 2023									
	-20.0	1.17	2.23	1.82	3.04	2.23			
circa anker	9.0	1.08	2.04	1.71	2.85	2.05			
boorpaal	24.0	1.03	1.95	1.65	2.75	1.96			
14,5m uit boorpaal	42.0	0.98	1.85	1.59	2.66	1.86			
	74.0	0.88	1.67	1.48	2.57	1.69			
Ontwerp aannemer zie BIND-B Nota Technische uitgangspunten									
	-30.0					2.23	2.59		
circa anker	5.0					2.14	2.49		
boorpaal	20.0					2.10	2.45		
14,5m uit boorpaal	30.0					2.07	2.42		
	70.0					1.97	2.31		
PASTAS Artesia Water (data t/m okt 2023)									
	-20.0								
circa anker	9.0		1.38						
boorpaal	24.0	1.19	1.30						
14,5m uit boorpaal	42.0	1.55	1.27						
	74.0	1.26	1.19						
PASTAS Artesia Water (data t/m febr 2024)									
	-20.0								
circa anker	9.0		1.70						
boorpaal	24.0	1.83	1.63						
14,5m uit boorpaal	42.0	1.94	1.78						
	74.0	1.85	1.84						





Tabel 39: Resultaten extrapolaties raai 4.

locatie	Afstand vanaf buitenkruin [m]	Extrapolatie				Ontwerp aannemer		locatie	Afstand vanaf buitenkruin [m]	Extrapolatie				Ontwerp			
		WBN2023 =NAP+3,77m		WBN2115 =NAP+4,72m		MHW206 5=NAP +3,60	MHW211 5=NAP +4,26m			2023 dagelijks		2115 dagelijks		2065 dagelijks	2115 dagelijks		
		TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	PL [m+NAP]	PL [m+NAP]			TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	PL [m+NAP]	PL [m+NAP]		
Extrapol mei en juni 2023														Extrapol mei en juni 2023 bij gem getij NAP+0.51			
	-20.0	2.28	2.45	2.91	3.30	2.49		-20.0	1.21	0.11	1.84	0.95					
circa anker	10.0	0.89	2.25	1.48	3.08	2.29	circa anker	10.0	-0.02	-0.03	0.58	0.80					
boorpaal	29.0	0.32	2.12	0.89	2.95	2.18	boorpaal	29.0	-0.50	-0.11	0.07	0.72					
14,5m uit boorpaal	43.5	-0.02	2.03	0.53	2.85	2.09	14,5m uit b	43.5	-0.78	-0.16	-0.23	0.66					
	77.5	-0.55	1.83	-0.03	2.64	1.90		77.5	-1.18	-0.29	-0.67	0.52					
Extrapol december 2023														Extrapol december 2023 bij gem getij NAP + 1.24 m			
	-20.0	2.57	2.54	3.20	3.38	2.51		-20.0	1.83	0.80	2.46	1.64					
circa anker	10.0	1.15	2.32	1.75	3.15	2.30	circa anker	10.0	0.53	0.65	1.12	1.48					
boorpaal	29.0	0.55	2.19	1.12	3.01	2.18	boorpaal	29.0	-0.01	0.56	0.56	1.38					
14,5m uit boorpaal	43.5	0.20	2.09	0.75	2.09	2.09	14,5m uit b	43.5	-0.32	0.50	0.24	1.31					
	77.5	-0.37	1.88	-0.37	1.88	1.89		77.5	-0.80	0.35	-0.29	1.16					
Ontwerp aannemer zieBIND-B Nota Technische uitgangspunten														Ontwerp aannemer zieBIND-B Nota Technische uitgangspunten			
	-30.0					2.23	2.59		-30.00				-0.19	-0.19			
circa anker	5.0					2.14	2.49	circa anker	5.00				-0.23	-0.23			
boorpaal	20.0					2.10	2.45	boorpaal	20.00				-0.25	-0.25			
14,5m uit boorpaal	30.0					2.07	2.42	14,5m uit b	30.00				-0.26	-0.26			
	70.0					1.97	2.31		70.00				-0.30	-0.30			
PASTAS Artesia Water (data t/m okt 2023)														PASTAS Artesia Water (data t/m okt 2023)			
	-20.0		2.26	1.83													
circa anker	10.0		1.74														
boorpaal	29.0		1.70														
14,5m uit boorpaal	43.5	0.01	1.59														
	77.5	0.81															
PASTAS Artesia Water (data t/m febr 2024)														PASTAS Artesia Water (data t/m febr 2024)			
	-20.0		1.48	2.04													
circa anker	10.0		1.96														
boorpaal	29.0		1.99														
14,5m uit boorpaal	43.5	0.46	2.14	2.04													
	77.5	2.14															

Tabel 40: Resultaten extrapolaties raai 5.

locatie	Afstand vanaf buitenkruin [m]	Extrapolatie				Ontwerp aannemer		locatie	Afstand vanaf buitenkruin [m]	Extrapolatie				Ontwerp aannemer			
		WBN2023 =NAP+3,77m		WBN2115 =NAP+4,72m		MHW206 5=NAP +3,60	MHW211 5=NAP +4,26m			2023 dagelijks		2115 dagelijks		2065 dagelijks	2115 dagelijks		
		TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	PL [m+NAP]	PL [m+NAP]			TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	PL [m+NAP]	PL [m+NAP]		
Extrapol mei en juni 2023														Extrapol mei en juni 2023 bij gem getij NAP+0.51			
	-20.0		2.64		3.50	2.64		-20.0		0.15		1.01					
circa anker	9.0		2.54		3.40	2.56	circa anker	9.0		0.11		0.96					
boorpaal	28.0		2.49		3.33	2.51	boorpaal	28.0		0.09		0.93					
14,5m uit boorpaal	40.0		2.45		3.29	2.48	14,5m uit b	40.0		0.07		0.92					
	102.0		2.26		3.10	2.31		102.0		-0.01		0.82					
Extrapol december 2023														Extrapol december 2023 bij gem getij NAP + 1.24 m			
	-20.0		2.71		3.57	2.66		-20.0		0.86		1.72					
circa anker	9.0		2.58		3.43	2.54	circa anker	9.0		0.79		1.64					
boorpaal	28.0		2.50		3.34	2.47	boorpaal	28.0		0.74		1.59					
14,5m uit boorpaal	40.0		2.45		2.45	2.42	14,5m uit b	40.0		0.72		1.56					
	102.0		2.20		2.20	2.19		102.0		0.58		1.40					
Ontwerp aannemer zieBIND-B Nota Technische uitgangspunten														Ontwerp aannemer zieBIND-B Nota Technische uitgangspunten			
	-30.0					2.23	2.59		-30.00				-0.19	-0.19			
circa anker	5.0					2.14	2.49	circa anker	5.00				-0.23	-0.23			
boorpaal	20.0					2.10	2.45	boorpaal	20.00				-0.25	-0.25			
14,5m uit boorpaal	30.0					2.07	2.42	14,5m uit b	30.00				-0.26	-0.26			
	70.0					1.97	2.31		70.00				-0.30	-0.30			
PASTAS Artesia Water (data t/m okt 2023)														PASTAS Artesia Water (data t/m okt 2023)			
	-20.0		9.0		2.56												
circa anker	9.0		2.49														
boorpaal	28.0		2.50														
14,5m uit boorpaal	40.0		2.33														
	102.0																
PASTAS Artesia Water (data t/m febr 2024)														PASTAS Artesia Water (data t/m febr 2024)			
	-20.0		9.0		2.44												
circa anker	9.0		2.40														
boorpaal	28.0		2.41														
14,5m uit boorpaal	40.0		2.34														
	102.0																

Tabel 41: Resultaten extrapolaties raai 6.

locatie	Afstand vanaf buitenkruin [m]	Extrapolatie				Ontwerp aannemer	
		WBN2023 =NAP+3,77m		WBN2115 =NAP+4,72m		MHW2065=NAP +3,60	MHW2115=NAP +4,26m
		TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	PL [m+NAP]	PL [m+NAP]
Extrapol mei en juni 2023							
	-20.0		2.79		3.65	2.79	
circa anker	7.5		2.65		3.51	2.66	
boorpaal	23.5		2.56		3.42	2.58	
14,5m uit boorpaal	34.0		2.51		3.36	2.53	
	84.0		2.21		3.04	2.26	
Extrapol december 2023							
	-20.0		2.78		3.64	2.74	
circa anker	7.5		2.64		3.49	2.61	
boorpaal	23.5		2.57		3.41	2.53	
14,5m uit boorpaal	34.0		2.52		2.52	2.49	
	84.0		2.29		2.29	2.28	
Ontwerp aannemer zieBIND-B Nota Technische uitgangspunten							
	-30.0				2.23	2.59	
circa anker	5.0				2.14	2.49	
boorpaal	20.0				2.10	2.45	
14,5m uit boorpaal	30.0				2.07	2.42	
	70.0				1.97	2.31	
PASTAS Artesia Water (data t/m okt 2023)							
	-20.0						
circa anker	7.5		2.67				
boorpaal	23.5		2.37				
14,5m uit boorpaal	34.0		2.53				
	84.0		2.34				
PASTAS Artesia Water (data t/m febr 2024)							
	-20.0						
circa anker	7.5		2.50				
boorpaal	23.5		2.44				
14,5m uit boorpaal	34.0		2.44				
	84.0		2.41				

locatie	Afstand vanaf buitenkruin [m]	Extrapolatie				Ontwerp aannemer	
		2023 dagelijks		2115 dagelijks		2065 dagelijks	2115 dagelijks
		TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	TZ [m+NAP]	PL [m+NAP]	PL [m+NAP]	PL [m+NAP]
Extrapol mei en juni 2023 bij gem getij NAP+0.51							
	-20.0		0.26		1.12		
circa anker	7.5		0.18		1.04		
boorpaal	23.5		0.13		0.99		
14,5m uit b	34.0		0.11		0.95		
	84.0		-0.05		0.78		
Extrapol december 2023 bij gem getij NAP + 1.24 m							
	-20.0		0.95		1.80		
circa anker	7.5		0.85		1.70		
boorpaal	23.5		0.80		1.65		
14,5m uit b	34.0		0.77		1.61		
	84.0		0.61		1.45		
Ontwerp aannemer zieBIND-B Nota Technische uitgangspunten							
	-30.0				-0.19	-0.19	
circa anker	5.00				-0.23	-0.23	
boorpaal	20.00				-0.25	-0.25	
14,5m uit b	30.00				-0.26	-0.26	
	70.00				-0.30	-0.30	

### Conclusies naar aanleiding van de berekeningsresultaten

Hoogte freatisch vlak:

- WBN2023  
Het Plaxis model geeft een realistische inschatting van de hoogte van het freatisch vlak onder dagelijkse omstandigheden ter plaatse van de boorpaal. Model en veldwaarnemingen komen goed overeen. De hoogte van het freatisch vlak ter plaatse van de boorpaal tijdens WBN2023 is met Plaxis berekend op NAP – 1,05 m (zie Figuur 127 in Paragraaf J.4.1.3) en daarmee verandert de hoogte van het freatisch vlak nauwelijks ten opzichte van dagelijks omstandigheden. Aangezien de dijk uit vrij ondoorlatende klei bestaat is dit goed verklaarbaar en sluit aan bij de ervaringen in dit gebied.
- WBN2115  
Als gevolg van WBN2115 gaat de buitenwaterstand met 0,95 m omhoog ten opzichte van WBN2023. Niet alleen het WBN maar ook het gemiddeld getij. Uit de Plaxis berekeningen (zie Figuur 127 in Paragraaf J.4.1.3) volgt dat het freatisch vlak hierdoor stijgt naar NAP – 0,60 m. Een verhoging van 0,45 m die wordt veroorzaakt door een circa 0,55 m hogere stijghoogte in de TZ en een 0,95 m hoger gemiddeld getij.
- Invloed hydraulische kortsluiting  
Hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL heeft geen invloed op de ligging van het freatisch vlak.
- Lekkage langs anker /boorpaal  
Lekkage langs anker/boorpaal heeft wel effect op het freatisch vlak ter plaatse van de deksloof. Vanuit de modelmatige berekeningen moet rekening worden gehouden met een stijging van 0,30 m, maar dit is alleen in de directe omgeving van de deksloof merkbaar.

Stijghoogten PL en TZ (zonder hydraulische kortsluiting):

- Verschil MHW2065 met WBN2023  
Hoewel het MHW2065 lager is dan het WBN2023 (NAP + 3,60 m, respectievelijk NAP + 3,77 m) zijn de stijghoogten in de PL en de TZ hoger dan bij WBN2023. Dit kan worden verklaard door de aanmerkelijk langere duur van de rivierafvoer-component in het HMHW2065 van 2424 uur t.o.v. 400 uur bij WBN2023. Dit volgt zowel uit de Plaxis als Extrapol-berekeningen.

- Verhoging stijghoogten WBN2023 en WBN2215:
  - De stijghoogten in de TZ en de PL voor WBN2115 nemen fors toe t.o.v. WBN2023. Uit de Extrapol berekeningen volgt circa 0,65 cm in de TZ en circa 0,80 m in de PL. (Uit de Plaxis berekening volgt ook een forse verhoging zij het gemiddeld iets minder dan Extrapol). Dit komt niet alleen door een verhoging van de topstand maar vooral door stijging van de zeespiegel. Door de stijging van de zeespiegel zullen de gemiddelde buitenwaterstanden in te toekomst toenemen. Hierdoor zullen ook de stijghoogten in de TZ en de PL onder dagelijks omstandigheden toenemen. Dit is in de Tabellen weergegeven. Voor raai 2 betekent dit bijvoorbeeld dat deze stijghoogte in de TZ en de PL met circa 0,55 m zullen toenemen volgens de Plaxis-berekeningen. Voor raai 5 en 6 betekent dit een toename van circa 0,80 m in PL volgens de Extrapol berekeningen.
- Verschil stijghoogte tussen TZ en PL:
  - Uit de berekeningen volgt dat het stijghoogteverschil tussen de TZ en de PL onder dagelijkse omstandigheden gering is (ter plaatse van de boorpaal en het anker tot 0,10 m). Onder maatgevende omstandigheden neemt dit fors toe volgens de Extrapol berekeningen, namelijk tot circa 1,0 m. In de Plaxis-berekening voor raai 2 is dit slechts 0,3 m. Volgens de simulatie met Pastas is dit verschil vergelijkbaar als met Plaxis. De tussenkleilaag tussen de TZ en de PL is zeer gering in dikte (slechts 1 m) en de tijdsduur van het hoogwater relatief lang waardoor een gering verschil zoals uit de Plaxis berekening volgt, is te verklaren. De Extrapol berekeningen voor de TZ en de PL zijn gescheiden uitgevoerd en houden geen rekening met de invloed van de dunne tussenkleilaag. Hierdoor mag worden verwacht dat de werkelijke stijghoogten in TZ en PL dicht bij elkaar komen zoals uit de Plaxis berekening volgt. De met Extrapol berekende stijghoogten in de TZ worden dus onderschat.
- Verschillen tussen de raaien:
 

De gemeten stijghoogten en responsen in de TZ en de PL zijn voor raai 1 en 2 vergelijkbaar, wat ook logisch is omdat de afstand tussen deze raaien gering is (circa 25 m). De extrapolaties met Extrapol leveren daarom nagenoeg dezelfde resultaten ter plaatse van de boorpaal. Hetzelfde geldt ook hier voor de simulaties met Pastas. Voor de raaien 3 en 4 en de raaien 5 en 6 kan dezelfde conclusie worden getrokken.

Vergelijking MHW2065 Extrapol en extrapolatie door de aannemer t.b.v. ontwerp:

De berekende stijghoogten voor MHW2065 zijn vergeleken met de door de aannemer uitgevoerde extrapolaties.

- Als de resultaten met Extrapol worden vergeleken met de resultaten van de aannemer (zie 7<sup>e</sup> kolom in de tabellen) volgt dat voor de raaien 1 t/m 4 vergelijkbare stijghoogten in de PL worden berekend (het verschil is 5 tot 15 cm waarbij in raai 1 en 2 met Extrapol iets lagere waarden zijn berekend en voor raaien 3 en 4 iets hogere). Voor de raaien 5 en 6 is het verschil groter waarbij met Extrapol circa 40cm hogere stijghoogten in de PL worden berekend dan de aannemer voor de situatie bij MHW2065.
- Zoals aangegeven zullen door de stijging van de zeespiegel de stijghoogten in de TZ en de PL onder dagelijks omstandigheden toenemen. Dit is in de tabellen weergegeven. Hierdoor wordt de sterkte vooral in de onderzijde van de deklaag lager ten opzichte van de huidige situatie.

Invloed hydraulische kortsluiting:

- Invloedgebied hydraulische kortsluiting:
 

Uit de Plaxis berekeningen in Paragraaf J.4.1.2 volgde al dat bij hydraulische kortsluiting tussen de TZ en de PL vooral de stijghoogte in de TZ hoger wordt (uit Paragraaf J.4.1.2 volgt *'op een afstand van circa 20 m voor en 20 m na de boorpaal (de boorpaal staat op  $x=72m$ ) is circa 20% stijghoogteverschil merkbaar is t.o.v. de situatie zonder hydraulische kortsluiting'*). Uit de Plaxis berekeningen volgt dat dit invloedgebied bij het optreden van langduriger hoogwaterstanden groter is.

Dit invloedgebied, dat groter is dan 20 m voor en 20 m na de boorpaal, is daarmee groter dan het gebied waarin de stijghoogten in de TZ invloed hebben op de stabiliteit van de dijk (stabiliteitsgebied).

- Verandering stijghoogte TZ door hydraulische kortsluiting:  
De verhoging van de stijghoogte in de TZ ter plaatse van de hydraulische kortsluiting is gelimiteerd tot de stijghoogte in de PL.  
Onder dagelijkse omstandigheden (getij) is dit afhankelijk van de manier van modelleren (normaal gepakt zand, losgepakt zand en een volledig open spleet langs de boorpaal ter hoogte van de tussenkleilaag) zoals in Paragraaf J.4.1.2 is weergegeven. Uit de berekeningsresultaten voor de situaties tijdens WBN2023 en WBN2115 (zie Tabel 37) volgt dat de manier van modelleren minder invloed heeft. De stijghoogte in de TZ stijgt bij normaal gepakt zand (in de spleet) al met 25 cm (van NAP + 0,82 m naar NAP + 1,07 m) en ligt daarmee slechts 9 cm lager dan de stijghoogte in de PL (NAP + 1,16 m zonder kortsluiting). De toename van de stijghoogte in TZ is daarmee circa 75% van het verschil tussen de stijghoogte in de TZ en de PL zonder kortsluiting.
- Invloed 3D:  
In de hier uitgevoerde Plaxis berekeningen is de hydraulische kortsluiting twee dimensionaal gemodelleerd. Daarmee simuleren de berekeningsresultaten het geval dat ter plaatse van alle boorpalen tegelijk hydraulische kortsluiting optreedt. Dit is een conservatieve aanname. De werkelijke verandering van stijghoogte in de TZ zal hierdoor geringer zijn.

## K Bijlage referenties

- ABT. (2014). Dijkversterking Kinderdijk-Schoonhovenseveer, Uitgangspunten Constructies in dijk v3 code 13013G.
- ADCIM. (2019). Onderzoek naar wateroverlast Lekdijk 385-388 Nieuw-Lekkerland (doc 201600016-C-WA-006.pdf).
- Artesia. (Februari 2024). Tijdreeksanalyse Lekdijk, Update april 2024, Projectnummer 23.036.067
- Baars, S. v. (April 2021). Rapport De Lekdijk is lekgestoken!.
- CDVM (Juli 2016). Ontwerpnota UO Constructies binnentalud DNL – F2. Uitvoeringsontwerp Constructies Dijkvak Nieuw Lekkerland – sectie F2.
- CDVM (Oktober 2016). Verificatierapport. Uitvoeringsontwerp Constructies Binnentalud Dijkvak Nieuw Lekkerland – sectie F2-2.
- CRUX. (2022). ENW, vragen naar aanleiding KIS.
- Deltares. (Juli 2021). Spoedadvies Analyse waterveiligheid Kinderdijk-Schoonhovenseveer, kenmerk 11207207-002-GEO-0004, rapport fase 1, definitief, 1 juli 2021.
- Deltares. (2022). Offerte en Plan van Aanpak vervolgvragen KIS.
- Deltares. (Januari 2022-1). Analyse waterveiligheid Kinderdijk-Schoonhovenseveer (KIS), Fase 2 Toetsing aspecten uit rapportage "De Lekdijk is lekgestoken". Kenmerk 11207207-005-GEO-0016, definitief, 31 januari 2022.
- Deltares. (Januari 2022-2). Analyse waterveiligheid Kinderdijk- Schoonhovenseveer (KIS), fase 2, Bijlage B: InSAR satelliet metingen, kenmerk 11207207-005-GEO-0008, concept.
- Deltares. (Februari 2022). Rapport Analyse waterveiligheid Kinderdijk-Schoonhovenseveer, kenmerk 11207207-005-GEO.
- Deltares. (2023). Feitelijke beschouwing storten boorpalen KIS irt afwijking 00187. Delft.
- Deltares. (Mei 2023). Feitelijk verslag mogelijk Lekkende anker A08, sectie F2-2 raai 3, kenmerk 11208554-003-GEO-0008, 25 mei 2023.
- Deltares. (Februari 2024). Feitenverslag ontgravingen KIS, deel 2. Kenmerk 11208554-004-GEO-0008, februari 2024.
- ENW. (December 2021). Adviesvraag Lekdijk Kinderdijk-Schoonhovenseveer, Kenmerk ENW-22-04.
- ENW. (Februari 2022). Adviesvraag Lekdijk Kinderdijk-Schoonhovenseveer, Kenmerk ENW-22-04. d.d. 11-02-2022.
- SGS (2023-1) Analyserapporten SGS Environmental Analytics SGS rapport nummers 13878573v1, 13857064v1, 13856569v1 en 13855630v1.
- SGS (2023-2) Analyserapporten SGS Environmental Analytics SGS rapport nummers 13970383v1 en 13970240v1, 8-11-2023.
- TAW (2004). Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken, 1 september 2004.
- WSRL (2013). "NOTA: Technische Uitgangspunten dijkversterking KIS", 4 februari 2013.
- WSRL. (2023). Verzamelde vragen m.b.t. de verankering van de boorpalenwanden bij dijkversterking KIS.
- WSRL. (april 2024). Verantwoording locatiekeuze Definitief oordeel Waterveiligheid dijkversterking Kinderdijk-Schoonhovenseveer. WSRL, 1-04-2024.
- Wiertsema. (November 2023-1) Geotechnisch monitoringsonderzoek Dijkversterking Kinderdijk-Schoonhovenseveer te Nieuw-Lekkerland. Kenmerk VN-81722-1,15 november 2023.
- Wiertsema. (November 2023-2) Inclinometingen Dijkversterking Kinderdijk-Schoonhovenseveer te Nieuw-Lekkerland. Kenmerk VN-81722-2, 28 november 2023.
- Wiertsema (Januari 2024). Geotechnisch onderzoek. Grondonderzoek en monitoring ten

behoefte van het vervolgonderzoek dijkversterking Kinderdijk-Schoonhovenseveer te Nieuw-Lekkerland. Kenmerk VN-81722-3, 18 januari 2024.

Willems, S., Albers, C. en Smeets, I. (2020). Variability in the interpretation of probability phrases used in Dutch news articles — a risk for miscommunication. *Journal of Science communication*. 19(02)(2020)A03.

De rapportages zijn te raadplegen op de volgende internetpagina's:

<https://www.deltares.nl/nl/projecten/onderzoek-dijkversterking-lekdijk/>.

<https://www.waterschaprivierenland.nl/rapport-kis>.

<https://molenlanden.bestuurlijkeinformatie.nl/Reports/Document/d2f37248-d0df-489c-a7b7-f8537a1e1548?documentId=44eb1570-7abc-4b0b-bf0f-5ee0431913bd>.



# L Digitaal dossier

Bij dit rapport is een digitaal dossier toegevoegd. Dit dossier bestaat vooral uit meetresultaten en berekeningsresultaten. Een overzicht van het digitaal dossier is hieronder weergegeven:

Amplitudes peilbuismetingen: Berekende amplitudes en gemiddelde stijghoogten van peilbuizen in de TZ en de PL.

Extrapol: Berekeningsresultaten extrapolatie naar WBN met model Extrapol.

Geocheck veldwerkzaamheden Januari en Februari 2023.

Hydrochemische onderzoek: Analyseresultaten SGS.

Lekkende anker A08, sectie F2-2 raai 3: Feitelijk verslag mogelijk lekkende anker A08, sectie F2-2 raai 3: rapportage (memo), inclusief foto's en video's.

Onderzoeksresultaten Wiertsema 28-11-2023.

Peilbuismetingen Wiertsema 8-03-2024.

Resultaten Artesia Water; Resultaten tijdreeksanalysemodellen voor alle peilbuizen inclusief rapportage Artesia.

Resultaten Hellingmeters t/m 15-1-2023.

Resultaten Plaxis analyses: Resultaten Plaxis analyses grondwaterstromingsberekeningen.

Schadelocaties vernatting Boorpalen: Memo: Verantwoording locatiekeuze Definitief oordeel Waterveiligheid dijkversterking Kinderdijk-Schoonhovenseveer, WSRL 1 maart 2024 inclusief bijlagen.

Waterstandverlooptlijnen: Memo: Uitgangspunten waterstandsverloop beoordeling Boorpalenwanden secties F1-1, F2-2 en H2, WSRL 10-10-2023.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)