

**POV PIPING "PROEFTUIN MASTENBROEK" -
HOOFDRAPPORT
INVLOED VAN "DIJCK GESGIEDENISCH",
VOORLANDEN EN ZANDGROFHEID OP PIPING**

WATERSCHAP GROOT SALLAND

24 januari 2017
078555849:B - Definitief
C03011.000275.0300



Inhoud

Management samenvatting	1
1 Inleiding	3
2 Historisch onderzoek – Alterra	5
2.1 Projectbeschrijving.....	5
2.2 Resultaten	5
2.3 Conclusie.....	7
3 Geofysisch onderzoek – Medusa	8
3.1 Projectbeschrijving.....	8
3.2 Resultaten	9
3.2.1 Voorland	9
3.2.2 Oeverwal.....	9
3.2.3 Proeftuin	10
3.2.4 Bisschopswetering	10
3.3 Conclusie.....	11
4 Geotechnisch onderzoek – ARCADIS	13
4.1 Projectbeschrijving.....	13
4.2 Resultaten	14
4.3 Conclusie.....	16
5 Synthese en aanbevelingen	18
6 Literatuur	20
Bijlage 1 Deelrapport “Historisch onderzoek – Alterra”	21
Bijlage 2 Deelrapport “Geofysisch onderzoek – Medusa”	22
Bijlage 3 Deelrapport “Geotechnisch onderzoek – ARCADIS”	23
Colofon	24

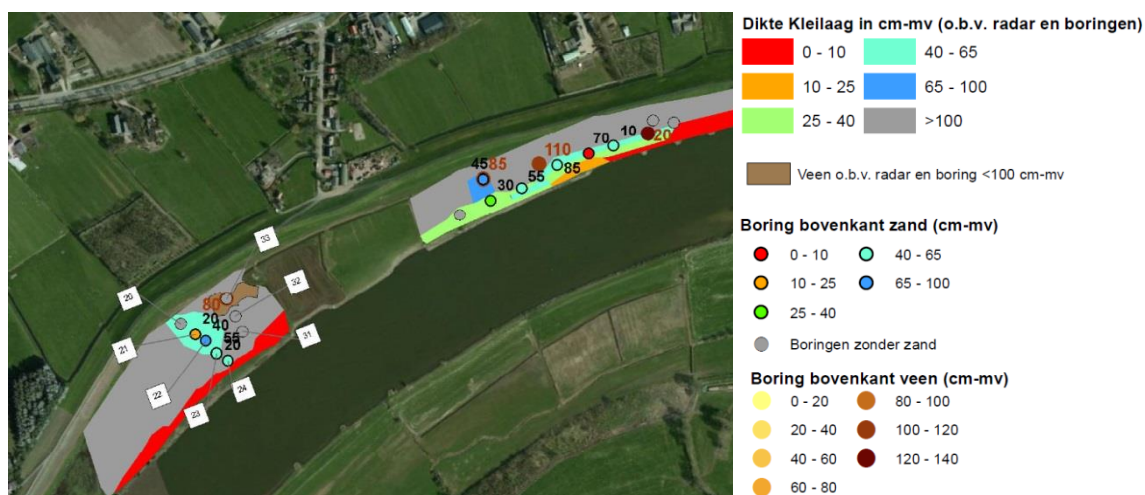
Management samenvatting

In het kader van de POV-piping is in de periode van 2014 tot 2015 door waterschap Groot Salland in samenwerking met Arcadis, Alterra en Medusa onderzoek gedaan naar de intredeweerstand, korrelgrootte en historische aanwijzingen voor zwakke plekken van het oudste poldergebied van Nederland. Dit is essentiële informatie voor het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen met de nieuwe rekenregel Sellmeijer (2011).

Het **doel** van deze verkenning was om:

- na te gaan of en hoe drie verschillende onderzoeksporen (geotechnisch, geofysisch en historisch onderzoek) elkaar kunnen versterken;
- het in beeld brengen van variaties in de ondergrond met elke onderzoekstechniek afzonderlijk.

De **aanleiding** hiervoor was het feit dat goede waarden voor intredeweerstand en zandgrofheid vaak lastig vast te stellen zijn door variaties in bodemopbouw. Bovendien verklaren de analyses met deze waarden niet altijd het ontstaan van zandmeevoerende wellen op specifieke plekken. In de figuur is als voorbeeld een bovenaanzicht van meetresultaten in het voorland gegeven. Het aantal legenda eenheden en het vlakken patroon geeft aan hoe de intredeweerstand in het voorland varieert.



Figuur 1: De resultaten van de metingen in het voorland met geofysisch onderzoek geven aan waar er sprake is van variatie in intredeweerstand

Het **onderzoek** heeft bestaan uit:

- zeer gedetailleerd grondonderzoek om de variatie in grondopbouw te onderzoeken;
- lokale bepaling van de intredeweerstand van het voorland met geofysisch onderzoek;
- historisch onderzoek naar aanwijzingen voor zwakke plekken.

Het onderzoek heeft uitgewezen dat:

- de verschillende onderzoekstechnieken elkaar alleen in beperkte mate versterken;
- de individuele onderzoeksporen elk hun eigen beperkingen (blijven) houden, ondanks dat ook positieve resultaten zijn bereikt.

Juist met een combinatie van geofysische onderzoekstechnieken is het mogelijk om een gebiedsdekkend beeld van de intredeweerstand te verkrijgen. Maar het vaststellen van de zandgrofheid met een beperkte hoeveelheid metingen lastig blijft door de van nature aanwezige variatie in de ondergrond.

Het wordt aanbevolen om het historisch onderzoek beperkt van karakter te houden, omdat het vooral een toegevoegde waarde heeft als het louter gericht is op waterveiligheid.

Daarnaast zijn diverse aanbevelingen gedaan en conclusies getrokken.

De **hoofdconclusies** zijn:

- er zijn geen historische aanwijzingen geleverd die duiden op lokale zwakke plekken, waarvan de exacte locatie daadwerkelijk bekend is;
- met de juiste geofysische onderzoekstechnieken kan worden bespaard op arbeidsintensieve handboringen;
- samenhang met andere POV piping verkenningen met een accent op zandgrofheid is nodig om volledig inzicht te krijgen in de praktische toepasbaarheid van rekenregel van Sellmeijer 2011.

Vervolgtraject

De praktische aanbevelingen ten aanzien van grondonderzoek en het schematiseren van de ondergrond worden in een aanvullende verkenning "Heterogeniteit" verwoord in een Handleiding Grondonderzoek en een Schematiseringshandleiding. Deze aanvullende verkenning start op korte termijn.

1 Inleiding

In het nieuwe dijkverbeteringsprogramma HWBP is een Project Overstijgende Verkenning (POV) opgenomen naar het bezwijkmechanisme piping; de POV piping. Hierin wordt de problematiek inclusief oplossingsrichtingen rondom piping op een landelijk niveau onder de loep genomen. Eén van de aspecten is vergroting van de kennis over de bodem en eigenschappen van grondlagen. De verwachting is dat hierdoor op termijn de benodigde maatregelen, om piping te voorkomen, ingeperkt kunnen worden.

“Proeftuin Mastenbroek” (hierna Veecaten genoemd) en bevindt zich in dijkkring 10 “Mastenbroek”. Deze verkenning is tot stand gekomen via een samenwerking tussen Waterschap Groot Salland en ARCADIS met ondersteuning van Alterra en Medusa. In Figuur 2 is de onderzoekslocatie met een groene stip weergegeven tezamen met enkele andere markante punten in de omgeving.



Figuur 2: Verstoringen in de ondergrond die mogelijk een risico vormen voor piping

Het onderhavige rapport behandelt het pilotproject waarin drie onderzoekstechnieken met een verschillende invalshoek worden gecombineerd. Dit zijn historisch onderzoek (Alterra), geofysisch onderzoek met grondradar (Medusa) en geotechnisch bodemonderzoek (ARCADIS). Deze rapportage brengt de kennis en ervaring van de drie verschillende invalshoeken bij elkaar. Er is gezocht naar schakels tussen deze invalshoeken die een versterkt beeld geven van de gevoeligheid voor het faalmechanisme piping.

De probleemstelling van deze verkenning luidt: "De zandgrofheid en intredeweerstand zijn belangrijk voor de berekening van de veiligheid tegen piping. Rekenwaarden voor deze parameters zijn vaak lastig vast te stellen en lijken bovendien niet altijd het ontstaan van zandmeevoerende wellen op een specifiek plek te verklaren."

Het hoofddoel van dit onderzoek is om na te gaan of en hoe de drie verschillende onderzoeksporen elkaar kunnen versterken, teneinde meer te weten te komen over de kans op piping op een bepaalde locatie. Daarnaast hebben alle onderzoeksporen een eigen deeldoelstelling binnen de POV piping, die in de navolgende hoofdstukken verder zijn toegelicht.

De onderzoeksvragen die bij deze verkenning horen zijn:

1. kunnen de verschillende onderzoeksporen elkaar versterken teneinde meer te weten te komen over de kans op piping?
2. welk beeld ontstaat als de zandgrofheid in een fijnmazig raster wordt bepaald?
3. hoe kan de overgang van verschillende bodemlagen nauwkeurig worden vastgesteld?
4. kan de historie van een gebied gerichte aanwijzingen geven voor het ontstaan van zandmeevoerende wellen?

Leeswijzer

Deze rapportage is het hoofdrapport van de pilotstudie, waarin de resultaten van de verschillende deelonderzoeken worden samengevat. Daarnaast is gezocht naar schakels tussen de verschillende deelonderzoeken die elkaar kunnen versterken bij het onderzoeken naar risico's op piping. Naast deze hoofdrapportage zijn de rapportages van de drie deelonderzoeken opgenomen in de bijlagen.

2

Historisch onderzoek – Alterra

2.1 PROJECTBESCHRIJVING

Alterra heeft historisch onderzoek uitgevoerd naar sporen uit de geschiedenis in de regio van Mastenbroek die een risico kunnen vormen op piping [Bijlage 1]. De doelstelling van dit deelonderzoek was “de ligging van (begraven) rivierduinen vaststellen en aanwezigheid van oude bouwkundige en waterbouwkundige werken verifiëren.”

Piping kan mede te maken hebben met de bodemopbouw in relatie tot de bewonings- en bebouwingshistorie. Om hier een goed beeld van te krijgen is historisch onderzoek uitgevoerd dat een relevant tijdvak beslaat in relatie tot de dijkhistorie (circa 2000 jaar). Vroege bebouwing en aanleg van (voormalige) kunstwerken hadden vroeger vaak plaats in het tracé van de huidige dijk. De eerste dijken werden namelijk vooral opgeworpen ter verbinding van natuurlijke hoogten, hoogten die ook voor bebouwing al benut (zouden kunnen) zijn.

Bij bebouwing werden veelal ook waterwerken uitgevoerd (aanleg zijltjes, zielen, valletijen, sluisjes of drechten) of werden er relatief vaak of veel dijkaanpassing uitgevoerd in relatie tot de doorbraken die ieder gebied kende. Indien er goed zicht is op de historie van een dijktracé dan komen hiermee een scala aan factoren in beeld die – vaak negatief – bijdragen aan de risico's die voortvloeien uit piping. Historisch onderzoek zou dan ook, in combinatie met geotechnische en geofysische technieken, een eerste stap kunnen zijn om risicotracés te duiden.

Het nauwkeurig duiden van risico tracés en locaties was de opdracht aan de historicus.

2.2 RESULTATEN

In de rapportage van Alterra zijn enkele aanwijzingen genoemd die mogelijk wijzen op een risico op piping. De onderliggende paragrafen beschrijven of citeren de belangrijkste onderwerpen die in de rapportage van het deelonderzoek “historisch onderzoek” zijn opgenomen.

Geologische onderbouwing van de ondergrond

De geologische geschiedenis vanaf de Romeinse tijd tot heden is uitgebreid toegelicht in de rapportage. Het ontstaan van de zandige windafzettingen (dekzand) en het bosveen, welke tevens met het geotechnisch onderzoek zijn aangetroffen, zijn verklaard. Dit is echter voor het hele gebied van toepassing. Hieruit volgt dus niet, waar in het onderzoeksgebied op basis van deze geologische kennis kan worden beoordeeld, wat risicovolle locaties zijn voor piping. Door met deze kennis als achtergrond het veld in te gaan en boringen uit te voeren, kan wel een stap voorwaarts worden gezet in het onderzoek naar piping.

De Bisschopswetering

Door de Bisschopswetering stond in het verleden de polder Mastenbroek in verbinding met de IJssel door middel van een sluisje. Na de overstroming bij Zalk in 1440 is de IJssel, die vóór de overstroming ten zuiden van Zalk stroomde, veranderd van baan en is noordelijk langs Zalk gaan stromen. Hierdoor is de oorspronkelijke verbinding tussen de Bisschopswetering en de IJssel niet meer in het veld zichtbaar. Vermoedelijk lag de oorspronkelijke wetering in het verlengde van de huidige Bisschopswetering. Aangezien de proeftuin van het geotechnisch onderzoek ook in het verlengde ligt, bestond de kans dat restanten van deze wetering aanwezig waren. Ondanks verwoede pogingen van de historicus zijn er geen concrete aanwijzingen gevonden in de oude documenten, die wijzen op de aanwezigheid van een voormalige (uitwaterings)sluis.

Ook restanten van een oude watergang in de ondergrond kunnen een risico vormen op piping door de antropogene invloeden in de ondergrond. Dergelijke restanten zijn niet terug gevonden tijdens het geotechnisch onderzoek, maar het geofysisch onderzoek heeft wel enkele mogelijke aanwijzingen opgeleverd (zie paragraaf 3.2.4 op pagina 10).

Grenzen tussen dijkrechten

Omstreeks 1390 werden het Sallands dijkrecht en het Mastenbroeker dijkrecht geïntegreerd. Bij Nieuwstad lag de grens. Stroomafwaarts van Nieuwstad gold het Mastenbroekse dijkrecht en stroomopwaarts het Sallands dijkrecht. De manier van dijkenbouwen verschilde nogal, zodat op het 'laspunt' waar de twee typen dijken samenkomen naar verwachting sprake is van een zwakke plek in de dijk omdat opbouw en de aard van het materiaal niet goed op elkaar aansluiten. Hierdoor is op deze plek een verhoogd risico op piping te verwachten.

De exacte locatie van het laspunt is niet voldoende aangegeven waardoor het niet mogelijk is om op dit risico te anticiperen. Indien dit wel het geval was, had aanvullend (veld)onderzoek uitgevoerd kunnen worden om een schatting te kunnen maken in de omvang van dit risico. Grenzen tussen dijkrechten kunnen naast piping tevens een risico zijn voor het faalmechanisme macrostabiliteit.

Dijkdoorbraken

In het verleden is de Veecaterdijk vermoedelijk zes keer doorgebroken. De locaties van deze dijkdoorbraken zijn niet genoemd in de rapportage van Alterra. Wel is deze informatie voor een deel terug te vinden in luchtfoto's, hoogtekarten en rapportages van vroegere dijkversterkingen. Historisch onderzoek versterkt wel het beeld omtrent piping risico's en daarom is de relevante informatie opgenomen in Bijlage 3 van deze rapportage.

Antropogene invloeden in de ondergrond

Eenvoudige technieken om dijken te restaureren of te versterken zijn in het verleden toegepast. Gedacht kan worden aan planken, palen en takkenbossen, wat vervolgens is afgedekt met grond. Deze restanten van dergelijke antropogene invloeden hebben invloed op de stabiliteit van een waterkering. In de deelrapportage worden geen specifieke locaties genoemd waar dit een risico vormt en geconcludeerd moet worden dat dit soort gedetailleerde historische informatie niet beschikbaar is.

Waarnemingen van zand meevoerende wellen

In de rapportage is vermeld dat er zand meevoerende wellen in het gebied zijn waargenomen. In de historische archieven was echter geen kaartmateriaal beschikbaar waarop de locatie van deze wellen nader werd aangeduid. Dit onderstreept het belang dat dergelijke zaken bij het waterschap na elk hoogwater goed worden gedocumenteerd in het hoogwaterslag.

2.3 CONCLUSIE

Binnen dit deelproject is onderzocht of uitgebreid historisch onderzoek zinvol is om risico's op piping in het gebied Mastenbroek te ontdekken. Het doel was om aan de hand van de fysisch geografische en/of antropogene ontwikkelingen specifieke pipinggevoelige locaties aan te kunnen wijzen en de oorzaak hiervan te kennen. Hiervoor is onder meer gezocht naar rivierduinen en restanten van (water)bouwkundige werken in de buurt van de waterkering. Ondanks de inspanningen van de historicus zijn er eigenlijk geen concrete aanwijzingen gevonden van deze aard. De ligging van de Bisschopswetering is namelijk vooral een sterk vermoeden ingegeven door de verkavelingsstructuur (blokken) in de rest van de polder Mastenbroek.

Er is uitgebreid onderzoek uitgevoerd naar de ontwikkelingen van de afgelopen 2000 jaar, waarin de natuur en met name de mens het gebied heeft gemaakt zoals het nu is. Op basis hiervan is het ontstaan van het gebied verklaard. De resultaten zijn echter niet locatie specifiek genoeg om aanwijzingen te vinden voor mogelijk pipinggevoelige locaties.

Op basis van de resultaten in deze verkenning wordt afgeraden om een uitgebreid historisch onderzoek te doen naar ontstaansgeschiedenis van een bedijkt gebied. En ook vooral samenwerking te zoeken met historici die gericht zijn op het resultaat voor de waterveiligheid en niet op het te weten komen van zoveel mogelijk historische feiten, die met de dijk minder te maken hebben.

Uiteraard zijn historische aanwijzingen wel van belang voor de sterkte van de dijk. Maar deze informatie is dikwijls ook terug te vinden in recente documenten zoals een dijkverbeteringsplan van enkele decennia oud of op <http://www.topotijdreis.nl/>. Een quickscan uitgevoerd door een archeoloog of erfgoed deskundige van een gespecialiseerd bureau volstaat daarvoor.

3

Geofysisch onderzoek – Medusa

3.1 PROJECTBESCHRIJVING

Medusa heeft door middel van grondradar en gammaspectrometrie de bodemlagen in het voorland en aan de binnenzijde van de waterkering in kaart gebracht (zie Bijlage 2). De doelstelling van dit deelonderzoek was “de overgangen tussen verschillende bodemlagen nauwkeuriger vast kunnen stellen en in het bijzonder de overgang van de cohesieve klei- en/of veenlaag naar de erosiegevoelige zandlaag en indien mogelijk de volgende overgang naar de goed doorlatende zandlaag.”

De aanwezigheid van klei met voldoende dikte in het voor- en achterland is van groot belang om het risico op piping te beheersen. Als er buitendijks klei in de bodem zit met voldoende dikte, dan vergroot dit de kwelweglengte en verkleint dus de kans op het ontstaan van piping. Ook de binnendijkse kleilaag is van belang omdat deze de weerstand biedt tegen opbarsten en de kwelweg verlengt.

Om de dikte van het kleipakket in de bodem te onderzoeken wordt normaliter in raaien met vaste afstand boringen geplaatst. Op deze boorlocaties geeft dit een accuraat beeld, maar de resolutie van deze boringen is beperkt (bijvoorbeeld hart op hart 50 m). Hierdoor is tussen de boor-raaien geen informatie bekend van de kleilaagdikte. Ook loodrecht op de dijk, vooral in binnendijkse richting, is vaak geen detailinformatie beschikbaar.

Om een gebiedsdekkend beeld te krijgen van de opbouw van de bodem aan de voet van de dijk, kunnen meettechnieken uit de geofysica worden gebruikt om de ruimtelijke variatie in kleilaagdikte in beeld te brengen. Het doel van de inzet van deze meettechnieken is als volgt.

- Verkleinen van onzekerheden in meetgegevens. Met behulp van deze meettechnieken kan een gebiedsdekkend beeld van de variatie in deklaagdikte worden verkregen. Hierdoor kunnen boringen gericht worden geplaatst en kan mogelijk met minder boringen worden volstaan. Door het complete beeld wordt de onzekerheid verkleind.
- Verlagen van kosten van onderzoek. De metingen worden al rijdend (met bijvoorbeeld een quad) uitgevoerd. Hierdoor kunnen relatief snel grote gebieden in kaart worden gebracht.
- Voorkomen van schade aan de dijk bij uitvoeren van onderzoek. De meettechnieken zijn non-destructief, wat betekent dat bij de meting fysiek geen gat in de waterkering gemaakt hoeft te worden (zoals bij een boring).
- In een eerdere studie is laten zien dat de dikte van de kleilaag in de bovenste 1,5 m nauwkeurig kan worden gemeten [lit. 2]. In deze pilotstudie is vooral gekeken of het ook praktisch kan worden uitgevoerd en wat de beste methode is voor analyse van de meetgegevens. Daarvoor zijn in aanvulling op de metingen met de geofysica boringen gezet.

3.2 RESULTATEN

Er is op drie locaties geofysisch onderzoek uitgevoerd: in het voorland, binnendijs ter plaatse van de proeftuin en aan de binnenteen op de vermoedelijke locatie van de opgevulde Bisschopswetering.

Het voorland is gemeten met behulp van een gammaspectrometer en grondradar. Aanvullend hierop zijn, ter plaatse van afwijkende resultaten, gericht handboringen geplaatst om grondlagen te karakteriseren en laagscheidingen te identificeren.

3.2.1 VOORLAND

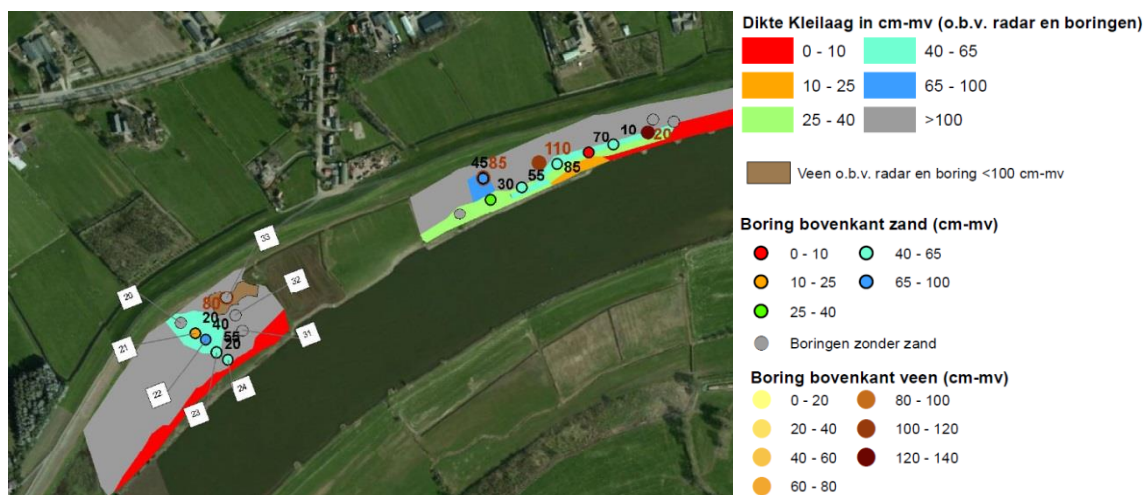
Figuur 3 geeft een deel van de resultaten weer van de metingen in het voorland. De cirkels geven locaties van de handboringen weer, de gekleurde vlakken zijn de resultaten van de metingen met grondradar en gammaspectrometer die gecorruleerd zijn met de handboringen. De oeverwal in het voorland aan de zijde van de IJssel is gekarteerd als een kleilaag van 0 – 10 cm dik.

3.2.2 OEVERWAL

De grijs gemarkeerde gebieden indiceren dat er voldoende intredeweerstand aanwezig is omdat een deklaag van minimaal 1 m dik is gemeten. Het maaiveld ter plaatse van de oeverwal is hoger en dus kan de kleiige laag (zavel / zandige klei of vette klei) van 0 tot 10 cm dik:

- een natuurlijke hoogte zijn waaronder zand maar ook nog klei met intredeweerstand aanwezig is of
- een dunne kleilaag zonder intredeweerstand op zand dat direct in verbinding staat met het watervoerend pakket.

Met deze techniek is dus niet direct duidelijk of er wel of niet voldoende intredeweerstand aanwezig is. Het plaatsen van extra boringen op deze oeverwal, is alsnog noodzakelijk om de aanwezig kwelweglengte in te schatten.



Figuur 3: Resultaten van de gammaspectra metingen in combinatie met de handboringen

3.2.3 PROEFTUIN

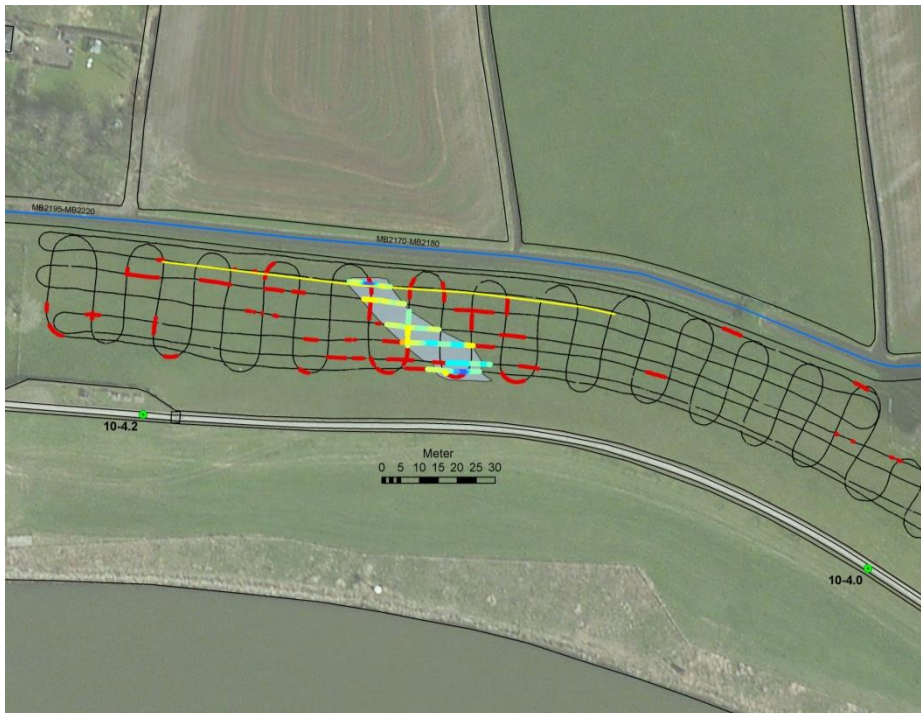
Er is tevens aan de binnenzijde van de waterkering gemeten ter plaatse van de proeftuin. In de proeftuin is met geotechnisch onderzoek geconstateerd dat de deklaag circa 2 m dik is. Deze deklaag bestaat voornamelijk uit een laag klei boven een laag veen. Een laagscheiding zou theoretisch meetbaar kunnen zijn, omdat de penetratiediepte van grondradar meerdere meters is (afhankelijk van de bodemopbouw). Helaas hebben de grondradar metingen alleen kunnen aantonen dat de kleilaag dikker is dan circa 1 m, vanwege het uitdoven van het signaal in de vette klei. Dit leidt niet tot de gewenste informatie, omdat de aanwezige deklaag duidelijk dikker is en dus minder snel zal opbarsten.

3.2.4 BISSCHOPSWETERING

Er zijn op basis van de inzichten uit het historisch onderzoek aanvullende metingen uitgevoerd. Er zijn verstoringen zichtbaar waar in het verleden de Bisschopswetering mogelijk heeft gelegen. Figuur 4 geeft de metingen weer ter plaatse van de binnentoe van de waterkering. De rode markering indiceert een verstoring in de ondergrond. Deze verstoringen lijken in de lijn te zijn met de huidige Bisschopswetering.

Er kan niet met zekerheid worden gesteld of dit daadwerkelijk de Bisschopswetering is, omdat:

- de metingen zijn uitgevoerd ter plaatse van de steunberm circa 1 m boven het maaiveld in het achterland, antropogene invloeden in de ondergrond zijn daarom te verwachten. Hierdoor is het niet op voorhand duidelijk wat de oorzaak is van anomalieën. Er kan zowel sprake zijn van recente als zeer oude vergravingen van de bodem;
- ter plaatse van de anomalie heeft in het verleden ook een kwelsloot gelegen, deze is zichtbaar op ontwerptekeningen van de vorige dijkversterking;
- tijdens het geotechnisch grondonderzoek zijn geen duidelijke aanwijzingen gevonden van antropogene invloeden in de ondergrond. Er is bijvoorbeeld geen puin of een oude sliblaag aangetroffen op een specifieke diepte in meerdere boorprofielen.



Figuur 4: De aangetroffen anomalieën in de binnenteen van de waterkering

- zwart = meetraaien
- rood = aangetroffen anomalieën in de ondergrond
- geel + blauw = opmerkelijke verstoringen in de ondergrond
- grijs = de mogelijke ligging van de Bisschopswetering

3.3 CONCLUSIE

De doelstelling van het deelonderzoek was “de overgangen tussen verschillende bodemlagen nauwkeuriger vast kunnen stellen en in het bijzonder de overgang van de cohesieve klei- en/of veenlaag naar de erosiegevoelige zandlaag”. Hierbij is het onderzoek vooral gericht op de dikte van de kleilaag in het voorland, omdat daar diktes in dit gebied naar verwachting maximaal 1,5 m zijn. Om de verschillende deelprojecten van de verkenning op elkaar aan te laten sluiten, zijn echter ook metingen uitgevoerd in het verlengende van de Bisschopswetering en ter plaatse van de proeftuin.

Uit de resultaten van deze pilot kan worden geconcludeerd dat metingen met een gammaspectrometer en grondradar een gebiedsdekkend beeld geeft over de bovenste grondlaag in het voorland. Deze bovenste laag is tot een diepte van 1 m nauwkeurig te bepalen met behulp van grondradar in combinatie met een gamma spectrometer. Door naast geofysisch onderzoek ook gericht boringen uit te voeren, is een methode ontwikkeld om de resultaten te vertalen naar gebiedsdekkende kaarten waarop de dikte van eerste grondlaag te zien is. Helemaal zonder boringen is het in kaart brengen van de laag met intredeweerstand niet mogelijk.

Nadeel van deze methode is dat bij een harde reflectie zoals bij een oeverwal niet diep genoeg wordt gekeken om de werkelijk aanwezige intredeweerstand vast te kunnen stellen. De aandacht wordt afgeleid door laagovergangen bovenin het profiel.

Ervaringen bij andere projecten van Medusa hebben geleerd dat met een combinatie van geofysische meettechnieken soms betere resultaten worden verkregen. Daarom worden combinaties aanbevolen, zoals weergegeven in Tabel 1. Een combinatie is echter niet een garantie voor een goed resultaat en de noodzaak van gerichte boringen wordt onderstreept.

bodemopbouw	referentie project	techniek 1	techniek 2
0,5 m klei op zand	Veecaten	grondradar	gammaspectrometer *
1 m klei op zand	Heerde (hoogwatergeul)	alleen grondradar (goed resultaat)	
1 m zand met kleilensjes	Cortenoever/Voorsterklei	grondradar (matig resultaat)	EM (met korte spoelafstand)
2 m klei en veen op zand	Veecaten	grondradar (matig resultaat)	EM (met gemiddelde spoelafstand)
> 3 m klei en/of veen op zand	Goudriaan (Alblasserwaard)	EM (bij voorkeur met verschillende spoelafstanden)	

Tabel 1: Geschikte combinaties van geofysisch onderzoek bij verschillende typen bodemopbouw

* = niet noodzakelijk voor bepaling laagdikte maar geeft informatie over samenstelling klei

Naast het feit dat geofysisch onderzoek niet altijd tot een goed resultaat komt kent de techniek de volgende specifieke beperkingen:

- er kan niet gemeten worden in natte gebieden;
- ter plaatse van sloten kan niet gemeten worden, dus daar zijn altijd enkele boringen nodig.

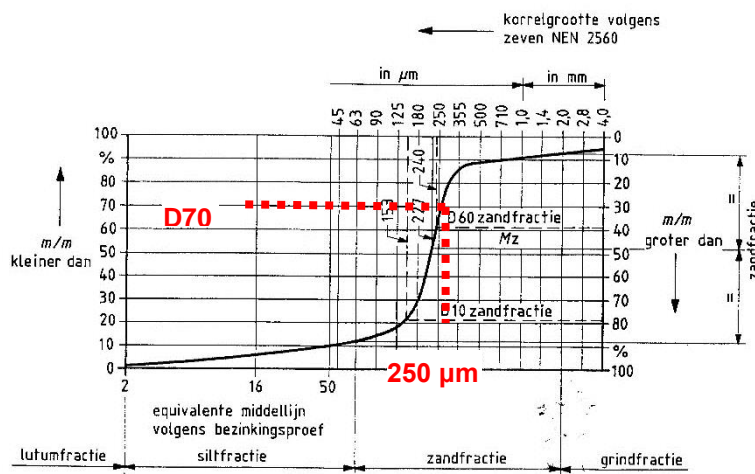
4

Geotechnisch onderzoek – ARCADIS

4.1 PROJECTBESCHRIJVING

Door ARCADIS is intensief grondonderzoek uitgevoerd naar (micro)variaties in korrelgrootte, deklaagdikte en doorlatendheid (zie Bijlage 3). De deeldoelstelling van dit onderzoek was "het vaststellen van de erosiegevoeligheid van de zandondergrond en ruimtelijke variatie in de erosiegevoeligheid." Daarnaast is de praktische toepasbaarheid van de Sellmeijer rekenregel 2011 in WTI-2017 onderzocht.

De d_{70} waarde van zand is de korrelgrootte in de korrelverdeling (zie Figuur 5) waarvan 70% kleiner is op basis van zeefproeven. De d_{70} waarde is een belangrijke parameter voor het bepalen van de weerstand tegen piping, volgens de rekenregel van Sellmeijer.



Figuur 5: Voorbeeld van korrelverdeling

Volgens de vigerende regel van Sellmeijer is er een verband tussen d_{70} en de benodigde kwelweglengte onder een dijk (hoe groter d_{70} , hoe kleiner de benodigde dijk). Daarmee bepaalt de keuze van een rekenwaarde voor d_{70} in grote mate de investeringskosten bij dijkversterkingen. Een beter inzicht in de ruimtelijke variatie van de d_{70} en het effect hiervan op de te kiezen rekenwaarde van d_{70} is dus van groot belang.

In de huidige adviespraktijk wordt er doorgaans gerekend met een conservatieve rekenwaarde van d_{70} , gebaseerd op metingen met een interval van 100 m of meer. Door meer inzicht te krijgen in de lokale d_{70} en de variabiliteit hierin, kan mogelijk met een minder conservatieve rekenwaarde voor d_{70} worden gerekend. Hierdoor zal de benodigde kwelweglengte (en dus investering) worden gereduceerd.

In juni 2014 is in samenwerking met Inpijn-Blokpoel grondonderzoek uitgevoerd in de "proeftuin" aan de binnenzijde van de waterkering. Er zijn 256 boringen gezet tot een diepte van 3,5 meter – maaiveld (m –mv). De boringen zijn uitgevoerd in een raster van 75x75 m, met een tussenliggende afstand van 5 m. Door de zeer hoge dichtheid is een zeer gedetailleerd beeld gecreëerd van de laagopbouw in de ondergrond.

Het zandpakket is aanwezig op een diepte van circa 2 m -mv. Dit zandpakket is afgedekt door een veenlaag en een kleilaag van beide circa 1 m dikte. Het zandpakket is gedurende de laatste ijstijd door de wind afgezet. De verwachting voorafgaand aan dit onderzoek was een fijn zandpakket met weinig variatie in korrelgrootte.

Volgens huidige inzichten is het zandpakket direct onder de slecht doorlatende deklaag het meest gevoelig voor het faalmechanisme piping. Bij bepaling van de bemonsteringstrategie is op deze inzichten ingespeeld. Het uitgangspunt was om het zand direct onder het veenpakket te bemonsteren. In het veld is echter een overgangslaag geconstateerd van enkele decimeters dik. Er is besloten om zowel de bruine overgangszandlaag als het onderliggende grijze zand te bemonsteren zodat later een goed onderbouwde keuze gemaakt kon worden.

Er is gekozen om het grijze zand van alle 256 boringen te zeven en de d_{70} waarde te bepalen. De bruine overgangslaag is afkomstig van dezelfde geologische afzetting maar bevat ingespoelde kleine bruine deeltjes van het bovenliggende veen. Daarnaast was het niet altijd mogelijk het bruine zand, door de beperkte laagdikte, te bemonsteren.

Diverse analyses zijn uitgevoerd om inzicht te creëren in (ruimtelijke) variaties in korrelgrootte en deklaagdikte. Beide parameters hebben grote invloed op de resultaten van piping berekeningen.

4.2 RESULTATEN

De geotechnische informatie die is verkregen tijdens het grond- en laboratoriumonderzoek is uitvoerig geanalyseerd. Deze paragraaf somt de belangrijkste resultaten van deze analyses op. De gevoeligheid van de Sellmeijer formule uit 2011 is voor drie verschillende parameters bepaald: de deklaagdikte, variatie in korrelgrootte en variatie in doorlatendheid.

Deklaagdikte

De deklaagdikte binnen de proeftuin bevat zeer weinig variatie. De variatiecoëfficiënt is bepaald en is slechts 0,11. De karakteristieke dikte is bepaald volgens ORZW en is 1,8 m. De resultaten zijn opgenomen in Tabel 2.

gemiddelde [m]	minimum [m]	maximum [m]	aantal [-]	variatie [-]	karakteristiek * [m]
2,0	1,0	2,5	256	0,11	1,8

Tabel 2: Statistische karakterisering dikte deklaag van klei en veen

* = op basis van formule 1.27 van ORZW [lit. 4]

Korrelgrootte

De variatie in korrelgrootte is tevens bepaald. Hiervoor zijn de d_{70} -waarden uit de zeefproeven gebruikt. Tabel 3 geeft de statistische karakterisering weer van zandgrofheid. De variatiecoëfficiënt is met een waarde van 0,09 zeer klein. Daarnaast is de karakteristieke d_{70} -waarde 187 μm , wat wordt geclassificeerd als matig fijn zand. Dit komt overeen met de verwachtingen voor eolisch dekzand.

gemiddelde [μm]	minimum [μm]	maximum [μm]	aantal [-]	variatie [-]	karakteristiek * [μm]
203	153	257	254	0,09	187

Tabel 3: Statistische karakterisering zandgrofheid grijs zand voor Sellmeijer berekening

* = op basis van formule 1.27 van ORZW [lit. 4]

Er is tevens een representatieve d_{70} -waarde bepaald door middel van de "zwakste pad methode". Dit is de d_{70} waarde in een denkbeeldig pad onder de dijk waarin de ruimtelijke distributie is meegenomen [lit. 1]. Deze waarde is 216 μm en is dus hoger dan de karakteristieke waarde. Als de zwakste pad waarde als rekenwaarde zou worden toegepast, resulteert dit in een kleinere benodigde kwelweglengte.

Doorlatendheid

De derde variabele invoerwaarde voor de Sellmeijer berekeningen is de doorlatendheid. De doorlatendheid is voor alle zandmonsters bepaald met de empirische formule van Den Rooyen. Ondanks dat inmiddels bekend is (uit andere POV verkenningen) dat deze formule beperkingen heeft, wordt wel een indruk verkregen van de bandbreedte van doorlatendheid als functie van de variatie in zandgrofheid. Tabel 4 geeft de statistische karakterisering weer van de doorlatendheid. De variatiecoëfficiënt is met een waarde van 0,3 hoog.

gemiddelde [m/dag]	minimum [m/dag]	maximum [m/dag]	aantal [-]	variatie [-]	karakteristiek * [m/dag]
7	5	23	256	0,3	6

Tabel 4: Statistische karakterisering grijs zand op basis van formule van Den Rooyen

* = op basis van formule 1.27 van ORZW [lit. 4]

Gevoeligheid piping berekeningen

De gevoeligheid van de Sellmeijer formule is bepaald door de korrelgrootte, deklaagdikte en doorlatendheid te variëren. Overige invoerwaarden voor de Sellmeijer formule, zoals waterpeilen en de beschikbare kwelweglengte, zijn als vaste waarden beschouwd. Tabel 5 geeft de resultaten van de berekeningen weer, waarin het resultaat is vertaald in een benodigde kwelweglengte (L benodigd).

De stroming van kwelwater in de ondergrond wordt beïnvloed door de aanwezige gelaagdheid. Met een tweedimensionale grondwaterstromingsberekening kan dit in beeld worden gebracht, maar dit hoort niet bij het doel van deze verkenning. Ook bestaan er tweelaags pipingmodellen, maar die zijn niet voor deze verkenning beschikbaar. Om het nut en de noodzaak van dit type berekeningen kracht bij te zetten, is het effect van een lage kD waarde van 100 m^2/dag beoordeeld. In theorie is deze waarde mogelijk maar in de praktijk is de waarde hoger. Het theoretische effect van een andere kD waarde op de benodigde kwelweg is groot (factor 2).

situatie	L aanwezig [m]	d_{70} [μ m]	d [m]	kD [m ² /dag]	creepfactor [-]	H [m]	L benodigd [m]
laag gemiddelde d_{70} (regionaal)	90	187	2,0	925	40,9	3,8	130,8
karakteristieke d_{70} (lokaal)	90	172	2,0	925	42,2	3,8	135,1
laag gemiddelde d_{70} (regionaal)	90	187	1,6	925	41,0	3,8	136,3
karakteristieke d_{70} (lokaal)	90	172	1,6	925	42,4	3,8	140,7
laag gemiddelde d_{70} (regionaal)	90	187	2,0	100	20,2	3,8	64,6
karakteristieke d_{70} (lokaal)	90	172	2,0	100	20,8	3,8	66,7

Tabel 5: Toetsing met Sellmeijer 2011 en maatgevende waterstand conform HR2006

L aanwezig	=	aanwezige kwelweglengte
d_{70}	=	korrelgrootte
d	=	deklaagdikte
kD	=	transmissiviteit watervoerend pakket
creepfactor	=	benodigde kwelweglengte gedeeld door het te keren waterstandsverschil
H	=	te keren waterstandsverschil
L benodigd	=	benodigde kwelweglengte voor voldoende veiligheid tegen piping

De aangetroffen variaties in korrelgrootte en deklaagdikte geven een relatief klein verschil in benodigde kwelweg. Dit wordt veroorzaakt door het homogene karakter van de hier gevonden ondiepe ondergrond. Het sterke doorlatendheidscontrast in het watervoerend pakket is echter aantoonbaar aanwezig en moet op andere plaatsen in Nederland ook worden verwacht. Van de Randmeerdijk bij Elburg is bekend dat ook daar uniform Bostel zand op Kreftenheye zand ligt. Daarom wordt aanbevolen de ontwikkeling van een praktisch toepasbaar meerlaags pipingmodel te bevorderen.

Het totale watervoerend pakket is circa 24 m dik maar bestaat uit twee zeer verschillende zandlagen, namelijk 4 m Formatie van Bostel ($k = 6$ m/dag) en 20 m Formatie van Kreftenheye ($k = 45$ m/dag).

De creepfactor van ongeveer 40 bij een kD waarde van 925 m²/dag is in vergelijking met de afgelopen decennia aangehouden waarden van 15 à 18 aan de hoge kant. De gevoeligheidsberekening met een kD waarde van 100 m²/dag geeft wel een creepfactor die aansluit bij de adviespraktijk van de afgelopen decennia. Het grote verschil roept vragen op zoals:

- is het rekenresultaat mogelijk te gevoelig voor de keuzes die bij schematisatie worden gemaakt;
- is de benodigde hoeveelheid gedetailleerde gegevens nog wel praktisch.

4.3 CONCLUSIE

De deeldoelstelling van het geotechnisch onderzoek binnen deze pilot was "het vaststellen van de erosiegevoeligheid van de zandondergrond en ruimtelijke variatie in de erosiegevoeligheid." Op basis van het uitgebreide geotechnisch onderzoek en analyses zijn de volgende conclusies getrokken.

Deklaagdikte en d_{70}

De (ruimtelijke) variatie is voor de deklaagdikte en korrelgrootte onderzocht door zeer gedetailleerd grondonderzoek uit te voeren. De hypothese was dat er weinig variatie in de ondergrond aanwezig zou zijn, wetende dat er ter plaatse van de proeftuin eolisch dekzand in de ondergrond aanwezig is. De variatiecoëfficiënt in deklaagdikte en d_{70} zijn respectievelijk 0,11 en 0,09, waarmee de hypothese kan worden bevestigd. Dit vertaalt zich in beperkte onzekerheid in het schematiseren van deze parameters. Het WTI-SOS bevestigt dit onafhankelijk van de resultaten van het deelonderzoek in de proeftuin.

Doorlatendheid is nieuw schematiseringsprobleem

Geconcludeerd wordt dat de geschiktheid van de rekenregel van Sellmeijer 2011 zeer sterk afhangt van de mate waarin een betrouwbare schematisatie kan worden opgesteld. Ondanks het tamelijk uniforme beeld in d_{70} waarde en deklaagdikte, blijft schematisatie een heikel punt. Het gelaagde watervoerend pakket kan namelijk niet op een praktische wijze meegenomen worden in de rekenregel van Sellmeijer.

Als voorbeeld kunnen de resultaten van de Sellmeijer berekeningen (Tabel 5) worden gebruikt om de onzekerheid met bijhorende gevoeligheid aan te tonen. De gevonden variatie in Creep-factor als gevolg van variaties in d_{70} is factor 1,05. De variatie in Creep-factor als gevolg van verschillende kD -waarden is met factor 2,0 vele malen groter.

Er resteert een belangrijk heterogeniteitsvraagstuk, namelijk: "Hoe kan de dikte van het watervoerend pakket eenvoudig worden geschematiseerd gegeven een scherp contrast in doorlatendheid van twee lagen". Een dergelijk verschil komt vaak voor en het is niet doelmatig om voor elke situatie opnieuw grondwaterstromingsberekeningen te maken met een eindige elementen model (bijvoorbeeld DgFlow).

De realiteit is dat, door te schematiseren met veilige karakteristieke waarden zoals is voorgeschreven, waterschappen een twee keer zo brede dijk moeten gaan beheren dan voorheen het geval was. De verhouding tussen benodigde nauwkeurigheid in parameter bepaling en dagelijkse praktijk lijkt hierdoor niet juist. En voor "het gemiddelde waterschap" met een normale hoeveelheid gegevens is de rekenregel daarom niet goed bruikbaar.

5

Synthese en aanbevelingen

In deze pilot heeft het verbinden van drie verschillende onderzoekstechnieken centraal gestaan. Door vanuit drie verschillende perspectieven naar dezelfde problematiek te kijken was de verwachting om verbanden te kunnen leggen tussen de resultaten van de drie onderzoeken. Dit hoofdstuk beschrijft waarin de drie onderzoeken elkaar versterken en tevens de beperkingen die in dit onderzoek naar voren zijn gekomen.

Hoe kunnen onderzoeken elkaar versterken

Kennis over de geologische en culturele ontwikkelingen in een gebied kan versterking bieden in het implementeren van geotechnische gegevens en de hierbij horende onzekerheden en materiaaleigenschappen. Een enthousiaste historicus kan de veelal nuchtere geotechnieut "breder" doen denken. Kennis over een gebied en het ontstaan ervan kan soms meer toevoegen dan een extra boring of sondering. Ook het gezamenlijk bestuderen van opgeboord materiaal in het veld versterkt het beeld van de ondergrond. Dit is tijdens een gezamenlijke veldwerkdag in februari 2015 naar voren gekomen. Door vanuit verschillende invalshoeken te kijken naar veen, humeuze bandjes en de bruine inspoelingslaag in het dekzand (zoals weergegeven op de kaft van het rapport), tekent zich een beeld van het ontstaan van de bodem af.

Om duidelijkheid te verschaffen op de risico's op piping, is gebiedsdekkende informatie nodig over de dikte van de afdekkende kleilaag, kwaliteit van de kleilaag en de ligging van de zandlagen in de ondergrond. Het onderzoek aan de buitenzijde van de dijk heeft laten zien hoe met behulp van geofysica een kaart met homogene vakken is te maken waarop de minimale dikte van de bovenste kleilaag zichtbaar is. In het project is de aanpak voor het werk ontwikkeld. Deze complete kaart verkleint de onzekerheid in de gegevens die gebruikt worden voor pipingberekeningen. De metingen worden al rijdend (met bijvoorbeeld een quad) uitgevoerd. Hierdoor kunnen relatief snel grote gebieden in kaart worden gebracht. De geofysische metingen en andere kaartinformatie maken het mogelijk dat er minder boringen nodig zijn, de boringen veel gericht geplaatst kunnen worden en dat er geen kleinere bodemstructuren "over het hoofd worden gezien". Boringen blijven wel noodzakelijk, maar kunnen efficiënter worden ingezet.

Beperkingen

Er zijn geen historische aanwijzingen geleverd waarvan de exacte locatie daadwerkelijk bekend is met uitzondering van de aanwijzingen op bijvoorbeeld de oude topografische kaarten. De meerwaarde van een uitgebreid historisch onderzoek ten opzichte van een beperkt onderzoek door een erfgoed deskundige kon niet worden aangetoond.

De grondradar is beperkt in de diepte waarin het kan meten. Hierdoor is het niet mogelijk om de intredeweerstand over de gehele breedte van het voorland goed in te kunnen schatten. Ter plaatse van de oeverwallen is door de verhoging in het maaiveld niet mogelijk om aan te tonen dat de deklaag tot aan de

rivier doorloopt. Hiervoor is een boring nodig op de oeverwal tot enkele meters diepte. Tevens is het met grondradar niet mogelijk geweest om verbanden te leggen met resultaten van het geotechnische onderzoek aan de binnenzijde van de dijk.

Samenwerken aan geotechnische problemen

De geotechnisch adviseur met verstand van het faalmechanisme piping kan alleen een goed onderbouwd advies geven over de risico's op piping als hij voorzien wordt van zo compleet mogelijke dataset met bodeminformatie. De basis hiervoor bestaat uit ruimtelijke informatie over de bodemopbouw zowel in de verticale als in de horizontale richting en de grondmechanische eigenschappen van de bodemlagen. Door alle gegevens te combineren worden de beperkingen van de individuele informatiebronnen geëlimineerd.

Een goede samenwerking tussen de informatie leveranciers en de informatie analisten is belangrijk om tot een goed onderbouwd advies te komen. Door de geofysica, boorgegevens en geotechniek goed op elkaar af te stemmen kan tot een beter resultaat leiden om de risico's op piping in kaart te brengen. Dit geldt in dit specifieke geval voor het voorland waar afdekkende kleilaag dunner is dan in het achterland. Andere geofysische meettechnieken zoals EM kunnen het verticale component nauwkeuriger meten. Afhankelijk van de bodemopbouw betekent dit dat op sommige complexe locaties meer boringen en geotechnisch onderzoek noodzakelijk is en minder geofysica, en op andere locaties de geofysica kan leiden tot minder boringen en minder geotechnisch onderzoek.

Samenhang met andere POV projecten

De samenhang met andere POV's met accent op d_{70} en kD waarde is nodig om volledig inzicht te krijgen in het schematiseringsvraagstuk en de praktische toepasbaarheid van rekenregel van Sellmeijer 2011 naar een acceptabel niveau te krijgen. Mede in dat kader wordt aanbevolen om de ontwikkeling van een praktisch toepasbaar meerlaags pipingmodel te bevorderen.

6

Literatuur

nummer	bron
1	Kanning, W. (2012). <i>The Weakest Link, Spatial Variability in the Piping Failure Mechanism of Dikes</i> , Delft University of Technology, the Netherlands, ISBN 978-94-6186-088-0.
2	Koomans, R.L. (Medusa), 2014. Nauwkeurigheid van grondradar bij onderzoek naar Piping. rapport 2013-P-458 Pilot Dijkenonderzoek

Bijlage 1

Deelrapport "Historisch onderzoek – Alterra"

Risico van piping, Historische informatie over het dijktracé IJssel ter hoogte van Polder Mastenbroek

Verkenning van historische gebeurtenissen die gevolgen kunnen hebben voor de opbouw van de dijk langs de IJssel ter hoogte van de polder Mastenbroek. Een bijdrage aan de methode voor het lokaliseren van risico's van piping.

A. Corporaal
A.H.F. Stortelder

Alterra-Wageningen, 2014

Bijlage 2

Deelrapport "Geofysisch onderzoek – Medusa"

Proeftuin Mastenbroek, Ontwikkeling van meetmethode binnen POV Piping

Medusa Project	2014-P-481
Medusa Rapport/versie	2014-P-481-v3
Opdracht	Ontwikkelen van meetmethode voor bepalen van de kleilaag dikte binnen POV Piping
Datum rapportage	30 juni 2015
Locatie	Mastenbroek
Gebruikte sensoren	Ground penetrating radar, gammaspectrometer, GPS

Bijlage 3

Deelrapport "Geotechnisch onderzoek – ARCADIS"

POV piping "proeftuin Mastenbroek" Duiding pipinggevoeligheid en toepasbaarheid rekenregel van Sellmeijer 2011

Arnhem, 6 januari 2015

ARCADIS document: 078366218:A

ARCADIS project: C03011.000275.0300

Colofon

POV PIPING "PROEFTUIN MASTENBROEK" - HOOFDRAPPORT INVLOED VAN "DIJCK GESGIEDENISCH", VOORLANDEN EN ZANDGROFHEID OP PIPING

OPDRACHTGEVER:

Waterschap Groot Salland

STATUS:

Definitief

AUTEUR:

Johannes de Groot
Rimmer Koopmans
Koos de Vries (Medusa)

GECONTROLEERD DOOR:

Marieke de Visser

VRIJGEGEVEN DOOR:

Rimmer Koopmans

24 januari 2017

078555849:B

ARCADIS NEDERLAND BV

Het Rietveld 59a

Postbus 673

7300 AR Apeldoorn

Tel 055 5815 999

Fax 055 5815 599

www.arcadis.nl

Handelsregister 09036504

©ARCADIS. Alle rechten voorbehouden. Behoudens uitzonderingen door de wet gesteld, mag zonder schriftelijke toestemming van de rechthebbenden niets uit dit document worden verveelvoudigd en/of openbaar worden gemaakt door middel van druk, fotokopie, digitale reproductie of anderszins.