

**POV PIPING "PIPINGONDERZOEK DIJKRING 43, D70 EN KD BEPALING"
ONDERZOEK NAAR DE TOEPASBAARHEID VAN DE REKENREGEL VAN
SELLMEIJER 2011 ONDERSTEUND MET VELDWAARNEMINGEN**

EEN SAMENWERKING VAN ARCADIS EN WATERSCHAP RIVIERENLAND



6 juni 2016

078250239:D - Definitief

C03011.000275.0400

Inhoud

Management samenvatting	3
Samenvatting	5
1 Inleiding	7
2 Aanleiding en doel verkenning IJzendoorn	8
2.1 Toepasbaarheid rekenregel vergroten	10
2.2 Reikwijdte rekenregel in beeld brengen	10
3 Methode van onderzoek	12
3.1 Locatie Verkenning IJzendoorn en locatie grondonderzoek	13
3.1.1 Locatiekeuze	13
3.1.2 Locatiekeuze grondonderzoek	15
3.1.3 Maaiveldhoogte	16
3.2 Proeftuin: Boringen en zeefproeven	17
3.3 Proefvakken: Boringen, sonderingen en zeefproeven	17
3.4 Zeefproeven	18
3.5 Raai Laura	18
3.6 Pompproef	18
3.7 Benutten juiste expertise en Koppelen van bevindingen aan theorie	19
4 Resultaten Proeftuin	20
4.1 Zandgrofheid d_{70}	20
4.1.1 Varatie d_{70} in horizontaal vlak	20
4.1.2 Karakteristieke waarde	21
4.1.3 Subsets	22
4.1.4 Vergelijking met regionale verzameling	23
4.1.5 Beschouwing karakteristieke waarde en Zwakste pad	24
4.1.6 Discussie monstergrootte	25
4.2 Dikte Holocene zandlaag	25
4.3 Deklaag	25
4.3.1 Dikte deklaag	25
4.3.2 Opbouw deklaag	27
4.3.3 Discussie en conclusie	28
4.4 d_{70} en dikte deklaag	29
4.5 Variatie d_{70} in diepte	29
4.6 Samengevat	30
5 Resultaten Proefvakken, pompproef en modelberekeningen	31
5.1 Bodemschematisatie proefvakken	31
5.1.1 Proefvak 1	31
5.1.2 Proefvak 2	31
5.1.3 Proefvak 3	32

5.2	Relatie wrijvingsgetal en d_{70}	32
5.3	Pompproef	33
5.4	Modelberekeningen.....	34
5.4.1	Toetsoordeel VTV2006	34
5.4.2	Overstromingskans VNK2.....	35
5.4.3	Toetsoordeel Sellmeijer 2011	37
5.4.4	Toetsoordeel hoogwater 1995.....	38
6	Discussie.....	40
6.1	Omggaan met variatie	40
6.2	Toepasbaarheid rekenregel	41
6.3	Reikwijdte rekenregel	42
7	Conclusies en aanbevelingen	43
7.1	Conclusies	43
7.2	Opvolging aanbevelingen ENW-T	44
7.3	Aanbevelingen	44
7.3.1	Vervolgonderzoek	44
7.3.2	Schematiseringshandleiding	45
8	Literatuur.....	46
Bijlage 1	Relatie conusweerstand, wrijvingsgetal en d_{70}	47
Bijlage 2	Voorbeeld bepaling d_{70}	49
Bijlage 3	Figuren proeftuin	50
Bijlage 4	Memo WTI-SOS scenario's	56
Bijlage 5	Uniformiteit (d_{60} / d_{10})	57
Bijlage 6	Samenvatting Review Prof. dr. ir. Jonkman	58
Colofon.....		59

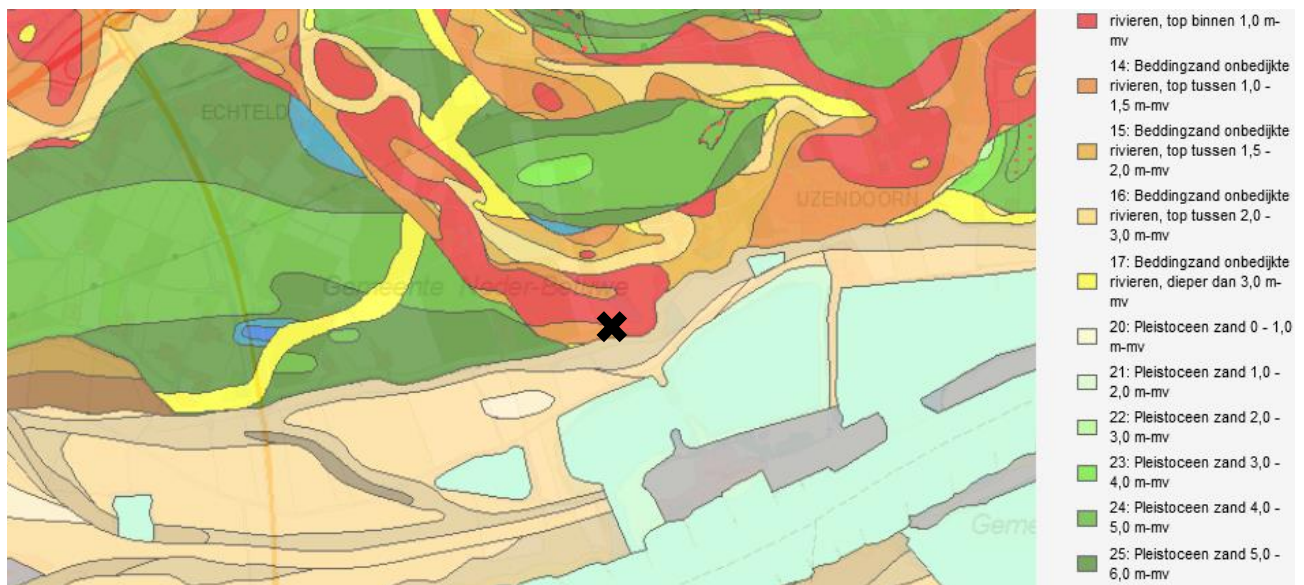
Management samenvatting

In het kader van de POV-piping is in de periode van 2014 tot 2015 door waterschap Rivierenland in samenwerking met Arcadis en de Universiteit Utrecht onderzoek gedaan naar de korrelgrootte en doorlatendheid van een typische zandondergrond in het midden riviereengebied. Dit zijn twee essentiële parameters in de nieuwe rekenregel Sellmeijer (2011).

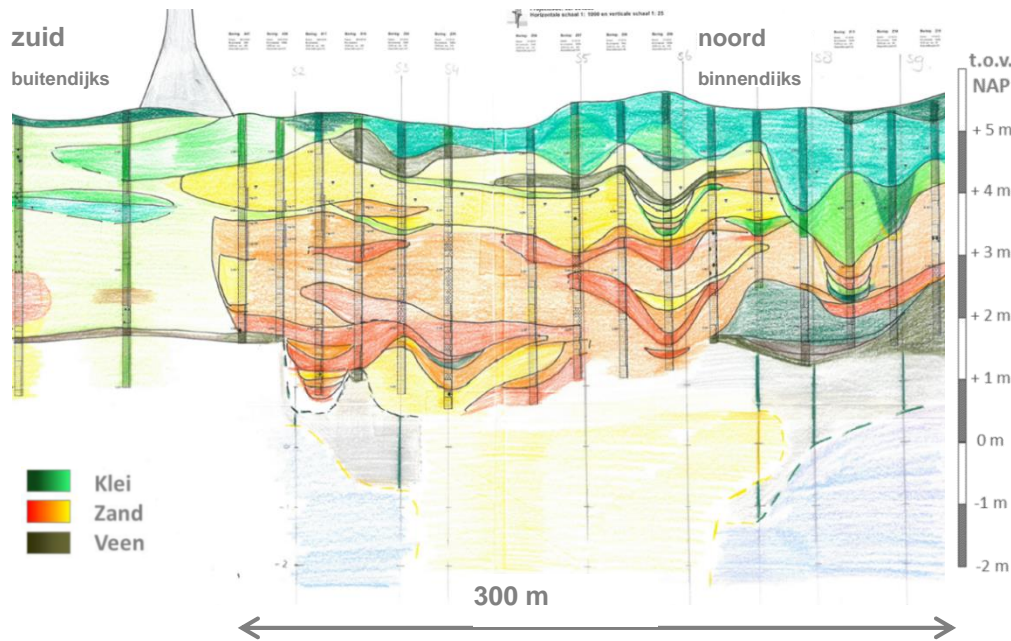
Het **doel** van deze verkenning was om:

- praktische methoden af te leiden voor het bepalen van de invoerwaarden voor de rekenregel van Sellmeijer voor piping;
- het toepassingsgebied van de rekenregel in te perken op basis van geologie.

De **aanleiding** hiervoor was de discrepantie tussen de uniforme schematisering die de rekenregel vraagt en de grote heterogeniteit van de ondergrond in de praktijk. In de figuur is een bovenaanzicht en een dwarsdoorsnede gegeven van de bekende zandbanen en geomorfologische grondopbouw rondom de onderzoekslocatie bij IJzendoorn. Dit staat in schril contrast met de laboratoriumomstandigheden waarbij de rekenregel is geijkt.



Figuur 1: Uitsnede van de zanddieptekaart (Cohen e.a., 2009) van de onderzoekslocatie langs de Waalbandijk te IJzendoorn. Het zwarte kruis geeft de locatie van de proeftuin aan.



Figuur 2: Lithologisch dwarsprofiel van een onderzoeksraai (Taal, 2015). De ondergrond is op een schaal van decimeters heterogeen.

Het **onderzoek** heeft bestaan uit:

- zeer gedetailleerd grondonderzoek om de variatie in grondopbouw te onderzoeken;
- lokale bepaling van de doorlatendheid van de zandlagen met pompproeven;
- interpretatie van de onderzoeksresultaten.

Het onderzoek heeft uitgewezen dat:

- de variatie in de eigenschappen van het zand veel groter is dan verwacht;
- de variatie in de dikte van de deklaag veel groter is dan verwacht.

Tevens suggereert het onderzoek dat de variatie of heterogeniteit in de zandlaag in alle gevallen een positief effect heeft op de weerstand tegen piping. Dit effect wordt momenteel nog niet in de berekeningen toegepast. Nader onderzoek is nodig om dit effect in rekening te kunnen brengen.

Daarnaast zijn diverse aanbevelingen gedaan en conclusies getrokken.

De **hoofdconclusies** zijn:

- de rekenregel van Sellmeijer geeft bij een heterogene ondergrond geen betrouwbaar resultaat en in het algemeen zal de rekenregel een te negatief beeld geven;
- de heterogeniteit van de ondergrond is op deze locatie veel groter dan verwacht.

Vervoltraject

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.

Samenvatting

Met de nieuwe rekenregel van Sellmeijer (2011) worden veel langere kwelweglengtes berekend dan voorheen met de methode van Bligh en de oude Sellmeijer (1998). Uit de nieuwe rekenregel blijkt dat de zandgrofheid (d_{70}) en de doorlatendheid (k) van het zandpakket essentiële parameters zijn om de kwelweglengte te bepalen. In theorie worden de d_{70} van het zand direct onder deklaag en de doorlatendheid k van het zandpakket gebruikt, maar een eenduidige methode om de waarden van deze twee sleutelparameters op een reële manier te verzamelen om de nieuwe Sellmeijer rekenregel toe te passen is nog niet beschikbaar. Daarnaast is de rekenregel gevalideerd met laboratoriumexperimenten met homogeen en goed gesorteerd zand. In werkelijkheid is de ondergrond opgebouwd uit gelaagde en inhomogene afzettingen waardoor de ruimtelijke spreiding van invoerparameters groot is. De reikwijdte van de berekende kwelweglengte tijdens veldomstandigheden is daardoor nog onbekend. De landelijke opinie is dat hiermee te conservatief gerekend wordt met als gevolg dat waterkeringen ten onrechte worden afgekeurd of te robuust worden ontworpen.

Deze verkenning binnen de POV-piping heeft als doel de uitkomsten van de nieuwe rekenregel te kunnen duiden door de toepasbaarheid en de reikwijdte daarvan te onderzoeken. De probleemstelling van deze verkenning is: "Het is nog niet bekend hoe reële waarden voor de d_{70} en k afgeleid kunnen worden voor toepassing in de rekenregel". De onderzoeksvragen hierbij zijn:

- Hoe kan de toepasbaarheid van de rekenregel worden verbeterd, ofwel welke praktische methode kan er worden gevonden voor het bepalen van reële invoerparameters?
- Hoe kan de reikwijdte van de regel worden afgebakend, ofwel kan op basis van geologie of eigenschappen van zandlagen piping worden uitgesloten?

De onderzoekslocatie ligt langs de Waalbandijk in IJzendoorn. Dit dijktraject is mogelijk pipinggevoelig door de aanwezigheid van een Holocene stroomgordelafzetting op een diepte van gemiddeld 1,5 meter onder maaiveld. Het Pleistocene zand ligt op een diepte van circa 5 meter onder maaiveld.

Voor de zandgrofheid is een proeftuin ingericht op een perceel van 75x75 meter waarbij 256 handboringen zijn uitgevoerd met een onderlinge hart op hart afstand van 5 meter. De textuur van deze handboringen is om de 10 centimeter beschreven. Daarnaast is voor elke boorlocatie een natte zeefproef uitgevoerd voor een zandmonster direct onder de deklaag. De doorlatendheid van het Holocene zandpakket en Pleistocene zandpakket zijn gemeten in twee afzonderlijke pompproeven in een proefvak parallel aan de Waalbandijk. Vervolgens zijn de onderzoeksresultaten uit het veld gebruikt om piping berekeningen uit te voeren op de oude manier van de derde toetsronde, de VNK2-methode en met de nieuwe rekenregel van Sellmeijer.

De grondopbouw in proeftuin wisselt sterk op een schaal van decimeters tot meters. De dikte en samenstelling van de deklaag varieerde van een 25 centimeter dikke kleilaag tot een 2,5 meter dikke deklaag van siltig zand afgewisseld met kleilagen. Zelfs op een klein perceel van 75 x 75 meter is de onderkant van de deklaag niet eenduidig definieerbaar en is de variatiecoëfficiënt 0,3. Voor de uitvoerbaarheid van het veldwerk is een praktisch besluit genomen om de zandgrofheid te bepalen op een standaard diepte van 1,75 meter onder maaiveld. De zandgrofheid van deze zandmonsters wisselde ook sterk op een schaal van decimeters tot meters in zowel de verticale als horizontale richting. Ook de doorlatendheid van het watervoerende pakket varieerde meer dan verwacht door de aanwezige gelaagdheid van het zand.

Volgens de oude toetsing met Bligh en Sellmeijer (1998) wordt dit dijkvak goedgekeurd. Het dijkvak wordt ook "goedgekeurd" met de VNK-2 methode nadat de uitgangspunten verfijnd zijn met de meetresultaten uit het veld. Met de nieuwe rekenregel scoort dit dijkvak echter ruim onvoldoende. Zelfs als er niet gerekend wordt met een maatgevend hoogwater van 6,6 meter maar met het opgetreden hoogwater in 1995 van 5,3 meter (verval over de dijk). Met de waterstand van 1995 is er nog steeds een kwelwegtekort van 100 meter, terwijl dit dijkvak geen duidelijke tekenen van bezwijken vertoonde in 1995. Ondanks dat de Sellmeijer 1998 en Sellmeijer 2011 niet één op één met elkaar te vergelijken zijn, lijkt het alsof gedetailleerde gegevens bij een probabilistische analyse een gunstig effect hebben en bij een deterministische analyse met karakteristieke waarden een negatief effect.

De doelstellingen om de toepasbaarheid te vergroten en de reikwijdte te kwantificeren zijn niet gehaald binnen deze verkenning. Hoewel er zeer gedetailleerd grondonderzoek is uitgevoerd, blijft het een knelpunt om één waarde voor de zandgrofheid en doorlatendheid te gebruiken in de piping berekening. Tot op zekere hoogte is dit niets nieuws, maar omdat juist de doorlatendheid en de zandgrofheid de essentiële parameters zijn voor de kwelwegberekening met de nieuwe rekenregel, wordt het nu een zichtbaarder probleem.

In deze verkenning is gebleken dat de korrelgrootte op verschillende manieren kan worden afgeleid, maar dat geen van deze werkwijzen leiden tot een representatievere invoer doordat de gelaagdheid verloren gaat door de invoer van één korrelgrootte. De toepasbaarheid is daarmee nog gebrekkig en dat wordt hoofdzakelijk veroorzaakt omdat de reikwijdte van de rekenregel nog niet voldoende in beeld is. De invoer van slechts één korrelgrootte is representatief voor enkele strekkende decimeters terwijl de kwelweglengte berekend wordt voor tientallen meters. Mogelijk dat hierdoor een dijktraject dat tijdens het hoogwater van 1995 overeind bleef staan, met de nieuwe inzichten een kwelweglengte tekort blijkt te hebben van 100 meter. Gevoelsmatig is daarom de verhouding tussen berekening en praktijk verloren.

Doorgaans leidt een grote spreiding in waardes voor de doorlatendheid en zandkorrelgrootte voor een lage sterkte. Een grote spreiding leidt immers tot lagere karakteristieke waarden. De hypothese is echter dat de spreiding juist tot een extra sterkte kan leiden doordat pipes worden geblokkeerd door grovere zanden, zoals ook de potentiële versterkingsoplossing GrofZandBarrière (GZB) laat zien. Van nature is op veel plaatsen zo'n barrière al aanwezig. Zeker bij grote aanwezige kwelweglengtes zou dit het geval moeten zijn.

Nadrukkelijk wordt aanbevolen om het in rekening stellen van heterogeniteit als sterkteparameter serieus te onderzoeken door bijvoorbeeld een heterogeniteitsindex per type afzetting te introduceren. De eenheden die gedefinieerd zijn voor de Stochastische Ondergrond Schematisatie (SOS) bieden een goede indeling om de heterogeniteitsindex aan te koppelen.

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.

De vergroting van de kennis wordt binnen de POV-piping bewerkstelligd door verkenningen uit te voeren. Een van deze verkenningen heeft de titel "Pipingonderzoek Dijkkring 43, d_{70} en kD bepaling" (hierna verkenning IJzendoorn genoemd) en is beschreven in voorliggend rapport. Deze verkenning is tot stand gekomen via een samenwerking tussen Waterschap Rivierenland en ARCADIS. De Universiteit Utrecht en Deltares zijn in een adviserende rol betrokken.

Het onderzoek richt zich op de invloed van twee sleutelparameters in de rekenregel van Sellmeijer voor de bepaling van de gevoeligheid van dijken voor piping: de d_{70} waarde van de korrelgrootteverdeling en de doorlatendheid (k). De probleemstelling van deze verkenning luidt: "De zandgrofheid en doorlatendheid zijn dominant in de berekening voor kwelweglengtes, maar deze "sleutelparameters" zijn zeer lastig vast te stellen en het is nog niet bekend welke waarden (binnen een beperkte bandbreedte) er "heersen" in de ondergrond". Met "heersen" wordt bedoeld welke waarden in de ondergrond representatief zijn voor toepassing in de rekenregel.

Binnen deze verkenning is gebruik gemaakt van specifiek grondonderzoek naar de sleutelparameters zandgrofheid (d_{70}) en doorlatendheid (k). De onderzoeksvragen bij deze verkenning horen zijn:

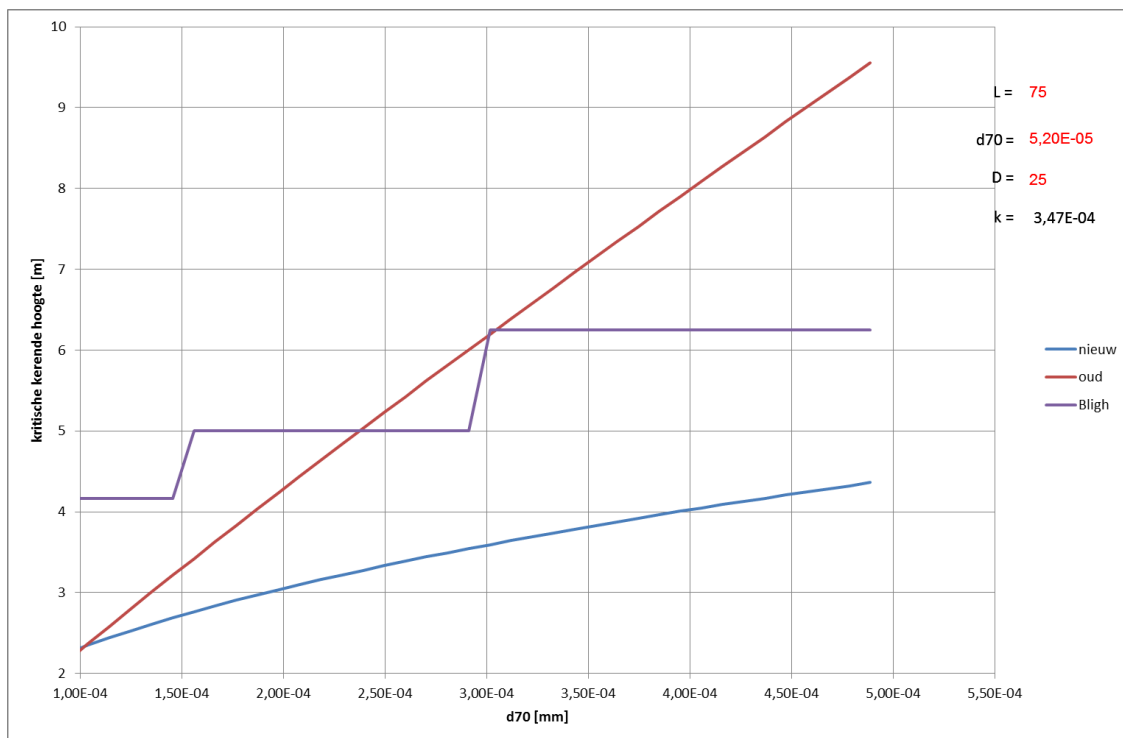
1. Toepasbaarheid: op welke schaal kunnen er karakteristieke waarden gevonden worden voor de k en d_{70} ? Hoe komt deze schaal terug in de rekenregel van Sellmeijer 2011?
2. Reikwijdte: Kan er op basis van de opbouw van de ondergrond op voorhand al een veiligheidsoordeel gemaakt worden wat betreft piping? Kunnen er bijvoorbeeld bepaalde typen ondergrond worden uitgesloten op basis van de ondergrond voor piping?

Het rapport is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 2 wordt meer achtergrond gegeven over de aanleiding van dit project en de bijbehorende theorie. Hoofdstuk 3 behandelt de methode van onderzoek. In hoofdstuk 4 en 5 volgen de resultaten waarna in hoofdstuk 6 de discussie en denkrichtingen zijn weergegeven. Hoofdstuk 7 behandelt de conclusies en aanbevelingen.

2

Aanleiding en doel verkenning IJzendoorn

Als gevolg van nieuwe inzichten is de relatief eenvoudige rekenregel "methode **Bligh**" vervallen is in **2011** een aangepaste versie van de rekenregel van Sellmeijer uit **1988** geïntroduceerd. Deze rekenregel beschrijft de fysica van het faalmechanisme piping beter. Echter, in de praktijk is de rekenregel lastiger toe te passen. Om de rekenregel van Sellmeijer uit 2011 toe te passen, zijn meer en gedetailleerdere parameters nodig, namelijk rekenwaarden voor zandgrofheid (d_{70}) en doorlatendheid (k). Deze zogenaamde sleutelparameters hebben de grootste invloed op het berekeningsresultaat, hetgeen voor d_{70} in Figuur 3 is geïllustreerd. Bij de oude rekenregel van Bligh kon worden volstaan met veldschattingen van de gemiddelde zandgrofheid. Er is dus meer grondonderzoek nodig.



Figuur 3: Verschil in toelaatbaar verval afhankelijk van kerende hoogte (Bligh, Sellmeijer 1988 en Sellmeijer 2011)

Het doel van het programma POV-piping in relatie tot de verkenning IJzendoorn

De POV piping heeft de volgende twee doelen:

1. Het - op basis van verkenningen - nauwkeuriger in beeld brengen van het areaal (op het faalmechanisme piping) te verbeteren waterkeringen, door:
 - a) de toepassing van de rekenregels te verbeteren én de toepasbaarheid ervan te vergroten;
 - b) de theorie (rekenregels) en de praktijk (werkelijkheid buiten) dichterbij elkaar te brengen.
2. Het ontwikkelen van nieuwe geaccepteerde maatregelen om het piping probleem op te lossen. In verkenningen wordt onderzocht of de innovatieve maatregel werkt, haalbaar en efficiënt is.

De verkenning "Pipingonderzoek Dijkkring 43, d₇₀ en kD bepaling" valt in doel 1a van de POV piping en haakt aan bij de vervallen "methode Bligh" voor het berekenen van piping en de in 2011 geïntroduceerde aangepaste rekenregel van Sellmeijer.

De rekenregel van Sellmeijer is gebaseerd op laboratoriumonderzoek met uniforme eigenschappen van de ondergrond. Er zijn situaties waarin inderdaad een kleine variatie in eigenschappen aanwezig is in de ondergrond [lit. 3 +14+15], maar het is ook bekend dat de benodigde parameters op een schaal van meters grote variaties kunnen vertonen [lit. 2]. Een eenduidige methode of werkwijze om de benodigde parameters (vooral de zandgrofheid d₇₀ en doorlatendheid k) te verzamelen en op een goede manier te schematiseren is tot dusver niet beschikbaar.

Verder is het zo dat de rekenregel van Sellmeijer een versimpeling is van de theorie van Sellmeijer. De theorie beschrijft evenwicht van een enkele korrel, terwijl de rekenregel is gefit op twee zandtypen. Hierin zit een beperking van de toepasbaarheid van de rekenregel opgesloten.

In de huidige praktijk worden regionale proevenverzamelingen gemaakt van de korrelgrootte (d₇₀) en toegepast in ontwerp- en toetsberekeningen. Deze proevenverzamelingen worden samengesteld aan de hand van grondmonsters die om de paar honderd meter langs de dijk worden genomen.

De doorlatendheid wordt in de huidige praktijk bepaald op basis van TNO-grondwaterkaarten. In het veld kan deze worden bepaald met een pompproef. Dit is erg kostbaar en tijdrovend en er worden niet altijd betrouwbare resultaten mee verkregen.

Er ontbreken op dit moment aanwijzingen hoeveel onderzoek benodigd is om betrouwbare parameters af te leiden voor de ontwerp- en toetsberekeningen. Hierdoor ontstaat het risico dat een te conservatieve waarde wordt aangehouden in de schematisering waardoor waterkeringen ten onrechte worden afgekeurd of er een te groot ontwerp wordt gerealiseerd (overdimensionering). Het is ook mogelijk dat juist te onveilige waarden worden aangehouden en er ten onrechte wordt goedgekeurd of een onveilig ontwerp wordt gerealiseerd.

De zandgrofheid (d₇₀) en doorlatendheid (k) door de nieuwe formule van Sellmeijer zeer belangrijke parameters geworden zijn bij het uitvoeren van pipinganalyses en het verzamelen van deze parameters is erg kostbaar en tijdrovend. Daarom is het belangrijk dat er goede methoden worden ontwikkeld waarin wordt aangegeven op hoe de invoerparameters voldoende betrouwbaar kunnen worden vastgesteld. Ideeën hierover worden in deze verkenning getest en zullen inzichten opleveren om de toepassing en reikwijdte van de rekenregel van Sellmeijer te verbeteren.

2.1 TOEPASBAARHEID REKENREGEL VERGROTEN

Het doel "toepasbaarheid" focust op praktische handvaten voor het vaststellen van de parameters waar de rekenregel van Sellmeijer om vraagt. De ruimtelijke variatie van parameters die samenhangen met eigenschappen van zand spelen daarin de hoofdrol.

In het verleden werden op enkele kilometers dijk circa tien korrelverdelingen uitgevoerd. Door deze schaal van onderzoek, kan er (onbedoeld) een grote spreiding in resultaten van zeefproeven ontstaan. Voorts wordt in de meeste gevallen binnen een traject van enkele hectometers maar op één plaats een zandmeevoerende wel gevonden. Ergo: piping is een zeer lokaal fenomeen terwijl het huidige grondonderzoek regionaal van karakter is.

Inmiddels is in het onderhavig onderzoek en [lit. 2] ook aangetoond dat door de schaalgrootte van geotechnisch onderzoek te verkleinen, nog steeds niet aangesloten wordt op de rekenregel. In de dwarsrichting van de dijk is de korrelverdeling onderzocht op meterniveau, maar dit resulteert nog steeds in een hoge variatie in resultaten van zeefproeven.

Het verschil in schaalgrootte en de mate van variatie in zandgrofheid kan praktisch gezien niet worden ondervangen met conventioneel grondonderzoek (bijvoorbeeld elke meter of decimeter een boring). Er zal daardoor een andere strategie gevolgd moeten worden waarbij de ruimtelijke variatie op macro en micro niveau in beeld wordt gebracht. Daarbij blijft de vraag bestaan welke waarde representatief is voor de parameter zoals die in het model bedoeld is, omdat bij het opstellen daarvan gebruik is gemaakt van homogeen zand.

De strategie die in deze verkenning gevolgd is, bestaat uit het anders benaderen (geologie, afzettingmilieu) van de schematisering van de ondergrond gecombineerd met andere meettechnieken (pompproeven) én verfijnde reguliere metingen (boringen en korrelverdelingen). Daarbij worden verschillende veiligheidsanalyses naar piping uitgevoerd op basis van reguliere rekentechnieken, VNK2 (Veiligheid van Nederland in Kaart) en "state of the art" technieken.

Het beoogde eindresultaat is dat het verband tussen geologie, bodemopbouw en parameters zoals d_{70} en kD wordt vastgesteld of dat wordt geconstateerd dat een dergelijk verband niet duidelijk aanwezig is.

2.2 REIKWIJDTE REKENREGEL IN BEELD BRENGEN

Binnen het doel "reikwijdte" wordt nagegaan voor welke doorsneden de rekenregel van Sellmeijer reële uitkomsten geeft en wanneer er sprake is van de metaforische contradictie "realiteit of rekenfout" [lit. 9].

Het doel "reikwijdte" raakt aan de ruimtelijke variatie op twee "niveaus", namelijk:

- bezien in de lengterichting van de dijk (hectometers), als in een oplossing op de vraag: "Voor welke strekkende lengte van een dijkvak kan de rekenregel van Sellmeijer worden toegepast?";
- en dwars op de dijk (meters), als in een oplossing op de vraag: "Bij welke breedte van een waterkering, bijvoorbeeld 150 m, beschrijft de rekenregel van Sellmeijer het mechanisme nog correct?".

Vast staat dat de schaalgrootte van dijktrajecten of dijkvakken een andere orde heeft dan de schaalgrootte van het bezwijkmechanisme piping. In de meeste gevallen wordt binnen een traject van enkele hectometers namelijk maar op één plaats een zandmeevoerende wel gevonden. Ergo: piping is andermaal een zeer lokaal fenomeen terwijl een dijktrajectindeling regionaal van karakter is.

De in 2014 opgestelde werkwijzer Piping bij dijken [lit. 4] geeft al eerste aanzetten tot het gebruik van historische kaarten en geologie. Desondanks blijven er, bijvoorbeeld bij de in de werkwijzer behandelde case Hurwenen [lit. 4], veel vragen over de alleen lokaal aanwezige zandmeevoerende wellen. Juist de kennis van de ontstaansgeschiedenis heeft sterke samenhang met alleen lokaal aanwezige zandmeevoerende wellen. Daarom is de gekozen strategie voor deze verkenning om eerst de historie en geologie (afzettingsgeschiedenis) van de onderzoekslocaties in beeld te brengen. Op basis hiervan wordt het geotechnisch veldonderzoek op een verfijnd niveau ingestoken, wat bijdraagt aan het in beeld brengen van het bereik van de rekenregel.

Het eindresultaat is dat er een duidelijk beeld ontstaat welke duiding er gegeven moet worden aan de uitkomsten van de nieuwe rekenregel van Sellmeijer uit 2011. Anders gezegd: zijn de (soms extreem) grote benodigde kwelweglengtes nu een realiteit of een rekenfout.

3

Methode van onderzoek

In verkenning IJzendoorn is specifiek ingegaan op de zandgrofheid (d_{70}) en doorlatendheid (k). Zoals eerder aangegeven zijn dit twee belangrijke "sleutelparameters" in pipinganalyses. Enerzijds is gebruik gemaakt van onderzoeksmethode in het veld zoals grondonderzoek, anderzijds is gezocht naar de juiste expertise van verschillende specialisten in het land. De volgende hoofdpunten worden in dit hoofdstuk toegelicht:

- locatiekeuze, het vinden van een geschikte locatie voor het onderzoek;
- gedetailleerd traditioneel grondonderzoek en niet traditioneel grondonderzoek;
- bij elkaar brengen van de juiste expertise en het koppelen van expertkennis en onderzoeksresultaten aan de theorie.

Op vijf verschillende locaties is grondonderzoek uitgevoerd voor specifieke doeleinden, zoals: inzicht in horizontale en verticale variatie in d_{70} , interne architectuur van de Holocene zandbaan en kD waarde van het watervoerend pakket.

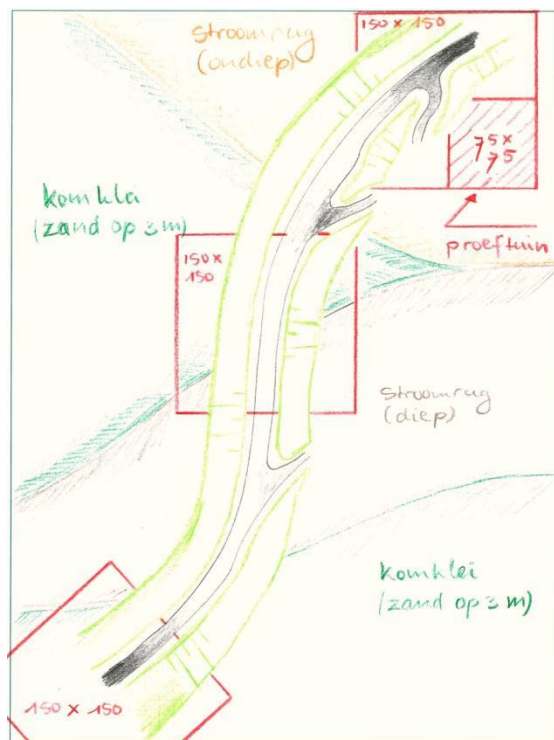
3.1 LOCATIE VERKENNING IJZENDOORN EN LOCATIE GRONDONDERZOEK

3.1.1 LOCATIEKEUZE

In eerste instantie is een soort ideale locatie voorgesteld (Figuur 4) waar op korte afstand van elkaar zandbanen van verschillende ouderdom aanwezig zijn en een deel van het te onderzoeken dijkvak ook op een komgrond ligt, zoals weergegeven in het figuur hiernaast.

In het onderzoeksgebied, zou dan op drie locaties van 150 strekkende meter dijk verfijnd onderzoek kunnen worden uitgevoerd. Daarbij is als doel geformuleerd om deze locaties op basis van geologie te kiezen.

Zo is gezocht naar onderscheidende locaties, bijvoorbeeld een locatie waarbij het bekend is dat verschillende stroomgordelafzettingen en/of geologische formaties parallel of haaks op de dijk aanwezig zijn. Of waar sprake is van pipinggevoelige bodem volgens de veiligheidstoetsingen, VNK2 of waarnemingen van de dijkbeheerder.



Figuur 4: Schets fictieve locatie

De zoektocht naar de ideale locatie is in samenspraak gemaakt tussen geotechnisch specialisten van het waterschap Rivierenland en ARCADIS, een geologische experts van de Universiteit Utrecht (Esther Stouthamer en Kim Cohen). Met behulp van de zandbanenkaart ([http://ags.prvgld.nl/GLD.Atlas/\(S\(artza5ahvqqvdqir1ep3no55\)\)/default.aspx?applicatie=Zandbanen](http://ags.prvgld.nl/GLD.Atlas/(S(artza5ahvqqvdqir1ep3no55))/default.aspx?applicatie=Zandbanen)), is uiteindelijk voor de locatie IJzendoorn gekozen (vak nummer: 43.DT145.DT156). Hierbij is ook gekeken naar verschillen in geo(morfo)logie, kans op opbarsten, uitkomsten van Veiligheid van Nederland in Kaart (VNK2) en de resultaten van de consequentieanalyse van de nieuwe pipingregel [lit. 7]. In Figuur 5 is de zanddieptekaart [lit. 13] weergegeven met de onderzoekslocatie bij het zwarte kruisje.



Figuur 5: Zanddieptekaart [lit. 13] westelijk van IJzendoorn (zwarte kruisje = onderzoekslocatie)

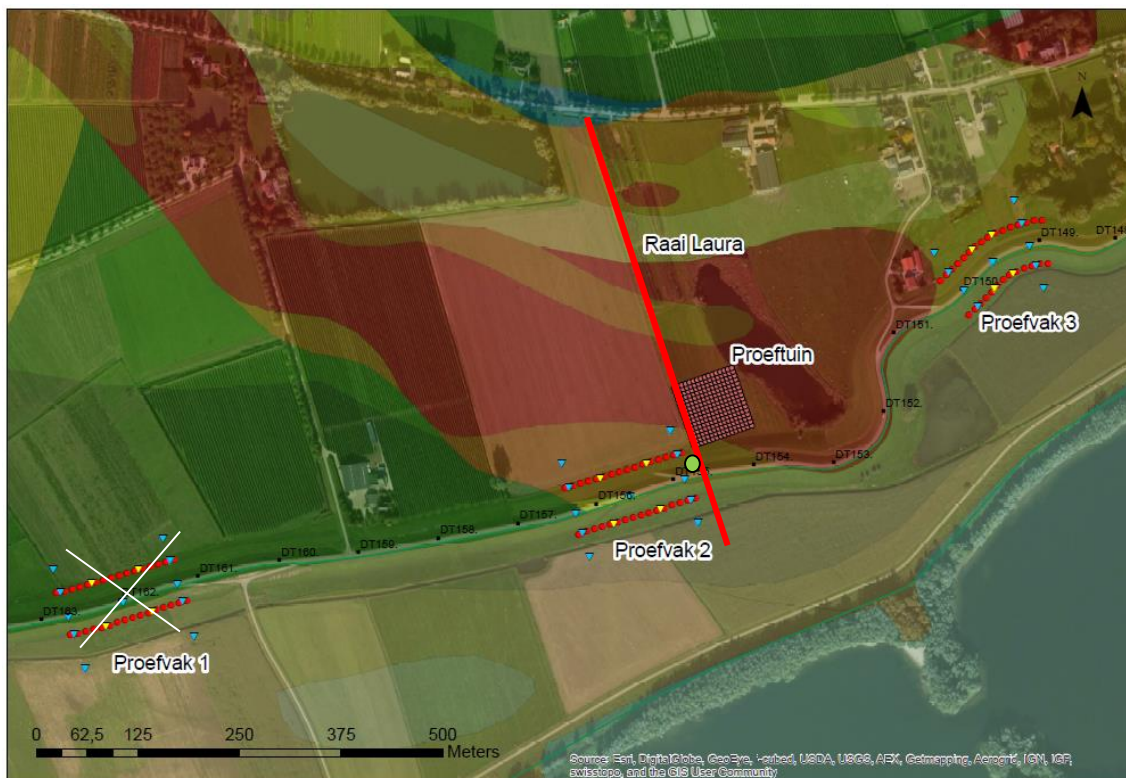
Bij de selectie hebben ook praktische zaken een rol gespeeld. Zo is de locatie bij IJzendoorn geschikt vanwege de aanwezigheid van een Holocene zandbaan in de ondergrond afgedekt met een relatief dunne laag klei van maximaal 2 meter. Dit maakt het met de hand uitvoeren van boringen en bemonsteren van de zandlaag eenvoudiger. Op de verlaten stroomdal gordel is een aanwijzing van een voormalige dijkdoorbraak, een zogenaamd "wiel" (ook wel "kolk"), aanwezig. Hierin schuilt mogelijk een aanwijzing van pipinggevoeligheid op deze specifieke locatie. Verder is de aanwezigheid van het wiel van belang voor de locatiekeuze ten aanzien van verstoorde grondlagen (overslaggronden). Het onderzoek dient juist niet op overslaggronden plaats te vinden (en dit is met proefboringen geverifieerd).



Figuur 6: Onderzoekslocatie westelijk van IJzendoorn (nabij Tiel), geprojecteerd op de "zandbanenkaart"

3.1.2 LOCATIEKEUZE GRONDONDERZOEK

Op vijf verschillende locaties is grondonderzoek uitgevoerd voor specifieke doeleinden, zoals: inzicht in horizontale en verticale variatie in d_{70} , interne architectuur van de Holocene zandbaan en kD waarde van het watervoerend pakket. De ligging van de locaties, aangeduid als proefvakken, proeftuin en raai, is in de navolgende Figuur 7 weergegeven.



Figuur 7: Ligging onderzoekslocaties met popproeflocatie (groene stip) tussen proefvak 2 en proeftuin

Proeftuin

De proeftuin is ingericht op een perceel van 75 x 75 m, waarbij voorwaarde was dat het zand relatief dicht onder maaiveld aanwezig was. Ten westen van de kolk bij dijkpaal DT153 bleek dit het geval te zijn. In deze proeftuin is extra gedetailleerd onderzoek gedaan naar de micro variatie in de zandgrofheid. De proeftuin is zo gekozen dat deze in de zandbaan ligt en buiten de invloed van het wiel, wat is geverifieerd met proefboringen.

Proefvakken

Bij de proefvakken is het onderzoek gericht op verschillen in de opbouw van de ondergrond ter plaatse van de buiten- en de binnenteen. De proefvakken zijn 150 m breed.

In proefvak 1 ligt de dijk op een komgrond en is het Pleistocene zand aan piping onderhevig als er een significante kans is op opbarsten. Gaandeweg het onderzoek blijkt de kans op opbarsten zeer klein te zijn omdat er een dikke deklaag is aangetroffen en is proefvak 1 komen te vervallen.

Proefvak 2 kan worden gekwalificeerd als een vak waar de Holocene zandbaan haaks onder de dijk door ligt. Proefvak 2 is in dit opzicht verschillend van proefvak 3. De Holocene zandbaan bleek minder dik dan op voorhand verwacht, waardoor in dit proefvak de Pleistocene zandlaag is onderzocht. Hier is mede met het oog op het wegvallen van proefvak 1 voor gekozen, aangezien het in proefvak 1 de bedoeling was om de Pleistocene zandlaag te onderzoeken.

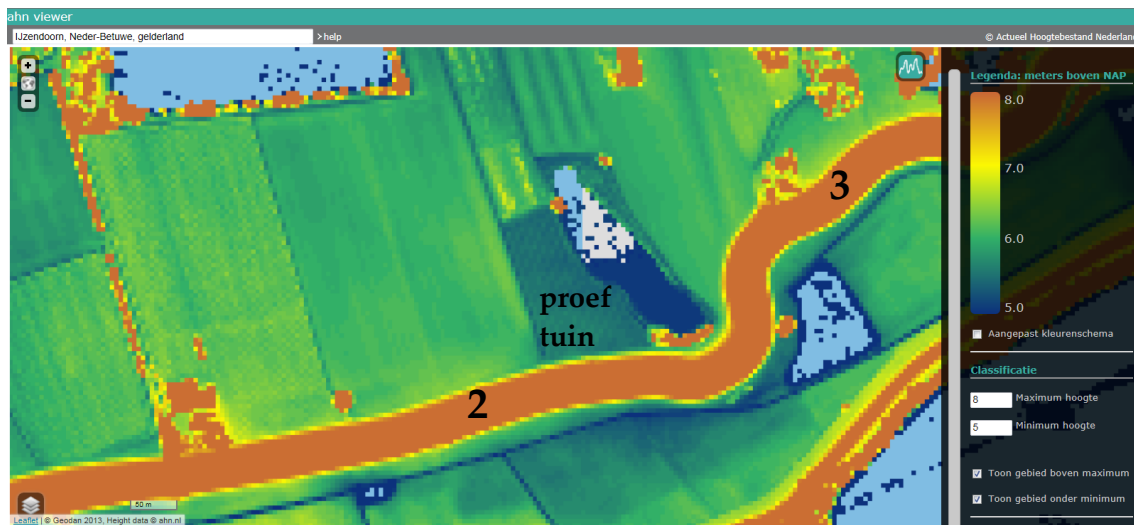
In Proefvak 3 ligt de Holocene zandbaan parallel aan de dijk. De zandbaan bleek hier prominenter aanwezig te zijn dan verwacht. Hierdoor kon het onderzoek zich, naast de dikte van de deklaag, richten op de grofheid van het Holocene zand.

3.1.3 MAAIVELDHOOGTE

De maaiveldhoogte in de proefvakken en proeftuin heeft alleen zijdelings aan de locatiekeuze bijgedragen. Uit het AHN2 blijkt dat het perceel van de proeftuin circa 0,5 m lager ligt dan het omringende gebied. De rechte begrenzing van de lagere ligging duidt er op dat het perceel is afgegraven voor bijvoorbeeld kleiwinning.

Globaal zijn de maaiveldhoogte binnendijks als volgt:

- proefvak 2: NAP +6,7 m (binnenteen) en NAP +6,0 m (achterland);
- proeftuin: NAP +5,5 m;
- proefvak 3: NAP +6,5 m.



Figuur 8: Maaiveldhoogte (bron: <http://ahn.geodan.nl/ahn/#>)

3.2 PROEFTUIN: BORINGEN EN ZEEFPROEVEN

In de proeftuin is het onderzoek specifiek gericht geweest op de horizontale variatie in d_{70} . De boringen zijn uitgevoerd met een edelmanboor, guts en Van der Staay boor. De beschrijvingen zijn per 10 cm gemaakt volgens de NEN5104 met aanvullingen vanuit de classificatie richtlijnen van de Universiteit Utrecht in de beschrijving van de fijnere zandafzettingen. Er zijn 256 boringen uitgevoerd met een onderlinge (h.o.h.) afstand van 5 m.

# boringen	boordiepte (m)	# sonderingen	sondeerdiepte (m)	# zeefproeven	overig
256	gem. 4,05	0	n.v.t.	7 + 256 + 27	n.v.t.

Tabel 1: Verricht onderzoek proeftuin

Er zijn 7 zeefproeven met bezinken uitgevoerd op matig fijn, matig siltig zand in de deklaag ($M_z = 163 \mu\text{m}$ en silt = 12 %). Een omschrijving van de deklaag is gegeven in paragraaf 4.3 (pagina 25).

Op het overwegend zeer grove zand rond circa 1,75 m –mv, met nagenoeg geen silt en weinig grind, zijn 256 natte zeefproeven uitgevoerd. Op het ogenschijnlijk iets grovere zand rond circa 2,25 m –mv zijn 27 natte zeefproeven uitgevoerd.

3.3 PROEFVAKKEN: BORINGEN, SONDERINGEN EN ZEEFPROEVEN

In de proefvakken is gekeken naar verschillen in deklaagdikte en zandgrofheid binnen en buitendijks, alsmede tussen de proefvakken onderling. Daarnaast is het onderzoek gericht op het verzamelen van gegevens, waarmee de PC-Ring berekeningen van VNK2 kunnen worden geoptimaliseerd.

Het in proefvak 2 en 3 uitgevoerde onderzoek is vermeld in Tabel 2 respectievelijk Tabel 3.

De zeefproeven zijn uitgevoerd op de volgende dieptes onder de deklaag:

- proefvak 2, buitendijks: 5,8 m –mv, onder de ca. 5,0 m dikke deklaag van klei met mv = NAP +6,2 m;
- proefvak 2, binnendijks: 6,3 m –mv, onder de ca. 5,8 m dikke deklaag van klei met mv = NAP +6,7 m;
- proefvak 3, buitendijks: 2,1 m –mv, onder de ca. 1,7 m dikke deklaag van klei met mv = NAP +5,8 m;
- proefvak 3, binnendijks: 2,7 m –mv, onder de ca. 2,2 m dikke deklaag van klei en siltig zand (variatioëfficiënt deklaag = 0,3) met mv = NAP +6,4 m.

Een omschrijving van de deklaag is gegeven in paragraaf 4.3 (pagina 25).

# boringen	boordiepte (m)	# sonderingen	sondeerdiepte (m)	# zeefproeven	overig
24	ca. 7,0	15	30 m (of maximale reactiekracht)	20	4 boringen 4,5 m diep

Tabel 2: Verricht onderzoek proefvak 2

# boringen	boordiepte (m)	# sonderingen	sondeerdiepte (m)	# zeefproeven	overig
28	buitendijks 4,0 binnendijks 4,8	15	30 m (of maximale reactiekracht)	28	1 boring met klei tot 5 m diep

Tabel 3: Verricht onderzoek proefvak 3

3.4 ZEEFPROEVEN

De keuze van te zeven monsters is door de sterke wisseling in dikte van de kleilaag bemoeilijkt. En daarvoor (in de tijd gezien) is in het veld al een praktisch dilemma ontstaan, namelijk de instructie aan de veldwerkers om op uniforme diepte monsters te nemen. Dit is verder toegelicht in paragraaf 4.1 (pagina 20). Uiteindelijk is in het veld en bij het kiezen van te zeven monsters uitgegaan van een deklaag van circa 1,5 m klei met fijn zand. Achteraf is met bezinkproeven de samenstelling van het fijne zand aangetoond, waaruit de hydraulische weerstand van het zand kan worden vastgesteld.

Wat mee heeft gespeeld in de overweging van het zeefplan is de ervaring van de Universiteit Utrecht. Pleistoceen zand is afgezet door vlechtende rivieren die constant van vorm en ligging veranderden. Bij de proeftuin zijn monsters genomen van een Holocene stroombaan. Kijkend naar de zeefkrommes van beide typen zandzettingen, zal het Holocene zand een relatief steile zeefkromme krijgen ($d_{60} / d_{10} < 2$) en het Pleistocene zand een relatief flauwe zeefkromme ($d_{60} / d_{10} > 3$).

De uitgevoerde zeefproeven betreffen zogenaamde natte zeefproeven zonder bezinken, enkele uitzonderingen daargelaten om hydraulische weerstand te bepalen. De monsters zijn voorbehandeld met natriumhexametafosfaat en soda om de leemfractie van de zandfractie "los te weken". Er zijn zeven met maaswijdte 2 mm, 1 mm, 500 μm , 250 μm , 125 μm en 63 μm gebruikt.

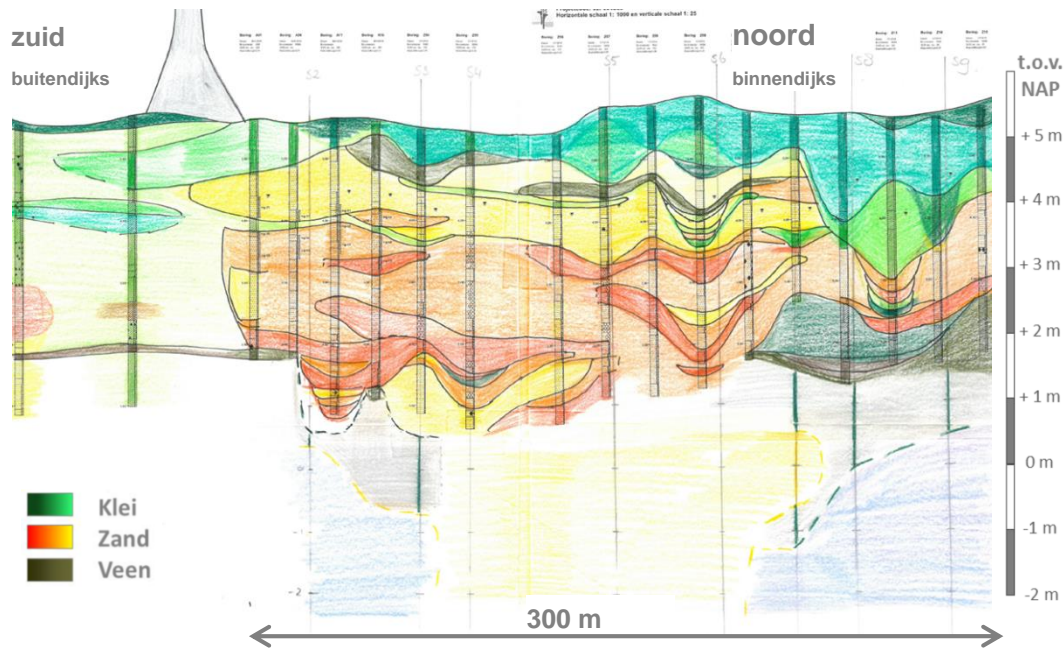
3.5 RAAI LAURA

Gelijktijdig met de verkenning IJzendoorn is door de Universiteit Utrecht onderzoek gedaan [lit. 1] naar interne architectuur van de Holocene zandbaan (ook wel "Raai Laura" genoemd, zie Figuur 7). Deze raai is zo goed mogelijk haaks op de Holocene zandbaan gekozen om zo een goed beeld over de zandbaan te krijgen. Dit onderzoek valt buiten het kader van verkenning IJzendoorn. De hoofdconclusies zijn echter in deze verkenning meegenomen.

In raai Laura bestaat een algemene trend van fijn zand bovenin en grof zand onderin. Het reconstrueren van het ontstaan van een zandbaan is complex. De variatie in gelaagdheid op decimeterschaal is groot en op centimeterschaal zo mogelijk nog groter. De doorsnede van de zandbaan in Figuur 9 illustreert de gelaagdheid.

3.6 POMPPROEF

In proefvak 2 is een pompproef uitgevoerd [lit. 8]. De kD waarde van zowel de Holocene zandlaag als de Pleistocene zandlaag zijn bepaald uit gemeten verlagingen van de stijghoogte tijdens het pompen. Er is gecorrigeerd voor de dagelijkse waterstandsvariaties op de Waal gedurende de pompproef die circa 1 week per grondlaag heeft geduurd. De uitkomsten van de analyses zijn vergeleken met resultaten van zeefanalyses van het gehele watervoerend pakket. De monsters voor de zeefanalyses zijn verkregen door het uitvoeren van een circa 35 m diepe machinale boring tot op de scheidende laag tussen de Formatie van Kreftenheye en Waalre.



Figuur 9: Lithologisch profiel Holocene stroombaan IJzendoorn, raai Laura, bron: [lit. 1]

3.7 BENUTTEN JUISTE EXPERTISE EN KOPPELEN VAN BEVINDINGEN AAN THEORIE

Naast het fysieke grondonderzoek is er in de verkenning IJzendoorn ook kennis bij elkaar gebracht om de doelstelling van de verkenning te bewerkstelligen. Binnen een projectgroep, met deelnemers van de Universiteit Utrecht, Deltares, Waterschap Rivierenland en ARCADIS zijn bevindingen besproken en is gezocht naar manieren om de juiste kennis hiervoor in te zetten.

Deze samenwerking heeft onder andere geresulteerd in de onderhavige rapportage, een STW voorstel voor promotieonderzoek van de Universiteit Utrecht en een voorstel voor vervolgonderzoek.

De resultaten van het veldonderzoek en het labonderzoek van de proeftuin IJzendoorn worden onder andere gekoppeld aan:

- het resultaat van de laatste toetsing (LRT3);
- de faalkans- en risicoberekeningen zoals die uitgevoerd zijn in het project VNK2;
- en aan het nieuwe Wettelijke toetsinstrumentarium (WTI-2017).

4

Resultaten Proeftuin

4.1 ZANDGROFHEID D_{70}

De parameter voor d_{70} zoals die bedoeld is als invoer in de rekenregel van Sellmeijer is de waarde direct onder de deklaag, op het niveau waar de pipes ontstaan. Door de gehanteerde bemonsteringsstrategie en wisselingen in de dikte van de afdekkende kleilaag, is niet overal direct onder de bovenste kleilaag een monster genomen. In veel boringen is echter rond 1,75 m –mv een kleilensje aanwezig dat invloed heeft op de verticale doorlatendheid van het bovenliggende pakket. Deze kleilens zou als onderkant van een deklaag kunnen worden gezien, maar is dus niet overal aanwezig. Hierdoor kan niet overal worden aangesloten bij de dagelijkse adviespraktijk die dicteert dat de d_{70} van de piping gevoelige zandlaag het beste direct onder de deklaag bepaald kan worden.

Uiteindelijk is ervoor gekozen om monsters te zeven die op dezelfde diepte zijn genomen. Hierdoor wordt de Holocene stroombaan geanalyseerd over een horizontaal vlak.

Er is tevens overwogen om vanwege de verschillende deklaagdiktes te kiezen voor willekeurig gekozen zandmonsters op verschillende dieptes. Deze oplossing is echter niet geschikt omdat hierdoor een extra en ongewenste variatie wordt geïntroduceerd, namelijk de diepte.

4.1.1 VARATIE D_{70} IN HORIZONTAAL VLAK

De op basis van de resultaten van de zeefproeven die zijn uitgevoerd op het overwegend grove zand rond circa 1,75 m –mv is per locatie de d_{70} bepaald en weergegeven in Figuur 10 en Figuur 11 en de bijbehorende statistische karakterisering is gegeven in Tabel 4.

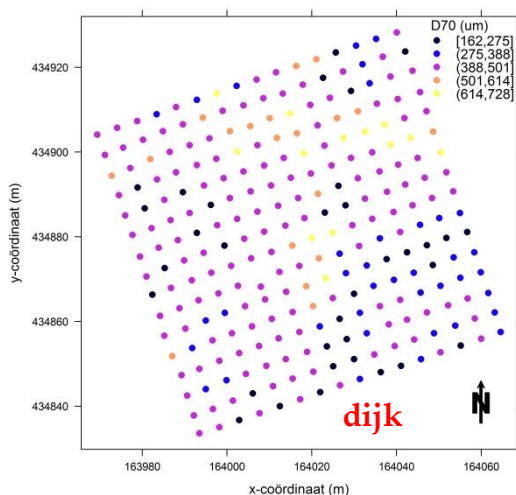
korrelgrootte	aantal	gemiddelde	standaard afwijking	variatie	minimum	maximum
	[-]	[μm]	[μm]	[-]	[μm]	[μm]
d_{70}	256	420	108	0,26	162	728

Tabel 4: Statistische karakterisering d_{70} proeftuin

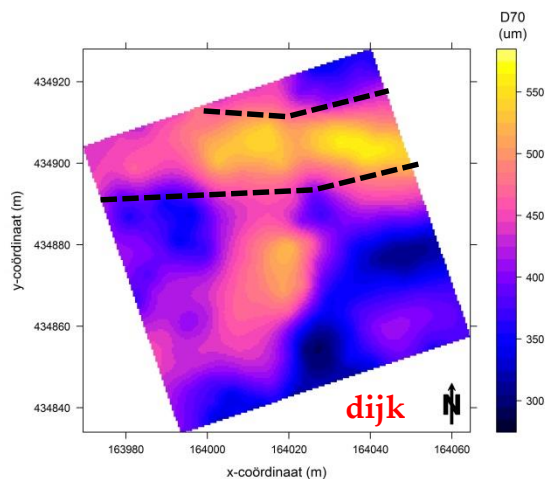
De d_{70} waarden variëren van matig fijn zand tot grof zand. De minimale waarde van de d_{70} is 162 μm wat is te beoordelen als matig fijn zand en de maximaal gevonden waarde is 728 μm wat geclassificeerd wordt als zeer grof zand. Het gemiddelde, met 420 μm , wordt als grof zand beschouwd.

De variatie in d_{70} waardes is zeer groot op een schaal van meters en dat blijkt ook uit de variatiecoëfficiënt van 0,26. Het is illustrerend voor het schematiseringsvraagstuk dat de d_{70} waardes zo kunnen verschillen op deze kleine onderlinge afstand. Fijn zand erodeert makkelijker dan grof zand; dus piping kan in fijn zand makkelijker optreden en grof zand heeft meer weerstand tegen piping.

In deze proeftuin is zowel matig-fijn als grof zand aanwezig. De vraag is wat de invloed hiervan is op de vorming van een pipe. In hoofdstuk 6 en 7 wordt hierop nader ingegaan.



Figuur 10: d_{70} waardes proeftuin ($\pm 1,75$ m –mv)



Figuur 11: interpolatie d_{70} waardes proeftuin ($\pm 1,75$ m –mv)

Uit het overzicht met de meetwaarden (Figuur 10) blijkt dat het grovere en fijnere zand over de proeftuin verspreid is. Op het oog lijkt er enige correlatie te zijn met de ligging van de restgeulopvulling aangeduid met zwarte stippelijin in Figuur 11. De gele vlekken (grofste zand) in Figuur 11 vallen (deels) samen met de blauwe strook (dikste kleilaag) in Figuur 15 (pagina 26).

4.1.2 KARAKTERISTIEKE WAARDE

De representatieve waarde voor de d_{70} in de huidige piping-voorschriften betreft een karakteristieke waarde, ofwel een 5%-ondergrenswaarde. Er zijn verschillende formules voor het bepalen van de karakteristieke ondergrens en karakteristieke waarde van het gemiddelde. Afhankelijk van de aard van de verzameling kan uit totaal zes formules (1.23 tot en met 1.27) worden gekozen in het ORZW. In Tabel 5 is volgens drie formules een "veilige" waarde bepaald.

formule	ORZW, 1.22 [μm]	ORZW, 1.25 [μm]	ORZW, 1.27 [μm]
d_{70} : karakteristiek (95%)	242	248	330
aard verzameling	lokaal ondergrens	lokaal ondergrens, lognormaal	regionaal laag gemiddelde

Tabel 5: Verschillende karakteristieke waarden voor d_{70} proeftuin

$$p_{kar} = p_{gem} \pm t_{N-1}^{0,95} s_p$$

Vergelijking 1: Karakteristieke waarde (95%), volgens ORZW, bijlage B, formule 1.22

$$p_{kar} = \exp((\ln p)_{gem} \pm t_{N-1}^{0,95} s_{\ln p})$$

Vergelijking 2: Karakteristieke waarde (95%), volgens ORZW, bijlage B, formule 1.25

$$p_{gem, kar} = p_{gem} \pm t_{N-1}^{0,95} s_p \sqrt{\Gamma^2 + \frac{I}{N}} \quad \text{met } \Gamma^2 = 0,25 \text{ (zie [TAW, 1989])}.$$

Vergelijking 3: Laag gemiddelde waarde (95%), volgens ORZW, bijlage B, formule 1.27

4.1.3 SUBSETS

De invloed van de ruimtelijke dichtheid van de metingen is onderzocht door subsets te maken van de data: Er zijn 4 subsets van de proeftuindata gemaakt (zie hier rechts), waarbij voor de subsets verzamelingen gemaakt zijn met meetpunten met een hart-op-hart-afstand van 10 m. Iedere subset bevat dus 64 metingen, gegeven in Tabel 6.

2	4	etc.
1	3	etc.
2	4	etc.
1	3	1

Figuur 12: Samenstellingswijze subsets

d ₇₀	proeftuin totaal	subset 1	subset 2	subset 3	subset 4
Aantal proeven [-]	256	64	64	64	64
Gemiddelde [µm]	420	407	424	429	419
Standaard deviatie [µm]	108	103	116	110	101
Variatiecoëfficiënt [-]	0,26	0,25	0,27	0,26	0,24
Minimum [µm]	162	163	162	165	166
Vergelijking 2: Karakteristieke waarde [µm]	248	244	239	256	245

Tabel 6: d₇₀ proeftuin met subsets, karakteristieke waarde volgens formule 1.25 uit bijlage B van ORZW

De subsets laten een vergelijkbaar beeld zien als de totale proeftuin: De gemiddeldes, standaard deviatie en variatiecoëfficiënten van de subsets zijn nagenoeg gelijk aan de waarden van de totale dataset. Door in de proeftuin een willekeurige set van 64 analyses te nemen waren dezelfde resultaten bereikt. Ook hieruit kan geconcludeerd worden dat de verspreiding redelijk gelijkmatig over de proeftuin verdeeld is, zoals ook zichtbaar is in Figuur 10.

4.1.4 VERGELIJKING MET REGIONALE VERZAMELING

De data van de proeftuin is vergeleken met de regionale verzameling. Standaard werkwijze is om op basis van de beschikbare data uit een gebied een regionale proevenverzameling op te stellen. Hierbij wordt in de praktijk voor een verzameling van d_{70} -waarden elke paar honderd meter tot circa een kilometer langs de dijk een monster genomen. De verzameling die in de proeftuin is verkregen is veel groter. Het is daarom interessant om te onderzoeken in hoeverre de grote hoeveelheid lokaal verkregen data van de proeftuin zich verhoudt tot regionaal aanwezige data.

De regionale proevenverzameling bevat 5 proeven (Tabel 7) die voorafgaand aan de dijkverbetering zijn uitgevoerd. Er zijn drie analyses beschikbaar op het relatief ondiep voorkomende Holocene zand bij IJzendoorn, een analyse op Pleistoceen zand (ca. 7 m –mv, dijkpaal 177) en een analyse op niet nader aan te duiden ondiep zand vlak bij Tiel (dijkpaal 197).

De regionale verzameling heeft een iets hoger gemiddelde (469 μm) dan de lokale proevenverzameling (420 μm). De variatiecoëfficiënt van de proeftuin (0,26) is hoger dan de regionale waarde (0,14), daarmee is de laag gemiddelde waarde van de proeftuin (330 μm) kleiner dan de regionale verzameling (377 μm). De kleinste d_{70} is gevonden in de proeftuin.

Proefvak 2 laat zich vergelijken met de proeftuin qua gemiddelde en karakteristieke waarde, terwijl het beeld uit proefvak 3 beter past bij de regionale verzameling.

d_{70}	proeftuin totaal	regionaal	proefvak 2	proefvak 3
Aantal proeven [-]	256	5	20	28
Gemiddelde [μm]	420	469	435	478
Standaard deviatie [μm]	108	71	112	92
Variatiecoëfficiënt [-]	0,26	0,14	0,26	0,19
Minimum [μm]	162	352	227	326
Vergelijking 3: laag gemiddelde waarde [μm]	330	377	329	394

Tabel 7: Vergelijking proeftuin en regionale data volgens formule 1.27 uit bijlage B van ORZW

Regelmatig wordt verondersteld dat door het doen van meer proeven de variatiecoëfficiënt van de d_{70} verkleind kan worden. Uit de vergelijking van de proeftuin met de regionale data blijkt dat deze veronderstelling niet correct is: In dit geval geeft meer data op een kleinere onderlinge afstand een grotere variatie. Vooral als de proeftuin met proefvak 3 wordt vergeleken (beiden zand uit Holocene zandbaan) wordt dit duidelijk.

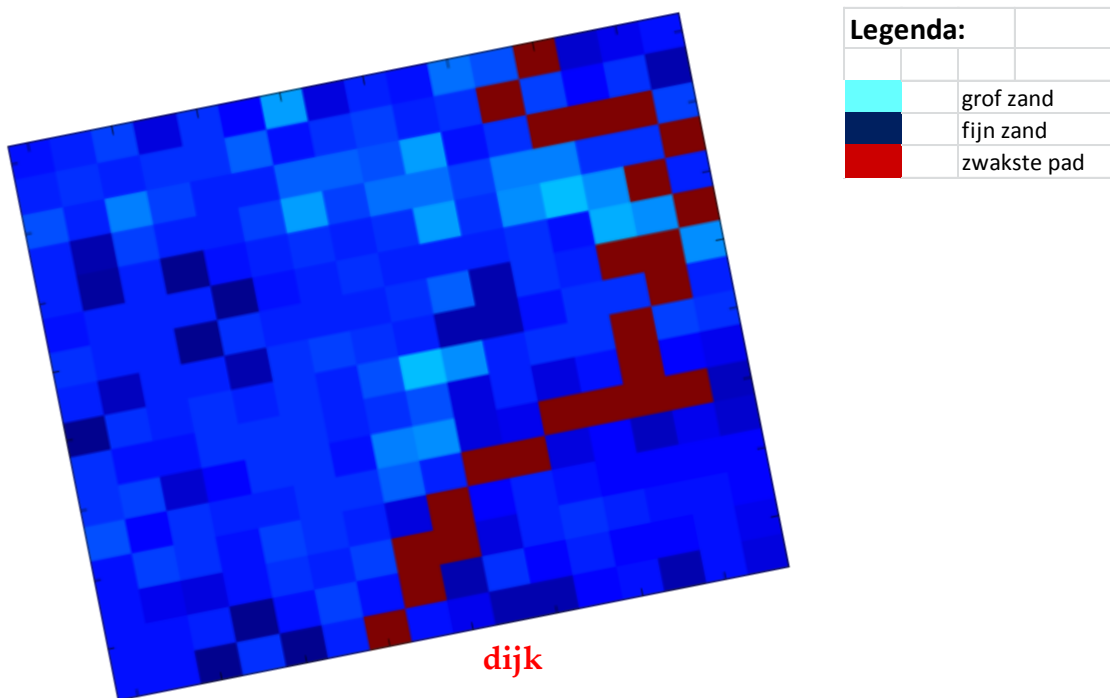
De monsters in de regionale verzameling zijn afkomstig uit dezelfde zandlagen als het zand in de proeftuin en in de proefvakken. In theorie mag zand uit verschillende geologische afzettingen niet bij elkaar in een proevenverzameling samengevoegd worden. Echter, voor het rekenen met de formule van Blich waarmee de dijkverbetering is ontworpen, was dit destijds minder van belang.

4.1.5 BESCHOUWING KARAKTERISTIEKE WAARDE EN ZWAKSTE PAD

De representatieve waarde voor de d_{70} in de huidige voorschriften betreft een karakteristieke waarde, ofwel een 5%-ondergrenswaarde. Gezien de grote variatie in de d_{70} kan de vraag worden gesteld of deze karakteristieke waarde wel een goede waarde is. In het proefschrift van Wim Kanning [lit. 5] is een methode onderzocht waarbij aangenomen wordt dat de weerstand tegen piping wordt gevormd door de grootste korrel in het zwakste pad. Het zwakste pad wordt hierbij gevormd door de kleinste d_{70} waardes. Voor proeftuin IJzendoorn is dit zwakste pad gegeven in Figuur 13. De maximum d_{70} waarde in dit zwakste pad is $445 \mu\text{m}$.

Aangenomen kan worden dat deze maximum waarde van de d_{70} in het zwakste pad een goede representatieve waarde kan zijn voor de d_{70} van de proeftuin. Deze waarde van $445 \mu\text{m}$ is veel groter dan de karakteristieke of laag gemiddelde waarde van de proeftuin ($242, 248$ of $330 \mu\text{m}$, zie Tabel 5) en ligt veel dichters tegen de gemiddelde waarde aan ($420 \mu\text{m}$). Een hypothese, voor nader onderzoek, die daaruit volgt is dat de gemiddelde waarde een goede representatieve waarde voor de d_{70} is.

Hierbij moet worden opgemerkt dat bij dit onderzoek niet is gekeken naar de grondwaterstroming, terwijl deze wel van invloed zal zijn op de ontwikkeling van de pipe. De waterdruk en stroming bij het uittreepunt zal de vorming van een pipe beïnvloeden en de ontwikkeling van de pipe meer direct sturen in de richting loodrecht op de dijk. Dat is niet in het model van Kanning meegenomen. Het is aan te bevelen dat in verdere ontwikkelingen mee te nemen.



Figuur 13: Zwakste pad door de proeftuin

4.1.6 DISCUSSIE MONSTERGROOTTE

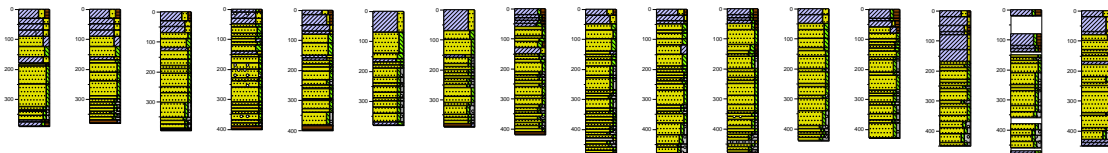
Standaard werkwijze in de dagelijkse adviespraktijk is om per boring één of enkele monsters te nemen van een grondlaag van enkele decimeters dik. Vervolgens wordt per monster een zeefproef uitgevoerd om de korrelverdeling te bepalen en wordt per monster uit de korrelverdeling een d_{70} bepaald. Als de verschillende monsters echter eerst samengevoegd zouden worden en van het totaal een korrelverdeling bepaald zou worden, wordt waarschijnlijk een ander resultaat verkregen. Hierdoor rijst de vraag hoe groot een monster moet zijn alsmede hoe het samengesteld moet worden.

Er is variabiliteit op verschillende schaalniveaus: Op een microscopisch niveau heb je individuele korrels met een bepaalde spreiding in korrelgrootte. Op grotere niveaus resulteert dit in een verdeling van de korrels (zoals in beeld gebracht met een korrelverdeling). Hoe groter het monster en hoe groter het beschouwde gebied, hoe flauwer de curve in principe verwacht wordt (daarbij wordt uitgegaan van de veronderstelling dat uitschieters uitmiddelen).

Het is dus de vraag wat precies gemeten wordt als per monster via een korrelverdeling een d_{70} wordt bepaald en vervolgens statistiek bedreven wordt op deze d_{70} waardes. Dit is te beschouwen als trekkingen uit een grote bak met grond of als variatie van de zeefkromme. Wat de juiste werkwijze is om de d_{70} vast te stellen hangt ook af hoe de piping formule is afgeleid: welke waarde vraagt het model.

4.2 DIKTE HOLOCENE ZANDLAAG

De dikte van de Holocene zandlaag varieert in de proeftuin van 2 tot meer dan 4 m. Met de boorprofielen in raai A van de proeftuin wordt dit geïllustreerd (zie Figuur 14). Waar de Holocene zandlaag contact maakt met het Pleistocene zand, is de dikte maximaal 5,0 m (zie Figuur 9, pagina 19).



Figuur 14: boringen raai A uit de proeftuin (links = 1 en rechts = 16)

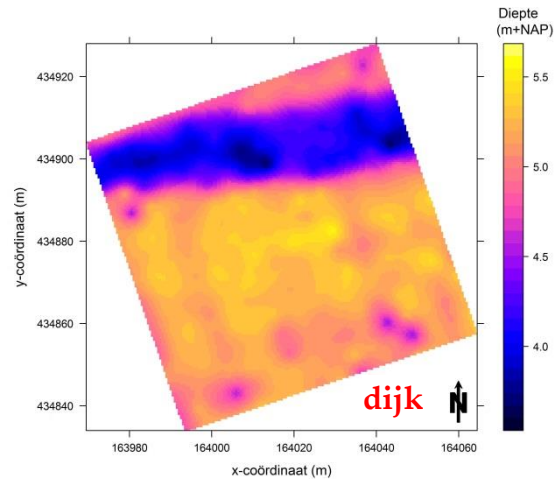
4.3 DEKLAAG

4.3.1 DIKTE DEKLAAG

Over het algemeen wordt onder de deklaag de grondlaag van cohesief materiaal vanaf maaiveld tot de pipinggevoelige zandlaag verstaan. Kenmerkend voor de deklaag is dat wateroverspanning kan ontstaan door een grote hydraulische weerstand. Bij komgronden bestaat de deklaag uit klei en veen en is de overgang naar de pipinggevoelige Pleistocene laag scherp. Bij Holocene stroombanen, kronkelwaarden of oeverwallen is het beeld minder zwart/wit. De deklaag kan daar ook uit siltig zand met kleilenzen bestaan met relatief veel hydraulische weerstand in vergelijking met de piping gevoelige zandlaag. De navolgende beschrijving van de deklaag in de proeftuin laat dit zien.

Op het eerste gezicht lijkt de deklaag te variëren van 0,2 m tot 1,6 m (zie Figuur 15). Dit betreft echter alleen de bovenste kleilaag, die is afgezet op de verlaten stroomgordel afzetting voor bedijking. De opvulling van de restgeul van de Holocene zandbaan is duidelijk zichtbaar als een blauwe strook met een relatief diepe basis van de deklaag.

Door de aanwezigheid van fijn zand met kleilaagjes bovenin en grof zand onderin de zandbaan, bestaat de werkelijke deklaag uit meer dan alleen de bovenste kleilaag. Niettemin is de variatie in deklaagdikte groot op zeer kleine afstand. Het grootste verschil tussen twee meetpunten met een onderlinge afstand van 5 m betreft circa 1,25 m (geel-blauw).

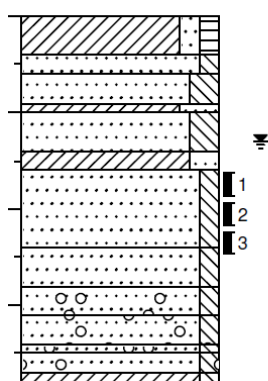


Figuur 15: Onderkant bovenste laat Holocene kleilaag (aan maaiveld)

De grote variatie in deklaagdikte is niet het gevolg van de maaiveldhoogte. Mogelijke oorzaak is grondbewerkingen op het perceel van de proeftuin. Gemiddeld is de maaiveldhoogte NAP +5,5 m met variatie = 0,015. Het minimum bedraagt NAP +5,3 m en het maximum NAP +5,7 m, zie Figuur 8.

boring: B01

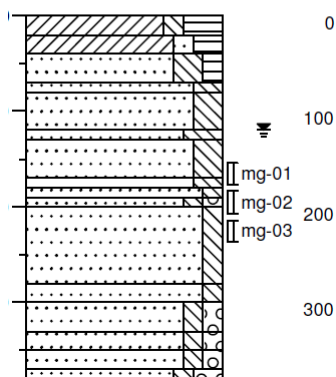
X: 163998,2
 Y: 434835
 Datum: 27-06-2014
 GWS: 130
 GHG:
 GLG:
 mv: 5,56 N.A.P.



boring B01, met fijn zand tussen kleilenzen tot 1,55 m

boring: C01

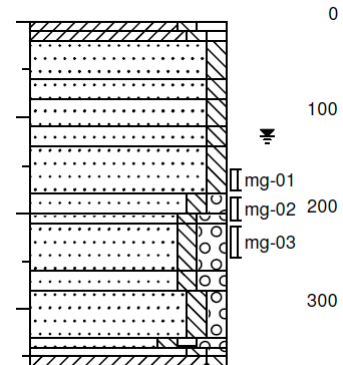
X: 164002,9
 Y: 434836,7
 Datum: 27-06-2014
 GWS: 120
 GHG:
 GLG:
 mv: 5,58 N.A.P.



boring C01, met fijn en siltig zand tot 1,75 m

boring: G05

X: 164015,5
 Y: 434862,2
 Datum: 03-07-2014
 GWS: 120
 GHG:
 GLG:
 mv: 5,51 N.A.P.



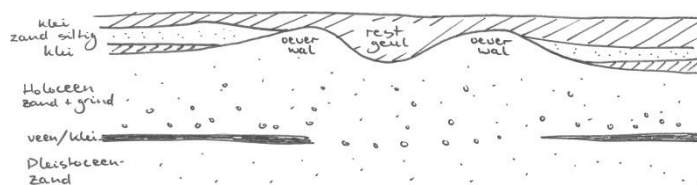
boring G05, fijn en siltig zand is afwezig, deklaag slechts 0,2 m dik

Figuur 16: Variatie in dikte en samenstelling van de deklaag in de proeftuin

Daar waar de deklaag van 1,5 m deels uit zand bestaat, is het zand in de meeste gevallen ingesloten tussen twee kleilagen. In boring B01 (Figuur 16) is dit duidelijk zichtbaar. Waar dit niet het geval is, mag er meestal van uit worden gegaan dat het zand gelaagd is alsmede fijner en siltiger ($M_z = 163 \mu\text{m}$, silt = 12 % en $k = 1 \text{ m/dag}$ volgens tabel 21 uit CUR2003-7 met lutum = silt/3) dan het zand waarop de piping analyses worden uitgevoerd ($M_z = 322 \mu\text{m}$, silt = 2,6 % en $k = 19 \text{ m/dag}$ volgens tabel 21 uit CUR2003-7 met lutum = silt/3). Ergo: zand in de deklaag bezit relatief veel uittredeweerstand en de doorlatendheid verschilt een orde grootte ten opzichte van de pipinggevoelige zandlaag. Door dit doorlatendheidscontrast kan wateroverspanning ontstaan, met opbarsten en zandmeevoerende wellen als mogelijk gevolg.

4.3.2 OPBOUW DEKLAAG

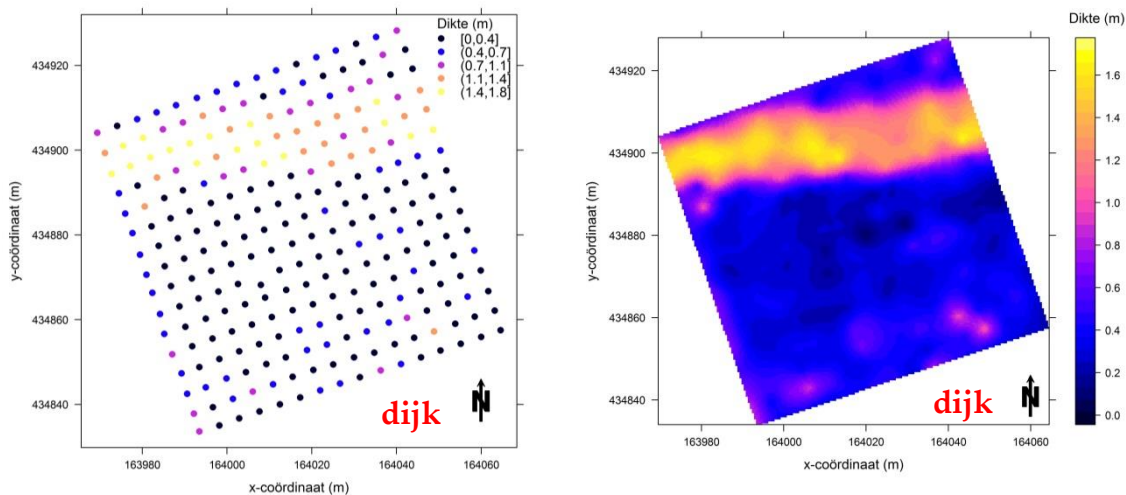
De deklaag van circa 1,5 m bestaat in veel gevallen uit klei op siltig zand met kleilaagjes. Daaronder is de pipinggevoelig veronderstelde Holocene zandlaag aanwezig, zoals toegelicht in 4.1 op pagina 20. In de schets hier links is het een en ander verduidelijkt. Het Pleistoceen begint ongeveer 5 m onder maaiveld.



Figuur 17: Schets wisselende deklaagdikte boven Holocene zandlaag

Bovenste laat Holocene kleilaag

In Figuur 18 zijn de dikte van de bovenste kleilaag en de diepte van de onderkant van de bovenste kleilaag gegeven. Hierin valt op dat deze kleilaag op zeer kleine afstand erg kan verschillen in dikte, van 0,2 m tot 1,6 m.



Figuur 18: Dikte bovenste laat Holocene kleilaag (links = gemeten waarden en rechts = interpolatie)

Onderbreking in tweede laat Holocene kleilaag

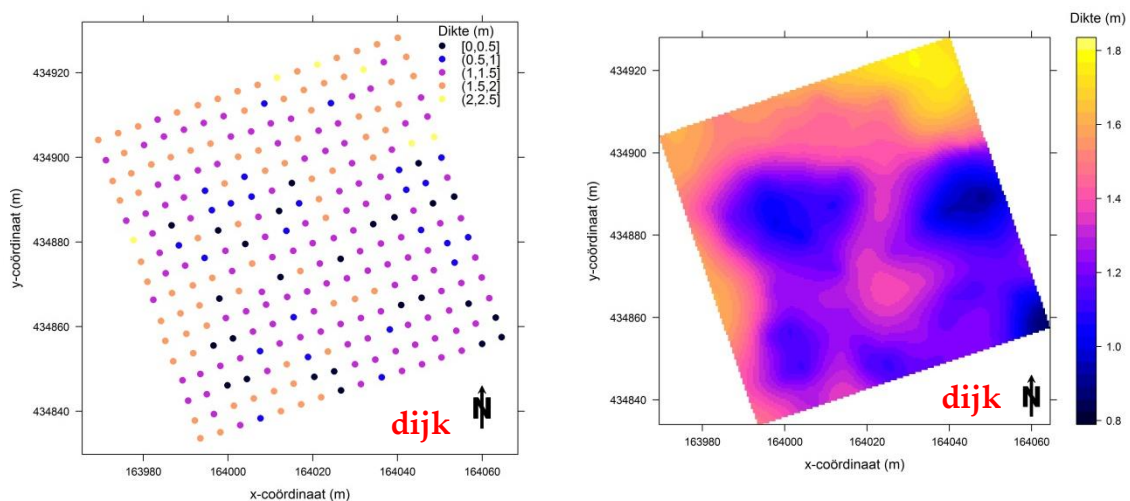
De Holocene zandlaag onder de tweede kleilaag is als de piping gevoelige laag aangemerkt. Op een aantal locaties is deze tweede kleilaag rond 1,5 m –mv echter niet aanwezig, zoals in boring C01. Wanneer dit het geval is, is het de vraag of de siltige zandlaag niet toch zo doorlatend kan zijn dat opbarsten op kan treden op deze locaties. Met D-Geo Flow, een numeriek grondwater- en pipingmodel dat grondwaterstromingspatronen nauwkeurig kan bepalen, kan dit onderzocht worden. Dit valt buiten deze verkenning.

4.3.3 DISCUSSIE EN CONCLUSIE

De variatie in de deklaagdikte is hier groot als gevolg van de opbouw van de deklaag. Zoals in voorgaande paragraaf uiteen is gezet bestaat de deklaag uit klei op siltig zand met kleilaagjes. Maar het siltige zand is lokaal minder siltig en kleilensjes zijn lokaal niet aanwezig, waardoor de deklaag op die locaties enkel gevormd wordt uit de bovenste kleilaag. De deklaagdikte varieert daarmee van 0,25 tot 2,5 m, zoals gegeven in Figuur 19.

In de dagelijkse adviespraktijk wordt een veel kleiner aantal boringen uitgevoerd. Als ter plaatse van de proeftuin slecht één boring was uitgevoerd, was deze variatie in deklaagdikte nooit gesignaleerd. Afhankelijk van de locatie van die ene boring was er een relatief dikke deklaag aangenomen of juist een zeer dunne deklaag. Aangezien de deklaagdikte een zeer belangrijke parameter is, en het verschil kan maken tussen wel of niet opbarsten is het belangrijk dat deklaagdikte goed te bepalen. Uit dit onderzoek kan geconcludeerd worden dat met enkel en alleen "normaal" grondonderzoek, waarbij om de paar honderd meter een boring of sondering genomen wordt, de deklaagdikte niet op een goede manier te bepalen is.

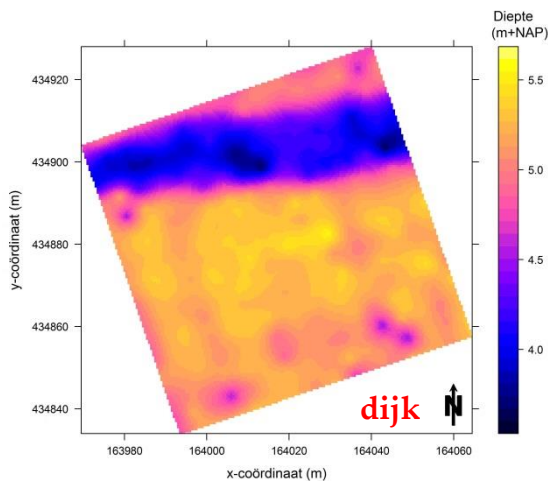
Geofysische metingen lijken op voorhand ook niet zomaar geschikt, omdat de sterke wisseling van klei en zand over het algemeen als ruis terugkomt uit metingen. Vooral grondradar kent dit probleem.



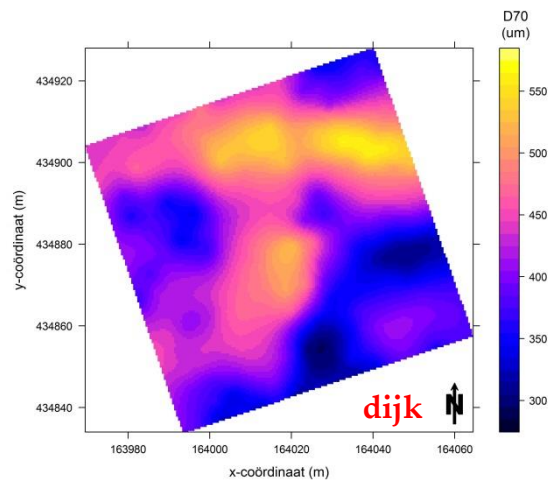
Figuur 19: Dikte deklaag van klei en siltig zand (links = gemeten waarden en rechts = interpolatie)

4.4 D₇₀ EN DIKTE DEKLAAG

In Figuur 20 en Figuur 21 zijn de meetresultaten van de dikte van de deklaag en de d₇₀ naast elkaar gegeven om te analyseren of er een correlatie is tussen een bepaalde deklaagdikte en de d₇₀. Op het oog lijkt er enige correlatie te zijn met de ligging van de restgeulopvulling. De gele vlekken (grofste zand) in Figuur 21 vallen samen met de blauwe strook (dikste kleilaag) in Figuur 20. Een mogelijke hypothese is dat door de geologische ontstaansgeschiedenis bepaalde cohesieve deklaagen (restgeulopvulling) en bepaalde zandlagen (oeverwallen) zo zijn afgezet dat er een directe link tussen beiden is die ook voor piping relevant is. Door de Universiteit Utrecht wordt bevestigd dat er mogelijk een relatie is tussen de deklaagdikte en de korrelgrootte.



Figuur 20: Onderkant van kleilaag aan maaiveld



Figuur 21: interpolatie d₇₀ waarden proeftuin (±1,75 m –mv)

4.5 VARIATIE D₇₀ IN DIEPTE

Bij meerdere boringen zijn drie onder elkaar genomen monsters gezeefd en hieruit is de gemiddelde d₇₀, standaard afwijking en variatiecoëfficiënt berekend. De gemiddelde variatiecoëfficiënt is 0,18. Echter, de verschillen in variatie lopen echter zeer sterk uiteen, hetgeen wijst op een grote verticale gelaagdheid, die ook blijkt uit het lithologisch profiel (Figuur 9).

boring	A01	A06	A14	B11	C11	D14	H07	H13	P04	P07	P14	P15	P16
d _{70, gem.} (µm)	335	335	470	445	482	459	479	471	515	438	483	401	436
variatie (-)	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0,3	0,2	0	0,4	0,1

Tabel 8: Verticale variatie in korrelgrootte van drie verschillende zandmonsters per boring op verschillende dieptes

4.6 SAMENGEVAT

Uit de proeftuin blijkt dat de deklaagdikte en d_{70} sterk variëren op zeer kleine afstand.

- d_{70} : 250 tot 750 μm ;
- deklaagdikte: 0,25 tot 2,5 m.

In relatie tot de uit te voeren modelberekeningen en op te stellen schematisaties betekent dit dat de nodige voorzichtigheid moet worden betracht. Anders gezegd: "Hoe moet worden omgegaan met heterogeniteit?".

5

Resultaten Proefvakken, pompproef en modelberekeningen

5.1 BODEMSCHEMATISATIE PROEFVAKKEN

In de onderstaande tabel staan de d_{70} waarden van de proefvakken weergegeven. Van proefvakken 2 en 3 zijn op basis van de uitgevoerde sonderingen (zie 3.3, pagina 17) geotechnische schematisaties gemaakt.

locatie	grondsoort	Formatie	aantal [-]	d_{70} ; gem. [μm]	variatie [-]	d_{70} ; min. [μm]	d_{70} ; laag gem. [μm]
proefvak 2	Pleistoceen	Kreftenheye	20	435	0,26	227	329
proefvak 3	Holoceen	Echteld	28	478	0,19	326	394

Tabel 9: Statistische karakterisering proefvakken (d_{70} laag gemiddelde volgens formule 1.27 uit bijlage B van ORZW)

5.1.1 PROEFVAK 1

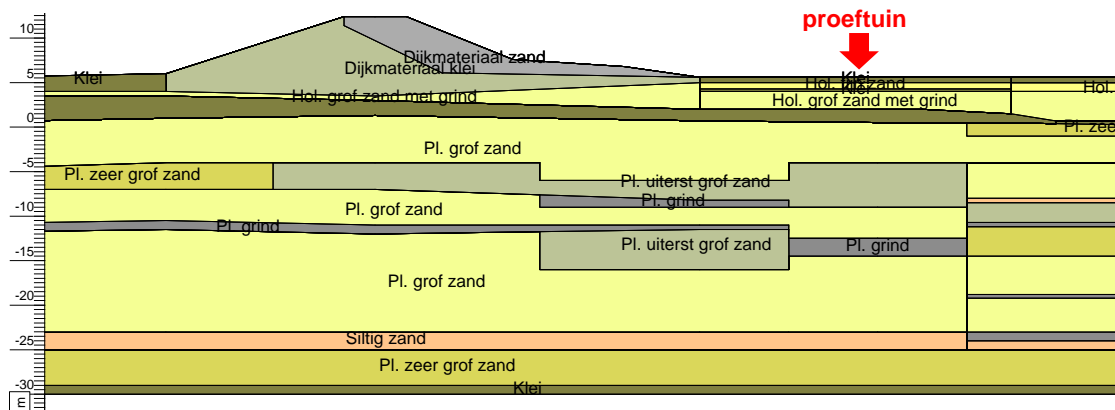
Vanwege de bodemopbouw in proefvak 1 is dit vak halverwege de uitvoering van het grondonderzoek komen te vervallen. Er zijn alleen boringen en sonderingen beschikbaar die aantonen dat de deklaag dik (> 7 m) is. De kans op opbarsten van de meer dan 7 m dikke deklaag is heel klein. Om die reden is dit vak voor piping weinig interessant. Dit proefvak wordt hierna niet meer beschreven.

5.1.2 PROEFVAK 2

Buitendijks is, in de deklaag van circa 5 m klei, op 2,5 m diepte een dunne (0,25 m) zandlaag aanwezig. Binnendijks is, in de deklaag van gemiddeld 5,8 m klei, op 2,5 m diepte een zandlaag van 0,1 à 1,0 m aanwezig, die richting het achterland in dikte toeneemt. In enkele boringen is ook op 5,0 m diepte een zandlaag van 0,5 m aanwezig. In alle gevallen zijn de zandlagen ingeklemd tussen kleilagen. De deklaag is onder de dijk 5,0 m à 5,8 m dik (zie Figuur 22) en het Pleistocene zand is in theorie de pipinggevoelige laag. Althans geredeneerd vanuit watervoerend vermogen.

In het achterland, waar de proeftuin ligt, is het beeld anders. De deklaag is daar gemiddeld 1,5 m dik en de enkele meters dikke Holocene zandlaag is pipinggevoelig geredeneerd vanuit watervoerend vermogen. Temeer omdat de Holocene zandbaan op circa 150 m van de binnenteen gefundeerd is op het Pleistoceen.

Het circa 30 m dikke Pleistocene pakket bestaat over het algemeen uit grof zand en wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van "grindnesten". Dit zijn niet aaneengesloten lagen van grind.



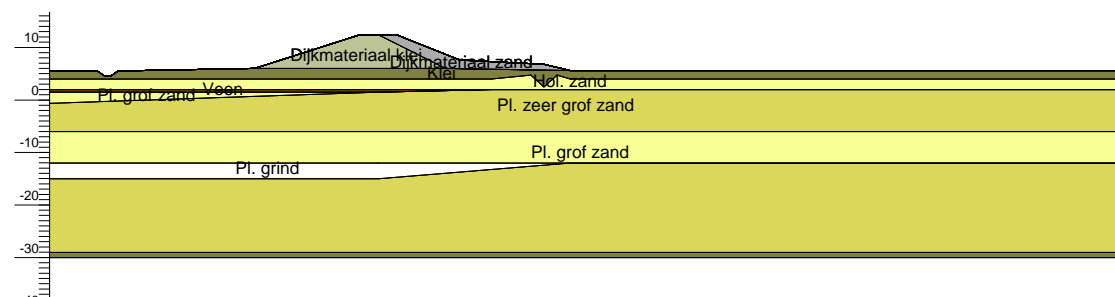
Figuur 22: Schematische weergave doorsnede over dijklichaam proefvak 2 op basis van sonderingen (zie Tabel 2)

5.1.3 PROEFVAK 3

Daar waar de deklaag deels uit zand bestaat, is het zand in de meeste gevallen ingesloten tussen twee kleilagen (dit is niet geschematiseerd in Figuur 23). Waar dit niet het geval is, mag ervan uit worden gegaan dat het zand siltiger is dan het zand waarop de piping analyses worden uitgevoerd en dus gerekend mag worden tot de deklaag (zie 4.3, pagina 25). De deklaag mag derhalve ongeveer 1,5 m dik worden verondersteld.

De Holocene zandbaan van 3 tot 4 m dik wordt gezien als de pipinggevoelige laag en is bij de binnenteen en in het achterland gefundeerd op het Pleistocene zand.

Het circa 30 m dikke Pleistocene pakket bestaat over het algemeen uit grof zand en wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van een niet doorlopende laag van grind.



Figuur 23: Schematische weergave doorsnede over dijklichaam proefvak 3 op basis van sonderingen (zie Tabel 3)

5.2 RELATIE WRIJVINGSGETAL EN D_{70}

Vooraf bestond er een indruk dat er een mogelijke relatie gelegd zou kunnen worden tussen wrijvingsgetal en zandgrofheid. In het algemeen geldt dat hoe grover het zand, des te lager het wrijvingsgetal. In de proefvakken kon echter geen duidelijke relatie tussen conusweerstand en/of wrijvingsgetal enerzijds en d_{70} anderzijds worden gevonden. Op basis van sonderingen blijkt het niet mogelijk om het nuance verschil tussen matig grove en grove rivierzanden te kunnen nagaan. Alleen de voorbelastende werking van het dijklichaam volgt uit de conusweerstand (zie verder Bijlage 1).

5.3 POMPPROEF

Het dijkvak bij IJzendoorn wordt gekenmerkt door een bodemopbouw zoals weergegeven in Figuur 24. Er is een Holocene zandlaag aanwezig, die lokaal gefundeerd is op het Pleistocene zand. Zowel de Holocene zandlaag als de Pleistoceen zandlaag zijn sterk heterogeen.

Uit de sonderingen in raai Laura blijkt dat er in drie van de negen sonderingen sprake is van contact tussen het Holocene en Pleistocene zand.

Uit de analyse van de pompproef [lit. 8] volgt dat de doorlatendheden van de beide zandlagen als volgt zijn:

- $k_{gem}; \text{Holocene} = \text{circa } 15 \text{ m/dag met } v_c=0,25;$
- $k_{gem}; \text{Pleistocene} = \text{circa } 63 \text{ m/dag met } v_c=0,13.$

De variatiecoëfficiënten zijn ingeschat op basis van de bandbreedtes in de analyse van de pompproef [lit. 8].

De bovenste 8 m van het Pleistoceen bezit $k = 44 \text{ m/dag}$ en de bovenste 16 m heeft $k = 55 \text{ m/dag}$. Er is dus sprake van "fining upward".

Als veilige rekenwaarde voor de doorlatendheid van het Pleistocene zandpakket wordt $k = 75 \text{ m/dag}$ aangehouden en voor de individuele grindlagen geldt een bovengrens van $k = 150 \text{ m/dag}$.

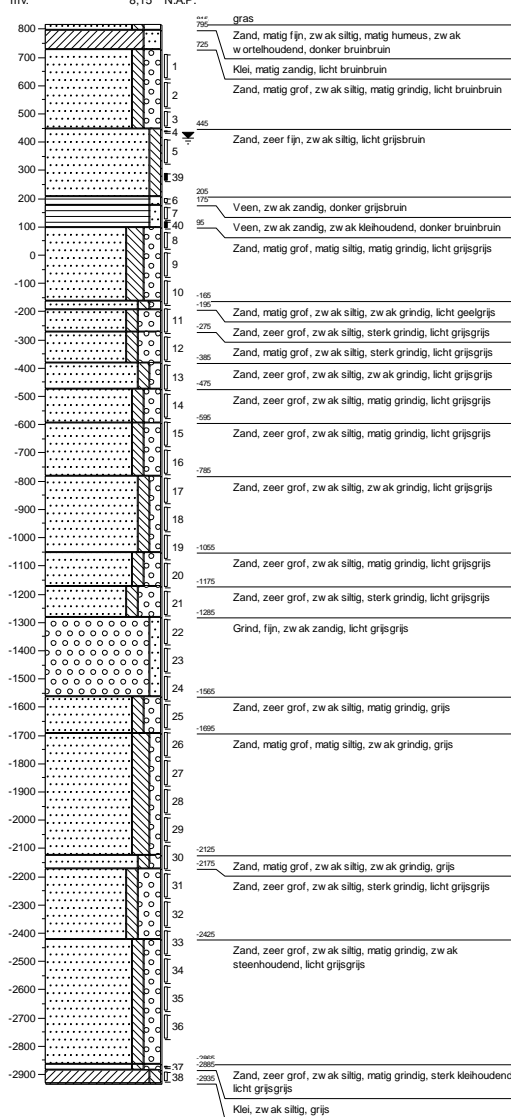
De dikte van de Pleistocene zandlaag is circa 30 m en van de Holocene zandlaag varieert van 2 m tot 5 m.

De grens tussen Holocene en Pleistoceen ligt ongeveer op NAP +0,5 m.

Op circa NAP -30 m is een scheidende laag aangetroffen.

boring: MB201

X: 163999
Y: 434824
Datum: 17-09-2014
GWS: 400
GLG:
mv: 8,15 N.A.P.



Figuur 24: Bodemopbouw op pompproef locatie

5.4 MODELBEREKENINGEN

De resultaten van het intensieve lokale grondonderzoek, dat is uitgevoerd in deze verkenning, is gebruikt om de bestaande veiligheidsanalyses opnieuw te beschouwen. Door in een bestaande situatie (dijkvak), die slecht scoort op piping, grondonderzoek en geotechnische analyses uit te voeren, is een relatie gelegd tussen de sleutelparameters (d_{70} en k) en consequenties. Op basis hiervan zijn de onderstaande optimalisaties en aandachtspunten in rekentechniek, onderzoeksmethodes en toetsmethodes bepaald.

5.4.1 TOETSOORDEEL VTV2006

Het toetsoordeel in de derde toetsronde van 2010 luidde 'goed'. Deze toetsing is uitgevoerd met de formule van Bligh met een creepfactor van 15. Het verband tussen geologie, bodemopbouw en parameters zoals d_{70} en kD is overduidelijk aanwezig. Enkele voorbeelden zijn:

- de grindnesten in het Pleistocene pakket, die duiden op een vlechtend rivierstelsel, hebben invloed op de doorlatendheid, net zoals het fijnere zand bovenin het Pleistocene pakket;
- de dunne deklaag, op de oeverwallen van de verlaten Holocene stroombaan, die snel kan opbarsten;
- het grovere zand onder de opgevulde Holocene restgeul, dat minder piping gevoelig zal zijn.

De meerwaarde van een geologische karakterisering voorafgaand aan een toetsing lijkt groot te zijn. Maar het is niet zondermeer duidelijk hoe alle recent opgedane inzichten gebruikt (hadden) kunnen worden bij de toetsing van de primaire waterkering in 2010. In een reguliere toetsing wordt immers nooit zoveel en zo gedetailleerd onderzoek gedaan. In ieder geval is de aanwezigheid van Holocene stroombanen (volgens de zandbanenkaart) reden om extra aandacht te schenken aan opbarsten en de kans op piping in de toetsing. De deklaag is immers dun.

Voor een generiek verband tussen de d_{70} en Holocene stroombanen, dienen meerdere proeftuinen of lokale verzamelingen naast elkaar te worden gelegd. Wanneer de proeftuin IJzendoorn naast lokale verzamelingen wordt gelegd, ontstaat een duidelijk beeld. In Tabel 10 is te zien dat op regionale schaal (volgens Vergelijking 3) de verschillen gering zijn afgezien van één grote uitschieter naar boven bij Nieuwegein.

Het algemene beeld is dat de gemiddelde d_{70} van Holocene stroombanen groter is dan 400 μm en dat 300 μm een veilige waarde is.

verzameling	aant. [-]	d_{70} gemiddeld [μm]	st. afw. [μm]	d_{70} karakteristiek; lokaal [μm]
proeftuin (Waal), dijkpaal 154	256	420	108	409 *
proeftuin (Waal), dijkpaal 154	256	420	108	330 **
Wijk bij Duurstede (Kromme Rijn), dijkpaal 63-67 + 71-72	6	404	111	312 *
Oostkanaaldijk Beatrixsluis, dijkpaal M6-M9	5	457	71	418 *
A2 bij Nieuwegein (Kromme IJssel), dijkpaal 3-5	5	648	163	477 *
Klaphek (Kromme IJssel), dijkpaal 6-10	6	499	178	416 *
Jaarsveld (gemaal de Koekoek), dijkpaal 126-129	8	331	29	319 *
Noordelijke Lekdijk (Amerongen – Jaarsveld)	30	453	154	314 **

Tabel 10: Waardes voor d_{70} in proeftuin en enkele lokale verzamelingen langs de Noordelijke Lekdijk

* = Karakteristieke waarde (95%), volgens ORZW, bijlage B, formule 1.23 (voor lokale verzamelingen)

** = Karakteristieke waarde (95%), volgens ORZW, bijlage B, formule 1.27 (voor regionale verzamelingen)

In de praktijk blijkt dat een karakteristieke d_{70} waarde van 300 μm ongeveer gelijk is aan een gemiddeld d_{50} waarde van 300 μm . En dit duidt op zeer grof zand. Hiermee correspondeert volgens het VTV2006 een creep factor volgens Bligh van circa 14,5. Deze waarde volgt uit tabel 4.1 van TRZ [lit. 10] ervan uitgaande dat creep=12 hoort bij het midden van de klasse 300-2000 μm en creep=15 bij het midden van de klasse 150-210 μm .

Wanneer een karakteristieke waarde van 300 μm voor d_{70} wordt toegepast binnen het VTV2006 kan ook met Sellmeijer 1998 een creep factor worden bepaald. (Dat is in de 3^e toetsronde niet gedaan.)

De volgende uitgangspunten voor kD, deklaag en kerende hoogte worden daarbij aangehouden (zoals eerder in de eerdere hoofdstukken in dit rapport is uitgewerkt).

- $kD = 2310 \text{ m}^2/\text{dag}$: 3 m Holoceen à 20 m/dag en 30 m Pleistoceen à 75 m/dag;
- deklaag dikte = 1,5 m (schatting op basis van uitgevoerd grondonderzoek);
- kerende hoogte (HR2006 kmr. 908 – maaiveld) = NAP +12,1 m – NAP +5,6 m = 6,5 m;
- beschikbare kwelweg (volgens de legger van Waterschap Rivierenland):
 - dijkpaal 148 – 150+75 = voorland + dijklichaam = 94 + 59 = 153 m (proefvak 3).
 - dijkpaal 150+75 – 152+50 = voorland + dijklichaam = 35 + 65 = 100 m (kolk tussen beide proefvakken).
 - dijkpaal 152+50 – 155 = voorland + dijklichaam = 99 + 59 = 157 m (proefvak 2 + proeftuin).

Volgens Sellmeijer 1988 bedraagt de creepfactor in dat geval 16,5.

rekenregel	L aanwezig [m]	creepfactor [-]	H [m]	d [m]	L benodigd [m]	toetsoordeel
Bligh	65 m dijk + 35 m voorland	14,5	6,5	1,5	88	goed
Sellmeijer 1988	65 m dijk + 35 m voorland	16,5	6,5	n.v.t. *	107	goed

Tabel 11: Toetsing dijkvak IJzendoorn conform VTV2006

* = verdisconteerd in creepfactor

5.4.2 OVERSTROMINGSKANS VNK2

De invloed van de nauwkeurig vastgestelde grondparameters op de overstromingskans is onderzocht met de VNK2 methode. De methode op zich wordt in het navolgende niet toegelicht, maar in deze methode is een probabilistische versie van Sellmeijer 1988 regel opgenomen. Voor achtergronden wordt verwezen naar handleidingen die in het kader van VNK2 zijn opgesteld.

In het VNK2 project is voor het dijkvak bij de proeftuin (43.DT145.DT156) een herhalingstijd voor de kans op piping bepaald van 420 jaar. De herhalingstijd van dit dijkvak en meer dan tien dijkvakken met een vergelijkbare herhalingstijd bossen op tot een ringkans voor piping van $2,45 \cdot 10^{-2}$ (1/40 keer per jaar). De belangrijkste vraag is of een dergelijk grote kans reëel is en of zeer gedetailleerd onderzoek leidt tot significant een andere kans.

De verdeling van de ondergrondscenario's in bodemdeelgebied O is standaard als volgt: 7 = 30%, 8 = 40%, 9 = 5% en 10 = 25%. Op basis van het uitgevoerde grondonderzoek in de proeftuin (zie 4.2, pagina 25) komt scenario 9 te vervallen. De dikte van de Holocene zandlaag is namelijk gemiddeld 3,5 m en geen 2,0 m. Ook scenario 10 komt te vervallen omdat de Formatie van Kreftenheye door een kleilaag wordt gescheiden van de Formatie van Waalre (zie 5.3, pagina 33).

De ondergrondscenario's 7 en 8 blijven derhalve over met de volgende verdeling:

- 7 = 67% (Holocene zandbaan niet gefundeerd);
- 8 = 33% (Holoceen gefundeerd op Pleistoceen).

Om op de belangrijkste vraag antwoord te geven zijn voor het dijkvak bij IJzendoorn tien pipingscenario's gedefinieerd. Hiervan zijn onder andere de dikte van de Holocene zandlaag en de kwelweg variabel en zijn de ondergrondscenario's verschillend. De grondeigenschappen vermeld in Tabel 12 zijn binnen de tien pipingscenario's aangepast tezamen met de verdeling van de ondergrond scenario's. De andere parameters, zoals kwelweglengte, slootpeil en maaiveldhoogte zijn niet aangepast.

eigenschap	Holoceen zand					Pleistoceen zand		
	dikte (d)	k gem.	v.c. k	d ₇₀ gem.	v.c. d ₇₀	dikte (D)	k gem.	v.c. k
	[m]	[m/dag]	[-]	[µm]	[-]	[m]	[m/dag]	[-]
oorspronkelijk VNK2	0,5 à 4,5	10	1,89	360	0,19	22 *	65 *	0,98 *
proeftuin IJzendoorn	2 à 5	20	0,25	420	0,26	30	63	0,13

Tabel 12: Wijzigingen grondeigenschappen in PC-Ring

* = ondergrondscenario 10 bezit andere waarden, maar de kD en variatie zitten in dezelfde orde grootte

De aanpassingen in grondeigenschappen zijn stapsgewijs doorgevoerd (zie Tabel 13) en resulteren uiteindelijk in een herhalingsstijd van 10.000 jaar. Vooral aanpassing van d₇₀ en k (de sleutel parameters) doen de herhalingsstijd sterk toenemen (factor 6).

Het cumulatieve effect van gedetailleerdere kennis van grondparameters en bodemschematisatie is dat de oorspronkelijke herhalingsstijd van 420 jaar toeneemt met een factor 24. Dit mag als een groot effect worden gezien op dijkvak niveau.

wijzigingsstap	initieel VNK2	ondergrond scenario's 67%-33%	d ₇₀ + k Holoceen zand	D Pleistoceen zand	k Pleistoceen zand	d Holoceen zand
herhalingsstijd [jaar]	420	840	5200	4000	10.000	10.000

Tabel 13: Wijzigingen in herhalingsstijd voor het bezwijkmechanisme piping dijkvak 43.DT145.DT156

De grotere herhalingsstijd van dit individuele vak draagt echter niet bij aan de overstromingskans van de hele dijkkring, omdat meer dan 10 vakken een kleine herhalingsstijd voor falen door piping bezitten. Wanneer ook deze vakken meer gedetailleerd onderzocht worden en vergelijkbaar beter scoren, zal de overstromingskans van de dijkkring als geheel met factor 10 toenemen. Voorwaarde daarbij is wel dat uit grondonderzoek in de betreffende vakken vergelijkbaar betere grondparameters worden gevonden. Dit kan wel maar hoeft niet het geval te zijn.

Ondanks dat piping het maatgevende faalmechanisme blijft, is het mogelijk het overstromingsrisico van de hele dijkkring met factor 10 te reduceren door nauwkeurig bepaalde waarden voor de sleutelparameters vast te stellen.

5.4.3 TOETSOORDEEL SELLMEIJER 2011

In het WTI-2017 zal gerekend gaan worden met de rekenregel van Sellmeijer uit 2011. Voor de bodemopbouw en grondparameters kan in eerste instantie worden teruggevallen op de Stochastische Ondergrond Schematisatie van Nederland (kortweg SOS). Maar deze schematisatie is op hoofdlijnen en moet met lokale kennis en waarnemingen worden aangevuld. Voor de onderhavige beoordeling is gebruik gemaakt van de lokale gegevens.

De afmetingen van de waterkeringen zullen waarschijnlijk worden afgeleid uit de legger en het beheerregister van de waterschappen.

De lokale kennis in IJzendoorn bestaat uit de volgende waarden:

- deklaagdikte: minimaal 0,25 m tot maximaal 2,5 m;
- d_{70} waarde:
 - gemiddelde (vergelijkbaar met zwakste pad): 420 μm ;
 - laag gemiddelde waarde (regionale verzameling): 330 μm ;
 - karakteristieke waarde (lokale verzameling): 248 μm ;
- kD waarde: $kD = 2310 \text{ m}^2/\text{dag}$ en met $D = 33 \text{ m}$ (3 m Holoceen à 20 m/dag en 30 m Pleistoceen à 75 m/dag);
- kerende hoogte (OWP2050+0,3m_{kmr. 908} – maaiveld): $\text{NAP} +12,2 \text{ m} - \text{NAP} +5,6 \text{ m} = 6,6 \text{ m}$.
- aanwezige kwelweglengte: 35 à 100 m voorland + 40 m dijklichaam + 15 à 25 m berm.

De resultaten van de berekeningen met de rekenregel van Sellmeijer uit 2011, voor de proeftuin van IJzendoorn, zijn weergegeven in Tabel 14. Bij de berekeningen is een veiligheidsfactor van $\gamma_n = 1,4$ gehanteerd volgens tabel 7.2 van het ORZW [lit. 12] en een schematiseringsfactor van $\gamma_b = 1,1$.

In deze berekening is niet uitgegaan van de nieuwe normering zoals voorgesteld in de wetswijziging van de Waterwet. De nieuwe norm is op dit dijktraject strenger. Als de nieuwe normering wel aangehouden zou worden, is een volgens het OI2014 een hogere veiligheidsfactor benodigd, namelijk $\gamma_n = 1,57$. Daardoor zou de benodigde kwelweg 10% tot 15% groter zal zijn. De waterstand bedraagt $\text{NAP} +12,4 \text{ m}$ inclusief 0,3 m onzekerheidstoeslag op de as van de rivier en is vergelijkbaar (traject 43-5 = 1/30.000 middenkans, kmr. 908, GRADE 2050 W+). De schematiseringsfactor blijft gelijk.

situatie	L aanwezig [m]	d_{70} [μm]	creepfactor [-]	H [m]	d [m]	L benodigd [m]	toetsoordeel
gemiddelde d_{70}	100	420	37,5	6,6	1,5	230	onvoldoende
laag gemiddelde d_{70} (regionaal)	100	330	41,5	6,6	1,5	256	onvoldoende
karakteristieke d_{70} (lokaal)	100	248	47	6,6	1,5	290	onvoldoende
gemiddelde d_{70}	100	420	37,5	6,6	0,5	242	onvoldoende
laag gemiddelde d_{70} (regionaal)	100	330	42	6,6	0,5	270	onvoldoende
karakteristieke d_{70} (lokaal)	100	248	47,5	6,6	0,5	306	onvoldoende
gemiddelde d_{70}	157	420	37,5	6,6	1,5	230	onvoldoende
laag gemiddelde d_{70} (regionaal)	157	330	41,5	6,6	1,5	256	onvoldoende
karakteristieke d_{70} (lokaal)	157	248	47	6,6	1,5	290	onvoldoende

Tabel 14: Toetsing met Sellmeijer 2011 met waterkering volgens de legger en maatgevende waterstand conform [lit. 11]

In Tabel 14 is te zien dat, bij toepassing van karakteristieke waarden in de rekenregel van Sellmeijer uit 2011, de veiligheid tegen piping ruim onvoldoende is. De dijk moet dan twee tot drie keer zo breed worden om het toetsoordeel goed te verkrijgen. Gevoelsmatig druist deze constatering van een groot kwelwegtekort in tegen het resultaat van de berekeningen met de VNK2 methode (factor 24 grotere herhalingsijd). Ondanks dat Sellmeijer 2011 en Sellmeijer 1988 niet één op één te vergelijken zijn, lijkt alsof gedetailleerde gegevens bij een probabilistische analyse een gunstig effect hebben en bij een deterministische analyse met karakteristieke waarden een negatief effect.

Opgemerkt wordt dat in werkelijkheid een voorland met een breedte van 150 m tot 250 m aanwezig is tussen de dijk en de zandwinplas van Dekker. Het is echter niet onderzocht (en allerm minst zeker) of buiten een zone van 100 m ook overal intredeweerstand aanwezig is. In het geval met 150 m à 175 m voorland, zoals aanwezig bij proefvak 3, is het toetsoordeel overigens nog steeds onvoldoende. Bij het 250 m brede voorland van proefvak 2, zou het toetsoordeel in theorie veranderen in goed, mits overal intredeweerstand wordt aangetoond en dit voorland ook daadwerkelijk in rekening mag worden gesteld. Tussen de beide proefvakken is een oude kleiwinning aanwezig in het voorland.

5.4.4 TOETSOORDEEL HOOGWATER 1995

De opgetreden waterstand van 1995 bedraagt NAP +10,7 m en is dus 1,5 m lager dan de maatgevende waterstand volgens het Addendum 1 bij de Leidraad Rivieren [lit. 11]. De resultaten van de analyse voor deze "overleefde waterstand" zijn gegeven in Tabel 15. De overige parameters zijn in eerste instantie gelijk gehouden aan 5.4.3. Daarbij moet in het achterhoofd worden gehouden dat tijdens de hoogwaterperiodes van 1993 en 1995 geen grote tekortkomingen aan de dijk zijn geconstateerd.

Op de plaatsen langs de dijk waar erosie een probleem vormde (vooral bij hoge bomen aan de buitenteen) is een taludverdediging aangebracht ongeveer op de hoogte van de kruinhoogte van de zomerkade [bron: startnotitie dijkverbetering, Grontmij, 1997].

Uit de in 2014 door het waterschap uitgevoerde inventarisatie van waarnemingen van zandmeevoerende wellen blijkt dat er rond de proeftuin geen waarnemingen zijn gedaan in het verleden.

situatie	L aanwezig [m]	d ₇₀ [µm]	creepfactor [-]	H [m]	d [m]	L benodigd [m]	toetsoordeel
karakteristieke d ₇₀ (lokaal)	100	248	46	5,3	1,5	213	onvoldoende
karakteristieke d ₇₀ (lokaal)	100	248	46	5,3	0,5	228	onvoldoende

Tabel 15: Toetsing met Sellmeijer 2011 met karakteristieke d₇₀ en kD en opgetreden waterstand uit 1995

Uit de rekenresultaten in Tabel 15 blijkt dat de veiligheid tegen piping bij de opgetreden waterstand en met karakteristieke waarden nog steeds onvoldoende is. Het tekort aan kwelweg bedraagt ruim 100 m. Bij MHW is dit 150 tot 200 m. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de rekenresultaten niet aansluiten bij een werkelijk overleefde gebeurtenis. Opgemerkt wordt dat in werkelijkheid een voorland met een breedte van 150 m tot 250 m aanwezig is tussen de dijk en de zandwinplas van Dekker. Het is echter niet onderzocht (en allerm minst zeker) of buiten een zone van 100 m ook overal intredeweerstand aanwezig is.

Gevoelsmatig had de dijk, bij een kwelwegtekort van meer dan 100 m, moeten zijn bezweken of had op zijn minst duidelijke tekenen van bezwijken moeten vertonen. En dat is niet het geval geweest. Derhalve is, om de gevoeligheid van het toetsoordeel in beeld te brengen, een berekening uitgevoerd met gemiddelde waarden voor de kwelweg en de sleutelparameters.

situatie	L aanwezig [m]	kD [m ² /dag]	d ₇₀ [μm]	creepfactor [-]	H [m]	d [m]	L benodigd [m]	toetsoordeel
gemiddelde waarden	157	1890	420	34	5,3	1,5	158	onvoldoende

Tabel 16: Toetsing met Sellmeijer 2011 met gemiddelde intredeweerstand, d₇₀ en kD en opgetreden waterstand uit 1995

De toetsresultaten bij gemiddelde waarden en de opgetreden waterstand resulteren nipt in een toetsoordeel onvoldoende (zie Tabel 16). Wanneer een decimeter water op maaiveld verondersteld wordt tijdens extreme omstandigheden (zie Figuur 25) of de deklaag 0,3 m dikker is, luidt de score goed. Daarbij wordt wel opgemerkt dat de intredeweerstand in het voorland tussen dijkpaal 150+75 – 152+50, met een waterpartij in het voorland (bodem op circa NAP +4 m), volgens de legger slechts 35 m bedraagt.



Figuur 25: Kwel januari 2015

Mogelijk is in werkelijkheid wel meer intredeweerstand aanwezig, maar dit is in het verleden niet onderzocht omdat de dijk ook met een smal voorland tot op heden voldoende veilig was. Het beleid van waterschappen ten aanzien van voorland zou omwille van de nieuwe rekenregel van Sellmeijer uit 2011 aangepast moeten worden. Het verwaarlozen van intredeweerstand op bodems van poelen en strangen en maximaliseren van intredelengte tot 100 m, kan leiden tot onterecht afgekeurde dijken.

De uitkomst uit dit onderzoek laat zien dat met de aangepaste rekenregel van Sellmeijer uit 2011 een 300 m brede dijk moet worden aangelegd. En volgens de nieuwe normering zelfs een nog bredere, terwijl volgens de VNK2 methode voor de huidige dijk een herhalingsstijd van 10.000 jaar wordt berekend. Aangezien de dijk volgens Sellmeijer 2011 tijdens het hoogwater van 1995 ook had moeten falen is gevoelsmatig de verhouding tussen berekening en praktijk zoek.

6

Discussie

6.1 OMGAAN MET VARIATIE

De variatie in de proeftuin ($V = 0,26$) is groter dan de variatie van de regionale verzameling ($V = 0,15$). De regionale verzameling is gebaseerd op de huidige praktijk van grondonderzoek met metingen om de circa 100 m. Op basis daarvan kan de vraag gesteld worden of met de huidige praktijk van grondonderzoek doen wel de werkelijke variatie in de ondergrond gevonden wordt. Daaruit volgt vervolgens de vraag of dan met de huidige grondonderzoek praktijk het faalmechanisme piping op een goede manier beschouwd kan worden met de formule van Sellmeijer.

Door vóór aanvang van een pipinganalyse een geologische beschouwing te doen, kan in beeld gebracht worden wat de verwachting van de voorliggende ondergrond is.

- Het is daarbij van belang om te weten of zandbanen voorkomen in het te beschouwen gebied. Op deze locaties is de deklaag relatief dun en daarmee de kans op opbarsten en daarmee piping relatief groot.
- Als op basis van een geologisch analyse aangetoond kan worden of de zandlagen naar verwachting homogeen of heterogeen zijn, kan een andere aanvullende conclusie mogelijk zijn. Indien de ondergrond zeer heterogeen is, kan de vraag gesteld worden of piping daar wel kan optreden. Bij zeer heterogene ondergrond zijn relatief veel grote korrels aanwezig. Mogelijk is deze weerstand zo groot dat piping uit te sluiten is.
- Het is daarom aan te bevelen onderzoek te doen naar de geologie in relatie tot piping: is het mogelijk om op basis van de sedimentologische opbouw piping in bepaalde gebieden uit te sluiten?

De huidige werkwijze met karakteristieke waarden geeft een niet representatieve of zelfs irreële schematisatie door de zeer grote spreiding in de meetwaarden. Op basis daarvan kan de vraag gesteld worden of het wel zinvol is om de karakteristieke waarden van de d_{70} als rekenwaarde aan te houden en daarmee de piping berekeningen volgens de formule van Sellmeijer uit te voeren:

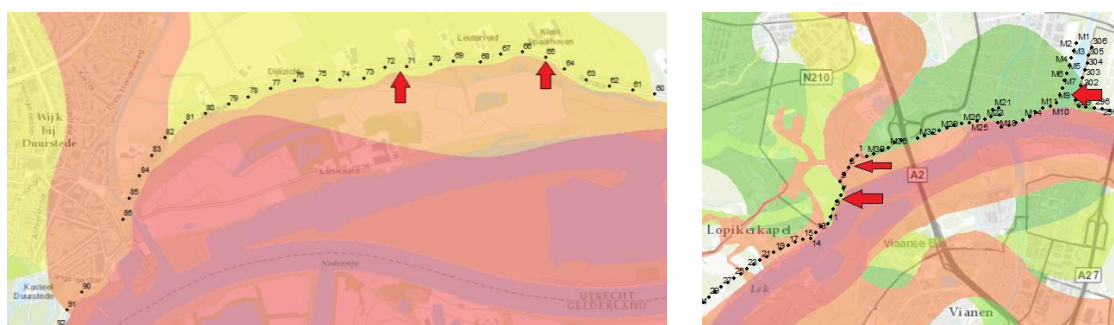
- De vraag kan worden gesteld of de kortst mogelijke kwelweg wel gelijk is aan de werkelijke kwelweg. In werkelijkheid is dit wellicht geen rechte lijn loodrecht op de dijk. Ook de methode waarbij het zwakste pad bepaald wordt (Kanning, 2012) laat zien dat de kwelweg langer is dan een rechte lijn loodrecht op de dijk. Deze extra kwelweglengte wordt in de huidige methodiek niet in rekening gebracht. Een alternatieve manier om de rekenwaarde voor de d_{70} te bepalen is deze gelijk te stellen aan de grootste korrel in het zwakste pad. Om te onderbouwen of deze korrelgrootte nog representatief is als invoer voor het model zouden eerst laboratoriumproeven moeten worden uitgevoerd.
- Een andere denkrichting is om een modelfactor voor heterogeniteit te introduceren. Daarbij kan dan uitgegaan worden van de gemiddelde waarde van de d_{70} met daarbij een modelfactor. Ook hiervoor zouden gevoeligheidsexperimenten moeten worden uitgevoerd in het laboratorium.

De veiligheidsfactor in het OI2014v3 die 1,57 bedraagt voor normtraject 43-5 bij IJzendoorn, verdisconteert model- en parameter onzekerheden. Gelet op de uitkomsten van de analyse is het de vraag of het aandeel van de grondparameters d_{70} en k in deze veiligheidsfactor juist is vastgesteld. Kan bij de hier gevonden grote variatie onzekerheid nog wel worden verdisconteerd in een samengestelde en tamelijk hoge veiligheidsfactor. Veelal liggen partiële veiligheidsfactoren tussen 1,05 en 1,3.

6.2 TOEPASBAARHEID REKENREGEL

Voor Holocene stroombanen in het overgangsgebied van Boven- naar Benedenrivierengebied kan een standaard d_{70} waarden worden vastgesteld van 430 μm gemiddeld en 300 μm karakteristiek. Dit blijkt uit de waarnemingen in de proeftuin en zes locaties langs de Noordelijke Lekdijk (zie Tabel 10). Met deze conclusie wordt een aanzet/bijdrage gegeven voor default d_{70} waarden in Nederland (d_{70} NL 1.0).

De doorlatendheid van 63 m/dag, die uit de pompproef te IJzendoorn volgt, past binnen het beeld dat al decennia bestaat vanuit de TNO grondwaterkaarten. Ergo: en eerste schatting van $k = 50$ m/dag gemiddeld volgens de grondwaterkaart is zo gek nog niet. Als rekenwaarde kan dit getal niet worden toegepast. Aanbevolen wordt om in het kader van de vierde toetsronde elke 10 tot 25 km gericht een pompproef, of een vergelijkbare veldtest, uit te gaan voeren op representatieve locaties.



Figuur 26: Voor " d_{70} NL 1.0" onderzochte locaties met Holocene stroombanen (Wijk bij Duurstede en Lopikerkapel)

De variaties in de ondergrond zijn ongekend groot. Dit geldt voor de deklaagdikte, de zandgrofheid van de pipinggevoelige Holocene laag, alsmede het totale Pleistocene watervoerend pakket. Met de huidige praktijk van het uitvoeren van grondonderzoek kunnen deze variaties normaal gesproken niet worden onderkend. Hieruit moet worden geconcludeerd dat schematisatie van de bodem bij toetsingen werk is voor zeer ervaren specialisten, die bovendien "thuis" zijn in het desbetreffende gebied van Nederland.

Een nauwkeurig schematisatie op basis van de juiste hoeveelheid grondonderzoek geeft in dit geval een factor 10 kleinere overstromingskans voor piping op dijkvakniveau. Des te opmerkelijker is het dat uit berekeningen met de rekenregel van Sellmeijer uit 2011 volgt dat veel bredere dijken nodig zijn dan nu aanwezig of dat de dijk in 1995 had moeten falen.

6.3 REIKWIJDTE REKENREGEL

Binnen het WTI2017 is een stochastische ondergrondschematisatie ontwikkeld (SOS) die bij de vierde toetsing gebruikt zal worden als vertrekpunt voor de schematisatie van de ondergrond. De bevindingen uit dit onderzoek zijn vergeleken met het SOS voor dit gebied. Het SOS is aangeleverd door Deltares.

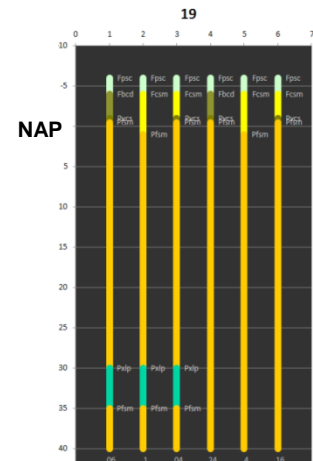
Het SOS geeft voor de aangetroffen grondlagen in IJzendoorn de volgende waarden (zie ook Bijlage 4 of hier rechts):

- zes ondergrond scenario's waarvan vier met een 3 tot 4 m dikke Holocene zandlaag (70% kans van aantreffen) en twee met komkleiafzettingen van 5 m dik (30% kans van aantreffen);
- op NAP -30 m tot NAP -35 m is 20% kans op een scheidende laag van vaste klei;
- gemiddelde waarden Holoceen zand (Formatie van Echteld):
 - dikte = 3,4 m;
 - d_{70} = 310 μm ;
 - k = 10 m/dag;
- gemiddelde waarden Pleistoceen zand (Formatie van Kreftenheye):
 - dikte = 30 m;
 - d_{70} = 410 μm ;
 - k = 65 m/dag.

De d_{70} van het Holocene zand wijkt sterk af van de gevonden waarden in de proeftuin. In een toetsing zouden deze waarden aangepast worden op basis van lokale inzichten. De overige waarden zijn in lijn met de inzichten uit de proeftuin. Op hoofdlijnen biedt het SOS voor de locatie van de proeftuin IJzendoorn een goede basis voor de vierde toetsronde.

De resultaten van de berekeningen volgens Sellmeijer 2011 spreken het niet falen van de dijk in 1995 tegen, alsmede de resultaten van de VNK2 methode. Verwacht moet worden dat in de vierde toetsronde op grotere schaal dan in de derde toetsronde dijkstrekkingen zullen worden afgekeurd op piping. Voor waterschappen schuilt hier een omgevingsrisico qua uitlegbaarheid naar de burgers.

Ook wanneer met een gemiddelde waarde voor de d_{70} wordt gerekend, sluiten de berekeningsresultaten niet goed aan bij de praktijk. Alleen wanneer nog "winst" in kwelweg in het voorland kan worden behaald, komen theorie en praktijk overeen. Voor waterschappen schuilt hier een technisch en financieel risico qua benodigd grondonderzoek.



Figuur 27: WTI-SOS scenario's voor traject 43-19

7

Conclusies en aanbevelingen

7.1 CONCLUSIES

In deze POV-piping verkenning is de toepasbaarheid en de reikwijdte van de nieuwe rekenregel van Sellmeijer (2011) onderzocht. Eén van den doelen was om een praktische methode te ontwikkelen voor het bepalen van representatieve invoerwaardes voor de rekenregel. Dit doel is ten dele gehaald omdat is gebleken dat de ondergrond nog heterogener is dan van verwacht. In de proeftuin bij IJzendoorn is het volgende geconstateerd.

- De samenstelling van de deklaag varieert van klei naar zandige klei tot klei afgewisseld met zand. De aanwezigheid van zand betekent niet automatisch pipinggevoelig zand. Hierdoor is de definitie van de deklaag niet eenduidig en is het lastig om de diepte van zandmonsters te bepalen in het veld. Uit praktisch oogpunt is gekozen voor een vaste zandmonsterdiepte van 1,75 meter.
- De zandkorrelgrootte loopt uiteen van matig fijn zand (162 μm) tot grof zand (728 μm) met een gemiddelde van 420 μm en een variatiecoëfficiënt van 0,26. De spreiding hiervan is gelijkmatig verdeeld over de hele proeftuin. Bovendien verschilt de spreiding van de lokale proevenverzameling niet veel van de regionale. Vanuit een zwakste pad analyse lijkt de gemiddelde korrelgrootte een goede representatieve waarde om in te voeren in het Sellmeijer model. Aanbevolen wordt om dit nog verder te onderzoeken met de toevoeging van grondwaterstroming.
- De doorlatendheid van het Pleistocene zand is 63 m/dag met een variatiecoëfficiënt van 0,13. De doorlatendheid van het Holocene zand is 15 m/dag met een variatiecoëfficiënt van 0,25.

Door de grote variatie in zowel de dikte van de deklaag, de zandkorrelgrootte als de doorlatendheid is het niet mogelijk gebleken om praktische handvatten te ontwikkelen om de waardes van de invoerparameters te ontwikkelen. Bovendien is niet duidelijk welke d70 precies gevraagd wordt als invoerparameter. Uit deze verkenning is duidelijk geworden dat meer grondonderzoek niet leidt tot een kleinere variatie. Echter, wat betreft de korrelgrootte is de variatie wel binnen een (bekende) bandbreedte. Ook de variatie in de dikte van de deklaag is gedeeltelijk te herleiden aan de ligging van de restgeul.

De doorlatendheid van het zand lijkt ook toegekend te kunnen worden aan geologische afzetting. Zo blijkt uit een vergelijking van de proeftuinresultaten met enkele kleine proevenverzamelingen van andere Holocene stroomgordels. Het doel om een verband tussen geologie en de waardes van de parameters te verkennen is hiermee geslaagd. Op basis van alleen deze verkenning alleen kunnen echter nog geen generieke conclusies getrokken worden over het verband tussen de waardes van de invoerparameters en de geologie. Hiervoor is een grootschaliger onderzoek nodig.

De reikwijdte van de rekenregel is enkel kwalitatief bepaald. Met de oude rekenregels, VNK2 methode en het beheerdersoordeel voldoet het dijkvak bij IJzendoorn aan de veiligheidsnorm. Met de nieuwe rekenregel van Sellmeijer ruim niet. De rekenregel van Sellmeijer geeft bij een heterogene ondergrond geen betrouwbaar resultaat en in het algemeen zal de rekenregel een te negatief beeld geven.

De toepasbaarheid en reikwijdte van de rekenregel van Sellmeijer uit 2011 lijken onvoldoende te zijn. Gebruik van deze regel in de vierde toetsronde brengt voor waterschappen politieke, technische en financiële risico's met zich mee, waarvan in de derde toetsronde nog geen sprake was. Nadrukkelijk wordt aanbevolen om het in rekening stellen van heterogeniteit als sterkteparameter serieus te onderzoeken. Dit lijkt onafwendbaar.

7.2 OPVOLGING AANBEVELINGEN ENW-T

Ed Calle, specialist op het gebied van geo-statistiek, heeft naar aanleiding van de statistische analyse van de zeefresultaten aangegeven dat karakteristieke waarden (95% betrouwbaarheid) niet altijd reëel zijn. De berekeningsresultaten van de benodigde kwelweg met karakteristieke waarden voor de sleutelparameters bevestigen deze constatering en de behoefte aan een ander soortige parameter zoals: waarde sterkste korrel in zwakste pad of een laag gemiddelde waarde. Hiernaar is verder onderzoek nodig.

Peter Blommaart, voormalig pipingregiseur bij RWS, heeft geopperd om na te gaan wat de kans is op het aantreffen van grof zand. Binnen deze verkenning wordt deze vraag niet ter hand genomen. Deze vraag hoort bij de aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

Door Henk Van Hemert van HHNK en Meindert Van van Deltares is aanbevolen om ook de uniformiteit (d_{60} / d_{10}) van de proeftuin te bepalen. In Bijlage 5 is een statistische karakterisering opgenomen. Het zand is matig goed gegradeerd ($U = 2,1$).

7.3 AANBEVELINGEN

7.3.1 VERVOLGONDERZOEK

Er wordt aanbevolen wordt om:

- de juiste wijze van het vaststellen van d_{70} waarde toe te voegen aan de werkwijzer piping;
- na te gaan welke winst in toetsing op piping volgens Sellmeijer nog gehaald kan worden met het model D-Geo Flow;
- een statistische analyse uit te voeren naar de kans op het simultaan voorkomen van een pipinggevoelige zandlaag, dunne deklaag en hoge doorlatendheid van de ondergrond binnen één dijkvak van meerdere kilometers. Uitkomsten van de analyse dienen een plek te krijgen in de bepaling van het lengte-effect;
- de kans op grof zand binnen een bepaalde ruimtelijke entiteit in relatie tot de afmeting en positie van de dijk te onderzoeken.

7.3.2 SCHEMATISERINGSHANDLEIDING

Aandachtspunten voor schematiseringshandleiding:

- Bij de uitvraag voor een pompproef is het belangrijk om het kader van het onderzoek duidelijk te vermelden. Veel pompproeven worden namelijk uitgevoerd om maximale bronneringsdebieten voor onttrekkingsvergunningen te bepalen. Hierdoor zijn geohydrologen dikwijls meer gespist op de bovengrens van de doorlatendheid van een heel pakket. Terwijl voor piping berekeningen de doorlatendheid van één specifieke laag in dat watervoerend pakket maatgevend zal zijn. Welke laag dat is, hangt af van de lokale gelaagdheid en ook dit is niet vergelijkbaar met reguliere geohydrologische analyses.
- De zandige eenheden van de Stochastisch Ondergrond Schematisatie (WBI-SOS) zijn onderverdeeld op basis van geologische formatie en bieden daardoor een handvat om de bandbreedtes van korrelgroottes te duiden. In de verkenning is hiertoe een eerste aanzet gegeven.
- De definitie van de deklaag is niet eenduidig, zelfs niet op kleine schaal (75x75 m).
- Door grondbewerking door de eeuwen heen zijn de natuurlijke hoogteverschillen uitgevlakt of juist kunstmatige hoogteverschillen ontstaan. De dikte van de deklaag is daardoor niet meer eenduidig definieerbaar.
- Het verschil in schaalgrootte en de mate van variatie in zandgrofheid kan praktisch gezien niet worden ondervangen met conventioneel grondonderzoek (bijvoorbeeld elke meter of decimeter een boring). Er zal daardoor een andere strategie gevolgd moeten worden, waarbij de ruimtelijke variatie op macro en micro niveau in beeld wordt gebracht. Daarbij blijft de vraag bestaan welke waarde representatief is voor de parameter zoals die in de rekenregel van Sellmeijer bedoeld is, omdat bij het opstellen daarvan gebruik is gemaakt van homogeen zand.

8

Literatuur

Naar onderstaande bronnen is in de tekst verwezen met [lit. x]

nummer	bron
1	"De relatie tussen zandmeevoerende wellen en de sedimentologische opbouw van de ondergrond in het centrale Rivierengebied van Nederland", Waterschap Rivierenland, L.J. Taal, 2015
2	"Zebra's en damborden" ARCADIS, 2012 afstudeeropdracht Teun van Ooijen en Max van Dalen
3	"proeftuin in dijkkring 48 bij Lathum" ARCADIS, 2014 studentopdracht hogeschool Van Hall-Larenstein
4	"Werkwijzer piping" RWS, 2015
5	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.
6	IJzendoorn d70 analyse – v2, Kanning, 2014
7	Consequentie analyse aangepaste pipingregel, ARCADIS 1 augustus 2012 (kenmerk: 076526682:C / project: C03011.000192) in opdracht van de waterschappen WSRL, WRIJ, WSVV, A&M, WGS en HDSR
8	Pipingonderzoek dijkkring 43 IJzendoorn, Analyse pompproef proefvak 2, Opdrachtnummer 02P004885, Inpijn-Blokpoel 18 mei 2015
9	Piping, Realiteit of Rekenfout?, ENW in opdracht van DG Water, januari 2010
10	Technisch Rapport Zandmeevoerende wellen, TAW, maart 1999
11	Addendum I bij de Leidraad Rivieren, t.b.v. het ontwerpen van rivierdijken, ENW, 2008
12	Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen, Deltares (i.o.v. RWS Waterdienst), maart 2012
13	Zand in banen, zanddiepte-attentiekaart van het Gelders rivierengebied, Rijksuniversiteit Utrecht en provincie Gelderland, 1994
14	POV piping "proeftuin Mastenbroek" duiding pipinggevoeligheid en toepasbaarheid rekenregel van Sellmeijer 2011, ARCADIS 2015 (kenmerk: 078366218 / project: C03011.000275.0300) in opdracht van WGS
15	HWBP T-2 verkenning noordelijk Randmeerdijk Elburg e.o., ARCADIS 2015 (kenmerk: 078369697 / project: C03011.000346) in opdracht van WSVV

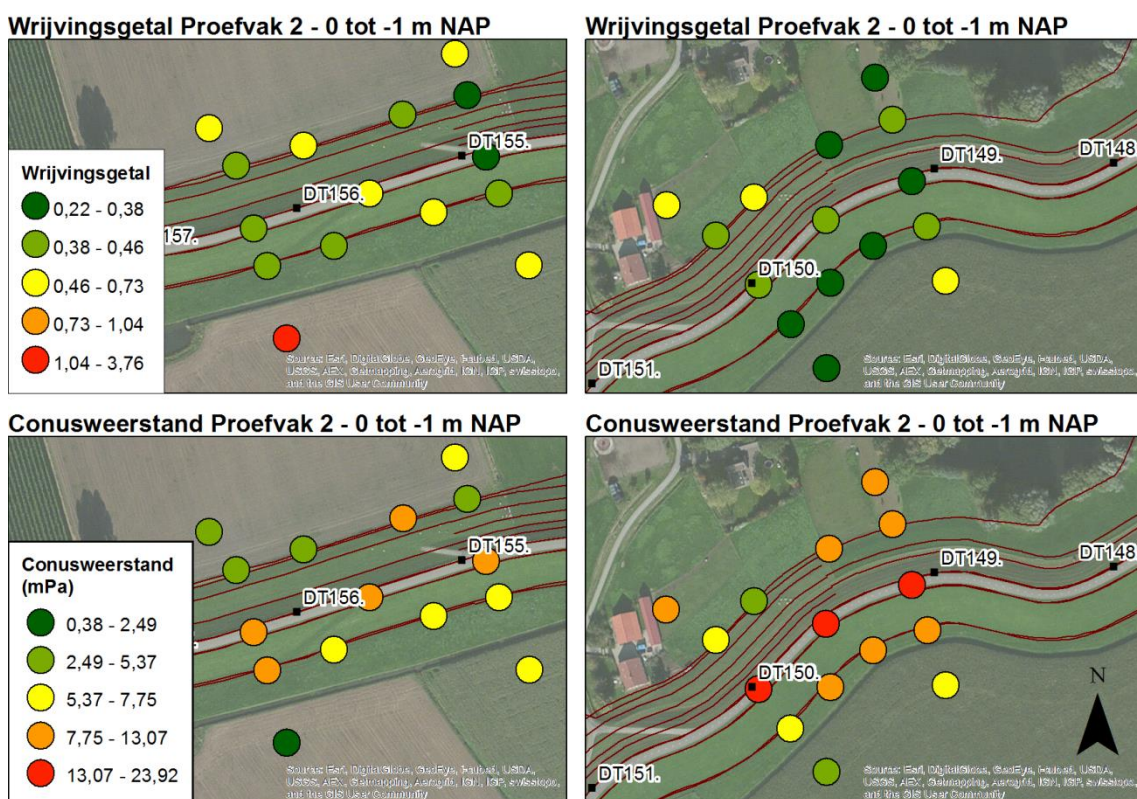
Bijlage 1 Relatie conusweerstand, wrijvingsgetal en d_{70}

Er is geen duidelijke relatie tussen conusweerstand en wrijvingsgetal enerzijds en d_{70} anderzijds. De voorbelastende werking van het dijklichaam volgt wel duidelijk uit de conusweerstand in de sonderingen. Onder de dijk, ter plaatse van de sonderingen op de kruin, is de conusweerstand duidelijk hoger.

Werkwijze:

- alle GEF bestanden van de sonderingen in excel laden;
- waarden van conusweerstand en wrijvingsgetal over een diepte van 0 tot -1 NAP selecteren;
- gemiddelde waarde van de conusweerstand en wrijvingsgetal over deze meter bepalen en inlezen in ArcGIS.

Figuur 28 is het resultaat.

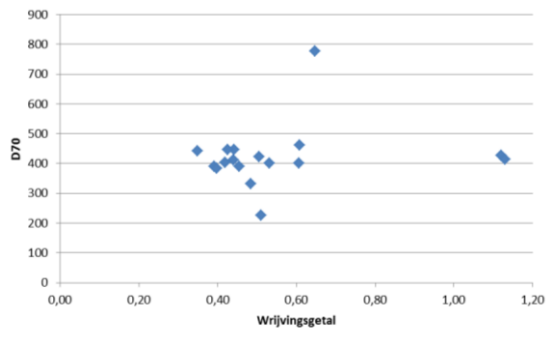


Figuur 28: Wrijvingsgetal en conusweerstand in de bovenste meter van het Pleistocene zand

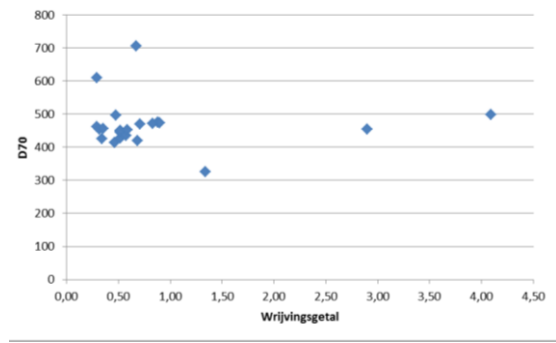
Werkwijze:

- boringen selecteren die binnen een straal van 15 meter van een sondering liggen;
- diepte van het gezeefde zandmonster bepalen;
- voor deze diepte het gemiddelde wrijvingsgetal berekenen;
- gemiddelde wrijvingsgetal en de waarden van d_{70} tegen elkaar uitgezet in een scatterplot;

Resultaat: geen correlatie.



Figuur 29: Geen correlatie tussen het wrijvingsgetal en de korrelgrootte in het Pleistocene zand aangetroffen



Figuur 30: Geen correlatie tussen het wrijvingsgetal en de korrelgrootte in het Holocene zand aangetroffen

Bijlage 2 Voorbeeld bepaling d_{70}

De d_{70} waarde (70% zeefdoorgang) is bepaald uit de zandfractie en er is lineair geïnterpoleerd tussen de waarnemingen. De d_{70} van de zeefresultaten in onderstaande tabel bedraagt 403 μm , uitgaande van:

- grindfractie = 0,62 %;
- siltfractie = 2,25 %.

maaswijdte zeef [mm]	2	1	0,5	0,25	0,18	0,125	0,63
cumulatief monster [%]	99,38	97,33	85,83	45,55	24,52	8,84	2,25
op zeef [%]	0,62	2,05	11,5	40,28	21,03	15,68	6,59
zandfractie [%]		2,11	11,84	41,47	21,65	16,14	6,78
zandfractie cumulatief [%]		2,11	13,95	55,42	77,07	93,21	99,99 *

Tabel 17: Zeefresultaten voor rekenvoorbeeld d_{70} bepaling

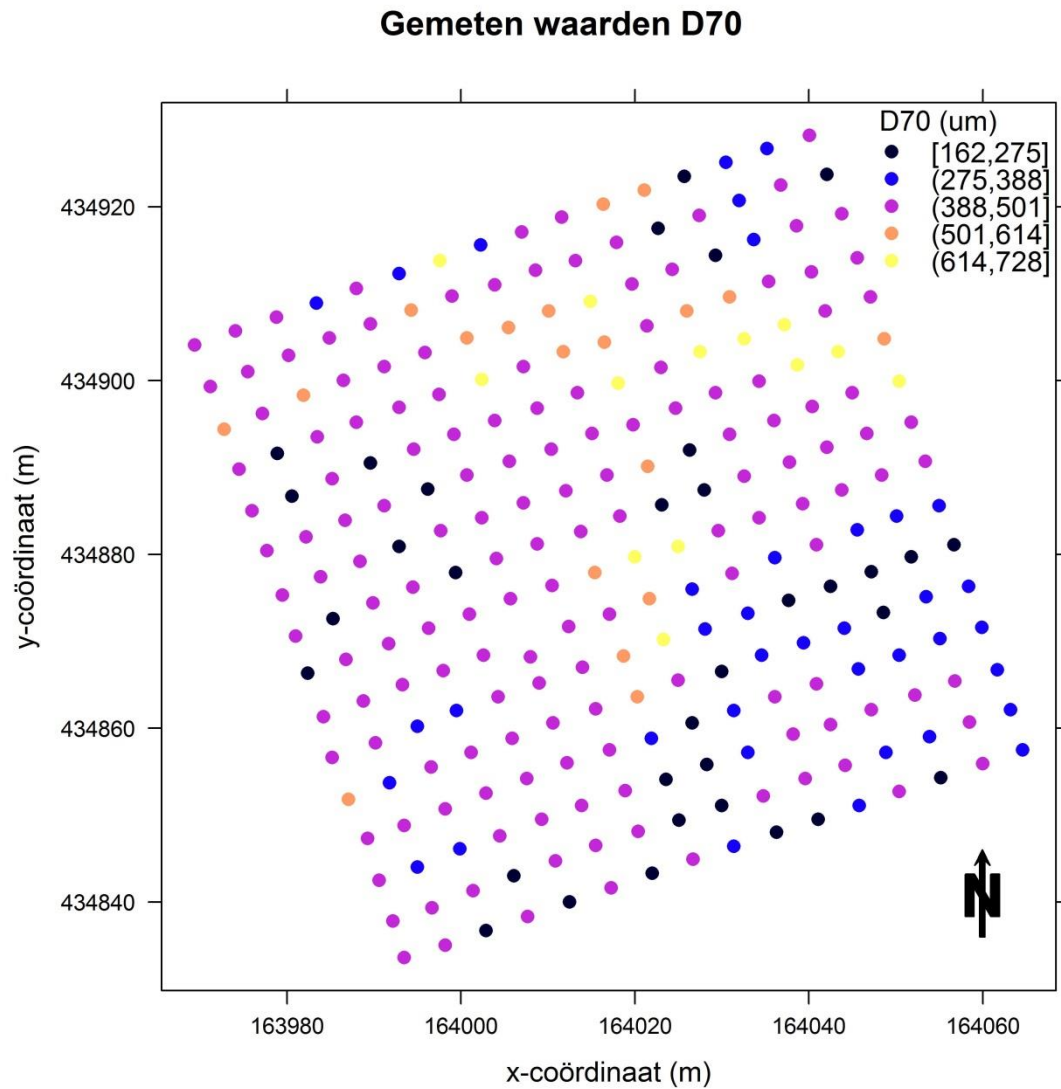
* = fout door afronding = 0,01

Berekening:

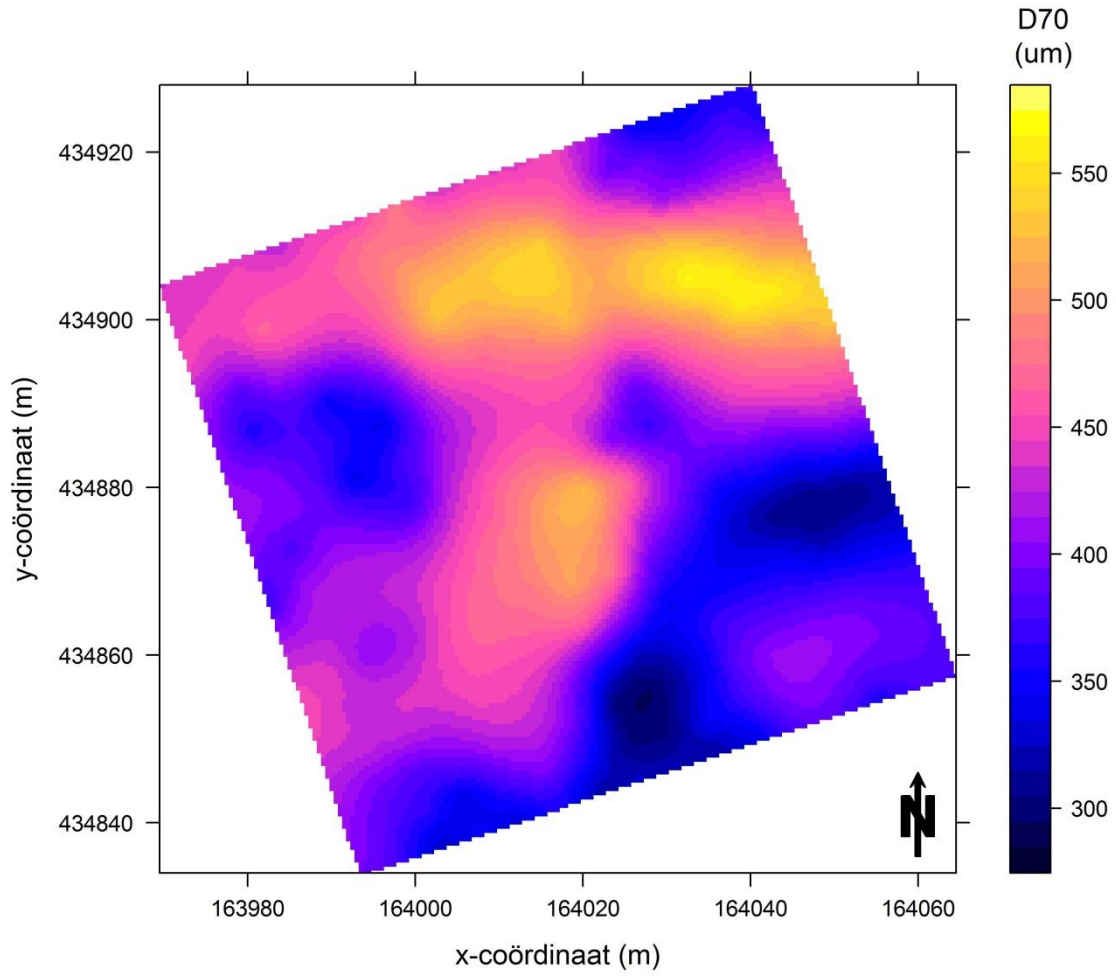
- zandfractie $11,5 / (100\% - 0,62\% - 2,25\%) = 11,84$ (op zeef 0,5 mm)
- zandfractie $40,28 / (100\% - 0,62\% - 2,25\%) = 41,47$ (op zeef 0,25 mm)
- $2,11 + 11,84 = 13,95$
- $2,11 + 11,84 + 41,47 = 55,42$
- $30 - 13,95 = 16,05$
- $16,05 / 41,47 = 0,4429$
- $d_{70} = 0,5 \text{ mm} - 0,387 \times (0,5 - 0,25 \text{ mm}) = 0,403$

Bijlage 3 Figuren proeftuin

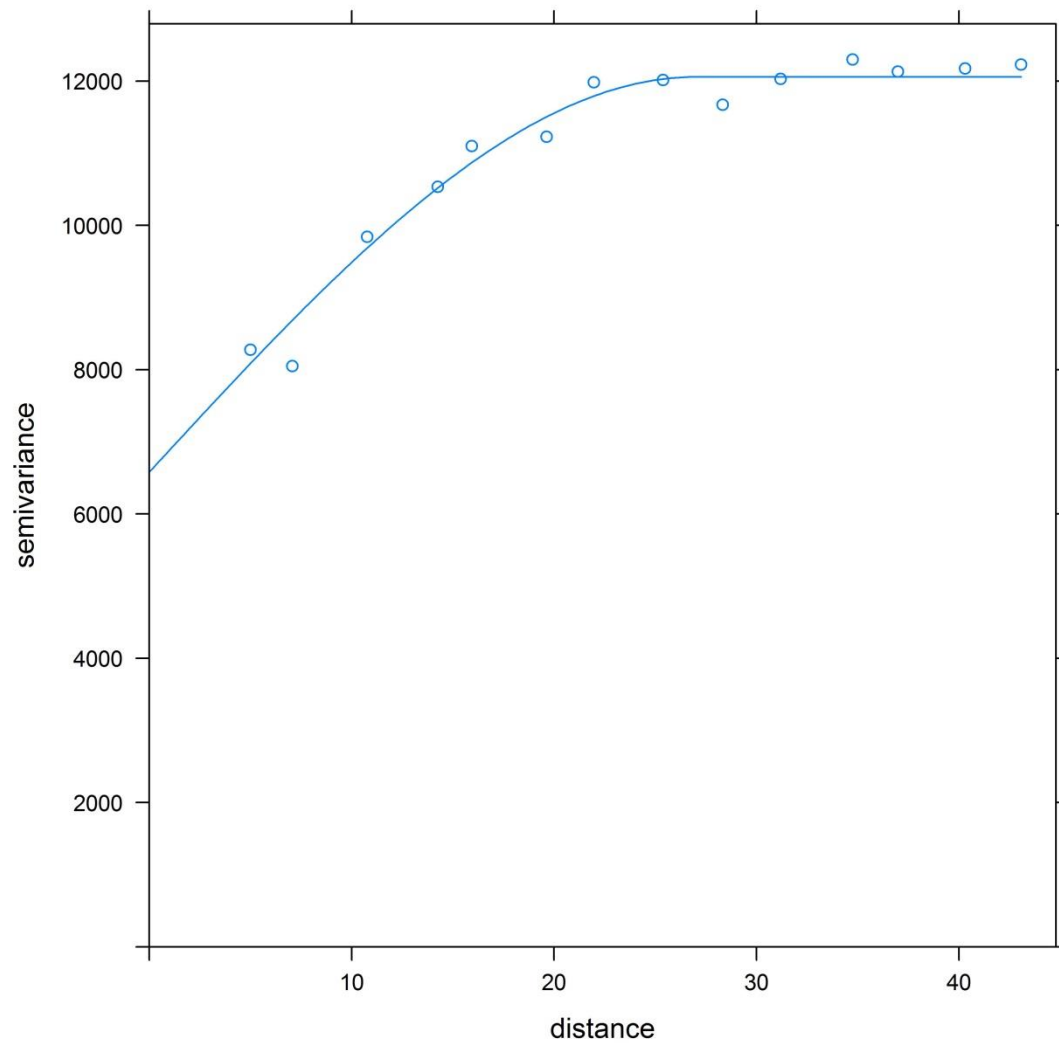
In deze bijlage zijn dezelfde figuren opgenomen als in de tekst, maar dan op een groter formaat. Tevens zijn ter informatie de semivariogrammen opgenomen.



Kriging interpolatie D70

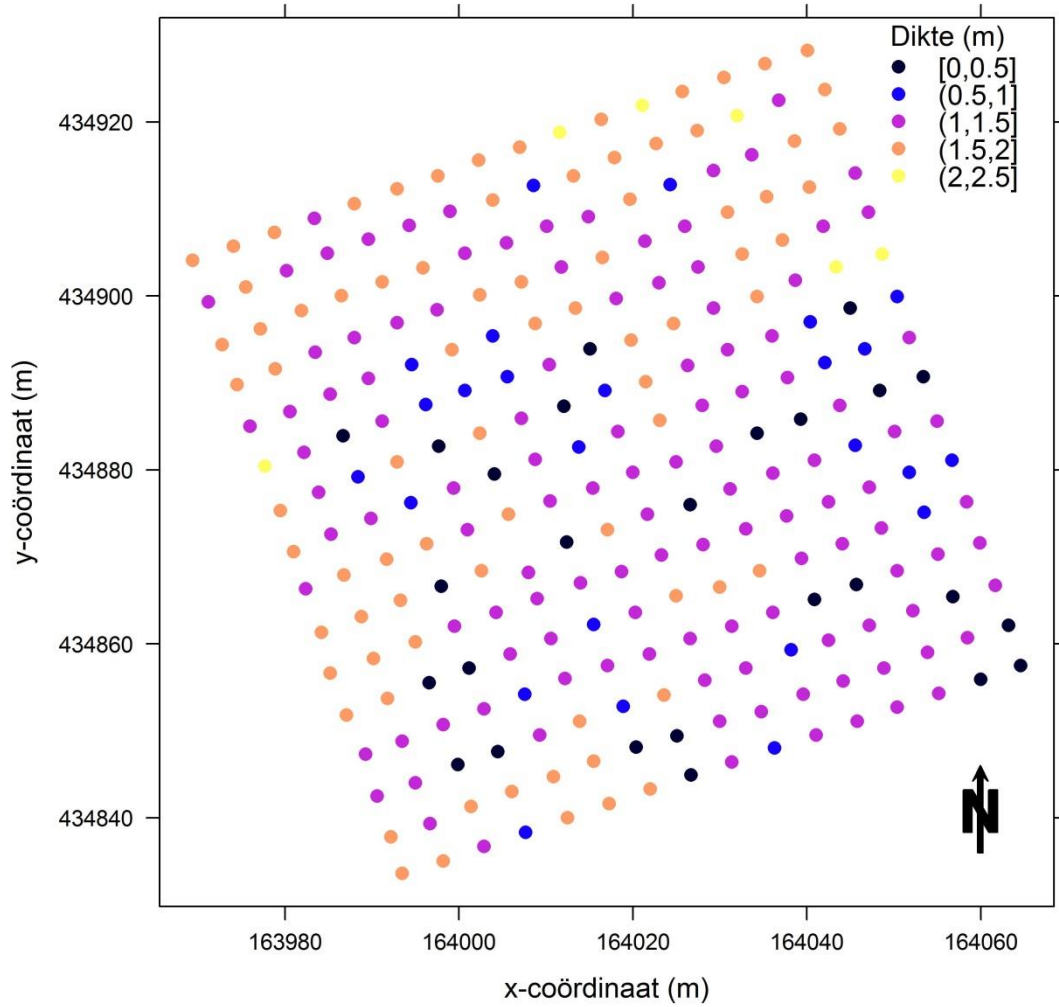


Semivariogram D70

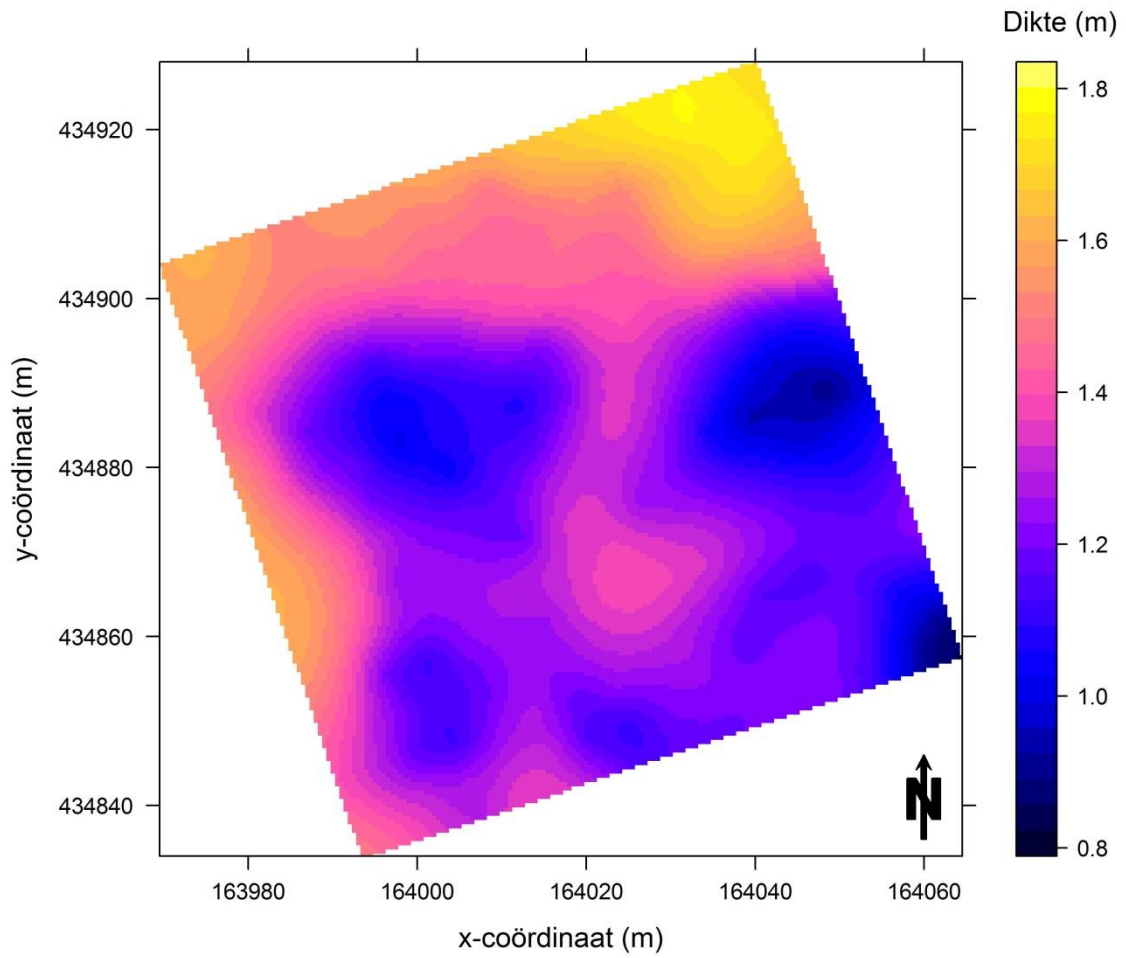


De wortel uit de semivariance (nugget) bedraagt $80 \mu\text{m}$ hetgeen duidt op een tamelijk grote spreiding door natuurlijke variatie. Ter vergelijking: het gemiddelde is $420 \mu\text{m}$ en de standaardafwijking bedraagt $108 \mu\text{m}$.

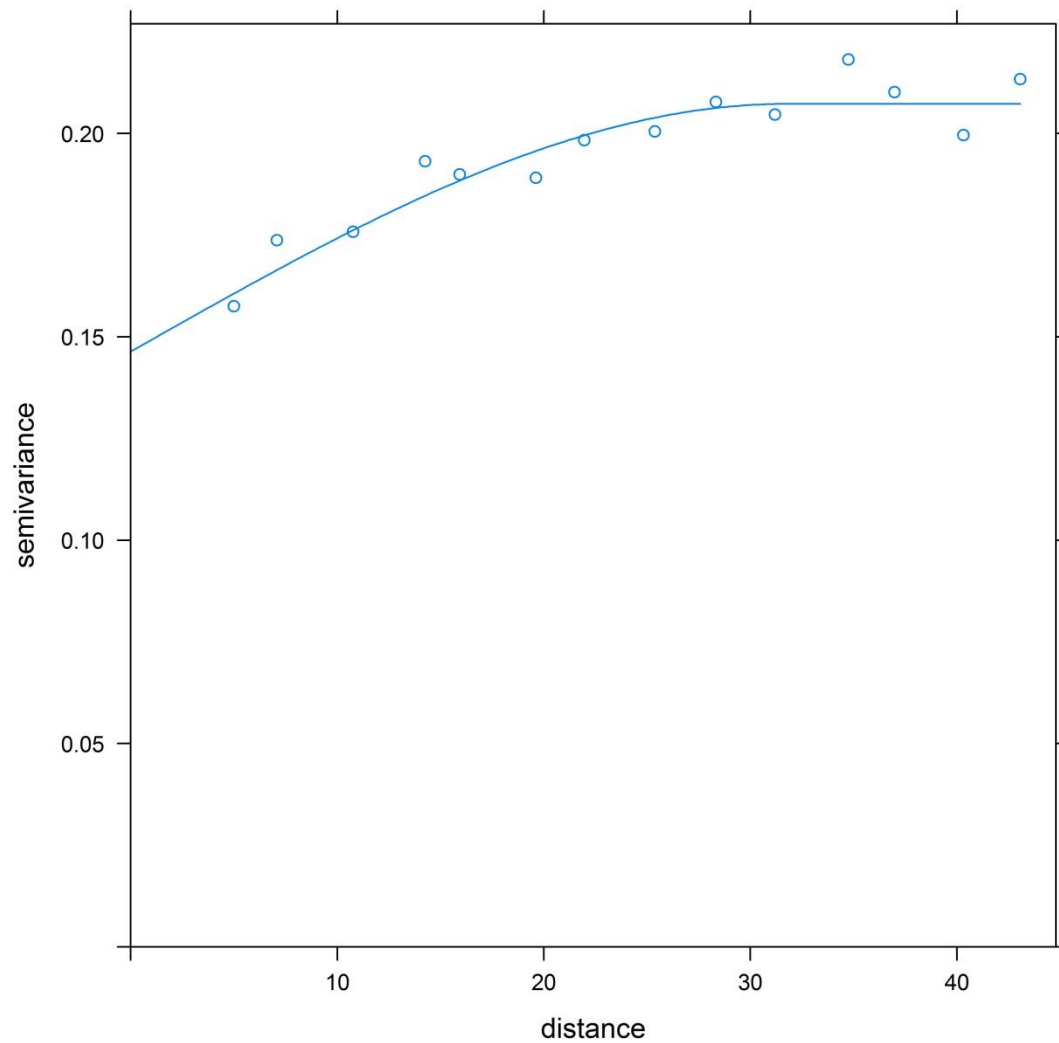
Gemeten deklaag dikte



Kriging interpolatie deklaag dikte



Semivariogram deklaagdikte



De wortel uit de semivariance (nugget) bedraagt 0,37 m hetgeen duidt op een tamelijk grote spreiding door natuurlijke variatie. Ter vergelijking: het gemiddelde bedraagt ongeveer 1,5 m en de standaardafwijking is 0,51 m.

Bijlage 4

Memo WTI-SOS scenario's

Bijlage 5 Uniformiteit (d_{60} / d_{10})

waarde	silt (%)	grind (%)	d_{60} / d_{10} (-)
gemiddelde	2,6	2,0	2,09
standaardafwijking	3,7	2,3	0,29
variatie	1,43	1,17	0,14
aantal	256	256	256
maximum	25,3	13,8	3,40
minimum	0,1	0	1,50
Vergelijking 1: ondergrens lokale waarde ORZW, formule 1.22			1,62
Vergelijking 3: regionaal laag gemiddelde waarde ORZW, formule 1.27			1,85

Tabel 18: Statistische karakterisering d_{60}/d_{10} proeftuin

d_{60} / d_{10}	< 1,75	1,75 – 2,0	2,0 – 2,25	2,25 – 2,5	2,5 – 2,75	> 2,75
aantal	25	47	135	30	9	10

Tabel 19: verdeling d_{60} / d_{10} over proeftuin

Bijlage 6

Samenvatting Review Prof. dr. ir. Jonkman

Review van "pipingonderzoek dijkring 43, d70 en kd bepaling"

Bas Jonkman, TU Delft

definitief, 14 januari 2016

Besproken op 14 januari met Rimmer Koopmans en Marieke de Visser

Mijn algemene indruk is dat het gaat om een zeer waardevol onderzoek dat beeld geeft van mogelijkheden en beperkingen van het gebruik van geavanceerde metingen en gegevens in het pipingmodel. Diverse gegevensbronnen en expertisegebieden zijn gecombineerd en eerste stappen zijn gezet om te komen tot interpretatie. Verdere vervolgstappen lijken op basis van de bevindingen en aanbevelingen nodig en gewenst om te komen tot nadere inzichten.

Vooraf gericht op het verdere traject en meer ter overdenking lijkt het relevant het volgende op te merken:

- Is een uitspraak te doen welke formule in 4.1.2 de meest realistische / representatieve uitkomst geeft? Omdat de beschikbaarheid van drie formules voor de karakteristieke waarde ook voor gebruikers tot verwarring kan leiden is mijn aanbeveling "guidance" te ontwikkelen voor modelselectie.
- Hoe groter het gebied, hoe groter de spreiding. Echter, we zijn niet geïnteresseerd in een willekeurige d_{70} in een gebied, maar de representatieve langs een (mogelijk) pipingpad. Het op een hoop gooien van alle metingen in een groter gebied kan dan leiden tot grotere spreidingen. De detailmetingen kunnen wel helpen het pipingpad te identificeren.
- In gevallen lijken nadere gegevens van de ondergrond te leiden tot een toename van μ en σ . Deze effecten lijken elkaar soms op te heffen bij de bepaling van veiligheid.
- In het rapport wordt terecht bediscussieerd dat het bepalen van variaties in een variërend geologisch gebied leidt tot grote variatie coëfficiënten en daardoor tot conservatieve schattingen. Beter lijkt een benadering waarin op basis van veel informatie een schematisatie wordt gemaakt. Daarvoor worden parameterwaarden geschat die ook passen in het faalmodel en bij het mechanisme (zie zwakste pad discussie).
- Bij piping is het nog ietsje complexer, omdat en opbarsten en het optreden van de pipe moeten samenvallen. Als ik dus een zwakst pad heb maar een dikke deklaag (of andersom een dunne deklaag met een onwaarschijnlijk pipingpad) is het toch niet zo waarschijnlijk. De informatie uit dit rapport zou gebruikt kunnen worden om dergelijke verbanden te zoeken (is er sprake van slechte d_{70} in de buurt van dunne deklagen. De interpretatie van de ondergrondstructuur kan hierbij helpen. Een schets van deze mogelijke relaties (bv. grove korrels nabij dikke deklagen of juist anders) zou interessant zijn.

Colofon

POV PIPING "PIPINGONDERZOEK DIJKRING 43, D70 EN KD BEPALING" ONDERZOEK NAAR DE TOEPASBAARHEID VAN DE REKENREGEL VAN SELLMEIJER 2011 ONDERSTEUND MET VELDWAARNEMINGEN

OPDRACHTGEVER:

Waterschap Rivierenland

STATUS:

Definitief

AUTEUR:

Rimmer Koopmans
Marieke de Visser

GECONTROLEERD DOOR:

Stefan van der Berg

VRIJGEGEVEN DOOR:

Rimmer Koopmans

23 februari 2016
078250239:D

ARCADIS NEDERLAND BV
Het Rietveld 59a
Postbus 673
7300 AR Apeldoorn
Tel 055 5815 999
Fax 055 5815 599
www.arcadis.nl
Handelsregister 09036504