

**Korrelgroottes en
heterogeniteit van
rivierafzettingen in het licht
van piping**



Korrelgroottes en heterogeniteit van rivierafzettingen in het licht van piping

Ane Wiersma
Marc Hijma

1210060-002

Titel

Korrelgroottes en heterogeniteit van rivierafzettingen in het licht van piping

Opdrachtgever
POV piping

Project
1210060-002

Kenmerk
1210060-002-BGS-0001-I

Pagina's
83

Trefwoorden

Piping, heterogeniteit, beddingafzettingen, geologie, korrelgrootte

Samenvatting

Over heterogeniteit en piping zijn de volgende feiten bekend:

- Uit laboratoriumproeven blijkt dat korrelgroottevariatie in de kwelweg het pipingproces negatief beïnvloed. Met andere woorden, korrelgroottevariatie geeft sterkte. Deze sterkte wordt in de huidige beoordelingsmethodiek nog niet meegenomen.
- Uit het veld weten we dat korrelgroottevariatie altijd aanwezig is in natuurlijke afzettingen.
- Als de extra sterkte door heterogeniteit meegenomen wordt, dan leidt dit tot lagere faalkansen.

Om de invloed van heterogeniteit te kunnen gebruiken in de praktijk moeten twee vragen beantwoord worden:

- 1 Welke korrelgroottevariatie is altijd aanwezig in natuurlijke afzettingen? (kwantificering van variatie)
- 2 In welke mate beïnvloedt deze aanwezige korrelgroottevariatie het pipingproces?(kwantificering van effect)

Dit rapport richt zich vooral op de eerste vraag en beschrijft de heterogeniteit, en vooral de korrelgroottevariatie, die aanwezig is in natuurlijke rivierafzettingen onder en nabij dijklichamen, in relatie tot het faalmechanisme piping. Het is een eerste poging om de korrelgroottevariatie die altijd voorkomt op mm en cm-schaal te karakteriseren, en geeft ook vuistregels voor de grotere schalen. Parallel hieraan zijn proeven uitgevoerd om de tweede vraag, het effect van heterogeniteit, vast te stellen. De resultaten van deze proeven zijn beschreven in (Van Beek e.a., 2017).

In het rapport worden eerst de methoden en onzekerheden van korrelgrootteonderzoek behandeld. Hieruit komt naar voren dat er veelal een mismatch is tussen het aangenomen detailniveau van metingen nodig voor berekeningen en het haalbare detailniveau in de praktijk. Ook zijn de korrelgrootten niet altijd representatief voor de diepte waarin piping optreedt. Daarna wordt de heterogeniteit beschreven op vier ruimtelijke schalen: deltaschaal, macroschaal, mesoschaal en microschaal. Deze schalen worden verder toegelicht met de volgende analyses:

- Vergelijking laserdiffractie- en zeefmetingen bij Westervoort
- Onderzoek naar meso- en microschaal bij Tuil met end-member modellering
- Korrelgrootteverloop in de Nederlandse Delta
- Wellen en wielen en de verbreiding van geologische formaties

Op iedere schaal bestaat veel heterogeniteit (o.a. in de korrelgrootte) die het pipingproces op verschillende manieren beïnvloedt.

De micro- en mesoschaal omvat de korrelgroottevariatie die altijd in de kwelweg aanwezig zal zijn. In de bestaande literatuur bestaan geen onderzoeken die een poging doen om op dijschaal deze variatie te karakteriseren. De variatie vindt plaats op cm-dm schaal en is daarom niet karteerbaar. Met andere woorden: de exacte korrelgroottevariatie kan niet voor

Titel

Korrelgroottes en heterogeniteit van rivierafzettingen in het licht van piping

Opdrachtgever

POV piping

Project

1210060-002

Kenmerk

1210060-002-BGS-0001-I

Pagina's

83

Iedere locatie vastgesteld worden. De variatie is echter wel te *karacteriseren*: de mate van verwachte variatie kan wel voorspeld worden. Een poging om de fijnste schaal te karakteriseren met behulp van end-member modellering leidde tot statistisch onderscheidbare korrelgrootteverdelingen waaruit de afzettingen op de bemonsterde plek zijn opgebouwd. Daarvan was één end-member dominant aanwezig in de meeste zandmonsters. De d70 van deze end-member was vergelijkbaar met de gemiddelde d70 van alle monsters. Daar is dit een onderbouwing dat de gemiddelde d70 een goede keuze is als karakteristieke waarde in pipingmodellen, zoals sinds kort in het WBI2017 gebeurt.

De end-member modellering is nu echter maar voor één locatie in het rivierengebied uitgevoerd. Het is moeilijk te zeggen hoe representatief deze locatie is voor andere gebieden. Ook is de mate en ruimtelijk schaal van de afwisselingen nog niet voldoende gekwantificeerd om deze mee te nemen in berekeningen.

Om de heterogeniteit op micro-mesoschaal te kwantificeren en de positieve effecten van heterogeniteit mee te kunnen nemen in berekeningen is daarom aanvullend onderzoek nodig, bij voorkeur in sleuven, omdat dan de korrelgroottevariatie ruimtelijk zichtbaar is en dus gericht bemonsterd kan worden. Wil de verkregen kennis kunnen worden toegepast, dan moet de manier van berekenen aangepast worden zodat de variaties in korrelgrootte kunnen worden meegenomen.

Ook op de macroschaal is variatie aanwezig die het pipingproces beïnvloedt. Deze schaal is wel karteerbaar en op basis van veldonderzoek kunnen de zwakke en sterke plekken aangewezen worden. Op deltaschaal is duidelijk zichtbaar dat stroomafwaarts de korrels steeds fijner worden. Verder lijken zandmeevoerende wellen vooral voor te komen in een begrensd gebied, ruwweg ten oosten van de lijn Schoonhoven-Gorinchem. Verder stroomafwaarts treden ook zandmeevoerende wellen op ondanks dat de korrelgrootte afneemt richting het westen, maar meer sporadisch. Deze grens kan te maken hebben met de geologische opbouw van de delta, bijvoorbeeld door de toenemende dikte van de wig deltasedimenten, het voorkomen van Hollandveen en wellicht de aanwezigheid van zoetwatergetijdenafzettingen. Als de werkelijke oorzaak hiervan kan worden herhaald dan zou de kans op het optreden van piping in grote gebieden worden verfijnd.

Wil de verkregen kennis op de verschillende schalen kunnen worden toegepast in de beoordelingsmethodiek, dan moet deze methodiek aangepast worden om de extra sterkte door korrelgroottevariatie, en heterogeniteit in het algemeen, te kunnen verzilveren.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	Jan. 2018	Ane Wiersma 		Vera van Beek		Renée Talens	
		Marc Hijma		Esther Stouthamer			

Status

definitief

Inhoud

1	Introductie	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Invloed heterogeniteit op piping in het laboratorium	3
1.3	Leeswijzer	5
2	Huidige praktijk	7
2.1	Toetslagen	7
2.2	Bepaling d70 voor toetsing	7
3	Achtergrond bij korrelgroottes	9
3.1	Korrelgrootteverdeling	9
3.2	De d70	11
3.3	Korrelgrootte-eigenschappen per afzetting	11
3.4	Methoden om de korrelgrootte te bepalen	12
3.4.1	Voorbehandeling	12
3.4.2	Zeefmethode	13
3.4.3	Laser-diffractie	13
3.4.4	Andere methoden	14
3.4.5	Vergelijkingen tussen methoden	15
3.5	Aspecten van korrelgroottemetingen	15
3.5.1	Monstergrootte	15
3.5.2	d70 van de zandfractie of de volledige korrelverdeling	16
3.5.3	Diepte van het zandmonster	16
3.5.4	End-member modellering (End-member analyse)	16
3.6	Analyse Westervoort: verschillen tussen laser-diffractie- en zeefmetingen	17
3.6.1	Methode	18
3.6.2	Resultaten	18
3.6.3	Zeefmaten / Interpoleren tussen klassen	21
3.7	Conclusies	26
4	Heterogeniteit in rivierafzettingen	27
4.1	Algemeen	27
4.2	Deltaschaal	31
4.2.1	Kortsluiting	32
4.2.2	Downstream fining	34
4.2.3	Voorkomen van wellen en wielen	37
4.3	Macroschaal	38
4.4	Mesoschaal	42
4.5	Microschaal	50
5	Onderzoek naar de meso- en microschaal bij Tuil	53
5.1	Achtergrond	53
5.2	Methoden	55
5.3	Resultaten	57
5.4	Korrelgrootteanalyse	59
5.5	Discussie	64
5.6	Conclusies	66

6 Discussie: gevolgen voor beoordeling op piping	69
6.1 Korrelgroottes	69
6.2 Microschaal heterogeniteit	70
6.3 Mesoschaal heterogeniteit	70
6.4 Macroschaal heterogeniteit	71
6.5 Deltaschaal heterogeniteit	71
7 Aanbevelingen	73
7.1 Proeftuinen	73
7.2 Protocol voor het nemen van korrelgroottemonsters	74
7.3 Rekenmodellen	74
7.4 Beslisregels	75
7.5 Uitbreiding onderzoek	76
7.6 Praktische adviezen voor beoordelingspraktijk	76
7.6.1 Zeefmaten	76
7.6.2 Monsternamen	76
8 Referenties	79

1 Introductie

In het dijkverbeteringsprogramma HWBP is een Project Overstijgende Verkenning (POV) opgenomen naar het bezwijkmechanisme piping. Hierin worden de problematiek en oplossingsrichtingen rondom piping op een landelijk niveau onder de loep genomen. Eén van de onderwerpen is vergroting van de kennis over de opbouw en de eigenschappen van de ondergrond. De verwachting is dat hierdoor op termijn de benodigde dijkversterkingsmaatregelen ingeperkt kunnen worden. Deze verwachting is gebaseerd op het feit dat in de huidige rekenregel (Sellmeijer) aan zandlagen geen interne variatie wordt toegekend, terwijl in de praktijk vrijwel altijd interne variatie aanwezig is en enkele verkennende studies hebben laten zien dat deze interne variatie zorgt voor extra sterkte. De vergroting van de kennis wordt uitgevoerd door middel van verkenningen.

In dit rapport wordt beschreven hoe rivierafzettingen waarin piping een rol speelt zijn opgebouwd, en verkend hoe deze natuurlijke eigenschappen van rivierafzettingen het pipingproces kunnen beïnvloeden. Hierbij wordt in het bijzonder ingegaan op de korrelgroottevariatie. Ook wordt een voorzet gegeven voor de karakterisatie van deze afzettingen voor pipingberekeningen. Het uiteindelijke doel is om praktisch toepasbare ideeën aan te leveren die te gebruiken zijn bij de toetsing en het ontwerp van waterkeringen.

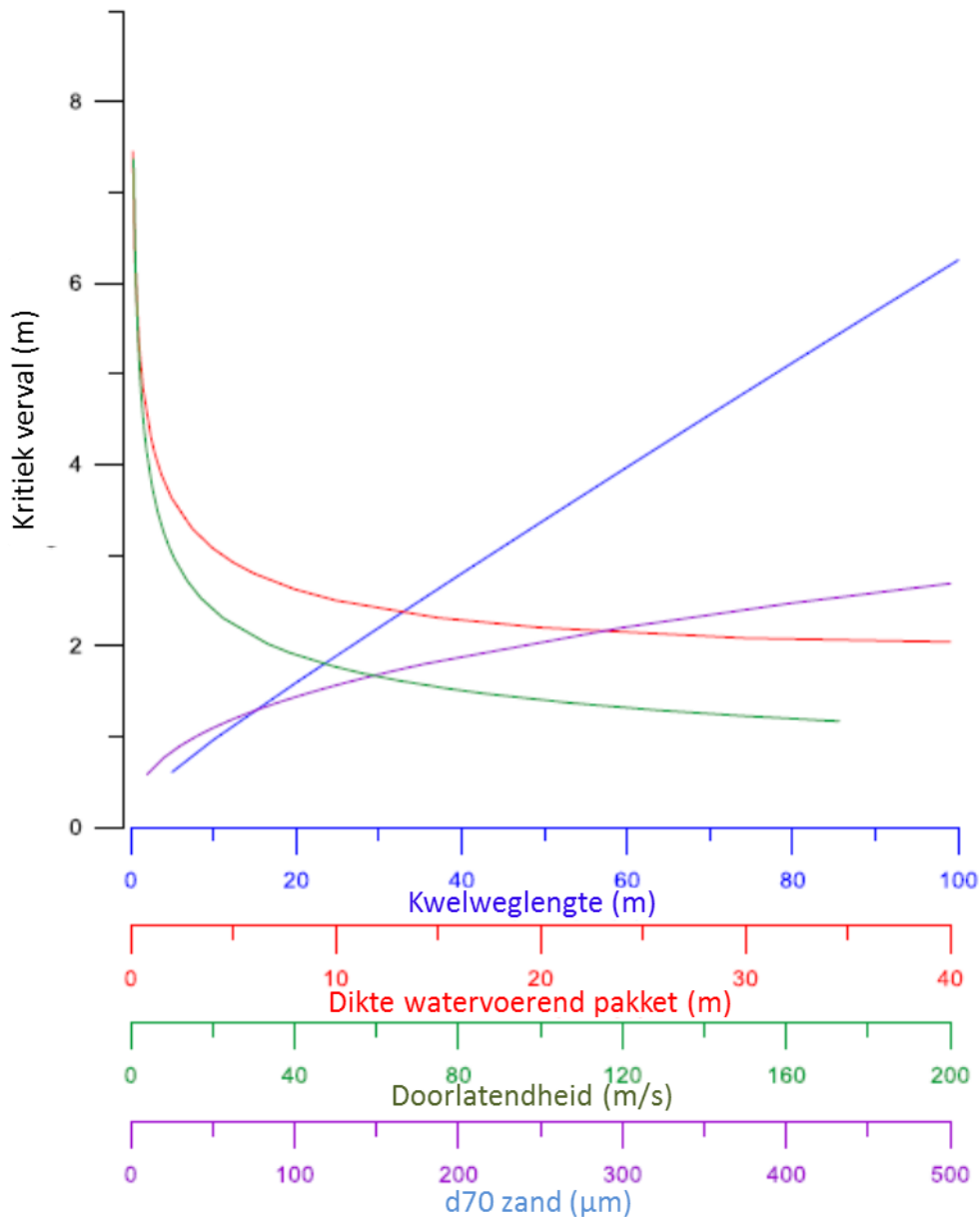
1.1 Achtergrond

Om te bepalen hoe gevoelig een dijktraject is voor piping wordt de regel van Sellmeijer toegepast. De regel van Sellmeijer is gebaseerd op een theoretisch rekenmodel voor terugschrijdende erosie (Sellmeijer, 1988). Berekend wordt het verval waarbij evenwicht is en de korrels net niet in beweging komen (kritiek verval) om een pipe te laten doorgroeien onder de gehele kwelweg. Zolang het werkelijke verval kleiner is dan het kritieke verval, ontstaat een evenwichtssituatie, waarbij de pipe niet meer verder groeit. Is het verval groter, dan groeit de pipe volledig uit tot een doorgaande pipe en kan de dijk verzakken en doorbreken. De grootte van het kritieke verval in Sellmeijer is afhankelijk van verschillende parameters (Figuur 1.1):

- geometrieparameters: o.a. kwelweglengte L , dikte van de zandlaag D , dikte van de deklaag d
- grondwaterstromingsparameters: o.a. doorlatendheid (k) van de watervoerende zandlaag
- micro-morfologieparameters: korrelgrootte d_{70} en soortelijk gewicht van het zandkorrelmateriaal, de sleepkrachtcoëfficiënt en de rolweerstandshoek.

De rekenregel is gekalibreerd op resultaten van laboratoriumexperimenten (schaal ~0.5 m tot 2m) en IJkdijkexperimenten (schaal ~15 m). In deze proeven zijn geïdealiseerde omstandigheden toegepast. Dat wil in dit geval zeggen dat de regel uitgaat van homogeen zand (goed gemengd zand met een constante korrelverdeling zonder fijne fractie), en dat de overgang tussen zand en klei (een perspex plaat in het laboratorium) zeer abrupt is.

De reden dat de d_{70} van de korrelverdeling wordt gebruikt in het model, en niet de d_{50} , is de aanname dat om voldoende korrels te verplaatsen grotere korrels ook in beweging moeten komen (Sellmeijer, 1988; Van Beek, 2015). De pipinggevoeligheid is afhankelijk van de waarde van de d_{70} , waarbij geldt dat een kleinere korrelgrootte een lager kritiek verval genereert, en dus een grotere kans op falen. Om het kritiek verval groter te maken wordt meestal als maatregel een berm aangelegd waardoor de kwelweglengte wordt vergroot.



Figuur 1.1 Variabelen in de rekenregel van Sellmeijer en de relatieve invloed op het kritieke verval (Buijs, 2013).
 Hoe lager het kritiek verval, hoe gevoeliger een situatie is voor piping.

De vraag rijst echter wat “de” d70 onder een dijk is. Eerdere studies hebben aangetoond dat de korrelgroottevariatie onder een dijk erg groot is (Arcadis, 2014; De Visser et al., 2015). Vaak is de praktijk om enkele korrelgroottemetingen rondom het te beoordelen dijktraject te verzamelen, en vervolgens van deze korrelgroottes de 5 percentiel ondergrenswaarde te nemen (Förster, 2012). De redenering hiervoor is dat er een kans is op een doorlopend zandlichaam onder de dijk door bestaand uit alleen de fijnste 5% van de gemeten korrelgroottes. Hierbij is de vraag of dit in geologische zin realistisch is.

Daarom gaan we in dit rapport in op de geologische opbouw van pipinggevoelige situaties in het rivierengebied, en meer specifiek:

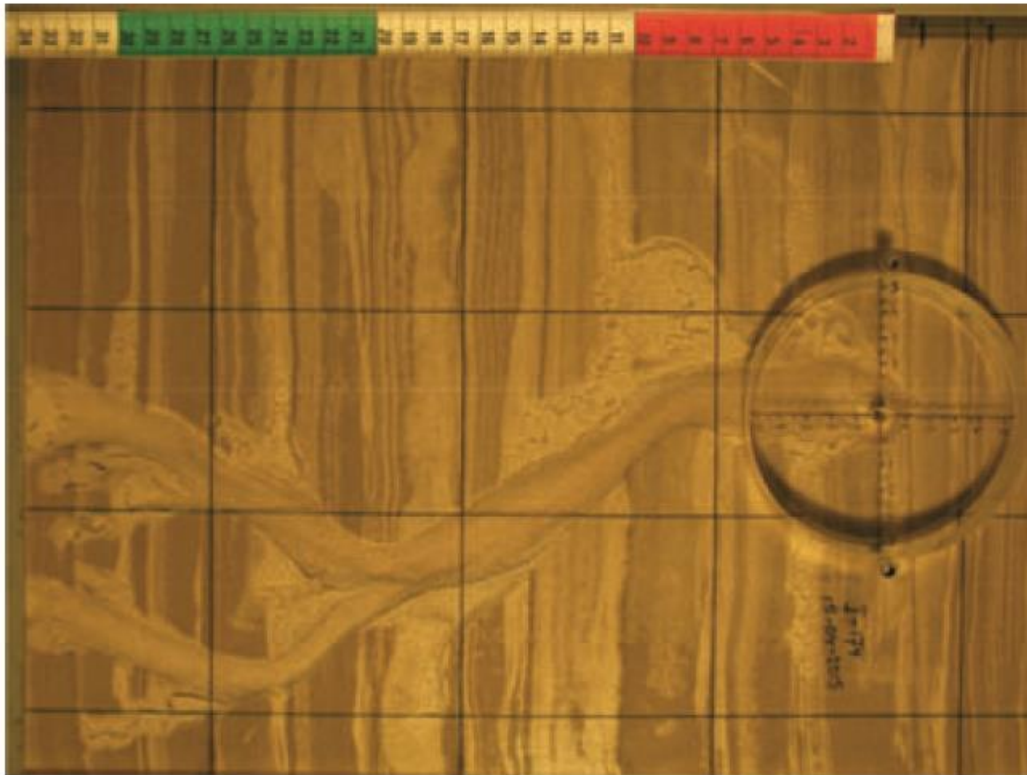
- Hoe nauwkeurig zijn korrelgroottemetingen en de d_{70} ?
- Wat is de geologische opbouw van pipinggevoelige situaties in het rivierengebied?
- Op welke schalen is er heterogeniteit aanwezig?
- Hoe beïnvloedt deze heterogeniteit piping?
- Kan deze heterogeniteit worden gekarakteriseerd?

Naast de korrelgrootte speelt doorlatendheid een grote rol in het pipingproces. Deze is ook afhankelijk van de korrelgrootte en de sortering van het zand. Om die reden vertoont de doorlatendheid ook een grote variatie op verschillende schalen. In dit rapport is ervoor gekozen om het onderzoek voornamelijk te richten op korrelgrootten en geologische opbouw van natuurlijke rivierafzettingen. De doorlatendheid is een gevolg van deze factoren en wordt in een afzonderlijk rapport binnen deze projectoverstijgende verkenning behandeld.

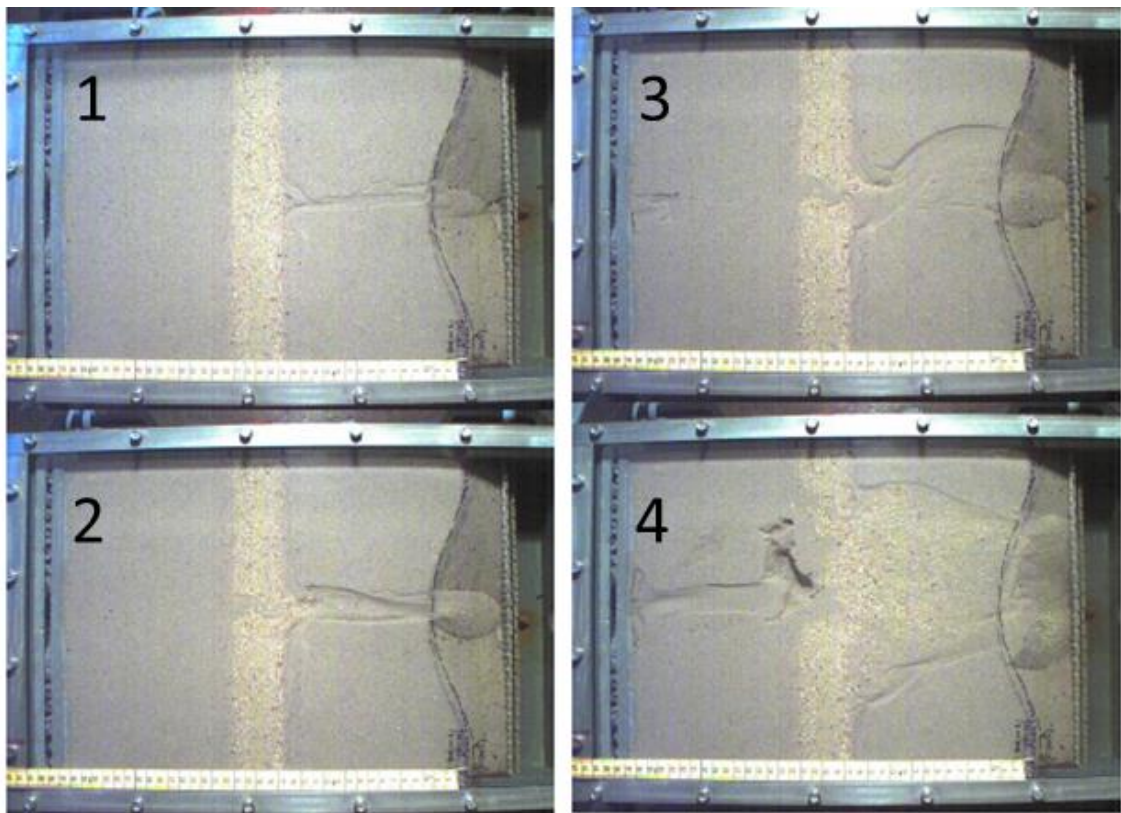
Het is algemeen erkend dat de opbouw van de ondergrond een belangrijke rol speelt bij het wel of niet pipinggevoelig zijn. In de praktijk is deze echter nauwelijks meegenomen in de beoordeling van de waterkeringen. Dit speelt overigens niet alleen in Nederland, een Amerikaans rapport verwoordt het als volgt (Wolff, 2002): “Although the local geology is identified as being of great importance in the development of underseepage problems, in practice it is incorporated into the analysis procedure only in a very indirect and judgmental manner and may often be overshadowed by the number-crunching aspects of the design.”

1.2 Invloed heterogeniteit op piping in het laboratorium

Het feit dat heterogeniteit invloed heeft op het pipingproces blijkt uit een tweetal laboratoriumexperimenten. Negrinelli et al. (2016) lieten zien dat zand opgebouwd uit laagjes van centimeters dik van verschillende korrelgrootten veel minder pipinggevoelig is dan homogeen zand (Figuur 1.2). De heterogene zanden zorgden zelfs voor een factor 3-4 hoger kritiek verval in vergelijking met homogene zanden. Ook Van Beek et al. (2008) experimenteerden met zand van verschillende korrelgrootten (Figuur 1.3). Hun conclusies waren dat zand van verschillende korrelgrootten een hoger kritiek verval heeft, dan het kritiek verval van de grootste fractie alleen. Dit suggereert dat variaties in korrelgrootte in het zand extra sterkte kunnen geven aan afzettingen. Door uit te gaan van homogeen zand wordt dus conservatief gerekend.



Figuur 1.2 Voorbeeld van een gelaagde laboratoriumopstelling voor pipingonderzoek (Negrinelli et al., 2016). De opstelling bestaat uit een PVC bak met afmetingen 48.3x30x10 cm (LxBxD) met daarop een perspex plaat met een rond gat dat dienst als uitstroomopening als een opgebarsten deklaag (rechts), links wordt door een filter een waterdruk aangebracht (om een hoge waterstand in de rivier te simuleren). De donkere en lichte banden geven lagen zand van verschillende korrelgrootten weer. Tussen de uitstroomopening en de filter is een meanderende pipe ontstaan. Deze had een hogere waterdruk nodig om door te groeien dan vergelijkbare experimenten met homogeen zand.



Figuur 1.3 Evolutie van een pipe in laboratoriumexperimenten met heterogeen zand door Van Beek et al. (2008). Het bakje heeft afmetingen van 48.3x30x10 cm (LxBxD) met daarop een perspex plaat. Hier is geen enkele uitstroomopening, maar uitstroming vindt plaats over de gehele breedte van de bak aan de rechterkant. Links wordt door een filter een waterdruk aangebracht (om een hoge waterstand in de rivier te simuleren). In 1) begint de pipe te groeien, maar loopt dood op de lichte band met grover zand. In 2) en 3) breekt de grovere band langzaam door waarna de pipe in 4) over de hele lengte van de proef is gevormd. De lengte van het bakje is ~50 cm.

1.3 Leeswijzer

De opbouw van het rapport is als volgt: eerst wordt de huidige praktijk van de beoordeling van dijken en het verzamelen van parameters voor pipingberekeningen besproken (Hoofdstuk 2). Daarna worden verschillende methoden van korrelgroottemetingen besproken, met specifieke aandacht voor belangrijke aannames die gedaan worden (H3). Dit wordt toegelicht aan de hand van een analyse van een proeftuin bij Westervoort, Gelderland. Daarna wordt de geologische opbouw van pipinggevoelige lagen besproken op vier ruimtelijke schalen, van zeer grootschalig (deltaschaal) naar kleinschalig (millimeterschaal) (H4). Binnen de schaaluitwerkingen worden enkele analyses gedaan om het belang van het denken in verschillende schalen te verduidelijken. In Hoofdstuk 5 wordt de invloed van heterogeniteit op microschaal (millimeter- en centimeterschaal) en de mesoschaal (decimeter tot tientallen meterschaal) toegelicht aan de hand van een onderzoek bij Tuil in de Betuwe. Vervolgens worden de implicaties van heterogeniteit op piping bediscussieerd (H6). Het laatste hoofdstuk geeft aanbevelingen over hoe de invloed van heterogeniteit van rivierafzettingen op de pipinggevoeligheid meegenomen kan worden in de berekeningen.


2 Huidige praktijk

2.1 Toetslagen

De beoordeling van een dijktraject op pipinggevoeligheid gaat in drie toetslagen.

De eerste laag is de **eenvoudige toets**. Hierin wordt gekeken 1) of piping een relevant faalmechanisme is op basis van ondergrondkenmerken, 2) of de duur van een op te treden hoogwater de tijdsduur overschrijdt die nodig is om een volledige pipe te ontwikkelen, en 3) of op basis van de geometrische kenmerken van een dijk en de dikte van de deklaag piping al kan worden uitgesloten.

Als een dijk niet voldoet aan de eisen om al bij de eerste laag te worden goedgekeurd volgt de **gedetailleerde toets**. In deze toets worden de kansen op opbarsten, heave (verticaal zandtransport door de opgebarsten laag) en de aanwezigheid van voldoende kwelweglengte gecontroleerd. In deze stap wordt de rekenregel van Sellmeijer voor het eerst ingezet. Dit kan met behulp van een semi-probabilistische toets per dijkvak, of een probabilistische toets per traject. De waarden voor de stochastische parameters doorlatendheid en d_{70} kunnen voor ieder WBI-SOS segment afgelezen worden uit een tabel met standaardwaarden. Hierbij wordt voor de korrelgrootte een gemiddelde d_{70} gegeven met een variatiecoëfficiënt van 0.12. Als de beheerder de beschikking heeft over relevante gegevens die een aanpassing van de standaardwaarden rechtvaardigen mogen deze worden gebruikt. De ondergrens van de d_{70} wordt gebruikt als rekenwaarde in de semi-probabilistische toets.

In de derde toetslaag, de **toets op maat**, kunnen geavanceerde methodes worden ingezet om de schematisering te verbeteren. Denk hierbij aan het nauwkeuriger bepalen van de relevante korrelgrootte, doorlatendheid, lengte-effectfactor, tijdsafhankelijkheid, ondergrondopbouw en het gebruik van meer geavanceerde berekeningen. Ook in deze toetslaag wordt het rekenmodel van Sellmeijer ingezet, bijvoorbeeld zoals geïmplementeerd in ow.

Bij al deze toetslagen wordt de verwachte variatie in korrelgrootte gebruikt om een (gaussische) verdeling te bepalen, en vervolgens wordt met een ondergrenswaarde gerekend, uitgaande van een homogene ondergrond. Hierbij wordt dus geen rekening gehouden met de bevindingen uit paragraaf 1.2 waarin wordt geconcludeerd dat de aanwezigheid van variatie in de baan van de pipe andere (minder conservatieve) uitkomsten geeft dan homogeen zand.

2.2 Bepaling d_{70} voor toetsing

Voor de bepaling van de benodigde korrelgrootte-informatie voor de bepaling van pipinggevoeligheid wordt in het onderzoeksrapport 'Zandmeevoerende wellen' (Förster, 2012) het volgende gemeld: *"De korrelverdeling is van invloed op de stabiliteit van de korrels in de pipe. Het is daarom van belang de korrelverdeling met name direct onder de slecht doorlatende laag, nabij de uitstroomopening te kennen. De zandmonsters kunnen om deze reden het beste binnendijs, nabij de dijk, worden genomen. Het aantal monsters dat beschikbaar moet zijn, hangt af van de uniformiteit van de zandlaag, in de lengterichting van de dijk. Er moeten in ieder geval voldoende monsters beschikbaar zijn om enig inzicht hierin te krijgen. Daarnaast dienen voldoende monsters beschikbaar te zijn om de karakteristieke waarde van de d_{70} te bepalen. Als absoluut minimum geldt een aantal van 3 monsters. Het verdient echter de voorkeur om per traject met een min of meer uniforme zandlaag tenminste 5 monsters te verzamelen. Indien er minder dan drie monsters beschikbaar zijn kan de*

karakteristieke waarde niet meer worden bepaald. Er kan dan hooguit nog een representatieve waarde worden geschat waarmee een globale berekening kan worden gedaan. Als invoer in de formules van Sellmeijer wordt de karakteristieke [5%] ondergrens van het gemiddelde van de d70 gebruikt.”

Er wordt gesteld dat als de zandlaag (min of meer) uniform is de karakteristieke d70 uit bij voorkeur tenminste 5 monsters bepaald moet worden. Vervolgens wordt de karakteristieke (5%) ondergrens van de gemiddelde d70 bepaald en gebruikt.

In de nieuwe schematiseringshandleiding piping (2017) die voor het WBI 2017 wordt opgesteld, wordt op een andere manier met de d70 van het zand onder de deklaag omgegaan. Hierin is het uitgangspunt dat de parameters k en de d70 in het veld moeilijk te bepalen zijn, en daarom worden aan de Stochastische Ondergrond Schematisatie (SOS) eenheden gerelateerde gemiddelde waarden voor k en d70 beschikbaar gesteld: *“Er wordt uitgegaan van een representatieve waarde. Het effect op piping van de ruimtelijke variatie op kleine en grote lengteschalen is onvoldoende bekend om een voor piping relevante kansverdeling te kunnen vaststellen. Voor de gedetailleerde toets wordt een variatiecoëfficiënt van 12% gehanteerd voor een lognormale kansverdeling”*. De verkregen waarden voor het WBI2017 zijn daarom zogenaamde “equivalente d70” waarden. Dit zijn globaal bepaalde d70 waarden op basis van metingen in de regio en kennis die recht doen aan de onzekerheid bij de bepaling van de korrelgrootteverdeling van een zandpakket en aan de geest van de formule.

Bij deze aanpak is er voor gekozen om af te wijken van de 5% ondergrenswaarde, waarbij een karakteristieke waarde berekend wordt uit meer dan vijf d70-metingen, naar een meer globale aanpak waarbij de equivalente d70 +/- 12% de relevante variatie beschrijft. Voor deze aanpak is gekozen omdat de 5% ondergrenswaarde leidde tot onwaarschijnlijk conservatieve uitkomsten. Bovendien zijn er in de praktijk maar een beperkt aantal monsters beschikbaar, waardoor de 5% ondergrenswaarde vaak slecht te bepalen is. De nieuwe aanpak is bedoeld als tussenstap naar een werkwijze waarbij de natuurlijke heterogeniteit en de afgeleide korrelgroottevariatie op een geologisch onderbouwde en tegelijk praktisch werkbare manier meegenomen worden bij het bepalen van de pipinggevoeligheid.

De spreiding van 12% is gebaseerd op de spreiding van de meest voorkomende (modale) korrelgrootte, die representatief is voor de meest voorkomende korrelgrootte. Deze is vrijwel altijd kleiner dan de spreiding van de d70 in veldmetingen. In de proeftuin bij IJzendoorn werd bijvoorbeeld een spreiding van 26% gevonden op een gemiddelde d70 van 420 µm (De Visser et al., 2016). De reden hiervoor is dat een klein percentage grove korrels een grote invloed op de d70 kan hebben, terwijl deze de modale korrelgrootte niet beïnvloeden.

Overigens wordt niet overal de d70 gebruikt bij pipingberekeningen. In de Verenigde Staten bestaan ook modellen waarbij de d10 wordt gebruikt als effectieve korrelgrootte (USACE, 1956; Glynn and Kuszmaul, 2010). De reden om de d10 te gebruiken is dat er een correlatie is gevonden tussen de horizontale doorlatendheid in een aquifer en de d10. In de rekenregel van Sellmeijer is de doorlatendheid als losse parameter opgenomen, en wordt de d70 direct onder de deklaag gebruikt omdat deze een maat is voor de transporteerbaarheid van korrels in stromend water.

3 Achtergrond bij korrelgroottes

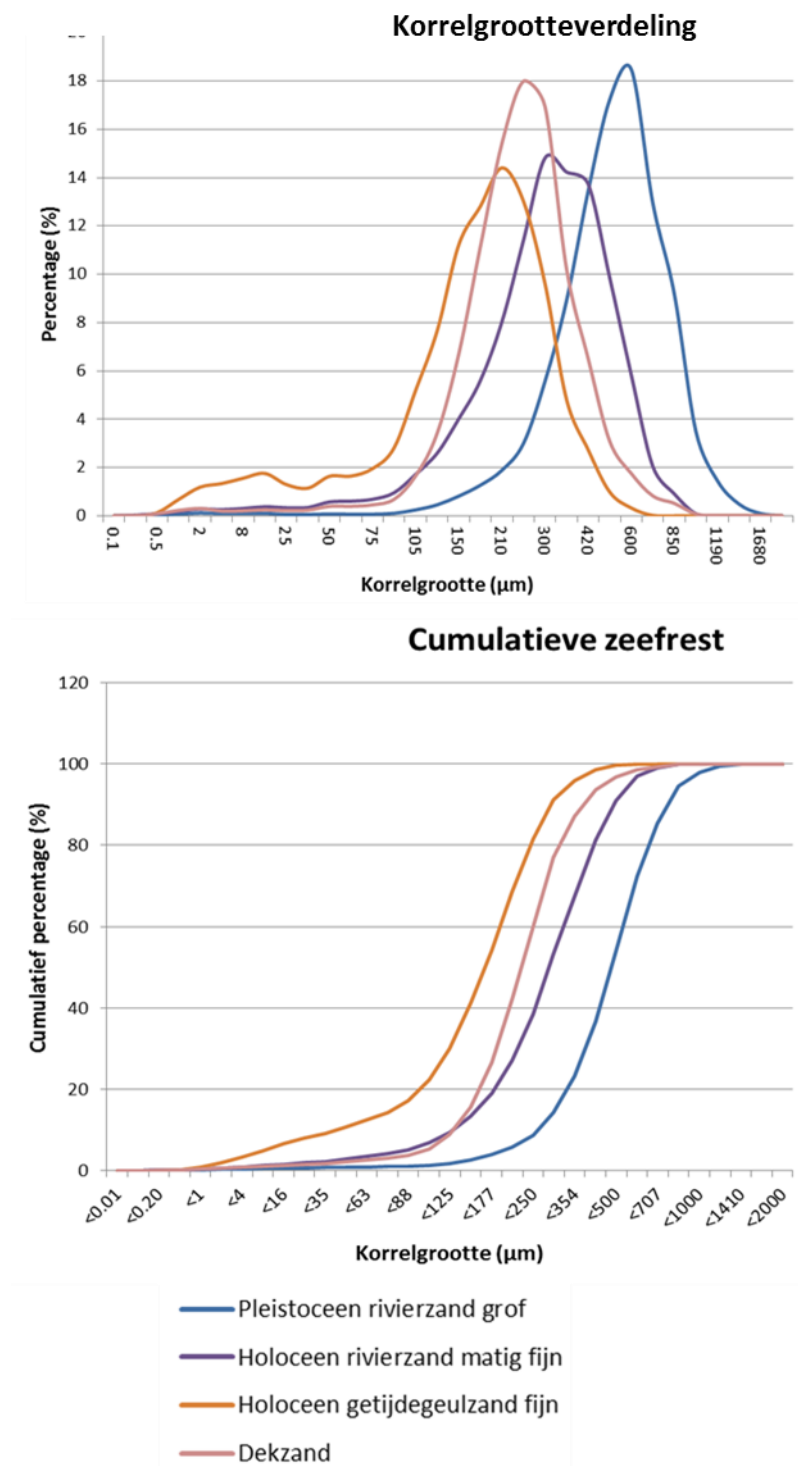
Zandige afzettingen bestaan nooit uit korrels met exact dezelfde afmetingen, maar vertonen altijd een spreiding in de grootte en vorm van de aanwezige korrels. Deze spreiding wordt weergegeven in een korrelgrootteverdeling. Hoe beter gesorteerd de natuurlijke afzetting is, hoe kleiner de spreiding in de gemeten korrelgroottes. De mate van sortering is afhankelijk van het proces van afzetting. Zand in kustduinen die door de wind zijn afgezet is beter gesorteerd dan zand afgezet in rivieren. De variatie wordt niet alleen bepaald door de manier van afzetten en het bronmateriaal, maar ook door de afmeting van het korrelgroottemonster. Een kubieke meter zand uit een natuurlijke afzetting kan een geheel andere spreiding hebben dan een willekeurig gekozen kubieke decimeter of kubieke centimeter binnen deze kubieke meter. Over het algemeen geldt: hoe kleiner het monster, hoe kleiner de spreiding.

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op methoden voor de bepaling van korrelgroottes en de aannames en beperkingen bij deze methoden. Verder wordt uitgewerkt wat dit betekent in de praktijk van veldmetingen. Dit wordt verduidelijkt aan de hand van een vergelijking tussen een korrelgrootteonderzoek met zeefmetingen in een proeftuin bij Westervoort uitgevoerd door Hogeschool Larenstein-Van Hall en Arcadis, en laserdiffractiemetingen door de Vrije Universiteit Amsterdam aan hetzelfde materiaal.

3.1 Korrelgrootteverdeling

Omdat de korrelgroottes binnen een monster verschillen wordt de korrelgrootte van een sedimentmonster vaak weergegeven als een korrelgrootteverdeling. De korrelverdelingen worden vaak op twee manieren weergegeven: 1) als korrelgrootteverdeling en 2) als cumulatieve zeefrest (zeefkromme). Een korrelverdelings-diagram geeft het aandeel korrels voor verschillende grootteklassen weer. Een cumulatieve zeefrest geeft deze waarden weer als cumulatief van 0 naar 100% voor de verschillende grootteklassen. De vorm van de curves is afhankelijk van het aantal korrelklassen dat is bepaald: een hoekige curve is opgebouwd uit weinig korrelgrootteklassen en een geleidelijke curve bestaat uit veel klassen. Een voorbeeld van beide diagrammen voor verschillende Nederlandse afzettingen is weergegeven in Figuur 3.1.

Korrelverdelingen worden meestal bepaald met behulp van zeefopstellingen (met standaardzeven cf. NEN2560; Tabel 1) of met behulp van laser-diffractiemetingen. Het is ook mogelijk om een korrelgrootteverdeling te meten met een opstelling waarbij het monster in een met water gevulde valbuis van enkele meters hoog gestrooid wordt. Door de differentiële aankomsttijd van de korrels beneden te meten kan een korrelgrootteverdeling bepaald worden. Deze techniek wordt echter niet veel gebruikt en in de volgende paragraaf wordt alleen nader ingegaan op de methodiek en de voor- en nadelen van het meten met behulp van zeven of laserdiffractie.



Figuur 3.1 Voorbeelden van korrelverdelingen en cumulatieve zeefresten van typische afzettingen die voorkomen in Nederland. Dekzand is vaak goed gesorteerd en heeft daardoor een relatief smalle korrelgrootteverdeling (steile curve) in vergelijking met rivierzand (minder steile curve). Getijdengeulzand wordt vaak gekenmerkt door een groot aandeel van de fijne fractie; rivierzand vaak juist door een relatief groot aandeel van de grove fractie.

3.2 De d70

Een belangrijke parameter bij de beschrijving van korrelgrootteverdelingen is de d_x (d_{10} , ..., d_{50} , ..., d_{70} , ..., d_{90}). Dit getal is de (berekende) diameter van een zeef waar $x\%$ van het gewicht van een granulair gesteente doorheen valt. De zandmediaan wordt vaak gebruikt als belangrijkste kenmerk van een zandmonster, en is gelijk aan de d_{50} (mediaan) van de zandfractie. De modus van het zand zit hier vaak in buurt. Hiervoor zijn dus eerst alle fracties fijner dan $63\ \mu\text{m}$ verwijderd, en vervolgens is de mediaan bepaald. Om deze reden wordt de zandmediaan ook wel aangeduid als de M63.

Zoals aangegeven in de introductie is de d_{70} is een belangrijke parameter in de rekenregel van Sellmeijer vanwege de aanname dat om voldoende korrels te verplaatsen grotere korrels ook in beweging moeten komen (Sellmeijer, 1988; Van Beek, 2015). Afhankelijk van de sortering van een monster kan de d_{70} afwijken van de zandmediaan. In een goed gesorteerd monster zullen de d_{50} en d_{70} dicht bij elkaar liggen, in een slecht gesorteerd monster zullen ze verder van elkaar af liggen. De mate van sortering heeft invloed op de eigenschappen van een monster: een slecht gesorteerd monster is bijvoorbeeld minder goed doorlatend dan een goed gesorteerd monster met een vergelijkbare d_{50} . Dit betekent dat, afhankelijk van de mate van sortering, monsters met dezelfde d_{70} verschillende hydraulische eigenschappen kunnen hebben.

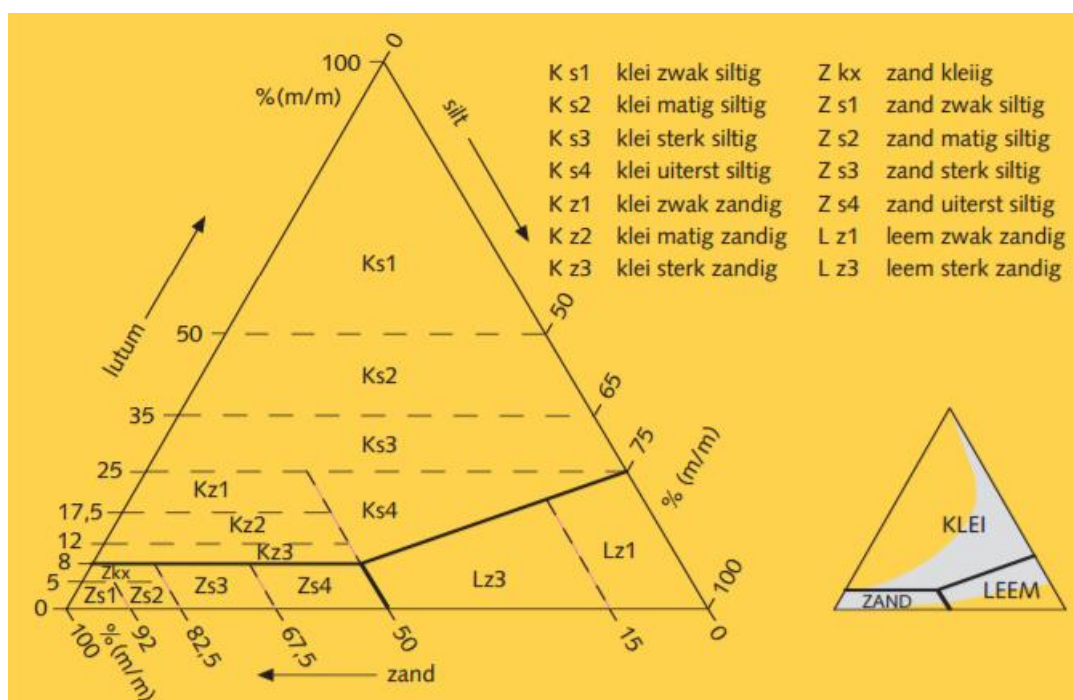
Ook de spreiding van de d_{70} verschilt ten opzichte van de d_{50} . De modale korrelgrootte in rivierafzettingen heeft een typische spreiding van 12% (Schematiseringshandleiding piping 2017), terwijl de d_{70} een veel grotere spreiding kan vertonen tussen monsters uit een bepaald zandpakket. De reden hiervan is dat enkele grove korrels een grote invloed kunnen hebben op de d_{70} waarde van de korrelgrootte. Omdat enkele grove korrels nauwelijks invloed hebben op het pipingproces, is het niet wenselijk om tijdens een beoordeling rekening te houden met de totale spreiding binnen een set d_{70} -bepalingen: dit zou leiden tot een onnodig grote onzekerheid in de uiteindelijke kans op falen. Daarnaast zijn de genomen monsters vaak een mengsel van een dikker zandpakket (meer dan 0.5 m dikte is niet ongewoon), en kunnen de grove korrels dus afkomstig zijn uit een zandpakket dat niet direct onder de deklaag aanwezig is en dus niet van belang voor het doorgroeien van de pipe. Dit heeft er toe geleid dat in het WBI2017 de variatiecoëfficiënt van de modale korrelgrootte in rivierafzettingen, 12%, ook wordt gebruikt als variatiecoëfficiënt van de d_{70} .

3.3 Korrelgrootte-eigenschappen per afzetting

In Figuur 3.1 worden de typische korrelverdelingen van verschillende typen afzettingen in Nederland vergeleken: Holocene- en Pleistocene rivierafzettingen, dekzand en getijdegeulafzettingen. Holocene rivierafzettingen hebben een vergelijkbare vorm van de korrelgrootteverdeling, maar de Pleistocene rivierafzettingen zijn grover. De Holocene rivierafzettingen bevatten daarom ook een groter aandeel van de fractie onder $63\ \mu\text{m}$. Dekzand is duidelijk fijner dan het Holocene rivierzand, maar vertoont een veel nauwere spreiding, en daarom steilere cumulatieve korrelverdeling. De d_{70} van dekzand ligt dus dicht bij de d_{50} dan bij rivierzand. Dit komt omdat het dekzand door de manier van afzetting, door wind, goed in grootte gesorteerd is. De getijdegeulafzettingen zijn in dit voorbeeld nog fijner dan het dekzand, maar laten een flauwere cumulatieve korrelverdelingscurve zien, en bevatten een groter aandeel van de fractie kleiner dan $63\ \mu\text{m}$. Deze fractie wordt gevormd door de silt- en kleifracie die kan bezinken in de getijdegeulen tijdens de kering van het tij. Door dit mengsel van fijne korrels afgezet tijdens lage stroomsnelheden en grovere korrels afgezet tijdens hogere stroomsnelheden zijn getijdeafzettingen slecht gesorteerd.

Deze verschillen in korrelgrootte-eigenschappen van verschillende afzettingstypen betekenen ook dat verschillende afzettingstypen (met dezelfde d_{70}) andere (hydraulische) eigenschappen hebben. Een getijdegeulzand met fijne fractie zal over het algemeen minder goed doorlatend zijn dan een goed gesorteerd dekzand. Pleistocene rivierzandafzettingen zullen over het algemeen grover zijn dan Holocene rivierzandafzettingen en daarmee beter doorlatend. Aan de andere kant zal de grofheid ertoe leiden dat piping minder snel kan optreden omdat grove korrels minder snel worden meegenomen door waterstroming.

In natuurlijke afzettingen kunnen niet alle korrelgroottes zomaar door elkaar voorkomen. Dit wordt geïllustreerd aan de hand van een zand-silt-klei driehoek, die wordt gebruikt om de mogelijke mengverhoudingen van een grondmonster aan te geven (Figuur 3.2). In deze driehoek komen in Nederland alleen de in het grijze gebied van de kleine driehoek aangegeven afzettingen in de natuur voor. Zwak zandige klei (Kz1) komt bijvoorbeeld niet voor in natuurlijke afzettingen in Nederland.



Figuur 3.2 NEN5104 klei (lutum) -silt-zanddriehoek (Van der Meulen et al., 2003). Het grijs gekleurde gebied in de kleine driehoek correspondeert met afzettingen die in de Nederlandse ondergrond aangetroffen worden. Dit betekent bijvoorbeeld dat een natuurlijke afzetting met 50% klei, 50% zand en 0% silt niet zal voorkomen.

3.4 Methoden om de korrelgrootte te bepalen

De korrelgrootte kan op verschillende manieren worden bepaald, en de uiteindelijke korrelgrootteverdeling is afhankelijk van de meetmethode. In deze paragraaf worden twee veel gebruikte meetmethoden vergeleken: zeefmetingen en laser-diffractie metingen. Eerst wordt kort ingegaan op de voorbehandeling van het zand.

3.4.1 Voorbehandeling

De voorbehandeling kan verschillen bij korrelgrootteanalyses, en is afhankelijk van de toepassing van de resultaten van de korrelgrootteanalyse. In analyses naar de herkomst van bepaalde korrelgroottes zijn vaak alleen de resistente mineralen (kwarts, veldspaat, klei) van belang. Hier wordt daarom vaak het kalk (bijv. schelpgruis) en organisch materiaal uit verwijderd. Als het gaat om het gedrag van een grondmonster (zoals bij piping) met een

bepaalde korrelgrootte kan de aanwezigheid van deze secundaire componenten wel van belang zijn.

Ook de zeefmethode kan verschillen. Er kan gekozen worden om eerst de 63 μm fractie met water weg te spoelen en op te vangen. Daarna wordt de zandfractie gedroogd en later gezeefd. Hierin kunnen echter nog kleibrokjes voorkomen. Dit kan voorkomen worden door deze fractie ook nat te zeven, of van tevoren een peptisator (voor het losmaken van kleideeltjes) toe te voegen of het monster in een ultrasoon bad los te trillen.

3.4.2 Zeefmethode

Korrelgrootteanalyse wordt sinds jaar en dag uitgevoerd met zeefmetingen, vaak in combinatie met pipetmetingen voor de fijne fractie. Bij zeefmetingen worden sedimentmonsters door een serie zeven met een afnemende maasgrootte gezeefd. Vervolgens wordt het gewicht van het sediment dat op de verschillende zeven blijft liggen bepaald. De standaardzeven die in Nederland worden gebruikt zijn weergegeven in tabel 1. Er zijn echter ook tussenmaten beschikbaar die kunnen worden toegevoegd, zoals 180 en 355 μm . Die worden echter niet altijd toegepast. Door het werken met standaardzeven ontstaan vrij grote korrelgrootteklassen, Hierdoor wordt de verdeling erg hoekig en moet geïnterpoleerd worden.

Tabel 1. Standaardzeven volgens NEN2560.

diameter (mm)	Zeefnaam
0,063	63 μm
0,125	125 μm
0,250	250 μm
0,500	500 μm
1,0	1 mm
2,0	2 mm
4,0	C4
8,0	C8
16,0	C16

De fijne fractie (<63 μm) kan onder andere bepaald worden door middel van een sedigraaf. Het fijne materiaal dat door uitspoeling door de 63 μm zeef valt wordt opgevangen in een bekersglas. Het monster wordt in suspensie gebracht waarna het langzaam uit kan zinken. Hierin wordt de korrelverdeling bepaald door gebruik te maken van röntgenstraling: door de intensiteit van de doorgelaten röntgenstraling op verschillende plaatsen en op verschillende tijdstippen te meten, wordt een beeld verkregen van de korrelverdeling. De kleinste korreldiameter die op deze manier kan worden gemeten is 0,1 μm . Deze methode maakt indirect gebruik van de Wet van Stokes, die beschrijft hoe snel korrels van een bepaald formaat uitzakken in een vloeistof. Behalve de sedigraaf zijn er ook vergelijkbare methodes die de Wet van Stokes gebruiken voor de bepaling van de korrelverdeling van de fijne fractie.

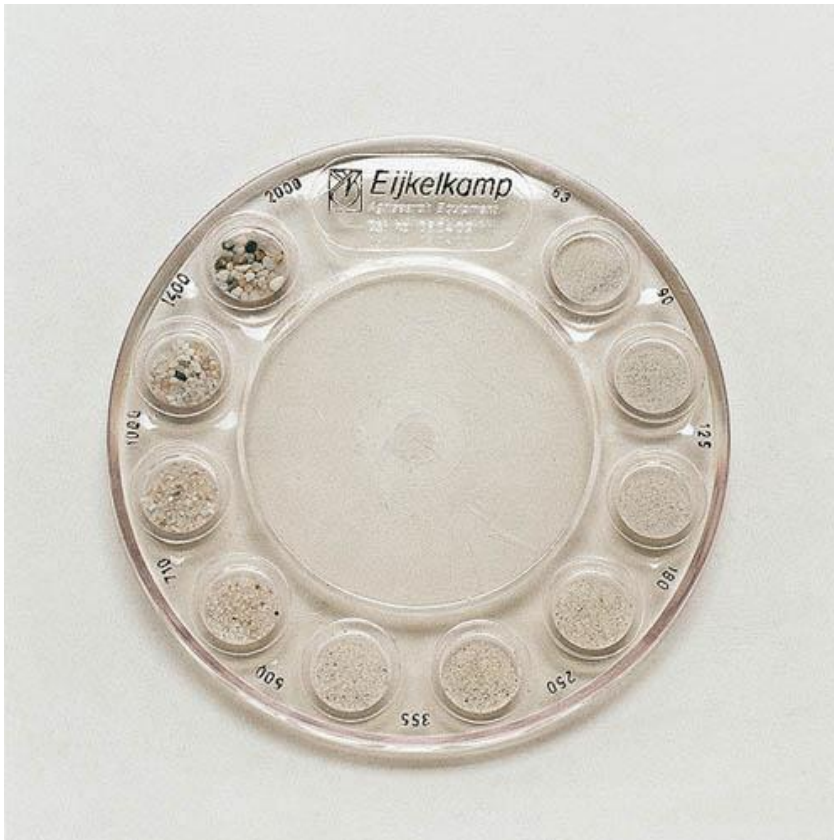
3.4.3 Laser-diffractie

Laser-diffractie meet het verstrooiingspatroon door het met een laserstraal beschijnen van in water gesuspendeerde deeltjes. Het verstrooiingspatroon geeft informatie over de korrelgrootte en de korrelgrootteverdeling. Het resultaat wordt meestal weergegeven in een procentueel aandeel van verschillende klassen in de analyse of als een cumulatieve verdeling van deze klassen. Het aantal klassen waarin de korrelgrootte wordt bepaald is 21 in het zandbereik en 57 inclusief de fractie kleiner dan 63 μm . Bij een vergelijkbare voorbehandeling kenmerken laser-diffractiemetingen zich door een hoge reproduceerbaarheid. Verschillen met de resultaten van andere metingen, zoals pipet- en zeefanalyses, kunnen worden

toegeschreven aan de effecten van korrelvorm (Konert en Vandenberghe, 1997). Ter compensatie van deze verschillen wordt vaak een correctie ingevoerd. Deze correctie geldt vooral voor de fijnste (klei/lutum) fracties, omdat de verwerking van de analyse uitgaat van ronde korrels, en de lutumfractie voornamelijk uit plaatjes bestaat. Ook bij afzettingen met zeer slecht afgerond, hoekig zand kunnen verschillen optreden. Deze verschillen zijn echter klein en zijn niet relevant in vergelijking met de verschillen in d_{70} die kunnen ontstaan door het grote verschil in korrelgrootteklassen tussen de zeefmethode en de laser-diffractie (zie Paragraaf 3.2.5).

3.4.4 Andere methoden

In het veld wordt meestal een zandliniaal gebruikt voor een schatting van de korrelgrootte. Dit is een doorzichtige liniaal met voorbeelden van zandfracties van een bepaalde korrelgrootte die naast het monster kan worden gelegd. In beschrijflaboratoria wordt een vergelijkbare methode gebruikt, maar dan worden de monsters onder een microscoop vergeleken met standaardkorrelgroottes.



Figuur 3.3 Voorbeeld van een zandliniaal (bron: website eijkelkamp-usa.com).

Tegenwoordig zijn methoden die van beeldherkenningstechnieken gebruik maken in opkomst. Een voorbeeld is de "Pixel sizer", die duizenden foto's maakt van korrels in een langsstromend opgelost zandmonster, en daaruit korrelvorm en korrelgrootte bepaalt.

In boorbeschrijvingen volgens de NEN wordt de korrelgrootte van zand in de klassen *uiterst grof*, *zeer grof*, *matig grof*, *matig fijn*, *zeer fijn* en *uiterst fijn* weergegeven (Tabel 2).

Tabel 2. Aanduidingen voor de grofheid van zand cf. NEN 5105 (Van der Meulen et al., 2003).

Klasse	Zandmediaan (μm)	
Zand uiterst grof (ZUG)	≥ 420	< 2000
Zand zeer grof (ZZG)	≥ 300	< 420
Zand matig grof (ZMG)	≥ 210	< 300
Zand matig fijn (ZMF)	≥ 150	< 210
Zand zeer fijn (ZZF)	≥ 105	< 150
Zand uiterst fijn (ZUF)	≥ 63	< 105

3.4.5 Vergelijkingen tussen methoden

Over de verschillen tussen zeefmetingen en laser-diffractiemetingen is veel literatuur verschenen (Konert en Vandenberghe, 1997; Beuselinck et al., 1998; Buurman et al., 2001; Wen et al., 2002; Eshel et al., 2004; Blott en Pye, 2006; Ramaswamy en Rao, 2006; Cheetham et al., 2008; Di Stefano et al., 2010). De meeste studies vinden verschillen in uitkomsten tussen verschillende korrelgrootteklassen (o.a. Buurman et al., 2001), maar ook tussen verschillende afzettingsmilieus (bijvoorbeeld rivieren, getijde of marien). In de meeste vergelijkingsstudies is de zandfractie uit zeefanalyses en laser-diffractieanalyses goed vergelijkbaar.

Vooraf bij fijnere korrelgroottefracties kunnen grotere verschillen optreden tussen de meetmethoden. Meestal gaat een onderschatting van klei samen met een overschatting van de siltfractie. Een gedeeltelijke verklaring hiervoor is de plaatvorm van kleideeltjes, waardoor ze niet reageren als relatief bolvormige kwartskorrels. Veel laser-diffractiestudies passen een correctie toe op de verkregen korrelverdeling om een betere korrelverdeling te verkrijgen.

Het nadeel van zeefanalyses is dat door te werken met standaardzeven vrij grote korrelgrootteklassen ontstaan. Hierdoor wordt de verdeling erg hoekig en moet geïnterpoleerd worden.

De uitkomst van een korrelgrootteanalyse is dus afhankelijk van de methode. Dit betekent niet dat de uitkomst van de ene methode beter is dan de ander. Eshel et al. (2004) verwoordt het op de volgende manier:

“It should be realized that there is no method for PSD (particle size distribution) determination of soil materials that can serve as a universal yardstick, because all available methods, whether classic (e.g., pipette) or new (e.g., laser-diffraction), suffer from some inherent flaws. The choice between methods depends, therefore, on the balance between the pros and cons of each.” Met andere woorden: iedere methode heeft zijn voor- en nadelen. Het is wel belangrijk om de voor- en nadelen van de gebruikte methode te kennen, zodat een afweging gemaakt kan worden van de beste methode voor een bepaalde toepassing. Wanneer de korrelgrootte op gedetailleerd niveau gewenst is, is laser-diffractie de beste keuze. Wanneer het gaat om globale bepalingen van grote monsters zijn zeefmetingen een betere methode.

3.5 Aspecten van korrelgroottemetingen

3.5.1 Monstergrootte

Zoals aangegeven in de introductie is de monstergrootte een belangrijke factor bij de eigenschappen van de korrelverdeling: hoe kleiner het monster, des te kleiner is de spreiding in de korrelgrootte. Methoden waarvoor een grote monsterhoeveelheid (>100 gram) vereist is, zoals zeefanalyses, geven de mogelijkheid om iets over de bulkkorrelgrootteverdeling te zeggen. Dit is vaak de factor die van invloed is op grootschalige processen in de ondergrond, zoals doorlatendheid. Laser-diffractie biedt de kans om op kleinere monsters een analyse te doen. Als de context van de monsters bekend is kunnen deze metingen ook belangrijke

informatie verschaffen, bijvoorbeeld voor een proces als piping dat verondersteld wordt zich op zeer lokale schaal af te spelen (namelijk in de bovenste centimeters onder de deklaag).

3.5.2 d70 van de zandfractie of de volledige korrelverdeling

In de Schematiseringshandleiding piping (2017) voor het WBI staan verspreid door het document twee definities voor de te gebruiken d70 in de rekenregel:

1. De d70 is de zeefmaat [m] die 70% (massa) van de zand- of grindkorrels van de zand- en grindfractie laat passeren. Voor de beoordeling van piping is de d70 van de laag direct onder de toplaag van belang (pagina 43).
2. De d70 is gedefinieerd als de zeefgrootte (in μm) waarbij 70% van de korrels door de zeef valt. De d70 wordt bepaald voor de gehele korrelgrootteverdeling en niet alleen de zandfractie (pagina 112).

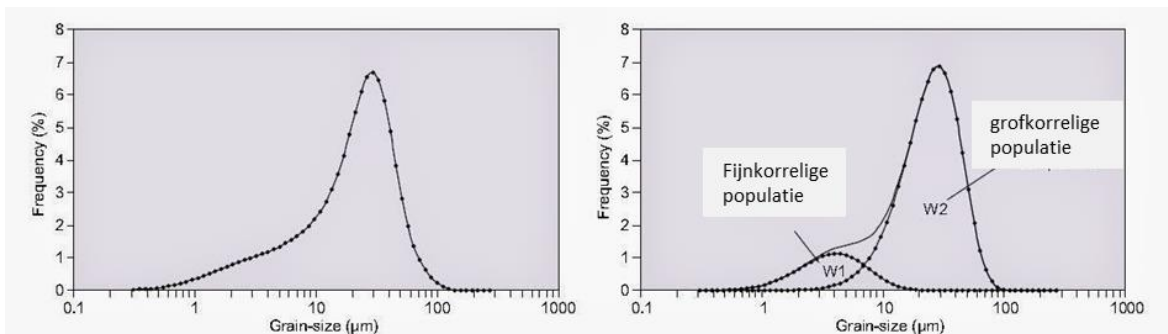
Volgens de eerste definitie gaat het dus om de 70ste percentiel van de **zand- en grindfractie**, en volgens de tweede definitie gaat het om de **volledige korrelverdeling (dus inclusief fijne fractie)**. Deze twee methoden geven een andere waarde voor de d70. Het is dus erg belangrijk om te weten welke d70 als input gevraagd wordt. Omdat het proces zich afspeelt in ongezeefde grond zou het de voorkeur hebben om een korrelgroottegetal van een onbehandeld zandmonster te hebben, dus in dit geval de d70 van de volledige korrelverdeling.

3.5.3 Diepte van het zandmonster

Rivierafzettingen vertonen meestal een fining-upward trend. Dit betekent dat de grofste zanden aan de basis van een zandlichaam te vinden zijn, en aan de top de meest fijne. Bestaande korrelgroottemetingen zijn vaak verdeeld over verschillende diepten en aanzienlijke intervallen van een zandig pakket: mengmonsters van 1 m zijn niet ongevoel. Voor piping is echter alleen de korrelgrootte direct onder de deklaag van belang. Door korrelgroottes van verschillende dieptes te gebruiken in het bepalen van de karakteristieke d70 waarde kan hierdoor een te grove waarde worden geschat. Overigens is de exacte overgang tussen deklaag en zandlichaam in boringen vaak moeilijk te bepalen omdat deze vaak geleidelijk is.

3.5.4 End-member modellering (End-member analyse)

Een korrelverdeling bestaat vaak uit een mengsel van verschillende populaties korrels die door verschillende processen zijn afgezet (Figuur 3.4), of uit verschillende bronnen komen. In een afzetting (bijvoorbeeld een rivierbeddingafzetting op een bepaalde locatie) zullen een beperkt aantal processen zijn opgetreden of sedimentbronnen aanwezig zijn. Door meerdere korrelverdelingen uit een bepaalde afzetting statistisch te analyseren, kunnen de korrelgrootteverdelingen worden ontmengd in een aantal aanwezige korrelgroottepopulaties (e.g. Weltje 1997; Heslop et al. 2007). Dit maakt het mogelijk om te bepalen uit welke processen van afzetting of zandtransport en/of sedimentbronnen een afzetting bestaat. Deze analyse heet end-member modelleren (end-member modelling).

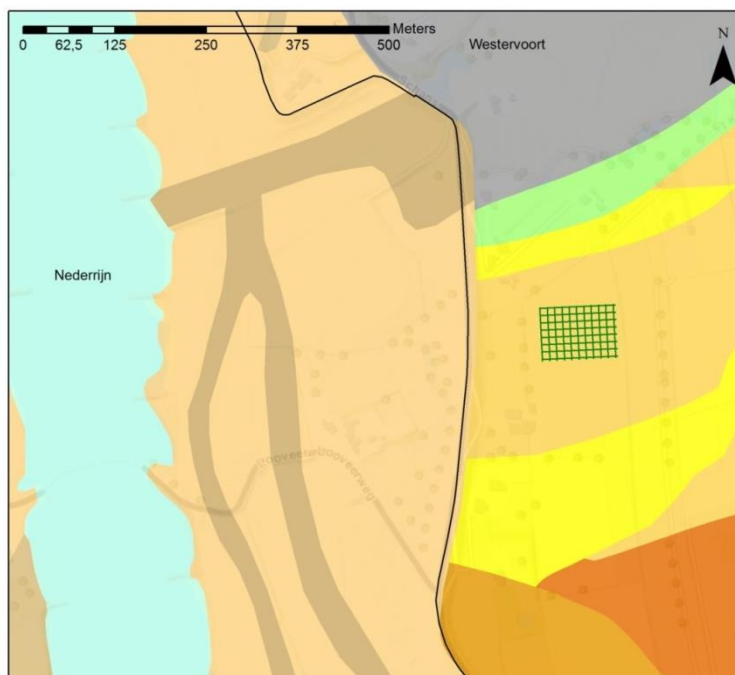


Figuur 3.4 Voorbeeld van een korrelgrootteverdeling (links), die is opgebouwd uit twee populaties: één grofkorrelig en één fijnkorrelig (rechts). Door middel van end-member modellering kunnen de aanwezige populaties in een afzetting worden bepaald, en worden gekoppeld aan een proces van afzetting.

Mogelijk kan door het ontmengen van rivierbeddingafzettingen bepaald worden welke korrelgroottepopulatie altijd voorkomt in een kwelweg. In Hoofdstuk 5 wordt deze hypothese getest door een end-member modellering uit te voeren op rivierbedafzettingen.

3.6 Analyse Westervoort: verschillen tussen laser-diffractie- en zeefmetingen

Om de verschillen en de beperkingen van zeefmetingen en laser-diffractiemetingen tastbaar te maken zijn aan 47 sedimentmonsters zeefmetingen en laser-diffractiemetingen uitgevoerd. De sedimentmonsters zijn verzameld door studenten van de Hogeschool Larenstein – Van Hall bij een proefveld bij Westervoort, Gelderland. Hier zijn de monsters genomen van de top van riviergeulzanden onder de 2 á 3 meter dikke deklaag. Op een selectie van de zandmonsters zijn eerst zeefanalyses uitgevoerd door de studenten. Vervolgens zijn uit het overgebleven zand uit de monsterzakken nieuwe submonsters genomen voor een laser-diffractie analyse aan de Vrije Universiteit Amsterdam. Deze paragraaf is gebaseerd op de resultaten van deze vergelijkingsstudie (Van de Ven, 2016).



Figuur 3.5 Locatie van de proeftuin bij Westervoort, Gelderland, langs het Pannerden Kanaal.

3.6.1 Methode

Voor de zeefanalyse is geen voorbehandeling uitgevoerd. Achtentachtig zandmonsters van enkele honderden grammen zijn over zes zeven met verschillende maasgrootte droog gezeefd. De maasgrootten waren 63 μm , 125 μm , 250 μm , 500 μm , 1000 μm en 2000 μm . Voor elke zeefklasse zijn gewichtsmetingen gedaan om de korrelgrootteverdelingen te bepalen.

In het veld was meer zand verzameld dan gebruikt is voor het zeven en uit 42 zakken is een eetlepel sediment gehaald voor laser-diffractiemetingen. Om te bepalen of binnen de monsterzakken ook variatie in korrelgrootte is ontstaan zijn voor vijf monsterzakken twee monsters voor de laser-diffractiemetingen verzameld.

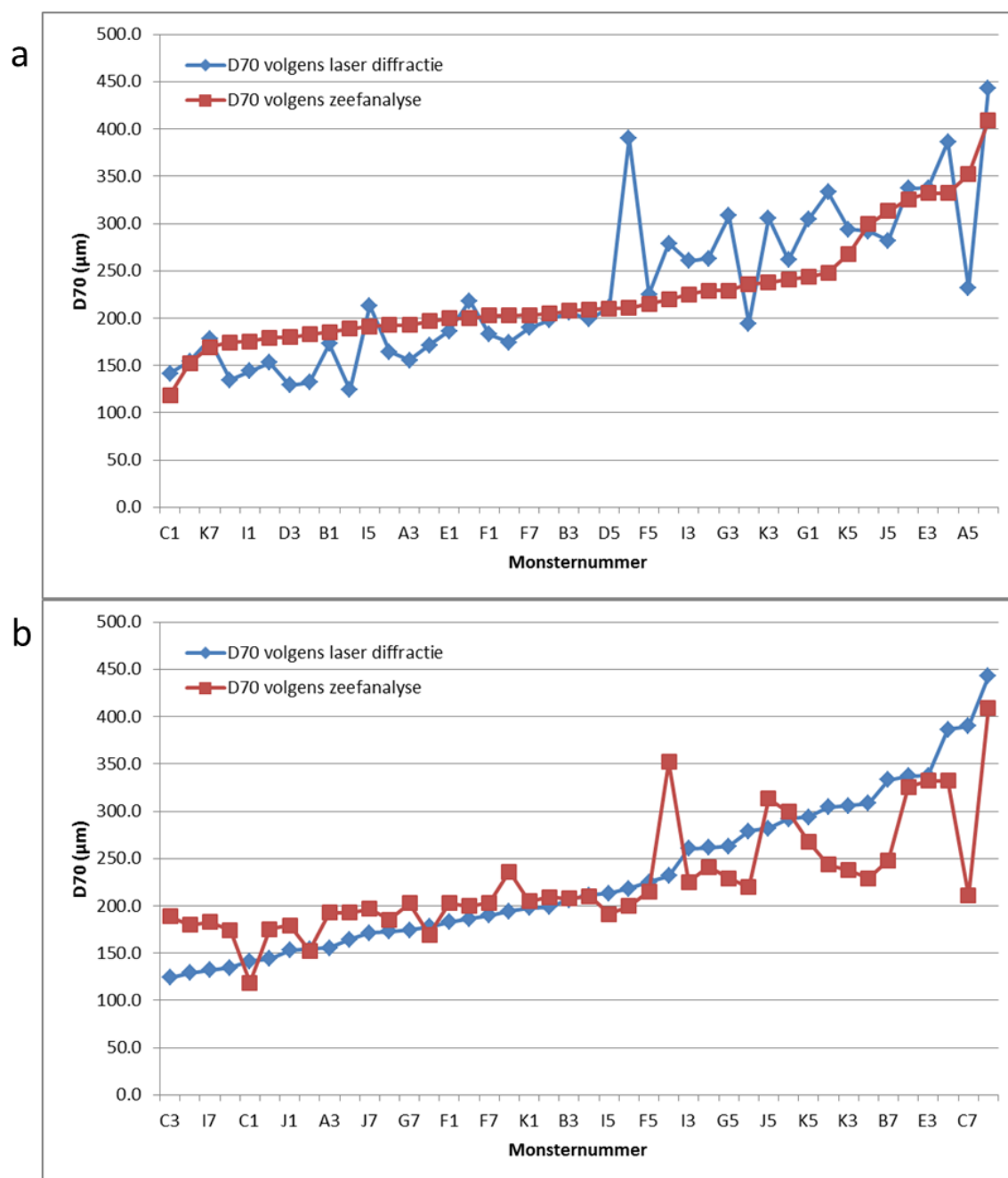
Voor de analyse met een Sympatec HELOS/KR laser-diffractie korrelgroottemeter (VU) zijn de monsters eerst voorbehandeld met waterstofperoxide (5 ml 30% H_2O_2) om het organisch materiaal te verwijderen en vervolgens gekookt met zoutzuur (10 ml 10% HCl) om de kalk te verwijderen. Daarna is peptiseermiddel ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) toegevoegd om de kleideeltjes van elkaar te weken. De analyse resulteerde in 57 korrelgrootteklassen.

3.6.2 Resultaten

Laser-diffractie vs. zeven

Omdat dit document over piping gaat wordt hier ingegaan op de verschillen in de d_{70} waarden tussen de analyses. De d_{70} waarden van de zandfractie van de twee analysemethoden laten verschillen zien tot meer dan 100 μm (Figuur 3.6). De zeefmetingen, geplot van fijn naar grof, laten een grote populatie zandmonsters zien met waarden tussen de 150 en 250 μm , en een kleinere populatie tussen de 300 en 350 μm (Figuur 3.2a). Als de laser-diffractiemetingen van fijn naar grof worden geplot (Figuur 3.2b) laten ze een geleidelijke vergroving zien, en komt de twee populatie (300-350 μm) uit de zeefmetingen niet naar voren.

Opvallend is dat voor de monsters met relatief lage d_{70} waarden (<200 μm) de zeefmetingen meestal een fijnere d_{70} laten zien dan de laser-diffractiemetingen, terwijl voor de hogere d_{70} waarden (>200 μm) de d_{70} van de zeefmetingen juist meestal grover is dan die van de laser-diffractiemetingen.



Figuur 3.6 Verschillen in d70 waarden tussen zeefanalyses en laser-diffractieanalyses op zandmonsters uit Westervoort a) is gesorteerd met de zeefanalyseresultaten van fijn naar grof, en b) is gesorteerd met de laser diffractie resultaten van fijn naar grof.

Het gemiddelde, het minimum en het maximum van de verschillende methoden komt vrij goed overeen (Tabel 3), maar per monsternummer zijn er flinke verschillen (Figuur 3.6).

Discussie

Een deel van de verschillen per monster kan worden verklaard door verschillen in monstergrootte: de zeefmetingen geven een waarde voor veel grotere monsters (~100 g) dan de laser-diffractiemetingen (enkele grammen). In de monsterzakken met enkele honderden

grammen sediment kan ook een sortering zijn opgetreden, waardoor de later genomen monsters voor de laser-diffractiemetingen mogelijk niet representatief zijn. Wel is het opvallend dat in dat geval bijna alle monsters onder de 200 μm een lagere d_{70} waarde hebben bij de laser-diffractiemetingen, en alle monsters boven de 200 μm een hogere waarde hebben voor de diffractiemetingen. Bovendien is het opvallend dat de laser-diffractiemetingen niet twee populaties laten zien.

Los van de variatie in monstergrootte kan het opvallende verschil mogelijk worden verklaard door de gekozen zeefmaten in combinatie met de aanwezige korrelgrootteverdelingen. De mogelijke verklaringen worden in de volgende paragrafen onderzocht.

Tabel 3. Vergelijking tussen de d_{70} waarden van de zeefanalyse en de laser-diffractie analyse.

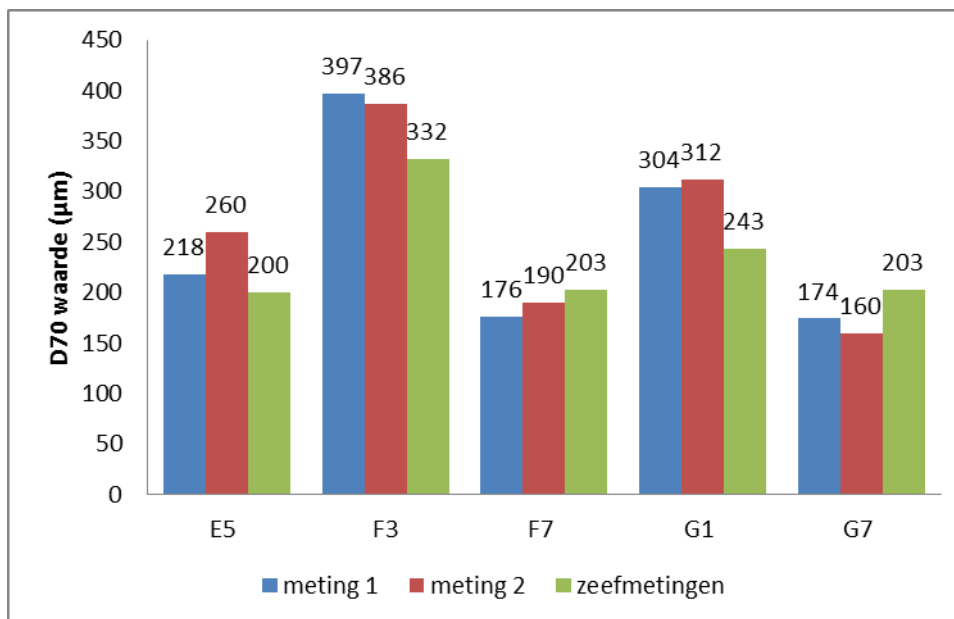
	Zeefanalyse	Laser-diffractie
Gemiddelde (μm)	225.8	230.0
Standaard deviatie (μm)	58.7	80.0
Minimum (μm)	118.4	124.2
Maximum (μm)	408.9	442.7

Verschillen binnen monsterzakken

Om de variatie binnen monsterzakken te onderzoeken zijn voor 5 monsterzakken voor twee monsters per zak laser-diffractie korrelgrootteanalyses uitgevoerd (Tabel 4; Figuur 3.7). De figuur laat zien dat er verschillen tot 40 μm optreden tussen de metingen binnen één monsterzak. Binnen een monsterzak is dus, zoals ook verwacht kan worden, veel variatie aanwezig. Dit onderlinge verschil is in drie van de vijf gevallen kleiner dan het verschil tussen de duplo-metingen en de d_{70} volgend uit de zeefmetingen (Figuur 3.7).

Tabel 4. Vergelijking tussen de d_{50} , $d_{70_{\text{totaal}}}$ en $d_{70_{\text{zand}}}$ duplo metingen met laser-diffractieanalyse uit dezelfde monsterzak.

	d_{50} (μm)	$d_{70_{\text{totaal}}}$ (μm)	$d_{70_{\text{zand}}}$ (μm)
E5 v1	113.7	179.1	217.9
E5 v2	174.2	235.1	259.6
F3 v1	192.6	323.7	396.8
F3 v2	238.8	347.3	386.3
F7 v1	131.1	166.2	175.8
F7 v2	137.1	176.0	189.9
G1 v1	244.2	298.5	304.4
G1 v2	250.4	306.5	311.8
G7 v1	110.9	152.9	174.2
G7 v2	86.9	128.9	159.8

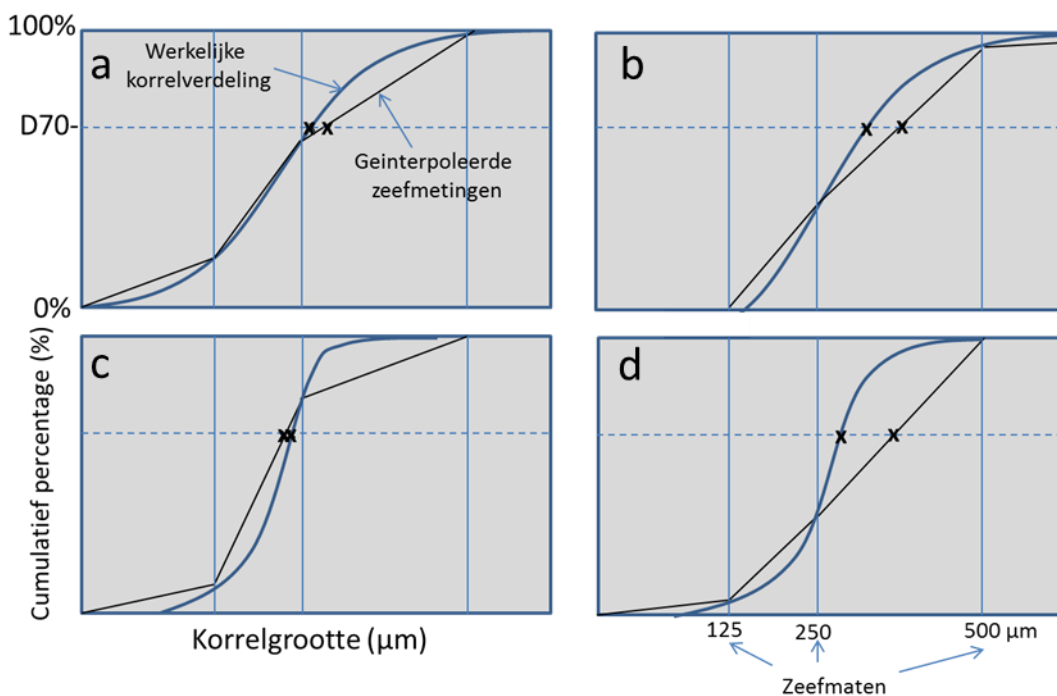


Figuur 3.7 Resultaten van 5 duplo laser-diffractie korrelgrootteanalyses en de gemeten waarde met zeefanalyse.

3.6.3 Zeefmaten / Interpoleren tussen klassen

Om tot een getal als de d_{70} te komen moet altijd worden geïnterpoleerd tussen zeefmaten. Dit kan door middel van een log-normale interpolatie of een lineaire interpolatie. Aangezien korrelverdelingen vaak log-normaal zijn verdeeld, zou een log-normale interpolatie de beste aanpak zijn. Echter, dit blijkt in de praktijk vaak een te gecompliceerde methode met ook zijn aannames. Om die reden wordt meestal lineair geïnterpoleerd om de d_{70} waarde te bepalen.

Als de werkelijke d_{70} in de buurt komt van de zeefmaten zal de zeefmeting een goede schatting geven van de d_{70} . Echter, als deze tussen zeefmaten inzit, dan is de d_{70} uit zeefmetingen minder betrouwbaar. Deze betrouwbaarheid is ook afhankelijk van de vorm (bijvoorbeeld steilheid) van de korrelverdeling. Dit is geïllustreerd in Figuur 3.8. Hierin zijn vier voorbeelden van realistische korrelverdelingen weergegeven, samen met de bijbehorende zeefuitkomsten en de lineaire interpolatie daartussen. Ook is de waarde van de d_{70} uit de werkelijke korrelverdeling, en de waarde gebaseerd op de geïnterpoleerde zeefanalyses weergegeven met kruisjes. Uit de figuur blijkt dat de vorm van de korrelverdeling ten opzichte van de zeefmaten grote invloed heeft op de waarde van de geïnterpoleerde d_{70} . Deze kan zowel groter als kleiner zijn dan de werkelijke d_{70} .



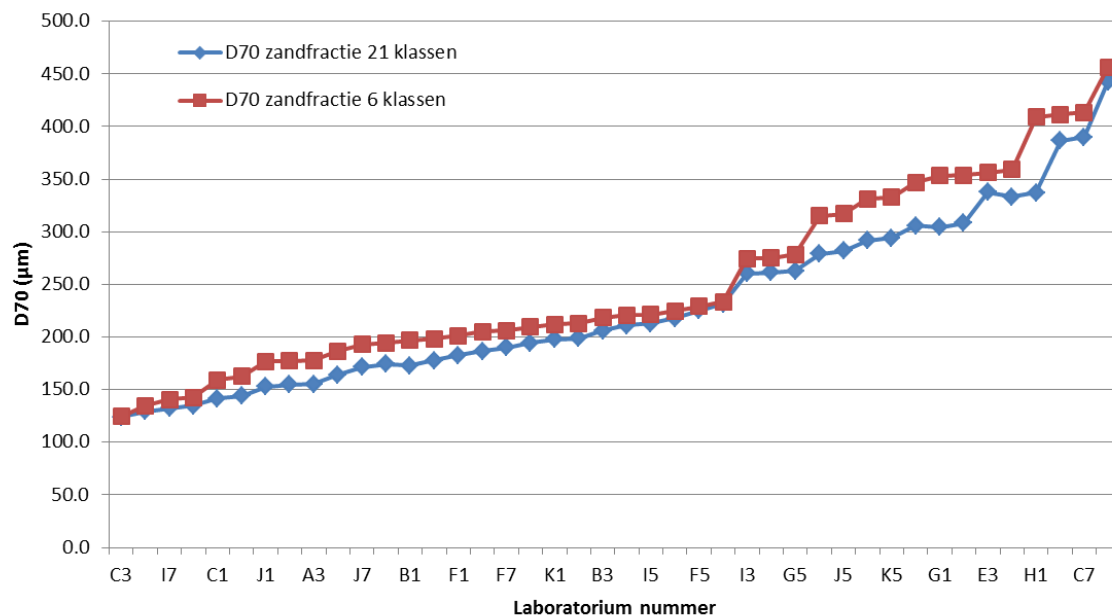
Figuur 3.8 Vier voorbeelden van virtuele realistische korrelverdelingen (representatief voor een laser diffractiemeting; blauwe lijn), de bijbehorende virtuele zeefkromme op basis van enkele metingen (representatief voor een zeefmeting; hoekige zwarte lijn) en de geïnterpoleerde d70 (kruisjes) op basis van een interpolatie tussen deze metingen (zwarte lijn).

Om de invloed van de zeefmaten te onderzoeken voor de analyses bij Westervoort zijn de 21 zandfractieklassen van de laser-diffractiemetingen omgerekend naar hoe de korrelverdeling zou zijn als er met 6 zeefmaten werd gewerkt (63 µm, 125 µm, 250 µm, 500 µm, 1000 µm en 2000 µm).

De resultaten laten zien dat de d70 in 6 klassen altijd hoger is dan de originele d70 gebaseerd op meer klassen (Figuur 3.9). Bij de zeefmaten (125 µm en 250 µm) convergeren de d70 waarden, maar ertussen verschillen op. Gemiddeld zijn deze verschillen ongeveer 20 µm, maar het maximale verschil bij dezelfde meting bedraagt meer dan 70 µm.

De verschillen die ontstaan door interpolatie naar het 70 percentiel tussen de zeefklassen zijn volledig afhankelijk van de vorm van de werkelijke korrelgrootteverdeling en de gekozen zeefmaten. Dit kan dus per locatie sterk verschillen. Uit de analyse bij Westervoort komt naar voren dat vooral de grove fractie uit geïnterpoleerde zeefanalyses in werkelijkheid fijner is dan de zeefmetingen aangeven. Ook de fijnere fracties lijken in werkelijkheid fijner dan uit zeefmetingen naar voren komt, zij het in mindere mate. Bij andere zeefmaten (of typische korrelgrootteverdelingen) had dit anders uit kunnen pakken.

D70 waarden: 21 klassen vs. 6 klassen



	21 klassen	6 klassen
Gemiddelde	230 µm	251 µm
Minimum	124 µm	124 µm
Maximum	443 µm	456 µm

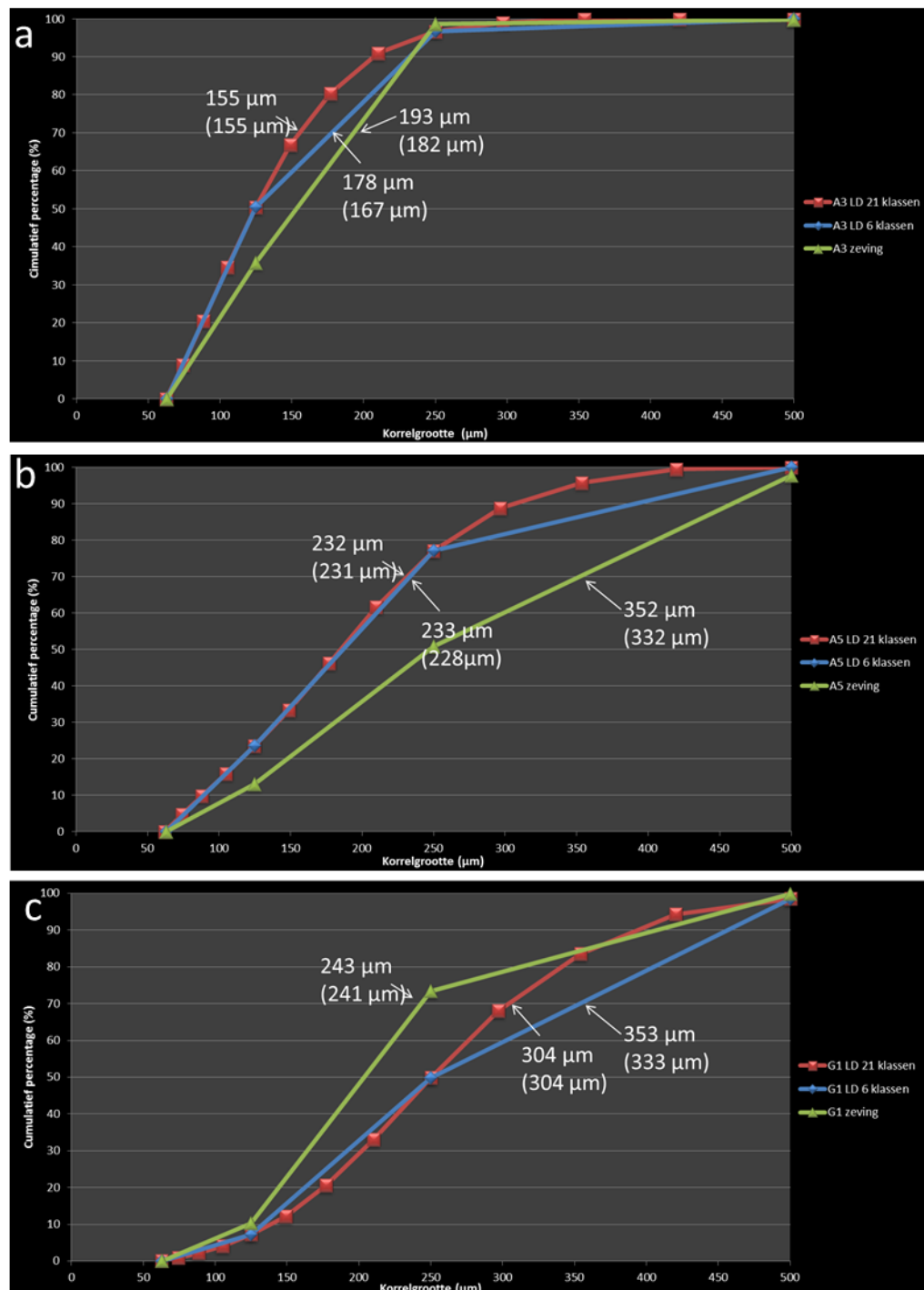
Figuur 3.9 Vergelijking van d70-waarden van korrelgrootteverdelingen met laser-diffractie bij Westervoort. De oorspronkelijke 21 klassen zijn vertaald naar wat de d70 zou zijn als de 6 standaard zeefklassen zouden zijn gebruikt.

Het effect van het gebruik van 6 klassen (zowel zeef- als laser-diffractiemeting) of 21 klassen (alleen laser-diffractiemeting) op de bepaling van de uiteindelijk bepaalde d70 kan het best geïllustreerd worden door enkele monsters afzonderlijk te bekijken (Figuur 3.10). De verschillende monsters vertonen grote verschillen in de d70-waarde van de zandfractie. Bij de monsters waar de d70 midden tussen zeefklassen valt speelt de interpolatie een grote rol, aangezien de sprongen erg groot en erg hoekig zijn ten opzichte van een natuurlijke s-vormige korrelverdeling. De laser-diffractiemeting met 6 klassen heeft in deze voorbeelden aanzienlijk hogere d70-waarden dan bij 21 klassen (Figuur 3.8b en d). Als de d70-waarde in de buurt van zeefgrens valt, zijn de verschillen aanzienlijk kleiner tussen de laser-diffractiemetingen met 6 of 21 klassen (Figuur 3.8a en c).

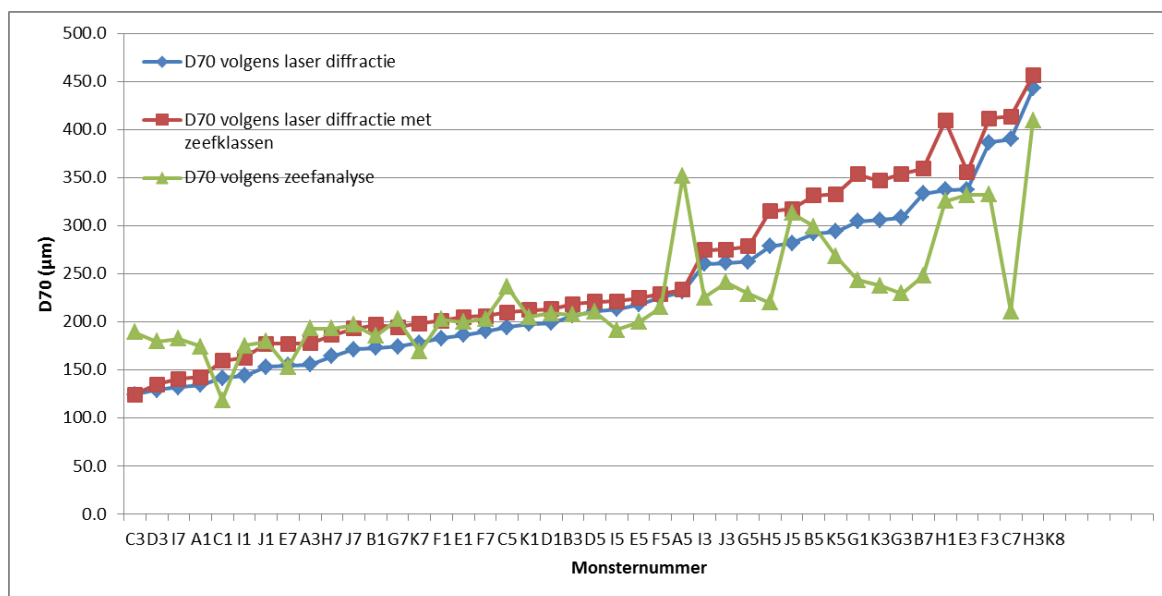
De waarden uit de zeefmetingen komen nog steeds niet overeen met de korrelgrootteverdeling van de in 6 klassen ingedeelde laser-diffractiemetingen en de d70-waarden. Ook komen de d70-waarden niet beter overeen als de laser-diffractiemetingen ingedeeld worden in 6 klassen. (Figuur 3.11). Dit kan de volgende oorzaken hebben:

- De meetmethoden hebben een systematische fout ten opzichte van elkaar: er wordt iets anders gemeten.
- Het verschil tussen volume % (laser-diffractie) en massa % (zeefmetingen) heeft invloed op de korrelverdeling.
- De voorbehandeling bij de laser-diffractiemethode heeft grote invloed op de korrelgrootteverdeling.
- De laser-diffractiemetingen zijn op kleinere monsters uitgevoerd en hebben daardoor een andere korrelverdeling (bijvoorbeeld een kleinere spreiding en/of door voorsortering in de zak een niet-representatief sub-monster).

De eerste optie is niet waarschijnlijk gezien de vele vergelijkingsstudies die zijn gedaan tussen zeefmetingen en laser-diffractiemetingen, en de correctie die bij laserdiffractie uitgevoerd gedaan op korrelvorm. Ook de tweede optie is onwaarschijnlijk aangezien de dichtheden van de aanwezige mineralen in het zand erg dicht bij elkaar liggen, en daarom zullen volume % en massa % vergelijkbaar zijn. De voorbehandeling zal een invloed gehad kunnen hebben, maar de monsters bestaan voor het overgrote gedeelte uit kwarts- en veldspaatzand, dus deze invloed is waarschijnlijk klein. De vierde optie, de variatie in monstergrootte en sortering in de monsterzakken is wordt daarom de meest waarschijnlijke oorzaak geacht voor de verschillen.



Figuur 3.10 Voorbeelden van individuele monsters met de resultaten van de zeefmetingen, de laser-diffractiemetingen en de fictieve zeefmeting in 6 klassen op basis van de laser-diffractieresultaten: a) monster A3, b) monster A5 en c) monster G1. Deze monsters zijn willekeurig gekozen. De aangegeven korrelgroottes komen uit een lineaire interpolatie zoals vaak toegepast. De waarden tussen haakjes zijn bepaald uit een log-normale interpolatie.



Figuur 3.11 Vergelijking tussen de d70 waarden uit de laser-diffractieanalyses, de virtuele zeefmetingen op basis van de laser-diffractieanalyses en volgens zeefanalyses.

3.7 Conclusies

Dé d70 van een bepaalde afzetting bestaat niet. Dit komt voornamelijk omdat zandige afzettingen sterk variëren over korte afstanden, daar komen we in de volgende hoofdstukken op terug. Daarnaast is zelfs het bepalen van dé d70 van één zandmonster bijna onmogelijk, en worden voor hetzelfde monster verschillen van meer dan 100 µm gemeten. Dit komt omdat verschillende meetmethoden net iets anders meten. Het grootste verschil lijkt echter te komen uit de hoeveelheid korrelgrootteklassen (en dus zeefmaten) waartussen moet worden geïnterpoleerd. Bij het bepalen van korrelgroottes om de pipinggevoeligheid te bepalen is het dus belangrijk om met een groot aantal zeven te werken, om de sprong in korrelgroottes goed te kunnen bepalen en daarmee een nauwkeuriger d70. Daarnaast heeft de monstergrootte een significant effect op de korrelgrootte. Voorbehandeling speelt in de onderzochte sedimenten waarschijnlijk geen rol, maar kan in gebieden waar veel schelpgruis aanwezig is wel degelijk effect hebben.

Deze resultaten illustreren dat een d70 meting van een zandmonster uit het veld niet op tien micrometer nauwkeurig zou moeten worden gebruikt in formules. Er zijn teveel onzekerheden over de nauwkeurigheid en representativiteit van de waarde. Bij het gebruik van de rekenregel van Sellmeijer om piping te bepalen wordt wel uitgegaan van een nauwkeurige bepaling van de d70.



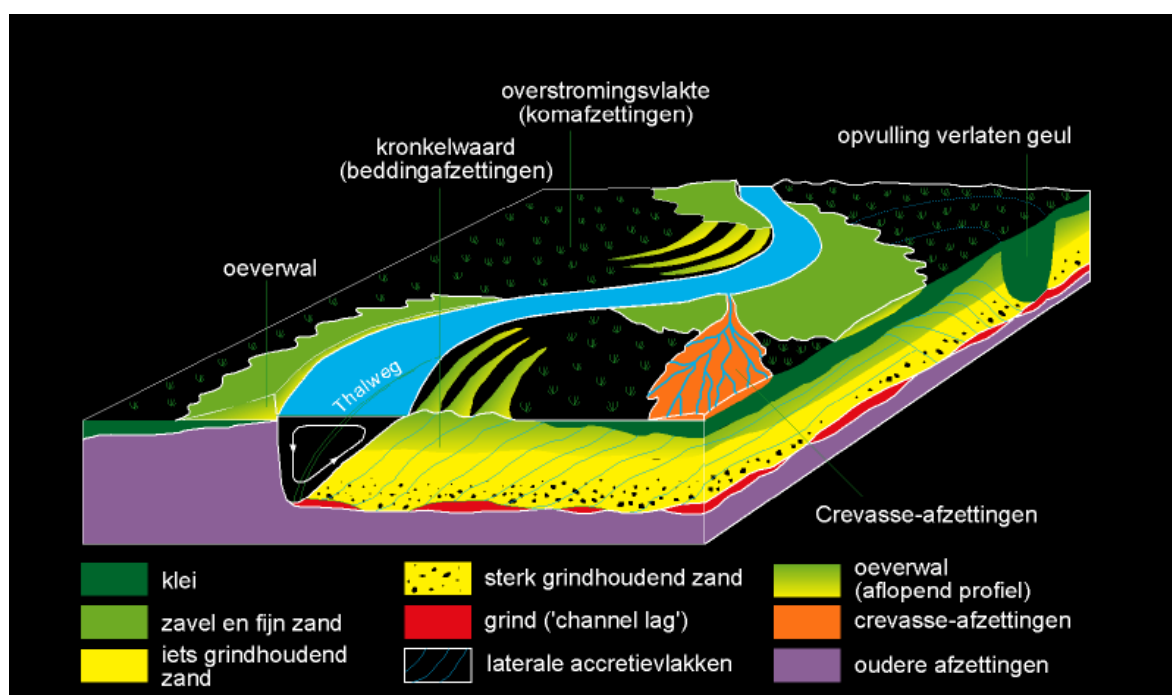
4 Heterogeniteit in rivierafzettingen

De kans op dijkfalen door piping wordt in sterke mate beïnvloed door de opbouw van de ondergrond. Het is dus nodig deze opbouw, en de variatie daarin, te kennen en deze kennis onderdeel te laten zijn van de beoordeling van de kans op falen. Op dit moment gebeurt dit op een zeer schematische manier die geen recht doet aan de grote invloed van de variatie op de kans van falen. Een van de redenen hiervoor is dat het niet eenvoudig is om de natuurlijke heterogeniteit op een praktische manier te karakteriseren of te bepalen in het veld. Om dit wel te doen is een van de uitdagingen voor de komende jaren. Een goed startpunt hierbij is een beschrijving, dit hoofdstuk, van de te verwachten opbouw van rivierafzettingen en welke heterogeniteit aanwezig is op verschillende schaalniveaus. In het navolgende hoofdstuk wordt besproken hoe deze variatie meegenomen zou kunnen worden tijdens de beoordeling van de kans op falen.

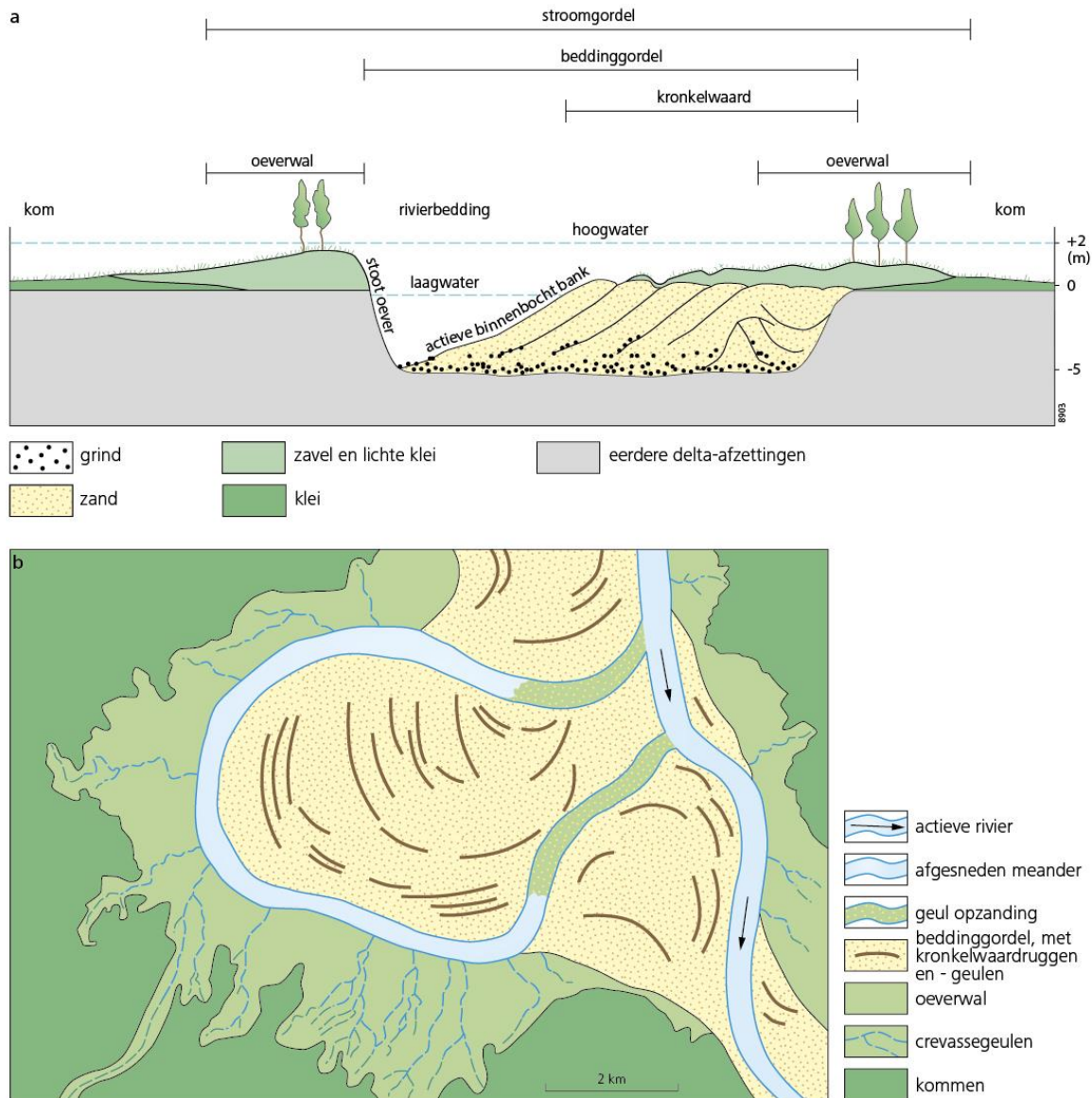
4.1 Algemeen

Rivierafzettingen bestaan uit de volgende hoofdcomponenten (Berendsen, 2004; Figuur 4.1; Figuur 4.2):

- Stroomgordelafzettingen:
 - Beddingafzettingen (geulafzettingen): voornamelijk zand en grind
 - Restgeulafzettingen: voornamelijk klei
 - Oeverafzettingen die op oevers worden afgezet bij overstromingen: fijn zand, zavel (zandige klei) en lichte klei
- Crevasseafzettingen (oeverwaldoorbraakafzettingen): zand, zavel en lichte klei
- Komafzettingen: zware en lichte klei
- Dijkdoorbraakafzettingen: zavel en zandige klei



Figuur 4.1 Blokdiagram van een meanderende laaglandrivier (Berendsen, 2004)



Figuur 4.2 a) Schematische doorsnede van een actieve rivierbedding en de bijbehorende termen en grondsoort. b) Geomorfologische overzichtskaart van een meanderende rivier. (Stouthamer et al., 2015).

Deze componenten zijn zowel aanwezig rond huidige rivieren als in oude begraven stroomgordels. De zandlaag onder de dijk waarin piping kan optreden bestaat uit zandige beddingafzettingen afgezet door de huidige rivier, of uit oude begraven beddingafzettingen die in contact staan met de huidige, actieve rivier (kortsluiting). Hoe ouder de stroomgordels, hoe dieper ze liggen en hoe dikker de deklaag is bovenop de beddingafzettingen.

Het niveau waarin piping plaatsvindt langs rivieren bevindt zich rond de overgang tussen de beddingafzettingen en de deklaag. Deze deklaag bestaat meestal uit oeverafzettingen of uit oeverafzettingen onder komafzettingen. Op de heterogeniteit in de beddingafzettingen en rondom deze overgang zal in dit hoofdstuk de nadruk liggen. De heterogeniteit wordt op vier schalen beschreven: microschaal, mesoschaal, macroschaal, en deltaschaal (Figuur 4.3). De dimensies die bij deze schalen horen zijn als volgt:

- Microschaal (millimeters tot centimeters).
- Mesoschaal (decimeters tot 10 meter).
- Macroschaal (tientallen meters tot honderden meters).
- Deltaschaal (tientallen kilometers)

Micro- en mesoschaal heterogeniteit zijn altijd aanwezig op de schaal van een dijklichaam of kwelweg, maar niet te *karteren*. Met andere woorden: aan de hand van meerdere boringen kan niet worden voorspeld wat de eigenschappen zullen zijn van het sediment tussen de boringen in. Als echter bekend is hoe het sediment is afgezet, kan de verwachte variatie wel *gekaracteriseerd* worden. Dus meerdere boringen en sedimentmonsters in combinatie (bijvoorbeeld een proeftuin) met geologische kennis van de verschillende afzettingmilieus kunnen wel een beeld van de variatie in relevante eigenschappen van het sediment geven.

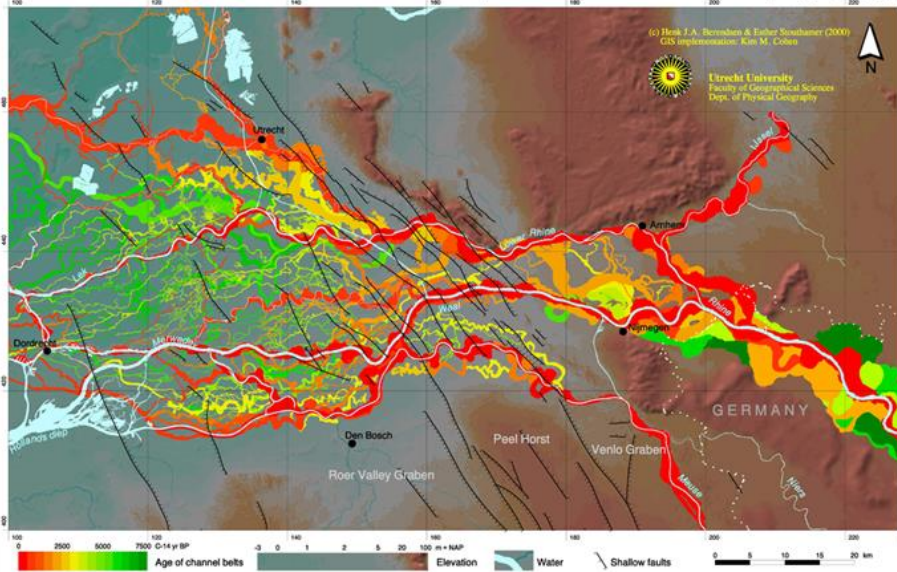
De macroschaal is beter karteerbaar en heeft een vergelijkbare schaal als dijklichamen, kwelweglengtes en berm lengtes. Ook om de heterogeniteit op deze schaal te beschrijven is zowel geologische kennis als grondonderzoek noodzakelijk.

Deltaschaal heterogeniteit speelt zich af op de schaal van riviersystemen. Hierbij moet gedacht worden aan verandering van patronen van rivierafzettingen binnen de delta. Deze veranderingen leiden tot grotere of kleinere gevoeligheid voor het optreden van piping.

Voor iedere schaal wordt gekeken naar andere *afzettingseenheden* die een bepaalde hiërarchie hebben in grootte en in afzettingstijd (Figuur 4.4). Dit zijn eenheden waar een zandlichaam uit is opgebouwd. Ieder van deze eenheden heeft een andere tijdschaal van vorming. Zo kan een mm dik laagje worden gevormd in seconden, maar duurt de opbouw van een kronkelwaard eeuwen tot millennia. In deze eeuwen tot millennia zorgen talloze hoog- en laagwater perioden voor regelmatige erosie en sedimentatie, totdat uiteindelijk de huidige kronkelwaard is gevormd. Dit zorgt voor de heterogeniteit in deze beddingafzettingen.

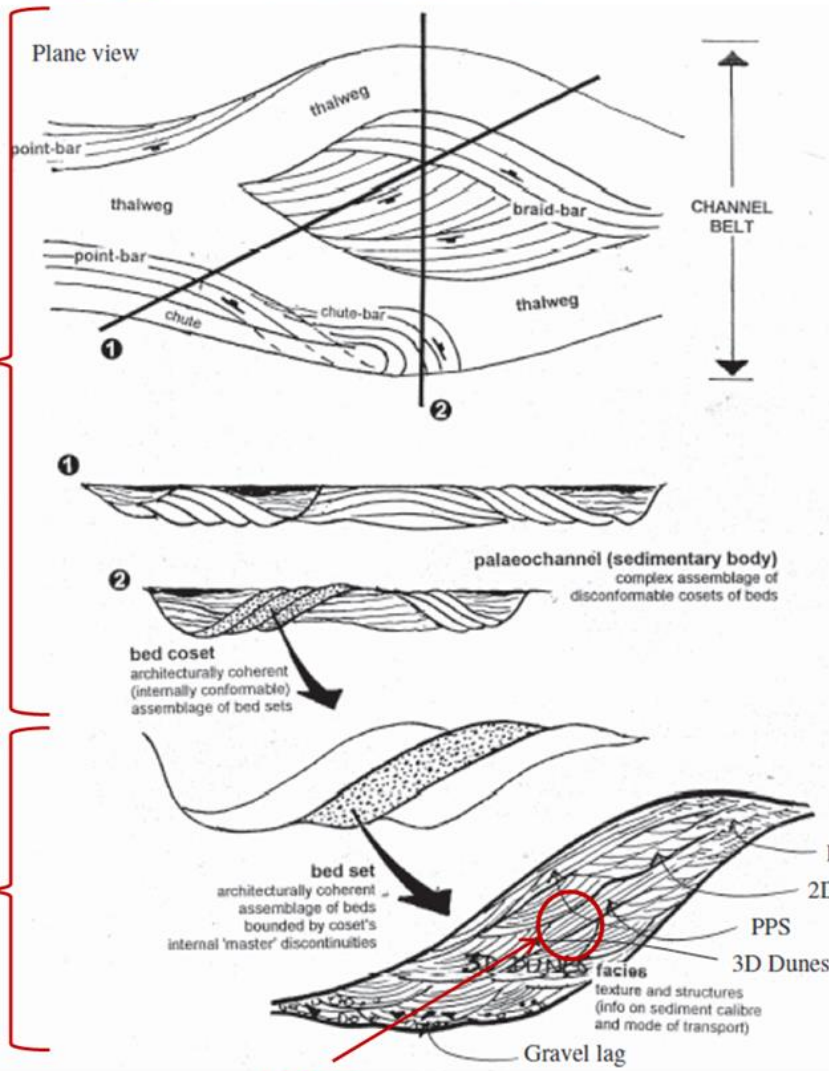
Dit hoofdstuk is opgebouwd van grof (deltaschaal) naar fijn (microschaal).

Age of Holocene channel belts in the Rhine-Meuse delta, the Netherlands



Delta

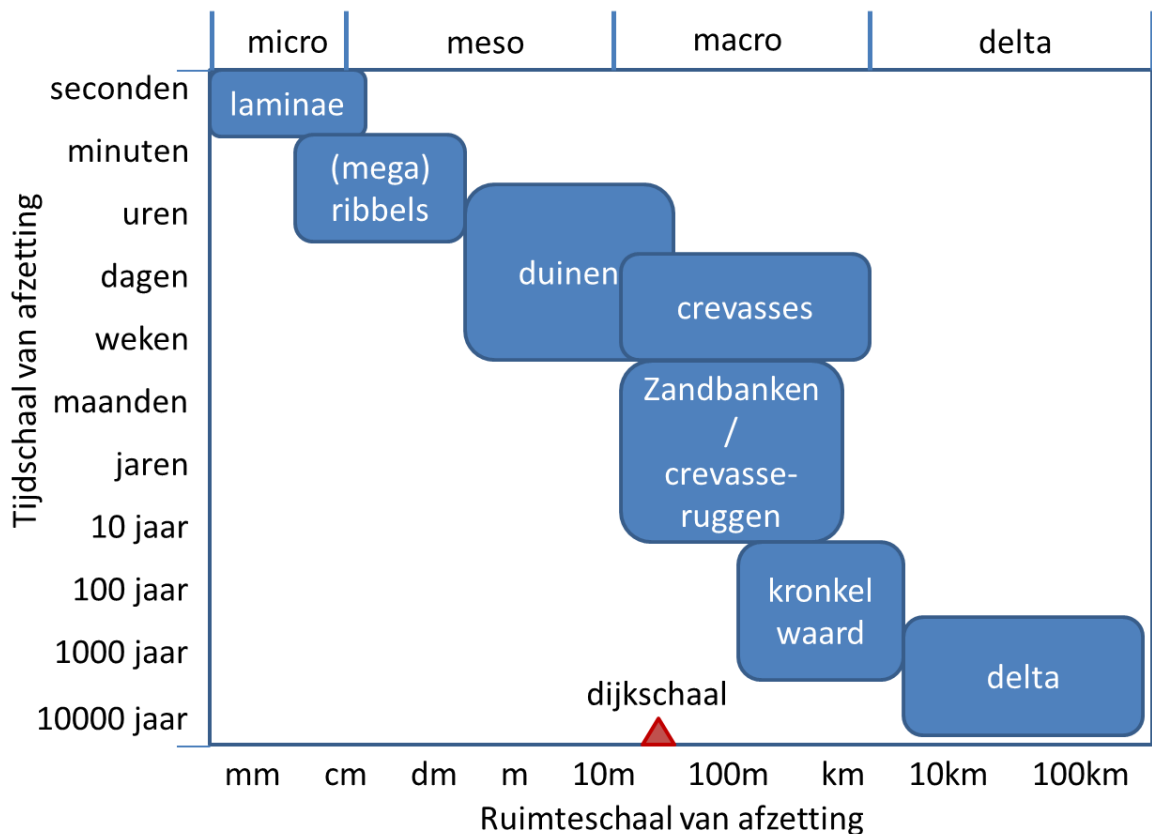
Macro



Meso

Micro

Figuur 4.3 Verschillende schalen van heterogeniteit, hier geïllustreerd aan de hand van vlechtende rivierafzettingen (kaart komt uit Berendsen en Stouthamer (2000); de schematische doorsneden uit Ekeland (2007); Bridge, (1993)). De deltaschaal gaat over veranderingen binnen de delta, zoals geulbreedte en omringend sediment. Hier getoond is de zandbanenkaart die oude beddinggordels in de ondergrond van Nederland weergeeft. De macroschaal omvat heterogeniteit op de schaal van de stroomgordel (Engels: channel belt) van de rivier (bovenste deelfiguur). Over de stroomgordel geven 2 dwarsprofielen (1 en 2) de opbouw van de stroomgordel weer. Deze laten zien dat de stroomgordel bestaat uit afzonderlijke beddingafzettingen (middelste 2 deelfiguren), met daarbinnen verschillende series van zandlagen waaruit de geulafzettingen zijn opgebouwd (Mesoschaal: onderste 2 deelfiguren). Met deze schaal wordt de architectuur van een geullichaam aangeduid. In het onderste deelfiguur worden tevens de sedimentaire structuren getoond die binnen een zandlaag aanwezig zijn. De afzonderlijke laagjes binnen deze structuren vormen de heterogeniteit op microschaal.



Figuur 4.4 Diagram waarin de ruimteschaal van afzettingseenheden wordt gekoppeld aan tijdschalen van afzettingen. De balk boven het diagram geeft een indicatie van de schaal waarin afzettingseenheden vallen. Hierbij geldt dat een ribbel bestaat uit laminae, en zandbanken bestaan uit duinen en ribbels, kronkelwaarden bestaan uit zandbanken etc. De rode driehoek geeft de schaal van een dijk weer.

4.2 Deltaschaal

De macroschaal kijkt naar variatie op het niveau van afzonderlijke stroomgordels. Wordt er uitgezoomd naar deltaschaal, dan spelen niet alleen lokale verschillen in afzettingscondities een rol bij het ontstaan van heterogene afzettingen, maar ook regionale factoren als zeespiegelveranderingen, de riviergradiënt, veranderingen in de afvoer of in de sedimentlast.

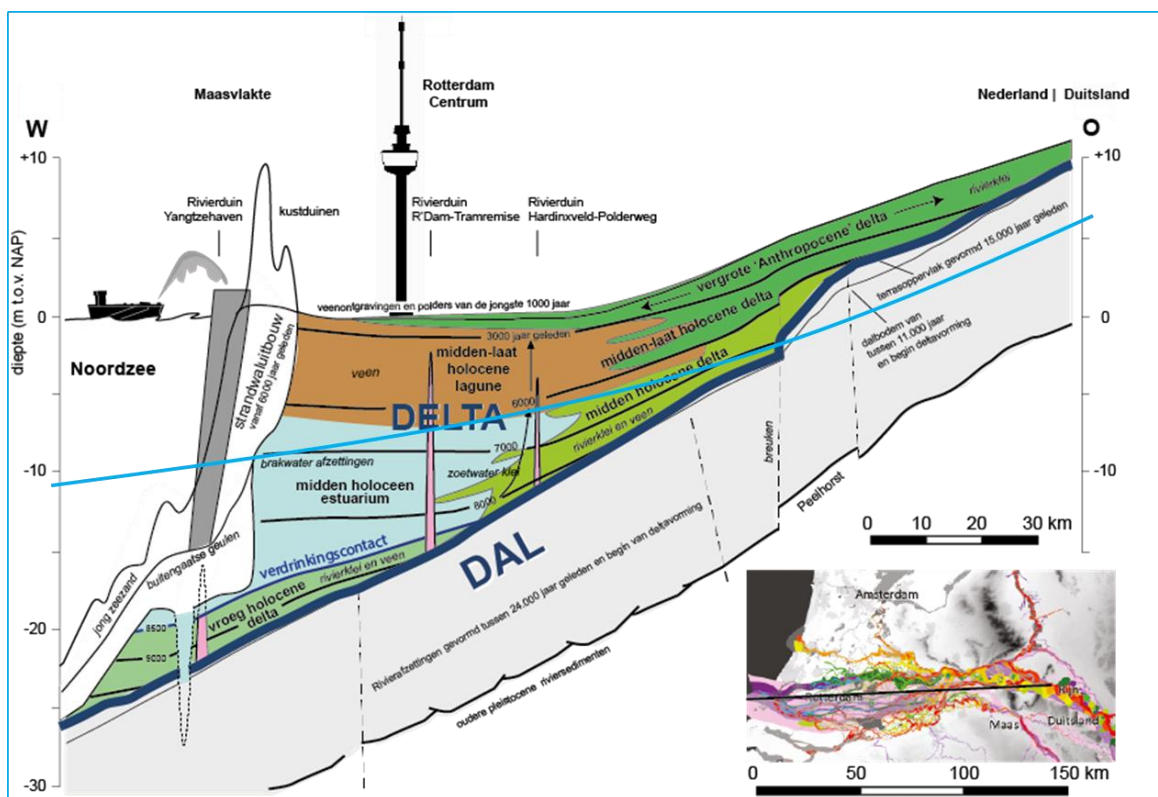
Processen op deze schaal bepalen bijvoorbeeld de breedte en dikte van riviergeulen, maar ook de gemiddelde korrelgrootte van het gehele pakket aan beddingafzettingen en de variatie in korrelgrootte. Deze processen kunnen van belang zijn voor het opstellen van vuistregels voor pipingberekeningen in verschillende gebieden in Nederland.

De delta-afzettingen in Nederland zijn wigvormig, gevormd in het Holoceen en liggen in het Rivierengebied voornamelijk op een vrij continu van oost naar west hellend pakket van grove zanden van Pleistocene ouderdom (Figuur 4.5; Cohen en Hijma, 2013). De wig wordt dikker naar het westen tot ongeveer 20 m onder de duinen. In het oosten van het rivierengebied is de dikte enkele meters, en rond Tiel ongeveer 7 meter. Deze delta-afzettingen bestaan uit klei en veen doorsneden door zandige afzettingen van vroegere rivieren in zowel stroomgordels als in estuaria. De ligging van een groot deel van de voormalige stroomgordels is redelijk bekend, en weergegeven in de bekende “zandbanenkaart” (kaart in Figuur 4.3; Cohen et al., 2012).

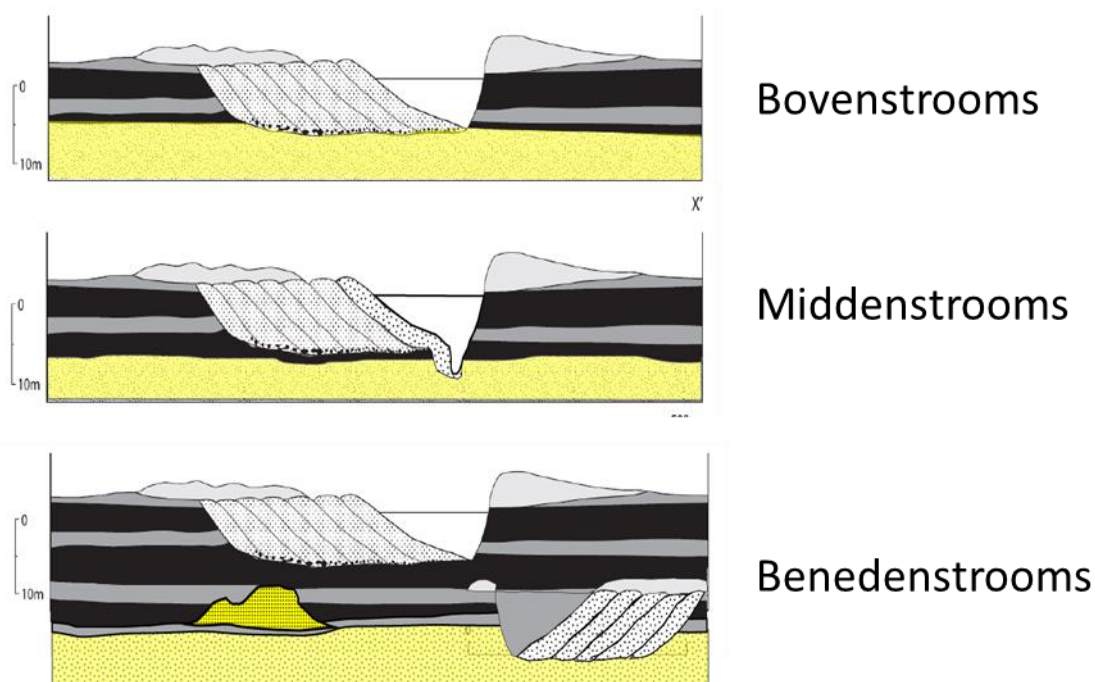
4.2.1 Kortsluiting

Omdat het pakket delta-afzettingen in het oosten dun is, maken de Holocene beddingafzettingen, zowel de recente als de oudere, altijd contact met het Pleistocene zand (Figuur 4.6). Hierdoor is er connectiviteit (“kortsluiting”) tussen het water in de rivier en het grondwater in deze Pleistocene zandlaag die meestal het eerste watervoerende pakket vormt. Er zijn een aantal breuken in de ondergrond aanwezig die zorgen voor sprongen in de hoogteligging van dit Pleistocene zand. Richting het westen neemt de dikte van het pakket delta-afzettingen toe. Aangezien een beddingafzetting in Nederland tussen 5 en 9 meter dik is, en gemiddeld 6,7 meter (Gouw en Berendsen, 2007), komt het in westelijke richting steeds vaker voor dat de beddingafzettingen niet in contact staan met het Pleistocene zand en “zweeft” in de kleiige en venige deltasedimenten (Figuur 4.6). Alleen in gevallen waar zand van rivierduinen of oudere stroomgordels wordt aangesneden ontstaat kortsluiting met andere zandige pakketten.

De huidige en oude beddinggordels laten ook een afname zien van de breedte richting de kust. De reden hiervoor is dat de oevers minder goed erodeerbaar zijn, waardoor de geulen minder kunnen migreren binnen de stroomgordel (Gouw, 1997). De stroomgordel kan hierdoor minder breed worden. Daarnaast neemt het aantal geulen richting het westen sterk toe door vertakkingen binnen de delta. De gemiddelde afvoer per geul neemt daardoor af en daarmee ook de breedte. De minder erodeerbare oevers leiden er ook toe dat benedenstrooms minder uitgebreide kronkelwaardsystemen voorkomen, en dat de beddinggordels voornamelijk bestaan uit smalle zandbanken die aanlanden langs de oevers.



Figuur 4.5 Schematische geologische Oost-West doorsnede van de Rijn-Maasdelta met tijdlijnen van grondwaterspiegelstijging en verdrinking (naar Cohen en Hijma, 2003). De blauwe lijn geeft een geschatte diepte aan van de basis van de stroomgordelafzettingen.



Figuur 4.6 Positie van een huidige stroomgordel in omringende delta-afzettingen en Pleistoceen zand (geel). In het bovenstroomse profiel maakt de huidige stroomgordel kortsluiting met de onderliggende Pleistocene zand. In het middenstroomse gedeelte gebeurt dit lokaal en in het benedenstroomse gedeelte nauwelijks, tenzij een oudere stroomgordel wordt aangesneden of een zandige rivierduinafzetting (fel geel)

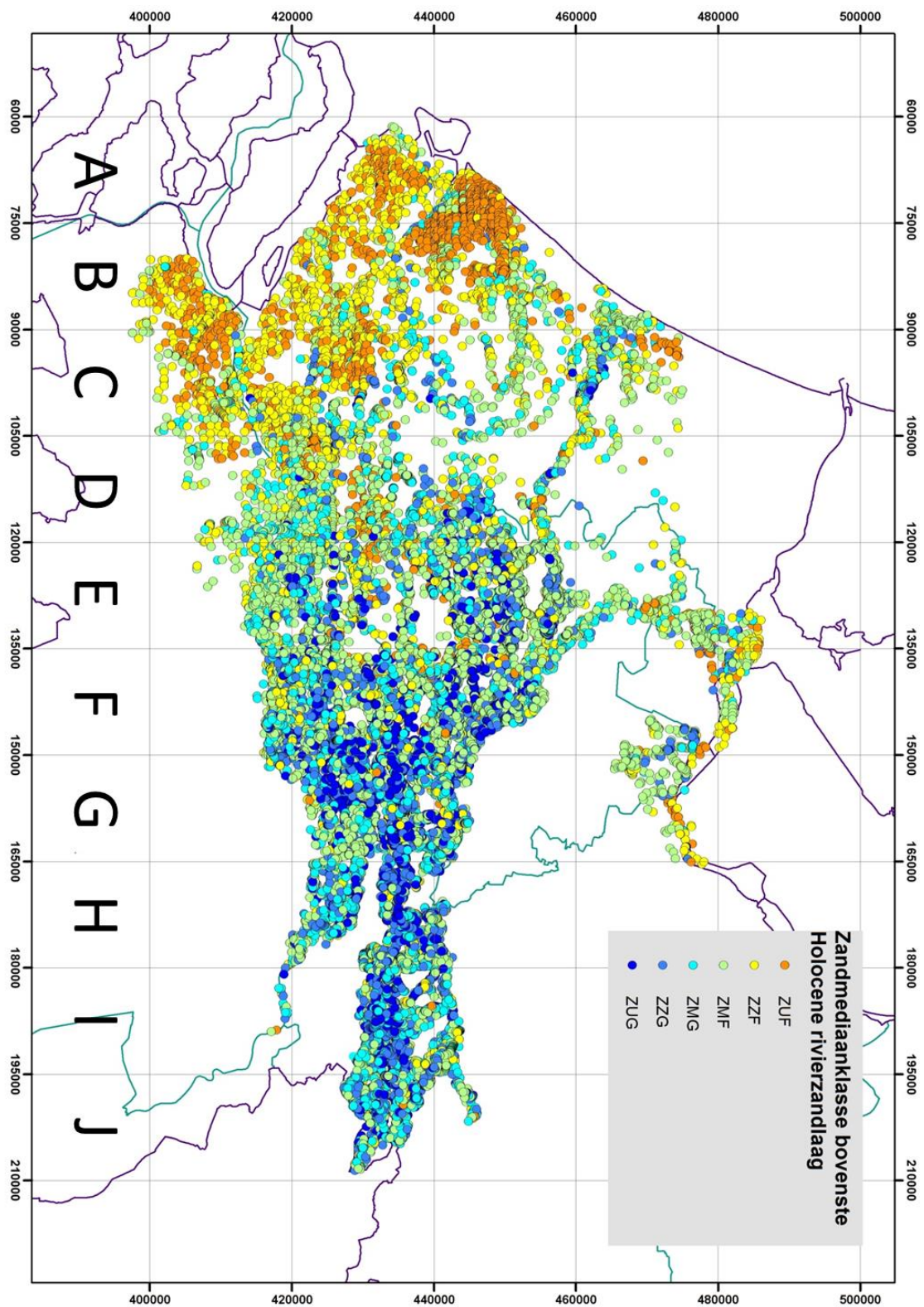
4.2.2 Downstream fining

Naast het feit dat richting het westen de kans kleiner wordt dat een beddingafzetting in contact staat met het Pleistocene zand, worden de beddingafzettingen in stroomafwaartse richting gemiddeld ook fijner (z.g. "downstream fining"; e.g. Frings, 2007). De oorzaken hiervoor zijn abrasie van korrels en selectieve sedimentatie: door afname in stroomsnelheden richting de kust komen niet meer alle korrels in beweging waardoor de grove korrels relatief achterblijven. Echter, de korrelgrootte wordt ook bepaald door (lokale) sedimentbronnen die worden aangetapt door de rivier, bijvoorbeeld doordat een dieperliggend zandpakket aangesneden wordt of door aanvoer vanuit een zijtak. Vooral in de bovenstroomse delta komt daardoor relatief veel grof zand voor in de Holocene beddingafzettingen, omdat het grovere Pleistocene zand aangesneden wordt. In het benedenstroomse gedeelte kunnen alleen lokale aansnijdingen van rivierduinen en oude (diepere) stroomgordelafzettingen voor nieuwe sedimentbronnen zorgen buiten het sediment dat door de rivier wordt aangevoerd.

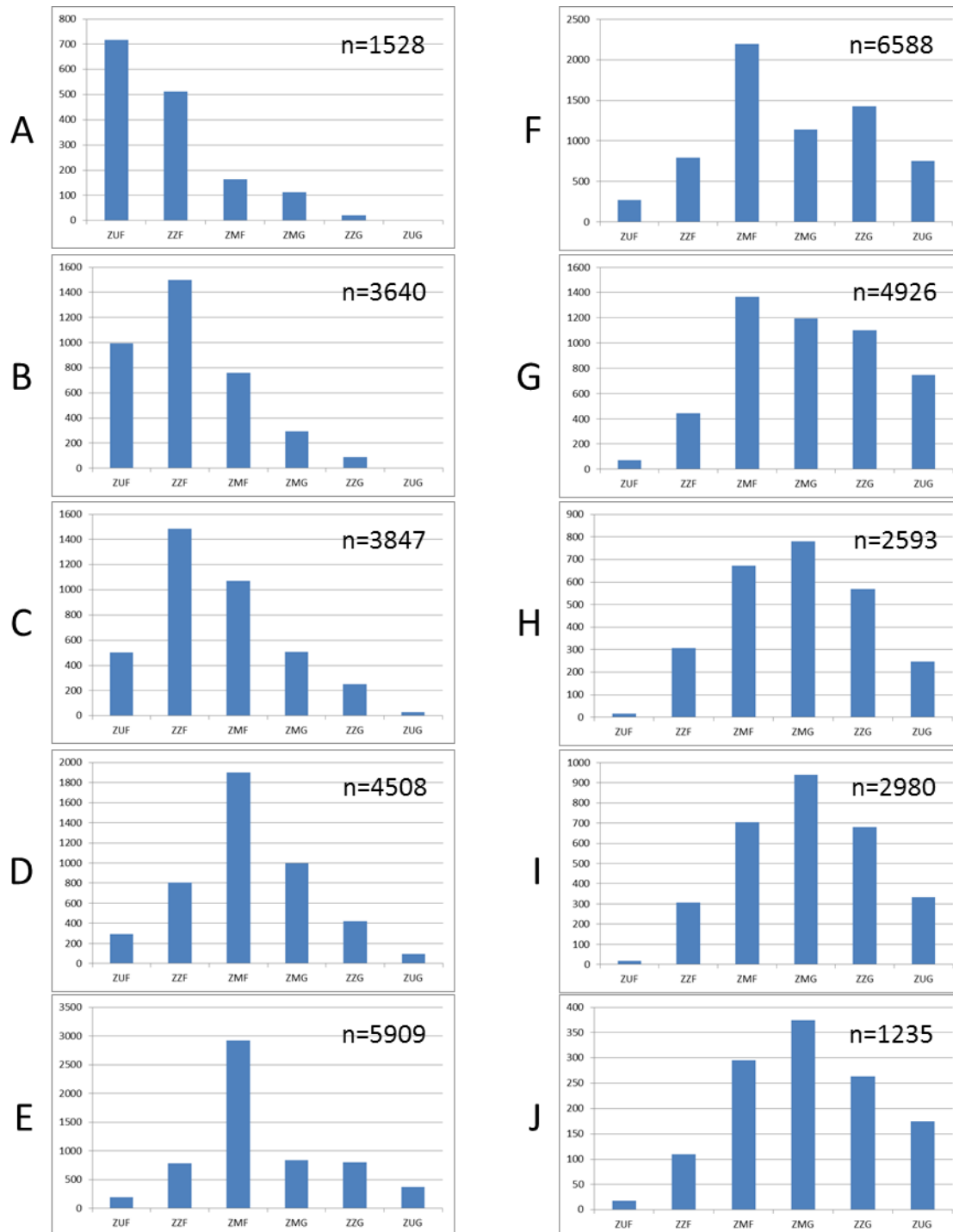
Om de downstream fining in het rivierengebied inzichtelijk te maken hebben we een analyse uitgevoerd van alle beschreven boringen in dit gebied. Voor deze boringen is de beschreven zandmediaanklasse omgezet naar de gebruikelijke NEN klassen gegeven in Tabel 2. Vervolgens is de waarde geplot van het hoogst liggende zandinterval dat behoort tot een Holocene fluviatiele (of getijdegeul)-formatie. Het verkregen beeld laat duidelijk een downstream-fining trend zien richting de kust (Figuur 4.7). De analyse bevat ongetwijfeld verkeerd beschreven boringen en onjuist toegekende zandmediaanklassen. De hoeveelheid data en de overduidelijke trend geeft echter vertrouwen in de uitkomst.

In Figuur 4.8 worden de zandmediaanklassen getoond per 15 km vak langs de as van de delta. Ook hier is de downstream fining trend goed zichtbaar. Wel is het zo dat in elk vak het hoogst liggende zandinterval kan bestaan uit verschillende zandmediaanklassen. Uiterst fijn zand is wel zeer zeldzaam in het oosten van het land, en uiterst grof zand is afwezig in het westen. In het oosten is matig grof zand het meest beschreven, richting het westen verschuift dit via matig fijn zand naar zeer fijn zand en zelfs uiterst fijn zand in het uiterste westen. Dit laatste komt mede door de aanwezigheid van getijdengeulafzettingen.

De uitschieters van grovere mediaanklassen (in het westen) en de fijnere mediaanklassen (in het oosten) zijn soms geclusterd, wat suggereert dat lokale processen verantwoordelijk zijn voor deze afwijkende gebieden. Het is dus niet zo dat alle mediaanklassen altijd overal door elkaar heen voorkomen, maar dat er soms preferent fijnere of grovere zandlichamen aanwezig zijn. Dit is waarschijnlijk het gevolg van lokale bronnen van fijner of grover zand die worden aangetapt door de rivier, zoals een dekzandrug (fijn en goed gesorteerd zand) of het Pleistocene zand (grof zand). Toch zijn de clusters niet zo eenduidig dat ze gebruikt kunnen worden als typische korrelgrootte in een lokaal gebied. De downstream-fining kaart kan dus hooguit regionaal gebruikt worden.




Figuur 4.7 Zandmediaanklassen van de hoogste Holocene rivierzandintervallen binnen 5 m beneden maaiveld. De letters A-J staan voor 15 kilometervakken waarvoor de samenstelling is geplot in Figuur 4.8.



Figuur 4.8 Aantal beschreven zandmediaanklassen per 15 kilometer vak (A t/m J) aangegeven in Figuur 4.7. A is het meest westelijke vak aan de kust, J is het meest oostelijke vak.

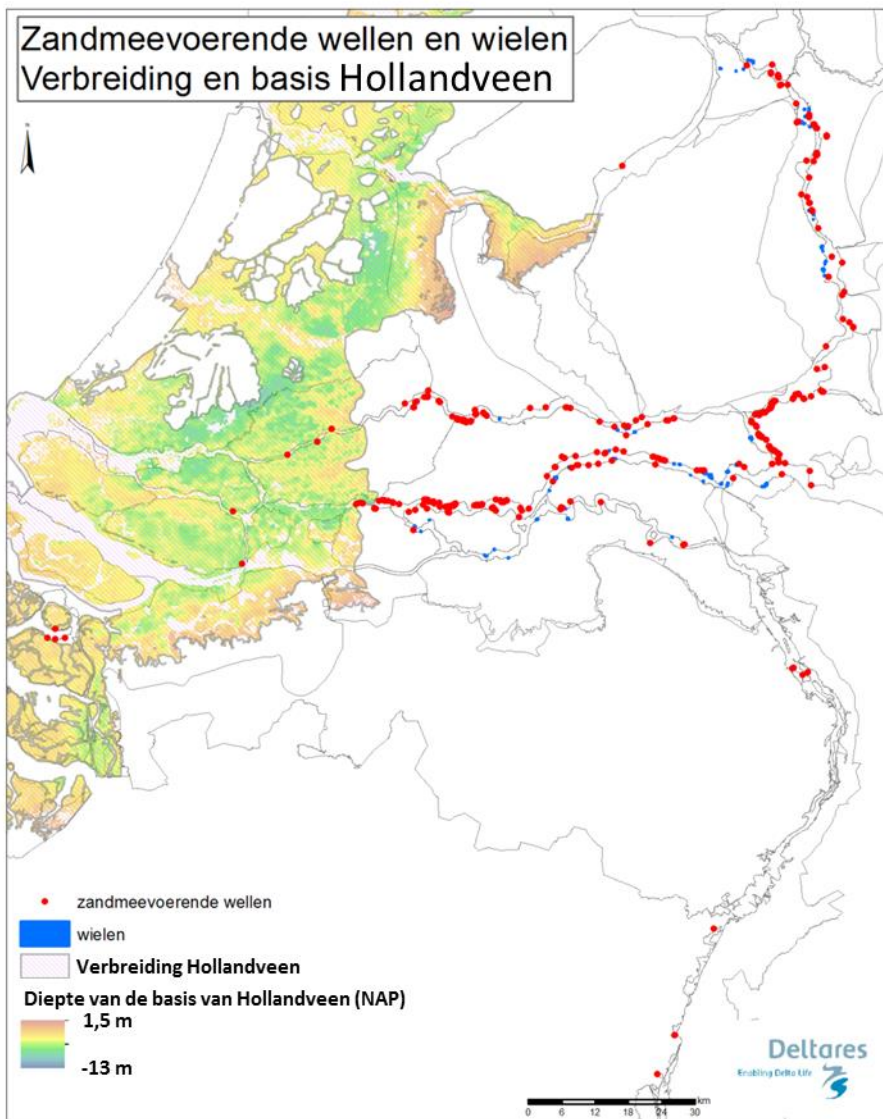
4.2.3 Voorkomen van wellen en wielen

In een Amerikaanse studie wordt aangegeven dat de beste correlatie voor het optreden van piping, het eerder optreden van piping is (Glynn en Kuszmaul, 2010). Als we op deltaschaal kijken naar de centraal geregistreeerde zandmeevoerende wellen en wielen die zijn waargenomen valt op dat ten westen van Schoonhoven en Werkendam nauwelijks zandmeevoerende wellen zijn waargenomen (Figuur 4.9). Voor de goede orde: zandmeevoerende wellen duiden niet altijd op de vorming van pipes, maar piping begint wel altijd met een zandmeevoerende wel. Zandmeevoerende wellen geven dus wel een indicatie van de pipinggevoeligheid. De grens ten westen waarvan nauwelijks zandmeevoerende wellen voorkomen komt min of meer overeen met de verbreiding van het Hollandveen laagpakket. In dit gebied zijn stroomgordels relatief smal (Gouw, 2007) en liggen oude stroomgordels vaak diep begraven onder een laag van klei en veen (Cohen et al., 2012). Ook treedt er nauwelijks kortsluiting op met de onderliggende pleistocene zandlaag. Het aantal begraven stroomgordels is ook relatief klein in dit gedeelte van de delta, aangezien er tussen 6500 en 2000 jaar geleden weinig Rijntakken actief waren in dit gebied. In die periode vormde de Oude Rijn de hoofdtak. Bovendien neemt de invloed van het getij op rivieren (en vroegere rivieren) toe in dit gebied, waardoor er meer fijne fractie in de zandlichamen aanwezig zal zijn.

Een kaart als deze zou gebruikt kunnen worden  een benedenstroomse grens vast te stellen vanaf waar geen piping meer kan voorkomen. De locaties waar wel wellen zijn waargenomen binnen bijvoorbeeld de verbreiding van het Hollandveen zouden onderzocht moeten worden, om vast te stellen waarom deze locaties afwijken. Deze informatie zou gebruikt moeten worden om te komen tot ondergrondopbouw die nog wel als pipinggevoelig beschouwd zouden moeten worden binnen het Hollandveengebied.

De verbreiding van het Hollandveen is maar een voorbeeld van een grens die gebruikt zou kunnen worden om de toepasbaarheid van een model of de kans op voorkomen van piping te compartimenteren. Andere belangrijke formaties die een rol zouden kunnen spelen in het voorkomen van zandmeevoerende wellen en de kans op piping zijn bijvoorbeeld de Laag van Wijchen, de Basisveen Laag, de Formatie van Naaldwijk (getijdenafzettingen) of grind in Maasafzettingen.

De Laag van Wijchen is een stugge kleilaag die vaak het Pleistocene zand van het Holocene pakket scheidt. Als deze laag aanwezig is onder een rivier zal er nauwelijks kortsluiting plaatsvinden met het Pleistocene zand en daardoor zal de kans op piping kleiner zijn. Basisveen heeft een vergelijkbaar effect. De Formatie van Naaldwijk bestaat voornamelijk uit fijn gelaagd zand en klei, waardoor de doorlatendheid laag zal zijn, waar de pipevorming hinder van ondervindt. Tot slot zal grind in Maasafzettingen vaak te grof zijn om getransporteerd te worden, waardoor piping niet kan optreden. Als er echter een zandlaag op ligt kan dit juist wel de kans op piping vergroten.



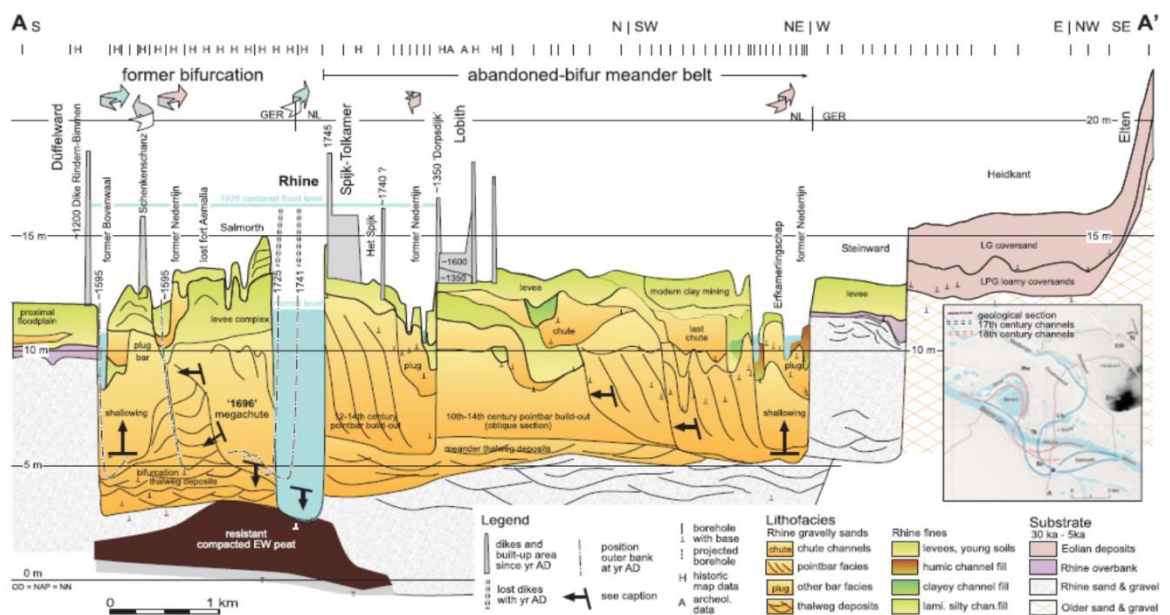
Figuur 4.9 Waarnemingen van zandmeevoerende wellen en wielen (Wiersma, 2015), met op de achtergrond de verbreiding van het Hollandveen Laagpakket volgens GeoTOP geplot (Stafleu et al., 2011). Bij de waarnemingenkaart moet worden opgemerkt dat deze is opgesteld uit de waarnemingen van verschillende waterschappen. Deze is mogelijk niet compleet, en zal in 2018 aangevuld worden.

4.3 Macroschaal

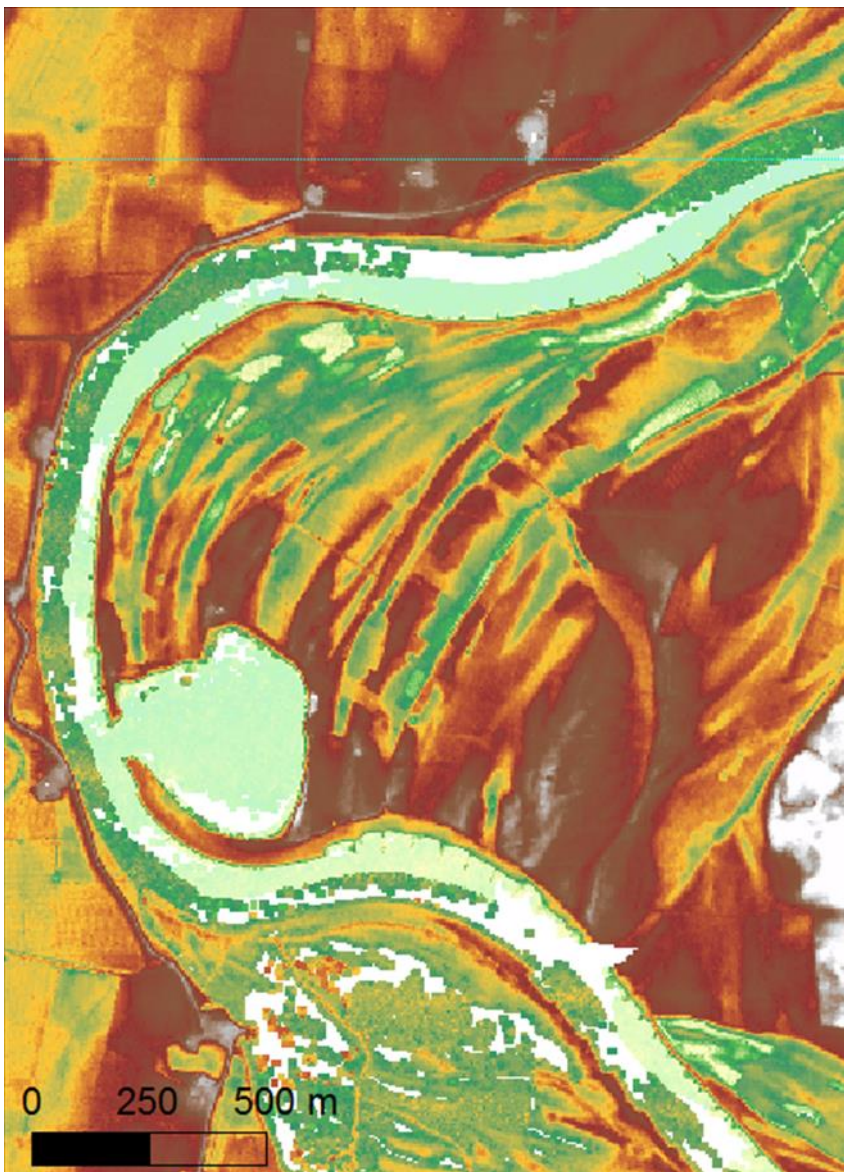
Heterogeniteit op macroschaal bestaat uit variaties over tientallen tot honderden meters en omvat onder andere de architectuur van rivierafzettingen zoals kronkelwaarden, restgeulafzettingen en verlandende rivieren door zandbanken. Deze zijn met voldoende datadichtheid (tientallen meters afstand tussen de boringen) te karteren (Figuur 4.10; Kleinhans et al., 2011). Vooral de opbouw van recente kronkelwaarden kan vrij goed worden gekarteerd door te kijken naar de morfologie van een gebied op het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN), waarop de kronkelwaardruggen en –geulen vaak goed te zien zijn (Figuur 4.11).

In de bewaarde (gepreserveerde) beddingafzettingen zullen preferente grondwaterstromingsrichtingen zijn. Parallel aan de kronkelwaardruggen zullen bijvoorbeeld minder obstakels voor waterstroming aanwezig zijn dan loodrecht op de ruggen. Bij deze obstakels kan gedacht worden aan kleilagen, kleiige kronkelwaardgeulopvullingen, erosieve

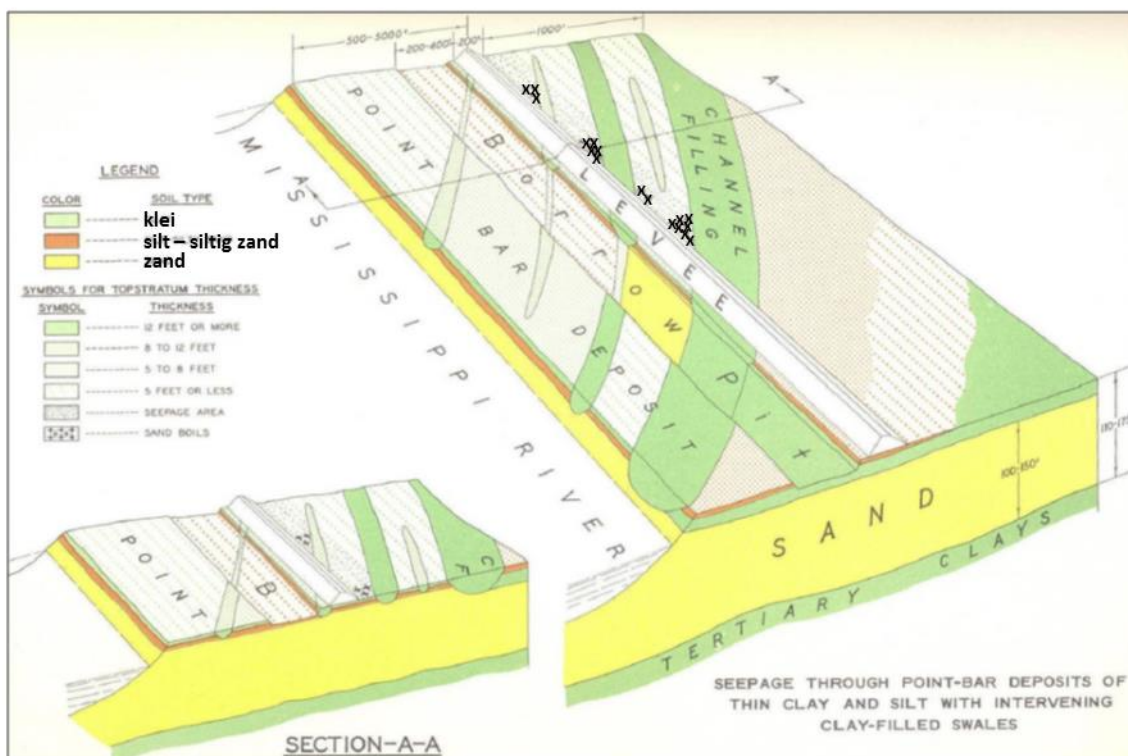
vlakken en graderingen in korrelgrootte loodrecht op de stroomrichting. Bovendien is op de kronkelwaardruggen de deklaag dunner. Een kronkelwaardrug loodrecht op de huidige dijk zal daardoor bijvoorbeeld een veel pipinggevoeligere plek zijn dan de naastgelegen kronkelwaardgeul. Langs de Mississippi zijn in het verleden al relaties gelegd tussen de oriëntatie van kronkelwaardruggen en het voorkomen van zandmeevoerende wellen die kunnen duiden op pipinggevoelige locaties (Figuur 4.12; USACE 1956; Glynn en Kuszmaul, 2010). In enkele empirische modellen voor piping speelt de hoek waarin rivierafzettingen de dijk kruisen dan ook een belangrijke rol (Glynn en Kuszmaul, 2010; Semmens, 2016). Als de top van de beddingafzettingen in beeld kan worden gebracht, en daarmee de morfologie van de rivierafzettingen, kunnen met deze kennis pipinggevoelige locaties worden aangegeven.



Figuur 4.10 Voorbeeld van heterogeniteit op Macroschaal (Kleinhans et al., 2011). Afzettingen die gevormd zijn tijdens verschillende fasen in rivierevolutie zijn gekarteerd in een profiel van 10 km lengte dwars op de rivier.



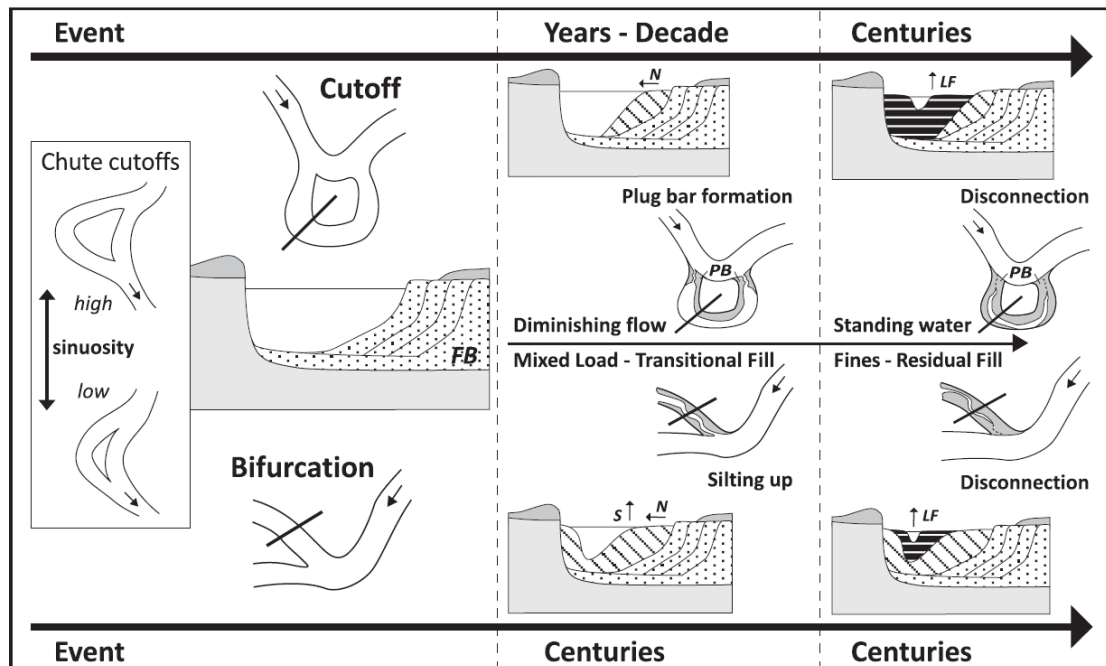
Figuur 4.11 Voorbeeld van actieve kronkelwaard langs de IJssel. De kaart is het AHN, waarin de donkerrode kleuren relatief hoog zijn en de groene kleuren laag. De kronkelwaardgeulen en -ruggen zijn duidelijk zichtbaar als hoogtes en laagtes tussen de meander.



Figuur 4.12 Invloed van de oriëntatie van een kronkelwaard op zandmeevoerende wellen (USACE 1956; Glynn en Kuszmaul, 2010). De kruisjes zijn zandmeevoerende wellen, die zich preferent bevinden op kronkelwaardruggen tegen kronkelwaardgeulen aan, waar de deklaag relatief dun is.

Als rivierlopen geleidelijk worden verlaten doordat de rivier bovenstrooms een nieuwe loop vormt, zal in de rivier alleen tijdens hoge afvoeren nog zand afgezet worden (Figuur 4.13; Toonen et al., 2012). Als de afvoer naar de geul bij het splitsingspunt is afgesneden en het water in de geul stagneert zal vooral klei sedimenteren. Deze afzettingen heten restgeulafzettingen, en bestaan uit een plug van klei en veen. Locaties met restgeulafzettingen zijn minder pipinggevoelig, maar ze kunnen wel voor een blokkade zorgen waardoor aan weerszijden mogelijk preferent zandmeevoerende wellen kunnen optreden (Figuur 4.12).

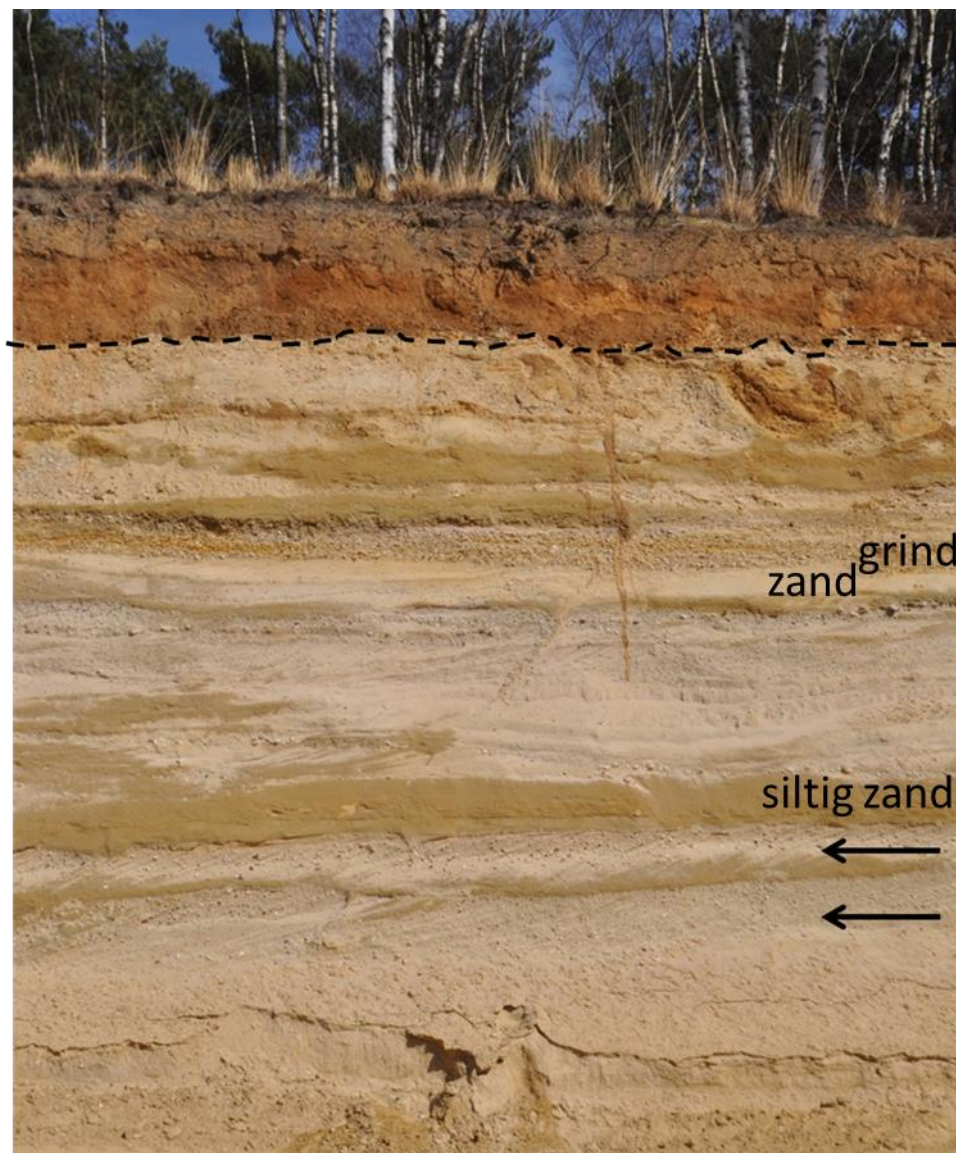
Dichtbij het splitsingspunt zal de restgeulopvulling vrij zandig zijn en kan bestaan uit een zandplug. Deze opvullingen die zijn ontstaan tijdens de geleidelijke verzandingsfase door een bovenstroomse avulsie hebben andere eigenschappen dan bijvoorbeeld kronkelwaardafzettingen (K.M. Cohen: pers.com). De exacte eigenschappen zijn nog moeilijk te duiden. Mogelijk kunnen deze zandlichamen als ze een dijk kruisen een meer pipinggevoelige situatie opleveren dan bij kronkelwaarden. Om deze reden wordt er onderzoek gedaan aan de Universiteit Utrecht naar de eigenschappen en dimensies van deze zandlichamen in het kader van het STW onderzoek "Piping in practice".



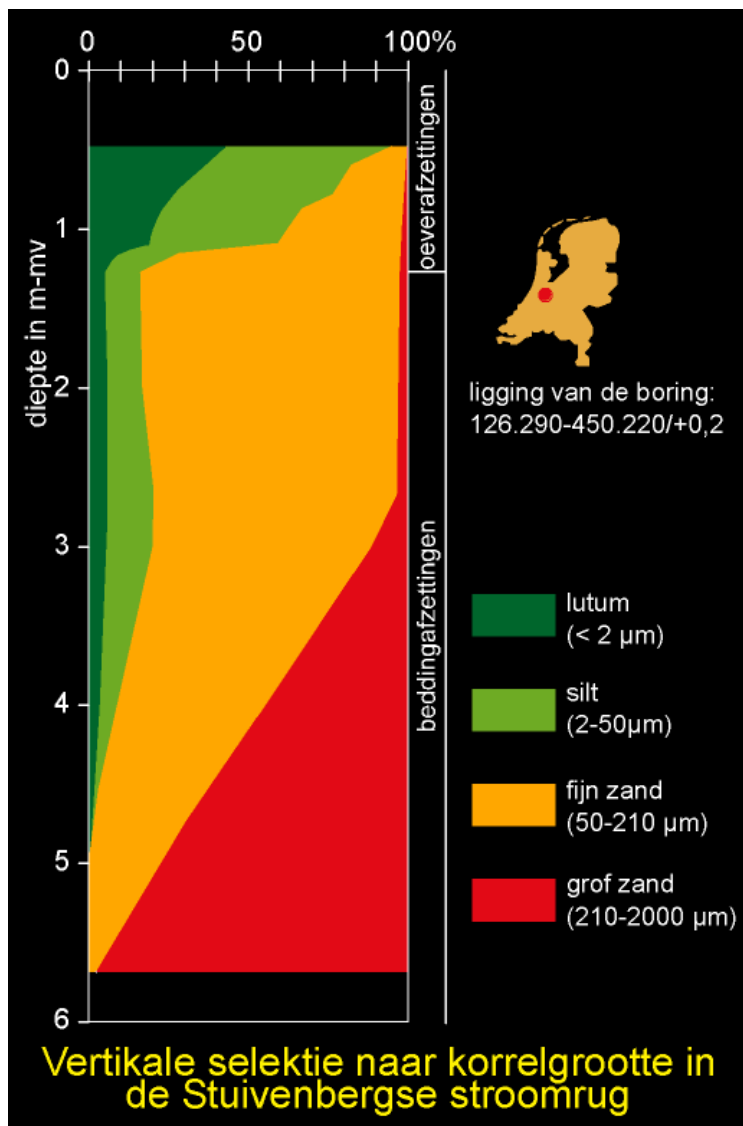
Figuur 4.13 Conceptueel sedimentatiemodel voor (rest)geulopvullingen. Bovenste deel van de figuur is voor afgesneden geulen (cut-off) en het onderste deel van de figuur voor geleidelijk verlaten geulen als gevolg van avulsie (Toonen et al., 2012).

4.4 Mesoschaal

Figuur 4.3 liet zien dat zandlichamen van rivieren zijn opgebouwd uit een opeenstapeling van lagen, die bijna altijd van grofkorrelig en dikke lagen aan de basis naar meer fijnkorrelige en dunne lagen aan de top gaan. Uiteindelijk worden ze bedekt door oeverafzettingen. Figuur 4.14 toont een groevewand waarin de mate van heterogeniteit goed zichtbaar is. De lagen lopen niet oneindig door, maar hebben vaak een dimensie van enkele meters tot honderden meters in het horizontale vlak. Deze lagen, en de afwisseling ervan is hier gedefinieerd als heterogeniteit op mesoschaal. Binnen een laag (Engels: "bed") komen ook korrelgrootteafwisselingen voor. De basis van een laag is bijvoorbeeld bijna altijd grover dan de top, maar ook lateraal kunnen er korrelgrootteveranderingen optreden binnen een laag. In beddingafzettingen wordt de grens tussen lagen soms gevormd door een dunne kleilaag (clay drape). De korrelgrootteverschillen en afzetting van klei ontstaan door (soms lokale) wisselingen in stroomsnelheid: hoe groter de stroomsnelheid, hoe groter de korrelgrootte.



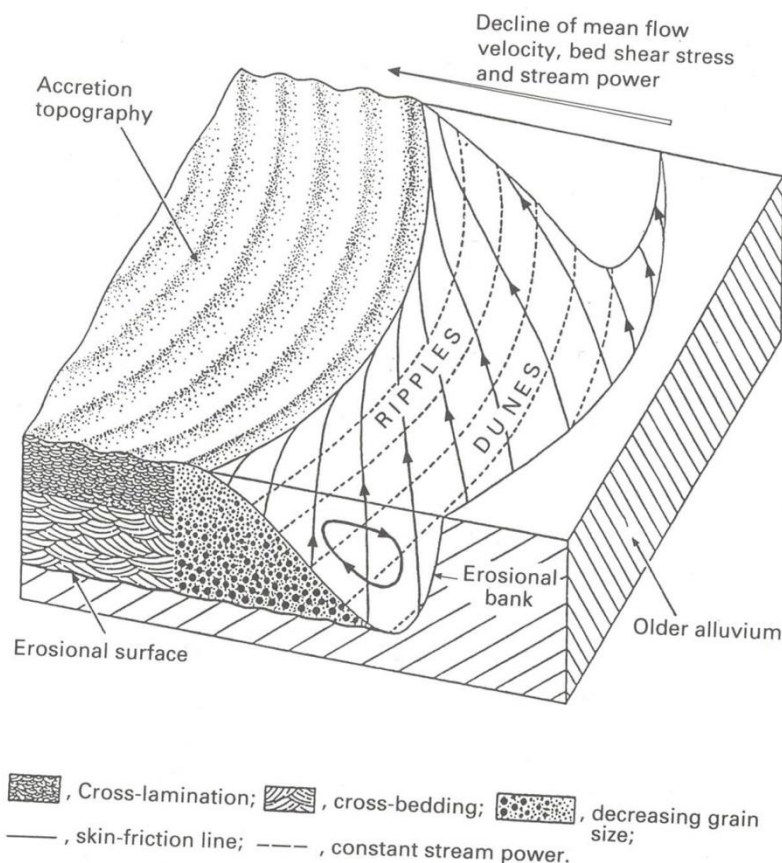
Figuur 4.14 Voorbeeld van heterogeniteit op mesoschaal in rivierafzettingen in de Formatie van Sterksel in de Hoher Stall groeve in Duitsland vlak over de grens bij Venlo. De wand is ca. 12 m hoog, intern is cross-bedding van stroomribbels en duinen te zien van ongeveer een meter hoog (pijlen). Ook zijn er veel verschillen in korrelgrootte te zien, zoals een grindlaag en zandlagen. De donkere banden zijn vochtiger en bevatten een hoger gehalte silt en klei en zijn slechter doorlatend. De basis van de deklaag (zwarte streepjeslijn) aan de top laat veel variatie zien in hoogteligging.



Figuur 4.15 Verticale opbouw van de Stuijvenbergse stroomrug in korrelgroottes (Berendsen 1982; Figuur uit Berendsen, 2004).

De aard van de heterogeniteit op de mesoschaal kan beter begrepen worden door te kijken naar de manier waarop zandige beddingafzettingen worden gevormd. Deze worden in eerste instantie gevormd door de wijze van waterstroming in de meanderbochten (Berendsen, 2004). Het water maakt hier een schroefdraadvormige (helicoïdale) beweging met opwaartse stroming in de binnenbocht. Door deze stroming ontstaat sedimenttransport in de vorm van duintjes en stroomribbels richting de binnenoever (Figuur 4.16). Het sediment dat te grof is om verplaatst te worden blijft achter op de rivierbodem (channel lag), en met afnemende diepte naar de oever in de binnenbocht toe neemt de korrelgrootte van het sediment af. Door variatie in rivierafvoer en daarmee gepaard gaande variatie in erosie van de buitenbocht en sedimentatie in de binnenbocht ontstaat in de binnenbocht van de rivier een kronkelwaard (Engels: point bar) die bestaat uit een afwisseling van sikkelvormige kronkelwaardruggen (aangelande zandbanken) en kronkelwaardgeulen (Figuur 4.2). De grensvlakken tussen de aangelande zandbanken worden laterale accretievlakken genoemd, en de aangelande zandbanken hebben een grofkorrelige basis en een fijnkorrelige top. In de kronkelwaardgeulen kan bij afnemend hoogwater klei afgezet worden.

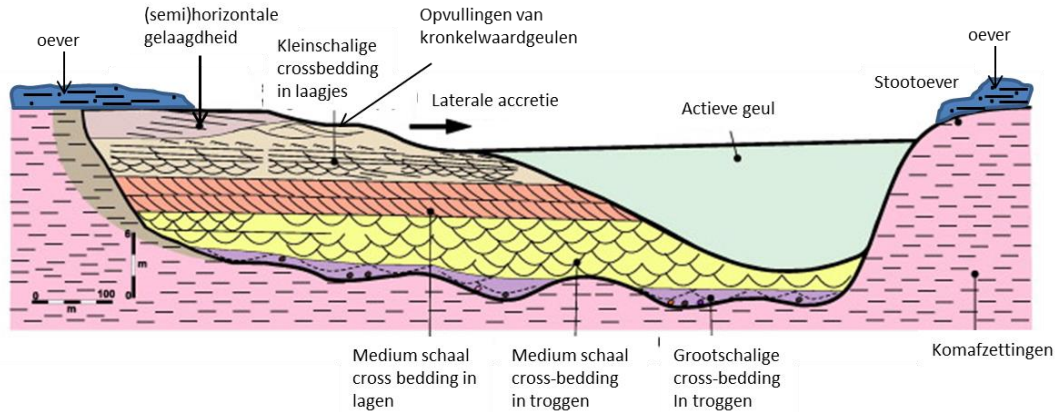
Tijdens lage waterstanden in de rivier vindt lokaal erosie plaats aan de rand van de kronkelwaard, en tijdens hoge waterstanden kunnen duinen en ribbels zich vormen op het kronkelwaard oppervlak. De kronkelwaard zelf raakt uiteindelijk bedekt met oeverafzettingen. De overgang van de beddingafzettingen naar de oeverafzettingen verloopt meestal geleidelijk. Doordat de kronkelwaarden langzaam stroomafwaarts migreren door erosie aan de stroomopwaartse kant en sedimentatie aan de stroomafwaartse kant bestaat de opeenvolging in een kronkelwaard uit een basis van channel lag afzettingen, met daarop bewaard gebleven afzettingen van duintjes en stroomribbels van zand die op de rivierbodem door het water zijn verplaatst. Naar boven toe worden deze lagen dunner en fijnkorreliger (Figuur 4.17). Het silt- en kleigehalte neemt ook geleidelijk toe naar boven (Figuur 4.15; Berendsen, 1982; 2004). De kronkelwaard kan op grote schaal vrij systematisch geordend zijn (Figuur 4.11), maar bestaat meestal uit complexen van verschillende fasen van kronkelwaarden die elkaar afsnijden.



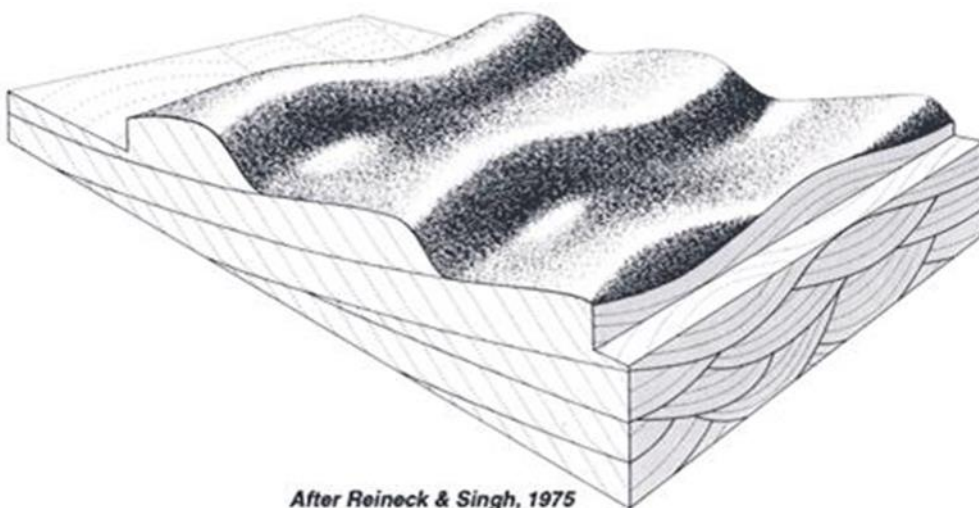
Figuur 4.16 Vorming van een kronkelwaard (Allen, 1970). In de buitenbocht van een rivier is een schroefdraadvormige waterbeweging die zorgt voor sedimenttransport van de geulbodem naar de top van kronkelwaard.

Omdat in de top van de beddingafzettingen lokaal erosie en sedimentatie plaatsvindt is de opbouw van de top complex met korrelgroottevariaties en hoogteveranderingen op de schaal van meters. Om die reden zullen boringen in een kronkelwaard bijna altijd verschillende profielen laten zien van de opbouw (Figuur 4.20; Das 2016; Bridge en Tye, 2000 en vele anderen). De korrelgroottevariatie die hier aanwezig is wordt veroorzaakt door de stroomsnelheid tijdens hoog water over de kronkelwaard, de korrelgrootte van de

bronsedimenten, het type bodemvormen dat zich kan vormen (duintjes, stroomribbels; Figuur 4.18), variaties in stroomsnelheden die lokaal voor sortering en fractionatie kunnen zorgen.



Figuur 4.17 Complexiteit binnen een kronkelwaard opeenvolging (aangepast uit Ghazi en Mounthey, 2012)

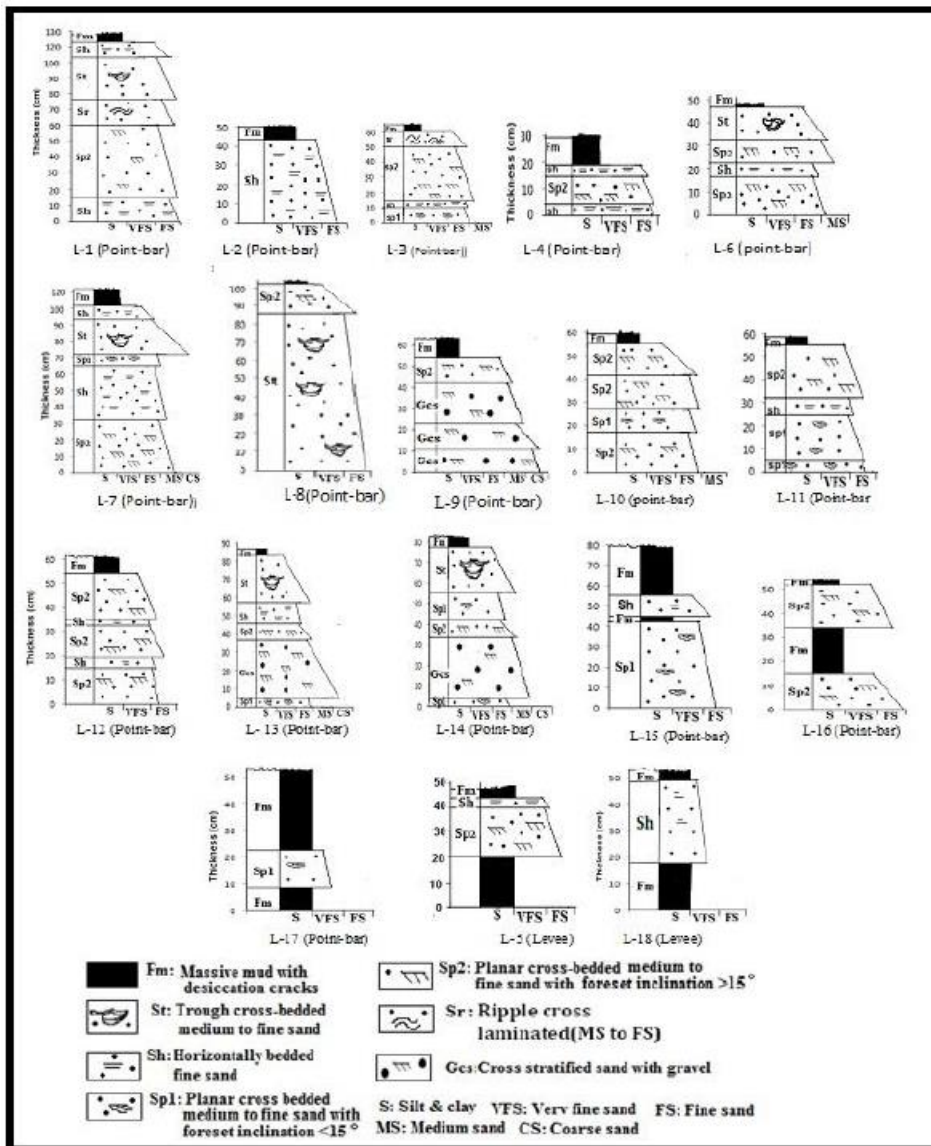


Figuur 4.18 Voorbeeld van de vorming van lagen door de verplaatsing van stroomribbels. Een deel van de ribbelafzettingen blijft behouden en vormt afzonderlijke lagen in het zand, vaak met lensvorm. Dergelijke lagen zijn aanwezig in de top van beddingafzettingen die gevormd worden door verplaatsende stroomribbels. Binnen de lagen is scheve microschaalvariatie te zien in de vorm van "cross-bedding". Uit Reineck en Singh, 1975)

Behalve korrelgroottevariatie is er ook variatie in de hoogteligging van de basis van de deklaag. Op een ruimtelijke schaal van tientallen meters is er de kronkelwaardrug en -geul afwisseling met hoogteverschillen van ongeveer 1 à 2 m. Daartussen zorgen stroomribbels bedekt met klei en lokale erosie op een ruimtelijke schaal van enkele meters voor een reliëf van tientallen centimeters in het contactoppervlak tussen de top van het beddingzand en de basis van de deklaag (Figuur 4.19). Bovendien zullen er in de top van de beddingafzettingen lokaal kleilaagjes zijn afgezet (Figuur 4.19), en in de oeverafzettingen zullen lokaal zandlenzen van maximaal een halve meter dik aanwezig zijn die op de oever zijn afgezet tijdens hoog water.



Figuur 4.19 Top van de beddingafzettingen in de uiterwaarden bij Afferden. De basis van de deklaag is zeer variabel, en in de beddingafzettingen zijn kleilaagjes aanwezig van 1 en 5 cm dik.


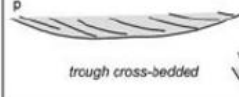





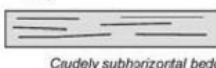
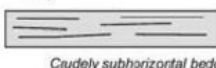




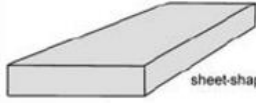
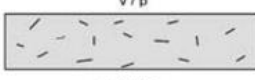
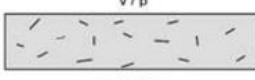


Figuur 4.20 Variatie in verticale profielen uit boringen in kronkelwaard- en oeverafzettingen langs een rivier in India (Das, 2016). Zwarte eenheden zijn klei, witte eenheden zijn zand. Hoe verder de eenheid naar rechts uitsteekt, hoe grover het sediment. Ieder profiel heeft een andere diepte tot het bovenste zand en de korrelgrootte en sedimentaire structuren tonen sterke variatie tussen de profielen.

Analyse van afzettingseenheden

Zoals hierboven aangegeven is in de zandlagen binnen beddingafzettingen een hiërarchie aanwezig (zie ook Figuur 4.3 en Figuur 4.4). Aan de basis zijn dikke lagen aanwezig met grind aan de basis, en aan de top zijn dunne lagen van enkele centimeters of decimeters dik die bestaan uit fijner zand. De dikke lagen hebben een grotere ruimtelijke verbreiding dan de dunne lagen. Een pipe gaat door de top van een beddingafzetting en de totale kwelweglengte is in de orde van enkele tientallen meters. De verwachting is dat deze veel lagen zal doorkruisen, aangezien de lagen in de top van een beddingafzettingen een ruimtelijke verbreiding hebben van enkele meters. Dit blijkt ook uit de grote variatie in de opbouw van de top van kronkelwaardafzettingen in boringen (Figuur 4.20) en uit onderzoek dat is uitgevoerd in proeftuinen (Arcadis, 2015).

Voor het karakteriseren van de top van een typische Nederlandse beddingafzetting waarin piping zich afspeelt is een inschatting van de aanwezige korrelgroottes noodzakelijk, en een schatting van de ruimtelijke dimensies van de sedimentlichamen (lagen) waarin deze zich bevinden. Op die manier kan worden vastgesteld welke sedimentlichamen met welke korrelgroottevariatie een kwelweg kruist. Voor de olie- en gaswinning zijn er aanpakken om deze sedimentlichamen te karakteriseren, bijvoorbeeld door de analyse van afzettingseenheden (e.g. Miall, 1985; 2014). Helaas is de wetenschappelijke literatuur hierover voornamelijk gericht op het identificeren van typen rivierafzettingen op een schaalniveau grover dan voor piping relevant is. Een analyse ervan op de schaal van dijken is nog niet gemaakt. Toch kan een analyse van de typische afzettingseenheden en de dimensies ervan die aanwezig zijn in de top van een beddingafzetting inzicht geven in de variatie die een vormende pipe tegenkomt in de kwelweg.

depositional element	external shape	internal structure		average size [m]			regional drainage-zone
		section oriented parallel to flow (p)	section oriented vertical to flow (v)	d	w	l	
Scour pool fill				1.7	25	40	western area
				0.7	3.5	8	northern area
small trough fill				/	/	/	western area
				0.3	3	5	northern area
gravel sheets				1.0	50	50	western area
				1.0	50	50	northern area
gravel dunes	2-D dune 			0.5	20	40	western area
	3-D dune 			0.3	10	25	northern area
traction carpets				4	100	500	western area
				2	40	100	northern area

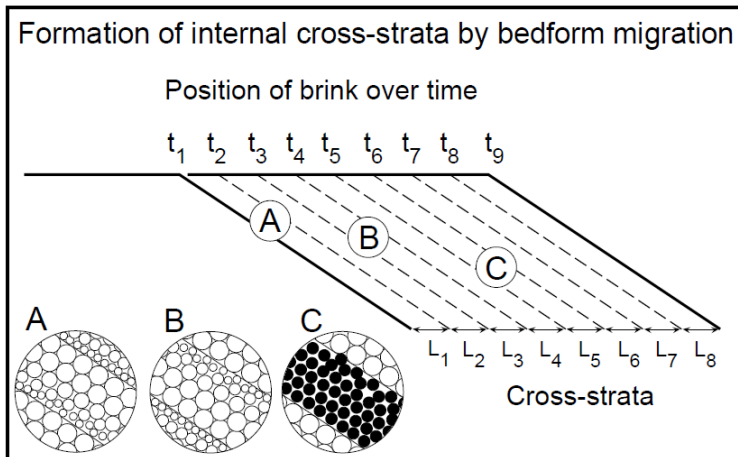
Figuur 4.21 Voorbeeld van een hiërarchische indeling van afzettingseenheden (hier: "depositional elements") in een rivierafzetting met de dimensies (dikte, breedte en lengte) per element (Heintz en Aigner, 2003). De bovenste eenheden komen voor aan de top van een bedding, de onderste aan de basis. Deze eenheden zijn niet volledig toepasbaar voor de Nederlandse situatie, maar de methode van indeling in afzettingseenheden wel.

Kanning (2012) laat zien op basis van modelberekeningen van het zwakste pad voor piping dat hoe kleiner de afmeting van eenheden met een vergelijkbare korrelgrootte zijn, hoe meer de representatieve korrelgrootte die piping beïnvloedt in de buurt komt van de gemiddelde d_{70} . In dat geval is een karakteristieke (5%) ondergrens waarde van de variatie in de d_{70} dus erg conservatief. De Visser et al. (2016) laten zien dat bij een proeftuin bij IJzendoorn het gebruik van de gemiddelde waarde in plaats van de karakteristieke (5%) ondergrenswaarde een winst van 40 m kwelweglengte kan worden gehaald. Het kritieke verval dat behaald wordt door te kijken naar de grofste korrelgrootte in het traject onder een dijk met de minste weerstand komt in de buurt van het kritieke verval waarbij een gemiddelde waarde van de d_{70} is gebruikt, en levert zelfs nog iets meer sterkte op (dus een hoger kritiek verval). Als met

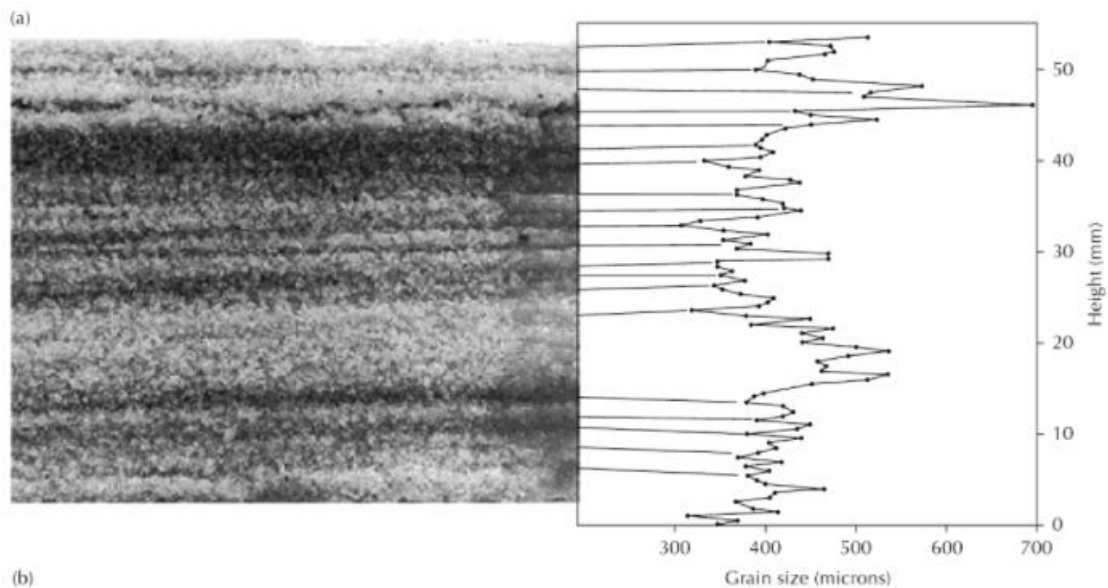
een analyse op basis van de dimensies van afzettingseenheden kan worden aangetoond dat de grootte van de eenheden aan de top van een beddingafzetting vele malen kleiner is dan de kwelweg, zou je dus kunnen zeggen dat de representatieve d_{70} voor het optreden van piping ongeveer de gemiddelde d_{70} is.

4.5 Microschaal

Op microschaal (millimeters) bestaan zandige sedimenten uit dunne laagjes (laminae). De laminae kunnen horizontaal opstapeld zijn (planaire laminae), maar meestal staan ze in een hoek (cross-laminae). De laminae ontstaan door variatie in korrelgrootte en/of mineralogische samenstelling (Figuur 4.22; Figuur 4.23; Figuur 4.24). Dit wordt veroorzaakt doordat zandtransport over de waterbodem plaatsvindt in bodemvormen zoals duinen en stroomribbels. Door variatie in waterstroming aan de stroomafwaartse zijde van deze stroomribbels wordt de afzetting van relatief fijn sediment afgewisseld met pulsjes grover sediment bestaand uit sediment (Reesink en Bridge, 2007; Reineck en Singh, 1973).



Figuur 4.22 Drie voorbeelden van heterogeniteit op microschaal in een migrerend rivierduin. A, B en C zijn mogelijke opbouwen van laminae die worden waargenomen: A) geeft een gradering per lamina die grover wordt naar boven, B) geeft een gradering per lamina die fijner wordt naar boven toe en C) geeft een variatie in mineralogische samenstelling weer (Cheel, 2002).

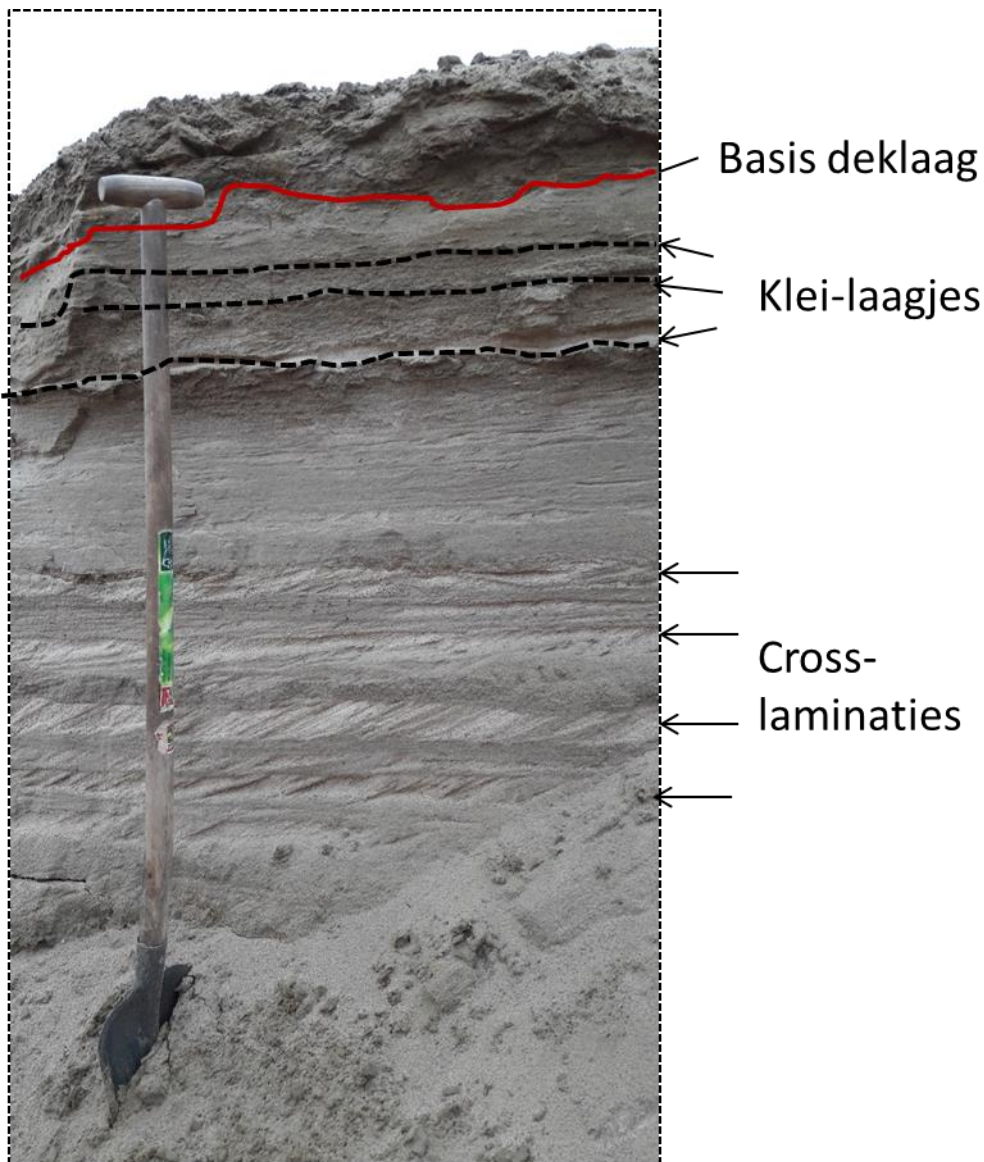


Figuur 4.23 Verschillen in korrelgrootte in horizontale laminaties geproduceerd in een gootexperimert (uit Bridge en Best, 1997; Bridge, 2003). Links een foto van de afzettingen; rechts de gemeten korrelgrootte per laag. De totale dikte van dit pakket is slechts 5 cm.

De afwisselingen tussen korrelgroottes op microschaal beïnvloeden ook de permeabiliteit en porositeit. Hier is veel onderzoek naar gedaan, vooral in het kader van olie- en gaswinning (Brayshaw et al., 1996; Reading, 2003), waarbij permeabiliteitsmodellen zijn ontwikkeld. Over het algemeen hebben de grofste delen van de scheve laagjes de grootste permeabiliteit en porositeit, ook omdat deze slecht gepakt zijn. De fijnere delen bevatten vaak silt en soms zelfs klei, waardoor de permeabiliteit lager is dan in de grove delen. Ook de richting van de laminae bepaalt de permeabiliteit: loodrecht op de laminae is de permeabiliteit lager dan parallel aan de laminae. Er valt te verwachten dat de microschaalheterogeniteit invloed heeft op piping. Hier is echter voor zover bekend nog geen onderzoek naar gedaan.

Het is niet eenvoudig om de variatie in korrelgrootte van laminae te bepalen. Bij korrelgrootteanalyses zijn grotere monsters noodzakelijk dan de microschaal toelaat. Door het mengen van de monsters verdwijnt de microschaalvariatie en er ontstaat dus geen inzicht in deze variatie, terwijl deze variatie in het veld wel degelijk voor piping relevante processen beïnvloedt.

Naast de opbouw in laagjes bepaalt ook de sortering van het sediment voor een belangrijk deel de fysische eigenschappen van het zand. De sortering is de mate van spreiding binnen de korrelgrootteverdeling. Goed gesorteerd zand is uniform en is beter doorlatend dan slecht gesorteerd zand (ook wel gegradeerd genoemd) met een zelfde gemiddelde korrelgrootte.



Figuur 4.24 Voorbeeld van crossbedding in beddingafzettingen in de uiterwaarden bij Afferden. De afwisselingen tussen horizontale lagen met meer en minder cross bedding is heterogeniteit op mesoschaal. De variatie binnen deze pakketten is heterogeniteit op microschaal. Aan de top zijn de oeverafzettingen en enkele ingeschakelde kleilaagjes zien.

De zichtbare hoeveelheid laminae neemt naar boven toe meestal af door bioturbatie: door activiteit van dieren en planten ontstaat een vrij homogeen pakket, waarbij het zand in de top van beddingafzettingen vaak vermengd wordt met organisch materiaal en kleideeltjes. De overgang van beddingafzettingen naar de deklaag kan hierdoor geleidelijk zijn en het is daarom soms lastig vast te stellen waar de deklaag eindigt en het beddingzand begint.



5 Onderzoek naar de meso- en microschaal bij Tuil

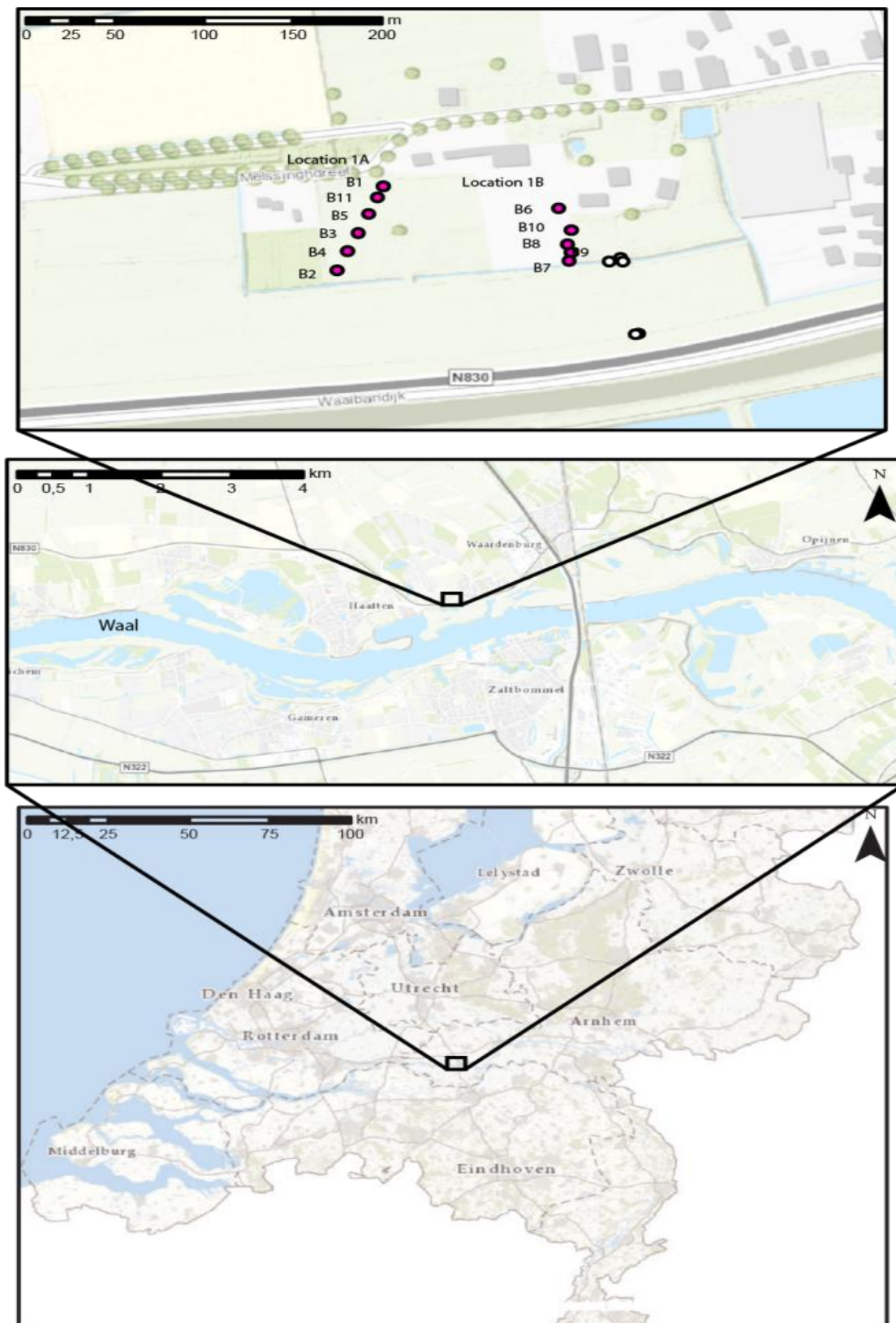
5.1 Achtergrond

Om te onderzoeken hoe de micro- en mesoschaal aanwezig is direct onder de deklaag is een onderzoek uitgevoerd naar de korrelgroottevariatie bij Tuil in Gelderland (Figuur 5.1). Hiervoor is drie dagen boorveldwerk uitgevoerd door een student van de Universiteit Utrecht (Van de Ven, 2016). De locatie is uitgekozen omdat op deze plek een stroomgordel in de ondergrond aanwezig is binnen 3 meter beneden maaiveld (Cohen et al., 2009) en omdat op deze locatie zandmeevoerende wellen zijn gevormd bij hoog water in 1993 en 1995. Dit kan duiden op gevoeligheid voor piping. De boringen zijn gezet in raaien: één over een paardenwei (locatie 1A), en één over een aardbeienveld (locatie 1B). Volgens de landeigenaar wordt het aardbeienveld bij hoog water zompig. Het onderzoeksterrein ligt in de kronkelwaard van een grote meanderbocht van de Waal. Eind 17^{de} eeuw is deze meanderbocht door de mens afgesneden (Cohen et al., 2012).

De microschaalvariatie op deze plek is onderzocht met behulp van hoge-resolutie korrelgrootteanalyses van de zandlaag direct onder de deklaag (daar waar piping plaatsvindt). Voor dit korrelgrootteonderzoek is gebruik gemaakt van end-member modellering (paragraaf 3.3.4). Met deze techniek zijn sedimentmonsters ontmengd tot verschillende populaties die in ieder monsters in meer- of mindere mate aanwezig zijn. Deze populaties zijn gerelateerd aan verschillende bronnen van sediment waaruit de monsters zijn opgebouwd.

Het doel van dit onderzoek is om te bepalen hoe de bovenste 20 centimeter van de zandlaag onder de deklaag is opgebouwd, en wat de verticale en ruimtelijke variatie in dit gedeelte van de zandlaag is. De ambitie is om verschillende groepen van korrelgroottes binnen de monsters te identificeren, en de relatieve verhoudingen hiervan in de sedimentmonsters te bepalen. Mogelijk zijn de aanwezige laminae een reflectie van de verschillende groepen en kan op basis van end-member modellering de microschaal heterogeniteit worden gekarakteriseerd. Dit vormt een essentiële stap binnen de doelstelling om deze heterogeniteit mee te nemen bij het bepalen van de piping gevoeligheid.

Eerdere studies in Nederland hebben succesvol gebruik gemaakt van end-member modellering (Jonkers et al., 2009; Erkens et al., 2013 en Toonen et al., 2015). Dit is echter de eerste keer dat de methode gebruikt wordt om te onderzoeken of micro-sortering binnen laminae in sedimenten kan worden gekarakteriseerd.



Figuur 5.1 Locatie van de profielen bij Tuil.



Legend

- Borehole locations of this study
- Seepage inventarisation by Dutch Water Authority Rivierenland

Depth of sand below the surface (Cohen et al., 2009)

- 2: Sand of diked rivers, top between 1.0 - 2.0 m below the surface
- 3: Sand of diked rivers, top between 2.0 - 3.0 m below the surface
- 14: Channel belt sand of undiked rivers, top between 1.0 - 1.5 m below the surface
- 15: Channel belt sand of undiked rivers, top between 1.5 - 2.0 m below the surface
- 16: Channel belt sand of undiked rivers, top between 2.0 - 3.0 m below the surface
- 17: Channel belt sand of undiked rivers, top deeper than 3.0 m below the surface
- 99: Water

Figuur 5.2 Overzicht van de boorlocaties op de zanddieptekaart (Cohen et al., 2009). De witte stippen geven locaties aan waar zandmeevoerende wellen zijn waargenomen tijdens hoogwater in 1993 en 1995. Opvallend is dat het aardbeienveld (rechter raai) volgens deze kaart een dikkere deklaag heeft dan de paardenwei (linker raai). NB: De dichtstbijzijnde boringen van de Universiteit Utrecht die gebruikt zijn voor de zandbanenkaart liggen op meer dan 300 m afstand.

5.2 Methoden

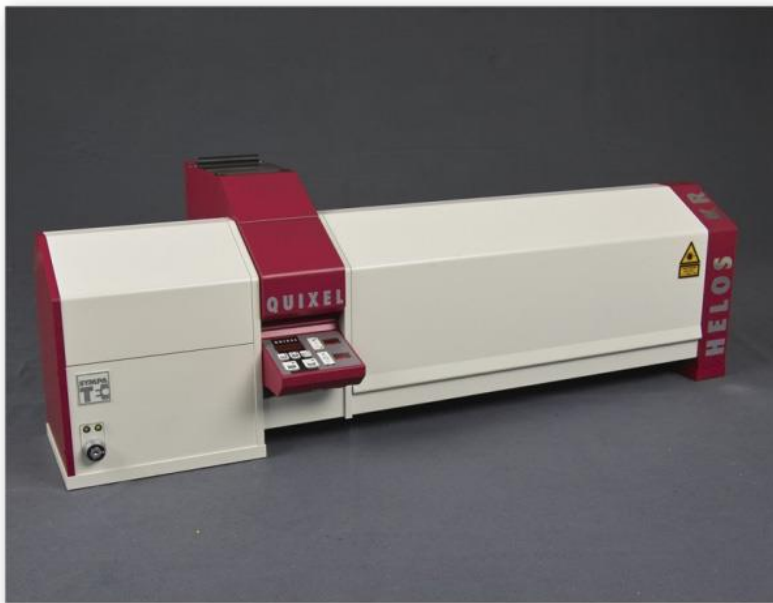
Tijdens het veldwerk zijn 11 boringen verricht (Figuur 5.2). Het gedeelte boven grondwater is geboord met een Edelman grondboor, de waterverzadigde klei onder het grondwaterniveau met een guts, en de zandige lagen onder de deklagen met een Van der Staay zuigboor. Op deze manier is tot maximaal 5 meter diep geboord. Van iedere boring is de locatie en de plaatselijke maaiveldhoogte met een DGPS vastgelegd.

6 boringen (B1, B2, B3, B4, B5 en B11) vormen raai 1A en 5 boringen (B6, B7, B8, B9 en B10) vormen raai 1B. Iedere 10 cm van de boringen is in het veld beschreven volgens de methode van de Universiteit Utrecht. De korrelgrootte is in het veld geschat met een zandliniaal.

Bij alle boringen zijn tien monsters van elk 2 cm van de bovenste 20 cm van het zandlichaam direct onder de deklaag genomen voor laser-diffractiemetingen. Daarnaast zijn enkele monsters genomen bij onregelmatigheden in de opbouw, zoals onder een 20 cm dikke kleilaag in het zandpakket onder de deklaag. In B3, B6 en B9 zijn ook enkele monsters van zandige delen van de deklaag meegenomen voor verdere analyse.

Korrelgrootteanalyse

Voor de analyse met een Sympatec HELOS/KR laser-diffractie korrelgroottemeter zijn de monsters eerst voorbehandeld met waterstofperoxide (5 ml 30% H_2O_2) om het organisch materiaal te verwijderen en vervolgens gekookt met zoutzuur (10 ml 10% HCl) om de kalk ($CaCO_3$) te verwijderen. Daarna is peptiseermiddel ($Na_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$) toegevoegd om de kleideeltjes van elkaar te weken. De analyse resulteerde in 57 korrelgrootteklassen van 0.1 tot 2000 μm .

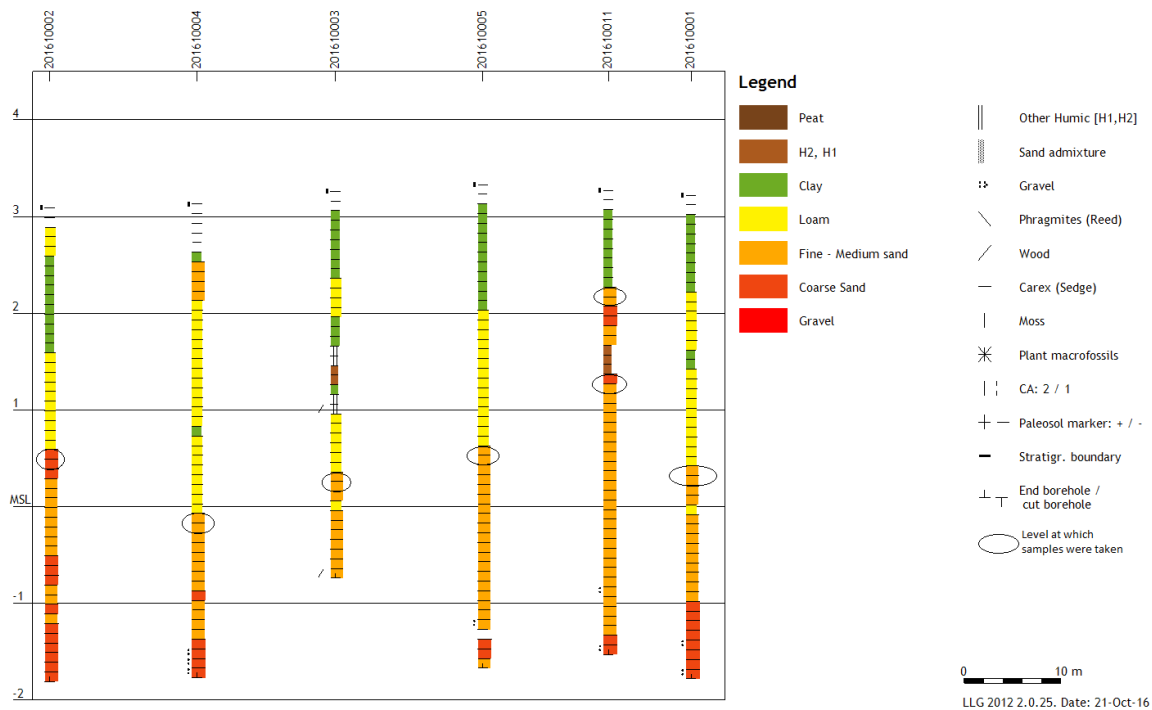


Figuur 5.3 Afbeelding van een Sympatec HELOS/KR laser-diffractie korrelgrootte meetapparaat . Source: https://www.sympatec.com/images/LaserDiffraction/HELOS-KR&QUIXEL_640.jpg

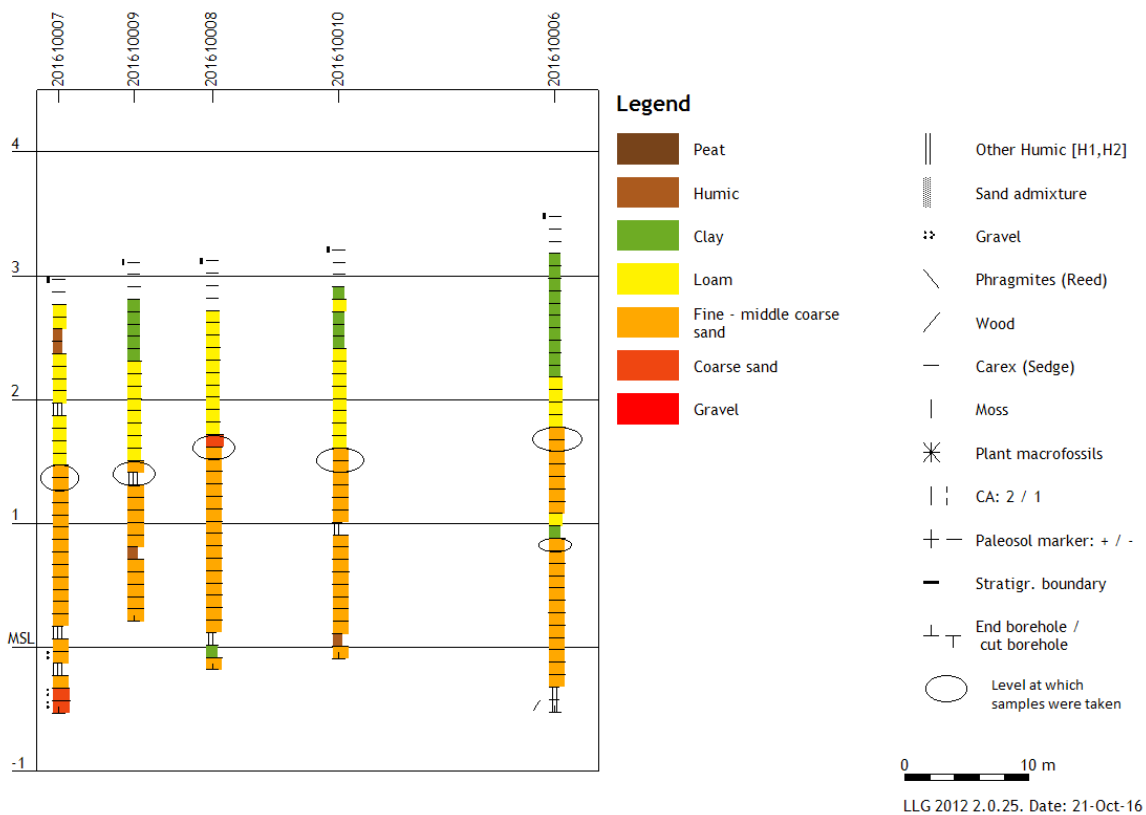
End-member modellering

De korrelverdelingen verkregen door middel van laser-diffractieanalyses zijn statistisch ontmengd door middel van end-member modellering (Paragraaf 3.3.4; e.g. Weltje 1997; Heslop et al. 2007). Voor deze analyse is het DRS-Unmixer model van Heslop et al. (2007) gebruikt. Bij de analyse zijn de verschillende monsters behandeld als steekproeven van een grote populatie, aangezien ze allen van dezelfde locatie komen en afgezet zijn door hetzelfde proces.

5.3 Resultaten



Figuur 5.4 Zuid-Noord boorprofiel over de profiel 1A. Transparante cellen geven geroerde grond weer. De boringen van links naar rechts zijn: B2, B4, B3, B5, B11 en B1. De ovalen geven het bemonsterde interval aan. Y-as is hoogte t.o.v. NAP.

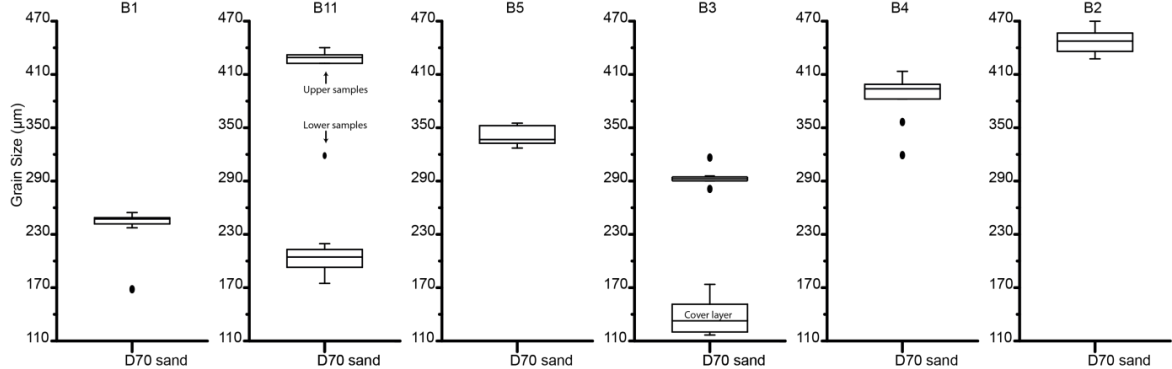


Figuur 5.5 Zuid-noord boorprofiel over profiel 1B. Transparante cellen geven geroerde grond weer. De boringen van links naar rechts zijn: B7, B9, B8, B10 en B6. De ovaal geven het bemonsterde interval aan. Y-as is hoogte t.o.v. NAP.

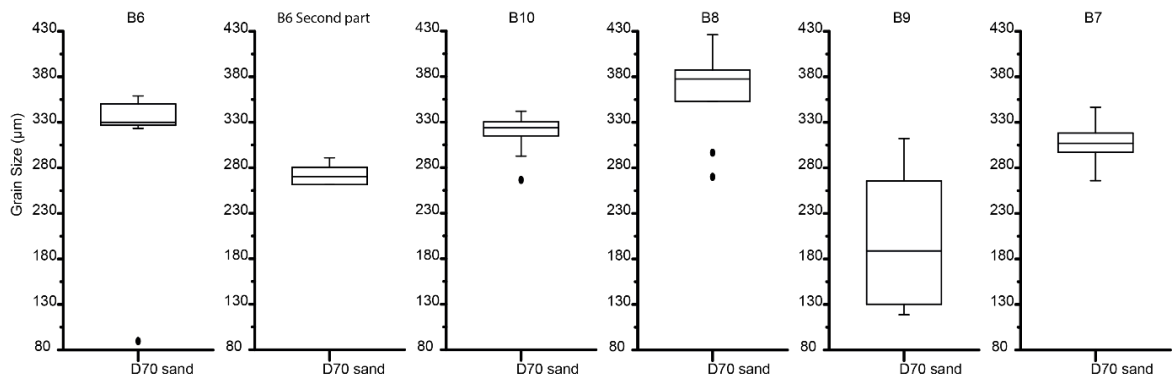
In alle boringen is de zandlaag bereikt. De deklaag is variabel in dikte, en bestaat meestal uit een basis van leem die overgaat in een top van klei. Lokaal komen er zandlagen in voor. Bijvoorbeeld in boring B11 (Fig. 5.4) is een zandlaag van 0,5 m dikte aanwezig in de deklaag op 0,8 m diepte, en in boring B4 (Fig. 5.4) een zandlaag van 0,4 m dikte op 0,5 m diep. Het zandlichaam bestaat voornamelijk uit fijn zand, met lokaal grofzandige inschakelingen. Regelmatig wordt het zandlichaam onderbroken door klei- of zavelinschakelingen. De diepte van het hoogste zandvoorkomen varieert van 3,30 meter (B4) tot 1,40 m (B8) beneden maaiveld. Opvallend is dat in profiel 1A de zandlaag dieper ligt dan in profiel 1B. Dit strookt met de observaties van de landeigenaar dat het zompig wordt op deze plek tijdens hoogwater. Bij locatie 1A is er meer variatie in de hoogteligging van de zandlaag t.o.v. NAP: het maximale hoogteverschil in de top van de zandlaag is 1,6 m.

5.4 Korrelgrootteanalyse

Variatie in d70-waarden



Figuur 5.6 Boxplots met de variatie in de waarde van de d70 in de bemonsterde intervallen onder de deklaag voor de raai 1A. De rechthoeken geven het gemiddelde, en het tweede en derde kwartiel aan. De balken geven het totale bereik van d70 waarden aan. Outliers zijn als punten aangegeven en gedefinieerd als 1,5 keer de waarde van een kwartiel.



Figuur 5.7 Boxplots met de variatie in de waarde van de d70 in de bemonsterde intervallen onder de deklaag voor raai 1B. De rechthoeken geven het gemiddelde, en de tweede en derde kwartiel aan. De balken geven het totale bereik van d70 waarden aan. Outliers zijn als punten aangegeven en gedefinieerd als 1,5 keer de waarde van een kwartiel.

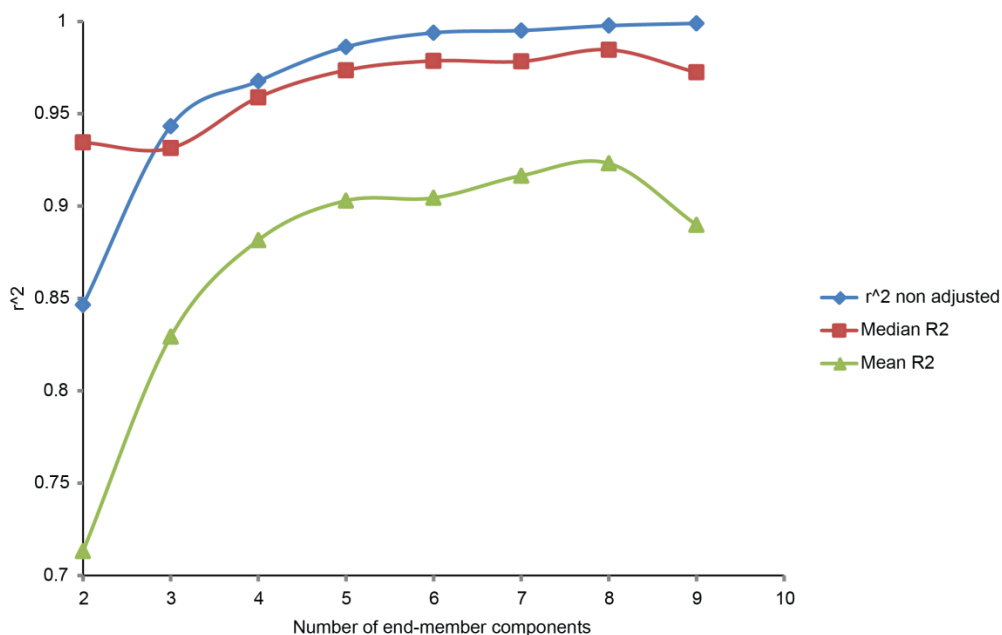
Figuur 5.6 en Figuur 5.7 geven de variatie in de berekende d70 binnen de bovenste 20 cm van het zand direct onder de deklaag op basis van de 10 monsters van 2 cm. Duidelijk en niet onverwacht is dat in beide profielen er grote variatie bestaat in de d70 waarden. Opvallend is dat in boringen waarin twee lagen zijn bemonsterd (B11 en B3) grote verschillen in de grofheid van deze lagen zitten. Verder valt op dat de verticale variatie in de d70, dus in het bemonsterde 20 cm interval, veel kleiner is (<30 μm) dan de variatie tussen boringen onderling (~250 μm tussen B11 en B2). Dit laat zien dat de kans groot is om zeer variabele korrelgrootten aan te treffen op de schaal van een kwelweg. Alleen boring B9 laat een variatie zien van ~130 μm . Opvallend is dat deze boven een organisch laagje lijkt te zijn bemonsterd (Figuur 5.5), wat suggereert dat dit een oever of een crevasse is, en geen beddingafzetting is. De gemiddelde d70 van alle zandmonsters is 329 μm (Tabel 5), met een minimum van 163 μm en een maximum van 470 μm .

Tabel 5. Gemiddelde, minimum en maximum waarden van de d50, d70zand en d70totaal voor alle zandmonsters bij het onderzoek in Tuil.

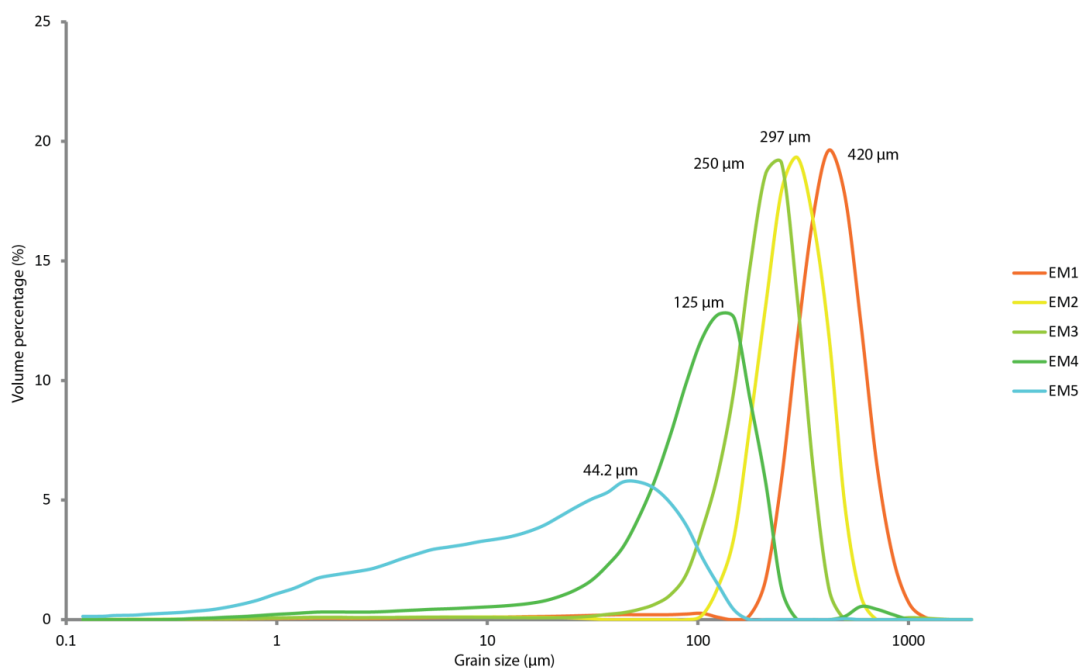
	d50 (μm)	d70zand (μm)	d70totaal (μm)
Gemiddelde	246	329	315
Min	73	163	124
Max	373	470	466
Standaard deviatie	66	71	73

End-member modellering

Alle korrelgrootteverdelingen zijn samengevoegd en vervolgens ontmengd in end-members. Het aantal end-members is bepaald door een analyse op de gemiddelde determinatiecoëfficiënt (R^2) uitgezet tegen het aantal potentiële end-members (Figuur 5.8). Hiermee wordt aangegeven hoeveel van de variatie verklaard kan worden met een toenemend aantal end-members. Als een extra end-member toevoegen niet meer leidt tot een aanzienlijk betere R^2 is het optimale aantal end-member bereikt. Het te gebruiken aantal end-members wordt ook gestuurd door de verwachting over de hoeveelheid betekenisvolle end-members. Eerder werd gesteld dat de end-members in de korrelgrootteverdeling een relatie hebben met de manier van afzetten, bijvoorbeeld door een verschil in korrelgrootte tussen bed load en suspensief transport. Het is daarom niet betekenisvol om bijvoorbeeld 10 end-members te gebruiken, omdat dit aantal niet te koppelen zou zijn aan een bepaald afzettingsmechanisme. Op basis van deze afwegingen is daarom gekozen voor vijf end-members. Meer end-members zouden iets meer variatie kunnen verklaren, maar zouden niet leiden tot geologisch betekenisvolle uitleg (e.g. Prins et al., 2000; Toonen et al., 2015). De vijf gekozen end-members zijn duidelijk onderscheidend (Figuur 5.9). End-member 1 (EM1) is de grootste end-member, end-member 5 (EM5) de fijnste. De gegevens van de end-members zijn gegeven in tabel 6.



Figuur 5.8 Grafiek met gemiddelde R^2 uitgezet tegen een toenemend aantal end-members.

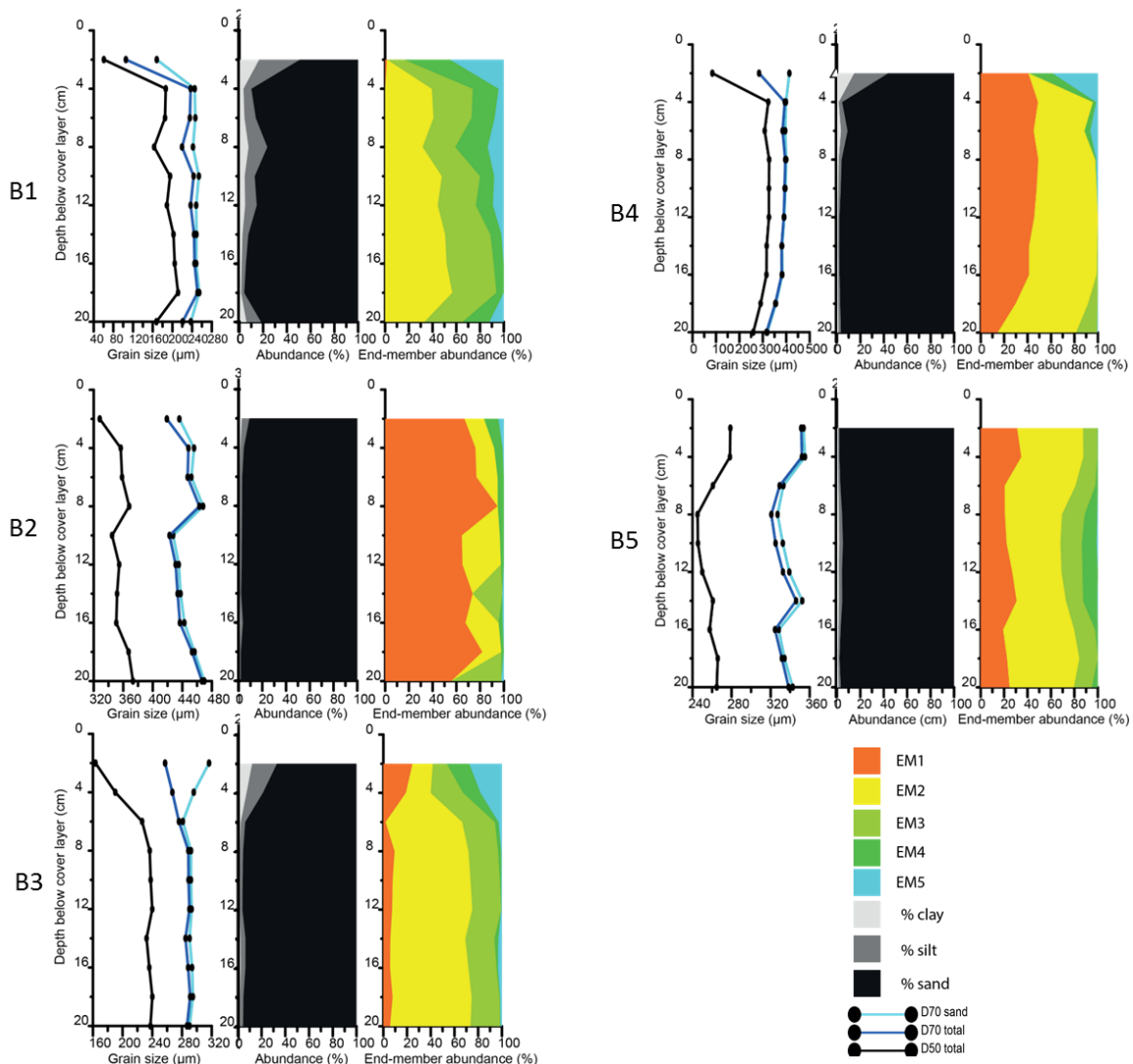


Figuur 5.9 De vijf gekozen end-members in dit onderzoek, en de bijbehorende modi.

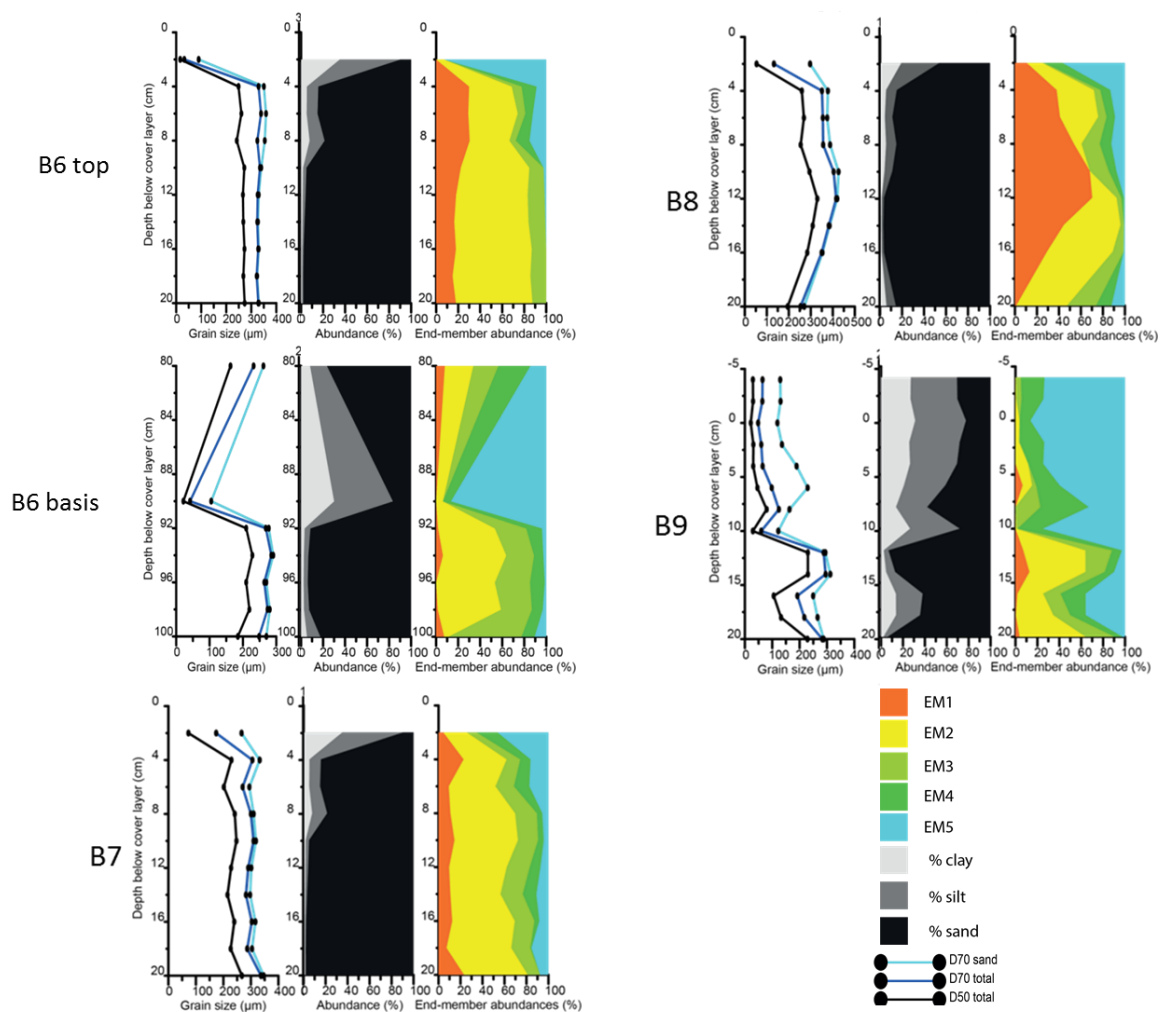
Tabel 6. Modus, $d70_{\text{totaal}}$ en $d70_{\text{zand}}$ van de geïdentificeerde end-members.

	Modus (μm)	$d70_{\text{totaal}}$ (μm)	$d70_{\text{zand fractie}}$ (μm)
EM1	420	465.7	469.7
EM2	297	311.0	313.3
EM3	250	231.2	233.6
EM4	125	125.3	141.1
EM5	44.2	37.5	91.6

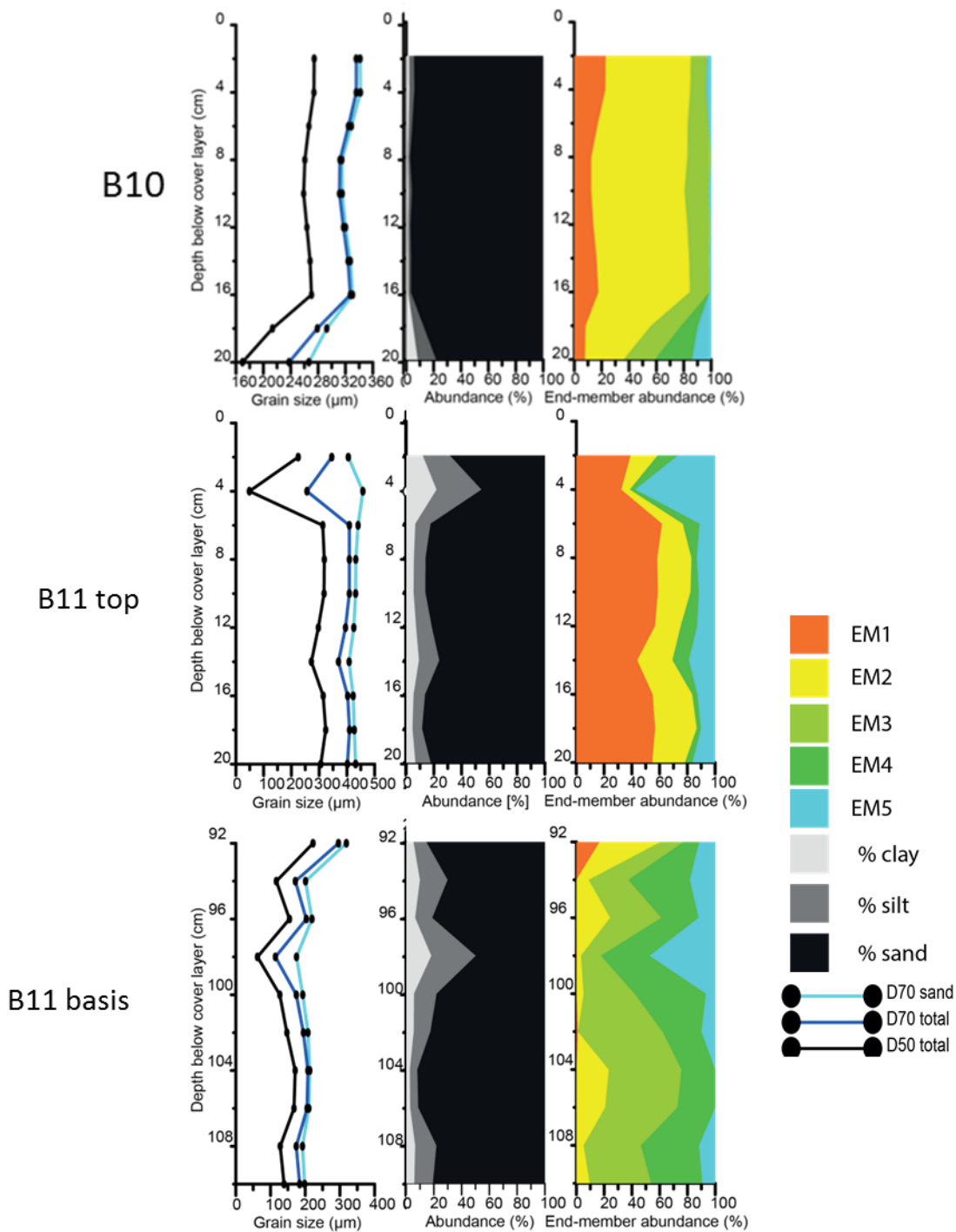
Nu de end-members zijn vastgesteld kunnen voor ieder boorprofiel de end-members worden geplote (Figuur 5.10; Figuur 5.11; Figuur 5.12). Een aantal boringen geeft een duidelijke fining-upward trend aan. In het bovenste monster kan wat zavel uit de deklaag zijn meebemonsterd. Daardoor komt EM5 erg sterk naar voren in dit bovenste interval. Deze fijne end-member is echter ook aanwezig in een aantal lagere intervallen binnen een aantal boringen (B1, B3, B4, B6, B7, B8, B9, B10 en B11). Dit betekent dat de fijnste populatie bestaande uit voornamelijk silt ook in de zandige trajecten vermengd zit. Per boring is het aandeel van de end-members zeer variabel: Boring B1 laat alleen EM2 t/m EM5 zien, terwijl boring B2 vooral EM1 t/m EM3 laat zien. In de meeste zandmonsters heeft EM2 de overhand. Alleen in boring B2 en B11-top overheerst EM1, terwijl in B11 basis EM3 overheerst. Het is dan ook geen verrassing dat de $d70$ van EM2 ook erg vergelijkbaar met de gemiddelde $d70$ van de totale monsterset (Tabel 5).



Figuur 5.10 Korrelgrootteanalyseresultaten per 2 cm intervallen per boring. De linker grafiek geeft de D50, d70 en d70_{zand} weer, de middelste grafiek de aandelen klei, silt en zand en de rechter grafiek de mate waarin de verschillende onderscheiden end-members vertegenwoordigd zijn.



Figuur 5.11 Korrelgrootteanalysesresultaten per 2 cm intervallen per boring. Linker grafiek geeft de D50, d70 en $d70_{sand}$ weer, de middelste grafiek de aandelen klei, silt en zand en de rechter grafiek de mate waarin de verschillende onderscheiden end-members vertegenwoordigd zijn.



Figuur 5.12 Korrelgrootteanalyse resultaten per 2 cm intervallen per boring. Linker grafiek geeft de D50, d70 en d70_{zand} weer, de middelste grafiek de aandelen klei, silt en zand en de rechter grafiek de mate waarin de verschillende onderscheiden end-members vertegenwoordigd zijn.

5.5 Discussie

Variatie in d70


De laterale variatie in d_{70} -waarden is groter dan de verticale variatie binnen 1 boring. Dit betekent dat een monster van 20 cm in veel gevallen behoort tot 1 afzonderlijke laag, of in ieder geval lagen die onder vrij vergelijkbare omstandigheden zijn afgezet. Deze 20cm komt van de dikte die hier bepaald is om te bemonsteren, mogelijk is de dikte van deze laag met vergelijkbare eigenschappen dikker. De boringen staan zo'n 10 à 15 m uit elkaar. Deze afstand is voldoende om zand te bemonsteren dat of tijdens een ander hoogwater is afgezet of tijdens hetzelfde hoogwater, maar dan net onder andere omstandigheden. De plaatselijke stroomsnelheid kan anders geweest zijn, evenals bijvoorbeeld de stromingsrichting, de waterdiepte of de mate van turbulentie. Dit leidt tot significante verschillen in d_{70} -waarden of de verhouding tussen de end-members. De verwachting is dat deze variatie altijd aanwezig is op deze schaal, gezien de complexiteit van de top van dergelijke afzettingen. De afzonderlijke lagen worden meestal fijner naar boven toe (Figuur 5.10; Figuur 5.11; Figuur 5.12). Dit past goed in het beeld dat de meeste monsters in een boring uit dezelfde laag komen.

End-members

De verdeling van de korrelgroottevariatie in vijf verschillende end-members ziet er overtuigend uit (M. Prins, pers.com.). De vraag is wat de end-members daadwerkelijk voorstellen. Vaak staan de end-members voor een transportproces dat zorgt voor de typische korrelgrootteverdeling per end-member. Omdat in deze studie rivierafzettingen zijn bemonsterd, kunnen de end-members waarschijnlijk gekoppeld worden aan transportprocessen (en afzettingsprocessen) in en langs rivieren, zoals rollend transport, saltatie (springend) transport, en gesuspendeerd (opgelost) transport. EM1, 2 en 3 worden hier geïnterpreteerd als rollend transport omdat de bijbehorende korrelgrootteverdeling vrij smal is en uit de grovere zandfracties bestaat. EM4 bestaat uit een iets fijnere fractie zand met een grote aandeel silt. Om deze reden wordt EM4 als salterend transport geïnterpreteerd. Tot slot bestaat EM5 uit de fijne korrelgrootten, en wordt daarom geïnterpreteerd als gesuspendeerd transport. Deze laatste fractie sedimenteert als het water nauwelijks meer stroomt na een hoog water in de komgebieden.

De interpretatie wordt wel bemoeilijkt omdat de afgezette korrelgrootte in sterke mate afhangt van de lokale stroomsnelheid die ook nog eens varieert in de tijd. Dit zou kunnen betekenen dat er in werkelijkheid een meer geleidelijk verloop is tussen de end-members. De end-members zijn immers slechts een statistische representatie van de werkelijk aanwezige korrelgrootten waarmee een goed beeld wordt verkregen van de aandelen van typische korrelgrootteverdelingen per monster. Het feit dat vijf end-members 90% van de korrelverdeling verklaren (Figuur 5.8) lijkt te betekenen dat de processen die voor de korrelgroottevariaties zorgen bij Tuijl toch leiden tot enkele typische korrelverdelingen. Dit zou kunnen komen doordat het sediment dat getransporteerd en afgezet kan worden resultaat is van een lange geschiedenis van sortering in rivierprocessen, en dus al is voorgesorteerd. Als er daarnaast toch een beperkt aantal processen van afzetting zijn in de top van een zandige rivierafzetting die resulteren in onderscheidbare korrelverdelingen, kan dit het duidelijke onderscheid in de end-members verklaren.

Een van de doelen van deze studie was de aanwezige korrelgroottevariatie op microschaal (mm – cm) te karakteriseren en bruikbaar te maken voor pipingberekeningen. Toegepast op de end-members zou dat bijvoorbeeld kunnen betekenen dat de d_{70} van de grofste end-memberpopulatie mogelijk de kans op piping bepalen, omdat de pipe de bijbehorende laagjes altijd tegen zou komen. Met de huidige dataset is dit echter niet aan te tonen. Wel is het aannemelijk dat de verschillende end-members overall in meer of mindere mate voorkomen aan de top van de kronkelwaard. Een veilige aanname lijkt dan dat de dominante end-member EM2, die nadrukkelijk aanwezig is in de meeste boringen, altijd aanwezig is en dat de d_{70} van deze end-member gebruikt kan worden als de representatieve waarde voor het pipingmodel op dit dijktraject. Omdat dit om de dominante end-member gaat, komt dit ook vrij goed overeen met de gemiddelde d_{70} in alle monsters. Dit is daarmee een onderbouwing

voor de keuze om in het WBI2017 met de gemiddelde d_{70} van de korrelgroottemonsters te werken in plaats van de 5 percentiel ondergrenswaarde.  De extra sterkte door korrelgrootteveranderingen wordt hierbij nog niet meegenomen.

Fijne fractie

In het grootste deel van de boringen zitten lutum en silt bijgemengd in de bemonsterde intervallen. Dit is in overeenstemming met andere studies waarin het kleigehalte van een kronkelwaard is onderzocht (e.g. Figuur 4.15; Berendsen, 1982). Deze fijne fractie heeft invloed op de eigenschappen van het zand, bijvoorbeeld door een lagere doorlatendheid. De gevolgen van bijgemengde lutum- en siltdeeltjes op het vormen van pipes is onbekend, omdat in de laboratoriumexperimenten de fijne fractie, inclusief silt, meestal is uitgezeefd.

Variatie dikte en samenstelling deklaag

De top van de zandlaag laat grote verschillen in diepteligging zien, met als gevolg dat ook de deklaag aanzienlijk in dikte varieert. Dit klopt met het beeld van het aanwezige reliëf binnen een kronkelwaard (Figuur 4.11). In totaal is er meer dan 1,6 m hoogteverschil in de top van het zand in één boorraai, en in boringen 10 m naast elkaar kan de top van de zandlaag 1 m in hoogte verschillen (e.g. B1 en B11). Lokaal kan ook een duidelijk dunnere deklaag aanwezig zijn, vooral bij locatie 1B. De gevonden deklaagdikte correspondeert niet met die uit de zanddieptekaart (Cohen et al., 2009). Dit is niet vreemd, aangezien de dichtstbijzijnde boringen van de Universiteit Utrecht op meer dan 300 m afstand liggen. Dit geeft aan dat dergelijke kaarten, zeker in gebieden met weinig data zoals hier, slechts indicatief gebruikt kunnen worden bij het inschatten van bijvoorbeeld de deklaagdikte.

In beide profielen zijn zandinschakelingen in de deklaag aanwezig, en klei-inschakelingen in het zand. De basis van de deklaag bestaat meestal uit zavel. Deze variaties zijn klassiek voor stroomgordelafzettingen en zullen invloed hebben op het proces van pipe-vorming. De variaties spelen zich af op de schaal van een kwelweg en zijn dus altijd aanwezig. Van deze complexiteiten wordt verwacht, en is deels al aangetoond in pilotproeven (zie Paragraaf 1.2), dat ze invloed hebben op de vorming van pipes. Ze zijn echter niet meegenomen bij het opstellen en ijken van de Rekenregel van Sellmeijer.

5.6 Conclusies

De hoge-resolutie variatie in korrelgrootte in de bovenste 20 cm van het zand onder de deklaag bij Tuil is onderzocht met behulp van laser-diffractiemetingen. Hiervoor is elke 2 cm van de 20 cm bemonsterd. Uit dit onderzoek komen de volgende waarnemingen naar voren:

- Er is veel variatie in deklaagdikte en de diepteligging van de top van het zandpakket.
- In de top van de zandlaag is de verticale variatie in korrelgrootte binnen 1 boring (<30 μm) veel kleiner dan de laterale variatie tussen boringen onderling (~250 μm).
- Ook op cm schaal is er geleidelijke variatie in de waarde van de d_{70} binnen dezelfde laag.
- In de meeste boringen is lutum en silt aanwezig in het beddingzand.
- De deklaag direct boven het beddingzand bestaat uit zavel.
- In de deklaag zijn ook zandintervallen aanwezig, met een dikte tot 0,5 m.

Er kan verwacht worden dat dergelijke variatie binnen beddingafzettingen op de schaal van dijklichamen en kwelwegen altijd voorkomt.

Het is niet haalbaar om deze variatie op een vergelijkbare manier als bij Tuil te kwantificeren voor het gehele rivierengebied. Dit is ook niet nodig. Op basis van dit onderzoek, aangevuld met vervolgonderzoek op meerdere locaties, kan de variatie globaal gekarakteriseerd worden en in een vervolgstap worden geïmplementeerd in een rekenregel. In deze karakterisatie zou bijvoorbeeld rekening gehouden moeten worden dat in het algemeen een afname van de korrelgrootte naar boven toe plaats vindt (fining-upward) in de top van beddingafzettingen, met grindig zand aan de basis en fijnzand met lutum bijmenging aan de top. Ook de diktevariatie van de deklaag, in de orde van 1,5 m over tientallen meters, zou meegenomen moeten worden, en de invloed van laminae en kleilaagjes. De huidige rekenregel van Sellmeijer houdt hier geen rekening mee, en geeft daarom een conservatieve inschatting van het kritieke verval. Het meenemen van deze effecten leidt tot een optimalisatie van het kritieke verval.

6 Discussie: gevolgen voor beoordeling op piping

In dit rapport wordt een beschouwing gegeven van de betrouwbaarheid van korrelgroottedata, en wordt de natuurlijke heterogeniteit die piping mogelijk beïnvloed op verschillende schalen uiteengezet. Uit deze analyses volgen een aantal consequenties voor pipingberekeningen.

6.1 Korrelgroottes

Uit de analyse van het onderzoek bij Westervoort volgt dat een aantal aspecten van grote invloed is op de uiteindelijke berekende korrelgrootteverdeling. De onzekerheid over de korrelgrootteverdeling is daarom groot. De aspecten betreffen:

- Door interpolaties tussen zeefmaten kunnen grote afwijkingen optreden tussen de geïnterpoleerde d_{70} en de werkelijke d_{70} . De afwijkingen kunnen oplopen tot vele tientallen μm . De mate van afwijking is afhankelijk van de hoeveelheid zeven met verschillende maasgrootte en hoe de maasgrootte is verdeeld over het totale korrelgroottebereik.
- Verschillende methoden kunnen verschillende korrelgrootteverdelingen genereren. Hierbij zijn vooral belangrijk:
 - o Voorbehandeling: wel of niet verwijderen van organische stof en kalk.
 - o Monstergrootte: hoe groot is het monster dat gemengd is.
 - o Sortering in de monsterzak: door beweging vindt binnen de zak segregatie plaats.
- Monsters die niet direct onder de deklaag zijn genomen zijn niet representatief voor piping en zullen vaak grover zijn dan de korrelgrootte direct onder de deklaag. Dit leidt in theorie tot onderschatting van de kans op piping.
- De d_{70} van de zandfractie verschilt van de d_{70} van de gehele korrelgrootteverdeling, het is niet altijd duidelijk welke waarde wordt gegeven. De d_{70} van de gehele fractie is kleiner dan die van alleen de zandfractie.

Deze aspecten zorgen ervoor dat het niet zinvol is om een model of rekenregel te voeden met een enkele d_{70} zonder rekening te houden met de onzekerheid. Binnen WBI 2017 wordt deze onzekerheid inmiddels verdisconteerd door te werken met een variatiecoëfficiënt van 12% rondom een gemiddelde d_{70} . Een andere werkwijze kan zijn om te gaan werken in klassen, zoals de NEN 5105 klassen voor de zandmediaan (Tabel 2: zand uiterst grof, zand zeer grof, zand matig grof, zand matig fijn, zand zeer fijn en zand uiterst fijn) of combinaties daarvan. Op deze manier kan beter met de onzekerheid in werkelijk aanwezige korrelgroottes, en de spreiding daarin, worden omgegaan.

Bij het opstellen van de rekenregel van Sellmeijer is gewerkt met voorgezeefd en homogeen zand om onder controleerbare omstandigheden proeven uit te voeren. Het gebruik van de d_{70} als parameter om de korrelgrootte te karakteriseren werkte hierbij goed. Bij natuurlijk afgezette zandlagen is de variatie in korrelgrootte veel groter dan van het zand dat bij de laboratoriumproeven gebruikt is. De d_{70} wordt dan een lastige parameter, omdat hij erg afhankelijk kan zijn van een gering aantal grove korrels. Bij een x aantal metingen van de korrelgrootteverdeling van een zandpakket kan de d_{70} daardoor een grote spreiding laten zien, ook al blijft de meest voorkomende korrelgrootte (modale korrelgrootte) hetzelfde. In dit laatste geval mag verwacht worden dat de kans op piping ook niet wezenlijk zal veranderen.

Daarnaast kunnen twee verschillende zandmonsters met verschillende sortering dezelfde d_{70} hebben, maar wel andere eigenschappen door een verschillende korrelverdeling. Ook voorbehandeling, monstergrootte, meettechnieken en interpolatie kunnen een grote invloed hebben op de berekende d_{70} . Parameters als de zandmediaan of de modale korrelgrootte zijn hier minder gevoelig voor. Het verdient daarom de voorkeur om deze of een andere meer generieke korrelgrootte parameter te gebruiken in rekenmodellen.

6.2 Microschaal heterogeniteit

Op microschaal bestaat heterogeniteit die altijd aanwezig is op de schaal van een kwelweg en dus de kans op piping beïnvloedt. Het is bijvoorbeeld bekend dat deze schaal invloed heeft op de hydraulische eigenschappen van zandlichamen (Brayshaw et al., 1996; Reading, 2003). Ook zijn er proeven uitgevoerd waarbij zand-in-laagjes met variërende korrelgrootte substantieel meer weerstand tegen piping bood dan homogeen zand (Van Beek et al., 2008; Negrinelli et al., 2016). Deze laagjes waren dikker (ordegrootte van centimeters) dan de millimeter dikke laminae die in het veld meestal aanwezig zijn.

In een poging deze microschaal heterogeniteit te karakteriseren zijn met behulp van end-member modellering bemonsterde beddingafzettingen ontmengd in 5 end-members. De gedachte achter de analyse was dat de verschillende end-members in een korrelgroottemonster gebruikt kunnen worden om de korrelgroottevariatie op mm en cm schaal te karakteriseren.

Van de end-members zijn er drie geïnterpreteerd als behorende tot rollend bodemtransport, één tot saltatie (springend) transport en één tot gesuspendeerd (zwevend) transport. In het huidig onderzoek is het echter niet aantoonbaar dat de variatie in korrelgrootte uit de verschillende end-members ook altijd aanwezig is in de kwelweg waar een pipe doorheen moet groeien. Was dat wel zo geweest, dan zouden de eigenschappen van de meest grove end-member mogelijk kunnen worden gebruikt als input voor pipingsommen. Deze fractie is dan immers (bijna) altijd aanwezig en daarmee de limiterende factor voor het doorgroeien van een pipe. Wel is duidelijk dat in het geval van het onderzoek bij Tuil het op één na grofste end-member in de meeste monsters nadrukkelijk aanwezig is. De d_{70} van deze dominante end-member is vergelijkbaar met de gemiddelde d_{70} van de monsters. Het aanwezig zijn van één dominante end-member, en daarmee korrelgrootteverdeling, kan gebruikt worden bij de schematisatie. De eigenschappen van deze end-member lijken dan een veilige keus als input voor pipingsommen, aangezien ze de bulk van de zanden representeert waar de kwelweg doorheen gaat. De overige populaties zijn in de monsters in meer of mindere mate aanwezig. Omdat de d_{70} van de dominante end-member vergelijkbaar is met de gemiddelde d_{70} van het onderzoek bij Tuil, zou dit in de praktijk kunnen betekenen dat de gemiddelde d_{70} van een groot aantal monsters een goede maat is voor pipingberekeningen, omdat deze bijna overal voorkomt. In dat geval wordt niet meegenomen dat de aanwezigheid van korrelgroottesprongen een extra versterkend effect heeft zoals besproken in Van Beek et al. (2008). Om dit effect mee te nemen zou een aanvullende factor moeten worden afgeleid, die het versterkende effect tussen korrelgroottesprongen mee neemt.

6.3 Mesoschaal heterogeniteit

Uit de proeftuin bij IJzendoorn (Arcadis, 2015; De Visser et al., 2016) en het hier beschreven onderzoek bij Tuil (Van de Ven, 2016) blijkt dat er op mesoschaal zeer veel ruimtelijke variatie is in korrelgroottes. Bij Tuil is de bovenste 20 cm onder de deklaag onderzocht in segmenten van 2 cm. Hieruit blijkt dat de korrelgroottevariatie per 20 cm in een boring veel minder is dan de verschillen tussen de boringen. In de boringen is vaak wel een lichte verfijning van korrelgroottes naar boven toe aanwezig. Dit suggereert dat op 1 boorlocatie eenzelfde afzettingseenheid (laag) is bemonsterd, maar dat op de verschillende boorlocaties

ook verschillende afzettingseenheden (lagen) zijn bemonsterd. De afzettingseenheden zijn dus onder andere omstandigheden afgezet, wellicht tijdens verschillende (hoogwater)events of binnen hetzelfde event, maar onder andere hydraulische omstandigheden of met ander bronmateriaal.

De dikte van de bovenste lagen in een beddingafzetting bedraagt enkele centimeters tot decimeters, en de ruimtelijke dimensies die daarbij horen zijn waarschijnlijk in de orde van enkele meters. Dit zou betekenen dat een kwelweg door veel verschillende lagen heen moet, met allen een andere korrelgrootteopbouw. Volgens Kanning (2012) ligt de representatieve d_{70} voor pipingberekeningen in de buurt van de gemiddelde d_{70} op de weg van de pipe naarmate de dimensies van de afzettingseenheden kleiner worden. Dit zou hier betekenen dat de gemiddelde d_{70} een goede schatting geeft.

In de top van de zandige beddingafzettingen is meestal klei en silt vermengd. Dit heeft invloed op de eigenschappen van het zand direct onder de deklaag. Het effect hiervan is nog niet gesimuleerd in laboratoriumexperimenten, aangezien in deze experimenten meestal geen fijne fractie gebruikt is.

De overgang van beddingafzettingen naar oeverafzettingen (deklaag) is meestal geleidelijk. In de top van de beddingafzettingen komen kleilaagjes voor, en de oeverafzettingen (deklaag) bestaan uit zandige of siltige klei en bevatten ingeschakelde zandlenzen. Ook zijn er variaties in de diepteligging van de basis van de deklaag: op de schaal van tientallen meters kan deze variatie 1 á 2 meter bedragen, op de schaal van meters kan deze tientallen centimeters zijn. De invloed van deze variatie wordt vooralsnog niet meegenomen in modellen.

6.4 Macroschaal heterogeniteit

Variaties op de schaal van kronkelwaarden en geulen kunnen wel gekarteerd worden. Uit Amerikaanse studies blijkt dat door naar de oriëntatie van kronkelwaardruggen te kijken hier met enig succes zelfs piping mee kan worden voorspeld (Glynn en Kuszmaul, 2010). Dit komt waarschijnlijk omdat loodrecht op de kronkelwaardruggen veel variatie in deklaagdikte en aanwezigheid van kleilaagjes aanwezig is, waardoor er een preferente stroming plaatsvindt parallel aan de kronkelwaardruggen. Bovendien is bovenop deze ruggen de deklaag ook dunner waardoor opbarsten makkelijker kan plaatsvinden. Uit AHN beelden kan aan de hand van de morfologie worden gekeken of deze kronkelwaardruggen herkenbaar zijn en wat de oriëntatie is. Ook kunnen de patronen van dikke en dunne deklagen met geofysisch onderzoek worden gekarteerd.

Over andersoortige beddingafzettingen zoals geleidelijke geulopvullingen met “plug bars” is weinig bekend. Om te bepalen of in deze afzettingen mogelijk een vergrote kans op piping kan optreden is recentelijk een promotieonderzoek aan de Universiteit Utrecht gestart.

6.5 Deltaschaal heterogeniteit

Op deltaschaal is een duidelijke stroomafwaartse verfijning waarneembaar in korrelgroottes direct onder de deklaag. Uiterst fijne zandmedianen zijn zeldzaam in het oosten, terwijl uiterst grove zandmedianen zeldzaam zijn in het westen. Enkele fijnkorrelige gebieden bovenstrooms en grofkorrelige gebieden benedenstrooms lijken wel geclusterd, wat mogelijk betekent dat er lokaal een bron met afwijkende korrelgroottes wordt aangesneden door de rivier. Hoewel de stroomafwaartse verfijning duidelijk zichtbaar is, kan deze trend niet direct gebruikt worden om lokaal de korrelgrootte-input voor pipingmodellen vast te stellen: er bestaat hiervoor te veel lokale variatie binnen de algemene trend

De breedte van de stroomgordels wordt stroomafwaarts steeds kleiner. Dit komt omdat de rivierbeddingen stroomafwaarts in dikke resistente klei- en veenpakketten zijn gevormd en de hoeveelheid geulen toeneemt. Opvallend is dat de kans op zandmeevoerende wellen ook sterk afneemt in stroomafwaartse richting. Stroomafwaarts van de uiterste oostelijke verbreding van Hollandveen zijn slechts 9 locaties van zandmeevoerende wellen bekend. Dit terwijl de zandmediaan wel afneemt wat de pipinggevoeligheid zou moeten vergroten. De oorzaak hiervoor is waarschijnlijk de aanwezigheid van smalle stroomgordels waar dijken in het verleden precies buiten geplaatst zijn: er is dus geen zand aanwezig onder de dijk. Bovendien zijn in dit gebied weinig oude, begraven zandbanen aanwezig die de huidige stroomgordel kruisen, waardoor er slechts een kleine kans bestaat op kortsluiting met diepere zandige pakketten.

7 Aanbevelingen

7.1 Proeftuinen


De huidige hoeveelheid gegevens om de heterogeniteit in korrelgrootte of doorlatendheid van rivierafzettingen te karakteriseren is te klein. Om tot een zinvolle karakterisatie te komen is een veelbelovende aanpak het bemonsteren van proeftuinen: in een proefveld met hoge boordichtheid relevante parameters verzamelen. Als deze proeftuinen representatief kunnen worden geacht voor een bepaald type rivierafzetting in een deel van de Nederlandse Rijn-Maasdelta kan deze schematisatie worden gebruikt als basis voor formules, waarbij de variaties in korrelgrootte die een pipe tegen komt in de kwelweg zijn meegenomen. Voorwaarde bij proeftuinen is wel dat de d_{70} bepaling nauwkeurig gebeurt met een goede zeefserie of met laser-diffractiemetingen.

Echter, de grote vraag die nog open staat wat betreft korrelgrootteheterogeniteit in de top van beddingafzettingen is de ruimtelijke dimensie van eenheden met een vergelijkbare korrelgrootteverdeling. In proeftuinen met boringen op 5 meter afstand wordt een grote horizontale variatie aangetroffen, maar wat de werkelijke ruimtelijke schaal van de eenheden is blijft de vraag. Als men werkelijk kan aantonen dat om de x meter een andere unit met een andere korrelgrootte in een kwelweg zit, kan dit getest worden en meegenomen worden in een pipingmodel. Kanning (2012) heeft met een modelstudie al aangetoond dat hoe kleiner de eenheden met een variërende korrelgrootte zijn, hoe groter de kans is dat de kwelweg door eenheden met grovere korrels moet gaan en dat de gemiddelde d_{70} dan de representatieve waarde is. Dit geeft dus sterkte ten opzichte van de huidige praktijk waarin een d_{70} -ondergrens gebruikt wordt als invoer voor de modellen.

Een manier om te bepalen wat de werkelijke variatie in korrelgrootte is in een kwelweg en of bijvoorbeeld de gemiddelde d_{70} een representatieve parameter is voor de bepaling van pipinggevoeligheid is het bemonsteren van continue ontsluitingen van een zandlichaam in plaats van met boringen. Een eenvoudige methode is het bemonsteren in een sleuf die door de deklaag snijdt tot in de top van relevante afzettingen. In de wand van de sleuf kan de daadwerkelijke aanwezige heterogeniteit worden onderzocht en kunnen gericht monsters worden genomen, bijvoorbeeld om de meter of halve meter. Dit kan de resultaten van boringen in een proeftuin in context plaatsen en de discussie over het bestaan van fijne banen ("zebra's") of continu afgewisselde korrelgrootten ("damborden"), of een vrij constante matrix met daarin fijnere en grovere gebieden ("panterprint") beslechten.


Tijdens bijvoorbeeld uiterwaardvergravingen wordt regelmatig de top van de beddingafzettingen blootgelegd. Door op deze momenten gericht onderzoek te doen naar de korrelgroottevariatie kan veel belangrijke kennis worden opgedaan over de opbouw van het zandlichaam onder de dijk en kan de heterogeniteit gekarakteriseerd worden. Dit is nodig om een stap te maken van 'ja, heterogeniteit levert waarschijnlijk sterkte op', naar een werkwijze waarbij deze heterogeniteit ook daadwerkelijk gekarakteriseerd is en dus gebruikt kan worden in modellen die de kans op piping inschatten.

Bij proeftuinen en proefsleuven moet wel worden gerealiseerd dat ze hooguit voor een deel van de rivierafzettingen een karakterisatie opleveren, en dat het dus vaak herhaald moet worden in verschillende gebieden om tot een zinnige karakterisatie te komen. Dit lijkt echter de beste mogelijkheid als er voor wordt gekozen om de extra sterkte die heterogeniteit biedt te gelde te maken.


Een andere mogelijke aanpak is om het laboratorium mee naar het veld te nemen, en in-situ proeven uit te voeren. Dit houdt in dat in een natuurlijke afzetting van een deklaag op beddingafzettingen piping wordt geïnitieerd door het opzetten van een verschil in waterdruk. Bijvoorbeeld bij een zomerdijk of een oude dijk die moet worden verwijderd. Op deze manier kan de werkelijke sterkte van zandlichamen in het veld worden getest en vergeleken met de theorie. Na de test kan de proef voorzichtig worden afgegraven om te onderzoeken of de werking van het proces in het veld vergelijkbaar is met het proces in het laboratorium. Dit vereist wel de lokale opzet van verval en daarmee het afsluiten van het te beproeven gebied met bijvoorbeeld damwanden of het wachten op een hoogwater (in geval van een zomerkade). 

7.2 Protocol voor het nemen van korrelgroottemonsters


In de huidige praktijk wordt in de gedetailleerde toets de ondergrenswaarde van de equivalente d_{70} met een variatiecoëfficiënt van 0.12 gebruikt voor de beoordeling van de pipinggevoeligheid. In de toets op maat kunnen de korrelgroottewaarden worden verscherpt met aanvullende metingen. Voor deze metingen is niet voorgeschreven hoe ze moeten worden gemeten, welke zeefgrootten moeten worden gebruikt, welke voorbehandelingsmethoden moeten worden toegepast en van welke diepte onder deklaag de monsters moeten komen. Er rolt wel altijd “een” d_{70} waarde uit die vervolgens bepalend is voor de uiteindelijk berekende kans op piping.

Om beheerders, grondlaboratoria en ingenieursbureaus te helpen om een betrouwbare set korrelgroottemetingen op te bouwen die geschikt is voor de toepassing in formules kan een protocol helpen. Beheerders weten  aan wat ze moeten vragen, laboratoria weten wat, hoe en waarom ze moeten meten en ingenieursbureaus kunnen deze gegevens met vertrouwen toepassen.

7.3 Rekenmodellen

In dit rapport wordt op verschillende schalen de heterogeniteit van beddingzettingen en de effecten daarvan op de pipinggevoeligheid beschreven. De conclusie is dat een belangrijk deel van deze heterogeniteit die altijd aanwezig is, niet kan worden gekarteerd, maar wel beter kan worden gekarakteriseerd op basis van proeftuinen, geologische kennis en afgeleide karakterisatie-parameters. De huidige rekenregel, Sellmeijer, is gebaseerd op gecontroleerde laboratoriumproeven en houdt rekening met korrelevenwichten op zeer gedetailleerde schaal. Het houdt echter geen rekening met heterogeniteit op de verschillende schalen en is derhalve niet gevalideerd voor omstandigheden zoals deze in het veld voorkomen. Zo is er geen fijne fractie aanwezig in de experimenten, is het zand gehomogeniseerd en is de deklaag horizontaal en ondoorlatend. In D-Geo Flow is het wel mogelijk om met  ere doorlatende lagen te modelleren. De uitgangspunten voor de rekenregel zijn conservatief, maar niet optimaal. Daarnaast vraagt het Sellmeijermodel een exact getal voor de inputparameter d_{70} , dit terwijl in het veld deze parameter sterk varieert over korte afstand. De nu gehanteerde praktische oplossing is om een equivalente d_{70} te gebruiken, die afgeleid is van VNK2-gegevens, en een variatiecoëfficiënt van 12% gebaseerd op de typische spreiding van de modus van de korrelgrootten in rivierafzettingen. Uit dit onderzoek blijkt dat het niet of nauwelijks haalbaar is voor waterkeringbeheerders om hier een betere waarde voor te bepalen, gezien de onzekerheid rondom de bepaling en de spreiding in het veld.

De verwachting bestaat dat de heterogeniteit op micro- en mesoschaal en de natuurlijke geologische opbouw het pipingproces hindert. Dit zou betekenen dat het huidige rekenmodel tot (te) conservatieve uitkomsten leidt, omdat deze uitgaat van een homogene ondergrond. De uitkomsten van het huidige model moeten daarom als indicatief worden beschouwd voor de pipinggevoeligheid, met meer conservatisme naarmate de variatie in zandeigenschappen groter is. Een hoge faalkans in een gebied met veel variatie betekent dat de locatie relatief

pipingevoelig is. Een lage faalka  betekent dat de locatie vrijwel zeker niet pipingevoelig is.

Een voor de hand liggende stap lijkt om de invloed van de micro- en mesoschaal heterogeniteit op het pipingproces te onderzoeken en het proces te modelleren. Hoewel de in het veld aanwezige heterogeniteit nooit exact vastgesteld kan worden, kan deze wel gekarakteriseerd worden, en de onzekerheden gekwantificeerd. Deze karakterisatie kan gebruikt worden om met kennis van de lokale opbouw van de ondergrond tot een rekenresultaat te komen. Het model zou zowel onder laboratorium- als onder veldomstandigheden gevalideerd moeten worden, daarbij ook gebruik makend van geavanceerde 3D-grondwatermodellen om bijvoorbeeld golvende deklagen en wel/geen kortsluiting Holoceen/Pleistoceen zand te onderzoeken. Het grondwatermodel zou ook gevoed moeten worden door informatie uit bijvoorbeeld peilbuizen. Veel van deze stappen zijn al mogelijk in het modelleerprogramma D-Geo Flow en kunnen in de toets op maat worden meegenomen.

Rekenkundig gezien zal er rekening gehouden moeten worden met grofheid en variatie van de korrelgrootte van het zand. Een equivalente d_{70} waarde is daarvoor wellicht niet voldoende. Ook het bepalen van de d_{70} in het veld voor een specifieke locatie zal daarbij niet zinvol zijn, omdat dit geen eenduidig beeld geeft. Het zal van belang zijn om de ondergrond te karakteriseren, rekening houdend met te verwachten heterogeniteit en korrelgrootte, en het effect hiervan te kwantificeren voor de weerstand tegen piping. Deze karakterisatie is mogelijk en de meest geschikte methode hiervoor zou onderzoek zijn in sleuven in beddingafzettingen in een uiterwaard (zie hierboven).

7.4 Beslisregels

Op basis van het karakteriseren van de ondergrond kunnen ook beslisregels opgesteld worden die gebieden uitsluiten van piping of waarbinnen een andere aanpak voor de detail beoordeling of toets-op-maat gevolgd zou moeten worden. Voor rivierafzettingen kan hierbij gedacht worden aan een minimaal benodigde deklaagdikte, wel/niet kortsluiting tussen Holoceen en Pleistoceen zand en het wel/niet aanwezig zijn van Hollandveen / de Laag van Wijchen / Formatie van Naaldwijk. Voor het voorbeeld van Hollandveen zou voor afgekeurde trajecten een detail toets of toets-op-maat met extra aandacht en met aanvullende data wellicht veel kunnen opleveren omdat de pipingevoelige locaties waarschijnlijk vrij goed kunnen worden afgebakend.

Een ander voorbeeld van een beslisregel kan zijn het bepalen van situaties waarbij piping optreedt, afhankelijk van de aangetroffen korrelgroottes. De gevoeligheid voor piping wordt kleiner naarmate de korrelgrootte groter is en de doorlatendheid kleiner. Gegradeerde afzettingen zijn daardoor niet zo gevoelig voor piping. De modellen zijn nog niet geschikt voor een breed bereik van korrelgroottes. Er is experimenteel vastgesteld dat er ook bij grindafzettingen piping kan optreden bij relatief lage gradiënten (Robbins et al., submitted) en alleen korrelgrootte zegt dus niet voldoende. In gebieden met zeer grof zand worden niet veel zandmeevoerende wellen waargenomen: veldonderzoek in combinatie met nader onderzoek om aan te tonen in welk bereik van korrelgroottes rekenregels toepasbaar zijn, zou hier meer duidelijkheid over kunnen geven.

7.5 Uitbreiding onderzoek

In dit rapport ligt de nadruk op de beddingafzettingen in het centrale Rijn-Maasdal. De omstandigheden in bijvoorbeeld het IJsseldal, het Maasdal in Limburg en in het gebied dat onder invloed staat van het getij zijn anders en de bevindingen uit het huidige onderzoek kunnen niet 1-op-1 vertaald worden naar deze gebieden. Een soortgelijke aanpak als beschreven in dit rapport zou ook voor dergelijke gebieden uitgevoerd kunnen worden. Dit zou uiteindelijk moeten leiden tot een rekenregel die rekening houdt met de verschillen in heterogeniteit in de genoemde gebieden. Dit is in lijn met voorgestelde plannen (Van Beek et al., 2016) en zou moeten leiden tot een rekenregel die recht doet aan de onzekerheden die bestaan in veldsituaties en leidt tot een betrouwbaardere inschatting van de kans op falen door piping.

7.6 Praktische adviezen voor beoordelingspraktijk

Naast de aanbevelingen en richtingen voor verder onderzoek volgen ook enkele concrete adviezen voor de beoordelingspraktijk.

7.6.1 Zeefmaten

Uit deze studie volgt dat bij het gebruik van standaard zeefmaten grote afwijkingen kunnen ontstaan in de geïnterpoleerde korrelgroottes omdat de meest aanwezige korrelgroottefracties tussen zeefmaten in vallen. Om een nauwkeurige korrelgrootteverdeling uit zeefmetingen te verkrijgen wordt daarom geadviseerd om extra zeven te plaatsen. Deze extra zeeffracties zijn afhankelijk van de beschreven korrelgrootte van het zand. Omdat in de fijne klassen geen standaard zeefdiameters bestaan is het aan te raden deze alleen met laser-diffractiemetingen te bepalen:

Naast de standaardzeven (Tabel 1) zouden de volgende bestaande zeefdiameters (μm) moeten worden bijgeplaatst om (bijvoorbeeld) de d_{70} beter te kunnen bepalen, afhankelijk van de beschreven zandklasse:

Silt: 38, 53

Zand uiterst fijn: 63, 75, 90

Zand zeer fijn: 106, **125**, 150

Zand matig fijn: 150, 180, 212

Zand matig grof: 212, **250**, 300

Zand zeer grof: 300, 355, 425

Zand uiterst grof: 425, **500**, 600, 710, 800, 850, 900, **1000**, **1400**, **2000**

7.6.2 Monsternamen

Monsterdiepte

Korrelgroottemonsters die worden gebruikt bij de beoordeling van de pipinggevoeligheid zouden moeten worden genomen uit de bovenste 20 cm onder de deklaag. Dit is het niveau waarin piping plaatsvindt volgens de theorie. Bovendien laat deze studie zien dat de korrelgroottes in de eerste 20 cm vrij constant zijn. Deze diepte waarover de korrelgroottes vrij constant is kan meer dan 20 cm bedragen, dit is echter niet onderzocht in deze studie en daarom wordt hier 20cm aangehouden. In verband met het fijner worden van riviersedimenten naar boven toe zijn korrelgroottemonsters die dieper zijn genomen dan de bovenste 20 cm niet representatief voor het zand waarin de pipe groeit en zouden niet meegenomen moeten worden bij pipingberekeningen.

Monstergrootte

Een nadeel van zeefmetingen is de relatief grote monstergrootte, waardoor mogelijk lagen bemonsterd worden die afgezet zijn onder andere omstandigheden en dus andere eigenschappen hebben. In deze studie is aangetoond dat de eigenschappen van de bovenste 20 cm van de pipinggevoelige laag vrij constant zijn. Om deze redenen zouden zeefmonsters verzameld uit dit niveau voldoende nauwkeurigheid opleveren.

Monsterlocatie

Om een goed idee van de korrelgroottevariatie onder een dijk te krijgen worden meerdere korrelgroottemonsters uit de buurt gebruikt. Het is belangrijk dat deze monsters in hetzelfde type afzetting (en zelfde niveau) zijn gezet als de relevante zandbaan onder de dijk. Het mengen van willekeurige zandmonsters uit de omgeving leidt er vaak toe dat de spreiding in d_{70} heel groot wordt en dat er uiteindelijk een d_{70} gebruikt wordt die niet representatief is voor de zandbaan.

8 Referenties

Allen, 1970. A quantitative model of grain size and sedimentary structures in lateral deposits. *Geological journal*, 7, 1, p129-146

Arcadis, 2015. POV piping “pipingonderzoek dijkkring 43, D70 en KD bepaling” Resultaten grondonderzoek en analyses. Een samenwerking van Arcadis en Waterschap Rivierenland. Arcadis rapport C03011.000275.0400.

Van Beek, V.M., Koelewijn, A., Kruse, G., Sellmeijer, H., Barends, F., 2008. Piping phenomena in heterogeneous sands – experiments and simulations. Fourth International Conference on Scour and Erosion 2008

Van Beek, V.M., 2015. Backward erosion piping, initiation and progression. PhD Thesis, TU Delft.

Van Beek, V. M., Wiersma, A.P., Van Esch, J. 2017. Invloed van micro-schaal laminae op het pipingproces. Deltares rapport in opdracht van POV piping. Concept.

Berendsen, H.J.A., 1982. De genese van het landschap in het zuiden van de provincie Utrecht, een fysisch-geografische studie. Dissertatie, Utrechtse Geografische Studies 25: 256 pp.

Berendsen, H.J.A. & E. Stouthamer (2000), Late Weichselian and Holocene palaeogeography of the Rhine-Meuse delta (The Netherlands). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 161 (3/4), p. 311-335.

Berendsen, H.J.A., 2004. De vorming van het land. Inleiding in de geologie en geomorfologie. Uitgeverij Van Gorcum.

Beuselinck, L., Govers, G., Poesen, J., Degraer, G., and Froyen, L., 1998. Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method, *Catena*, 32, 193–208, 1998

Blott, S. J., & Pye, K. (2001). Gradistat: a grain-size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms Earth Surf. Process. Landforms*, 26, 1237–1248. <http://doi.org/10.1002/esp.261>

Brayshaw A.C., Davies, G.W., Corbett, P.W.M., 1996. Depositional controls on primary permeability and porosity at the bedform scale in fluvial reservoir sandstones. In: Carling, P.A., & Dawson, M.R. (eds.). *Advances in Fluvial Dynamics and Stratigraphy*. Wiley, Chichester. Pp 374-394

Bridge, J.S. (1993) The interaction between channel geometry, water flow, sediment transport and deposition in braided rivers. In: *Braided Rivers*. Geological society special publication, 75,13.

Bridge, J.S. and Best, J.L., 1997. Preservation of planar laminae arising from low-relief bed waves migrating over aggrading plane beds: Comparison of experimental data with Theory. *Sedimentology*, 44, 253-262.

Bridge, J.S., Tye, R.S., 2000. Interpreting the Dimensions of Ancient Fluvial Channel Bars, Channels, and Channel Belts from Wireline-Logs and Cores. *AAPG Bulletin*, V. 84, No. 8, p1205-1228.

Bridge, J.S., 2003. *Rivers and Floodplains: Forms, Processes, and Sedimentary Record*. ISBN: 978-0-632-06489-2. 504 pages. April 2003, Wiley-Blackwell publishing

Buurman, P., Pape, T., Reijneveld, J. A., de Jong, F., & van Gelder, E. (2001). Laser-diffraction and pipette-method grain sizing of Dutch sediments: correlations for fine fractions of marine, fluvial, and loess samples. *Netherlands Journal of Geosciences*, (2).

Cheel, R., 2002. *Introduction to clastic sedimentology*. brock university.

Cheetham, M.D., Keene, A.F., Bush, R.T., Sullivan, L.A. and Erskine, W.D. 2008. A comparison of grain-size analysis methods for sand-dominated fluvial sediments. *Sedimentology*, 55, 6, 1905-1913. Doi: 10.1111/j.1365-3091.2008.00972.x

Cohen, K.M. en Hijma, M.P., 2013. The transgressive Early-Middle Holocene boundary – the case for a GSSP at Rotterdam, Rhine Delta, North Sea Basin. *Ciencias da Terra, Volume Especial 7*, 148-149.

Cohen, K. M., Stouthamer, E., Hoek, W. Z., Berendsen, H. J. A., & Kempen, H. F. J. (2009). *Zand in banen : zanddieptekaarten van het Rivierengebied en het IJsseldal in de provincies Gelderland en Overijssel*. Utrecht University.

Cohen, K.M., Stouthamer, E., 2012 *Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta*. DANS. <https://doi.org/10.17026/dans-x7g-sjtw>

Das, D. 2016. Vertical sequences of Lithofacies in point bar and natural levee deposits, Tons River, Allahabad, U.P., India. *International journal of environmental sciences* 6, 5. P. 746-757. doi: 10.6088/ijes.6070

Ekeland, A. 2007. *Sedimentology and Geomodelling of Small Scale Fluvial Architecture from the Lourinha Fm., Central Portugal*. MSc. Thesis. University of Bergen.

Erkens, G., Toonen, W.H.J., Cohen, K.M., Prins, M.A., 2013. Unravelling mixed sediment signals in the floodplains of the Rhine catchment using end member modelling of grain size distributions. *Proceedings ICFS 2013 Leeds*

Eshel, G., G.J. Levy, U. Mingelgrin, and M.J. Singer. 2004. Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:736–743. doi:10.2136/sssaj2004.0736

Förster, U, Van den Ham, G., Calle, E., Kruse, G., 2012. *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen*. Deltares rapport 1202123-003 opgesteld voor Rijkswaterstaat.

Frings, R.M., 2007. *From gravel to sand. Downstream fining of bed sediments in the lower river Rhine*. PhD thesis, Universiteit Utrecht.

Ghazi en Mountney, 2012. Petrographic composition, sedimentary structures and palaeocurrent analysis in Northern Gondwana: The Lower Permian Warchha Sandstone of the Salt Range, Pakistan. *Journal of Asian Earth Sciences* Volume 59, 1, 185-207

Glynn, M.E. and Kuszmaul, J., 2010. "Prediction of Piping Erosion Along Middle Mississippi River Levees - An Empirical Model." ERDC/GSL TR-04-12, USACE, Engineering Research and Development Center, Vicksburg, MS.

Gouw, M., 2007. Alluvial architecture of the Holocene Rhine-Meuse delta (The Netherlands) and the Lower Mississippi Valley (U.S.A.). PhD Thesis, Utrecht University.

Gouw, M.J.P. en Berendsen, H.J.A., 2007. Variability of Channel-Belt Dimensions and the Consequences for Alluvial Architecture: Observations from the Holocene Rhine–Meuse Delta (The Netherlands) and Lower Mississippi Valley (U.S.A.). *Journal of sedimentary research*, 87, 8. DOI: 10.2110/jsr.2007.013

Heintz, J. and Aigner, T., 2003. Hierarchical dynamic stratigraphy in various Quaternary gravel deposits, Rhine glacier area (SW Germany): implications for hydrostratigraphy. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* (2003) 92:923–938 DOI 10.1007/s00531-003-0359-2

Heslop, D., von Dobeneck, T., & Höcker, M. (2007). Using non-negative matrix factorization in the "unmixing" of diffuse reflectance spectra. *Marine Geology*, 241(1), 63–78. <http://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.03.004>

Hornung, J. en Aigner, T. 1999. Reservoir and Aquifer Characterization of Fluvial Architectural Elements: Stubensandstein, Upper Triassic, Southwest Germany. *Sedimentary Geology* 129(3):215-280. DOI: 10.1016/S0037-0738(99)00103-7

Jonkers, L., Prins, M. A., Brummer, G.-J. A., Konert, M., & Lougheed, B. C., 2009. Experimental insights into laser-diffraction particle sizing of fine-grained sediments for use in palaeoceanography. *Sedimentology*, 56(7), 2192–2206. <http://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2009.01076.x>

Kanning, W., 2012. The weakest link – spatial variability in the piping failure mechanism of dikes. PhD Thesis, TU Delft.

Kleinbans, M.G., Cohen, K.M., Hoekstra, J., IJmker, J.M., 2011. Evolution of a bifurcation in a meandering river with adjustable channel widths, Rhine delta apex, The Netherlands. *Earth Surf. Process. Landforms* 36, 2011–2027.

Konert, M., & Vandenberghe, J., 1997. Comparison of laser grain-size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology*, 44(3), 523–535. <http://doi.org/10.1046/j.1365-3091.1997.d01-38.x>

Miall, A.D., 1985. Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-science reviews*, 22, 4, 261-308.

Miall, A.D., 2014. *Fluvial depositional systems*. Springer. ISBN 978-3-319-00665-9

Negrinelli, G., Van Beek, V.M., Ranzi, R., 2016. Experimental and numerical investigation of backward erosion piping in heterogeneous sands. *Scour and Erosion – Harris, Whitehouse & Moxon (Eds)*. Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02979-8

Prins, M. , Postma, G., & Weltje, G., 2000. Controls on terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the late Quaternary: the Makran continental slope. *Marine Geology*, 169(3), 351–371. [http://doi.org/10.1016/S0025-3227\(00\)00087-6](http://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00087-6)

Ramaswamy, V. and Rao, P.S., 2006. Grain Size Analysis of Sediments from the Northern Andaman Sea: Comparison of Laser Diffraction and Sieve-Pipette Techniques. *Journal of Coastal Research* 22, 4. P1000-1009.

Reading, H.G. 2003. *Sedimentary Environments: Process, Facies and Stratigraphy*. 688 pages. Blackwell publishing.

Reesink, A.J.H., Bridge, J.S., 2007. Influence of superimposed bedforms and flow unsteadiness on formation of cross strata in dunes and unit bars. *Sedimentary geology* 202, 281-296. doi:10.1016/j.sedgeo.2007.02.005

Reineck H.-E., en Singh, I.B., 1973. *Depositional Sedimentary Environments With Reference to Terrigenous Clastics*. ISBN: 978-3-540-07377-2. Springer books.

Robbins B.A., Stephens, I.J., Leavell, D.A., Lopez-Soto, J.F. en Montalvo-Bartolomei, A.M., submitted. Laboratory Piping Tests on Fine Gravel. Submitted naar *Canadian Geotechnical Journal*.

Semmens, S. 2016. An examination of the impact of the natural environment on levee sustainability. MSc thesis, Colorado School of Mines.

Sellmeijer, J.B., 1988. On the mechanism of piping under impervious structures. Proefschrift, TU Delft.

Sellmeijer, H., de la Cruz, J. L., van Beek, V. M., & Knoeff, H., 2011. Fine-tuning of the backward erosion piping model through small-scale, medium-scale and IJkdijk experiments. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15(8), 1139–1154. <http://doi.org/10.1080/19648189.2011.9714845>

Stafleu, J., Maljers, D., Gunnink, J.L., Menkovic, A. & Busschers, F.S., 2011. 3D modelling of the shallow subsurface of Zeeland, the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw* 90 - 4, p. 293-310.

Di Stefano, C., Ferro, V., Mirabile, S. 2010. Comparison between grain-size analyses using laser diffraction and sedimentation methods. *Biosystems Engineering* 106, 205–215. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2010.03.013

Schematiseringshandleiding piping, WBI 2017. 2017. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.

Stouthamer, E. Cohen, K., Hoek, W., 2015. *De vorming van het land*. Geologie en geomorfologie Perspectief Uitgevers, 7e geheel herziene druk 2015. ISBN 978 94 91269 11 0

Toonen, W.H.J., Kleinhans, M.G., Cohen, K.M., 2012. Sedimentary architecture of abandoned channel fills. *Earth Surf. Process. Landforms* 37, 459–472.

Toonen, W. H. J., Winkels, T. G., Cohen, K. M., Prins, M. A., & Middelkoop, H., 2015. Lower Rhine historical flood magnitudes of the last 450years reproduced from grain-size measurements of flood deposits using End Member Modelling. *CATENA*, 130, 69–81. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.004>USACE, 1956;

Van de Ven, C. 2016. Characterization of grain-size heterogeneity in Dutch fluvial sand deposits using laser-diffraction measurements, and the implications. MSc thesis. Universiteit Utrecht.

De Visser, M.M., Kanning, W., Koopmans, R., Niemeijer, J., 2015. Determination of Spatial Variability in d70 Grain Size Values Using High Density Site Measurements. *Geotechnical Safety and Risk V*, T. Schweckendiek et al. (Eds). doi:10.3233/978-1-61499-580-7-215

Weltje, G.J. 1997. End-member modeling of compositional data: Numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem. *Mathematical geology* 29, 4, 503-549.

Wen, B., A. Aydin, and N.S. Duzgoren-Aydin. 2002. A comparative study of particle size analyses by sieve-hydrometer and laser diffraction methods. *Geotechnical Testing J.* 25:434–442

Wiersma, 2015. Inventarisatie van wielen en (zandmeevoerende) wellen in Nederland. Deltares project in opdracht van Rijkswaterstaat.

Wolff, T.F., 2002. Performance of Levee Underseepage Controls: A Critical Review. ERDC/GSL TR-02-19 US Army Corps of Engineers report.

USACE, 1956. Investigation of underseepage and its control. Lower Mississippi river levees. Technical memorandum no. 3-424. Prepared for The President, Mississippi river commission corps of engineers by waterways experiment station, Vicksburg, Mississippi.