

Getijdenafzettingen en piping: een quickscan

Karakterisatie, inventarisatie en demonstratie



Getijdenafzettingen en piping: een quickscan

Karakteristatie, inventarisatie en demonstratie

Marc Hijma
Albert Oost

11202560-012

Titel

Getijdenafzettingen en piping: een quickscan

Project

11202560-012

Kenmerk

11202560-012-GEO-0001

Pagina's

79

Samenvatting

De pipingproeven die aan de basis van de rekenregel van Sellmeijer liggen zijn vrijwel altijd uitgevoerd met zand zonder de fractie $<63 \mu\text{m}$ (lutum en silt) en met een smalle korrelgrootteverdeling (homogeen zand). Daarnaast is het zand van origine meestal afgezet door rivieren. Rivierzand is sterk afwijkend van het zand dat afgezet wordt in getijdengebieden: dat zand bevat in de regel relatief veel lutum- en siltdeeltjes. De vraag die dan rijst is of de rekenregel ook geldig is voor getijdenzand en ook toegepast kan worden in gebieden met getijdenafzettingen onder de dijken (Zeeland, Zuid- en Noord-Holland, Friesland, Groningen). Deze vraag rijst des te meer door het feit dat in gebieden met getijdenafzettingen er zeer weinig zandmeevoerende wellen zijn waargenomen (<10 voor heel Nederland) en in gebieden met rivierafzettingen juist zeer veel (>200 voor heel Nederland).

Deze quickscan geeft een karakterisatie van getijdenafzettingen, inventariseert het voorkomen van zandmeevoerende wellen in getijdenafzettingen en eerdere relevante pipingproeven en demonstreert piping in getijdenzand door middel van kleine schaalproeven. Het onderzoek draaide om het beantwoorden van drie vragen:

1) Is getijdenzand minder pipinggevoelig dan rivierzand?

Volmondig ja. Op basis van de kleine schaalproeven kan gesteld worden dat getijdenzand aantoonbaar sterker is dan het zand gebruikt voor het ontwikkelen van het model van Sellmeijer. Bij proeven zonder kleilagen lag het kritieke verval gemiddeld 100% hoger dan het berekende kritieke verval, bij een proef met 1 kleilaag 50% hoger, en bij een proef met 2 kleilagen zelfs 650%.

2) Zo ja, waardoor komt dit?

In het geval van de aanwezigheid van kleilagen speelt uiteraard de fysieke barrière die deze vormen voor het doorstromen van water en het doorgroeien van de pipe een belangrijke rol. In het geval van getijdenzand zonder kleilagen, maar met een duidelijke klei- en siltfractie, zijn er meerdere factoren die een rol spelen. Ten eerste is het model van Sellmeijer gekalibreerd op pipingproeven zonder een fijne fractie, waarbij impliciet ook een korrelgrootte-doorlatendheidsrelatie in zal zitten. In het geval van de aanwezigheid van een fijne fractie zal deze impliciete relatie anders zijn (lagere doorlatendheid dan verwacht), waardoor er een onderschatting van het kritieke verval op zal treden. Een tweede effect is het transport van de fijne fractie door het materiaal richting het uittreepunt, waardoor rondom het uittreepunt mogelijk verstopping optreedt met lagere doorlatendheden als gevolg. De belangrijkste verklaring lijkt echter te liggen in de extra sterkte die ontstaat door fysische (tussen lutumdeeltjes) en biologische (biofilms) cohesie. Deze sterkte wordt groter met toenemende saliniteit.

3) Zo ja, hoe kan dit meegenomen worden bij de beoordeling?

Dit kan op verschillende manieren. Uiteindelijk zal het waarschijnlijk wenselijk zijn om specifiek voor getijdenafzettingen een pipingmodel te hebben. De huidige dataset van 5 proeven is hiervoor echter nog te klein. In dit pipingmodel zal naar verwachting het percentage fijne fractie (nog te bezien of dit inclusief silt is of alleen inclusief de cohesieve fractie) een belangrijke rol gaan spelen. Op de kortere termijn zijn meerdere acties mogelijk. Gedacht kan worden aan het gebruik van een factor die afgeleid wordt uit de gedane proeven, waarbij wellicht al voor de verschillende WBI-SOS eenheden andere factoren worden ingevoerd. Er kunnen ook

Titel

Getijdenafzettingen en piping: een quickscan

Project

11202560-012

Kenmerk

11202560-012-GEO-0001

Pagina's

79

aanpassingen gedaan worden aan het invullen van de d70 (van gehele fractie en niet alleen van zandfractie).

Opvallend aan het onderzoek is dat het gebruikte zand feitelijk nog maar weinig lutum (2.2%) en silt (2.7%) bevat. De verwachting bestaat dat bij hogere percentages, die zeker niet ongebruikelijk zijn in de praktijk, het getijdenzand nog minder pipinggevoelig wordt. Om dit vast te stellen, de oorzaak voor de extra sterkte beter te begrijpen en een goede toepassing binnen WBI vorm te geven worden aanvullende werkzaamheden voorgesteld die bestaan uit:

- Aanvullende proeven, zowel op kleine schaal, medium schaal als in het veld. Bij deze proeven moet gevarieerd worden met de hoeveelheid lutum en silt. Deze proeven moeten ertoe leiden dat de relatie pipinggevoeligheid met gehalte cohesief materiaal duidelijker en beter begrepen wordt.
- Modelleren. De invloed van kleilagen op de piping kan onderzocht worden met de random fields methode, waarbij op willekeurige plaatsen, maar met opgelegde correlatiecoëfficiënten, kleilagen aanwezig zijn in een zandpakket. Ook moet het effect van 2D- en 3D-grondwaterstromingen richting het uittredepunt nader onderzocht worden.
- Toepasbaar maken binnen WBI. Het zou goed om zijn binnen een wat breder kader na te denken over inbedding van deze resultaten in het WBI, waarbij ook de effecten van een 2D- versus een 3D-benadering meegenomen moeten worden.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	Feb. 2019	Marc Hijma		Vera van Beek		Leo Voogt	
Albert Oost							

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Centrale vragen van het rapport	1
1.2 Achtergrond	1
1.3 Leeswijzer	2
2 Karakterisatie getijdenafzettingen	2
2.1 Introductie relevante SOS-eenheden	2
2.2 Verbreiding van getijdenafzettingen onder de primaire waterkeringen	4
2.3 Karakterisatie relevante SOS-eenheden	6
2.3.1 Getijdegeulen algemeen	6
2.3.2 Getijdengeul afzettingen	8
2.3.3 Platen algemeen	21
2.3.4 Kwelders	33
2.4 Korrelgrootteverdelingen getijdenafzettingen	34
3 Getijdenafzettingen op de schaal van Nederland	36
3.1 Millennia	36
3.2 Eeuwen	44
3.3 Kleinere tijd- en ruimteschalen	45
4 Inventarisatie van eerder onderzoek	46
4.1 Veldobservaties	46
4.1.1 Zandmeevoerende wellen	46
4.1.2 Dijkdoorbraak bij Strijenham	47
4.2 2015 memo	47
4.3 Laboratoriumproeven	48
4.3.1 Kohno et al. 1987	48
4.3.2 Onderzoek op Loire zand 2011	48
4.3.3 Richards en Reddy 2012	48
4.3.4 Heterogeniteitsrapport 2014	49
4.3.5 Fleshman en Rice 2014	50
4.3.6 Negrinelli 2015	51
4.3.7 University of New South Wales lopend onderzoek	51
5 Demonstratie van piping in getijdenzand	52
5.1 Gebruikt getijdenzand	52
5.2 Proef	55
5.2.1 Opstelling	55
5.2.2 Opzet proeven, aanbrengen materiaal en uitvoering	56
5.2.3 Opzet analyse	57
5.3 Resultaten	58
5.3.1 Karakteristieken	58
5.3.2 Samenvatting meetresultaten	58
5.4 Discussie	67
5.4.1 Vergelijk met het model van Sellmeijer	67
5.4.2 Proces	69

6 Conclusies	72
6.1 Centrale vragen	72
6.2 Karakterisatie	73
6.3 Inventarisatie	73
6.4 Demonstratie	74
7 Aanbevelingen voor activiteiten in 2019	75
8 Referenties	77

1 Inleiding

1.1 Centrale vragen van het rapport

De pipingproeven die aan de basis van de rekenregel van Sellmeijer liggen zijn vrijwel altijd uitgevoerd met zand zonder de fractie $<63 \mu\text{m}$ en met een smalle korrelgrootteverdeling (homogeen zand). Daarnaast is het zand van origine meestal afgezet door rivieren. Rivierzand is sterk afwijkend van het zand dat afgezet wordt in getijdengebieden: dat zand bevat in de regel relatief veel lutum- en siltdeeltjes. De vraag die dan rijst is of de rekenregel ook geldig is voor getijdenzand en ook toegepast kan worden in gebieden met getijdenafzettingen onder de dijken (Zeeland, Zuid- en Noord-Holland, Friesland, Groningen). Deze vraag rijst des te meer door het feit dat in gebieden met getijdenafzettingen er zeer weinig zandmeevoerende wellen zijn waargenomen (<10 voor heel Nederland) en in gebieden met rivierafzettingen juist zeer veel (>200 voor heel Nederland). De centrale vragen in dit rapport zijn dan ook:

1) Is getijdenzand minder pipinggevoelig dan rivierzand?

2) Zo ja, waardoor komt dit?

3) Zo ja, hoe kan dit meegenomen worden bij de beoordeling?

1.2 Achtergrond

De ondergrond in Nederland is sterk heterogeen als gevolg van een complexe geologische geschiedenis: in Zuid-Limburg kun je bijvoorbeeld 300 miljoen jaar oud gesteente aanraken, terwijl in de Waddenzee het landschap nog elke dag enigszins verandert. Op elk moment in de tijd zijn en waren er in Nederland verschillende typen landschappen aanwezig en elk type landschap kan gekarakteriseerd worden door een afzettingsmilieu. Op zijn beurt leidt elk afzettingsmilieu tot een bepaald type afzetting, bijvoorbeeld getijdengeulzand of veen, die gekarakteriseerd kan worden met bepaalde eigenschappen zoals korrelgrootte, mate van gelaagdheid, cohesie en doorlatendheid. Deze eigenschappen bepalen uiteindelijk de sterkte van de ondergrond bij een belasting. Het besef dat een indeling van de ondergrond in afzettingsmilieu's meerwaarde heeft bij het beoordelen van waterkeringen heeft geleid tot het ontwikkelen van een globale Stochastische OndergrondSchematisatie (SOS) binnen het Wettelijk BeoordelingsInstrumentarium (WBI) 2017. Hierbij zijn voor alle primaire waterkeringen (a-b-c categorie) 1D-scenario's van de opbouw van de ondergrond gegeven, waarbij ieder scenario een eigen kans van aantreffen heeft. Het globale SOS is bedoeld als startpunt voor een lokale schematisatie van de ondergrond waarbij toegespitst wordt op een bepaald faalmechanisme en lokale informatie toegevoegd wordt (Hijma and Lam, 2015; Kruse and Hijma, 2015). De scenario's zelf bestaan uit gestapelde eenheden, waarbij elke eenheid overeenkomt met een bepaald type afzetting. In totaal zijn destijds 43 eenheden onderscheiden.

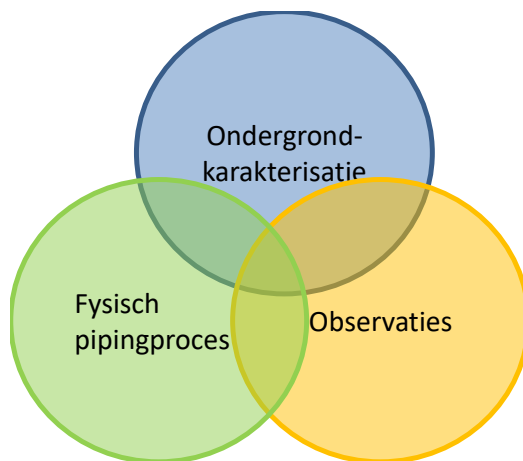
Binnen WBI-SOS zijn ongeveer 25 eenheden gebruikt voor het beschrijven van zandige afzettingen, waarbij een hoofdingeling gemaakt is getijden-, rivier-, beek-, wind-, meer- en estuariene afzettingen. Binnen deze eenheden bestaat grote variatie in bijvoorbeeld de korrelgrootteverdeling, mate van gelaagdheid, aantal kleilaagjes en de grootte van de kleifractie en met eigenschappen samenhangende doorlatendheid. Ook bestaat er aanzienlijke variatie in de geometrie van de zandlichamen, hiermee wordt bedoeld dat de zandlichamen per eenheid verschillende vormen hebben (dikte, breedte, reliëf). Elk van de eigenschappen is van invloed op het faalmechanisme piping. Binnen het Toetsspoor Piping van WBI 2017 worden zandlagen echter momenteel voornamelijk beschreven aan de hand van een maat voor de korrelgrootte (d_{70}), de doorlatendheid en veelal feitelijk op basis van op vrij eenvoudige configuratie van de ondergrond (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017). Voor de uiteindelijke bepaling van

de kans op pipevorming wordt de rekenregel van Sellmeijer gebruikt, een rekenregel die afgeleid is van laboratoriumproeven op gehomogeniseerd rivierzand (Van Beek, 2015).

De sterke overtuiging bestaat dat de huidige beoordelingsmethodiek verbeterd kan worden door binnen de beoordeling van de kans op piping veel meer te differentiëren naar afzettingstype waarbij de specifieke eigenschappen van de verschillende afzettingen meegewogen worden. Deze overtuiging is onderdeel van de Deltares-visie op piping (Van Beek et al., 2016):

‘Een naar de ondergrond gedifferentieerde beoordelingsmethodiek, eenvoudig waar het kan en complex waar het nodig is, met handvatten voor slim en zinvol meten, waarin gebruik wordt gemaakt van de observaties uit de praktijk.’

Binnen deze visie zijn drie hoofdonderzoekslijnen uitgezet die complementair aan elkaar zijn en gezamenlijk opgepakt zouden moeten worden (Figuur 1.1).



Figuur 1.1 De drie hoofdonderzoekslijnen binnen de Deltares-visie op piping

Binnen deze visie zijn in 2018 een aantal deelprojecten gestart naar verschillende aspecten van piping (Hijma et al., 2018). Een van de deelprojecten omvat onderzoek naar piping in getijdenafzettingen en de resultaten daarvan worden beschreven in dit rapport.

1.3 Leeswijzer

Dit rapport beschrijft de werkzaamheden binnen het deelproject naar piping in getijdenafzettingen dat opgezet is als quick-scan. In de eerste hoofdstukken worden getijdenafzettingen op verschillende schalen gekarakteriseerd. De SOS-eenheden die getijdenafzettingen beschrijven worden hierbij als leidraad gebruikt. In hoofdstuk 4 worden de ervaringen uit eerder onderzoek geïnventariseerd en samengevat, terwijl in hoofdstuk 5 de resultaten van kleinschalige pipingproeven worden gepresenteerd. De laatste hoofdstukken gaan in op de kennishiaten en geven aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

2 Karakterisatie getijdenafzettingen

2.1 Introductie relevante SOS-eenheden

In Nederland wordt het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI) gebruikt om te toetsen of primaire waterkeringen voldoen aan de heersende normen. Een onderdeel van het WBI is een

stochastische ondergrondschematisatie (SOS). WBI-SOS levert informatie over de globale (geschematiseerde) opbouw van de ondergrond onder een dijk aan de hand van scenario's met elk een kans van aantreffen (Hijma and Lam, 2015; Kruse and Hijma, 2015). De scenario's bestaan uit gestapelde ondergrondeenheden die elk een bepaald type afzetting beschrijven. Aan deze eenheden kunnen relevante grondparameters toegekend worden, waarna in een vervolgstap een inschatting kan worden gemaakt van de faalrisico's van de dijk. Om de resultaten van dit onderzoek naar getijdenafzettingen eenvoudig in te kunnen passen in het WBI, zullen de relevante (zandige) SOS eenheden als uitgangspunt gebruikt worden, zoals deze beschreven zijn in Tabel 2.1 en de daaropvolgende volgende paragrafen. Binnen WBI-SOS wordt er op dit moment geen onderscheid gemaakt in het verloop van het pipingproces tussen getijdenafzettingen en rivierafzettingen.

Tabel 2.1 laat zien dat er onderscheid gemaakt wordt tussen getijdengeul- en getijdenplatafzettingen. Hieronder worden deze eerst kort beschreven, waarna een meer gedetailleerde karakterisatie volgt.

2.1.1 Getijdengeulafzettingen

Getijden- en estuariene geulen in de ondergrond van de westelijke delen van Nederland zijn vaak zandig ingevuld en kunnen direct onder de dijk aanwezig zijn. De korrelgrootte van getijdenzand is kleiner dan die van rivierzand, met een gemiddelde mediane korrelgrootte van 180 µm met een minimum van 90 µm en een maximum van 500 µm (Van Beek et al. 2016).

Er worden grofweg 3 verschillende SOS-eenheden onderscheiden binnen getijdengeulafzettingen (Tabel 2.1):

- matig fijn tot zeer grof (estuariën) getijdengeulzand (H_Mg_zm, P_Mg_zm, H_Eg_zm);
- uiterst fijn tot matig fijn (estuariën) getijdengeulzand (ndH_Eg_k&z);
- uiterst fijn tot matig fijn getijdengeulzand met dunne klei- en siltlaagjes (H_Mg_zk, P_Mg_zk, H_Eg_k&z).

In deze eenheden kunnen mm-cm dunne en smalle (<1 m) klei- en siltlaagjes voorkomen, waarbij het gehalte aan fijne laagjes zeer variabel is (Tabel 2.1). De afzettingen zijn zeer los tot los gepakt. De invloed van kleilaagjes op de verticale doorlatendheid en pipegroei is zeer groot, maar dit hangt sterk af van de lengte/breedte van de kleilaagjes. In ontsluitingen is bijvoorbeeld te zien dat deze laagjes soms vrij kort zijn, hooguit enkele meters, en dan is de invloed op de bulkdoorlatendheid waarschijnlijk beperkt en kunnen pipes er wellicht omheen groeien.

2.1.2 Getijdenplatafzettingen

De zandige getijdenplaten liggen vaak langs de flanken van getijdengeulen of getijdenbekkens. In de Waddenzee liggen ze ook vaak tussen de getijdengeulen in. Ze worden gevormd in een sub- tot intergetijdengebied (Van Beek et al. 2016). Er worden 2 SOS-eenheden onderscheiden binnen zandige getijdenplatafzettingen (Tabel 2.1):

- zandige getijdenplaat-afzettingen met weinig klei (H_Mp_zf);
- afzettingen van kleine getijdenplaat- en kweldergeulen met een afwisseling van zand en klei (H_Mkw_k&z).

Deze laatste staan niet in de tabel, omdat ze al aangemerkt zijn als niet pipinggevoelig en onderdeel kunnen zijn van de deklaag (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017). Doordat de platen regelmatig droogstaan en ook onderhevig zijn aan golfwerking, is de pakking soms aanzienlijk minder los dan bij getijdengeulen. Getijdenplatafzettingen

bestaan vaak uit zeer fijn zand, met een gemiddelde mediane korrelgrootte van ongeveer 90 μm , met een minimum van 70 en een maximum van 130 μm (Van Beek et al. 2016). In tegenstelling tot de getijdengeulen, is het pakket zandige afzettingen vaak hooguit enkele meters dik. De platen kunnen wel over grote afstanden aaneengesloten voorkomen. De getijdenplatafzettingen zijn vaak gelaagd op mm-schaal, met een afwisseling van klei- en zandlagen. Dit is het gevolg van een afwisseling in energetische condities. Hogere energetische afzetting condities zijn vaak gerelateerd aan getijdenstromen en onder deze condities wordt zand afgezet (of vindt er erosie plaats). Hier-tussen zijn er rustige fasen (tijdens de hoogwater-kentering voor intergetijdemilieu's en laag- en hoogwaterkentering voor subgetijdemilieu's), wat fijnere afzettingen en daarmee gelaagdheid tot resultaat heeft (Erkens, 2012). De lengte van de kleilagen is vaak aanzienlijk, langer dan bij getijdengeulen.

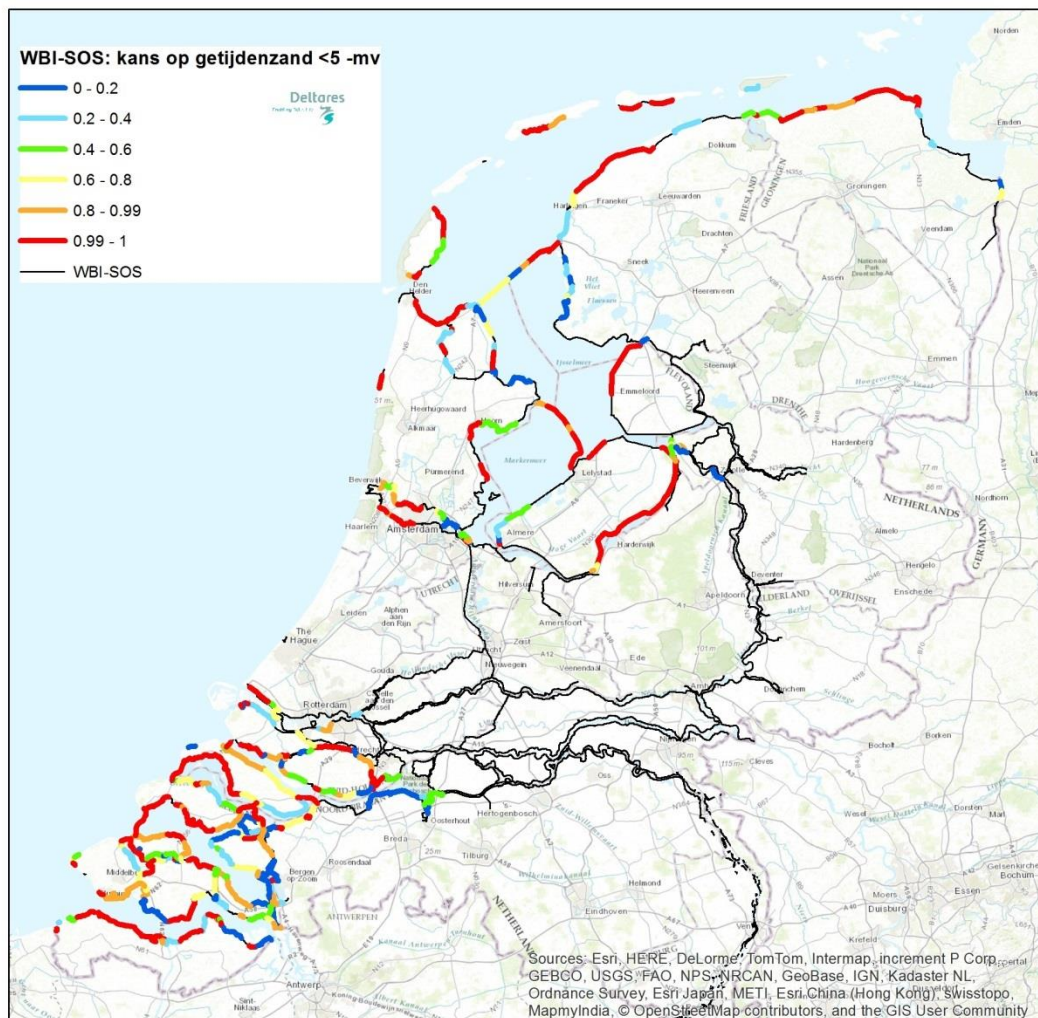
Tabel 2.1 WBI-SOS eenheden met getijdenafzettingen (Hijma and Lam 2015).

	WBI-SOS code	Formatie	Omschrijving	Kenmerken relevant voor anisotropie
Marien	H_Mg_zm / P_Mg_zm	Naaldwijk / Eem	Matig fijn tot zeer grof getijdengeulzand	Zand, fijn en middel, kleilig, met mm - cm dunne en smalle klei/siltlaagjes, gehalte fijne laagjes klei zeer variabel
	H_Mg_zf	Naaldwijk	Uiterst fijn tot matig fijn getijdengeulzand	Getijdengeul. Zand, fijn, kleilig, mm - cm dunne en smalle klei/siltlaagjes, gehalte fijne laagjes klei zeer variabel.
	H_Mg_zk / P_Mg_zk	Naaldwijk / Eem	Uiterst fijn tot matig fijn getijdengeulzand met dunne klei- en silt laagjes.	Getijdengeul. Zand, fijn, kleilig, mm – cm en dunne smalle klei/siltlaagjes, gehalte fijne laagjes klei zeer variabel, maar meer dan bij Mg_zm en Mg_zf en minder schone stukken zand.
	H_Mp_zf	Naaldwijk	Zandige getijdenplatafzettingen	Zand, fijn met weinig dunne klei/silt laagjes, kunnen uit relatief schoon zand bestaan.
	H_Eg_zm	Naaldwijk	Matig fijn tot zeer grof estuarien getijdengeulzand	Vergelijkbaar met H_Mg_zm, maar dan gevormd in een estuarium. Met name aanwezig in omgeving Rotterdam. Bestaat uit afwisselingen van zand en klei.
Estuarien	H_Eg_k&z	Naaldwijk	Uiterst fijn tot matig fijn estuarien getijdengeulzand	Ook deze eenheid komt vooral voor rondom Rotterdam. Bestaat uit metersdikke, tot 20 m dikke, pakketten met afwisselingen tussen zand en klei. De lagen zijn mm-dm dik.

2.2 Verbreiding van getijdenafzettingen onder de primaire waterkeringen

Figuur 2.1 laat zien dat onder bijna 1000 km primaire waterkering er getijdenzand voor kan komen in de bovenste 5 m. In Friesland en Groningen zijn duidelijk secties zichtbaar waar de kans op getijdenafzettingen veel lager is (blauwe en groene kleuren), terwijl in Zeeland de kans op getijdenzand onder de meeste keringen zeer hoog is. Ook in Noord-Holland en langs de oostgrens van Flevoland komen veel getijdenafzettingen voor.

WBI-SOS - Kans op aanwezigheid Holoceen getijdenzand in de bovenste 5 m - Totaal 970 km



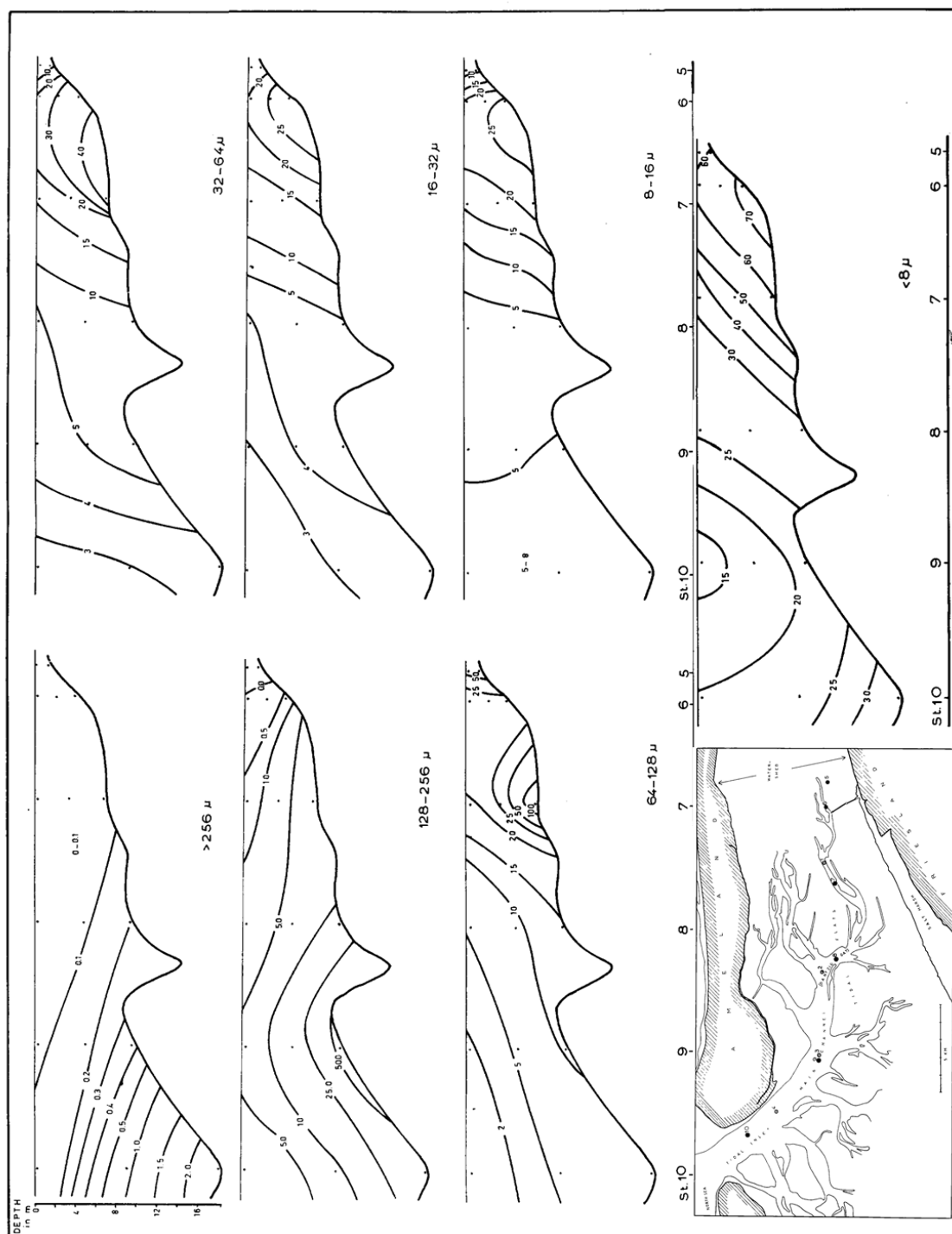
Figuur 2.1 Overzicht van het voorkomen van getijdenafzettingen onder de primaire waterkeringen .

2.3 Karakterisatie relevante SOS-eenheden

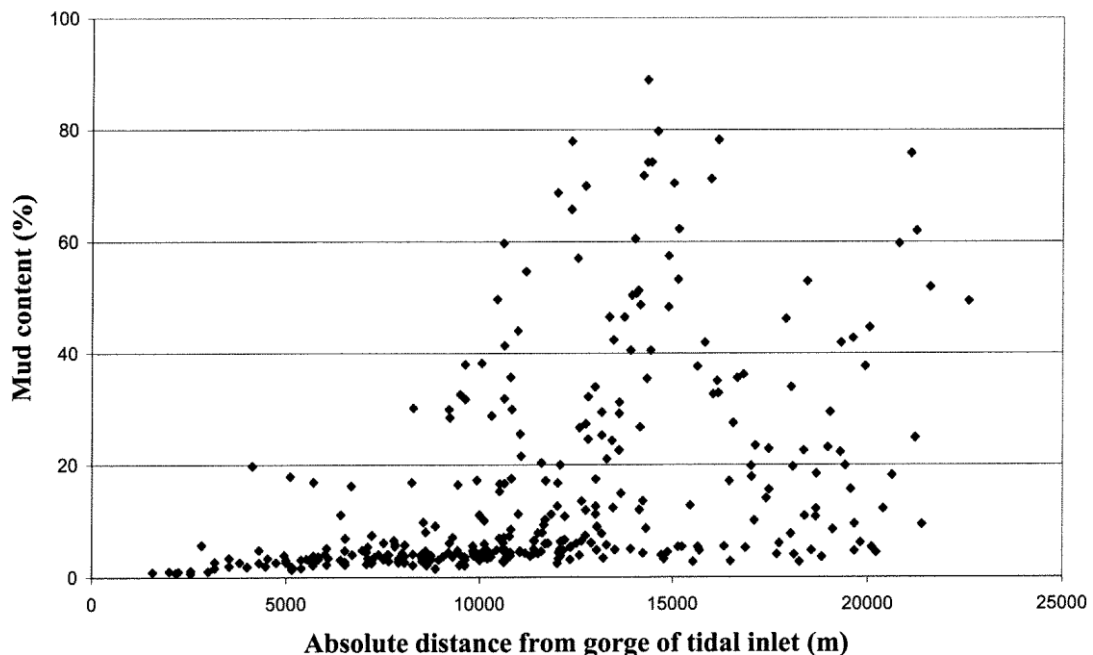
2.3.1 Getijdegeulen algemeen

De energiegradiënt is bepalend voor welke korrelgroottefracties tot afzetting. Over het algemeen geldt dat zowel de getijden- als de golfenergie en daarmee de korrelgroottes afnemen vanaf het zeegat in de richting van het landwaartse deel van het bekken. Hierbij worden korrelgroottes $< \text{ca. } 160 \text{ } \mu\text{m}$ (diameter) soms betiteld als de suspensiepopulatie, omdat de verschillen tussen de stroomsnelheden die nodig zijn om de korrels in beweging te zetten en de stroomsnelheden om ze te doen zweven in de waterkolom erg klein zijn (Van Rijn, 2007). Daarom zullen fijnkorrelige sedimenten $< \text{ca. } 160 \text{ } \mu\text{m}$ vrijwel volledig zwevend worden vervoerd. Boven deze korrelgroottegrens bevindt zich de zogeheten bodemlastpopulatie waarvan de korrels deels rollend over de bodem worden vervoerd en pas bij hogere snelheden ($> 0,4 \text{ m/s}$) zwevend worden getransporteerd. Onder normale omstandigheden treden dit soort hoge stroomsnelheden gedurende langere tijd op in de diepere geulen tijdens een getijcyclus. Bij het zeegat en het (diepste) deel van de hoofdgeul zijn de snelheden groot genoeg om zelfs grof zand in suspensie te brengen. In ondiepe geulen, platen, kreken/slenken en kwelders/schorren treden dergelijke snelheden maar vrij kort op.

Gaande van het zeegat naar het eind van de geulen, zal, onder normale condities, de korrelgrootte in de waterkolom boven de geulbodem afnemen (Postma, 1961). De suspensiepopulatie en de bodemlastpopulatie zijn duidelijk van elkaar gescheiden. De grovere zanden van de bodemlastpopulatie worden vooral bij het zeegat gevonden en hun aandeel neemt snel af in de richting van de kombergingsgebied. Merk op dat de waarnemingen van Postma (1961) zich beperken tot het Zeegat van Texel en die van Ameland. Door de grotere getijdenslag in het Zeeuwse en de Eems worden hogere snelheden bereikt in de belangrijkste geulen waardoor ter plekke de bodemlastpopulatie verder landwaarts kan komen. De suspensiepopulatie in de geulen is door een duidelijke afstand gescheiden van de bodemlastpopulatie, en vooral te vinden nabij het eind van de geulen (Figuur 2.2). Dit figuur toont duidelijk de afname aan van de mediane korrelgrootte in de Waddenzeegeulen vanaf het zeegat naar binnen toe. Ook het sediment van de geulbodem laat in dezelfde richting een duidelijke afname zien in de korrelgrootte en een toename van het kleigehalte (Figuur 2.3; Nieuwenhuis (2001). De platen worden ook duidelijk modderiger in de richting van het vasteland (Oost, 1995).



Figuur 2.2 Gesuspendeerd sedimentconcentraties van verschillende korrelgroottes in de Borndiep geulen zoals gemeten op September 1958 (Postma, 1961). De hogere concentraties zitten naarmate de fracties fijnkorerlijger zijn dichter bij het einde van de geul.



Figuur 2.3 Slibgehalte van het sediment versus afstand van de keel van het zeegat (Nieuwenhuis, 2001).

2.3.2 Getijdengeul afzettingen

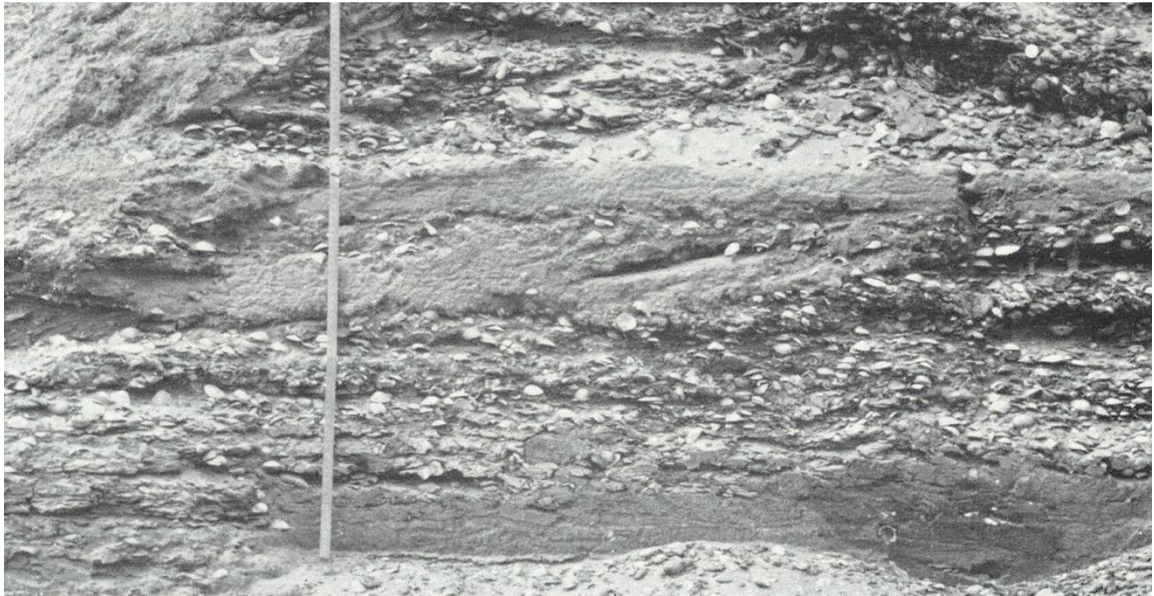
De volgende SOS eenheden kunnen worden onderscheiden:

1 Matig fijn tot zeer grof getijdengeulzand

H_Mg_zm / P_Mg_zm	Naaldwijk / Eem	Matig fijn tot zeer grof getijdengeulzand	Zand, fijn en middel, kleiig, met mm - cm dunne en smalle klei/siltlaagjes, gehalte fijne laagjes klei zeer variabel.
----------------------	--------------------	--	---

Nadere karakterisatie

Het matig fijne tot zeer grove getijdengeulzand is karakteristiek voor de sedimenten afgezet op die plaatsen waar de stroomsnelheden relatief hoog zijn, bijvoorbeeld in hoofdgeulen. Over het algemeen nemen de stroomsnelheden af met een kleiner getijdenvolume stromend door de geul en daarmee ook de geuldimensies (diepte en breedte). Daarnaast zijn stroomsnelheden in de geulen vaak hoger in de diepste delen dan in de ondiepere delen. Door de hoge stroomsnelheden in de diepste delen zal daar het sediment overwegend zandig zijn met lokaal dikke poreuze schelpenlagen (Figuur 2.4). Het sediment wordt gekarakteriseerd door erosief in elkaar ingesneden sedimentaire structuren (Figuur 2.5), en klein- en grootschalige cross-bedding met kleilaagjes (mud drapes; Figuur 2.6) veroorzaakt door perioden van, respectievelijk, lage en hoge stroomsnelheden. Hoger in een dergelijke opvulling komen vergelijkbare afzettingen voor maar dan veelal met minder schelpen (Figuur 2.7). Over het algemeen echter zullen bij de grotere geulen de sliblagen dun zijn (mm tot cm's). Deze worden gevormd tijdens de kentering van het getij. Door de vele megaribbels, ribbels en interne erosievlakken zal over het algemeen de laterale continuïteit van deze dunne sliblagen beperkt zijn en vaak vrijwel of geheel aanwezig op de diepere delen van de geulafzettingen omdat daar de stroomsnelheden te hoog zijn.

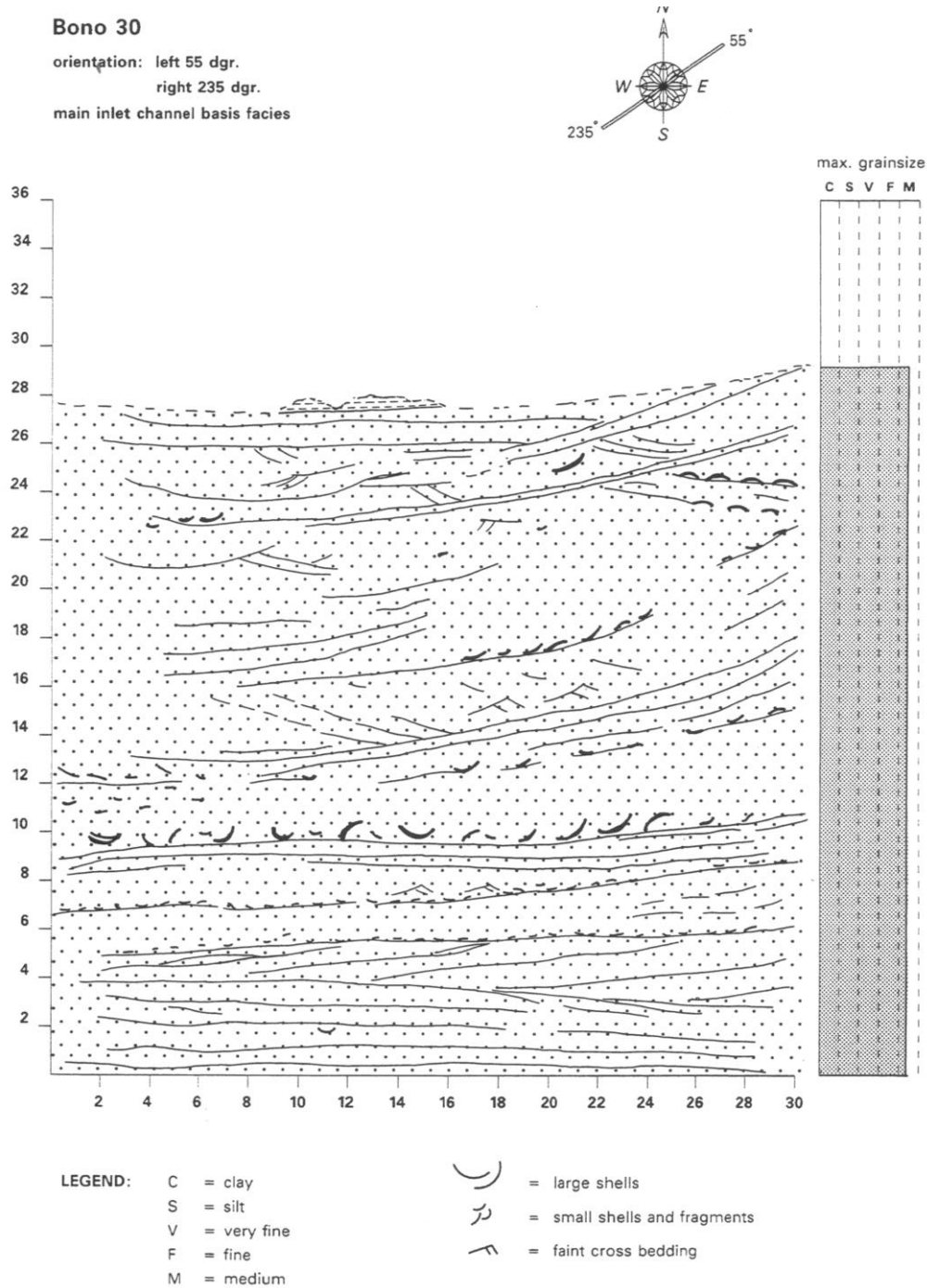


Figuur 2.4 Geulbodem van een geulopvulling. Bouwput tunnel Velsen. De afzetting is gevormd op ca. 15 km afstand van het (oorspronkelijke) zeegat (Van Straaten, 1964).

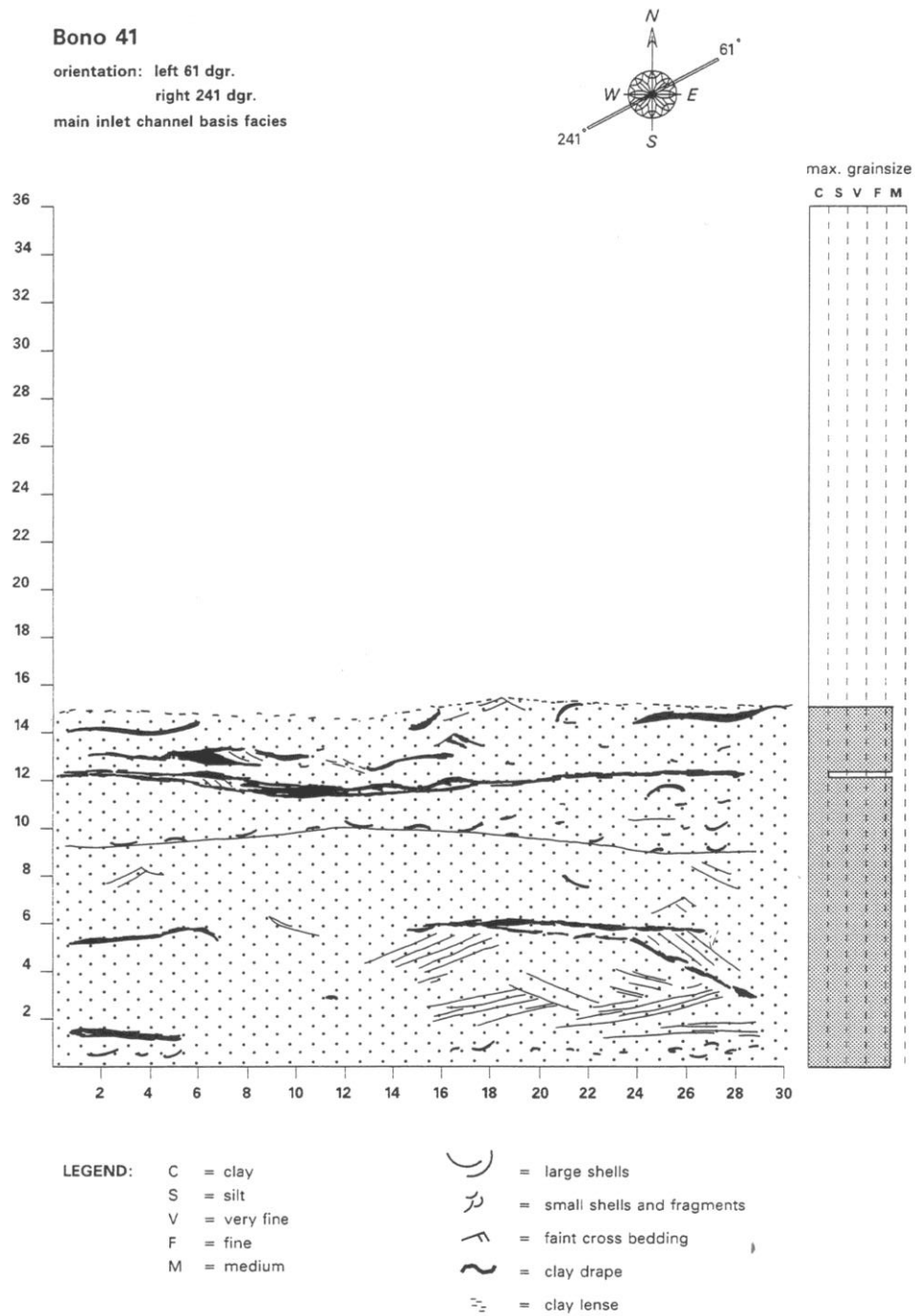
Meer naar boven toe kan het slibaandeel toenemen, omdat de stroomsnelheden daar lager liggen. Er zijn daarbij twee mogelijkheden waardoor dikkere sliblagen kunnen vormen:

- 1 Amalgamatie van de opeenvolgende slibafzettingen op die plaatsen waar geen zand tot afzetting kan komen tijdens getijden. Dit is meestal te vinden aan de basis (bottom sets) van grootschalige ribbels en in platen (Figuur 2.8). De dikte van dergelijke sliblagen is veelal tot enkele dm. Over het algemeen zijn deze afzettingen van beperkte laterale continuïteit, maar kunnen aanwezig zijn over afstanden van tientallen meters. In dit geval gaat het ook om lokale slibconcentraties op iets grotere diepte t.o.v. gemiddeld laagwater.
- 2 Binnenbochtafzettingen waarbij de omstandigheden zo rustig zijn dat zandafzetting alleen in perioden van hogere dynamiek optreedt, zoals het stormhalfjaar of rond springtij condities. De totale dikte van de individuele cm-dm dikke sliblagen (met hier en daar een cm-dm dikke laagjes zand, welke ook vrij continue kunnen zijn) kan oplopen tot ca. 1 à 2 m. De binnenbochtafzettingen vormen vaak een hellend vlak. Vaak zijn deze afzetting afgezet in het hogere subgetijdebereik en het intergetijdebereik. Helaas zijn deze binnenbochtafzettingen niet heel uitgebreid bestudeerd zodat er weinig informatie is over hun laterale uitgestrektheid en continuïteit, maar gesloten pakketten over enkele honderden meters komen voor met diktes dus tot ca. 2 meter.

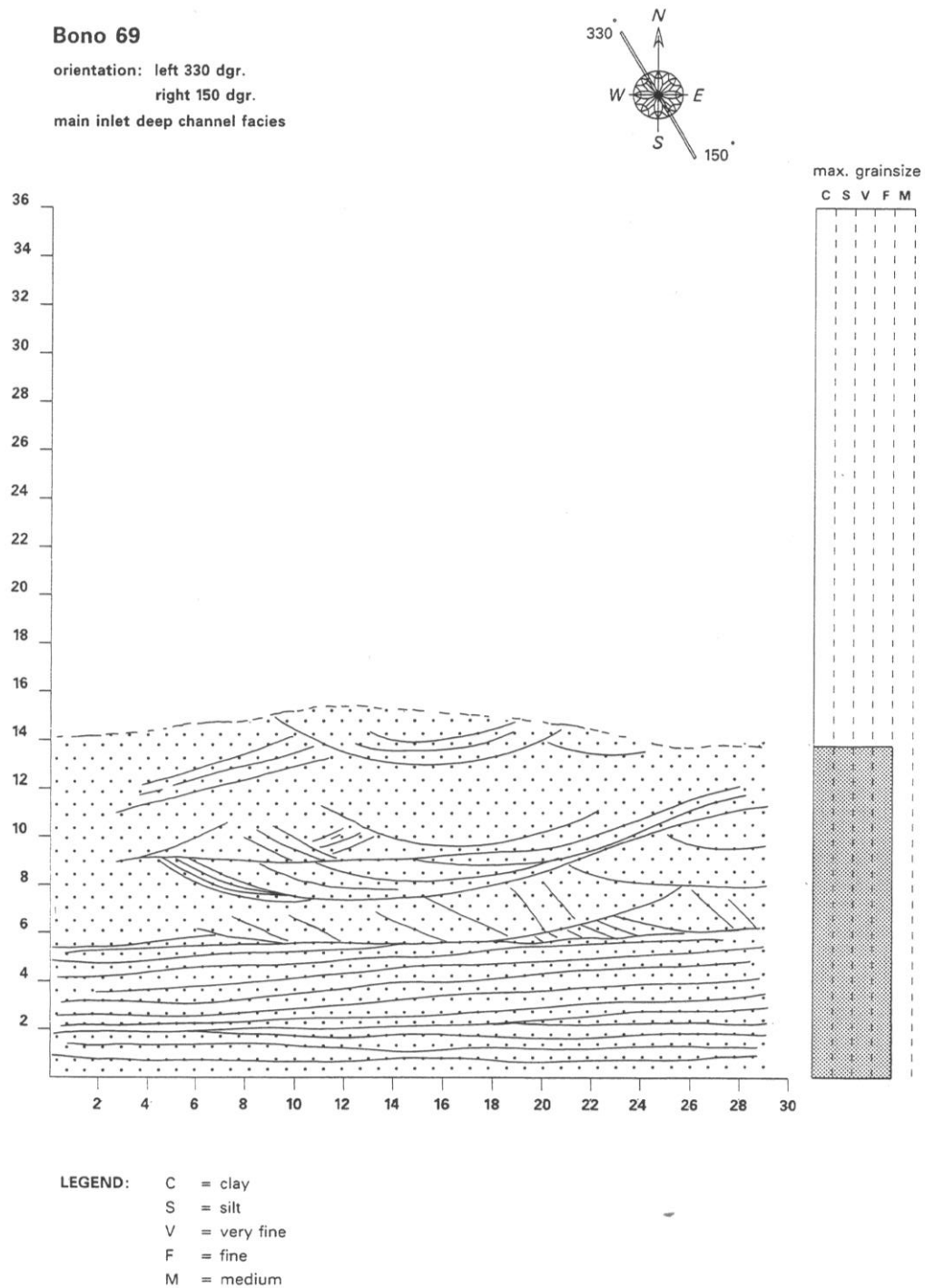
Resumerend: de getijdengeulafzettingen zullen over het algemeen fijner naar boven toe worden. Onderin zijn schelpen en stenen aanwezig met daarbovenop overwegend grove zandpakketten afgezet als megaribbels en banken in snelstromend water. In deze zandige pakketten kunnen lokale dunne sliblaagjes aanwezig zijn die veelal erg discontinue zijn. Hier en daar kan een amalgamatie van slibafzettingen plaatsvinden tot enkele dm dikte die zich tot enkele tientallen meters uitstrekken. Meer naar boven naar de top neemt het slibaandeel toe en kan de korrelgrootte van het zand eventueel verder afnemen. In hoeverre de slibrijke lagen aan de top lateraal continue zijn is onzeker, maar gesloten pakketten over maximaal enkele honderden meters komen voor.



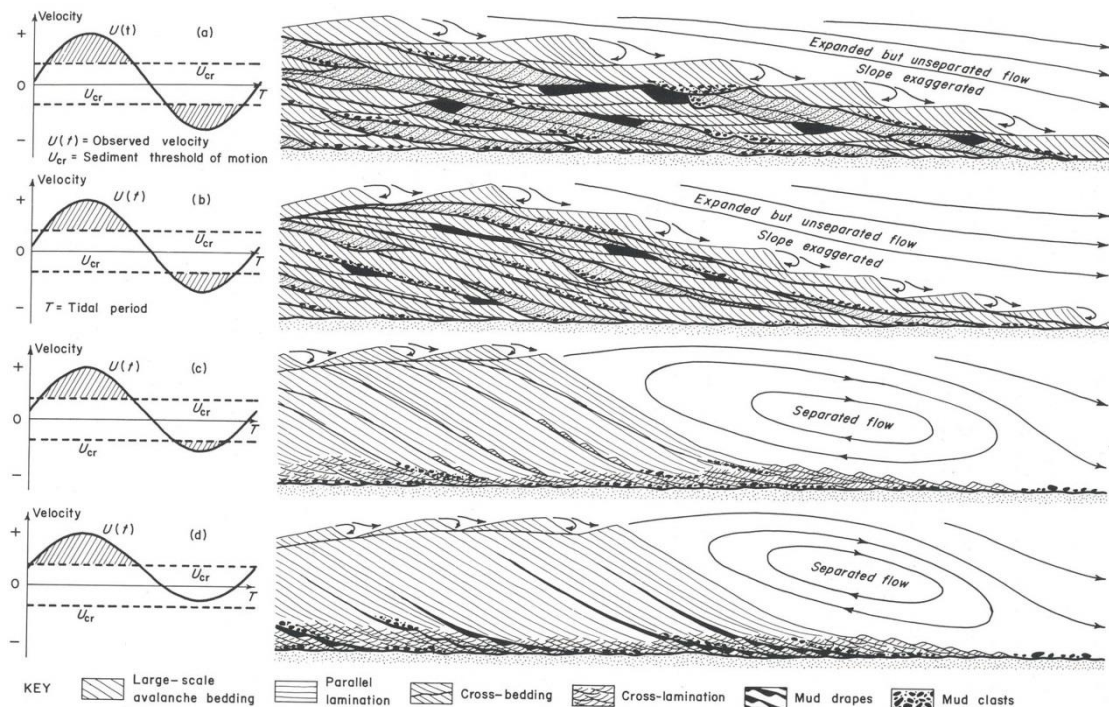
Figuur 2.5 Hoofdgeul Pinkegat -14,4 m NAP: megaribbels met hier en daar schelpenlaagjes (Van den Heuvel, 1993)



Figuur 2.6 Basis hoofdgeul Pinkegat -6,1 m NAP: mud drapes en kleine tot grote ribbelstructuren (Van den Heuvel, 1993).



Figuur 2.7 Binnenbocht hoofdgeul Pinkegat -1,5 m NAP: parallelle bedding door hoge stroomsnelheden en groot-schalige tangential cross bedding (Van den Heuvel, 1993).



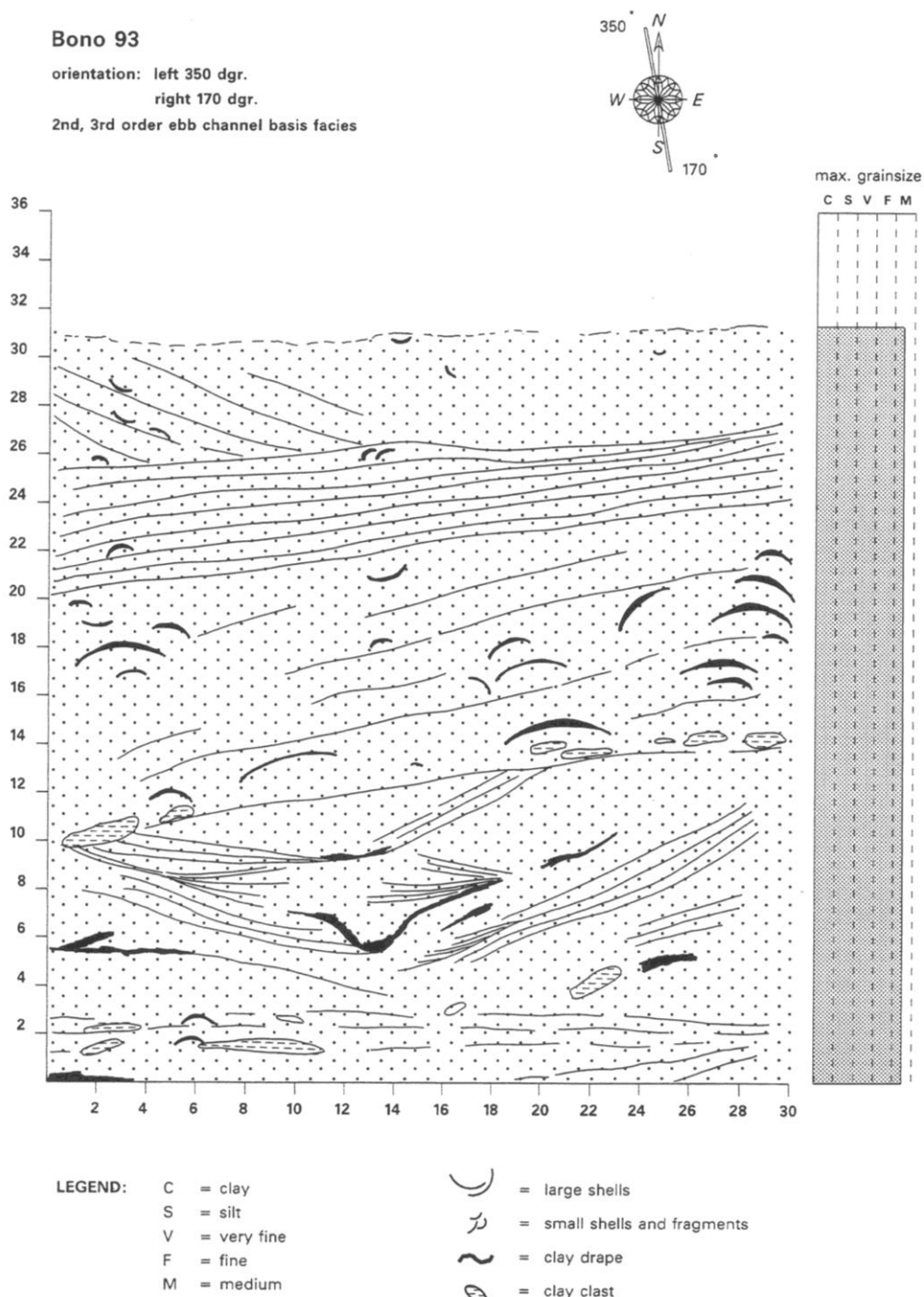
Figuur 2.8 Model voor de interne opbouw van zandgolven die worden bepaald door de, van boven naar beneden toenemende asymmetrie van de eb en vloedstroom die eroverheen stromen (Allen, 1984). Merk op dat het slib (mud drapes) zich onder de diverse omstandigheden anders verdeelt.

2 Uiterst fijn tot matig fijn getijdengeulzand

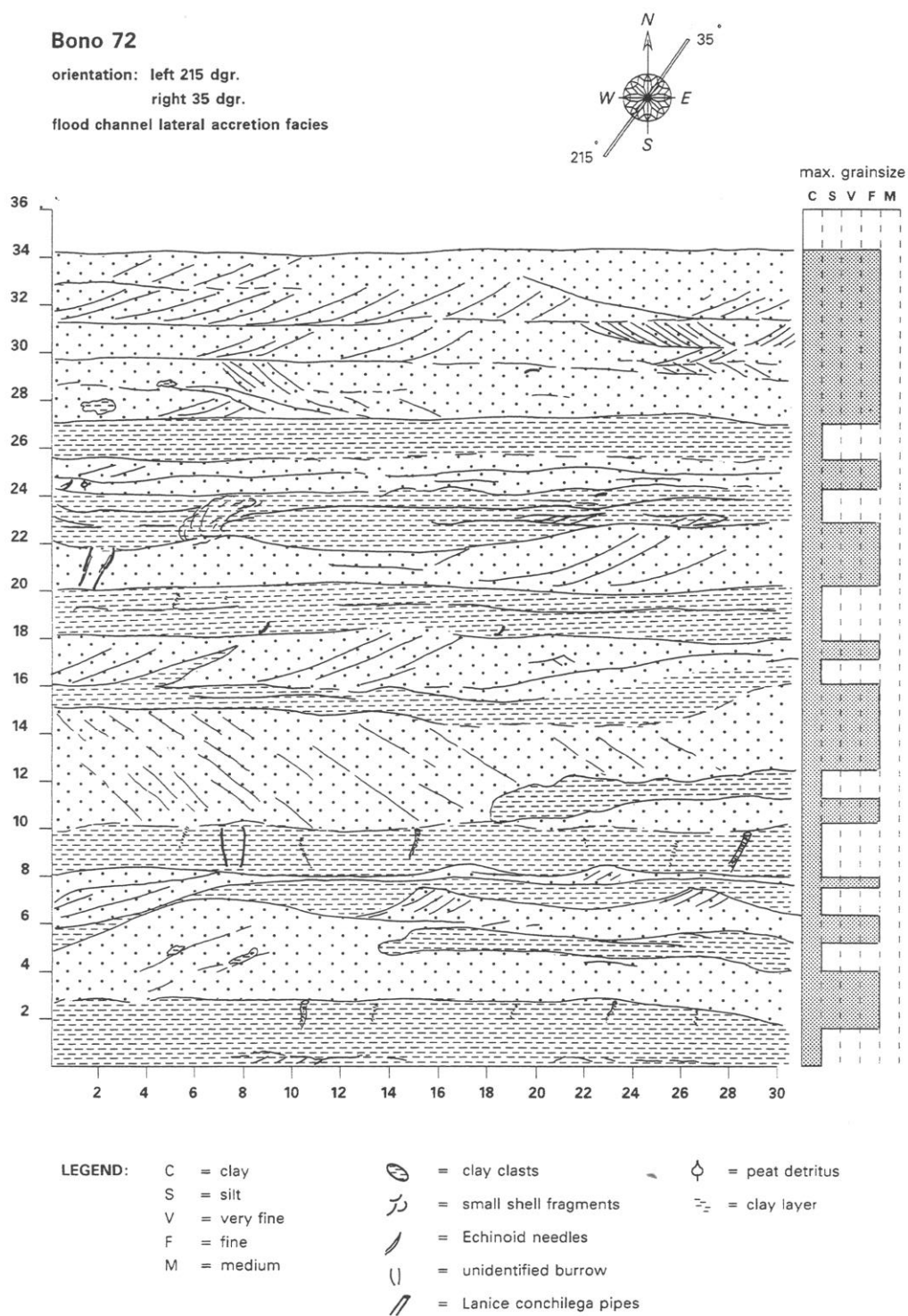
H_Mg_zf	Naalddijk	Uiterst fijn tot matig fijn getijdengeulzand	Getijdengeul. Zand, fijn, kleiig, mm - cm dunne en smalle klei/siltlaagjes, gehalte fijne laagjes klei zeer variabel.
---------	-----------	--	---

Nadere karakterisatie

Het uiterst fijn tot matig fijne getijdengeulzand is karakteristiek voor de sedimenten afgezet op die plaatsen waar de stroomsnelheden relatief wat lager zijn dan bij de vorige groep. Over het algemeen moet gedacht worden aan maximale stroomsnelheden van enkele dm/s tot ca. 60 cm/s. Het gaat daarbij overwegend om kleine getijdengeulen (Figuur 2.9). Door de lagere stroomsnelheden is het kleiaandeel vaak wat groter. Doordat erosie wat minder sterk is kunnen pakketten van dunne sliblaagjes (elk mm-cm) zich vormen in deze afzettingen (Figuur 2.10). Net als de grotere geulen kennen ook deze afzettingen binnenbocht afzettingen welke kunnen bestaan uit 0,5-2 m dikke sublagen van slibrijker sediment, afgewisseld met zandlagen. Doordat deze buitenbochten veelal kleiner zijn zal in het algemeen de laterale uitgestrektheid van de afzettingen ook beperkter zijn; vaak minder dan 30 m lang.



Figuur 2.9 Afzettingen in een kleinere 2^e orde eb-gedomineerde geul, Pinkegat, -4,8 m NAP; schaal in cm; korrelgrootte aan de rechterzijde (Van den Heuvel, 1993).



Figuur 2.10 Afzettingen in de binnenbocht van een 2^e orde eb-gedomineerde geul, Pinkegat, -5,6 m NAP; schaal in cm; korrelgrootte aan de rechterzijde (Van den Heuvel, 1993).

Figuur 2.11 ten slotte laat een boorfoto's zien van een locatie bij Vijfhuizen, waarop zowel fijne (H_Mg_zf) als wat grovere getijdengeulafzettingen (H_Mg_zm) te zien zijn. Het aantal kleilaagjes is sterk wisselend, maar ze komen veelvuldig voor.



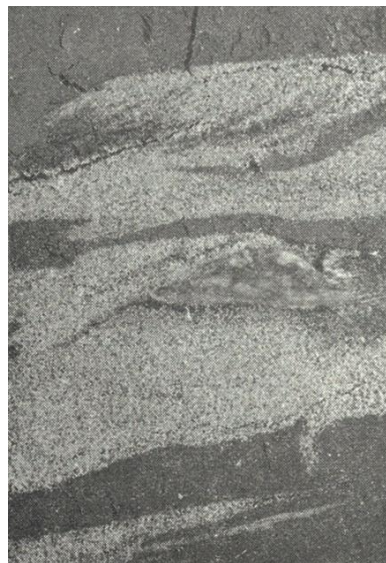
Figuur 2.11 Boring 03G0426, met een indeling in SOS-eenheden.

3 Uiterst fijn tot matig fijn getijdengeulzand met dunne klei- en silt laagjes.

H_Mg_zk / P_Mg_zk	Naaldwijk / Eem	Uiterst fijn tot matig fijn getijdengeulzand met dunne klei- en silt laag- jes.	Getijdengeul. Zand, fijn, kleiig, mm – cm en dunne smalle klei/siltlaagjes, gehalte fijne laagjes klei zeer varia- bel, maar meer dan bij Mg_zm en Mg_zf en minder schone stukken zand.
----------------------	--------------------	--	--

Nadere karakterisatie

Het uiterst fijn tot matig fijne getijdengeulzand met dunne klei en silt laagjes is karakteristiek voor de sedimenten afgezet op die plaatsen waar de stroomsnelheden relatief wat lager zijn dan bij de vorige groep 2). Over het algemeen moet gedacht worden aan maximale stroomsnelheden van enkele dm/s tot ca. 40 cm/s. Het gaat daarbij overwegend om kleine tot zeer kleine getijdengeulen. Door de lagere stroomsnelheden is het kleiaandeel relatief groot in deze afzettingen. Dit zijn met name de geultjes ver van het zeegat waar het slibgehalte in het water hoog is (zie ook tekst bij groep 2; Figuur 2.12). Net als de grotere geulen kennen ook deze afzettingen binnenbocht afzettingen welke 0,5-2 m dikke sublagen van slibrijker sediment kunnen afzetten die bestaan uit cm-dm dikke laagjes. Doordat deze binnenbochten veelal kleiner zijn zal in het algemeen de laterale uitgestrektheid van de afzettingen ook beperkter zijn: vaak minder dan 30 m breed.



Figuur 2.12 Afbeelding op ware grootte: geulbodemsediment uit het centrum van de voormalige Lauwerszee op -12 m NAP (Van Straaten, 1964).

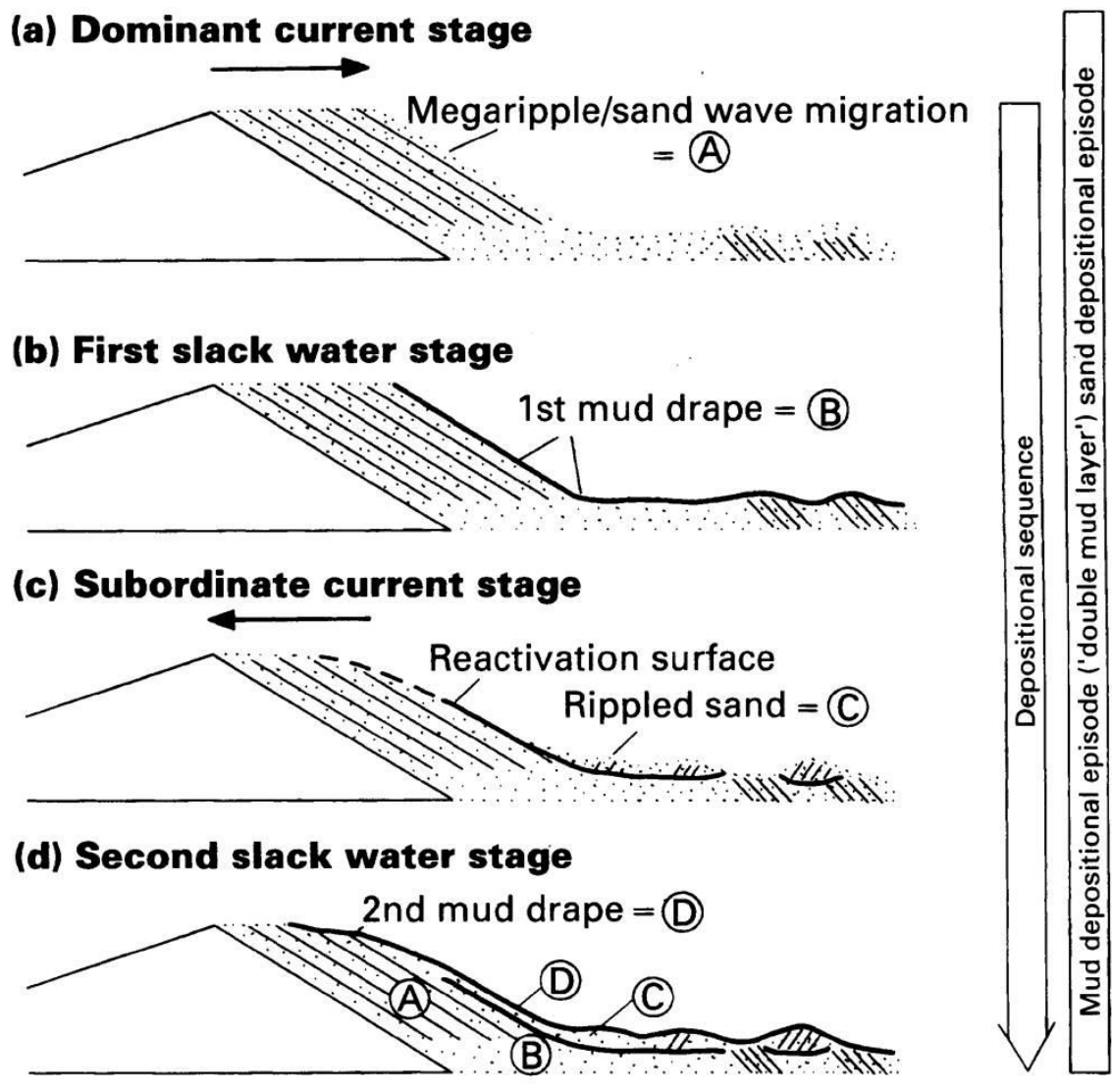
4 Matig fijn tot zeer grof estuarien getijdengeulzand

H_Eg_zm	Naaldwijk	Matig fijn tot zeer grof estuarien getijdengeulzand	Vergelijkbaar met Mg_zm, maar dan gevormd in een estuarium. Met name aanwezig in omgeving Rotterdam. Bestaat uit afwisselingen van zand en klei.
---------	-----------	---	--

Nadere karakterisatie

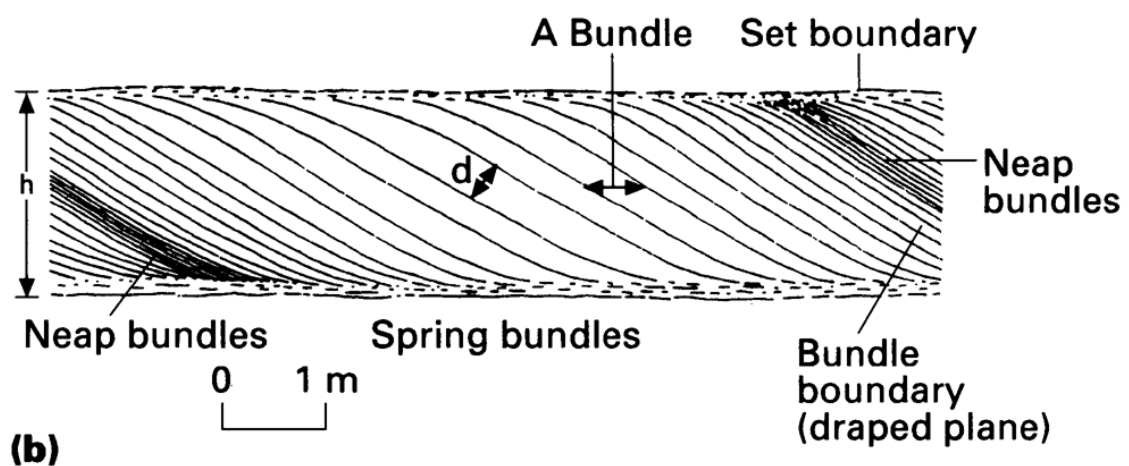
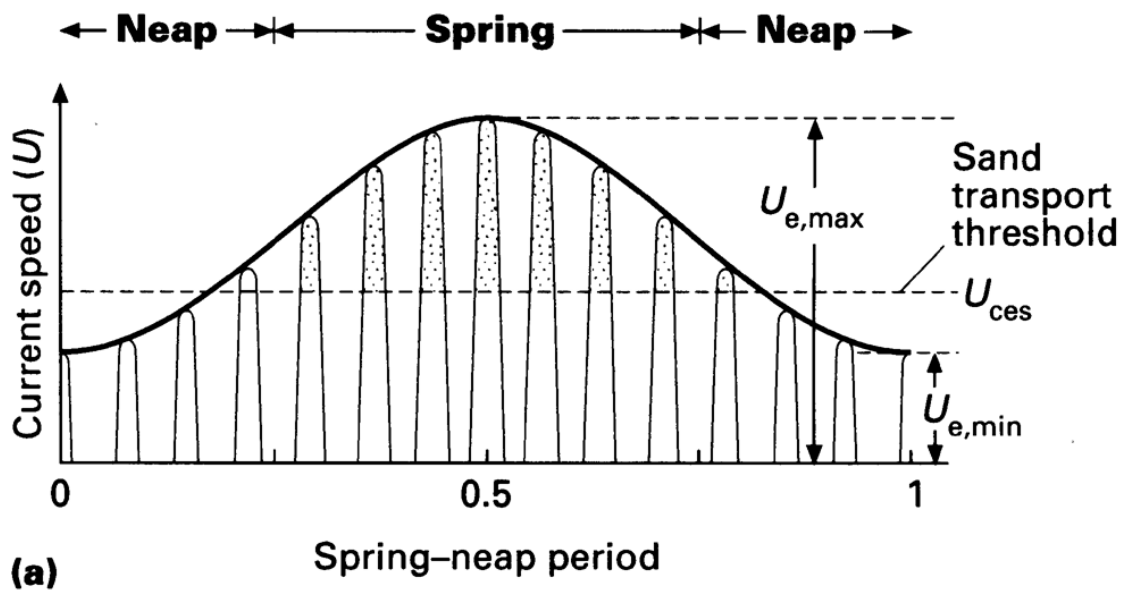
Estuaria zoals de Eems en de Westerschelde en vroeger ook Haringvliet en Oosterschelde worden gekenmerkt door grote geulen waarbij vloedstroom en ebstroom door andere bochten stromen. Daardoor is in een geul vaak of de vloed of de eb dominant. Daardoor zal zich een dikker laagje zand afzetten tijdens het dominante getij en een dunner laagje tijdens het tegenovergestelde getij (Figuur 2.13). Tijdens de kenteringen zet zich slib af in een mm tot cm dik laagje. Deze “drapes” zijn vaak over meters te vervolgen. Omdat er sprake is van een dagelijkse ongelijkheid van het getij worden tijdens de opeenvolgende dominante getijden steeds twee zandlagen gevormd waarvan de een dikker is dan de ander. Daarnaast is er ook nog de doottij-springtij-doottij cyclus waardoor de zandlagen over 28 opeenvolgende getijden dikker en weer dunner worden (Figuur 2.14). Door de vele verschillen in getijdesterkte worden de dunne sliblaagjes gemakkelijk door erosie aangetast. Hetzij doordat het slib wordt geërodeerd door het volgend getij, hetzij door verlegging van de oriëntatie van bodemvormen, hetzij door nieuwe bodemvormen die oudere aantasten.

Amalgamatie van de opeenvolgende slibafzettingen vindt plaats op die plaatsen waar geen zand tot afzetting kan komen tijdens getijden. Dit is meestal te vinden bij de tenen (bottom-sets) van grootschalige ribbels en in platen. De dikte van dergelijke sliblagen is veelal cm tot enkele dm. Over het algemeen zijn deze afzettingen van beperkte laterale continuïteit over afstanden van tientallen meters.



Figuur 2.13 Schematische weergave van het ontstaan van zogeheten double mud drapes, waarbij 1 getij dominanter is dan het tegengestelde (subordinate) getij. Met slack water wordt de kentering van het getij bedoeld.

http://www.seddeposseq.co.uk/depositional_env/Tidal/tidal.htm



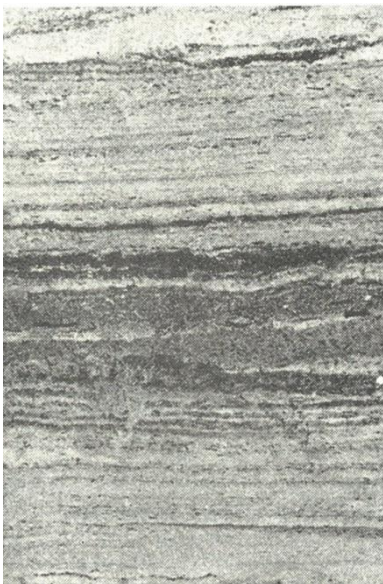
Figuur 2.14 Afzettingen gedurende een doottij-springtij-doottij opeenvolging van getijden: dikkere zandlagen worden tot afzetting gebracht tijdens springtij; elke laag bestaat uit een zandlaag, een sliblaagje, een dunne zandlaag en weer een sliblaagje. Merk op dat de sliblaagjes klei met name een belangrijk deel van het sediment vormen rond doottij (=neap). (http://www.seddepseq.co.uk/depositional_env/Tidal/tidal.htm).

5 Uiterst fijn tot matig fijn estuarien getijdengeulzand

H_Eg_k&z	Naaldwijk	Uiterst fijn tot matig fijn estuarien getijdengeulzand	Ook deze eenheid komt vooral voor rondom Rotterdam. Bestaat uit metersdikke, tot 20 m dikke, pakketten met afwisselingen tussen zand en klei. De lagen zijn mm-dm dik.
----------	-----------	--	--

Nadere karakterisatie

In de estuaria, zeker nabij Rijn-Maas mondingen, is altijd veel slib en organisch materiaal aanwezig in het water. Op rustigere plekken in estuariene geulen kunnen deze tot bezinking komen, tezamen met uiterst fijn tot matig estuarien getijdengeulzand (Figuur 2.15). Zand en slib komen beiden gemakkelijk tot bezinking, wat wijst op wisselingen in stroomsnelheid, waarbij de pieksnelheden relatief laag zijn. Hierbij gaat het vaak om secundaire geulen die vaak niet of nauwelijks dienst doen. Daarom kan fijner materiaal en organisch materiaal beter tot afzetting komen. Dit is vaak in dunne laagjes aanwezig, soms als laminae. Bioturbatie door organismen kan deze fijn gelaagde opbouw volledig verstoren en ongedaan maken waardoor een homogeen slib-zand mengsel overblijft. Kleilaagjes van cm tot 0,5 m kunnen daarbij worden gevormd. Ook kan plaatselijk organisch materiaal tot afzetting komen. Verticaal komen er binnen 1-2 m en over afstanden van 2-20 m grote variaties voor in de hoeveelheid kleilagen en kleilaagjes. In de omgeving van Rotterdam komen pakketten voor van 15-20 m dik die volledig uit dit soort gelaagde afzettingen bestaan.



Figuur 2.15 Brak water laminae in "Sloef" 0- 57,5-65 cm onder het maaiveld in de Noordoostpolder; afbeelding op ware grootte (Van Straaten, 1964).

2.3.3 Platen algemeen

Introductie

Wadplaten (Waddenzee) of ook wel: slikken (Delta) liggen tussen hoog- en laagwater. Ze worden daarom ook wel intergetijdeplaten genoemd. Daarnaast zijn er ook nog subgetijde platen die nooit droogvallen. Zij zijn meestal aanwezig tussen de daadwerkelijke geulen en de intergetijdeplaten. Met name in het Marsdiep en het Zeegat van het Vlie komen dergelijke platen veel voor.

Platen zijn aanwezig op die plekken waar de stroomsnelheden niet in staat zijn om geulen uit te schuren. Soms gebeurt dit op plekken die al hoog waren, maar het gebeurt ook dat ze vanaf diep water worden opgebouwd als een geul langzaam migreert. Door de vorming van intergetijdeplaten wordt het getijdenvolume van een zeegatsysteem kleiner omdat de platen een volume innemen in het intergetijdenbereik. Daarmee nemen ook de stroomsnelheden in de richting van de platen wat af en in de geulen zelf. Zo is er een wisselwerking tussen geulen en intergetijdenplaten. Het is niet bekend hoe de wisselwerking tussen subgetijdenplaten en geulen verloopt.

Voorts is het van belang in het kader van deze studie om te bedenken dat het geulareaal weliswaar veel kleiner is dan het plaatareaal, maar dat dit niet wil zeggen dat dit ook het geval is voor het volume van de diverse afzettingen. Ten eerste worden geulafzettingen over een veel groter verticaal bereik afgezet. Ten tweede migreren geulen veelal langzaam met de tijd (inhammen daargelaten), waardoor de afzettingen wel tot 4/5^e kunnen uitmaken van sedimenten welke in kombergingsgebieden en estuaria worden afgezet. De platen zijn daarmee niet alleen verticaal dunner (vaak niet meer dan de getijdeslag), maar kennen ook een minder groter verspreiding. Hieronder worden de verschillende type platen besproken.

Subgetijdenplaten = permanent onder water liggende platen

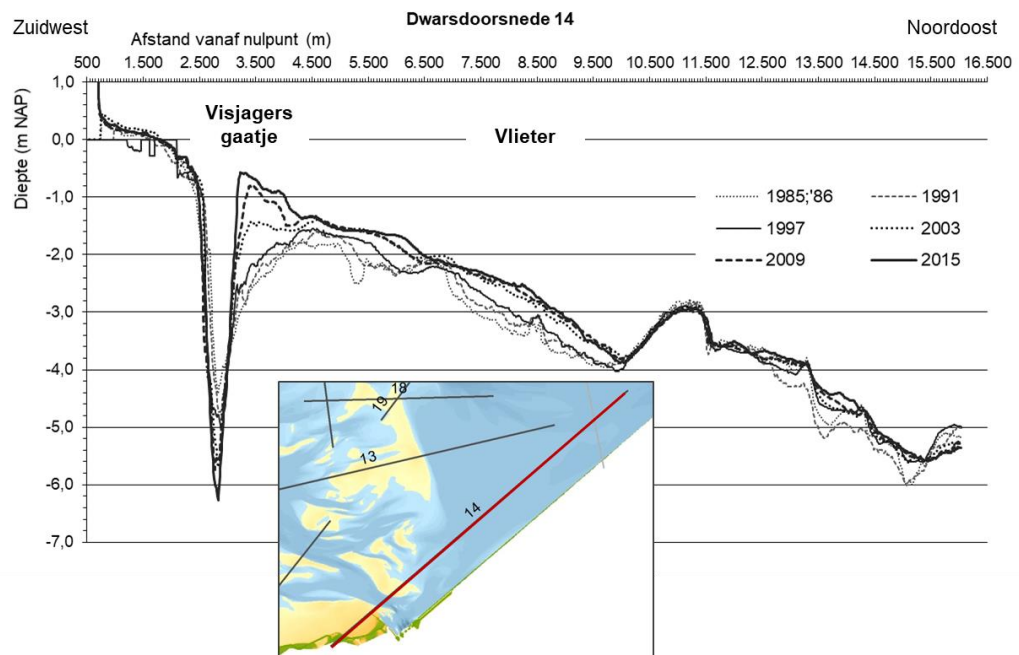
Subgetijdenplaten worden vaak vergeten in het geheel van platen en geulen. Dat is terecht, omdat het om aanzienlijke oppervlakten gaat. Bij wijze van voorbeeld: In het kombergingsgebied van het Marsdiep (geul tussen Den Helder en Texel) ligt 15% procent van het oppervlak boven de gemiddeld laagwaterlijn en behoort tot de droogvallende wadplaten. In het kombergingsgebied van het Vlie is dat ca. 52%. Het gebied onder de laagwaterlijn wordt automatisch gekarakteriseerd als getijdengeul. Een blik op de kaart leert echter dat duidelijke getijdengeulen een kleiner areaal beslaan en dieper liggen dan de omringende subgetijden plaatgebieden. Een eerste bepaling waarbij ervan uitgegaan is dat getijdengeulen beginnen rond NAP -3 m¹, laat zien dat 51% (Marsdiep), respectievelijk 30% (Zeegat van het Vlie) kunnen beschouwd worden als permanent onder water liggende platen.

Twee hoofdgroepen zijn tot nog toe onderscheiden (Cleveringa et al., in prep.):

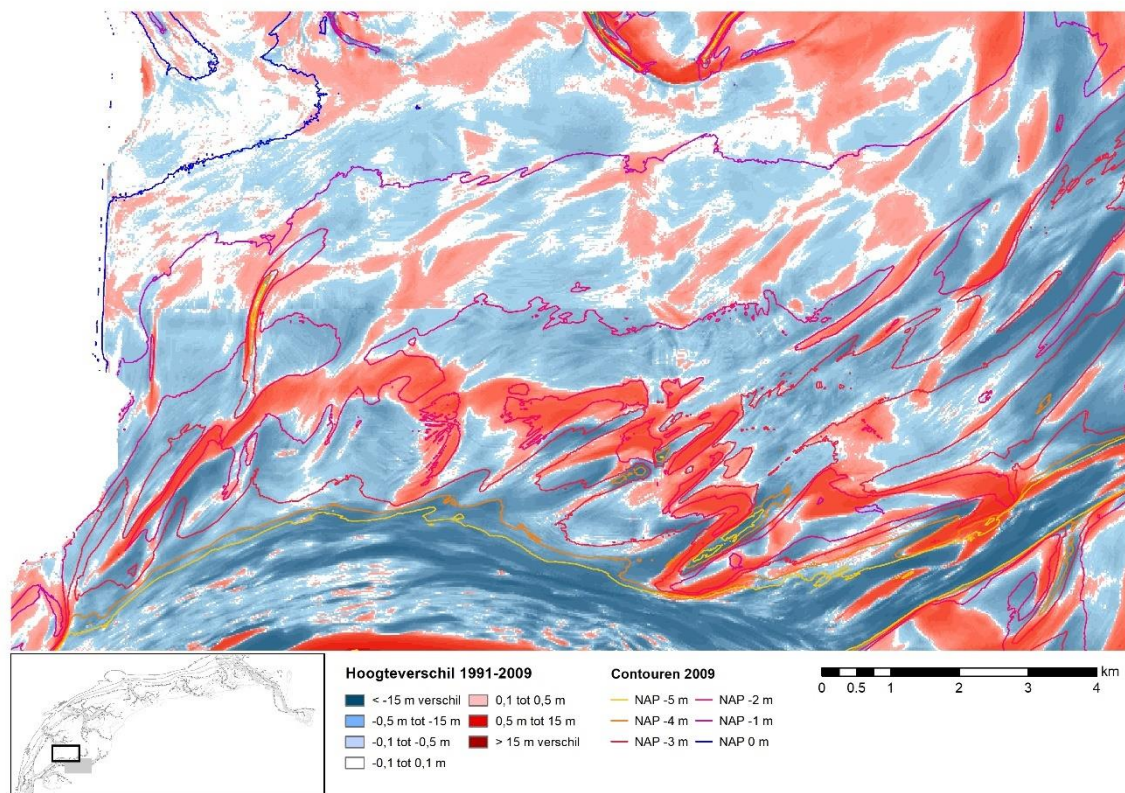
- 1 Opvullende verlaten geulen die veranderen in subgetijdenplaten. Dit kunnen geulen zijn die door afsluiting of overname door andere getijgeulen aan het opvullen zijn. Voorbeelden zijn de Vlieter welke is afgesloten door de Afsluitdijk (Figuur 2.16) en de Mok op Texel welke op natuurlijke wijze is afgesloten door een zandplaat aan een zijde. De opvulling gaat veelal met lagen met een dikte van een dm tot een meter per jaar. Veelal is dat slib in het zomerhalfjaar en zandigere afzettingen in het winterhalfjaar. Bioturbatie komt voor, maar is veelal niet overheersend. Door de opbouw van slib en zandlagen die vrij horizontaal zijn kent een dergelijke geulopvulling weinig dikke zandlagen van meer dan een meter.
- 2 Hanenkammen. Kenmerkend voor subgetijdenplaten zijn de aanwezige paraboolachtige bodemvormen van meerdere km lang die een lichte verhoging van 0,5 m vormen boven het oppervlak en zich geleidelijk over het oppervlak verplaatsen met enkele tientallen m/jr. De bodemvormen zijn niet alleen banken (verhogingen), maar voor elke bank is ook verdieping aanwezig. Mogelijk desintegreren de bodemvormen bij verder migratie hoger op de plaat geleidelijk. Het sediment bij de Hanekammen van de Vlakte van Kerk is zandig (zie figuren). Het is echter niet duidelijk welke bijdrage getijdenstroming en golven spelen aan de opbouw en migratie van deze bodemvormen. Ook is onduidelijk in

¹ Dit is een eerste inschatting, omdat het areaal van de geulen dat ondieper is dan NAP -3 m zo bij het sublitoraal wordt gerekend. Een meer geavanceerde berekening vraagt om scherper omschreven definities van getijdengeul en sublitoraal, die eerst moeten worden vastgesteld.

hoeverre deze banken bijdragen aan plaatopbouw en het veranderen van het plaatareaal. De geometrie van de overgang van sublitoraal naar het litoraal is in dit gebied ten zuiden van de Vlake van de Kerken in ieder geval duidelijk afwijkend van de normale overgang van geul naar plaat, die veel abrupter is.



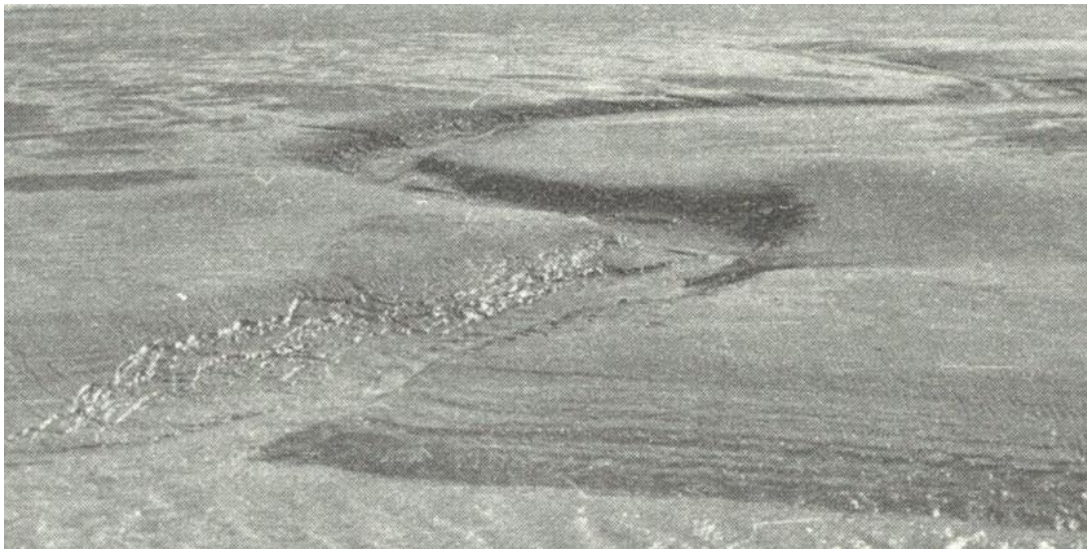
Figuur 2.16 Dwarsdoorsnede 14 door het Visjagersgatje en de Vlieter (zie inzet voor locatie) (Cleveringa et al., in prep.) met diepteprofielen van meerdere jaren. De subgetijdenplaten ten noordoosten van het Visjagersgatje liggen een stuk ondieper geworden.



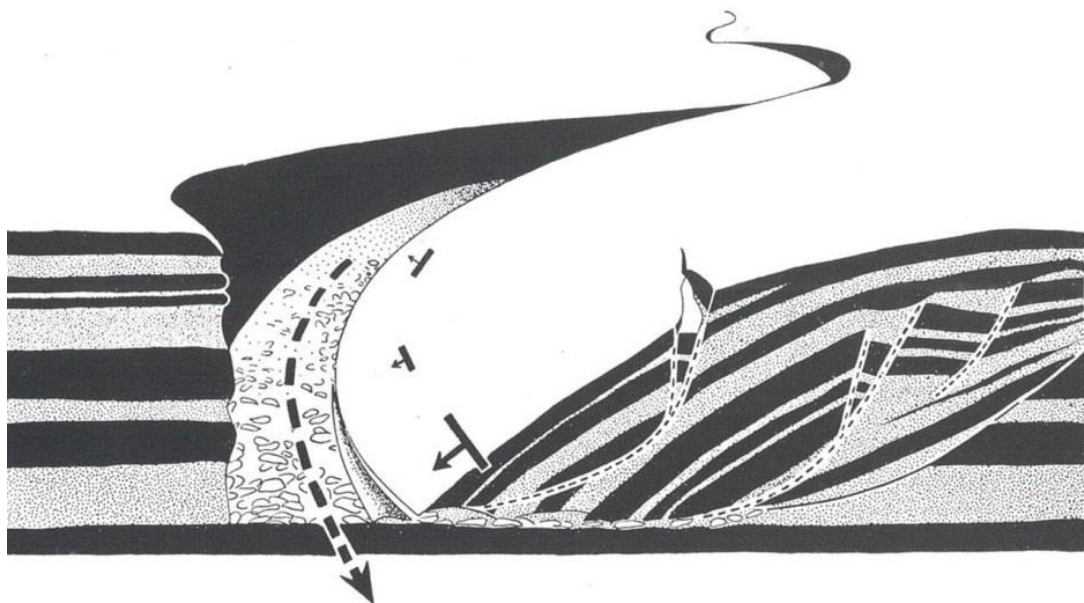
Figuur 2.17 Kaart van de ontwikkeling in het hoogteverschil tussen 1991-2009 van de subgetijdenplaten in de omgeving van de Vlake van de Kerken, O van Texel (Cleveringa et al., in prep.). De rode vlekken zijn migrerende hanenkammen.

Lage wadplaten

Op de getijdenplaten zijn de stroomsnelheden in het algemeen laag. In de zuidwestelijke Delta zijn ze, door de grotere getijslag, wel hoger dan in de Waddenzee. Op het moment dat het getijdenwater buiten de oevers van de geulen treedt nemen de stroomsnelheden snel af. De grovere korrels worden vooral direct nabij de geulen afgezet, waar ze oeverwallen vormen. Gedurende de eb fase treden de hoogste snelheden op rond het moment dat de getijdenplaten (bijna) drooggevalen zijn. De golven reiken tot op de bodem en wervelen het sediment op. Dit alles heeft tot gevolg dat suspensie transport domineert boven het grootste deel van de platen in de Waddenzee met uitzondering van de oeverwallen en de prielen.



Figuur 2.18 Priel op de lage intergetijdenwadplaten, ten noorden van Holwerd (Van Straaten, 1955).



Figuur 2.19 Schematische tekening van (deels afgegleden) lagen in een binnenbocht van een priel (rechter zijde): donker = slib; licht = zand (Reineck, 1967).

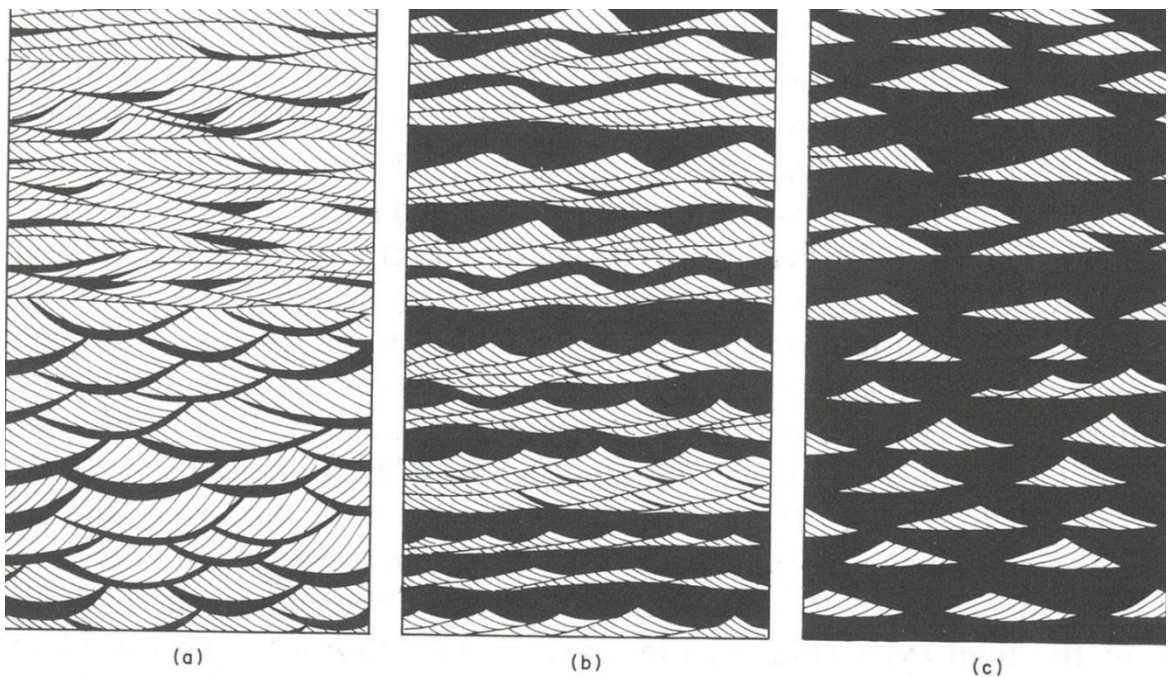
De prielen zijn de intergetijdengeultjes (soms nog net tot in het subgetijdendeel) die de platen draineren en waar snelheden tot meer dan 1 m/s kunnen optreden (Figuur 2.18). Deze prielen vormen tijdens meanderende migratie binnenbochtafzettingen welke vrij scheef staan en uit een afwisseling van zand en slib bestaan (Figuur 2.19). In de zuidwestelijke Delta zijn de stroomsnelheden soms dusdanig hoog op de platen ($U_{max}=0,8-1,2$ m/s), dat er vrijwel geen slib afgezet wordt.

De lagere platen worden door de stroming en golfwerking vooral door fysische structuren zoals golf- en stroomribbels gekenmerkt. Zand en slib gedragen zich hydrodynamisch zodanig anders dat ze als aparte laagjes worden afgezet (slib rond de kentering; zand vooral bij hogere energie; Figuur 2.19). Afhankelijk van de hoeveelheid slib die kan bezinken bestaan de plaatafzettingen alleen maar uit zand of kunnen mengvormen worden. Daarbij kunnen tussen de

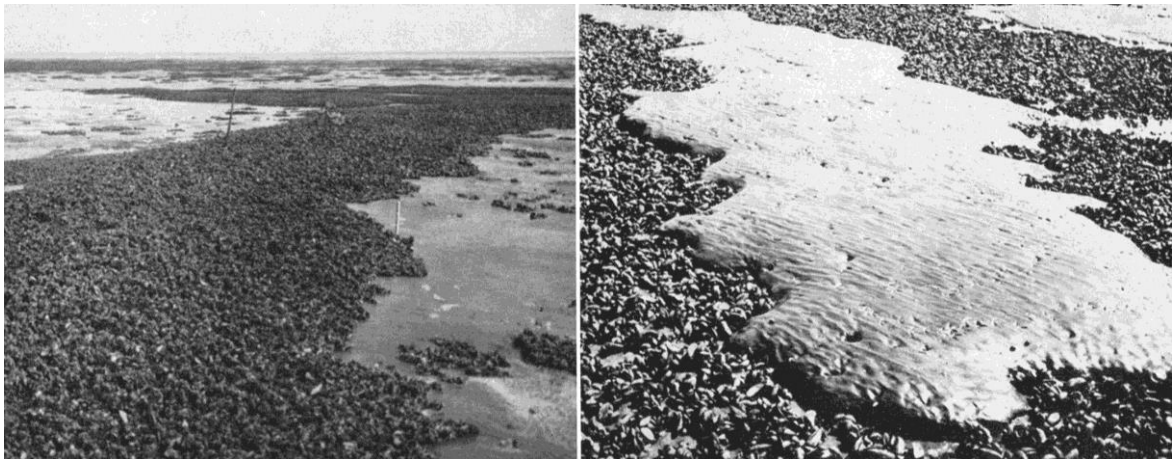
zandribbels de sliblaagjes deels bewaard worden (flaser bedding). Een andere mogelijkheid is dat er doorlopende sliblagen met daartussen zandige lagen opgebouwd worden via ribbelmi-gratie (lenticular bedding). Bij nog hogere slibconcentraties ontstaan zandlensen afgezet als ribbels in een matrix van slib (Figuur 2.21). Op een aantal plaatsen overheersen mosselbedden of oesterbanken en vormen biogene structuren met vrij veel slib erin (Figuur 2.22). Deze afzet-tingen worden binnen WBI-SOS ondergebracht in eenheid H_Mkw_z&k en als niet-pipingge-voelig beschouwd (Kruse et al., 2015).



Figuur 2.20 Laag-wad sediment met fijne gelaagdheid, uit prielzone bij Wilhelmshaven; licht is zand, donker is slib-rijker materiaal (Häntzschel, 1936). Afbeelding op ware grootte.



Figuur 2.21 Schema van (a) flaser bedding; (b) wave bedding & (c) lenticular bedding in een verticale doorsnede parallel aan de richting van golfvoortplanting of stroming (Allen, 1984).



Figuur 2.22 Links: Mosselbank op het wad bij Nes, Ameland; Rechts: Afzetting van mosselslib, op het wad bij Nes, Ameland (Van Straaten, 1964).

Hoge wadplaten

Naarmate de platen hoger zijn en er meer luwte komt gaan biota overheersen. Zij zorgen er door hun graaf- en voedingsbewegingen voor dat het sediment geheel gemengd wordt: slib en zand worden zo vermengd (Figuur 2.23). Zolang het slibgehalte (gewichtsperscentage) niet boven de 15% komt mag verwacht worden dat het slib in de poriën tussen de zandkorrels zit. Daarmee neemt de permeabiliteit van het zand af. Boven 15% begint het slib in toenemende mate zoveel volume in te nemen dat de zandkorrels elkaar steeds minder goed raken en deze gaan in toenemende mate “zweven” in een matrix van slib. Het slibgehalte dat van een bulkmonster wordt bepaald kan dus of het gevolg zijn van fysische gelaagdheid of een mengsel van slib en zand. In het laatste geval zullen vrij gemakkelijk alle zandporiën verstopt raken; in het eerste geval hoeft dat niet op te treden.

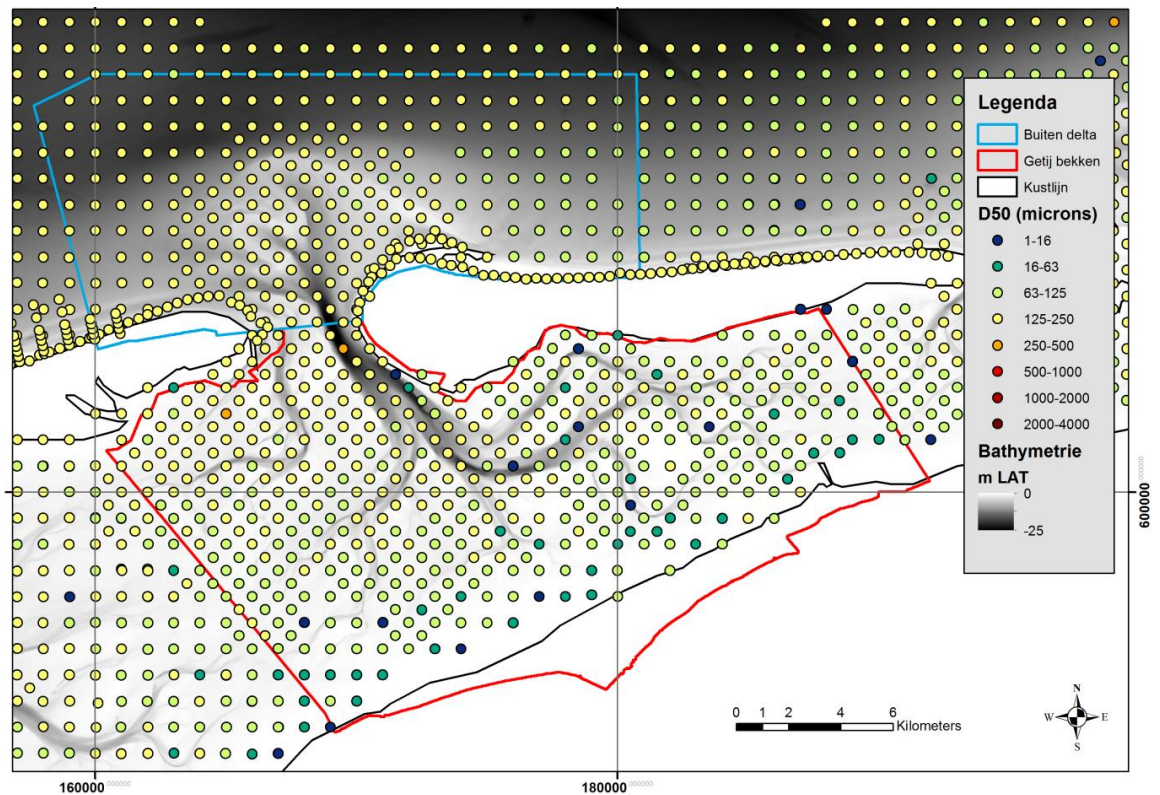


Figuur 2.23 Hoog-wad sediment met sterke bioturbatie uit oudere waddenafzettingen in de voormalige Lauwerszee op -12 m NAP (Van Straaten, 1964). Afbeelding op ware grootte.

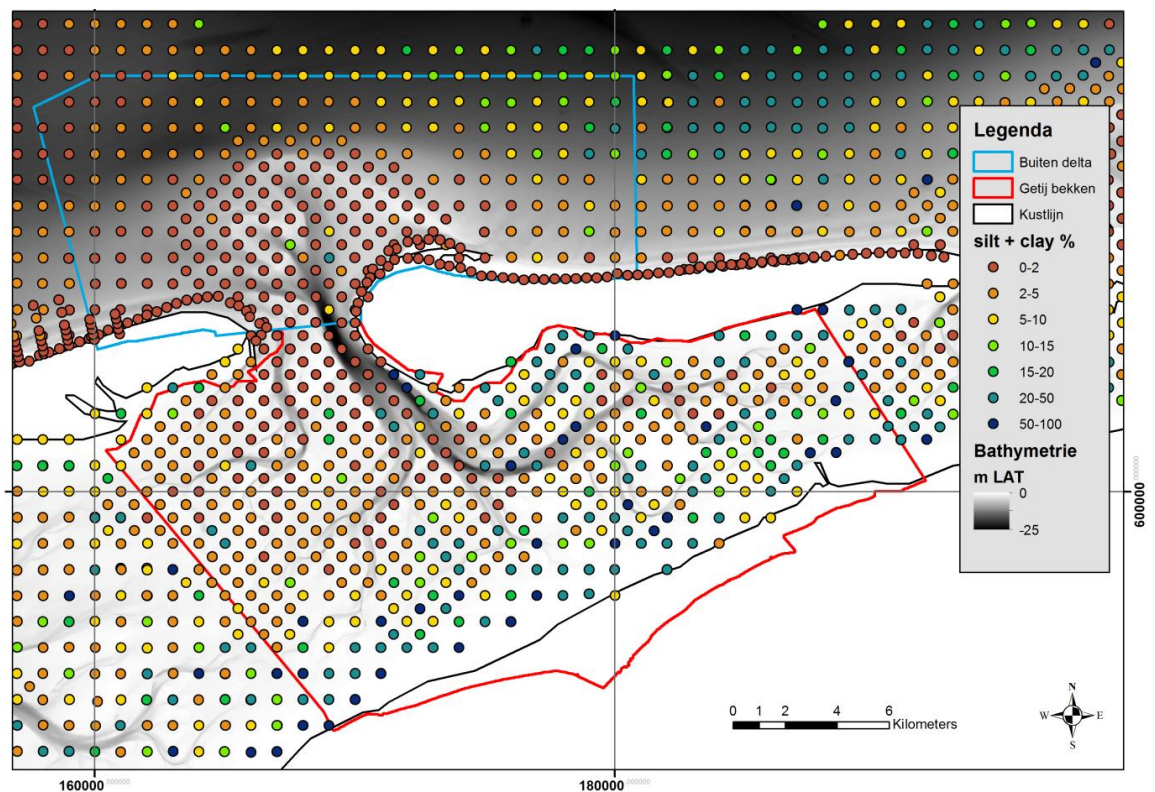
De slibrijke (*slib = silt en klei; meestal in een vrij vaste mengverhouding*) intergetijdenplaten zijn vooral te vinden boven gemiddeld zeeniveau, nabij het vasteland en in de luwte van de eilanden en bij waterscheidingen. Eysink & Biegel (1992) waren het eens met Postma (1961) dat golfwerking domineert op de platen en dat stroming niet belangrijk is. Dit wordt echter tegengesproken door waarnemingen:

- 1 In het algemeen neemt de korrelgrootte af, gaande vanaf de Waddeneilanden naar het vasteland (Figuur 2.24). Dit suggereert dat ook stromingen van belang moeten zijn want anders zouden de platen in de luwte van de eilanden net zo modderig zijn als nabij het vasteland. De afname van de korrelgrootte naar het vasteland toe (Flemming and Nyandwi, 1994) kan deels verklaard worden door de zogeheten settling lag (het deeltje bezinkt tijdens het eind van de vloedstroom voorbij het punt waar de stroomsnelheden het nog in beweging kunnen zetten tijdens de ebstroom) en scour lag effecten (de energie nodig om het deeltje tot bezinking te brengen is lager dan de energie om het weer in beweging te zetten; (Postma, 1954; Van Straaten and Kuenen, 1958)), en deels door de sorterende werking van de geulen zoals eerder toegelicht.
- 3 In vergelijkbare submilieus in de Waddenzee neemt de mediane korrelgrootte af van west naar oost (Eysink and Biegel, 1992). Aangezien de getijdenplaten ten oosten van Schiermonnikoog veel minder in de luwte liggen dan die ten zuiden van Ameland en Schiermonnikoog, is golfwerking niet de bepalende factor. Het mag duidelijk zijn dat een sorteermecanisme over de waterscheidingen en langs de kusten werkt in oostwaartse richting waar ook stroming een rol bij moet spelen.
- 4 Kamps (1962) observeerde dat gedurende stormvloeden de wind- en getijgedreven stroming bepaalt waar het sediment op de platen heen wordt getransporteerd.
- 5 Model studies geven aan dat de plaats waar slib kan sedimenteren vooral bepaald wordt door het getij. Hoewel door de geringe waterdiepten golven bepalen hoeveel en hoe snel slib weer in suspensie wordt gebracht, bepalen de getijdenstromingen het eigenlijke transport (Nieuwenhuis, 2001).

Al met al kan geconcludeerd worden dat de korrelgroottefracties in getijdenbekkens worden afgezet volgens een energiegradiënt. De algemene trend is een afname in zowel golfenergie als getijdenenergie die leidt tot een afname van de korrelgrootte (Figuren 2.23 en 2.24).



Figuur 2.24 Gemiddelde korrelgrootte van bodemonsters bij Ameland (RIKZ, 1998).



Figuur 2.25 Slib gehalte van bodemonsters bij Ameland (RIKZ, 1998).

6 Karakterisatie: Zandige getijdenplaatafzettingen

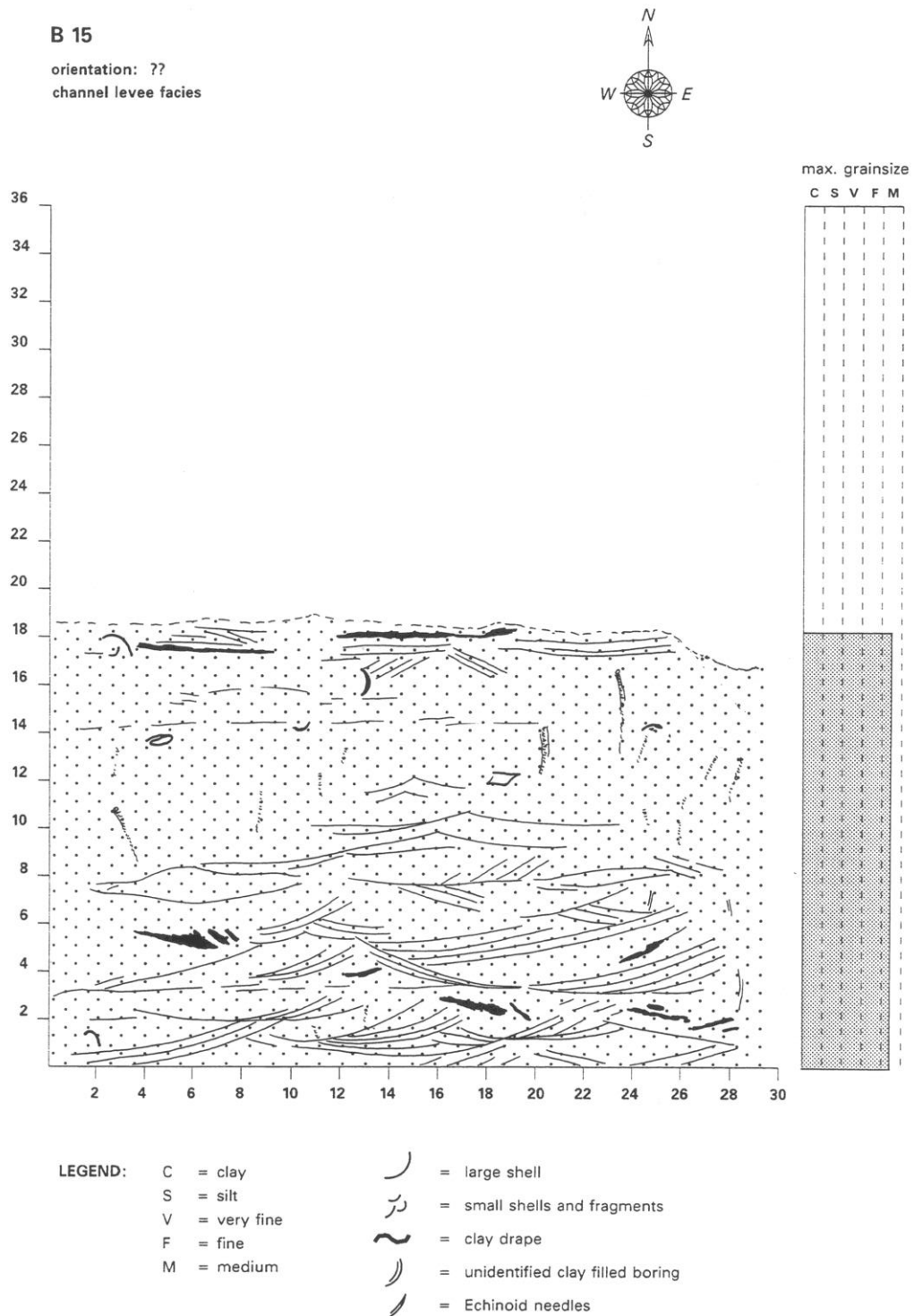
H_Mp_zf	Naaldwijk	Zandige getijdenplaat-afzettingen	Zand, fijn met weinig dunne klei/silt laagjes, kunnen uit relatief schoon zand schoon bestaan.
---------	-----------	-----------------------------------	--

Nadere karakterisatie

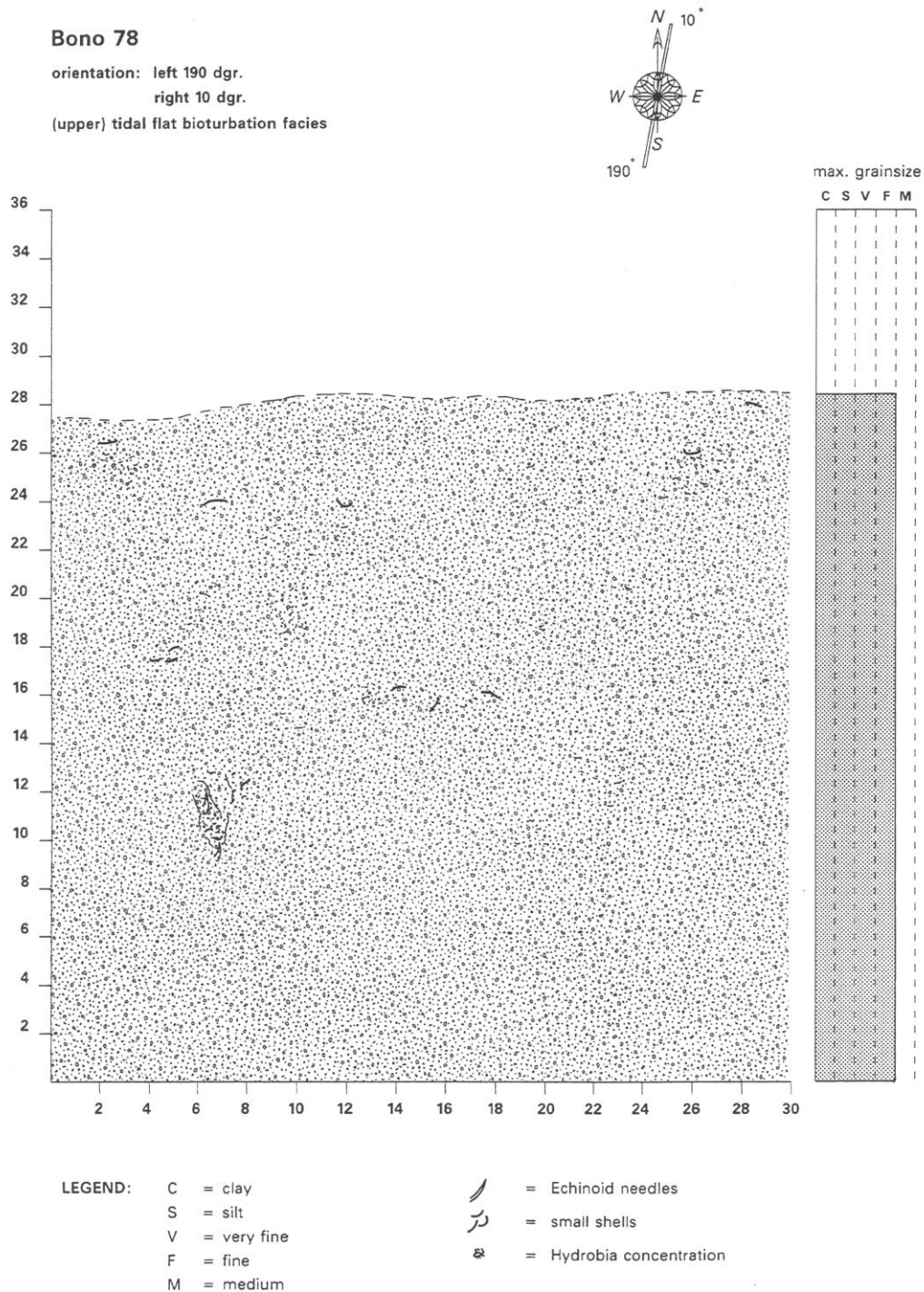
Zandige getijdenplaatafzettingen worden veelal gevormd tussen gemiddeld laagwater en gemiddeld hoogwater en hellen af naar de geulen toe en op grotere schaal naar de kust toe². De zandige intergetijdenplaatafzettingen bestaan uit een aantal verschillende subsoorten, waarbij de korrelgrootte afneemt van zandig naar slibrijk naar het vasteland en naar de eilanden en soms de waterscheidingen tussen geulsystemen:

- Zandige getijdenplaatafzettingen die aan de rand van geulen liggen en gedomineerd worden door megaribbels en/of grote banken. Door de hoge stroomsnelheden (tot ca. 1 m/s) kunnen deze afzettingen bestaan uit grover zand en komen er over het algemeen vrijwel geen sliblaagjes in voor (Figuur 2.26).
- Zandige getijdenplaatafzettingen die verder op de platen liggen, gevormd bij relatief hoge maximum stroomsnelheden (tot ca. 0,8 m/s). Deze snelheden worden op platen vooral bereikt bij grotere getijdenslag. De platen kunnen uit grover zand en megaribbels bestaan. Voorbeelden kunnen worden gevonden in de Westerschelde.
- Bij een beperkte getijdenslag (tot ca. 2 m) zal het zand op getijdenplaten vooral uit de suspensiepopulatie bestaan en dus fijnzandig zijn (< ca. 160 µm). De structuren zijn voornamelijk kleinschalige stroom- en/of golfribbels. Daartussen kan slib ingesloten zijn in zeer dunne laagjes (mm) die zeer discontinue zijn (flasers). Het slib kan tijdens de hoogwaterkentering zijn uitgezakt, maar het kunnen ook slibrijke faecespropjes zijn die zich als zandkorrels gedragen en lokaal lijntjes van klei vormen.
- In nog luwere gebieden wordt het zand en het slib door bioturbatie volledig door elkaar heen gewerkt en vormt het sediment een vrij homogene laag. Dit is veelal zeer ondiep, maar lokaal kan het ook op dieper water plaatsvinden. Bij een toenemend slibpercentage (gewicht) neemt de permeabiliteit van het sediment af. Bij een slibpercentage van 15% zijn alle korreelporiën verstopt. Deze zanden kunnen door migrerende prielen (= intergetijdengeulen) worden omgewerkt waarbij de binnenbochtafzettingen zandig tot slibrijk kunnen zijn (Figuur 2.27).

² Ook subgetijdeplaatafzettingen komen voor. Over het algemeen worden deze laatste gekarakteriseerd door grotere bodemvormen en soms ook grover zand.



Figuur 2.26 Afzettingen op intergetijdenplaat bij de waterscheiding rond GLW in het Pinkegat: schaal in cm; korrelgrootte aan de rechterzijde (Van den Heuvel, 1993).



Figuur 2.27 Intergetijdenafzettingen bestaande uit slib welke volledig gemengd is met het zand. Het mengsel heeft nog steeds de structuur van zand; Pinkegat, -1 m NAP; schaal in cm; korrelgrootte aan de rechterzijde (Van den Heuvel, 1993).

2.3.4 Kwelders

Kwelders (Waddenzee) of Schorren (Waddenzee en Delta) zijn begroeide gebieden die regelmatig door zeewater overstromd worden. Ze liggen enkele dm onder gemiddeld hoogwater (GHW) tot ca. 2 m boven GHW. De begroeiing op kwelders begint veelal met zeekraal dat al kan leven op enkele dm onder GHW. De planten beïnvloeden de stromingspatronen en bevorderen de opslibbing. Naarmate de kwelder hoger wordt zullen andere pioniersplanten de begroeiing overheersen. Door hun schikkende werking ontstaan er op de kwelder preferente kanalen waarin de waterstromen van en naar de kwelder zich concentreren. Dit zijn de krenken (Waddenzee) of slenken (Delta).

Boven GHW leven praktisch geen dieren: voor zoutwatersoorten is het te weinig frequent bedekt; voor zoetwatersoorten te vaak. Hierdoor wordt de gelaagdheid van de sedimenten niet of nauwelijks door dieren verstoord. Wel vindt verstoring plaats door in de bodem dringende plantenwortels. Dit is echter een veel geringer effect dan dat wat we bijvoorbeeld kunnen waarnemen bij bodemdieren op de wadsedimenten. De scheidingsvlakken in het sediment van de kwelders is zeer onregelmatig. De laagjes hebben een enigszins golvend of bobbelig verloop (Figuur 2.28). Dit komt niet alleen door de plantenwortels maar ook door de onregelmatigheid van de dikte omdat het sediment afgezet wordt op een oneffen, telkens indrogend oppervlak en gebonden is aan de tussenruimte tussen de plantenstelen (Van Straaten, 1964). Doordat de sedimentatie tijdens overstromingen optreedt, zullen de mm tot cm dikke laagjes meestal elk in korrelgrootte afnemen naar boven toe: van zandig naar kleiig. Daardoor vormt zich een vrij ondoordringbare pakket sedimenten die ondergebracht worden binnen WBI-SOS in de eenheden H_Mp_k (kleiige afzettingen) en/of H_Mkw_z&k (afwisselingen van zand en klei), beide niet-pipinggevoelig. In het geval van aanwezigheid van dunne veenlagen en/of organische kleien kunnen de eenheden H_Mp_ko (organische klei met dunne veenlagen) of H_Ml_ko (lagunaire, organische afzetting) gebruikt worden. Ook deze laatste twee zijn niet-pipinggevoelig (Kruse et al., 2015). Een woord van waarschuwing met betrekking tot gevoeligheid voor piping is dat van tijd tot tijd extreme stormvloed en zeer dikke zandlagen kunnen afzetten (tot ca. 1 m dik en 1 km landinwaarts). Dat kan zowel op de kleiige kwelder afzettingen gebeuren als op het zandige wad dat dan de aanzet kan zijn voor een nieuwe kweldervorming (Figuur 2.29).



Figuur 2.28 Onregelmatig gelaagd kweldersediment van het Klif bij Zoutkamp uit de voormalige Lauwerszee (Van Straaten, 1964). Afbeelding op ware grootte.

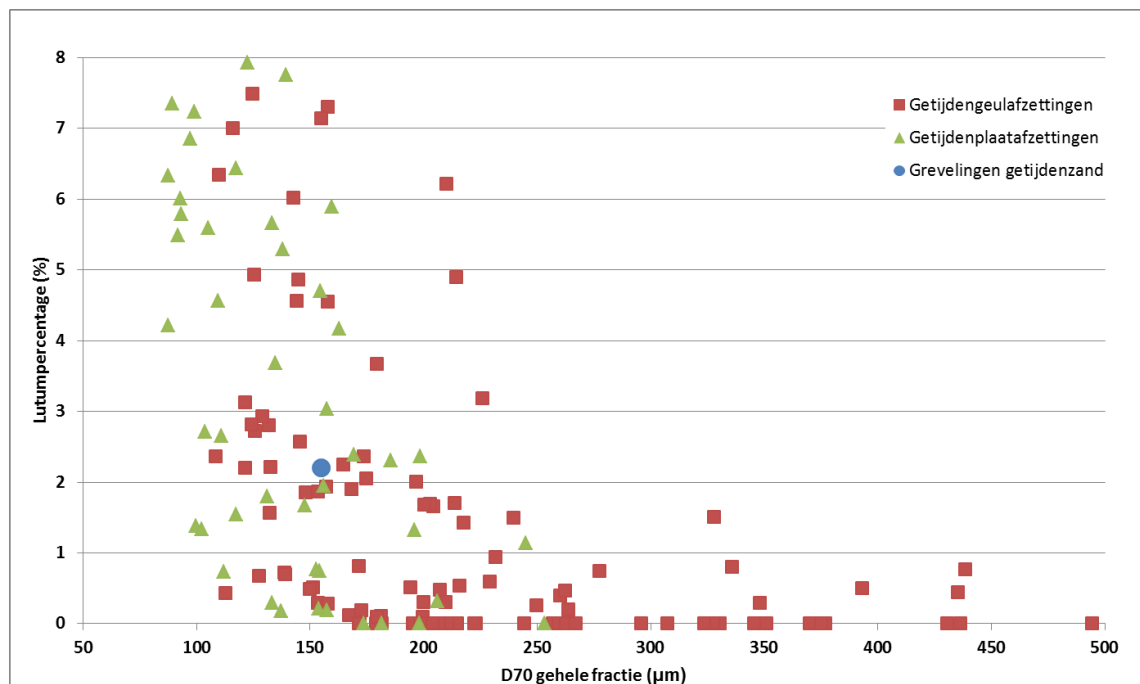


Figuur 2.29 Kern genomen in Noord-Groningen (top boven, links), waarbij potentiële stormvloedafzettingen van 1717 het hoge wad ophogen tot een kwelder, waarin laminae op cm schaal van zand en slib worden afgezet; gevolgd (bovenste kern) door de zandige stormvloedafzettingen van 1825 welke weer overgaan in slibrijke afzettingen aan de top (data Univ. Mainz).

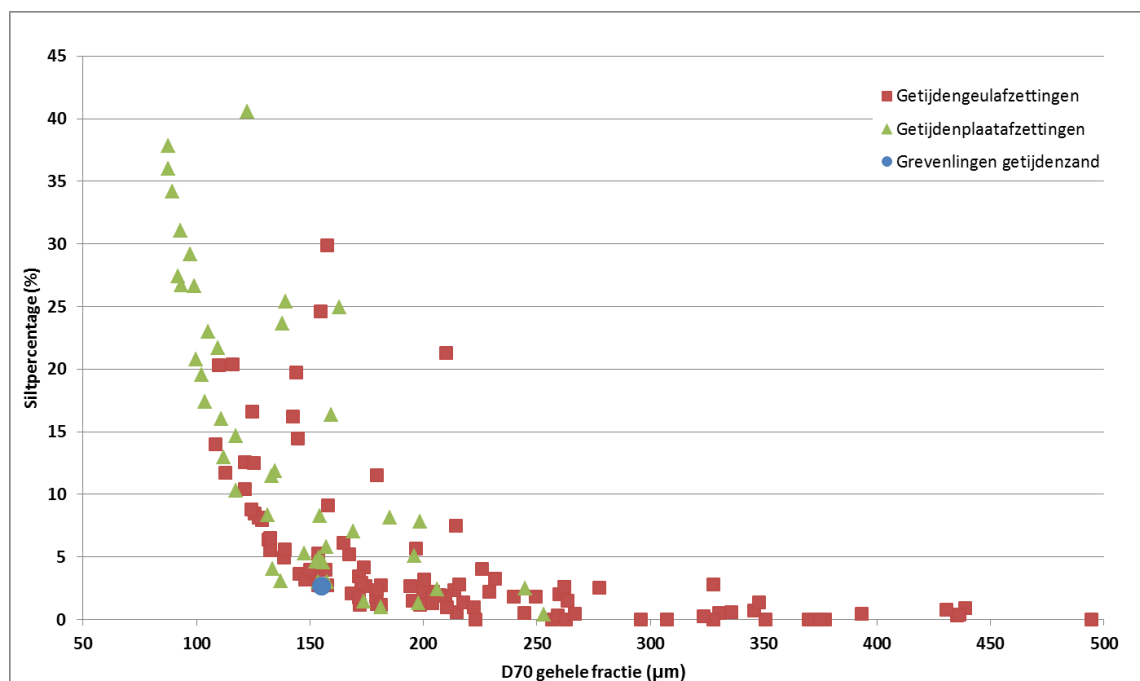
2.4 Korrelgrootteverdelingen getijdenafzettingen

Hierboven is meermaals aangehaald dat een belangrijk verschil tussen getijdenafzettingen en rivierafzettingen een veel grotere fijne fractie is, hiermee wordt de fractie kleiner dan $63\ \mu\text{m}$ bedoeld. Op basis van de korrelgrootte-database van TNO-Geologische Dienst van Nederland wordt hieronder een overzicht gegeven enkele korrelgrootte-karakteristieken van getijdenzandafzettingen. Deze karakteristieken omvatten niet meer de meer kleiige trajecten binnen getijdenafzettingen. De grafieken laten zien dat zowel in afzettingen die gelabeld zijn als getijdengeul als getijdenplaat een aanzienlijke lutumfractie in het zand aanwezig kan zijn, tot ongeveer 8%. Nogmaals, binnen getijdenafzettingen komen delen voor met aanzienlijke hogere percentages, maar de korrelgrootte-database richt zich met name op de zandige trajecten van getijdenafzettingen. Bij d_{70} -waarden hoger dan $200\ \mu\text{m}$ is nog nauwelijks lutum aanwezig in het zand. Ook de siltpercentages nemen sterk af rond d_{70} -waarden van $200\ \mu\text{m}$. Voor zand met een d_{70} kleiner dan $200\ \mu\text{m}$ ligt het percentage silt veelal tussen de 5 en 30%.

Een studie naar het karakter van plaatafzettingen in Zeeland (Erkens, 2012) laat zien dat de 98% van de als zand gelabelde plaatafzettingen gelaagd zijn met kleiige sublaagjes. Voor de als klei gelabelde plaatafzettingen geldt dat 68% hiervan gelaagd is met dunne zandige sublaagjes. Een groot deel van deze gelaagdheid is niet opgenomen in de boorbeschrijving, wat inhoudt dat de mate van gelaagdheid op basis van alleen een boorbeschrijving vrijwel altijd onderschat wordt. De sublagen hebben diktes van 0.1-0.9 cm.



Figuur 2.30 Lutumpercentage van zandige getijdenafzettingen, uitgesplitst naar plaat- en geulafzettingen, uitgezet tegen de d70 van de gehele fractie (Bron data: TNO-Geologische Dienst van Nederland). De blauwe cirkel geeft de karakteristieken weer voor de het gebruikte getijdenzand uit de Grevelingen.



Figuur 2.31 Siltpercentage van zandige getijdenafzettingen, uitgesplitst naar plaat- en geulafzettingen, uitgezet tegen de d70 van de gehele fractie (Bron data: TNO-Geologische Dienst van Nederland). De blauwe cirkel geeft de karakteristieken weer voor de het gebruikte getijdenzand uit de Grevelingen.

3 Getijdenafzettingen op de schaal van Nederland

Het vorige hoofdstuk heeft voor verschillende typen getijdenafzettingen in detail beschreven hoe ze er uitzien. Er is nog niet stilgestaan bij het aspect tijd. Een individueel laagje wordt afgezet gedurende een enkel getij, maar hoe uiteindelijk getijdenafzettingen bewaard blijven in de ondergrond wordt bepaald door ontwikkelingen op tijdschalen van millennia. Over het algemeen geldt: hoe groter de tijdschaal, hoe groter ook de ruimtelijke schaal waarop ontwikkelingen zich voltrekken. Voor een goed begrip van de verbreiding van mogelijke getijdenafzettingen en de mogelijke implicaties voor pipinggevoeligheid gaan we de schalen kort langs. Voor een uitgebreider begrip hoe de ontwikkelingen op de verschillende tijdschalen uiteindelijk leiden tot de opbouw die er nu is en de implicaties daarvan voor de pipinggevoeligheid wordt een geo(morfo)logische studie per deelgebied (Delta, Hollandse Kust en Waddenkust) aanbevolen.

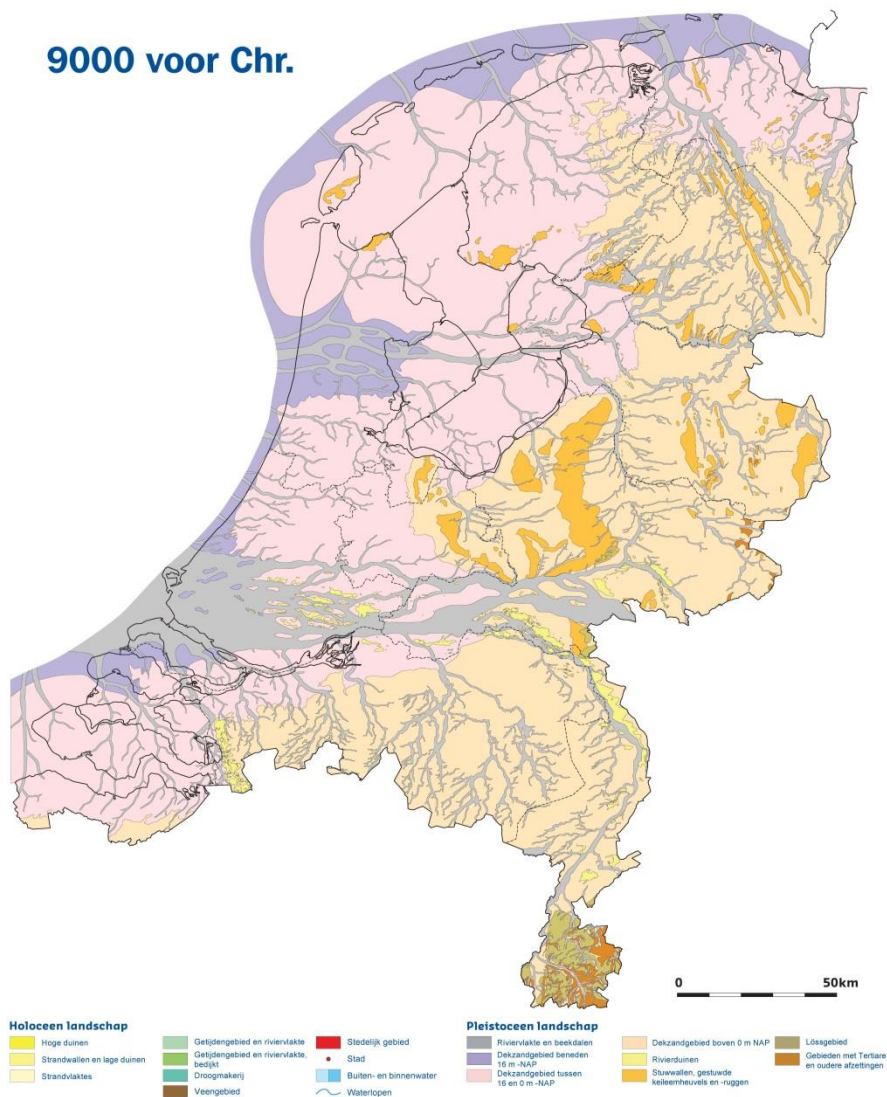
3.1 Millennia

Het grote patroon van de Nederlandse getijdenafzettingen is een gevolg van de afwisseling tussen koude perioden (glacialen, lage zeespiegelstand) en warme periode (interglacialen, hoge zeespiegelstand). Tijdens interglacialen treedt er in het algemeen netto sedimentatie op van getijdenafzettingen, maar tijdens glacialen zullen deze afzettingen door erosie weer (deels) verdwijnen. In glacialen worden ook wel getijdenafzettingen gevormd, maar door de lage zeespiegelstand vormden deze zich ver buiten de huidige kustlijn van Nederland. Na de piek van een glaciaal (grootste landijsmassa) volgt meestal een periode van 10.000-15.000 jaar met zeer snelle zeespiegelstijging (0.5-2 m/eeuw), waarna de stijgingssnelheid snel sterk afneemt. Door de stijging schuift het gebied waar zich getijdenafzettingen vormen in landwaartse richting, waarbij eerst de rivierdalen verdrinken. De depositieruimte die ontstaat in de rivier- en beekdalen en de beschikbaarheid aan sediment bepaalt in welke mate het dal opgevuld raakt. Wanneer de aanvoer groter is dan de behoefte kan netto een verondieping optreden. Indien de aanvoer kleiner is dan zal er een verdieping optreden. Indien beiden ongeveer vergelijkbaar in volume/tijdseenheid zijn dan zal een semi-evenwichtstoestand kunnen worden bereikt.

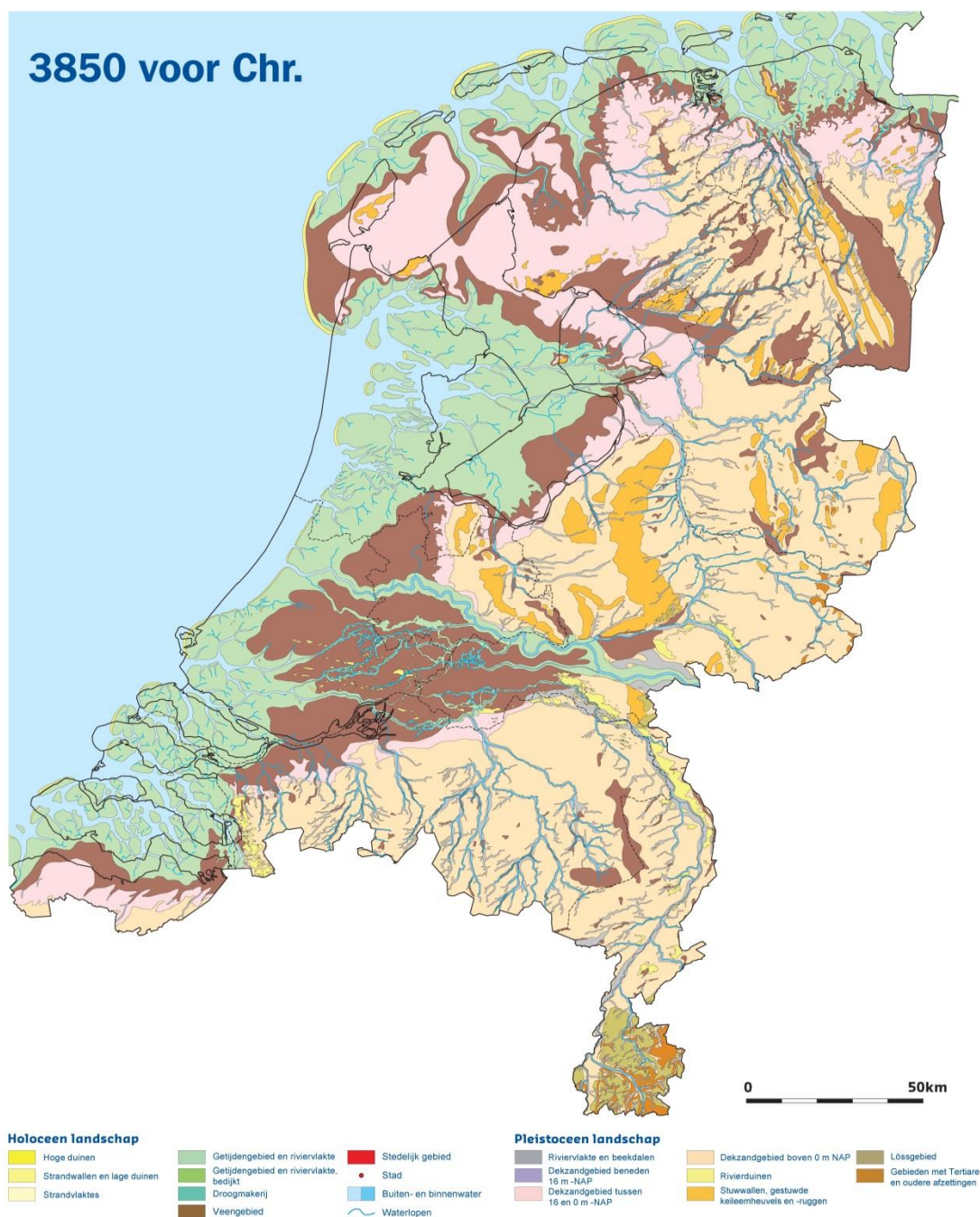
Omdat in het algemeen de zeespiegelstijgingssnelheid afneemt gedurende een interglaciaal mag verwacht worden dat opvulling gaandeweg gemakkelijker optreedt. Opvulling betekent meestal ondiepere condities en –indien het areaal niet te snel toeneemt– een afname in getijdenvolumes. Ondiepere condities leiden vaak tot een geleidelijke overgang van zandige naar slibrijke platen. Een afname van getijdenvolumes betekent eveneens verondieping van geulen en –indien deze zich verplaatsen, minder dikke zandige pakketten die worden gevormd. De afnemende dynamiek zal in het algemeen ook leiden tot geulafzettingen die slibrijker zijn. Deze processen spelen met name een belangrijke rol langs de Hollandse kust en een groot deel van de Friese en Groninger kusten. Daar mogen dus dikke zandige geulafzettingen worden verwacht welke zijn afgedekt met meer kleiige afzettingen. De Zeeuwse kusten, de voormalige Zuiderzee en de Eems zijn deels recentere inbraken in veelal veenrijke gebieden (zie eeuwen).

Aan de hand van kustreconstructies (Figuren 3.1-3.7) is redelijk te achterhalen welke grotere doorsnijdingen en opvullingen er aanwezig zijn in de kust. De aard is te achterhalen door opeenvolgende kaarten te vergelijken. Deze kaarten beschrijven de landschappelijke ontwikkelingen in het huidige interglaciaal, het Holoceen, dat 11.700 jaar geleden begon. De Holocene getijdenafzettingen zijn onderdeel van de Formatie van Naaldwijk. Getijdenafzettingen uit het voorgaande interglaciaal, het Eemien, zijn in verschillende delen van Nederland bewaard gebleven. Deze afzettingen horen bij de Eem Formatie, maar komen niet in de onderstaande kaartbeelden naar voren.

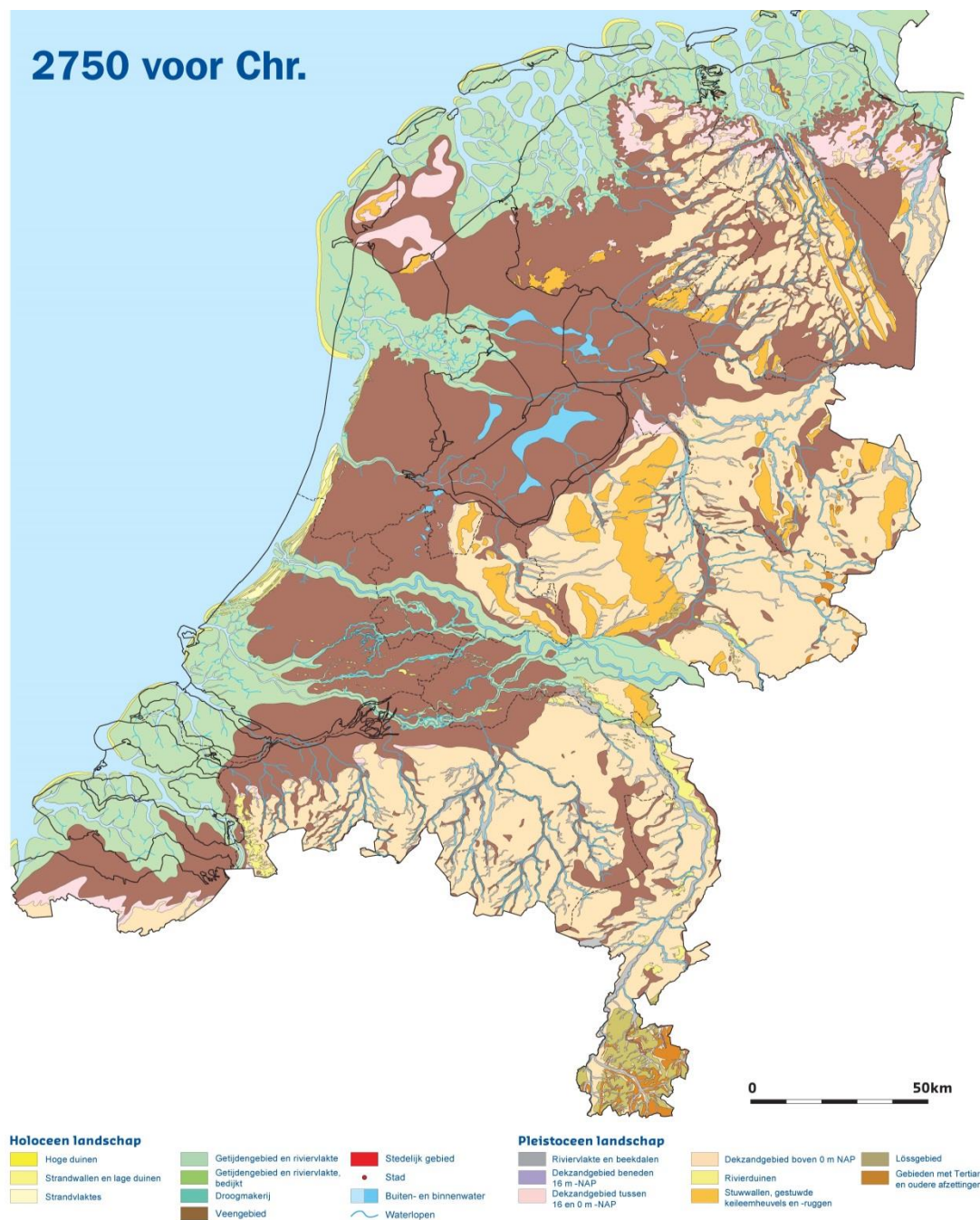
De conclusie is dat de afzettingen gevormd op grote tijd- en ruimteschalen vaak een resultante zijn van het al aanwezige paleo-relief, gevormd in een eerder stadium, en het sedimentaanbod. Waar dijken over dergelijk paleo-relief zijn aangelegd, dient in het algemeen rekening gehouden te worden met de mogelijkheid dat er onder een bovenliggende sliblaag een zandige geulafzetting aanwezig kan zijn met aanzienlijke dikte. In hoeverre deze geulafzettingen slibrijk zijn ligt aan de plaatselijke condities. De kaarten van het Holoceen kunnen een eerste indicatie geven van de mogelijke aanwezigheid van geulafzettingen onder dijken. De getoonde kaarten zijn afkomstig uit de Atlas van het Holoceen (Vos et al., 2011), maar er wordt continue gewerkt aan updates van deze kaarten. Ook zijn er voor verschillende regio's kaarten op grotere schaal beschikbaar.



Figuur 3.1 Deze kaart geeft een beeld van Nederland kort na de laatste ijstijd, toen een groot deel van het landschap uit begroeid zand bestond (Vos et al., 2011; Vos, 2015). De verschillende valleien (Rijnmond, bij Bergen, verschillende dalen in Friesland en Groningen) zullen als eerste gaan verdrinken bij de volgende zeespiegelstijging.



Figuur 3.2 Er is veel gebeurd in 5000 jaar. Grote delen van Zeeland, Zuid- en Noord-Holland en de huidige kustgebieden van Friesland en Groningen zijn onderdeel van een groot getijdengebied, waarin grote hoeveelheden zandige afzettingen worden gedeponneerd (Vos et al., 2011; Vos, 2015). Ter plaatse van de huidige kustlijn van Zuid- en Noord-Holland lag toen een open zee. In Noord-Nederland vallen de hoge en droge delen op, dit zijn delen waar de Pleistocene afzettingen relatief hoog liggen.



Figuur 3.3 De kustlijn in Zuid- en Noord-Holland sluit zich, in de overige kustgebieden blijft deze nog open. In het binnenland treedt grootschalige veenvorming op (Vos et al., 2011; Vos, 2015).



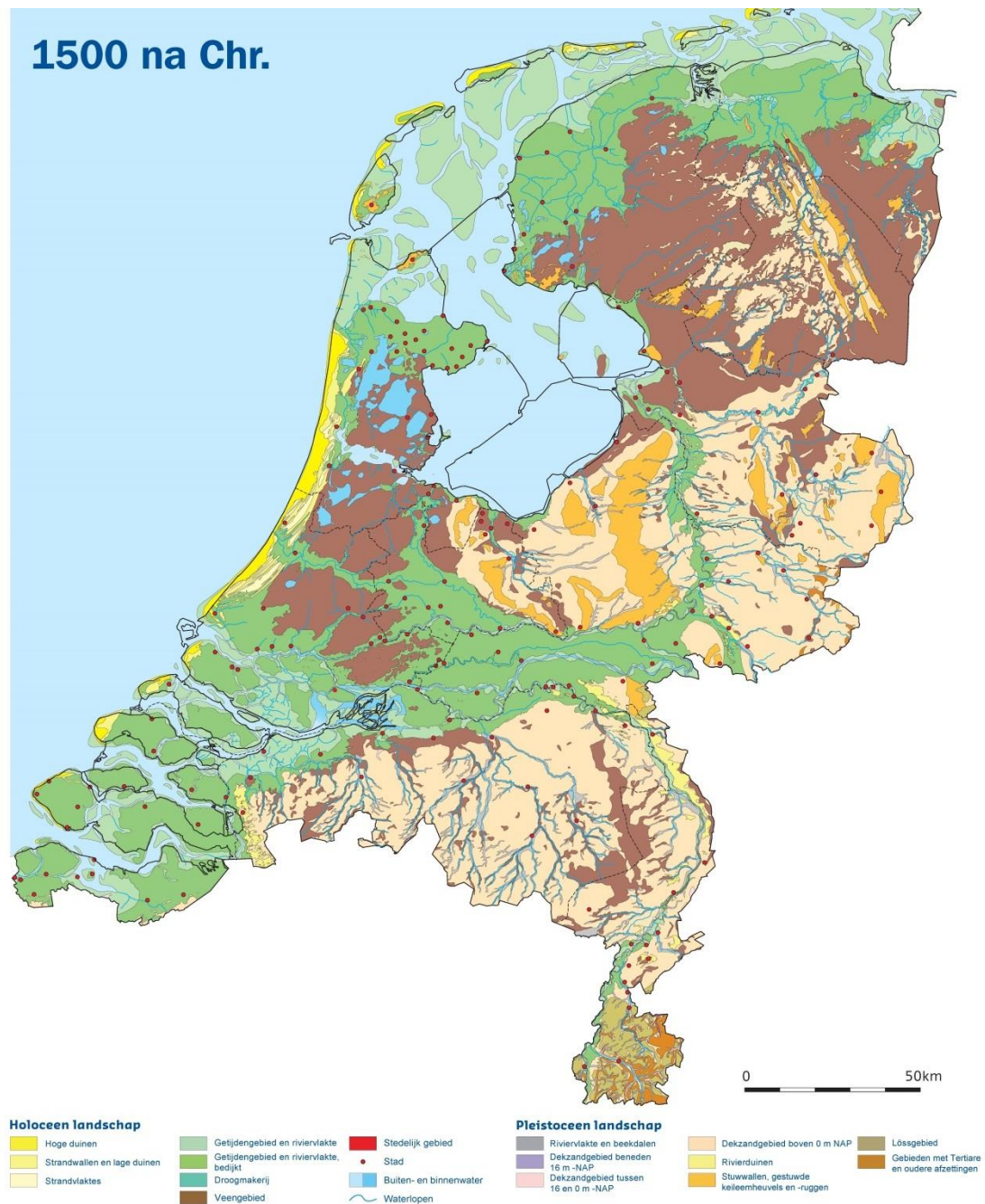
Figuur 3.4 Ook de kustlijn in Zeeland is nu goeddeels gesloten en de veengroei gaat onverminderd door. Het zee-gat van Bergen in Noord-Nederland is nog steeds open. Grote delen van de huidige kustlijnen van Friesland en Groningen liggen redelijk achterin de getijdenbekkens, waar relatief veel slib in de afzettingen aanwezig zal zijn. Langs de lijn van de huidige Waddeneilanden zijn al eilanden aanwezig (Vos et al., 2011; Vos, 2015).



Figuur 3.5 De situatie is redelijk gestabiliseerd. De kustlijn van Zeeland, Zuid- en Noord-Holland is nog steeds dicht, nu inclusief het Zeegat van Bergen. In het noorden zijn meer veranderingen opgetreden, zo is er een connectie ontstaan tussen de veenmeren in het huidige IJsselmeergebied en de Waddenzee en is de zee wat verder Friesland en Groningen binnen gedrongen (Vos et al., 2011; Vos, 2015).



Figuur 3.6 De zee is terug. In Zeeland is feitelijk volledig verdrongen en de connectie tussen de Waddenzee en het IJsselmeergebied is aanmerkelijk verbreed. Ook in Friesland en Groningen is het getijdengebied verder het land in geschoven (Vos et al., 2011; Vos, 2015).



Figuur 3.7 De mens neemt het over. Door middel van grootschalige bedijken lijkt de kaart al veel op de huidige kaart. De Zeeuwse en Zuid-Hollandse eilanden krijgen vorm en grote delen van Noord-Holland en Friesland en Groningen zijn bedijkt (Vos et al., 2011; Vos, 2015).

Wat vertellen deze reconstructies ons? Ze laten in ieder geval duidelijk zien dat inbraken en opvullingen elkaar afwisselen en dat de huidige dijken voor een belangrijk deel op oude mariene afzettingen staan. Daarnaast valt op dat in Friesland en Groningen een groot van de Waddenzeedijken van het vaste land op getijdenafzettingen zullen staan die redelijk ver in het getijdenbekken gevormd zijn en veel minder op grotere getijdengeulafzettingen zullen staan, in tegenstelling tot bijvoorbeeld de dijken in Zeeland. Er mag verwacht worden dat de relevante getijdenafzettingen in Friesland en Groningen in het algemeen dus slibrijker zijn. De kaarten

en zeker de meer regionale kaarten geven dus veel informatie over welk type afzettingen verwacht kunnen worden. Gebruik van dergelijke kaarten, in samenhang met hoogtebeelden en aanvullende ondergronddata, biedt veel mogelijkheden om de ondergrond gedetailleerd in beeld te krijgen.

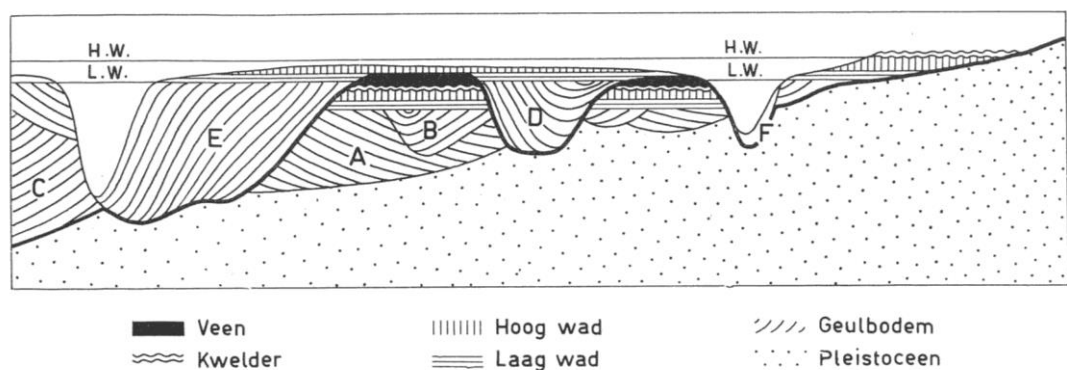
3.2 Eeuwen

Over periodes van eeuwen zijn er twee processen van groot belang:

- 1 Kustparallelle verschuiving van kustuitbouw- en terugtrekking onder invloed van belangrijke processen:

1.1 Verschuiven van zeegaten.

Een dergelijk verschuiven heeft tot gevolg dat ook het hele zeegatsysteem achter de kust mee kan gaan schuiven. Dit impliceert dat grote delen van het getijdensysteem omgeploegd worden door geulen die in de migratierichting een pakket van geulsedimenten achterlaten. Door dergelijke verschuivingen kan het gebeuren dat 80% van alle sedimenten geulafzettingen zijn, terwijl het momentane areaal aan geulen maar 20% is van een getijdengebied (Figuur 3.8).



Figuur 3.8 Schematische doorsnede door Waddenzeeafzettingen. Links Noordzezijde; rechts vastelandzijde.

Twee fasen zijn aangegeven: de tegenwoordige en een oudere gevormd bij een lagere stand van de zeespiegel. Na het opslibben in de eerste fase vormde zich veen op de kwelderafzettingen. De onderkant van de tegenwoordige fase is aangegeven met een dikke lijn (Van Straaten, 1964).

- 1.2 het in verschuiven van lokale plekken waar er verschil is tussen sedimentaanvoer en -afvoer. Dit kan bijvoorbeeld de erosie betreffen van een kaap of een netto aanvoer vanuit zee op een eilandkop of aanslibbing van een belangrijk stuk van de kust. Bij wijze van voorbeeld: de Groningse kust is aanzienlijk zeewaarts uitgebouwd sinds de Middeleeuwen, terwijl in dezelfde periode de NW Friese kust vrijwel stabiel was. Deze verschuivingen kunnen een uitbouw genereren van de kust waarbij deze hoger komt te liggen. Bij doorgaande ophoging kan het gebied zo hoog worden dat alleen stormen het gebied nog kunnen bereiken en er soms zandige afzettingen vormen: kwelderwallen in het suprage-tijdenbereik.
- 2 Het in kustdwarse richting overstroom van veelal veenrijke gebieden. Het overstroom van veenrijke gebieden door getijdenwater had in Nederland eigenlijk altijd tot gevolg dat het veen (dat vaak al gedraineerd was en bebouwd werd) nog lager kwam te liggen dan het al deed (zuurstoftoevoer, sulfaataanvoer, sedimentbedekking en drainage zorgen voor verlaging van het veen; stormvloed en getij zorgen voor erosie). Grote veengebieden zijn zo in korte tijd verloren gegaan en hebben plaats gemaakt voor getijdenafzettingen, zoals: de Westerschelde, delen van de Oosterschelde, het Marsdiepgebied, het voormalige Zuiderzeegebied, Middelzee en Lauwerszee en grote delen van de Dollard

(zie ook bovenstaande kaarten). Afhankelijk van de balans tussen sedimentaanbod en sedimentbehoefte, de eigen ontwikkeling en het management door de mens, kan erosie doorzetten (Westerschelde, Zuiderzeegebied) of sedimentatie overheersen (voormalige Dollard, Middellzee en Lauwerszee). Overheersing van sedimentatie zal ook hier weer in enkele eeuwen een gebied kunnen laten opvullen. Geulafzettingen zullen dan geleidelijk ondieper worden en het gebied zal uiteindelijk een slibvang worden: zo wordt een zandlichaam opgebouwd dat door slib overdekt wordt.

De basisconclusie is dat zowel parallel aan de kust als dwars op de kust tot in vrij recente tijd (late Middeleeuwen) zich erosie en sedimentatie hebben voorgedaan. Daardoor zullen dijken die een Middeleeuwse of latere oorsprong hebben vrijwel zeker bovenop de weer opgevulde inbraakzones liggen. Net als andere opvullingen is daarbij de kans aanwezig dat dit deels vrij dikke mariene geulzanden betreft die afgedekt zijn met klei.

3.3 Kleinere tijd- en ruimteschalen

Decennia

Over decennia kunnen platen opbouwen of afbreken en geulen zich aanzienlijk (horizontaal honderden meters en verticaal tientallen meters) verleggen met bijbehorende erosie (buitenbochten) en sedimentatie (binnenbochten). Dergelijke geulen zullen aanwezig zijn (geweest) in alle gebieden waar een significant getijdenvolume aanwezig is (geweest).

Jaren

Over jaren kunnen zich relatief kleine veranderingen voordoen in getijdengebieden, waarbij geulen lokaal tot een (ordegrootte) meter per jaar kunnen sedimenteren of eroderen en platen groeien met enkele centimeters in de verticaal. Horizontale verschuivingen worden primair bepaald door geulverleggingen (m/jaar).

Getijden

Over een getijde kan in geulen een sedimentdikte worden afgezet tot enkele dm bij een laterale verplaatsing over enkele dm waar het gaat om zandige afzettingen. De dikte van kleiafzettingen is enkele mm tot cm tijdens de kenteringen. Op platen gaat het om ribbels die over enkele golflengten of minder verschuiven. Dichter bij het land zijn de sedimentbewegingen op platen over het algemeen langzamer en is het sediment over het algemeen slibrijker. Stormvloeden kunnen tot meer zandige sedimenten leiden in dit milieu.

Resumerend kan gesteld worden dat de karakterisering met behulp van de globale WBI-SOS eenheden nuttig is en een goed startpunt voor het opstellen van een lokaal SOS, maar dat bij het opstellen van een lokaal SOS er nog veel winst te behalen is door de eenheden te bekijken vanuit een gedetailleerde landschappelijke bril, waarbij meer lokale SOS-eenheden onderscheiden kunnen worden. Op die manier kan bijvoorbeeld beter bepaald worden of de afzettingen uit grote getijdengeulafzettingen bestaan of juist uit kleine kwelderkreekaafzettingen. Daarbij is het van belang om gebruik te maken van (bestaande of te maken) lokale studies op een schaal van 1:25.000, aangevuld met ondergrondinformatie. Deze aanpak is alleen nodig voor die gebieden die op basis van de WBI-beoordeling als pipinggevoelig worden beschouwd.

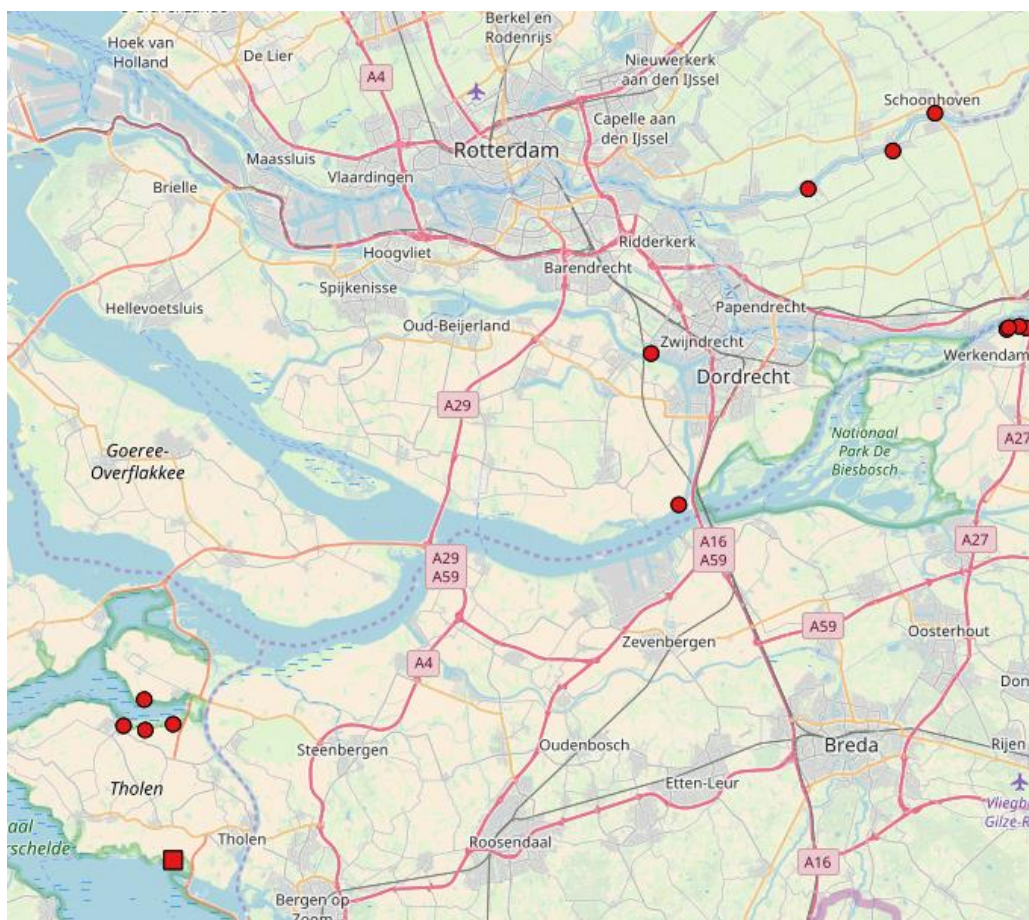
4 Inventarisatie van eerder onderzoek

In dit hoofdstuk wordt eerst een overzicht gegeven van observaties van zandmeevoerende wellen in delen van Nederland met getijdenafzettingen bij de keringen, waarna een memo over dit onderwerp kort wordt samengevat en vervolgens wordt ingegaan op laboratoriumproeven die een link hebben met getijdenafzettingen.

4.1 Veldobservaties

4.1.1 Zandmeevoerende wellen

Er zijn zeer weinig zandmeevoerende wellen bekend in gebieden met getijdenafzettingen. Onderstaand figuur geeft een overzicht van de bekende zandmeevoerende wellen in West-Nederland. Uit Noord-Nederland zijn geen gevallen bekend, afgezien van wat opwellend water in slootbodems en dergelijke. Een onderzoek naar de specifieke grondopbouw bij de wellen in Figuur 4.1 is voorzien binnen het Deelproject Zandmeevoerende Wellen in West-Nederland (Hijma, 2018).



Figuur 4.1 Overzicht van de zandmeevoerende wellen in de database (rode cirkels). Het rode vierkantje geeft de locatie aan van de dijkdoorbraak bij Strijenham (Tholen) die toegeschreven wordt aan het faalmechanisme piping.

4.1.2 Dijkdoorbraak bij Strijenharn

In Nederland worden enkele historische dijkdoorbraken direct toegeschreven aan het faalmechanisme piping. De drie doorbraken die het meest genoemd worden zijn Nieuwkuijk (1880), Strijenharn (Tholen, 1894) en Zalk (1926). In Buijs (2013) worden ook de doorbraken bij Afferden (1784) en Oosterhout (1820, Gelderland) nog aan piping toegeschreven. Voor andere dijkdoorbraken bestaan soms wel sterke vermoedens dat piping een rol gespeeld heeft, bijvoorbeeld bij het Wiel van Bassa waar een zandbaan de Diefdijk kruist, maar ontbreekt verdere evidentie. Van deze locaties ligt alleen Strijenharn in een gebied met getijdenafzettingen, te weten aan de zuidkant van Tholen. Opvallend is dat in de nabije omgeving, aan de noordkant van Tholen, zandmeevoerende wellen zijn waargenomen.

In Wilderom (1964) en Buijs (2013) wordt in redelijk detail ingegaan op de situatie bij Strijenharn. Ter plaatse van de doorbraak lag vroeger de opening van de Striene, een geul die in de 14^{de} eeuw reeds afgedamd werd (Wilderom, 1964) en vroeger een grensstroom vormde tussen Zeeland en Brabant. De naam Strijen is afgeleid van Striene. De Striene vormde vroeger wellicht een directe zuid-noordverbinding tussen Tholen en de Maas (Strienemonde bij Oud-Beijerland), maar door latere inbraken vanuit zee werd de Striene “doorgeknijpt” door het Haringvliet. Deze noord-zuidverbinding moet, indien hij bestaan heeft, relatief klein geweest zijn, aangezien deze op de schaal van een regionale geologische kartering (1:50.000) niet herkend wordt (bijv. Vos and Van Heeringen, 1997).

Het feit dat bij Strijenharn een dijkdoorbraak is geweest, lijkt dus direct bewijs te zijn voor het feit dat piping kan optreden in getijdenafzettingen. Het zand onder de deklaag zal inderdaad getijdenzand zijn en uit de boringen van Buijs (2013) blijkt dat dit zand goed gesorteerd en homogeen fijn zand is (d_{70} van 132 μm , uniformiteitscoëfficiënt van 2). Over de diepere zandlagen is minder bekend, geologische reconstructies geven aan dat dit gebied vroeger onderdeel was van de Scheldevallei, waardoor de diepere zandige afzettingen mogelijk relatief grof zijn en een fluviaal karakter hebben. Hierover valt op dit moment geen uitsluit te geven.

4.2 2015 memo

In dit memo is, met medewerking van Hans Sellmeijer, specifiek ingegaan op het optreden van piping in getijdenafzettingen (Kruse et al., 2015). Concreet worden in dit memo vier SOS-eenheden benoemd waarvan aangenomen mag worden dat deze niet-pipinggevoelig zijn en, afhankelijk van de diepteligging, tot de deklaag gerekend mogen worden. Het betreft de volgende kleigedomineerde eenheden:

- Getijdenrestgeulopvulling, H_Mr_kz
- Afzettingen van kleine getijdenplaat- en kweldergeulen, H_Mkw_k&z
- Kleiige getijdenplaat- en kwelderafzettingen, H_Mp_k
- Organisch materiaalrijke getijdenplaat- en kwelderafzettingen, H_Mp_ko

De invloed van kleilaagjes en/of een hogere kleifractie op het pipingproces in meer zandige afzettingen wordt als volgt beschreven:

- De verticale en horizontale doorlatendheid van de afzettingen wordt door de kleistroken en overige lokale verhogingen van de fijne fractie beperkt. Lagere doorlatenheden leiden, onder overigens gelijkblijvende omstandigheden, tot hogere kritieke vervallen in de voor piping gehanteerde benadering.
- De groei van tunneltjes wordt door barrière werking van kleilaagjes gehinderd en kan worden voorkomen.
- Mogelijk wordt de groei van tunneltjes beïnvloed door de invloed van de kleilaagjes op de lokale poriewaterdrukgradiënten.

In het memo wordt verder gesteld dat, afgezien van enkele kleine zandmeevoerende wellen bij graafwerkzaamheden, er zover bekend geen piping in getijdenafzettingen is opgetreden. Dit is wellicht niet geheel juist gezien bovengenoemde dijkdoorbraak en zandmeevoerende wellen bij Tholen. Geconcludeerd wordt dat naar alle waarschijnlijk de rekenregel van Sellmeijer veel te conservatief is voor piping in getijdenafzettingen en dat de beslissing om deze regel wel toe te passen bij getijdenafzettingen zal leiden tot het vermoedelijk onterecht afkeuren van veel dijkstrekkings. Er wordt echter ook gesteld dat er vooralsnog onvoldoende onderbouwing bestaat om alle getijdenafzettingen als niet-pipinggevoelig te beschouwen en dat aanvullende experimenten en terreinwaarnemingen nodig zijn om een volgende stap te kunnen maken in het maken van realistische beoordeling van de pipinggevoeligheid van getijdenafzettingen.

4.3 Laboratoriumproeven

Er zijn geen laboratoriumproeven bekend die specifiek de werking van piping in getijdenafzettingen onderzoeken. Wel is duidelijk dat een barrière, in de vorm van bijvoorbeeld een dunne kleilaag als een grofzandige laag, pipegroei tegen zal gaan (zie ook §4.2). Er zijn wel laboratoriumproeven gedaan waarbij de fijne fractie niet uit het materiaal is gezeefd, zoals meestal wel gedaan wordt, waardoor de invloed van de fijne fractie op het pipingproces geanalyseerd kan worden. Hieronder volgt een beschrijving van deze onderzoeken.

4.3.1 Kohno et al. 1987

Kohno en collega's rapporteerden in 1987 over proeven op zand waarbij gevarieerd is met sortering (1987). Gezien het grote verschil in geometrie van het uittredepunt tussen Kohno et al. en de huidige studie en het feit dat de manier van bezwijken niet op piping lijkt, maar eerder op afschuiving, worden hun resultaten verder niet meegenomen (in lijn met Allan, 2018).

4.3.2 Onderzoek op Loire zand 2011

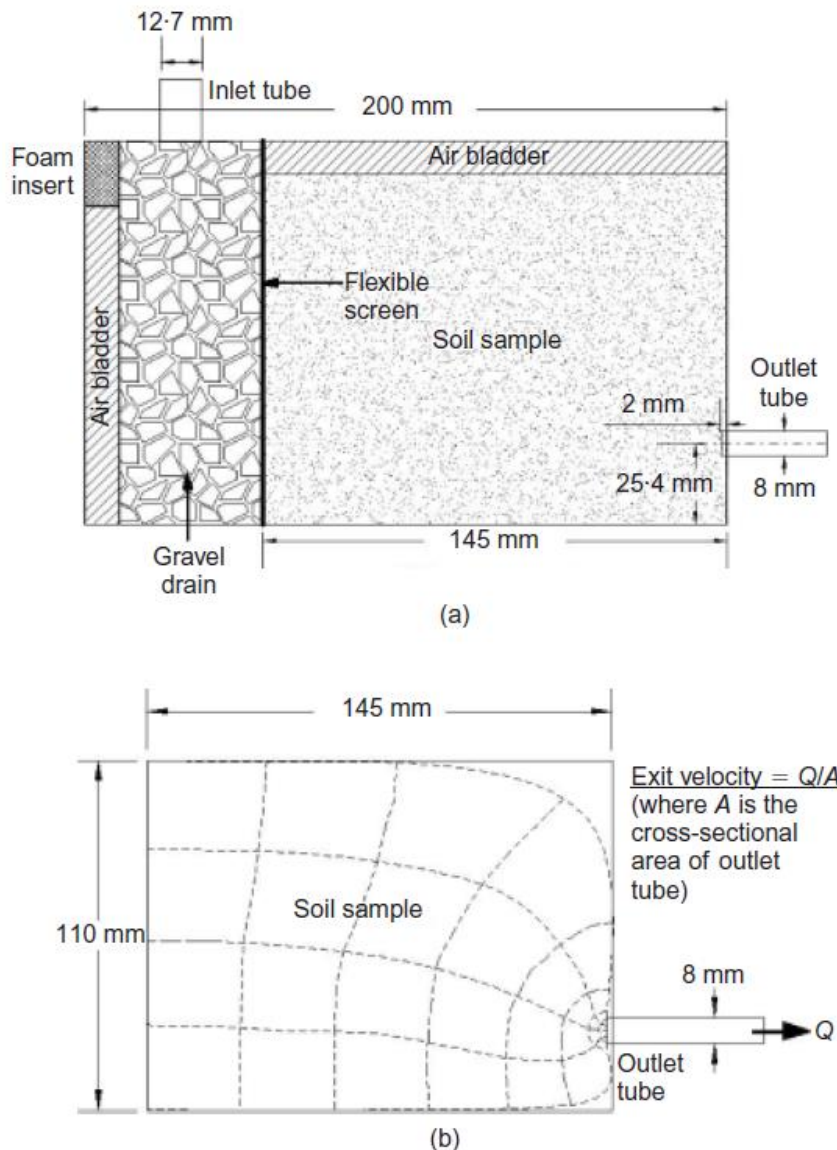
In 2011 zijn 2 proeven uitgevoerd op Loire zand, afkomstig uit Frankrijk nabij Orléans (Luijendijk and Van den Ham, 2011). Dit zand had een relatief hoge uniformiteitscoëfficiënt van 3.3 en relatief veel fijn materiaal (3% lutum, 4% silt). Tijdens de proef viel op dat het fijne materiaal (waarschijnlijk kleiner dan 60 μm) uitspoelde vanaf een verval van 30 cm. Dit resulteerde in veel kleine pipes, maar pas bij een verval van 120 cm ontstond een 'echte' pipe en bij 180 cm vormde zich een grote en brede pipe. Bij een vergelijk van het kritieke verval met de uitkomsten van Sellmeijer bleek het gemeten kritieke verval 3.1-4.6 maal hoger te liggen.

4.3.3 Richards en Reddy 2012

Het onderzoek van Richards and Reddy (2012) richtte zich specifiek op de verschillen in het pipingproces tussen niet-cohesief en cohesief materiaal. De meetopstelling verschilt sterk ten opzichte van de opzet die gebruikt wordt bij Deltares en haar voorgangers, omdat het zand in een triaxiaalcel zit. De verschillende soorten zand worden eerst gezeefd om het grofste materiaal er uit te halen en vervolgens gemengd aangebracht om isotrope condities te krijgen. De druk wordt uniform aan 1 zijkant van de cel opgevoerd, waarbij onderaan de andere zijkant zandmeevoerende wellen kunnen ontstaan en het zand afgevoerd kan worden via een slangetje. Het materiaal bestond vaak uit relatief grof zand, soms ook met grind, waardoor er regelmatig ook suffosie van fijn materiaal optrad.

Bij enkele proeven is zand gemengd met klei, zowel kaolinite als montmorilloniet. Bij kaolinite trad een sterke verlaging op van de benodigde kritische gradiënt voor bezwijking, waarbij eerst uitspoeling van het fijne materiaal zichtbaar is en vervolgens versneld terugschrijdende erosie optreedt. Bij menging met montmorilloniet neemt de benodigde kritische gradiënt juist sterk toe. Het bezwijkmechanisme is hierbij echter niet terugschrijdende erosie, maar geconcentreerde lekerosie langs de randen van de cel. In het artikel wordt de oorzaak van het verschil niet in

detail uitgelegd, afgezien het benoemen dat kaoliniet een lagere plasticiteit heeft dan montmorilloniet.



Figuur 4.2 De meetopstelling van Richards and Reddy (2012). Boven: de druk wordt links gelijk verdeeld aangebracht via een grinddrain en rechtsonder is uitgang waar zandmeevoerende wellen ontstaan. Onder: het stromingspatroon door het isotrope materiaal.

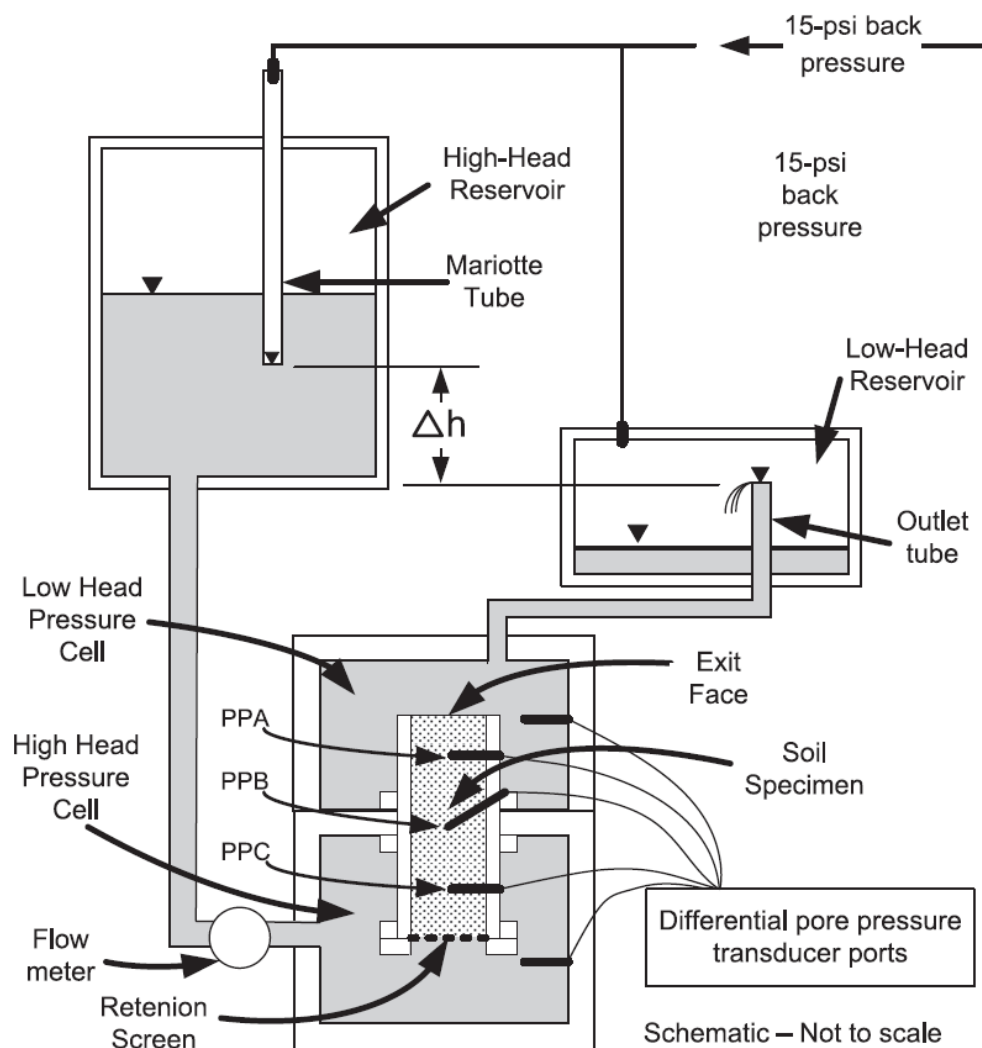
4.3.4 Heterogeniteitsrapport 2014

In 2014 is een rapport verschenen in het kader van WBI-2017 waarin gekeken is naar de invloed van heterogeniteit op het pipingproces (Van Essen et al., 2014). Hierbij zijn verschillende vormen van heterogeniteit bekeken, bijvoorbeeld een golvende onderkant van de deklaag, invloed van wisselende d_{70} -waarden, barrières (grofzand, textiel), maar ook de invloed van de korrelgrootteverdeling op piping. Hierbij zijn, in afwijking van de proeven waarop het Sellmeijer-model gebaseerd is, 15 proeven uitgevoerd met de gehele korrelgrootteverdeling van het zand. De kritieke vervallen zoals volgend uit de proeven zijn vervolgens vergeleken met de kritieke vervallen volgende uit het Sellmeijer-model. Hieruit volgt, na correctie voor het feit dat

Sellmeijer voor een 2D-configuratie is opgesteld en de proeven uitgevoerd zijn in een 3D-configuratie (zie beneden en Van Beek et al., 2015), dat het gemeten kritieke verval gemiddeld 20% hoger ligt dan berekend met het model van Sellmeijer (met een range van 27% lager tot 150% hoger). Let op: bij deze proeven is alleen kwarts zand gebruikt, geen lutum.

4.3.5 Fleshman en Rice 2014

Mandie Fleshman en haar collega beschrijven pipingproeven uitgevoerd met een opvallend andere opzet (Figuur 4.3). Het initiëren van piping wordt bestudeerd.



Figuur 4.3 Opstelling voor pipingproeven zoals gebruikt door Fleshman and Rice (2014).

Bij deze opstelling worden relatief kleine zandmonsters in een verticale cilinder geplaatst. Deze cilinder bevindt zich in een drukkamer, waarbij de druk als deklaag fungeert. Door het opzetten van een gradiënt kan het heave- en pipingproces bestudeerd worden. Bij de proeven is gevarieerd met het type zand (gewicht, hoekigheid, sortering). Niet geheel verrassend treedt er minder snel heave op als het zand zwaarder is door de aanwezigheid van zware mineralen. Met betrekking tot hoekigheid wordt geconcludeerd dat hoekig zand minder snel in beweging komt, omdat de korrels in elkaar haken. De mate van hoekigheid zat eerst ook verwerkt in het Sellmeijer-model (KAS parameter), maar wordt binnen WBI thans niet meer gebruikt, omdat zowel het effect van deze parameter als de verwachte variatie van KAS voor Nederlandse zanden

klein zijn. De derde conclusie is dat de gevoeligheid voor piping afneemt met een toenemende slechte sortering. Een proef is uitgevoerd met zand waaraan klei is toegevoegd. Vanwege de klei kon het materiaal minder verdicht worden dan bij de monsters die volledig uit zand bestonden en daardoor was de benodigde gradiënt voor het optreden van heave relatief lager dan bij de andere proeven. Het precieze effect van de klei op de pipinggevoeligheid wordt nog onduidelijk genoemd.

4.3.6 Negrinelli 2015

In de periode 2014-2015 heeft Giacomo Negrinelli (Universiteit van Brescia) zijn afstudeeronderzoek bij Deltares uitgevoerd. Zijn onderzoek richtte zich op piping in heterogeen opgebouwd zand en hij maakte gebruik van dezelfde proefopstelling die bij het huidige onderzoek gebruikt is. De proeven uitgevoerd met 'micro-scale heterogeneity' zijn hier het meest relevant. De micro-schaal heterogeniteit is aangebracht door de proefopstelling te vullen met water en steeds een beperkte hoeveelheid in het water te doen. Door differentiële valsnelheden vormt zich een laagje dat naar boven toe steeds fijner wordt. Het herhalen van deze procedure resulteert in een opbouw met 'fining-upward' sequenties. Bij een vergelijk van de kritieke vervallen tussen de proeven met micro-schaal heterogeniteit en proeven waarbij het zand gemengd is aangebracht, bleek dat bij micro-schaal heterogeniteit het kritieke verval 28% tot 46% hoger ligt. De proeven zonder gelaagdheid zijn beschreven in (Van Beek et al., 2015). De verklaring hiervoor wordt enerzijds gezocht in de fysieke barrières die ontstaan bij het gelaagd aanbrengen, maar ook in een afname van de bulkdoorlatendheid. De sterkte winst van 28% wordt behaald bij Enschedé zand, dat een siltfractie heeft van slechts 0.5%. De lutumfractie is niet bepaald, maar naar verwachting vrijwel nihil. De grotere sterkte winsten worden behaald bij Itterbeck Mixture 2, dat een siltfractie heeft van 14.6% en een onbekende lutumfractie. De d_{70} van dit laatste zand ligt rond de 200 μm .

4.3.7 University of New South Wales lopend onderzoek

In Australië werkt Rebecca Allan momenteel aan proefschrift over piping in slecht gesorteerd (well graded) zand. In een congresartikel (Allan et al., 2016) laat ze zien dat met het toenemen van de uniformiteitscoëfficiënt (d_{60}/d_{10}) het kritieke verval ook stijgt. Het bereik van de gebruikte coëfficiënten ligt tussen 1.3 en 8.8, waarin het kritieke verval met een factor 10 toeneemt. Zeer recent (begin december 2018) is haar proefschrift beschikbaar gekomen (Allan, 2018). Er was niet genoeg tijd om voor het verschijnen van dit conceptrapport het proefschrift (1012 blz.) goed door te kunnen nemen. De focus lijkt met name te liggen op de invloed van sortering op piping. In het geval van getijdenzand is de sortering vaak goed (relatief lage uniformiteitscoëfficiënt), maar speelt juist de fijne fractie een belangrijke rol.

5 Demonstratie van piping in getijdenzand

5.1 Gebruikt getijdenzand

Voor de pipingproeven is zand opgehaald uit het Grevelingenmeer, in de nabije omgeving van het vogeleiland Markenje. Momenteel worden daar graafwerkzaamheden verricht om het eiland te vergroten en het water er omheen (deels) te verdiepen. In overleg met het waterschap Hollandse Delta en aannemer Verboon en Maasland is toestemming verkregen om getijdenzand van deze locatie te verzamelen (Figuur 5.1).

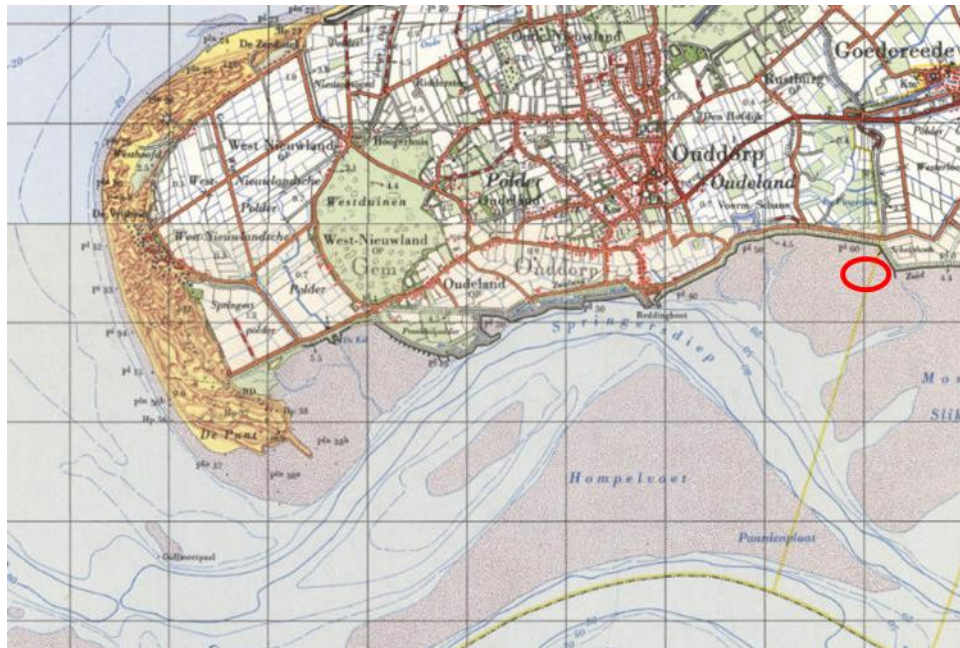


Figuur 5.1 Locatie bij Markenje (Grevelingenmeer) waar het getijdenzand verzameld is.

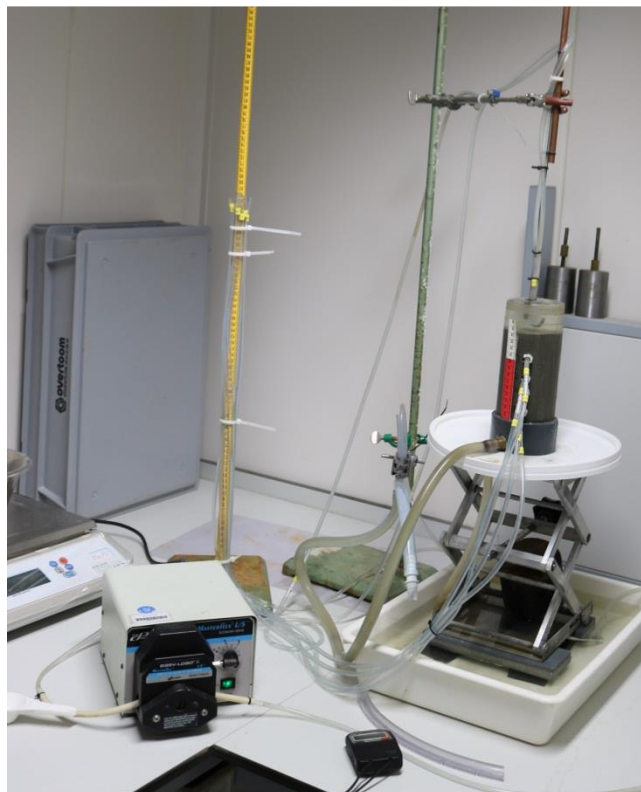
Voor de aanleg van de Grevelingendam (1965, oostzijde) en de Brouwersdam (1971, westzijde) was het gebied onderdeel van de Grevelingen en stond het onder invloed het getij. Historische kaarten laten zien dat het gebied waar het zand verzameld is de laatste 2 eeuwen direct ten noorden van een grote getijdengeul lag (Springerdiep) en onderdeel was van de Slikken van Goeree (Figuur 5.4). In het zand waren veel schelpen aanwezig (met name kokkels, mossels). Voor de proeven is al het schelpmateriaal groter dan 2 mm uit het zand gezeefd.

Op het zand zijn voorafgaand aan de proeven ook 2 doorstroomproeven uitgevoerd om de doorlatendheid te bepalen (Figuur 5.3). De proeven gaven overeenkomende resultaten met $1.55E-05$ en $1.64E-05$ m/s (1.34 respectievelijk 1.42 m/dag), waarden die niet ongewoon zijn voor getijdenzand. Relatieve dichtheden waren respectievelijk 91 en 83%.

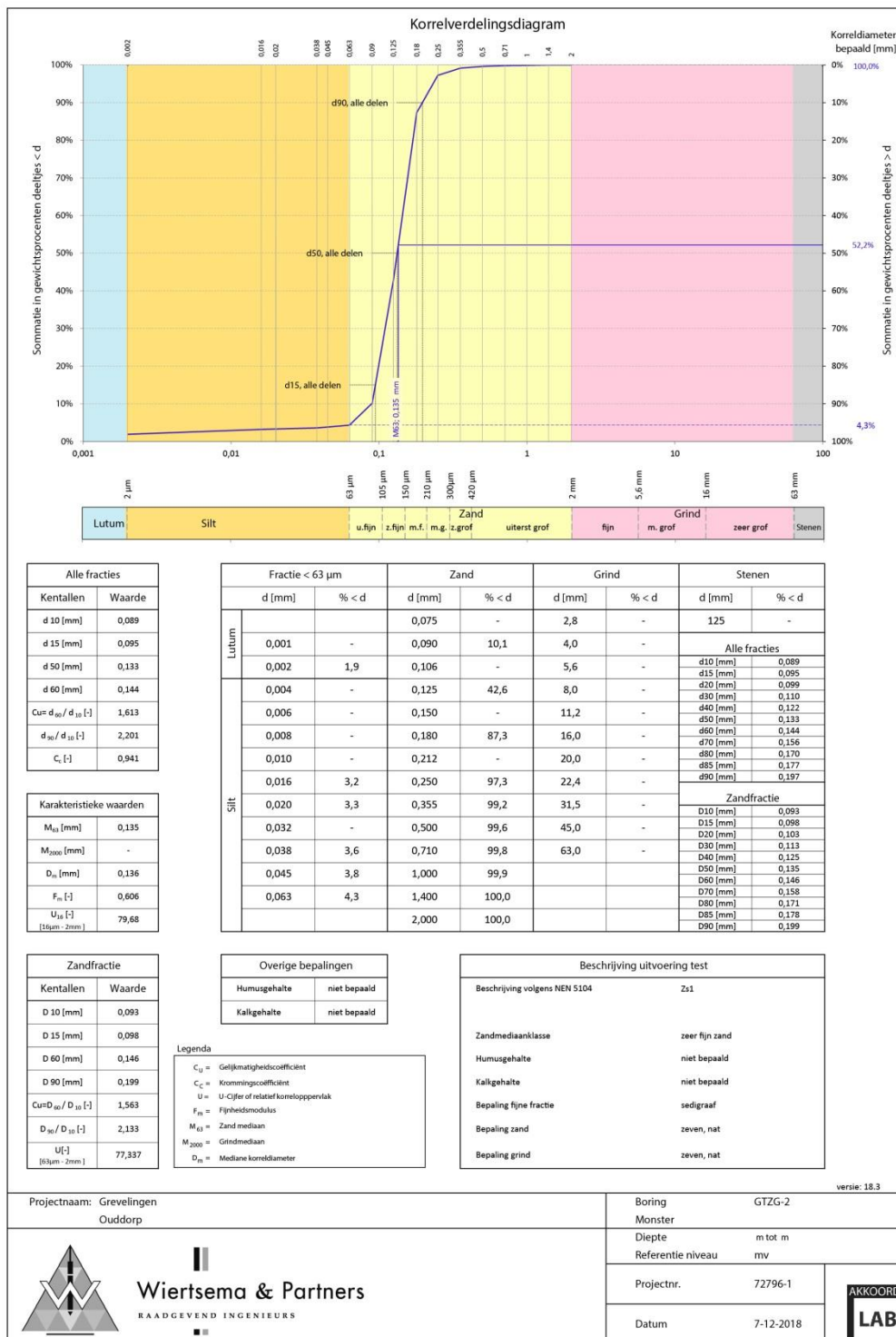
Er zijn drie korrelgrootteverdelingen gemaakt. Figuur 5.4 geeft een representatieve korrelgrootteverdeling en de belangrijkste korrelgrootteparameters weer. Belangrijk, voor dit onderzoek, zijn de gemiddelde percentages lutum (2.2%), silt (2.7%) en de d_{70} (155 μm o.b.v. gehele fractie, 157 μm o.b.v. zandfractie). Dit type zand hoort bij WBI-SOS eenheid H_Mg_zf (uiterst fijn tot fijn getijdengeulzand).



Figuur 5.2 Kaart van de Grevelingen uit de jaren '60. De rode cirkel geeft aan waar het zand voor de pipingproef is verzameld.



Figuur 5.3 Opstelling van de doorstroomproef, waarbij op verschillende dieptes in de kolom getijden drukveranderingen worden gemeten om de doorlatendheid uit te kunnen rekenen.

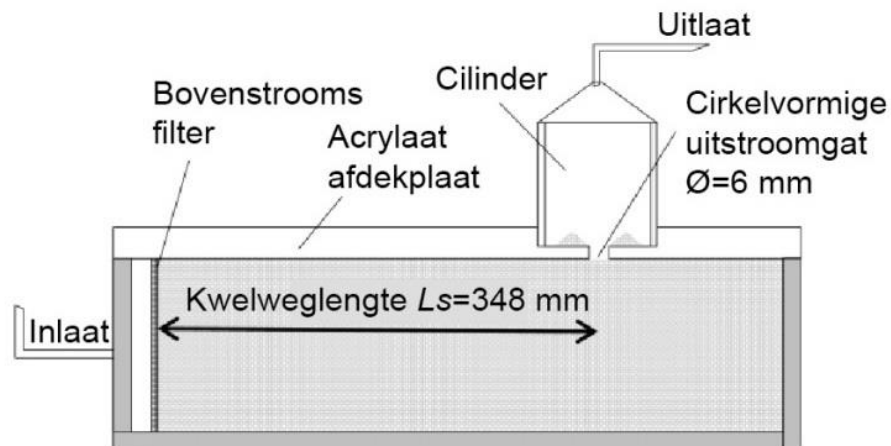


Figuur 5.4 Representatieve korrelgrootteverdeling van het gebruikte getijdenzand uit het Grevelingenmeer

5.2 Proef

5.2.1 Opstelling

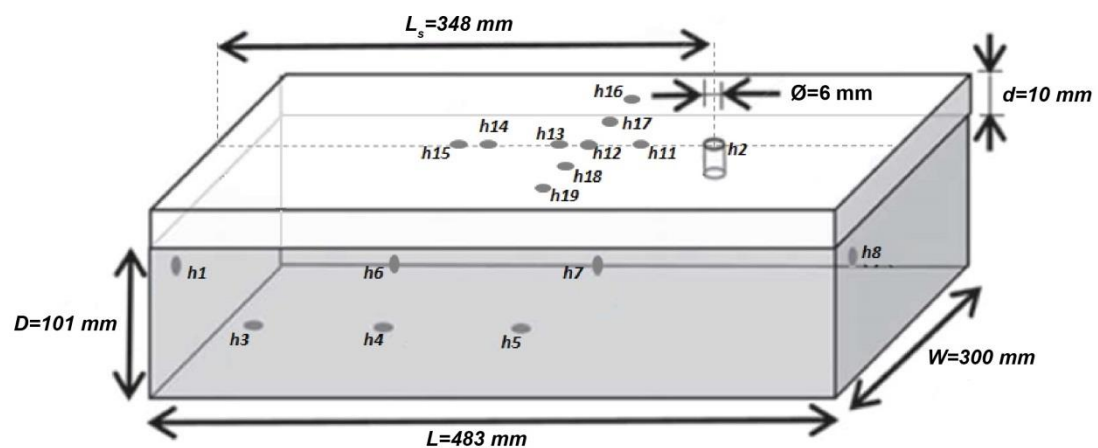
De pipingproeven zijn uitgevoerd in de kleine schaalproef van Deltares. De binnenkant van de bank is 483 mm lang, 300 mm breed en 101 mm hoog. Bij de inlaat is een filter aangebracht om het zand in het bakje te houden, daarnaast zorgt het filter voor een gelijkmatige doorstroom van water door het bakje (Figuur 5.5). De slang bij de inlaat is verbonden met een bak water op een constante hoogte en met een constant waterniveau (Figuur 5.6). De bovenkant van het bakje bestaat uit een doorzichtige acrylaatplaat die fungeert als cohesieve deklaag en aan de onderkant een siliconengel coating heeft om enige ruwheid te geven. Het cirkelvormige uittreepunt vormt het opbarstkanaal en de proef wordt dus uitgevoerd in een 3D-situatie waarbij opbarsten al heeft plaatsgevonden. Het opbarstkanaal is zo kort mogelijk gehouden om drukverliezen te voorkomen en gelijk aan de dikte van de acrylaatplaat (10 mm). Over het uittreepunt is een cilinder geplaatst om het zand op te vangen dat uit de zandmeevoerende wel komt (er ontstaat een zandvulkaan rondom de wel) en om het water weg te laten stromen. De slang aan de cilinder is verbonden met een benedenstrooms communicerend vat dat verlaagd kan worden om een gradiënt over het bakje te genereren. De proef begint zodra dit vat 1 cm verlaagd wordt. Aan het bakje zijn verder 18 stijghoogtemeters verbonden (Figuur 5.7). De stijghoogtes zijn met name van belang om achteraf stijghoogteveranderingen te kunnen koppelen aan geobserveerde ontwikkelingen in het bakje en om de doorlatendheid van het monster te bepalen. De locaties van de stijghoogtemeters zijn gekozen tijdens het uitvoeren van grofzandbarrièreproeven, waarbij de barrière ruwweg tussen meters 11 en 14 lag. Voor de huidige proeven was het niet noodzakelijk de locaties van de buisjes te veranderen.



Figuur 5.5 Kleine schaalproefopstelling met cirkelvormig uittreepunt. Rechts: plaatsing van 18 stijghoogtemeters.



Figuur 5.6 Opzet van kleine schaalproef. Het water in de grijze emmer zorgt voor druk via een slang die aan het bakje verbonden is. Door een communicerend vat aan de uitstroomkant van het bakje stapsgewijs te verlagen wordt kan het verval vergroot worden.



Figuur 5.7 Dimensies van de kleine schaalproef en de posities van de stijghoogtemeters

5.2.2 Opzet proeven, aanbrengen materiaal en uitvoering

Er is gestart met 2 proeven op gemengd getijdenzand. Ondanks de identieke opzet waren de uitkomsten behoorlijk verschillend en daarom is nog een derde proef uitgevoerd. Bij de vierde proef zijn 2 kleilagen aangebracht en bij de vijfde 1 kleilaag. Idealiter worden van elke proefopzet minstens 2 proeven uitgevoerd om de resultaten te kunnen vergelijken, maar vanwege tijdsdruk was dit nu niet mogelijk is er voor gekozen om twee verschillende proeven te doen

met kleilagen in plaats van 2x dezelfde proef kleilagen. De kleilaag bevindt is over de gehele breedte/hoogte aanwezig en vormt dus een verticaal scherm van klei.

Bij de eerste drie proeven is het getijdenzand dus gemengd aangebracht. Dit houdt dat het zand uit het Grevelingenmeer eerst gedroogd is en daarna geroerd. Bij het aanbrengen van het zand wordt de bak gekanteld en wordt de benedenstroomse zijkant verwijderd. Vervolgens wordt via een slang een dunne laag ontluicht water aangebracht onderin het bakje en in deze dunne laag water wordt zand van bovenaf ingestrooid (conform Van der Poel and Schenkeveld, 1998). Het zand wordt tussendoor aangestampt om de gewenste relatieve dichtheid te verkrijgen. Deze dichtheid wordt na de proef nog apart bepaald. Aansluitend worden steeds kleine hoeveelheden water en zand in het bakje gedaan totdat het bakje vol is, waarbij tussendoor steeds aangestampt wordt. Doordat gewerkt wordt met dunne lagen water ontmengt het getijdenzand niet in een fijne en grovere fractie en wordt het zand dus goed gemengd aangebracht.

Voor het aanbrengen van de kleilagen is eerst een subset verkregen van fijn materiaal uit het getijdenzand. Dit is gedaan door het getijdenzand in een waterkolom te gieten en het gesuspendeerde materiaal vervolgens af te zuigen. Op deze manier wordt fijn materiaal verkregen dat overeenkomt met materiaal dat onder natuurlijke omstandigheden bezinkt en een kleilaag vormt tijdens de kentering van het getij. Op de gewenste locatie in het bakje is in de dunne laag water dit fijne materiaal gebruikt om een kleilaag te vormen. Na het bereiken van de gewenste dikte van deze laag werd weer overgestapt op het gemengde getijdenzand (een deel waar geen fijne fractie uit verwijderd is). Tijdens de vierde proef is dit op tweede plekken gedaan, waarbij de bovenstroomse laag een dikte van ongeveer 10 mm had en de benedenstroomse laag een dikte van ongeveer 5 mm. Bij de vijfde proef is 1 laag van 5 mm aangebracht. Van de kleilaag zijn twee korrelgroottemonsters genomen die laten zien dat de d_{50} tussen de 2-3 μm ligt. De klei bestaat voor 45% uit lutum, 52% uit silt en voor 3% uit uiterst fijn tot zeer fijn zand en kan daarmee gelabeld worden als matig zware klei (Ks2).

De proeven zijn uitgevoerd door elke vijf minuten het verval over de bak met 1 cm te vergroten. Als er na de vijf minuten nog pipegroei plaatsvindt wordt het verval constant gehouden totdat er weer een evenwicht is ontstaan. Bij de proef met 2 kleilagen was een zeer groot verval nodig om een doorgaande pipe te genereren en is vanaf een verval van 40 cm eerst met stappen van 2 cm gewerkt, vanaf 60 cm met stappen van 4 cm en vanaf 92 met stappen van 8 cm. De proef is voorbij als de pipe het bovenstroomse filter bereikt. Gedurende de test wordt de volgende data verzameld:

- Stijghoogte van alle 18 stijghoogtemeters wordt elke vijf minuten afgelezen
- Observaties worden genoteerd (pipegroei, pipelengte, grootte zandvulkaan, etc.)
- Foto's (elke tien seconde)
- Debiet, handmatig verkregen door elke vijf minuten gedurende 1 minuut het uitstromende water op te vangen en te wegen.

5.2.3 Opzet analyse

Als er in de tekst verwezen wordt naar het totale stijghoogteverlies over het systeem, dan wordt het verschil tussen h_1 (bovenstrooms van het filter) en h_2 (uittredepunt) bedoeld. Dit verschil is niet helemaal hetzelfde als het stijghoogteverschil over het getijdenzand, omdat er drukverlies optreedt over het filter bij het intredepunt, maar ook in de zandvulkaan en in de erosielen onder het opbarstkanaal. De verschillen zullen echter gering zijn en de interpretatie niet beïnvloeden.

De doorlatendheid van het getijdenzand is vooraf bepaald, maar kan ook tijdens de proef bepaald worden middels het verschil in stijghoogte tussen h3 en h4. Hierbij wordt aangenomen dat voordat er pipeontwikkeling plaatsvindt, er een 1D-stromingssituatie tussen deze twee meetpunten. Indien er toch concentratie van stroming plaatsvindt, zal er extra stijghoogteverlies optreden, en wordt de doorlatendheid onderschat.

5.3 Resultaten

Hieronder worden eerst enkele karakteristieken voor de proeven vermeld, waarna de resultaten van de proeven samengevat worden in enkele figuren. De discussie van de resultaten en een vergelijking met proeven op zonder fijne fractie volgt in §5.4.

5.3.1 Karakteristieken

De basiskarakteristieken van de proeven met gemengd getijdenzand staan in Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Karakteristieken van de testen met gemengd getijdenzand

Gebruikt zand	GTZG (Getijdenzand Grevelingen)		
Naam proef	GTZG-1-207	GTZG-2-208	GTZG-3-209
Relatieve dichtheid (% $\pm$ 5%)	81	80	79
Water temperatuur (°C)	21.0	20.5	20.5
Luchttemperatuur (°C)	20.9	21.2	21.2
Gebruikte doorlatendheid (m/s)	1.6E-05	3.0E-05	1.5E-05
Totaal verval bij doorgaande pipe (cm)	36	26	25

De basiskarakteristieken van de proeven met gemengd getijdenzand staan in Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Karakteristieken van de testen met gemengd getijdenzand

Gebruikt zand	GTZG (Getijdenzand Grevelingen)	
Naam proef	GTZG-4-210	GTZG-5-211
Relatieve dichtheid (% $\pm$ 5%)	78	83
Water temperatuur (°C)	21.0	20.8
Luchttemperatuur (°C)	20.9	20.8
Gebruikte doorlatendheid (m/s)	1.0E-05	1.3E-05
Aantal kleilagen	2	1
- positie t.o.v. uittreepunt (mm)	75-80, 155-165	113-118
- dikte (mm)	5, 10	5
Totaal verval bij doorgaande pipe (cm)	116	27

5.3.2 Samenvatting meetresultaten

Tijdens de proeven is op 18 locaties in het bakje elke 5 minuten de stijghoogte bepaald, debieten zijn gemeten en elke 10 seconde is een foto genomen. Er is dus een flinke hoeveelheid data om te gebruiken en te analyseren. In dit rapport zullen echter alleen de belangrijke resultaten worden samengevat en worden de meest in het oog springende processen bediscussieerd. Deze aanpak is ingegeven door tijdsdruk. In een later stadium kan uitgebreider stilgegaan worden bij de details van de proeven. Hieronder wordt eerst in een tabel het verloop van proef beschreven, waarna voor elke proef een aantal foto's worden getoond. Vervolgens wordt voor elke proef het verloop van de stijghoogteprofielen gegeven, waarna een figuur volgt die

het verloop van de gemeten debieten geeft. De discussie van de resultaten en een vergelijk met de rekenregel van Sellmeijer volgt in §5.4.

Beschrijving

Tabel 5.3 Samenvattende beschrijving van het verloop van de proef. Richting het intredepunt is het westen.

Proef	Verloop
GTZG-1-207 (gemengd zand) Hc=36 cm	Bij een verval van 2 cm komen de korrels in beweging in het uitstroombgat, vanaf 10 cm is sprake van de vorming van een zandvulkaan. Bij 12 cm begint zich een pipe te vormen richting het noorden. Pipe groeit langzaam verder tot een verval van circa 22 cm. Af en toe komen er pluimen van fijn materiaal uit de wel. Rond 25 cm begint pipevorming richting intredepunt, maar deze buigt eerst weer af naar de zijkant en reikt tot dicht bij de rand van de bak. De pipe richting intredepunt blijft ondertussen langzaam groeien. Bij verval 35 cm begint deze pipe zeer hard te groeien en bereikt bij 36 cm het intredepunt.
GTZG-2-208 (gemengd zand) Hc=26 cm	Zandvulkaan bij 7 cm, pipegroei begint bij 13 cm richting het intredepunt en groeit gestaag door en vanaf 21 ontstaat een dominante rechte pipe richting het intredepunt. Vanaf 23 cm groeit deze hard door en bij 26 cm bereikt hij het intredepunt.
GTZG-3-209 (gemengd zand) Hc=25 cm	Verloop proef en Hc zeer vergelijkbaar met GTZG-2-208.
GTZG-4-210 (2 kleilagen) Hc=116 cm	Bij 11 cm ontstaan kleine pipes binnen de omtrek van de cilinder en vanaf 14 cm treedt er een pipe buiten de cilinder richting het zuidwesten, bij 16 cm ook richting het zuidoosten. De pipe groeit zeer langzaam en blijft op ongeveer 1 cm voor de kleilaag hangen. Vanuit de kleilagen is zichtbaar dat fijn materiaal door het zand getransporteerd wordt. Bij 27 cm ontstaat ook een pipe richting het noorden, bij 32 cm buigt deze pipe af richting het westen, er gebeurt verder zeer weinig. Bij 76 cm krijgt de noordelijk een zijtak richting het westen die snel begint te groeien. Als de eerste kleilaag eenmaal door is, gaat de pipe zeer snel door de tweede kleilaag heen richting het intredepunt.
GTZG-5-211 (1 kleilaag) Hc=27 cm	Bij 8 cm ontstaat een zandvulkaan en 10 cm begint een pipe richting het zuidwesten te ontstaan. Bij 11 cm ontstaat een splitsing, 1 tak naar het zuiden en 1 naar het westen. Deze splitsing zit op een paar 2 cm van de kleilaag. Bij 15 cm bereikt de pipe de kleilaag en begint langs de kleilaag te groeien (zowel richting het noorden als het zuiden). Bij 21 cm breekt de kleilaag door bij 27 cm wordt het intredepunt bereikt.

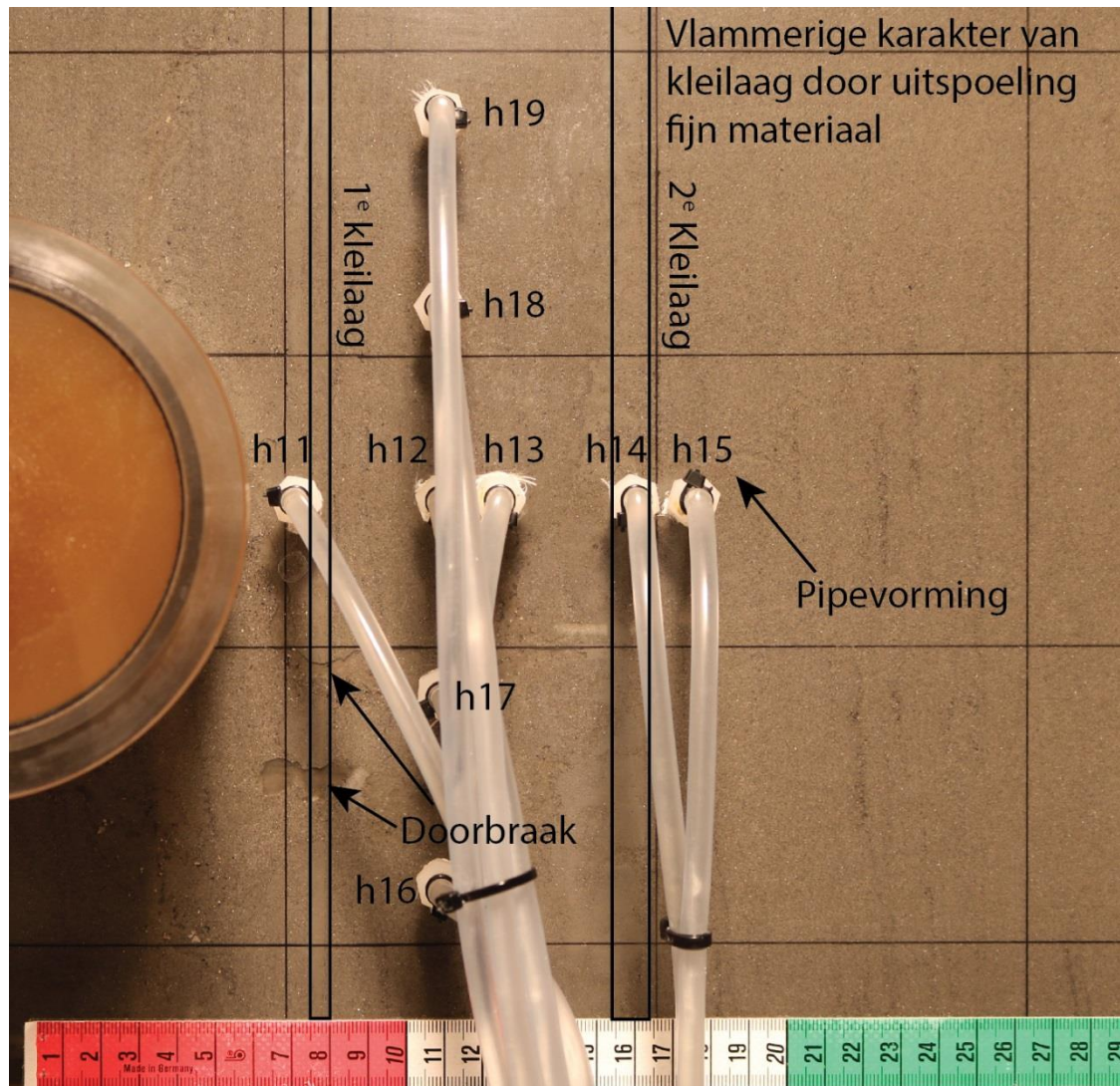
Foto's

Figuur 5.8 laat voor de drie proeven met het gemengde zand de eindsituatie zien. De eerste proef had een veel hoger kritiek verval, omdat de pipe pas laat richting het intredepunt begon te groeien, terwijl bij de andere 2 proeven de pipe vrijwel direct richting het intredepunt groeide.



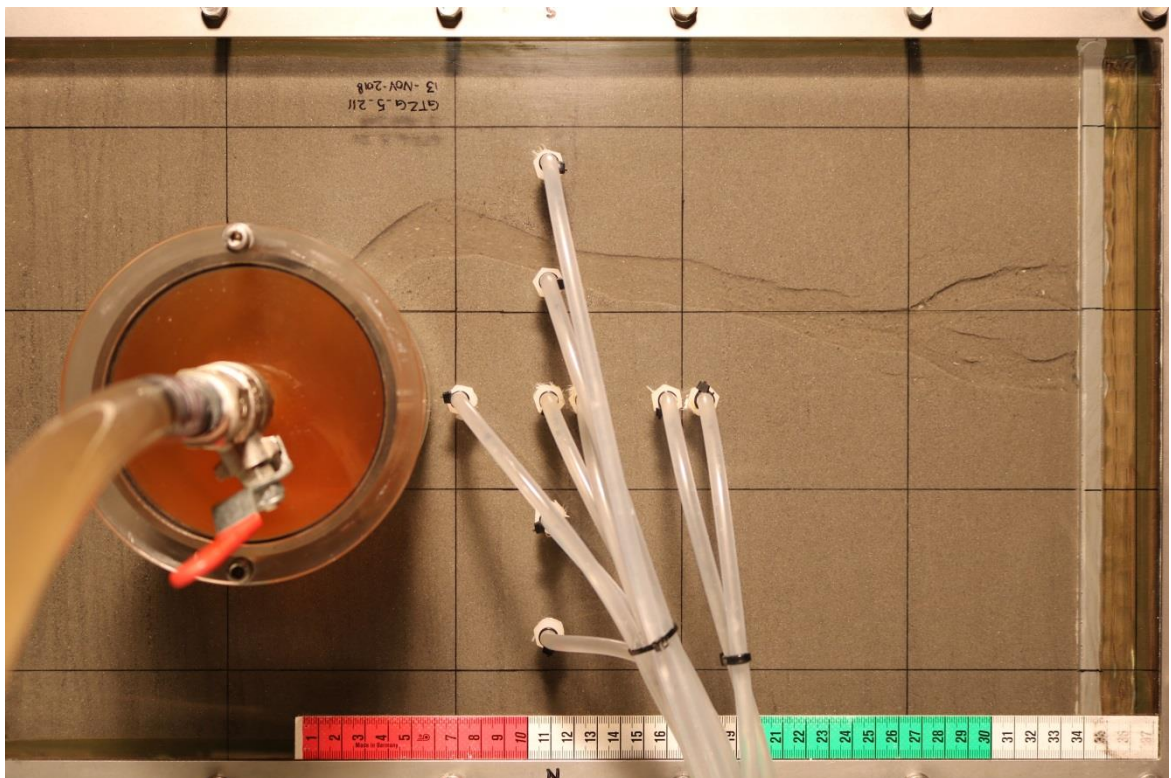
Figuur 5.8 Foto's van de eindsituatie bij de drie proeven met gemengd zand (GTZG-1-207 boven, GTZG-2-208 midden en GTZG-3-209 onderaan).

Figuur 5.9 laat het moment zien bij de proef met 2 kleilagen dat de eerste kleilaag (gezien vanaf het uittredepunt) geheel doorbroken is en de tweede kleilaag nog net niet.



Figuur 5.9 Het moment tijdens proef GTZG-4-210 (twee kleilagen) vlak voor de definitieve doorbraak. De eerste kleilaag is doorbroken en de tweede kleilaag is ook al flink aangetast. Niet alleen waar de pipe er doorheen gaat, maar langs de gehele lengte is een deel van het fijne materiaal weggespoeld.

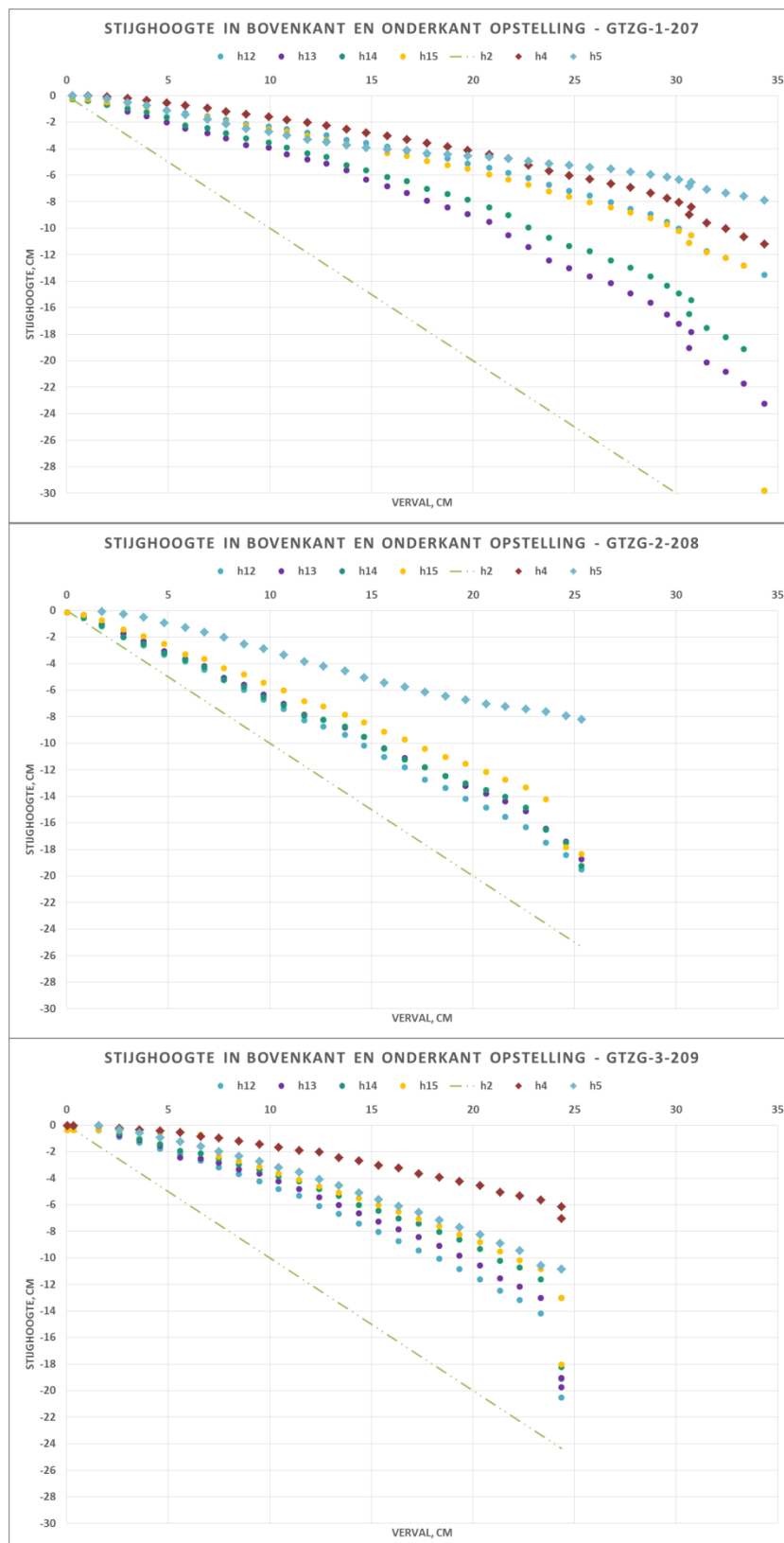
Figuur 5.10 ten slotte laat geeft de eind situatie weer voor de proef met 1 kleilaag, waarbij de doorgaande pipe in een vrij rechte lijn richting het intredepunt gaat. De dunne kleilaag (~5 mm) bevindt zich rond 7 cm.



Figuur 5.10 Het moment tijdens proef GTZG-5-211 (een kleilagen) vlak voor de definitieve doorbraak. De eerste kleilaag is doorbroken en de tweede kleilaag is ook al flink aangetast. Niet alleen waar de pipe er doorheen gaat, maar langs de gehele lengte is een deel van het fijne materiaal weggespoeld.

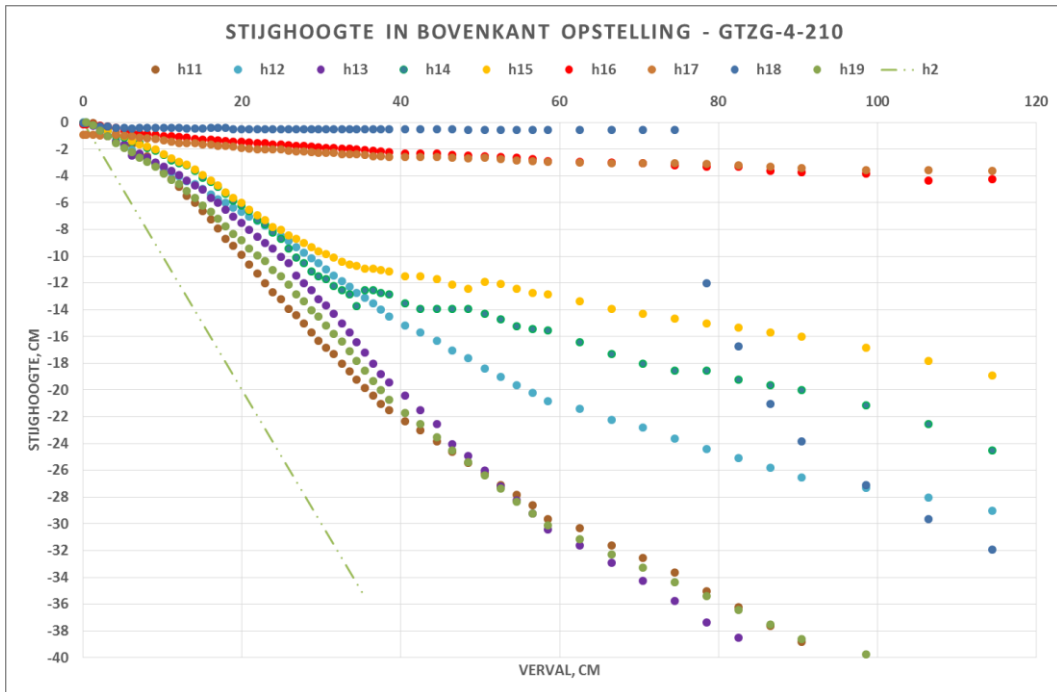
Stijghoogte

Figuur 5.11 laat het stijghoogteverloop zien bij de drie proeven met gemengd zand. Bij GTZG-1-207 nemen de stijghoogtes enigszins abrupt toe bij een verval van ongeveer 30 cm, bij de andere twee proeven neemt de stijghoogte geleidelijk toe.

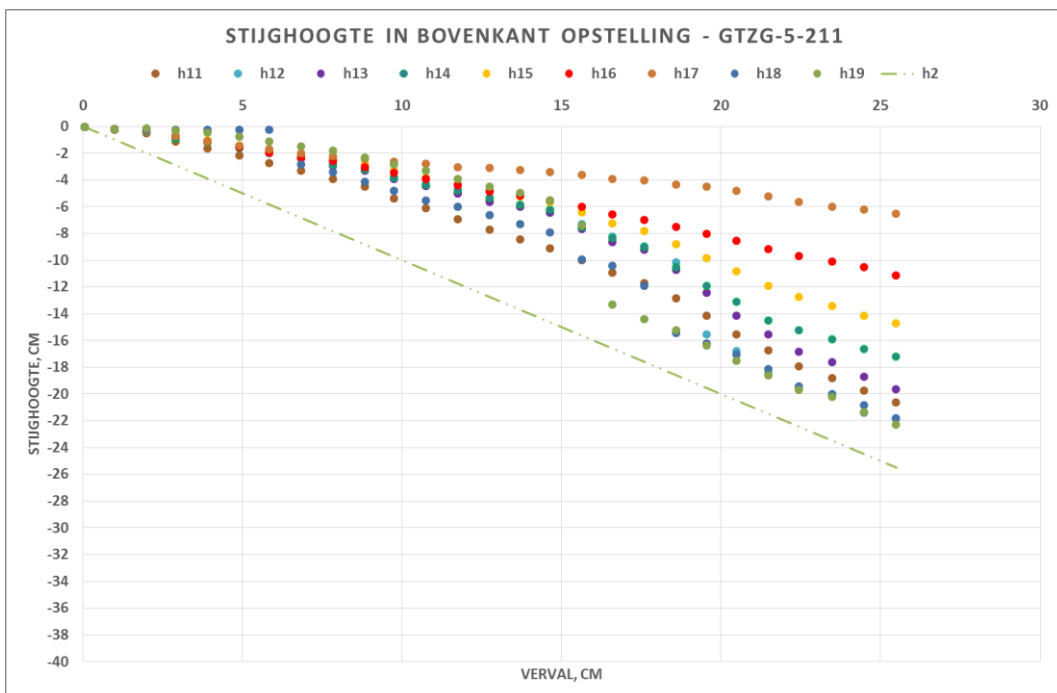


Figuur 5.11 Stijghoogteverloop bij de proeven met gemengd zand

Bij de proeven met kleilagen is het natuurlijk interessant om verschillen in stijghoogte te zien voor en achter de kleilagen. Bij h15 wordt de stijghoogte bovenstrooms van de 2^e kleilaag gemeten (zie ook Figuur 5.9), bij h11 net benedenstrooms van de 1^e kleilaag (Figuur 5.12). Bij proef met 1 kleilaag (Figuur 5.13) loopt de kleilaag tussen h12 en h13.



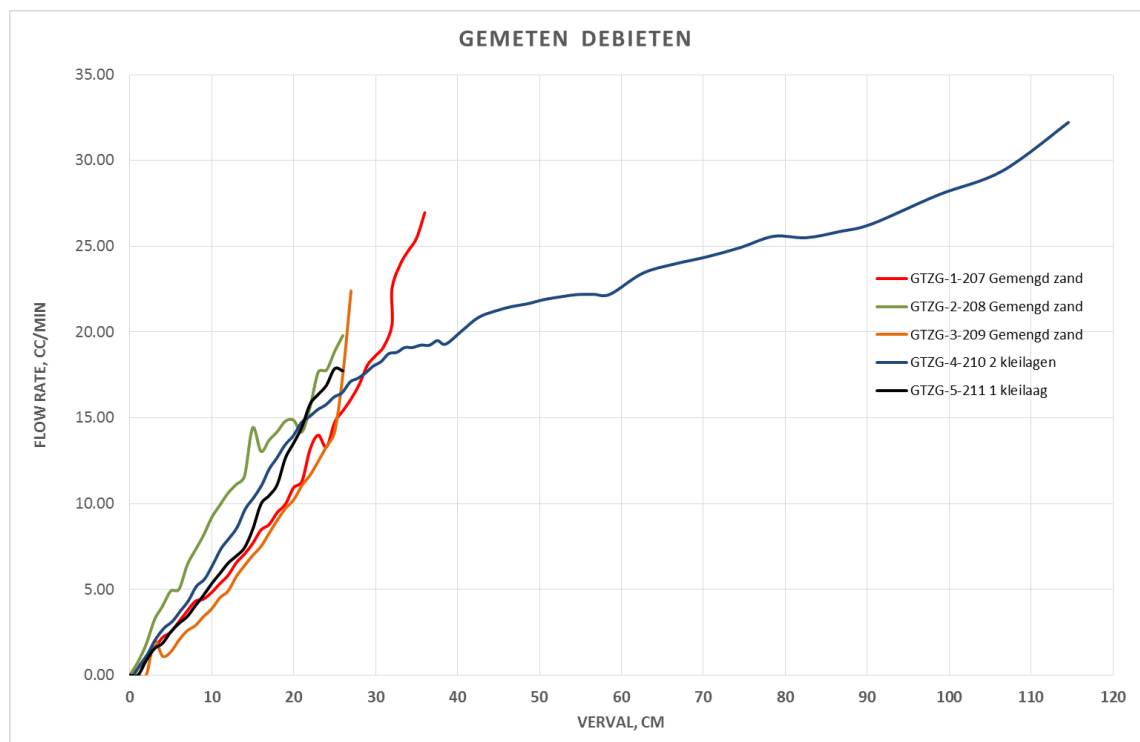
Figuur 5.12 Stijghoogteverloop bij de proef met twee kleilagen.



Figuur 5.13 Stijghoogteverloop bij de proef met een enkele kleilaag.

Debiten

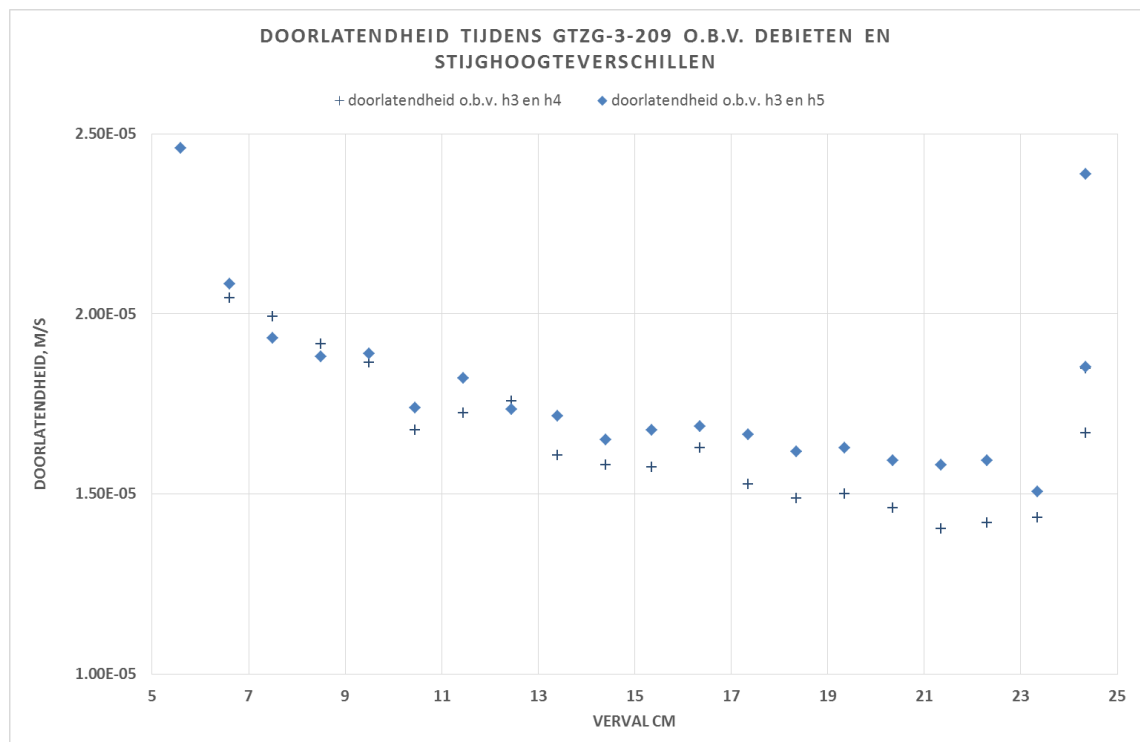
Figuur 5.14 ten slotte toont de gemeten debieten tijdens de vijf proeven. Wat opvalt is dat het debiet bij de proef met de 2 kleilagen initieel een vergelijkbaar verloop heeft met de overige proeven, maar vanaf een verval van ongeveer 20 cm begint af te vlakken, wat duidt op een afname van de doorlatendheid. De toename in debiet per toename verval blijft vervolgens wel constant. De proef met 1 kleilaag laat geen afwijkend debietsverloop zien. Bij de proeven met gemengd zand had GTZG-1-207 een veel hoger kritiek verval dan de overige 2. Aan het debietsverloop is niks opvallends te zien, het is sterk vergelijkbaar met proef GTZG-3-209.



Figuur 5.14 Gemeten debieten tijdens de vijf proeven.

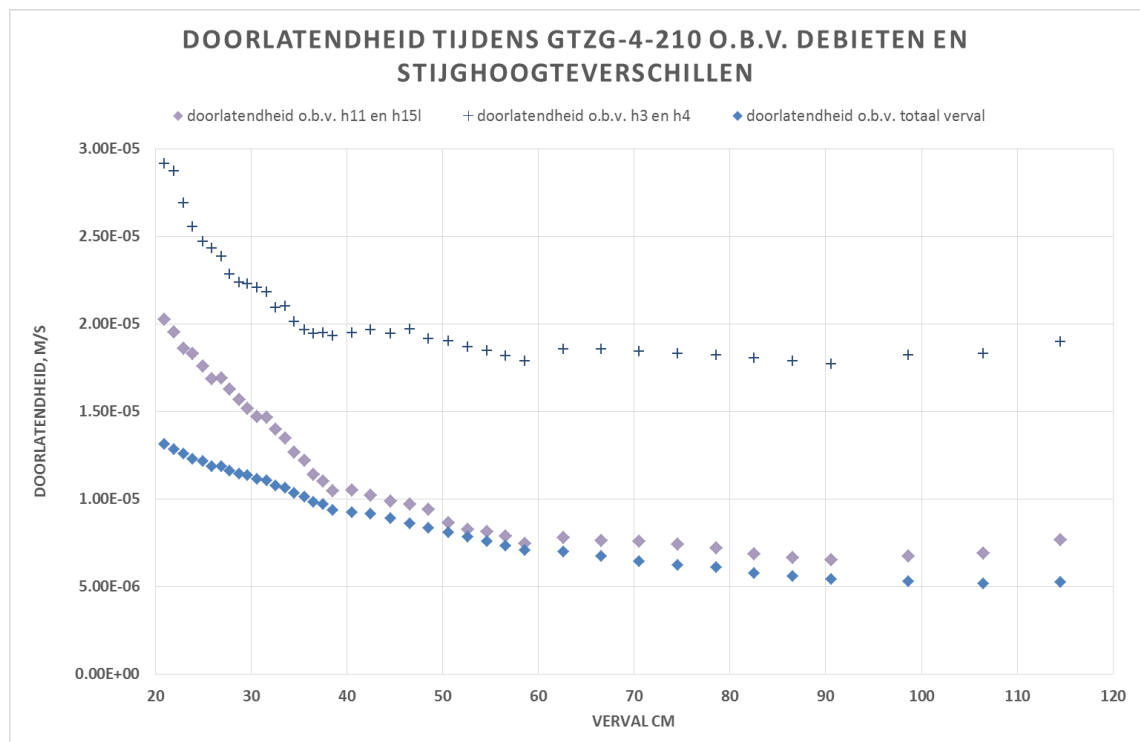
Doorlatendheden

De doorlatendheid is een belangrijke parameter bij piping. Bij de doorstroomproef is voor het gemengde getijdenzand een doorlatendheid van ongeveer $1.6E-05$ m/s vastgesteld (zie boven). Met behulp van het gemeten debiet tijdens de proef en de gemeten gradiënten tussen stijghoogtemeters kunnen de debieten tijdens de proeven ook geschat worden. Op deze manier bepaalde doorlatendheden zijn bij eerdere kleine schaalproeven gebruikt bij een vergelijk met de uitkomsten van het model van Sellmeijer (Van Beek et al., 2015). Figuur 5.15 geeft een voorbeeld voor proef GTZG-3-209, waarbij op basis van stijghoogteverschillen tussen twee, aan de onderkant liggende, paren stijghoogtemeters de doorlatendheid geschat. Opvallend is dat de berekende doorlatendheid met een toenemend verval afneemt en daarna relatief constant is. Dit patroon wordt bij alle proeven gevonden, ook bij de eerdere proeven van Van Beek (pers. comm). De constante waardes komen bij deze proef goed overeen met de vooraf bepaalde doorlatendheid van $1.6E-05$ m/s. Bij GTZG-1-207 ligt de constante waarde rond $1.5E-05$ m/s, bij GTZG-2-209 met circa $3E-05$ m/s dag opvallend hoog.



Figuur 5.15 Berekende doorlatendheden tijdens proef GTZG-3-209.

De doorlatendheid bij de proeven met kleilagen is naar verwachting lager dan 1.6×10^{-5} m/s. De gemeten debieten tijdens de proeven met kleilagen (GTZG-4 en GTZG-5) zijn echter niet wezenlijk anders dan bij de proeven met gemengd zand. Indien een gewogen doorlatendheid wordt berekend met in totaal 1.5 cm klei met bijvoorbeeld een doorlatendheid van 6×10^{-7} m/s ca. 0.05 m/dag) dan leidt dit tot een vrij lage doorlatendheid van 7.6×10^{-6} m/s die niet lijkt te kloppen met de gemeten debieten. Berekende doorlatendheden op basis van stijghoogtemeters en de gemeten debieten laten een wisselend beeld zien (Figuur 5.16), waarbij de debieten op basis van h3 en h4 als te hoog worden beschouwd, omdat de kleilaag hierin wordt meegenomen. H3 en h4 liggen allebei bovenstrooms van de kleilaag, terwijl h11 en h15, en h1 en h2 (totale verval) wel aan verschillende kanten van de kleilagen liggen. Het nadeel van h11 en h15 is dat ze aan de bovenkant liggen, waar stroming wellicht beïnvloed wordt door de acrylaatdeklaag, het nadeel van h1 en h2 dat ook de stijghoogte-effecten van de zandmeevoerende wel zelf een rol spelen. Desalniettemin worden deze twee paren voor deze proef als de beste indicatie voor de doorlatendheid genomen, waarbij de doorlatendheid gesteld wordt op 1×10^{-5} m/s. Voor proef GTZG-5-211 (1 kleilaag) wordt een doorlatendheid gebruikt die tussen de doorlatendheid van het gemengde zand en die van het zand met 2 kleilagen ligt (1.3×10^{-5} m/s). Voor een betere inschatting van de doorlatendheid zouden de verschillende configuraties in 3D-gemodelleerd moeten worden. De gebruikte doorlatendheden tijdens een vergelijk met het model van Sellmeijer staan in Tabellen 5.1-5.2.



Figuur 5.16 Berekende doorlatendheden tijdens proef GTZG-3-209.

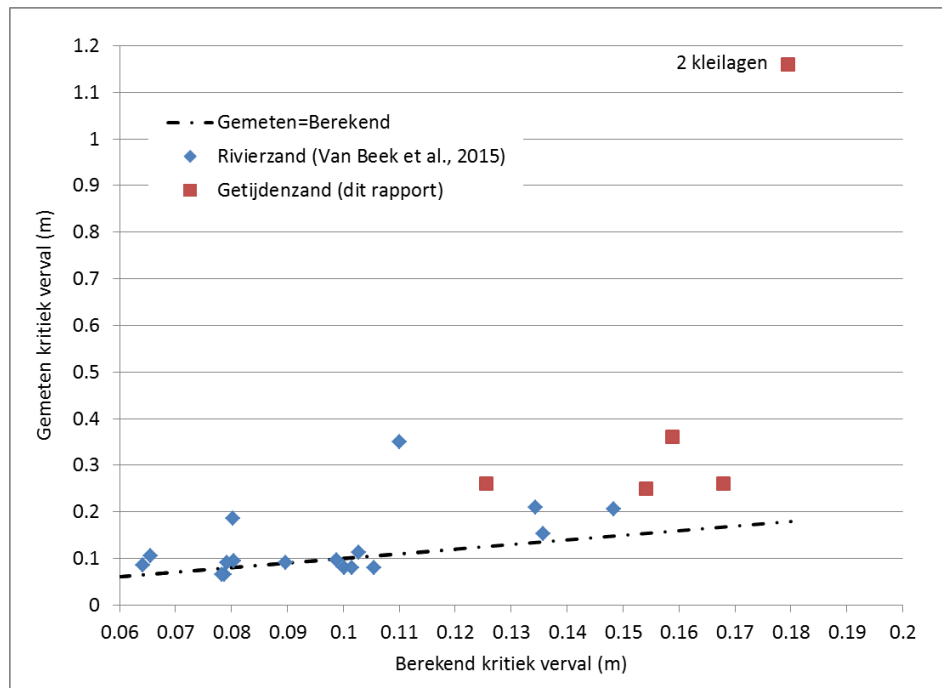
5.4 Discussie

5.4.1 Vergelijk met het model van Sellmeijer

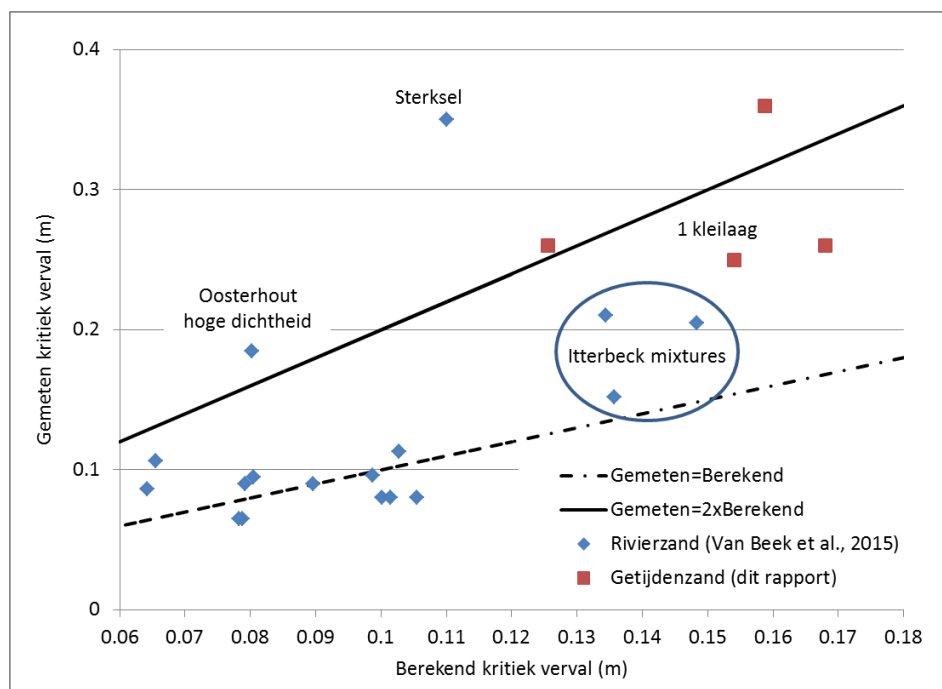
Binnen het WBI wordt momenteel gewerkt met het model van Sellmeijer (2011). In Van Beek et al. (2015) wordt aangetoond dat gemeten kritieke vervallen in kleine schaalproeven goed gereproduceerd worden door het model als de kleine schaalproef een 2D-configuratie heeft. In het geval van een 3D-configuratie, zoals gebruikt tijdens de proeven met getijdenzand, zijn de gemeten kritieke vervallen structureel lager dan de berekende kritieke vervallen. Dit wordt veroorzaakt doordat bij een 3D-configuratie de stroom zich concentreert naar 1 uitstroompunt, waardoor de gradiënt bovenstrooms van de pipe groter is en stroomsnelheden in de pipe groter zijn. Volgens Van Beek et al. (2015) zijn de berekende kritieke vervallen ongeveer 2x zo groot als de gemeten vervallen in het geval van een pipe die vrijwel in een rechte lijn van het uittreden naar het intredepunt groeit. In de figuren hieronder hebben zijn de berekende vervallen volgens Sellmeijer daarom met een factor 2 gehalveerd. Wanneer er veel dwarsontwikkeling plaatsvindt, zoals bij de proef met 2 kleilagen, zijn de berekende vervallen waarschijnlijk minder dan 2x zo groot als de gemeten vervallen, omdat de stroming dan meer een 2D-situatie benaderd. De extra sterkte bij de proef met 2 kleilagen wordt daardoor mogelijk overschat. Om hier meer inzicht te verkrijgen zou de grondwaterstroming in het bakje gemodelleerd moeten worden. De gebruikte doorlatendheden in onderstaande figuren zijn afgeleid uit de stijghoogteprofiel van h3 en h4 en daarmee in lijn met de werkwijze in Van Beek et al. (2015).

Figuur 5.17 laat de gemeten en berekende kritieke vervallen zien voor alle proeven met getijdenzand en alleen de proeven op rivierzand zonder fijne fractie uit Van Beek et al. (2015) waarbij een identieke proefopstelling gebruikt is als tijdens het huidige onderzoek. Hierbij zijn de berekende waarden volgens Sellmeijer dus gehalveerd. De zwarte lijn geeft de lijn aan waarop de punten zouden liggen indien de berekende en gemeten vervallen gelijk zouden zijn. De grafiek wordt sterk naar boven uitgerekt door de proef met de 2 kleilagen. Het gemeten kritieke verval is daar maar liefst 6.5x zo groot als het berekende kritieke verval. In Figuur 5.18

zijn dezelfde punten geplot, behalve de proef met 2 kleilagen, om de verschillen wat inzichtelijker te maken.



Figuur 5.17 Berekende kritieke vervallen (model Sellmeijer/2) en gemeten kritieke vervallen.



Figuur 5.18 Berekende kritieke vervallen (model Sellmeijer/2) en gemeten kritieke vervallen, waarbij de proef met 2 kleilagen is weggelaten.

Direct valt op dat de proeven met getijdenzand duidelijk hogere gemeten kritieke vervallen hebben dan de berekende kritieke vervallen. Voor de proeven met gemengd zand zijn de

gemeten vervallen gemiddeld 2x hoger dan de berekende vervallen. De proef met 1 kleilaag heeft een gemeten verval dat 1.5x hoger is dan het berekende verval, bij de proef met 2 kleilagen is het gemeten verval 6.5x zo groot.

Wat verder opvalt is dat ook in de dataset van Van Beek et al. (2015) er verschillende proeven ruim hoger plotten dan verwacht wordt op basis van het Sellmeijer model. Dit geldt onder andere voor de groep waarbij zand onder de naam Itterbeck mixtures is gebruikt. Deze mixtures bestaan uit relatief fijn zand, maar bevatten geen/nauwelijks lutum en siltdeeltjes. De zandfractie 63-125 μm heeft ongeveer een aandeel van 10-15%. Dit heeft geleid tot lagere doorlatendheden (circa 3-5 keer lagen dan Itterbeck zand zonder toevoeging van uiterst fijn zand), maar dus ook tot hogere gemeten kritieke vervallen dan berekend. Over de overige twee proeven die opvallend hoge gemeten kritieke vervallen hebben (Sterksel en Oosterhout, hoge dichtheid) schrijven Van Beek et al. (2015) dat beide proeven opvallend laat de eerste pipevorming lieten zien, maar dat vanaf dat moment bezwijking snel optrad. Bij de Sterkselproef speelde migratie van fijn materiaal mogelijk een rol, terwijl bij de afwijkende Oosterhoutproef het zand een zeer hoge relatieve dichtheid had (94%) ten opzichte van de overige 2 proeven met Oosterhoutzand (beide 65%).

Samenvattend kan gesteld worden dat getijdenzand aantoonbaar sterker is dan op basis van het huidige model van Sellmeijer verwacht mag worden (feitelijk sterker dan de zandsoorten op basis waarvan het Sellmeijer model ontwikkeld is). De minimale sterktewinst voor het gemengde zand bedroeg hierbij een factor 1.6, de maximale een factor 2.3. De proef met 1 kleilaag lag in de lijn met de proeven met gemengd zand, de proef met 2 kleilagen was duidelijk afwijkend en was een factor 6.5 sterker dan verwacht. Een gedeelte van de sterkte van deze laatste proef komt waarschijnlijk door de dwarsontwikkeling van de pipe, waardoor de stroming meer 2D dan 3D wordt. Een belangrijk aandachtspunt is dat het model van Sellmeijer gebaseerd is op en feitelijk geldig is voor 2D-situaties. In de praktijk kunnen, net als bij de proeven, ook 3D-situaties aanwezig zijn, die pipinggevoeliger zijn dan 2D-situaties.

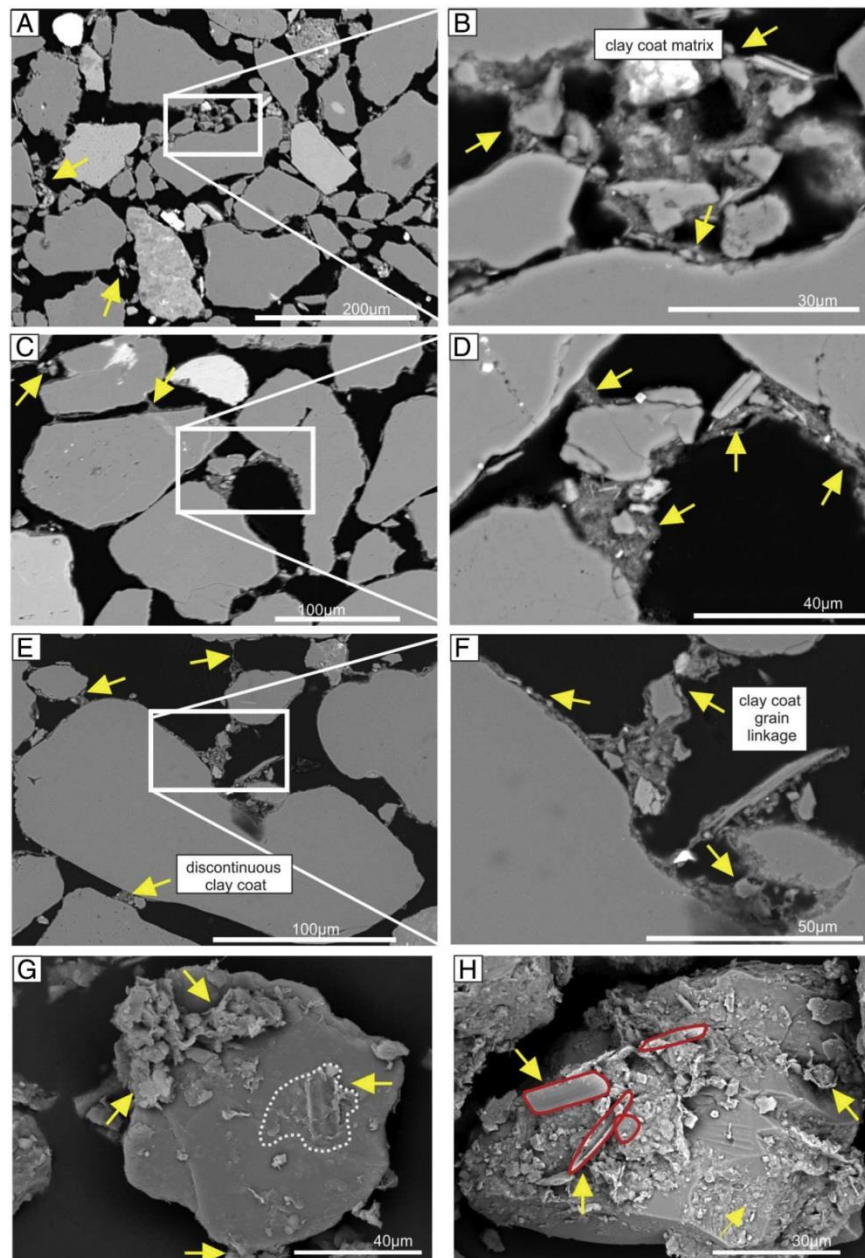
5.4.2 Proces

Waarom is getijdenzand sterker? In het geval van de aanwezigheid van kleilagen lijkt dit evident, deze zorgen namelijk voor een fysieke barrière voor zowel zandkorrels als voor stromend water. Dit laatste blijkt overigens niet uit de debietmetingen tijdens de proeven: bij de proef met 2 kleilagen is het debiet initieel zeer vergelijkbaar met de overige proeven en uit de debieten die afgeleid zijn uit de stijghoogtemetingen volgt ook niet dat de doorlatendheid lager is. Bij de proef met 2 kleilagen was wel duidelijk zichtbaar dat de pipe moeite heeft om door de kleilaag heen te groeien en ook om deze kleilaag te bereiken. Dit laatste lijkt te duiden op weinig toestroom van water direct achter de kleilaag, waardoor pipegroei stopt.

Bij de proeven met gemengd zand is er geen kleilaag die de extra sterkte kan verklaren. Een gedetailleerde vergelijking van de proeven met getijdenzand en de proeven uit Van Beek et al. (2015) lijkt nuttig, waarbij debieten, doorlatendheden en stijghoogtes met elkaar vergeleken worden, om mogelijke verklaringen te vinden. Processen die mogelijk een rol spelen zijn:

- 1 Transport van fijn materiaal richting het uittredepunt met lokale verstopping als mogelijk gevolg. Tijdens de proeven zijn pluimen van uittredend fijn materiaal waargenomen die mogelijk duiden op een doorbraak van een dergelijke verstopping. Ook de afname in debiettoename met toename van het verval bij de proef met 2 kleilagen lijkt op verstopping te duiden.
- 2 De belangrijke oorzaak wordt echter gezocht in sterkte verkregen door fysische en biologische cohesie. Met fysische cohesie ontstaat extra sterkte door Van der Waals krachten en elektrostatische binding. Deze laatste binding neemt toe met saliniteit (Mietta et al.,

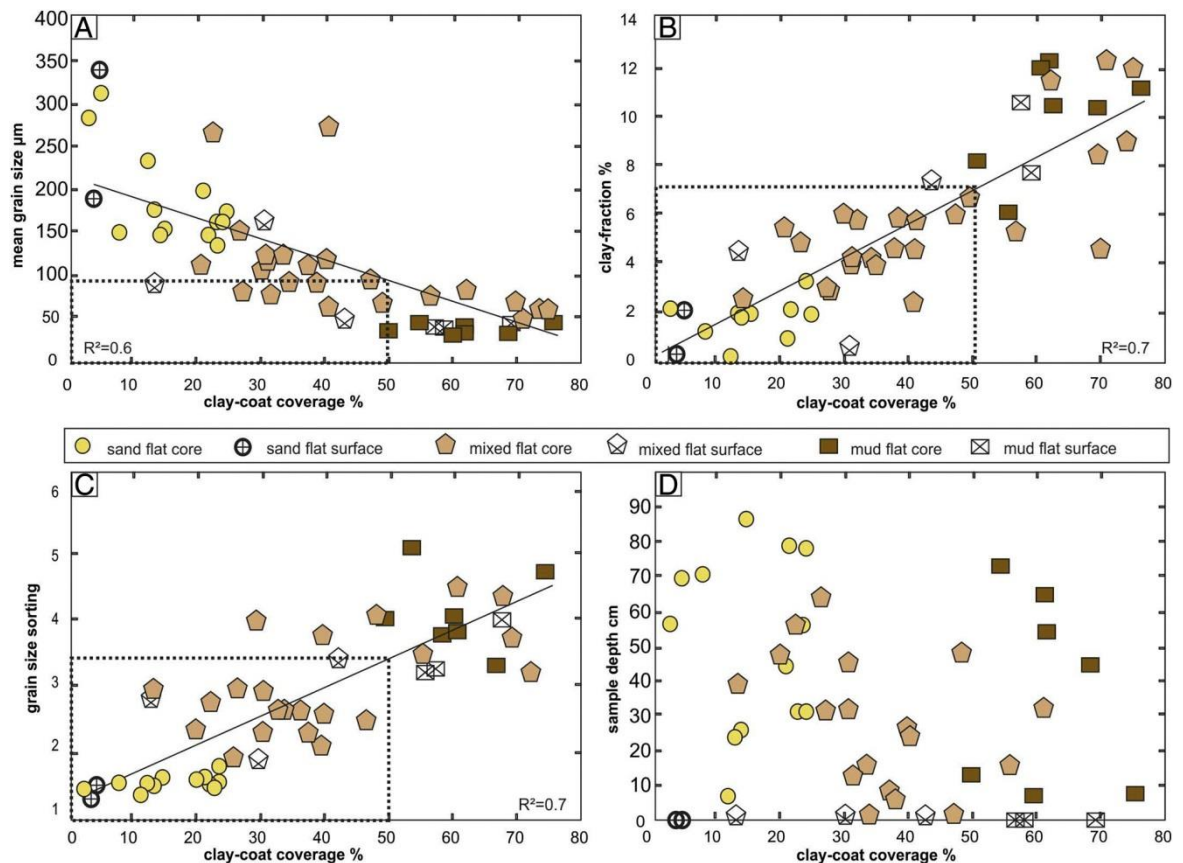
2009). Deze cohesie ontstaat door de aanwezigheid van lutumdeeltjes tussen de zandkorrels in. Biologische cohesie wordt gevormd door de aanwezigheid van biofilms op het oppervlak van de zandkorrels. Deze biofilms bestaan uit Extracellular Polymeric Substances (EPS) en kunnen gezien worden als een coating rondom het zand. Hoge resolutie microscopen laten deze coating goed zien (Figuur 5.19). De EPS kunnen de zandkorrels fysiek aan elkaar koppelen en zorgen op die manier voor extra sterkte.



Figuur 5.19 Scanning Electron Microscopy (SEM) plaatjes van het oppervlak van zandkorrels met een klei-coating. De pijlen wijzen naar delen met relatief veel klei-coating. De plaatjes zijn van kleiige getijdenplaten (A, B) en kleiige en zandige getijdenplaten (C-F). G en H laten details van zandkorrels zien (Wooldridge et al., 2018).

Het percentage van de zandkorrel dat bedekt is met een coating neemt toe met een afnemende gemiddelde korrelgrootte, een toenemend percentage kleifractie en met een toenemend

slechte sortering (Figuur 5.20). Een relatie met diepte is er niet, wat in het artikel gebruikt wordt als argument dat processen na sedimentatie (bioturbatie, inspoeling) een beperkte rol spelen.



Figuur 5.20 Gemiddelde korrelgrootte (A), kleifractie (B), sortering (C) en monsterdiepte (D) uitgezet tegen het percentage klei-coating (Wooldridge et al., 2018).

Als zowel lutumdeeltjes als EPS aanwezig zijn worden de aantrekkingskrachten tussen de kleideeltjes verder versterkt. De invloed van fysische en biologische cohesie heeft recentelijk veel aandacht gekregen door een reeks artikelen over de invloed van deze cohesie op sediment transport. Veel sedimenttransportmodellen zijn gebaseerd op empirische relaties afgeleid uit proeven met 'schoon' zand zonder een fijne fractie. Bij het doen van proeven op zand waarin deze fijne fractie aanwezig is ontstaan bodemvormen veel later en komt sedimenttransport veel later op gang (Malarkey et al., 2015; Schindler et al., 2015; Parsons et al., 2016). De invloed van biologische cohesie wordt in deze studies belangrijker geacht dan de fysische cohesie. Een eerdere studie toont aan dat sediment met EPS veel minder snel erodeert, zelfs al bij zeer kleine hoeveelheden EPS (Tolhurst et al., 2002).

In analogie hieraan mag verwacht worden dat fysische en biologische cohesie ook het piping-proces zal beïnvloeden, doordat extra weerstand overwonnen moet worden voordat het sediment in beweging komt in vergelijking met zand zonder biofilms en lutumdeeltjes. Biofilms komen overigens niet uitsluitend voor in getijdenafzettingen, ze worden ook wel in rivierafzettingen aangetroffen, maar lijken wel uitbundiger aanwezig in getijdenafzettingen. Daarnaast heeft saliniteit een versterkend effect op deze vormen van cohesie.

6 Conclusies

6.1 Centrale vragen

Het onderzoek was gericht op het beantwoorden van drie centrale vragen. Hieronder worden deze beantwoord.

1) Is getijdenzand minder pipinggevoelig dan rivierzand?

Volmondig ja. Op basis van de proeven kan gesteld worden dat getijdenzand aantoonbaar sterker is dan het zand gebruikt voor het ontwikkelen van het model van Sellmeijer. Bij de proeven zonder kleilagen lag het kritieke verval gemiddeld 100% hoger dan het berekende kritieke verval, bij de proef met 1 kleilaag 50% hoger, en bij de proef met 2 kleilagen zelfs 650% hoger. De d_{70} is niet dermate laag dat deze buiten het gestelde bereik van het model van Sellmeijer valt.

2) Zo ja, waardoor komt dit?

Op basis van alleen deze quickscan kan hier nog geen overtuigend antwoord op gegeven worden. In het geval van de aanwezigheid van kleilagen speelt uiteraard de fysieke barrière die deze vormt voor het doorstromen van water en het doorgroeien van de pipe een belangrijke rol. In het geval van getijdenzand zonder kleilagen, maar met een duidelijke klei- en siltfractie, zijn er meerdere factoren die een rol spelen. Ten eerste is het model van Sellmeijer gekalibreerd op pipingproeven zonder een fijne fractie, waarbij impliciet ook een korrelgrootte-doorlatendheidsrelatie in zal zitten. In het geval van de aanwezigheid van een fijne fractie zal deze impliciete relatie anders zijn (lagere doorlatendheid dan verwacht), waardoor er een onderschatting van het kritieke verval op zal treden. Een tweede effect is het transport van de fijne fractie door het materiaal richting het uittreepunt, waardoor rondom het uittreepunt mogelijk verstopping optreedt met lagere doorlatendheden als gevolg. De belangrijkste verklaring lijkt echter te liggen in de extra sterkte die ontstaat door fysische (tussen lutumdeeltjes) en biologische (biofilms) cohesie. Deze sterkte wordt groter met toenemende saliniteit.

3) Zo ja, hoe kan dit meegenomen worden bij de beoordeling?

Dit kan op verschillende manieren. Uiteindelijk zal het waarschijnlijk wenselijk zijn om specifiek voor getijdenafzettingen een pipingmodel te hebben. De huidige dataset van 5 proeven is hiervoor echter nog te klein. In dit pipingmodel zal naar verwachting het percentage fijne fractie (nog te bezien of dit inclusief silt is of alleen inclusief de cohesieve fractie) een belangrijke rol gaan spelen.

Op de kortere termijn zijn meerdere acties mogelijk. Gedacht kan worden aan het gebruik van een factor die afgeleid wordt uit de gedane proeven, waarbij wellicht al voor de verschillende WBI-SOS eenheden andere factoren worden ingevoerd. Er kunnen ook aanpassingen gedaan worden aan het invullen van de d_{70} (van gehele fractie en niet alleen van zandfractie).

6.2 Karakterisatie

De verschillende SOS-eenheden voor getijdenafzettingen zijn op basis van literatuur en geologische kennis beschreven, waarbij een hoofdonderverdeling in getijdengeul- en getijdenplaatafzetting is gemaakt. Getijdenafzettingen hebben een kans van aantreffen onder 970 km primaire kering. Voor dit type afzetting geldt in zijn algemeenheid dat hoe verder weg ze van het zeegat afgezet zijn, hoe meer lutum en silt ze bevatten. Binnen een afstand van 10 km van het zeegat zijn de gezamenlijke lutum/siltpercentages laag, (1-4%), maar bij afstanden groter dan 10 km kunnen de percentages oplopen tot boven de 60%. Daarnaast geldt in zijn algemeenheid dat hoe groter de geul, des te groter de stroomsnelheden, des te grover het sediment en des te minder lutum en silt het sediment bevat. De drie SOS-eenheden voor (estuariene) getijdengeulen, H(P)_Mg(Eg)_zm, H_Mg(Eg)_zf en H(P)_Mg_zk, omvatten getijdengeulafzettingen die in toenemende mate fijner, siltiger en lutumrijker en daarmee minder pipinggevoelig worden. Het gemiddeld aantal dunne kleilaagjes neemt daarbij toe, maar is sterk variabel. Voor zandige getijdenplaatafzettingen is maar 1 SOS-eenheid beschikbaar, H_Mp_zf. Voor estuariene getijdengeulafzettingen is nog een extra eenheid toegevoegd, H_Eg_z&k, die een afzettingen in de omgeving van Rotterdam typeert. Het gebruikte zand voor de proeven in dit rapport is afkomstig uit het Grevelingmeer en valt onder H_Mg_zf. .

De korrelgrootte database van TNO-Geologische Dienst van Nederland is gebruikt om een overzicht te verkrijgen van de gemiddelde percentages lutum en silt in zandige getijdenafzettingen. De data laten zien dat bij d70-waarden van 200 µm of groter de percentages lutum en silt zeer klein zijn, maar beneden de 200 µm flink toenemen. Percentages lutum bereiken waarden van maximaal 8% in de database, percentages silt 40%.

Een overzicht van de geologische en landschappelijke ontwikkeling van het Nederlandse kustgebied in de laatste duizenden jaren vertelt veel over de verdeling van de verschillende typen getijdenafzettingen. In gebieden die bijvoorbeeld altijd ver van het zeegat vandaan gelegen hebben zullen de getijdenafzettingen veel lutumrijker zijn dan in gebieden waar in het verleden grote getijdengeulen hebben gelegen. De globale WBI-SOS eenheden vormen een nuttig startpunt bij het opstellen van een lokaal SOS, maar dit lokale SOS is scherper te maken door eenheden te bekijken vanuit een gedetailleerde landschappelijke bril, waarbij meer lokale SOS-eenheden onderscheiden kunnen worden. Op die manier kan bijvoorbeeld beter bepaald worden of de afzettingen uit grote getijdengeulafzettingen bestaan of juist uit kleine kwelderreekafzettingen, en dus meer of minder pipinggevoelig zijn.

6.3 Inventarisatie

Uit vrijwel alle studies volgt dat zand met een fijne fractie sterker is dan zand zonder fijne fractie. Dit geldt ook voor proeven waarbij de fijne fractie feitelijk uit niet-cohesief silt bestaat. Voor die laatste proeven moet de extra sterkte gezocht worden in een verminderde doorlatendheid. De extra sterkte bij proeven met een lutumfractie kan oplopen tot een factor 3.1-4.6 (Luijendijk and Van den Ham, 2011).

Uit het inventarisatieonderzoek is verder maar 1 studie naar voren gekomen die specifiek gekeken heeft naar de invloed van cohesiviteit op piping (Richards and Reddy, 2012). Daaruit volgt dat het veel uitmaakt waaruit de lutumfractie bestaat. In het geval van gebruik van kaoliniet trad juist eerder bezwijking op dan bij proeven zonder lutum, terwijl bij gebruik van montmorrilloniet er veel extra sterkte was. Helaas wordt dit verschil verder niet uitgediept in het artikel. Het is bekend dat montmorrilloniet cohesiever is dan kaoliniet.

6.4 Demonstratie

De proeven tonen aan dat getijdenzand sterker is dan op basis van het huidige model van Sellmeijer verwacht mag worden (feitelijk sterker dan de zandsoorten op basis waarvan het Sellmeijer model ontwikkeld is). De minimale sterktewinst voor het gemengde zand bedroeg hierbij een factor 1.6, de maximale een factor 2.3. De proef met 1 kleilaag lag in de lijn met de proeven met gemengd zand, de proef met 2 kleilagen was duidelijk afwijkend en was een factor 6.5 sterker dan verwacht. Een gedeelte van de sterkte van deze laatste proef komt waarschijnlijk door de dwarsontwikkeling van de pipe, waardoor de stroming meer 2D dan 3D wordt. Meest waarschijnlijke reden voor de extra sterkte is fysische en biologische cohesie onder invloed van de aanwezige lutumdeeltjes.

7 Aanbevelingen voor activiteiten in 2019

De quickscan naar piping in getijdenzand toont aan dat getijdenafzettingen minder pipinggevoelig zijn dan rivierafzettingen, of in ieder geval minder dan afzettingen zonder een fijne fractie. Opvallend hierbij is dat het gebruikte zand feitelijk nog maar weinig lutum (2.2%) en silt (2.7%) bevat. De verwachting bestaat dat bij hogere percentages, die zeker niet ongebruikelijk zijn in de praktijk, het getijdenzand nog minder pipinggevoelig wordt. Het aantal proeven is echter nog niet groot, er zijn alleen kleine schaalproeven uitgevoerd en de oorzaak voor de extra sterkte is nog niet geheel duidelijk. Ook de toepassing binnen WBI van deze nieuwe kennis moet nog beter uitgewerkt worden. In feite moeten er nog meer proeven uitgevoerd worden, inclusief veldproeven, om de extra sterkte onderbouwd mee te kunnen nemen en zonder gebruik te hoeven maken van zeer grote bandbreedtes. Er worden daarom de volgende werkzaamheden aanbevolen.

Proeven

- De proeven die slechts 1 keer uitgevoerd zijn (met 1 kleilaag en 2 kleilagen) herhalen om een onderling vergelijk mogelijk te maken.
- Kleine schaalproeven uitvoeren op getijdenzand van andere locaties dan het Grevelingenmeer.
- Proeven op zand zonder coating (bijvoorbeeld Baskarpzand) met daaraan toegevoegd een zeer weinig cohesieve fijne fractie, om effecten cohesiviteit en coating te onderscheiden van effecten van verminderde doorlatendheid.
- Proeven uitvoeren waarbij de fijne fractie kunstmatig verhoogd wordt om de relatie fijne fractie –pipinggevoeligheid vast te stellen.
- Een aantal medium schaalproeven uitvoeren om schaaffecten uit te sluiten.
- Blijven doorgaan met opzetten van een pipingproef in het veld, in samenwerking met Wetterskip Fryslan.
- Binnen het rivierengebied komen, inclusief Limburg, komen ook gebieden voor waar het zand relatief veel klei en silt bevat. Vervolgstudies zouden zich ook op deze zanden moeten richten.

Modelleren

- De invloed van kleilagen op de piping kan onderzocht worden met de random fields methode, waarbij op willekeurige plaatsen, maar met opgelegde correlatiecoëfficiënten, kleilagen aanwezig zijn in een zandpakket. Deze random fields opbouw kan binnen D-Geo Flow gebruikt worden om het effect van kleilagen op piping te onderzoeken. Hierbij moet ook aandacht zijn voor het vaststellen of de toestroom richting het uittredepunt een 3D- of meer een 2D-karakter heeft onder invloed van pipevorming in dwarsrichting.

Begrijpen

- Vaststellen of het gebruikte getijdenzand inderdaad een kleicoating heeft door gebruik te maken van een SEM.

Toepassing binnen WBI

- In het huidige rapport wordt aangegeven dat eventueel vast met een sterkte-factor gewerkt zou kunnen worden, bijvoorbeeld op basis van de huidige set proeven. De dataset is echter nog vrij beperkt en het zou goed zijn om de proefresultaten van 2019 af te wachten. Het zou verder goed zijn om binnen een wat breder kader na te denken over inbedding van deze resultaten in het WBI, waarbij ook de effecten van een 2D- versus een 3D-benadering meegenomen moeten worden.

8 Referenties

- Allan, R., Douglas, K., Peirson, W., 2016. Backward erosion piping in well graded soils, International Symposium on the Mechanics of Internal Erosion for Dams and Levees. USSD, Salt Lake City, Utah, USA.
- Allan, R.J., 2018. Backward erosion piping. Ph.D.-thesis, The University of New South Wales, Australia.
- Allen, J.R.L., 1984. Sedimentary structures, their character and physical basis, Developments in sedimentology 30. A&B, Elsevier, Amsterdam.
- Buijs, M., 2013. Applying a piping model on field data and historical data of dike failure events, MSc-thesis, Free University, Amsterdam, pp.
- Erkens, G., 2012. Karakterisatie Plaat- en Lagunefacies NAWA/NAWO, Deltares rapport 1205336-000-BGS-000221 pp.
- Eysink, W.D., Biegel, E.J., 1992. Impact of sea level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function (phase 2): Investigations on empirical morphological relations, WL-Delft Hydraulics Report serie H1300pp.
- Flemming, B.W., Nyandwi, N., 1994. Land reclamation as a cause of fine-grained sediment depletion in backbarrier tidal flats (Southern North Sea). Netherland Journal of Aquatic Ecology, 28 (3), 299-307. 10.1007/bf02334198.
- Fleshman, M.S., Rice, J.D., 2014. Laboratory Modeling of the Mechanisms of Piping Erosion Initiation. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 140 (6), 04014017. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001106.
- Häntzschel, W., 1936. Die schichtungsformen rezenter Flachmeer-Ablagerungen. Senckenbergiana, 18 (1), 316-356.
- Hijma, M.P., Lam, K.S., 2015. Globale stochastische ondergrondschematisatie (WTI-SOS) voor de primaire waterkeringen, Deltares report 1209432-000-GEO-0006pp.
- Hijma, M.P., 2018. Waarom zijn er weinig zandmeevoerende wellen in West-Nederland?, Deltares report 11202560-015-GEO-0006_v1.0pp.
- Hijma, M.P., Kanning, W., Wiersma, A.P., Van Beek, V.M., Hoogendoorn, R.D., 2018. Plan van Aanpak KPP 2018 Piping, Deltares rapport 11202560-002-GEO-0001pp.
- Kamps, L.F., 1962. Mud distribution and land reclamation in the eastern Wadden shallows, Rijkswaterstaat Communications Nr 4pp.
- Kohno, I., Nishigaki, M., Takeshita, Y., 1987. Levee failure caused by seepage and preventive measures. Natural Disaster Science, 9 (2), 55-76.
- Kruse, G., Hijma, M.P., 2015. WTI 2017: Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS, Deltares report 1209432-004-GEO-0002pp.
- Kruse, G.A.M., Sellmeijer, H., Van Esch, J., Calle, E., 2015. Optreden van piping in getijdenafzettingen, Deltares memo, 26 augustus 2015pp.
- Luijendijk, S., Van den Ham, G., 2011. Results experiments backward erosion on Loire sand, Deltares memo 1201652-031-GEO-0003pp.
- Malarkey, J. et al., 2015. The pervasive role of biological cohesion in bedform development. Nature Communications, 6, 6257. 10.1038/ncomms7257
<https://www.nature.com/articles/ncomms7257#supplementary-information>.
- Mietta, F., Chassagne, C., Manning, A.J., Winterwerp, J.C., 2009. Influence of shear rate, organic matter content, pH and salinity on mud flocculation. Ocean Dynamics, 59 (5), 751-763. 10.1007/s10236-009-0231-4.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017. Schematiseringshandleiding piping WBI 2017, Definitief, versie 2.2pp.
- Nieuwenhuis, O., 2001. Sand-mud distribution in the Ameland inlet: Sand and mud transport computations in a tidal inlet. Ph.D.-thesis, TUDelft, Delft.
- Oost, A.P., 1995. Dynamics and sedimentary developments of the Dutch Wadden Sea with a special emphasis on the Frisian Inlet : a study of the barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and drainage basins. Ph.D.-thesis, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands.

- Parsons, D.R. et al., 2016. The role of biophysical cohesion on subaqueous bed form size. *Geophysical Research Letters*, 43 (4), 1566-1573. doi:10.1002/2016GL067667.
- Postma, H., 1954. Hydrography of the Dutch Wadden Sea. Ph.D.-thesis, Groningen University, Groningen, The Netherlands.
- Postma, H., 1961. Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1 (1), 148-190. [https://doi.org/10.1016/0077-7579\(61\)90004-7](https://doi.org/10.1016/0077-7579(61)90004-7).
- Reineck, H.E., 1967. Layered sediments of tidal flats, beaches, and shelf bottoms of the North Sea. In: G.H. Lauff (Ed.), *Estuaries. Publ. Am. Assoc. Adv. Sc.*, pp. 191-206.
- Richards, K.S., Reddy, K.R., 2012. Experimental investigation of initiation of backward erosion piping in soils. *Géotechnique*, 62 (10), 933-942. 10.1680/geot.11.P.058.
- RIKZ, 1998. Sedimentatlas Waddenzee. Rijksinstituut voor Kust en Zee, Vestiging Haren, Haren.
- Schindler, R.J. et al., 2015. Sticky stuff: Redefining bedform prediction in modern and ancient environments. *Geology*, 43 (5), 399-402. 10.1130/G36262.1.
- 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. 10.1080/19648189.2011.9714845.
- Tolhurst, T.J., Gust, G., Paterson, D.M., 2002. The influence of an extracellular polymeric substance (EPS) on cohesive sediment stability. In: J.C. Winterwerp, C. Kranenburg (Eds.), *Proceedings in Marine Science. Elsevier*, pp. 409-425.
- Van Beek, V.M., 2015. Backward erosion piping - initiation and progression. Ph.D.-thesis, TU Delft, Delft, The Netherlands.
- Van Beek, V.M., Van Essen, H.M., Vandenboer, K., Bezuijen, A., 2015. Developments in modelling of backward erosion piping. *Géotechnique*, 65 (9), 740-754. 10.1680/geot.14.P.119.
- Van Beek, V.M., Hijma, M.P., Wiersma, A.P., Kanning, W., 2016. Piping: Globaal plan van aanpak 2017-2022, Deltares rapport 1230090-004-GEO-0002pp.
- Van den Heuvel, P.B.J., 1993. From the ebb-tidal delta to the mainland shore of the Holwerderbalg, Dutch Wadden Sea; a facies description, University of Utrecht, Int. Report XGS/32103 pp.
- Van der Poel, J.T., Schenkeveld, F.M., 1998. A preparation technique for very homogeneous sand models and CPT research. In: J. Kimura, T. Kusakabe, O. Takemura (Eds.), *Proceedings of the International Conference Centrifuge 98. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.*, pp. 149-154.
- Van Essen, H.M., Kanning, W., Van Beek, V.M., 2014. Research and Development of Flood Defense Assessment Tools for Piping in WTI 2017 Report 12. Heterogeneity, Deltares rapport 1207809-008-GEO-000345 pp.
- Van Rijn, L.C., 2007. Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. II: Suspended Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 668-689. 10.1061(ASCE)0733-9429(2007)133:6(668).
- Van Straaten, L.M.J.U., Kuenen, P.H., 1958. Tidal action as a cause of clay accumulation. *Journal of Sedimentary Research*, 28 (4), 406-413. 10.1306/74D70826-2B21-11D7-8648000102C1865D.
- Van Straaten, L.M.J.U., 1964. De bodem der Waddenzee. In: J. Abrahamse, J.D. Buwalda, L.M.J.U. Van Straaten (Eds.), *Het Waddenboek. Nederlandse Geologische Vereniging*, pp. 75-151.
- Vos, P.C., Van Heeringen, R.M., 1997. Holocene geology and occupation history of the Province of Zeeland. In: M.M. Fischer (Ed.), *Holocene evolution of Zeeland (SW Netherlands). Mededelingen Rijks Geologische Dienst. Rijks Geologische Dienst, Haarlem*, pp. 5-110.
- Vos, P.C., Bazelmans, J., Weerts, H.J.T., Van der Meulen, M.J., 2011. Atlas van Nederland in het Holoceen, RCE, TNO en Deltares94 pp.
- Vos, P.C., 2015. Origin of the Dutch coastal landscape. Ph.D.-thesis, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands, 359 pp.
- Wilderom, M.H., 1964. Tussen afsluitdammen en deltadijken II - Noord-Zeeland (Schouwen-Duiveland, Tholen en St. Philipsland)pp.

Wooldridge, L.J., Worden, R.H., Griffiths, J., Utley, J.E.P., Thompson, A., 2018. The origin of clay-coated sand grains and sediment heterogeneity in tidal flats. *Sedimentary Geology*, 373, 191-209. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.06.004>.