



Eindrapport Piping in Getijdenzand

Hedwigeproject | Onderzoek naar extra weerstand tegen piping

1220-164143.R08 v3.0 | 30 april 2023

Definitieve versie

HWBP / Waterschap Hollandse Delta

Documentbeheer

Documentgegevens

Projectnaam	Hedwigeproject
Documentnaam	Eindrapport Piping in Getijdenzand
Documentnummer.	1220-164143.R08 / Deltares project: 11204565
Versienummer	v3.0
Opgesteld door	Fugro NL Land & Deltares

Klantgegevens

Klant	Waterschap Hollandse Delta
Adres	Postbus 4103, 2980 GC Ridderkerk
Contactpersoon	Hans de Bart
Documentnr. Klant	n.v.t.

Versiebeheer

Versie	Datum	Status	Omschrijving	Opgesteld door	Gecontroleerd door	Goedgekeurd door
0.1	1-8-2022	Concept	Eerste concept	Projectteam	GRG/MPH	-
1.0	31-8-2022	Concept	Ter beoordeling kennispartners	Projectteam	GRG/MPH	GRG/MPH
2.0	15-12-2022	Concept	(eerste) opmerkingen ENW en Adviesteam dijkontwerp verwerkt	Projectteam	GRG/MPH	GRG/MPH
3.0	30-04-2023	Definitief	Advies ENW verwerkt	Projectteam	GRG/MPH	GRG/MPH

Auteurs

Initialen	Naam	Rol / functie
GRG	Gert-Ruben van Goor	Senior adviseur / projectmanager Waterbouw (Fugro)
MPH	Marc Hijma	Expert geoloog en projectleider (Deltares)
HDB	Hans de Bart	Technisch manager (WSHD)
NP	Noor Pruijn	Adviseur geotechniek (WSHD)
VVB	Vera van Beek	Adviseur / onderzoeker waterkeringen (Deltares)

De auteurs willen op deze plek iedereen bedanken die heeft bijgedragen aan de totstandkoming, uitvoering en begeleiding van dit project. Een groot aantal collega's bij het HWBP, WSHD, Fugro en Deltares heeft een waardevolle bijdrage geleverd aan het onderzoek en de resultaten daarvan. Ook willen wij de andere organisaties bedanken met wie wij samengewerkt hebben binnen dit project: het ENW, Adviesteam Dijkontwerp, Living Lab Hedwige- Prosperpolder, Jan de Nul, Belgisch departement voor Mobiliteit en Openbare Werken en verschillende onderaannemers.

Inhoudsopgave

1. Inleiding	1
1.1 Hedwigeproject: onderzoek naar piping in getijdenzand	1
1.2 Kaders	2
1.3 Kwaliteitsborging	2
1.4 Leeswijzer	2
2. Narratief piping in getijdenzand	4
3. Inpassing binnen het beoordelings- en ontwerpproces	6
4. Stap 1-2: Identificatie getijdenafzettingen	9
4.1 Waar komen ze voor	10
4.2 Relatie tussen getijdengeul- en plaatafzettingen	11
4.3 Breedte/dikteverhouding	12
5. Stap 3: Aanpak getijdenplaatafzettingen	15
5.1 Beslisregel op basis van pipingberekeningen	15
5.2 Achtergrond $C_{\text{plaat}} (L/Hc)$	16
6. Stap 4: Aanpak voor alle getijdenafzettingen	18
6.1 Extra sterktefactor op basis van pipingproeven	18
6.2 Generieke beslisregel getijdenafzettingen	18
6.3 Veilige rekenwaarde sterktefactor	20
6.4 Voor de toekomst: probabilistische aanpak	22
7. Overwegingen en aanbevelingen	24
7.1 Toepassing sterktefactor	24
7.2 Bepalen pipeniveau	25
7.3 Aanbevelingen en vervolgstappen	26
8. Referenties	28
Bijlage 1 – Achtergronden bij de sterktefactor	30

1. Inleiding

Dit eindrapport beschrijft de aanpak en onderbouwing waarmee het faalmechanisme piping in getijdenzand realistischer, en in dit geval daardoor scherper, kan worden beoordeeld op basis van nieuwe beslisregels voor getijdenafzettingen. Deze aanpak is geschikt voor toepassing in beoordelings- en versterkingsprojecten van primaire waterkeringen in Nederland. De aanpak sluit aan bij de huidige aanpak op basis van het rekenmodel van Sellmeijer, zoals geïmplementeerd in de vigerende rekenregel en bijvoorbeeld D-Geo Flow. Het rekenmodel van Sellmeijer is gebaseerd op uniform, homogeen zand en niet gevalideerd voor getijdenafzettingen die onder andere worden gekenmerkt door relatief hoge percentages fijn materiaal in het zand. In de meeste gevallen heeft getijdenzand een $d_{70_{\text{zand}}}$ die lager is dan $150 \mu\text{m}$ en valt daarmee buiten het toepassingsgebied van de rekenregel van Sellmeijer ($d_{70_{\text{zand}}}$: $150\text{-}430 \mu\text{m}$). De laatste jaren is onderzoek gedaan naar piping in getijdenzand en is aangetoond dat getijdenzand meer weerstand biedt tegen piping dan volgt uit de rekenregel. De nieuwe beslisregels voor getijdenafzettingen leiden tot een realistischere veiligheidsbeoordeling en tot optimalisatie van het versterkingsontwerp.

1.1 Hedwigeproject: onderzoek naar piping in getijdenzand

Gesteund door het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) is in samenwerking tussen Fugro, Deltares en Waterschap Hollandse Delta (WSHD) sinds 2020 onderzoek gedaan naar piping in getijdenzand, hierbij aansluitend op eerder onderzoek naar dit onderwerp door Fugro, Deltares, RWS-WVL en Wetterskip Fryslân. Het project Piping in getijdenzand (Hedwigeproject) heeft tot doel gehad de daadwerkelijke weerstand van getijdenzand tegen piping te bepalen, de sterkte-eigenschappen te karakteriseren en deze kennis toepasbaar te maken voor beoordelings- en versterkingsprojecten.

Om de doelstelling te bereiken zijn modelstudies en pipingproeven op verschillende schalen uitgevoerd. Er zijn meer dan 30 kleine en medium schaalproeven uitgevoerd in het lab en een drietal op grote schaal in het veld in de Hedwigepolder en eerder langs de Vijfhuisterdijk in Friesland. De onderzoeksresultaten, gedetailleerd beschreven in onderstaande achtergrondrapportages, vormen de basis voor de aanpak zoals gegeven in dit eindrapport.

Tabel 1.1: Relevante achtergrondrapportages Hedwigeproject.

Kenmerk	Onderwerp	Datum, versie
1219-154756.R01	Eindrapportage pipingproef Vijfhuisterdijk	28-5-2021, v4.0
1220-164143.R04	Factual Report grootschalige pipingproeven Hedwigepolder	25-3-2022, v2.0
1220-164143.R05	Gevoeligheidsstudie (modelstudie) getijdenplatafzettingen	2-6-2022, v1.0
1220-164143.R06	Analyserapport grootschalige pipingproeven Hedwigepolder	1-5-2023, v2.0
1220-164143.R07	Analyserapport kleine en medium schaalproeven	1-5-2023, v2.0

Waar relevant zal naar deze achtergrondrapportages worden verwezen.

1.2 Kaders

Bij de uitvoering van het Hedwigeproject en het opstellen van de aanpak zijn de volgende kaders gehanteerd:

1. Focus op deelmechanisme terugschrijdende erosie

Een serie gebeurtenissen langs het faalpad dient op te treden voordat een waterkering faalt op piping. In de huidige praktijk op basis van het WBI2017 en OI2014 worden hierbij de deelmechanismen opbarsten, heave en terugschrijdende erosie onderscheiden. De waarschijnlijkheid van optreden van deze gebeurtenissen bepaalt de faalkans. Het onderzoek heeft zich specifiek gericht op het deelmechanisme terugschrijdende erosie. Belangrijke aspecten in het getijdengebied als tijdsafhankelijkheid, anisotropie en meerlaagsheid worden dus niet behandeld en zijn geen onderdeel van de beslisregels.

2. Aansluiting bij vigerend rekenmodel van Sellmeijer

Er is aangesloten bij de vigerende rekenmodellen en -regels voor terugschrijdende erosie zoals deze zijn vastgelegd in het WBI2017. Meer specifiek gaat het om het aangepaste rekenmodel van Sellmeijer (Förster *et al.*, 2012). Hieruit volgen ook enkele specifieke toepassingsvoorwaarden voor het gebruik van de sterktefactor. Deze worden verderop gegeven in hoofdstuk 6.

3. Integratie binnen veiligheidsraamwerk als onderdeel BOI 2023

Een sluitende integratie van de hier gegeven aanpak met het wettelijke veiligheidsraamwerk op basis van de overstromingskansbenadering dient bij het opstellen van het BOI 2023 geborgd te zijn. De aanpak beschreven in dit document is geen alomvattende handreiking voor de beoordeling van het pipingmechanisme in getijdenzand. Het BOI geeft de procedures en werkprocessen; het project voegt hier een tweetal ingrediënten aan toe die kunnen worden toegepast wanneer er sprake zou zijn van piping in getijdenzand.

1.3 Kwaliteitsborging

De resultaten van het onderzoek zijn tot stand gekomen in samenwerking tussen Deltares, Fugro en WSHD, waarbij alle producten in overeenstemming met de kwaliteitssystemen van deze partijen intern zijn beoordeeld. Daarnaast heeft collegiale toetsing plaatsgevonden binnen het projectteam en zijn de producten op inhoud en bruikbaarheid voorgelegd aan het expertteam die rondom het Hedwigeproject is opgericht. Daarnaast zijn de resultaten besproken en afgestemd met het begeleidingsteam van het HWBP, de BOI organisatie, het Adviesteam Dijkontwerp en het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW). De beslisregels worden opgenomen binnen het landelijke Beheer- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) voor primaire waterkeringen.

1.4 Leeswijzer

Terugschrijdende erosie (piping) is een complex mechanisme waarvan we op dit moment de relevante fysische processen beperkt kunnen vatten in rekenmodellen. Experimenteel en modelonderzoek leveren een belangrijke bijdrage aan de kennisontwikkeling en vertaling

naar de praktijk. Dit moet ingebed zijn in een begrip van de processen en kenmerken die de dijkveiligheid bepalen. Het volgende hoofdstuk start dan ook met een beschouwing van het pipingproces in getijdenzand en de kenmerken die bijdragen aan extra sterkte.

Hoofdstuk 3 vat de aanpak voor piping in getijdenzand samen in een stappenplan dat kan worden gebruikt bij de beoordeling op piping.

In het stappenplan, dat de kapstok vormt van dit document, wordt onderscheid gemaakt tussen getijdenplaat- en getijdengeulafzettingen. Voor beide afzettingmilieus is een onderscheidende aanpak uitgewerkt, resulterend in een tweetal beslisregels. De verschillen tussen getijdenplaat- en getijdengeulafzettingen en hoe deze zijn te herkennen is beschreven in hoofdstuk 4. Dit hoofdstuk laat ook zien waar getijdenzand kan worden aangetroffen in Nederland en geeft daarmee het toepassingsgebied van de aanpak.

Voor de relatief dunne (≤ 4 m) en slecht doorlatende (ongefundeerde) getijdenplaatafzettingen is een eenvoudige algemene beslisregel afgeleid waarmee kan worden aangetoond dat bepaalde getijdenafzettingen niet pipinggevoelig zijn. De aanpak en onderbouwing voor toepassing van de beslisregel bij getijdenplaatafzettingen is beschreven in hoofdstuk 5.

Voor de dikkere (> 4 m), meer zandige en beter doorlatende getijdengeulafzettingen is op basis van kleine, medium en grote schaalproeven een extra sterktefactor afgeleid waarmee het berekende kritiek verval kan worden gecorrigeerd. De aanpak en onderbouwing voor toepassing van de sterktefactor bij deze getijdengeulafzettingen is gegeven in hoofdstuk 6. Opgemerkt wordt dat deze beslisregel voor getijdengeulafzettingen mag worden gebruikt voor alle typen getijdenafzettingen, dus zowel getijdenplaat- als geulafzettingen. Daarom wordt in dit document ook wel gesproken over de beslisregel voor getijdenafzettingen, deze staat los van de beslisregel voor getijdenplaatafzettingen die alleen voor die subcategorie mag worden toegepast. Achtergronden bij de sterktefactor worden gegeven in Bijlage 1, waarin ook specifieke verwijzingen staan naar passages in achtergrondrapportages.

Hoofdstuk 7 sluit af met een aantal relevante overwegingen bij het gebruik van de beslisregels en geeft aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

2. Narratief piping in getijdenzand

De waterkerende functie van een waterkering kan verloren gaan als gevolg van het faalmechanisme piping. In de huidige praktijk worden in dit faalproces de deelmechanismen opbarsten, heave en terugschrijdende erosie onderscheiden. Voordat er daadwerkelijk kans op bresvorming is, moet een uittredepunt aanwezig zijn die afvoer van zand toe laat – bijvoorbeeld door opbarsten of een zwakke plek in de deklaag – en dient de pipe door te groeien vanaf het uittredepunt tot aan het buitenwater. Door kortsluiting met het buitenwater neemt de stroomsnelheid en erosie in de pipe toe en start het ruimproces. Als gevolg van dit ruimproces kan de dijk verzakken en uiteindelijk bezwijken met een overstroming tot gevolg. In een beoordeling langs het faalpad kunnen de verschillende deelmechanismen en vervolgprocessen worden meegenomen.

Een algemene fenomenologische beschrijving van de (deel)mechanismen is gedetailleerd beschreven in 'Fenomenologische beschrijving faalmechanismen WBI' (Deltares, 2018) en 'Gebiedsspecifieke faalpaden voor piping' (Deltares, 2020). In dit laatste rapport is het faalpad voor piping ook in de context van getijdenafzettingen beschreven.

Eerdere onderzoeksprojecten gericht op piping, zowel in het veld als in het laboratorium, wezen in de richting dat getijdenzand meer weerstand biedt tegen piping dan volgt uit de rekenregel. Dit volgde onder meer uit de onderzoeken binnen het RWS-WVL programma Kennis voor Keringen (Hijma en Oost, 2018; Hijma, 2019) en uit POV-onderzoek naar de invloed van anisotropie langs het Spui (Fugro, Deltares en WSHD, 6-11-2020). In de Schematiseringshandleiding Piping (RWS, 2021; bijlage B) is ook al onderkend dat in bepaalde getijdenafzettingen het optreden van terugschrijdende erosie onwaarschijnlijk is door de aanwezigheid van laagjes met een hoog percentage fijne fractie.

Dat getijdenzand meer weerstand biedt tegen piping vormde dan ook de werkhypothese binnen het Hedwigeproject.

Deze extra sterkte wordt veroorzaakt door de volgende aspecten die aangrijpen op de belasting (a-b) en sterkte (c-e).

- a. meerlaagsheid op basis van doorlatendheidsvariatie tussen grondlagen;
- b. anisotropie in doorlatendheid door gelaagdheid binnen grondlagen;
- c. relatief hoog percentage fijne fractie in het zand dat zorgt voor inbedding van de korrels en cohesie tussen kleideeltjes;
- d. cohesie tussen eerdergenoemde kleideeltjes maar ook door eventuele kleicoating op zandkorrels en biofilms;
- e. doolhofstructuur in de top van het getijdenpakket waarlangs of onder een erosiepijp dient te groeien met name door de aanwezigheid van dunne kleilaagjes. Dit zal vooral effect hebben op de pipegroeisnelheid.

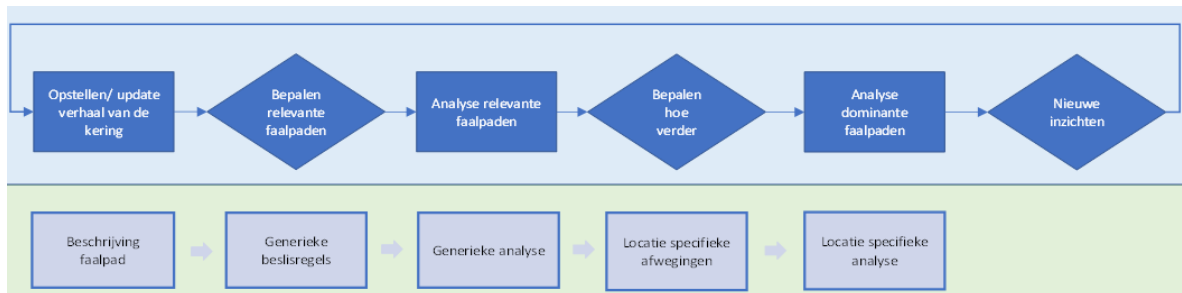
Deze aspecten zijn overigens in meer of mindere mate ook van toepassing op rivierafzettingen, deze afzettingen vallen echter buiten de scope van dit onderzoek. Nader onderzoek naar dit type afzettingen wordt aanbevolen, zie §7.3.2.

Het onderzoek naar piping in getijdenzand heeft zich gericht op het type getijdenafzettingen waarbij piping onwaarschijnlijk is (getijdenplaatafzettingen) en het type waar piping niet zonder meer kan worden uitgesloten (getijdengeulafzettingen). Voor deze laatste categorie heeft het onderzoek zich toegespitst op het bepalen van het effect van de fijne fractie (onderdelen c en d) op de weerstand tegen terugschrijdende erosie. Als gevolg van een betere inbedding van de korrels en cohesie tussen de lutumdeeltjes is de weerstand tegen terugschrijdende erosie groter dan voor homogeen zand zonder fijne fractie waarop de rekenregel van Sellmeijer is gebaseerd. De relatieve bijdrage van inbedding versus cohesie aan de grotere weerstand van getijdenzand is nog niet bekend.

In de huidige praktijk kunnen, veelal binnen een maatwerk aanpak, belangrijke aspecten die ingrijpen op de belasting zoals meerlaagsheid, anisotropie en tijdsafhankelijkheid al worden meegenomen. De extra sterkte als gevolg van de fijne fractie in het zandpakket kan aanvullend op deze onderdelen in rekening worden gebracht (zie ook hoofdstuk 7). De doolhofstructuur in de top van het getijdenzand en de invloed daarvan op het pipingproces varieert sterk per locatie en is in de praktijk daardoor niet goed te bepalen en gekwantificeerd mee te nemen in een beoordeling of ontwerp.

3. Inpassing binnen het beoordelings- en ontwerpproces

De beoordeling van de veiligheid van een waterkering wordt uitgevoerd volgens het schema van Figuur 3-1. Dit schema wordt als uitgangspunt gebruikt bij (de ontwikkeling van) het nieuwe Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI). Het schema begint met het opstellen van het verhaal van de kering en de beschrijving van de mogelijke faalpaden. Vervolgens worden relevante faalpaden van grof naar fijn uitgewerkt.



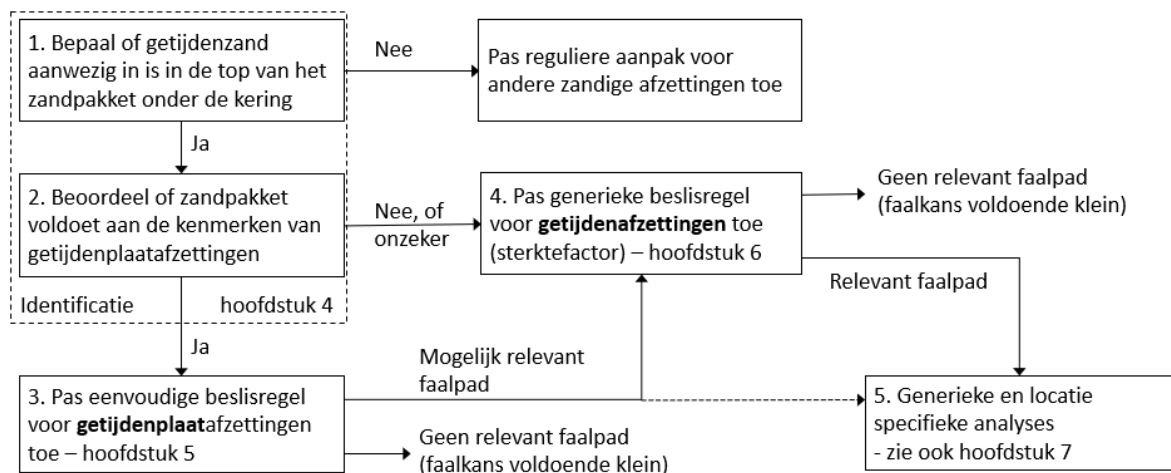
Figuur 3-1: Stappen in het beoordelingsproces volgens het BOI 2023.

De aanpak voor getijdenafzettingen met twee beslisregels: één voor getijdenplaatafzettingen en één voor alle getijdenafzettingen, is in bovenstaand beoordelingsproces in te passen. De beslisregel voor getijdenplaatafzettingen kan, naast de bestaande beslisregels, worden toegepast om te beoordelen of piping een relevant faalmechanisme is dat significant bijdraagt aan de overstromingskans.

Bij de generieke beslisregel voor alle getijdenafzettingen past het toepassen van een sterktefactor op het kritiek verval binnen de generieke analyse van het initiële mechanisme terugschrijdende erosie (piping). Deze generieke analyse is vergelijkbaar met de gedetailleerde beoordeling volgens het WBI 2017. In de aanpak wordt op basis van de huidige dataset gerekend met een veilige rekenwaarde van de sterktefactor. Dit maakt het mogelijk de nieuw opgedane kennis vlot toe te passen binnen projecten met als resultaat een forse optimalisatie van scope en/of pipingmaatregelen, terwijl tegelijkertijd recht wordt gedaan aan de (rest)onzekerheden. De keuze voor een veilige rekenwaarde past binnen de toepassing als beslisregel, dus het identificeren van evident veilige pipinglocaties. Meer over de afleiding van de rekenwaarde van de sterktefactor en de toepassing volgt in hoofdstuk 6.

Analyse van de dominante faalpaden vindt vervolgens plaats in een locatie specifieke analyse waarin de overstromingskans wordt bepaald langs het faalpad. Hierin kunnen ook vervolgmecanismen worden meegenomen. Deze stap is vergelijkbaar met de Toets op Maat uit het WBI 2017 en valt buiten de scope van dit onderzoek.

In Figuur 3-2 is het stappenplan gegeven voor de toepassing van de beslisregels bij het beoordelen en ontwerpen op piping in getijdenzand.



Figuur 3-2: Stappenplan toepassing beslisregels voor piping in getijdenzand.

De verschillende stappen zijn hieronder kort beschreven met een verwijzing naar de relevante hoofdstukken in dit document.

Stap 1 t/m 2: Identificatie van getijdenplaat- en getijdengeulafzettingen

Voor toepassing van de beslisregel voor getijdenplaatafzettingen en de extra sterktefactor voor getijdenzand in het algemeen dient logischerwijs eerst te worden vastgesteld of er getijdenzand aanwezig is onder de waterkering. Bij afwezigheid van getijdenzand in de top van het watervoerend pakket dient de reguliere aanpak te worden gevolgd. Handvatten voor de identificatie van getijdenafzettingen en relevante eigenschappen zijn gegeven in hoofdstuk 4.

Indien is vastgesteld dat de eerste zandlaag een getijdenzandlaag is, kan op basis van een aantal kenmerken een onderscheid worden gemaakt in aanpak. De relatief eenvoudige beslisregel kan worden toegepast als wordt voldaan aan de volgende kenmerken die representatief zijn voor getijdenplaatafzettingen:

1. de dikte van het getijdenzandpakket is gelijk aan of kleiner dan 4 m, en
2. het getijdenzandpakket staat niet in direct contact met diepere zandlagen. Het getijdenzandpakket is dus niet gefundeerd op een andere zandige formatie, en
3. de verhouding tussen de dikte en breedte van de formatie is ≥ 100 (dun, uitgestrekt).

Wanneer de bovenstaande kenmerken voor een getijdenplaatafzetting onzeker of lastig te bepalen zijn, kan ervoor gekozen worden om direct de generieke beslisregel voor alle getijdenafzettingen toe te passen (zie stap 4).

Stap 3: Eenvoudige beslisregel getijdenplaatafzettingen

Wanneer uit de voorgaande stappen blijkt dat er sprake is van een (ongefundeerd) zandpakket dat voldoet aan de kenmerken van een getijdenplaatafzettingen, kan de beslisregel voor dit type getijdenafzetting worden toegepast. Dit betreft een beoordeling

waarbij, op basis van het verval over de kering en aanwezige kwelweglengte, de pipinggevoeligheid relatief eenvoudig kan worden beoordeeld. De aanpak is gegeven in hoofdstuk 5.

Piping in deze dunne en slecht doorlatende getijdenzandafzettingen is, gezien de veelal lange kwelweglengtes bij dijken in het getijdengebied, onwaarschijnlijk. Wanneer wordt voldaan aan de voorwaarde uit de beslisregel is de kans op piping verwaarloosbaar.

Wanneer niet wordt voldaan aan de voorwaarde uit de eenvoudige beslisregel voor getijdenplaatafzettingen en de overige meer generieke beslisregels, is piping een relevant faalpad dat nader moet worden beoordeeld. Hierbij kan verder worden gegaan met de algemene beslisregel voor alle getijdenafzettingen op basis van de extra sterktefactor of andere pipinganalyses binnen het generieke of maatwerkspoor.

Stap 4: Generieke beslisregel getijdenafzettingen (extra sterktefactor)

De beoordeling vindt plaats op basis van een reguliere (semi)probabilistische analyse van het deelmechanisme terugschrijdende erosie met de vigerende rekenregel van Sellmeijer. Het berekende kritiek verval wordt hierbij gecorrigeerd met een sterktefactor waarin het gunstige effect van een fijne fractie in het getijdenzand wordt meegenomen. Deze sterktefactor omvat alleen de extra sterkte die veroorzaakt wordt door inbedding en cohesie. Aspecten als anisotropie, meerlaagsheid, tijdsafhankelijk, voorland en 3D-effecten staan hier verder los van.

Het toepassen van de sterktefactor is geoorloofd voor alle getijdenzanden, dus zowel getijdenplaat- als de meer zandige geulafzettingen. De aanpak en rekenwaarde van de sterktefactor is gegeven in hoofdstuk 6.

Stap 5: Generieke en locatie specifieke (maatwerk)analyses

Binnen het reguliere werkproces kan, in het geval piping niet kan worden uitgesloten met de beslisregels, verder worden gegaan met pipinganalyses binnen generieke en locatie specifieke maatwerkanalyses. Enkele specifieke aspecten die raken aan een maatwerkaanpak bij de beoordeling van piping in getijdenzand zijn gegeven in hoofdstuk 7.

4. Stap 1-2: Identificatie getijdenafzettingen

In het onderzoek naar piping in getijdenzand is onderscheid gemaakt tussen (ongefundeerde) getijdenplaat- en getijdengeulafzettingen, waarbij is gebleken dat plaatafzettingen zeer beperkt pipinggevoelig zijn en zeker minder pipinggevoelig dan geulafzettingen. Onderstaande tabel toont de belangrijkste verschillen tussen beide afzettingen. In een eerder rapport is ook uitgebreid stilgestaan bij de verschillen en overeenkomsten tussen deze twee typen getijdenzand, zie Hijma & Oost (2018).

Tabel 4.1: Overzicht van de belangrijkste verschillen tussen getijdenplaat- en getijdengeulafzettingen.

Eigenschap	Getijdenplaat	Getijdengeul
Vorm afzetting	Uitgestrekt en relatief dun (in aanpak maximaal 4 m dik genomen, meestal dunner)	Relatief dik t.o.v. de breedte (breedte/dikte verhouding < 100)
D70, gehele fractie	70-150 μm , mediaan rond 130 μm	90-500 μm , mediaan rond 150 μm
Fijne/slibfractie	Sterk wisselend, gemiddeld hoger dan in geulafzettingen	Sterk wisselend
Gelaagdheid	Sterk wisselend	Sterk wisselend
Doorlatendheid	Meestal < 2 m/d, bereik 0,5-4 m/d	2-10 m/d
Pakking	Door golfwerking vaak relatief dichtgepakt	Vaak los tot zeer los
Anisotropie in doorlatendheid	3-14 (afhankelijk van gelaagdheid)	3-14 (afhankelijk van gelaagdheid)
WBI-SOS eenheid	H_Mp_zf – zandige getijdenplaat	H_Mg_zk – fijn zand, kleiig H_Mg_zf – fijn zand, minder kleiig H_Mg_zm – matig grof zand

Door deze verschillen kan voor deze twee typen getijdenzand een andere aanpak worden gevolgd bij het beoordelen en ontwerpen van dijken op getijdenzand. Het is hierbij dus wel noodzakelijk dat deze twee typen kunnen worden onderscheiden op basis van grondonderzoek en/of aanvullende geologische informatie. Meestal is het echter niet mogelijk de twee typen afzettingen uit elkaar te houden op basis van de sondeerresultaten (conusweerstand, wrijvingsgetal) of een boorbeschrijving alleen, daarvoor lijken de afzettingen te veel elkaar. Het onderscheid moet vooral worden gemaakt op basis van de morfologie (vorm) van de afzetting. In de praktijk komt het regelmatig voor dat plaatafzettingen direct gelegen zijn op geulafzettingen, in dat geval kan de aanpak op basis van de beslisregel voor plaatafzettingen niet worden gebruikt, maar kan wel de aanpak voor getijdengeulafzettingen op basis van een extra sterktefactor worden toegepast.

Om onderscheid te kunnen maken tussen getijdenplaat- en getijdengeulafzettingen is het noodzakelijk om eerst nog drie aspecten te benoemen, namelijk:

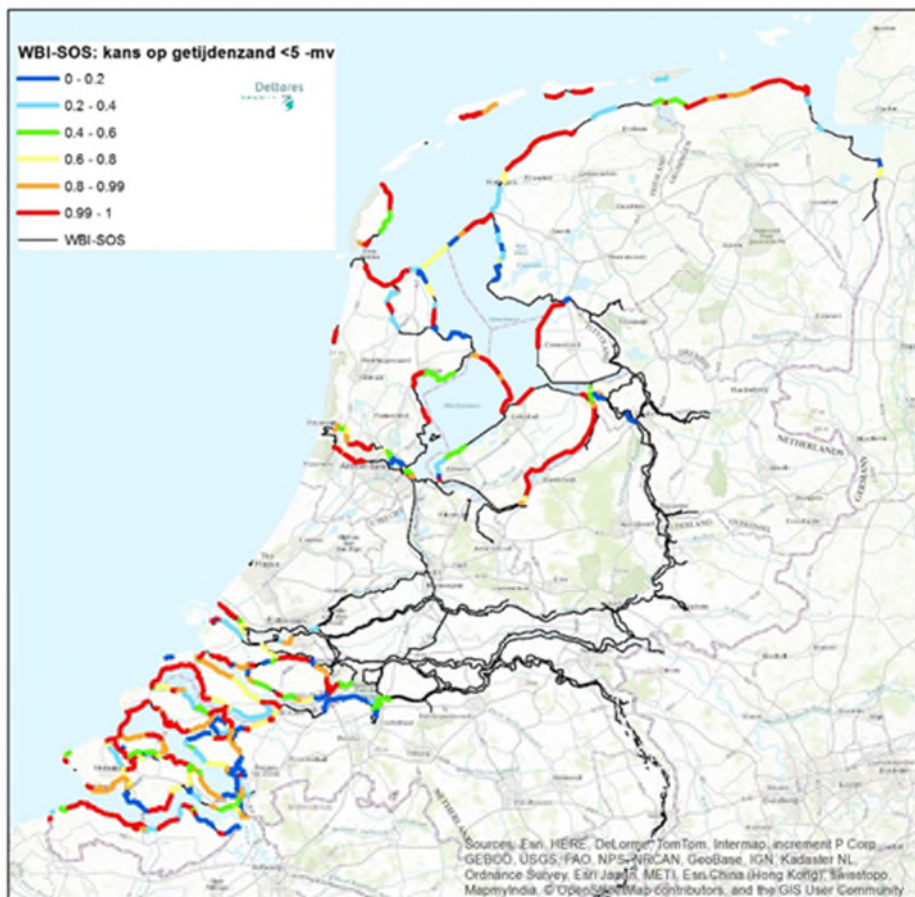
1. Waar komen ze voor;
2. Relatie tussen getijdengeul- en plaatafzettingen;
3. De breedte/dikteverhouding.

Deze aspecten zijn in de volgende paragrafen beschreven.

4.1 Waar komen ze voor

Het eerste aspect gaat over de verbreiding van getijdenafzettingen. Er zijn veel waterschappen met getijdenzand in de ondergrond. Uit WBI-SOS volgt dat onder 970 km primaire kering getijdenzand voorkomt binnen 5 m onder het maaiveld (zie Figuur 4.1). Voor de meeste van deze waterschappen geldt dat al het Holocene zand onder de primaire keringen sowieso uit getijdenzand bestaat, simpelweg omdat er geen rivierafzettingen voorkomen. Maar met name rondom de Rijn-Maasmonding en de IJsselmonding is een graduele overgang aanwezig tussen getijden-, estuariene en rivierafzettingen, waarbij deze typen zowel horizontaal als verticaal in elkaar over kunnen gaan. In deze gebieden is WBI-SOS een goed startpunt voor het toekennen van het label 'getijdenzand', maar ook het geologisch model GeoTOP kan hiervoor worden geraadpleegd, bijvoorbeeld via www.dinoloket.nl; de getijdenafzettingen vallen onder de Walcheren en Wormer Laagpakketten van de Formatie van Naaldwijk.

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



Figuur 4.1: Kaart met de kans op getijdenzand binnen 5 m onder maaiveld, gebaseerd op WBI-SOS.

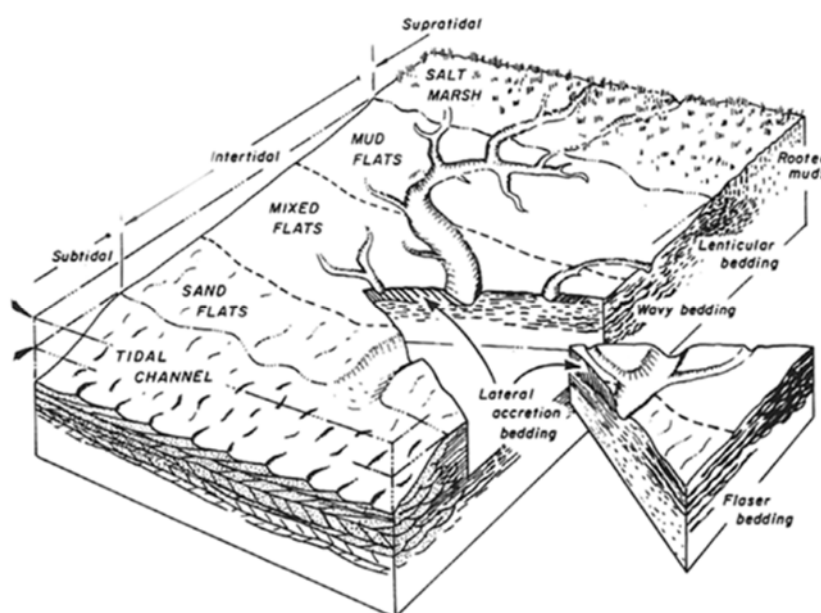
4.2 Relatie tussen getijdengeul- en plaatafzettingen

Het tweede aspect gaat over de relatie tussen geulen en platen.

Ter illustratie, veel mensen hebben wel eens wadgelopen en lopen dan vooral over drooggevallen platen. De platen worden doorkruist door geulen, waarvan de diepste ook bij eb niet droogvallen. Bij vloed komt het water vervolgens binnen via de geulen en steeds grotere delen van de platen komen weer onder water te staan. De stroomsnelheden zijn hierbij het hoogst in de geul en nemen verder van de geul steeds meer af. Dit heeft merkbare gevolgen op het wad: als men vanaf de geul de plaat zou oplopen wordt het materiaal steeds minder zandig en steeds slibrijker. Het water stroomt tenslotte steeds langzamer en kan dus minder grof materiaal meenemen.

Een doorsnede door een dergelijk systeem wordt getoond in Figuur 4.2. Het laat zien dat naast de getijdengeul (tidal channel) de zandige getijdenplaten liggen (sand flats), die lateraal overgaan in kleiiger delen (mixed flats) en dan de kleiige plaatafzettingen (mudflats). De overgang naar de kwelder (salt marsh) is aanwezig langs kustlijnen, maar in een Waddenzee-achtige situatie gaan de mudflats uiteindelijk via mixed en sand flats weer over in een volgende getijdengeul. Op de plaat zelf zijn kleinere geulen aanwezig (krekens, prielen) die de plaat afwateren richting de getijdengeul.

Getijdenplaten en -geulen zijn dus met elkaar verbonden en liggen direct naast elkaar. In profielen is dit vaak goed te zien doordat aan weerszijden van de relatief dikke getijdengeulen relatief dunne zandlagen zichtbaar zijn die als 'vleugels' aan de geul vastzitten. De overgang van dikke geul- naar dunne plaatafzettingen is meestal vrij scherp en kan binnen 10 m plaatsvinden. In gebieden waar de geulen zich vaak hebben verplaatst, kan een complexe 3D-afwisseling van plaat- en geulafzettingen zijn ontstaan en zijn ze moeilijker van elkaar te onderscheiden.



Figuur 4.2: Relatie tussen getijdengeulen (tidal channel) en zandige getijdenplaten (sand flats). Naar Dalrymple (1992).

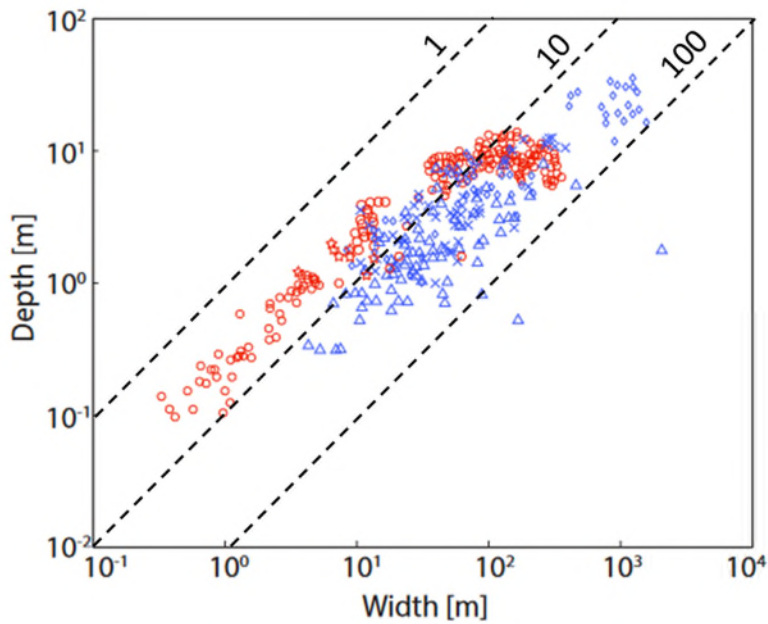
4.3 Breedte/dikteverhouding

Het derde aspect, de breedte/dikteverhouding, is ook direct zichtbaar bij het wadlopen: de geulen zijn smaller dan de platen, maar wel behoorlijk diep (zie bijvoorbeeld Figuur 4.3). Met andere woorden: geulen hebben een andere breedte/dikteverhouding dan platen. Naar deze verhouding is veel onderzoek gedaan en het bepalen van de verhouding geeft veel houvast bij het maken van het onderscheid.



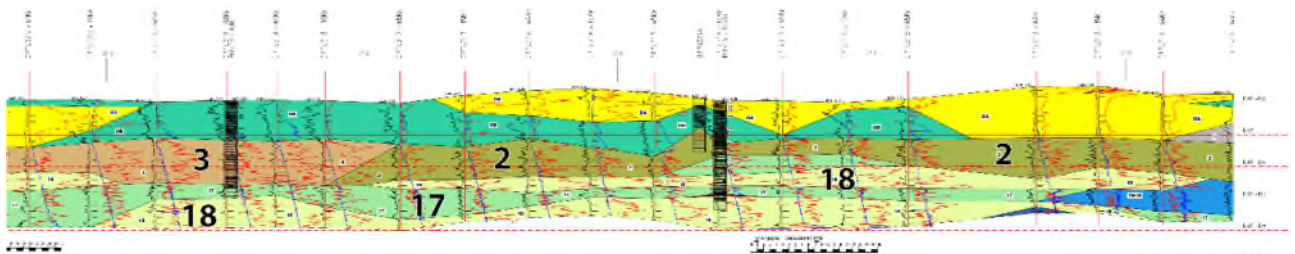
Figuur 4.3: Foto van de Waddenzee bij laagwater: relatief smalle getijdengeulen (gevuld met water) met aan weerszijden uitgestrekte getijdenplaten. Locatie: Neuwerk, Duitsland (bron: Wikipedia).

Onderstaand figuur geeft een overzicht van de breedte/dikteverhouding voor getijdengeulen (in rood). Geulen tot 10 m breed hebben een relatief kleine breedte/dikte verhouding van circa 5-7. Dit betekent dat een geul van 10 m breed ongeveer 1,5-2 m diep zal zijn. Bij grotere geulen kan de verhouding oplopen tot 80. Dit sluit goed aan bij de resultaten van Gouw & Hijma (2022), die voor West-Nederland verhoudingen berekend hebben van gemiddeld 50-70. Getijdenplaten hebben veel hogere breedte/dikteverhoudingen, meestal ruim boven de 100. Een breedte/dikteverhouding van 100 is dan ook een goed criterium: is deze verhouding kleiner dan 100, dan gaat het om een getijdengeul en anders om een getijdenplaat.



Figuur 4.4: De breedte en dikte van getijdengeulen (rood) en riviergeulen (blauw), de gestreepte lijnen geven de breedte/dikteverhouding aan. Naar Finotello et al. (2020).

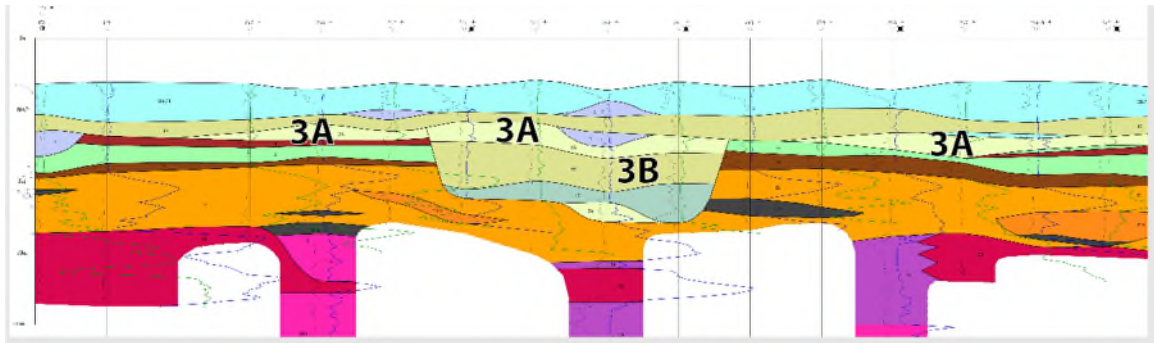
De (gemiddelde) dikte van een afzetting is eenvoudig af te leiden uit grondonderzoek (sonderingen, boringen, geofysisch onderzoek), maar de bepaling van de breedte is minder gemakkelijk. De breedte van een getijdenafzetting kan namelijk alleen worden vastgesteld als bekend is hoe de afzetting georiënteerd ligt ten opzichte van de ondergronddata. Onderstaande voorbeelden illustreren hoe belangrijk dit is. Het eerste voorbeeld toont een geotechnisch lengteprofiel langs de Oude Maas (zie Figuur 4.5). De Oude Maas is een bedijkte geul, waarbij de bovenste afzettingen onder de dijk ook door de Oude Maas zijn afgezet. Dit betekent dat de dijk hoofdzakelijk parallel loopt aan de oriëntatie van de bovenste zandafzettingen. Een profiel langs de dijk laat daardoor overal getijdenzand zien, waardoor de indruk kan ontstaan dat deze afzetting heel breed is. De daadwerkelijke breedte kan langs de Oude Maas alleen worden vastgesteld door ondergronddata haaks op de dijk, en dus haaks op de geul in voor- en achterland, te analyseren.



Figuur 4.5: Voorbeeld uit een geotechnisch lengteprofiel langs de Oude Maas (bij km 31.6). De zandige getijdenafzettingen zitten in eenheden 2, 3, 17 en 18. De afzettingen liggen parallel georiënteerd aan de dijk, komen daarom langs grote delen van de hele dijk voor, maar dit zegt niks over de breedte van afzetting. Daarvoor zal in dit geval een raai haaks op de dijk moeten worden bekeken.

Het tweede voorbeeld toont een deel van een geotechnisch profiel bij Holwerd in Friesland (zie Figuur 4.6). De dijken langs de Waddenzee liggen daar gemiddeld haaks op de stromingsrichting van de voormalige getijdengeulen. In de figuur is een mooi begrensde

getijdengeul zichtbaar (gestapelde eenheden 3A-3B), met aan beide kanten dunne getijdenplaatafzettingen (eenheid 3A). De geul zal ongeveer haaks worden aangesneden, is 400 m breed en 6 m dik en heeft dus een breedte/dikte verhouding van rond de 70. De plaatafzetting is ongeveer 1,5 m dik, komt over honderden meters voor en heeft dus een breedte/dikteverhouding van ruim boven de 100. In dit voorbeeld is de geulvorm natuurlijk overduidelijk aanwezig en eenvoudig te herkennen, ook zonder het berekenen van de breedte/dikteverhouding. Dit zal echter niet in alle profielen zo eenvoudig zijn en dan geeft de verhouding een goed houvast.



Figuur 4.6: Voorbeeld uit een geotechnisch lengteprofiel langs de Waddenzee (bij km 38-39). De getijdengeulafzettingen zitten in eenheden 3A-3B (geulvorm in het midden) en de getijdenplaatafzettingen in eenheid 3A aan weerszijden van de geul. De geul- en de plaatafzettingen liggen haaks op de dijk, waardoor de geul goed zichtbaar is en de breedte/dikteverhouding van de plaat eenvoudig kan worden bepaald.

Om de breedte vast te stellen is het dus nodig om de oriëntatie van de afzetting te weten en grondonderzoek langs en dwars op de afzetting te hebben. Voor ondiepere afzettingen is dit meestal vrij eenvoudig, omdat goed bekend is welke gemiddelde richting de geulsystemen hadden op basis van geologisch onderzoek en/of beschikbare paleogeografische kaarten. Voor diepere afzettingen is dit lastiger, maar op basis van (bestaand) grondonderzoek, het geologische 3D-model GeoTOP (www.dinoloket.nl) en paleogeografische kaarten (bijvoorbeeld Vos et al., 2011) is dit goed mogelijk.

5. Stap 3: Aanpak getijdenplaatafzettingen

5.1 Beslisregel op basis van pipingberekeningen

Voor relatief dunne, slecht doorlatende getijdenplaatafzettingen, die niet zijn gefundeerd op een ander zandpakket is een relatief eenvoudige beslisregel afgeleid op basis waarvan piping kan worden uitgesloten. De toepassingsvoorwaarden zijn gegeven in hoofdstuk 3. De beslisregel voor zandpakketten die voldoen aan de kenmerken van getijdenplaatafzettingen luidt als volgt:

$$(\Delta H - 0,3d) \leq \Delta H_c = \frac{L}{C_{\text{plaat}}}$$

Vergelijking 5.1

Met daarin:

- ΔH = het verval over de waterkering (WBN – h_{exit}) [m]
- d = dikte deklaag bij uittredepunt [m]
- ΔH_c = kritiek verval [m]
- L = kwelweglengte [m]
- C_{plaat} = factor die de maximale verhouding L/H_c weergeeft = 7 [-]

De beslisregel is te vergelijken met de bekende empirische rekenregel van Bligh (zie TAW, 1999). De C_{plaat} -waarde is hier echter niet empirisch vastgesteld, maar op basis van pipingberekeningen in D-Geo Flow met variatie in eigenschappen die de gehele bandbreedte aan mogelijke configuraties in plaatafzettingen afdekken. De hoogste C_{plaat} -waarde die is gevonden in de gevoeligheidsstudie en waarbij piping nog juist op kan treden in zandige plaatafzettingen, bedraagt $C=7$ [-]. Deze waarde van C_{plaat} betreft een veilige bovengrens voor het scenario met de grootste dikte van het zandpakket (4 m) en hoogste doorlatendheid (4 m/d) binnen de ranges die representatief zijn voor getijdenplaatafzettingen. Dit scenario heeft een verwaarloosbare kans op optreden die ruimschoots binnen de faalkanseis op doorsnedeniveau past. Daarmee kan worden gesteld dat wanneer wordt voldaan aan de beslisregel, de faalkans voldoende klein is.

Er bestaan ook getijdengeulafzettingen die dunner zijn dan 4 m en een bulkdoorlatendheid hebben van minder dan 4 m/dag. Aangezien de achterliggende modellering voor de beslisregel voor getijdenplaatafzettingen geen rekening houdt met de breedte van het zandpakket, is er in principe geen reden om de beslisregel voor getijdenplaatafzettingen niet ook toe te passen op deze getijdengeulafzettingen. Het is dan wel nodig met voldoende onderbouwing aan te geven dat de bulkdoorlatendheid inderdaad minder is dan 4 m/dag, dit is voor plaatafzettingen niet nodig. Verder geldt ook voor deze getijdengeulafzettingen dat ze dan niet contact mogen staan met diepere zandlagen.

Voor de bepaling van de parameters wordt aangesloten bij de Schematiseringshandleiding Piping (RWS, 2021), zie onderstaande tabel.

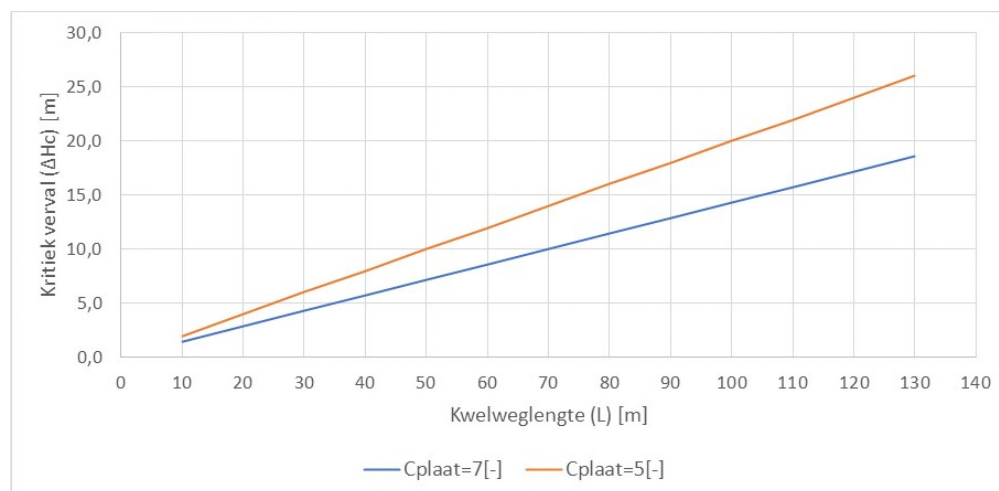
Tabel 5.1: Toe te passen waarden voor parameters in beslisregel.

Parameters	Omschrijving	Toelichting
WBN [m NAP]	Buitenwaterstand	Buitenwaterstand waarbij de overschrijdingskans van de waterstand gelijk is aan de norm (WBN)
h_{exit} [m NAP]	Waterstand binnendijks	Waterstand binnendijks (polderpeil) of maaiveldniveau (indien geen open water) ter plaatse van het uittredepunt (ondergrens)
d [m]	Deklaagdikte	Lage karakteristieke waarde (5% ondergrens)
L [m]	Kwelweglengte	Lage karakteristieke waarde (5% ondergrens)
C_{plaat} [-]	Factor max L/Hc	Nominaal (voorgeschreven): 7 [-] - volgt uit pipingberekeningen

5.2 Achtergrond C_{plaat} (L/Hc)

$C_{\text{plaat}} = 7$ [-] geldt als bovengrens voor het rekenscenario met de meest ongunstigste uitgangspunten in dikte van het zandpakket (4 m) en doorlatendheid (4 m/d). In vergelijking met $C=18$ [-], zoals typisch werd toegepast in de rekenregel van Bligh, betreft $C=7$ [-] een veel lagere maar reële waarde die aansluit bij de relatief dunne en slecht doorlatende eigenschappen van het pakket. Voor getijdenplaatafzettingen wordt deze waarde als een conservatieve bovengrens beschouwd.

Bij de bepaling van de C-factor is vooralsnog geen rekening gehouden met extra sterkte van getijdenzand door de aanwezigheid van een fijne fractie. Deze extra is gemiddeld ruim een factor 2, met een 5% ondergrenswaarde (rekenwaarde) van 1,4. Rekening houdend met deze minimale extra sterktefactor van 1,4 [-] zou de waarde van C_{plaat} afnemen van 7 naar 5. Uit een impactanalyse blijkt dat een dergelijke optimalisatie overigens niet onderscheidend zal uitpakken. Uit Figuur 5.1 volgt dat bij vrij gangbare beschikbare kwelweglengtes ≥ 70 m het kritiek verval volgens de beslisregel met $C=7$ [-] al meer dan 10 m bedraagt.



Figuur 5.1: Berekend kritiek verval als functie van kwelweglengte en $C_{\text{plaat}}=7$ [-]. Ter illustratie zijn ook de resultaten voor $C_{\text{plaat}}=5$ [-] gegeven.

De analyses die ten grondslag hebben gelegen aan de beslisregel voor getijdenplaat-afzettingen zijn gedetailleerd beschreven in het achtergrondrapport 'Gevoeligheidsstudie getijdenplaatafzettingen en afleiding beslisregel' (kenmerk: 1220-164143.R05 v2.0 d.d. 2-6-2022).

6. Stap 4: Aanpak voor alle getijdenafzettingen

6.1 Extra sterktefactor op basis van pipingproeven

Onderstaande aanpak kan worden toegepast wanneer terugschrijdende erosie in getijdenzand wordt beoordeeld. De top van het watervoerend pakket dient hierbij uit getijdenzand te bestaan. In de praktijk komt het soms voor dat een getijdengeul in direct contact staat met dieper gelegen zandlagen. Omdat de pipe zich in het getijdenzand ontwikkelt, mag ook in deze gevallen de sterktefactor worden toegepast. Als het getijdenpakket relatief dun is (1-2 m) en het onderliggende pakket een veel hogere doorlatendheid heeft, dient mogelijk ook het onderliggende pakket te worden beoordeeld op terugschrijdende erosie. In dergelijke gevallen is het namelijk niet uitgesloten dat verticale piping door (een deel van) het getijdenzandpakket optreedt en het getijdenzand vervolgens als dak van de pipe fungeert. Bij de grootschalig pipingproeven in de Hedwigepolder is allereerst sprake geweest van verticale piping door ca. de bovenste 0,5 m van het getijdenpakket waarbij de doorlatendheid van dit bovenste deel ongeveer 4 tot 8 maal lager is bepaald dan de onderliggende zandlagen (zie ook Analyserapport grootschalige pipingproeven Hedwigepolder en verderop §7.2).

Het wordt benadrukt dat, in overeenstemming met het stappenplan uit Figuur 3-2, deze aanpak voor zowel getijdenplaat- als getijdengeulafzettingen toepasbaar is.

Pipingproeven op verschillende schalen hebben aangetoond dat getijdenzand meer weerstand biedt tegen piping dan volgt uit de rekenregel van Sellmeijer. De extra sterkte wordt toegeschreven aan de fijne fractie in het zandige pakket. Als gevolg van een betere inbedding van de korrels en cohesie tussen de lutumdeeltjes is de weerstand tegen terugschrijdende erosie groter dan voor homogeen zand zonder fijne fractie waarop de rekenregel is gebaseerd (zie ook hoofdstuk 2).

Wanneer terugschrijdende erosie plaatsvindt in getijdenzand kan het berekende kritiek verval, zoals bepaald met de huidige rekenregel van Sellmeijer of met een numeriek model zoals D-Geo Flow, worden gecorrigeerd. Toepassing van de huidige rekenregel zonder sterktefactor leidt namelijk tot een onderschatting van het kritiek verval voor piping in getijdenzand.

6.2 Generieke beslisregel getijdenafzettingen

De aanpak volgt de reguliere beoordeling op basis van de vigerende rekenregel waarmee in een (semi-)probabilistische aanpak het pipingrisico wordt beoordeeld. Door het berekende kritiek verval te vermenigvuldigen met de sterktefactor kan de extra sterkte van getijdenzand tegen piping worden meegenomen. Hieronder is dat weergegeven bij de bepaling van de stabiliteitsfactor (F_p) voor terugschrijdende erosie volgens het WBI 2017.

$$F_p = \frac{\Delta H_c \cdot SF_{\text{getijdenzand}}}{(WBN - h_{\text{exit}} - 0,3 \cdot d)}$$

Met daarin:

WBN	Buitenwaterstand waarbij de overschrijdingskans van de waterstand gelijk is aan de norm [m NAP]
h_{exit}	Waterstand (polderpeil) of maaiveldniveau bij uittredepunt [m NAP]
d	Dikte deklaag bij uittredepunt [m]
ΔH_c	Kritiek verval over de waterkering bepaald met rekenregel Sellmeijer [m]
$SF_{\text{getijdenzand}}$	Sterktefactor getijdenzand als gevolg van fijne fractie [-]

Voor een beschrijving van de parameters WBN, h_{exit} , d en ΔH_c , hoe deze zijn te bepalen en met welke veiligheden, wordt verwezen naar de Schematiseringshandleiding Piping (RWS, 2021) en Bijlage III Sterkte en veiligheid (WBI 2017).

Op basis van het onderzoek naar piping in getijdenzand kan, als gevolg van de fijne fractie in het getijdenzand, een extra sterktefactor van 1,4 [-] op het berekende kritiek verval worden toegepast.

De waarde van 1,4 is de 5% ondergrens (rekenwaarde) van de totale verdeling van gemeten sterktefactoren. De gemiddelde sterktefactor ligt ruim boven de 2. Deze rekenwaarde mag toegepast worden op elk type getijdenzand, ongeacht de dikte van het getijdenzandpakket.

Omdat een veilige rekenwaarde van de sterktefactor is voorgeschreven, past de aanpak binnen de toepassing als beslisregel, dus voor het identificeren van evident veilige pipinglocaties. Hoewel toepassing van een dergelijke sterktefactor tot een reëlere inschatting van de overstromingskans door piping in het getijdengebied zal leiden, heeft de voorgestelde veilige rekenwaarde geen eenduidige relatie met de daadwerkelijke overstromingskans. Daarvoor zouden de onzekerheden rondom de sterktefactor expliciet betrokken moeten worden in de analyse en zou de sterktefactor op termijn als aanvullende parameter moeten worden betrokken in een nieuwe kalibratiestudie.

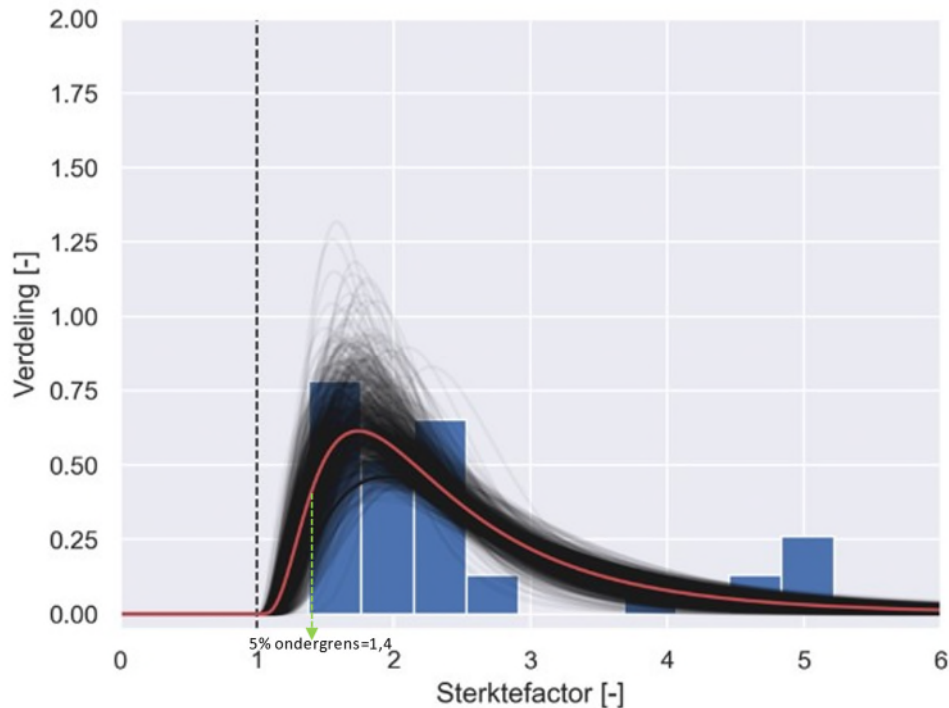
Desondanks kan de voorgeschreven rekenwaarde van de sterktefactor binnen (semi)probabilistische pipinganalyses worden gebruikt om te beoordelen of de faalkans voldoende klein is. De sterktefactor wordt meegenomen als nominale waarde, zonder spreiding. In ontwerpprojecten kan de sterktefactor worden gebruikt om een voldoende veilig ontwerp op te stellen. In vergelijking met de huidige praktijk zal dat tot een scherpere beoordeling en een optimalisatie van het ontwerp leiden.

De toepassingsvoorwaarde van de rekenregel van Sellmeijer ten aanzien van de relatieve dichtheid (>50%) blijft van kracht. Alle pipingproeven die in het Hedwigeproject zijn uitgevoerd hebben een relatieve dichtheid groter dan 50%.

Er is geen ondergrens voor de waarde van de d_{70} . In de proevenserie is gewerkt met zand waarvan de d_{70} veelal lager en de uniformiteit (Cu-waarde) juist hoger ligt dan de range waarop de oorspronkelijke rekenregel is geijkt (d_{70} : 150-430 μm ; Cu:1,5-2,5). Dit maakt toepassing van de beslisregel dan ook beter geschikt voor fijnere getijdenzanden.

6.3 Veilige rekenwaarde sterktefactor

De rekenwaarde van de sterktefactor betreft een ondergrenswaarde op basis van de set kleine schaal pipingproeven uitgevoerd binnen het Hedwigeproject. Hierbij is een lognormale verdeling gefit en zijn aanvullende statistische berekeningen uitgevoerd (Figuur 6-1).



Figuur 6-1: Lognormale verdelingen door de data heen. De rode lijn geeft de beste fit (MLE=Maximum Likelihood Estimation). De zwarte lijnen geven alle mogelijke uitkomsten op basis van de onzekerheid in het model.

Het betreft een rekenwaarde die op basis van nader onderzoek mogelijk verhoogd zou kunnen worden. De rekenwaarde omvat geen invloed van anisotropie, meerlaagsheid en 3D-effecten. Deze moeten bij een beoordeling apart meegenomen worden. De afleiding van de rekenwaarde wordt in Bijlage 1 nader toegelicht. Een rekenwaarde van 1,4 [-] wordt als veilig beschouwd vanwege de hieronder genoemde redenen.

- Zowel door Deltares als door Fugro zijn statistische analyses uitgevoerd. Deltares heeft onder andere een analyse met probability density functions (PDF) uitgevoerd, waarbij de PDF met de beste fit is gebruikt voor verdere analyses (zie voor achtergronden Mavrtsakis, 2022). Deltares en Fugro hebben daarnaast de gebruikelijke formules ingezet (Eurocode7) voor het bepalen van karakteristieke waarden uit datasets, waarbij gewerkt is met een verschoven lognormale verdeling (zie voor meer details memo's 1220-164143.M39 v1.0 d.d. 22-10-2022 en 11204565-006-BGS-0003). Uit beide studies volgt dat in de meest conservatieve aanpak en gebruik makend van zowel de kleine als de grote schaalproeven de 5% ondergrenswaarde 1,4 bedraagt. Hierbij wordt opgemerkt dat de kleine schaalproeven gehomogeniseerd zijn aangebracht, terwijl in het veld heterogeniteit aanwezig is (kleilaagjes) en de sterktefactor in het veld daarom gemiddeld hoger zal zijn. Dit sluit aan bij de resultaten van de grote schaalproeven, waar in

natuurlijk afgezet getijdenzand, de sterktefactor bepaald is op $2,1 \pm 0,7$ voor beide Hedwigeproeven en minimaal $3,9 \pm 1,3$ is voor de proef langs de Vijfhuisterdijk in Friesland. De ondergrens van deze ranges zijn representatief voor de situatie met een 3D-stromingssituatie, zoals bij de proeven het geval was, en de bovengrens voor de situatie met een 2D stromingssituatie waarvoor de rekenregel van Sellmeijer is bedoeld. Of er sprake is van een 2D of 3D stromingsconfiguratie heeft dus een groot effect; onderzoek naar dit aspect vormt dan ook een belangrijke aanbeveling voor vervolgonderzoek, zie §7.3.3. Een waarde van 1,4 sluit dus goed aan bij de ondergrens van de sterktefactor zoals die is bepaald op basis van de grootschalige pipingproeven in de Hedwigepolder. Tijdens deze proeven was uiteindelijk sprake van een volledige 3D-stromingssituatie met concentratie naar één dominante pipe.

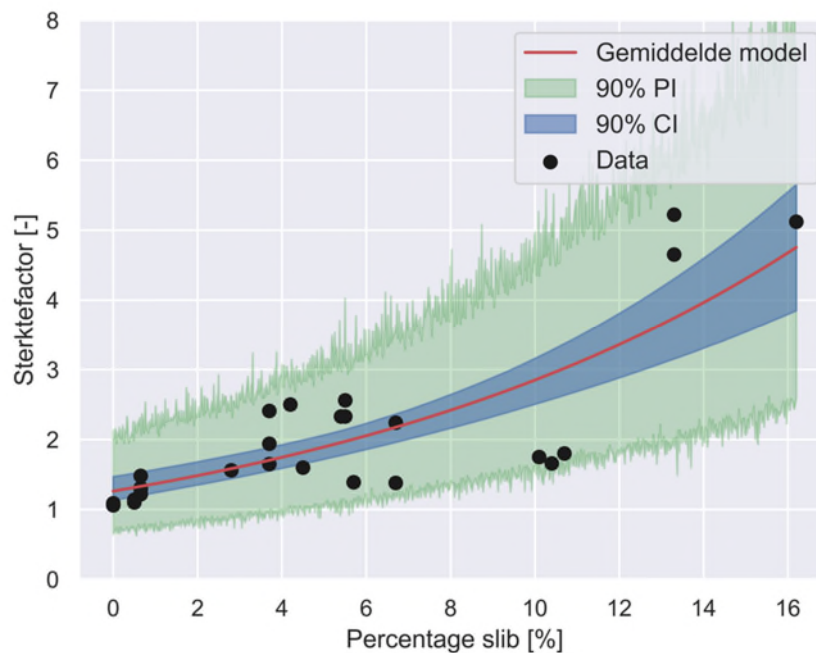
- Als de dataset niet alleen als puntdata beschouwd wordt, maar als een uitmiddeling van regionale variatie neemt de 5% ondergrenswaarde toe tot ruim boven de 1,4 (1,7). Meer analyses zijn nodig om te zien of regionale uitmiddeling volledig toegepast mag worden, maar regionale uitmiddeling zal ongetwijfeld een rol spelen en de waarde van 1,4 hoger kunnen laten uitpakken. Ook dit geeft aan dat een waarde van 1,4 een conservatieve 5% ondergrenswaarde vormt die na aanvullend onderzoek wellicht verhoogd kan worden.
- Op basis van de proefresultaten volgt een positief verband tussen het slibpercentage in het getijdenzand (fractie $\leq 16 \mu\text{m}$) en de sterktefactor, zie paragraaf 6.4 en Figuur 6-2. Hierbij zijn bij slibpercentages van ca. 6-8% fors hogere sterktefactoren bepaald. De sterktefactor is vooralsnog niet afhankelijk gesteld van het slibpercentage, de resultaten van de kleine schaalproeven zijn als één dataset beschouwd waarbij de relatief hoge sterktefactoren juist bijdragen aan een relatief grote spreiding.

De aanpak kan direct worden toegepast in beoordelings- en versterkingsprojecten. De impact op basis van een factor 1,4 is fors, uit impactanalyses volgt een scopereductie van ca. 70% op piping in het getijdengebied. De huidige dataset kan in de toekomst worden uitgebreid op basis waarvan aanscherping van de veilige waarde eventueel beter kan worden onderbouwd.

De resultaten van alle pipingproeven op kleine, medium en grote schaal zijn gedetailleerd beschreven in het 'Analyserapport schaalproeven en sterktefactor' (kenmerk: 1220-164143.R07 v2.0 d.d. 1-5-2025). Het 'Analyserapport grootschalige pipingproeven Hedwigepolder' (kenmerk 1220-164143.R06 v2.0 d.d. 1-5-2023) gaat specifiek in op de grootschalige proeven, aanverwante analyses en de gevonden sterktefactor in het veld.

6.4 Voor de toekomst: probabilistische aanpak

Er lijkt een positief verband te zijn tussen het slibpercentage (fractie $\leq 16 \mu\text{m}$) en de sterktefactor op basis van een verkennende Bayesiaanse regressie-analyse (Figuur 6-2).



Figuur 6-2: Verkennende Bayesiaanse regressie. De datapunten rond 0-0.5% slib zijn afkomstig uit Van Beek et al. (2015), de overige datapunten betreffen de kleine schaalproeven op getijdenezand. PI=Predictie-interval; CI=Credible Interval.

Deze relatie sluit aan bij de redeneerlijn dat bij een toenemend percentage fijne fractie de weerstand tegen piping toeneemt als gevolg van een betere inbedding van de zandkorrels en grotere cohesie bij toenemend slib en daarmee lutumpercentage. De gevonden relatie is significant en resulteert met name bij hogere slibpercentages vanaf ca. 6-8% in fors hogere sterktefactoren dan 1,4, waarbij de onzekerheid nog wel relatief groot is. Met verdere analyse en onderzoek (aanvullende proeven, waardoor de bandbreedte zal afnemen) is een aanpak denkbaar waarbij de sterktefactor afhankelijk kan worden gesteld van een lokaal te bepalen percentage slibfractie en dus probabilistisch kan worden meegenomen. Dit past binnen de toepassing van probabilistische analyses waarbij onzekerheden expliciet worden meegenomen op weg naar een reële inschatting van de faalkans. Deze aanpak wordt vooralsnog echter afgeraden omdat er ook andere onzekerheden spelen die (deels) afgedekt dienen te worden. Deze onzekerheden zijn:

- Weerstand in opbarstkanaal bij fijn materiaal. 0,3d-regel mogelijk te optimistisch; veldmetingen in Hedwigepolder wijzen op 0,2-0,25d.
- 3D-stromingseffecten die zorgen voor een hogere belasting (ca. factor 2) in relatie tot de rekenregel van Sellmeijer die uitgaat van een 2D-stromingsconfiguratie. Ook de invloed van fines op het verschil tussen 2D/3D-situatie is vooralsnog onbekend.
- Nauwkeurige vaststelling van het pipeniveau. Deze zou zich dikwijls dieper kunnen instellen, zoals bij de proeven in de Hedwigepolder, maar dat zou vaak gunstig(er)

uitpakken vanwege geringere dikte van het zandpakket en doorgaans grovere korrels op lager niveau bij een geulopvulling. Zie ook §7.2.

- Onzekerheden rondom de proefuitvoering van de kleine schaalproeven:
 - o proefmethode (met name inbouwen; lage reproduceerbaarheid);
 - o doorlatendheidsbepaling in proefbak en met doorstroomproef inclusief mogelijke effecten van gelaagdheid en niet uniforme stroming door monster.

7. Overwegingen en aanbevelingen

7.1 Toepassing sterktefactor

In gebieden met getijdenzand spelen meer aspecten die tezamen kunnen resulteren in nog lagere faalkansen voor piping in getijdenzand. Denk hierbij aan aspecten als tijdsafhankelijkheid van de belasting in relatie tot de pipegroeisnelheid en het meenemen van meerlaagsheid en anisotropie van het zandpakket. Het onderzoek piping in getijdenzand heeft zich gericht op de bepaling van de extra sterkte ten gevolge van de fijne fractie in het getijdenzand op de weerstand tegen terugschrijdende erosie. De extra sterkte komt tot uitdrukking in de eerder genoemde factor, het gunstige effect van de overige aspecten zit niet in de rekenwaarde van 1,4 verdisconteerd.

Ten aanzien van de toepassing van de sterktefactor wordt daarom het volgende opgemerkt:

- De sterktefactor is aanvullend op het veelal gunstige effect van een meerlaagse en anisotrope bodemopbouw van het getijdenzand. Getijdenzanden kenmerken zich door relatief grote doorlatendheidscontrasten tussen en binnen onderscheidende zandige lagen. Het meenemen van een meerlaagse en anisotrope bodemopbouw kan reeds een forse aanvullende optimalisatie inhouden.
- De sterktefactor is aanvullend op het gunstige effect van tijdsafhankelijkheid. Zowel de pipingproeven als het DgFlow model zijn stationair uitgevoerd waarbij de belasting incrementeel is verhoogd tot het kritiek verval werd gevonden. Met name in getijdengebieden met een veelal storm-gedomineerde belasting en relatief grote stromingsweerstand in de ondergrond kunnen tijdsafhankelijke analyses een forse optimalisatie inhouden. De pipegroeisnelheid in beide grootschalige pipingproeven in de Hedwigepolder lag rond 0,2 mm/s langs het meanderende pad van de pipe en 0,12 mm/s over de afstand loodrecht tussen uittredepunt en infiltratiebuizen / intredepunt. Deze waarden sluiten goed bij de recente resultaten van Pol (2022) en bij eerdere experimenten (Pol, 2022; zijn Figuur 4.11). Deze gevonden groeisnelheden liggen ruim (factor 10-20) onder de 2 mm/s zoals deze binnen een eenvoudige tijdsafhankelijke beoordeling wordt aangenomen. Bij 0,2 mm/s zou een pipe er ca. 3 dagen over doen om over een kwelweglengte van 50 m te groeien. Gezien de relatief korte (piek)belastingduur in gebieden met getijdenzand direct onder de waterkering lijkt hier voldoende tijd aanwezig om (nood)maatregelen te treffen na het observeren van een zandmeevoerende wel. Voorwaarde voor toepassing in de praktijk blijft een lastige, omdat historische zandmeevoerende wellen op de locatie moeten zijn uitgesloten. Ook rondom het eventuele herstelvermogen van een pipe is nog veel onduidelijk.
- De sterktefactor wordt toegepast op de uitkomst van de rekenregel van Sellmeijer, dat uitgaat van een 2D-pipingsituatie. De invloed van 3D-grondwaterstroming zit hier dus niet in verwerkt en dient apart beschouwd te worden omdat hiermee de belasting op de pipe zal toenemen resulterend in een lager kritiek verval dan berekend met het 2D Sellmeijermodel. Nader onderzoek naar dit aspect is nodig (zie ook §7.3.3).

- De sterktefactor vormt een veilige waarde op basis van de schaalproeven en is de rekenwaarde (5% ondergrens) van de totale dataset aan gevonden sterktefactoren. De gemiddelde sterktefactor ligt ruim boven de 2. Dit is bevestigd door de grootschalige pipingproeven in de Hedwigepolder en langs de Vijfhuisterdijk waarin grotere sterktes zijn gevonden. Het aanscherpen van de sterktefactor op basis van pipingproeven op lokaal materiaal wordt binnen reguliere beoordelings- en versterkingsprojecten niet haalbaar geacht. Naast praktische overwegingen vanuit planning en budget in relatie tot het aantal proeven en doorlooptijd, zou ook meer fundamenteel onderzoek uitgevoerd kunnen worden naar de proefuitvoering (o.a. reproduceerbaarheid), de voorspellende kracht van het Sellmeijermodel voor niet-homogeen zandmateriaal en de relatieve bijdrage van cohesie en inbedding aan de extra sterkte ten gevolge van de fijne fractie in het zandmateriaal.

7.2 Bepalen pipeniveau

Bij de grootschalige pipingproeven in de Hedwigepolder is het lastig gebleken om voorafgaand aan de proeven het precieze pipeniveau te voorspellen.

Ondanks grondig vooronderzoek op basis van geotechnisch veld- en labonderzoek en visuele waarnemingen in proefkuilen was het pipeniveau vooraf op een hoger niveau (ca. 0,5 m hoger) ingeschat. De relatief lage grondwaterstand en grote variatie in de samenstelling van het top van het getijdenzand in het (brede) onderzoeksgebied lagen hieraan ten grondslag. Tijdens het blootleggen van de pipes in een CSI-fase en na afspoeling van een profielwand kon de diepere ligging van de pipe duidelijk worden verklaard door de positie van laagjes met verhoogde percentages silt en lutum. Op basis van de korrelverdeling uit het vooronderzoek is de grond boven het pipeniveau niet geclassificeerd als klei (lutumpercentage max. 5,8%). Terwijl na de proef het dak van de pipe nog juist als klei is geclassificeerd (8% lutum) Ook op basis van de HPT-(A)MPT[®] sonderingen, die direct na afloop van de proef zijn gezet in het inmiddels verzadigde pakket, is de ligging van de pipe te verklaren in een traject met toenemende conusweerstand en doorlatendheid. De top van het getijdenpakket waaronder de pipe uiteindelijk horizontaal is gaan groeien had een 4 tot a. 8 maal lagere doorlatendheid dan de onderliggende zandlagen. Tijdens proeven is eerst verticale piping opgetreden door ca. 0,5 m van de top van het getijdenpakket. Dit resulteerde in een verticaal uittredekanal, waarna de pipe horizontaal verder is gegroeid.

In de praktijk dient men zich bewust te zijn van dit aspect waarbij de onderkant van de deklaag (lees: pipeniveau) niet altijd eenduidig is te voorspellen. Dit speelt met name in getijdengebieden waar laagjes met verhoogde silt en lutumpercentages in de top van het zandige pakket veel voorkomen.

7.3 Aanbevelingen en vervolgstappen

7.3.1 Nadere uitwerking sterktefactor voor getijdenafzettingen

Zoals eerder benoemd volgt vanuit de fysica en de pipingexperimenten op getijdenzand een positieve relatie tussen het slibpercentage (0-16 μm) en de sterktefactor. Dit verband is significant en resulteert met name bij hogere slibpercentages vanaf ca. 8-10% in fors hogere sterktefactoren. Wanneer op basis van aanvullende pipingproeven de onzekerheid rondom de relatie tussen fijne fractie en extra sterkte verder kan worden verkleind, is een aanpak, waarbij de sterktefactor afhankelijk kan worden gesteld aan een lokaal te bepalen percentage fijne fractie, haalbaar. Dit zal tot aanscherping van de sterktefactor kunnen leiden en het bijvoorbeeld mogelijk maken deze probabilistisch mee te nemen in een faalkansbenadering.

Daarnaast wordt aanbevolen om op termijn de sterktefactor als aanvullende parameter mee te nemen in een nieuwe kalibratiestudie rondom piping.

7.3.2 Extra sterkte: doorvertaling naar rivierengebied en Limburg

In het Hedwigeproject is aangetoond dat getijdenzand meer weerstand biedt tegen piping dan homogeen (rivier)zand waarop de rekenregel van Sellmeijer is geijkt. De aandacht lag hierbij op de extra sterkte veroorzaakt door een gecombineerde invloed van cohesie en inbedding van zand in een fijnere korrelmatrix. Verwacht wordt dat rivierzand met een fijne fractie ook een verhoogde weerstand tegen piping heeft, dit volgt ook uit de gevonden relatie tussen extra weerstand en slib. Aanbevolen wordt om de bestaande dataset uit te breiden met pipingproeven op verschillende schalen met zand representatief voor het rivierengebied.

Naast een effectbepaling als gevolg van de uniformiteit van het zand door het meenemen van fines is het ook zinvol om het effect van de pakkingsdichtheid (RD) en bijmenging met grove korrels te onderzoeken. In de Schematiseringshandleiding Piping (RWS, 2021) wordt ook benoemd dat in de literatuur een aantal laboratoriumproeven beschikbaar zijn waaruit volgt dat grover materiaal meer sterkte heeft dan op basis van Sellmeijer kan worden verwacht.

Kortom, nader onderzoek zal zich kunnen richten op de invloed van de staarten van de korrelverdeling (buiten de zandfractie) en de pakking van natuurlijk afgezet zandig materiaal onder de Nederlandse dijken in het rivierengebied en Limburg.

7.3.3 2D / 3D stromingseffecten

Het Sellmeijer model gaat uit van een 2D-stromingssituatie in de ondergrond als gevolg van de uitstroomconfiguratie en/of het ontstaan van een patroon van pipes. In het geval van een geconcentreerde stromingssituatie naar een enkel uittredepunt en pipe ontstaat er lokaal een 3D gedomineerde stromingssituatie wat leidt tot een hogere belasting. Op basis van kleine schaalproeven volgt dat het kritiek verval gemiddeld een factor 2 lager is in geval van een 3D-stromingssituatie. Aanbevolen is om dit effect op verschillende schalen te onderzoeken,

dus ook in medium en grootschalige veldproeven. 3D-stromingssituaties kunnen in de praktijk ook voorkomen, zoals bij de pipingproeven in de Hedwigepolder maar ook bij bijvoorbeeld kopsloten en lokale zwakke plekken in de deklaag.

7.3.4 Modelvorming ten behoeve van pipinganalyses

De bestaande regel van Sellmeijer is als uitgangspunt gebruikt voor de aanpak binnen het Hedwigeproject. Aanbevolen wordt om ook andere benaderingen te overwegen waarmee het risico op piping mogelijk beter wordt voorspeld. De Sellmeijer regel lijkt minder geschikt voor bodems die afwijken van het homogene rivierzand dat is gebruikt in de proeven waarop het model is gefit. Echter biedt het Sellmeijer model wel mogelijkheden tot aanpassing voor deze zanden, omdat de pipevorming op dezelfde manier plaatsvindt als in proeven met uniform zand. Ook met het oog op de mogelijk grote gevolgen van 2D/3D stromingseffecten kan er minder vertrouwen ontstaan in de vigerende rekenregel.

8. Referenties

- Dalrymple, R.W., 1992. Tidal depositional systems, Reprint Series 4: 195-218. Geological Association of Canada, St. John's, Newfoundland.
- Deltares, 2018. Fenomenologische beschrijving, faalmechanismen WBI. Deltares rapport 11200574-007-GEO-0005-ga. Opdrachtgever: RWS WV.
- Deltares, 2020. Gebiedsspecifieke Faalpaden voor Piping. Deltares rapport 11205284-001-ZWS-0002. Opdrachtgever: RWS WV.
- Deltares, 2022. Statistical analysis of piping tests. Deltares-memo 11204565-006-BGS-0003.
- Finotello, A., D'Alpaos, A., Bogoni, M., Ghinassi, M., Lanzoni, S., 2020. Remotely-sensed planform morphologies reveal fluvial and tidal nature of meandering channels. Scientific Reports, 10 (1), 54. 10.1038/s41598-019-56992-w.
- Förster, U., Van den Ham, G., Calle, E., Kruse, G. 2012. Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen. Kenmerk 12021230003-GEO-0002. Deltares, Delft.
- Fugro, Deltares en WSHD. (2020). Onderzoeksproject Anisotropie, eindrapportage. Kenmerk: 1217-0051-000.R17 d.d. 6-11-2020.
- Gouw, M.J.P., Hijma, M.P., 2022. From apex to shoreline: fluvio-deltaic architecture for the Holocene Rhine–Meuse delta, the Netherlands. Earth Surf. Dynam., 10 (1), 43-64. 10.5194/esurf-10-43-2022.
- Hijma, M.P., Oost, A.P., 2018. Getijdenafzettingen en piping: een quickscan - Karakterisatie, inventarisatie en demonstratie, Deltares rapport 11202560-012-GEO-0001.
- Hijma, M.P., 2019. KvK Piping deelproject 011: Getijdenafzettingen en piping (2) - Proeven, begrijpen, toepassen, Deltares rapport 11203719-011-GEO-0001.
- Pol, J.C., 2022. Time-dependent development of Backward Erosion Piping. Ph.D.-thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Projectteam Hedwigepolder, 2023a. Piping in getijdenzand – Hedwigeproject. Analyse kleine en medium schaalproeven. 1120-164143.R7 (Fugro-rapportnummer).
- Projectteam Hedwigepolder, 2023b. Piping in getijdenzand - Hedwigeproject. Analyserapport grootschalige pipingproeven Hedwigepolder . 1120-164143.R6 (Fugro-rapportnummer).
- Vos, P.C., Bazelmans, J., Weerts, H.J.T., Van der Meulen, M.J., 2011. Atlas van Nederland in het Holoceen, RCE, TNO en Deltares.
- RWS, 2021. Schematiseringhandleiding piping. 28 mei 2021. WBI 2017.
- TAW, 1999. Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen. Rijkswaterstaat DWW d.d. 1-3-1999.

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.

WBI 2017 Bijlage III Sterkte en Veiligheid. Regeling veiligheid primaire waterkeringen. Ministerie van Infrastructuur en Milieu d.d. 29-1-2019.

Bijlage 1 – Achtergronden bij de sterktefactor

De beslisregel voor getijden(geul)zand omvat een sterktefactor van 1,4. Dit is de rekenwaarde (5% ondergrens) van de dataset aan gevonden sterktefactoren. Hieronder wordt de afleiding, inclusief de bijbehorende onzekerheden, van deze rekenwaarde nader toegelicht en wordt expliciet gemaakt welke aspecten verwerkt zitten in deze sterktefactor. Dit gebeurt middels het beantwoorden van vragen die bij gebruikers (kunnen) leven. Hierbij wordt steeds verwezen naar passages in achtergrondrapporten die geraadpleegd kunnen worden voor nog meer aanvullende informatie.

Wat is de sterktefactor precies?

De sterktefactor geeft aan hoeveel keer groter het gemeten kritieke verval tijdens een schaalproef is ten opzichte van het berekende kritieke verval middels de rekenregel van Sellmeijer. Deze sterktefactor heeft betrekking op het effect van fijn materiaal in het zandpakket op de weerstand tegen terugschrijdende erosie. Het fijne materiaal zorgt voor meer cohesie tussen de korrels en een betere inbedding van deze korrels in de korrelstructuur. Als de rekenregel een sterktefactor van 10 cm berekend en er is een kritiek verval gemeten van 25 cm, dan is de sterktefactor 2,5. De sterktefactor wordt nader toegelicht in §4.1 van het rapport over de kleine en medium schaalproeven (Projectteam Hedwigepolder, 2023a).

Hoe is de rekenwaarde van de sterktefactor voor de praktijk bepaald?

Voor het bepalen van de rekenwaarde is gebruik gemaakt van de gehele database aan sterktefactoren, dus met de resultaten van alle geslaagde kleine, medium en veldschaalproeven. Uit deze database is de 5% ondergrens statistisch bepaald op 1,4 en gebruikt als rekenwaarde. Achtergronden bij de statistische bepalingen zijn te vinden in Deltares (2022). Aangezien de database vooral uit kleine schaalproeven bestaat, is de rekenwaarde vooral op deze proeven gebaseerd. De resultaten van de grote veldproeven sluiten hier echter goed bij en valideren de uitkomsten van de kleine schaalproeven. De gemiddelde en mediane sterktefactor liggen met waardes van 2,7 en 2,3 ruim boven de twee.

Wat is de fysische betekenis van de rekenwaarde?

De rekenwaarde is een statistisch afgeleide 5% ondergrenswaarde en heeft geen directe relatie met een bepaalde parameter.

De beslisregel is gebaseerd op labproeven en drie proeven in het veld. Is de dataset dan wel representatief voor heel Nederland en de rest van de wereld?

Jazeker. De labproeven zijn zo ingestoken dat de proeven een breed palet aan verschillende slibpercentages bestrijken, de drie veldproeven waren vooral bedoeld om de inzichten uit de labproeven te valideren. De afgeleide sterktefactor is daarom niet locatie-afhankelijk, maar geldig voor alle typen getijdenzand. De sterktefactor kan niet zomaar toegepast worden op rivierzand met een fijne fractie, daar is nog aanvullend onderzoek voor nodig.

Waarom niet gebruik maken van de gevonden relatie tussen het percentage slib en de sterktefactor?

Er is inderdaad een statistisch significante relatie gevonden tussen het percentage slib en de sterktefactor: hoe meer slib, hoe hoger de sterktefactor. Het inzetten van deze relatie wordt voornamelijk echter afgeraden omdat er ook andere onzekerheden spelen die eerst nog (deels) afgedekt dienen te worden (zie ook §6.4 van het onderhavige rapport). Daarnaast is de huidige dataset voor situaties met slibpercentages >7% nog beperkt met 6 resultaten met relatief veel spreiding.

Wat zijn onzekerheden bij het bepalen van het berekende kritieke verval en hoe werkt dit door in de sterktefactor?

Afgezien van de doorlatendheid zijn alle invoerparameters voor de rekenregel goed bekend tijdens de kleine en medium schaalproeven. De doorlatendheid is steeds met twee methodes bepaald. Bij de eerste methode wordt het te gebruiken zand ingebouwd in een kolom en wordt er een waterstroom op gang gebracht, dit wordt een doorstroomproef genoemd. Bij verschillende dichtheden wordt met waterdruksensoren de waterdrukgradiënt bepaald en het debiet gemeten. Op deze manier kan de doorlatendheid voor verschillende dichtheden bepaald worden. Tijdens de daadwerkelijk proef wordt ook de dichtheid bepaald en kan de bijbehorende doorlatendheid opgezocht worden in de gevonden relatie dichtheid-doorlatendheid bij de kolomproef. Bij de tweede methode wordt tijdens de schaalproef zelf de doorlatendheid bepaald middels het meten van debieten en de waterdrukgradiënten volgens de Wet van Darcy. Idealiter zijn beide doorlatendheden identiek, maar in de praktijk kan er een aanzienlijk, niet-systematisch, verschil tussen zitten. De oorzaak hiervoor wordt goed gezocht in het feit dat er meer heterogeniteit aanwezig is en er meer migratie van fijn materiaal optreedt tijdens de schaalproef dan tijdens de doorstroomproef. De bulkdoorlatendheid die uiteindelijk in de rekenregel is ingevuld is veelal het gemiddelde van beide doorlatendheden. In het rapport wordt per schaalproef aangegeven op welke manier de doorlatendheid is bepaald (zie Factsheets in Projectteam Hedwigepolder, 2023a; zie ook 3.1.3 in hetzelfde rapport). Aangezien het verschil tussen beide methodes niet-systematisch is en de gemiddelde doorlatendheid meegenomen wordt, mag aangenomen worden dat in een dataset van circa 30 proeven de onzekerheid ook uitmiddelt en geen invloed heeft op de gemiddelde sterktefactor of de rekenwaarde. Het is wel één van de oorzaken van de spreiding in de resultaten (zie ook H5 in Projectteam Hedwigepolder, 2023a). In het veld is de doorlatendheid bepaald middels HPT-(A)MPT metingen, maar ook op basis van debieten en waterdrukgradiënten (zie Projectteam Hedwigepolder 2023b).

Hoe zit het met schaaffecten?

In het Sellmeijermodel is het kritiek verval lineair afhankelijk van de kritieke schuifspanning van de korrels op de bodem van de pipe en deze kritieke schuifspanning is niet schaalafhankelijk. De extra weerstand van getijdenzand tegen piping wordt naar verwachting voor een belangrijk deel veroorzaakt door een hogere kritieke schuifspanning van getijdenzand in vergelijking met homogeen rivierzand. De hogere schuifspanning is een gevolg van meer cohesie en inbedding van zandkorrels in

een fijne matrix. Dit zou betekenen dat de extra sterkte van het getijdenzand schaalafhankelijk is (zie ook §4.4 in Projectteam Hedwigepolder, 2023a).

De rekenregel is 2D, terwijl de schaalproeven 3D zijn. Hoe is hiervoor gecorrigeerd?

Onderzoek van Van Beek et al. (2015) laat zien dat het kritiek verval in kleine schaalproeven met een 3D-uitstroom gemiddeld een factor 2 lager ligt dan volgt uit de rekenregel van Sellmeijer. Tijdens het bepalen van de sterktefactor in het huidige project is hier rekening mee gehouden en wordt de uitkomst van de rekenregel eerst door twee gedeeld en dan pas vergeleken met het gemeten kritieke verval. De grootte van het 3D-effect tijdens de veldproeven is veel lastiger te bepalen. Tijdens de veldproeven in de Hedwigepolder was echter sprake van 3D-effecten met geconcentreerde stroming naar één dominante pipe, met meer belasting op de pipe dan volgt uit het 2D-rekenmodel. De gevonden sterktefactor van 1,4 wordt dan ook als een minimale sterktefactor beschouwd. Wanneer, zoals bij de kleine schaalproeven, gecorrigeerd zou worden voor het 3D-effect met een factor 2 zou de sterktefactor tijdens de Hedwigeproeven oplopen tot 2,8.

Belangrijk aandachtspunt hierbij is dat Van Beek et al. (2015) een gemiddelde factor van 2 vond, maar dat er wel spreiding aanwezig was rondom deze factor. Om hieruit volgende vraagtekens over de daadwerkelijke extra sterkte van getijdenzand weg te nemen, zijn de uitkomsten van de proeven op getijdenzand direct vergeleken met de uitkomsten van eerdere proeven op (gezeefd) rivierzand. Hieruit volgt dat de mediane sterktefactor van homogeen rivierzand bij een 3D-correctie met een factor 2 op 0,9 uitkomt en voor getijdenzand op 2,3 (zie §5.1 in Projectteam Hedwigepolder, 2023a). De mediaan van 0,9 laat zien dat een 3D-factor van 2 inderdaad een goede, zij het licht conservatieve, benadering is van de invloed van een 3D-configuratie op het kritieke verval op labschaal. Om een mediaan van 1,0 te krijgen zou een 3D-factor van 2,35 gebruikt moeten worden. De proeven op getijdenzand laten dus duidelijk hogere sterktefactoren zien, de mediaan ligt een factor 1,8 hoger dan rivierzand uit het veld. Deze extra sterkte is onafhankelijk van welk 3D-effect dan ook, omdat deze voor alle kleine schaalproeven gelijk is. Dit laat zien dat de extra sterkte in getijdenzand niet een artefact is van het toepassen van een factor 2 voor het 3D-effect, maar dat getijdenzand echt een stuk sterker is dan zand zonder of met een geringe fijne fractie.

Maar hoe zit het dan in de praktijk met het 3D-effect?

De rekenwaarde van 1,4 heeft geen relatie meer tot het 3D-effect, en omvat alleen de extra sterkte van getijdenzand door de aanwezigheid van fijn materiaal. Er is bij het bepalen van de sterktefactoren tijdens het Hedwigeproject wel een correctie voor het 3D-effect uitgevoerd voor de kleine en medium schaalproeven, maar deze is gebaseerd op eerder onderzoek, waardoor deze goed bekend is. In het veld is dit effect echter minder goed bekend en moet steeds apart beschouwd worden. Het 3D-effect in het veld is een apart onderzoeksspoor en vraagt veel aandacht de komende jaren. De invloed hiervan geldt echter voor het gehele pipingspoor, niet specifiek voor de sterktefactor van getijdenzand.

Bevat de sterktefactor wel de invloed van anisotropie en meerlaagsheid?

Nee, de sterktefactor omvat alleen de invloed van fijn materiaal op de schuifspanning, oftewel hoe snel de korrels in beweging komen. Zoals eerder aangegeven bestaat de database van sterktefactoren vooral uit kleine schaalproeven. Deze zijn homogeen aangebracht en anisotropie en meerlaagsheid speelden geen rol. Tijdens de veldproeven natuurlijk wel, omdat de proeven zijn uitgevoerd op natuurlijke afzettingen. Daar is de mate van de doorlatendheidsvariatie tussen (meerlaagsheid) en binnen (anisotropie) bodemlagen bepaald op basis van HPT-(A)MPT metingen. Deze complexe ondergrondopbouw is in D-Geo Flow geschematiseerd voor de pre- en postdicties van het kritieke verval.

Kan de sterktefactor in het veld echt nooit lager dan de rekenwaarde van 1,4 zijn?

De rekenwaarde van 1,4 is statistisch afgeleid uit de database aan bepaalde sterktefactoren en betreft de 5% ondergrens. Statistisch gezien is er dus een kans op lagere waarden, vertaald naar de praktijk is een lagere waarde echter onwaarschijnlijk. De meeste proeven in de database zijn kleine schaalproeven, uitgevoerd op zo homogeen mogelijk aangebracht getijdensand. In het veld zal het getijdensand altijd heterogener aanwezig zijn, waardoor er een doolhofstructuur ontstaat die het getijdensand nog wat sterker zal maken. Daarnaast verwachten we dat in het veld biologische cohesie ook nog een rol speelt. Tijdens de schaalproeven is het zand eerst gedroogd geweest, waardoor biofilms niet meer aanwezig zijn. Deze biofilms zorgen voor cohesie en verhogen de schuifspanning, waardoor de sterktefactor omhoog gaat. Er zijn feitelijk geen situaties denkbaar voor getijdensand in het veld, waarvoor een sterktefactor lager dan de rekenwaarde van 1,4 verwacht kan worden.

Mag de sterktefactor dus altijd bovenop andere effecten worden toegepast?

Ja. De sterktefactor geldt puur alleen voor de extra sterkte van getijdensand door invloed van fijn materiaal op de schuifspanning en staat helemaal los van alle andere, positieve en negatieve, effecten. Die moeten allemaal apart beschouwd en meegenomen worden bij een integrale beoordeling van de veiligheid.

Wanneer en waar mag de sterktefactor worden toegepast?

De beslisregel mogen toegepast worden op getijdensand (zie H6 van dit rapport). Hierbij gelden bestaande regels voor de relatieve dichtheid (minimaal 50%). De bestaande ondergrens van 150 μm voor de D70 in de rekenregel van Sellmeijer komt wel te vervallen, omdat ook kleinere korrelgroottes, meer representatief voor getijdensand, in dit onderzoek zijn meegenomen.