



Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing

WBI 2017

Datum	28 november 2019
Status	Definitief



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

In de release notes van 28 november op de helpdeskwater staan de wijzigingen vermeld van deze schematiseringshandleiding.

Colofon

Uitgegeven door	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Informatie	Helpdesk Water, www.helpdeskwater.nl
Contact	helpdeskwater@rws.nl
Uitgevoerd door	Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving
Datum	28 november 2019
Status	Definitief
Versienummer	2.0

Inhoud

1	Inleiding Schematiseringshandleidingen en WBI 9
1.1	Inleiding Schematiseringshandleiding generiek 9
1.2	Inleiding Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing 12
1.3	Uitgangspunten 12
1.4	Opbouw 12
2	Stappenschema 14
2.1	Inleiding 14
2.2	Stappenschema 14
3	Belastinggevallen 17
3.1	Inleiding 17
3.2	Morfodynamische processen 17
3.3	Waterstandsverloop 17
4	Inventarisatie gegevens 19
5	Vakindeling 21
5.1	Inleiding 21
5.2	Processtappen vakindeling 21
5.3	Overige informatie 22
6	Schematisering per vak 23
6.1	Grondopbouw 23
6.1.1	Inleiding 23
6.1.2	Dijksmateriaal 24
6.1.3	Stochastische Ondergrondschematisering (SOS) 24
6.1.4	Lokaal grondonderzoek 26
6.2	Geometrie 27
6.2.1	Inleiding 27
6.2.2	Geometrie 28
6.2.3	Beweeglijkheid van het onderwaterprofiel 28
6.2.4	Zie paragraaf 7.1 voor bepaling van de parameter die de beweeglijkheid van de vooroever in de eenvoudige en gedetailleerde toets representeert. Vooroeverbetasting 29
6.2.5	Ontgrondingskuilen in geulbodem 31
7	Parameters 33
7.1	Geometrische parameters 33
7.1.1	Methoden bepaling geometrische parameters onderwatertalud 33
7.1.2	Teen onderwatertalud van meest ongunstige geometrie in beoordelingsperiode 33
7.1.3	Geulrand van meest ongunstige geometrie in beoordelingsperiode 34
7.1.4	Laag Laagwaterstand LLWS/OLW/OLR 34
7.1.5	Equivalente oevermigratiesnelheid V_{lokaal} 34
7.1.6	Lengte vooroeverbetasting vanaf buitenteen dijk 34
7.1.7	Begin- en eindpunt vooroeverbetasting vanuit geul 35
7.2	Grondlagen en eigenschappen per grondlaag 35
7.2.1	Onder- en bovengrens van zand- en siltlagen in onderwatertalud 35
7.2.2	Vergelijken lokaal grondonderzoek met SOS 37
7.2.3	Eigenschappen per zandlaag 37
7.2.3.1	$F_{\text{cohesivelayers}}$ 37
7.2.3.2	State parameter Ψ 37
7.2.3.3	d_{50} 40

7.2.3.4	d_{15}	40
7.2.4	Equivalente parameters	40
7.2.4.1	Ψ_{5m}	40
7.2.4.2	$d_{50, \text{gemiddeld}}$	42
7.2.4.3	$d_{15, \text{gemiddeld}}$	42

8 Voorbeeld 45

8.1	Introductie	45
8.2	Belastinggevallen	45
8.3	Inventarisatie gegevens	45
8.4	Vakindeling	45
8.5	Eenvoudige toets	46
8.6	Gedetailleerde toets	48
8.7	Conclusies	52

A Literatuur 57

B Parameterlijst 59

B.1	Schematisering	59
B.2	Modelinvoer	59

C Rekenregels voor gedetailleerde toets op zettingsvloeiing 61

C.1	Stap A - Bepaal optredingskans zettingsvloeiing per ondergrondscenario $P(ZV S_i)$ voor het betreffende vak	61
C.2	Stap B - Bepaling optredingskans zettingsvloeiing voor alle grondopbouwscenario's $P(ZV)$	63
C.3	Stap C - Bepaal overschrijdingskans toelaatbare inscharingslengte gegeven een vloeiing $P(L > L_{\text{toelaatbaar}} ZV)$	63
C.4	Stap D - Bepaal de kans op overschrijding van toelaatbare inscharingslengte door een zettingsvloeiing per dijkvak per jaar $P(L > L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{vak}}$	65
C.5	Aandachtspunten en praktische tips	66

D Schema werkwijze beoordeling zettingsvloeiing 73

D.1	Toelichting op het schema werkwijze beoordeling	73
D.2	Schema werkwijze beoordeling Zettingsvloeiing voorland (VLZV)	74
D.3	Referenties bij het schema werkwijze beoordeling Zettingsvloeiing voorland (VLZV)	74
D.3.1	Activiteit 'data verzamelen'	74
D.3.2	Activiteit 'schematiseren'	74
D.3.3	Activiteit 'berekenen hydraulische belastingen'	75
D.3.4	Activiteit 'berekenen toetsoordeel'	75
D.3.5	Activiteit 'analyseren'	75
D.3.6	Toelichting bij de referenties	75

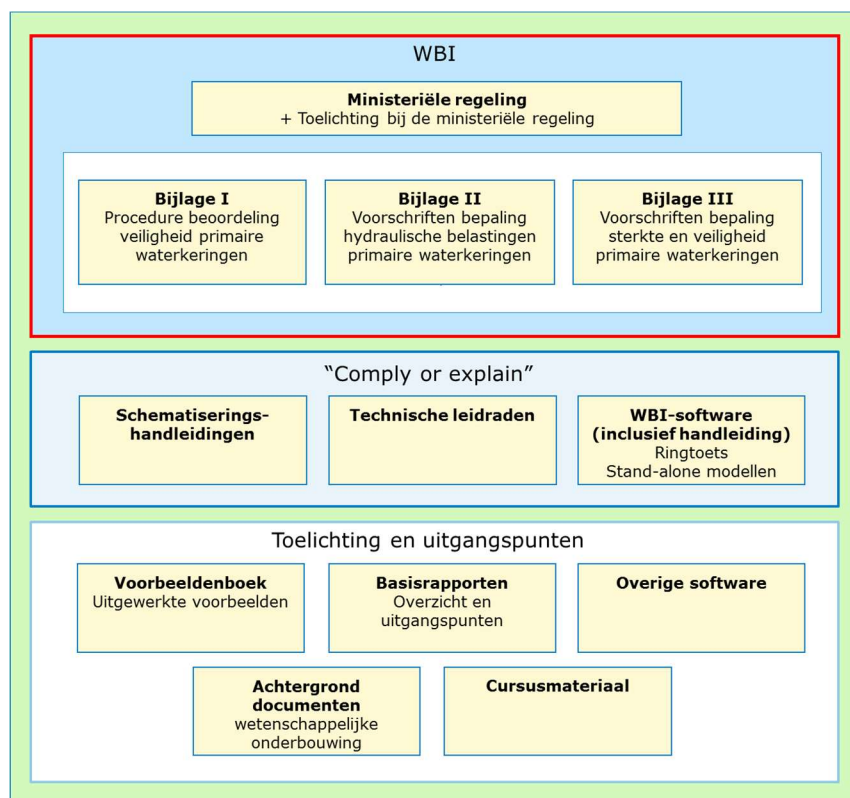
1 Inleiding Schematiseringshandleidingen en WBI

1.1 Inleiding Schematiseringshandleiding generiek

Deze schematiseringshandleiding is opgesteld in het kader van het Wettelijk Beoordelings-instrumentarium (hierna: WBI 2017 of WBI). Het WBI voor de beoordelingsronde 2017-2023 bestaat uit de ministeriële regeling en 3 bijlagen. Die drie bijlagen zullen verder worden aangeduid als:

- *WBI 2017 Bijlage I Procedure.*
- *WBI 2017 Bijlage II Hydraulische belastingen.*
- *WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid.*

Het WBI bevat de voorschriften voor het uitvoeren van de beoordeling. In deze voorschriften wordt verwezen naar een aantal documenten en applicaties die de beheerder *ondersteunen* bij het uitvoeren van de beoordeling, waaronder de schematiseringshandleidingen en de WBI software. Een overzicht van de structuur van het WBI en de daaraan gerelateerde documenten staat in Figuur 1. Binnen het rode kader de formele WBI documenten, daarbuiten de ondersteunende documenten en applicaties.



Figuur 1 Het WBI 2017 en daaraan gerelateerde documenten

WBI software

Er zijn meerdere 'WBI applicaties'. Ringtoets is feitelijk het 'beoordelings-platform' en staat daarom ook wel bekend als dé WBI software. De andere applicaties, waaronder de diverse Basismodules (zoals BM Gras Buitentalud, BM Asfalt en Steentoets) en D-Soilmodel maken echter ook nadrukkelijk deel uit van de WBI software-familie.

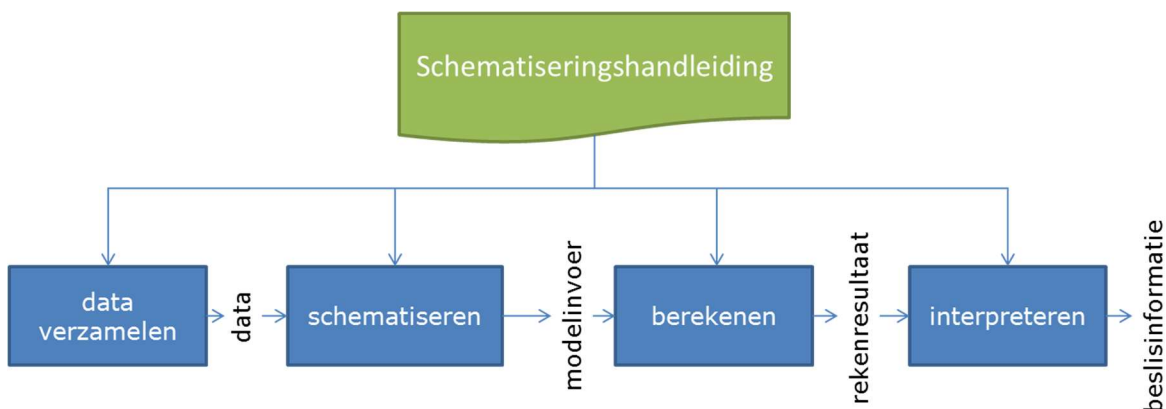
Ringtoets of Riskeer?

Ringtoets is de applicatie waarbinnen voor een aantal toetssporen de berekeningen en analyses kunnen worden uitgevoerd en de resultaten geassembleerd tot op het niveau van een oordeel

per traject. Ringtoets versie 18.1.1 blijft de versie die primair bedoeld is voor de eenvoudige en de gedetailleerde toetsingen. Vanaf november 2019 is ook Riskeer beschikbaar, een doorontwikkelde versie van Ringtoets. Er is bewust gekozen voor de naamswijziging om het verschil tussen de applicatie t.b.v. de beoordeling (eenvoudig, gedetailleerd conform de regeling) te scheiden van de applicatie die ook kan worden ingezet voor enkele specifieke Toetsen op Maat en verificatie van overstromingskansen bij het ontwerp. In Riskeer 19.1.1 zijn namelijk nieuwe functionaliteiten beschikbaar en is ook nieuwe kennis toegepast. Wanneer overigens in Riskeer 19.1.1 met dezelfde instellingen wordt gerekend als in Ringtoets 18.1.1 leidt dat tot hetzelfde resultaat.

Doel schematiseringshandleiding

Het uitvoeren van een toets (eenvoudige toets, gedetailleerde toets per vak of toets op maat) voor het beoordelen van primaire waterkeringen bestaat op hoofdlijnen uit vier activiteiten, zie Figuur 2. In een schematiseringshandleiding wordt, gegeven een rekenmethode of model, de samenhang aangegeven tussen deze vier activiteiten: welke data benodigd is, hoe moet worden geschematiseerd, welke software hiervoor beschikbaar is en in sommige gevallen hoe de resultaten kunnen worden geïnterpreteerd.



Figuur 2 Activiteiten verbonden met een toets

De activiteit schematiseren wordt hier gedefinieerd als het vertalen van de gegevens over de waterkering naar invoer voor de methode (meestal een rekenmodel al dan niet in software) waarmee de toets wordt uitgevoerd. De gegevens kunnen meetgegevens zijn uit het veld of het laboratorium, ontwerp- of revisietekeningen zijn, maar kunnen ook kennis en ervaring betreffen. Bij het schematiseren speelt de beschikbare hoeveelheid gegevens en de kwaliteit ervan een grote rol. Bij weinig gegevens is de schematisering grof of globaal en met een grote onzekerheid. Naarmate er meer en betere gegevens beschikbaar zijn, wordt de schematisering fijner en preciezer, wat zal leiden tot een betere inschatting van de overstromingskans. Vanzelfsprekend zit hier een optimum in, dat van geval tot geval verschilt. Meer gegevens is dus niet per definitie beter.

Faalmechanismen zijn vertaald in modellen. De meer complexe modellen zijn vervolgens weer in software gevat, omdat de berekeningen nu eenmaal niet meer op de achterkant van de sigarendoos kunnen worden gemaakt. Bij softwareontwikkeling worden keuzes gemaakt voor de (vrijheid van) invoer. Soms zijn modelparameters hard geprogrammeerd, in andere gevallen is het invoer gebruiker. De beschikbare software bepaalt dus in belangrijke mate de benodigde invoer. In algemene zin kunnen we wel stellen dat een schematisering bij een model óf applicatie hoort en niet bij een faalmechanisme. De faalmechanismen zijn beschreven in de [fenomenologische beschrijving WBI](https://www.helpdeskwater.nl/algemene-onderdelen/structuur-pagina/zoeken-site/@192499/fenomenologische/)¹. De beschikbare modellen en (bijbehorende) applicaties beschrijven soms maar een deel van het hierin beschreven faalspoor. In een aantal gevallen zijn er meerdere modellen beschikbaar en is het aan de gebruiker een keuze te maken.

Het doorlopen van de vier activiteiten uit figuur 2 is in veel gevallen een iteratief proces. Zeker als ervoor wordt gekozen om te starten met een grove schematisering. In de vierde activiteit

¹ <https://www.helpdeskwater.nl/algemene-onderdelen/structuur-pagina/zoeken-site/@192499/fenomenologische/>

wordt bekeken of door het inwinnen van extra gegevens en/of het verfijnen van de schematisering, het resultaat van de derde activiteiten kan worden aangescherpt. Het is uiteraard ook mogelijk om meteen te kiezen voor een gedetailleerde schematisering.

De schematiseringshandleiding geeft aanwijzingen voor het type en de benodigde hoeveelheid aan onderzoek om tot een goede schematisering te kunnen komen. Verder ondersteunt de schematiseringshandleiding gebruikers in het omzetten van (veld)gegevens naar de juiste rekenparameters en goede schematiseringen die in de toets kan worden toegepast. De wijze waarop gegevens ingewonnen moeten worden (bijvoorbeeld hoe veldonderzoek of laboratoriumonderzoek uitgevoerd wordt) wordt slechts summier behandeld.

De schematiseringshandleiding is geen wet. Het is een handleiding die de gebruiker er niet van ontslaat zelf na te denken. Als de lokale situatie aanleiding geeft om af te wijken van wat in de Schematiseringshandleiding staat beschreven, is dat zelfs aan te raden.

Veel van wat in deze schematiseringshandleiding staat beschreven is ook toepasbaar bij het ontwerp van (primaire) waterkeringen, of bijvoorbeeld bij het toetsen van regionale keringen. Op een aantal plekken zijn ook specifiek ten aanzien van ontwerpen handvatten gegeven. De lezer moet zich echter nadrukkelijk realiseren dat deze schematiseringshandleiding is geschreven voor de beoordeling van primaire waterkeringen.

Uitgangspunten

Voor alle schematiseringshandleidingen gelden de volgende uitgangspunten:

- Voor de gegevens die in het rekenmodel voor het toetsspoor worden ingevoerd wordt een format voorgeschreven. Een rekenmodel kent immers toepassingsgrenzen. Het format sluit aan bij de Aquo standaard. Verdere informatie hierover is te vinden in de Handleiding datamanagement² WBI [9].
- Deze schematiseringshandleiding ondersteunt gebruikers in het omzetten van (veld)gegevens naar de juiste rekenparameters en goede schematiseringen die in de beoordelingsmethoden kunnen worden toegepast.
- Deze schematiseringshandleiding geeft tevens aanwijzingen voor de waarden die voor parameters aangehouden kunnen worden. In de Handleiding Datamanagement WBI² [9] (paragraaf 4.1 aldaar) zijn vier typen waarden benoemd, die ook in deze schematiseringshandleiding worden gehanteerd:

Groep	Benaming	Toelichting
1	Vaste waarde	Parameterwaarden mogen door de gebruiker niet worden gewijzigd (voor de beoordeling).
2	Defaultwaarde of aanbevolen waarde	Parameterwaarden mogen door de gebruiker wel worden gewijzigd.
3	Startwaarde	Parameterwaarden worden bij voorkeur door lokale waarden vervangen.
4	Vrije waarde	Geen gegeven parameterwaarden. De gebruiker moet de regionale of lokale waarden bepalen of op ervaring inschatten.

Doelgroep

De schematiseringshandleiding is geschreven voor een deskundig gebruiker die bekend is met de voorschriften en de (deel)faalmechanismen en modellen die van toepassing zijn voor deze schematiseringshandleiding.

² <https://www.helpdeskwater.nl/algemene-onderdelen/structuur-pagina/zoeken-site/@205764/handleiding/>

1.2 Inleiding Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing

1.3 Uitgangspunten

Voor deze schematiseringshandleiding geldt:

- Voor het schematiseren van de ondergrond is een globale stochastische ondergrond schematisering, SOS, beschikbaar voor alle primaire waterkeringen in Nederland. Bij een beoordeling van een toetsspoor is deze globale schematisering het startpunt voor het maken van toepassingsspecifieke, lokale ondergrondschematisering. In deze schematiseringshandleiding wordt verwezen naar de desbetreffende handleiding. Zie Hijma en Kruse [10].
- Zettingsvloeiing leidt tot een verandering van de geometrie van het voorland van een waterkering of van de waterkering zelf en (daarmee) mogelijk een verandering van de belasting op de waterkering. Daarmee heeft zettingsvloeiing invloed op andere (directe) faalmechanismen zoals overslag/overloop, stabiliteit bekleding buitentalud, piping en buiten- en binnenwaartse macrostabiliteit. In principe wordt zettingsvloeiing onafhankelijk van deze faalmechanismen beoordeeld. Hiervoor zijn criteria afgeleid. Indien dit niet tot een oordeel voldoende voor zettingsvloeiing leidt, worden de veranderde geometrie of belasting als scenario's of stochast met een kansverdeling meegenomen in de beoordeling van de directe faalmechanismen.

1.4 Opbouw

De opbouw van de handleiding is als volgt:

Onderwerp	Locatie
Stappenschema	Hoofdstuk 2
Belastinggevallen	Hoofdstuk 3
Inventarisatie gegevens	Hoofdstuk 4
Vakindeling	Hoofdstuk 5
Schematisering per vak	Hoofdstuk 6
Parameters	Hoofdstuk 7
Voorbeeld	Hoofdstuk 8

Het *stappenschema in hoofdstuk 2* vormt de basis van de schematiseringshandleiding. Dit stappenschema geeft een overzicht van de te volgen stappen in het proces van schematiseren. Per stap wordt een verwijzing gegeven naar een paragraaf of hoofdstuk van deze schematiseringshandleiding waarin dit verder wordt uitgewerkt. Dit hoofdstuk 2 kan dus als leeswijzer of leidraad voor het toepassen van dit rapport worden gebruikt. Voor een omschrijving van begrippen wordt verwezen naar de begrippenlijst die is opgenomen als Appendix B van *WBI 2017 Bijlage I Procedure*.

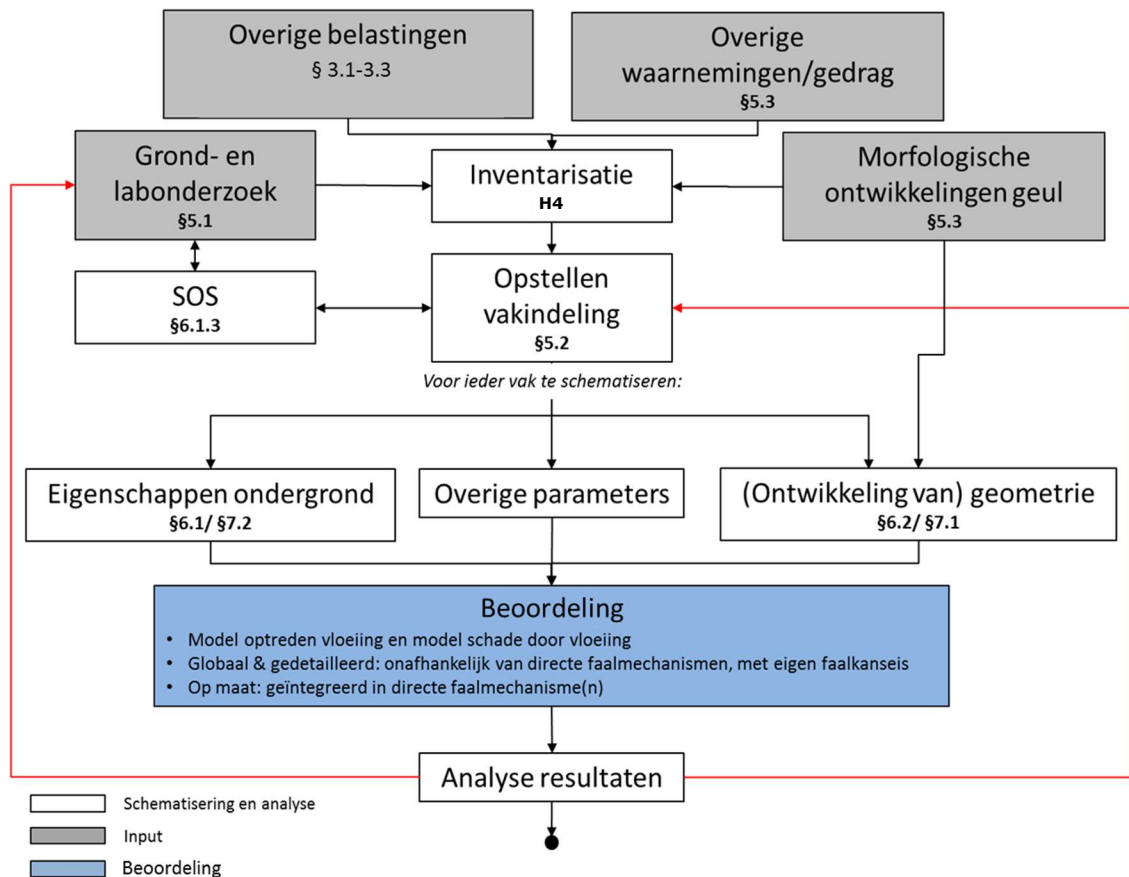
2 Stappenschema

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een stappenschema dat moet worden doorlopen om tot een schematisering te komen voor de beoordeling van zettingsvloeiing.

2.2 Stappenschema

Onderstaande figuur geeft het stappenschema voor de schematisering. Per stap is aangegeven of en in welke paragraaf dit verder is uitgewerkt.



Figuur 2.1 Stappenschema schematisering t.b.v. een beoordeling op zettingsvloeiing

3 Belastinggevallen

3.1 Inleiding

Eén van de voorwaarden voor het optreden van een zettingsvloeiing is dat er een inleidend mechanisme is. Dit kan een geleidelijke, ongunstige verandering van de vorm van het onderwatertalud zijn of verplaatsing van het gehele onderwatertalud richting oever of juist daar vandaan, het gevolg van erosie- of sedimentatieprocessen, samen te vatten als morfodynamische processen. Het inleidend mechanisme kan ook een kortdurende belasting zijn, zoals een flinke trilling door een aardbeving, heiwerkzaamheden of seismische sonderingen, of door een kleine afschuiving ergens in het onderwatertalud of een snelle daling van de waterstand.

In het grootste deel van Nederland, waar zettingsvloeiingsgevoelige ondergrond aanwezig is, is de kans dat er een kortdurende belasting optreedt die groter is dan de grootste belasting die het onderwatertalud meermaals per jaar meemaakt, erg klein. Daarmee is voor het optreden van een zettingsvloeiing alleen relevant of er sprake is van ongunstige doorgaande geleidelijke veranderingen van het onderwatertalud. Als in de te beoordelen periode het optreden van deze veranderingen uitgesloten kan worden, is de kans op een zettingsvloeiing verwaarloosbaar. Als deze wel verwacht worden, zullen de hiervoor genoemde kortdurende belastingen niet bepalen of een zettingsvloeiing kan optreden, maar slechts het moment waarop dit gebeurt. In gebieden met een grote morfodynamiek zal het moment van optreden van een vloeiing wellicht met enkele weken vervroegd worden, in minder dynamische gebieden zou dit enkele maanden of zelfs jaren kunnen zijn.

In de volgende paragrafen wordt achtereenvolgens ingegaan op:

- De hierboven genoemde morfodynamische aspecten.
- Het verloop van de waterstand, de enige mogelijk relevante hydraulische belasting.

3.2 Morfodynamische processen

Geleidelijke verandering kan leiden tot een combinatie van ondergrond en geometrie die kritiek is voor het optreden van verweking of het ontstaan van een bresvloeiing³. Dit kan zijn door (1) versteiling of verhoging van het onderwatertalud door erosie aan de teen of sedimentatie aan de top, of (2) terugschrijding van het gehele talud naar een gedeelte van de ondergrond waar de grondcondities minder gunstig zijn (lossere pakking, fijnere korreldiameter, meer stoorlaagjes) of transgressie van het gehele talud, door aanzanding waarbij het aangezande materiaal minder gunstige grondcondities heeft. Daarnaast kan in een ondergrond met afwisselend erosiegevoelige en erosiebestendige laagjes geleidelijke verandering leiden tot een kleine lokale instabiliteit, die voldoende groot is om een vloeiing te initiëren.

Voor de schematisering dient dus rekening te worden gehouden met de verwachte veranderingen in vorm en locatie van het onderwatertalud in de komende beoordelings- of beheer- en onderhoudsperiode. Hierop wordt ingegaan in paragraaf 7.1.

3.3 Waterstandsverloop

Bij gelijkblijvende overige omstandigheden neemt de kans op een *verwekingsvloeiing* toe bij een daling van de buitenwaterstand. Hoe groter de daling en hoe sneller de daling plaatsvindt, des te groter de toename van de kans. Waarschijnlijk zal een *bresvloeiing* in de meeste gevallen geïnitieerd worden door een (kleine) *verwekingsvloeiing* of afschuiving ergens in het onderwatertalud. Daarom zal de kans op het ontstaan van een *bresvloeiing* waarschijnlijk ook groter zijn bij een grote en snelle daling van de waterstand.

Voor de beoordeling van zettingsvloeiing is dus informatie nodig over laagwaterstanden. Waterstanden met onderschrijdingsfrequenties kunnen gehaald worden uit waternormalen die door Rijkswaterstaat afgeleid zijn uit het landelijk afvoeren- en waterstandsmeetnet, o.a. te vinden op de helpdesk water (Referentiewaarden Waterstanden).

³ <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/technische-leidraden/zoeken-technische/@194207/verschillen-tussen/>

4 Inventarisatie gegevens

Voordat aan de indeling in vakken begonnen wordt (volgende hoofdstuk), worden de beschikbare gegevens geïnventariseerd. Denk daarbij aan:

- Recente dijkverbeteringen en maatregelen op de vooroever zoals bestortingswerken of suppleties.
- SOS dat bestaat uit segmenten van honderden meters tot meerdere kilometers.
- Beschikbaar grond- en laboratoriumonderzoek, aanvullend op SOS (boringen en sonderingen in DinoLoket zijn meestal al gebruikt voor SOS).
- Historische vakindeling.
- Tijdreeksen van bathymetriën waaruit de morfologische ontwikkelingen af te leiden zijn en ook aanwijzingen met betrekking tot de aanwezigheid van bestorting.
- Informatie over aanwezige bestortingen.
- Ervaringen van de beheerder. Informatie van het al dan niet eerder opgetreden zijn van vloeiingen geeft een indruk van de gevoeligheid voor vloeiingen van een bepaald gebied. Tegenwoordig, nu onderwatergeometrieën gemeten (kunnen) worden met veel meer detail dan vroeger, is het zinvol opeenvolgende recentere metingen met elkaar te vergelijken om te kijken naar (sporen van) kenmerken van opgetreden vloeiingen/instabiliteiten.

Deze inventarisatie dient om inzicht te krijgen in de situatie, de omvang en aard van eventueel aanvullend grondonderzoek en het verkrijgen van een vakindeling en een plan om van grof naar fijn te werken. Hierbij kunnen de volgende onderdelen beschouwd worden:

- SOS scenario's, eerste screening van ongunstige scenario's.
- Hoeveelheid en kwaliteit van de beschikbare gegevens.
- Zwaartepunten voor de beoordeling.

Op basis van de inventarisatie kan een vakindeling gemaakt worden. Dit is verder uitgewerkt in het volgende hoofdstuk.

5 Vakindeling

Dit hoofdstuk geeft voor het faalmechanisme zettingsvloeiing de overwegingen om vakgrenzen te bepalen.

5.1 Inleiding

Bij de vakgrootte en -grenzen moet rekening worden gehouden met lengte-effect, maar ook de hoeveelheid beschikbare data en spreiding in de data. Het is mogelijk om van grof naar fijn te werken en dijkvakken in een latere fase op te knippen.

Zolang zettingsvloeiing onafhankelijk van de directe faalmechanismen wordt beoordeeld (zie De Bruijn et al 2015), hoeft geen rekening gehouden te worden met de vakindeling voor de directe faalmechanismen. Indien in een eventuele *toets op maat* verstoringprofielen ten gevolge van zettingsvloeiing als geometrie-scenario's bij de directe faalmechanismen worden beschouwd, zal de vakindeling mede bepaald worden door de vakindeling van de directe faalmechanismen.

De minimale lengte van het vak wordt bepaald door de minimale omvang van een zettingsvloeiing. Hiervoor lijkt een waarde van 50 m redelijk. In principe is er geen maximum aan de te kiezen vaklengte. Het blijft wel verstandig de vaklengte te koppelen aan de directe faalmechanismen. Indirecte mechanismen zijn bij voorkeur scenario's bij directe mechanismen. Het advies is om niet vakken van 500 m of meer te kiezen

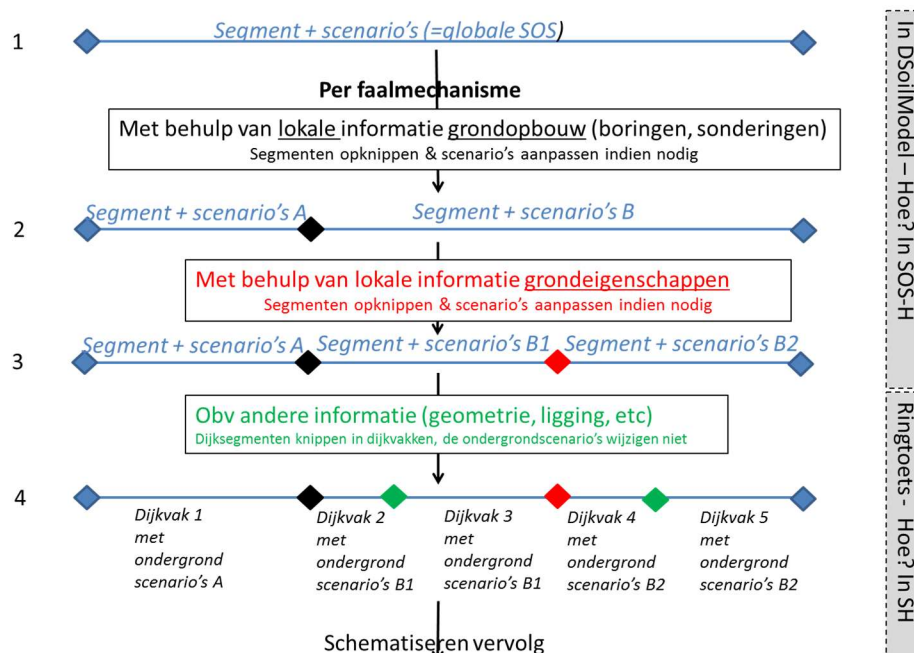
5.2 Processtappen vakindeling

Onderstaand schema geeft de generieke processtappen om te komen tot een vakindeling.

Startpunt (stap 1) zijn de segmenten en scenario's uit de SOS. Op basis van lokaal grondonderzoek en/of lokale informatie over grondeigenschappen (bijvoorbeeld laboratoriumproeven) kan het aantal segmenten en scenario's worden aangepast (stappen 2 en 3). Op basis van "overige informatie" wordt uiteindelijk tot een (dijk)vakindeling gekomen (stap 4).

Stappen 1 t/m 3 worden in principe uitgevoerd in DSoilModel. Eigenschappen van de grondopbouw die relevant zijn voor zettingsvloeiing zijn de aanwezigheid, dikte en pakking van zand- en siltlagen, de korrelverdeling van deze zand- en siltlagen en de frequentie van klei- en veenlagen binnen deze zand- en siltlagen. Deze stappen worden nader beschreven in de SOS-handleiding, Hijma en Kruse [10].

Stap 4 wordt beschreven in de volgende paragraaf.



Figuur 5.1 Processtappen vakindeling (generiek voor alle toetssporen waarvoor de opbouw van de ondergrond relevant is) opmerking: voor zettingsvloeiing worden processtap 3 en 4 niet in Ringtoets uitgevoerd, omdat dit faalmechanisme daar geen onderdeel van is. In plaats daarvan kan de software D-FlowSlide versie 18.1.1 gebruikt worden.

5.3

Overige informatie

Overige informatie bestaat uit:

- Aanwezige administratieve grenzen, zoals:
 - Beheerdersgrenzen.
Daar waar de waterkering verandert van beheerder kan om praktische redenen een knip worden gelegd.
 - Normklasse.
 - Historische vakgrenzen.
- Verder kan een knip gelegd worden op die locaties waar een duidelijke verandering is in de volgende sterkte- en belastingparameters (naast de ondergrond, die reeds in de vorige paragraaf is beschreven):
 - Hoogte, gemiddelde helling en vorm van het onderwatertalud. Bij "vorm" gaat het met name om de aanwezigheid en locatie van lokale steile gedeelten.
 - Lengte van het voorland tot aan de buitenteen van de waterkering.
 - Aanwezigheid van bestorting op het onderwatertalud.
 - Morfologische ontwikkelingen van de vooroever: ontwikkeling geulgeometrie in de tijd (belangrijkste belasting).

Deze aspecten worden in het volgende hoofdstuk (schematisering per vak) nader beschreven. Dit geeft aan dat de bepaling van de vakindeling en de schematisering per vak een iteratief proces is.

6 Schematisering per vak

Dit hoofdstuk geeft aanwijzingen en aandachtspunten voor het opstellen van een schematisering per dijkvak. Dit betreft bijvoorbeeld het omgaan met scenario's en/of bepalen van een karakteristieke doorsnede.

De methoden en procedures ter bepaling van de parameters zelf worden in hoofdstuk 7 beschreven.

6.1 Grondopbouw

6.1.1 Inleiding

Om berekeningen te kunnen uitvoeren met de methoden/modellen waarmee beoordeeld kan worden of een zettingsvloeiing kan optreden en/of schadelijk is, moet de opbouw van de ondergrond worden geschematiseerd. Hierbij gaat het om de grondopbouw in het voorland van de waterkering, ter plaatse van het onderwatertalud. De ligging van de verschillende bodemlagen en de relevante parameters dienen door middel van onderzoek te worden vastgesteld.

Een overzicht van de grondkarakteristieken, die bekend moeten zijn om de kans op het optreden van een zettingsvloeiing te kunnen beoordelen, is gegeven in Tabel 6.1. Ook voor de bepaling van het verstoringsprofiel zijn de grondopbouw en eigenschappen van de grondlagen van belang. Zoals in de Fenomenologische beschrijving [5] is beschreven kan een zettingsvloeiing een verwekingsvloeiing, een bresvloeiing of een combinatie van beide zijn. De verwekingsgevoeligheid van een zand- of siltlaag is een functie van de pakking in combinatie met de *in situ* spanningssituatie en de aard van het zand of silt. In de gedetailleerde toets wordt de pakking uitgedrukt in de state parameter, welke in het volgende hoofdstuk in detail besproken wordt. Technieken voor het bepalen van de state parameter en de verwekingsgevoeligheid van het zand als functie van de state parameter verschillen. De kans op het optreden van een bresvloeiing wordt hoofdzakelijk bepaald door de korrelverdeling van de zand- en siltlagen.

Opgemerkt wordt dat in de gedetailleerde toets, waar grondeigenschappen tot de invoerparameters behoren, niet alle in de tabel als relevant aangemerkte karakteristieken via invoerparameters in rekening worden gebracht.

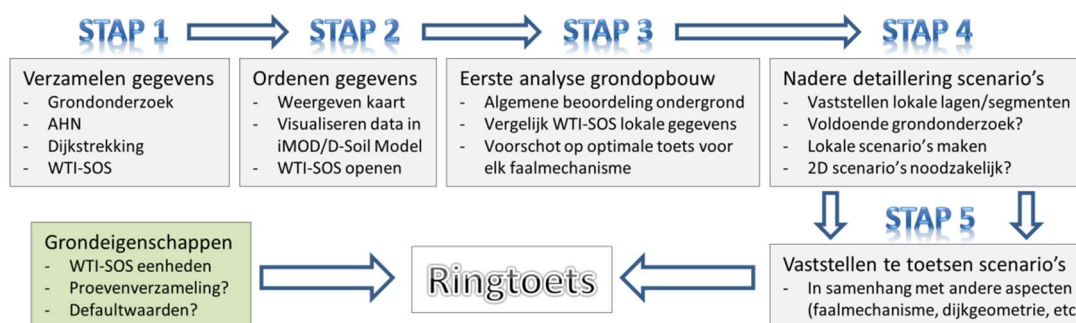
Tabel 6.1 Grondkarakteristieken in het voorland relevant voor verwekingsvloeiing/zettingsvloeiing

	Grondlagen	Schuifsterkte klei- en veenlagen	Pakking zand- en siltlagen	Korrelverdeling zand- en siltlagen
Optreden verwekingsvloeiing	Relevant tot 0,5 maal de taludhoogte onder de teen van het talud	Enigszins relevant (stoorlagen)	Zeër relevant	Enigszins relevant (tijdsduur wateroverspanningen)
Optreden bresvloeiing	Relevant tot teen talud	Enigszins relevant (stoorlagen)	Enigszins relevant (kans neemt toe met lossere pakking)	Zeër relevant
Verstoringsprofiel	Relevant tot teen talud	Niet relevant	Mogelijk relevant	Relevant (hoe fijner het zand, des te groter de inscharingslengte)

Voor bepaling van de bodemopbouw zijn in principe twee bronnen beschikbaar:

- De SOS.
- Lokaal grond- en laboratoriumonderzoek.

Op basis van deze twee bronnen kan een lokale schematisering opgesteld worden die relevant is voor het beoordelen van de kans op zettingsvloeiing. Hoe te komen tot een lokale schematisering staat beschreven in Hijma en Kruse [10]. In Figuur 6.1 wordt schematisch de samenhang en relatie van deze twee bronnen met de beoordeling van het faalmechanisme, in dit geval zettingsvloeiing, weergegeven.



Figuur 6.1 Overzicht van de vijf stappen die doorlopen moeten worden bij het lokaal schematiseren van de ondergrond. De "Grondeigenschappen" box voegt de benodigde grondeigenschappen toe die behoren bij de WTI-SOS eenheden. Dit kunnen default waarden zijn of lokaal vastgestelde waarden indien er voldoende informatie beschikbaar is. In geval van zettingsvloeiing wordt Ringtoets vervangen door DFlowSlide.

6.1.2

Dijksmateriaal

Bij de beoordeling of schade aan de dijk ten gevolge van een zettingsvloeiing toelaatbaar is of niet, kan de samenstelling van het dijklichaam een rol spelen. In geval van een kleidijk zou schade aan de bekleding wellicht eerder toelaatbaar geacht kunnen worden dan in geval van een zanddijk. Vastgesteld moet daarom worden of sprake is van een dijk met een kleikern of zandkern.⁴

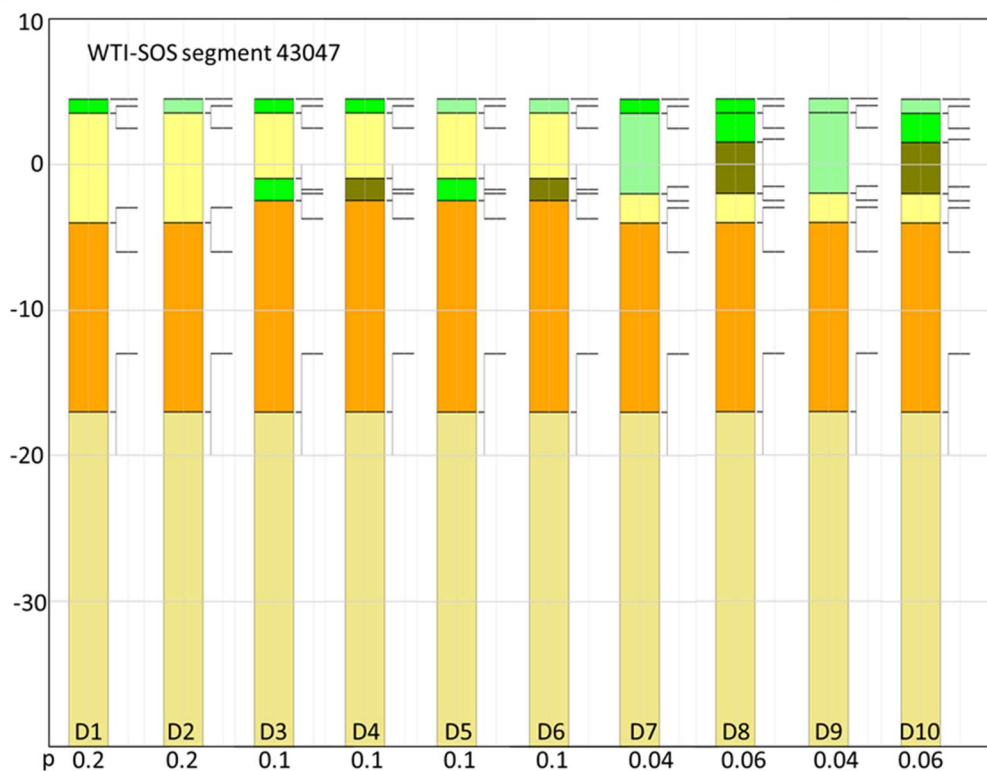
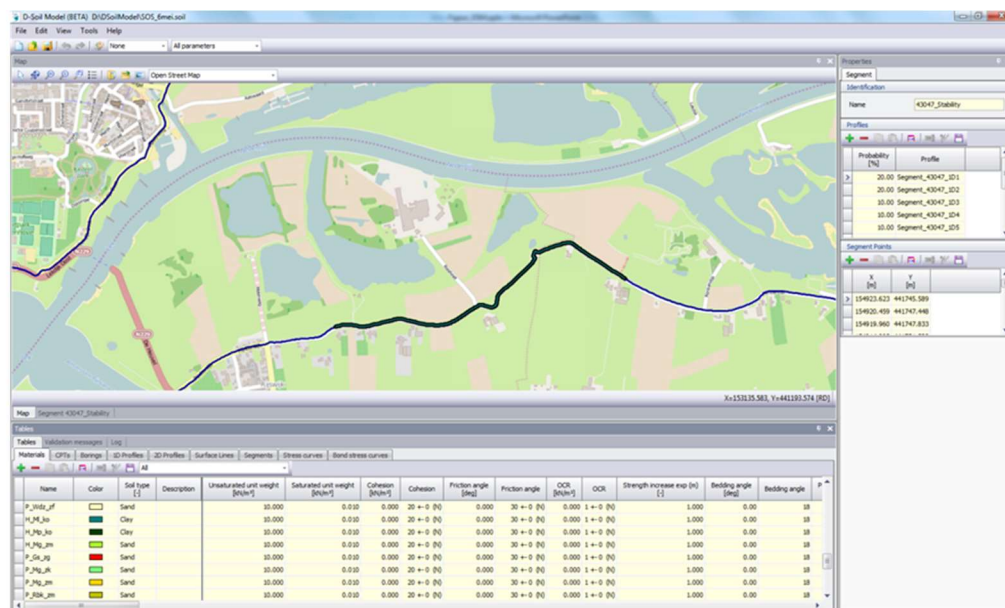
6.1.3

Stochastische Ondergrondschematisering (SOS)

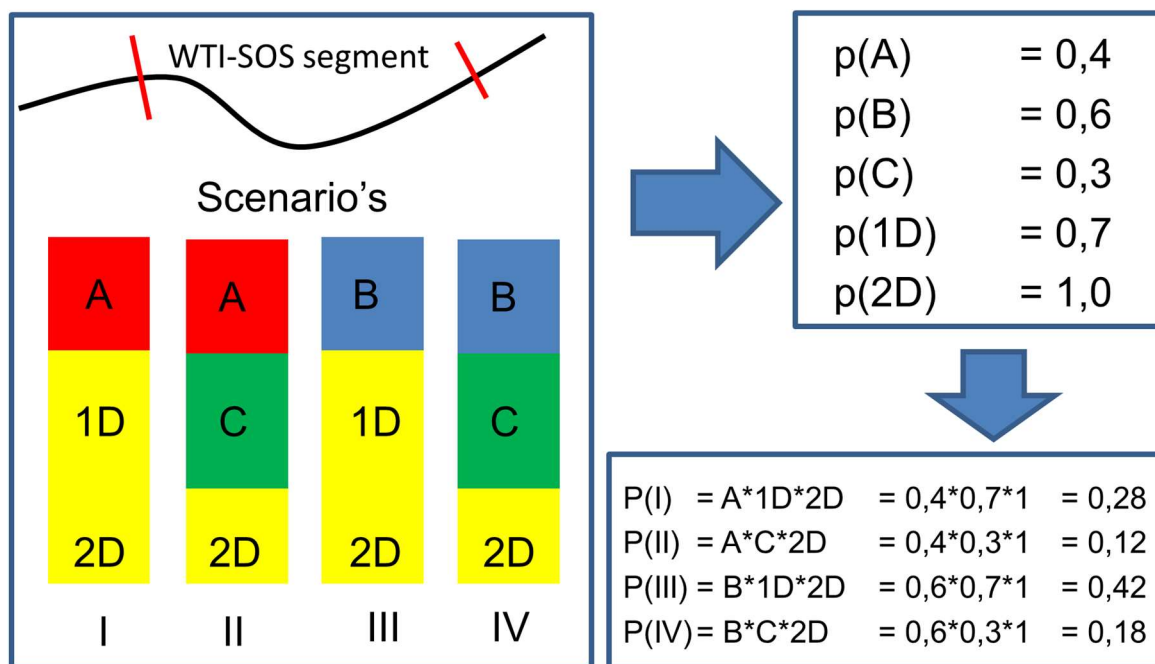
Voor alle primaire keringen in Nederland is een globale Stochastische Ondergrondschematisering (SOS) opgesteld met daarbij scenariokansen. Met deze globale Stochastische Ondergrondschematisering wordt de onzekerheid over de opbouw van de ondergrond in rekening gebracht. Een stochastisch ondergrondmodel bevat de verschillende mogelijkheden van de opbouw van de ondergrond in een gebied met de bijbehorende kans van voorkomen van de scenario's. Het stochastisch ondergrondmodel is opgesteld op basis van feitelijke gegevens, zoals sonderingen en boringen, en op basis van geologische kennis over de ontstaansgeschiedenis van een gebied. De opbouw van de ondergrond kan heel variabel zijn. Vaak is een grondmechanisch onderzoek onvoldoende omvangrijk om alle variaties in de ondergrond in beeld te brengen. Ook op korte afstand van een sondering of boring kan de opbouw van de ondergrond anders zijn dan ter plaatse van de sondering of boring. Met een stochastisch ondergrondmodel wordt deze onzekerheid in rekening gebracht.

In de globale Stochastische Ondergrondschematisering is Nederland opgedeeld in geologische segmenten. Deze segmenten zijn enkele honderden meters tot enkele kilometers lang. Voor elk van deze segmenten is een aantal scenario's van de ondergrondopbouw vastgesteld met de bijbehorende kans van voorkomen. De scenario's bestaan uit een 1D opbouw van de ondergrond. Het aantal scenario's per geologisch segment is 1 tot orde 5 tot soms 10 scenario's en maximaal 16 scenario's. In deze scenario's komen meerdere grondlagen voor. Verschillende grondlagen komen in meerdere scenario's voor. Ook in naastgelegen geologische segmenten komen vaak dezelfde grondlagen voor.

⁴ In de eenvoudige en gedetailleerde toets speelt dit in principe geen rol, omdat daar wordt nagegaan of de kans dat het verstoringsprofiel ten gevolge van een zettingsvloeiing de invloedzone van de waterkering overschrijdt voldoende klein is.



Figuur 6.2 Voorbeeld van de informatie uit WTI-SOS zoals beschikbaar in D-Soil Model. De kaart geeft de ligging aan van het WTI-SOS segment, in dit geval segment 43047. Onder de kaart staan de WTI-SOS scenario's voor dat segment, waarbij de minimale en maximale diepteligging van de top van de eenheden wordt aangegeven met streepjes (dit is een compilatie van screenshots uit D-Soil Model). Elk scenario wordt genummerd (D1-D_n) en de kans van aantreffen (p) wordt getoond. Voor dit voorbeeld zijn de namen van de eenheden toegevoegd aan het plaatje (zie voor meer informatie Hijma en Lam [8]).



Figuur 6.3 Bij het opstellen van WTI-SOS wordt de mogelijke grondopbouw in een segment samengevat in een aantal scenario's. Het linkerpaneel laat de scenario's zien die onderscheiden zijn en bestaan uit vier fictieve eenheden (A-D). Eenheid D heeft twee unieke voorkomens en deze voorkomens worden numeriek onderscheiden. Alle eenheden hebben een eigen kans van aantreffen toegekend gekregen (paneel rechtsboven). Door de kansen van aantreffen van de verschillende eenheden te vermenigvuldigen ontstaat er een kans van aantreffen voor het gehele scenario. De kans op aantreffen van scenario I is in dit voorbeeld 0,28 oftewel 28%.

Op basis van de globale SOS moet aan de hand van lokaal grondonderzoek, zoals boringen en sonderingen, een lokale ondergrondschematisering worden opgesteld. Voor het faalmechanisme zettingsvloeiing moet de focus dan ook liggen op een ondergrondschematisering voor dit specifieke faalmechanisme. De manier waarop de SOS kan worden toegepast voor het opstellen van een lokale ondergrondschematisering voor het betreffende dijkvak met bijbehorende scenariokansen is uitgewerkt in de Handleiding Lokaal schematiseren met SOS Hijma en Kruse [10].

De SOS is gebaseerd op sonderingen en boringen die binnendijs zijn uitgevoerd. Met name als er sprake is van een breed voorland en/of een dynamische vooroever (zie paragraaf 6.2.3), kan de grondopbouw in het voorland aanzienlijk afwijken van die ter plaatse van de dijk. In die gevallen is het aan te raden sonderingen en boringen in het voorland uit te voeren, zo dicht mogelijk bij de oever of zelfs in het onderwatertalud. Dit kan betekenen dat grondonderzoek vanaf het water moet worden uitgevoerd.

6.1.4

Lokaal grondonderzoek

In Tabel 6.2 is een indicatie gegeven van de mogelijke omvang van het grondonderzoek en andere metingen behorende bij de verschillende toetsen op zettingsvloeiing. Verder hangt de mate van detaillering van het grondonderzoek samen met de grondgesteldheid (aanwezigheid stoorlagen, eventuele losse pakking) en de gewenste/benodigde analysemethoden. De intensiteit van grondonderzoek wordt groter naarmate de toets verfijnder wordt of de bodemopbouw meer risico's met zich meebrengt.

Tabel 6.2 Globale indruk van benodigd grondonderzoek bij de verschillende toetsen op zettingsvloeiing

Fase beoordeling	Indicatie van benodigd grondonderzoek	
Eenvoudige toets	Geen grondonderzoek, de eenvoudige toets is een puur geometrische beoordeling	
Gedetailleerde toets	SOS sonderingen tot $0,5 \cdot H_R$ **) onder bodem: minimaal 4 per km talud, hoewel dit geheel afhankelijk is van de verwachte variabiliteit volgens de SOS, Hijma en Kruse [10]. Bij voorkeur in het voorland eventueel extra (seismische) sonderingen, afhankelijk van ruimtelijke variatie van losgepakt zand- en siltlagen en/of korrelverdeling daarvan (volgens SOS). Bij voorkeur in voorland eventueel boringen ter bepaling van soort zand, stoorlaagjes, etc.	
Toets op maat	Faalmechanisme	
	Verwekingsvloeiing	Bresvloeiing
	archief- en kaartmateriaal (aanvullend t.o.v. SOS) extra boringen en sonderingen (bij voorkeur in voorland) afhankelijk van ruimtelijke verdeling losgepakte zand- en siltlagen. Ter bepaling van de pakking van zand- en siltlagen eventueel: (in aanvulling op sonderingen) bevroren monsters elektrische dichtheidsmetingen (met ijking) ter bepaling van pakking serie triaxiaalproeven (bv. natte of droge kritieke dichtheidsproeven) en samendrukkingsproeven Plus maatwerk afhankelijk van de situatie	archief- en kaartmateriaal (aanvullend t.o.v. SOS) extra boringen en sonderingen tot geulbodembodem (bij voorkeur in voorland), afhankelijk van ruimtelijke variatie van de korrelgrootte van de zandlagen. Hiermee kan tevens gelaagdheid beter in beeld gebracht worden als er stoorlagen zijn classificatieproeven zand (met name korrelverdeling) Plus maatwerk afhankelijk van de situatie
	**) Definitie H_R gegeven in Figuur 6.4	

6.2

Geometrie

6.2.1

Inleiding

De geometrie van het onderwatertalud en de snelheid waarmee deze in vorm (hoogte en/of helling) verandert of waarmee deze zich verplaatst, beïnvloedt in sterke mate de kans op een vloeiing en, indien een vloeiing optreedt, de eventuele vervolgschade (het verstoringsprofiel). Zettingsvloeiingen hebben, wat de geometrie van het onderwatertalud betreft, de kleinste optredingskansen bij:

- Een flauwe helling.
- Geringe taludhoogte.
- Een holle taludvorm (taludhelling onderin flauwer dan bovenin).

Bij de beoordeling op zettingsvloeiing moet worden uitgegaan van de meest ongunstige geometrie binnen de beoordelingsperiode. Daarnaast is in de huidige gedetailleerde beoordelingsmethode, die gebaseerd is op de statistiek van opgetreden vloeiingen in Zeeland, de snelheid van verandering van de geometrie van het onderwatertalud en snelheid waarmee het onderwatertalud migreert (richting oever of juist daarvan af) een belangrijke invoerparameter.

Hiervoor is dus informatie nodig over de te verwachten beweeglijkheid van de vooroever. Hierop wordt ingegaan in paragraaf 6.2.3.

Voor de geometrische criteria zoals die in de *eenvoudige* en de *gedetailleerde toets* worden gehanteerd is het van belang te weten in hoeverre het grondmassief onder water ligt en in hoeverre boven water. Dit laatste is van belang, om twee redenen:

- Verweking van zandlagen onder water is een functie van (onder andere) de spanningstoestand in die zandlagen. Deze wordt mede bepaald door de geometrie boven water.
- Om te bepalen of een vloeiing, indien die optreedt, wel of niet schadelijk is (al dan niet via directe faalmechanismen).

6.2.2

Geometrie

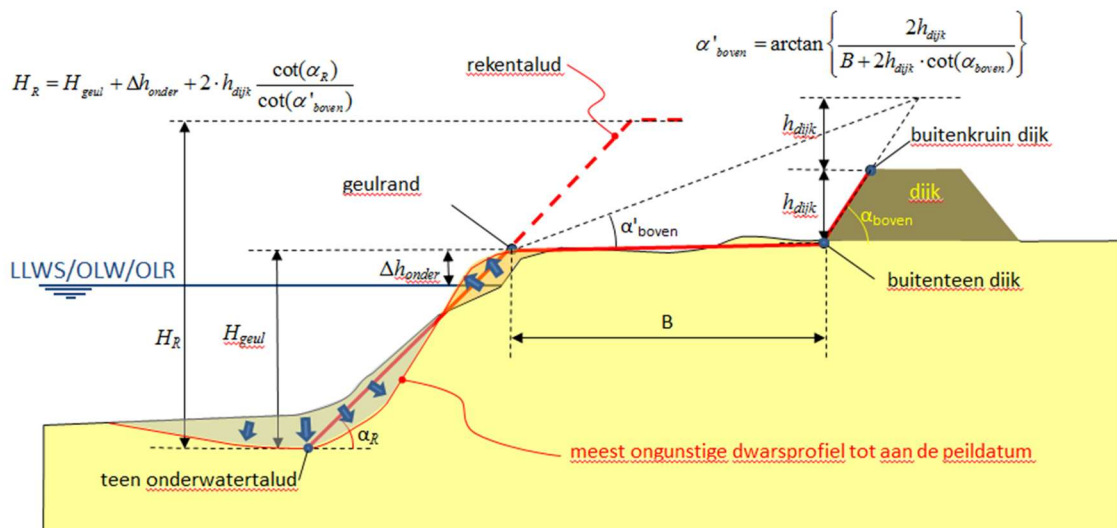
Startpunt voor het bepalen van de meest ongunstige geometrie in de beoordelingsperiode is de bestaande geometrie. Bij dijken langs een getijgeul of rivier kan de bestaande geometrie worden bepaald uit peilingen (singlebeam of multibeam echolodingen). Bij voorkeur worden peilingen bij hoogwater uitgevoerd, om zo een zo groot mogelijke overlap met de hoogtegegevens boven water te krijgen. Peilingen dienen beschikbaar te zijn tot aan de tegenoverliggende oever, omdat de geulgeometrie invloed kan hebben op de uiteindelijke inschарingslengte. Op basis van de verwachte beweeglijkheid van het onderwaterprofiel (volgende paragraaf) kan een schatting van de meest ongunstige geometrie gemaakt worden.

Het effectieve gewicht van zand is boven water groter dan onder water. Om dat in rekening te brengen wordt voor de analyse van *verweking* een fictief onderwater dwarsprofiel beschouwd waarin de verticale effectieve korrelspanningen gelijk zijn aan die van een profiel dat daadwerkelijk geheel onder water ligt. Dat profiel wordt verder vereenvoudigd tot een profiel met één constante taludhelling. Die helling wordt hier met de **rekentaludhelling α_R** aangeduid en is gelijk aan de daadwerkelijke geulhelling. De fictieve taludhoogte wordt aangeduid met **rekentaludhoogte H_R** . Zie Figuur 6.4. Voor de bepaling van H_R moet langs de kust en in de estuaria uitgegaan worden van LLWS (zeegebied), OLW (benedenrivierengebied) of OLR (bovenrivierengebied). Deze waarden kunnen gevonden worden in het Rijkwaterstaat document "Referentiewaarden waterstanden" [14]. Voor een verdere toelichting zie paragraaf 7.1.4.

Het bovenwatergedeelte van de geometrie kan bepaald worden uit het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) of uit het legger- en beheerregister van de keringbeheerder. Vervolgens dienen de peilingen van het onderwatergedeelte gecombineerd te worden met de hoogtemetingen boven water. Uit deze gecombineerde dataset kunnen dwarsprofielen worden gegenereerd vanaf de waterlijn van de tegenoverliggende oever tot aan de buitenkruin van de waterkering.

Voor de bepaling van de geuldiepte en rekengeuldiepte wordt als ondergrens de geulbodem genomen, *mits hier zand aanwezig is*. Anders wordt als ondergrens de onderkant van de diepste zandlaag boven de geulbodem genomen.

De formules waarmee H_R en α_R worden berekend staan in de figuur.



Figuur 6.4 Geschematiseerde geometrie, met bepaling rekentaludhoogte H_R en rekentaludhelling α_R , ten behoeve van de eenvoudige en de gedetailleerde toets voor zettingsvloeiing

Zie verder paragraaf 7.1 voor de bepaling van de relevante parameters.

6.2.3

Beweeglijkheid van het onderwaterprofiel

Een voorspelling van de toekomstige geometrie kan gemaakt worden op basis van extrapolatie van peilingen van de afgelopen jaren, tenzij verwacht wordt dat belangrijke veranderingen worden aangebracht in het stroompatroon of als er op basis van de opbouw van de ondergrond

een hogere of lagere erosiesnelheid verwacht wordt. In het geval van verwachte veranderingen in het stroompatroon (bijvoorbeeld door de aanleg van een strekdam of een bestorting) kan de geometrie voorspeld worden middels een voorspelling van de toekomstige stroming, alsmede van de resulterende aanzanding en erosie, met hydraulische en morfologische modellen zoals SOBEK of Delft3D. Uiteraard kan men de geometrie vastleggen met behulp van een taludbescherming, soms ook een bodembescherming.

Overwegingen bij vereiste frequentie peilingen vooroever

In principe wordt de vereiste frequentie waarmee peilingen dienen te worden uitgevoerd bepaald door twee factoren:

- hoe ver het beschouwde dijktraject van afkeuren op zettingsvloeiing zit volgens de toegepaste beoordelingsmethoden.
- De mate waarin de kans op afkeuren door zettingsvloeiing af- of toeneemt door beweeglijkheid van de vooroever.

Om het tweede aspect vast te kunnen stellen kan het zinvol zijn om op basis van peilingen uit het verleden de kans op zettingsvloeiing grafisch uit te zetten tegen de tijd (hetgeen betekent dat de gedetailleerde beoordelingsmethode, of een andere probabilistische methode, meerdere keren moet worden uitgevoerd). Indien er in de afgelopen 10 jaar regelmatig (bijvoorbeeld elk jaar) een peiling is uitgevoerd, zal vrij nauwkeurig een voorspelling van de geulontwikkeling gemaakt kunnen worden. Daarbij moet uiteraard wel gelet worden op de grondopbouw in de geul. Indien de geul insnijdt in een kleilaag en deze bijna op doorbreken staat, kunnen metingen uiteraard niet geëxtrapoleerd worden. Indien regelmatige peilingen over de afgelopen jaren ontbreken, is een voorspelling lastiger en zal (in eerste instantie) frequenter gemonitord moeten worden met een combinatie van technieken en systemen (grondonderzoek, peilingen en modellering). Van belang is verder de te kiezen toelaatbare faalkans. Indien nagegaan wordt of een vloeiing tot schade aan een eventueel aanwezige bestorting leidt, zal de toelaatbare faalkans waar op beoordeeld wordt uiteraard hoger zijn dan wanneer nagegaan wordt of de kans op een overstroming ten gevolge van een zettingsvloeiing voldoende klein is. Dat kan betekenen dat minder snel maatregelen genomen hoeven te worden.

Bij de dimensionering van stormvloedkeringen, uitwateringssluizen, brugpijlers en andere stroomvernauwingen is een voorspelling nodig van kuildiepte en hellingen. Die hangen sterk af van het stromingspatroon (wervelstraten, turbulentie), dat op zijn beurt bepaald wordt door onder meer het ontwerp van de constructie (o.a. mate van stroomvernauwing) en de lengte van de bodembescherming. Bij bestaande constructies kan men de helling van de kuilen beïnvloeden door bestortingen aan te brengen. Zie paragraaf 7.1 voor bepaling van de parameter die de beweeglijkheid van de vooroever in de eenvoudige en gedetailleerde toets representeert.

6.2.4 Vooroeverbetorting

Daar waar het onderwatertalud bestort is, kan geen erosie plaatsvinden en is dus ook geen initiatiemechanisme voor verweking of bresvloeiing aanwezig. Dit heeft consequenties voor de bepaling van de rekengeulhoogte- en helling die gebruikt worden voor het bepalen of een vloeiing kan optreden en voor de inscheringlengte indien een vloeiing optreedt. Een vooroever kan volledig of gedeeltelijk bestort zijn. Een volledig bestorte vooroever houdt in dat een aaneengesloten bestorting aanwezig is van het diepste punt van de geul tot aan de teenbestorting van de dijk of buitenteen van de dijk. Bij een gedeeltelijk bestorte vooroever kan sprake zijn van een bestorting in het bovenste deel van het talud, die aansluit op de

teenbestorting of buitenteen van de dijk, of een bestorting in het onderste deel van het talud, beginnend vanuit het diepste punt van de geul.⁵

Er bestaan nog geen criteria waarmee de toestand van een bestorting beoordeeld kan worden. Omdat de functie van een bestorting het tegengaan van erosie is, moet het tenminste aan de volgende twee eisen voldoen:

1. De toplaag moet zelf voldoende stroombestendig zijn, d.w.z. stabiel onder invloed van de hydraulische belastingen (stroomsnelheid en turbulentie)
2. De beschermingsconstructie moet in staat zijn om de erosie van het zand in voldoende mate te verhinderen, oftewel het moet een goede filterwerking hebben.

Veelvuldig toegepaste mogelijkheden:

1. Een tweelaagse bestorting, bestaande uit een filter-/uitvullaag met relatief fijne sortering met daarop een laag erosiebestendige stortsteen van grovere sortering. Hierbij is dus sprake van een zogenaamd granulair filter. Dit is een veelvuldig toegepaste maatregel (Zeeland, Dordtsche Kil, Vierhuizergat)
2. Bestorting in combinatie met een zink- of kraagstuk met geotextiel, waarbij het geotextiel als filterconstructie fungeert.

In bijlage C 1.2 van het Achtergrondrapport van OI2014 [19] wordt hier in meer detail op in gegaan en worden referenties gegeven met criteria voor erosiebestendigheid en filterwerking.

Criteria in hoeverre een gedeeltelijke bestorting, bijvoorbeeld omdat deze is ondermijnd door erosie, nog voldoet, en in hoeverre de integriteit van de bestorting nog voldoende is, bestaan nog niet. De meest concrete aanwijzing voor de aanwezigheid van bestorting zijn tekeningen of andere historische documenten waarin is aangegeven dat er een bestorting is aangebracht, in combinatie met voldoende lange tijdreeksen van peilingen waaruit blijkt dat het onderwaterprofiel nauwelijks beweegt.

Verder is er de afgelopen jaren op een aantal locaties in Nederland ervaring opgedaan met geofysische metingen vanaf het schip. ook als deze bijvoorbeeld is begraven onder zand. Goede ervaringen zijn opgedaan met side scan sonar en subbottom profiling metingen (lagere frequentie dan standaard echolodgingen waardoor een stukje in de ondergrond "gekeken" kan worden). Het backscatter signaal van multibeam metingen kan informatie geven over de aanwezigheid van stortstenen, mits deze niet zijn begraven. Methoden om de dikte of samenstelling te bepalen zijn er nog niet.

⁵ Welke (reken)geuldiepte in geval van een gedeeltelijke bestorting precies in rekening gebracht moet worden voor de bepaling van de optredingskans en het inscharingsprofiel, d.w.z. alleen de onbestorte hoogte of de hele hoogte, inclusief het bestorte gedeelte, is nog onderwerp van onderzoek (wat bijvoorbeeld in een *toets op maat* zou kunnen plaatsvinden). Aanbevolen wordt vooralsnog het volgende: als een deel van de oever is bestort of als voor een deel van de oever vaststaat dat het materiaal niet bres- of verwekingsgevoelig is, kan dat als volgt worden verwerkt: bestorting of niet-verwekingsgevoelige lagen onderin de geul hoeven niet te worden beschouwd bij bepaling van de rekengeuldiepte voor optreden of geuldiepte voor inscharing, maar de gehele oever erboven moet worden meegerekend als bres- of verwekingsgevoelig. Dit geldt dus ook voor eventuele bestortingen die aansluiten op de teen.

Zie verder paragraaf 7.1 voor de bepaling van de relevante parameters.

6.2.5 *Ontgrondingskuilen in geulbodem*

Als de geulbodem niet vlak is maar ontgrondingskuilen heeft, wordt aanbevolen de globale en gedetailleerde schadelijkheids- en optredingscriteria voor afschuiving voorland en zettingsvloeiing uit Bijlage III van de Ministeriele Regeling toe te passen op de hellingen van de ontgrondingskuil (gegeven meest ongunstige geometrie in beoordelingsperiode). Startpunt van het signaleringsprofiel in het schadelijkheidscriterium is in dat geval de teen van de geulhelling of de onderrand van een eventueel aanwezige bestorting. Als daaruit volgt dat een afschuiving of vloeiing in de kuilhelling niet schadelijk is of niet kan optreden, hoeft de ontgrondingskuil niet geschematiseerd te worden. Anders dient de kuil mee geschematiseerd te worden in de bepaling van de (reken)geuldiepte en –helling of dient een toets op maat te worden uitgevoerd.

7 Parameters

Dit hoofdstuk geeft aanwijzingen voor de waardebepaling van de relevante parameters. Uitgangspunt is dat deze primair voor de eenvoudige of gedetailleerde toets worden gebruikt. Per parameter wordt aangegeven wat de parameter precies inhoudt, hoe de waarde kan worden bepaald en welke aandachtspunten er zijn. In hoofdstuk 8 wordt dit uitgewerkt in een voorbeeld. In de parameterlijst in de bijlage wordt per parameter aangegeven of deze wel of niet als stochastische variabele gemodelleerd wordt. Indien dat wel het geval is wordt aangegeven of deze een continue of discrete verdeling heeft (in het tweede geval wordt met scenario's gewerkt) en welk type verdeling aangenomen moet worden.

7.1 Geometrische parameters

Figuur 6.4 geeft een overzicht van een aantal te bepalen geometrische parameters van een geometrie op een bepaald tijdstip. Naast de actuele (meeste recente) geometrie is de snelheid van verandering van de onderwatergeometrie in de komende beoordelingsperiode een invoerparameter en benodigd om de meest ongunstige geometrie in de beoordelingsperiode te bepalen.

In de software D-FlowSlide 18.1.1, ontwikkeld voor het uitvoeren van een eenvoudige en gedetailleerde toets of berekeningen ten behoeve van een Toets op Maat, dient de geometrie geschematiseerd te worden in zogenaamde karakteristieke punten. Deze karakteristieke punten komen overeen met de blauwe punten in Figuur 6.4, waarvan een aantal hieronder besproken worden. In de user interface van D-FlowSlide kunnen de karakteristieke punten eenvoudig worden geselecteerd nadat een profiel bestaande uit een groot aantal punten is ingelezen.

7.1.1 Methoden bepaling geometrische parameters onderwatertalud

Voor alle geometrische parameters die betrekking hebben op het onderwatertalud geldt dat deze bepaald moeten worden uit tijdreeksen van peilingen (singlebeam- of multibeamlodingen) in de geul. Zie ook de opmerkingen hierover in paragraaf 6.2.1.

7.1.2 Teen onderwatertalud van meest ongunstige geometrie in beoordelingsperiode

Wat is het

De overgang van het onderwatertalud naar de geulbodem [m t.o.v. NAP]. Benodigd voor bepaling van de (reken)hoogte en (reken)helling van het geschematiseerde onderwatertalud van de meest ongunstige geometrie in de komende beoordelingsperiode (H en α_R) en voor bepaling van de inscharingslengte (het verstoringsprofiel). Opgemerkt wordt dat voor de bepaling van de geuldiepte en de rekengeuldiepte als ondergrens de geulbodem genomen wordt, *mits hier zand aanwezig is*. Anders wordt als ondergrens de onderkant van de diepste zandlaag boven de geulbodem genomen.

Hoe te bepalen

Zie paragraaf 6.2.2 en Figuur 6.4. Het is niet altijd meteen duidelijk waar de overgang van onderwatertalud naar geulbodem zich bevindt. Het punt dient zo gekozen te worden dat, tezamen met de keuze van de geulrand, een zo groot mogelijke kans op zettingsvloeiing wordt berekend. Dit is dus een enigszins iteratief proces.

Aandachtspunten

Voor bepaling van de rekentaludhoogte en helling (H_R , zie paragraaf 6.2.2), die in de eenvoudige en gedetailleerde toets gebruikt wordt om het optredingscriterium te controleren of de optredingskans te berekenen, geldt het volgende: als een deel van de oever is bestort of als voor een deel van de oever vaststaat dat het materiaal niet verwekingsgevoelig is, kan dat als volgt worden verwerkt: bestorting of niet-verwekingsgevoelige lagen onderin de geul hoeven niet te worden beschouwd bij dit criterium, maar de gehele oever erboven moet worden meegerekend als verwekingsgevoelig. Dit geldt dus ook voor eventuele bestortingen die aansluiten op de teen.

Als de geulbodem niet vlak is maar erosiekuilen heeft, wordt verwezen naar paragraaf 6.2.5.

7.1.3 *Geulrand van meest ongunstige geometrie in beoordelingsperiode*

Wat is het

De overgang van het onderwatertalud naar het voorland. Indien geen voorland aanwezig is, kan de laagwaterlijn genomen worden [m t.o.v. NAP].

Hoe te bepalen

Zie paragraaf 6.2.2 en Figuur 6.4. Het is niet altijd meteen duidelijk waar de geulrand zich bevindt. Het punt dient zo gekozen te worden dat tezamen met de keuze van de teen van het onderwatertalud tot een zo hoog mogelijke kans op zettingsvloeiing leidt. Dit moet dus iteratief bepaald worden.

7.1.4 *Laag Laagwaterstand LLWS/OLW/OLR*

Wat is het

LLWS: Het meerjarig gemiddelde van het laagste springlaagwater ten opzichte van NAP, geldig in het kustgebied en de estuaria.

OLW: Overeengekomen Laag Water ten opzichte van NAP, geldig in het benedenrivierengebied (in Waal stroomafwaarts van Tiel).

OLR: Overeengekomen Lage Rivierstand ten opzichte van NAP, geldig in het bovenrivierengebied (in Waal stroomopwaarts van Tiel), hetgeen overeenkomt met de Overeengekomen Lage Afvoer bij Lobith.

Het OLW sluit vloeiend aan op het LLWS en het OLR.

Hoe te bepalen

LLWS, OLW en OLR zijn te vinden in *Referentiewaarden waterstanden* [14].

7.1.5 *Equivalent oevermigratiesnelheid V_{lokaal}*

Wat is het

Beweeglijkheid van het onderwatertalud [m/jaar]. De snelheid van verandering wordt gebruikt om de meeste ongunstige geometrie gedurende de beoordelingsperiode te bepalen.

Hoe te bepalen

Zie de opmerkingen in paragraaf 6.2.3.

Kwantificeer de te verwachten beweeglijkheid van de oever met de snelheid V_{lokaal} . Dit kan gedaan worden met een trendanalyse van (jaarlijkse) peilingen van de afgelopen 10 jaar. De snelheid V_{lokaal} kan vervolgens bepaald worden door de grootste waarde te nemen van:

- de snelheid van de terugschrijding of vooruitgang van de waterlijn,
- de terugschrijding of vooruitgang van het gemiddelde talud
- de snelheid van de verdieping aan de teen maal $\cot\alpha_R$.

Aandachtspunten

Het is ook mogelijk dat de onderwatergeometrie gedurende de beoordelingsperiode gunstiger wordt, bijvoorbeeld als sprake is van aanzanding aan de teen. De meest ongunstige geometrie is dan de actuele geometrie.

7.1.6 *Lengte vooroeverbrestorting vanaf buitenteen dijk*

Wat is het

Lengte van de vooroeverbrestorting vanaf de buitenteen van de dijk [m in horizontale richting t.o.v. buitenteen dijk].

Hoe te bepalen

Tekeningen waarop maatregelen op de vooroever zoals bestortingswerken of suppleties staan. Voor het gedeelte van de bestorting dat niet boven water geïnspecteerd kan worden: op locaties waar uit peilingen volgt dat sprake is van erosie (verschilbathymetriën), volgt vaak ook de locatie van bestortingen, omdat daar geen erosie plaatsvindt. Technieken om de

aanwezigheid (dikte, continuïteit) van vooroeverbestedingen te controleren zijn nog in ontwikkeling. Zoals aangegeven in paragraaf 6.2.4 zijn de meest geschikte thans beschikbare techniek voor het vaststellen van de aanwezigheid van bestorting onder water side scan sonar, subbottom profiling of multibeam metingen met backscatter (mits de bestorting niet begraven is).

Aandachtspunten

Bij een geheel bestorte vooroever kan een vloeiing in de meeste gevallen niet optreden (met inachtneming van de opmerkingen in paragraaf 6.2.4).

7.1.7 *Begin- en eindpunt vooroeverbesteding vanuit geul*

Wat is het

Begin en eindpunt van de vooroeverbesteding onderaan het onderwatertalud [m in horizontale richting t.o.v. geulrand].

Hoe te bepalen

Tekeningen waarop maatregelen op de vooroever zoals bestortingswerken of suppleties staan. Op locaties waar uit peilingen volgt dat sprake is van erosie (verschilbathymetriën), volgt vaak ook de locatie van bestortingen. Technieken om de aanwezigheid (dikte, continuïteit) van vooroeverbestedingen te controleren zijn nog in ontwikkeling. De meeste geschikte thans beschikbare techniek voor het vaststellen van de aanwezigheid van bestorting onder water is side scan sonar.

Aandachtspunten

Zie paragraaf 7.1.6.

7.2 **Grondlagen en eigenschappen per grondlaag**

Zoals aangegeven in paragraaf 6.1 kunnen per vak meerdere grondopbouwscenario's voorkomen.

De bepaling van de grondopbouwscenario's per vak vindt plaats in twee stappen:

- Interpretatie van lokale sonderingen, zoals beschreven in paragraaf 7.2.1.
- Vergelijking van de in de vorige stap geïnterpreteerde sonderingen met de grondopbouwscenario's in de globale SOS, zie paragraaf 6.1.4.

In een volgende stap worden van de geïdentificeerde zand- en siltlagen de relevante grondparameters bepaald. Deze komen aan de orde in paragraaf 7.2.1.

Hierbij wordt er nogmaals op gewezen dat voor situaties genoemd in de laatste alinea van paragraaf 6.1.3 de ondergrondopbouw ter plaatse van de onderwaterhelling kan sterk kan afwijken van die onder de dijk of binnendijks, waarvoor de grondopbouw scenario's uit de SOS zijn opgesteld.

7.2.1 *Onder- en bovengrens van zand- en siltlagen in onderwatertalud*

Wat is het

Onder- en bovengrens van alle zand- en siltlagen dikker dan 1 m, tussen het niveau op $0,5H_R$ onder de teen van het onderwatertalud en de geulrand, of de gemiddelde waterstand indien deze hoger ligt dan de geulrand [m t.o.v. NAP].

Hoe te bepalen

Minimaal dient een standaard (elektrische) druksondering met meting van de kleef of mantelwrijving te worden uitgevoerd. De nauwkeurigheid kan vergroot worden door het gebruik van een piezoconus, bij voorkeur met een zogenaamde u2 waterspanningssensor. Als er grindhoudende lagen zijn, of andere harde lagen, zijn bijzondere maatregelen nodig om met een sondering op diepte te komen. Soms is het voldoende om de techniek van 'spoelsonderingen' toe te passen. In andere situaties kan het nodig zijn om eerst een boring uit

te voeren, door de harde laag heen, om vervolgens een sondering uit te voeren in de onderliggende, zachtere lagen.

Voor wat betreft de locatie en dichtheid van sonderingen wordt verwezen naar paragraaf 6.1.4.

Met behulp van de sonderingen kunnen grondlagen worden geclassificeerd. Een mogelijkheid om de grondlagen vast te stellen die op basis van alleen grondeigenschappen gevoelig zijn voor verwekings- en bresvloeiing is het gebruik van de methode van Jefferies & Davies [16], waarin de soil type index $I_{c,JD}$ berekend wordt:

$$I_{c,JD} = \sqrt{(3 - \log Q_t \cdot (1 - B_q))^2 + (1,5 + 1,3 \log F_r)^2} \quad [-] \quad (7.1)$$

Waarin:

B_q de genormaliseerde wateroverdruk: $B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma'_{v0}} \quad [-]$,

met:

u_2 de poriewaterdruk gemeten achter de conus $[-]$.

u_0 de steady state poriewaterdruk is $[-]$.

Indien u_2 niet gemeten is, kan u_2 gelijk genomen worden aan u_0

F_r het genormaliseerde wrijvingsgetal: $F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma'_{v0}} \quad [-]$.

Q_t de genormaliseerde conusweerstand: $Q_t = \frac{q_t - \sigma'_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad [-]$,

met:

q_t conusweerstand gecorrigeerd voor poriewaterdruk [MPa],

$$q_t = q_c + u_2(1 - a)$$

waarin :

q_c conusweerstand [MPa]

a "oppervlakte ratio" die hoort bij de gebruikte conus (op te vragen bij fabrikant) $[-]$

f_s wrijvingsgetal [MPa],

σ'_{v0} totale verticale spanning [MPa], waarbij σ_{v0} kan worden geschat uit de diepte ten opzichte van het maaiveld en het volumiek gewicht van de bovenliggende grondlagen.

σ'_{v0} effectieve verticale spanning [MPa]: $\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$.

Ten behoeve van bepaling van de verticale spanning kan het volumiek gewicht, γ , geschat worden uit de sondering via de correlatie van Robertson (2010), zie Shuttle en Jefferies [4]:

$$\gamma = \gamma_w \cdot 0,27 \log(R_f) + 0,36 \log\left(\frac{q_t}{p_a}\right) + 1,236 \quad (7.1b)$$

waarin:

p_a atmosferische druk, in dezelfde eenheid als q_t

γ_w volumiek gewicht van water, in dezelfde eenheid als γ

Tabel 7.1 geeft soil types voor de verschillende ranges van $I_{c,JD}$.

Tabel 7.1 Relatie tussen $I_{c,JD}$ en soil type

$I_{c,JD}$	Soil type
$I_{c,JD} > 3,22$	Organische grond, veen
$2,82 < I_{c,JD} < 3,22$	Kleien
$2,54 < I_{c,JD} < 2,82$	Silt mengsels – kleiige silt tot siltige klei
$1,90 < I_{c,JD} < 2,54$	Zand mengsels – siltig zand tot zandige silt
$I_{c,JD} < 1,90$	Zanden – schoon zand tot siltige zanden

Aandachtspunten

Volgens Van den Ham [18] blijkt deze methode in vergelijking met andere classificatiemethoden de meest geschikte voor de Nederlandse ondergrond. Indien daar aanleiding voor is kunnen uiteraard ook andere classificatiesystemen gebruikt worden op basis van sonderingen, zoals waarin andere aspecten worden meegenomen die waarschijnlijk invloed hebben op de verwekingsgevoeligheid van zand:

- Schnaid et al [12], waarin ook de aspecten aging en cementatie worden beschouwd, welke mogelijk van belang zijn voor verwekingsgevoeligheid van zand.
- Schneider et al [2], waarin onderscheid wordt gemaakt in de mate van drainage tijdens het indringen van de conus.

Volgens Van den Ham [18] zouden deze methoden eerst verder onderzocht moeten worden om vast te stellen of dit (betere) alternatieven zijn voor de methode van Jefferies & Davies [16].

7.2.2 *Vergelijken lokaal grondonderzoek met SOS*

Het updaten van de SOS met lokaal grondonderzoek tot een lokaal stochastisch ondergrondmodel wordt beschreven in Hijma en Kruse [10].

7.2.3 *Eigenschappen per zandlaag*

7.2.3.1 *$F_{cohesivelayers}$*

Wat is het

Maat voor de aanwezigheid van klei- en/of veenlaagjes binnen de voor zettingsvloeiing gevoelige zand- en siltlagen die aanwezig zijn in de vooroever tussen de geulrand en $0,5 \bullet H_R$ onder de teen van de geul, volgens de definitie in Figuur 6.4. Indien de samenstelling van de zand- en siltlaag overeenkomt met die in een "gemiddelde" grondopbouw in Zeeland, geldt $F_{cohesivelayers} = 1$. De aanwezigheid van veel klei- en veenlaagjes leidt tot een grotere kans op een onbeheerste bresvloeiing.

Hoe te bepalen

De parameter heeft vooralsnog een vrij kwalitatief karakter. Daarom kunnen er geen duidelijke criteria gegeven worden voor de wijze van bepaling. Wellicht kan een koppeling met de eenheden in de globale SOS gemaakt worden. Er wordt niet verwacht dat dit op korte termijn (voor 2017) verbeterd kan worden.

(0,5m < laagdikte < 5m)		$F_{cohesivelayers}$
Vrijwel geen klei- en/of veenlaagjes		1/3
Beperkt aantal klei- en/of veenlaagjes		1
Groot aantal klei- en/of veenlaagjes		3

7.2.3.2 *State parameter ψ*

Wat is het

De state parameter is een maat voor de verwekingsgevoeligheid van zand. Meer precies is het het verschil tussen het actuele poriëngetal van het zand en het poriëngetal van het zand in critical state bij dezelfde spanning.

Hoe te bepalen

De waarde van de state parameter wordt bepaald volgens de methode van Shuttle en Jefferies [4], voor de zand- en siltlagen waarvan de onder- en bovengrenzen zijn bepaald op basis van de SOS of op basis van de methode beschreven in paragraaf 7.2.1. In dat geval moeten alleen de lagen beschouwd worden waarin $I_{C,JD} < 2,54$ over minimaal 0,5 m.

Binnen een zand- of siltlaag wordt niet één waarde van de state parameter bepaald. Het betreft dan ook geen directe invoerparameter voor de beoordelingsmethoden. In paragraaf 7.2.4.1 wordt beschreven hoe de verschillende waarden van de state parameter die binnen elk van de relevante zand- of siltlagen zijn bepaald kunnen worden omgerekend in een karakteristieke waarde van de overall parameter: $\psi_{5m, kar}$.

De state parameter kan het makkelijkst bepaald worden uit een sondering. Minimaal moet een standaard (elektrische) druksondering met meting van de kleef of mantelwrijving worden uitgevoerd. Extra informatie kan verkregen worden door het gebruik van een piëzoconus, bij voorkeur met een zogenaamde u_2 waterspanningssensor. Nog meer nauwkeurigheid kan behaald worden met een seismische sondering. In navolgend stappenplan worden defaultwaarden gegeven voor bepaalde parameters voor het geval een seismische sondering niet kan worden uitgevoerd of beschikbaar is.

Als er grindhoudende lagen zijn, of andere harde lagen, zijn bijzondere maatregelen nodig om met een sondering op diepte te komen. Soms is het voldoende om de techniek van 'spoelsonderingen' toe te passen. In andere situaties kan het nodig zijn om eerst een boring uit te voeren, door de harde laag heen, om vervolgens een sondering uit te voeren in de onderliggende, zachtere lagen.

Op basis van Van den Ham [18] wordt aanbevolen de methode van Shuttle en Jefferies [4] te gebruiken. Die methode is als volgt:

Bepaal de state parameter ψ van minimaal 0,5 m dikke lagen waarvoor volgens vergelijking (7.1) $I_{C,JD} < 2,54$ is:

$$\psi = -\frac{\ln(Q_p/k)}{m} \quad (7.2)$$

De coëfficiënten k en m worden gegeven in (7.4) en (7.5). Q_p is de genormaliseerde dimensieloze conusweerstand:

$$Q_p = \frac{(q_t - p)}{p'} \quad (7.3)$$

waarin:

q_t conusweerstand gecorrigeerd voor poriewaterdruk [MPa]

$$q_t = q_c + u_2(1 - a)$$

waarin :

q_c conusweerstand [MPa]

a "oppervlakte ratio" die hoort bij de gebruikte conus (op te vragen bij fabrikant) [-]

p gemiddelde totale spanning; $p = 1/3 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ [MPa],

p' gemiddelde effectieve spanning; $p' = 1/3 (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$ [MPa].

σ_1, σ_2 en σ_3 zijn de spanningen in de drie principiële spanningsrichtingen; het accent geeft aan dat het om effectieve spanningen gaat.

In de praktijk kan p' worden geschat door σ'_1 als verticale effectieve spanning (σ'_{v0}) te nemen en $\sigma'_2 = \sigma'_3 = K_0 \sigma'_1$, waarin K_0 de neutrale gronddrukcoëfficiënt is: $K_0 \approx 1 - \sin(\varphi')$, waarin φ' de effectieve wrijvingshoek is en $\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$, waarin u_0 de steady state poriewaterdruk is. σ_{v0} kan worden geschat uit de diepte ten opzichte van het maaiveld en het volumiek gewicht van de bovenliggende grondlagen.

$$k = (f_1(G_0/p') \cdot f_2(M) \cdot f_3(N) \cdot f_4(H) \cdot f_5(\lambda) \cdot f_6(v))^{1,45} \quad (7.4)$$

$$m = 1,45 \cdot f_7(G_0/p') \cdot f_8(M) \cdot f_9(N) \cdot f_{10}(H) \cdot f_{11}(\lambda) \cdot f_{12}(v) \quad (7.5)$$

De functies f_1 tot f_{12} zijn:

$$f_1(G_0/p') = 3,79 + 1,12 \ln(G_0/p')$$

$$f_2(M) = 1 + 1,06(M - 1,25)$$

$$f_3(N) = 1 - 0,30(N - 0,2) \approx 1,0$$

$$f_4(H) = (H/100)^{0,326}$$

$$f_5(\lambda) = 1 - 1,55(\lambda - 0,01)$$

$$f_6(v) = 1,0$$

$$f_7(G_0/p') = 1,05 + 0,46 \ln(G_0/p')$$

$$\begin{aligned}
 f_8(M) &= 1 - 0,40(M - 1,25) \\
 f_9(N) &= 1 - 0,30(N - 0,2) \approx 1,0 \\
 f_{10}(H) &= (H/100)^{0,15} \\
 f_{11}(\lambda) &= 1 - 2,21(\lambda - 0,01) \\
 f_{12}(v) &= 1,0
 \end{aligned}$$

waarin:

G_0	small strain shear modulus [MPa].
p'	in situ gemiddelde effectieve spanning [MPa].
M	helling van de critical state line in het p' - q vlak [-].
N	scaling parameter voor de stress dilatancy, een NorSand model parameter [-].
H	plastic hardening modulus, een NorSand model parameter [-].
λ	helling van de critical state line in het e - $\ln p'$ vlak [-].
v	Poisson's ratio [-].

De small strain shear modulus G_0 kan worden afgeleid uit de seismische schuifgolfsnelheid V_s :

$$G_0 = (\gamma_{nat}[kPa]/9,81 [m/s^2] \cdot V_s^2[m/s])/1000 [MPa] \quad (7.6)$$

Indien geen seismische sondering is uitgevoerd kan $G_0/p' = 1500$ worden aangehouden. Voor een nauwkeurige bepaling zouden M , λ en H bepaald moeten worden op basis van triaxiaalproeven op grondmonsters in het lab. Als zand minder dan 5% fines bevat ($I_{c,JD} < 1,90$) kunnen deze triaxiaalproeven op opgebouwde monsters worden uitgevoerd. Indien de zand- en siltlagen meer dan 8% klei bevatten, kunnen triaxiaalproeven uitgevoerd worden op ongeroerde monsters, verkregen met standaard monsternametechnieken. In andere gevallen zijn bevroren monsters nodig. In het geval dat geen triaxiaalproeven beschikbaar zijn, kunnen de parameters geschat worden met de volgende correlaties:

$$\lambda = \frac{1/(34 - 10 \cdot I_{c,JD})}{2,303} \quad (7.7)$$

H kan als volgt, iteratief, geschat worden:

$$H_{start} = 150 \quad (7.8)$$

Met $H = H_{start}$ wordt ψ_{start} berekend met vergelijkingen 7.2 – 7.9.

Dan:

$$H_{update} = 150 - 400 \cdot \psi_{start} \quad (7.9)$$

Daarna wordt ψ berekend met vergelijkingen 7.2 – 7.9 met $H = H_{update}$. Door deze update zal de state parameter toenemen met circa 0.05 a 0.1.

M kan worden berekend uit de (kritieke) inwendige hoek van wrijving ϕ' met:

$$M = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (7.10)$$

Als de (kritieke) inwendige hoek van wrijving niet bekend is, kan $M = 1,26$ worden genomen (overeenkomstig $\phi' = 32^\circ$).

Aandachtspunten

Als het zand > 5% fines (<0.063 mm) bevat en het zand zich niet volledig gedraineerd gedraagt tijdens conus indringing, dus $B_q \neq 0$ of $I_{c,JD} > 1,90$, is de methode van Shuttle en Jefferies [4] in principe niet geldig, omdat deze alleen voor volledige gedraineerde conusindringing is afgeleid. Een methode voor niet volledige drainage is thans nog niet beschikbaar. Een optie is om de indringingsnelheid van de conus zodanig te reduceren, dat wel

volledige drainage kan plaatsvinden, dus $B_q = 0$, of vast te houden aan de standaard indringingssnelheid van 2 cm/s en een overschatting van de state parameter voor zanden waarin geen volledige drainage plaatsvindt ($B_q \neq 0$) te accepteren.

7.2.3.3 d_{50}

Wat is het

De 50-percentielwaarde van de korrelverdeling [m].

Hoe te bepalen

Verwezen wordt naar paragraaf 7.2.4.2, waarin de parameter $d_{50, \text{gemiddeld}}$ wordt besproken, hetgeen een directe invoerparameter is voor de gedetailleerde toets

7.2.3.4 d_{15}

Wat is het

De 15-percentielwaarde van de korrelverdeling [m].

Hoe te bepalen

Verwezen wordt naar paragraaf 7.2.4.3, , waarin de parameter $d_{15, \text{gemiddeld}}$ wordt besproken, hetgeen een directe invoerparameter is voor de gedetailleerde toets

7.2.4 *Equivalent parameters*

Met equivalente parameters worden parameters bedoeld met één waarde die van toepassing is voor alle zand- en siltlagen die gevoelig zijn voor zettingsvloeiing die voorkomen tussen het niveau op $0,5H_R$ onder de teen van het onderwatertalud en de geulrand, of de gemiddelde waterstand indien deze hoger ligt dan de geulrand. Deze equivalente parameters zijn nodig voor de gedetailleerde beoordelingsmethode. Het betreffen karakteristieke waarden.⁶

7.2.4.1 ψ_{5m}

Wat is het

De waarde van de state parameter ψ over een cumulatieve hoogte van in totaal 5 m zand- en siltlagen, zoals gedefinieerd in paragraaf 7.2.1, tussen het niveau op $0,5H_R$ onder de teen van het onderwatertalud en de geulrand, of de gemiddelde waterstand indien deze hoger ligt dan de geulrand [m t.o.v. NAP.].

Hoe te bepalen

Zolang er in SOS nog geen defaultwaarden voor karakteristieke waarden van ψ_{5m} beschikbaar zijn, of als deze om een andere reden niet gebruikt worden, kan de parameter uit lokaal uitgevoerde sonderingen bepaald worden. Bij lokaal grondonderzoek gaat het om onderzoek binnen een meetgebied waarbinnen regionale variaties geen rol spelen. Wellicht is dit voor zandlagen enkele honderden meters. De bepaling van $\psi_{5m, \text{kar}}$ gebeurt in de volgende stappen:

1. Per sondering worden eerst de boven- en ondergrenzen van de zand- en siltlagen bepaald zoals beschreven in paragraaf 7.2.1.
2. Vervolgens wordt voor alle sondeerwaarden in de zand- en siltlagen de waarde van ψ berekend zoals beschreven in paragraaf 7.2.1.
3. Dit levert een profiel van ψ op zoals het voorbeeld in Figuur 7.1.
4. Vervolgens wordt zoals in Figuur 7.1 schematisch weergegeven ψ_{5m} berekend. Als voorbeeld: als er twee zandlagen zijn, één met een dikte van 4 m dik en de ander van 6 m, hebben we in totaal 10 m zand. Als er elke 2 cm een sondeerwaarde is, wordt

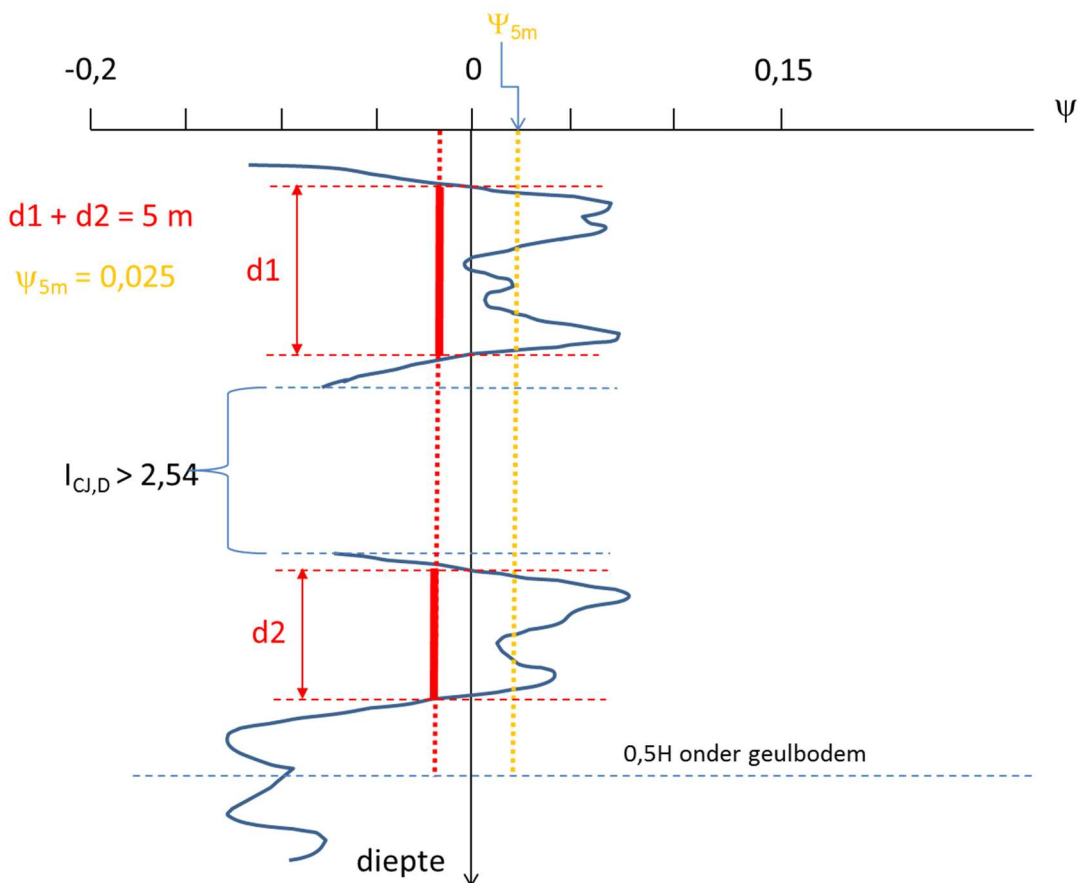
⁶ Het plan bestaat om voor alle SOS eenheden waarvoor is vastgesteld dat die relevant zijn voor zettingsvloeiing (in totaal ca. 12 eenheden) default karakteristieke waarden voor deze equivalente parameters bepaald gaan worden. Zolang deze waarden nog niet bepaald zijn of indien er aanleiding is te veronderstellen dat op basis van lokaal grondonderzoek tot een betere bepaling van de karakteristieke waarden kan worden gekomen, kunnen de methoden in de volgende twee paragrafen worden gebruikt.

voor elke sondeerwaarde (mits $I_{C,D} < 2,54$) de state parameter berekend. Vervolgens worden de 250 hoogste waarden geselecteerd. Het gemiddelde van deze 250 waarden is ψ_{5m} .

5. Voor alle sonderingen wordt ψ_{5m} bepaald.

6. Op basis van de beschikbare sonderingen kan nu per laag de gemiddelde waarde van ψ_{5m} , $\psi_{5m,gem}$, worden bepaald. Vervolgens moet de spreiding van ψ_{5m} worden bepaald. De onzekerheid van de state parameter heeft twee bronnen: onzekerheid ten gevolge van transformatie van de sondeerwaarden in de state parameter en onzekerheid ten gevolge van ruimtelijke variabiliteit van gemeten sondeerwaarden in zowel verticale als horizontale richting. Een deel van de ruimtelijke variabiliteit wordt gedekt door te werken met ondergrondscenario's. Het gaat hier dus om de ruimtelijke variabiliteit binnen het grondopbouwscenario. De standaardafwijking per grondlaag binnen een scenario kan als volgt bepaald worden: $\sigma(\psi) = \sqrt{\sigma^2(\psi_{methode}) + \sigma^2(\psi_{ruimtelijk})}$.

Aangenomen kan worden dat $\sigma(\psi_{methode}) = 0,03$ a $0,05$. De waarde van $\sigma(\psi_{ruimtelijk})$ wordt in principe op dezelfde manier bepaald als de spreiding ten gevolge van ruimtelijke variabiliteit van sterkteparameters ten behoeve van macrostabiliteitsberekeningen. Methoden worden beschreven in bijvoorbeeld het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies. Hierin wordt ook beschreven hoe om te gaan met regionale variatie, indien sonderingen uit een groter gebied worden gebruikt. De karakteristieke waarde van de ψ_{5m} kan dan als volgt bepaald worden: $\psi_{5m, kar} = \psi_{5m, gem} - \frac{t_{n-1}^{0,95} \sigma(\psi)}{\sqrt{n}}$



Figuur 7.1 Bepaling ψ_{5m} in één sondering

7.2.4.2 $d_{50, \text{gemiddeld}}$ Wat is het

De waarde van de 50-percentiel waarden van de korrelverdeling [m], gemiddeld over alle zand- en siltlagen dikker dan 1 m, zoals die gedefinieerd zijn in paragraaf 7.2.1, in het *onbestorte gedeelte* tussen de teen van het onderwatertalud en de geulrand, of tussen teen en de gemiddelde waterstand, indien deze hoger ligt dan de geulrand [m t.o.v. NAP]. Het gemiddelde betreft een gewogen gemiddelde, waarbij de weegfactor de dikte van de laag met een bepaalde waarde van d_{50} is.

Hoe te bepalen

In eerste instantie kan gebruik gemaakt worden van de default rekenwaarden van de d_{70} die per SOS eenheid worden gegeven in schematiseringshandleiding piping. De karakteristieke waarde van de $d_{50, \text{gemiddeld}}$ kan hieruit afgeleid worden, uitgaande van een uniformiteitscoëfficiënt van 1,5 a 2.

Indien grondmonsters uit de zand- en siltlagen ($I_{C,JD} < 2,54$) beschikbaar zijn kan een korrelverdeling bepaald worden, waarbij de d_{50} van de gehele fractie wordt bepaald (dus niet alleen de fractie $> 0,063$ mm).

7.2.4.3 $d_{15, \text{gemiddeld}}$ Wat is het

De waarde van de 15-percentiel waarden van de korrelverdeling, gemiddeld over alle zand- en siltlagen dikker dan 1 m, zoals die gedefinieerd zijn in paragraaf 7.2.1, in het *onbestorte gedeelte* tussen de teen van het onderwatertalud en de geulrand, of tussen de teen en de gemiddelde waterstand, indien deze hoger ligt dan de geulrand [m t.o.v. NAP]. Het gemiddelde betreft een gewogen gemiddelde, waarbij de weegfactor de dikte van de laag met een bepaalde waarde van d_{15} is.

Deze parameter is onderdeel van het toepassingscriterium van de eenvoudige toets en is ook een invoerparameter van het rekenmodel HMBreach, dat in D-FlowSlide 18.1.1 is geïmplementeerd. Met HMBreach kan een bresvloeiingsberekening worden uitgevoerd, bijvoorbeeld in een Toets op Maat. Het toepassingscriterium is bepaald op basis van gevoeligheidsberekeningen met HMBreach. In HMBreach wordt de d_{15} gebruikt voor bepaling van de doorlatendheid van het zand.

Hoe te bepalen

De $d_{15, \text{gemiddeld}}$ kan worden berekend uit de doorlatendheden die in de SOS voor de zandige eenheden worden gegeven worden ten behoeve van het faalmechanisme piping of op basis van korrelverdelingbepaling op monsters conform Eurocode 7.

Voor omrekening van de doorlatendheden uit SOS in d_{15} dient dezelfde formule gebruikt te worden als geïmplementeerd in HMBreach, waarmee d_{15} in doorlatendheid wordt omgerekend. Dit is de formule die door Den Adel is afgeleid:

$$k = \frac{g \cdot d_{15}^2}{160 \cdot \nu} \cdot \frac{n_0^3}{(1 - n_0)^2}$$

Oftewel:

$$d_{15} = \sqrt{\frac{k \cdot 160 \cdot \nu \cdot (1 - n_0)^2}{g \cdot n_0^3}}$$

Met:

- k doorlatendheid van het zand [m/s]
- g zwaartekrachtversnelling [m/s²]
- n_0 porositeit van het zand [-]. Hiervoor kan een waarde van 0.4 aangehouden worden
- ν kinematische viscositeit van water [m²/s]. Hiervoor kan een waarde van $1.2 \cdot 10^{-6}$ m²/s aangehouden worden (aannahme is een temperatuur van 13 °C).

Indien korrelverdelingen bepaald worden in het laboratorium, dient dat op monsters te gebeuren die bij voorkeur genomen zijn uit het onderwater talud. Voor bresvloeiing is vooral het zand dicht aan het oppervlak van het talud van belang. Representatieve zandmonsters kunnen daarom eenvoudig verkregen worden met een eenvoudige zandhapper (de “Van Veen grabber”). Omdat zettingsvloeiing vooral speelt in situaties waar sprake is van erosie, is de kans dat de relevante zandlaag is afgedekt door een sliblaag waarschijnlijk redelijk beperkt.

Aandachtspunten

De in SOS gegeven doorlatendheden zijn afgeleid voor het project VNK door Deltares en TNO, zie rapport [20]. Het zijn grove schattingen op basis van korrelgrootten en informatie uit REGIS, bestaande uit een combinatie van lab-tests en pompproeven. De herkomst van de doorlatendheden is echter slecht te herleiden en bevat waarschijnlijk flink wat expert judgment van de geoloog die de schattingen heeft gemaakt. Hier moet dus met voorzichtigheid mee worden omgegaan.

8 Voorbeeld

8.1 Introductie

In dit voorbeeld worden de schematiseringsstappen doorlopen voor de twee toetsen: de *eenvoudige* en de *gedetailleerde toets*.

8.2 Belastinggevallen

Dit voorbeeld betreft een dijkstuk met een zandige vooroever. De aangelegen rivier heeft invloed op de sedimentatie en erosie van het voorland, dat van invloed is op de schematisering van het dijkstuk. Daarnaast kunnen fluctuerende waterstanden een inleidend mechanisme voor zettingsvloeiing zijn.

8.3 Inventarisatie gegevens

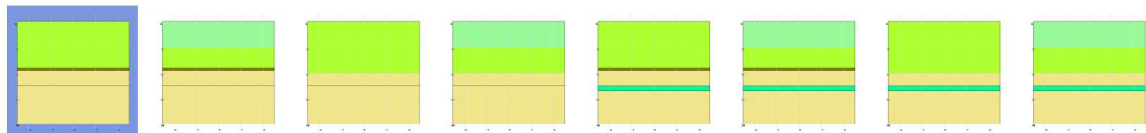
Een inventarisatie van de beschikbare data levert de benodigde informatie om tot een vakindeling te komen. Vanuit eerdere beoordelingen en andere geologische data-bronnen zijn in dit geval de volgende gegevens al beschikbaar:

- SOS model (dekkend in dit gebied).
- Relatief veel sonderingen (waarvan enkele met meting van waterspanning, u2) uitgevoerd tussen 1990 en 2000 (Dinoloket). Tussenafstand is ca. 100 m.
- Bathymetrische inmetingen (lodingen) tussen 2000 en 2013. Hieruit kunnen actuele profielen worden opgemaakt en morfologische veranderingen worden gedestilleerd.
- Side scan sonar opnames van 2013 ten behoeve van het in kaart brengen van steenbestortingen.

Voor dit voorbeeld is arbitrair een beoordelingsperiode van 5 jaar gekozen.

8.4 Vakindeling

Allereerst wordt de vakindeling conform SOS aangehouden. Dit segment is ca. 3,0 km lang en bevat 8 ondergrondscenario's in de SOS, zie Figuur 8.1. Op basis van het aantal sonderingen, boringen en andere gegevens kan het segment in meerdere segmenten opgeknipt worden. Daarnaast kunnen scenario's aangepast worden. In dit geval worden scenario's 5 t/m 8 uitgesloten, omdat het voor zettingsvloeiing niet relevant is of er zich wel of geen diepe kleilaag op NAP -24m bevindt (de rest van de profielen zijn identiek aan die van nr. 1 t/m 4). De aanwezige sonderingen komen overeen met de laagopbouw uit de SOS. De exacte opbouw en de parameters per laag wordt pas in de *gedetailleerde toets* behandeld. Voor de *eenvoudige toets* is de grondopbouw formeel niet relevant.



Figuur 8.1 SOS scenario's

Hierna worden dijksegmenten opgeknipt in dijkvakken onder behoud van andere informatie. Hierbij moet de geometrie per dijkvak gelijkwaardig zijn; de ondergrondscenario's wijzigen niet. Op basis van de dwarsprofielen (dijkhoogte, lengte voorland, geulhelling, geuldiepte) en aanwezige informatie zoals bestortingen wordt tot in totaal 7 dijkvakken gekomen.

Overwegingen die hierbij gemaakt zijn, worden onderstaand opgesomd:

- Dijkvakken 2 en 5 zijn in de laatste toetsronde gebleken niet relevant te zijn voor zettingsvloeiing, bijvoorbeeld omdat het talud vastgelegd is (bestort). Op basis daarvan wordt verwacht dat dit dijkvak gemakkelijk goedgekeurd wordt in de *eenvoudige toets*.

- Het stuk tussen dijkvak 2 en 5 wordt opgeknipt in twee delen, omdat op basis van de peilingen opgemaakt is dat de lengte van het voorland aanzienlijk verschilt (resp. 85 en 35 meter).
- Het zuidelijkste stuk wordt ook opgeknipt, omdat er zich in de bocht van de rivier kribben bevinden. Dit kan een indicatie zijn dat er lokaal meer of minder erosie plaatsvindt.
- De grenzen van dijkvakken 1 en 7 vallen samen met de grenzen van de SOS-segmenten waarin zij vallen.

De nu gemaakte vakindeling is niet definitief en kan nog worden gewijzigd gedurende de schematisering per vak. Nu zal voor dijkvak 3 worden beschreven hoe de schematisering per dijkvak uitgevoerd kan worden. Dit wordt aan de hand van de toetsprocedure gedaan, aangezien de verfijning van de schematisering samen gaat met de opeenvolgende toetsen.

8.5

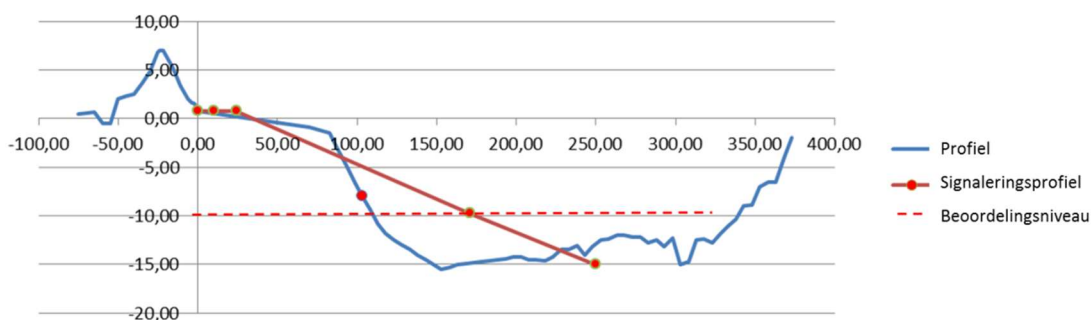
Eenvoudige toets

De *eenvoudige toets* is een geometrische toets, waarbij wordt nagegaan of het verwachte meest ongunstige profiel in de beoordelingsperiode (in dit voorbeeld 5 jaar) voldoet aan het schadelijkheids- en optredingscriterium. Hiervoor zijn basisgegevens van de geometrie en ontwikkeling van de geometrie in de tijd nodig.

Op basis van de morfologische veranderingen in het verleden en geologische opbouw (aanwezigheid kleilagen) kan een inschatting van de toekomstige geulontwikkeling gemaakt worden. Ter plaatse van de geulteen is in 11 jaar in verticale richting een verandering van ca. -3 tot -1 meter en lokaal van -5 tot -3 meter opgetreden. Gemiddeld komt dit dus neer op -0,3 meter verdieping per jaar. Bij het bestuderen van de morfologische ontwikkelingen is ook te zien dat er meer erosie optreedt dicht bij een brug die zich in één van de vakken bevindt. Voor het hier beoordeelde dijkvak 3 is dit nog niet van belang, maar voor dijkvak 4 zal dit wel zo zijn. In de SOS (volgende paragraaf) valt te zien dat in enkele SOS scenario's op NAP-16 m, dus ca. 1 m onder de huidige geulbodem, een kleilaag zit. Mogelijk zal deze kleilaag dus binnen enkele jaren bereikt worden. Waarschijnlijk zal de erosiesnelheid dan sterk afnemen. In de *eenvoudige toets* kan bij de bepaling van de meest ongunstige geometrie gedurende de beoordelingsperiode van 5 jaar in eerste instantie conservatief aangenomen worden dat de erosiesnelheid gelijk blijft als de kleilaag bereikt wordt.

In Figuur 8.2 geeft de blauwe lijn het meest recente profiel.

Op een gedeelte van het dijktraject is in verband met eerdere maatregelen tegen zettingsvloeiing bestorting op de vooroever aanwezig. De side scan sonar beelden geven de locatie aan van eventuele bestortingen. Daarop is te zien dat ter plaatse van dijkvak 4 en 6 vooroeverbetasting aanwezig is. In het beschouwde dijkvak 3 is er geen bestorting aanwezig. Op het beoordelingsniveau wordt nagegaan of het signaleringsprofiel landwaarts ligt ten opzichte van het meest ongunstige profiel in de beoordelingsperiode. In Figuur 8.2 is te zien dat dit voor het huidige profiel (blauwe lijn) al ruimschoots niet het geval is, hetgeen betekent dat niet wordt voldaan aan het schadelijkheids criterium in toetsstap E.1. Dus wordt doorgegaan naar toetsstap E.2.

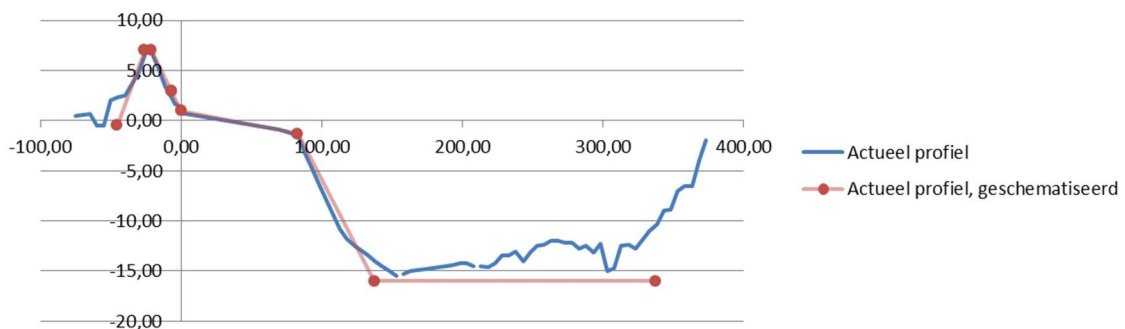


Figuur 8.2 Representatieve profiel voor dijkvak 3 met signaleringsprofiel en beoordelingsniveau ten behoeve van de eenvoudige toets

Voor de eenvoudige toetsstappen E.2 en E.3 moet de geometrie geschematiseerd worden tot een aantal karakteristieke punten, zoals uitgebreid beschreven in paragraaf 7.1. Iteratief wordt tot het meest ongunstige profiel in de beoordelingsperiode gekomen.

In het voorbeeld zou de teen van het onderwatertalud in eerste instantie op $x = 150$ en NAP-15m kunnen worden gekozen, zie Figuur 8.3. Er wordt gecontroleerd of er op dit niveau wel zand aanwezig is, anders zou het niveau te ongunstig gekozen zijn. Volgens de SOS ligt de bovenkant van de eventueel aanwezige kleilaag op NAP -16 m.

De geulrand wordt gekozen op $x=83$ en $\text{NAP}-1,3 = \text{m}$ omdat hier een sterke knik in het profiel zit. Echter, dit geschematiseerde profiel zou te weinig recht doen aan de steile helling van de geul, zie onderstaande afbeelding.

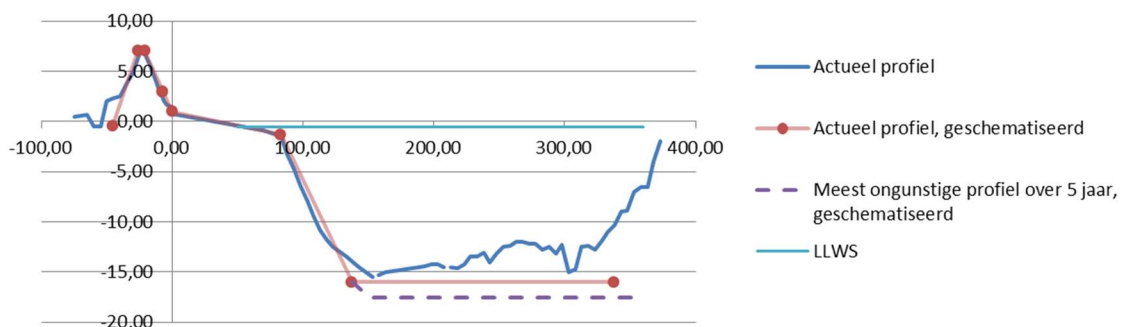


Figuur 8.3 Geschematiseerd profiel dijkvak 3

Het deel van de geulhelling tussen NAP-11 en NAP-15 m is echter wel flauwer, dus het gehele profiel steil schematiseren zou te conservatief zijn. Als indicatie kan aangehouden worden dat het volume grond "links" en "rechts" van de schematisering gelijk moeten zijn. Ook wordt het laagwater-niveau gedefinieerd. In dit geval wordt uit de "referentiewaterstanden" [14] afgeleid dat $\text{OLW} = \text{NAP} - 0,6 \text{ m}$.

Om de meest ongunstige geometrie *gedurende de beoordelingsperiode* te berekenen, wordt de oevermigratiesnelheid V_{lokaal} berekend. Extrapolatie van 5 m verdieping over 11 jaar (tussen 2000 en 2011) levert een (verwachte) geulverdieping op van 0,27 m per jaar, er (conservatief) van uitgaande dat de kleilaag op NAP-16 m die in enkele SOS scenario's aanwezig is geen remmende werking heeft. De geulbodem na 5 jaar zou dan op NAP-17,4 komen te liggen. Deze snelheid van de verdieping in verticale richting kan omgerekend worden in de equivalente oevermigratiesnelheid door deze snelheid te vermenigvuldigen met $\cot \alpha_R$. Dit komt neer op $0,27 \cdot 3,2 = 0,87 \text{ m / jaar}$.

Zoals eerder aangegeven zal gegeven de verwachte erosiesnelheid de kleilaag mogelijk al binnen de beoordelingsperiode bereikt worden. Voor de eenvoudige toets wordt er vanuit gegaan dat zodra de kleilaag bereikt is de erosiesnelheid niet vertraagt. Dit is conservatief. In Figuur 8.4 is met de gestippelde lijn de schematisering weergegeven die wordt gebruikt in de toets.



Figuur 8.4 Actueel en geschematiseerd actueel profiel en geschematiseerd aan einde beoordelingsperiode van 5 jaar (meest ongunstig)

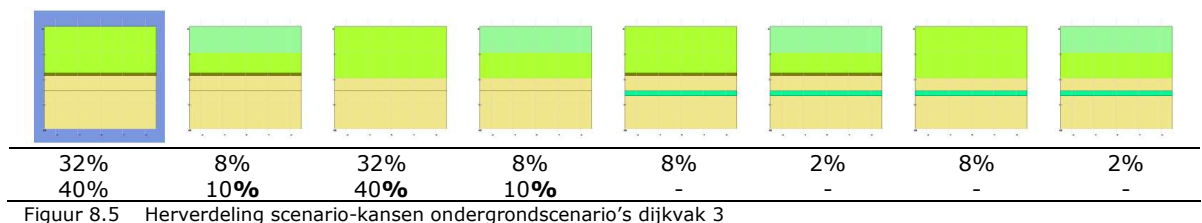
Op de side scan sonar beelden is geen bestorting op het voorland en/of het talud te zien. Er hoeft dus geen locatie van het einde van de bestorting gedefinieerd te worden.

Aan de hand van de geschematiseerde geometrie kunnen de toetsstappen E.2 en E.3 doorlopen worden. Indien er niet voldaan wordt aan deze *eenvoudige toets*, zal volgens de procedure een *gedetailleerde toets* uitgevoerd moeten worden. Hiervoor zal ook de ondergrond geschematiseerd moeten worden.

8.6

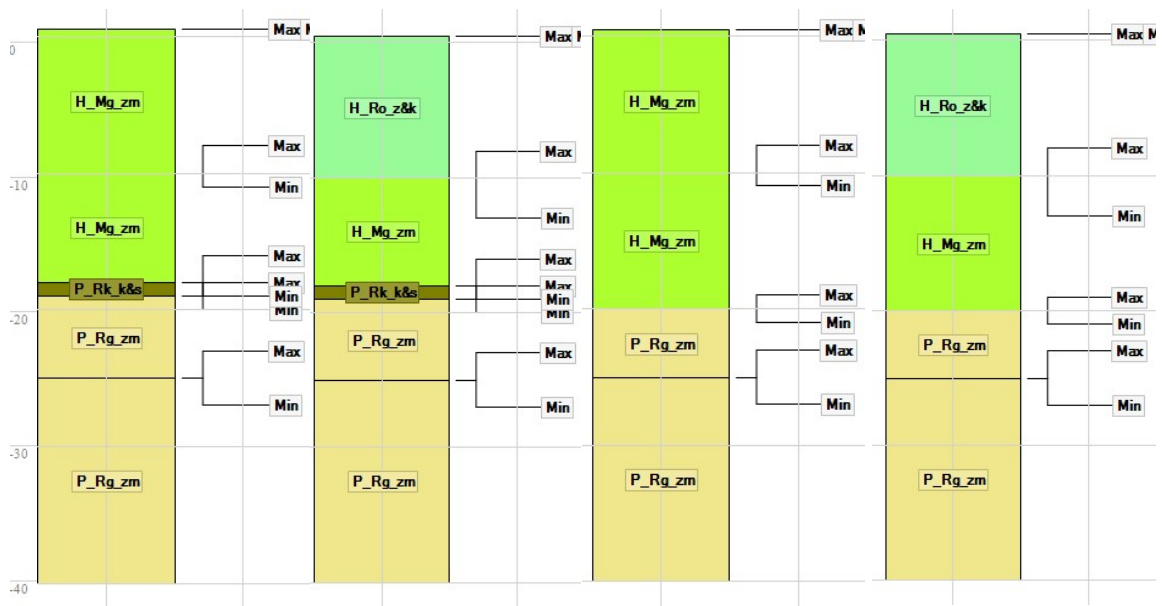
Gedetailleerde toets

Als een *gedetailleerde toets* op zettingsvloeiing moet worden uitgevoerd, zal per ondergrondscenario een optredingskans voor zettingsvloeiing moeten worden berekend. In de *eenvoudige toets* waren al 4 scenario's geëlimineerd, omdat deze onder het invloedsgebied van zettingsvloeiing liggen: invloedsdiepte zettingsvloeiing is maximaal 1,5 keer de geuldiepte = $15 \cdot 1,5 = 22$ meter onder NAP. De scenario-kansen (S_i) worden nu herverdeeld, zie Figuur 8.5.



Figuur 8.5 Herverdeling scenario-kansen ondergrondscenario's dijkvak 3

De scenario's zijn weergegeven in Figuur 8.6. De lagen bestaan uit H_Mg_zm en P_Rg_Zm (1 t/m 4) met al dan niet een toplaag van H_Ro_z&k (2 en 4) en/of een tussenkleilaag P_Rk_k&s waarvan de bovenkant zich op ca. NAP-16 m bevindt (1 en 3).



Figuur 8.6 Ondergrondscenario's dijkvak 3

De parameters $\cot \alpha_R$ en V_{lokaal} zijn al vastgesteld en verschillen niet per ondergrondscenario. Rekengediepte H_R verschilt: voor scenario's 1 en 2, waarin de tussenkleilaag voorkomt, wordt aangenomen dat als de geulbodem de kleilaag op NAP - 16 m bereikt, de geul niet verder zal verdiepen. Voor scenario's 3 en 4 zal erosie niet beperkt worden en na 5 jaar een diepte van NAP - 17,3 m bereiken.

De karakteristieke waarden van de parameters $\psi_{5m, kar}$, $d_{50, gem, kar}$ en $F_{cohesivelayers}$ moeten nu per ondergrondscenario worden vastgesteld.

Omdat $\psi_{5m, kar}$ lastig is te bepalen (er zijn daarvoor meerdere sonderingen in het dijkvak benodigd, bij voorkeur in het voorland) wordt in een eerste stap een conservatieve inschatting (dus een hoge waarde van $\psi_{5m, kar}$) op basis van ervaring of expert judgement gemaakt. Voor scenario's 1 en 3 zal de state parameter hoger zijn, omdat de afzetting vooral zandig is (H_Mg_zm). Voor scenario's 2 en 4 zal de state parameter wellicht iets lager zijn omdat de toplaag (H_Ro_z&k) zand en klei bevat. Conservatief wordt een state parameter van 0,10 voor scenario 1 en 3 en 0,05 voor scenario 2 en 4 aangehouden.

Per ondergrondscenario moet nu een waarde voor $F_{cohesivelayers}$ gegeven worden. De parameter heeft een kwalitatief karakter. Op basis van de sondeerbeelden lijken er in scenario's 1 en 3 relatief weinig kleilaagjes voor te komen en wordt een factor van 1/3 gebruikt, in scenario's 2 en 4 komen meer kleilaagjes voor en wordt een factor 1 gebruikt.

Er zijn nog geen boringen beschikbaar in het gebied, dus het voorspellen van de $d_{50, gem, kar}$ is lastig. Er wordt vooralsnog een conservatieve aanname gedaan: $d_{50, gem, kar} = 0,150$ mm.

Met alle bekende parameters kan de optredingskans op zettingsvloeiing per scenario worden berekend. Vervolgens kan de optredingskans zettingsvloeiing voor alle scenario's worden gecombineerd. Vervolgens kan de kans van overschrijden van de maximale inscharingslengte gegeven een vloeiing en de overschrijdingskans voor het dijkvak berekend worden. In deze stap wordt de kans op een inscharingslengte die voorbij de invloedzone van de dijk komt bepaald. Uit de legger of stabiliteitsberekeningen blijkt dat het voorland 83 m lang is en de invloedzone van de dijk 10 meter. De maximaal toelaatbare inscharingslengte is dus 73 m.

De maximaal toelaatbare faalkans per dijkvak in de *gedetailleerde toets* is 0,01 per km per jaar. Het beschouwde dijkvak 3 heeft een lengte van 200 m. De toelaatbare faalkans voor dijkvak 3 is dus $0,01/5=0,002$ per jaar.

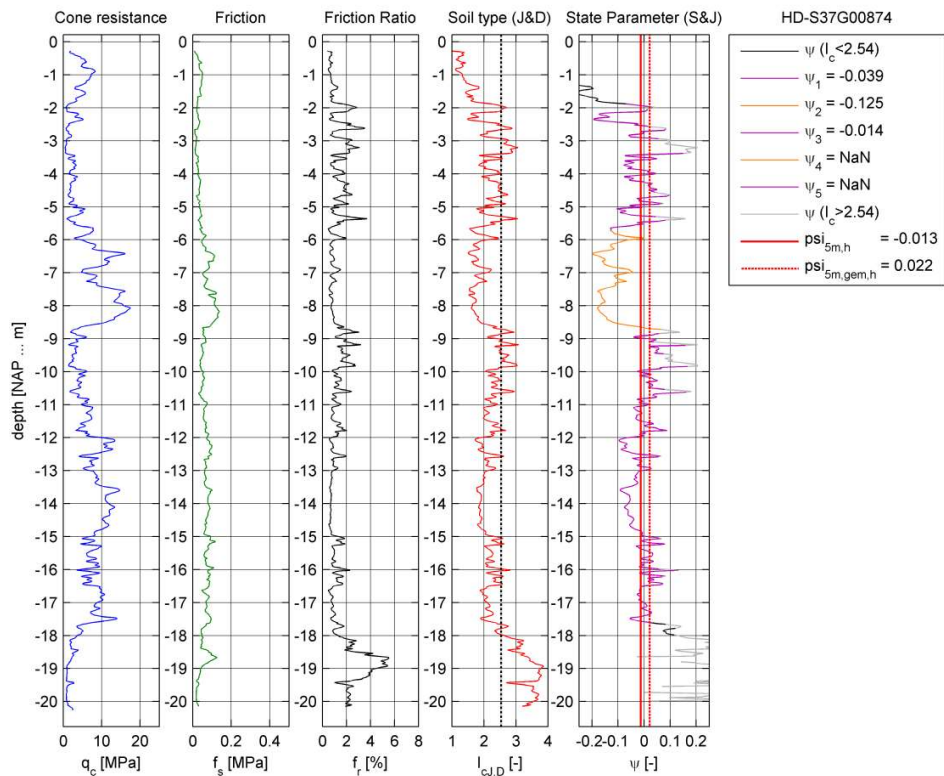
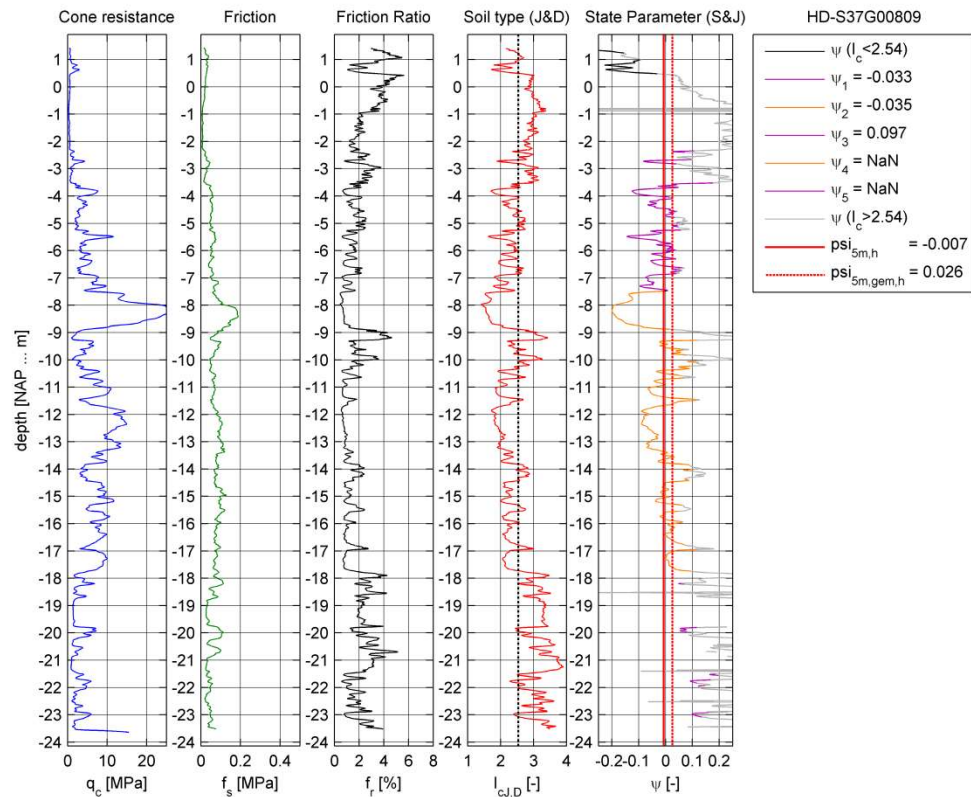
Als de berekende faalkans voldoet met de deels conservatief geschatte parameters, kan het dijkvak worden goedgekeurd. Is dit niet het geval, dan zal een verfijning van de grondparameters mogelijk verbetering kunnen opleveren. De *gedetailleerde toets* levert het volgende resultaat op:

Grond parameters	scen 1	scen 2	scen 3	scen 4
$\psi_{5m, kar}$	0,1000	0,0500	0,1000	0,0500
$d_{50, gem. kar}$	1,50E-04	1,50E-04	1,50E-04	1,50E-04
F_{coh}	0,33	3,33E-01	1,00	1,00E+00
V_{lokaal}	0,87	8,70E-01	0,87	8,70E-01
$V_{Zeeland}$	1,00	1,00E+00	1,00	1,00E+00
Optredingskans zettingsvloeiing				
F(ZV)	2,67E+00	8,54E-01	3,19E+00	1,05E+00
F(ZV) per dijkvak	5,35E-01	1,71E-01	6,38E-01	2,10E-01
P(ZV)	4,14E-01	1,57E-01	4,72E-01	1,89E-01
P(Si)	0,4	0,1	0,4	0,1
som P(fZV) over Si	3,89E-01	38,90%		
P(L>Lforeland)	1,46E-01	14,58%		
P(ZV) * P(L>Lforeland)	5,67E-02	5,67%		
Norm	2,00E-03	0,20%		
voldoet niet				

De kans op zettingsvloeiing die tot in de invloedzone reikt blijkt met 5,67% bijna een factor 30 groter dan de toelaatbare kans.

Voor de bepaling van de vervolgstappen kan gespeeld worden met de parameters om een indruk te krijgen van de relatieve invloed op de faalkans. Het kan zijn dat ψ_{5m} relatief veel bijdraagt aan de faalkans (omdat deze conservatief is aangenomen). Op basis hiervan kan besloten worden of het zinvol is om een of meerdere sonderingen op het voorland te laten doen en hier ψ_{5m} voor uit te werken.

Voor beide scenario's wordt een sondering uitgewerkt. De sonderingen worden geselecteerd op basis van de mate waarin zij overeenkomen met de grondopbouw in de SOS scenario's. De sonderingen zijn uitgevoerd vanaf de kruin van de dijk. Omdat in dit voorbeeld sprake is van een rivier die zich insnijdt, mag aangenomen worden dat de grondopbouw in het voorland vergelijkbaar is met die onder de dijk. Voor scenario's 1 en 3 wordt de bovenste sondering in Figuur 8.7 representatief geacht. Voor scenario's 2 en 4 wordt de onderste sondering gebruikt. Daarin zijn tussen NAP-1 m en NAP-6 m duidelijk kleilaagjes zichtbaar, hetgeen te zien is aan het grillige verloop van het wrijvingsgetal. Te zien is dat ψ_{5m} gelijk is aan 0,026 respectievelijk 0,022.



Figuur 8.7 Bepaling $\psi_{5m,gem}$ (rechter kolom) uit de sondering die representatief is voor ondergrondscenario's 1 en 3 (boven) en voor ondergrondscenario's 2 en 4 (onder)

Met de gevonden waarden van ψ_{5m} wordt tot de volgende kansen gekomen:

Grondparameters	scen 1	scen 2	scen 3	scen 4
ψ_{5m}	0,0260	0,0220	0,0260	0,0220
$d_{50,gemiddeld}$	1,50E-04	1,50E-04	1,50E-04	1,50E-04
F_{coh}	0,33	3,33E-01	1,00	1,00E+00
V_{lokaal}	0,87	8,70E-01	0,87	8,70E-01
$V_{Zeeland}$	1,00	1,00E+00	1,00	1,00E+00
Optredingskansen zettingsvloeiing				
F(ZV)	4,97E-01	4,54E-01	6,30E-01	5,80E-01
F(ZV) per dijkvak	9,93E-02	9,08E-02	1,26E-01	1,16E-01
P(ZV)	9,45E-02	8,68E-02	1,18E-01	1,09E-01
P(S _i)	0,4	0,1	0,4	0,1

som P(fZV) over S _i	1,05E-01	10,48% 14,58% 1,53% 0,20%
P(L>L _{foreland})	1,46E-01	
P(ZV) * P(L>L _{foreland})	1,53E-02	
Norm	2,00E-03	

voldoet
niet

De berekende kans is nog steeds bijna een factor 8 groter dan de toelaatbare kans. Uiteraard moet hierbij opgemerkt worden dat de waarden van ψ_{5m} voor beide grondopbouwscenario's gebaseerd zijn op telkens slechts één sondering. Er is dus geen rekening gehouden met spreiding door ruimtelijke variabiliteit. Het is dus onduidelijk of de gevonden waarden inderdaad als karakteristieke waarde van ψ_{5m} beschouwd mogen worden. Om $\psi_{5m,kar}$ beter te kunnen bepalen zouden binnen het dijkvak meerdere sonderingen moeten worden uitgevoerd, bij voorkeur in het voorland. Voor de bepaling van de karakteristieke waarde op basis van lokaal grondonderzoek wordt in paragraaf 7.2.4.1 een handreiking gegeven. Indien op basis van meerdere sonderingen blijkt dat $\psi_{5m,kar}$ hoger is dan hier aangenomen, zal dat tot nog hogere berekende kansen leiden.

8.7

Conclusies

In het onderzochte dijkvak 3 kan zowel in de *eenvoudige* als *gedetailleerde toets* niet worden aangetoond dat de kans dat een zettingsvloeiing tot in de invloedszone van de waterkering komt voldoende klein is. Er kan in deze toetsen dus niet tot een oordeel "goed" worden gekomen. Mogelijk valt het resultaat nog wat ongunstiger uit indien de karakteristieke waarde van ψ_{5m} zou worden bepaald op basis van meerdere sonderingen.

Er kan nu een afweging gemaakt worden of de beoordeling verder verdiept wordt in een *toets op maat* of dat direct overgegaan wordt tot maatregelen. De kosten van maatregelen ten opzichte van de kosten van aanvullende onderzoek kunnen hierin een rol spelen, maar ook de grootte van het gat tussen de berekende en toelaatbare kans in de *gedetailleerde toets*. In de meeste gevallen, zoals ook in dit voorbeeld, zal het zinvol zijn om in ieder geval de volgende stap uit te voeren, omdat deze met redelijk beperkte inspanning uitgevoerd kan worden (in principe geen extra grond- en labonderzoek of geavanceerde rekenmodellen nodig):

- Geeft het meenemen van (de kansverdeling van) het verstoringsprofiel bij de (relevante) directe faalmechanismen problemen of niet. Uiteindelijk gaat het erom dat de kans dat een zettingsvloeiing, al dan niet via een direct faalmechanisme zoals overloop, piping, macrostabiliteit, voldoende klein is.

Als dit punt geen oplossing biedt kan gedacht worden aan:

- Meer lokaal grondonderzoek bestaande uit extra sonderingen en/of boringen. Hiermee kunnen wellicht SOS scenario's aangepast worden en kan de karakteristieke waarde van ψ_{5m} beter bepaald worden.
- Laboratoriumonderzoek, al dan niet in combinatie met geavanceerde rekenmodellen voor verweking en bresvloeiing, zodat de kans op het optreden van een verwekingsvloeiing of een bresvloeiing en het schadeprofiel exacter bepaald kunnen worden.

Verantwoording

Deze *Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing* is in opdracht van Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving opgesteld door Deltares. Dit document is als onderdeel van het WBI 2017 besproken met keringbeheerders in de WBI-coördinatiegroep en beoordeeld door de ENW Voorbereidingsgroep WBI 2017.

Schrijver:

G.A. van den Ham (Deltares).

Regie:

J. van der Hammen (RWS).
K.S. Lam (Deltares).
M.M. de Visser (Arcadis).

Review:

T.P. Stoutjesdijk (Deltares).
R. Slomp (RWS).
M. Bottema (RWS)

Eindredactie:

R. 't Hart (Deltares).
A. Bizzarri (RWS).
M. Hazelhoff (RWS).

Eindcontrole 2019:

Don de Bake (RWS)
R.M. Slomp (RWS).
J.G. Knoeff (Deltares).
J. de Waal (Deltares)

A Literatuur

- [1] *A semi-empirical method to assess flow-slide probability.* G.A. van den Ham, M.B. de Groot en D.R. Mastbergen. In: Krastel et al (eds): Proceedings of the 6th International Symposium Submarine mass movements and their consequences, pp. 213 - 223. 2014.
- [2] *Analysis of factors influencing soil classification using normalized piezocone tip resistance and pore pressure parameters.* J.A. Schneider, M.F.Randolph, P.W. Mayne and N.R. Ramsey. Journal Geotechnical and Geo-environmental Engrg. 134 (11): 1569-1586. 2008.
- [3] *CUR Aanbeveling Oeverstabiliteit bij zandwinputten.* CUR113. Gouda, 2008
- [4] *Dimensionless and unbiased CPT interpretation in sand.* D.A. Shuttle and M.G. Jefferies. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 22, pp. 351 – 391, 1998.
- [5] *Fenomenologische beschrijving faalmechanismen WBI.* Rijkswaterstaat - Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.
- [6] *Field Measurements to Investigate Submerged Slope Failures.* T.A. van Duinen, A. Bezuijen, G.A. van den Ham en V. Hopman, In: Krastel et al (eds): Proceedings of the 6th International Symposium Submarine mass movements and their consequences, pp. 13 - 21. 2014.
- [7] *Flow slide prediction method: influence of slope geometry.* T.P. Stoutjesdijk, M.B. de Groot and J. Lindenberg. Canadian Geotechnical Journal 35, pp. 34 – 54. 1998.
- [8] *Globale stochastische ondergrondschematisatie (WTI-SOS) voor de primaire waterkeringen.* M.P. Hijma, K.S. Lam. Deltares rapport 1209432-000-GEO-0006. Delft, september 2015.
- [9] *Handleiding datamanagement WBI 2017.* Rijkswaterstaat - Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.
- [10] *Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS.* G. Kruse, M. Hijma . Deltares rapport 1209432-004-GEO-0002, Delft, december 2015.
- [11] *Handreiking Toetsen Voorland Zettingsvloeiing t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde.* Uitgave: Rijkswaterstaat, oktober 2012.
- [12] *In situ test characterisation of unusual soils.* F. Schnaid, B. M. Lehané and M. Fahey, Keynote Lecture. Proc. 2nd Int. Conf. Geotech. Geophys. Site Characterisation, Porto 1, 49–74. 2004.
- [13] *Probabilistic seismic hazard assessment for the Netherlands.* Th. de Crook. Geologie en Mijnbouw 72: 1-13, 1993.
- [14] *Referentiewaarden waterstanden.* Rijkswaterstaat.
http://www.rijkswaterstaat.nl/images/Referentiewaarden%20waterstanden_tcm174-326696.pdf, Rijkswaterstaat, 1985.
- [15] *Resultaten van het vooroeveronderzoek langs de Zeeuwse stromen.* N.H. Wilderom, Rijkswaterstaat Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Nota 75.2, januari 1979.

- [16] *Soil classification by the cone penetration test: Discussion*. M.G. Jefferies, M.P. Davies, Canadian Geotechnical Journal 28, 1, pp 173-468. 1991.
- [17] *Stormvloedkering Oosterschelde: ontwikkeling ontgrondingskuilen en stabiliteit bodembescherming, Hoofdrapport*. T.P. Stoutjesdijk, D.R. Mastbergen en M.B. de Groot. Deltares rapport 1206907-005-GEO-0004. Delft november 2012.
- [18] *WTI cluster Indirecte faalmechanismen – Update of detailed assessment method on flow slides - final*. G.A. van den Ham, Deltares rapport, kenmerk 1209439-002-GEO-0001, mei 2015.
- [19] *Achtergrondrapport Ontwerpinstrumentarium 2014 Behorende bij Handreiking Ontwerpen met Overstromingskansen (OI2014v4)*. Rijkswaterstaat rapport, december 2016.
- [20] *VNK: bepalen kentallen doorlatendheid*. Notitie van TNO Energie en Deltares (auteur: S.H.L.L. Gruijters), kenmerk 1206930, 3 juli 2014.
- [21] *Beantwoording helpdeskvraag 17 10 0639 omtrent de bepaling van de faalkanseis bij afschuiving voorland (VLAF)*. KPR memo (auteur: Bob van Bree), 1 februari 2018.
- [22] *CUR Report Artificial sand fills in water*. CUR report no. 152. Gouda, 1992

B Parameterlijst

B.1 Schematisering

Toetspoor	WTID / letters/symbolen	Code (Aquo)	Begrip / WTI-parameter	Vertaling	Grootheid (Aquo)	Object (Aquo)	Eenheid (Aquo)	Hoedanigheid (Aquo)	Betrekking op object (Aquo)	Waardebewerkingsmethode (Aquo)	Overiglocatie	Waardebepalingsmethode	Toetslaag	Afs te leiden uit / Opmerkingen	
Zettingsvloeiing	S01		Geometrie boven waterlijn (bepaald 10 jaar)	Geometry above water line until 10 years								Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing	1		
Zettingsvloeiing	S02		Geometrie boven waterlijn (bepaald buitenwal dijk)	Geometry above water line until outer crest dike								Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing	1		
Zettingsvloeiing	S03		Langste steedsbestanding vanaf buitenwal dijk	Length of slope from toe dike towards the under water slope								Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing	1		
Zettingsvloeiing	S04		Langste steedsbestanding van de ondergrond	Subsurface layer model								Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing	1	Met V08 om V12 kan soil type indicie ten	
Zettingsvloeiing	S05	d_{50}	d_{50} per zandlaag > 1m	d_{50} per sand layer > 1m	Korrelgrootte	Zandlaag	m	-		50-percentiel (mediaan)		Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing	1		
Zettingsvloeiing	S06	d_{10}	d_{10} per zandlaag > 1m	d_{10} per sand layer > 1m	Korrelgrootte	Zandlaag	m	-		15-percentiel		Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing	1		
Zettingsvloeiing	S07	γ_{sat}	Verzadigt volumiek gewicht per grondlaag	Soil unit weight saturated (below phreatic level)	Volumiek gewicht	Grondlaag	kN/m ³	Verzadigt		-		Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing	1 en 2		
Zettingsvloeiing	S08	γ_{unsat}	Onverzadigt volumiek gewicht per grondlaag	Soil unit weight unsaturated (above phreatic level)	Volumiek gewicht	Grondlaag	kN/m ³	Onverzadigt		-		Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing	1 en 2		
Zettingsvloeiing	S09	$I_{cl,0}$	Soil type index wg. Jeffries & Davies (1991)	Soil type index according to Jeffries & Davies (1991)	Soort	Grondsoort	dimensieloos					Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing	2		
Zettingsvloeiing	S10	ν	State parameter	State parameter	Staat parameter	Grondlaag	dimensieloos				Minimale laagdikte van 0.5 m	Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing	2		
Legenda															
Verstet nog verdere toelichting															
Geen parameter maar coördinaten, constante of een groep van parameters															
Hydraulische parameter															
Kolommen															
Grootheid															
Object															
Eenheid															
Hoedanigheid															
Betrekking op object															
Waardebewerkingsmethode															

B.2 Modelinvoer

Toetspoor	WTI-ID	letters/symbolen	Omschrijving	Grootheid	Object	Eenheid	Hoedanigheid (Aquo)	Betrekking op object (Aquo)	Waardebewerkingsmethode (Aquo)	Overiglocatie	Waardebepalingsmethode	Toetslaag	At te leiden uit
Dimensies													
Zettingsvloeiing	M01	$\cotan \alpha_{RE}$		Taludhellings		-	-					2	profiel
Zettingsvloeiing	M02	H_{RE}		Hoogte		m						2	profiel
Zettingsvloeiing	M03	H_{RE}		Hoogte		m						2	profiel
Zettingsvloeiing	M04	$\cotan \alpha_{RE}$		Helling		-						2	profiel
Zettingsvloeiing	M05	S_{2V}		lengte		m	-					2	profiel
Zettingsvloeiing	M06			lengte		m	-					2	profiel
Zettingsvloeiing	M07	M_{RE}		lengte		m	-					2	profiel
Materiaaleigenschappen													
Zettingsvloeiing	M08	d_{50}		Korrel diameter		m	-		NEN/RAW			1 en 2	bodemmodel
Zettingsvloeiing	M09	d_{10}		Korrel diameter		m	-		NEN/RAW			1 en 2	bodemmodel
Zettingsvloeiing	M10	k		Doorlatendheid		m/s	-		TR Voorland			2	bodemmodel
Zettingsvloeiing	M11	V_{95n}		-		-	-		TR Voorland			2	bodemmodel
Zettingsvloeiing	M12	$F_{cohesionlayers}$		Factor	-	-	-		TR Voorland			2	bodemmodel
Overige													
Zettingsvloeiing	M13	$V_{95n,200}$		Oevermigratiesnelheid		m/jaar	-		TR Voorland			2	-
Zettingsvloeiing	M14	P_{52}	Kans op een ondergrondopbouwscenario voor het faill.	Kans		-	-		n.t.b.			2	kering

C Rekenregels voor gedetailleerde toets op zettingsvloeiing

C.1 Stap A - Bepaal optredingskans zettingsvloeiing per ondergrondscenario $P(ZV|S_i)$ voor het betreffende vak

Eerst wordt de frequentie van optreden $F(ZV|S_i)$ berekend met:

$$F(ZV | S_i) = \left(\frac{5}{\cot \alpha_R} \right)^5 \cdot L_{vak} \cdot \frac{V_{lokaal}}{V_{zeeland}} \cdot 0,025 \cdot \left\{ 0,5 \cdot \left(\frac{H_R}{24} \right)^{2,5} \cdot \left(\frac{1}{10} \right)^{-10(0,05 + \psi_{5m,kar})} + 0,5 \cdot \left(\frac{H_{geul}}{24} \right)^5 \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^{-4}}{d_{50, gemiddeld, kar}} \right)^5 \cdot F_{cohesivelayers} \right\} \quad (C.1)$$

Waarin:

L_{vak} de lengte van het dijkvak [km]

Vervolgens kan de frequentie omgerekend worden in een kans van optreden $P(ZV|S_i)$ met:

$$P(ZV | S_i) = 1 - e^{-F(ZV|S_i)} \quad (C.2)$$

De parameters zijn hieronder beknopt beschreven, waarbij de parameters zijn onderverdeeld in parameters die betrekking hebben op de geometrie, de grondeigenschappen en –toestand en de beweeglijkheid van de vooroever.

Geometrie:

De schematisatie van het meest ongunstige *rekentalud* in de beoordelingsperiode wordt gekarakteriseerd door een fictieve taludhoogte H_R [m] en een bijbehorende taludhelling α_R [graden] (zie Figuur C.1 en paragraaf 6.2.2 uit (van den Ham, 2015)). De taludhelling α_R volgt uit de schematisatie van het meest ongunstige dwarsprofiel in de beoordelingsperiode; de fictieve taludhoogte H_R wordt als volgt berekend:

$$H_R = H_{geul} + \Delta h_{onder} + 2 \cdot h_{dijk} \cdot \frac{\cot(\alpha_R)}{\cot(\alpha'_{boven})} \quad (C.3)$$

Met:

$$\alpha'_{boven} = \arctan \left\{ \frac{2h_{dijk}}{B + 2h_{dijk} \cdot \cot(\alpha_{boven})} \right\}$$

Waarin:

H_{geul} geuldiepte [m].

Δh_{onder} hoogte van de geulhelling die bij extreem laagwater boven water ligt: "niveau van geulrand" – "niveau LLWS/OLW/OLR" [m].

h_{dijk} hoogte van het waterkerend grondlichaam ten opzichte van de buitenteen van de dijk [m].

B breedte van het voorland, voor een schaadijk geldt $B = 0$ [m].

$\cot(\alpha)$ cotangens van de taludhelling α [-].

α_R rekenwaarde voor de taludhelling van het fictieve dwarsprofiel = taludhelling van het geschematiseerde onderwatertalud, ten opzichte van horizontaal [graden].

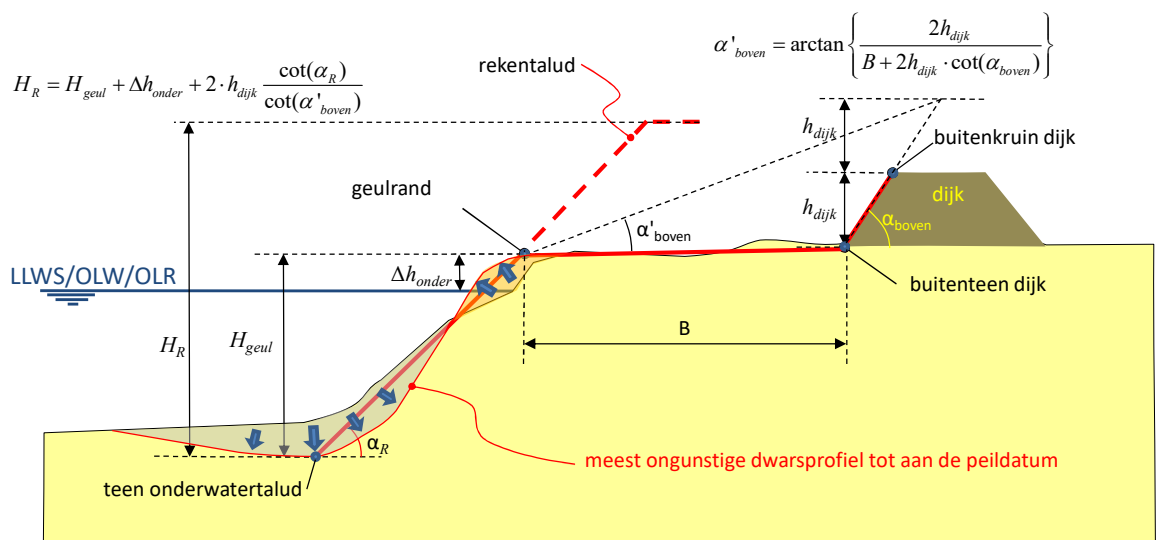
α_{boven} helling van het buitentalud van de buitenteen van de dijk naar de buitenkruinlijn, ten opzichte van horizontaal [graden].

α'_{boven} fictieve taludhelling van de rand van het voorland naar de fictieve buitenkruinlijn van de $2 \cdot h_{dijk}$ -hoge dijk, ten opzichte van horizontaal. Voor een schaadijk geldt $\alpha'_{boven} = \alpha_{boven}$ [graden].

Verder is in onderstaande figuur:

- LLWS meerjarig gemiddelde van het laagste springlaagwater ten opzichte van NAP, geldig in het kustgebied en de estuaria.
 OLW Overeengekomen Laag Water ten opzichte van NAP, geldig in het benedenrivierengebied (in Waal stroomafwaarts van Tiel).
 OLR Overeengekomen Lage Rivierstand ten opzichte van NAP, geldig in het bovenrivierengebied (in Waal stroomopwaarts van Tiel), hetgeen overeenkomt met de Overeengekomen Lage Afvoer bij Lobith.

Hoe geulrand, teen onderwatertalud, buitenteen dijk en buitenkruinlijn dijk, bepaald moeten worden staat in meer detail beschreven in de schematiseringshandleiding, zie paragraaf 7.1.



Figuur C.1 Schematisatie van meest ongunstige geometrie in de beoordelingsperiode met bepaling van de rekentaludhoogte H_R en de rekentaludhelling α_R

Materiaalparameters

- $\psi_{5m, kar}$ de karakteristieke waarde van ψ_{5m} [-]. ψ_{5m} is het gemiddelde van de state parameter ψ over in totaal 5 m (verticaal) van de meest zettingsgevoelige (= hoge ψ -waarde) lagen gelegen tussen de geulrand en $0,5 H_R$ onder de geulbodem.
 $d_{50, gemiddeld, kar}$ de karakteristieke waarde van $d_{50, gemiddeld}$ [m]. $d_{50, gemiddeld}$ is de gemiddelde mediane korrel diameter is over alle zand- en siltlagen tussen geulrand en geulbodem.
 $F_{cohesivelayers}$ is een parameter die de invloed van stoorlagen uitdrukt [-].
 Hoe de waarde van bovenstaande parameters te bepalen, is beschreven in de schematiseringshandleiding, zie paragraaf 7.2.

Beweeglijkheid

De beweeglijkheid van de voorlandgeometrie wordt gegeven door een lokaal bepaalde waarde V_{lokaal} en een referentiewaarde $V_{zeeland}$:

V_{lokaal} een maat voor de beweeglijkheid van de vooroever [m/jaar]. Deze kan bepaald worden door de grootste waarde te nemen van:

- De snelheid van de terugschrijding of vooruitgang van de waterlijn.
- De terugschrijding of vooruitgang van het gemiddelde talud.
- De snelheid van de verdieping aan de teen maal $\cot(\alpha_R)$.

De minimale waarde die ingevuld moet worden voor V_{lokaal} is 0,01 m/jaar.

V_{Zeeland} de beweeglijkheid van een gemiddelde Zeeuwse vooroever, waarop de optredingskansformule in de *gedetailleerde toets* gebaseerd is [m/jaar]. Voor V_{Zeeland} kan 1 m/jaar gekozen worden.

C.2 Stap B - Bepaling optredingskans zettingsvloeïing voor alle grondopbouwscenario's $P(ZV)$

Combineer de optredingskans per ondergrondscenario, zoals bepaald met (C.2), tot de totale optredingskans:

$$P(ZV) = \sum_i P(ZV|S_i)P(S_i) \quad (\text{C.4})$$

Waarin:

$P(S_i)$ de kans van aantreffen op scenario S_i is [-]. Hierbij geldt dat $\sum_i P(S_i) = 1$.

C.3 Stap C - Bepaal overschrijdingskans toelaatbare inscharingslengte gegeven een vloeïing $P(L > L_{\text{toelaatbaar}}|ZV)$

Als een zettingsvloeïing plaatsvindt, zal een deel van het vervloeiende materiaal naar de zijanten afvloeien. Door dit tweedimensionale effect zal de oppervlakte van de verdwenen grond bovenin het dwarsprofiel (oppervlak 1 in Figuur C.2) ongeveer een factor 1,4 groter zijn dan de oppervlakte van de grond die er aan de onderkant (oppervlak 2) bijkomt. Het uitvloeïingsprofiel heeft ook niet één gelijkmatige taludgradiënt maar bestaat uit ruwweg twee delen; een zeer flauw ondergedeelte en een steiler bovengedeelte. Indien deze verhouding wordt meegenomen, luidt de formule⁷:

$$L = ax - Db \quad (\text{C.5})$$

Met:

$$x = \frac{-cH + \sqrt{(cH)^2 + (1-c) \left(\frac{D^2 b}{a} + H^2 c \right)}}{(1-c)}$$

$$a = \cot \gamma - \cot \alpha$$

$$b = \cot \gamma - \cot \beta$$

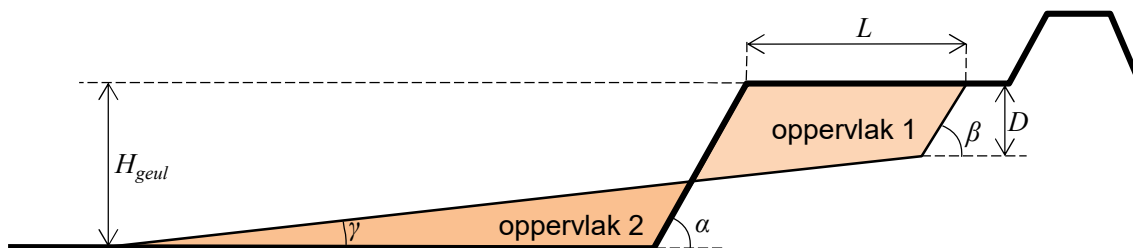
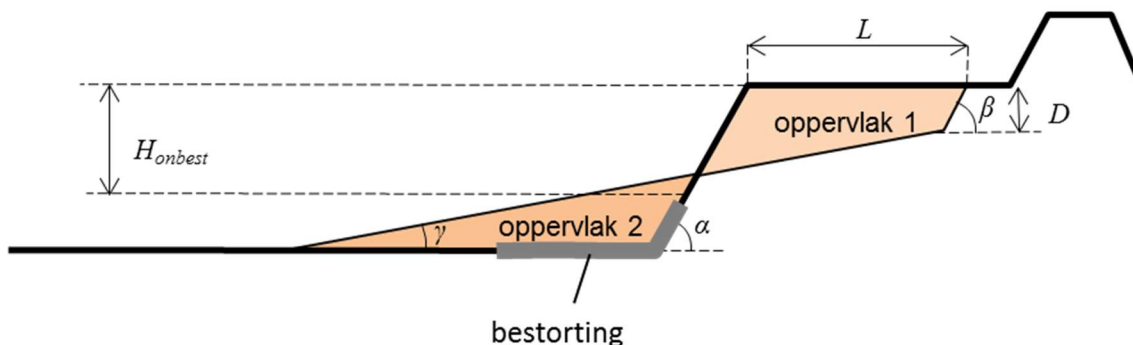
Waarin:

c verhouding tussen oppervlak 1 en oppervlak 2 ($A_1 = cA_2$) [-].

H totale hoogte van het onderwatertalud, moet de werkelijke hoogte tot aan het voorland worden genomen (en dus niet fictieve rekenhoogte H_R) [m]. In geval van een onbestort onder water talud of als sprake is van een bestorting op een gedeelte van het talud, dat niet doorloopt tot in het diepste punt van de geul, geldt: $H = H_{\text{geul}}$. Indien er gedeeltelijk bestorting aanwezig is die begint in het diepste punt van de geul, geldt $H = H_{\text{onbest}}$.

D steile gedeelte van het uitvloeïingsprofiel [m].

⁷ Formule geldt alleen als $c \neq 1$. Als $c = 1$ geldt $x = \frac{1}{2}H + \frac{1}{2}\frac{D^2}{H} \cdot \frac{b}{a}$

Figuur C.2 Geschematiseerd restprofiel ten behoeve van de *gedetailleerde toets*Figuur C.3 Geschematiseerd restprofiel ten behoeve van de *gedetailleerde toets*, voor situatie met gedeeltelijke bestorting die onderin de geul begint

De variabelen in bovenstaande formule zijn onzeker. Op basis van statistische analyse van de geometrische kenmerken van circa 140 vloeiingen in de Zuidwestelijke Delta is voor elke variabele de verwachtingswaarde, standaardafwijking en het type verdeling bepaald. De resultaten zijn weergegeven in Tabel C.1.

Tabel C.1 Overzicht geometrische variabelen. Omrekening verwachtingswaarde en standaardafwijking vanuit het gemiddelde en standaardafwijking van de onderliggende lognormale verdeling $\mu(X)=\exp(\mu(Y))$ en $\sigma(X)=\exp(\mu(Y)+\sigma(Y))-\exp(\mu(Y))$.

X	$\mu(X)$	$\sigma(X)$	Type verdeling	Onderliggende normale verdeling	
				$\mu(Y)$	$\sigma(Y)$
$\cot(\gamma)$	16,8	7,1	Lognormaal	2,82	0,38
$\cot(\beta)$	2,9	1,7	Lognormaal	1,05	0,47
D/H	0,43	0,06	Normaal		
c	1,4	0,1	Normaal		
$\cot(\alpha)$		$0,05 \cdot E(X)$	Normaal		

Voor bepaling van de kans op overschrijding van de toelaatbare inscharingslengte moet de volgende betrouwbaarheidsfunctie opgelost worden:

$$Z = L_{\text{toelaatbaar}} - L \quad (\text{C.6})$$

Deze functie kan exact opgelost worden door de kansdichtheidsfuncties van alle variabelen in bovenstaande tabel mee te nemen (probabilistische berekening op niveau III) of door de functie te lineariseren in het ontwerppunt, waarbij de kansverdeling van elke variabele wordt benaderd door een standaard normale verdeling (probabilistische berekening op niveau II). Dit laatste vindt plaats in een FORM analyse.

Navolgend worden twee methoden beschreven om de overschrijdingskans van de inscharingslengte te berekenen:

- In de software D-FlowSlide 18.1.1 wordt de betrouwbaarheidsfunctie met een FORM analyse, aangeroepen uit de probabilistische bibliotheek, opgelost. Daarnaast wordt de volumebalans niet met $L=ax-Db$ opgelost, maar numeriek. Daarmee kan rekening worden

gehouden met beperkte berging, bijvoorbeeld in het geval van een smalle geul. Dit is de aanbevolen methode.

- In het geval D-FlowSlide niet gebruikt wordt is kan teruggevallen worden op een handmatige FORM berekening, waarin enige vereenvoudigingen worden aangenomen. Deze methode wordt hieronder beschreven.

Uit probabilistische berekeningen blijkt dat $\cot \alpha$, $\cot \beta$, D/H en c een kleine invloed hebben op de overschrijdingskans (d.w.z. de invloedsfactor is klein). Daarom kan de FORM analyse vereenvoudigd worden door deze parameters deterministisch te nemen, dus uit te gaan van de verwachtingswaarden, $\mu(X)$, aangegeven in Tabel C.1.

Met deze kentallen is het mogelijk de overschrijdingskans van L te bepalen en vervolgens de kans dat L groter is dan $L_{\text{toelaatbaar}}$. Als betrouwbaarheidsfunctie wordt

$$Z = L_{\text{toelaatbaar}} - L(\cot \gamma(\beta)) = 0$$

$\cot \gamma = \exp(\mu_{\cot \gamma} + \beta \sigma_{\cot \gamma})$ genomen. Hierin is L de optredende inscharingslengte die berekend wordt met $L = aX - Db$ op basis van de verwachtingswaarde en de standaardafwijking van $\cot \gamma$ en $L_{\text{toelaatbaar}}$. $L_{\text{toelaatbaar}}$ is de aanwezige lengte van het voorland. In dit geval is $\cot \gamma$ de enige stochast, dus kan de betrouwbaarheidsindex β worden bepaald door de volgende vergelijking op te lossen voor $\cot \gamma$, lognormaal verdeeld.

$$Z = L_{\text{toelaatbaar}} - L(\cot \gamma(\beta)) = 0$$

$$\cot \gamma = \exp(\mu_{\cot \gamma} + \beta \sigma_{\cot \gamma}) \quad (\text{C.7})$$

Oplossen van deze vergelijking kan door middel van iteratie. Hiervoor kan het volgende zoekalgoritme worden gebruikt:

- 1 Start met $\beta_i = 1$ en bepaal L voor $\cot \gamma = \exp(\mu_{\cot \gamma} + \beta_i \cdot \sigma_{\cot \gamma})$
- 2 Bepaal de waarde van de relatieve afstand⁸ $L_{\text{toelaatbaar}} / L$
- 3 Gebruik $\beta_{i+1} = \beta_i + (L_{\text{toelaatbaar}} / L - 1)$ als nieuwe waarde voor β en bepaal L voor $\cot \gamma = \exp(\mu_{\cot \gamma} + \beta_{i+1} \cdot \sigma_{\cot \gamma})$
- 4 Herhaal de stappen 1 tot 3 tot een stabiele waarde van β is gevonden, waarvoor $Z = L_{\text{toelaatbaar}} - L(\cot \gamma(\beta)) = 0$

Om te compenseren voor de niet beschouwde stochastische variabelen $\cot \alpha$, $\cot \beta$, D/H en c moet de berekende betrouwbaarheidsindex gecorrigeerd worden. Op basis van een kalibratie, waarbij β is berekend in een FORM-analyse met alle parameters als stochast en een FORM-analyse waarbij alleen $\cot \gamma$ als stochast is meegenomen, blijkt dat de β , berekend volgens de bovenstaande procedure, gedeeld moet worden door een factor 1,10.

Uitgaande van een Gauss-verdeling, wordt de overschrijdingskans van de toelaatbare inscharingslengte vervolgens berekend met:

$$P(L > L_{\text{toelaatbaar}} | ZV) = P(Z < 0) = \Phi(-\beta) \quad (\text{C.8})$$

C.4

Stap D - Bepaal de kans op overschrijding van toelaatbare inscharingslengte door een zettingsvloeijing per dijkvak per jaar $P(L > L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{vak}}$

$$P(L > L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{vak}} = P(ZV) \cdot P(L > L_{\text{toelaatbaar}} | ZV) \quad (\text{C.9})$$

⁸ Een robuuster/stabieler algoritme is door $\ln(L_{\text{toelaatbaar}}) / \ln(L)$ als relatieve afstand te gebruiken. Dit kost meer iteratiestappen, maar voorkomt wel dat de iteratie "uit de bocht schiet" bij hoge beta-waarden

C.5 Aandachtspunten en praktische tips

Geldigheid toelaatbare kans op overschrijding van de invloedslijn in gedetailleerde toets

De gedetailleerde toets in bijlage III van de Ministeriele Regeling stelt als eis dat de kans op overschrijding van de invloedslijn van de dijk door een inscharing bij een zettingsvloeïing kleiner dient te zijn dan 1% per km per jaar. In de formules onder stappen C en D van de rekenregels voor de gedetailleerde methode is $L_{\text{toelaatbaar}}$ de afstand tussen de geulrand en de invloedslijn. Verondersteld wordt dat in dat geval de bijdrage van zettingsvloeïing aan de overstromingskans verwaarloosbaar is. In het KPR memo [21] is aangetoond dat hieraan wordt voldaan als de kans op overstroom, gegeven overschrijden van de invloedslijn door een zettingsvloeïing, getalsmatig gelijk aan of kleiner dan de norm is. In de meeste gevallen mag ervan uitgegaan worden dat dit het geval is, maar uit een aantal praktijkgevallen is gebleken dat dit niet altijd zeker is. Probleem is dat met toenemende toelaatbare inscharingslengte, de overschrijdingskans daarvan, $P(L > L_{\text{toelaatbaar}} | ZV)$, niet zo snel afneemt. Gevallen waarin het criterium mogelijk niet veilig is, zijn situaties waarin de invloedslijn dichtbij de dijk ligt, bijvoorbeeld omdat ruim voldaan wordt aan de overige (directe) faalmechanismen, de dijkbasis vrij smal is, en er sprake is van een laag achterland, waarbij een dijkval direct tot een overstrooming leidt.

Idealiter zou een kalibratie van het huidige 1% criterium plaats moeten vinden. Zo'n kalibratie bestaat uit een groot aantal probabilistische berekeningen, waarin de kans op overstrooming (of kans op directe faalmechanismen) wordt berekend, waarbij het verstoringprofiel na een vloeïing als stochastische variabele of via scenario's wordt meegenomen, maar waarbij ook rekening wordt gehouden dat het optreden van een zettingsvloeïing doorgaans niet samenvalt met een hoogwater. Deze berekeningen zouden moeten worden uitgevoerd voor een groot aantal geometrieën. Vervolgens kan een criterium worden afgeleid dat voor alle situaties veilig is. Een dergelijke kalibratie heeft binnen het WBI onderzoek nooit plaatsgevonden.

Conservatismen in de berekende toelaatbare kans op overschrijding van de invloedslijn

Er is een aantal factoren te benoemen die een flink reducerend effect kunnen hebben op de inscharingslengte, maar die niet meegenomen zijn in de formules in stap C uit de rekenregels voor de gedetailleerde toets in paragraaf C.3. Een aantal worden genoemd:

- Korreldiameter: hoe kleiner de korreldiameter, des te flauwer de uitvloeïhelling. In paragraaf 3.4.2 van het WBI rapport [18] is hiertoe een voorstel gedaan.
- Beperkte berging in geul: Bij een nauwe geul zal de berging beperkter zijn en daarmee ook de inscharingslengte. Zoals onder stap C uit de rekenregels is aangegeven wordt dit in D-FlowSlide netjes meegenomen, maar in de analytische formules gegeven onder stap C niet.
- Grondopbouw: Er kan reden zijn om D/H (de Tabel onder stap C) groter te kiezen of de hellingshoek van het steile gedeelte steiler te nemen. Boven water blijft grond veel steiler staan en ook in klei zal een steilere helling mogelijk zijn.
- Zie verder de volgende alinea

Aanvullend criterium voor uitsluiting optreden zettingsvloeïing (bijdrage aan overstromingskans verwaarloosbaar).

(zie ook Q&A op helpdesk water).

In de toetsmethode in Bijlage III van de Ministeriele Regeling noch elders in deze schematiseringshandleiding worden ondergrenzen aan de dikte(s) van de zandlaag of zandlagen gegeven waarbij een zettingsvloeïing nog kan optreden. Binnen het project WBI is hier wel onderzoek naar gedaan. Daarbij is gekeken naar ervaringen van de US Army Corps (USACE) langs de Lower Mississippi (qua grondopbouw vergelijkbaar met West-Nederland), en experimenteel onderzoek door Deltares en voorgangers. Ten tijde van het opstellen van WBI

was er echter nog onvoldoende vertrouwen in de voorgestelde criteria om deze als beoordelingsregel op te nemen.

Niettemin kan op basis van de huidige inzichten voor situaties waarin er sprake is van een deklaag bestaande uit klei- en veenlagen bovenop de potentieel vloeiingsgevoelige zandlaag, het volgende criterium voldoende veilig gehanteerd worden, aanvullend op de criteria in de eenvoudige en gedetailleerde toets:

Indien de dikte van de deklaag groter is dan 1.4 keer de dikte van de zandlaag (inclusief dunne kleilaagjes), kan een vloeiing uitgesloten worden, **Figuur C.4** en **Figuur C.5**, waarin Overburden staat voor de deklagen en Zone A sand voor de potentieel vloeiingsgevoelige zandlaag. Indien geen lokaal grondonderzoek beschikbaar is kunnen voor het bepalen van de zand- en deklagen in eerste instantie de grondeenheden uit WBI-SOS aangehouden worden.

Indien er geen sprake is van een deklaag, maar van één zandlaag met een vrij oppervlak, en de $d_{50, \text{gemiddeld}}$ van die zandlaag groter is dan 0.250 mm, kan daarnaast het volgende criterium, gebaseerd op de CUR 152 [22], gehanteerd worden:
Het optreden van een zettingsvloeiing kan uitgesloten worden als de dikte van de zandlaag [m] kleiner is dan $75.000 \times d_{50} - 18.75$, met d_{50} [m]. Dit is in **Figuur C.6** grafisch weergegeven, met in het onderschrift ook enige toelichting. Bij een $d_{50, \text{gemiddeld}}$, zoals bepaald in paragraaf 7.2.4.2, van 0.350 mm, betekent dit dus dat de dikte van de zandlaag minimaal 7.5 m moet zijn.

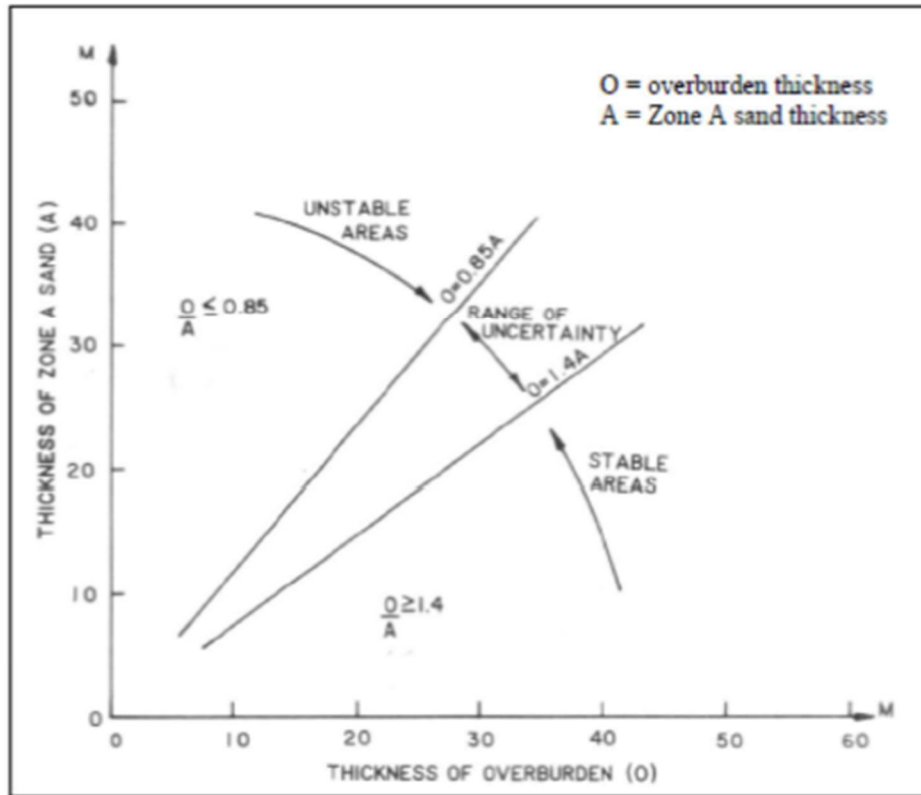


Figure 4.7 Empirical relationship between thickness of overburden (topstratum), thickness of zone A sand (see Figure 4.6), and bank stability (Hvorslev 1956). Stable banks are those with $R = O/A > 0.85$ and generally less than 20 ft of zone A sands.

Figuur C.4 Criterium op basis van verhouding dikte deklaag en dikte vloeiingsgevoelige zandlagen volgens USACE

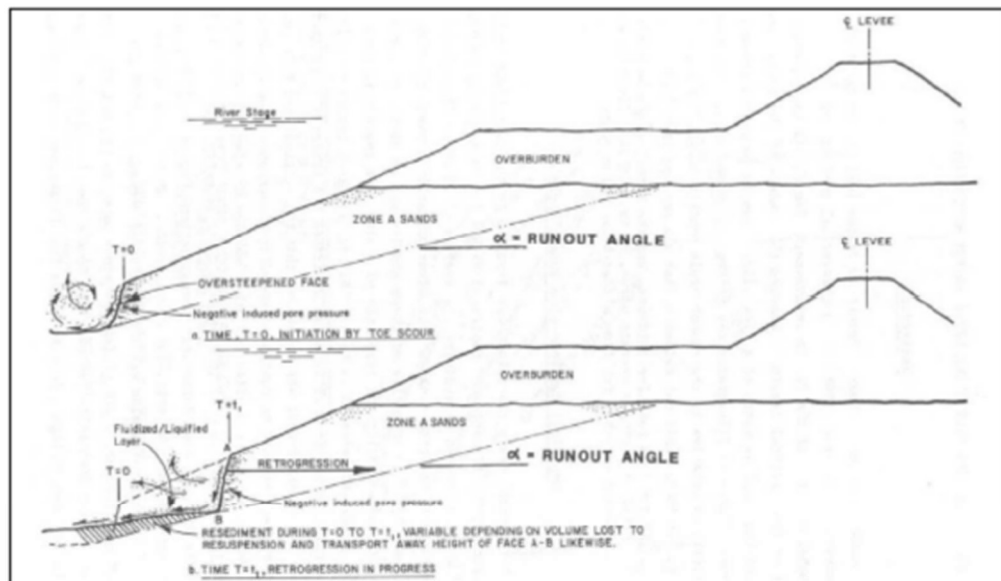


Figure 4.9 Retrogressive failure mechanism in dense point bar sands showing sequential stages of development (Torrey 1988). Flow failure continues until the oversteepened slope face intersects the overburden and zone A sand contact. Empirical data from past failures indicates the runout angle is limited to approximately 10-degree maximum slope.

Figuur C.5 Criterium op basis van verhouding dikte deklaag en dikte vloeingsgevoelige zandlagen volgens USACE, principe faalmechanisme

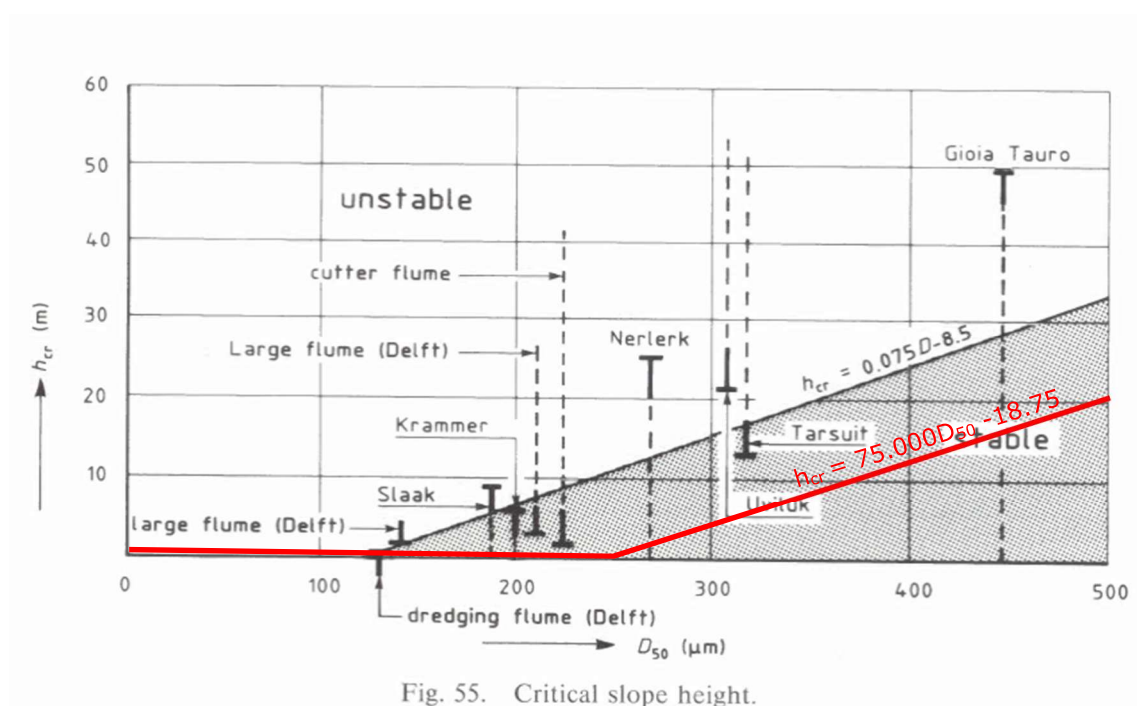


Fig. 55. Critical slope height.

Figuur C.6 Criterium voor een zandlaag met vrij oppervlak en $d_{50, \text{gemiddeld}} > 0.250$ mm. De achterliggende figuur is afkomstig uit CUR152. Gepresenteerd zijn de resultaten van een proeven en een aantal opspuitingen in onder meer Canada. Een T staat voor gevallen waar een vloeing plaatsvond (unstable) en de omgekeerde T waarbij dat niet het geval was (stable). Voor die situatie ligt de werkelijke kritieke hoogte ergens op de stippellijn. De rode

lijn, die het aanvullende optredingscriterium weergeeft, is zodanig gekozen dat alle dakjes van de T's eronder liggen.

Nuancering toepassingscriteria gedetailleerde methode in Bijlage III van de Ministeriele Regeling

In Bijlage III van de Ministeriele Regeling worden twee toepassingsvoorwaarden voor de gedetailleerde toets gegeven:

1. De geulrand ligt buiten de invloedzone
2. Over elke willekeurige 5 meter hoogte van het onderwatertalud is de gemiddelde taludhelling flauwer dan 1:4.

Indien niet aan deze voorwaarden wordt voldaan, zijn er mogelijk toch nog een aantal mogelijkheden om op basis van de gedetailleerde toets aan te tonen dat de bijdrage van zettingsvloeïing verwaarloosbaar is.

Ad 1.

Aan deze voorwaarde zal niet voldaan worden bij een kort voorland of helemaal geen voorland (schaardijk). Alvorens opties voor een Toets op Maat worden overwogen, zou een aanvullende stap kunnen zijn te controleren of de optredingskans $P(ZV)$, bepaald in stap B in de rekenregels van de gedetailleerde toets, kleiner is dan 1% van de norm. Als dat zo is, is de bijdrage van zettingsvloeïing aan de overstromingskans verwaarloosbaar, ongeacht de schade die optreedt na optreden.

Ad2.

Deze voorwaarde zal roet in het eten kunnen gooien voor profielen waarin de helling van de steilste 5 m steiler is dan 1:4, maar waarin de gemiddelde helling is beduidend flauwer is (dus er is sprake van een getrapt talud, bestaande uit flauwere en steilere gedeelten). Een praktische aanpak die in enkele gevallen wellicht toch soelaas kan bieden: voer de gedetailleerde toets uit, waarbij de hellingshoek van het gehele talud gelijk wordt gesteld aan die over de steilste 5 m, in combinatie met de werkelijke rekengeuldiepte. Dat is uiteraard conservatief, maar als dat tot een voldoende kleine kans leidt, is geen verdere analyse nodig.

De achtergrond van deze toepassingsvoorwaarde:

Zowel de eenvoudige als gedetailleerde toets op zettingsvloeïing hebben als basis een statistische analyse van een groot aantal onderwaterhellingen in Zeeland waarin een zettingsvloeïing is opgetreden. Uit deze analyse is gebleken dat de optredingskans van een vloeïing gecorreleerd is aan zowel de gemiddelde helling als de helling over de steilste 5 m. De eenvoudige toets bestaat daarom uit twee optredingscriteria: één gebaseerd op het totale profiel en één gebaseerd op de helling van de steilste 5 m in het profiel. Deze criteria zijn niet gebaseerd op een zeer gedegen statistische analyse. Het criterium over de steilste 5 m is rechtstreeks overgenomen uit het VTV2006. Voor de gedetailleerde methode, waarin een optredingskans wordt uitgerekend, is voor WBI2017 een meer gedegen statistische analyse uitgevoerd. Dit is echter alleen gedaan voor de gemiddelde helling. Vandaar dat de formule alleen de gemiddelde helling bevat. Het was destijds wel het streven om ook de helling van de steilste 5 m in de formule mee te nemen, maar ten tijde van oplevering van de methode is geconcludeerd dat dat nog niet voldoende uitgerijpt was. Gedachte was daarnaast dat als uit de eenvoudige methode rolt dat een zettingsvloeïing kan optreden, dit in de meeste gevallen zal komen omdat wordt voldaan aan het criterium op basis van de gemiddelde helling en minder vaak omdat wordt voldaan aan het criterium van de steilste 5 m. Om deze redenen is

besloten de steilste 5 m niet in de optredingskansformule te verwerken. In plaats daarvan is de tweede toepassingsvoorwaarde toegevoegd.

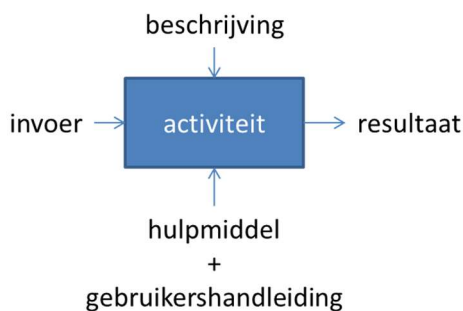
D Schema werkwijze beoordeling zettingsvloeiing

Hieronder is schematisch de werkwijze van de beoordeling van het toetsspoor Zettingsvloeiing voorland (VLZV) weergegeven (Figuur D.2).

D.1

Toelichting op het schema werkwijze beoordeling

De werkwijze bestaat uit opvolgende activiteiten waarbij het resultaat van de voorgaande activiteit de invoer is van de volgende activiteit. Deze activiteiten moeten doorlopen worden om te komen tot een oordeel. Per activiteit kan worden beschreven hoe men van de invoer komt tot de benodigde uitvoer. Daarnaast wordt aangegeven of een activiteit door hulpmiddelen wordt ondersteund. Het schema van een activiteit ziet er in het algemeen uit zoals Figuur D.1.

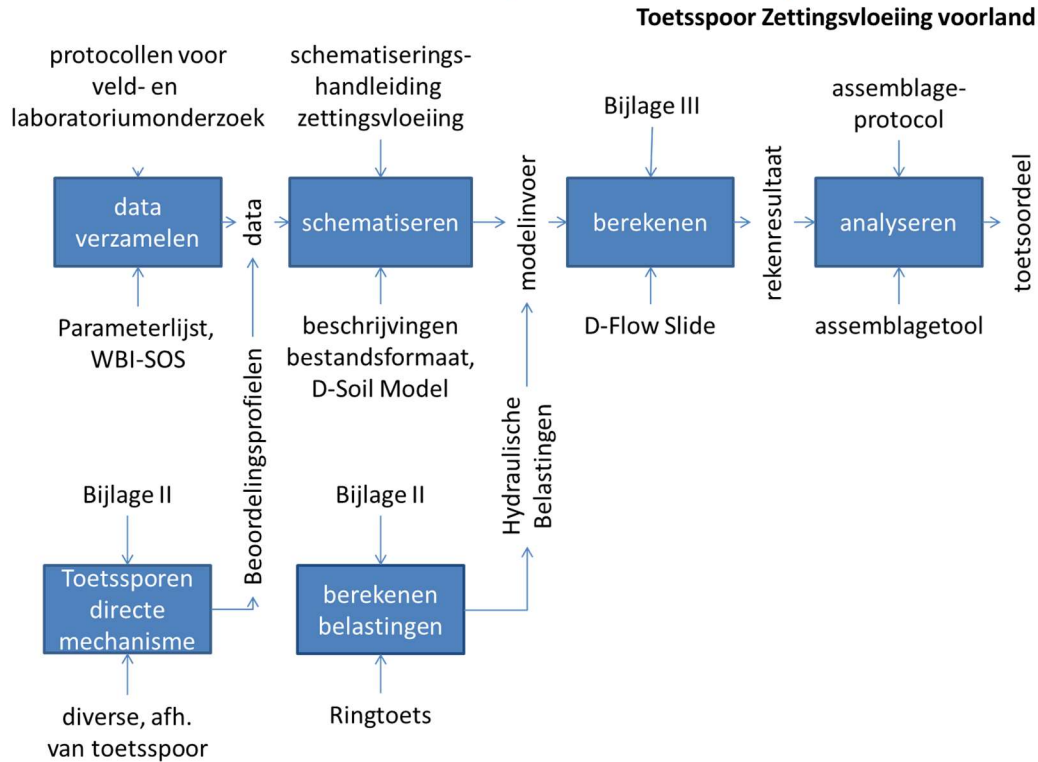


Figuur D.1 Het algemene schema van een activiteit. Een aaneenschakeling van benodigde activiteiten bij een beoordeling geeft de schematische werkwijze van de beoordeling weer.

Het beoordelingsinstrumentarium bestaat uit verschillende documenten en tools/software om te komen tot een oordeel. In het schema is aangegeven welke (hoofd) documenten en tools/software betrekking hebben op een activiteit. Bij de activiteit wordt in de referenties na het schema gerefereerd naar de alle beschikbare documenten en/of tools/software behorende bij de activiteit. Op deze manier kan de beoordelaar bij elke activiteit achterhalen welke documenten en/of tools/software van het beoordelingsinstrumentarium relevant zijn om die activiteit uit te kunnen voeren. Er wordt in het schema niet uitsluitend verwezen naar documenten en/of tools/software van het beoordelingsinstrumentarium.

Benadrukt wordt dat dit schema niet het beoordelingsproces beschrijft. Het beoordelingsproces wordt beschreven in Bijlage I 'Procedure' van de Ministeriële Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017. Het beoordelingsproces is iteratief waarbij één of meerdere activiteiten uit het schema meerdere malen kan worden doorlopen. Afhankelijk van waar men zich bevindt in het beoordelingsproces, kan de invulling van de activiteit anders zijn. Bijvoorbeeld bij de activiteit 'berekenen' kan dit door middel van een eenvoudige toets, gedetailleerde toets per vak of een toets op maat. Verder wordt benadrukt dat de beschrijvingen en hulpmiddelen niet uitputtend zijn. Niet alle invullingen van een activiteit zijn beschreven of worden ondersteund (denk hierbij aan toets op maat).

D.2 Schema werkwijze beoordeling Zettingsvloeiing voorland (VLZV)



Figuur D.2 Schema werkwijze beoordeling Zettingsvloeiing voorland (VLZV). In het schema zijn alleen de belangrijkste documenten en/of tools/software genoemd. De lijst met alle beschikbare documenten en tools/software die betrekking hebben op een activiteit wordt hieronder beschreven.

D.3 Referenties bij het schema werkwijze beoordeling Zettingsvloeiing voorland (VLZV)

D.3.1 Activiteit 'data verzamelen'

Referenties beschrijving activiteit

- Voor de beschrijving van deze activiteit wordt verwezen naar de algemeen geaccepteerde en van toepassing zijnde protocollen, voorschriften en normen in de grond-, water- en wegebouw die te vinden zijn bij CROW en NEN.

Referenties hulpmiddel activiteit

- WBI-Parameterlijst (bijlage A uit Handleiding Datamanagement WBI 2017)*. K.S. Lam, Deltares-rapport 209432-002-GEO-0002, Delft, september 2016.
- WBI-SOS, Globale stochastische ondergrondschematisatie voor de primaire waterkeringen*. Deltares, Delft, december 2015. Wordt als bestand meegeleverd met D-Soil Model.
- Globale stochastische ondergrondschematisatie (WTI-SOS) voor de primaire waterkeringen*. M. Hijma, K.S. Lam. Deltares rapport 1209432-000-GEO-0006, Delft, december 2015.

D.3.2 Activiteit 'schematiseren'

Referenties beschrijving activiteit

- Schematiseringshandleiding Zettingsvloeiing voorland, WBI 2017*. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.

Referenties hulpmiddel activiteit

- D-Soil Model, Software voor de beoordeling van primaire waterkeringen*. Deltares, Delft, september 2016.
- D-Soil Model, Ondergrondschematiseringsproces voor geotechnische toepassingen, Handleiding, Wettelijk Toets Instrumentarium 2017*. Deltares, Delft, september 2016.

D.3.3 *Activiteit 'berekenen hydraulische belastingen'*

Referenties beschrijving activiteit

- *Ministeriële Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belastingen primaire waterkeringen*. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.

Referenties hulpmiddel activiteit

- *Ringtoets, Software voor de beoordeling van primaire waterkeringen*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Ringtoets, Installatiehandleiding, Wettelijk Toets Instrumentarium 2017*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Ringtoets, Gebruikershandleiding, Wettelijk Toets Instrumentarium 2017*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Waternormalen* (www.rijkswaterstaat.nl/waternormalen). Rijkswaterstaat.

D.3.4 *Activiteit 'berekenen toetsoordeel'*

Referenties beschrijving activiteit

- *Ministeriële Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Voorschriften bepaling sterkte en veiligheid primaire waterkeringen*. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.

Referenties hulpmiddel activiteit

- *Rekenregels voor gedetailleerde toets op zettingsvloeiing (Bijlage C uit Schematiseringshandleiding Zettingsvloeiing voorland, WBI 2017)*. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.
- *D-Flow Slide 18.1.1, Software voor de beoordeling van primaire waterkeringen*. Deltares, Delft, 2018.
- *D-Flow Slide 18.1.1, Gebruikershandleiding*. Deltares, Delft, te verschijnen in 2019.
- *Ringtoets, Software voor de beoordeling van primaire waterkeringen*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Ringtoets, Installatiehandleiding, Wettelijk Toets Instrumentarium 2017*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Ringtoets, Gebruikershandleiding, Wettelijk Toets Instrumentarium 2017*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Fenomenologische beschrijving faalmechanismen WBI*. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.

D.3.5 *Activiteit 'analyseren'*

Referenties beschrijving activiteit

- *Ministeriële Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Voorschriften bepaling sterkte en veiligheid primaire waterkeringen*. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.
- *Assemblageprotocol WBI2017, Nadere uitwerking van het beoogde assemblageprotocol voor het wettelijke beoordelingsinstrumentarium*. F. Diermans, K.S. Lam, H. Knoeff, Deltares rapport 1230086-010-GEO-0001, Delft, juni 2016.

Referenties hulpmiddel activiteit

- *Assemblagetool WBI2017*. Nog in ontwikkeling.

D.3.6 *Toelichting bij de referenties*

Het softwareprogramma Ringtoets kan verschillende (sub)activiteiten ondersteunen bij het berekenen van de hydraulische belastingen en bij het berekenen van het rekenresultaat. Daarom wordt Ringtoets meerdere malen genoemd bij de referenties.

De bestandsformaten behorende tot een software of tool zijn beschreven in de handleiding van de betreffende software of tool.