



RWS INFORMATIE

Schematiseringshandleiding afschuiving voorland

WBI 2017

Datum	28 november 2019
Status	Definitief

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



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

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 Schematiseringshandleiding en WBI 9
1.1	Inleiding Schematiseringshandleiding generiek 9
1.2	Uitgangspunten het toetsspoor <i>afschuiving voorland</i> (VLAF) 13
1.3	Opbouw 13
2	Stappenschema 15
2.1	Inleiding 15
2.2	Afschuiving voorland 15
2.2.1	Eenvoudige toets 15
2.2.2	Gedetailleerde toets 16
3	Belastinggevallen 18
3.1	Inleiding 18
3.2	Permanente belastingen 18
3.3	Hydraulische belastingen 18
3.4	Overige belastingen 19
3.4.1	Wind 19
3.4.2	Aanvaringen en drijvende voorwerpen 19
3.4.3	Biologische aantasting 19
4	Inventarisatie gegevens 20
4.1	Inleiding 20
4.2	Geometrie 20
4.2.1	Uitwendige geometrie 20
4.2.2	Ondergrondmodel 21
5	Schematisering 22
5.1	Algemeen 22
5.2	Uitwendige geometrie 22
5.3	Constructies in de vooroever 22
5.4	Stochastische Ondergrondschematisatie (SOS) 22
5.5	Toekenning parameters aan eenheden in SOS 23
5.6	Waterspanningen 23
6	Vakindeling 24
6.1	Inleiding 24
6.2	Processtappen vakindeling 24
6.3	Overige informatie, vakgrenzen. 25
7	Parameters 26
7.1	Inleiding 26
7.2	Geometrie 27
7.2.1	Teen onderwatertalud 29
7.2.2	Geulrand 29
7.2.3	Breedte bestorting $M_{bestort}$ 29
7.2.4	Uitwerking 30
7.3	Volumiek gewicht 31
7.4	Effectieve verticale spanning 31
7.5	Hoek van inwendige wrijving 31
7.6	Normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkte ratio S 32
7.7	Sterktetoename-exponent 32

- 7.8 Grensspanning 32
- 7.9 Freatisch vlak 33
- 7.10 Waterspanning 33
- 7.11 Buitenwaterstand (hydraulische belasting) 33

8 Voorbeeld: bepaling macrostabiliteit van voorland 34

- 8.1 Algemeen 34
- 8.2 Te beoordelen dijkstrekking 34
- 8.3 Eenvoudige toets 35
 - 8.3.1 Invloedszone 35
 - 8.3.2 Signaleringsprofiel 36
 - 8.3.3 Beoordelingsprofiel 36
 - 8.3.4 Afschuifpunt en signaleringspunt 36
 - 8.3.5 Vooroeverinformatie 36
 - 8.3.6 Eenvoudige toets op afschuiving vooroever 36
- 8.4 Gedetailleerde toets 37
 - 8.4.1 Uitwendige geometrie 37
 - 8.4.2 Opbouw van de ondergrond volgens SOS 37
 - 8.4.3 Schuifsterkte parameters 38
 - 8.4.4 Waterspanningen 38
 - 8.4.5 Bepalen vereiste stabiliteitsfactor 39
 - 8.4.6 Uitvoeren glijvlakanalyses 39
 - 8.4.7 Berekeningsresultaten 39

A Literatuur 45

B Afkortingen, begrippen en symbolenlijst 47

C Schema werkwijze beoordeling afschuiving voorland 49

- C.1 Toelichting op het schema werkwijze beoordeling 49
- C.2 Schema werkwijze beoordeling Afschuiving voorland (VLAF) 50
- C.3 Referenties bij het schema werkwijze beoordeling Afschuiving voorland (VLAF) 50
 - C.3.1 Activiteit 'data verzamelen' 50
 - C.3.2 Activiteit 'schematiseren' 51
 - C.3.3 Activiteit 'berekenen hydraulische belastingen' 51
 - C.3.4 Activiteit 'berekenen toetsoordeel' 51
 - C.3.5 Activiteit 'analyseren' 51
 - C.3.6 Toelichting bij de referenties 52

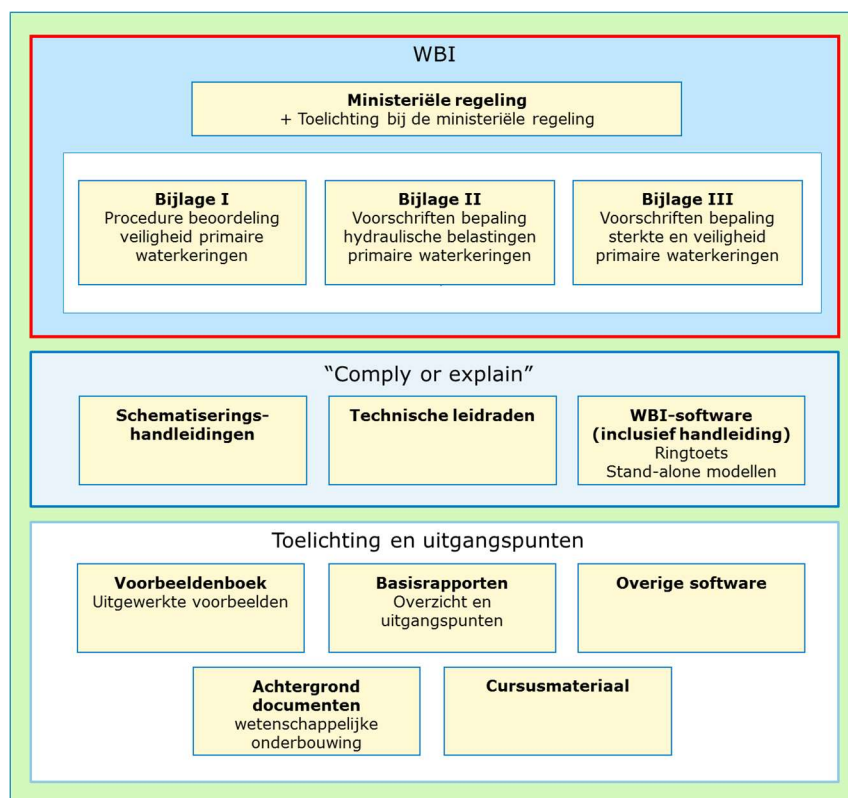
1 Inleiding Schematiseringshandleiding en WBI

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.

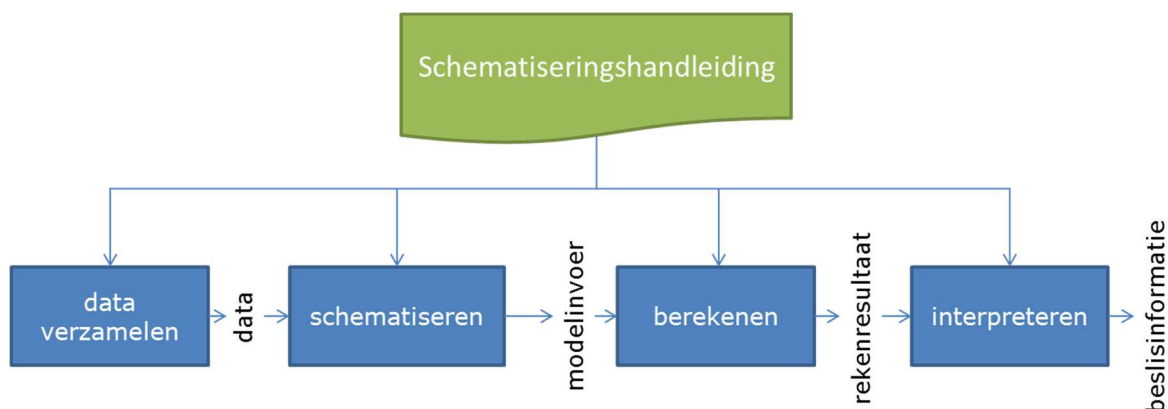
Ringtoets of Riskeer?

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 wordt bekeken of door het inwinnen van extra gegevens en/of het verfijnen van de

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

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 [2]
- 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 WBI [2] (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

Uitgangspunten het toetsspoor *afschuiving voorland* (VLAF)

- Voor het schematiseren van de ondergrond van alle primaire waterkeringen in Nederland is een globale Stochastische Ondergrond Schematisatie (SOS) beschikbaar. Voor het beoordelen van een faalmechanisme dient deze globale schematisatie als startpunt voor het maken van lokale, toepassings specifieke ondergrondschematisaties. In deze schematiseringshandleiding wordt verwezen naar de Handleiding lokaal schematiseren met het WTI-SOS [3].
- De *gedetailleerde toets* voor de macrostabiliteit van het dijktafval binnenwaarts en buitenwaarts en van het voorland, is in het WBI 2017 verbeterd door het toepassen van de Critical State Soil Mechanics (CSSM) theorie en van ongedraineerde schuifsterkte voor klei en veen. Voor de theoretische achtergrond hiervan wordt verwezen naar de *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit*, bijlage C (Theorie faalmechanisme en gebruikte modellen) en bijlage G (interpretatie laboratoriumproeven).
- Afschuiving van het voorland leidt tot een verandering van de geometrie van het voorland en daarmee mogelijk tot een verandering van de belasting op de waterkering. Daarmee is er invloed op andere (directe) faalmechanismen zoals overslag/overloop, stabiliteit bekleding buitentalud, piping en macrostabiliteit. Afschuiven van het voorland is niet direct gerelateerd aan maatgevende omstandigheden en wordt als indirect mechanisme onafhankelijk van deze faalmechanismen beoordeeld.

1.3

Opbouw

De opbouw van de handleiding is als volgt:

Onderwerp	Locatie
Stappenschema	Hoofdstuk 2
Belastinggevallen	Hoofdstuk 3
Inventarisatie gegevens	Hoofdstuk 4
Schematisering	Hoofdstuk 5
Vakindeling	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. Hoofdstuk 2 kan dus als leeswijzer of leidraad voor het toepassen van dit rapport worden gebruikt.

2 Stappenschema

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft het stappenschema dat moet worden doorlopen om tot een beoordeling van de stabiliteit tegen afschuiven van het voorland (VLAF) te komen.

Het toetsproces is vastgelegd in het wettelijk vastgelegde *WBI 2017 Bijlage I Procedure*. Hierin is onder andere het verloop van *eenvoudige* en *gedetailleerde toets* naar *toets op maat* (voorheen geavanceerde toets) toegelicht (zie figuur 1.1).

De technische beschrijving hoe de toetsen uitgevoerd dienen te worden is niet in *WBI 2017 Bijlage I Procedure* opgenomen. Daarvoor wordt verwezen naar *WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid* (met de toetsschema's) en de schematiseringshandleidingen.

In de afgelopen periode is veel onderzoek op het gebied van macrostabiliteit uitgevoerd. Dit heeft een vergroting van het inzicht in relevante fenomenen opgeleverd waarbij het rekenen met ongedraineerde sterkteparameters de belangrijkste is. De achtergronden daarvan worden uitgebreid toegelicht in de *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit*. De berekeningswijze met het CSSM-model en de ongedraineerde schuifsterkte zoals die in dit document voor STBI en STBU wordt beschreven wordt ook voor het beoordelen van de macrostabiliteit van het voorland toegepast. In dit document wordt in aansluiting met de terminologie in *WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid* verder over 'afschuiving voorland' gesproken waar het gaat om deze vorm van het faalmechanisme macro-instabiliteit.

2.2 Afschuiving voorland

Afschuiven van het voorland is een indirect mechanisme bij de beoordeling van de overstromingskans. Het mechanisme treedt op bij een lage buitenwaterstand en er is dus in het algemeen geen direct gevaar voor overstroming. Afhankelijk van de mate van aantasting van de dijk is er gedurende de tijd benodigd voor reparatie wel een verhoogd risico voor directe faalmechanismen als piping of macrostabiliteit van de dijk, zowel buitenwaarts als binnenwaarts. Buitenwaarts omdat de stabiliteit van het buitentalud lager wordt door de ongunstiger geometrie, binnenwaarts door invloed op de waterspanningen, waardoor macrostabiliteit negatief kan worden beïnvloed.

2.2.1 Eenvoudige toets

In de *eenvoudige toets* wordt nagegaan of het voorland voldoet aan algemene geometrische kenmerken. Dit betreft kenmerken van de geometrie van de waterkering (met name het buitentalud), van het voorland en van de geul. Daarnaast speelt de opbouw van de ondergrond een rol. In de *eenvoudige toets* worden achtereenvolgens het schadelijkheidscriterium en het optredingscriterium gecheckt.

Voor het schadelijkheidscriterium zijn de volgende gegevens nodig:

- De diepte van de geul (ten opzichte van het voorland).
- De ligging van de overgangen van het profiel (vóór afschuiving) naar geulbodem en voorland.
- De ligging van de invloedszone.
- De aanwezigheid van vooroeverbestedingen en de horizontale uitgestrektheid daarvan.

Voor het optredingscriterium zijn ook nog de volgende gegevens nodig:

- De opbouw van de ondergrond, met name de aanwezigheid van kleilagen.

2.2.2

Gedetailleerde toets

In de algemene opzet van de *gedetailleerde toets* kent het WBI 2017 drie vormen, met een toenemende inspanning en een steeds scherpere beoordeling:

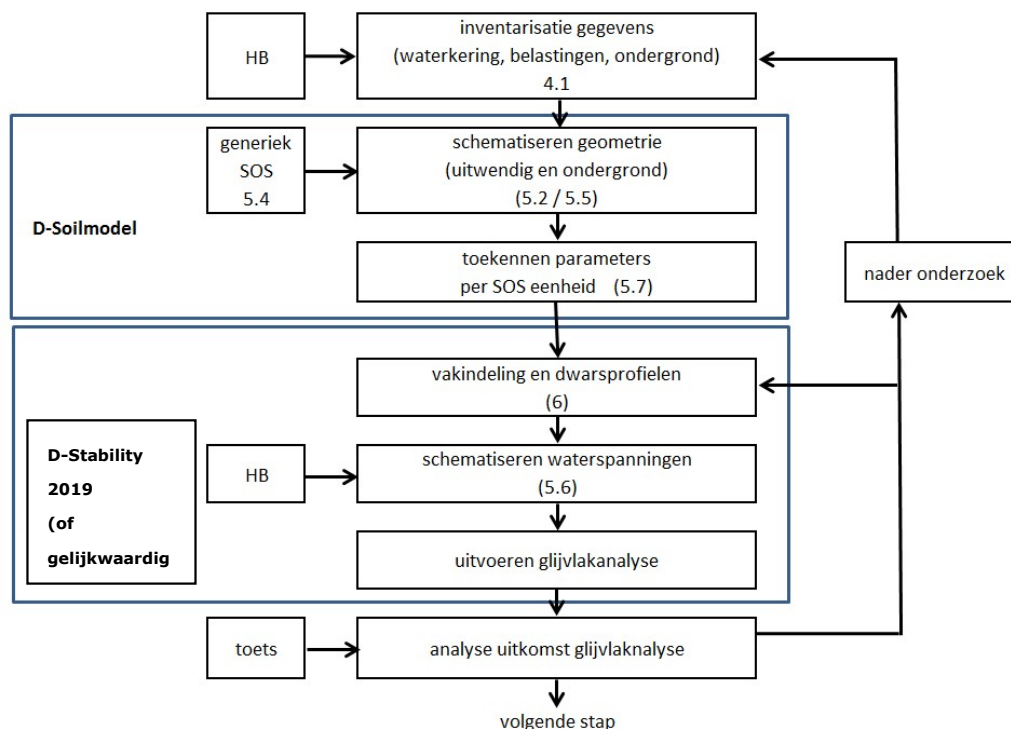
- Semi-probabilistische toets per dijkvak.
- Probabilistische toets per dijkvak.
- Probabilistische toets per dijktraject.

De *gedetailleerde toetsing* voor *afschuiving voorland* bestaat alleen uit een semi-probabilistische toets per dijkvak. Hierbij wordt een stabiliteitsanalyse uitgevoerd met een glijvlakmodel. Deze toets heeft veel overeenkomsten met de gedetailleerde toets voor het toetsspoor Macrostabiliteit buitenwaarts (STBU).

Voor het uitvoeren van een stabiliteitsanalyse wordt een aantal stappen doorlopen. Deze zijn onderstaande paragraaf beschreven

Hydraulische belastingen (HB)

De kritieke situatie voor *afschuiving voorland* is een lage buitenwaterstand in combinatie met een hoge grondwaterstand. Meer informatie over de hydraulische belastingen is opgenomen in paragraaf 3.3.



Figuur 2.1 Stappenschema gedetailleerde toets *afschuiving voorland*

Schematiseren geometrie

De grondmechanische schematisatie van een dwarsprofiel van het buitentalud en het voorland van een waterkering bevat de volgende elementen:

- Geometrie (zie paragraaf 4.2.1).

- Opbouw van de ondergrond (zie paragraaf 4.2.2).
- Grondmechanische parameters van de grondlagen (zie paragraaf 5.5).
- Schematisering waterspanningen (zie paragraaf 5.6).

Daarnaast betreft deze stap de keuze van gedraineerd of ongedraineerd grondgedrag. Voor het toetsspoor *afschuiving voorland* zijn snel optredende afschuivingen maatgevend. Voor de klei- en veenlagen dienen de macrostabiliteitsanalyses daarom te worden gebaseerd op ongedraineerde schuifsterkte-eigenschappen, voor zand op gedraineerde schuifsterkte-eigenschappen. Bijlage C4 van de *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit* geeft in detail aan voor welke situaties gedraineerde dan wel ongedraineerde schuifsterkteparameters van toepassing zijn.

Vakindeling

Na de schematisering wordt het voorland ingedeeld in vakken. Per vak wordt een maatgevend dwarsprofiel vastgesteld op basis van de beschikbare gegevens (zie hoofdstuk 6). Het indelen van vakken en het inwinnen van gegevens is een iteratief proces. Ook na het uitvoeren van een toets kan de conclusie zijn dat het de moeite loont om aanvullend grondonderzoek te doen of een vak te splitsen. De vakindeling voor het toetsspoor *afschuiving voorland* hoeft niet dezelfde te zijn als voor het toetsspoor *macrostabiliteit binnenwaarts* (dat betrekking heeft op het dijklichaam) of andere toetssporen. De vakindeling komt uitgebreider aan de orde in Hoofdstuk 6.

Veiligheidsbeoordeling

De evenwichtsbeschouwing van het talud dient buiten Ringtoets gemaakt te worden, bijvoorbeeld met D-Stability 2019 (opvolger van D-Geo Stability). Ook de veiligheidsbeoordeling wordt niet door Ringtoets ondersteund en moet daarbuiten worden uitgevoerd.

Het afschuiven van het voorland valt niet samen met het optreden van hoogwater (indirect mechanisme). Daarom is de geaccepteerde kans op optreden niet direct gekoppeld aan de faalkanseis van de dijk. Het criterium aan de hand waarvan moet worden beoordeeld is opgenomen in het *WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid* (paragraaf 23.2).

Indien de berekende faalkans niet voldoet aan de vereiste faalkans is er een keuzemoment: de vakindeling aanpassen zodat een deel wel kan worden goedgekeurd, grondonderzoek doen om (schuifsterkte)parameters beter vast te stellen of overgaan tot een *toets op maat*.

3 Belastinggevallen

3.1 Inleiding

De belastingen op de vooroever/ het voorland zijn van permanente of veranderlijke aard. In dit rapport zijn ze als volgt onderverdeeld:

- Permanent:
 - Eigen gewicht.
- Veranderlijk:
 - Hydraulische belastingen.
 - Overige belastingen.

Bij de beoordeling van het voorland dient expliciet rekening te worden gehouden met morfologische veranderingen. Geleidelijke verandering kan leiden tot een combinatie van ondergrond en geometrie die kritiek is voor het optreden van een afschuiving. Dit kan zijn door:

- (1) versteiling of verhoging van het onderwatertalud door erosie aan de teen of sedimentatie aan de top
- (2) door terugschijding van het gehele talud naar een gedeelte van de ondergrond waar de grondcondities minder gunstig zijn.

Voor de schematisering dient rekening te worden gehouden met de verwachte veranderingen in vorm en locatie van de onderwatergeometrie tot de peildatum. Hierop wordt ingegaan in paragraaf 7.1.

3.2 Permanente belastingen

Eigen gewicht

Het eigen gewicht van de grond in het voorland nabij de geul is een belasting. Het aandrijvend moment in de analyse van de stabiliteit wordt in hoge mate door dit eigen gewicht bepaald.

3.3 Hydraulische belastingen

De kritieke situatie voor *afschuiving voorland* is een lage buitenwaterstand in combinatie met een hoge grondwaterstand. In de *TR Ontwerpbelastingen Rivierengebied* worden drie belastingssituaties onderscheiden [5]:

1. Een buitenwaterstand bij een snelle val van het buitenwater in combinatie met de grondwaterstand die behoort bij het voorafgaand hoogwater.
2. Een gemiddelde laagwaterstand (GLW) van het buitenwater in combinatie met extreme regenval.
3. Een laagwaterstand die eens per 10 jaar wordt overschreden ($LW_{1/10 \text{ jaar}}$) in combinatie met een normale freatische lijn in het voorland.

De criteria voor 'snelle val' zijn voor verschillende situaties in het rivierengebied (bovenrivieren, benedenrivieren en IJssel/ Vecht-delta) uitgewerkt. Zie het *TR Ontwerpbelastingen Rivierengebied* [5], paragraaf 7.4 en verder. Voor meren kan eenzelfde aanpak worden gevolgd, waarbij "op bepaalde punten de specifieke karakteristieken voor meren moeten worden gebruikt" (Addendum I bij de Leidraad Zee- en Meerdijken t.b.v. het ontwerpen van meerdijken, [7]). Voor zeegedomineerde situaties moet rekening worden gehouden met een springtij laagwaterstand.

3.4 **Overige belastingen**

3.4.1 *Wind*

Windbelasting kan van invloed zijn op falen van Niet Waterkerende Objecten (NWO's). In het geval van windbelasting, die via bomen of andere niet-waterkerend objecten wordt overgebracht op de rand van het voorland dient binnen het toetsspoor *NWO* per geval te worden nagegaan wat het effect is van de windbelasting voor de stabiliteit van het grondlichaam.

3.4.2 *Aanvaringen en drijvende voorwerpen*

Juist als het stormt, kan een schip stuurloos of op drift raken en op het voorland lopen en een afschuiving inleiden. De beheerder moet zelf nagaan of dit in zijn specifieke omstandigheden kan voorkomen.

3.4.3 *Biologische aantasting*

Dieren die gangen of holen graven, zoals ratten, muskusratten en mollen, kunnen een talud ondermijnen. Dit is niet gerelateerd aan maatgevende omstandigheden. Het signaleren en oplossen hiervan behoort tot de actieve zorgplicht.

4 Inventarisatie gegevens

4.1 Inleiding

Voor analyse van de kans op afschuiven van het voorland zijn de volgende gegevens noodzakelijk:

- Geometrie, dat wil zeggen het dwarsprofiel van het voorland vanaf de teen van de waterkering tot het diepste punt van de geul.
- Laagopbouw van de ondergrond.
- Volumieke gewichten en sterkte-eigenschappen van de grondlagen.

De eerste stap is het inventariseren van alle beschikbare gegevens. Het kan daarbij gaan om onder andere:

- Gegevens uit vorige beoordeling(en).
- Historische vakindeling.
- VNK2 resultaten.
- Informatie uit recente dijkverbeteringen.
- Informatie over aanwezige bestortingen.
- Bathymetrische tijdreeksen (om de morfologische ontwikkeling af te leiden).
- De globale stochastische ondergrondschematisatie (SOS).
- Beschikbaar veld- en laboratoriumonderzoek.
- Andere informatie uit het beheerregister.
- Ervaringen van de beheerder (veldwaarnemingen).

Deze gegevens zullen niet afzonderlijk voor het voorland ingezameld worden. Het ligt voor de hand dit te integreren met het verzamelen van gegevens ten behoeve van de dijk zelf. Veel gegevens zullen overlappen, bijvoorbeeld waar het gaat om de ondergrond, andere gegevens zijn complementair, zoals de (onderwater) geometrie van het voorland.

4.2 Geometrie

4.2.1 *Uitwendige geometrie*

De geometrie van het voorland wordt vereenvoudigd tot een aantal 2D-doorsneden of dwarsprofielen die niet noodzakelijk samenvallen met de dwarsdoorsneden ten behoeve van de beoordeling van de dijk (STBI en/of STBU). Boven water kan dit door inmeten door een landmeter of door het inmeten met behulp van laseraltimetrie. Bij dijken langs een getijgeul of rivier kan de onderwatergeometrie worden bepaald uit peilingen (singlebeam of multibeam echolodgingen). Bij voorkeur worden peilingen bij hoog water uitgevoerd om een zo groot mogelijke overlap met de hoogtegegevens boven water te krijgen. Van belang is dat het dwarsprofiel ver genoeg doorloopt om de maatgevende glijcirkel geheel in te kunnen sluiten. Voor *afschuiving voorland* dient minimaal het talud onder de waterlijn tot het diepste punt in het dwarsprofiel aanwezig te zijn.

Bij de schematisering van voorland ten behoeve van de beoordeling op zettingsvloeiing moet de geometrie vaak vereenvoudigd worden. In rekenmodellen als D-Stability of geavanceerder zijn de mogelijkheden groter om met gecompliceerdere geometrieën rekening te houden. Maar bij bijvoorbeeld geulbodems met erosiekuilen zoals deze in het benedenrivierengebied wel voorkomen moet de geometrie wel voldoende ver worden doorgetrokken om vast te stellen of deze een bedreiging voor de dijkveiligheid kunnen vormen of niet.

4.2.2 *Ondergrondmodel*

In een ondergrondmodel wordt het vóórkomen van verschillende grondlagen of afzettingen schematisch weergegeven. Van de verschillende grondlagen die zich van elkaar onderscheiden door specifieke eigenschappen wordt het niveau aangegeven (meestal ten opzichte van NAP) waarop de grondlagen voorkomen. Wanneer alleen geologische afzettingen of formaties zijn weergegeven is sprake van een geologisch model. Wanneer onderscheid is gemaakt naar geotechnische kenmerken van de ondergrond kan worden gesproken van een geotechnisch ondergrondmodel.

Het uitgangspunt is de globale Stochastische Ondergrondschematisatie (SOS) die voor alle primaire waterkeringen in Nederland is opgesteld [3]. In een stochastische ondergrondschematisatie worden de verschillende mogelijkheden (scenario's) beschreven voor de opbouw van de ondergrond die zich op een locatie kunnen voordoen. De wijze waarop de SOS kan worden verfijnd met lokaal grondonderzoek is uitgebreid beschreven in de *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit*.

Op basis van dit lokale onderzoek kan worden nagegaan of een bepaald ongunstig ondergrondscenario uit het globale SOS-model daadwerkelijk in een vak wordt aangetroffen of dat dit ongunstige scenario alleen in een deel van een vak wordt aangetroffen of dat de kans op het aantreffen van een bepaald scenario groter of kleiner is dan het globale SOS-model aangeeft. Voor het toetsspoor *afschuiving voorland* kunnen de relevante scenario's andere zijn dan voor toetssporen als *macrostabiliteit buitenwaarts* of *zettingsvloeiing voorland* en zij dienen dus apart te worden geanalyseerd.

Voor wat de schuifsterkteparameters betreft kan een eerste fase van de *gedetailleerde toets* worden uitgevoerd op basis van de defaultwaarden in de *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit*, hoofdstuk 7. Wanneer dit niet leidt tot een beoordeling 'voldoende' kan in de tweede fase aanvullend veld- en laboratoriumonderzoek worden ingezet om de grondmechanische parameters te optimaliseren, zie paragraaf 4.4 van de *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit*.

5 Schematisering

5.1 Algemeen

Dit hoofdstuk geeft aanwijzingen en aandachtspunten voor het opstellen van de schematisering van het voorland.

De globale werkwijze bij het schematiseren betreft drie stappen:

- Karakterisering van de ondergrondopbouw in de omgeving van de dijk.
- Geotechnische schematisering.
- Keuze maatgevend dwarsprofiel (in het volgende hoofdstuk 'vakindeling').

5.2 Uitwendige geometrie

Zoals eerder opgemerkt dient bij de beoordeling van het voorland expliciet rekening te worden gehouden met morfologische veranderingen. 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 zullen optreden in het stroompatroon of 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 met hydraulische en morfologische modellen zoals SOBEK of Delft3D.

Waar een taludbescherming of een bodembescherming aanwezig is kan ervan uitgegaan worden dat de geometrie constant is. Voor de schematisering dient rekening te worden gehouden met de verwachte veranderingen in vorm en locatie van de onderwatergeometrie tot de peildatum. Schat de geulontwikkeling daarbij conservatief in. Het resulterende profiel wordt deterministisch behandeld, hier wordt verder geen onzekerheid in rekening gebracht.

Voor de analyse van de voorlandstabiliteit dienen de voor dit mechanisme meest kritische dwarsprofielen te worden geselecteerd. Dat zijn de dwarsprofielen met de steilste taluds en/of de diepste geul. Het wordt afgeraden vaste tussenafstanden voor de dwarsprofielen te kiezen daar dit er toe kan leiden dat de geselecteerde dwarsprofielen niet maatgevend zijn.

5.3 Constructies in de vooroever

Wanneer versterkingselementen als ankers, nagels of geotextielen aanwezig zijn in de vooroever dient het voorland beoordeeld te worden met een *toets op maat*.

5.4 Stochastische Ondergrondschematisatie (SOS)

Voor alle primaire waterkeringen in Nederland is³, afgezien van de duinen, een globale Stochastische Ondergrondschematisatie (SOS) opgesteld (zie de *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit* hoofdstuk 5 en voor meer details de Handleiding Stochastische Ondergrondschematisatie [3]).

Het startpunt voor de lokale schematisering is het genoemde SOS. Op basis van beschikbare informatie uit grondonderzoek (sonderingen, boringen, geofysisch onderzoek) kan deze schematisatie worden gedetailleerd in diepteligging en uitgestrektheid van de lagen, en met behulp van de resultaten van laboratoriumonderzoek ingevuld met parameterwaarden. De onzekerheid die altijd in de ondergrond aanwezig is wordt in rekening gebracht door middel van scenario's en (bij parameterwaarden) door middel van verdelingen met een gemiddelde en een standaardafwijking. Voor het toetsspoor *afschuiving voorland* kunnen de relevante scenario's

³ Sommige waterkeringen aangelegd na 2014 zijn niet in het SOS opgenomen

andere zijn dan voor toetssporen als *macrostabiliteit buitenwaarts of zettingsvloeiing* en zij dienen dus apart te worden geanalyseerd.

5.5 Toekenning parameters aan eenheden in SOS

Aan alle eenheden van de (lokale) ondergrondschematisatie moeten parameterwaarden worden toegekend. In hoofdstuk 7 komen de verschillende parameters aan de orde, met vermelding of het stochasten zijn en hoe men aan de gegevens komt.

Het gaat per grondlaag of SOS eenheid om:

- Volumiek gewicht γ .
- Hoek van inwendige wrijving ϕ' voor zandlagen (of andere goed doorlatende lagen).
- Ongedraineerde schuifsterkte ratio S .
- Sterktetoename-exponent m .

Daarnaast is er een niet aan de SOS eenheden gekoppelde parameter:

- Grensspanning σ'_{yy} .

De input voor de stabiliteitsberekening bestaat uit een verwachtingswaarde, een standaardafwijking, het type verdeling (normaal, lognormaal) en het aantal metingen. In semi-probabilistische analyses worden rekenwaarden van de schuifsterkte-eigenschappen voor de geotechnische parameters van de grondlagen toegepast. De rekenwaarden zijn de karakteristieke waarden gedeeld door een materiaalfactor. De materiaalfactoren zijn overigens vooralsnog gelijk aan 1.

Voor het volumiek gewicht worden bij voorkeur lokale gegevens toegepast, waarbij het bij de beoordeling van de stabiliteit van het voorland steeds gaat om het verzadigde volumiek gewicht. Het volumiek gewicht is zowel van belang voor het aandrijvend gewicht (belasting) als voor de effectieve spanning en dus voor de schuifsterkte. Omdat de variatie van het volumiek gewicht binnen een grondlaag of SOS-eenheid aanzienlijk kan zijn is het niet raadzaam data uit een regionale proefverzameling te gebruiken, zie paragraaf 7.3

Voor de sterkteparameters wordt verwezen naar wat hierover in hoofdstuk 5 en 7 van de *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit* is opgenomen.

5.6 Waterspanningen

Het schematiseren van de waterspanningen voor dit toetsspoor is zeer eenvoudig. In het slechtste geval ligt het freatisch vlak aan het maaiveld van het voorland, en dit wordt in de berekeningen zo aangenomen.

6 Vakindeling

Dit hoofdstuk geeft voor het toetsspoor afschuiving voorland de overwegingen om vakgrenzen te bepalen.

6.1 Inleiding

Bij de vakgrootte en -grenzen moet rekening worden gehouden met het 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 pas in een latere fase op te knippen. Dit is noodzakelijk als op basis van 'het slechtste vak' de afstand tot de norm nog te groot is.

Zolang afschuiving voorland onafhankelijk van de directe faalmechanismen wordt beoordeeld, hoeft geen rekening gehouden te worden met de vakindeling voor de directe faalmechanismen. Indien in een eventuele toets op maat verstoringsprofielen ten gevolge van afschuiving voorland als geometrie-scenario's bij de directe faalmechanismen worden beschouwd, zal de vakindeling mede bepaald worden door de vakindeling van de directe faalmechanismen.

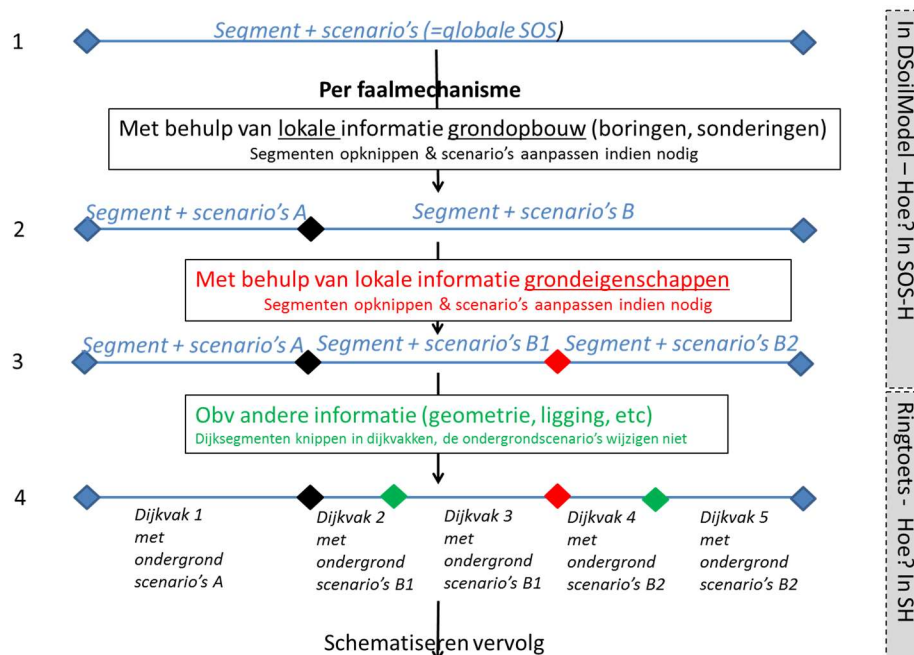
De minimale lengte van het vak wordt bepaald door de minimale omvang van een afschuiving. Hiervoor lijkt een waarde van 50 m redelijk. In principe is er geen maximum aan de te kiezen vaklengte.

6.2 Processtappen vakindeling

Onderstaand schema geeft de (voor alle faalmechanismen 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 afschuiving voorland zijn de positie en dikte van de bodemlagen, en stabiliteitsgerelateerde eigenschappen als volumiek gewicht, hoek van inwendige wrijving, grensspanning, sterktetoeename-exponent en normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkte ratio. Deze stappen worden nader beschreven in de SOS-handleiding [8].

Stap 4 wordt beschreven in de volgende paragraaf.



Figuur 6.1 Processtappen vakindeling (generiek voor toetssporen waarvoor de opbouw van de ondergrond relevant is).

6.3

Overige informatie, vakgrenzen.

- Een knip wordt gelegd op die locaties waar een duidelijke verandering is in de volgende sterkte- en belastingparameters (uitgezonderd 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
- Daarnaast kunnen aanwezige administratieve grenzen aanleiding zijn voor een knip, zoals:
 - Beheerdersgrenzen.
Daar waar de waterkering verandert van beheerder kan om praktische redenen een knip worden gelegd.
 - Normklasse.
 - Historische vakgrenzen.

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.

7 Parameters

7.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft aanwijzingen voor waardebepaling van de relevante parameters voor een beoordeling van de stabiliteit van het voorland. De *eenvoudige toets* is een geometrische toets die bestaat uit het schematiseren van het werkelijke voorlandprofiel tot een rekenprofiel, het vergelijken van het rekenprofiel met het signaleringsprofiel, en het beoordelen van de steilheid van het rekenprofiel.

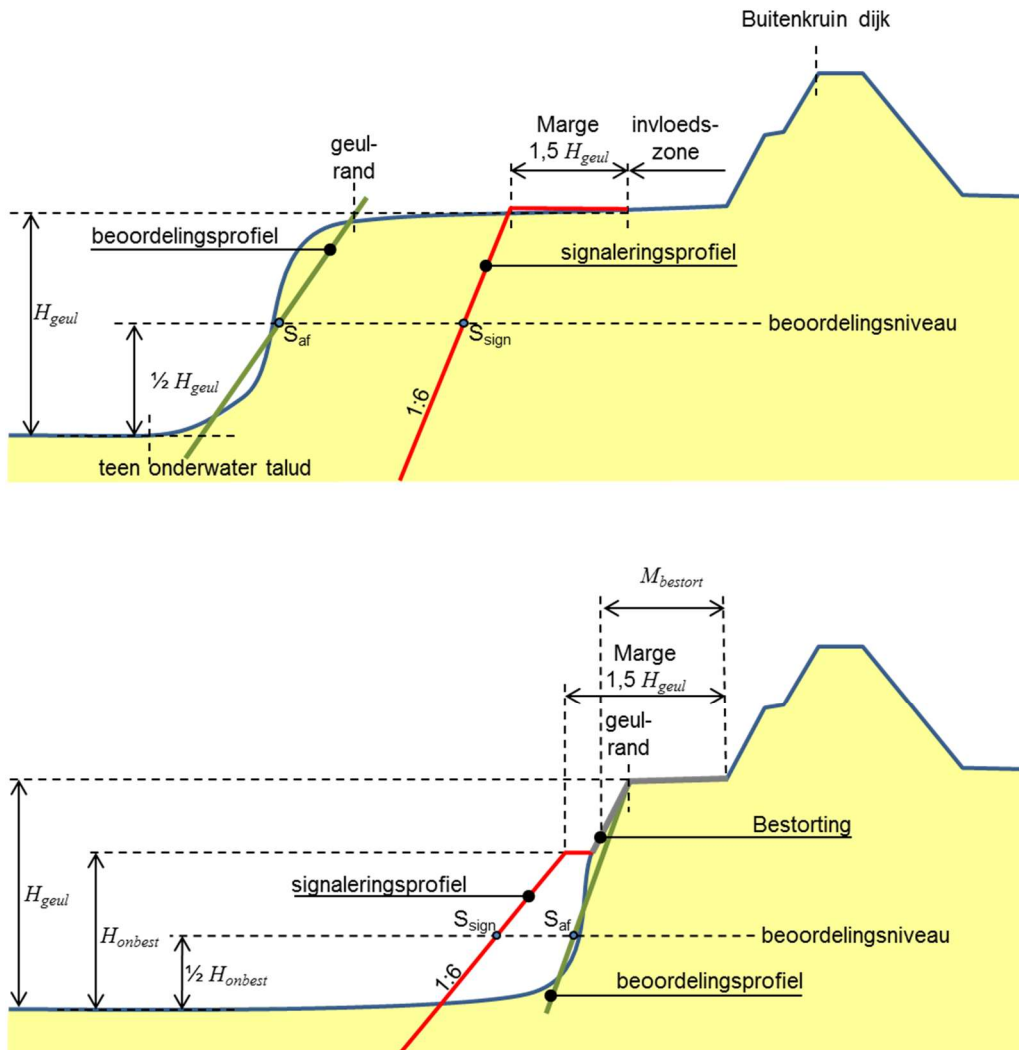
In de *gedetailleerde toets* wordt een geotechnische analyse van de (macro)stabiliteit uitgevoerd. Deze verloopt vergelijkbaar met de toets op buitenwaartse stabiliteit van het dijklichaam (STBU). De macrostabiliteitsanalyse dient voor slecht doorlatende grondlagen (klei en veen) te worden gebaseerd op ongedraineerde schuifsterkte-eigenschappen, voor goed doorlatende grondlagen (zand) op gedraineerde schuifsterkte-eigenschappen. Een uitgebreide uitleg over deze werkwijze is te vinden in de *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit*, in het bijzonder appendix C.

De maatgevende omstandigheden voor afschuiving van het voorland zijn een lage buitenwaterstand in combinatie met een hoge grondwaterstand ten gevolge van een voorafgaand hoogwater (of eventueel door intensieve neerslag). Als worst case voor de schematisering van de waterspanning kan worden uitgegaan van een ligging van het freatisch vlak gelijk aan het maaiveld van het voorland. De drie in paragraaf 3.3 beschreven belastingssituaties worden daarmee:

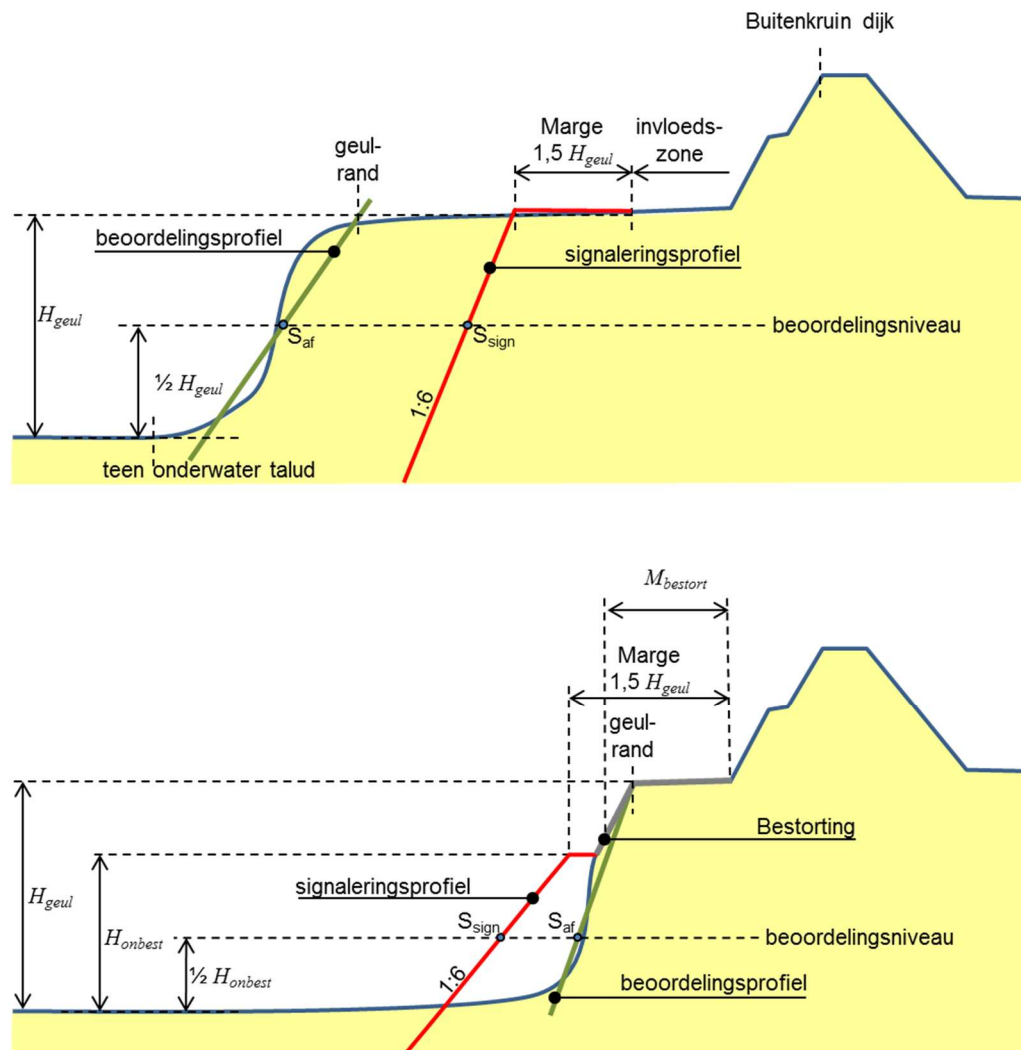
1. Een buitenwaterstand bij een snelle val van het buitenwater in combinatie met de freatische lijn aan het maaiveld.
2. Een gemiddelde laagwaterstand (GLW) van het buitenwater in combinatie met een freatische lijn aan het maaiveld.
3. Een laagwaterstand die eens per 10 jaar wordt onderschreden (LW1/10 jaar) in combinatie met een normale freatische lijn in het voorland.

Dit hoofdstuk geeft per parameter aan wat de parameter inhoudt. Een uitgebreidere beschrijving van de geotechnische parameters is te vinden in de *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit*.

7.2

Geometrie

Figuur 7.1 Figuur 7.1 geeft een overzicht van een aantal te bepalen geometrische parameters op een bepaald tijdstip. Naast de actuele geometrie is de snelheid van verandering van de (onderwater)geometrie benodigd om de meest ongunstige geometrie tot aan de peildatum te bepalen.



Figuur 7.1 Definitie geschematiseerde geometrische parameters voor een situatie zonder bestorting (boven) en met bestorting (onder)

Voor de geometrische parameters die betrekking hebben op het onderwatertalud geldt dat deze bepaald moeten worden uit tijdreeksen van peilingen (singlebeam- of multibeamlodingen) in de geul. Het bovenwatergedeelte van de geometrie kan bepaald worden uit het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) [1] of uit de legger- en het 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 het diepste punt van de geul tot aan de buitenkruin van de waterkering.

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.

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 stroomvernaauwing) en de lengte van de bodembescherming. Bij bestaande constructies kan men de helling van de kuilen beïnvloeden door bestortingen aan te brengen.

7.2.1 *Teen onderwatertalud*

Wat is het

De overgang van het onderwatertalud naar de geulbodem. Het gaat enerzijds om het niveau van de teen [m t.o.v. NAP], die nodig is voor de bepaling van de (reken)hoogte (H_{geul}). Anderzijds gaat het ook om de positie van de teen. Die is nodig om de (reken)helling ($\alpha_R(t_{eind})$) van het geschematiseerde onderwatertalud te kunnen bepalen. Daarbij moet de meest ongunstige geometrie tot aan de peildatum worden genomen.

Hoe te bepalen

Gegeven een (lodings)profiel is het niet altijd meteen duidelijk waar de overgang van onderwatertalud naar geulbodem zich bevindt. Aanbevolen wordt op basis van engineering judgement een punt te kiezen waar een knik optreedt in de taludhelling. Om te komen tot de meest ongunstige geometrie tot aan de peildatum dienen meerdere lodingen te worden geëvalueerd. Als het talud zich versteilt, dient te worden geëxtrapoleerd naar de peildatum.

7.2.2 *Geulrand*

Wat is het

De overgang van het onderwatertalud naar het voorland. Indien geen vlak voorland aanwezig is, het onderwatertalud sluit hierbij direct aan op de teen van de waterkering, dan kan de laagwaterlijn genomen worden [m t.o.v. NAP]. Neem dan voor de Kust en estuaria LLWS, voor Benedenrivieren OLW en voor Bovenrivieren OLR.

Hoe te bepalen

Gegeven een (lodings)profiel is het niet altijd meteen duidelijk waar de geulrand zich bevindt. Het punt dient gekozen te worden op de locatie waar een duidelijke versteiling optreedt van het min of meer horizontale voorland naar het talud van de geul. Dit is dus een enigszins subjectieve bepaling.

7.2.3 *Breedte bestorting $M_{bestort}$*

Wat is het

De *breedte bestorting* ($M_{bestort}$ [m]) is de breedte van de strook voorland die effectief is verdedigd met zinkstukken en/of bestorting.

Hoe te bepalen

De rand van de bestorting volgt enerzijds uit de aanleg (bestek) van de bodembescherming. Na verloop van jaren zal de ligging van de rand door periodieke lodingen moeten worden bevestigd. Als niet de volledige geulwand is bestort, kan door erosie van de vooroever onder de bestorting de rand van de bestorting zich in landwaartse richting verplaatsen, waardoor de situatie met betrekking tot afschuiven van het voorland ongunstiger wordt. De *breedte bestorting* volgt uit de horizontaal gemeten afstand tussen de teen van de dijk en de rand van de bodembescherming.

7.2.4 Uitwerking

De *eenvoudige toets* is een geometrische toets die bestaat uit (1) het schematiseren van het werkelijke voorlandprofiel tot een rekenprofiel, (2) het vergelijken van het rekenprofiel met het signaleringsprofiel, en (3) het beoordelen van de steilheid van het rekenprofiel. In paragraaf 7.2 is de geometrie met de belangrijkste definities gegeven. De uitwerking voor een onbestort, deels bestort en volledig bestort voorland is als volgt:

Onbestort voorland:

Voor het onbestorte voorland geldt:

$$S_{\text{sign}} = L_{\text{invloedszone}} + 1,5 H_{\text{geul}} + 3 H_{\text{geul}} = L_{\text{invloedszone}} + 4,5 H_{\text{geul}}$$

$$S_{\text{af}} = L_{\text{geulrand}} + \frac{1}{2} H_{\text{geul}} N_{\text{voorland}}$$

Waarbij $1/N_{\text{voorland}} = \tan(\alpha_{\text{voorland}})$ staat voor de geschematiseerde helling van het voorland.

Stel dat geldt:

$$\begin{aligned} L_{\text{invloedszone}} &= 10 \text{ meter} \\ H_{\text{geul}} &= 12 \text{ meter} \\ L_{\text{geulrand}} &= 50 \text{ meter} \\ \tan(\alpha_{\text{voorland}}) &= 1/N_{\text{voorland}} = 1/4 \text{ (1V:4H)} \\ N_{\text{voorland}} &= 4 \end{aligned}$$

Dan is:

$$\begin{aligned} S_{\text{sign}} &= 10 + 4,5 \cdot 12 = 64 \text{ meter uit de buitenteen van de dijk} \\ S_{\text{af}} &= 50 + \frac{1}{2} \cdot 12 \cdot 4 = 74 \text{ meter uit de buitenteen van de dijk} \end{aligned}$$

$S_{\text{af}} > S_{\text{sign}}$ In dit geval wordt voldaan aan de eis (de faalkans is verwaarloosbaar).

Deels bestort voorland:

Voor het voorland waarvan een deel bestort is geldt

$$S_{\text{sign}} = \max\{1,5 H_{\text{geul}} ; M_{\text{bestort}}\} + 3 \cdot H_{\text{onbestort}}$$

$$S_{\text{af}} = L_{\text{geulrand}} + \frac{1}{2} H_{\text{geul}} N_{\text{voorland}}$$

Stel dat geldt:

$$\begin{aligned} M_{\text{bestort}} &= 15 \text{ meter} \\ H_{\text{geul}} &= 12 \text{ meter} \\ H_{\text{onbestort}} &= 6 \text{ meter} \\ L_{\text{geulrand}} &= 50 \text{ meter} \\ \tan(\alpha_{\text{voorland}}) &= 1/N_{\text{voorland}} = 1/4 \text{ (1V:4H)} \\ N_{\text{voorland}} &= 4 \end{aligned}$$

Dan is:

$$\begin{aligned} S_{\text{sign}} &= \max\{1,5 \cdot 12 ; 15\} + 3 \cdot 6 = 18 + 18 = 36 \text{ meter uit de buitenteen van de dijk} \\ S_{\text{af}} &= 50 + \frac{1}{2} \cdot 12 \cdot 4 = 56 \text{ meter uit de buitenteen van de dijk} \end{aligned}$$

$S_{\text{af}} > S_{\text{sign}}$ dus in dit geval wordt voldaan aan de eis (de faalkans is verwaarloosbaar).

Volledig bestort voorland:

De werkwijze voor een volledig bestort voorland is gelijk aan de werkwijze voor het onbestorte voorland. Dan geldt:

$$S_{\text{sign}} = L_{\text{invloedszone}} + 1,5 H_{\text{geul}} + 3 H_{\text{geul}} = L_{\text{invloedszone}} + 4,5 H_{\text{geul}}$$

$$S_{\text{af}} = L_{\text{geulrand}} + \frac{1}{2} H_{\text{geul}} N_{\text{voorland}}$$

7.3**Volumiek gewicht****Wat is het**

Het *volumiek gewicht* van grond (γ [kN/m³]) is het gewicht van grond per volume-eenheid. Het *volumiek gewicht* is een belangrijke parameter in een stabiliteitsanalyse, omdat het aan de actieve kant van de glijcirkel van belang is voor de aandrijvende kracht, en aan de passieve kant voor de te mobiliseren schuifweerstand.

Hoe te bepalen?

Het *volumiek gewicht* van grondlagen wordt bepaald op ongeroerde grondmonsters uit boringen door het gewicht en het volume van de monsters vast te stellen.

Aandachtspunten

Voor het toetsspoor *afschuiving voorland* dient gebruik te worden gemaakt van het *verzadigde* volumiek gewicht. Zie verder de *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit*, paragraaf 7.2.

7.4**Effectieve verticale spanning****Wat is het**

De *effectieve verticale spanning* (σ'_{vz} [kN/m²]) is de (verticale) spanning in de grond ten gevolge van het gewicht van de bovenliggende grondlagen, minus de waterspanning. De waterspanning wordt bepaald door het freatisch vlak en de stijghoogte in het watervoerend pakket.

De *effectieve verticale spanning* wordt berekend uit de gegevens van het volumiek gewicht en de waterspanning. Een schatting van de *effectieve verticale spanning* is van belang voor het uitvoeren en analyseren van veld- en laboratoriumproeven.

Hoe te bepalen

Zie de *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit*, paragraaf 7.3.

7.5**Hoek van inwendige wrijving****Wat is het**

De hoek van inwendige wrijving (ϕ' [°]) is een maat voor de wrijving tussen gronddeeltjes. Bij een toenemende normaalspanning op de grond neemt de wrijving tussen de gronddeeltjes evenredig toe. Dit wordt gekarakteriseerd met de hoek van inwendige wrijving.

Voor het uitvoeren van gedraineerde stabiliteitsanalyses dan wel voor de schuifsterkte van goed doorlatende grondlagen wordt gebruik gemaakt van gedraineerde schuifsterkte-eigenschappen ofwel effectieve schuifsterkteparameters.

Voor macrostabiliteit is de critical state hoek van inwendige wrijving van belang. Bij macrostabiliteit zijn grote vervormingen nodig om de schuifsterkte van de grond langs het gehele schuifvlak te mobiliseren. Deze grote vervormingen corresponderen met de critical state, zie *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit*, bijlage C.4.

Hoe te bepalen

De critical state hoek van inwendige wrijving wordt in het laboratorium bepaald met gedraineerde triaxiaalproeven op ongestoorde grondmonsters of geprepareerde grondmonsters. Zie verder de *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit* paragraaf 7.5.

7.6

Normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkte ratio S Wat is het

De normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio (S [-]) is de ongedraineerde schuifsterkte gedeeld door de consolidatiespanning bij een overconsolidatieratio $OCR = 1$. Het is een wrijvingsparameter voor het karakteriseren van de ongedraineerde schuifsterkte van grond onder normaal geconsolideerde condities.

Bij het bepalen van S kan gebruik worden gemaakt van de piekwaarde van de schuifsterkte of van de waarde van de schuifsterkte bij grote rek (ultimate state). Voor de *gedetailleerde toets* wordt uitgegaan van de grote-rek-waarde.

Hoe te bepalen

De normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio S wordt met behulp van laboratoriumonderzoek bepaald. Hierbij is een stapsgewijze aanpak de aangewezen weg. Zie hiervoor de *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit* paragraaf 7.6.

7.7

Sterktetoenamen-exponentWat is het

De sterktetoenamen-exponent (m [-]) is een parameter bij de berekening van de ongedraineerde schuifsterkte s_u . De sterktetoenamen-exponent bepaalt de mate waarin het effect van de belastinggeschiedenis (grensspanning σ'_{vy} , overconsolidatieratio OCR) doorwerkt in de ongedraineerde schuifsterkte. De sterktetoenamen-exponent m is een dimensieloze factor, de eenheid is dus [-].

Hoe te bepalen

Voor het bepalen van de ongedraineerde sterkteparameters is een stapsgewijze aanpak (in combinatie met de bepaling van S) de aangewezen weg, zie de *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit*, paragraaf 7.7.

7.8

GrensspanningWat is het

De grensspanning (σ'_{vy} [kN/m²]) is een maat voor de belastinggeschiedenis van de grond. Wanneer de grensspanning relatief hoog is ten opzichte van de actuele effectieve verticale spanning (hoge overconsolidatieratio OCR) dan is de grond relatief sterk samengedrukt. Het poriënvolume van de grond is dan relatief klein in relatie tot de actuele effectieve verticale spanning.

Bij een effectieve spanning lager dan de grensspanning is het gedrag van de grond relatief stijf in vergelijking met het gedrag bij een effectieve spanning gelijk aan de grensspanning. Tevens is de ontwikkeling van de wateroverspanning bij ongedraineerd afschuiven geringer.

De parameter is niet gekoppeld aan een eenheid van de Stochastische Ondergrondschematisatie.

Hoe te bepalen

Vanwege het belang van de parameter is het belangrijk de grensspanning lokaal vast te stellen. Het toepassen van sonderingen met correlaties is daarvoor een efficiënt middel. Zie hiervoor de *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit*, paragraaf 7.8 en bijlage I.

7.9 **Freatisch vlak**

Wat is het

Het freatisch vlak [m t.o.v. NAP] is de vrije grondwaterspiegel, zijnde de (hypothetische) positie waar de waterdruk gelijk is aan de atmosferische druk.

Hoe te bepalen

Voor het toetspoor *afschuiving voorland* wordt het freatisch vlak geacht te liggen op het maaiveld van het voorland.

7.10 **Waterspanning**

Wat is het

De waterspanning [kN/m²] is de waterdruk op een willekeurige locatie in de ondergrond. De grootte van de waterdruk op een willekeurige locatie wordt gekenmerkt door de stijghoogte (m t.o.v. NAP) op deze locatie. De waterspanning is het resultaat van een schematisering van het freatisch vlak en de stijghoogte in het watervoerend pakket. De waterspanning is een berekende grootheid.

Hoe te bepalen

In eerste instantie met behulp van een eenvoudige schematisering met hydrostatische waterdruk ten opzichte van het freatisch vlak. Voor eventuele optimalisatie kunnen peilbuiswaarnemingen worden gebruikt en in de cohesieve lagen kan de waterspanning worden bepaald met waterspanningsmetingen. Zie verder de *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit*, paragraaf 7.10, en het TR Waterspanningen bij dijken [6].

7.11 **Buitenwaterstand (hydraulische belasting)**

Wat is het

De buitenwaterstand [m t.o.v. NAP] is het niveau van het oppervlaktewater dat direct onder invloed staat van een stormvloed, van hoog oppervlaktewater van een van de grote rivieren, van hoog water van het IJsselmeer of Markermeer of van een combinatie daarvan.

Hoe te bepalen

Voor het mechanisme *afschuiving voorland* is een lage buitenwaterstand maatgevend in combinatie met een hoge grondwaterstand door een voorafgaand hoogwater of intensieve regenval. De maatgevende omstandigheden, die afhankelijk zijn van de locatie, kunnen ontleend worden aan de Waternormalen van Rijkswaterstaat[4] De criteria voor wat maatgevend is worden ontleend aan het Technisch Rapport Ontwerpbelastingen voor het rivierengebied [5].

8 Voorbeeld: bepaling macrostabiliteit van voorland

8.1 Algemeen

In dit hoofdstuk worden de te doorlopen toetsstappen voor de eenvoudige toets en de gedetailleerde toets voor het toetsspoor Afschuiving voorland en de daarbij behorende schematisering en de beoordeling van de resultaten geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld. Het betreft de toetsstappen uit hoofdstuk 23 van *WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid*. Aan de hand van dit voorbeeld worden de toetsen doorlopen, de *eenvoudige toets* en de *gedetailleerde toets*. In de *gedetailleerde toets* wordt gestart met een globale stochastische ondergrondschematisatie volgens de SOS en default schuifsterkte parameters. Dit voorbeeld is dezelfde casus als in de schematiseringshandleiding zettingsvloeiing.

8.2 Te beoordelen dijkstrekking

Dit voorbeeld betreft een dijkstrekking met een overwegend zandige vooroever. In de ondergrond zijn ook enkele kleilagen aanwezig. De aangelegen rivier heeft invloed op de sedimentatie en erosie van het voorland. In deze dijkstrekking spelen fluctuerende waterstanden als gevolg van het getijde een rol. De erosie en sedimentatie en de wisselende waterdrukken kunnen van invloed zijn op de stabiliteit van het voorland.

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, u_2) 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.

Deze data is veelal beschikbaar vanuit een of meerder datamanagementsystemen bij het Waterschap.

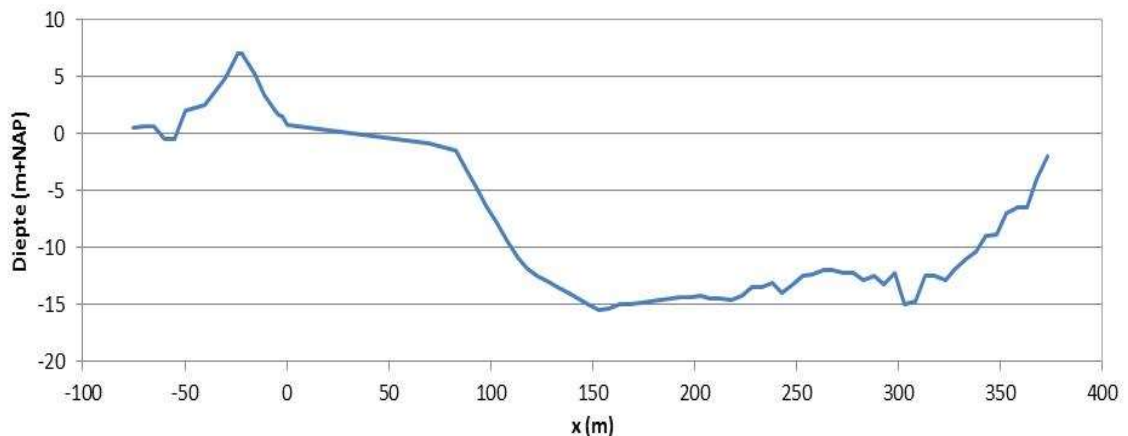
Op basis van de geometrie (bathymetrische inmetingen), de aanwezigheid van bestortingen (op basis van side scan sonar beelden) en de opbouw van de ondergrond volgens de SOS is een dijkvakindeling gemaakt.

In het dijkvak in dit voorbeeld heeft het voorland een breedte van 83 m. Het niveau van het voorland is ongeveer NAP. De bodem van de geul ligt op ongeveer NAP -15 m. In dit dijkvak is geen bestorting aanwezig. De geometrie van de waterkering, het voorland en het onderwatertalud zijn weergegeven in Figuur 8.1.

Het beschouwde dijkvak 3 heeft een lengte van 200 m.

Laag water is NAP -0,6 m volgens de gegevens over de rivierwaterstanden ontleend aan:

<http://rijkswaterstaat.nl/water/waterdata-en-waterberichtgeving/metingen/waternormalen/index.aspx>.



Figuur 8.1 Geometrie van de waterkering, het voorland en het onderwatertalud

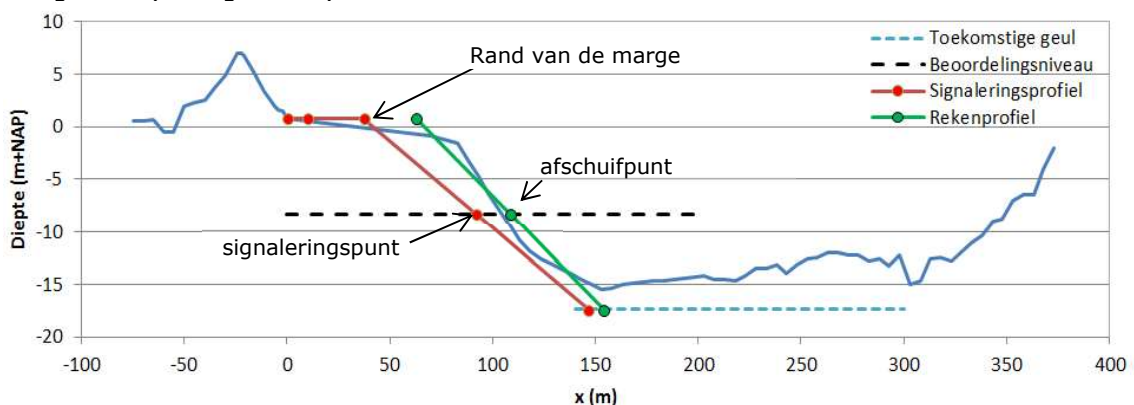
Uit bathymetrische inmetingen (lodingen) tussen 2000 en 2013 zijn de morfologische veranderingen afgeleid. Ter plaatse van de geulteen is in 11 jaar in verticale richting een verandering van circa -3 tot -1 meter en lokaal van -5 tot -3 meter opgetreden. Gemiddeld komt dit dus neer op circa 0,3 meter verdieping per jaar.

De normstelling van het dijkvak is weergegeven in paragraaf 8.4.5, maar is voor de *eenvoudige toets* nog niet relevant

8.3

Eenvoudige toets

De *eenvoudige toets* wordt uitgevoerd volgens het schema in figuur 23.1 van *WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid*. De *eenvoudige toets* bestaat uit 2 stappen. In de eerste stap wordt gecontroleerd of een afschuiving schadelijk is (stap E.1). Voor deze controle worden het signaleringsprofiel, rekenprofiel, beoordelingsniveau, signaleringspunt en afschuifpunt vastgesteld (zie Figuur 8.2).



Figuur 8.2 Geometrie met toekomstige geuldiepte. Het beoordelingsniveau, signaleringsprofiel en beoordelingsprofiel zijn ook aangegeven.

In de *eenvoudige toets* kan bij de bepaling van de meest ongunstige geometrie gedurende de beoordelingsperiode in eerste instantie conservatief aangenomen worden dat de erosiesnelheid gelijk blijft. Voor de beoordelingsperiode wordt uitgegaan van 5 jaar. De geulbodem na 5 jaar zou dan op NAP-17,4 komen te liggen.

8.3.1

Invloedszone

Voor de invloedszone is een maat van 10 m vanuit de buitenteen (afstand tussen het eerste rode puntje en tweede rode puntje op het signaleringsprofiel, het eerste rode puntje is de

buitenteenlijn) van de waterkering vastgesteld. De geuldiepte is 18,2 m, met de geulrand op NAP +0,8 m (niveau conservatief gekozen bij de buitenteen van de waterkering) en het diepste punt van de geul inclusief toekomstige verdieping op NAP -17,4 m.

8.3.2 *Signaleringsprofiel*

Buiten de invloedszone wordt een marge aangehouden van 1,5 maal de geuldiepte. De rand van de marge (dit is het derde rode bolletje op het signaleringsprofiel en aangegeven met de pijl in figuur 2) bevindt zich daarmee op 37,3 m ($10\text{ m} + 1,5 \cdot 18,2\text{ m}$) uit de buitenteen van de waterkering. Vanaf de marge verloopt het signaleringsprofiel met een helling van 1:6 naar het niveau van het diepste punt van de geul. Het einde van het signaleringsprofiel bevindt zich op 146,5 m ($10\text{ m} + 1,5 \cdot 18,2\text{ m} + 6 \cdot 18,2\text{ m}$) vanaf de buitenteen van de waterkering.

8.3.3 *Beoordelingsprofiel*

De helling van het beoordelingsprofiel is bepaald door de gemiddelde helling van het steilste deel van de geul van het aanwezige profiel te bepalen. Dit deel bevindt zich tussen $x = 83\text{ m}$ en $x = 153\text{ m}$. De helling van dit deel bedraagt gemiddeld 1:5. Vervolgens is het beoordelingsprofiel met dezelfde helling 1:5 zo gepositioneerd in het aanwezige profiel dat het beoordelingsprofiel en het werkelijk aanwezige profiel gemiddeld over elkaar heen liggen (het volume grond "links" en "rechts" van het beoordelingsprofiel zijn ongeveer gelijk).

8.3.4 *Afschuifpunt en signaleringspunt*

Het beoordelingsniveau ligt op NAP -8,3 m (halverwege de geulrand op +0,8 m en de toekomstige geulbodem op -17,4 m). Op het snijpunt van het beoordelingsniveau en het beoordelingsprofiel ligt het afschuifpunt. Op het snijpunt van het beoordelingsniveau en het signaleringsprofiel ligt het signaleringspunt.

8.3.5 *Vooroeverinformatie*

Uit de data volgt dat in dit dijkvak geen vooroeverbetasting aanwezig is. Daarmee is de controle of een afschuiving schadelijk is voor dit dijkvak uitgevoerd. In de naburige dijkvakken is wel bestorting aanwezig. Voor die dijkvakken dient de controle of een afschuiving schadelijk is te worden uitgevoerd voor een situatie met bestorting.

8.3.6 *Eenvoudige toets op afschuiving vooroever*

Op basis van de controle wordt geconcludeerd dat het signaleringspunt S_{sign} landwaarts van het afschuifpunt S_{af} ligt. De afstand tussen beide punten is 16 m. Een eventuele afschuiving van het voorland is daardoor niet schadelijk voor de veiligheid. De faalkans voor afschuiving voorland is daarom verwaarloosbaar.

Omdat in stap E.1 is geconcludeerd dat de faalkans voor afschuiving voorland verwaarloosbaar is, is de beoordeling van afschuiving voorland volgens het schema van Figuur 23.1 van *WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid* voltooid en is het resultaat niet van toepassing. Hiermee is dit toetsspoor afgerond.

Voor het voorbeeld wordt echter ook stap E.2 van het genoemde schema doorlopen. Hier wordt nagegaan of een afschuiving mogelijk is. Een afschuiving kan optreden wanneer de gemiddelde helling van de totale geul steiler is dan of gelijk aan 1:4,5. Tevens worden eisen gesteld aan de helling van de steilste delen van de geul over een hoogte van minimaal 5 m.

Voor een situatie met een kleilaag zonder zand moet de lokale helling steiler dan of gelijk aan 1:1 zijn. Voor een situatie met zand moet de lokale helling steiler dan of gelijk aan 1:2 zijn. In het aanwezige profiel tussen $x = 83\text{ m}$ en $x = 153\text{ m}$ is de gemiddelde helling 1:5. De hellingen van de steilste delen van de geul zijn 1:2,9. Daarmee wordt niet voldaan aan de criteria. De faalkans ten gevolge van afschuiving van het voorland is daarmee verwaarloosbaar.

8.4 Gedetailleerde toets

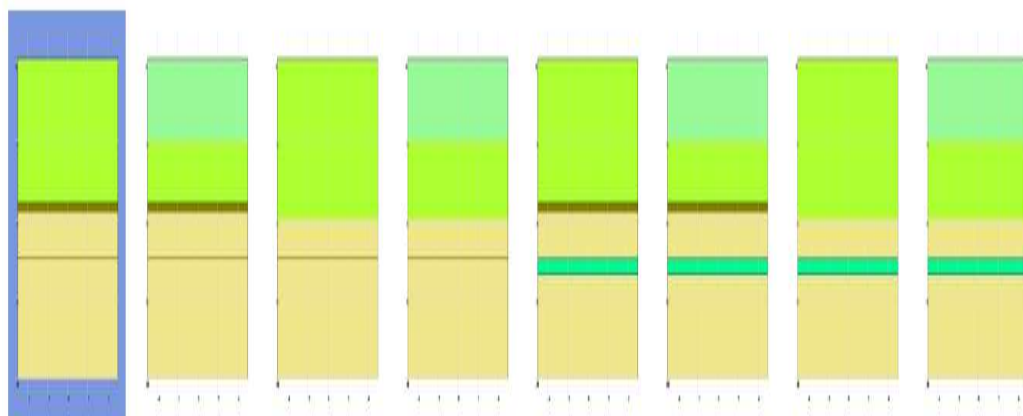
De *gedetailleerde toets* per dijkvak wordt uitgevoerd volgens paragraaf 23.2 van WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid.

8.4.1 Uitwendige geometrie

De actueel aanwezige geometrie is getoond in Figuur 8.1. De geometrie is ingevoerd in D-Stability (2019). Op basis van de morfologische veranderingen in het verleden en de geologische opbouw (aanwezigheid kleilagen) kan een inschatting van de toekomstige geulontwikkeling gemaakt worden. 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 geulbodembodem, een kleilaag zit. Mogelijk zal deze kleilaag dus binnen enkele jaren bereikt worden. Waarschijnlijk zal de erosiesnelheid dan sterk afnemen.

8.4.2 Opbouw van de ondergrond volgens SOS

De SOS kent voor deze dijkstrekking 8 ondergrondscenario's. De ondergrondscenario's zijn getoond in Figuur 8.3. In Tabel 8.1 zijn de SOS ondergrondscenario's met kansen van voorkomen en opbouw van grondlagen met modale waarden van het niveau van de laagscheidingen weergegeven. In de eerste fase van de *gedetailleerde toets* worden stabiliteitsanalyses uitgevoerd voor alle 8 ondergrondscenario's. Het niveau van de laagscheidingen is daarbij aangehouden op de modale waarden die de SOS geeft. In het vervolg kunnen de scenario's eventueel worden aangescherpt op basis van lokale informatie en beter worden afgestemd op het faalmechanisme macrostabiliteit.



Figuur 8.3 SOS ondergrondscenario's. Zie Tabel 8.1 voor de toelichting.

Tabel 8.1 SOS ondergrondscenario's met kansen van voorkomen en opbouw van grondlagen met modale waarden van het niveau van de laagscheidingen

ID1	P(Si) 32%	ID2	P(Si) 8%	ID3	P(Si) 32%	ID4	P(Si) 8%	ID5	P(Si) 8%	ID6	P(Si) 2%	ID7	P(Si) 8%	ID8	P(Si) 2%
Eenheid	Top [m NAP]	Eenheid	Top [m NAP]	Eenheid	Top [m NAP]	Eenheid	Top [m NAP]	Eenheid	Top [m NAP]	Eenheid	Top [m NAP]	Eenheid	Top [m NAP]	Eenheid	Top [m NAP]
H_M_g_zm	0,5	H_Ro_z&k	0,5	H_M_g_zm	0,5	H_Ro_z&k	0,5	H_M_g_zm	0,5	H_Ro_z&k	0,5	H_M_g_zm	0,5	H_Ro_z&k	0,5
H_M_g_zm	-10	H_M_g_zm	-10	H_M_g_zm	-10	H_M_g_zm	-10	H_M_g_zm	-10	H_M_g_zm	-10	H_M_g_zm	-10	H_M_g_zm	-10
P_Rk_k&s	-18	P_Rk_k&s	-18	P_Rg_zm	-20	P_Rg_zm	-20	P_Rk_k&s	-18	P_Rk_k&s	-18	P_Rg_zm	-20	P_Rg_zm	-20
P_Rg_zm	-19	P_Rg_zm	-19	P_Rg_zm	-25	P_Rg_zm	-25	P_Rg_zm	-19	P_Rg_zm	-19	P_Ov_a_sd	-25	P_Ov_a_sd	-25
P_Rg_zm	-25	P_Rg_zm	-25					P_Ov_a_sd	-25	P_Ov_a_sd	-25	P_Rg_zm	-27	P_Rg_zm	-27
								P_Rg_zm	-27	P_Rg_zm	-27				

P(Si) = Kans van voorkomen scenario (-)

De SOS geeft informatie over de ondergrond tot aan het binnendijkse maaiveld. De ondergrond boven het niveau van het binnendijkse maaiveld wordt gekarakteriseerd als antropogeen materiaal ofwel dijkmateriaal. In dit voorbeeld is dat op basis van de beschikbare gegevens klei. Dit geldt voor alle 8 scenario's.

Voor verdere informatie over de toepassing van de SOS voor deze locatie wordt verwezen naar de gedetailleerde uitwerking in de Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS [3].

8.4.3

Schuifsterkte parameters

Voor dit dijkvak zijn geen lokale schuifsterkteparameters beschikbaar. Daarom wordt uitgegaan van de default waarden uit de schematiseringshandleiding macrostabiliteit. In dit dijkvak bestaat de ondergrond overwegend uit zandlagen, maar er zijn ook kleiige lagen aanwezig. Voor de zandlagen wordt de schuifsterkte gekarakteriseerd met een hoek van inwendige wrijving. Voor de kleiige lagen worden de ongedraineerde schuifsterkte parameters ongedraineerde schuifsterkte ratio S_d , sterkte toename exponent m en grensspanning σ'_{vy} toegepast. De schuifsterkte parameters zijn gekoppeld aan de SOS eenheden. De toegepaste parameter waarden zijn vermeld in Tabel 8.2. In de schematiseringshandleiding zijn verwachtingswaarde gegeven en variatiecoëfficiënten op basis waarvan karakteristieke waarde voor de schuifsterkte zijn bepaald. De karakteristieke waarde gedeeld door de materiaalfactor (= 1,0) geeft de rekenwaarde voor de parameter.

Tabel 8.2 Rekenwaarden van de schuifsterkte parameters gekoppeld aan de SOS eenheden

SOS eenheid	Omschrijving	Volume-gewicht γ (kN/m ³)	Ongedraïneerde schuifsterkte ratio S_d (-)	Sterkte toename exponent m_d (-)	Pre overburden pressure POP_d (kPa)	Hoek van inwendige wrijving ϕ_d' (°)
H_Mg_zm	Getijdengeul-zand	20,0	--	--	--	30,0°
H_Ro_z&k	Zand en klei (oever)	18,0	0,22	0,90	8	--
P_Rk_k&s	Klei en silt (Wijchen)	18,0	0,22	0,90	10	--
P_Rg_zm	Rivierbed-dingszand	20,0	--	--	--	30,0°
P_Ova_sd	Slecht doorlatend	20,0	0,22	0,90	10	--
H_Aa_ht	Dijksmateriaal	19,0	0,26	0,90	7	--

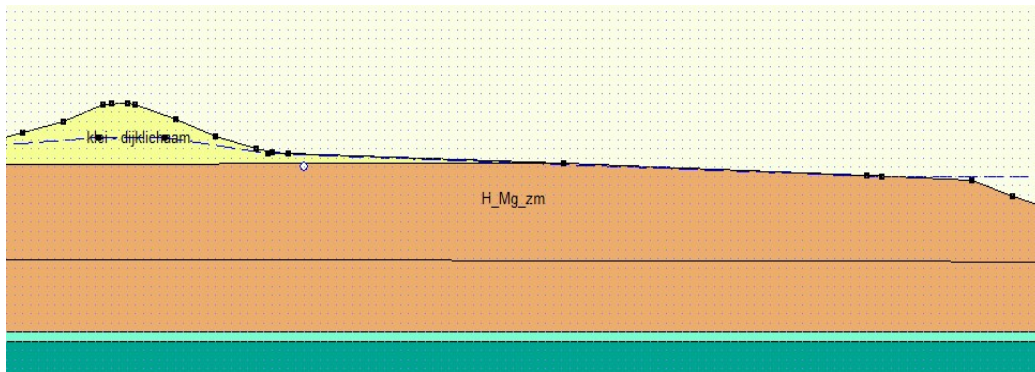
Voor deze casus zijn de default waarden voor POP uit de Schematiseringshandleiding macrostabiliteit rechtsreeks toegepast in de berekeningen, zonder omrekening naar grensspanning. Dat is in dit geval verdedigbaar, omdat er geen grote veranderingen in waterspanningen en effectieve spanningen zijn ten opzichte van de dagelijkse gemiddelde situatie. De default waarden voor POP in de Schematiseringshandleiding macrostabiliteit gelden voor de dagelijkse gemiddelde situatie.

De materiaalfactoren voor ongedraineerde schuifsterkte ratio S_d , sterkte toename exponent m en grensspanning σ'_{vy} zijn 1,0.

8.4.4

Waterspanningen

Voor de waterspanningen is in eerste instantie een eenvoudige schematisatie toegepast. Deze bestaat uit een freatisch vlak met een hydrostatisch waterdrukverloop. Bij het voorland ligt het freatisch vlak dicht onder het maaiveld. In de rivier is de waterstand gelijk aan Laag Laag Water (NAP -0,6 m). De waterstand in de kern van de dijk volgt uit metingen en bedraagt NAP + 3,2 m. Het toepassen van een waterstand op het voorland gelijk aan maaiveldniveau geldt als een conservatieve schematisatie. In onderstaande Figuur 8.4 is dit weergegeven.



Figuur 8.4 Schematisatie van de waterspanning (hydrostatisch verloop)

8.4.5 *Bepalen vereiste stabiliteitsfactor*

Op basis van hoofdstuk 23 van WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid is de bijdrage aan de overstromingskans verwaarloosbaar als de berekende faalkans kleiner is dan de faalkanseis op vakniveau per jaar ($P_{\text{eis,vak}}$). Gelijk aan de faalmechanismen macrostabiliteit binnenwaarts (STBI) en macrostabiliteit buitenwaarts (STBU) is de faalkanseis:

$$P_{\text{eis,drsn}} = P_{\text{voorland}} / N$$

Met:

$$N = 1 + (a \cdot L_{\text{traject}})/b$$

Waarin:

$P_{\text{eis,drsn}}$	Faalkanseis op doorsnede niveau [1/jaar]
P_{voorland}	Kans van optreden van voorlandmechanisme waarbij de bijdrage aan de overstromingskans verwaarloosbaar wordt geacht ($P_{\text{voorland}} = 0.01$ [1/jaar])
N	Lengte-effect factor [-]
a	Fractie van lengte van traject dat gevoelig is voor betreffende faalmechanisme (-)
b	Lengte van onafhankelijke, equivalente vakken voor betreffende faalmechanisme (m)
L_{traject}	Lengte van dijktraject zoals vastgelegd in de Waterwet (m)

Met hierin $a = 0.033$ en $b = 50$ m.

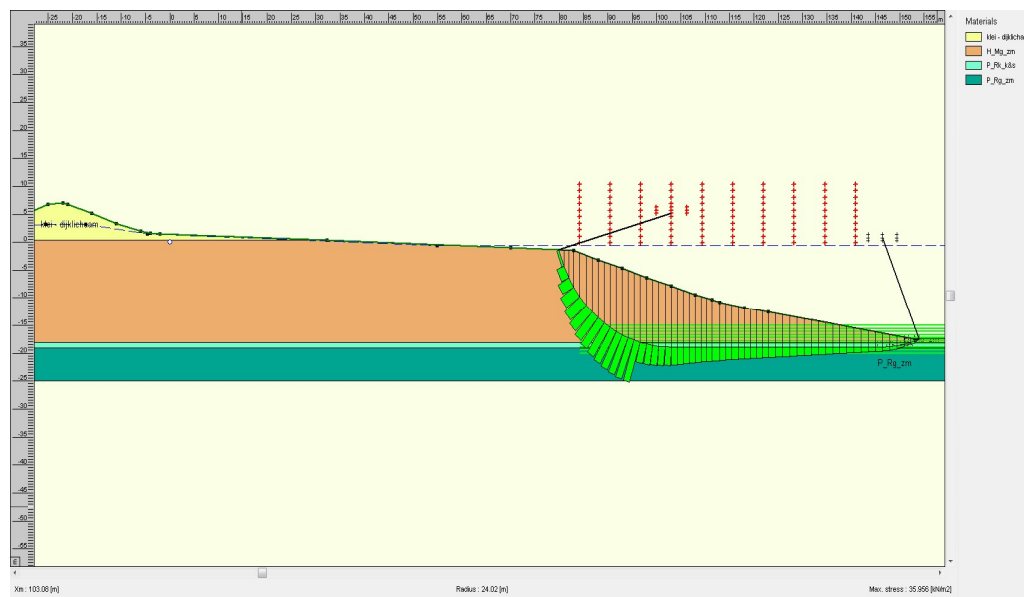
De faalkanseis wordt volgens de aanpak van STBI en STBU vertaald in een veiligheidsfactor.

8.4.6 *Uitvoeren glijvlakanalyses*

Op basis van de hiervoor beschreven gegevens zijn 8 schematisaties opgesteld in D Stability 2019. Voor deze schematisaties zijn schuifvlakberekeningen uitgevoerd met het model LiftVan.

8.4.7 *Berekeningsresultaten*

Voor alle 8 ondergrondscenario's zijn maatgevende schuifvlakken en stabiliteitsfactoren berekend. Hierbij is het belangrijk dat de glijvlakken zodanig van omvang zijn dat ze van invloed hebben om de directe faalmechanismen.



Figuur 8.5 Berekend schuifvlak met stabiliteitsfactor $F_{d,i} = 1,56$ voor ondergrondscenario 1 met kans van voorkomen $P(S_i)$ van 32%.

Het resultaat van het meest kritische schuifvlak is weergegeven in Figuur 8.5. De berekende stabiliteitsfactor $F_{d,i} = 1,56$. Het betreft ondergrondscenario 1 met een kans van voorkomen van 32%. De berekende stabiliteitsfactoren van de overige 7 ondergrondscenario's liggen tussen 1,59 en 2,19. De berekende stabiliteitsfactoren voor alle scenario's zijn weergegeven in Tabel 8.3.

Tabel 8.3 Berekende stabiliteitsfactoren en faalkansen

Sce- nario	Stabiliteits- factor berekend $F_{d,i}$ (-)	Stabiliteits- factor correctie $F_{d,i}/\gamma_d$ (-)	Betrouw- baarheids-index bij scenario β_i (-)	Faalkans bij scenario $P_{f,i}$ (1/jaar)	Kans van voorkomen scenario $P(S_i)$ (-)	Faalkans gegeven scenario $P_{f S_i}$ (1/jaar)
1	1,56	1,46	6,99	$1,41 * 10^{-12}$	0,32	$4,52 * 10^{-13}$
2	1,59	1,49	7,17	$3,66 * 10^{-13}$	0,08	$2,93 * 10^{-14}$
3	2,17	2,03	10,79	$1,98 * 10^{-27}$	0,32	$6,35 * 10^{-28}$
4	2,13	1,99	10,54	$2,90 * 10^{-26}$	0,08	$2,32 * 10^{-27}$
5	1,62	1,51	7,36	$9,19 * 10^{-14}$	0,08	$7,35 * 10^{-15}$
6	1,66	1,55	7,61	$1,38 * 10^{-14}$	0,02	$2,75 * 10^{-16}$
7	2,19	2,05	10,91	$5,08 * 10^{-28}$	0,08	$4,06 * 10^{-29}$
8	2,12	1,98	10,48	$5,60 * 10^{-26}$	0,02	$1,12 * 10^{-27}$
Faalkans doorsnede $P_{f,dsn}$ (1/jaar)						$4,89 * 10^{-13}$

γ_d is de modelfactor 1,07.

Op basis van de vergelijkingen 5.2 en 5.3 in paragraaf 5.2 (macrostabiliteit binnenwaarts) van *WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid* zijn de berekende stabiliteitsfactoren $F_{d,i}$ omgerekend naar de faalkans voor de doorsnede $P_{f,dsn}$. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 8.3.

Beoordeling

De berekende faalkans voor de doorsnede $P_{f,dsn}$ bedraagt $4,89 * 10^{-13}$ per jaar. Deze faalkans dient vervolgens vergeleken te worden met de faalkanseis () *WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid*.

Als uit de *gedetailleerde toets* was gebleken dat de faalkans groter was dan de eis dan moest een *toets op maat* te worden uitgevoerd waarbij het scenario dat het voorland afschuift wordt meegenomen in de beoordeling van de directe faalmechanismen. De kans dat het scenario optreedt, is dan gelijk aan de berekende faalkans in de *gedetailleerde toets*.

Verantwoording

Deze *Schematiseringshandleiding afschuiving voorland* 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:

J.K. van Deen (Deltares)
Update 2019
Bob Maaskant (HKV Lijn in Water).
Robert 't Hart (Deltares.)

Regie:

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

Review:

A. van Duinen (Deltares).
B. Hardeman (RWS).

Eindredactie:

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

Eindcontrole:

R.M. Slomp (RWS).
D.P. de Bake (RWS)
J.G. Knoeff (Deltares).
M. Bottema (RWS).

A Literatuur

- [1] *Actueel hoogtebestand Nederland (AHN)*. <http://www.ahn.nl/index.html>. Programmasecretariaat AHN, Amersfoort (benaderd 28 juni 2016).
- [2] *Handleiding datamanagement WBI 2017*. Rijkswaterstaat – Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.
- [3] *Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS*. G. Kruse, M. Hijma, R. van der Meij. Deltares rapport 1209432-004-GEO-0002, Delft, december 2015.
- [4] *Normaalwaarden afvoeren*. <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterdata-en-water-berichtgeving/metingen/waternormalen/index.aspx> (benaderd 28 juni 2016).
- [5] *Technisch Rapport Ontwerpbelastingen voor het rivierengebied*. Uitgave: Ministerie van Verkeer en Waterstaat / Expertise Netwerk Waterkeren, ISBN 978-90-369-1409-3. Den Haag, juli 2007.
- [6] *Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, RWS-DWW 2004-056. ISBN-90-369-5565-3. Delft, september 2004.
- [7] *Addendum I bij de Leidraad Zee- en Meerdijken t.b.v. het ontwerpen van meerdijken*. Uitgave: Ministerie van Verkeer en Waterstaat / Expertise Netwerk Waterkeren 25 maart 2009.
- [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] *Handreiking Voorland*, Niels Roode, Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard, Bob Maaskant, HKV Lijn in Water, Matthijs Boon, Horvat & Partners

B Afkortingen, begrippen en symbolenlijst

Voor lijsten met afkortingen en begrippen wordt verwezen naar appendix B van *WBI 2017 Bijlage I Procedure*.

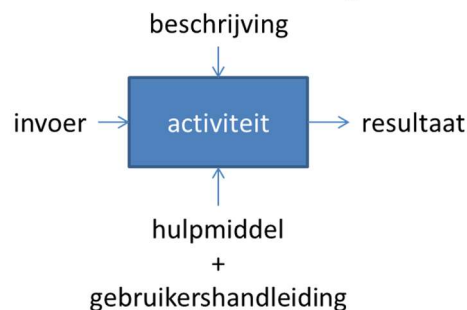
Symbool	Omschrijving	Eenheid
H_{geul}	hoogte van het talud van het voorland, tussen teen onderwatertalud en de geulrand (verticaal)	[m]
$M_{bestort}$	breedte van het verdedigde voorland, tussen de rand van de bestorting en de dijkteen (horizontaal)	[m]
m	sterktetoename-exponent	[-]
S	normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkte ratio	[-]
s_u	ongedraineerde schuifsterkte	[kN/m ²]
V_{lokaal}	equivalente oevermigratiesnelheid	[m/jaar]
α_R	helling van het talud van het voorland, tussen teen onderwatertalud en de geulrand (t.o.v. horizontaal)	[rad]
γ	volumiek gewicht grond	[kN/m ³]
ϕ'	hoek van inwendige wrijving	[°]
σ'_{vi}	effectieve verticale spanning	[kN/m ²]
σ'_{vy}	grensspanning	[kN/m ²]

C Schema werkwijze beoordeling afschuiving voorland

Hieronder is schematisch de werkwijze van de beoordeling van het toetsspoor Afschuiving voorland (VLAF) weergegeven (Figuur 2).

C.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 1.

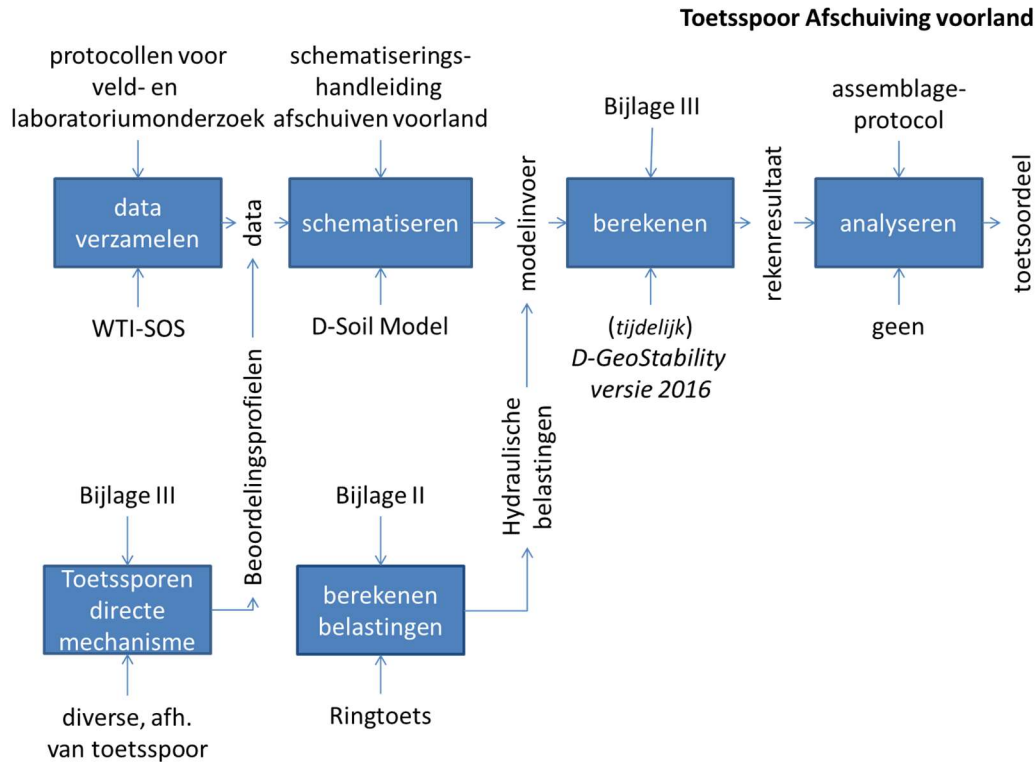


Figuur 1 Het algemene schema van een activiteit. Een aaneenschakeling van benodigde activiteiten bij een beoordeling geeft de schematische werkwijze van de beoordeling weer.

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).

C.2 Schema werkwijze beoordeling Afschuiving voorland (VLAF)



Figuur 2 Schema werkwijze beoordeling Afschuiving voorland (VLAF). 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.

Let op:

Vanaf november 2019 is D-Stability beschikbaar als opvolger van D-Geo Stability en de BM Macrostabiliteit.
Kijk altijd op www.helpdeskwater.nl voor de meest recente versies van applicaties.

C.3 Referenties bij het schema werkwijze beoordeling Afschuiving voorland (VLAF)

C.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

- WTI-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.

C.3.2 Activiteit 'schematiseren'

Referenties beschrijving activiteit

- *Schematiseringshandleiding Afschuiving 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.

C.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.
- *Tool Waterstandsverloop*
- *Gebruikershandleiding Waterstandsverloop, Versie 2.0*. J. Ansink, R. Kamp, C.P.M. Geerse. HKV, Rapport PR2803.10. Lelystad, mei 2014.
- *Waternormalen* (www.rijkswaterstaat.nl/waternormalen). Rijkswaterstaat.

C.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

- *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.
- *Tijdelijke D-GeoStability, versie 2016*.
- *Fenomenologische beschrijving faalmechanismen WBI*. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.

C.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. Diermanse, K.S. Lam, H. Knoeff, Deltares rapport 1230086-010-GEO-0001, Delft, juni 2016.

Referenties hulpmiddel activiteit

- *Assemblagetool WBI2017.* Nog in ontwikkeling.

C.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.