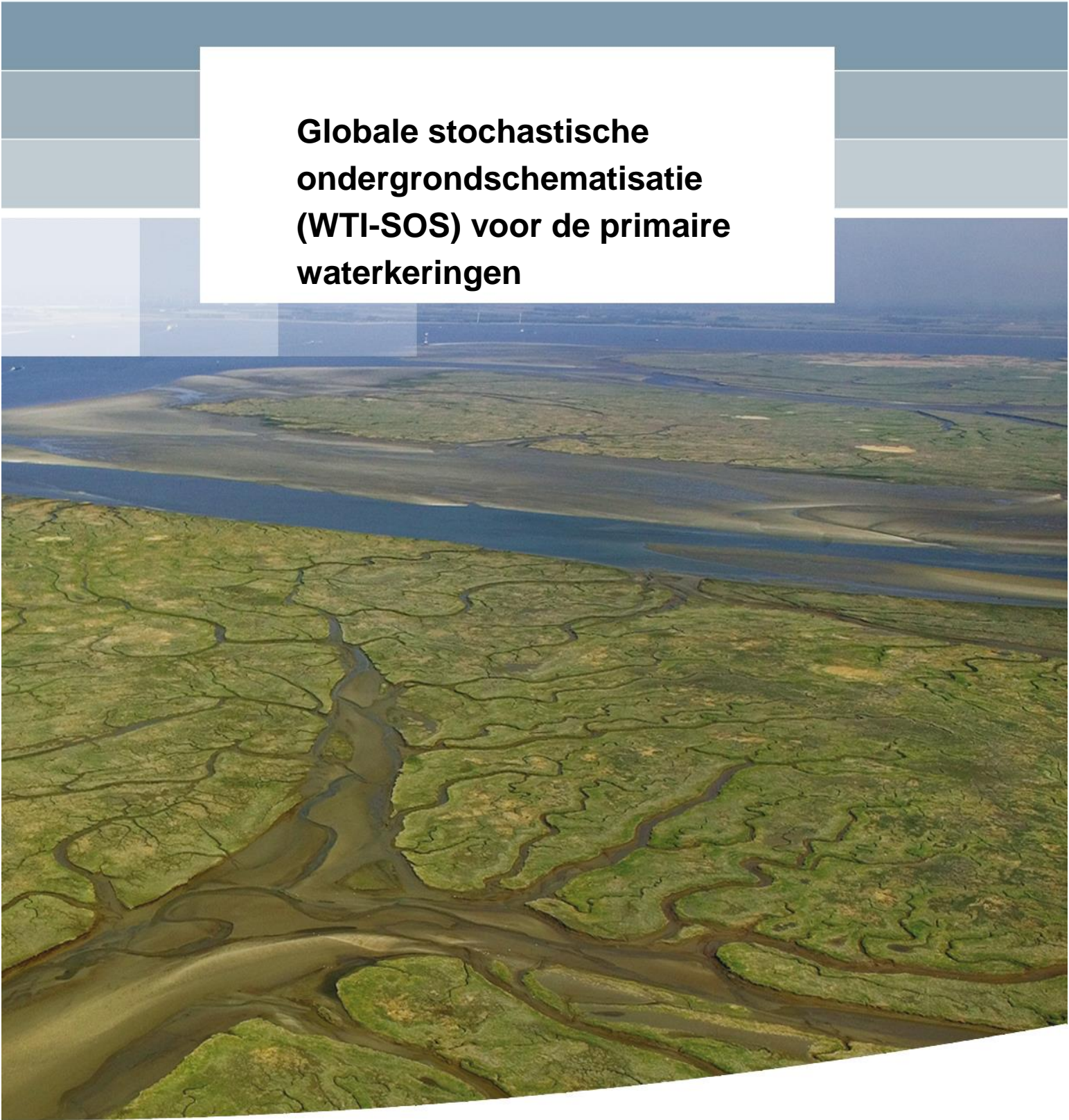


**Globale stochastische
ondergrondschematisatie
(WTI-SOS) voor de primaire
waterkeringen**



**Globale stochastische
ondergrondschematisatie (WTI-
SOS) voor de primaire
waterkeringen**

Marc Hijma
Kin Sun Lam

1209432-000

Titel

Globale stochastische ondergrondschematisatie (WTI-SOS) voor de primaire waterkeringen

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	1209432-000	1209432-000-GEO-0006	51

Trefwoorden


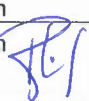

WTI 2017, WTI-SOS, grondopbouw, waterkering, stochastisch schematiseren, dijkveiligheid

Samenvatting

Deltares ontwikkelt voor Rijkswaterstaat de inhoudelijke componenten voor het Wettelijk Toets Instrumentarium (WTI). Het WTI moet in 2017 bruikbaar zijn tijdens het uitvoeren van de vierde toetsronde van de waterkeringen. Een onderdeel van het WTI is een globale stochastische ondergrondschematisatie (WTI-SOS) voor, afgezien van de kustduinen, alle primaire waterkeringen. Hierbij is de voor de toepassing relevante variatie in de ondergrond samengevat in scenario's van de grondopbouw. WTI-SOS is een toepassingsonafhankelijke ondergrondschematisatie en kan na een lokale verfijning gebruikt worden voor het probabilistisch toetsen van de keringen voor alle relevante faalmechanismes. Dit is een verandering ten opzichte van de huidige praktijk waarbij een voor een dijkvak maatgevend geacht scenario deterministisch getoetst wordt. Het maatgevende scenario wordt bepaald op basis van de beschikbare boringen en sonderingen in het dijkvak. In de meeste gevallen is de afstand tussen boringen en sonderingen echter te groot om deterministisch te kunnen toetsen en de onzekerheid die er bestaat over de opbouw van de ondergrond wordt dan onvoldoende meegenomen. In dergelijke gevallen is het daarom beter om een probabilistische toets uit te voeren met behulp van ondergrondscenario's. Met het ontwikkelen van WTI-SOS is verder een kader geschept voor:

- Een probabilistische benadering voor de faalkansen van dijken;
- Een consistente identificatie van grondlagen waaraan parameterwaarden voor geotechnisch gebruik toegewezen kunnen worden;
- Kwaliteitsborging van het gebruik van de ondergrond bij de toetsing;
- Efficiënt gebruik van ondergrondschematisaties tijdens de vierde toetsronde en hergebruik tijdens navolgende toetsrondes en andere activiteiten rond waterkeringenbeheer;
- Karakterisering van de ondergrond van waterkeringen voor globale evaluaties, waaronder KOSWAT (nHWBP), het Deltaprogramma en WV21.

Dit rapport beschrijft hoe WTI-SOS opgesteld is en hoe het, naast WTI 2017, ook voor andere toepassingen gebruikt kan worden.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	nov. 2014	Marc Hijma		Bob Hoogendoorn		Maya Sule	
2	sep. 2015	Marc Hijma		Bob Hoogendoorn		Maya Sule	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.3 De doelstelling en doelgroep van WTI-SOS	5
1.3.1 Doelstelling	5
1.3.2 Doelgroep	6
1.4 De WTI-SOS producten	6
1.5 Structuur van het rapport	6
2 Gebruikte data, software en kennis	7
2.1 Data	7
2.1.1 Boringen en sonderingen	7
2.1.2 3D geologische modellen: GeoTOP, NL3D en DGM	7
2.1.3 Actueel Hoogtebestand van Nederland: AHN	9
2.1.4 Kaarten	9
2.1.5 Stippenkaarten uit VNK2	10
2.1.6 GIS-bestand van de ligging van de waterkeringen	11
2.2 Software	11
2.2.1 iMOD	11
2.2.2 Rockworks	11
2.2.3 Schematiseer Excel-sheet	11
2.3 Kennis	12
2.4 Gebruik van VNK2-data en kennis	13
2.5 GeoTOP-pilots	13
2.5.1 Pilot 1: Clustering van GeoTOP resultaten	14
2.5.2 Pilot 2: Vergelijking WTI-SOS scenario's met de opbouw in GeoTOP	14
2.5.3 Gebruik van GeoTOP binnen WTI-SOS	16
3 De WTI-SOS eenheden	17
3.1 Niveau 1: Stratigrafie	17
3.2 Niveau 2: Regionaal	18
3.3 Niveau 3: Lokaal	18
3.4 Niveau 4: Materiaaleigenschappen	18
4 Het opstellen van WTI-SOS	20
4.1 Het opstellen van WTI-SOS	20
4.1.1 Het verzamelen van gegevens	20
4.1.2 Het ordenen van gegevens	21
4.1.3 Het analyseren van de grondopbouw en het trekken van segmentgrenzen	22
4.1.4 Het vaststellen van de scenario's	22
4.2 Onderscheiden van WTI-SOS eenheden	22
4.2.1 Dikte van de eenheden	23
4.3 Het toekennen van de kans van aantreffen	25
4.4 Benodigd grondonderzoek bij het lokaal schematiseren	27
4.4.2 Relevante afmetingen van eenheden voor het faalmechanisme piping	28
4.4.3 Kansen van aantreffen van relevante eenheden	28
4.4.4 Samenvattend: meetlocatieafstand en macrostabiliteit	31

4.4.5	Samenvattend: meetlocatieafstand en piping	32
5	Verdere toepassingen van WTI-SOS	35
5.1	Toepassen in andere (lokale/regionale) waterkeringstaken	35
5.2	Toepassen in (landelijk) beleidsstudies	35
5.3	WTI-SOS als kapstok voor het schematiseren van de ondergrond	35
6	Conclusies	37
7	Referenties	39
A	Definitielijst	A-1
B	Pilots: Toepasbaarheid in de praktijk	B-1
C	WTI-SOS eenheden	C-1

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

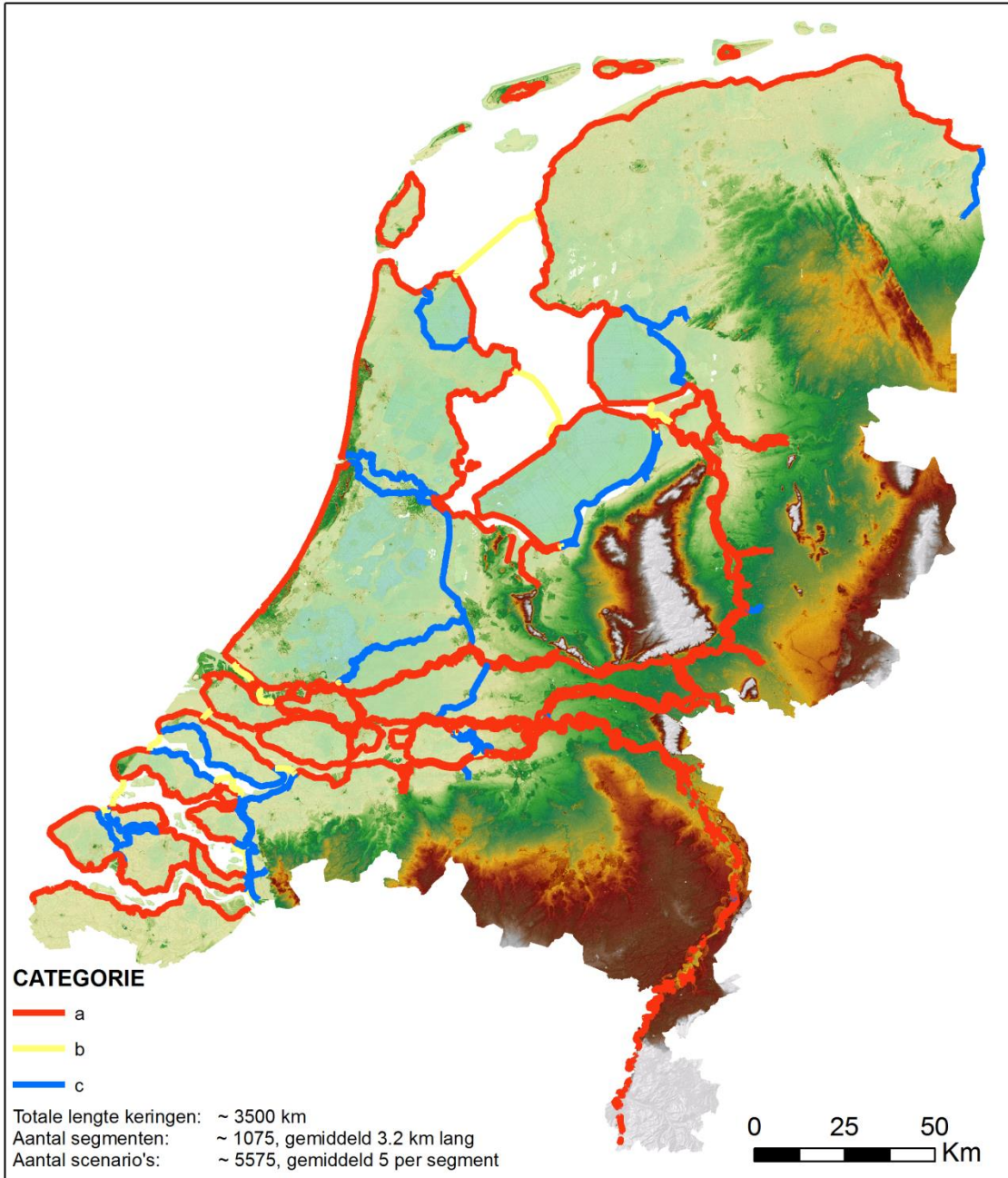
Deltares ontwikkelt voor Rijkswaterstaat de inhoudelijke componenten voor het Wettelijk Toets Instrumentarium (WTI). Het WTI moet in 2017 bruikbaar zijn voor het uitvoeren van de vierde toetsronde van de waterkeringen. Een onderdeel van het WTI is een globale stochastische ondergrondschematisatie (WTI-SOS, WTI-Stochastische Ondergrond Schematisatie) voor, behalve de kustduinen, alle primaire keringen (categorie a-b-c): een totaal van meer dan 3500 km (Figuur 1.1). WTI-SOS bestaat uit een schematisering van de ondergrond op basis van scenario's van de grondopbouw. WTI-SOS is een toepassingsonafhankelijke ondergrondschematisatie en kan na een lokale verfijning gebruikt worden voor het toetsen van de keringen voor alle relevante faalmechanismes (zie ook Figuur 1.2). WTI-SOS vat de inzichten in en kennis over de opbouw van de ondergrond samen, zodat deze efficiënt ingezet kunnen worden voor de lokale schematisaties. De functie van WTI-SOS is hierin het toeleveren van informatie over de opbouw van de ondergrond en het herkennen en identificeren van relevante ondergrondlagen. Daarnaast helpt WTI-SOS ook bij het eenduidig toewijzen van waarden voor grondparameters. Samen met inzicht in de werking van en invloeden op faalmechanismen kan met de WTI-SOS informatie een verantwoorde lokale schematisatie van de ondergrond worden opgesteld (Kruse en Hijma, 2015).

De werkwijze binnen WTI 2017 voor het schematiseren van de ondergrond met behulp van scenario's verschilt met de gehanteerde werkwijze bij eerdere toetsrondes (vergelijk bijvoorbeeld met TRGS, 2012). In de volgende paragrafen worden deze verschillen aangestipt en wordt aangegeven hoe en waarom WTI-SOS is opgezet en wat de doelstelling en doelgroep is van WTI-SOS. De structuur van het rapport wordt beschreven aan het einde van dit hoofdstuk.

1.2 Schematiseren van de ondergrond: WTI-SOS versus de huidige werkwijze

De relevante aspecten van de grondopbouw voor het toetsen van waterkeringen moeten geschematiseerd worden (Figuur 1.2). Met schematiseren wordt hier bedoeld het samenvatten van de werkelijkheid met een beperkt aantal variabelen voor een specifieke toepassing. Om te schematiseren moet er dus informatie zijn over de werkelijkheid en over het doel van de schematisering. Voor de ondergrond betreft dat:

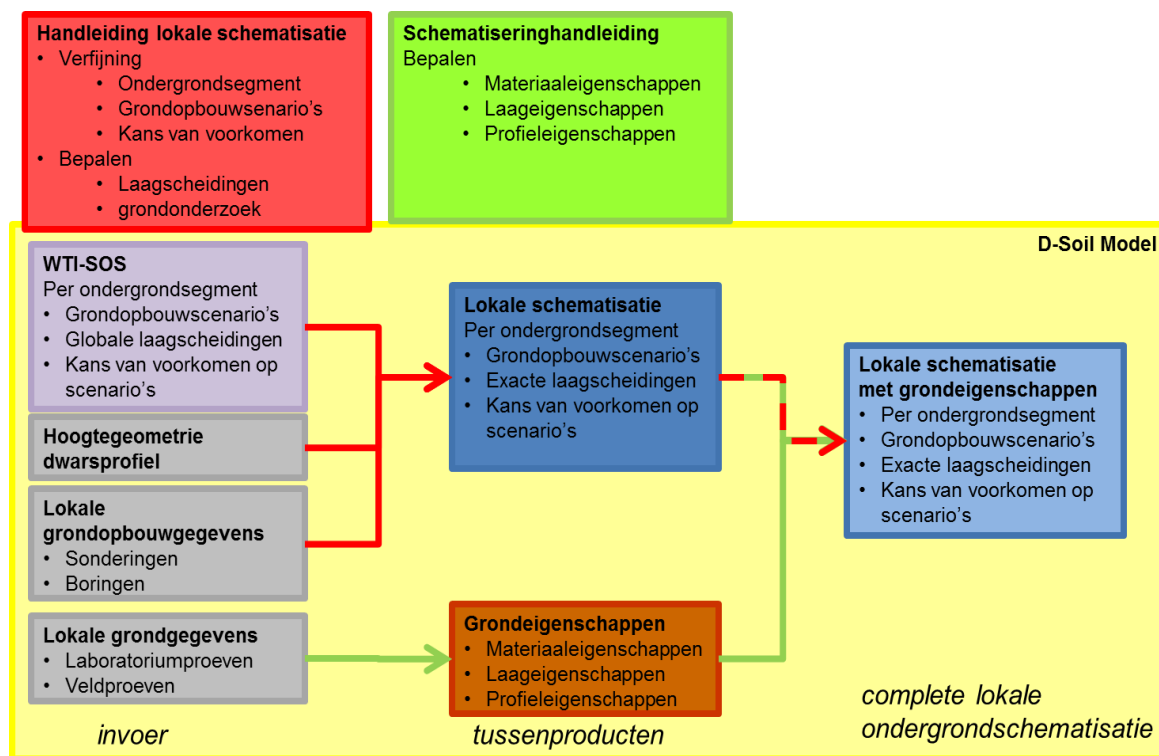
- informatie over de vereisten van de toepassing, zoals toetsen op macrostabiliteit, piping, of zettingsvloeiing;
- informatie over de ondergrond, zoals data over de opbouw en de eigenschappen van de grond (vooral sondeer- en boorstaten), proefresultaten en digitale hoogtemodellen;
- informatie over de achtergronden van grondeigenschappen en het systeem in de ruimtelijke variatie in de opbouw van de ondergrond. Dit laatste is nodig omdat het niet mogelijk is om met alleen data, zoals sondeer- en boorstaten en grondeigenschappen van grondmonsters, een representatieve verantwoorde schematisatie van de ondergrond te maken.



Figuur 1.1 Overzichtskarta van Nederland met de waterkeringen per categorie. Er is gewerkt met het Nationaal Basisbestand Dijkkringlijnen 4.0 (2012).

Om bij veiligheidsbeschouwingen de opbouw van de ondergrond te schematiseren zijn er verschillende strategieën ontwikkeld. Een veel gebruikte strategie is het in ruimtelijk verband tonen van de grondopbouwgegevens (sondeer- en boorstaten) en daarin herkende overeenkomsten van patronen in diepte-intervallen in de individuele waarnemingen te markeren als 'laaggrenzen'. Die 'laaggrenzen' worden dan geïnterpoleerd tussen de waarnemingen. Hiermee wordt een schets van een lagenopbouw gemaakt zoals in bijvoorbeeld een geotechnisch profiel. In de praktijk wordt zo'n schets soms als een

rechtstreekse weergave van de opbouw van de ondergrond opgevat en wordt de grondopbouw voor berekeningen er 1-op-1 op gebaseerd. Aangezien er geen eenduidige criteria bestaan voor het onderscheiden van lagen en het deterministisch interpoleren tussen puntwaarnemingen, zijn er behoorlijke verschillen in de mate van differentiatie, detaillering en omschrijven van de lagen tussen de verschillende opstellers. Deze verschillen leiden tot een andere uitkomst van de toets. Los van deze verschillen, bestaat er bij deze aanpak grote onzekerheid over de ruimtelijke variatie in de ondergrond, zeker over de variatie in de grondopbouw die niet toevallig in de waarnemingen in de strekking is aangetroffen. De lokale variatie in grondopbouw wordt daarbij vaak onderschat (Figuur 1.3). Er kan namelijk in de meeste gebieden in Nederland niet zonder meer worden aangenomen dat een waarneming, zoals een sondeerstaat, de ondergrond tot meer dan 30 m afstand ervan voldoende weergeeft. Interpolatie tussen de ligging van dieptegrenzen in boor- en sondeerstaten of tussen materiaaleigenschappen van de lagen in de ondergrond geeft de grondopbouw daarom niet met voldoende zekerheid weer als de waarnemingen zover uiteen liggen. Figuur 1.4 geeft een voorbeeld van significante variatie in grondopbouw over afstanden van 15 m.



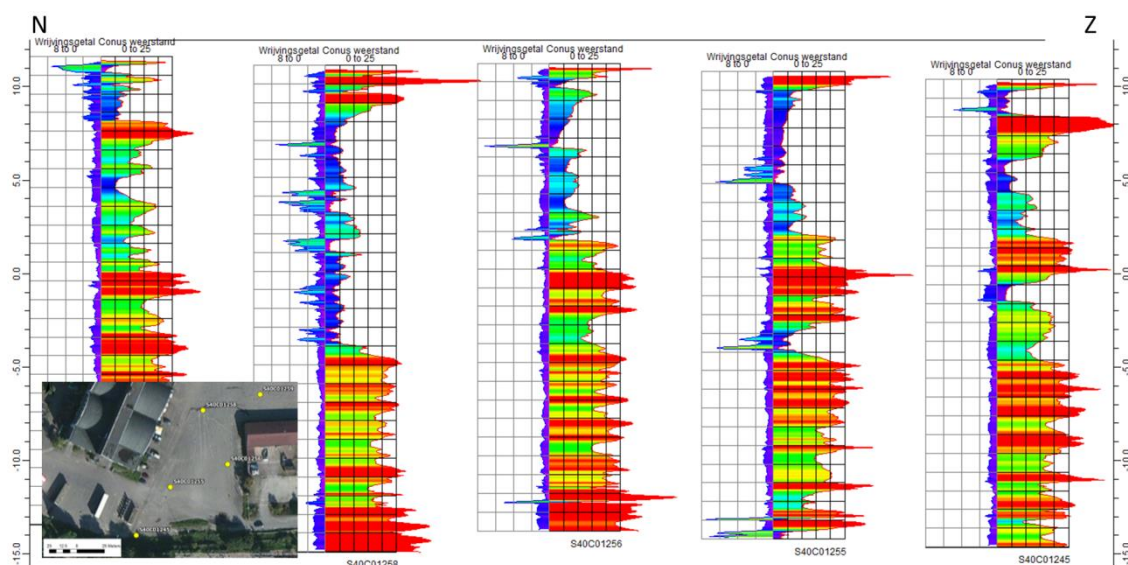
Figuur 1.2 Stroomschema van het schematiseren van de ondergrond voor WTI 2017. Dit rapport beschrijft hoe WTI-SOS (lila box) is opgesteld. WTI-SOS wordt op basis van lokale informatie (grijze boxen) gedetailleerd tot een lokale schematisatie (donkerblauwe box). Bij het lokaal schematiseren dienen verschillende handleidingen gebruikt te worden (rode en groene boxen). Tijdens het lokaal schematiseren worden ook grondeigenschappen (bruine box) aan de eenheden van de schematisatie toegekend. Uiteindelijk leidt dit tot een lokale schematisatie met grondeigenschappen (lichtblauwe box). Deze schematisatie zal vervolgens gebruikt worden bij het toetsen. De gele box geeft aan waar het in ontwikkeling zijnde D-Soil Model ondersteuning zal gaan bieden.

Om deze tekortkomingen op te vangen is voor WTI 2017 gekozen voor een alternatieve strategie die zich richt op het kwantificeren van de onzekerheid, zodat de aannames die gedaan worden in de keuze van een representatieve grondopbouw objectiever en vaak meer

rationeel worden (Kruse en Van Meurs, 2013; Kruse en Hijma, 2015). Hierbij wordt voor een strekking van een waterkering de ondergrond weergegeven met een aantal grondopbouwscenario's, WTI-SOS scenario's, die elk een kans van aantreffen hebben. De toegekende kansen zijn gebaseerd op de waarnemingen in het betreffende gebied bij de dijk en op inzicht in het systeem in de ondergrond. De scenario's bestaan uit WTI-SOS eenheden die gebruikt worden om lagen in de ondergrond te karakteriseren. De eenheden omvatten al de lagen die voor toetsen gespecificeerd moeten worden (zie bijlage B voor een lijst van de eenheden). Op basis van WTI-SOS worden lokale schematisaties gemaakt. De toepassing waarvoor geschematiseerd wordt is hierbij erg belangrijk, aangezien voor elk van de te toetsen faalmechanismen andere vereisten gelden aan de lokale schematisaties. De lokale schematisering vergt daarom niet alleen kennis en inzicht over de grondopbouw, maar ook over de effecten van die opbouw voor de toepassing (Kruse en Hijma, 2015). De WTI-SOS eenheden kunnen ook gebruikt worden voor het opstellen en gebruiken van proevenverzamelingen. Per WTI-SOS eenheid kunnen de benodigde parameters vastgesteld en vastgelegd worden, hetzij op basis van bestaande proevenverzamelingen, hetzij op basis van nieuwe gegevens.



Figuur 1.3 Een actief kweldergebied in Nederland. De getoonde variatie over korte afstanden in Figuur 1.4 is niet verwonderlijk als gekeken wordt naar bijvoorbeeld een dergelijk dynamisch gebied. Binnen het gebied komen direct naast elkaar verschillende, lokale, afzettingmilieus voor. De ruimtelijke verspreiding van deze milieus kan door de tijd sterk veranderen. Dit soort landschappen ligt in Nederland op tal van locaties begraven. Bij grondonderzoek in een dergelijk gebied kunnen de boor- en sondeerstaten over korte afstand dus veel variatie laten zien (Foto: Jan Tuijp).



Figuur 1.4 Illustratie van de variatie in grondopbouw. De sonderingen staan op onderlinge afstanden van 25-35 m. In de inzet wordt de ligging van de sonderingen gegeven. Links van de Y-as staat het wrijvingsgetal, rechts is de conusweerstand uitgezet. De sondeerstaten laten aanzienlijke en relevante variatie zien. Hoewel er delen van Nederland zijn waar de ondergrond relatief minder grote variatie over korte afstand vertoont, komt relevante variatie zoals hier getoond op veel plaatsen voor in de ondergrond. Er kan daarom niet zonder meer worden aangenomen dat een waarneming, zoals een sondeerstaat, de ondergrond van een gebied tot meer dan 30 m afstand ervan weergeeft, noch dat met interpolatie tussen waarnemingen een goed beeld van de variatie in de opbouw van de ondergrond verkregen wordt.

1.3 De doelstelling en doelgroep van WTI-SOS

1.3.1 Doelstelling

Zoals hierboven aangegeven vormt de ondergrond een significante bron van onzekerheid in het bepalen van de faalkans van een waterkering. WTI-SOS heeft de doelstelling om de kwaliteit van de schematisering van de ondergrond voor het toetsen van waterkeringen te verbeteren door relevante informatie over de opbouw van de ondergrond op systematische en eenvoudige wijze beschikbaar te stellen. WTI-SOS geeft hiermee het kader voor het vaststellen van de lokale schematisatie voor de toetsing en is opgesteld door ter zake deskundigen van de TNO-Geologische Dienst van Nederland (TNO-GDN) en Deltares. De informatie in WTI-SOS wordt op kosteneffectieve wijze beschikbaar gesteld voor gebruik tijdens WTI 2017. De voorgestelde gebruikswijze staat beschreven in Kruse en Hijma, 2015.

De WTI-SOS grondopbouwscenario's beogen op een eenduidige wijze te voorzien in een belangrijk deel van de inbreng van ervaring en kennis over de grondopbouw die nodig is voor het schematiseren. De WTI-SOS schematisering beperkt hiermee het beroep dat gedaan moet worden op de kennis over en ervaring met grondopbouw en grondeigenschappen in een bepaald gebied. De opzet van WTI-SOS maakt het daarnaast mogelijk de onzekerheid die bestaat over de opbouw van de ondergrond probabilistisch mee te nemen tijdens het toetsen, waardoor de uiteindelijk berekende faalkans beter onderbouwd kan worden. Ook wordt de kans dat risicovolle grondopbouwen gemist worden verkleind. Een grote meerwaarde van het gebruik van WTI-SOS is dus dat de kwaliteit van de toets verbeterd. Daarnaast heeft de gebruiker het voordeel dat heel veel ondergrondinformatie en geologische kennis is samengevat in WTI-SOS scenario's. De gebruiker kan hierdoor efficiënt lokale schematisaties maken en erop vertrouwen dat de ondergrond goed meegenomen wordt tijdens het toetsen. De lokale schematisaties kunnen tijdens latere toetsen gemakkelijk opnieuw gebruikt worden en zijn dan eenvoudig aan te passen indien dat noodzakelijk lijkt.

door het beschikbaar komen van nieuwe gegevens. Het opstellen van WTI-SOS en het gebruik van WTI-SOS dragen hiermee dus bij aan een kader voor:

1. Een probabilistische benadering voor de faalkansen van dijken.
2. Een consistente identificatie van grondlagen waaraan parameterwaarden voor geotechnisch gebruik toegewezen kunnen worden.
3. Kwaliteitsborging van het gebruik van de ondergrond bij de toetsing.
4. Efficiënt gebruik van ondergrondschematisaties tijdens de vierde toetsronde en hergebruik tijdens navolgende toetsrondes.
5. Karakterisering van de ondergrond van waterkeringen voor globale evaluaties, waaronder KOSWAT (nHWBP), het Deltaprogramma en WV21.

1.3.2 Doelgroep

Voor het gebruik van WTI-SOS en het lokaal schematiseren is inzicht nodig in de vereisten van de toepassing. Er wordt voor het gebruik van WTI-SOS vanuit gegaan dat er ervaring is met het werken met grondgegevens en dat er voldoende bekendheid en ervaring is voor het beoordelen van geotechnische kwesties voor het toetsen van dijken. De gebruikers worden geacht verantwoorde keuzes te kunnen maken ten aanzien van effecten van grondopbouw bij het selecteren van nader te beoordelen omstandigheden bij het komen tot het toetsoordeel. Die keuzes betreffen met name de algemene effecten van verschillen in laagopbouw en geometrie kenmerken van de waterkering (hoogte, bermen, taluds, intree en uitrede locaties en dergelijke). Dit betekent in de praktijk dat minimaal 3 jaar relevante werkervaring vereist is.

1.4 De WTI-SOS producten

Binnen het WTI-SOS deelproject worden vier producten opgeleverd:

- Eindrapportage (dit rapport).
- Handleiding met een beschrijving om van WTI-SOS tot een lokale ondergrondschematisatie te komen (Kruse en Hijma, 2015).
- Achtergrondrapportages over onder andere de uitgevoerde interne en externe pilots en de toepasbaarheid van WTI-SOS (Hijma, 2014a).
- De schematisaties. Deze bestaan per dijkkring uit twee onderdelen. Het eerste onderdeel geeft de locatie (in de vorm van een ArcGis shapefile) met daarin de ligging van de onderscheiden dijksegmenten. Het tweede onderdeel is een Excel-bestand met de specificatie van de ondergrondscenario's per dijksegment. Dit Excel-bestand zal in 2015 in D-Soil Model geïmporteerd kunnen worden (Hijma, 2014a).

1.5 Structuur van het rapport

Het rapport gaat vanaf hier verder met een beschrijving van de data, de software en de kennis die gebruikt zijn bij het opstellen van WTI-SOS (Hoofdstuk 2). Daarna volgt een toelichting op de gebruikte eenheden om de ondergrond te schematiseren (Hoofdstuk 3). In Hoofdstuk 4 wordt vervolgens de WTI-SOS werkwijze besproken, waarbij een aantal belangrijke aspecten in detail wordt toegelicht. Hoofdstuk 5 geeft enkele suggesties voor breder gebruik dan WTI 2017. In het laatste hoofdstuk worden de conclusies gepresenteerd. In bijlage A worden in dit rapport veelgebruikte termen gedefinieerd. Bijlage B gaat in op de toepasbaarheid van WTI-SOS in de praktijk door middel van het evalueren van twee uitgevoerde pilots. Bijlage C geeft een overzicht van de onderscheiden WTI-SOS eenheden.

2 Gebruikte data, software en kennis

Voor het opstellen van WTI-SOS zijn heel veel beschikbare data en kennis gebruikt (zie ook Hijma, 2013). De belangrijkste databronnen zijn de gegevens uit DINOloket (met name sonderingen en boringen) en uit de database van de Universiteit Utrecht (boringen; Berendsen, 2007). De hiermee beschikbare data-dichtheid is voldoende om samen met andere bronnen en geologisch inzicht in de opbouw van de ondergrond te komen tot een globale ondergrondschematisatie zoals WTI-SOS. Voor een efficiënt gebruik van de data speelt software een belangrijke rol, vooral om de analyse van de data met expert kennis te faciliteren. Geologische en geotechnische kennis heeft een belangrijke rol gespeeld bij het opstellen van relevante ondergrondscenario's en de bijbehorende kansen van aantreffen.

Ervaringen uit een eerder project waarbij stochastisch geschematiseerd is, VNK2, zijn eveneens meegenomen. Tevens is een 3D-ondergrondmodel van Nederland, GeoTOP, ingezet. Hieronder wordt in detail ingegaan op de manier hoe deze data en hulpmiddelen gebruikt zijn. Tijdens het lokaal schematiseren zal gebruikt gaan worden van aanvullende gegevens, zoals uit het archief van de waterkeringbeheerders of adviesbureaus, waarbij ook rekening gehouden moet worden met lokale verstoringen van de deklaag.

2.1 Data

2.1.1 Boringen en sonderingen

DINOloket (www.dinoloket.nl) is het uitgifteportaal van data van TNO-Geologische Dienst van Nederland (TNO-GDN). Via dit portaal kunnen boringen en sonderingen opgevraagd worden. Uit de DINO-database zijn binnen een bufferzone van 800 m langs de primaire waterkeringen alle niet-confidentiële boringen en sonderingen gedownload. De boorgegevens zijn middels een script omgezet naar csv-bestanden die vervolgens weer omgezet zijn naar ipf-bestanden zoals gebruikt binnen het programma iMOD (zie paragraaf 2.2.1). De sondeerstaten, indien beschikbaar als GEF-bestand, zijn na omzetting gevisualiseerd binnen iMOD en Rockworks (zie paragraaf 2.2). De sonderingen die alleen als plaatje beschikbaar waren zijn buiten iMOD en Rockworks bekeken. Binnen WTI-SOS is geen gebruik gemaakt van een directe link naar de constant geüpdatete DINO-database, maar zijn verschillende versies gebruikt. Er is begonnen met de versie van augustus 2013. Halverwege het schematiseren, in februari 2014, is een nieuwe versie gedownload om de updates van de DINO-database te kunnen gebruiken. Het schematiseren is in november 2014 afgerond. In totaal waren circa 75000 boringen en 17000 sonderingen uit de DINO-database beschikbaar. Behalve de DINO-database is ook de boringendatabase van de Universiteit Utrecht gebruikt (Berendsen, 2007; Cohen, 2009). Deze database bestaat vooral uit boringen in het rivierengebied. Ook uit deze database zijn binnen een bufferzone van 800 m van de primaire waterkeringen alle boringen beschikbaar gemaakt voor het opstellen van WTI-SOS, een totaal van 33000 boringen.

2.1.2 3D geologische modellen: GeoTOP, NL3D en DGM

Bij het opstellen van WTI-SOS is gebruikt gemaakt van GeoTOP, NL3D en DGM, 3D geologische modellen van de ondergrond opgesteld door TNO-GDN. De gebruikte bestanden werden aangeleverd door TNO-GDN en gevisualiseerd in iMOD. Bij GeoTOP is de ondergrond onderverdeeld in voxels van 100x100x0,5 m. Aan elke voxel zijn lithologische en stratigrafische eigenschappen toegekend, gebaseerd op stratigrafisch gestuurde interpolaties tussen duizenden boorgegevens (Stafleu et al., 2013). Bij aanvang van WTI-SOS was GeoTOP beschikbaar voor Zeeland, Zuid- en Noord-Holland en het gehele rivierengebied, inclusief de Gelderse Vallei, maar zonder het Gelderse IJsseldal. Tijdens het project kwam

een beta-versie beschikbaar van het Waddengebied en het grootste deel van Friesland (Figuur 2.1). Deze versie is inmiddels officieel vrijgegeven. Gedurende WTI-SOS zijn samen met TNO-GDN een tweetal pilots uitgevoerd om GeoTOP zo optimaal mogelijk te gebruiken. De uitkomsten van de pilots worden besproken in paragraaf 2.5.



Figuur 2.1 Overzicht van het gebied waar GeoTOP beschikbaar was tijdens het project (figuur via DINOloket).

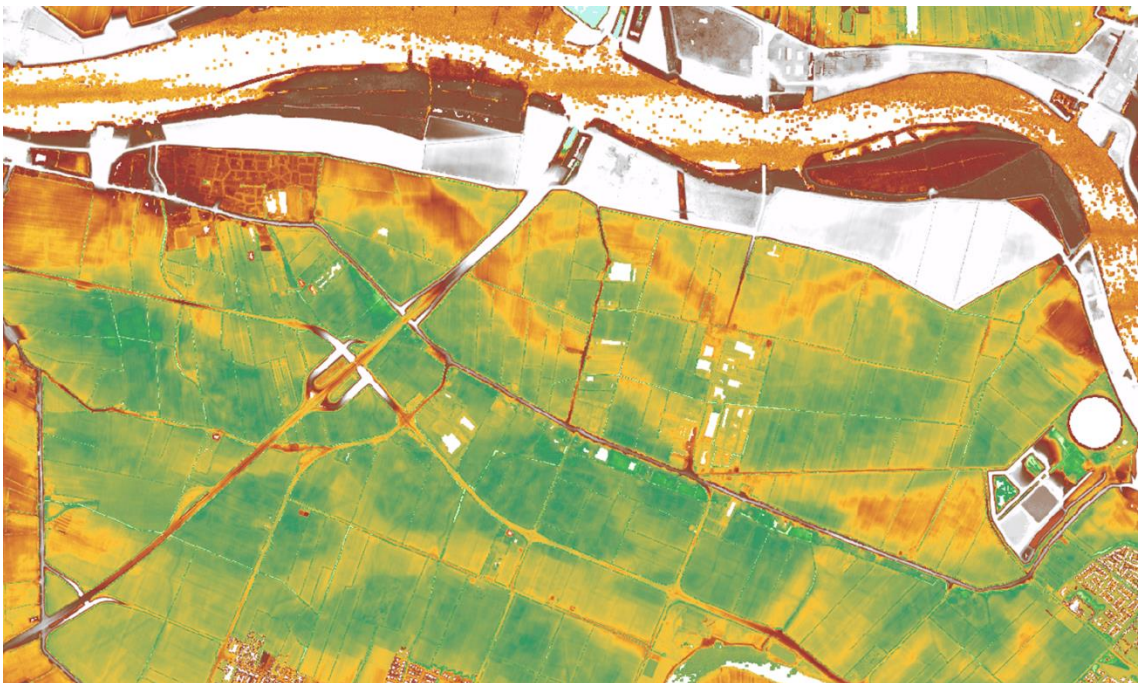
In gebieden waar GeoTOP niet beschikbaar was, is informatie gebruikt uit NL3D. Dit is eveneens een 3D geologisch model, maar de voxels zijn groter (250x250x1 m) en het model is landsdekkend. Een belangrijker verschil is dat bij de interpolatie tussen boringen er veel minder geologische sturing gebruikt is. Hierdoor zal de overeenkomst met de werkelijkheid, zeker voor dieptes beneden de 15 m –NAP minder groot zijn dan bij GeoTOP.

Tijdens het opstellen van de WTI-SOS is ook gebruik gemaakt van het Digitaal Geologisch Model (DGM) van TNO-GDN. Dit is een regionaal (landsdekkend) geologisch model tot dieptes van ongeveer 500 m. Dit model laat de positie van zogenaamde lithostratigrafische eenheden in de ondergrond zien (waarbij “litho” de aard van de grond betreft en “stratigrafische” de topologie (onderlinge ligging) van ruimtelijk eenheden). De bovenste eenheid in het DGM is vaak het Holoceen dat onder andere de slappe lagen onder dijken omvat. Binnen DGM is het Holoceen niet onderverdeeld, daarom heeft DGM geen toegevoegde waarde voor de schematisatie van de Holocene afzettingen. Voor de

dieperliggende eenheden binnen het Pleistoceen heeft DGM, gezien de schaarste aan data van de diepere ondergrond, wel aanvullende waarde.

2.1.3 Actueel Hoogtebestand van Nederland: AHN

Het Actueel Hoogtebestand van Nederland (AHN) is voor twee zaken gebruikt. Binnen WTI-SOS wordt aan elk onderscheiden dijksegment een representatieve, veelal een gemiddelde, hoogte gegeven (de top van de bovenste WTI-SOS eenheid). Deze hoogte wordt afgeleid uit met name het AHN. Daarnaast geeft de gedetailleerde hoogtekkaart veel informatie over de opbouw van de ondiepere ondergrond en is daarmee dus nuttig tijdens het opstellen van WTI-SOS (Figuur 2.2). Er is gebruikt gemaakt van de eerste versie van het AHN (AHN1) die bestaat uit opnames tussen 1996 en 2003, omdat er destijds minder bebouwing was dan tijdens de opnames voor AHN2 die in 2007 gestart zijn. Dat er kleine verschillen zijn tussen de huidige maaiveldhoogtes en de hoogtes in AHN1 is voor WTI-SOS niet relevant.



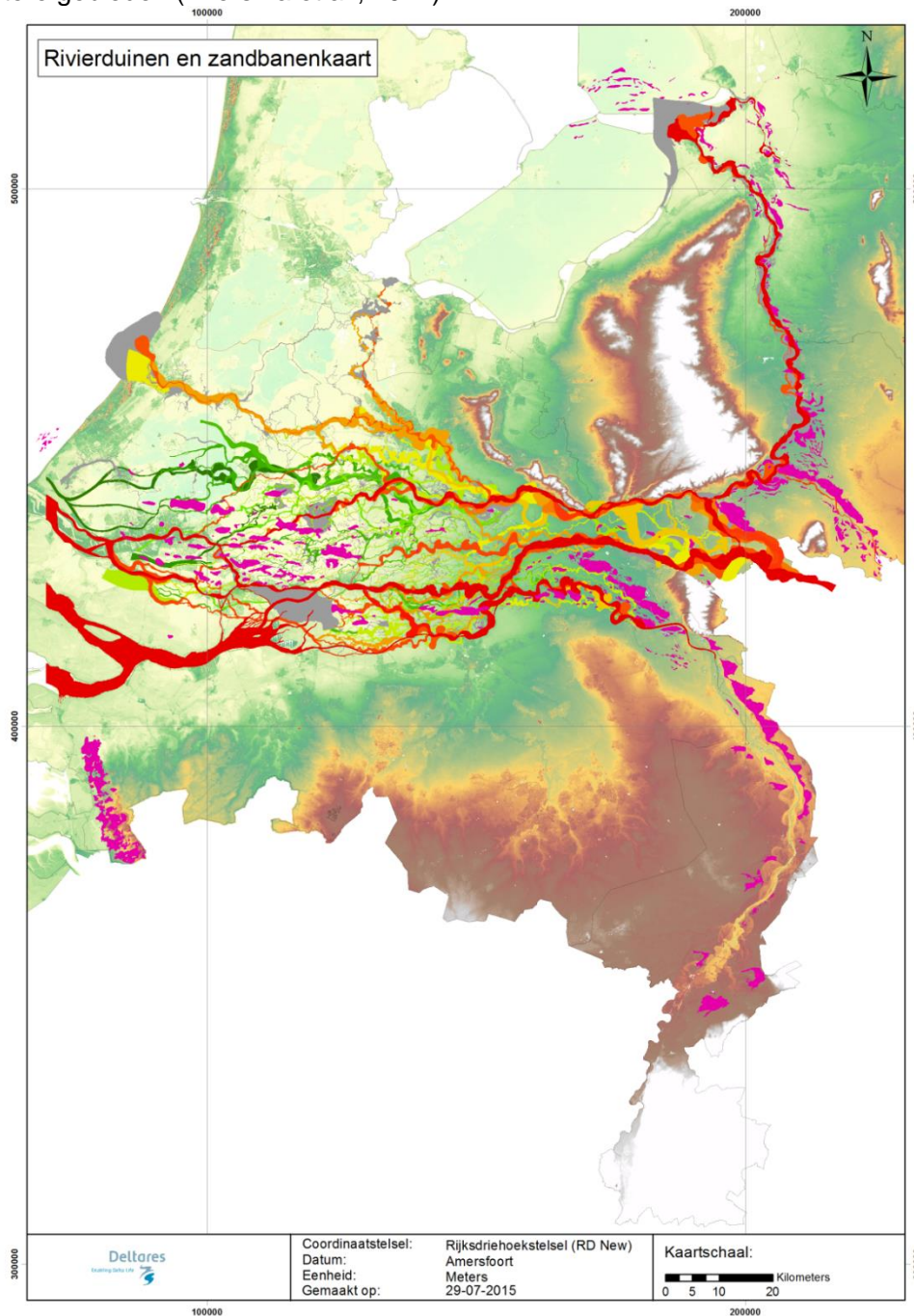
Figuur 2.2 Een voorbeeld van het AHN, in het noordelijke deel van de Hoeksche Waard, direct ten zuiden van de Oude Maas. De groenige delen liggen relatief laag, de gelige/bruinige delen relatief hoog. De hogere delen zijn zichtbaar als meanderende banen en geven de positie weer van ondiep gelegen zandige rivierbeddingen. Door differentiële inklinking liggen deze begraven rivieren thans als ruggen in het landschap.

2.1.4 Kaarten

Voor de WTI-SOS zijn de relevante geologische en bodemkaarten geraadpleegd. Ook de landelijke paleogeografische kaartenset is gebruikt (Vos et al., 2011). Voor Zeeland gaven rapporten die opgesteld zijn in verband met de aanleg van de Deltawerken waardevolle informatie (Rijks Geologische Dienst, 1976). In het rivierengebied is gebruik gemaakt van het Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta waarop de ligging van zandbanen in de ondergrond wordt weergegeven (Cohen et al., 2012) en kaarten met de ligging van gekarteerde rivierduinen (Cohen et al., 2015; Figuur 2.3).

2.1.5 Stippenkaarten uit VNK2

Tijdens VNK2 zijn voor de primaire keringen Categorie a zogeheten stippenkaarten gebruikt. Hierbij worden de boorstaten getoond als cirkels met verschillende kleuren voor verschillende soorten lithologie en met grotere cirkels voor grotere dieptes (zie Hoofdstuk 4 voor een voorbeeld). De stippenkaart geeft snel een goede indruk over de opbouw van de ondergrond over grotere gebieden (Wiersma et al., 2012).



Figuur 2.3 Kaart met een overzicht van de gekarteerde zandbanen voor het rivierengebied (slingerende, gekleurde banen (Cohen et al., 2012)) en de gekarteerde rivierduinen (paarse kleuren)

2.1.6 GIS-bestand van de ligging van de waterkeringen

Tijdens WTI-SOS is de strekking van waterkeringen opgeknipt in dijksegmenten. Elk dijksegment heeft hierbij een unieke naam gekregen die gekoppeld is aan een set scenario's. De dijksegmenten zijn vastgelegd in ArcGis. De gebruikte en opgeknipte shapefile is door RWS aangeleverd met als titel "Nationaal_Basisbestand_2012_Dijkringlijnen_4_0".

2.2 Software

Tijdens het opstellen van WTI-SOS is gebruikt gemaakt van software die hieronder wordt beschreven. Naast deze software is ook gebruik gemaakt van standaard softwarepakketten, zoals ArcGis en Microsoft Office, die hier niet worden behandeld.

2.2.1 iMOD

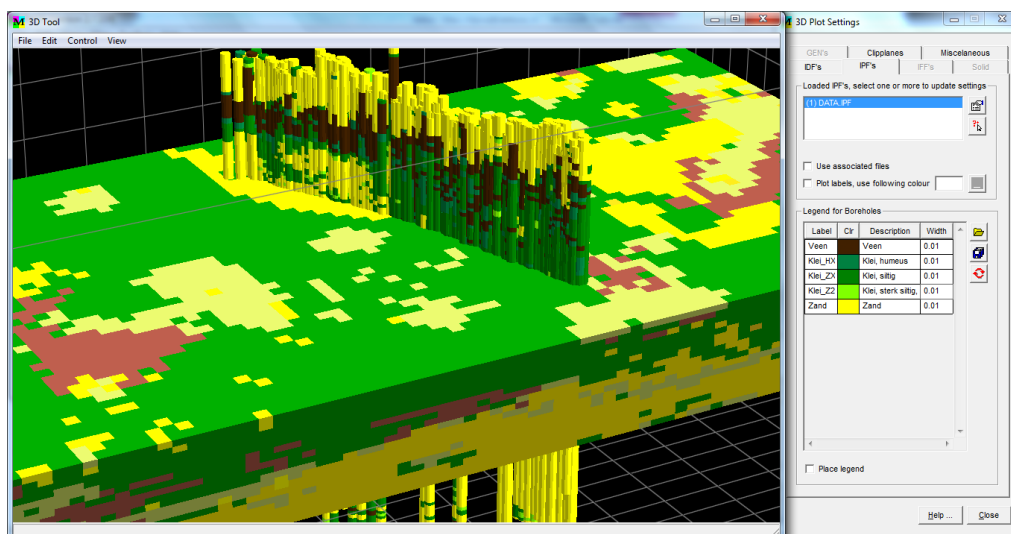
Voor WTI-SOS is veel gebruik gemaakt van iMOD dat staat voor "Interactief Modelleren". iMOD is ontwikkeld door Deltares als modelinstrumentarium ten behoeve van grondwatermodellering. Het wordt daarnaast ook gebruikt voor het visualiseren van en werken met ondergrondgegevens. Gegevens zoals sondeerstaten, boorstaten, 3D modellen en het AHN kunnen allemaal tegelijk en interactief bekeken worden in zowel 2D als 3D (Figuur 2.4). Het werken met iMOD heeft het mogelijk gemaakt WTI-SOS efficiënt en vrijwel papierloos op te stellen. Met iMOD kan een shapefile van een dijkkring gebruikt worden om alle ondergrondgegevens binnen een opgegeven bufferzone rond de shapefile op een diepteprofiel geprojecteerd weer te geven. Voor WTI-SOS zijn verschillende aanvullingen aan iMOD toegevoegd om de efficiëntie te vergroten.

2.2.2 Rockworks

Het softwarepakket Rockworks (RockWare) is een pakket om ondergronddata te visualiseren. Het wordt veel gebruikt binnen de mijnbouw, de geotechniek, milieutechniek en tijdens de exploratie van olie en gas. Voor WTI-SOS is Rockworks 15 gebruikt, met name om sondeerstaten te kunnen bekijken.

2.2.3 Schematiseer Excel-sheet

De scenario's zijn per WTI-SOS segment opgesteld in een Excel-sheet met een bijbehorende Visual Basic macro. In de spreadsheet zijn de verschillende eenheden met hun bijbehorende diepteliggingen en kansen van aantreffen genoteerd, waarna de macro de mogelijke scenario's en de kansen van aantreffen van de scenario's berekent en visualiseert voor kwaliteitsborgingdoeleinden (zie ook Hoofdstuk 4). De berekende scenario's kunnen naar een csv-bestand worden geëxporteerd dat gebruikt kan worden in bijvoorbeeld door Deltares ontwikkelde DAM-software en het in ontwikkeling zijnde D-Soil Model.



Figuur 2.4 Voorbeeld van de 3D-visualisatie van boringen en GeoTOP binnen iMOD.

2.3 Kennis

Er is kennis van en inzicht in de systematiek van de opbouw van de ondergrond nodig om de gebruikte data te analyseren (zie verder Hoofdstuk 4). Een grote meerwaarde van het WTI-SOS is het toevoegen van deze kennis en ervaring aan het 'kale' interpreteren van sonderingen. Het herkennen van typen landschappen in sonderingen maakt het mogelijk de relevante ondergrondopbouw te schematiseren, ook als die niet allemaal aangetroffen zijn in de sonderingen. Stel dat een sondering een begraven zandige riviergeul aantreft en een sondering verderop een laaggelegen, begraven, kleiige overstromingsvlakte. Er mag dan aangenomen worden dat in het tussengelegen gebied een begraven rivieroever voorkomt. Naast geologische kennis, is ook geotechnisch inzicht noodzakelijk om voor de toepassing relevante scenario's op te stellen. Om de gewenste kwaliteit van WTI-SOS te behalen is daarom gebruik gemaakt van ervaren geologen van zowel Deltares als TNO-GDN en van deskundigheid op geotechnisch gebied bij Deltares. Er is geschematiseerd in groepen van twee mensen. Hier is voor gekozen, omdat uit ervaring gebleken is dat dit de kwaliteit van de schematisatie ten goede komt. Beide mensen brengen hun eigen ervaring in en door uitwisseling van inzichten wordt het product verbeterd. De samenstelling van de teams werd af en toe gewijzigd om tot een consistent opgestelde schematisatie te komen. Bij aanvang van het schematiseren van een nieuw gebied werd een gezamenlijke discussie gevoerd over de te onderscheiden eenheden. De schematisaties zijn achteraf wederom getoetst op de onderlinge consistentie en volledigheid.

De groep mensen die direct aan het schematiseren hebben meegewerkt bestonden uit werknemers van zowel Deltares als TNO-GDN. Vanuit Deltares is geschematiseerd door Marc Hijma, Gerard Kruse, Ger de Lange en Ane Wiersma. Vanuit TNO-GDN door Aleid Bosch, Wim Dubelaar, Ronald Harting, Patrick Kiden en Tamara van de Ven. Vanuit het project werd aan een stuurgroep gerapporteerd over de voortgang en werd de werkwijze besproken. De doelstellingen van de stuurgroep bestonden, los van kwaliteitsborging, uit het zorgdragen voor het hergebruiken van de kennis en ervaring opgedaan in VNK2 en andere schematiseerprojecten en het effectief gebruik van de informatie uit GeoTOP. De stuurgroep bestond uit Gerard Kruse, Marco de Kleine (beide Deltares) en Jan Stafleu (TNO-GDN).

2.4 Gebruik van VNK2-data en kennis

Veiligheid Nederland in Kaart (VNK2: 2007-2013) is de eerste landsdekkende en systematische beoordeling van de veiligheid tegen overstroming die gebruik maakt van een stochastische schematisering van de ondergrond (primaire keringen Categorie a). Het VNK2-project omvat onder meer de schematisatie van het voorkomen van zand-klei overgangen, welke relevant zijn voor het beoordelen van het optreden van piping. Daarnaast bevat het voor piping relevante parameters als doorlatendheid en D70. Deze stochastische schematisering is opgesteld door Deltares, in samenwerking met TNO-GDN, en wordt hieronder VNK2-SOS genoemd. Uit bovenstaande volgt dat er een overlap zit in de stochastische ondergrondschematisatie van VNK2 en WTI betreffende het faalmechanisme piping voor primaire keringen Categorie a. Uit deze overlap volgt de vraag hoe de kennis en informatie die binnen VNK2-SOS zijn vergaard, gebruikt kunnen worden binnen WTI-SOS en wat de verschillen en overeenkomsten zijn tussen beide projecten. Binnen Deltares/TNO hebben de WTI- en VNK2-teams een gezamenlijk memo opgesteld dat ingaat op de overeenkomsten en verschillen (Hijma en Vonhögen-Peeters, 2014a). Het memo komt tot de bevinding dat:

1. *De verschillen tussen beide projecten qua scope, aanpak en beschikbaar budget, maken dat hergebruik van VNK2 binnen WTI met name bestaat uit:*
 - a. Geologische indelingen en stippenkaarten van VNK2-SOS worden gebruikt als basisinformatie voor de geologische indeling binnen WTI-SOS.
 - b. VNK2-medewerkers nemen deel aan WTI schematisatie (kennisoverdracht door ervaring met de ondergrond onder dijken en werken met ondergrondscenario's).
2. *De overeenkomsten tussen beide projecten maken zinvolle combinatie van de resultaten van beide projecten in de toekomst mogelijk:*
 - a. Er zijn verschillende mogelijkheden voor hergebruik van VNK2 binnen WTI 2017. De laatste tijd is hier uitgebreid over gediscussieerd en in een ander memo (Hijma en Vonhögen-Peeters, 2014b) wordt hier verder op ingegaan. In 2015 zullen aan de relevante WTI-SOS eenheden, per WTI-SOS segment, de corresponderende VNK2-waarden voor korrelgrootte en doorlatendheid als defaultwaarden worden toegekend.

2.5 GeoTOP-pilots

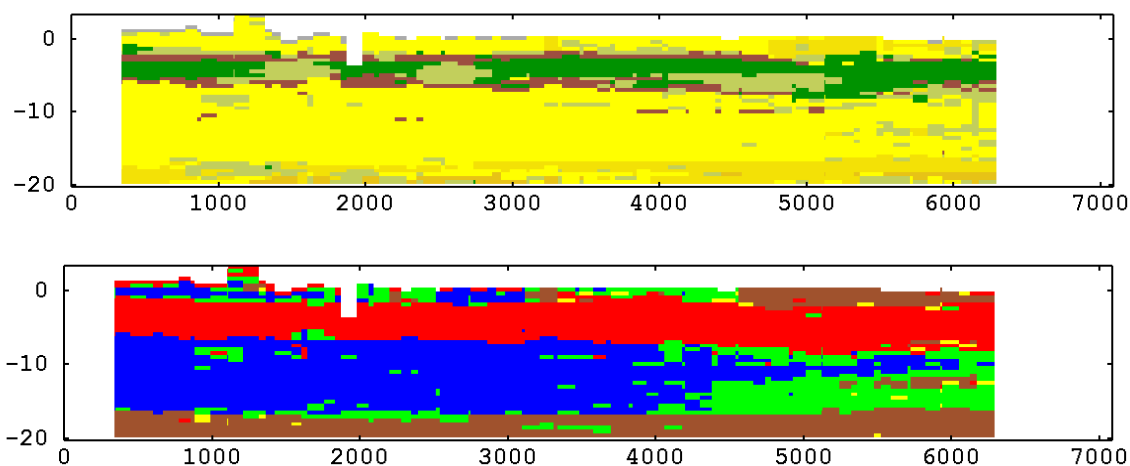
GeoTOP is een door TNO-GDN gemaakt 3D geologisch voxelmodel van de ondergrond van Nederland (Stafleu et al., 2013; www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen). Hierbij wordt de ondergrond tot een diepte van 50 m onder NAP onderverdeeld in voxels van 100x100x0,5 meter. Elk voxel heeft een aantal attributen, zoals de geologische eenheid, de meest waarschijnlijke lithoklasse (soort grond) en de kansen op de verschillende lithoklassen. De attributen worden toegekend naar aanleiding van een door een geologisch lagenmodel gestuurde interpolatie tussen de boor- en sondeergegevens. Verder spelen globale verhoudingen tussen lithoklassen die opgelegd zijn aan geologische eenheden een rol bij het vullen van de voxels. Uiteindelijk wordt voor elke geologische eenheid (bijvoorbeeld een formatie) honderd maal een schatting van de lithoklasse uitgevoerd. Elk van deze 100 schattingen (realisaties) is statistisch even waarschijnlijk. Op basis van de uitkomsten van de realisaties wordt voor elke voxel vervolgens een kansenverdeling voor de verschillende lithoklassen opgesteld. Ook wordt voor elke voxel de meest waarschijnlijke lithoklasse bepaald. Dit laatste gebeurt niet door voor elke voxel te bepalen welke lithoklasse het vaakst geschat is, want dat zou tot een overschatting van veel voorkomende lithoklassen leiden. Daarom wordt de toekenning van de meest waarschijnlijke lithoklasse middels de methode van Soares (1992) uitgevoerd, waarbij rekening gehouden wordt met de opgelegde globale

verhoudingen binnen elke geologische eenheid. De onderscheiden lithoklassen in GeoTOP zijn antropogeen, organisch materiaal (veen), klei, kleilig zand/zandige klei/leem, fijn zand, midden zand, grof zand, grind en schelpen.

Het uiteindelijke 3D-model bevat dus veel informatie die nuttig is voor het opstellen van WTI-SOS. Tijdens WTI-SOS is door Deltares met TNO-GDN in een tweetal pilots onderzocht of GeoTOP een grotere toegevoegde waarde zou kunnen hebben bij het opstellen van grondopbouwscenario's voor toepassing in het toetsen. De ene pilot richtte zich op het clusteren van voxels op basis van de onderliggende kansenverdelingen. Hierdoor zouden mogelijk eenheden ontstaan die gelinkt kunnen worden aan bijvoorbeeld een afzettingmilieu van sediment en daarmee met bepaalde grondeigenschappen. De andere pilot richtte zich op een directe vergelijking van voxelstacks (stapeling van voxels) met de opgestelde ondergrondscenario's. De uitkomsten van de pilots worden hieronder kort toegelicht en vervolgens wordt ingegaan op de manier waarop GeoTOP gebruikt is tijdens WTI-SOS.

2.5.1 Pilot 1: Clustering van GeoTOP resultaten

Voor het clusteren zijn twee methoden gebruikt: 1) Fuzzy k-mean clustering en 2) Self Organizing Maps. De pilot is uitgevoerd door Jan Gunnink van TNO-GDN voor testgebieden in het rivierengebied en in de kop van Noord-Holland. De pilot liet wisselende resultaten zien. In sommige gevallen konden de clusters goed gecorreleerd worden aan bepaalde stratigrafische eenheden, maar vaak was dit erg lastig. Figuur 2.5 laat een voorbeeld zien van de clustering voor een segment in Noord-Holland op basis van Fuzzy clustering.

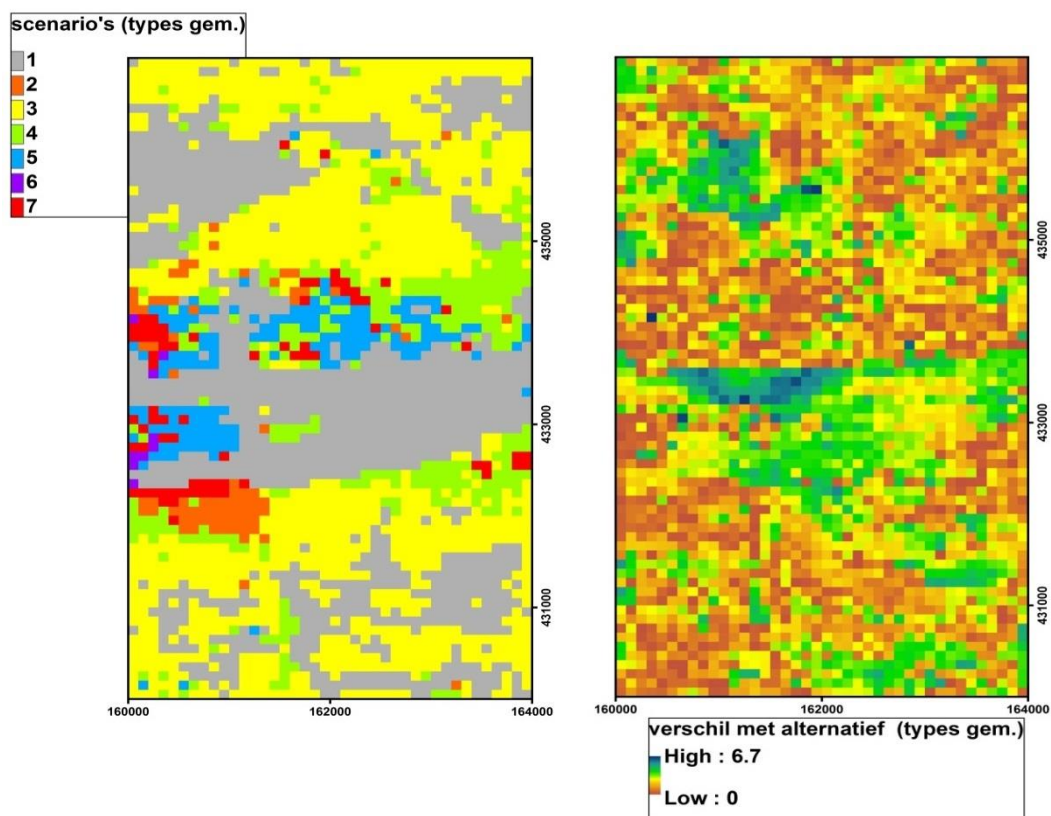


Figuur 2.5 Het bovenste plaatje laat een uitsnede uit GeoTOP zien van de meest waarschijnlijke lithoklasse langs een dijk in Noord-Holland. Het onderste plaatje laat de resultaten zien van de Fuzzy clustering waarbij de gehele kansenverdeling per voxel is meegenomen. Het opgelegde aantal van 5 clusters laat een patroon zien dat mogelijk toegevoegde waarde heeft ten opzichte van het gebruik van alleen de meest waarschijnlijke lithoklasse. Voorbeelden hiervan zijn het bruine cluster aan het maaiveld tussen 5500 en 6000 m en het lichtgroene cluster tussen 5 en 15 m –NAP. Deze clusters zijn wellicht te koppelen aan onderscheidende grondlagen met binnen een cluster vergelijkbare grondeigenschappen. Deze informatie kan relevant zijn tijdens het opstellen van ondergrondschematisaties.

2.5.2 Pilot 2: Vergelijking WTI-SOS scenario's met de opbouw in GeoTOP

In de andere pilot is onderzocht of opgestelde WTI-SOS ondergrondscenario's op een automatische wijze kunnen worden vergeleken met de ondergrondopbouw volgend uit GeoTOP. Potentieel zou dit twee voordelen meebrengen, namelijk 1) dat het ruimtelijk patroon van de WTI-SOS scenario's in een segment in beeld kon worden gebracht en 2) dat

de toegekende kansen van aantreffen ter kwaliteitscontrole konden worden vergeleken met de kansen van aantreffen volgend uit GeoTOP. De pilot is uitgevoerd in drie testgebieden (rivierengebied, Noord-Holland, Friesland). Voor het uitvoeren van de pilot was het noodzakelijk dat aan de WTI-SOS eenheden een lithoklasse-kansenverdeling werd toegekend (kans op bijvoorbeeld klei, veen, fijn zand). Figuur 2.6 laat een voorbeeld zien van een uitkomst voor het testgebied in het rivierengebied.



Figuur 2.6 Het linker plaatje laat de verdeling van een zevental WTI-SOS scenario's zien zoals berekend op basis van de GeoTOP voxels. Het rechterplaatje laat voor elke voxel het verschil zien tussen de match van het WTI-SOS scenario dat het meest op de voxelstack leek en de op een na beste match tussen een scenario en de voxelstack. Een laag getal betekent in dit geval dat er weinig verschil zit tussen de match van de twee best passende scenario's.

Een vergelijking van de binnen WTI-SOS toegekende kansen aan de scenario's en de met behulp van GeoTOP uitgerekende kansen van aantreffen op een scenario liet een gemiddeld verschil zien van 16 procentpunt tussen de WTI-SOS en GeoTOP-kansen (bijvoorbeeld 4% versus 20%). Aangezien de toegekende kansen binnen WTI-SOS vaak klein zijn, betekent dit een gemiddeld verschil van 500%. Voor dit grote verschil zijn verschillende oorzaken denkbaar. Een mogelijkheid is dat het verschil veroorzaakt wordt doordat de GeoTOP-interpolaties niet geheel overeenkomen met de informatie uit boringen en sonderingen waarop de WTI-SOS scenario's met name gebaseerd zijn. Voor de pilotgebieden is dit onderzocht door in iMOD het GeoTOP model te vergelijken met de ondergrondopbouw van nabij liggende boringen. Hieruit volgt dat er soms behoorlijke verschillen zijn tussen de boor- en sondeergegevens en GeoTOP. Het is daarom niet verwonderlijk dat een vergelijking tussen de WTI-SOS scenario's en GeoTOP in sommige gevallen weinig overeenkomsten laten zien. Dit probleem wordt enigszins ondervangen doordat tijdens de pilot is gekeken naar de

relatieve match tussen WTI-SOS scenario's en voxelstacks. Met andere woorden: hoe goed past een voxelstack bij een bepaald WTI-SOS scenario ten opzichte van andere WTI-SOS scenario's. Als de WTI-SOS scenario's onderling sterk verschillend zijn, dan is de beste match tussen een voxelstack en een bepaald WTI-SOS scenario vaak duidelijk beter dan de match tussen de voxelstack en de andere WTI-SOS scenario's. Als de verschillen tussen de WTI-SOS scenario's subtiel zijn, en dat zijn ze regelmatig, dan zal het veel lastiger worden om een voxelstack eenduidig aan een WTI-SOS scenario te koppelen. De verschillen tussen de toegekende kansen van aantreffen op basis van WTI-SOS en op basis van GeoTOP kunnen in dergelijke gevallen gemakkelijk groot worden.

Een andere mogelijkheid is dat het verschil veroorzaakt wordt doordat de resultaten sterk afhankelijk zijn van de toegekende lithoklasse-kansenverdeling aan de WTI-SOS eenheden. Elke GeoTOP-voxel heeft een lithoklasse-kansenverdeling die vergeleken wordt met de WTI-SOS eenheden. Op basis van de overeenkomst wordt een voxel gekoppeld aan een WTI-SOS eenheid. Om dit vergelijk mogelijk te maken moet aan elke WTI-SOS eenheid ook een lithoklasse-kansenverdeling worden toegekend. Dit is lastig, omdat de eenheden vaak uit verschillende grondsoorten bestaan (bijvoorbeeld rivierklei met af en toe dunne veenlagen) of omdat de eenheden vrij veel overeenkomsten hebben (bijvoorbeeld zand met kleilagen versus klei met zandlagen). De toegekende lithoklassen-kansenverdelingen aan de WTI-SOS eenheden zijn daarom vaak niet sterk onderscheidend, waardoor het koppelen van een voxel aan een WTI-SOS eenheid niet eenduidig wordt. Een dergelijke gevoeligheid zou de bruikbaarheid van de pilot-resultaten verminderen, aangezien een voxel dan regelmatig aan een 'verkeerde' WTI-SOS eenheid wordt gekoppeld. Deze gevoeligheid wordt gezien als de belangrijkste oorzaak voor het grote verschil tussen de toegekende kansen van aantreffen.

2.5.3 Gebruik van GeoTOP binnen WTI-SOS

De uitkomsten van de pilots laten zien dat door slim gebruik van de GeoTOP-data enkele afgeleide producten van toegevoegde waarde zouden kunnen zijn bij het schematiseren van de ondergrond. De uitkomsten laten ook zien dat de gebruikte methoden verder ontwikkeld en verfijnd moeten worden om direct bruikbaar te zijn. Binnen WTI-SOS was financieel geen ruimte om deze inspanning te bekostigen. De verwachte toegevoegde waarde voor WTI-SOS na een verdere uitwerking was daarnaast niet van dien aard dat buiten WTI-SOS naar budget is gezocht. Er is daarom besloten tijdens WTI-SOS de pilots niet verder uit te werken en GeoTOP 'slechts' te gebruiken als informatiebron tijdens het schematiseren.

3 De WTI-SOS eenheden

De WTI-SOS grondopbouwscenario's die voor een dijksegment zijn opgesteld geven de opbouw van de ondergrond in WTI-SOS eenheden. Deze WTI-SOS eenheden omvatten de globaal gekarakteriseerde lagen die voor de toetsing van een dijkstrekking gespecificeerd moeten zijn. De karakterisering van de eenheden is daarnaast van belang voor het opstellen en gebruiken van proevenverzamelingen van grondeigenschappen. De proevenverzamelingen kunnen hierbij gekoppeld worden aan een WTI-SOS eenheid. In totaal zijn binnen WTI-SOS 43 globale eenheden onderscheiden. Het systeem achter de eenheden wordt hieronder toegelicht. In Bijlage B wordt van al de eenheden een beschrijving gegeven, zowel in geologische als in geotechnische termen, die als hulpmiddel dient om in waarnemingen de WTI-SOS eenheden te kunnen herkennen.

De onderscheiden WTI-SOS eenheden zijn ingedeeld op vier niveaus die van belang zijn voor het opstellen van een consistente landelijke ondergrondkarakterisering voor geotechnische doeleinden. Het eerste niveau is de stratigrafische positie (Holoceen ligt op Pleistoceen en ouder), het tweede niveau is de regionale samenhang waarmee de samenhang tussen verschillende eenheden wordt gekarakteriseerd (bijvoorbeeld marien, rivier, estuariën), het derde niveau beschrijft hoe het materiaal is afgezet (lokaal afzettingsmilieu, bijvoorbeeld rivierbedding) en het laatste niveau beschrijft de materiaaleigenschappen (grof zand, stevig veen, zandige klei, etc.). Tabel 3.1 geeft een overzicht van het systeem en de onderscheiden codes op de vier niveaus. Door het combineren van de codes op deze vier niveaus ontstaan de codes voor de verschillende eenheden. De code H_Rg_zf betekent bijvoorbeeld een Holocene riviergeul die opgevuld is met fijn zand. Deze opzet maakt het mogelijk de codes snel te kunnen 'lezen' en te vertalen naar een bepaald afzettingsmilieu en daarmee met de te verwachten opbouw in termen van grondeigenschappen. De codes zijn dus volgens een systeem opgezet, maar hiermee is pragmatisch omgegaan om te voorkomen dat de indeling nodeloos complex werd. Zo valt bijvoorbeeld het subtype 'BeeK' onder het hoofdtype 'Rivier' en is er dus niet gekozen om nog een hoofdtype 'BeeK' te maken. Ook is er voor gekozen om bijvoorbeeld een hoofdtype 'Veen' te gebruiken in plaats van bijvoorbeeld 'Moeras' hetgeen meer zou passen bij een typering volgens regionale afzettingsmilieus. Er is daarmee gekozen voor een opzet waarbij het gebruik geen uitgebreide voorkennis vergt. Hieronder worden voor de verschillende niveaus nog enkele toelichtingen gegeven.

3.1 Niveau 1: Stratigrafie

Niveau 1 onderscheidt Holocene van Pleistocene (en oudere) afzettingen. Dit is van belang omdat de oudere afzettingen door leeftijdseffecten vrijwel altijd vaster zijn dan de Holocene afzettingen, ook als ze in hetzelfde afzettingsmilieu zijn afgezet (dezelfde oorsprong hebben). Dit kan verschillende redenen hebben, zoals bodemvorming, compactie, en cementatie of structuurvorming. Het is hierbij niet de bedoeling heel strikt met de grens Holoceen-Pleistoceen om te gaan. Zo zijn sommige rivierduinen gevormd in het begin van het Holoceen, maar deze worden in de praktijk en daarom ook in het WTI-SOS systeem tot de Pleistocene afzettingen gerekend (zie ook Bijlage B).

Tabel 3.1 Het systeem achter de naamgeving van de 43 WTI-SOS eenheden: onderscheid op vier onderdelen, namelijk Stratigrafie, Regionaal, Lokaal en Materiaal eigenschappen (zie Bijlage B)

Code	Betekenis	Code	Betekenis	Code	Betekenis	Code	Betekenis		
H	Holoceen	M	Marien	g	Geul	zg	Zeer en uiterst grof zand		
				kw	Kwelder	zm	Matig fijn tot zeer grof zand		
				l	Lagune	zf	Uiterst fijn tot matig fijn zand		
		E	Estuarien	p	Getijdenplaat	z&s	Afwisseling zand/silt lagen		
				r	Restgeul	z&k	Afwisseling zand/klei lagen		
				R	Rivier	k	Komgebied	zs	Siltig zand
		o	Oeverwal/crevasse			zk	Kleilig zand		
		bk	Beek			s	Silt		
		P	Pleistoceen en ouder	V	Veen	bv	Basisveen	kz	Zandige klei
						hv	Hollandveen	k&s	Afwisseling klei en silt lagen
W	Wind			dz	Dekzand	k	Klei		
				ls	Löss	ko	Organische klei		
				rd	Rivierduin	k&v	Afwisseling klei en veenlagen		
G	Glaciaal			gs	Gestuwd	vk	Kleilig veen		
				Kl	Keileem	v	Veen		
				sh	Smeltwater en helling	o&z	Afwisseling organische klei/zandlagen		
O	Overig			m	Meer	sd	Slecht doorlatend		
				v	Variabel	ht	Antropogeen: heterogeen		
A	Aangebracht	a	Aangebracht						

3.2 Niveau 2: Regionaal

Niveau 2 geeft op een regionale schaal aan in welk afzettingsmilieu de afzettingen zijn afgezet. De hoofdtypen 'Marien' en 'Rivier', 'Wind' en 'Veen' spreken voor zich. Hoofdtype 'Estuarien' wordt binnen WTI-SOS alleen gebruikt om, in vooral de Rijnmond, riviergeulafzettingen te benoemen die afgezet zijn onder sterke getijdeninvloed en vaak gekenmerkt worden door afwisselingen van zand- en kleilaagjes. Hoofdtype 'Glaciaal' omvat afzettingen die direct gekoppeld zijn aan ijs. Hoofdtype 'Aangebracht' omschrijft eenheden die door de mens zijn aangebracht, onder andere de bovenste grondlagen in steden en opgehoogde terreinen.

3.3 Niveau 3: Lokaal

Niveau 3 geeft binnen een 'regionaal' afzettingsmilieu als 'Rivier' aan in welk 'lokaal' afzettingsmilieu het materiaal is afgezet, bijvoorbeeld 'geul' of 'oever'. Tabel 3.2 geeft voor elk van de verschillende subtypes een korte omschrijving (grotendeels naar Vos et al., 2011).

3.4 Niveau 4: Materiaaleigenschappen

Dit niveau beschrijft de materiaaleigenschappen. In vrijwel alle gevallen zijn dit lithologische en andere materiaalkarakteristieken.

Tabel 3.2 Omschrijving van de verschillende subtypes (grotendeels naar Vos et al., 2011).

Code	Betekenis	Omschrijving
G	Geul	Grotendeels met zand opgevulde rivier-, estuariene of getijdengeul. Bevat in het estuariene en getijdengebied ook veel kleilaagjes.
kw	Kwelder	Gebied achter in een getijdenbekken dat alleen bij springtij nog onder water staat. In het gebied komen relatief veel kleine getijdengeultjes voor.
l	Lagune	Zeer ondiep brak- of zoutwatergebied. Valt bij eb niet droog.
p	Getijdenplaat	Delen van getijdenbekkens die elke vloed onderlopen. Staan ook bekend als slik of wad. Kunnen uit vrij schoon zand bestaan, maar ook sterk kleilig zijn.
r	Restgeul	Bestond uit het watervoerende deel van een geulsysteem ten tijde van het verlaten van het geulsysteem. De opvulling kan sterk wisselend zijn, maar bestaat vaak uit een afwisseling van organische lagen en meer klastische (zand/klei) lagen.
k	Komgebied	Laaggelegen gebied langs de rivier dat bij hoogwater overstroomt. Daarbij wordt vooral klei afgezet. In de diepere delen van een komgebied staat dermate lang water dat er ook organische afzettingen vormen.
o	Oeverwal/crevasse	Een oeverwal is een relatief hooggelegen strook pal langs de rivier, ontstaan door opslibbing met zand en klei tijdens overstromingen van de rivier. Langs een rivier wordt een oeverwal op meerdere plaatsen doorbroken door kleine zijriviertjes, crevassegeulen, die achter de oeverwal zand en klei afzetten.
bk	Beek	Feitelijk een kleine rivier.
bv	Basisveen	Deze compacte veenlaag ligt meestal direct op het Pleistocene zand en vormt vaak de basis van het Holoceen. De veenlaag is ontstaan door snelle zeespiegelstijging die leidde tot een stijging van het grondwater. Bij de toekenning van dit subtype aan eenheden in de ondergrond is niet volgens de strikte lithostratigrafische regels gewerkt, maar is uitgegaan van hoe dit subtype in de geotechnische praktijk gebruikt wordt, namelijk als een compacte veenlaag op het Pleistoceen.
hv	Hollandveen	Het Hollandveen omvat veenlagen die verspreid door de Holoceen afzettingen voorkomen en is veel slapper dan het basisveen. Het omvat veel verschillende soorten veen.
dz	Dekzand	Zand dat door wind is afgezet tijdens een ijstijd in een poolwoestijnklimaat. De korrelgrootte is behoorlijk constant, gemiddeld 150-210 μ m. Komt in grote delen van Nederland voor.
ls	Löss	Ook löss is door de wind afgezet tijdens ijstijden, maar bestaat voornamelijk uit silt. Komt vooral in Zuid-Limburg veel voor.
rd	Rivierduin	Uit een drooggevalen rivierlakte of rivieroever opgestoven duin.
gs	Gestuwd	Afzettingen die door ijs zijn gestuwd, waarbij de oorspronkelijk grotendeels horizontale lagen scheef zijn komen te staan en in meer of mindere mate vervormd zijn. Hebben hierdoor regelmatig een complexe opbouw.
kl	Keileem	(Zandige) leem vermengd met door landijs aangevoerd gesteentegruis en stenen, afgezet onder de ijskap.
s	Smeltwaterafzetting	Afzettingen gevormd door smeltwater afkomstig van de ijskappen. Bestaan meestal uit slecht gesorteerd en grof zand.
m	Meer	Hier worden de meerafzettingen van de Peelo-formatie mee bedoeld (o.a. potklei)
v	Variabel	Een restgroep
a	Aangebracht	Door de mens aangebrachte laag.

4 Het opstellen van WTI-SOS

Dit hoofdstuk beschrijft de gevolgde werkwijze om te komen tot globale ondergrondscenario's voor de primaire waterkeringen. De gebruikte werkwijze zal eerst stapsgewijs behandeld worden. Daarna zullen een aantal aspecten apart toegelicht worden, waaronder het benodigde grondonderzoek tijdens het lokaal schematiseren. Het hoofdstuk behandelt niet in detail hoe op basis van WTI-SOS te komen tot een lokale schematisatie die in de toets gebruikt wordt, daarvoor wordt verwezen naar Kruse en Hijma, 2015.

4.1 Het opstellen van WTI-SOS

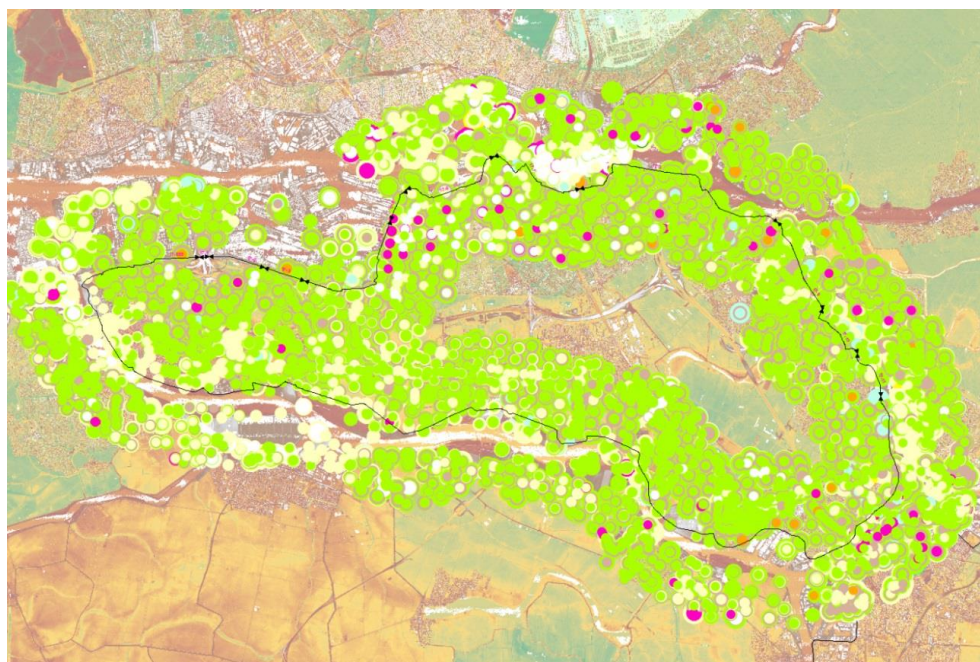
Bij het globaal schematiseren van de ondergrond voor WTI-SOS is een stappenplan gevolgd (Figuur 4.1). Het begint met het verzamelen (1) en het ordenen (2) van gegevens, vervolgens worden de gegevens geanalyseerd (3) en worden relevante, globale ondergrondscenario's voor geotechnische analyses onderscheiden (4).



Figuur 4.1 Overzicht van de vier stappen die steeds doorlopen zijn bij het opstellen van WTI-SOS.

4.1.1 Het verzamelen van gegevens

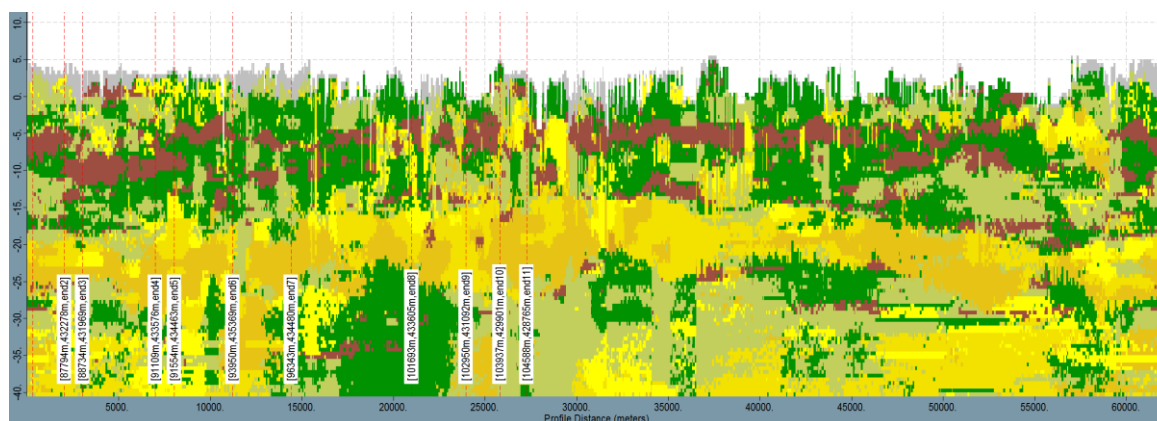
Tijdens het schematiseren is per dijkkring gewerkt (Nationaal Basisbestand Dijkkringlijnen 4.0, 2012). Bij aanvang van het schematiseren van een dijkkring worden de relevante gegevens, zoals boringen/sonderingen, AHN, VNK2-stippenkaarten (Figuur 4.2), 3D geologische modellen en eventueel geologische en/of bodemkaarten verzameld (zie ook Hoofdstuk 2 voor een overzicht van de gebruikte data).



Figuur 4.2 Voorbeeld van de VNK2-stippenkaart voor dijkkring 17 met daaronder het AHN. De belangrijkste kleuren hier zijn groen (klei), geel (zand) en bruin (veen). Deze manier van visualiseren van ondergrondinformatie geeft snel een goed beeld van de grootschalige, ruimtelijke patronen binnen een dijkkring.

4.1.2 Het ordenen van gegevens

Een deel van de verzamelde gegevens wordt gevisualiseerd in ArcGis. Dit betreft de dijkkring, de locatie van boringen en sonderingen, het AHN, de stippenkaarten (Figuur 4.2) en andere relevante informatie zoals kaarten met daarop de ligging van breuken, de positie van rivierduinen, de hoogteligging van de top van het Pleistoceen en het Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta (Cohen et al., 2012). Boringen, sonderingen en 3D-modellen worden in iMOD loodrecht geprojecteerd op de dijklijn (Figuren 4.3 en 4.5).



Figuur 4.3 Voorbeeld van de projectie van GeoTOP op dijkkring 17 voor een lengte van meer dan 60 km en tot een diepte van circa 40 m –NAP. De gele kleuren geven zand weer, de lichtgroene zandige klei, de donkergroene klei en de bruine kleuren veen. Regionale patronen van de opbouw van de ondergrond kunnen op deze manier efficiënt in beeld worden gebracht.

4.1.3 Het analyseren van de grondopbouw en het trekken van segmentgrenzen

Op basis van alle gegevens wordt door tweetallen deskundigen vastgesteld hoe langs de dijk de algemene geologische opbouw varieert, welke WTI-SOS eenheden onderscheiden moeten worden en waar segmentgrenzen getrokken moeten worden. Voor geotechnische toepassingen relevante overgangen in de algemene opbouw van de ondergrond vormen de basis van de segmentgrenzen binnen WTI-SOS. Hierbij moet gedacht worden aan variaties in veendikte, diepteligging van het Pleistocene zand of overgangen tussen gebieden met vooral klei en veen naar gebieden met vooral zand. De segmenten zijn gemiddeld ongeveer 3 km lang, maar de lengte kan variëren tussen enkele honderden meters tot 15 km. Een lang segment hoeft niet te betekenen dat er niet veel variatie in grondopbouw is in dat segment. In sommige gevallen kent een lang segment namelijk relatief veel variatie, maar is er geen systematische verandering van de patronen in de variatie. Tijdens de lokale schematisatie zullen in de meeste gevallen de WTI-SOS segmenten verder opgedeeld worden in lokale segmenten (Kruse en Hijma, 2015). Bij het maken van WTI-SOS segmenten is de ondergrond leidend geweest en zijn bestaande dijkvakindelingen niet in beschouwing genomen. Binnen een dijkkring zijn wel altijd segmentgrenzen gelegd op overgangen tussen verschillende categorieën primaire keringen.

4.1.4 Het vaststellen van de scenario's

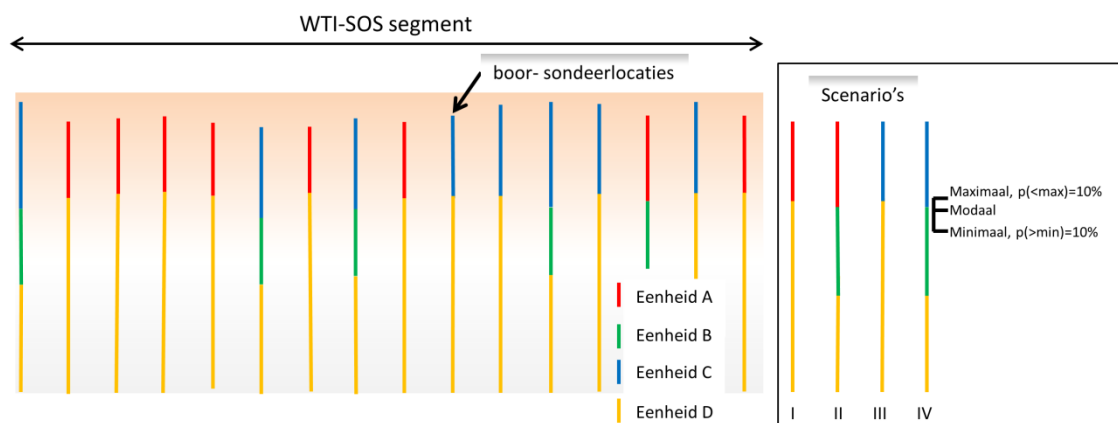
De WTI-SOS scenario's beschrijven de opbouw van de ondergrond in WTI-SOS eenheden die in een dijkstrekking kunnen worden aangetroffen. Per segment worden gemiddeld 5 scenario's onderscheiden; in sommige gevallen zijn slechts 2 scenario's onderscheiden, maar soms ook meer dan 20. Voor elk scenario is een kans van aantreffen bepaald, dit is de kans dat dit scenario wordt aangetroffen in een uit te voeren boring of sondering (zie verder §4.3). Uitgangspunt is dat de scenario's samen alle relevante ondergrondopbouw bevatten die mogelijk aanwezig kunnen zijn in een dijksegment. De schematisaties zijn gemaakt tot 40 m – NAP, deze diepte is voldoende voor het schematiseren voor de verschillende faalmechanismen. Indien dieper reikende schematisaties gewenst zijn, kunnen de WTI-SOS scenario's voor de Categorie a-keringen aangevuld worden met informatie vanuit VNK2. De scenario's zijn opgesteld als 1D-scenario's die geldig zijn voor de binnentoe van de waterkering. Het dijkmetaal en eventuele zetting van de ondergrond onder de dijk zijn niet meegenomen in de scenario's (zie Kruse en Hijma, 2015 voor hoe hiermee om te gaan tijdens het lokaal schematiseren).

In veel gevallen neemt de datadichtheid sterk af voor grondlagen dieper dan 20 meter onder de dijk. Voor die dieptes zijn de scenario's opgesteld op basis van expert knowledge, de enkele diepere boringen die er zijn en de beschikbare 3D-ondergrondmodellen van TNO-GDN. Een aantal belangrijke aspecten van het maken van de scenario's wordt in de volgende paragrafen in meer detail toegelicht.

4.2 Onderscheiden van WTI-SOS eenheden

Na het vaststellen van de WTI-SOS segmenten worden de ondergrondgegevens in dat gebied in detail bekeken. Op basis van de boor- en sondeerstaten, kennis van het gebied en andere relevante informatie wordt de ondergrond onderverdeeld in WTI-SOS eenheden. De eenheden komen binnen een WTI-SOS segment veelal verspreid voor. De WTI-SOS eenheden worden herkend in de ondergrondgegevens en op basis van de voorkomende WTI-SOS eenheden kunnen de scenario's worden opgesteld (Figuur 4.4). Indien nodig geacht worden WTI-SOS eenheden toegevoegd die niet direct zichtbaar zijn in de waarnemingen, maar wel voor kunnen komen en relevant worden bevonden voor de toepassing.

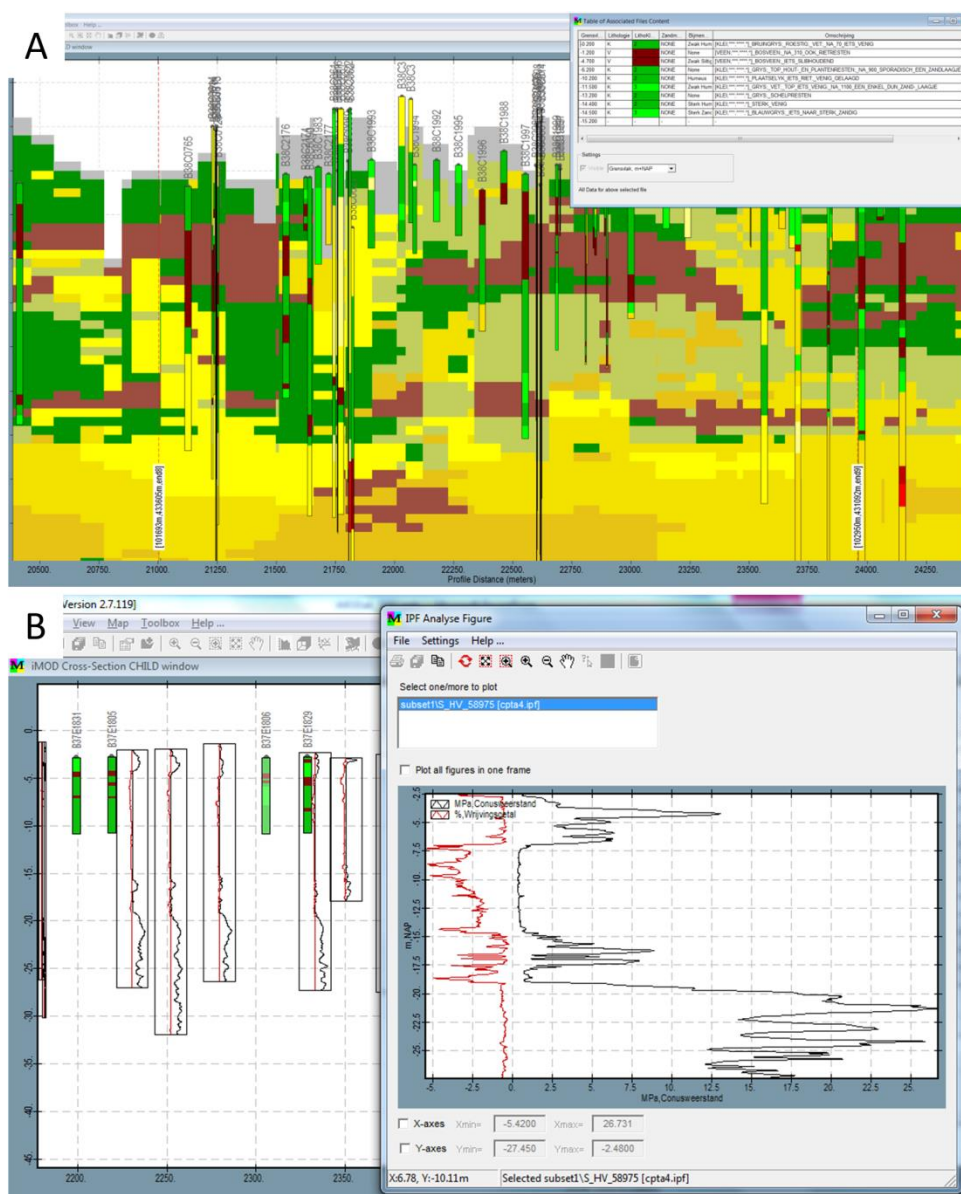
Tijdens het opstellen van de WTI-SOS scenario's zijn de ondergrondgegevens flexibel en interactief bekeken in iMOD (Figuur 4.5). De ondergrondgegevens zijn hierbij loodrecht op de ingeladen dijkkring geprojecteerd in wisselende bufferzones rondom de dijk. Door te klikken op een boring of sondering komt detailinformatie beschikbaar. De gebruikte bufferzone verschilde per segment, al naar gelang de relevantie van verder weg gelegen boringen/sonderingen voor het schematiseren van de grondopbouw onder de dijk. Als bijvoorbeeld een zandbaan (oude rivier) schuin de dijk aansnijdt, dan kunnen boringen in die zandbaan op enkele honderden meters van de dijk nog relevant zijn voor het schematiseren van de opbouw van de zandbaan onder de dijk. Indien een bufferzone van honderden meters gebruikt is, betekent dit niet dat alle boringen/sonderingen in de bufferzone gebruikt zijn bij het opstellen van de schematisatie, aangezien verschillende boringen/sonderingen niet relevant zullen zijn. De breedte van de gebruikte bufferzone heeft geen invloed op de onzekerheid omtrent de WTI-SOS scenario's. De scenario's vormen de weerslag van terzake deskundigheden, waarbij onzekerheden in de geleverde scenario's zijn opgenomen.



Figuur 4.4 Voorbeeld van een fictief WTI-SOS segment waarbinnen vier eenheden zijn onderscheiden (A-D) in de boor- en sondeerlocaties. De eenheden komen verspreid over het gebied voor. Op basis van de verticale positie van de eenheden zijn vier verschillende WTI-SOS scenario's opgesteld (I-IV, rechts). Voor elke eenheid wordt de modale, de maximale en de minimale diepteligging van de top van de eenheden gegeven, in de figuur voor Eenheid B.

4.2.1 Dikte van de eenheden

De minimale dikte van de geschematiseerde WTI-SOS eenheden is 0.25 m, een dikte die ruimschoots voldoende is voor een globale schematisatie. De meeste eenheden in de WTI-SOS scenario's zijn dikker dan 0.5 m. Sommige eenheden omvatten afwisselingen van lagen, bijvoorbeeld organische klei- en veenlagen, die individueel wel dunner dan 0.25 m zijn (zie ook Bijlage B). Tijdens de lokale schematisatie kunnen de toetsers uiteraard dunnere eenheden aanbrengen als dat nodig geacht wordt. In sommige gevallen kan een laag die in werkelijkheid dunner is dan 0.25 m dermate relevant zijn, dat deze wel apart geschematiseerd is (als een 0.25 m dikke eenheid). Dit geldt bijvoorbeeld voor het basisveen dat vaak als een uitgestrekte continue laag voorkomt en als afsluitende laag voor waterdruk kan fungeren tussen zandlagen.



Figuur 4.5 Binnen iMOD kunnen boor- en sondeergegevens interactief, flexibel en in detail bekeken worden. Het bovenste plaatje laat geprojecteerde boringen zien langs een dijklijn met op de achtergrond de meest waarschijnlijke lithologie volgens GeoTOP. Het inzetkader toont detailinformatie voor een boring. Het onderste plaatje laat geprojecteerde boringen en sonderingen zien en het inzetkader detailinformatie voor een sondering.

Aan elke WTI-SOS eenheid is een diepteligging van de top van de eenheid toegekend (in m NAP). Deze diepteligging kan binnen een segment uiteraard variëren. Het dieptebereik waarbinnen de top van de eenheid kan liggen wordt daarom binnen WTI-SOS gekarakteriseerd door drie dieptes: de minimale, de modale en de maximale diepteligging (Figuren 4.4 en 4.6). De modale diepteligging geeft de meest voorkomende diepteligging weer. De “minimale” en “maximale” waarden geven de dieptes aan die in ongeveer 10 % van de gevallen dat de laag wordt aangetroffen over- dan wel onderschreden wordt. In sommige gevallen is het mogelijk dat de maximale diepteligging hoger ligt dan de minimale, modale of maximale diepteligging van de top van de bovenliggende eenheid. In zulke gevallen is er dan een kleine kans dat de bovenliggende eenheid niet aanwezig is. De top van de bovenste

eenheid is gelijk aan het maaiveld en voor de bovenste eenheid zijn de modale, minimale en maximale diepteligging van de top hetzelfde gemaakt.

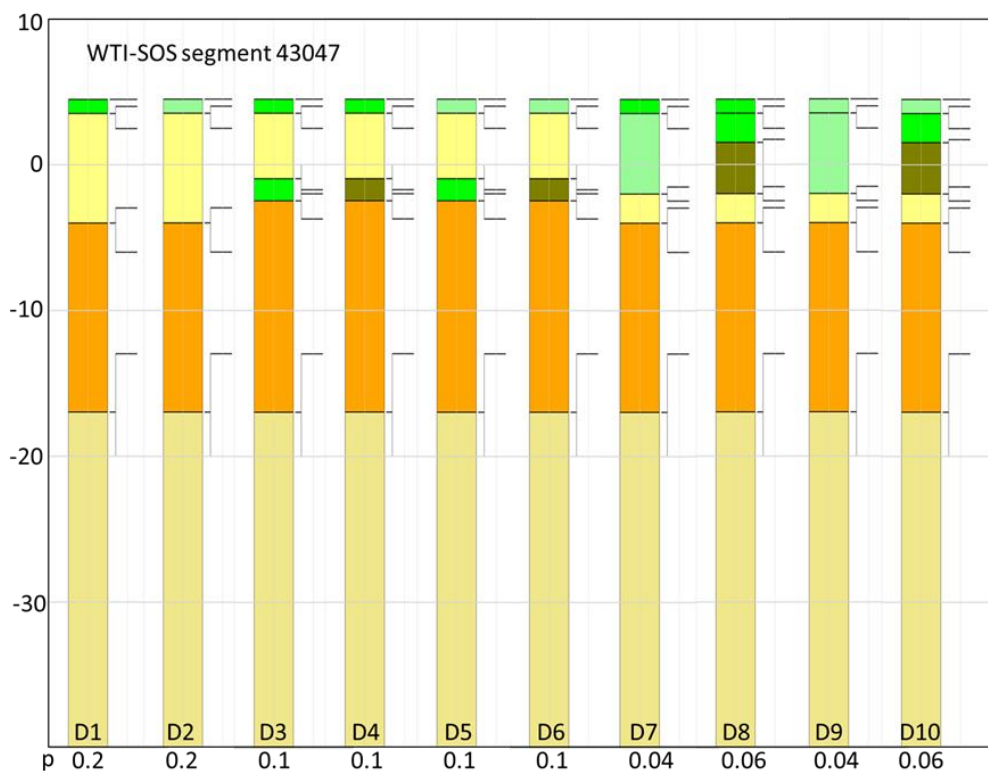
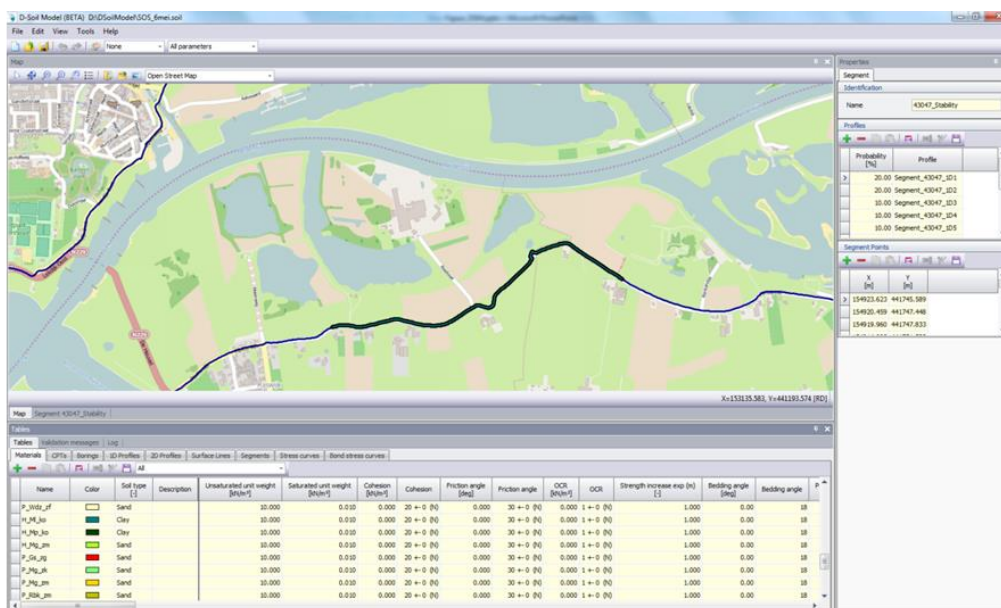
Ter illustratie wordt hier een voorbeeld gegeven van hoe de “minimale” en “maximale” waarden gebruikt kunnen worden in de praktijk. Stel er komt een zandlaag voor in een bepaald segment met een kans van aantreffen van 40%. Van die zandlaag ligt dus in 4% van de gevallen de top lager en in 4% van de gevallen de top hoger dan respectievelijk de “minimale” en “maximale” waarden. En stel dat die zandlaag een aangesloten laag is van 400 m lang in een segment van 1 km lang met daarin 20, regelmatig verdeelde, boringen en sonderingen. De zandlaag wordt dan in ongeveer 8 van de 20 waarnemingen aangetroffen (40% kans). Het deel van de zandlaag dat hoger reikt dan de “maximale” waarde zal ongeveer 40 m lang zijn. Het aantal waarnemingen in dat segment dat de top van de zandlaag hoger aantreft dan de “maximale” waarde is dan ongeveer 0,8 in dit voorbeeld (10% van 8). Dit voorbeeld wijst erop dat veel waarnemingen nodig zijn om de ongunstigste condities binnen een dijktraject op basis van slechts directe waarnemingen te specificeren. Er zijn daarom sterke aanwijzingen in het lokale grondonderzoek nodig om de kansen van minimale en maximale diepteligging die in de WTI-SOS schematisering worden gegeven niet als basis te nemen voor de van de WTI-SOS afgeleide lokale scenario's.

4.3 Het toekennen van de kans van aantreffen

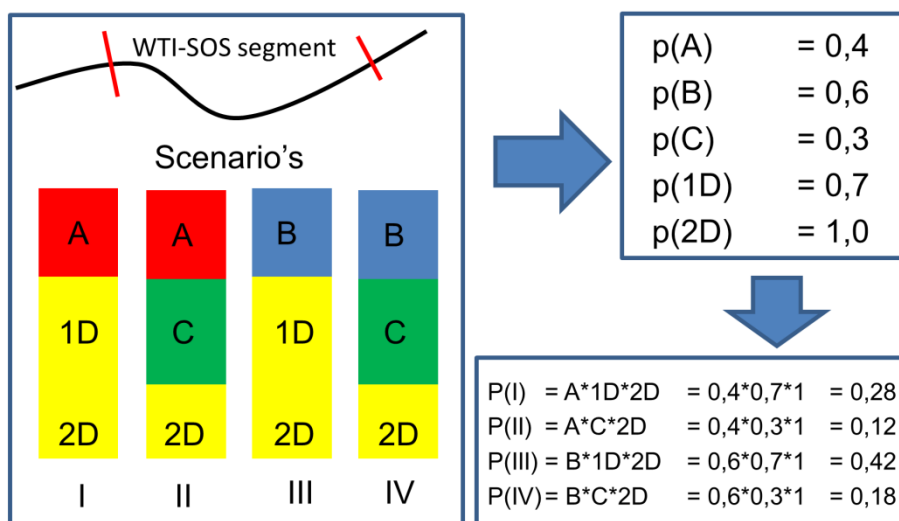
Voor WTI-SOS zijn keuzes gemaakt voor de voor het toetsen relevant geachte eenheden. Als een bepaalde eenheid kan voorkomen in een segment, wordt nagegaan met welke kans de eenheid er kan worden aangetroffen (Figuur 4.7). Het vaststellen van de kans van aantreffen van een eenheid berust op:

- (i) De relatieve frequentie van aantreffen van de eenheid in sondeer- en boorstaten;
- (ii) de karakteristieke afmetingen van een eenheid (bijvoorbeeld een riviergeul met een bepaalde breedte) ten opzichte van de lengte van het segment;
- (iii) in relatie hiermee en op basis van geologisch inzicht: hoe vaak een bepaalde eenheid met een bepaalde karakteristieke afmeting voor kan komen binnen een segment van een zekere lengte.

Hierbij is gewerkt met klassen: een eenheid die vrijwel altijd aanwezig is krijgt bijvoorbeeld een kans van 95%, een eenheid die zelden aanwezig is 5% en een eenheid die iets vaker dan in de helft van gevallen aanwezig kan zijn bijvoorbeeld 60%. De kansen van aantreffen van de verschillende scenario's is het product van de kansen van aantreffen van de WTI-SOS eenheden waaruit het scenario is opgebouwd (Figuur 4.7).



Figuur 4.6 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 16037. 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.



Figuur 4.7 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 in Figuur 4.4 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%.

4.4 Benodigd grondonderzoek bij het lokaal schematiseren

Informatie uit lokaal grondonderzoek zal vaak aanleiding zijn om de globale WTI-SOS schematisering van de ondergrond nader te differentiëren voor het toetsen. De differentiatie dient om het resultaat van het toetsen zodanig te detailleren en specifiek te maken voor een dijkstrekking dat er voldoende basis is voor verantwoorde beslissingen. Tijdens het opstellen van de lokale schematisatie kan het gewenst zijn extra grondonderzoek uit te laten voeren, maar dit hoeft niet altijd nodig te zijn. Dit is afhankelijk van de bestaande data-dichtheid en van het gewenste detail van de ondergrondschematisatie voor het toetsen. Dit laatste hangt samen met enerzijds de omvang van het deel van de ondergrond dat bij een faalmechanisme is betrokken en anderzijds de afmetingen die horen bij relevante variatie in de ondergrond. Los van deze aspecten spelen uiteraard ook financiële of andere afwegingen een rol bij het vaststellen van het benodigde grondonderzoek.

In het volgende worden handvatten gegeven om op basis van het gewenste detail het benodigde grondonderzoek vast te stellen. Daarbij wordt uitgegaan van de gangbare aannamen over faalmechanismen en praktijk van het toetsen, de variatie in de ondergrond en algemene aannamen over het aantreffen van lagen in de ondergrond. Er wordt hierbij uitgegaan van regelmatig verdeelde boringen en/of sonderingen langs de dijkstrekking. Om te weten welke dichtheid aan grondgegevens gewenst kan zijn, is het noodzakelijk om te weten welke afmeting een maatgevende grondlaag minimaal moet hebben om relevant te zijn bij het beoordelen van de dijkveiligheid. Deze minimale afmeting verschilt per faalmechanisme. Hieronder zal eerst ingegaan worden op de relevante afmetingen van lagen voor macrostabiliteit en piping. Daarna zal met behulp van de uitkomst van een Monte Carlo simulatie een handvat gegeven worden voor het bepalen van het benodigde grondonderzoek bij een gewenste zekerheid.

4.4.1 Relevante afmetingen van eenheden voor het faalmechanisme macrostabiliteit

Het mechanisme macrostabiliteit betreft het wegschuiven van een deel van de waterkering. De lengte van de afschuivende grondmoot blijkt bij praktijkgevallen in de orde van 50 tot 100 m te liggen en de breedte is veelal een factor lager. Een zwaktezone in de ondergrond die zo'n afschuiving kan veroorzaken betreft een deel van deze afmetingen en heeft daarmee een breedte van enkele meters tot meer dan 10 m en een lengte van enige tientallen meters. In veel gevallen zal zo'n initiërende zwakke strook deel uit maken van een grotere eenheid met vergelijkbare, maar iets minder negatieve eigenschappen. De lengte van een dergelijke grotere eenheid kan op basis van deze overwegingen geschat worden op tenminste enige tientallen meters en is waarschijnlijk voor Nederlandse dijken meestal meer dan 50 m.

4.4.2 Relevante afmetingen van eenheden voor het faalmechanisme piping

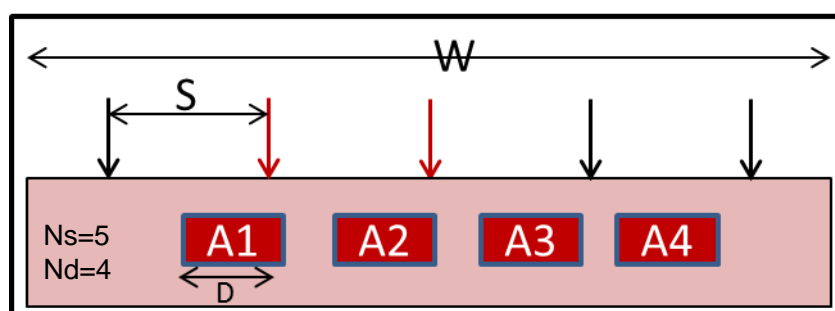
Het mechanisme piping wordt meestal gekoppeld aan de ontwikkeling van "pipes", tunneltjes, in zand direct onder een afsluitende laag. De breedte van zich ontwikkelende "pipes" is zeer gering (zeer veel smaller dan 1 m). De afmetingen voor de relevante ruimtelijke variatie van de specifieke doorlatendheid, die de ontwikkeling van de "pipes" mede bepaalt, betreffen enige meters tot niet meer dan enige tientallen meters. Ook de maat voor de korrelgrootte (D_{70}) varieert aanmerkelijk binnen 10-tallen meters afstand. Er bestaat momenteel niet voldoende inzicht in de effecten van lokale variaties op de ontwikkeling van "pipes", om effecten van lokale variatie in opbouw van zandpakketten vast te stellen. Er dient daarom rekening mee gehouden te worden dat het voorkomen van eenheden van fijner zand en doorlatende pakketten met breedtes van 25 m en kleiner relevant zijn.

4.4.3 Kansen van aantreffen van relevante eenheden

Met de hierboven genoemde kentallen 25 m en 50 m voor respectievelijk piping en macrostabiliteit wordt in deze paragraaf ingegaan op de kans van aantreffen van lagen met die afmetingen tijdens het grondonderzoek. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat het grondonderzoek bestaat uit een regelmatig over een strekking verdeelde hoeveelheid boringen en sonderingen. De kans van aantreffen kan dan worden bepaald door een vergelijk van het aantal waarnemingen waarin een laag is aangetroffen met de totale hoeveelheid waarnemingen. Het aantal gelijkmatig verdeelde boor- sondeerlocaties dat nodig is om die schatting te maken hangt af van de lengte van het segment en van de afmetingen van de lagen in de ondergrond. Als handvat bij het bepalen van de benodigde hoeveelheid grondonderzoek is op basis van Monte Carlo simulaties nagegaan wat de kans is dat één of meer eenheden van een bepaalde afmeting gemist worden bij een bepaalde onderlinge afstand boringen en sonderingen. Ook is nagegaan hoe vaak een dergelijke eenheid gemiddeld aangetroffen wordt. Het is hierbij van belang of de eenheid voorkomt in meerdere, relatief korte stukken, of vooral bestaat uit enkele langere aaneengesloten stukken. Dit heeft namelijk gevolgen voor de kans op het met waarnemingen vaststellen van een laag. Aan de hand van een aantal tabellen wordt in deze paragraaf ingegaan op de relatie tussen het aantreffen van lagen met een bepaalde afmeting in de ondergrond en de afstand tussen meetlocaties. Er wordt in Tabel 4.1 tot en met Tabel 4.4 gevarieerd met de lengte van individuele eenheden in een dijkstrekking van bepaalde lengte en met de onderlinge afstand van gelijk over de strekking verdeelde boor- en sondeerlocaties. De tabellen geven respectievelijk de relatieve frequentie, als kans, dat geen van de gezochte eenheden wordt aangetroffen en het gemiddelde en de standaarddeviatie van het aantal eenheden dat wordt aangetroffen. Na deze uitzetting worden de bevindingen die volgen uit de Monte Carlo-exercities gerelateerd aan het benodigde grondonderzoek voor de faalmechanismen macrostabiliteit en piping. Figuur 4.8 geeft een voorbeeld van de opzet van de Monte Carlo-exercitie.

Tabel 4.1 Kans van aantreffen van eenheden van bepaalde afmetingen in boor-sondeerlocaties op onderlinge afstanden van respectievelijk 200, 100 en 50 m in een strekking van 1 km lengte. W = lengte strekking [m]; D = lengte van een enkele eenheid in een strekking (m); N_d = aantal voorkomens van de eenheden; R_{mis} gem. = gemiddelde relatieve frequentie van het niet aantreffen van een eenheid, $Thit$ gem. = gemiddeld aantal keren dat de eenheid wordt aangetroffen in de boringen en sonderingen, $Thit$ st.dev. = standaard deviatie van het aantal aangetroffen eenheden, S : afstand [m] tussen sondeer-boorlocaties, N_s : aantal boor-sondeerlocaties in strekking.

D	N_d	R_{mis} , gem	$Thit$, gem	$Thit$, st. dev
S = 200 m, N_s = 5				
200	1	0.00	1.00	0.00
100	2	0.21	0.99	0.07
50	4	0.28	0.98	0.07
25	8	0.31	0.98	0.08
S = 100 m, N_s = 10				
200	1	0.00	2.00	0.00
100	2	0.00	2.00	0.00
50	4	0.04	1.97	0.12
25	8	0.06	2.03	0.11
S = 50 m, N_s = 20				
200	1	0.00	4.00	0.00
100	2	0.00	4.00	0.00
50	4	0.00	4.00	0.00
25	8	0.00	3.93	0.14



Figuur 4.8 Voorbeeld van de opzet van de Monte Carlo-exercitie. W is de lengte van onderzochte strekking, S de afstand tussen de meetlocaties en D de lengte van een enkele eenheid. In het voorbeeld zijn er 5 sonderingen ($N_s=5$) en komt een eenheid vier keer voor ($N_d=4$). De roodgekleurde sonderingen treffen de eenheid.

In Tabel 4.1 wordt gevarieerd met de lengte van de eenheden in de ondergrond en de afstand tussen de waarnemingen. Bij een meetlocatieafstand van 200 m worden geen van de 200 m lange eenheden gemist, dit geldt voor alle voorbeelden in de tabel waarbij de lengte van de eenheid en de meetlocatieafstand hetzelfde zijn. In het geval dat de eenheden bijvoorbeeld 50 m lang zijn komt de eenheid dus vier maal voor. Bij een meetlocatieafstand van 200 m wordt in dat geval de eenheid met een kans van bijna 30% niet aangetroffen. Gemiddeld wordt bij die meetlocatieafstand de eenheid één maal aangetroffen. Indien de meetlocatieafstand verkleind wordt tot 100 m, dan wordt de 50 m lange eenheid nog maar in 4% van de gevallen gemist. Bij een relatieve frequentie van 40% van de eenheden, neemt de

kans de kans dat de eenheid gemist wordt sterk uiteraard af (Tabel 4.2). Was eerst de kans dat bij een meetlocatieafstand van 200 m alle eenheden van 50 m lang gemist werden bijna 30%, nu is dat nog maar 5%.

Tabel 4.3 geeft de kansen dat eenheden gemist worden als de lengte van de strekking verdubbeld wordt tot 2 km. Een vergelijk met Tabel 4.1 laat zien dat de kans dat een eenheid gemist wordt afneemt met de lengte van de strekking bij eenzelfde meetlocatieafstand en eenzelfde relatieve lengte van de eenheden. De voorbeelden in Tabel 4.1 tot en met Tabel 4.3 laten zien dat het aantal eenheden dat met een bepaalde meetlocatieafstand wordt aangetroffen afhangt van, uiteraard, het aantal van de eenheden en van de verhouding tussen de lengte van de eenheden en de meetlocatieafstand. De resultaten in de Tabel 4.1 tot en met Tabel 4.3 geven ook aan dat eenheden die relatief lang zijn in vergelijking tot de meetlocatieafstand een betrekkelijk geringe kans hebben om gemist te worden, hetgeen in de lijn der verwachting ligt. Als de lengte van elk van de eenheden ongeveer de helft van de meetlocatieafstand bedraagt, wordt ongeveer de helft van de eenheden aangetroffen. Opgemerkt wordt dat de lengte van de strekking de standaarddeviatie van het aantal aangetroffen eenheden beïnvloedt.

Tabel 4.2 Kans van aantreffen van eenheden van bepaalde afmetingen in boor-sondeerlocaties op onderlinge afstanden van 200 m in een strekking van 1 km lengte. Het aantal eenheden is verdubbeld ten opzichte van het aantal in Tabel 4.1 op 200 m afstand tussen meetlocaties. Zie het bijschrift bij Tabel 4.1 voor de gebruikte afkortingen. D = lengte van een enkele eenheid in een strekking (m); Nd = aantal voorkomens van de eenheden; Rmis gem. = gemiddelde relatieve frequentie van het niet aantreffen van een eenheid, Thit gem. = gemiddeld aantal keren dat de eenheid wordt aangetroffen in de boringen en sonderingen, Thit st.dev. = standaard deviatie van het aantal aangetroffen eenheden, S: afstand [m] tussen sondeer-boorlocaties, Ns: aantal boor-sondeerlocaties in strekking.

D	Nd	Rmis, gem	Thit, gem	Thit, st. dev
S = 200 m, Ns =5				
200	2	0.00	2.00	0.00
100	4	0.02	1.94	0.07
50	8	0.05	1.92	0.11
25	16	0.08	1.98	0.18

Tabel 4.3 Kans van aantreffen van eenheden van bepaalde afmetingen in boor-sondeerlocaties op onderlinge afstanden van 200 m in een strekking van 2 km lengte, de dubbele lengte van de strekking in Tabel 4.1. Het aantal objecten is hetzelfde als in Tabel 4.1 op 200 m afstand tussen meetlocaties. Zie het bijschrift bij Tabel 4.1 voor de gebruikte afkortingen (zie Tabel 4.2).

D	Nd	Rmis, gem	Thit, gem	Thit, st. dev
S = 200 m, Ns =10				
200	2	0.00	2.00	0.00
100	4	0.03	1.99	0.12
50	8	0.07	1.91	0.22
25	16	0.09	1.97	0.20

Tabel 4.4 tenslotte geeft aan dat voor eenheden met een lengte van 25 m en een meetlocatieafstand van 50 m, de kans dat een eenheid gemist wordt in een strekking van 1000 m aanzienlijk is als de gezochte eenheid slechts 1 keer aanwezig is, maar dat de kans heel snel kleiner wordt met een toename van het aantal voorkomende eenheden.

Tabel 4.4 Kans van aantreffen van verschillende aantallen eenheden van 25 m lengte in boor-sondeerlocaties op onderlinge afstand van 50 m in een strekking van 1 km lengte. Zie het bijschrift bij Tabel 4.1 voor de gebruikte afkortingen. D = lengte van een enkele eenheid in een strekking (m); Nd = aantal voorkomens van de eenheden; Rmis gem. = gemiddelde relatieve frequentie van het niet aantreffen van een eenheid, Thit gem. = gemiddeld aantal keren dat de eenheid wordt aangetroffen in de boringen en sonderingen, Thit st.dev. = standaard deviatie van het aantal aangetroffen eenheden, S: afstand [m] tussen sondeer-boorlocaties, Ns: aantal boor-sondeerlocaties in strekking.

D	Nd	Rmis, gem	Thit, gem	Thit, st. dev
S = 50 m, Ns =20				
25	1	0.49	0.51	0.10
	2	0.20	1.01	0.11
	3	0.10	1.50	0.12
	4	0.05	1.92	0.09

4.4.4 Samenvattend: meetlocatieafstand en macrostabiliteit

Op basis van de informatie volgend uit de Tabellen 4.1 t/m 4.4 worden hieronder voor de verschillende meetlocatieafstanden en voor eenheden van 50 m enkele samenvattende bevindingen benoemd.

Voor meetlocatieafstanden van 200 m

- Als er relatief veel eenheden van 50 m lengte in een strekking zijn, worden die voldoende vaak aangetroffen om een indruk van de grondgesteldheid te krijgen voor verkennend onderzoek.
- De kans is aanzienlijk dat eenheden van 50 m lengte die niet vaak langs een strekking aanwezig zijn gemist worden en een meetafstand van 200 m is onvoldoende om met enige zekerheid het voorkomen van zulke eenheden uit te sluiten.
- Indien de eenheden van 50 m lang de ruimtelijke variatie binnen een langere eenheid betreffen, bijvoorbeeld een wat minder stevige laag in een organische klei, dan worden de effecten van deze zwaktezone in veel gevallen met de aannamen voor het vaststellen van rekenwaarden en de invloed van het lengte-effect verdisconteerd.

Voor meetlocatieafstanden van 100 m

- Het aanwezig zijn van eenheden van 50 m lengte in een strekking wordt in meer dan 95 % van de gevallen onderkend en er wordt een gedetailleerde indruk van de ondergrond mee gevormd.
- Er is een kans tot bijna 10 % procent dat eenheden van 50 m lengte die niet vaak langs een strekking aanwezig zijn gemist worden en de meetafstand is niet voldoende als die voorkomens een voor het toetsen kritieke eenheid betreffen.
- Indien de eenheden van 50 m lang de ruimtelijke variatie binnen een langere eenheid betreffen, bijvoorbeeld een wat minder stevige laag in een organische klei, dan worden de effecten van deze zwaktezone in veel gevallen met de aannamen voor het vaststellen van rekenwaarden en de invloed van het lengte-effect verdisconteerd.
- Eenheden van 50 m lengte die afwijken van de omgeving kunnen niet uitgesloten worden, bijvoorbeeld het voorkomen van klei in veen of van zandpakketten in klei.
- Ongeveer de helft van alle eenheden van 50 m lengte zullen worden aangetroffen.

Voor meetlocatieafstanden van 50 m

- Alle eenheden van 50 m lengte worden aangetroffen.

Ten aanzien van het toetsen voor macrostabiliteit kan op grond van de voorwaarde dat voorkomens van eenheden met kritieke eigenschappen over een lengte van 50 m van belang zijn worden gesteld dat:

- meetlocatieafstanden van 200 m geven een indruk van de grondopbouw in algemene zin en de ruimtelijke variatie is slechts verdisconteerd in zeer globaal gedefinieerde en gekarakteriseerde eenheden (zeer grote spreiding in grondeigenschappen).
- meetlocatieafstanden van 100 m geven een gedetailleerde indruk van de grondopbouw langs een dijkstrekking, maar die afstand tussen boringen en sonderingen is niet voldoende om alle voorkomens van eenheden in de strekking die kritiek zijn voor het toetsen vast te kunnen stellen, of met grote zekerheid de aanwezigheid van eenheden te kunnen bevestigen of uit te sluiten.
- met meetlocatieafstanden van 50 m worden alle voor macrostabiliteit relevante eenheden in een strekking aangetroffen onder aanname dat de eenheid herkend wordt in boor- en sondeerstaten.
- Vanwege de aard van de invloed van de ligging van zwaktezones op macrostabiliteit en de gebruikelijke locatie van grondonderzoek voor waterkeringen is de hier gehanteerde lengte van 50 m bij de dijk voldoende voor de een gedetailleerde karakterisering.

4.4.5 Samenvattend: meetlocatieafstand en piping

De ruimtelijke variatie in de opbouw van zandpakketten is relatief groot over beperkte afstanden. In zandpakketten van kust- en getijdengebieden betreft die variatie de hoeveelheid fijn materiaal die is bijgemengd (meer of minder kleine kleilaagjes in relatief uniform zand). In zandpakketten in het rivierengebied gaat het om relatief grote ruimtelijke variatie in korrelgrootteverdeling en pakking over korte afstanden (10^{-1} m – 10^1 m) en in de aard van de gelaagdheid. Er is significante variatie binnen 25 m afstand. Een relatieve uitzondering wordt gevormd door dekzand. Dit zijn door de wind neergelegde afzettingen met een relatief zeer uniforme korrelgrootteverdeling die in grotere gebieden in Nederland voorkomen, een dikte van één tot enige meters hebben en vaak direct onder de Holocene afzettingen zijn gelegen. De meeste zandpakketten die behoren bij rivier-, getijdengeulen en dekzand hebben in Nederland een breedte van enkele honderden meters. De variatie in dikte bedraagt voor een zandpakket, behoudens dekzand, vaak vele meters binnen enige tientallen meters afstand. In sommige gebieden in Nederland, onder andere het Benedenrivierengebied en in gebieden met door klei gedomineerd getijdenafzettingen in Noord, West en Zuidwest Nederland, komen ook vaak smallere zandpakketten voor die voor piping relevant kunnen zijn. Op basis van bovenstaande kenmerken van zandpakketten en van de informatie uit de Tabellen 4.1 t/m 4.4 worden hieronder voor de verschillende meetlocatieafstanden enkele samenvattende bevindingen benoemd.

Voor meetlocatieafstanden van 200 m

Gegeven de omvang van de meeste zandpakketten die voor piping van belang kunnen zijn (enkele honderden meters breed), kan in veel gebieden met een afstand tussen sondeer- en boorlocaties van 200 m met voldoende zekerheid vastgesteld worden of er een zandpakket in de ondergrond aanwezig is. Dit geldt niet waar het dijklichaam gelegen is boven de horizontale begrenzing van een zandlichaam die vaak een abrupte overgang in grondsoort betreft. Vaak is dit een overgang van het zandlichaam van de actieve rivier naar het naastliggende gebied. Het is daarom noodzakelijk om na te gaan of de dijk mogelijk is gelegen boven zo'n laterale begrenzing. Waar dat zo is en waar de zandbanen veel smaller

zijn dan 200 m, is een meetlocatieafstand van 200 m vrijwel nooit voldoende om met enige zekerheid de aanwezigheid van relevante zandpakketten uit te kunnen.

Voor meetlocatieafstanden van 100 m

Met een meetlocatieafstand van 100 m worden de meeste van de voor piping relevante zandpakketten in de ondergrond van een dijkstrekking aangetroffen. Ook hier is het noodzakelijk na te gaan of het dijklichaam mogelijk boven een horizontale begrenzing van een zandpakket is gelegen om het optreden van opbarsten, piping en heave te kunnen beoordelen.

Voor meetlocatieafstanden van 50 m

Met een meetlocatieafstand van 50 m wordt het mogelijk alle voor opbarsten, heave en piping relevante zandpakketten in de ondergrond vast te stellen. Ook bij deze meetlocatieafstand blijft het nodig na te gaan of de binnentoe van de dijk of berm mogelijk gelegen is boven de horizontale begrenzing van een groter zandlichaam in verband met het mogelijke vormen van "pipes" onder de dijk door.

De ruimtelijke variatie binnen al deze zandpakketten, ongeacht de lengte en dus behoudens de genoemde dekzanden, is groot over relatief korte afstanden. Met een meetlocatieafstand van 50 m kan een deel van die ruimtelijke variatie in kaart gebracht worden. Het betreft dan de ligging van bepaalde onderdelen van zandpakketten. De spreiding in dikte en horizontale omvang van die onderdelen is in de meeste gevallen groot en vaak kan er ook met 50 m afstand tussen meetlocaties geen voldoende beeld van die onderdelen gevormd worden. Tenslotte is de variatie in korrelgrootte binnen die onderdelen zelf dermate groot dat deze nooit met sonderingen gevat kan worden. Deze variatie heeft echter een belangrijk effect op de ontwikkeling van 'pipes'. Op basis van kennis van het afzettingmilieu van het zandpakket is het wel mogelijk om deze variatie zodanig te omschrijven in termen van de te verwachten range in korrelgrootte en afstanden waarover de korrelgrootte varieert dat hier rekening mee gehouden zou kunnen worden. Ten aanzien van het toetsen voor opbarsten, heave en piping kan dus worden gesteld dat:

- Meetlocatieafstanden van 200 m geven een indruk van de grondopbouw in algemene zin en van het voorkomen van zandpakketten met een grotere omvang.
- Meetlocatieafstanden van 100 m geven een gedetailleerde indruk van het mogelijk voorkomen van relevante zandpakketten langs een dijkstrekking.
- Met meetlocatieafstanden van 50 m worden alle mogelijk relevante zandpakketten in de ondergrond in een strekking aangetroffen.
- De lokale ruimtelijke variatie binnen zandpakketten en de dikte ervan kan bijna nergens met meetlocaties op onderlinge afstand van 50 m worden vastgesteld. Ook met een afstand van 25 m kan deze variatie meestal nog niet voldoende gevat worden.
- De ligging van een dijklichaam boven een horizontale begrenzing van een zandpakket is van belang voor het toetsen voor piping en heave. Vastgesteld moet worden of de binnentoe van de dijk of de berm mogelijk gelegen is binnen zo'n begrenzing. Indien dat het geval is kan met een meetlocatie afstand van minder dan 25 m het toetsresultaat geoptimaliseerd worden voor zulke strekkingen.

De ligging van grenzen van lokale segmenten die voor het beoordelen van het optreden van piping van belang zijn kunnen nader gespecificeerd worden indien voldoende dicht opeenvolgende waarnemingen beschikbaar zijn. In het algemeen vergt het begrenzen van naast elkaar liggende zandpakketten een zeer dicht net van waarnemingen, in de meeste gevallen minder dan 25 m onderlinge afstand langs de dijk.

5 Verdere toepassingen van WTI-SOS

Naast het voorziene gebruik van WTI-SOS binnen de 4^{de} toetsronde zijn er verschillende andere toepassingen van WTI-SOS mogelijk. Hiernaar worden de toepassingsmogelijkheden toegelicht in volgorde van rijp (direct toepasbaar) naar minder rijp (in de nabije toekomst te verwachten uitbreidingen).

5.1 Toepassen in andere (lokale/regionale) waterkeringstaken

Op vrijwel dezelfde wijze als voor toetsen kan WTI-SOS ook worden gebruikt voor andere (lokale/regionale) waterkeringstaken waarbij de ondergrondschematisering een rol speelt, zoals

- Ontwerpen
- Vergunningverlening
- Legger opstellen
- Monitoring
- Calamiteitenbeheer

In combinatie met lokale grondgegevens kan met het globale WTI-SOS een lokale (stochastische) ondergrondschematisering worden opgesteld. De geologische kennis en het beschikbare grondonderzoek worden door middel van WTI-SOS toegankelijk gemaakt voor deze taken. Hiermee wordt de uniformiteit tussen de verschillende waterkeringstaken voor wat betreft het schematiseren van de ondergrond vergroot, omdat de basis (WTI-SOS) hetzelfde is. Eenzelfde basis voor het ondergrond schematiseren maakt het ook lonend om deze schematisaties te beheren en steeds te verfijnen bij nieuwe lokale grondgegevens; de beheerde ondergrondschematisaties kunnen immers voor de verschillende waterkeringstaken worden (her)gebruikt. Dit zorgt niet alleen voor meer efficiëntie, maar ook voor een betere kwaliteitsborging en een continue verbetering van de ondergrondschematisatie. Het ontsluiten, beheren en schematiseren van ondergrondschematisaties zal ondersteund worden door het softwareprogramma D-Soil Model. Daarnaast kan WTI-SOS worden gebruikt voor verschillende waterkeringstaken om een eerste indruk te krijgen voor de grondopbouw ter plekke.

5.2 Toepassen in (landelijk) beleidsstudies

WTI-SOS is uniform opgezet en omvat alle primaire waterkeringen (met uitzondering van de kustduinen) en is daarom geschikt voor landelijke beleidsstudies. Door in verschillende beleidsstudies gebruikt te maken van WTI-SOS zijn de studies ook beter onderling te vergelijken. Het beschikbaar hebben van een dergelijke dataset is zeer waardevol voor het kunnen uitvoeren van beleidsstudies. Dit komt de kwaliteit van de studies ook ten goede.

Een voorbeeld hiervan is het gebruik van WTI-SOS binnen het HWBP. Tijdens het WTI-SOS project zijn voor waterkeringen die versterkt worden binnen het HWBP de schematisaties van WTI-SOS aangeleverd om gebruikt te kunnen worden in het instrument KOSWAT (KOSTenraming WATerkeringen). KOSWAT maakt gebruik van WTI-SOS om te komen tot globale ramingen over kosten van versterkingen en andere evaluaties over het functioneren en beheer van waterkeringen.

5.3 WTI-SOS als kapstok voor het schematiseren van de ondergrond

In dit rapport is WTI-SOS gepresenteerd als kapstok voor het (stochastisch) schematiseren vanuit de globale ondergrondschematisatie met lokale grondgegevens naar een lokale

ondergrondschematisatie voor de grondopbouw. Maar WTI-SOS is breder toepasbaar. WTI-SOS kan op dezelfde wijze als voor de grondopbouw als kapstok dienen voor de grondeigenschappen van de verschillende onderscheiden grondlagen in het WTI-SOS (defaultwaarden voor de grondeigenschappen). De (globale) indeling in grondopbouw heeft immers voor heel Nederland dezelfde opzet. Binnen WTI 2017 zullen defaultwaarden voor de doorlatendheid en korrelgrootte van WTI-SOS eenheden uitgeleverd worden, voornamelijk alleen voor de Categorie a-keringen. Deze zijn beschikbaar via D-Soil Model. In eerste instantie zouden defaultwaarden voor de faalmechanismen Piping, Macrostabieliteit en Zettingsvloeiing kunnen worden bepaald. Voor andere (faal)mechanismen of geotechnische mechanismen zouden op dezelfde wijze (default) grondeigenschappen kunnen worden bepaald, die met lokale grondgegevens lokaal verfijnd kunnen worden. Deze uniforme aanpak vergroot de vergelijkbaarheid, maar biedt toch voldoende flexibiliteit om lokaal te verfijnen. Bovendien zorgt de uniforme WTI-SOS opzet ervoor dat er brede ervaring en kennis kan worden opgedaan door de gebruikers. Voor alle primaire waterkeringen en de waterkeringstaken die daarop betrekking hebben zal de schematiseringaanpak hetzelfde zijn. Dit zal de kwaliteit van de ondergrondschematisering naar een hoger niveau kunnen brengen. De brede ervaring en kennis kan verder uitgebreid worden naar de regionale waterkeringen, door WTI-SOS uit te breiden met de ondergrond van de regionale waterkeringen. Belangrijk daarbij is dezelfde (globale) indeling in de grondopbouw wordt toegepast als voor WTI-SOS, zodat er op de aanpak werkelijk voort-/uitgebouwd kan worden.

Tot slot levert het continu en systematisch verfijnen van de (lokale) ondergrondschematisaties (zie paragraaf 6.1 Toepassen in andere (lokale/regionale) waterkeringstaken) een schat aan gegevens, kennis en ervaringen op die door het gebruik van dezelfde opzet eenvoudig gecombineerd kan worden voor het verbeteren van WTI-SOS en de defaultwaarden van de grondeigenschappen, voor (landelijke) beleidsstudies, maar ook voor onderzoeksdoeleinden. Ondergrondgegevens worden immers continu en systematisch ingewonnen en verwerkt. De kwaliteit van de schematisering van de ondergrond zal op meerdere terreinen worden verbeterd voor minimaal de primaire waterkeringen.

De hierboven beschreven toepassingen van WTI-SOS beperken zich niet tot Nederland, maar kan in het buitenland eveneens worden toegepast. Uiteraard zal er voor het buitenland een dergelijke (globale) SOS moeten worden opgesteld, om de vruchten ervan te kunnen plukken. De methodiek van het WTI-SOS is dan ook geen losstaande ontwikkeling, maar past in het grotere geheel om gegevens, ervaringen en kennis over de ondergrond te beheren, te ontsluiten en te verbeteren.

6 Conclusies

WTI-SOS betreft de landelijke schematisering van de ondergrond van de primaire waterkeringen, behalve de kustduinen, met behulp van ondergrondscenario's. Tijdens het opstellen van WTI-SOS zijn de primaire keringen opgedeeld in segmenten van gemiddeld drie kilometer lang. De segmentgrenzen zijn gekozen op basis van veranderingen in de globale opbouw van de ondergrond. Voor elk segment zijn globale en toepassingsonafhankelijke ondergrondscenario's opgesteld, met elk een eigen kans van aantreffen. Tijdens het toetsen zullen de WTI-SOS scenario's het uitgangspunt vormen voor het opstellen van lokale, faalmechanisme specifieke scenario's die binnen RingToets getoetst zullen gaan worden. Deze lokale schematisatie valt onder de verantwoording van de waterkeringbeheerders.

Voor het schematiseren van de ondergrond is het nodig de vereisten van de toepassing, in dit geval het toetsen van waterkeringen, te kennen en de systematiek in de opbouw van de ondergrond te begrijpen. De WTI-SOS ondergrondscenario's beogen op een eenduidige wijze te voorzien in een belangrijk deel van de benodigde informatie over de ondergrond voor het schematiseren. Ze zijn opgesteld door ervaren geologen met gebiedsspecifieke kennis en op basis van de beschikbare ondergrondgegevens uit de databases van TNO-GDN en de Universiteit Utrecht, het AHN, geologische kaarten en andere relevante literatuur. WTI-SOS beperkt het beroep dat gedaan moet worden op de kennis over en ervaring met de grondopbouw en de grondeigenschappen in een bepaald gebied. Daarnaast beperkt het gebruik van WTI-SOS de inspanning die nodig is om lokale schematisaties te maken, omdat het beoordelen en indelen van de lokale waarnemingen (boringen en sonderingen) efficiënter kan verlopen. Met WTI-SOS is hiermee een kader geschapt voor:

- Een probabilistische benadering voor de faalkansen van dijken;
- Een consistente identificatie van grondlagen waaraan parameterwaarden voor geotechnisch gebruik toegewezen kunnen worden;
- Kwaliteitsborging van het gebruik van de ondergrond bij de toetsing;
- Efficiënt gebruik van ondergrondschematisaties tijdens de vierde toetsronde en hergebruik tijdens navolgende toetsrondes;
- Breder toepassing, buiten WTI-2017, voor andere lokale en regionale waterkeringstaken en landelijke, globale beleidsstudies waaronder KOSWAT (nHWBP), het Deltaprogramma en WV21.

Het werken met scenario's is een verandering ten opzichte van de huidige praktijk waarbij een voor een dijkvak maatgevend geacht scenario deterministisch getoetst wordt. Het maatgevende scenario wordt bepaald op basis van de beschikbare boringen en sonderingen in het dijkvak. In de meeste gevallen is de afstand tussen boringen en sonderingen echter te groot om deterministisch te kunnen toetsen en de onzekerheid die er bestaat over de opbouw van de ondergrond wordt dan onvoldoende meegenomen. In dergelijke gevallen is het daarom beter om een probabilistische toets uit te voeren met behulp van ondergrondscenario's.

De directe bijdragen van WTI-SOS project aan het voorziene toetsproces zijn de volgende:

- Het samenvatten van de ondergrond in globale ondergrondschematisaties (WTI-SOS) voor alle primaire waterkeringen. Elke gebruiker start dus met een ondergronduitgangspunt dat consistent, uniform en met kennis is opgesteld.
- WTI-SOS vormt de basis voor het lokaal schematiseren, waarbij voor ieder faalmechanisme apart scenario's worden opgesteld waarmee getoetst gaat worden.
- Een handleiding om WTI-SOS te gebruiken bij het lokaal schematiseren. In deze handleiding wordt ingegaan op hoe de WTI-SOS eenheden te herkennen in boringen en sonderingen en hoe de verschillende lokale scenario's opgesteld kunnen worden.
- De WTI-SOS eenheden worden gebruikt om een consistente indeling te verkrijgen voor de laagkarakteristieken ten behoeve van het toekennen van parameterwaarden.

Met het opstellen van WTI-SOS is dus een belangrijke stap gezet in de richting van een toets van de waterkeringen, waarbij de onzekerheid die er bestaat over de opbouw van de ondergrond expliciet wordt meegenomen en het schematiseren van de ondergrond voor de verschillende faalmechanismen op een meer transparante en herleidbare manier kan worden uitgevoerd.

7 Referenties

Berendsen, H.J.A., 2007. De Laaglandgenese Databank, geüpdatet in 2011. CD-ROM, Departement Fysische Geografie, Faculteit Geowetenschappen, Universiteit Utrecht.

TRGS, 2012. Calle, E., Technisch rapport grondmechanisch schematiseren bij dijken. Deltares rapport 1001411-010-GEO-006, met bijdragen van Fugro Ingenieursbureau BV, HKV_Lijn in Water en Arcadis Nederland BV.

Cohen, K.M., 2009. VAN LLG NAAR SBB: Inklaren van de UU-LLG database t.b.v. gebruik binnen Deltares. Intern rapport Deltares / TNO / UU, 27 pp.

Cohen, K.M., Stouthamer, E., Pierik, H.J. & Geurts, A.H., 2012. Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta / Rhine-Meuse Delta Studies' Digital Basemap for Delta Evolution and Palaeogeography. Dept. Physical Geography. Utrecht University. Digital Dataset. <http://persistent-identificer.nl/?identificer=urn:nbn:nl:ui:13-nqjn-zl>.

Hijma, M.P., 2013. WTI: Stochastische schematisatie van de ondergrond onder dijken. Handleiding voor de geoloog. Deltares rapportnummer 1207806-003-GEO-0001.

Hijma, M.P., 2014a. Oplevering WTI-SOS producten. Deltares memonummer 1209432-003-GEO-0004.

Hijma, M.P., 2014b. Evaluatie externe pilot WTI-SOS. Deltares memonummer 1209432-003-GEO-0003.

Hijma, M.P. en Vonhögen-Peeters, L.M., 2014a. WTI-SOS en VNK2: verschillen, overeenkomsten en hergebruik. Deltares memo.

Hijma, M.P. en Vonhögen-Peeters, L.M., 2014a. WTI 2017: gebruik van WTI en VNK2 ondergrondschematisaties en parameters. Deltares memo.

Kruse, G. & Van Meurs, G. 2013. Stochastische modellering van de ondergrond. Achtergrond en opzet globale schematisering. Deltares rapportnummer 1206012-001-HYE-006 versie 3.

Kruse, G. en Hijma, M.P., 2015. WTI 2017: Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS. Deltares rapportnummer 1209432-004-GEO-002.

Rijks Geologische Dienst, 1976. Geologisch onderzoek dijken Oosterschelde. Rapportnummer 10185. Uitgebracht bij briefnummer 761-69 d.d. 3 juni 1976 aan het Hoofd van de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst van de Rijkswaterstaat te 's Gravenhage.

Stafleu, J., Maljers, D. Busschers, F.S., Gunnink, J.L., Schokker, J., Dambrink, R.M., Hummelman, H.J. & Schijf, M.L., 2013. GeoTOP modellering. TNO-rapport TNO 2012 R10991.

Vos, P.C., Bazelmans, J., Weerts, H.J.T. en Van der Meulen, M.J. (red.), 2011. Atlas van het Nederland in het Holoceen., Amsterdam.

Wiersma, A.P., L. Vonhögen, M. de Kleine, R. Hoogendoorn, S. Gruijters, D. Maljers & V. Marges, 2011. Rapportage bepaling ondergrondparameters piping VNK2. Deltares rapportnummer 1203622-000-BGS-0004 versie 2.1 d.d. juli 2011.

A Definitielijst

Deterministisch

Er wordt vanuit gegaan dat het beschouwde aspect, bijvoorbeeld de grondopbouw, bekend is en er wordt geen rekening gehouden met de mogelijke variatie en de onzekerheden daarover zoals bijvoorbeeld omtrent de grondopbouw.

Dijkstrekking

Dijkstrekking is een algemene term voor een stuk dijk. Dit zijn meestal geen officieel vastgelegde of genummerde stukken. Vaak worden ze gebruikt met woorden als: “de dijkstrekking van km 3.9 tot km 4.5 is onderzocht”.

Eenheid/Eenheden (van WTI-SOS)

WTI-SOS verdeelt de ondergrond in eenheden, in totaal 43 (Bijlage B). Een WTI-SOS eenheid bestaat uit een grondlaag of grondlagen die relatief homogeen verdeelde eigenschappen hebben. De lithologie kan homogeen zijn, maar het is ook mogelijk dat de eenheid een homogene afwisseling bevat van verschillende lithologieën, bijvoorbeeld zand/klei afwisselingen. De eenheden zijn zo opgezet en beschreven dat ze herkend kunnen worden in boringen en sonderingen en dat ze relatief eenvoudig zijn te koppelen aan proevenverzamelingen.

Laag/Lagen

Hiermee wordt een relatief homogeen pakket afzettingen in de ondergrond aangeduid, bijvoorbeeld een veenlaag of een grove zandlaag. Een WTI-SOS eenheid kan bestaan uit meerdere lagen. Een afwisseling van dunne veen- en kleilagen wordt bij WTI-SOS bijvoorbeeld met één eenheid aangegeven.

Lokale schematisatie

Een lokale schematisatie is een schematisering die voor een dijkstrekking wordt opgesteld ten behoeve van het toetsen. Vaak is dat een nadere detaillering van de WTI-SOS scenario's. Voorzien wordt dat voor elk faalmechanisme een aparte lokale schematisatie opgesteld wordt. De lokale schematisaties bestaan uit scenario's. Alle, enkele of één van die scenario's worden gebruikt om de faalkans van een dijkstrekking te bepalen

Schematiseringshandleiding

Voor de faalmechanismen piping, macrostabiliteit en zettingsvloeiing zijn schematiseringshandleidingen gemaakt. In de handleidingen staat hoe tijdens het toetsen op die faalmechanismen de relevante aspecten geschematiseerd moeten worden. Een van die aspecten is de ondergrond. Voor elk van de faalmechanismen zijn voor het opstellen van lokale schematisaties van de ondergrond andere afwegingen nodig. De onderhavige WTI-SOS handleiding beschrijft hoe WTI-SOS op basis van ondergrondgegevens gedetailleerd kan worden. Daarnaast worden voor de drie faalmechanismen enkele afwegingen die te maken hebben met de ondergrondopbouw aangestipt en wordt voor een verdere uitwerking van de faalmechanismen doorverwezen naar de schematiseerhandleidingen.

Scenario (van WTI-SOS)

De stapelingen van WTI-SOS eenheden die binnen segmenten kunnen voorkomen worden scenario's of WTI-SOS scenario's genoemd. Vanwege de onzekerheid over de werkelijke grondopbouw op elke locatie langs de dijk worden er meestal meerdere scenario's vastgesteld en wordt voor elk van die scenario's de kans van aantreffen gegeven.

Segment (van WTI-SOS)

Bij het opstellen van WTI-SOS zijn de dijken opgedeeld in segmenten. Aan elk segment zijn scenario's van mogelijke grondopbouwen toegekend.

Strekking

Zie dijkstrekking

WTI-SOS

WTI-SOS staat voor WTI-Stochastische Ondergrondschematisatie. Het is product waarbij alle primaire waterkeringen, afgezien van de kustduinen, zijn opgedeeld in segmenten en waar voor elk van deze segmenten (globale) scenario's zijn opgesteld. WTI-SOS vormt het uitgangspunt voor de lokale schematisaties.

B Pilots: Toepasbaarheid in de praktijk

Bij het opzetten en opstellen van WTI-SOS is veel aandacht besteed aan de toepasbaarheid van de methode in de praktijk. Dit is gedaan door het uitvoeren van twee pilots, waarbij de deelnemers van de pilot de WTI-SOS gebruikten zoals is voorzien binnen WTI 2017. Dit betekent dat ze WTI-SOS gebruikt hebben om met lokale ondergrondgegevens WTI-SOS te verfijnen tot een lokale, faalmechanisme specifieke, ondergrondschematisatie. De eerste pilot, uitgevoerd in het voorjaar van 2014 (Van der Meij et al., 2014), was een interne pilot. De tweede pilot, uitgevoerd in juni 2014 (Hijma, 2014b), was een externe pilot met deelnemers van waterkeringbeheerders en adviesbureaus. De 4 deelnemers hebben hun bevindingen schriftelijk verwoord en in een afsluitende plenaire bijeenkomst is de toepasbaarheid van WTI-SOS in de praktijk uitgebreid besproken. Hieronder wordt een aantal vragen en aanbevelingen uit het evaluatieformulier van de externe pilot overgenomen zoals verwoord in Hijma (2014b) waarin het commentaar van de deelnemers is samengevat. Bij de gedane aanbevelingen wordt tevens aangegeven hoe deze opgepakt zijn.

- 1.1 Inhoudelijk: is de inhoud bruikbaar en voldoende duidelijk?
 - *Ja (unaniem). Opzet en concept zijn duidelijk. Inzet van WTI-SOS leidt een consistentere, kwalitatief hoogwaardiger en waarschijnlijk efficiënter gebruik van de ondergrond. Inhoud is deels wel abstract en vraagt daardoor enige gewenning. De uitleg van de gebruikte (geologische) eenheden kan uitgebreider en kan zich meer toespitsen op enkele voor de geotechniek belangrijke zaken (denk hierbij aan doorlatendheid, watervoerend, etc.).*
- 2.2 Lokaal schematiseren: Hoe wordt het gebruik van de WTI-SOS informatie en de handleiding tijdens het lokaal schematiseren ervaren?
 - *Zoals hierboven al aangegeven is de gebruikte werkwijze/software tijdens de pilot niet de uiteindelijke WTI-methode waarbij D-Soil Model (DSM) veel gebruikt zal worden. De pilot-werkwijze is tijdelijk opgezet voor de pilot en de handleiding is, deels door intensieve begeleiding, niet uitgebreid getest. Wel is het zo dat er talloze aanbevelingen uit deze pilot volgen voor de uiteindelijke workflow. Zoals verwacht sluiten de globale WTI-SOS scenario's goed aan bij de lokale grondgegevens. Met de globale scenario's in de hand kunnen lokale data aan globale scenario's gekoppeld worden. Hierdoor worden in ieder geval de juiste geologische grondlagen gebruikt. Dit leidt tot een betere lokale schematisatie. Ook geven de globale scenario's direct een goed beeld van wat in een gebied verwacht kan worden. Dit hoeft dus niet uitgezocht te worden.*
- 2.3 Efficiëntie: leidt WTI-SOS tot een efficiëntere manier van het lokaal schematiseren?
 - *De algemene mening is dat dit na 1 pilot nog niet goed vast te stellen is. Vraagteken is met name hoeveel tijd het lokaal schematiseren gaat kosten. Wel staat vast in toetsrondes na 2017 de tijdsinspanning zeer sterk afneemt, omdat de opgestelde globale en lokale schematisaties in de meeste gevallen 1-op-1 hergebruikt kunnen worden.*
- 2.4 Kwaliteit: leidt WTI-SOS tot een kwalitatief betere lokale ondergrondschematisatie?
 - *Ja (unaniem), aangezien belangrijke geologische informatie nu beter kan worden meegenomen tijdens de lokale schematisatie.*

3.1 Wat is de algemene indruk van WTI-SOS?

- Goed concept en gedegen, uniforme schematiseringswijze van de ondergrond. In huidige adviespraktijk is deze geologische kennis niet gebruikelijk en dus van zeer grote meerwaarde. Noodzakelijk is wel dat de kennis wordt vertaald naar de geotechnische opgave. In een volgende fase van het testen moet de gehele workflow, inclusief DSM, klaar zijn en dan vroeg beginnen met gebruikerstests. Het is mogelijk dat de toetskosten voor de 4^e ronde omhoog kunnen gaan. In volgende toetsrondes zullen de toetskosten sterk dalen door hergebruik schematisering. Daarnaast is er het zorgpunt dat door veel te rekenen er een divergerend effect kan optreden en dan wordt het lastig om daarna weer te convergeren. Tevens bestaan er twijfels over de controleerbaarheid van de SOS. Vooral bij ingenieursbureaus wordt verwacht dat het lastig wordt te herleiden wat erin het model is gestopt.

3.2 Een van de doelen van WTI-SOS was de ondergrond landsdekkend (onder de primaire keringen), consistent en kwalitatief hoogwaardig te schematiseren, zodat de ondergrond op een betere manier meegenomen wordt tijdens het toetsen. Is men van mening dat dit doel bereikt zal worden?

- Ja (unaniem). Het is wel goed om aan te geven waar tijdens het opstellen van de WTI-SOS veel data aanwezig waren en waar niet. Het is wel van belang om voldoende checks en objectieve iteraties in te bouwen, zodat voor elk faalmechanisme de maatgevende scenario's zo objectief mogelijk worden bepaald. Het doel blijft tenslotte dat de schematisering van de ondergrond zo goed mogelijk meegenomen wordt om te komen tot een zo correct mogelijke bepaling van waar wel en waar niet aan de geëiste veiligheid wordt voldaan.

3.3 Denken jullie dat WTI-SOS goed toepasbaar zal zijn binnen het nieuwe toetsinstrumentarium?

- Hoe het gehele toetsproces in 2017 zal verlopen is nog niet geheel duidelijk bij de deelnemers. De plek van WTI-SOS in WTI 2017 is wel duidelijk en vrij essentieel. De toepasbaarheid van WTI-SOS binnen WTI 2017 is geen probleem: het ondervangt verschillende problemen binnen de huidige toetspraktijk en WTI 2017 wordt zo opgetuigd dat WTI-SOS daarin een goede plek krijgt. Voor de toetsers zelf is het wel een nieuw concept dat op een andere manier de ondergrond meeneemt. Dit zal enige aanpassingstijd vergen.

Aanbevelingen

- Zoals al eerder aangegeven wordt het cruciaal hoe DSM gaat werken en dan zeker in combinatie met Ringtoets. Uit de pilot volgen tal van functionele eisen voor DSM die uitgewerkt moeten worden. Verder leeft bij een groot deel van de deelnemers de wens dat voordat Ringtoets 2b ingezet wordt, er een schifting gemaakt kan worden binnen de scenario's. De hoeveelheid scenario's kan aardig oplopen en die wil je niet allemaal in Ringtoets 2b doorrekenen. Het bepalen van de maatgevende opbouw(en) per faalmechanisme is echter niet eenvoudig vast te stellen (veel factoren spelen een rol). Dit blijkt ook wel uit de huidige praktijk waarbij door verschillende toetsers behoorlijk verschillende maatgevende opbouwen worden afgeleid. Voorgesteld wordt binnen DSM, of anders in een combinatie met Ringtoets 2b, sommen te kunnen draaien waarna gekozen kan worden welke scenario's doorgerekend gaan worden in Ringtoets 2b. Bij het draaien van deze voorsorteringssommen zouden keuzes gemaakt moeten worden over welke laagdiktes gevarieerd gaan worden.

Genomen acties: Veel van de functionele eisen die de deelnemers hadden zijn opgenomen in het functioneel ontwerp van D-Soil Model. In 2015 zal in een aantal software-ontwikkeling sprints D-Soil Model aangepast en uitgebreid worden. Het binnen DSM kunnen doorrekenen van scenario's voordat definitief besloten wordt welke door te sturen naar Ringtoets wordt vooralsnog niet ontwikkeld. Dit zal opgevangen worden door in de verschillende schematiseringshandleidingen duidelijke richtlijnen te geven voor het identificeren van maatgevende scenario's. Indien er nog twijfel bestaat over welke scenario's maatgevend zullen zijn, dan is het raadzaam alle twijfelgevallen door te rekenen binnen Ringtoets.

- In de handleiding moet iets gezegd worden over de eerste 0.5-1 m. Deze laag is regelmatig verstoord, terwijl in WTI-SOS uitgegaan wordt van een ongestoorde opbouw (afgezien van sterk stedelijke gebieden zoals Amsterdam en Rotterdam).

Genomen acties: De WTI-SOS scenario's gelden voor de natuurlijk afgezette ondergrond; alleen in die gevallen dat de verstoring over grote gebieden te vervolgen is (bijvoorbeeld opgehoogd industrieterrein) is deze opgenomen in WTI-SOS. De lokale verstoring zal tijdens het lokaal schematiseren meegenomen moeten worden op basis van lokale informatie van de waterschappen.

- Er zou voor een aantal gebieden een consequentie-analyse gedaan moeten worden. Gedacht wordt om een aantal gebieden te kiezen waar de grondopbouw volgens de opstellers goed bekend is en goed verwerkt zit in de deterministische som. Deze gebieden zouden op de WTI-manier doorgerekend moeten worden om op die manier de verschillen in de veiligheidsfactor te kunnen analyseren.

Genomen acties: Dit zou een interessante exercitie zijn, maar deze wordt vooralsnog niet uitgevoerd. Als de gehele trein D-Soil Model-Ringtoets klaar is zou dit alsnog gedaan kunnen worden.

- De workflow moet zodanig worden dat er een minimum aan fouten gemaakt kan worden.

Genomen acties: Dit is inderdaad de insteek, maar bij belangrijk onderdelen, bijvoorbeeld het lokaal schematiseren en het toekennen van grondeigenschappen, is menselijke expertise noodzakelijk en dit proces kan maar ten dele geautomatiseerd worden. Hierbij zijn fouten dus niet uitgesloten. Wel zal de software zo ontworpen worden dat de gebruiker zo efficiënt mogelijk kan werken.

- In DSM moet ook een database aanwezig zijn, per regio, met daarin de benodigde parameterwaarden van de gebruikte WTI-SOS eenheden. De bestaande proevenverzamelingen zouden op een efficiënte wijze aan de eenheden gekoppeld moeten worden. In sommige gevallen zal dit gemakkelijk, maar soms ook moeilijk gaan. Het zou goed zijn hier in een breder verband over na te denken. Indien parameters niet voorhanden zijn uit proevenverzamelingen is het wellicht nuttig om defaultwaarden voor de grondlagen in SOS (sterkteparameters, doorlatendheid) op te nemen.

Genomen acties: Dit is momenteel nog niet beschikbaar, maar dit zal in de loop der tijd vanzelf ontstaan door het koppelen van (nieuwe) proevenverzamelingen aan de eenheden. Aan eenheden die uit zand bestaan worden momenteel op basis van de VNK2-gegevens default waarden toegekend voor de doorlatendheid en de d_{70} .

- *Zorg ervoor dat specialisten zelf scenario's kunnen toevoegen en niet scenario's alleen door Deltares te laten wijzigen. (Wachten op reactie duurt dan te lang). Kan wel bijvoorbeeld door andere kleur te geven zodat duidelijk is wat gewijzigd/aangevuld is.*

Genomen acties: Het is altijd de bedoeling geweest dat specialisten zelf scenario's kunnen wijzigen en toevoegen. WTI-SOS is bedoeld ter ondersteuning en als uitgangspunt.

Uit de pilots volgde dus dat WTI-SOS gezien wordt als een grote meerwaarde, maar dat het wel essentieel is dat de toetsers goed voorgelicht wordt over hoe WTI-SOS te gebruiken en dat veel afhangt van de gebruiksvriendelijkheid van de bijbehorende software. De software is thans, voorjaar 2015, nog volop in ontwikkeling, maar de aanbevelingen volgend uit de pilots worden hierin zoveel mogelijk meegenomen. Uit de pilot bleek verder met name dat het expliciet maken van het proces van schematiseren van de ondergrond voor geotechnische doeleinden, de vele ad hoc beslissingen aan het licht bracht die vaak een zeer relevante invloed op de uitkomst van veiligheidsevaluaties hebben. Die vele ad hoc beslissingen blijken in de courante wijze van schematiseren van de ondergrond van dijken niet op voldoende onderbouwde aannamen te berusten en daardoor tot niet optimale of zelfs geheel onjuiste analyses te leiden.

C WTI-SOS eenheden

WTI-SOS code	Omschrijving	Kenmerken (geldend voor het vrije veld, op enige meters diep)	Formatie
H_Mg_zm	Matig fijn tot zeer grof getijdengeulzand	Zand, fijn en middel, kleiig (volgens NEN, soms zandige klei), met mm - cm dunne smalle (<~1 m) klei/siltlaagjes, gehalte fijne laagjes klei zeer variabel, met variatie tussen ca. 10 - 30 % met uitschieters tot 40 %, in 0.5 - 2 m dikke sublagen minder dan 30 m breed binnen één pakket, zeer los tot los, kleef ~ 0.5 - 1.5 %, conus 1 - ~20 MPa met fluctuaties over 1 - 2 m van 2 - 5 MPa	Naaldwijk
H_Mg_zf	Uiterst fijn tot matig fijn getijdengeulzand	Getijdengeul. Zand, fijn, kleiig, mm - cm dunne smalle (<~1 m) klei/siltlaagjes, gehalte fijne laagjes klei zeer variabel, met variatie tussen ca. 5 - 15 % met uitschieters tot 30 %, in 0.5 - 2 m dikke sublagen minder dan 30 m breed binnen één pakket, zeer los tot los, kleef ~ 1 - 2 %, conus 1 - 10 MPa met fluctuaties over 1 - 2 m van 1 - 2 MPa en met uitschieters naar 15 MPa	Naaldwijk
H_Mg_zk	Uiterst fijn tot matig fijn getijdengeulzand met dunne klei- en silt laagjes.	Getijdengeul. Zand, fijn, kleiig, mm - cm dunne smalle (<~1 m) klei/siltlaagjes, gehalte fijne laagjes klei zeer variabel, met variatie tussen ca. 10 - 30 % met uitschieters tot 40 %, in 0.5 - 2 m dikke sublagen minder dan 30 m breed binnen één pakket, zeer los tot los, kleef ~ 1 - 2 %, conus 1 - 10 MPa met fluctuaties over 1 - 2 m van 1 - 3 MPa en met uitschieters naar 15 MPa	Naaldwijk
H_Mp_zf	Zandige getijdenplaatafzettingen	Zand, fijn met zeer weinig dunne klei/silt laagjes, bestaat uit relatief schoon zand. Los tot dicht gepakt. Kleef ca. 0.5-1.5%, conus 2-10 MPa	Naaldwijk
H_Mr_kz	Getijdenrestgeulopvulling	Afwisseling van zand en kleilagen met regelmatig organische klei- en veenlagen. De afzetting kent een grote variatie, kleef ca. 1-4% met uitschieters naar 6%, conus 1-5 MPa met soms uitschieters tot 10 MPa.	Naaldwijk
H_Mkw_z&k	Afzettingen van kleine getijdenplaat- en kweldergeulen	Klei, geen - weinig mm tot cm dikke zand/siltlaagjes, meest matig stevig, weinig plantenresten, kleef ca. 1.5 - 4 %, conus <~2 MPa, getijdeplaat afzetting, pakket wordt gekenmerkt door meerdere lagen met verschil in gehalte aan zandlaagjes	Naaldwijk
H_Mp_k	Kleiige getijdenplaat- en kwelderafzettingen	Klei, zacht tot matig stevig, vaak zandig, kleef ca. 2 - 5 %, conus <~1 MPa, plaatselijk tot 2 MPa, pakket bestaat soms uit lagen met meer en minder plantenresten	Naaldwijk
H_Mp_ko	Organisch rijke getijdenplaat- en kwelderafzettingen	Organische klei met regelmatig veenlagen Kan ook gyttjalagen bevatten. Zacht met veenlagen van 0.1- 0.4 m dik, kleef 4-8% met uitschieters naar 10%. conus meestal < 1 MPa.	Naaldwijk
H_Ml_ko	Lagunaire afzetting	Organische klei, zeer zacht. Kan ook gyttjalagen bevatten. Kleef 2-4% met uitschieters naar 6%, conus meestal <1 MPa en vaak rond de 0.5 MPa.	Naaldwijk
H_Eg_zm	Matig fijn tot zeer grof estuarien getijdengeulzand	Zand en klei, met weinig fijne (cm) en soms dikkere (0.5 m) kleilaagjes. Verticaal komen er binnen 1-2 m en over afstanden van 2-20 m grote variaties voor in de hoeveelheid kleilagen en kleilaagjes, plaatselijk met organisch materiaal, conus tussen 5-15 MPa met uitschieters tot 20 MPa, kleef= 0.5-2 %	Naaldwijk
H_Eg_z&k	Uiterst fijn tot matig fijn estuarien getijdengeulzand	Zand en klei, met meest fijne (cm) en soms dikkere (0.5 m) kleilaagjes. Verticaal komen er binnen 1-2 m en over afstanden van 2-20 m grote variaties voor in de hoeveelheid kleilagen en kleilaagjes, plaatselijk met organisch materiaal, conus tussen 1-5 MPa met uitschieters tot 10 MPa, kleef= 0.5-2 %	Naaldwijk
H_Rg_zg	Zeer grof tot uiterst grof rivierbeddingszand	Zand, middel to grof, regelmatig met grindinsluitingen en fijne zandinsluitingen, conus >20 MPa. Is opgebouwd uit sublagen met grote verschillen in sondeerwaarden en korrelgrootte: Fluctuaties van > 5 MPa over 1-2 m hoogte en over afstanden van 5-20 m.	Echteld
H_Rg_zm	Matig fijn tot zeer grof rivierbeddingszand	Zand, middel, soms met grindinsluitingen en regelmatig fijne zandlagen, los tot matig dicht, conus ~10-20 MPa met uitschieters naar 30 MPa. Is opgebouwd uit sublagen met grote verschillen in sondeerwaarden en korrelgrootte: Fluctuaties van > 5 MPa over 1-2 m hoogte en over afstanden van 5-20 m.	Echteld
H_Rg_zf	Uiterst fijn tot matig fijn zand rivierbeddingszand	Zand, fijn -middel, weinig zeer grof zandinsluitingen met soms wat grind, los tot matig dicht, conus ~3-15 met uitschieters naar 20 MPa. Is opgebouwd uit sublagen met verschillen in sondeerwaarden en korrelgrootte: Fluctuaties van 1-5 MPa over 1-2 m hoogte en over afstanden van 5-20 m.	Echteld
H_Rr_o&z	Rivierrestgeulopvulling	Afwisselende lagen van voornamelijk organische klei, regelmatig veen, vooral aan de bovenkant van de laag, en soms zandlagen van 0.2-1 m dik. Kan ook gyttjalagen bevatten.	Echteld

H_Ro_z&k	Oever-, crevasse- en dijkdoorbraakafzettingen	Klei- en zandlagen van meest 0.1-0.2 m dik, zeer lokaal dikkere zandlagen van 1-3 m dik en over 5-50 m lengte. Conusweerstand 2-5 MPa, zeer variabel met de diepte, wrijvingsgetal 1-4%	Echteld
H_Rk_k	Hogere komafzettingen	Klei met silt, met soms geïsoleerde zand en veenlaagjes van 0.1-0.3 m dik, wrijvingsgetal 2-4%, conus <1 MPa	Echteld
H_Rk_k&v	Lagere komafzettingen met afwisseling van klei- en veenlagen	Afwisseling van veenlagen en kleilagen van 5-30 m lengte van decimeters dikte. Kan ook gyttjalagen bevatten. Kleef=3-7%, conus < 1.2 MPa	Echteld
H_Rk_ko	Lagere komafzettingen met organische klei	Organische klei, met plantenresten, bevat soms veenlagen van enige decimeters dikte, wrijvingsgetal 3-7%, conus < 1.2 MPa. Kan ook gyttjalagen bevatten.	Echteld
H_Rk_vk	Lagere komafzetting van kleiig veen	Kleiig veen, kleef 4-8% met variaties van 4% over 0.5-1 m diepte, conus<1 MPa. Kan ook gyttjalagen bevatten.	Echteld
H_Vhv_v	Veen	Veen, slap, kleef variabel meest > 5 % , conus < 1MPa. Kan ook gyttjalagen bevatten, met name aan de basis van een veenpakket.	Nieuwkoop
H_Vbv_v	Gecompecteerd veen	Veen, in dunne laag (0.15 - 1 m), onderste 0.3 m zeer compact en vaak met wat klei, matig stevig, slecht doorlatend. Kleef vaak >7%. Kan ook gyttjalagen bevatten.	Nieuwkoop
H_Ova_zm	Matig fijn tot zeer grof zand	Zand, middel tot grof en soms zeer grof, zeer weinig kleilagen, vast gepakt, bevat vaak schelpenresten. Kleef=<1 en conus=5-30 met variaties van 5 MPa over 1 m. Zelden dikker dan 2 m.	Variabel
H_Ova_zf	Uiterst fijn tot matig fijn zand	Zand, fijn en middel, zeer weinig kleilagen, bevat schelpenresten. Kleef=<1 en conus=5-15 met variaties van 5 MPa over 1 m. Homogeen zand in lagen met sterk wisselende dikte.	Variabel
H_Aa_ht	Aangebracht materiaal	Zand en klei, sterk wisselende samenstelling, aangebrachte grond	Geen
P_Mg_zm	Matig fijn tot zeer grof getijdengeulzand	Zand, fijn en middel, kleiig (met NEN soms zandige klei) , met mm - cm dunne smalle (<~1 m) klei/siltlaagjes, gehalte fijne laagjes klei zeer variabel, met variatie tussen ca. 10 - 30 % met uitschieters tot 40 %, in 0.5 - 2 m dikke sublagen minder dan 30 m breed binnen één pakket, zeer los tot los, kleef ~ 0.5 - 1.5 %, conus 2 - ~20 MPa met fluctuaties over 1 - 2 m van 2 - 5 MPa	Eem
P_Mg_zk	Uiterst fijn tot matig fijn getijdengeulzand met dunne klei en silt laagjes.	Getijdengeul. Zand, fijn, kleiig , mm - cm dunne smalle (<~1 m) klei/siltlaagjes, gehalte fijne laagjes klei zeer variabel, met variatie tussen ca. 10 - 30 % met uitschieters tot 40 %, in 0.5 - 2 m dikke sublagen minder dan 30 m breed binnen één pakket, zeer los tot los, kleef ~ 1 - 2 %, conus 1 - 10 MPa met fluctuaties over 1 - 2 m van 1 -3 MPa en met uitschieters naar 15 MPa	Eem
P_Mp_k	Kleiige getijdenplaat- en kwelderafzettingen	Klei, matig stevig, met plantenresten, kleef ca. 2 - 5 %, conus <~1-2 MPa, getijdenplaat afzetting, pakket bestaat soms uit lagen met meer en minder plantenresten	Eem
P_Rg_zg	Zeer grof tot uiterst grof rivierbeddingszand	Zand, middel tot grof, meestal met grindinsluitingen, conus >20 MPa. Is opgebouwd uit sublagen met grote verschillen in sondeerwaarden en korrelgrootte: Fluctuaties van > 5 MPa over 1-2 m hoogte en over afstanden van 5-20 m. In Zuid-Nederland komen grofgrind pakketten voor.	Kreftenheye; Beegden; Urk; Sterksel; Waalre
P_Rg_zm	Matig fijn tot zeer grof rivierbeddingszand	Zand, middel, soms met grindinsluitingen en regelmatig fijne zandlagen, los tot matig dicht, conus ~10-30 MPa met uitschieters naar 45 MPa. Is opgebouwd uit sublagen met grote verschillen in sondeerwaarden en korrelgrootte: Fluctuaties van > 5 MPa over 1-2 m hoogte en over afstanden van 5-20 m.	Kreftenheye; Beegden; Urk; Sterksel; Waalre
P_Rg_zf	Uiterst fijn tot matig fijn zand rivierbeddingszand	Zand, fijn -middel, weinig zeer grof zandinsluitingen met soms wat grind, los tot matig dicht, conus ~3-20 met uitschieters naar 30 MPa. Is opgebouwd uit sublagen met verschillen in sondeerwaarden en korrelgrootte: Fluctuaties van 1-5 MPa over 1-2 m hoogte en over afstanden van 5-20 m.	Kreftenheye; Beegden; Urk; Sterksel; Waalre
P_Rk_k&s	Kleiige en siltige komafzetting	Klei, vaak zandig, met zandinsluitingen tot 1.5 m. Wrijvingsgetal 2-4%, conus 1-4 MPa. Zeer stevig en ondoorlatend	Kreftenheye, Laag van Wijchen
P_Rbk_zm	Zeer fijn tot zeer grofzandige beekafzetting	Afwisselende lagen van matig grof tot grindig zand van 1-2 m dikte over lengtes van 10-30 m, conus > 25 MPa	Boxtel

P_Rbk_z&s	Heterogene beekafzetting met zand en siltlagen	Fijn zand en siltlagen van 0.5-3 m dikte over lengtes van voornamelijk >100 m. Sterk wisselende conusweerstand, 2-10 met uitschieters tot 30 MPa. Wrijvingsgetal 2-5%	Boxtel
P_Wrd_zm	Matig fijn tot matig grofzandige windafzetting (rivierduin)	Zand, matig fijn tot matig grof, kleef < 1%, conus 8-20 MPa. Vaak gelegen op P_Rk_K&s	Boxtel, Laagpakket van Delwijnen
P_Wdz_zf	Matig fijnzandige windafzetting (dekzand of stuifzand)	Zand, fijn, los tot matig dicht, kleef < 1%, conus ~ 5-15 MPa, met uitschieters naar 20 MPa. Meest als een 1-3 m dikke laag met over afstanden van meer dan 200 m weinig variatie in korrelgrootte en meestal een geringe variatie in dikte. Wordt ook voor Holoceen stuifzand gebruikt.	Boxtel, Laagpakket van Wierden; Drachten
P_Wls_s	Siltige windafzetting (löss)	Silt, los tot matig dicht, kleef < 3%, conus ~3-12 MPa. Komt veel in Zuid-Nederland voor	Boxtel, Laagpakket van Liempde en Schimmert
P_Gs_zg	Matig grof tot uiterst grof smeltwaterzand en hellingafzettingen	Zand, middel en grof, soms veel grind en bevat lokaal stenen, kleef < 1 %, conus > 15 MPa regelmatig >~ 30 MPa	Drente; Boxtel
P_Ggs_zg	Gestuwde afzetting	Veelal gestuwde rivierafzettingen. Afwisselend gelaagde afzettingen in pakketten van 1-10 m dik. Vaak grof zand, maar ook kleilagen. De lagen staan onder een steile helling van 10-45 graden. Sondeerstaten vertonen over afstanden van 5-20 m zeer grote variatie.	Drente
P_Gkl_kz	Keileem	Klei tot zand met stenen, zeer stevig, kleef ca. 2 - 4 % vaak gelijkmatig, conus 2-5 MPa, vaak een minder cohesieve toplaag van 1-2 m dikte	Drente, Laagpakket van Gieten
P_Om_zf	Fijnzandige en compacte meerafzetting	Zand, fijn, dicht gepakt. Conus tot 40 MPa, kleef 1-3%	Peelo
P_Om_k	Kleiige en compacte meerafzetting (potklei)	Klei, zeer stevig, soms met zandige insluitingen 0.5 - 2 m dik, kleef 3 - 8 % , conus 0.5 - 2.5 MP, regelmatig zeer geleidelijke toename met diepte	Peelo, Laagpakket van Nieuwolda
P_Ova_sd	Slecht doorlatend	Zeer slecht doorlatend zandige en klei afzettingen met vaak zandinsluitingen van beperkte uitbreiding van 10-50 m, soms veen of venig materiaal bevattend, stevig. Niet nader omschreven, slecht doorlatend materiaal	Variabel, o.a. Eem; Urk, Sterksel; Waalre en Tertiaire formaties