


# **POVM Beter benutten actuele sterkte**

Verkenning Ontwerptool Macrostablieiteit

**POV**

**MACRO  
STABILITEIT**



**Auteur: M. Visschedijk**

**Datum: juni 2017**

**Versie: 1**

**Titel**

POVM - Beter benutten actuele sterkte, Verkenning Ontwerptool Macrostablieit

**Opdrachtgever**

Waterschap Rivierenland

**Project**

11200643-015

**Kenmerk**

11200643-015-GEO-0001

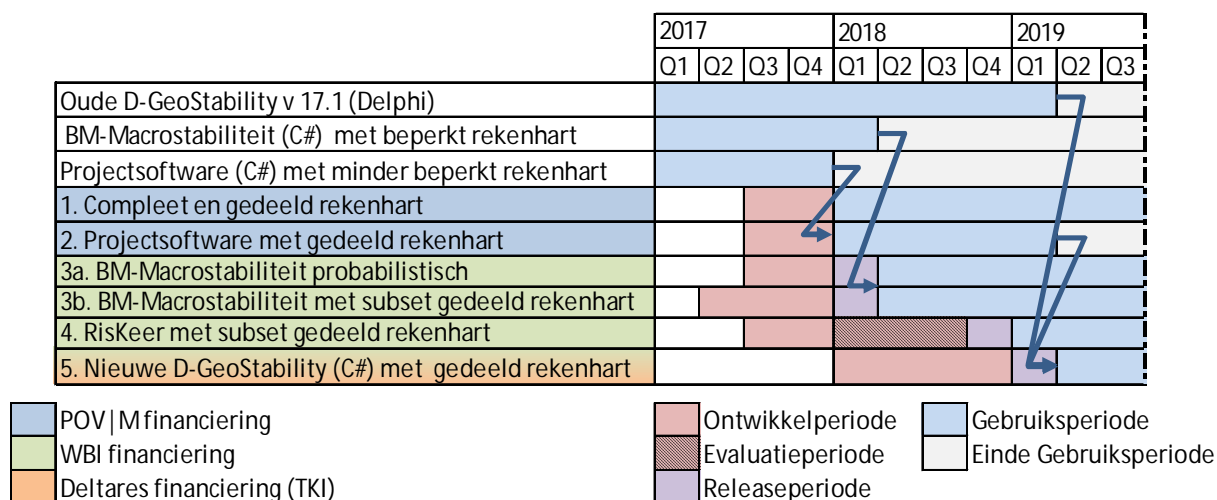
**Pagina's**

34

**Samenvatting**

Een probabilistische faalkansbepaling voor macrostablieit leidt aantoonbaar tot een scherpere beoordeling en een scherper ontwerp. Volgens het Wettelijke Beoordelingsinstrumentarium (WBI) moet daarbij voor klei en veen gebruik worden gemaakt van een ongedraineerde sterktekaracterisering. Per begin 2017 is het rekenen met deze combinatie alleen mogelijk met speciale projectsoftware, die niet wordt uitgeleverd. In de standaard Deltares software (D-Geo Stability) ontbreekt de specifieke combinatieoptie. Deze software is geschreven in de verouderde programmeertaal Delphi. Daarom vinden hierin geen updates meer plaats. De software binnen het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI) ondersteunt (nog) geen probabilistische analyse van macrostablieit. Dat geldt zowel voor BM-Macrostablieit (doorsnedeniveau) als voor RisKeer (trajectniveau). Bovendien mist deze software de extra functionaliteit die nodig is voor ontwerpen. De verschillende gereedschappen maken verder gebruik van verschillende softwarecomponenten. Dat leidt tot verschillende rekenresultaten.

De voorliggende verkenning bevat een plan voor realisatie van geïntegreerde softwaregereedschappen, met een complete en praktisch bruikbare functionaliteit. Geïntegreerd wil zeggen dat de gereedschappen softwarecomponenten gaan delen. Geïntegreerd wil ook zeggen dat gecoördineerde deelprojecten binnen een overkoepelend projectkader leiden tot samenhangende deelproducten. De voorgestelde samenhang zorgt er tevens voor dat de benodigde resultaten sneller en goedkoper worden bereikt dan bij gescheiden ontwikkelsporen. De functionaliteit van de bestaande en te realiseren software wordt op hoofdlijnen gespecificeerd in hoofdstuk 2 en 3 van dit rapport en in detail in bijlage A. Een overzicht van de deelproducten wordt hieronder getoond. De te realiseren deelproducten zijn gekoppeld aan verschillende stakeholders (POV|M, WBI, Deltares).



Bovenstaande tabel toont dat de bestaande projectsoftware per direct beschikbaar is voor probabilistische analyses met ongedraineerde sterkte. De ontwerpfunctionaliteit van deze versie

**Titel**

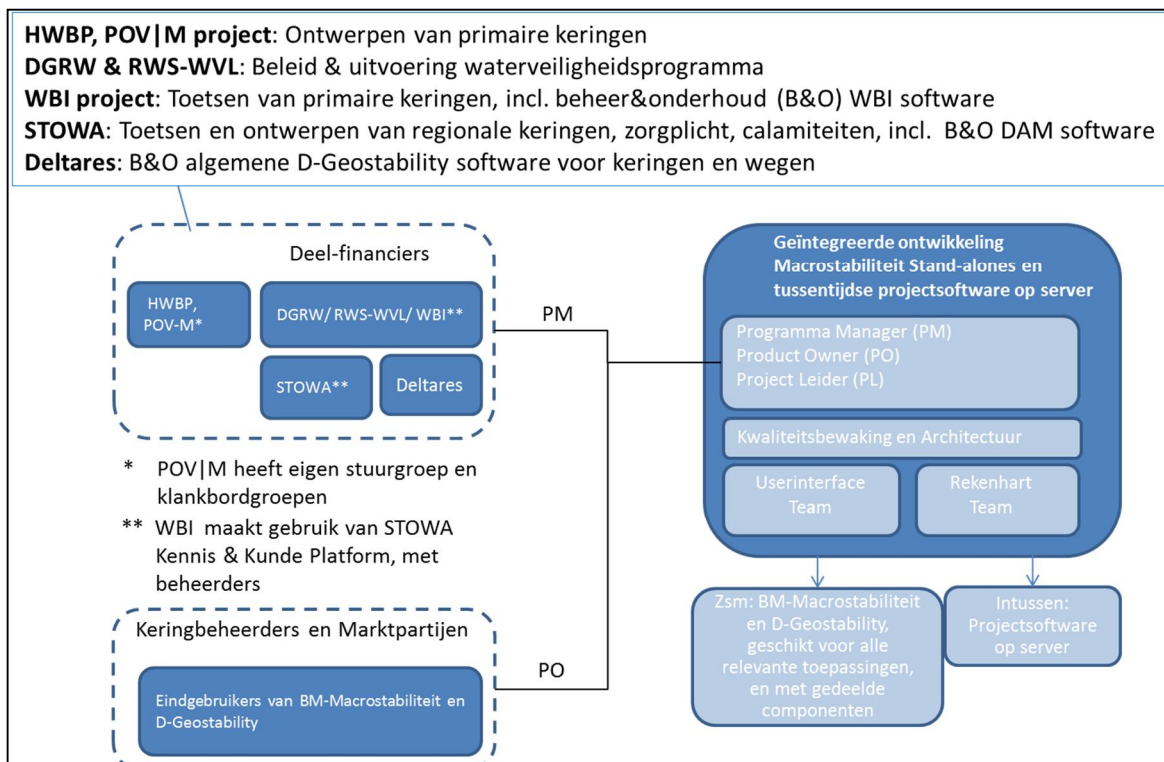
POVM - Beter benutten actuele sterkte, Verkenning Ontwerptool Macrostablieit

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Waterschap Rivierenland	11200643-015	11200643-015-GEO-0001	34

is echter nog beperkt en er is alleen op projectbasis gebruik mogelijk, via een server. Bovendien zijn de rekenresultaten niet noodzakelijkerwijs gelijk aan de WBI software.

Voorstel aan de POV|M is daarom om deelproduct 1 en deelproduct 2 te realiseren, in de periode tot en met eind 2017. Deelproduct 1 betreft uitbreiding van het beperkte WBI rekenhart tot de volledige functionaliteit die nodig is voor ontwerpen. Deelproduct 2 betreft de koppeling van dit rekenhart aan de projectsoftware. Daarmee is vanaf begin 2018 projectgebonden gebruik mogelijk van de volledige ontwerpfunctionaliteit op een server. Voorstel aan het WBI project is verder om het uitgebreide rekenhart gelijktijdig te koppelen aan de WBI software (deelproduct 3b en deelproduct 4). Zo wordt geborgd dat ontwerpen en gedetailleerde toetsen vanaf begin 2018 dezelfde rekenresultaten leveren, zowel probabilistisch als semi-probabilistisch. Aanvullend voorstel aan Deltares/WBI is om in 2018, op basis van hetzelfde rekenhart, de stap te maken naar een nieuwe productversie van D-Geo Stability (deelproduct 5). In dat stadium zullen ook user-interface-componenten met de WBI software worden gedeeld. Deze productversie vervangt in 2019 zowel de projectsoftware als de oude D-Geo Stability versie, en misschien zelfs ook BM-Macrostablieit. Door het vervangen van de projectsoftware komt de volledige ontwerpfunctionaliteit weer toekomstbestendig beschikbaar, in een uitleverbare vorm.

Onderstaande figuur toont ten slotte het beoogde organisatieschema. De praktische toepasbaarheid wordt daarin geborgd door frequente consultatie van een groep van eindgebruikers, met aandacht voor de in totaal beoogde toepassingsgebieden.

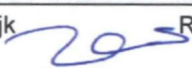
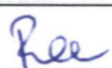
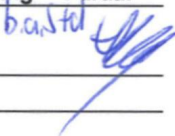




**Titel**

POVM - Beter benutten actuele sterkte, Verkenning Ontwerptool Macrostablieit

**Opdrachtgever** Waterschap Rivierenland      **Project** 11200643-015      **Kenmerk** 11200643-015-GEO-0001      **Pagina's** 34

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	juni 2017	M. Visschedijk		R van der Meij		L. Voogt	

**Status**

Definitief

Het in dit document voorgestelde plan van aanpak is gericht aan verschillende stakeholders (waaronder POVM), ter ondersteuning van hun verdere koersbepaling. Het document dient dus nadrukkelijk niet te worden gelezen als een plan dat al door een of meer van deze stakeholders is geaccordeerd.

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>1</b>
1.1	Positionering van deze verkenning binnen de POV M	1
1.2	Relevante ontwikkelingen voor het ontwerpen op macrostabiliteit	1
1.2.1	Het ontwerp- en beoordelingsinstrumentarium	1
1.2.2	Het <i>Dijken op Veen</i> onderzoek rond ongedraineerde sterkte	3
1.2.3	Het <i>Actuele Sterkte</i> onderzoek rond faalkansbepaling	3
1.3	Aanleiding en probleemstelling	4
1.4	Doelstelling en doelgroepen	4
1.5	Afbakening	5
<b>2</b>	<b>Overzicht van de huidige software</b>	<b>7</b>
2.1	Inleiding	7
2.2	WBI software	8
2.3	D-Geo Stability	9
2.4	Projectsoftware voor <i>Actuele Sterkte</i>	11
2.5	STOWA-DAM software	12
<b>3</b>	<b>Integratieplan</b>	<b>14</b>
3.1	Inleiding	14
3.2	Doelen	14
3.2.1	Geïntegreerd en compleet softwaregereedschap	14
3.2.2	Flexibele ondersteuning voor probabilistische stabiliteitsanalyses	15
3.2.3	Gebruikersvriendelijke ondersteuning voor ongedraineerde sterkte	17
3.3	Overkoepelend ontwikkelprogramma	18
3.4	Deelproducten	20
3.4.1	Overzicht	20
3.4.2	Deelproduct 1 en 2: Rekenhart en Projectsoftware	21
3.4.3	Deelproduct 5: D-Geo Stability	21
3.4.4	Deelproduct 3: BM-Macrostabiliteit	22
3.4.5	Deelproduct 4: RisKeer	23
3.5	Fasering en milestones	23
	<b>Literatuur</b>	<b>25</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A</b>	<b>Functionaliteit van de verschillende producten</b>	<b>A-1</b>
A.1	Inleiding	A-1
A.2	Stijghoogtebepaling	A-2
A.3	Mechanische belastingen	A-2
A.4	Sterkte-eigenschappen	A-3
A.5	Glijvlakmodellen	A-5
A.6	Constructieve elementen	A-6
A.7	Zoekmethoden voor ligging maatgevend glijvlak	A-6
A.8	Probabilistische methoden voor faalkansbepaling	A-7
A.9	Invoer	A-8



A.10 Uitvoer

A-8

## Begrippen, afkortingen en symbolen

### Begrippen

BM-Macrostablieiteit	WBI/Deltares softwareapplicatie (BM=Basismodule), voor de (op dit moment) semi-probabilistische beoordeling van primaire keringen op binnenwaartse stabiliteit in een 2D doorsnede
Bishop	Glijvlakmodel op basis van cirkelvormig glijvlak
C#	Moderne programmeertaal, die ook wordt gebruikt voor de WBI software
DAM	STOWA/Deltares softwareapplicatie voor geautomatiseerde semi-probabilistische analyse van macrostablieiteit en piping langs trajecten van regionale en primaire keringen, ten behoeve van verschillende doeleinden.
Delphi	Oudere programmeertaal waarin veel bestaande softwareapplicaties zijn opgezet, inclusief D-Geo Stability en D-Settlement
D-Geo Stability	Deltares software (voorheen genoemd MStab) voor het vastleggen van alle benodigde invoer, gevolg door een semi-probabilistische of probabilistische analyse van een 2D doorsnede van grondlichamen met een keuze uit verschillende glijvlakmodellen
D-Serie	De verzamelnaam voor de geotechnische software serie van Deltares
D-Settlement	Deltares software (voorheen genoemd MSettle) voor het vastleggen van geometrie, ondergrondgegevens en ophoging en voor de semi-probabilistische of probabilistische analyse van zettingen door ophoging in een 2D doorsnede.
D-Sheetpiling	Deltares software (voorheen genoemd MSheet) voor damwandberekeningen
D-Soilmodel	WBI/Deltares software voor het vastleggen van geometrie en ondergrondgegevens in meerdere doorsneden ten behoeve van de daarop volgende semi-probabilistische beoordeling met BM-Macrostablieiteit (in een enkele doorsnede) en de toekomstige probabilistische beoordeling met RisKeer (voor meerdere vakken en faalmechanismen)
Faalmechanisme	Een bezwijkvorm die het verlies van waterkerende functie inluit
Faalkans	In de context van waterkeringen: de kans dat in een of meer doorsneden langs een traject een faalmechanisme optreedt
Faalkansbudget	Het deel van de maximaal toelaatbare faalkans dat binnen een traject aan een bepaald faalmechanisme wordt toegekend
Glijvlak	Het vlak waarlangs een grondmoot afschuift bij instabiliteit
Glijvlakmodel	Model om de stabiliteit van een helling te berekenen op basis van de grondsterkte langs het glijvlak
Grensspanning	De effectieve verticale spanning die de grens aangeeft tussen normaal geconsolideerde grond en overgeconsolideerde grond. Overgeconsolideerde grond (met grensspanning groter dan veldspanning) is sterker en stijver dan normaal geconsolideerde grond (met veldspanning gelijk aan grensspanning).
Hydraulische belastingen	Buitenwaterstand en golven, die de waterkering belasten

Macrostablieiteit	Stabiliteit van de helling van een grondlichaam. Instabiliteit leidt tot afschuiven van een grondmoot
Ontwerppunt	De meest waarschijnlijke combinatie van onzekere parameters waarbij falen optreedt
Primaire waterkering	Primaire waterkeringen bieden bescherming tegen overstromingen bij hoogwater vanuit de Noordzee, de Waddenzee, de grote rivieren Rijn, Maas en Westerschelde, de Oosterschelde, het IJsselmeer, het Volkerak-Zoommeer, het Grevelingenmeer, het getijdedeel van de Hollandsche IJssel en de Veluwerandmeren
Probabilistische analyse	Directe faalkansbepaling op basis van kansverdelingen voor sterkte, belasting en modelonzekerheid
Uplift-Van	Uitbreiding van het Bishop glijvlakmodel voor oprijfsituaties. Het glijvlak bestaat uit een horizontaal deel met aan de buitenzijden twee cirkelvormige delen.
Regionale waterkering	Alle niet-primaire waterkeringen. Daaronder vallen: boezemkaden (en polderkaden); keringen langs regionale rivieren, keringen langs kanalen en wateropslagbekkens; Compartimenteringsdijken, secundaire dijken, slaperdijken en landscheidingen; Voorlandkeringen en zomerkades.
RisKeer	WBI software (tot 2017 genoemd Ringtoets) voor probabilistische bepaling van de hydraulische belastingen langs trajecten van primaire keringen, gecombineerd met semi-probabilistische en probabilistische beoordeling voor meerdere faalmechanismen
Semi-probabilistische analyse	Indirecte toetsing op de maximaal toelaatbare faalkans, met behulp van partiële veiligheidsfactoren voor sterkte, belasting en modelonzekerheid.
Spencer	Glijvlakmodel met vrije glijvlakvorm.
Stijghoogte	Een representatie van de waterdruk op een zekere locatie in de grond, door middel van de hoogte van de waterkolom die zou ontstaan wanneer op die locatie een verticale buis zou worden geslagen. De stijghoogte is gedefinieerd ten opzichte van een vast verticaal referentieniveau.
Talud	Helling van een grondlichaam
<b>Afkortingen</b>	
DGRW	Directoraat Generaal Ruimte en Water van het ministerie van Infrastructuur en Milieu
HWBP	Hoogwaterbeschermingsprogramma
LRT3+	Landelijke Rapportage Toetsing
KIJK	Versterkingsproject <i>Krachtige IJsseldijken Krimpenerwaard</i>
OI2014v4	Ontwerpinstrumentarium, versie 4. Dit ontwerpinstrumentarium geeft een handreiking voor het ontwerpen van primaire keringen.
POP	<i>Pre Overburden Pressure</i> . De POP is gelijk aan het verschil tussen de grensspanning $\sigma_y$ en de effectieve verticale veldspanning $\sigma'_v$ . Het is een maat voor de overconsolidatie van de grond. De POP neemt toe door leeftijd en/of door een weggenomen voorbelasting.
POV	Project Overstijgende verkenning, ten behoeve van het binnen



POV M RWS-WVL SHANSEP	HWBP projecten toepassen van nieuwe kennis en kansrijke (product)innovaties. Project Overstijgende verkenning Macrostabiliteit Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving Stress History And Normalized Soil Engineering Properties. Relateert de ongedraineerde sterkte aan veldspanning en grensspanning.
STBI	Aanduiding voor het WBI toetspoot 'Stabiliteit Binnenwaarts' Binnenwaarts wil zeggen: afschuivingen richting landzijde, als gevolg van verhoging van de buitenwaterstand
STOWA	Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.: kenniscentrum van regionale waterbeheerders.
UI	User Interface
IO	Input/Output
VNK	Veiligheid Nederland in Kaart. Een meerjarig onderzoeksproject waarbinnen tot en met 2014 een complete probabilistische beoordeling is uitgevoerd van alle primaire waterkeringen in Nederland
WBI	Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium. Dit instrumentarium bestaat uit voorschriften en ondersteunende software voor de wettelijk verplichte beoordeling van primaire keringen in de periode 2017-2023

### Symbolen

$c$	Cohesie [kPa]. Parameter voor het deel van de grondsterkte dat niet van de effectieve veldspanning afhankelijk is.
$s_u$	Ongedraineerde sterkte [kPa]. De sterkte van natte cohesieve grond (klei en veen). De ongedraineerde sterkte is afhankelijk van zowel de effectieve veldspanning als van de grensspanning.
$\phi$	Wrijvingshoek [deg]. Parameter voor het deel van de grondsterkte dat van de effectieve veldspanning afhankelijk is.
$\psi$	Dilatantiehoek [deg]. Parameter voor de volumeverandering als gevolg van afschuiven.
$\sigma_y$	Grensspanning of <i>Yield Stress</i> [kPa]. De grensspanning is minimaal gelijk aan de effectieve verticale veldspanning.
$\sigma'_v$	De effectieve verticale veldspanning, dat wil zeggen de totale verticale spanning minus de waterspanning

# 1 Introductie

## 1.1 Positionering van deze verkenning binnen de POV|M

De primaire waterkeringen in Nederland moeten voldoen aan de vereiste veiligheidsnorm. Daartoe voeren waterschappen, hoogheemraadschappen en het ministerie van Infrastructuur en Milieu in alliantievorm maatregelen uit, binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Dat doen ze op basis van afspraken die zijn vastgelegd in het Bestuursakkoord Water van mei 2011. De scope van de huidige versterkingsronde van het HWBP wordt bepaald door de primaire waterkeringen die zijn afgekeurd in de laatste (verlengde) derde toetsronde. Deze keringen zijn eind 2013 vastgelegd in de Landelijke Rapportage Toetsing (LRT3+). Het HWBP heeft zich tot doel gesteld om de huidige ronde van versterkingsmaatregelen ruim 2 keer sneller en goedkoper uit te voeren dan de vorige ronde. De gereedschapskist van de dijkversterker moet daarvoor worden gevuld met nieuwe technieken, rekenmethodieken, procedures etc. Om de daarvoor benodigde innovaties te ondersteunen heeft het HWBP een aantal zogenaamde *Project Overstijgende Verkenningen* (POV's) gestart. Binnen de POV's worden kansrijke ideeën tot toepasbare technieken uitgewerkt. Een van deze POV's is de POV Macrostabiliteit (POV|M).

Waterkeringbeheerders, bedrijfsleven en kennisinstellingen werken binnen de POV|M samen aan het realiseren van versnellende, kostenbesparende en praktisch toepasbare kennis- en productinnovaties, zonder kwaliteitsverlies. Dit inclusief de bijbehorende technieken, rekenmethodieken en procesverbeteringen. De belangrijkste resultaten moeten uiterlijk 2018 kunnen worden geïmplementeerd in de toekomstige dijkversterkingsprojecten van het HWBP.

Volgens het Plan van aanpak (Waterschap Rivierenland, 2015) is de POV|M opgedeeld in de volgende vier clusters:

- Innovatie en techniek;
- Rekentechnieken;
- Monitoring;
- Proces.

Hoofdactiviteit 7 van het cluster Rekentechnieken betreft het onderzoekspoor “Beter Benutten van Actuele Sterkte”. Binnen deze hoofdactiviteit is onder andere een verkenning gedefinieerd naar een ontwerptool voor macrostabiliteit (Waterschap Rivierenland, 2017a; Deltares, 2017a; Waterschap Rivierenland, 2017b). De voorliggende rapportage doet verslag van deze verkenning.

Het in deze rapportage voorgestelde plan van aanpak is gericht aan verschillende stakeholders (waaronder POV|M), ter ondersteuning van hun verdere koersbepaling. Het document dient dus nadrukkelijk niet te worden gelezen als een plan dat al door een of meer van deze stakeholders is geaccordeerd.

## 1.2 Relevante ontwikkelingen voor het ontwerpen op macrostabiliteit

### 1.2.1 Het ontwerp- en beoordelingsinstrumentarium

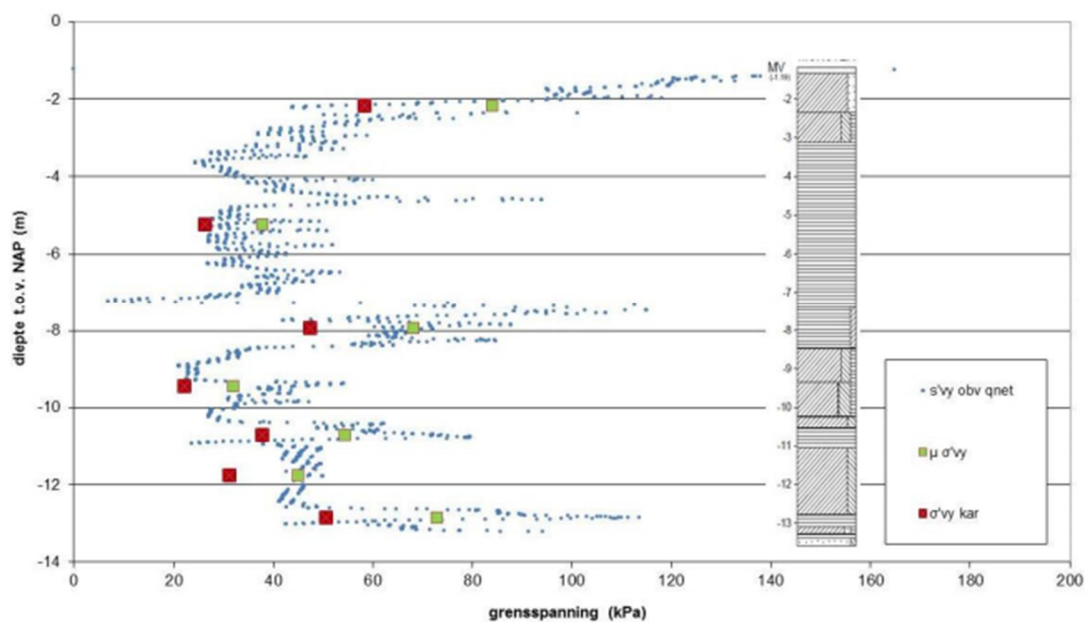
De meest recente handreiking voor het ontwerpen van primaire keringen is vastgelegd in versie 4 van het ontwerpinstrumentarium (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017a), hierna te noemen: OI2014v4. Het OI2014v4 sluit aan op het nieuwe Wettelijke

Beoordelingsinstrumentarium, met bijbehorende software (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017b; Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016; Deltares, 2016k). Dit beoordelingsinstrumentarium wordt hierna WBI genoemd. De genoemde voorschriften beperken zich tot *groene dijken*. Dat wil zeggen dijklichamen zonder constructieve elementen.

Ten opzichte van de oude toetsvoorschriften (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007) bevat het nieuwe instrumentarium op het gebied van macrostabiliteit twee belangrijke nieuwe elementen:

1 Ongedraineerde sterkte

De sterkte van cohesieve grond (klei, veen) moet volgens het WBI (gedetailleerde toets) vanaf 2017 worden beschreven door middel van de 'ongedraineerde sterkte'  $s_u$ , in plaats van door de cohesie  $c$  en de wrijvingshoek  $\phi$ . De ongedraineerde sterkte varieert van plaats tot plaats en is bovendien afhankelijk van zowel de heersende effectieve veldspanning als van de zogenaamde 'grensspanning'. Het ruimtelijke veld tijdens dagelijkse omstandigheden moet de beoordelaar vooralsnog zelf bepalen uit correlaties met de sondeerweerstand. Volgens het WBI moet de beoordelaar hieruit vervolgens zelf een geschematiseerd grensspanningsveld bepalen<sup>1</sup>. Dat veld dient als invoer voor de WBI stabiliteitssoftware. In het najaar van 2017 wordt binnen het WBI meer ondersteuning voor de grensspanningsbepaling voorzien.



Figuur 1.1 Illustratie van het (handmatig) bepalen van grensspanningsvelden uit sondeerweerstand.

2 Voorsorteren op probabilistisch beoordelen vanaf 2019

Het OI2014v4 en het WBI schrijven voor hoe de maximaal toelaatbare faalkans op doorsnedeniveau moet worden afgeleid voor verschillende faalmechanismen, waaronder macrostabiliteit. De faalkanseis hangt af van de norm, de trajectlengte en het 'faalkansbudget'. Deze eis wordt via een formule vertaald naar de vereiste stabiliteitsfactor voor een semi-probabilistische beoordeling bij maatgevend hoogwater, in combinatie met toe te passen partiële veiligheidsfactoren op sterkteparameters. Het

<sup>1</sup> via het SHANSEP model (Ladd & Foott, 1974; Deltares, 2014)

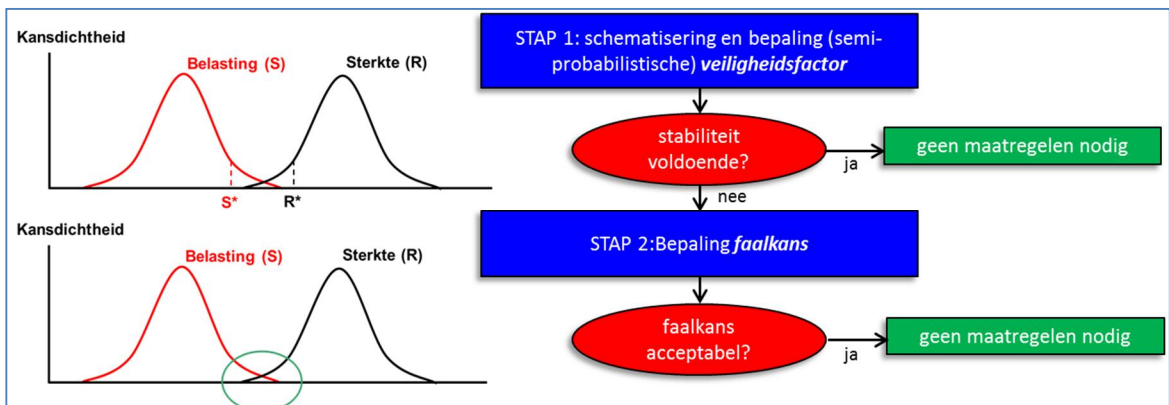
Het WBI wil vanaf 2018 ondersteuning gaan bieden voor probabilistische analyses op doorsnedeniveau en vanaf 2019 ook op trajectniveau.

1.2.2 Het *Dijken op Veen* onderzoek rond ongedraineerde sterkte

Voor het bepalen van de benodigde versterking van de Markermeerdijken is van 2013 tot en met 2015 onder andere onderzoek verricht naar het beter karakteriseren van de sterkte van veen met hulp van ongedraineerde sterkte. Dat heeft in 2015 geleid tot een werkwijze voor semi-probabilistische stabiliteitsanalyses. Deze wordt momenteel in het ontwerpproces toegepast. Binnen deze werkwijze wordt het geschematiseerde ongedraineerde sterkte veld per doorsnede rechtstreeks bepaald uit correlaties met sonderweerstand. Het geschematiseerde ongedraineerde-sterkteveld dient, na een spanningscorrectie voor hoogwateromstandigheden, als invoer voor de stabiliteitsanalyses. Het WBI ondersteunt voor de gedetailleerde toets een aanpak via de grensspanning. Het OI2014v4 staat zowel gebruik van de *Dijken op Veen* methode als van de WBI methode toe.

1.2.3 Het *Actuele Sterkte* onderzoek rond faalkansbepaling

Onder de noemer *Actuele Sterkte* wordt binnen de POV|M onderzoek verricht naar de meerwaarde van probabilistische analyses voor macrostabiliteit. Binnen dat kader zijn in 2016 met speciale projectsoftware analyses uitgevoerd voor het dijkversterkingsproject *Krachtige IJsseldijken Krimpenerwaard* (KIJK) (Deltares, 2016e). Deze analyses laten zien dat een probabilistische beoordeling op doorsnedeniveau significant gunstiger uitpakt dan een semi-probabilistische beoordeling. Deze conclusie sluit aan op verwachtingen en op eerdere ervaringen, zoals opgedaan binnen het project *Veiligheid Nederland in Kaart* en kalibratiestudies voor het WBI. De ongedraineerde sterkte is in de POV|M analyses gemodelleerd met de WBI methode. Op grond van die ervaring is de toepassing van probabilistische analyses binnen het KIJK project vanaf februari 2017 al verder verbreed. Deze bredere toepassing wordt ook voorzien binnen andere HWBP projecten. Een snelle operationalisering wordt ondersteund door RWS-WVL. RWS-WVL heeft daarom begin 2017 opdracht gegeven voor een update van de handreiking uit 2016 (Deltares, 2016f) en voor het verbeteren van de speciale projectsoftware waarmee de KIJK analyses zijn uitgevoerd (zie § 2.4).



Figuur 1.2 Stap 1 en 2 van de Actuele Sterkte methodiek. Deze twee stappen komen in principe overeen met de vanaf 2019 ook binnen WBI voorgeschreven stappen in de gedetailleerde toets. In de Actuele Sterkte aanpak wordt stap 2 op doorsnedeniveau uitgevoerd. Het aanvullende doel vanuit het WBI is om in 2019 ook de integratie over meerdere doorsneden en faalmechanismen te ondersteunen. Stap 3 van de Actuele Sterkte methodiek wordt hier niet getoond. Laatstgenoemde stap betreft een zogenaamde 'faalkansupdate', op basis van de in het verleden overleefde belasting.

### 1.3 Aanleiding en probleemstelling

Aanleiding voor de voorliggende verkenning is dat er voor de beoordeling van macrostabiliteit in de loop der tijd verschillende software is ontstaan, met afzonderlijke rekencomponenten. De ontwikkeling van deze software vond plaats binnen afzonderlijke sporen, met verschillende doelen en met verschillende 'stakeholders'. De functionaliteit van de huidige gereedschappen overlapt deels. Geen van op dit moment uitleverbare gereedschappen ondersteunt echter voldoende volledig een probabilistische beoordeling op basis van ongedraineerde sterkte. De WBI software bevat bovendien niet de extra functionaliteit die nodig is voor ontwerpdoeleinden en die nodig is voor andere typen grondlichamen dan de primaire keringen in Nederland. Zie hoofdstuk 2 voor een gedetailleerd overzicht.

Deze situatie leidt tot de volgende deelproblemen:

- De beschikbare softwaregereedschappen bieden geen of onvoldoende functionaliteit voor een probabilistische (her)beoordeling en voor een daarop volgend geoptimaliseerd ontwerp.
- De projectsoftware voor *Actuele Sterkte* biedt dergelijke mogelijkheden grotendeels wel, maar heeft ook niet de in totaal gewenste functionaliteit voor stabiliteitsanalyses. De projectsoftware is bovendien alleen op projectbasis beschikbaar, in afwachting van vervangende formele producten.
- De beperkte ondersteuning voor 'ongedraineerde sterkte' op basis van sondeerweerstand noodzaakt de beoordelaar tot het opzetten en toepassen van eigen spreadsheets of software om daaruit grensspanningen te bepalen. In de schematiseringshandleiding (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016) ontbreken bovendien handvaten voor het eenduidig kiezen van representatieve waarden voor de sondeerweerstand. Dit beperkt de productiviteit en blijkt vooralsnog ook een bron voor inconsistenties en fouten.
- De verschillende rekenharten leiden momenteel al tot verschillende rekenresultaten. Zonder ingrijpen neemt de toekomstige kans daarop verder toe, omdat aanpassingen en uitbreidingen in beide rekenharten tijdens doorontwikkeling niet synchroon en identiek zullen plaatsvinden.
- De 'user interfaces' bieden voor de invoer en presentatie van dezelfde gegevens een verschillende gebruikerservaring ('look & feel'). Dat kan verwarring veroorzaken en de foutgevoeligheid vergroten.
- Zonder ingrijpen is meervoudig beheer en onderhoud nodig.
- De benodigde functionaliteit voor verschillende toepassingsgebieden en stakeholders overlapt deels. Er ontbreekt echter een gecoördineerde en geïntegreerde ontwikkeling van producten en van de daarbij te delen componenten, waarbij rekening wordt gehouden met de wensen, eisen en randvoorwaarden van alle stakeholders samen.
- Betrokkenheid van de eindgebruikers op de voor hen relevante gebruikersaspecten is nog te gefragmenteerd georganiseerd.
- Gescheiden ontwikkelsporen leiden tot hogere kosten en langere doorlooptijden voor elk van de financierende stakeholders met hun achterliggende eindgebruikers.

### 1.4 Doelstelling en doelgroepen

Doel van de voorliggende verkenning is om een voorstel te schetsen voor realisatie van geïntegreerd softwaregereedschap, met een complete en praktisch bruikbare functionaliteit. Geïntegreerd wil zeggen dat gereedschappen waar mogelijk rekencomponenten delen en idealiter ook user-interfacecomponenten. Geïntegreerd wil ook zeggen binnen een samenhangend uitvoeringsprogramma, met een overkoepelend organisatiekader en proceskader. Compleet wil zeggen dat de functionaliteit alle beoogde toepassingen moet dekken en dat deze functionaliteit in lijn moet zijn met de eisen en wensen van alle

stakeholders die aan de ontwikkeling bijdragen. Praktisch bruikbaar wil ten slotte zeggen dat de software aansluit op het werkproces van de eindgebruiker.

De resulterende “blauwdruk” voor inhoud en proces is in principe bedoeld voor de volgende drie verschillende doelgroepen.

- 1 De koers-beslissers, c.q. ‘stakeholders’, die (mee)financieren. Dat zijn:
  - De kerngroep en de stuurgroep en het rekencluster van het POV|M programma. Binnen dit programma ligt de focus op het probabilistisch (her)beoordelen en vervolgens ontwerpen van primaire keringen op macrostabiliteit.
  - DGRW en RWS-WVL, met een brede focus op het beoordelen (WBI) en ontwerpen van waterkeringen, inclusief het beschikbaar stellen van het daarvoor benodigde instrumentarium.
  - De binnen STOWA verzamelde waterschappen, met een aanvullende focus op zorgplicht, beleid en regionale keringen.
  - Deltares, met een focus op de bestaande eigen software voor de geotechniek.
- 2 De eindgebruikers van de software. Dat wil zeggen de geotechnisch en waterbouwkundig specialisten die werkzaam zijn bij ingenieursbureaus (focus op de toepassing van de software) en bij de beheerders van de infrastructuur (focus op het verzamelen en beheren van de benodigde data voor het gebruik). Deze specialisten op dit moment vertegenwoordigd in:
  - het rekencluster van de POV|M (ingenieursbureaus),
  - de door STOWA ondersteunde *Kennis en Kunde* platforms (waterkeringbeheerders)
  - de klantengroep van de D-Serie (vooral ingenieursbureaus).
- 3 Ten slotte zijn het de koers-uitvoerders (softwarebeheerders, programmeurs).

In de voorliggende verkenning krijgen al deze drie gezichtspunten op hoofdlijnen aandacht.

## 1.5 Afbakening

Op grond van voorgaande probleemstelling en doelstelling wordt in het vervolg van dit rapport de volgende afbakening aangehouden.

- De verkenning beperkt zich tot softwaregereedschappen voor glijvlakberekeningen, omdat er juist voor dit type stabiliteitsberekening meerdere gereedschappen zijn ontstaan.
- De software in de POV|M gereedschapskist moet minimaal een probabilistische (her)beoordeling en een geoptimaliseerd ontwerp van primaire keringen mogelijk maken, binnen de kaders van de veranderende voorschriften. De complete toepasbaarheid voor primaire keringen staat dus centraal vanuit POV|M perspectief.
- De toepasbaarheid voor andere typen grondlichamen (regionale keringen en wegen) zal ook worden beschouwd, vanwege de doelstelling om te komen tot onderling afgestemde productontwikkelingen voor glijvlakberekeningen, met gedeelde software-componenten. Daarom worden ook de belangen, prioriteiten en eisen in kaart gebracht van alle stakeholders die worden verwacht actief bij te dragen aan het te bereiken eindresultaat.
- In relatie met bovenstaande moet de verkenning ook de opties nagaan voor het opnemen van ontwerpsoftware voor macrostabiliteit in het door DGRW en RWS-WVL ondersteunde instrumentarium. Ondersteuning door DGRW en RWS-WVL houdt in dat

de ontwerpsoftware onder gelijke (rand)voorwaarden wordt ontwikkeld, beheerd en beschikbaar gesteld als de huidige WBI software.

- Het gebruik van 'ongedraineerde sterkte' binnen beoordeling en ontwerp moet op een meer gebruikersvriendelijke en eenduidige wijze worden ondersteund dan nu het geval is, in combinatie met zowel een semi-probabilistische als met een probabilistische analyse. Dat betreft zowel ondersteuning voor de binnen de gedetailleerde WBI beoordeling voorgeschreven methode als voor de 'Dijken op Veen' methode.
- Een complete en formele detaillering van functionaliteit en ontwerp vormt geen onderdeel van de verkenning. Deze nadere detaillering moet gebeuren tijdens een of meer definitiefases, binnen een samenhangend uitvoeringsprogramma. Tijdens deze nadere detaillering moet het complete programma van eisen worden vastgesteld en vervolgens vertaald naar functionele en technische ontwerpen. Tijdens de voorliggende verkenning hebben al wel enige eerste en voorlopige functionele specificaties plaatsgevonden. Deze zijn ter kennisgeving opgenomen in bijlage A.

## 2 Overzicht van de huidige software

### 2.1 Inleiding

Figuur 2.1 geeft een overzicht van de toepassingsgebieden van de softwaregereedschappen die anno 2017 beschikbaar zijn voor glijvlakberekeningen. Drie van deze gereedschappen ondersteunen stabiliteitsanalyses op doorsnedeniveau. Drie andere gereedschappen voeren stabiliteitsanalyses uit op trajectniveau, of zullen dat volgens de WBI planning vanaf 2019 gaan doen. Het toepassingsgebied van de softwaregereedschappen is deels verschillend. De op glijvlakmodellen gebaseerde gereedschappen maken gebruik van dezelfde rekentechnieken en rekenmodellen, op basis van dezelfde invoer en uitvoer. Daarvoor gebruiken ze echter softwarecomponenten die deels verschillen.

	Deltares			WBI/Deltares		STOWA/Deltares	
	D-Geo Stability	Project-software	Plaxis	BM-Macrostablieit + D-Soil Model	Riskeer	DAM	FEWS-DAM
Doorsnede	✓	✓	✓	✓			
Traject					✓	✓	✓
Toetsen Primair laag 2, semipr.	✓	✓		✓	Nov 2017		
Toetsen Primair laag 2, prob.	✓	icm toolkit		Nov 2017?	(2019)		
Toetsen Primair laag 3 (op maat)	✓	✓	✓				
Ontwerpen Primair, semiprob	✓	✓	✓				
Ontwerpen Primair, prob.	✓	icm toolkit					
Toetsen & Ontwerpen Regionaal	✓		✓			✓	
Ontwerpen (Spoor)Wegen	✓		✓				
Leggerproductie & beleid (benodigd profiel)						✓	
Calamiteiten							✓
R&D	✓		✓			✓	✓

*Figuur 2.1 Overzicht van de in Nederland beschikbare gereedschappen voor analyse van macrostablieit, anno 2017. In dit rapport wordt verder alleen ingegaan op de gereedschappen die gebruik maken van glijvlakberekeningen.*



## 2.2 WBI software

### Algemeen

BM-Macrostablieit en D-Soilmodel zijn softwareapplicaties die begin 2017 binnen WBI beschikbaar zijn gekomen. Ze maken een semi-probabilistische beoordeling mogelijk van primaire keringen op binnenwaartse macrostablieit, voor een enkele doorsnede. Daarnaast is binnen het WBI recent ook de RisKeer software beschikbaar gekomen (voorheen genoemd: Ringtoets). RisKeer ondersteunt de probabilistische bepaling van de hydraulische belastingen langs trajecten van primaire keringen en een semi-probabilistische en/of probabilistische beoordeling voor enkele faalmechanismen. Daarbij voert RisKeer dan een integratie uit van de faalkans over meerdere dijkvakken en mechanismen. De huidige versie van RisKeer ondersteunt nog geen beoordeling voor macrostablieit. Ondersteuning voor semi-probabilistische analyses is voorzien vanaf 2018. Vanaf 2019 is voorzien dat RisKeer de bepaling van hydraulische belasting ook kan combineren met een probabilistische beoordeling. In de eerste helft van 2017 worden de rekenhartcomponenten van BM-Macrostablieit verbeterd op grond van eerste gebruikerservaringen. Deze verbeteringen hebben betrekking op:

- Verhoging van de rekensnelheid.
- De schematisering van stijghoogtes bij een gegeven buitenwaterstand.
- Een meer gebruikersvriendelijke definitie voor ongedraineerde sterkte, door middel van invoer van een Pre Overburden Pressure (POP) onder dagelijkse omstandigheden.

Vanuit WBI wordt in 2017 verder ook meer ondersteuning verwacht voor de bepaling van de grensspanning uit sondeerweerstand.

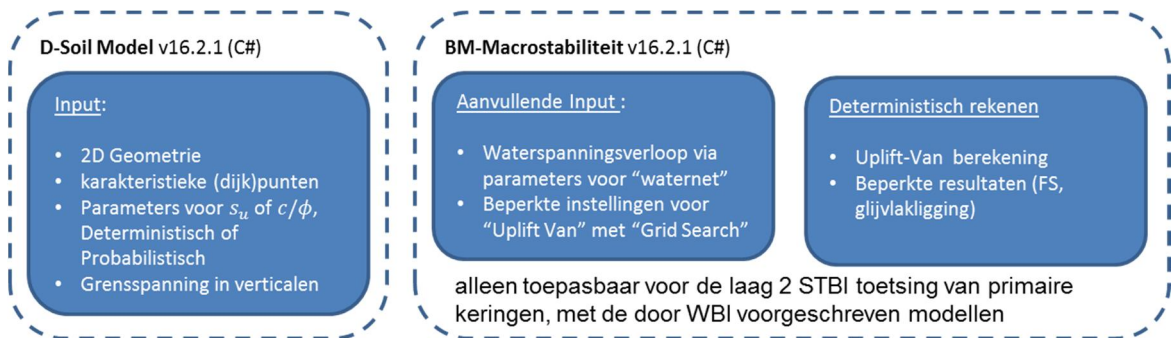
De rekencomponenten die BM-Macrostablieit gebruikt zullen in de periode tot 2019 ook worden aangesloten op RisKeer. De aansluiting op het probabilistische deel van het rekenhart is al in voortgang.

### Beschikbaarstelling en beheer

De WBI software wordt door Rijkswaterstaat zonder licentiekosten ter beschikking gesteld, met gebruikersondersteuning door de Helpdesk water. Ontwikkeling en onderhoud worden uitgevoerd door Deltares, in opdracht van Rijkswaterstaat.

### Functionaliteit

Schematisering van de geometrie en van grondeigenschappen vindt plaats in de afzonderlijke software D-Soilmodel. D-Soilmodel slaat deze schematiseringen op in een database, voor meerdere doorsneden/vakken. D-Soilmodel slaat ook sonderingen en boringen op. Deze kunnen worden gebruikt voor de ondergrondschematisering, samen met een al bij D-Soilmodel meegeleverd 'stochastisch ondergrondmodel'. Het uit de database importeren van een enkele doorsnedeschematisering en het vervolgens berekenen van de stijghoogtes en het uitvoeren van de semi-probabilistische berekening vindt plaats in BM-Macrostablieit. BM-Macrostablieit ondersteunt alleen de toepassing van het binnen WBI voorgeschreven glijvlakmodel (Uplift-Van), voor een beoordeling van binnenwaartse stablieit (STBI). Het stijghoogteveld wordt deterministisch bepaald als functie van de buitenwaterstand en het polderpeil. De mogelijkheid tot beïnvloeding van het stijghoogteverloop door de gebruiker is beperkt. Binnen het WBI project wordt overwogen om de basismodule in 2017 uit te breiden met mogelijkheden voor probabilistische analyse. In deze verkenning wordt verder aangenomen dat deze uitbreiding ook zal gaan plaatsvinden.



Figuur 2.2 Overzicht van de functionaliteit van de WBI software voor glijvlakberekeningen op doorsnedeniveau, per januari 2017.

Verdere details omtrent de functionaliteit zijn te vinden in Bijlage A.

### Programmeer-technische aspecten

De user-interfaces van alle WBI software en de rekenhartcomponenten voor macrostabiteit zijn opgezet in de programmeertaal C# (spreek uit: *C Sharp*). Deze taal wordt onder programmeurs momenteel het meest gebruikt. Een strikte scheiding tussen rekencomponenten en user-interface vormt onderdeel van de verbeteringen die in de eerste helft van 2017 worden doorgevoerd. Het probabilistische rekenhart van RisKeer is opgezet in de programmeertaal FORTRAN. Deze afwijkende keuze is gemaakt in 2011, vanwege de specifieke kwaliteiten die FORTRAN heeft voor rekenintensieve toepassingen. De C# user-interfaces van BM-Macrostabiteit en D-Soilmodel zijn gebaseerd op de componentenbibliotheek DeltaShell Light. Deze bibliotheek blijkt echter niet voldoende schaalbaar voor applicaties zoals RisKeer en D-Soilmodel, die efficiënt een grote hoeveelheid data moeten kunnen benaderen en presenteren. Daarom maakt RisKeer vanaf 2015 gebruik van een nieuwe bibliotheek die beter schaalbaar is. Binnen het WBI project wil men zo spoedig mogelijk alle WBI applicaties op deze nieuwe bibliotheek overzetten, inclusief BM-Macrostabiteit en D-Soilmodel.

## 2.3 D-Geo Stability

### Algemeen

D-Geo Stability (voorheen MStab) is in Nederland al sinds 1988 het standaard gereedschap voor glijvlakberekeningen. Toepassing vindt plaats voor diverse typen grondlichamen (primaire waterkeringen, regionale waterkeringen, wegen en spoorwegen). Alle schematiseringsinvoer voor een enkele doorsnede vindt plaats in D-Geo Stability zelf.

### Beschikbaarstelling en beheer

Deltares brengt licentiekosten in rekening, waaruit de kosten voor beschikbaarstelling en het beheer worden gefinancierd.

### Functionaliteit

In vergelijking tot BM-Macrostabiteit biedt D-Geo Stability veel extra functionaliteit:

- De mogelijkheid voor een vrije invoer van het stijghoogteverloop. Deze vrije invoer is niet gekoppeld aan een op te geven buitenwaterstand, zoals in BM-Macrostabiteit.
- Diverse typen gewichtsbelasting, waaronder verkeersbelasting.
- Aardbevingsbelasting.
- Gedeeltelijke consolidatie door ophoging.
- Vernageling.

- Geotextielen.
- Diverse glijvlakmodellen, waaronder naast Uplift-Van ook de methoden Bishop, Spencer en 'Horizontaal Evenwicht'.
- De verschillende glijvlakmodellen kunnen worden gecombineerd met verschillende zoekmethoden voor bepaling van de ligging van het maatgevende glijvlak.
- Definitie van de toelaatbare glijvlakligging bij de zoekprocedure, teneinde ondiepe glijvlakken te voorkomen of om rekening te houden met een damwand.
- D-Geo Stability ondersteunt naast een deterministische berekening ook twee soorten probabilistische berekeningen ('random average' en 'random field'). Binnen de probabilistische berekening kan D-Geo Stability optioneel een integratie uitvoeren over de faalkans bij verschillende buitenwaterstanden. In dat geval moet het stijghoogteverloop voor elk van deze buitenwaterstanden afzonderlijk worden opgegeven.
- Ondersteuning voor ongedraineerde sterkte op basis van ingevoerde grensspanningen en voor directe invoer van ongedraineerde sterkte. De implementatie op basis van grensspanningen is echter verschillend van die in BM-Macrostablieit. Bovendien is de ongedraineerde sterkte op basis van grensspanningen niet met probabilistisch rekenen te combineren. Bij directe invoer van ongedraineerde sterkte kan niet eenvoudig een horizontaal verloop worden opgegeven. Dit maakt de invoer in praktijk zeer bewerkelijk. Daarom is voor het versterkingsproject Markermeerdijken begin 2017 nog een speciale versie 16.3 van D-Geo Stability gemaakt. In die versie is invoer van een verticaal over de laag verlopende POP (*Pre Overburden Pressure*) waarde mogelijk gemaakt: een methode die in de loop van 2017 ook in BM-Macrostablieit mogelijk wordt gemaakt.
- Voor de analyse van ophoogeffecten kan D-Geo Stability ook gebruik maken van invoer die voorafgaand door de D-Settlement software is gegenereerd voor verschillende tijdstippen na ophoging. Deze invoer bevat de gezette geometrie en de op dat tijdstip aanwezige consolidatiegraden in de verschillende grondlagen.
- D-Geo Stability kan automatisch grondeigenschappen halen uit databases die kunnen worden gevuld en beheerd met de MSoilbase applicatie.



Figuur 2.3 Overzicht van de functionaliteit van D-Geo Stability voor glijvlakberekeningen op doorsnedeniveau. De extra functionaliteit ten opzichte van BM-Macrostablieit is roze gekleurd. De Delphi versie van D-Geo Stability zal niet verder worden doorontwikkeld.

Verdere details omtrent de functionaliteit zijn te vinden in Bijlage A.

### Programmeertechnische aspecten

D-Geo Stability is opgezet in de programmeertaal Delphi2007. Delphi was in het verleden vaak de eerste keuze. Deltares wil al enige jaren overstappen op C#. Dit vanwege het betere toekomstperspectief en ook om componenten te kunnen gaan delen met de WBI software. Daarom zal de Delphi versie niet verder worden doorontwikkeld. Rekenhart en 'user-interface' zijn in de Delphi versie verweven. D-Geo Stability wordt als geheel aangeroepen vanuit de DAM software (zie § 2.5) en ook vanuit de damwandensoftware D-Sheetpiling.

## **2.4 Projectsoftware voor *Actuele Sterkte***

### Algemeen

Deltares heeft medio 2016 een eerste versie van projectsoftware beschikbaar gemaakt voor het *Actuele Sterkte* onderzoek. Voor de probabilistische berekeningen wordt deze projectsoftware gecombineerd met een afzonderlijke Probabilistische Toolkit. Met de eerste projectversie zijn voor het KIJK project in 2016 analyses uitgevoerd op 3 doorsneden, in opdracht van de POVJM (Deltares, 2016e). Zoals al gemeld in § 1.2 is het doel van RWS-WVL om de *Actuele Sterkte* aanpak zo snel mogelijk verder te operationaliseren. Daarom is de software in 2017 uitgebreid en verbeterd, in opdracht van RWS-WVL. De uitbreidingen en verbeteringen zijn gebaseerd op de ervaringen en wensen die ontstonden tijdens het eerste gebruik. Met de tweede versie van de projectsoftware zijn van maart tot en met mei 2017 succesvolle nieuwe probabilistische stabiliteitsanalyses uitgevoerd voor het volledige KIJK traject.

### Beschikbaarstelling en beheer

De projectsoftware heeft per definitie een tijdelijk karakter. De projectsoftware is niet meer nodig zodra er nieuwe producten beschikbaar zijn gekomen met voldoende functionaliteit voor probabilistisch rekenen en voor ontwerpen. Tot nu toe hebben ruim 16 geotechnisch adviseurs van verschillende partijen de software op projectbasis gebruikt op werklocaties bij Deltares, met ondersteuning vanuit Deltares. Zo kon direct hulp worden geboden bij eventuele vragen en problemen. Voor toekomstig gebruik kan Deltares de software op projectbasis ook beschikbaar maken via een server. Op die manier kan nog steeds snel hulp worden geboden, maar ontstaat de aanvullende mogelijkheid voor gebruik vanaf willekeurige werklocaties.

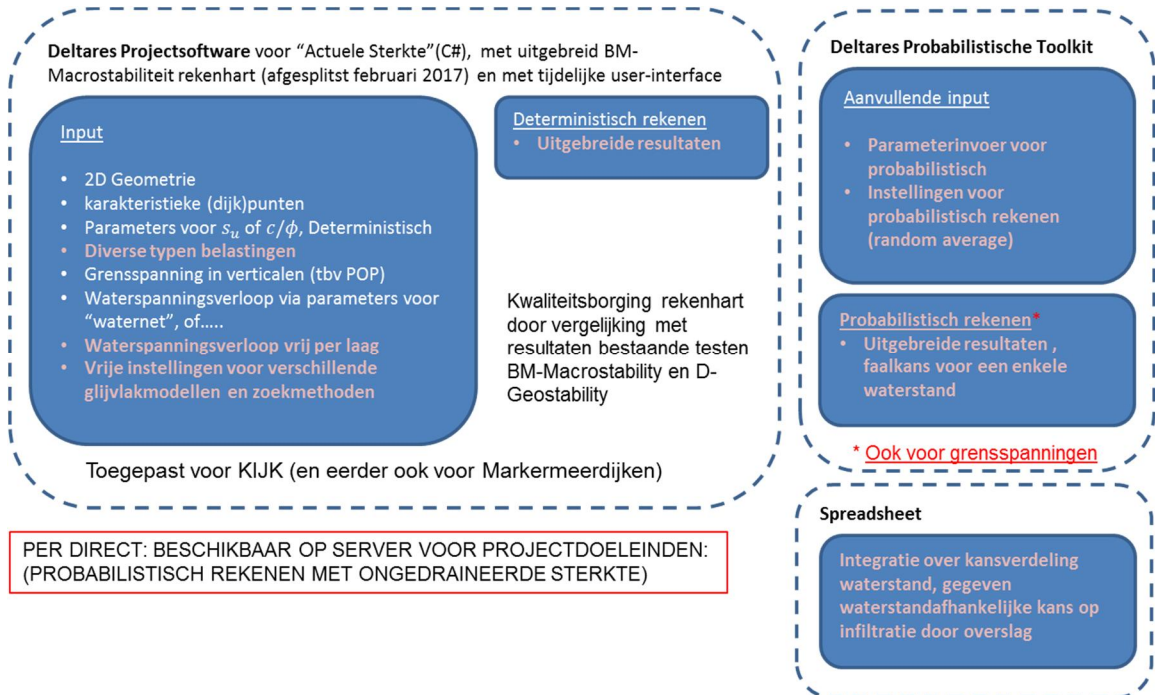
### Functionaliteit

Ten opzichte van BM-Macro stabiliteit heeft de projectversie extra functionaliteit en staat de user-interface ook rechtstreekse invoer toe van geometrie en van de (deterministische) grondeigenschappen. De rechtstreekse invoer van geometrie is vooral handig tijdens het (iteratieve) ontwerp stadium. Tot de extra functionaliteit behoort in het bijzonder:

- rechtstreekse invoer van geometrie en grondeigenschappen
- analyse van buitenwaartse stabiliteit,
- een meer vrije definitie van stijghoogteverlopen,
- verkeersbelasting,
- probabilistisch rekenen met ongedraineerde sterkte op basis van grensspanningen (WBI methode).

De Probabilistische Toolkit bepaalt door herhaalde aanroep van de projectsoftware iteratief de faalkansen voor afzonderlijke waterstanden. De integratie van de faalkansen over meerdere mogelijke waterstanden moet daarna nog plaats vinden met hulp van een spreadsheet. Bij deze integratie wordt rekening gehouden met de waterstandafhankelijke kans op volledige infiltratie door overslag en eventueel ook met de kans op hydraulische kortsluiting. De toolkit

ondersteunt overigens naast stap 2 uit de *Actuele Sterkte* aanpak (faalkansbepaling) ook stap 3 (faalkansupdate).



Figuur 2.4 Overzicht van de functionaliteit van de combinatie van de projectsoftware en de "Probabilistische Toolkit" voor glijvlakberekeningen op doorsnedeniveau. De extra functionaliteit ten opzichte van BM-Macrostablieit is roze gekleurd.

Verdere details omtrent de functionaliteit zijn te vinden in Bijlage A.

### Programmeertechnische aspecten

Zowel de user-interface als de rekencomponenten zijn opgezet in de programmeertaal C#. De rekencomponenten komen grotendeels overeen met de rekencomponenten in BM-Macrostablieit. Versie 2 van de projectsoftware maakt gebruik van een in februari 2017 afgesplitst rekenhart van BM-Macrostablieit. Na afsplitsing is daarin alleen nog een beperkte functionele uitbreiding gedaan voor spanningsverspreiding bij verkeerbelasting en voor de stijghoogtebepaling als functie van de buitenwaterstand. De Probabilistische Toolkit maakt gebruik van een C# versie van de probabilistische bibliotheek. Deze bibliotheek komt qua functionaliteit overeen met de FORTRAN versie die wordt gebruikt door het probabilistische rekenhart van RisKeer. De C# user-interface van de projectsoftware is gebaseerd op de componentenbibliotheek DeltaShell Light.

## 2.5 STOWA-DAM software

### Algemeen

DAM is ontstaan vanuit projecten die door Deltares sinds 2008 zijn uitgevoerd voor waterschappen. In opdracht van STOWA heeft vervolgens een operationaliseringslag plaatsgevonden. De daaruit resulterende versie 1.0 is begin 2013 opgeleverd.



### Beschikbaarstelling en beheer

De DAM software is beschikbaar voor (de opdrachtnemers van) de 5 waterschappen die bijdragen aan de kosten van ontwikkeling en onderhoud. Ontwikkeling en onderhoud worden uitgevoerd door Deltares, in opdracht van STOWA.

### Functionaliteit

DAM ondersteunt een geautomatiseerde analyse voor piping en macro-stabiliteit, voor meerdere dijkdoorsneden. DAM vult RisKeer aan voor wat betreft de toetsing van regionale keringen, beleidsstudies, leggerproductie en calamiteiten (dat laatste in combinatie met Delft-FEWS). Voor analyse van macro-stabiliteit roept DAM momenteel D-GeoStability aan. Veel van de D-GeoStability mogelijkheden en modellen zijn via DAM aan te sturen. DAM stelt automatisch schematiseringen samen uit de door het waterschap beheerde kerndata en kan ook automatisch het voor macrostabiliteit benodigde profiel uitrekenen (ontwerpfunctie). DAM haalt de ondergrondgegevens uit een database, die kan worden benaderd en gevuld met MSoilbase. MSoilbase is in feite de voorloper van D-Soilmodel. DAM biedt ten slotte verschillende opties om het stijghoogteverloop te bepalen als functie van de buitenwaterstand.

### Programmeertechnische aspecten

DAM is opgezet in de programmeertaal C#. DAM maakt gebruik van de bibliotheek DeltaShell Light. In de loop van 2017 vindt een herstructurering plaats. Daarin wordt de userinterface van het rekenhart gescheiden en wordt het koppelen van nieuwe rekencomponenten aan het rekenhart vereenvoudigd.

## 3 Integratieplan

### 3.1 Inleiding

Het in dit hoofdstuk voorgestelde integratieplan is bedoeld als “blauwdruk” voor zowel inhoud als proces. Deze blauwdruk heeft een globaal en indicatief karakter. Nadere detaillering van de inhoud (programma van eisen, ontwerp) dient plaats te vinden binnen de reguliere definitiefasen. Nadere detaillering van de projectplanning dient eveneens plaats te vinden als onderdeel van de uitvoering van de hierna voorgestelde deelprojecten.

### 3.2 Doelen

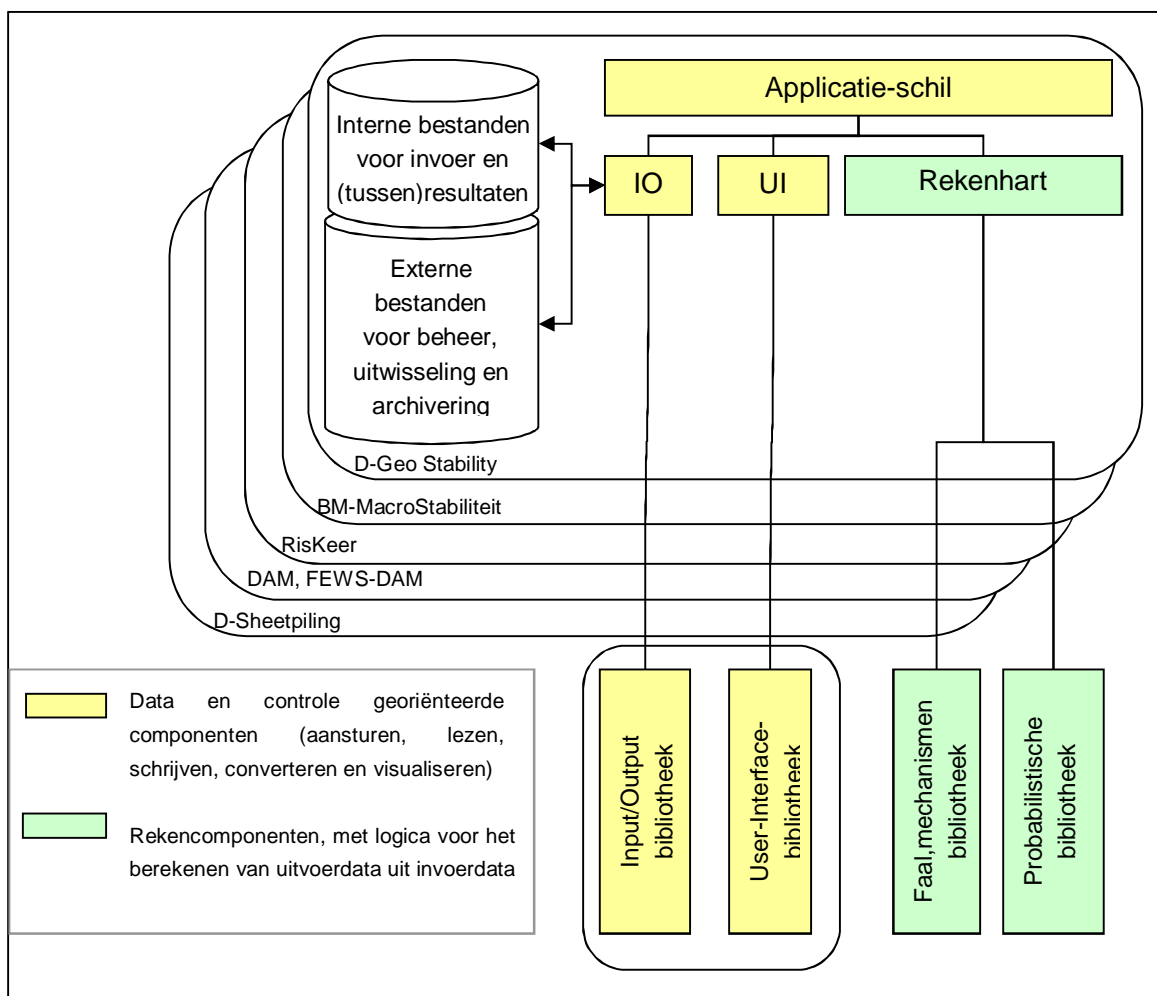
De te bereiken doelen zijn:

- Geïntegreerd en compleet softwaregereedschap (§ 3.2.1).
- Flexibele ondersteuning voor probabilistische stabiliteitsanalyses (§ 3.2.2).
- Gebruikersvriendelijke ondersteuning voor ongedraineerde sterkte (§ 3.3).

#### 3.2.1 Geïntegreerd en compleet softwaregereedschap

Einddoel is volledig geïntegreerd softwaregereedschap voor glijvlakberekeningen (zowel op doorsnedeniveau als op trajectniveau), met een complete en praktisch bruikbare functionaliteit. Geïntegreerd wil zeggen dat deze gereedschappen waar mogelijk rekencomponenten delen en idealiter ook user-interfacecomponenten, zie Figuur 3.1. Compleet wil zeggen dat de functionaliteit alle beoogde toepassingen moet dekken en dat deze functionaliteit in lijn moet zijn met de eisen en wensen van alle stakeholders die aan de ontwikkeling bijdragen. Praktisch bruikbaar wil ten slotte zeggen dat de software moet aansluiten op het werkproces van de eindgebruiker. De prioriteit ligt in eerste instantie op het delen van rekencomponenten, omdat uniformiteit in rekenresultaten als eerste moet worden geborgd.

De daarbij tevens te bereiken doelen voor probabilistisch rekenen en voor ongedraineerde sterkte worden behandeld in de volgende twee paragrafen.



Figuur 3.1 De uiteindelijk te integreren applicaties, met tussen de applicaties te delen componenten voor berekeningen, invoer, uitvoer en user-interface. Het delen van rekencomponenten heeft de hoogste prioriteit

### 3.2.2 Flexibele ondersteuning voor probabilistische stabiliteitsanalyses

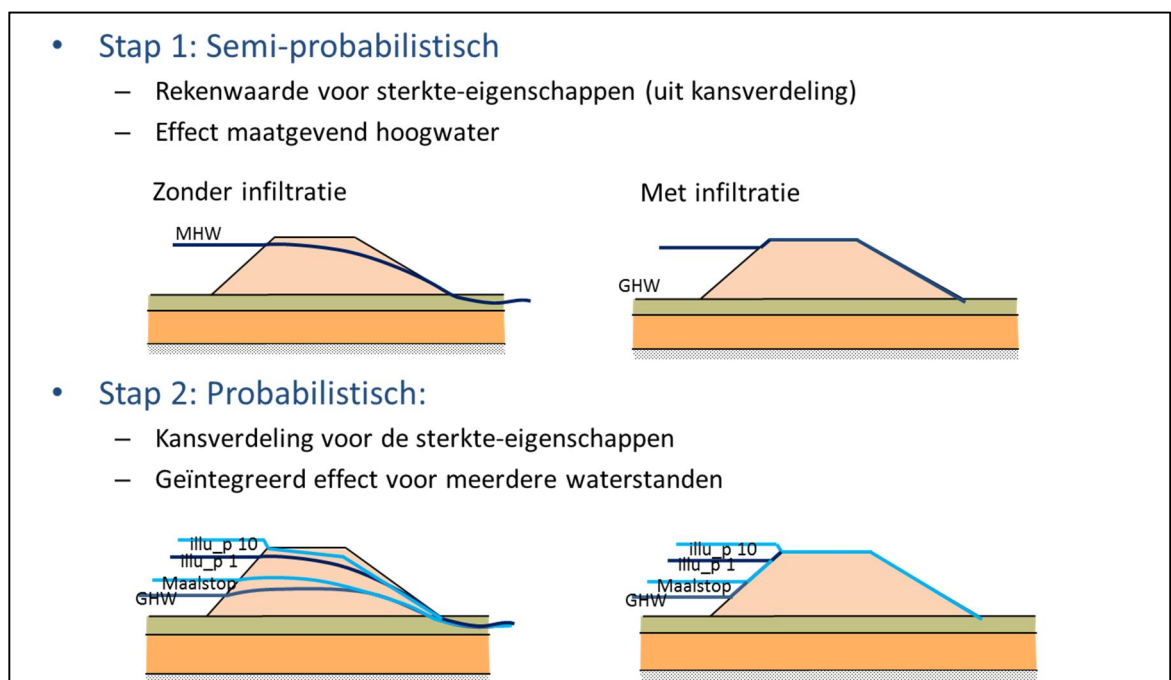
De positieve ervaringen met probabilistische stabiliteitsanalyses binnen het VNK project en binnen het *Actuele Sterkte* onderzoek zijn gebaseerd op een werkwijze met handmatige schematiseringen van het stijghoogteverloop voor verschillende buitenwaterstanden, voor verschillende infiltratiescenario's en eventueel ook scenario's voor het optreden van hydraulische kortsluiting. Per mogelijke waterstand en glijvlakligging zijn afzonderlijke probabilistische berekeningen uitgevoerd, die daarna werden geïntegreerd. Zie Tekstblok 3.1 voor een beschrijving van de werkwijze en zie Figuur 3.2 voor een illustratie.



Tekstblok 3.1 "Handmatige" werkwijze Actuele Sterkte en Veiligheid Nederland in Kaart

Voor *Veiligheid Nederland in Kaart* (VNK) en voor *Actuele Sterkte* zijn met succes probabilistische stabiliteitsanalyses uitgevoerd. De daarbij gehanteerde werkwijze is als volgt.

- In beide gevallen wordt gestart met de bepaling van het stijghoogteverloop in elke afzonderlijke doorsnede, voor verschillende mogelijke waterstanden. Deze bepaling is vaak gebaseerd op ervaring en expertkennis. De bepaling houdt waar mogelijk rekening met lokale stijghoogtemetingen. In het geval van *Actuele Sterkte* worden daarbij zowel het scenario zonder volledige infiltratie als met volledige infiltratie beschouwd.
- Deze stijghoogteschematiseringen worden gebruikt voor afzonderlijke probabilistische berekeningen per buitenwaterstand en per doorsnede. Om het rekenresultaat te beoordelen is per afzonderlijke probabilistische berekening inzicht nodig in wat er precies gebeurt en waarom. Uit deze probabilistische berekeningen resulteert per waterstand (en per infiltratiescenario) een ander "ontwerppunt". Dat is de meest waarschijnlijke combinatie van onzekere parameters waarbij falen optreedt. Hierbij wordt ook de kansbijdrage van verschillende mogelijke glijvlakliggingen beschouwd.
- Binnen de *Actuele Sterkte* aanpak wordt uit de ontwerppunten een *fragility curve* samengesteld, voor het geval zonder infiltratie en voor het geval met infiltratie. Deze *fragility curve* geeft de faalkans als functie van de buitenwaterstand. De totale faalkans voor een doorsnede wordt bepaald door integratie over beide *fragility curves*. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de afzonderlijk te bepalen kans op een kritiek overslagdebiet als functie van de waterstand. Een kritiek debiet is de waarde waarboven volledige verzadiging door infiltratie wordt aangenomen.
- Binnen de VNK aanpak worden de ontwerppunten gebruikt als invoer voor de PC-Ring software. De functionaliteit van PC-Ring is vergelijkbaar met de functie van RisKeer. PC-Ring voert met hulp van de ontwerppunten een integratie uit over de kansverdelingen van de waterstand en van de gesommeerde sterkteparameters, gevolgd door een integratie over meerdere doorsneden en faalmechanismen.



Figuur 3.2 Illustratie van de verschillende handmatige schematiseringen van stijghoogteverlopen, zoals die voor *Actuele Sterkte* worden gebruikt in een probabilistische analyse op doorsnedeniveau.

Het eerste doel is om voor de voorgenoemde “handmatige” aanpak voldoende ondersteuning te blijven bieden. Zeker voor gevallen waarin een “toets op maat” nodig is, of een vergelijkbare (her)beoordeling binnen het ontwerpproces.

Tweede doel is om, in de aanloop naar 2019, de RisKeer software en het onderliggende rekenhart zo snel mogelijk in te zetten voor evaluatie van de volgende twee aspecten.

- Binnen het VNK project is voor de integratie over de dwarsdoorsneden gebruik gemaakt van een benaderende kansverdeling over de gesommeerde sterkteparameters van de grondlagen die het glijvlak doorsnijdt (zie Tekstblok 3.1). De grondsoorten die het glijvlak doorsnijdt zullen per doorsnede echter kunnen verschillen. De kansverdeling van de gesommeerde sterkteparameter verschilt dus ook per doorsnede. Tijdens de evaluatieperiode wordt onderzocht in hoeverre de benadering door sommatie aanvaardbaar is, of dat deze kan worden vermeden.
- Met automatisering van het stijghoogteverloop is nog geen ervaring opgebouwd in probabilistische context. Voordeel van automatisering is dat het uniformiteit afdwingt. Voordeel is ook dat er een directe koppeling kan worden gelegd met de “kerndata” die de waterkeringbeheerder beheert. Deze voordelen zijn vooral belangrijk voor de gedetailleerde WBI toets (laag 2). Inzicht in het resultaat van de tussenstappen zal echter nodig blijven om de betrouwbaarheid van het eindresultaat te kunnen beoordelen. Het moet bovendien nog blijken of een dergelijke automatisering in praktijk voldoende robuust en conservatief is en of daarin goed rekening kan worden gehouden met de scenario's in geval van infiltratie en/of hydraulische kortsluiting. Wanneer automatisering niet (altijd) mogelijk blijkt kan per doorsnede invoer wordt gegenereerd voor RisKeer. Die invoer is het resultaat van afzonderlijke probabilistische berekeningen per mogelijke waterstand en glijvlakligging. Deze afzonderlijke berekeningen zijn dan uit te voeren met BM-Macrostabieliteit en/of D-Geo Stability.

### 3.2.3 Gebruikersvriendelijke ondersteuning voor ongedraineerde sterkte

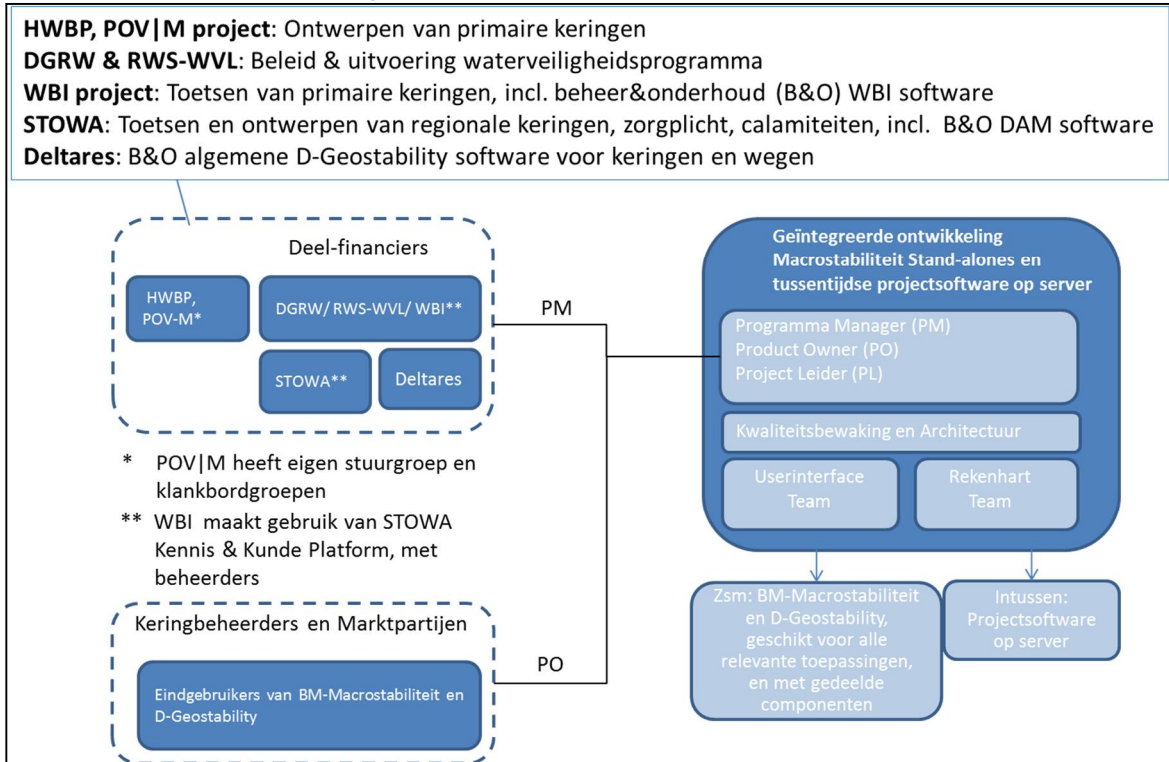
De ondersteuning voor ongedraineerde sterkte in software en schematiseringshandleiding is nog (te) beperkt. Dat blijkt uit Tekstblok 3.2. Het doel is om bovengenoemde bezwaren op te heffen door betere ondersteuning in de software en in de WBI schematiseringshandleiding. Welke ondersteuning het best aansluit op het werkproces zal moeten worden vastgesteld door representatieve eindgebruikers te consulteren.

#### *Tekstblok 3.2 Beperkingen in de huidige ondersteuning voor ongedraineerde sterkte*

Volgens het WBI voorschrift moet een beoordelaar zelf uit sondeerweerstand een representatief verloop van de ongedraineerd sterkte bepalen. Daaruit moet hij vervolgens weer een verloop afleiden van “grensspanningen” of van daaraan gerelateerde POP waarden. Hij moet daarbij zelf aannames doen voor het verloop van veldspanning en waterspanning langs de sondering, zonder gebruik te kunnen maken van de verlopen die door BM-Macrostabieliteit en D-Geo Stability worden berekend. De bestaande software geeft onvoldoende mogelijkheden om te rekenen met een veld dat verloopt in horizontale en verticale richting. Er wordt verder nog geen handreiking gegeven voor het kiezen van een representatief verloop van sondeerweerstand, gegeven de veelheid aan beschikbare sonderingen binnen een vak. Resultaten uit het *Actuele Sterkte* onderzoek leiden ten slotte tot vragen over het modelleren van het deel van het kleiig dijksmateriaal dat alleen nat is gedurende een tijdelijke waterstandsverhoging.

### 3.3 Overkoepelend ontwikkelprogramma

Figuur 3.3 toont het organisatieschema voor het in deze verkenning voorgestelde overkoepelende ontwikkelprogramma.



Figuur 3.3 Voorgesteld organisatieschema voor integrale sturing, ontwikkeling en gebruikersconsultatie.

- Binnen het overkoepelende programma wordt uitgegaan van gecoördineerde deelprojecten, die leiden tot samenhangende deelproducten. Die deelproducten zijn gekoppeld aan verschillende stakeholders. Elke stakeholder heeft een specifiek belang bij het deelproduct waaraan hij bijdraagt. Door de samenhang worden de in totaal benodigde resultaten voor elk van de stakeholders sneller en goedkoper bereikt dan bij gescheiden ontwikkelsporen. Zie verder § 3.4.
- Het Deltares projectteam realiseert alle deelproducten, in samenspraak met stakeholders en eindgebruikers.
  - De “programma manager” (PM) communiceert met de gedelegeerde vertegenwoordigers van de stakeholders. Het is zijn taak om de benodigde samenhang te creëren en te bewaken. Zijn taak is ook om de voortgang en de benodigde (bij)sturing af te stemmen met de gedelegeerde vertegenwoordigers van de stakeholders.
  - De projectleider (PL) bewaakt de voortgang van de verschillende deelprojecten in termen van tijd, geld en kwaliteit. Hij rapporteert daarover aan de PM.
  - De “Product Owner” (PO) fungeert als gedelegeerd eindgebruiker. Hij zorgt voor de inhoudelijke aansturing van het ontwikkelteam, ter realisatie van de benodigde functionaliteit met de vereiste praktische bruikbaarheid. Daarvoor interacteert hij een representatieve gebruikersgroep vanuit keringbeheerders en marktpartijen.
- In de groep van keringbeheerders en marktpartijen zijn vooral eindgebruikers vertegenwoordigd. Dat zijn zowel de gebruikers van D-GeoStability als van BM-Macrostablieit. Binnen de gebruikersgroep zal naar verwachting vooral aandacht



uitgaan naar de methodiek en ondersteuning voor de bepaling van ongedraineerde sterkte uit sondeerweerstand en naar de ondersteuning voor probabilistische analyse. Daarnaast zal de groep ook richting geven aan de gebruikerseisen voor stabiliteitsanalyse van grondlichamen, waaronder naast primaire keringen ook regionale keringen en (spoor)wegen.

### 3.4 Deelproducten

#### 3.4.1 Overzicht

Tabel 3.1 geeft een overzicht van de stakeholders en de daaraan gekoppelde deelproducten. De kleurcodering correspondeert met de kleurcodering die ook wordt gebruikt in § 3.5. De voor deze verkenning relevante deelproducten worden in de volgende paragrafen toegelicht. In tekstkaders worden daarbij de belangrijke beslismomenten voor verschillende stakeholders aangeduid.

Tabel 3.1 Overzicht van de samenhangende deelproducten en de daarbij horende stakeholder

Stakeholder	Samenhangende deelproducten
HWBP en daarbinnen het POV M project. Binnen dit project ligt de focus op het probabilistisch (her)beoordelen en vervolgens ontwerpen van primaire keringen op macrostabiliteit	<p>1 Compleet rekenhart, voortbouwend op de basis van het beperkte rekenhart van BM-Macrostabiliteit</p> <p>2 Koppeling van dit complete rekenhart aan de user-interface van de al bestaande projectsoftware. Daarmee zijn alle benodigde ontwerpmogelijkheden zo snel mogelijk beschikbaar in combinatie met semi-probabilistische en probabilistische analyse, in afwachting van een nieuwe D-GeoStability versie (deelproduct 5.)</p>
DGRW en RWS-WVL, met een brede focus op het beoordelen (WBI) en ontwerpen van waterkeringen, inclusief het beschikbaar stellen van het daarvoor benodigde instrumentarium.	<p>3 Uitbreiding van BM-Macrostabiliteit geschikt voor gedetailleerd beoordelen van primaire keringen in laag 2.</p> <p>(a) met de mogelijkheid voor probabilistische analyse op doorsnedeniveau.</p> <p>(b) met aansluiting op het nieuwe complete rekenhart (deelproduct 1).</p> <p>4 Uitbreiding van RisKeer met aansluiting op het nieuwe complete rekenhart (deelproduct 1). Door het delen van het rekenhart wordt zeker gesteld dat RisKeer en BM-Macrostabiliteit dezelfde rekenresultaten leveren als de projectsoftware.</p>
Zowel DGRW/RWS-WVL als Deltares	<p>5 Een nieuwe C# versie van D-Geo Stability, aangesloten op het complete nieuwe rekenhart (deelproduct 1). Geschikt voor ontwerpen, beoordelen op maat van primaire keringen, wegen en regionale keringen. Deze nieuwe versie vervangt de projectsoftware. Het deelproduct communiceert met MSettle en met de Msoilbase database. Door het delen van het rekenhart wordt zeker gesteld dat D-Geo Stability dezelfde resultaten blijft leveren als de WBI software</p>
.Deltares, als beheerder en ontwikkelaar van D-GeoStability en aan D-GeoStability gekoppelde software	<p>6 Aansluiting van het nieuwe rekenhart op DSheetpiling</p>
De binnen STOWA verzamelde waterschappen, met een aanvullende focus op zorgplicht, beleid en regionale keringen.	<p>7 Aansluiting van DAM op het complete nieuwe rekenhart (deelproduct 1). Daarmee wordt ook zeker gesteld dat DAM dezelfde rekenresultaten blijft leveren als de WBI software.</p>

### 3.4.2 Deelproduct 1 en 2: Rekenhart en Projectsoftware

De projectsoftware is op dit moment al beschikbaar voor projectdoeleinden. Vooral voor HWBP projecten, ten behoeve van probabilistisch rekenen met ongedraineerde sterkte. De projectsoftware overbrugt de periode waarin de opvolger van D-GeoStability nog niet beschikbaar is. De projectsoftware krijgt per begin 2018 een update (deelproduct 2). Deze update maakt gebruik van het uiteindelijk tussen alle applicaties gedeelde rekenhart (deelproduct 1). De projectsoftware ontsluit de complete benodigde functionaliteit voor ontwerpdoeleinden. Dit is inclusief probabilistisch rekenen in combinatie met ongedraineerde sterkte. De invoer voor ongedraineerde sterkte zal maximaal aansluiten op wat nodig is voor praktijkgebruik. De software is daarnaast ook geschikt voor een “toets op maat” in laag 3 en impliciet ook voor het beoordelen en ontwerpen van regionale keringen en wegen. Beide deelproducten worden in dit voorstel gefinancierd vanuit de POV|M. De projectsoftware deelt het rekenhart al vanaf eind 2017 met de WBI software.

Begin juli 2017 wordt binnen de POV|M beslist over de opdracht tot uitbreiding van het WBI rekenhart en het volledig ontsluiten van dit rekenhart in de projectsoftware.

Figuur 3.4 geeft een overzicht van de te bereiken functionaliteit in de update van de projectsoftware, vanaf begin 2018. Details zijn te vinden in Bijlage A.



Figuur 3.4 Overzicht van de beoogde functionaliteit van de projectsoftware voor glijvlakberekeningen op doorsnedeniveau. De extra functionaliteit ten opzichte van de oude versie is roze gekleurd.

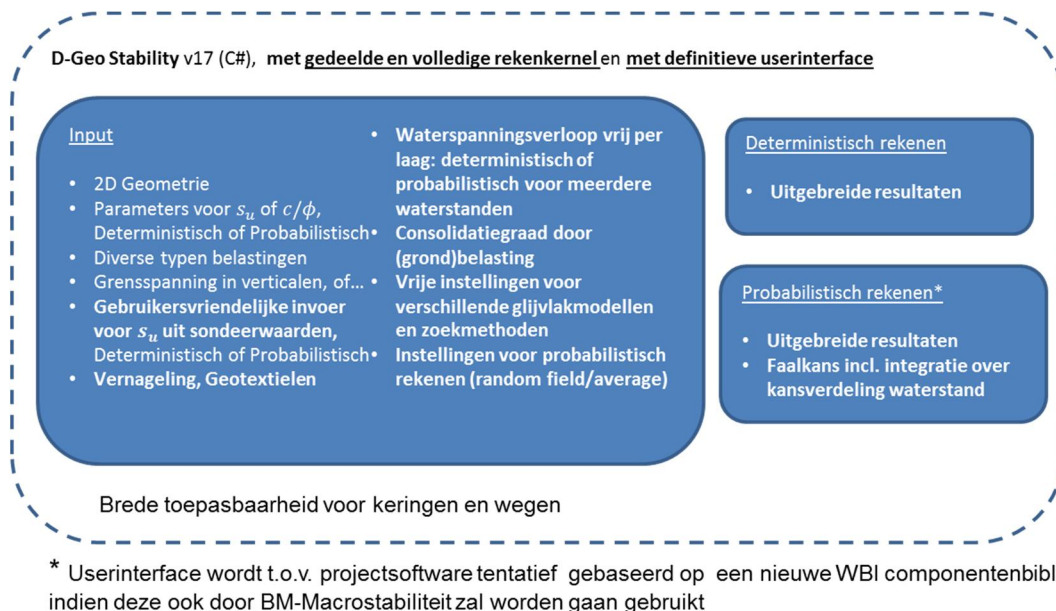
### 3.4.3 Deelproduct 5: D-Geo Stability

De oude D-Geo Stability versie (in de programmeertaal Delphi) blijft beschikbaar totdat er een opvolger beschikbaar is voor eindgebruik, maar wordt niet meer doorontwikkeld. De opvolger (in de programmeertaal C#) wordt tentatief in 2019 opgeleverd (deelproduct 5). De opvolger maakt gebruik van het uiteindelijk tussen alle applicaties gedeelde rekenhart (deelproduct 1). De opvolger ontsluit dezelfde complete functionaliteit als de projectsoftware en vervangt dus ook de projectsoftware. Het productrijp maken van de projectsoftware wordt in dit voorstel gefinancierd door Deltares (TKI subsidie). Het optioneel overgaan op een andere UI bibliotheek wordt in dit voorstel gefinancierd vanuit DGRW/RWS-WVL.

Medio augustus 2017 wordt duidelijk of vanuit Deltares een TKI subsidie kan worden aangesproken voor het omzetten van de projectsoftware naar een nieuwe productversie van D-Geo Stability, inclusief bijbehorende testbank en gebruikersdocumentatie.

Uiterlijk eind 2017, maar tentatief al in september 2017, wordt in overleg tussen DGRW/RWS-WVL en Deltares beslist over de toekomstige ondersteuning van D-Geo Stability als ontwerpinstrument. Indien D-Geo Stability onder het door het DGRW/RWS-WVL ondersteunde instrumentarium gaat vallen zal RWS-WVL in principe de verdere kosten voor beheer en beschikbaarstelling dragen. Daarvoor stelt RWS-WVL als randvoorwaarden dat geen licentiekosten worden geheven en dat D-Geo Stability dezelfde UI bibliotheek moet gaan gebruiken als RisKeer. In dit besluit moet de toch al benodigde omzetting van D-Soilmodel en BM-Macrostablieit naar deze UI bibliotheek worden meegenomen. Na omzetting kan D-Geo Stability al veel UI componenten met D-Soilmodel en BM-Macrostablieit delen en is er een relatief beperkte extra inspanning nodig voor de verder nog toe te voegen UI componenten.

Figuur 3.5 geeft een overzicht van de te bereiken functionaliteit in de nieuwe versie van D-Geo Stability, vanaf begin 2019. Details zijn te vinden in Bijlage A.



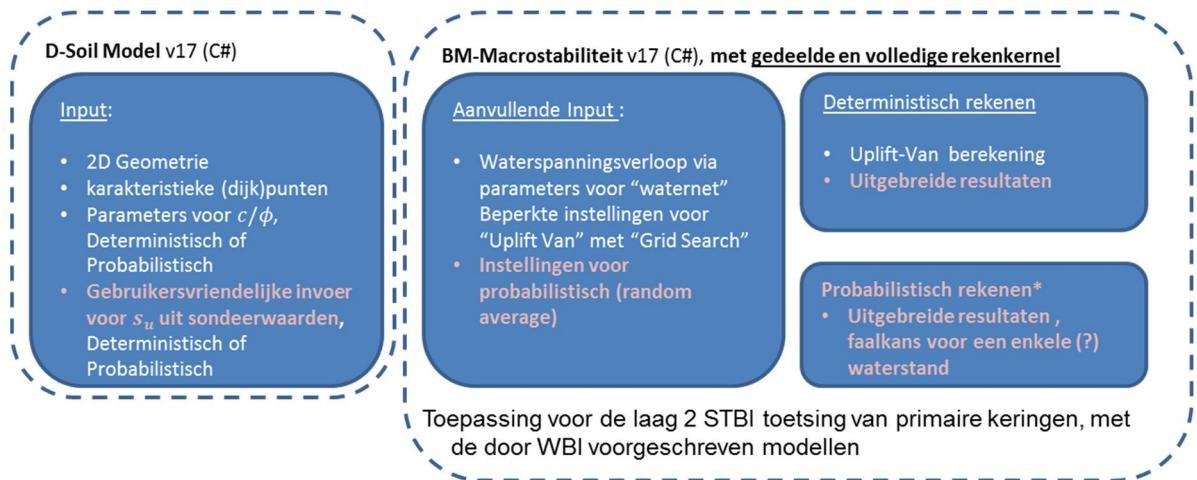
Figuur 3.5 Overzicht van de beoogde functionaliteit van de nieuwe D-Geo Stability versie voor glijvlakberekeningen op doorsnedeniveau..

### 3.4.4 Deelproduct 3: BM-Macrostablieit

De huidige versie van BM-Macrostablieit krijgt begin 2018 een update (deelproduct 3). Deze update maakt gebruik van het uiteindelijk tussen alle applicaties gedeelde rekenhart (deelproduct 1). Ten opzichte van D-Geo Stability zal BM-Macrostablieit, alleen de modellen ondersteunen voor de gedetailleerde WBI toets van primaire keringen (laag 2). BM-Macrostablieit is daarmee in feite een D-Geo Stability in "beoordelingsmodus". Ten opzichte van D-Geo Stability biedt D-Soilmodel vergelijkbare invoermogelijkheden voor geometrie en grondeigenschappen.

Begin juli 2017 wordt binnen het WBI project beslist of en hoe BM-Macro stabiliteit per eind 2018 ook probabilistische analyses op doorsnedeniveau zal ondersteunen (deelproduct 3a). Daarbij hoort ook de keuze voor een faalkansbepaling per waterstand of een faalkansberekening over de kansverdeling van de waterstand. Een berekening per doorsnede biedt een terugvaloptie indien na evaluatie blijkt dat een integratie over de doorsneden in RisKeer te veel beperkingen oplevert.

Figuur 3.6 geeft een overzicht van de te bereiken functionaliteit in de nieuwe versie van BM-Macro stabiliteit, vanaf begin 2018. Details zijn te vinden in Bijlage A.



Figuur 3.6 Overzicht van de beoogde functionaliteit van de BM-Macro stabiliteit voor glijvlakberekeningen op doorsnedeniveau. De extra functionaliteit ten opzichte van de oude versie is roze gekleurd.

### 3.4.5 Deelproduct 4: RisKeer

Vanaf begin 2018 maakt de interne evaluatieversie van RisKeer gebruik van het uiteindelijk tussen alle applicaties gedeelde rekenhart (deelproduct 1) en ondersteunt het probabilistische analyses op trajectniveau. De productversie is vanaf 2019 beschikbaar voor eindgebruik. Binnen een evaluatiefase (tot eind 2018) vindt onderzoek plaats naar de mogelijkheden voor voor een geautomatiseerde probabilistische stabiliteitsanalyse, met integratie van de faalkans over waterstanden, doorsneden en faalmechanismen.

Eind 2018 zal binnen het WBI project worden besloten welke probabilistische methode (of methoden) voor stabiliteitsberekeningen vanaf 2019 formeel worden ondersteund in de productversie. Een probabilistische berekening per doorsnede is de terugvaloptie, indien mocht blijken dat geautomatiseerde stijghoogtebepaling en/of integratie over de doorsneden niet (altijd) acceptabel is.

## 3.5 Fasering en milestones

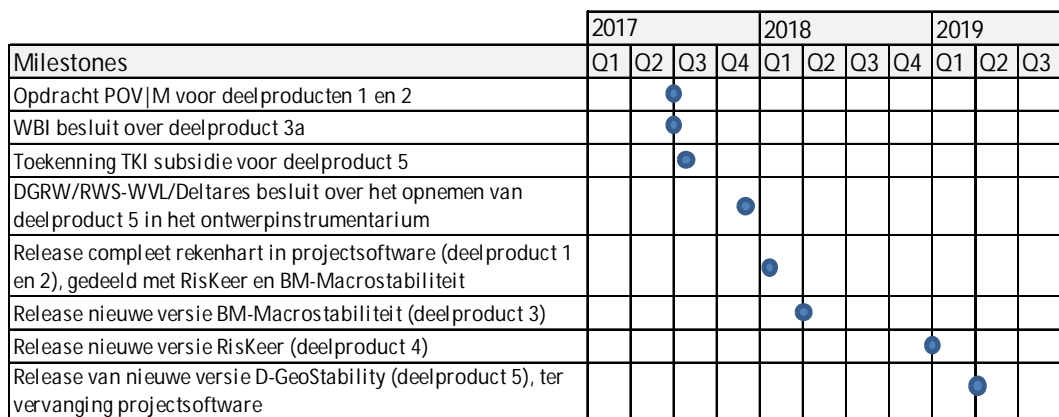
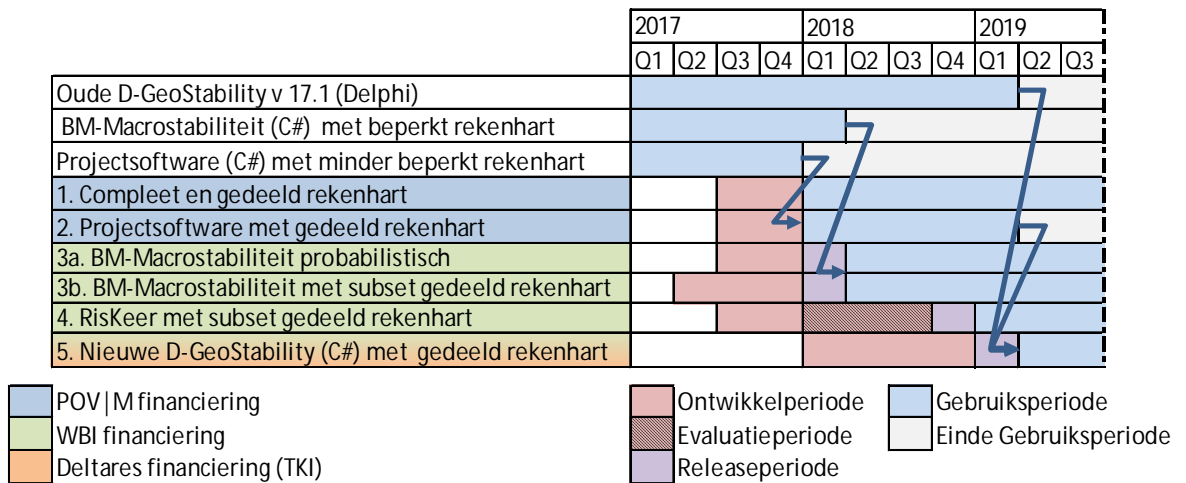
Figuur 3.7 toont ten slotte schematisch de voorgestelde fasering en milestones. De genoemde deelproducten en stakeholders corresponderen met het overzicht in Tabel 3.1.

In de figuur wordt per deelproduct onderscheid gemaakt tussen de volgende fasen:

- Ontwikkelperiode. Daarin wordt het programma van eisen en het ontwerp vastgelegd, gevolgd door het programmeren en testen.
- Evaluatieperiode. In deze periode is de software beschikbaar voor evaluatiedoeleinden, maar (nog) niet voor eindgebruik.



- Releaseperiode. In deze periode vinden alle activiteiten plaats die nodig zijn voor beschikbaarstelling van formele producten aan eindgebruikers. Daarbij hoort het opstellen van gebruikersdocumentatie, het voorbereiden van gebruikerscursussen etc.
- Gebruiksperiode. De periode waarin de software na de release beschikbaar is voor eindgebruik.



*Figuur 3.7 Voorgestelde fasering en daaraan gekoppelde milestones voor de realisatie van de samenhangende deelproducten. De aansluiting van DAM en D-Sheetpiling op het gedeelde rekenhart is niet in deze fasering opgenomen, maar kan in principe ook in de loop van 2018 gaan plaatsvinden.*

## Literatuur

- Deltares. (2013a). *Handleiding DAM 1.0, Deltares rapport 1207094-000-GEO-0005.*
- Deltares. (2013b). *Versterking Samenhang VTV tools, op weg naar een nieuwe generatie dijksterkte software. Rapport nr. 1206005-002-HYE-0003.*
- Deltares. (2014). *1207808-001-GEO-0004, Versie 01, WTI2017 Beoordeling macrostabiliteit met ongedraineerd materiaalmodel definitief.*
- Deltares. (2016a). *WTI2017 Failure mechanisms – MacroStability kernel: Requirements and Functional Design, version 4. Deltares report 1230095-002-HYE-0014.*
- Deltares. (2016b). *WTI2017 Failure Mechanisms- MacroStabilityKernel: Technical Design. Deltares report 1230095-002-HYE-0012, version 1.5.*
- Deltares. (2016c). *WTI2017 Failure mechanisms – MacroStability Kernel: Test plan. Deltares report 1230095-002-HYE-0015, version 2.*
- Deltares. (2016d). *WTI2017 Failure mechanisms - MacroStability Kernel: Test report for version 16.2.1. Deltares report 1230095-002-HYE-0013, version 2.*
- Deltares. (2016e). *POVM Beter benutten actuele sterkte KJK, Activiteit 6 - Faalkans updating 3 cases, concept rapport.*
- Deltares. (2016f). *Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating, rapport nr. 1230090-032-GEO-0016.*
- Deltares. (2016g). *BM-MacroStabiliteit: Functional Design, Deltares report 1230088-040-DSC-0009, version 3.*
- Deltares. (2016h). *BM-MacroStabiliteit: Technical Design, Deltares report 1230088-040-DSC-0004, version 1.2.*
- Deltares. (2016i). *BM-MacroStabiliteit: Test Plan, Deltares report 1230088-040-DSC-0002, version 1.2.*
- Deltares. (2016j). *BM-MacroStabiliteit: Test report for version 16.2.1, Deltares report 1230088-040-0008, version 1.2.*
- Deltares. (2016k). *Gebruikershandleiding BM-MacroStabiliteit: stand-alone tool voor MacroStabiliteit binnenwaarts, versie 1.1.*
- Deltares. (2016l). *Gebruikershandleiding D-Soil Model: ondergrondschematiseringsproces voor geotechnische toepassingen, versie 1.1.*
- Deltares. (2016m). *User manual for D-Geo Stability, version 16.2: Slope Stability software for soft soil engineering.*
- Deltares. (2017a, maart 21). *Offerte POVM: 'Beter benutten actuele sterkte', Activiteit 'Proefbelasting IJsseldijk'. Kenmerk 11200643-001-GEO-0001.*
- Deltares. (2017b). *Ringtoets gebruikershandleiding, versie 16.4.4.,.*
- Ladd, C., & Foott, R. (1974). *New design procedure for stability of soft clays. Journal of the Geotechnical Engineering Division*, pp. 100(7): 763-786.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2016). *Schematiseringshandleiding MacroStabiliteit, WBI 2017, versie 2.1.*
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2017a). *Handreiking ontwerpen met overstromingskansen, Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen, versie OI2014v4.*
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2017b). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III: Sterkte en veiligheid.*
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat. (2007). *Voorschrift toetsen op veiligheid primaire waterkeringen voor de derde toetsronde 2006-2011.*
- Waterschap Rivierenland. (2015). *Plan van Aanpak Projectoverstijgende Verkenning MacroStabiliteit.*



Waterschap Rivierenland. (2017a, maart 8). Offerteaanvraag 2.1B2: Toepassen actuele sterkte, activiteit 7. Kenmerk 2017011691/2017011713.

Waterschap Rivierenland. (2017b, april 10). Opdrachtverlening Toepassen Actuele Sterkte (proefbelasting) KIJK, onderdeel 2.1B2A. Kenmerk 2017011691/2017019879.

## A Functionaliteit van de verschillende producten

### A.1 Inleiding

In de volgende paragrafen wordt aangegeven welke functionaliteit beschikbaar is in de huidige versies van de projectsoftware, van D-Geo Stability en van BM-Macrostabilliteit en welke functionaliteit wordt voorgesteld in de eerstvolgende versie van die producten. Daarbij wordt aangetekend dat de functionaliteit die begin 2019 tentatief in D-Geo Stability beschikbaar komt, begin 2018 al beschikbaar zal komen in de projectsoftware. Per paragraaf wordt een groep van deelfunctionaliteiten behandeld. Voor de verschillende versies worden de volgende labels gebruikt.

Label	Omschrijving
PS 2017	Huidige projectsoftware
DG 2017	D-Geo Stability, begin 2017 (huidige versie 17.1)
PS 2018	Update projectsoftware (deelproduct 2).
DG 2019	D-Geo Stability, 2019. (nieuwe versie, deelproduct 5). Dezelfde functionaliteit is begin 2018 al beschikbaar in de projectsoftware
BM 2017	BM-Macrostabilliteit, begin 2017 (huidige versie 16.2.1)
BM 2018	BM-Macrostabilliteit, begin 2018 (nieuwe versie, deelproduct 3)

## A.2 Stijghoogtebepaling

Code	Stijghoogte-schematisering en invoervorm	PS 2017	DG 2017	DG 2019	PS 2018	BM 2017	BM 2018
H-01a	<i>PL lines per layer + Phreatic Line.</i> Vrije, handmatige invoer van stijghoogteverloop langs de boven- en onderzijde van elke laag.	-	✓	-	-	-	-
H-01b	<i>Waternet PL lines</i> Vrije, handmatige invoer van stijghoogteverloop langs lijnen, onafhankelijk van laagligging	✓	-	✓	-	-	-
H-02	<i>Waternet Creator:</i> automatische schematisering van het stijghoogteverloop bij hoogwater ten behoeve van analyse van binnenwaartse stabiliteit, gegeven de buitenwaterstand, gegeven de ligging van karakteristieke (dijk)punten en gegeven de ligging van de watervoerende lagen	✓	- <sup>2</sup>	✓	✓	✓	✓
H-03	<i>Degree of consolidation.</i> De consolidatiegraad bepaalt de wateroverspanningen door ophoging. De wateroverspanningen nemen af bij toenemende consolidatiegraad. De wateroverspanningen in een bepaalde laag worden veroorzaakt door het gewicht van een of meer bovenliggende ophooglagen.	-	✓	✓	-	-	-
H-04	<i>Use MSeep net.</i> Importeren van waterdrukken in een driehoekig grid, zoals berekend door de MSeep software	-	✓	-	-	-	-
H-05	Importeren van waterdrukken in een driehoekig grid, zoals berekend door de DG-Flow software (recente vervanger van MSeep)	-	-	✓	-	-	?
H-06	<i>External Water Levels.</i> Voor probabilistische analyse van waterkeringen: invoer van meerdere stijghoogteverlopen en bijbehorende buitenwaterstanden, met overschrijdingsfrequentie. Wordt gebruikt in combinatie met een aangenomen <i>Gumbel</i> verdeling voor de waterstand	-	✓	✓	-	-	?
H-07	<i>Stochastic hydraulic pressure and excess pore pressure.</i> Voor probabilistische analyses: de onzekerheid in het ingevoerde waterspanningsveld, opgegeven per grondlaag. Daarnaast nog een opgegeven onzekerheid op de ligging van de freatische lijn. En een onzekerheid op de wateroverspanning als functie van consolidatiegraad.	-	✓	✓	-	-	✓

## A.3 Mechanische belastingen

Code	Mechanische belasting en invoervorm	PS 2017	DG 2017	DG 2019	PS 2018	BM 2017	BM 2018
B-01	<i>Line Load.</i> Lijnvormige belasting, in de richting loodrecht op de doorsnede, optioneel onder een hoek met de verticaal,	-	✓	✓	-	-	-

<sup>2</sup> De automatische schematisering van een stijghoogteverloop als functie van buitenwaterstand zit wel in DAM, waar D-Geo Stability aan is gekoppeld

	met spreidingshoek					
B-02	<i>Uniform Loads.</i> Gewichtsbelasting (zoals een verkeersbelasting), met spreidingshoek, inclusief de daardoor gegenereerde tijdelijke wateroverspanningen in de lagen daaronder (via invoer van consolidatiegraad).	✓	✓	✓	-	-
B-03	<i>Earthquake.</i> Horizontale en verticale versnellingsbelasting, voor quasi-statische analyse van de stabiliteit bij aardbevingen	-	✓	✓	-	-
B-04	<i>Tree on Slope.</i> Momentbelasting als gevolg van een door wind belaste boom	-	✓	✓	-	-

#### A.4 Sterkte-eigenschappen

Code	Sterktemodel en invoervorm	PS 2017	DG 2017	DG 2019	PS 2018	BM 2017	BM 2018
S-01	<i>Mohr Coulomb</i> met cohesie $c$ , effectieve wrijvingshoek $\phi$ . en dilatatiehoek $\psi$ . Default niet-associatief: $\psi = 0$	✓	✓	✓	✓	✓	✓
S-02	<i>Sigma-Tau.</i> Invoer van schuifsterkte als functie van de normaalspanning loodrecht op het glijvlak. Wordt geïnterpreteerd als een spanningsafhankelijke wrijvingshoek en $\psi = \phi$	-	✓	?	-	-	-
S-03	<i>Measured Yield Stress.</i> Invoer van een ongedraineerde sterkte $s_u$ als materiaaleigenschap (opgegeven aan boven en onderzijde van de laag, of opgegeven in het midden van de laag met een gradiënt). Deze invoermogelijkheid staat geen verloop in horizontale richting toe.	-	✓	-	-	-	-
S-04	Verbeterde invoer van een ongedraineerde sterkte $s_u$ veld, als verloop langs de boven- en onderzijde van de laag.	-	-	✓	-	-	-
S-05	Nog nader te bepalen mogelijkheden voor bepaling van het ongedraineerde sterkte veld uit invoer langs lagen van conusweerstand, waterspanningen en maaiveldligging (referentiewaarden voor conusweerstand + actueel) en SHANSEP parameters.	-	-	✓	-	-	✓
S-06	<i>Su Calculated with Yield Stress</i> Invoer van de SHANSEP parameters $S$ en $m$ , in combinatie met invoer van de grensspanning $\sigma_y$ in punten binnen de laag. D-GeoStabiliteit berekent hieruit de gemiddelde POP per laag. BM-Macro stabiliteit en de projectsoftware gebruiken langs het glijvlak de POP waarde van het dichtstbijzijnde punt. Hierdoor ontstaat in horizontale richting wel een verloop in de grensspanning, maar wel met de beperking dat de POP waarde in horizontale richting een constant of discontinu verloop heeft.	✓	✓	-	✓	-	-
S-07	Invoer van de SHANSEP parameters $S$ en $m$ , in combinatie met verbeterde invoer van het verloop van de grensspanning $\sigma_y$ langs de bovenzijde en onderzijde van elke laag, De software gebruikt deze grensspanningswaarde direct, inclusief het opgegeven verloop in horizontale richting. .	-	-	✓	-	-	✓

S-09	<i>Su Calculated DOV</i> Invoer van de SHANSEP parameters $S$ en $m$ , in combinatie met invoer van de <i>POP</i> als materiaalparameter aan boven en onderzijde van een laag, onder de actuele omstandigheden. Hierdoor ontstaat in horizontale richting wel een verloop in de grensspanning, maar met een constante <i>POP</i> . waarde in horizontale richting.	-	✓	-	-	-
S-09	<i>Su Calculated with POP</i> . Invoer van de SHANSEP parameter $S$ , in combinatie met invoer van de <i>POP</i> onder de actuele omstandigheden als materiaalparameter. De software neemt aan: $m = 1$ . De <i>POP</i> kan worden gekoppeld aan een veldspanning bij een andere maaiveldligging dan de actuele. Daarbij kan echter geen rekening worden gehouden met variatie in stijghoogte.	-	✓	-	-	-
S-10	Invoer van de SHANSEP parameters $S$ en $m$ , in combinatie met verbeterde invoer van het verloop van de <i>POP</i> onder referentie omstandigheden langs de bovenzijde en onderzijde van elke laag, in combinatie met de ingevoerde verlopen van de waterspanningen en de maaiveldligging (referentiewaarden voor <i>POP</i> + actueel).	-	-	✓	-	✓
S-11	Voor de parameter $S$ kunnen optioneel verschillende waarden worden ingevoerd voor actieve en passieve afschuiving, waartussen langs het glijvlak dan een sinusvormig verloop wordt aangenomen ( <i>stress induced anisotropy</i> ).	-	✓ <sup>3</sup>	✓	-	-

<sup>3</sup> In D-Geo Stability 17.1 alleen beschikbaar in combinatie met 'Su calculated with POP'

## A.5 Glijvlakmodellen

Code	Glijvlakmodel	PS 2017	DG 2017	DG 2019	PS 2018	BM 2017	BM 2018
G-01	<i>Fellenius</i> : schuifweerstand langs cirkelvormig glijvlak. Evenwicht van moment. Voor taludinstabiliteit.	-	✓	✓	-	-	-
G-02	<i>Bishop</i> : schuifweerstand langs cirkelvormig glijvlak. Evenwicht van moment en verticale krachten. Voor taludinstabiliteit.	✓	✓	✓	-	-	-
G-03	<i>Uplift Van</i> : schuifweerstand langs horizontaal deel met twee cirkelvormige uiteinden. Evenwicht van moment en verticale krachten in de cirkelvormige delen. Horizontaal – en momenten evenwicht voor het horizontale deel. Voor taludinstabiliteit bij mogelijke oprijfsituaties. Wanneer de lengte van het horizontale deel nul is ontstaat een cirkel en wordt het Uplift Van Model gelijk aan het Bishop model. Bij opdrijven ontstaat aan landzijde een uitgerekt glijvlak in horizontale richting, omdat de waterdrukken in een zandlaag onder de deklaag het gewicht van die deklaag benaderen. De definitie van het model is eind 2016 nog verbeterd, om rekening te houden met het verloop van waterspanning langs het horizontale deel.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
G-04	<i>Spencer</i> : vrije vorm, Evenwicht van moment, verticale krachten en horizontale krachten. Voor taludstabiliteit in willekeurige situaties, inclusief opdrijven. Heeft ten opzichte van Uplift-Van als voordeel dat het ook langgerekte glijvlakliggingen kan beschrijven met een niet-horizontale basis en dat een gekromde vorm niet een cirkel hoeft te zijn	✓	✓	✓	-	-	-
G-05	<i>Horizontal Balance</i> : schuifweerstand langs horizontaal glijvlak, voor horizontaal evenwicht, exclusief taludstabiliteit. Vereist voor het toetsen van regionale keringen	-	✓	✓	-	-	-
G-06	<i>Zone Areas for Safety (Zone plot)</i> . Geeft bij Bishop en Uplift-Van de mogelijkheid om rekening te houden met de ligging van het glijvlak in relatie tot de vereiste stabiliteitsfactor: in het minimaal vereiste restprofiel is de vereiste stabiliteitsfactor het hoogst, naar de binnenzijde toe wordt de vereiste veiligheidsfactor kleiner. Bij de controle wordt een (zeer benaderende) verplaatsingstoets gedaan om te controleren of het afgeschoven lichaam het restprofiel verkleint	-	✓	✓	-	-	?



G-07	Randvoorwaarden aan de glijvlakligging (minimale cirkeldiepte, minimale glijvlaklengte, horizontale zone waar intreepunt mag liggen)	✓	✓	✓	✓	✓
G-08	Randbijdrage (uit het vlak) aan het weerstandbiedend moment	-	✓ <sup>4</sup>	✓	-	-

#### A.6 Constructieve elementen

Code	Constructief element en invoervorm	PS 2017	DG 2017	PS 2018 DG 2019	BM 2017	BM 2018
C-01	Geotextiel. Levert weerstand tegen afschuiven, totdat uittrekken optreedt	-	✓	✓	-	-
C-02	Vernageling, met of zonder kopplaat. Levert weerstand tegen afschuiven, totdat de sterkte van de omringende grond of van de nagel is bereikt.	-	✓	✓	-	-
C-03	Damwand, gemodelleerd als een "forbidden line" (waar het glijvlak niet doorheen mag lopen)	✓	✓	✓	-	-

#### A.7 Zoekmethoden voor ligging maatgevend glijvlak

Code	Zoekmethode en invoervorm	PS 2017	DG 2017	PS 2018 DG 2019	BM 2017	BM 2018
Z-01	<i>Grid Search Vrij</i> . Invoer van de mogelijke posities van cirkelmiddens en raaklijnen, vrije keuze voor binnenzijde of buitenzijde en verdere instellingen, vast grid, of bewegend grid). Toepasbaar voor Bishop (1 grid) en Uplift-Van (2 grids). Vindt soms een niet-maatgevend lokaal minimum. Is rekenintensief, vooral voor Uplift Van.	✓	✓	✓	-	-
Z-02	<i>Grid Search Automatisch</i> (bewegend grid, automatisch geplaatst aan binnenzijde, weinig instelmogelijkheden).	✓	-	✓	✓	✓
Z-03	<i>Genetic Algoritm</i> . Twee submethoden. Vindt altijd de maatgevende ligging, ook bij meerdere lokale minima. Is sneller dan Grid Search voor globaal bepalen van glijvlakligging (zeker bij Uplift Van en Spencer). Diverse instelmogelijkheden	-	✓ <sup>5</sup>	✓	-	-
Z-04	<i>Levenberg Marquardt</i> : op gradiënten gebaseerde procedure. Combineerbaar met het genetisch algoritme voor de stap van globale ligging naar precieze ligging. Kan rekenintensief zijn.	-	✓ <sup>6</sup>	✓	-	-

<sup>4</sup> Alleen in combinatie met de probabilistische random field methode

<sup>5</sup> Werkt in D-Geo Stability 17.1 alleen in combinatie met Spencer

<sup>6</sup> Werkt in D-Geo Stability 17.1 alleen in combinatie met Spencer. Is niet altijd stabiel

#### A.8 Probabilistische methoden voor faalkansbepaling

Code	Probabilistische methode en invoervorm	PS 2017	DG 2017	DG 2019	PS 2018	BM 2017	BM 2018
P-01	Deterministisch, met directe invoer van de rekenwaarde	✓	✓	✓	✓	✓	✓
P-02	Semi-probabilistisch, met berekening van de rekenwaarde uit de ingevoerde kansverdeling en partiële factor	-	✓	✓	-	-	✓
P-03	<i>Pseudo-values</i> . Semi-probabilistisch, met berekening van de rekenwaarde uit een kansverdeling. Daarbij wordt door correlatie tussen laageigenschappen ook nog rekening wordt gehouden met de onwaarschijnlijkheid dat de eigenschappen van alle lagen tegelijkertijd ongunstig zijn.	-	✓ <sup>7</sup>	-	-	-	-
P-04	<i>Random Average (Reliability)</i> . Probabilistische variatie van de onzekere waarde van een eigenschap uit de kansverdeling, waarbij binnen een laag geen ruimtelijke variatie wordt aangenomen (volledig ruimtelijk gecorreleerd). Met optioneel het terugrekenen van de kansverdeling uit een ingevoerde rekenwaarde, partiële factor en variatiecoëfficiënt. Voor waterkeringen kan ook een integratie worden uitgevoerd over de kansverdeling van de buitenwaterstand, wanneer per waterstand stijghoogteverlopen zijn gedefinieerd.	- <sup>8</sup>	✓ <sup>9</sup>	✓ <sup>10</sup>	-	-	✓ <sup>11</sup>
P-05	<i>Random Field</i> Probabilistische variatie van de onzekere waarde van een eigenschap uit de kansverdeling, waarbij binnen een laag een ruimtelijke variatie van grondeigenschappen wordt aangenomen	-	✓ <sup>12</sup>	?	-	-	-

<sup>7</sup> Werkt alleen met "Sigma-Tau curves"

<sup>8</sup> Probabilistische berekeningen met de projectsoftware wel mogelijk door aansluiting op toolkit

<sup>9</sup> *Random Average* in *D-Geo Stability 17.1* is beschikbaar met vrijwel alle sterktemodellen, maar NIET met *Su Calculated with Yield Stress*

<sup>10</sup> In de nieuwe versie van *D-GeoStability* moet de *Random Average* methode beschikbaar komen voor ALLE ondersteunde sterktemodellen en invoervormen en voor alle relevante stochastische variabelen

<sup>11</sup> In de nieuwe versie van *BM-Macrostablieit* moet de *Random Average* methode beschikbaar komen voor ALLE ondersteunde sterktemodellen en voor alle relevante stochastische variabelen

<sup>12</sup> *Random Field* in *D-Geo Stability 17.1* is alleen beschikbaar voor het Bishop glijvlakmodel met cohesie en wrijvingshoek en met "grid search".

### A.9 Invoer

Code	Invoer	PS 2017	DG 2017	DG 2019	PS 2018	BM 2017	BM 2018
I-01	Grafische en/of getalsmatige invoer van alle locatiegebonden gegevens	✓	✓	✓	-	-	-
I-02	Getalsmatige invoer van alle niet-locatiegebonden gegevens	✓	✓	✓	-	-	-
I-03	Getalsmatige invoer van parameters voor geautomatiseerde stijghoogtebepaling	✓	-	✓	✓	✓	✓
I-04	Importeren van materiaal-eigenschappen uit een MSoilbase database. Dit is de centrale database voor de D-Serie applicaties, waaronder ook DAM.	-	✓	✓	-	-	-
I-05	Importeren van het oude D-Serie uitwisselingsformaat voor de geometrie (geo-file) en van oude D-Geo Stability bestanden	✓	✓	✓	-	-	-
I-06	Importeren van materialen, geometrie en karakteristieke punten uit een D-Soilmodel database. Dit is de WBI database.	-	-	✓	✓	✓	✓

### A.10 Uitvoer

Code	Uitvoer	PS 2017	DG 2017	DG 2019	PS 2018	BM 2017	BM 2018
U-01	Grafische en getalsmatige uitvoer van spanningen over verticalen	✓	✓	✓	-	-	✓
U-02	Grafische en getalsmatige uitvoer van glijvlakligging en stabiliteitsfactor	✓	✓	✓	✓	✓	✓
U-03	Grafische en getalsmatige uitvoer van spanningscomponenten langs glijvlak	✓	✓	✓	-	-	✓
U-04	<i>FMin Grid</i> Grafische en getalsmatige uitvoer van stabiliteitsfactoren in het grid van mogelijke cirkelmiddens	-	✓	✓	-	-	✓
U-05	<i>Safety Factor per zone</i> Grafische uitvoer van de zones waarin de middelpunten van glijcirkels zich bevinden, met bijbehorende veiligheidsfactoren	-	✓	✓	-	-	?
U-06	<i>Safety Overview</i> Grafische en getalsmatige uitvoer van gebieden met glijvlakliggingen, met onderscheid naar verschillende klassen van stabiliteitsfactoren	-	✓	✓	-	-	✓
U-07	Waarschuwingen & foutmeldingen	✓	✓	✓	✓	✓	✓
U-08	Voortgangsindicatie	✓	-	✓	-	-	✓
U-09	Log-gegevens van iteratie zoekalgoritme	-	-	✓	-	-	✓
U-10	Log-gegevens van probabilistische analyse	-	-	✓	-	-	✓
U-11	Grafische en getalsmatige uitvoer van invloedsfactoren en betrouwbaarheidsindex van probabilistische analyse (per buitenwaterstand)	-	✓	✓	-	-	✓