



# Optimalisatie van de faalkanseis en de schematisatie van het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts

---

BACHELOR THESIS CIVIELE TECHNIEK



uw waterschap

UNIVERSITY OF TWENTE.

J. BOOTSMA  
UNIVERSITEIT TWENTE  
WATERSCHAP DRENTS OVERIJSSELSE DELTA  
28 JUNI 2019

Foto op voorblad: (WDOdelta, 2019)

Titel:	Optimalisatie van de faalkanseis en de schematisatie van het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts
Bijbehorend document:	Interviewverslagen
Onderwijsinstituut:	Universiteit Twente
Externe organisatie:	Waterschap Drents Overijsselse Delta
Auteur:	J. Bootsma – s1823817
Gelegenheid/aanleiding:	Bachelor Thesis
Begeleiders:	ir. P.T. Hopman (Waterschap Drents Overijsselse Delta) ir. J.H. Damveld (Universiteit Twente)
Plaats:	Zwolle
Doorlooptijd:	8 april 2019 – 5 juli 2019

## VOORWOORD

Voor u ligt mijn thesis met de titel 'Optimalisatie van de faalkanseis en de schematisatie van het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts'. Dit product is mijn eindopdracht voor de bachelor Civiele Techniek vanuit de Universiteit Twente.

In de afgelopen tien weken heb ik aan mijn onderzoek mogen werken bij het Waterschap Drents Overijsselse Delta. Binnen de afdeling Onderzoek en Advies en de vakgroep Waterveiligheid heb ik onderzoek verricht naar het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts. Binnen de wettelijke beoordeling en het ontwerp van primaire waterkeringen is dit onderwerp op dit moment onderbelicht. Met dit onderzoek hoop ik een steentje bij te kunnen dragen aan de verdere begripsvorming hiervan. Hierbij bestond de eerste fase van het onderzoek uit een literatuurstudie en interviews en de tweede fase van het onderzoek uit een analyse met en van de verkregen aandachtspunten uit fase één.

Graag wil ik Peter Hopman bedanken voor de begeleiding vanuit WDODelta. Hij stond altijd open voor vragen en feedback en was zelf erg enthousiast in zijn begeleiding en interesse in het onderwerp. Vanuit de Universiteit Twente wil ik Johan Damveld bedanken voor zijn begeleiding. Met zijn wetenschappelijke kennis heeft hij mij geholpen mijn onderzoek naar een hoger niveau te brengen. Naast mijn twee begeleiders gaat mijn dank uit naar het waterschap en in het speciaal de vakgroep Waterveiligheid. Ik heb een erg plezierige tijd gehad waarbij de werksfeer altijd goed was en iedereen openstond voor inhoudelijke dan wel niet inhoudelijke gesprekken. Als laatste wil ik iedereen bedanken die betrokken is geweest bij mijn onderzoek, zoals geïnterviewden, vrienden en familie.

Ten slotte wil ik u als lezer veel plezier wensen bij het lezen van mijn verslag. Mocht u vanuit interesse vragen of opmerkingen hebben dan sta ik hier altijd voor open.

Jesse Bootsma,

Juni 2019, Zwolle

## SAMENVATTING

In het Deltaprogramma 2015 wordt beschreven om over te gaan van waterveiligheidsmanagement op basis van risico naar een methode op basis van de kans op een overstroming en de gevolgen die daarbij optreden (Ministerie van Infrastructuur en Milieu; Ministerie van Economische Zaken, 2014). De introductie van deze nieuwe methode heeft invloed op de eisen die aan de waterkeringen worden gesteld en de methode van ontwerp en beoordeling van deze waterkeringen. Sinds de invoer van deze nieuwe normering, op 1 januari 2017, is de ervaring met omgang met deze nieuwe methode nog niet toereikend voor een aantal faalmechanismen, waaronder macrostabiliteit buitenwaarts. De factsheet van het Kennisplatform Risicobenadering 'Omgang met buitenwaartse macrostabiliteit' is mede-aanleiding geweest voor dit onderzoek (Kennisplatform Risicobenadering, 2018).

Het doel van dit onderzoek is het optimaliseren van de veiligheidsbeoordeling en de schematisatie van primaire waterkeringen met betrekking tot het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts. Optimalisatie betekend in dit geval: onderbouwd afwijken van de standaardregels voor berekeningen, aannames en voorschriften om tot een accurater veiligheidsoordeel of ontwerp te komen. Het totale doel is van toepassing voor de sector waterveiligheid in zijn geheel, maar zal uiteindelijk toespitsen op het beheersgebied van het Waterschap Drents Overijsselse Delta.

De hoofdvraag luidt hierbij als volgt:

*Hoe kan de faalkanseis en de schematisatie van het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts worden geoptimaliseerd?*

Binnen dit onderzoek naar optimalisatiemogelijkheden zal het eerste deel bestaan uit een literatuurstudie en een aantal interviews. Een van de onderdelen binnen de literatuurstudie en de interviews heeft betrekking op de ervaren problemen met STBU (macrostabiliteit buitenwaarts) en de huidige tijdelijke herstelmaatregelen na een buitenwaartse afschuiving.

De interviews zijn uitgevoerd met specialisten op het gebied van waterveiligheid en geotechniek en met waterkeringbeheerders.

Vervolgens is de input uit het eerste deel van het onderzoek gebundeld en zijn optimalisatiemogelijkheden ten behoeve van de faalkanseis en de schematisatie opgesteld. Het effect van aanpassingen hierin is daarna in beeld gebracht. Voor de faalkanseis is dit gedaan met voorbeeldberekeningen. Het effect van aanpassingen in de schematisatie is bepaald door middel van een kwantitatieve analyse in D-Geo Stability, een applicatie van Deltares voor stabiliteitsberekeningen van dijkprofielen. Voor deze analyse is een fictieve case opgesteld met negen verschillende basis scenario's, bestaande uit drie typen ondergrondopbouw en drie typen dijkopbouw.

Het onderzoek heeft uiteindelijk geleid tot een tal van optimalisatiemogelijkheden, zowel binnen de faalkanseis als de schematisatie. Zo is het mogelijk om de faalkansruimtefactor voor STBI (macrostabiliteit binnenwaarts) aan te passen. Vergroten van deze factor heeft tot gevolg dat de faalkanseis die aan STBU wordt gesteld op doorsnedeniveau groter wordt. Een van de mogelijkheden voor aanpassing is het omwisselen van de faalkansruimtefactor van STBI met deze van piping. Dit maakt dat de faalkansruimtefactor niet 0,04 is, maar 0,24. Deze vergroting met een factor 6 heeft een directe vergroting met dezelfde factor 6 in faalkanseis als gevolg. Echter is dit alleen mogelijk als aangetoond kan worden dat de kans op piping zodanig klein is dat deze daardoor strenger kan worden getoetst en toch aan de norm voldoet.

Naast de faalkansruimtefactor liggen er optimalisatiemogelijkheden binnen de faalkanseis bij de conditionele faalkans. Op dit moment wordt gerekend met een default waarde van 10% van de faalkansruimtefactor van STBI voor de kans dat een waterkering niet binnen de beschikbare hersteltijd gerepareerd kan worden. Hierdoor zal er bij een volgend hoogwater een bres ontstaan met een overstroming als gevolg. Door hersteltijden te benaderen en uit te werken binnen het opstellen van de faalkanseis kan winst geboekt worden voor de conditionele faalkans. Het grootste effect wordt hierbij behaald door het expliciet beschouwen van de hersteltijden, waarbij het finetunen van deze hersteltijden minder relevant is. Via deze weg kan de default waarde van 10% verlaagd worden naar

bijvoorbeeld 1% of zelfs 0,1%. Verlagen van de conditionele faalkans heeft een verlaging van de faalkanseis met dezelfde factor als gevolg.

Een betere benadering van de freatische lijn, het niveau van de grondwaterspiegel in de dijk, na een val van hoogwater kan optimalisatiemogelijkheden bieden binnen de schematisatie. Een schematisatie waarbij de freatische lijn is gezakt tijdens een val van de buitenwaterstand heeft namelijk een aanzienlijk effect op de beoordeling van dit dijklichaam. Hoe verder de freatische lijn hierbij gezakt is, hoe hoger de uiteindelijke safety factor uit de stabiliteitsberekening.

Verder kan aanpassing van de verkeersbelasting ervoor zorgen dat de belasting op het dijklichaam verlaagd kan worden. Het kan uitkomst bieden door beleidsmaatregelen op te stellen met betrekking tot de verkeersbelasting. Zo kan zwaar verkeer op de dijk geweigerd worden in de periode na een hoogwater.

Eén van de onzekerheden binnen de schematisatie zijn de grensspanningen. Optimalisatie van de grensspanningen bestaat voornamelijk uit het uitvoeren van gedetailleerder onderzoek naar de grensspanningen door middel van grondonderzoek en laboratoriumonderzoek. De grensspanningen kunnen enorm verschillen binnen de dimensies van een dijklichaam en binnen een dijkvak.

Het tijdsverloop van de buitenwaterstand heeft effect op het verloop van de freatische lijn. Op dit moment is er weinig ervaring met het modelleren van een snelle val van de buitenwaterstand en wordt een vaste waarde voor de waterstand na een vast aantal dagen genomen binnen de schematisatie. Dit is echter een conservatieve waarde. In veel gevallen kan met een hogere buitenwaterstand geschematiseerd worden dan op dit moment gedaan wordt, wat een positief effect heeft op de stabiliteitsbepaling van het dijklichaam.

Naast het onderzoek naar de optimalisatiemogelijkheden aangaande STBU is er een analyse gedaan naar de mogelijkheden hiervan binnen het beheergebied van WDO Delta. Voor het Waterschap Drents Overijsselse Delta wordt geadviseerd om de faalkanseis en de schematisatie te optimaliseren op een van de genoemde aspecten wanneer een dijkvak wordt afgekeurd op STBU of wanneer er binnen de ontwerpfase een dure maatregel nodig is om het stabiliteitsprobleem op te lossen. Wanneer een van deze zaken aan de orde is kan de inschatting van de optimalisatiemogelijkheden zoals gegeven in hoofdstuk 9.2.

## INHOUDSOPGAVE

Voorwoord .....	3
Samenvatting.....	4
1. Introductie.....	10
1.1. Probleemomschrijving.....	10
1.2. Relevantie.....	10
1.3. Doel.....	11
2. Onderzoeksvragen.....	12
3. Procedure en onderzoeksmethodes .....	13
4. Theoretisch Kader .....	15
4.1. Het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts .....	15
4.2. Macrostabiliteit buitenwaarts binnen de totale veiligheidsbeoordeling .....	15
4.3. De veiligheidsbeoordeling voor macrostabiliteit buitenwaarts .....	16
4.3.2. Gedraineerd/ongedraineerd rekenen.....	20
5. Interviewanalyse .....	22
5.1. Verkregen aanbevelingen.....	22
5.2. Overeenkomsten en verschillen .....	23
6. Huidige omgang met macrostabiliteit buitenwaarts .....	24
6.1. Voorgekomen problemen met macrostabiliteit buitenwaarts .....	24
6.1.1. Problemen in de praktijk.....	24
6.1.2. Problemen binnen de beoordeling en het ontwerp .....	25
6.2. Tijdelijke maatregelen na een buitenwaartse afschuiving .....	25
6.2.1. Huidige procedure en maatregelen .....	27
7. Mogelijkheden voor optimalisatie van de faalkanseis .....	29
7.1. Faalkansruimtefactor .....	29
7.2. Conditionele faalkans .....	29
7.3. Voorbeeld aanpassingen faalkanseis.....	32
7.3.1. STBU-berekening Stenendijk.....	32
7.3.2. Benaderen van de hersteltijd.....	33
8. Optimalisatie van de schematisatie .....	35
8.1. Mogelijkheden voor optimalisatie van de schematisatie.....	35
8.1.1. Verloop freatische lijn .....	35
8.1.2. Tijdsverloop buitenwaterstanden.....	35
8.1.3. Verkeersbelasting.....	36
8.1.4. Grensspanningen .....	36
8.2. Kwantitatieve analyse schematisatie.....	37
8.2.1. Uitgangspunten berekeningen.....	37
8.2.2. Analyse freatische lijn .....	39
8.2.1. Analyse verkeersbelasting.....	42
8.2.2. Analyse grensspanningen.....	44
9. Optimalisatiemogelijkheden binnen het gebied van WDOdelta .....	47

9.1. Beheergebied WDODelta.....	47
9.2. Optimalisatiemogelijkheden per dijktraject .....	49
9.2.1. Relevante kenmerken dijktrajecten WDODelta.....	50
9.2.2. Scores per categorie.....	52
9.3. Resultaten.....	56
9.3.1. Faalkanseis .....	56
9.3.2. Schematisatie.....	57
9.3.3. Totaalscore.....	58
9.3.4. Visuele weergave .....	59
10. Discussie .....	61
11. Conclusie .....	64
12. Aanbevelingen voor verder onderzoek.....	66
Referenties .....	67
Bijlagen.....	69
A. Interviewformat .....	69
A.1. Format interviews keringbeheerders.....	70
A.2. Format interviews specialisten waterveiligheid/geotechniek .....	71
B. Antwoorden per interviewvraag.....	73
C. Excel sheet berekening faalkans Stenendijk .....	77
D. D-Geo Stability berekeningen .....	78
D.1. Uitgangspunten berekeningen.....	78
D.2. Gevoeligheid freatische lijn.....	88
D.3. Gevoeligheid verkeersbelasting .....	107
D.4. Gevoeligheid POP-waarden.....	113
E. Overzicht optimalisatiescores .....	131
E.1. Faalkanseis.....	131
E.2. Schematisatie .....	134



## LIJST MET BEGRIPPEN EN AFKORTINGEN

Begrip / afkorting	Betekenis
Freatische lijn	Niveau van de grondwaterspiegel in de dijk
HBN	Hydraulisch Belasting Niveau
Heavescherm	Scherm als maatregel tegen piping
KPR	Kennisplatform Risicobenadering
MHW	Maatgevend Hoogwater
mv	Maaiveld
OCR	Over-Consolidation Rate
OI2014	Ontwerpinstrumentarium 2014
Piping	Faalmecanisme waarbij water via een zandlaag onder de dijk door stroomt
POP	Pre-Overburden Pressure
SF	Safety Factor
SHM	Schematiseringshandleiding Macrostabieleit
STBI	Macrostabieleit Binnenwaarts
STBU	Macrostabieleit Buitenwaarts
STOWA	Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
TRWD	Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken
TRWG	Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies
UGT	Uiterste Grens Toestand
UT	Universiteit Twente
WBI	Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium
WBN	Waterstand Bij Norm
WDODelta	Waterschap Drents Overijsselse Delta
WSRL	Waterschap Rivierenland

## LIJST MET FIGUREN

Figuur 1: Schematische weergave buitenwaartse macro-instabiliteit (Deltares, 2018) .....	10
Figuur 2: Afschuiving door instabiliteit van het talud (Helpdesk Water, 2019) .....	15
Figuur 3: Werkproces toets spoor STBU (Helpdesk Water, 2019) .....	17
Figuur 4: Schema eenvoudige toets macrostabieleit buitenwaarts (STBU) (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2017) .....	18
Figuur 5: Schematische weergave van de bepaling van de faalkanseis per doorsnede (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2017) .....	19
Figuur 6: Lichte afschuiving tijdens werkzaamheden Reevediep. Linksboven: dichtgedrukte sloot; rechtsboven: golfvorming land achter sloot en onder: lichte afschuiving.....	24
Figuur 7: Ongeveer twee dagen nadat de topafvoer gepasseerd was, is het buitentalud van de Rijnbanddijk bij Ingen verzakt. Vervolgens is deze versterkt met zandzakken.....	25
Figuur 8: Type afschuiving (Kennisplatform Risicobenadering, 2019) .....	26
Figuur 9: Traditionele bekramming met zandzakken (links) versus innovatieve bekramming met kunststof wapeningsnet (rechts).....	28
Figuur 10: Faalkans 2a (links) en faalkans 2b (rechts) tegen hersteltijd .....	33
Figuur 11: Dijkopbouw 3 met ondergrondscenario 2 .....	38
Figuur 12: Safety factors per scenario schematisatie freatische lijn voor een kleidijk met ondergrondscenario 2.....	40
Figuur 13: Safety factors per scenario schematisatie freatische lijn voor een zanddijk met ondergrondscenario 2.....	40
Figuur 14: Safety factors per scenario schematisatie freatische lijn voor een zanddijk met kleibekleding met ondergrondscenario 2.....	41
Figuur 15: Safety factor per dijkprofiel voor verschillende verkeersbelastingen .....	42
Figuur 16: Resultaat D-Geo Stability berekening zanddijk met ondergrondscenario 2 en een verkeersbelasting van 13,3 kN/m2.....	43
Figuur 17: Safety factor per ondergrondscenario per POP-scenario voor de kleidijk.....	45
Figuur 18: Safety factor per ondergrondscenario per POP-scenario voor de zanddijk .....	45

Figuur 19: Safety factor per ondergrondscenario per POP-scenario voor de zanddijk met kleibekleding .....	46
Figuur 20: Beheergebied WDODelta met weergave primaire keringen .....	47
Figuur 21: Overzicht normtrajecten met bijbehorende ondergrens (Informatiehuis Water, 2019) ....	48
Figuur 22: Eis op doorsnedeniveau voor STBU tegen de trajectlengte voor een 1/3000 ondergrens en de daadwerkelijke ondergrens van het normtraject.....	49
Figuur 23: Hoogwatergolf Kampen bij een waterstand van 4m+NAP en een herhalingstijd van 1000 jaar .....	53
Figuur 24: Hoogwatergolf Olst bij een waterstand van 4m+NAP en een herhalingstijd van 1000 jaar	53
Figuur 25: Bandbreedte scores per dijktraject ten behoeve van de faalkanseis .....	56
Figuur 26: Bandbreedte scores per dijktraject ten behoeve van de schematisatie.....	57
Figuur 27: Bandbreedte scores per dijktraject ten behoeve van de faalkanseis en de schematisatie .	58
Figuur 28: Visuele weergave optimalisatiescores dijktrajecten WDODelta.....	60

## LIJST MET TABELLEN

Tabel 1: Standaard faalkansbegroting volgens WBI 2017. De faalkansruimtefactor is weergegeven per faalmechanisme. Het type traject is altijd 'overig' als het traject zich niet langs de kust bevindt. De faalkansruimtefactor per faalmechanisme is de factor binnen de totale veiligheidsbeoordeling waarvoor het specifieke faalmechanisme mag falen. De faalkanseis per doorsnede voor een faalmechanisme wordt bepaald met behulp van de faalkansruimtefactor. (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2017) .....	16
Tabel 2: Modelfactoren per glijvlakmodel .....	20
Tabel 3: Faalpaden na een buitenwaartse afschuiving .....	31
Tabel 4: Waarden voor betrouwbaarheidsinterval ( $\beta$ ) en schadefactor ( $\gamma$ ) voor de Stenendijk bij aanpassing van de faalkansruimtefactor en de norm .....	32
Tabel 5: Uitgevoerde stabiliteitsberekeningen in D-Geo Stability. Aangekruisde cellen zijn hierbij uitgevoerd. ....	38
Tabel 6: Scenario's schematisatie freatische lijn kleidijk .....	39
Tabel 7: Percentuele verschillen in safety factor t.o.v. standaard schematisatie voor de kleidijk, zanddijk en zanddijk met kleibekleding.....	41
Tabel 8: Verwachtingswaarden en karakteristieke waarden voor POP voor verscheidene grondsoorten (Deltares, 2015).....	44
Tabel 9: POP-waarden per grondlaag voor de drie verschillende POP-scenario's.....	44
Tabel 10: Overzicht dijktrajecten IJsseldelta WDODelta inclusief lengte, onderdeel van dijkkring en norm .....	48
Tabel 11: Overzicht gegevens dijktrajecten WDODelta .....	51
Tabel 12: Resultaten analyse waterstandsverloop .....	54
Tabel 13: Scores per dijktraject WDODelta aangaande optimalisatiemogelijkheden ten behoeve van de faalkanseis .....	56
Tabel 14: Scores per dijktraject WDODelta aangaande optimalisatiemogelijkheden ten behoeve van de schematisatie .....	57
Tabel 15: Scores per dijktraject WDODelta aangaande optimalisatiemogelijkheden ten behoeve van de faalkanseis en de schematisatie.....	58

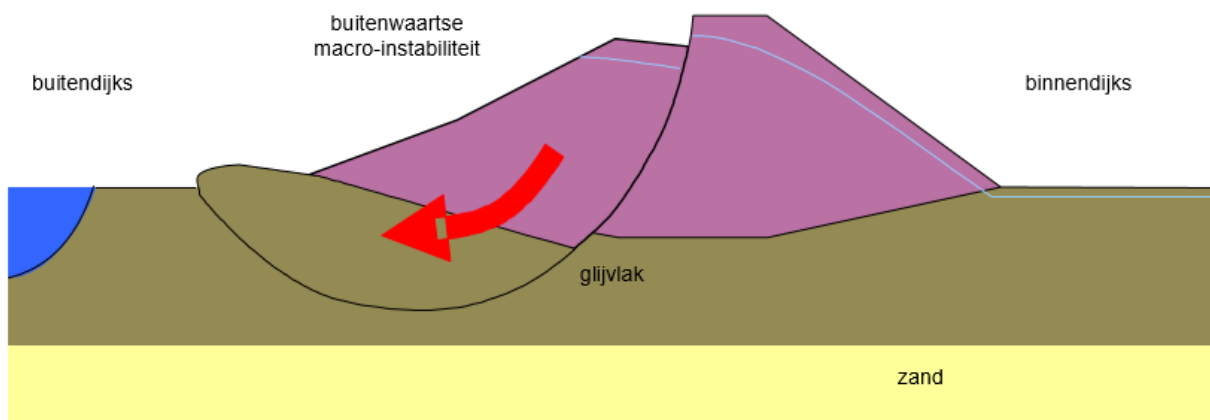
## 1. INTRODUCTIE

### 1.1. PROBLEEMOMSCHRIJVING

Op dit moment staat de Nederlandse watersector wereldwijd bekend om haar kennis op het gebied van watermanagement en waterveiligheid. Om deze positie vast te houden is het belangrijk dat de sector zich blijft ontwikkelen. Omdat klimaatverandering steeds meer een rol gaat spelen in water gerelateerde problemen zijn nieuwe technieken en beleidsmaatregelen benodigd. Deze maatregelen moeten ervoor gaan zorgen dat Nederland een veilige en prettige leefomgeving blijft. Een tak binnen de watersector met grote belangen is de waterveiligheid. Primaire waterkeringen langs rivieren en kust moeten steeds hogere waterniveaus en debieten aankunnen. Dit betekent dat de veiligheidsbeoordeling en de schematisatie van deze primaire waterkeringen erg belangrijk zijn.

Binnen de veiligheidsbeoordeling van een waterkering spelen meerdere faalmechanismen een rol. Een van deze mechanismen, welke op dit moment onderbelicht is, is macrostabiliteit van het buitentalud. Dit faalmechanisme vindt plaats wanneer grote delen van het buitentalud van een grondlichaam afschuiven (Figuur 1). Dit gebeurt wanneer het waterniveau in het dijklichaam, de freatische lijn, hoog is na een lange periode van een hoge buitenwaterstand. Wanneer vervolgens een snelle val van deze buitenwaterstand optreedt, kan er een afschuiving plaatsvinden van het buitentalud. Een andere reden voor een hoge freatische lijn kan extreme neerslag zijn. Omdat het waterniveau aan de buitenzijde van de dijk alweer gezakt is op het moment van een afschuiving, zal buitenwaartse macrostabiliteit niet direct leiden tot een overstroming. Een hoger risico op overstroming ontstaat alleen wanneer binnen de benodigde hersteltijd van het dijklichaam een nieuwe hoogwatergolf plaatsvindt. In dit geval zal het beschadigde dijklichaam mogelijk niet langer deze waterstand kunnen keren en zal deze daardoor bezwijken (Deltares, 2015).

Hoewel buitenwaartse macrostabiliteit niet wordt gezien als een direct faalmechanisme, wordt het mechanisme wel op deze manier benaderd. Dit betekent dat de kans op een afschuiving van een deel van het buitentalud direct gerelateerd is aan een kans op falen van de waterkering. Dit wordt binnen de beoordeling verwerkt door de kans op een hoog water scenario binnen de hersteltijd van het dijklichaam (en daarmee bresvorming) mee te nemen in de faalkans (Kennissplatform Risicobenadering, 2018).



Figuur 1: Schematische weergave buitenwaartse macro-instabiliteit (Deltares, 2018)

### 1.2. RELEVANTIE

In het Deltaprogramma 2015 wordt beschreven om over te gaan van waterveiligheidsmanagement op basis van risico naar een methode op basis van de kans op een overstroming en de gevolgen die daarbij optreden (Ministerie van Infrastructuur en Milieu; Ministerie van Economische Zaken, 2014). De introductie van deze nieuwe methode heeft invloed op de eisen die aan de waterkeringen worden gesteld en de methode van ontwerp en beoordeling van deze waterkeringen. Sinds de introductie van deze nieuwe normen is buitenwaartse macrostabiliteit een indirect faalmechanisme geworden. Met de eerder gebruikte berekeningsmethodes is veel ervaring opgedaan in de afgelopen 20 à 30 jaar. Sinds de invoer van de nieuwe normering, op 1 januari 2017, is de ervaring met omgang met deze nieuwe

methode nog niet toereikend. Dit onderzoeksproject zal daardoor bijdragen aan het vullen van dit gebrek aan ervaring.

Met een optimalisatie van de veiligheidsbeoordeling en het ontwerp van primaire waterkeringen aangaande macrostabiliteit buitenwaarts kan een verbeterd beeld gecreëerd worden van de toekomstige veiligheid van een waterkering. Als gevolg hiervan zullen de veiligheidsbeoordeling en dijkversterkingsprojecten beter aansluiten op de werkelijkheid. Het waterschap is benieuwd naar de mogelijkheden voor optimalisatie in ontwerp en veiligheidsbeoordeling en tot op welke hoogte dit mogelijk is. Deze optimalisatie kan verschillen per type dijklichaam en verscheidene randvoorwaarden. Vanwege deze redenen is het Waterschap Drents Overijsselse Delta benieuwd naar de mogelijkheden binnen haar eigen beheersgebied en wat de maatgevende aspecten hierin zijn.

Optimalisatie is voornamelijk relevant voor waterkeringen die nipt worden afgekeurd. Optimalisatie van de faalkanseis of de schematisatie kan er in deze gevallen toe leiden dat deze waterkeringen onterecht zijn afgekeurd door berekeningen met te conservatieve uitgangspunten. Door deze reden kan optimalisatie bijdragen aan het voorkomen van over-dimensionering en onnodige dijkversterkingsprojecten en daardoor leiden tot aanzienlijke kostenbesparing.

Met een beter begrip van het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts kan de schematisatie en de veiligheidsbeoordeling voor primaire waterkeringen worden verbeterd. Dit verbeterde beeld kan direct leiden tot aanpassingen in ontwerp en omgang met het faalmechanisme in projecten. Met deze voorkennis kunnen discussies en overhaaste beslissingen in de toekomst worden voorkomen en kunnen waterveiligheidsspecialisten direct aanpassingen maken binnen de schematisatie en de wettelijke beoordeling.

### 1.3. DOEL

Het doel van het onderzoek is het optimaliseren van de veiligheidsbeoordeling en de schematisatie van primaire waterkeringen met betrekking tot het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts. Optimalisatie in betekend in dit geval: onderbouwd afwijken van de standaardregels voor berekeningen, aannames en voorschriften om tot een accurater veiligheidsoordeel of ontwerp te komen. Dit draagt bij aan het overkoepelende doel dat waterkeringen voldoen aan de eisen op nationaal en projectniveau, waarbij over-dimensionering of onnodig dure maatregelen worden voorkomen.

De optimalisatie zal uiteindelijk resulteren in meerdere aanbevelingen voor situaties waarin macrostabiliteit buitenwaarts relevant is of niet. Als het relevant is, zullen meerdere opties worden gegeven voor verfijning van de veiligheidsbeoordeling of de schematisatie van de waterkering. Door middel van een kwantitatieve analyse van deze aanpassingen, zowel in schematisatie als veiligheidsbeoordeling, zal het effect van deze opties ter optimalisatie worden bepaald.

De optimalisatiemogelijkheden kunnen bestaan uit specifieke veranderingen in de schematisatie als ook aanbevelingen voor de veiligheidsbeoordeling van dijklichamen. Het totale doel is van toepassing voor de sector waterveiligheid in zijn geheel, maar zal uiteindelijk toespitsen op het beheersgebied van het Waterschap Drents Overijsselse Delta.

## 2. ONDERZOEKSVRAGEN

Met behulp van de probleemomschrijving en het theoretisch kader zijn de onderzoeksvragen opgesteld. De hoofdvraag luidt als volgt:

**Hoofdvraag:** *Hoe kan de faalkanseis en de schematisatie van het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts worden geoptimaliseerd?*

Deze hoofdvraag is verdeeld in verschillende deelvragen om tot een antwoord te komen voor de hoofdvraag. De deelvragen zijn als volgt gedefinieerd:

**Deelvraag 1:** *Welke problemen worden er nu al ervaren en wat zijn de tijdelijke maatregelen voor dijkherstel met betrekking tot macrostabiliteit buitenwaarts?*

**Deelvraag 2:** *Hoe kan de faalkanseis voor een dijktraject worden geoptimaliseerd aangaande macrostabiliteit buitenwaarts en wat is het effect van deze optimalisaties op de veiligheidsbeoordeling?*

**Deelvraag 3:** *Hoe kan de schematisatie van het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts worden geoptimaliseerd en wat is het effect van deze optimalisaties op de veiligheidsbeoordeling?*

**Deelvraag 4:** *Op basis van welke aspecten kan het beheergebied van WDODelta worden verdeeld in sub-gebieden rekening houdend met algemene karakteristieken en typische situaties voor het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts?*

### 3. PROCEDURE EN ONDERZOEKSMETHODES

De procedure binnen dit onderzoeksproject bestaat uit drie stappen. Deze bevatten verscheidene onderzoeksmethodes, waarbij diverse applicaties gebruikt worden. De drie stappen zijn als volgt:

1. Verzamelen van informatie via literatuuronderzoek en interviews
2. Het gebruiken van deze informatie als input voor modellering en het verkrijgen van aanbevelingen
3. Aanbevelingen specifiek maken voor het beheergebied van WDODelta

#### 1. VERZAMELEN VAN INFORMATIE VIA LITERATUURONDERZOEK EN INTERVIEWS

Als eerste binnen deze stap is een literatuuronderzoek uitgevoerd om de nieuwste kennis met betrekking tot macrostabiliteit buitenwaarts te verkrijgen. Na het vervaardigen van meer kennis over het onderwerp, hebben er interviews en overleggen plaatsgevonden met verscheidene experts op het gebied van waterveiligheid, zowel binnen de organisatie als daarbuiten. Deze experts zijn geïnterviewd via semigestructureerde interviews. Dit is gedaan omdat expertises binnen het onderzoeksbereik verzameld dienden te worden maar relevante aanvullingen zeker van toepassing kunnen zijn. Om deze reden zijn de interviews uitgevoerd als verkennende besprekingen waar antwoorden op de onderzoeksvragen als wel aanbevelingen voor verder onderzoek worden verkregen. Het hoofddoel van de interviews was voornamelijk het verzamelen van informatie van de huidige veiligheidsbeoordeling en schematisatie. Hier lag de nadruk op de manier van modelleren en de verschillen die hiertussen zijn. Daarnaast zijn aanbevelingen voor optimalisatie, en in welke situatie deze van toepassing zijn, verkregen. Na het afnemen van de interviews zijn de benodigde informatie en expertise gebundeld.

De interviews zijn afgenomen met onderstaande personen, waarbij er een format voor waterkeringbeheerders en een format voor specialisten waterveiligheid/geotechniek is gebruikt. Deze formats zijn te vinden in bijlage A.

- |                                    |                                     |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| - Frank Jansen (WDODelta)          | Waterkeringbeheerder                |
| - Marco de Wit (WDODelta)          | Waterkeringbeheerder                |
| - Bouke van Meekeren (Antea Group) | Externe adviseur waterveiligheid    |
| - Herman-Jaap Lodder (WSRL)        | Senior-adviseur geotechniek         |
| - Jan Blinde (Deltares)            | Senior-adviseur onderzoekinstelling |
| - Bas Effing (Rivierenland)        | Strategisch Technisch Manager       |
| - Jan Gruppen (WDODelta)           | Adviseur waterveiligheid            |

De resultaten van de literatuurstudie en de interviews zijn gebruikt om een antwoord op te stellen voor de onderzoeksvragen 1, 2 en 3 (gepresenteerd in hoofdstuk 2). Onderzoeksvraag 1 is hierna uitgewerkt in hoofdstuk 6. De verkregen resultaten en aanbevelingen voor onderzoeksvragen 1 en 2 zijn gebundeld en vormen de basis voor de analyse van het effect van aanpassingen in zowel faalkanseis als schematisatie.

#### 2. HET GEBRUIKEN VAN DEZE INFORMATIE ALS INPUT VOOR MODELLERING EN HET VERKRIJGEN VAN AANBEVELINGEN

Met de verzamelde informatie en expertises in het eerste deel van het onderzoeksproject zijn verschillende maatregelen/aanpassingen gemodelleerd en zekere aanbevelingen opgesteld. Ten behoeve van de faalkanseis is het effect van aanpassingen hierin kwantitatief weergegeven. Hiervoor zijn huidige berekeningen gebruikt om aanpassingen in te maken, waarbij vervolgens het effect van deze aanpassingen is aangetoond.

Voor aanpassingen in de schematisatie zijn algemene modellen voor dijkprofielen en ondergrond zullen gebruikt. Met algemeen wordt bedoeld dat de schematisatie van de dijklichamen die gebruikt worden fictieve dijklichamen zijn die zich op een willekeurige plaats in Nederland langs een rivier zouden kunnen bevinden, bijvoorbeeld zanddijken, kleidijken en zanddijken met een deklaag van klei. Deze profielen zijn opgesteld in samenspraak met waterveiligheidsspecialisten van WDODelta, waarbij

relevante profielen met betrekking tot het beheergebied van WDODelta zijn geschematiseerd. Via deze methode zijn verschillende typen dijkprofielen getest. Het effect van aanpassingen binnen de schematisatie is hiermee in kaart gebracht, waarbij een vergelijking is gemaakt met de huidige manier van schematiseren.

Via deze tweede fase binnen het onderzoek is antwoord verkregen op de onderzoeksvragen 2 en 3. Hierbij zijn de verkregen optimalisatiemogelijkheden uit de eerste fase geanalyseerd, waarbij het effect van aanpassingen in faalkanseis en schematisatie zijn aangetoond.

De volgende applicaties zijn binnen deze fase gebruikt:

- *D-Geo Stability versie 18.1*

De software van D-Geo Stability is ontwikkeld door Deltares om het ontwerp en de beoordeling van de stabiliteit van ophopingen op zachte ondergrond te bepalen (Deltares, 2016). Deze software is gebruikt om het effect van aanpassingen binnen de schematisatie op de stabiliteit van het dijkprofiel weer te geven.

- *Microsoft Excel 2013*

Binnen Microsoft Excel worden meerdere berekeningen gedaan en resultaten verwerkt in tabellen en grafieken voor o.a. aanpassingen van de faalkanseis, de schematisatie, het aantonen van verlopen van waterstanden en gegevens van het beheergebied van WDODelta.

### **3. AANBEVELINGEN SPECIFIEK MAKEN VOOR HET BEHEERSGEBIED VAN WDODELTA**

In samenwerking met experts binnen de organisatie en met behulp van literatuuronderzoek zijn aanbevelingen tot stand gebracht voor het Waterschap Drents Overijsselse Delta. Experts van WDODelta hebben de meeste kennis over hun beheergebied. Om deze reden zal samenwerking met hen een positief effect hebben op de kwaliteit van de te vormen aanbevelingen.

Deze derde fase binnen het onderzoek resulteert in een antwoord op de vierde deelvraag. Hierin is het gebied van WDODelta verdeeld op basis van relevante aspecten met betrekking tot de schematisatie en de faalkanseis. Ieder dijktraject heeft hierbij een score gekregen voor optimalisatiemogelijkheden, zowel voor de faalkanseis als de schematisatie.

De volgende applicaties zijn binnen deze fase gebruikt:

- *Waterstandsverloop*

Via de Waterstandsverlooptool wordt het verloop van een hoogwatergolf bepaald. De tool geeft het verloop van de waterstand op een bepaalde locatie over de tijd. Deze output kan vervolgens gebruikt worden voor de beoordeling van geotechnische faalmechanismen, zoals STBU (Helpdesk Water, 2019). Deze tool is gebruikt om een hoogwatergolf in kaart te brengen voor Kampen en voor Olst. Hierbij is het verschil in oploop van deze hoogwatergolf per locatie aangegeven. Daarnaast is deze tool gebruikt om de criteria voor de kans op een snelle val op te stellen.

- *ArcGis Basic*

Met ArcGis Basic is informatie ingewonnen over de primaire keringen van WDODelta waarna gewenste overzichtskaarten gemaakt zijn binnen deze applicatie.

- *Microsoft Excel 2013*

Zoals beschreven in stap 2.

## 4. THEORETISCH KADER

Dit theoretisch kader vormt de basis van het onderzoeksproject. In dit kader is het resultaat van de literatuurstudie macrostabiliteit buitenwaarts van primaire waterkeringen weergegeven.

### 4.1. HET FAALMECHANISME MACROSTABILITEIT BUITENWAARTS

Het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts is het faalmechanisme waarbij grote delen van het buitentalud van een dijklichaam afschuiven door een hoog waterniveau in het dijklichaam; de freatische lijn Figuur 2. Dit kan voorkomen na een lange periode van hoogwater waarbij vervolgens een snelle val optreedt van het buitenwater. Een andere reden voor deze hoge freatische lijn kan extreme neerslag zijn (Deltares, 2013).

Een dijklichaam faalt ten gevolge van macrostabiliteit buitenwaarts als een overstroming voorkomt binnen de hersteltijd van het beschadigde dijklichaam na afschuiving van grote delen van het buitentalud. Omdat het waterniveau aan de buitenzijde alweer is gedaald door een snelle val van het buitenwater, zal er geen direct hoger risico op overstroming optreden na een buitenwaartse instabiliteit. Sinds de nieuwe normering met de overstromingskansbenadering zoals beschreven in SHM (Deltares, 2015) en Bijlage III van het WBI 2017 (Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium) (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2017), wordt macrostabiliteit buitenwaarts beschouwd als een indirect faalmechanisme (Kennissplatform Risicobenadering, 2018).



Figuur 2: Afschuiving door instabiliteit van het talud (Helpdesk Water, 2019)

### 4.2. MACROSTABILITEIT BUITENWAARTS BINNEN DE TOTALE VEILIGHEIDSBEOORDELING

Waterveiligheidsspecialisten dienen de belangrijkste waterkeringen te beoordelen volgens de waterwet. De eerste toets ronde verloopt hierbij van 2017-2022. De tweede ronde en de opvolgende ronden duren vervolgens ieder 12 jaar. In 2017 zijn hiervoor de nieuwe normen opgesteld en is begonnen aan de beoordeling. In 2050 moeten alle waterkeringen voldoen aan deze nieuwe normen (Rijkswaterstaat, 2019).

Macrostabiliteit is een van vele faalmechanismen waarvoor een dijk kan falen. De veiligheidsbeoordeling van een dijk bestaat daarom uit een analyse van alle mogelijke faalmechanismen. Voor deze verschillende faalmechanismen wordt een faalkansbegroting opgesteld (Kennissplatform Risicobenadering, 2016). Een standaard faalkansbegroting is gegeven in het WBI 2017 en weergegeven in Tabel 1, deze kan onderbouwd project specifiek worden gemaakt voor een normtraject (Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, 2016). Via de faalkansbegroting is de faalkansnorm verdeeld over de verschillen faalmechanismen. Deze begroting wordt gebruikt om de faalkanseis per faalmechanisme te bepalen en speelt daardoor een rol binnen de bepaling van de geometrie van de dijk (Kennissplatform Risicobenadering, 2016).



Van een maximaal toelaatbare kans op overstromen naar een faalkans per faalmechanisme op doorsnede niveau gaat in twee stappen, waarbij voor STBU een derde stap is toegevoegd:

1. Bepalen van de faalkansbegroting om de faalkans per faalmechanisme voor het traject te bepalen;
2. Toepassen van de factor voor het lengte-effect om te komen van een faalkans per faalmechanisme per traject tot een faalkans per faalmechanisme per doorsnede;
3. Specifiek voor STBU wordt nog een factor toegevoegd vanwege betreffen indirect faalmechanisme.

De berekening van deze specifieke faalkans voor macrostabiliteit buitenwaarts per doorsnede, met het lengte-effect inbegrepen, is weergegeven in de volgende paragraaf.

**Tabel 1: Standaard faalkansbegroting volgens WBI 2017. De faalkansruimtefactor is weergegeven per faalmechanisme. Het type traject is altijd 'overig' als het traject zich niet langs de kust bevindt. De faalkansruimtefactor per faalmechanisme is de factor binnen de totale veiligheidsbeoordeling waarvoor het specifieke faalmechanisme mag falen. De faalkanseis per doorsnede voor een faalmechanisme wordt bepaald met behulp van de faalkansruimtefactor. (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2017)**

Type waterkering	Faalmechanisme	Type traject	
		Zandige kust	Overig (dijken)
<b>Dijk</b>	Overloop en golfoverslag	0,0	0,24
	Opbarsten en piping	0,0	0,24
	Macrostabiliteit binnenwaarts	0,0	0,04
	Beschadiging bekleding en erosie	0,0	0,10
<b>Kunstwerk</b>	Niet sluiten	0,0	0,04
	Piping	0,0	0,02
	Constructief falen	0,0	0,02
<b>Duin</b>	Duinafslag	0,70	0,0 / 0,10*
<b>Overig</b>		0,30	0,30 / 0,20*
<b>Totaal</b>		1,0	1,0

\*Voor trajecten die gedeeltelijk bestaan uit duinen, zal duinerosie vaak een relatief kleine faalkansbijdrage leveren. Daarom wordt 10% van de categorie 'overig' toegewezen aan duinafslag in deze gevallen.

#### 4.3. DE VEILIGHEIDSBEOORDELING VOOR MACROSTABILITEIT BUITENWAARTS

De beoordeling van het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts bestaat uit verschillende stappen. Deze stappen zijn in kaart gebracht door middel van de handleiding voor schematisatie van macrostabiliteit (Deltares, 2015), het rapport voor sterkte en veiligheid van primaire waterkeringen (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2017) en het logboek van de veiligheidsbeoordeling van dijktraject 9-1, Vecht Noord van het Waterschap (Waterschap Drents Overijsselse Delta, 2018). Het stappenplan ziet er als volgt uit:

##### 1. BEPALEN VAN DE HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN

De hydraulische randvoorwaarden zijn benodigd voor het uitvoeren van de veiligheidsbeoordeling. Deze randvoorwaarden bepalen o.a. de maatgevende waterniveaus, golfcondities en het maximum toelaatbaar overslagdebiet.

Binnen de beoordeling van buitenwaartse macrostabiliteit zijn er drie belastingsituaties te onderscheiden (Deltares, 2015):

- I. Een snelle val van de buitenwaterstand na een voorafgaand hoogwater, waarbij de freatische lijn in het dijklichaam verhoogd is gebleven.
- II. Een verhoogde freatische lijn in het dijklichaam veroorzaakt door extreme neerslag in combinatie met een gemiddelde laagwaterstand (GLW) van het buitenwater.
- III. Een normale freatische lijn in de dijk in combinatie met een laagwaterstand die eens per 10 jaar wordt onderschreden ( $LW_{1/10 \text{ jaar}}$ )

## 2. SCHEMATISATIE VAN DE GEOMETRIE

De schematisatie van de waterkering is noodzakelijk voor het opstellen van de dijkvakindeling, welke wordt gebruikt als basis voor de veiligheidsbeoordeling

## 3. BEPALEN VAN DE DIJKVAKKEN

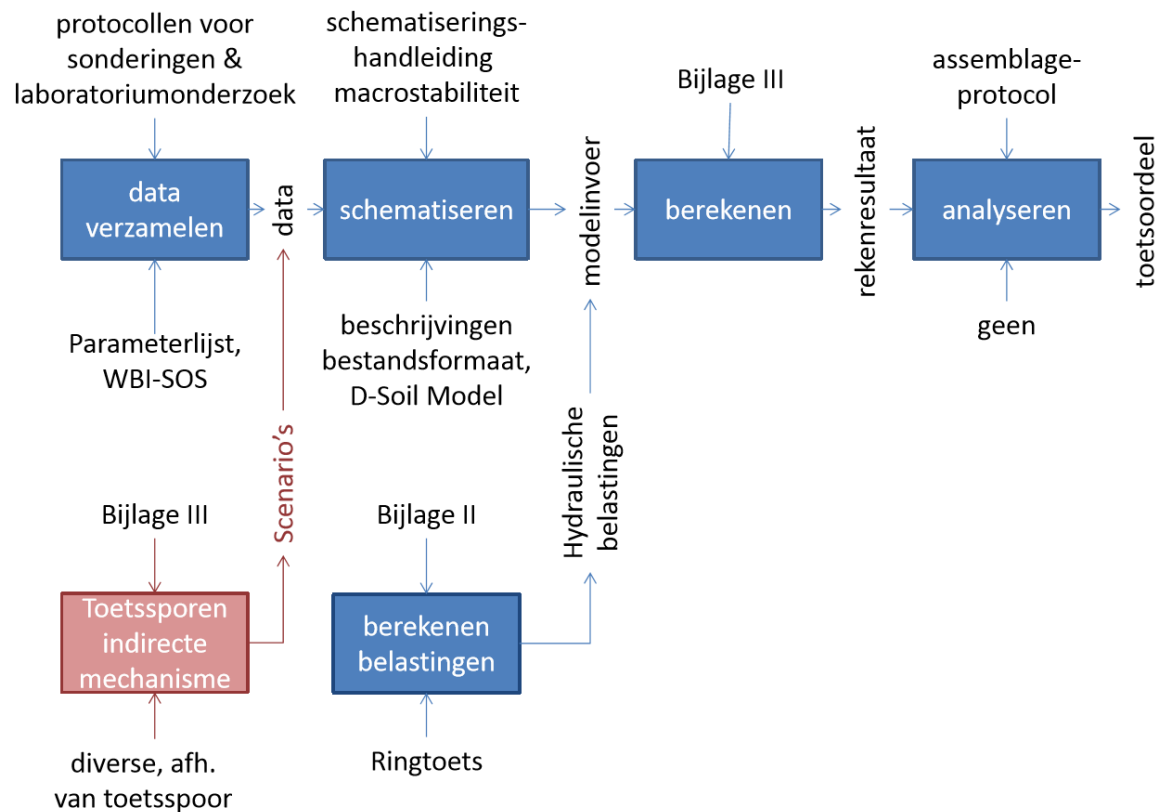
Het totale dijktraject om te ontwerpen of te beoordelen wordt opgesplitst in verschillende dijkvakken. Deze verdeling is gebaseerd op karakteristieken in de geometrie van het dijktraject.

## 4. DE VEILIGHEIDSBEOORDELING

- Eenvoudige toets
- Gedetailleerde toets
- Toets op maat

Het totale toets traject voor buitenwaartse macrostabiliteit (STBU) is weergegeven in Figuur 3.

### Werkproces toetspoor STBU

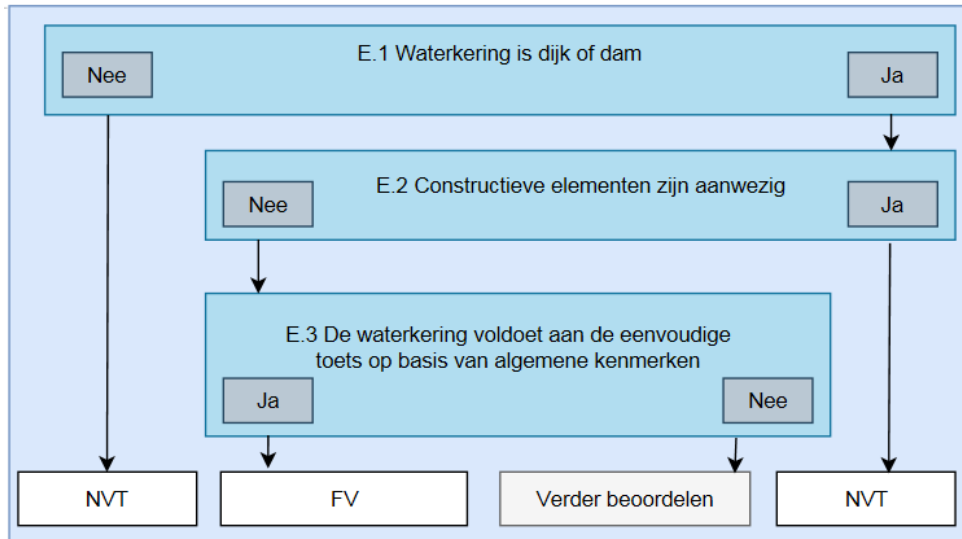


Figuur 3: Werkproces toets spoor STBU (Helpdesk Water, 2019)

#### a. Eenvoudige toets

De eerste stap binnen de veiligheidsbeoordeling is de eenvoudige toets, weergegeven in Figuur 4. Deze test bestaat uit de volgende twee stappen:

- E.1 en E.2: Relevantietoets op basis van het type waterkering;
- E.3: Toets op basis van algemene karakteristieken.
  - Op basis van contourplots, Bijlage III Sterkte en veiligheid pagina 29 (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2017).



Figuur 4: Schema eenvoudige toets macrostabiliteit buitenwaarts (STBU) (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2017)

*b. Gedetailleerde toets*

Als de conclusie van de simpele toets is dat het desbetreffende dijkvak verdere beoordeling vereist, zal de gedetailleerde toets worden uitgevoerd. Deze gedetailleerde toets bestaat uit de volgende twee stappen:

- G.1: Voldoen aan toets condities voor sterkte-berekeningsmodel;
- G.2: Analyse van belasting en sterkte.

G.1. Voldoet als het dijktraject vrij is van constructieve elementen. In G.2 kan een glijvlakanalyse worden uitgevoerd met behulp van o.a. D-Geo Stability.

In de gedetailleerde toets wordt de faalkans per doorsnede bepaald op basis van de berekende stabiliteitsfactoren per scenario. Hierin is de volgende relatie tussen faalkans en stabiliteitsfactor van toepassing:

$$P_{f,i} = \Phi \left( -\frac{\left(\frac{F_{d,i}}{\gamma_d}\right) - 0.41}{0.15} \right) \quad (1)$$

Waar:

- $\Phi$  = Standaard (cumulatieve) normale verdeling [-]
- $F_{d,i}$  = Berekende stabiliteitsfactor voor scenario  $i$  [-]
- $\gamma_d$  = Modelfactor [-]
- $P_{f,i}$  = Faalkans voor scenario  $i$  [1/jaar]

Om tot een faalkans per doorsnede te komen, moet de faalkans per scenario worden vermenigvuldigd met de kans op dat scenario. Dat product moet voor alle scenario's worden gesommeerd.

$$P_{f,dsn} = \sum_{i=1}^n P(S_i) * P_{f,i} \quad (2)$$

Waar:

- $P_{f,dsn}$  = Faalkans per doorsnede [1/jaar]
- $P(S_i)$  = Kans van voorkomen van een scenario  $i$  [-]
- $P_{f,i}$  = Faalkans bij scenario  $i$  [1/jaar]

De faalkanseis per doorsnede wordt bepaald met de norm voor het dijktraject ( $P_{eis}$ ). Omdat buitenwaartse macrostabiliteit een indirect faalmechanisme betreft, wordt er standaard met een factor 10 grotere faalkans berekend in vergelijking met de toets sporen voor directe mechanismen. De faalkanseis per traject is daarom  $\omega(10 * P_{eis})$  met  $\omega = 0.04$ . De faalkanseis per doorsnede waaraan voldaan moet worden wordt bepaald met de volgende formule:

$$P_{eis,dsn} = \frac{\omega(10 * P_{eis})}{N_{dsn}} \quad (3)$$

Waar:

- $P_{eis,dsn}$  = Faalkanseis per doorsnede [1/jaar]
- $\omega$  = Faalkansruimtefactor (0,04) [-]
- $N$  = Factor voor het lengte-effect [-]

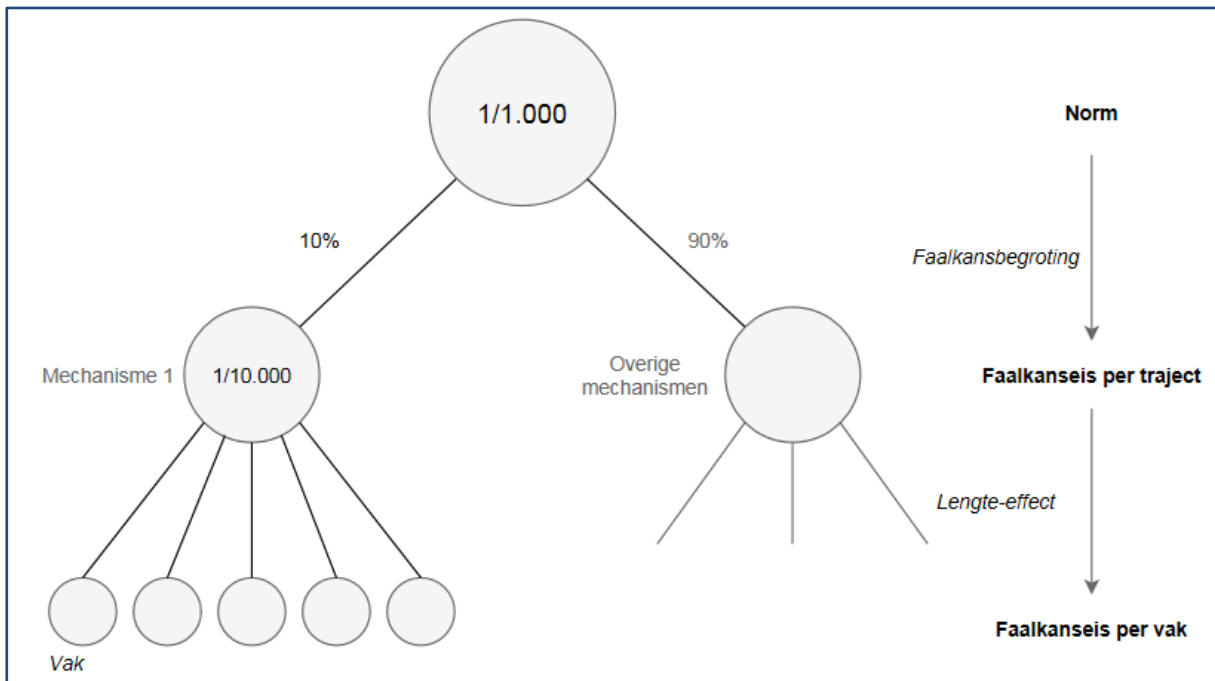
Binnen de berekening voor de faalkanseis per doorsnede wordt gebruik gemaakt van de factor voor het lengte-effect. Deze factor wordt gebruikt omdat de kans dat ergens in een dijkkring de dijk faalt groter is dan de kans dat de dijk faalt op een specifieke plek, omdat de sterkte onzeker is en ruimte variabel is (Kennissplatform Risicobenadering, 2016). Deze factor voor het lengte-effect kan bepaald worden met de volgende formule:

$$N_{dsn} = 1 + \frac{a_1 * L_{traject}}{b_1} \quad (4)$$

Waar:

- $a_1$  = Mechanismegevoelige fractie van de dijktrajectlengte [-]
- $b_1$  = Lengtemaat die de intensiteit van het lengte-effect weergeeft binnen de mechanismegevoelige lengte van het dijktraject [m]
- $L_{traject}$  = Lengte van het dijktraject zoals vastgelegd in de Waterwet [m]

Een overzicht van de bepaling van de faalkanseis per doorsnede is weergegeven in Figuur 5.



Figuur 5: Schematische weergave van de bepaling van de faalkanseis per doorsnede (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2017)

Met de faalkanseis per doorsnede voor buitenwaartse macrostabiliteit kan de schadefactor voor het faalmechanisme bepaald worden middels de volgende formule:

$$\gamma_n = 1 + 0.15\beta_{eis,dsn} + 0.41 \quad (5)$$

Met:

$$\beta_{eis,dsn} = -\Phi^{-1}(P_{eis,dsn}) \quad (6)$$

Waar:

- $\gamma_n$  = Schadefactor voor macrostabiliteit buitenwaarts [-]
- $\beta_{eis,dsn}$  = Geëiste betrouwbaarheidsindex voor een doorsnede [-]
- $P_{eis,dsn}$  = Eis aan de kans op falen per doorsnede als gevolg van macro-instabiliteit buitenwaarts [1/jaar]

De uiteindelijke stabiliteitstoets is afhankelijk van vier factoren: de schadefactor, de modelfactor, de materiaalfactor en de schematiseringsfactor.

$$F_d \geq \gamma_n * \gamma_d * \gamma_m * \gamma_b \quad (7)$$

Waar:

- $F_d$  = De stabiliteitsfactor, berekend met rekenwaarden voor de schuifspanning (Karakteristieke warden gedeeld door de materiaalfactoren  $\gamma_m$ ) [-]
- $\gamma_n$  = Schadefactor voor het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts [-]
- $\gamma_d$  = Modelfactor [-]

Binnen deze berekening zijn de vier factoren als volgt gedefinieerd en conform het WBI2017 (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2017) en TRGS (Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren) (Expertisenetwerk Waterveiligheid, 2012):

- De schadefactor ( $\gamma_n$ ) is hierboven berekend
- De modelfactor ( $\gamma_d$ ) is afhankelijk van het type glijvlakmodel (Tabel 2)

Tabel 2: Modelfactoren per glijvlakmodel

Glijvlakmodel	Modelfactor
<b>Bishop</b>	1,11
<b>LiftVan</b>	1,06
<b>Spencer-Van der Meij</b>	1,07

- Alle materiaalfactoren ( $\gamma_m$ ) zijn gelijk aan 1,0 voor berekeningen met het CSSM (Critical State Soil Mechanics) model.
- De schematiseringsfactor ( $\gamma_b$ ) is gelijk aan 1,0. Deze is gelijk aan 1,0 omdat de onzekerheid van de ondergrond al verdisconteerd zit doordat meerdere scenario's voor de ondergrond worden doorgerekend.

### c. Toets op maat

Wanneer de resultaten van de gedetailleerde toets voor het faalmechanisme niet voldoen aan de eisen voor dit faalmechanisme, is het mogelijk over te gaan op een toets op maat. Verdere analyse kan in dit geval bestaan uit het uitvoeren van een model met de eindige elementen methode of berekeningen met de reststerkte van de waterkering (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2017).

### 4.3.2. GEDRAINEERD/ONGEDRAINEERD REKENEN

Sinds de invoering van de nieuwe normering is er begonnen met het ongedraineerd doorrekenen van slecht doorlatende grondlagen binnen de stabiliteitsbeoordeling (Deltares, 2015). Binnen de berekening worden grondsoorten met een hoge doorlatendheid, zoals zand, gedraineerd berekend en grondsoorten met een lage doorlatendheid, zoals klei en veen, ongedraineerd. Dit heeft te maken met de mate van drainage tijdens afschuiven (Deltares, 2015).

Via deze ongedraineerde rekenmethode worden waterspanningen die in de grond gegenereerd worden in rekening gebracht wanneer de schuifweerstand van de grond wordt gemobiliseerd en de grond deformeert. Deze gegenereerde waterspanningen reduceren de schuifsterkte van de grond.

Aan de basis van dit ongedraineerd rekenen staan het critical state soil mechanics (CSSM) model (Schofield & Wroth, 1968) en de Stress History And Normalized Soil Engineering Properties (SHANSEP) methode. Het CSSM-model vervangt hiermee het Mohr-Coulomb model dat eerder gebruikt werd voor waterkeringen. Met de SHANSEP-methode wordt de historische belasting van de grond bepaald en in rekening gebracht (Ladd & Foott, 1974).

## 5. INTERVIEWANALYSE

De afgenomen interviews zullen in dit hoofdstuk met elkaar worden vergeleken en de belangrijkste bevindingen zullen op een rij worden gezet. De interviewverslagen zijn te vinden in het los geleverde document 'Interviewverslagen'. De gebundelde antwoorden per interviewvraag zijn te vinden in bijlage B Antwoorden per interviewvraag.

### 5.1. VERKREGEN AANBEVELINGEN

Onderstaand zijn de belangrijkste aanbevelingen voor optimalisatiemogelijkheden weergegeven. Deze aanbevelingen vormen de basis voor de hoofdstukken 0 en 8 met betrekking tot de faalkanseis en de schematisatie.

#### **AANBEVELINGEN VOOR OPTIMALISATIE VAN DE FAALKANSEIS**

De faalkansruimtefactor voor macrostabiliteit binnen de totale faalkansbegroting is aan te passen. Deze is alleen aan te passen voor STBU door deze te ruilen met piping, dit kan echter alleen voor het gehele traject, niet verschillend per dijkvak.

De default waarde van 10% kans op een hoogwater binnen de hersteltijd van het afgeschoven dijkvak kan waarschijnlijk stukken kleiner. Van deze 10 procent wordt op dit moment bekeken of hier 1% of zelfs 0,1% van gemaakt kan worden. Hierbij moet wel aangetoond kunnen worden dat er voldoende reparatiecapaciteit aanwezig is, zowel in de vorm van materiaal als mankracht, voor tijdelijke herstelmaatregelen. Daarnaast ontbreekt er een statistische onderbouwing van de conditionele faalkans, wat wel kan bijdragen aan de begripsvorming van deze faalkans.

#### **AANBEVELINGEN VOOR OPTIMALISATIE VAN DE SCHEMATISATIE**

Het verloop van de freatische lijn kan grote invloed hebben op de beoordeling, echter is deze zeer lastig te bepalen en vereist dit langdurige metingen. Zowel de ligging van de freatische lijn als de mate van verzadiging is hierbij relevant. Op dit moment wordt uitgegaan van een stationaire waterstand waarbij de dijk wel verzadigd bij een hoogwater maar niet weer leegloopt na een val van hoog water.

De snelle val van het buitenwater verdient ook aandacht. Een snelle val van het buitenwater wordt verschillend gedefinieerd. Dit hangt af van het type gebied. Bij een storm gedomineerde situatie zal een snelle val kunnen optreden in termen van uren. Bij een benedenrivierengebied gaat de op- en afloop van een hoogwatergolf in termen van weken en zal een snelle val alleen kunnen optreden als dijken bezwijken. In sommige situaties is het daarom de vraag of een snelle val überhaupt kan optreden.

De verkeersbelasting wordt op dit moment vrij extreem meegenomen in de beoordeling van STBU. Deze zou wellicht anders geschematiseerd kunnen worden. Ook kan gedacht worden aan beleidsmaatregelen als het weigeren van vrachtwagens in bepaalde kritieke situaties.

Grensspanningen zouden ook kunnen bijdragen. Deze grensspanningen vertellen de voorgeschiedenis van de grond. Het is echter lastig te zeggen wat de grensspanning is en hoe deze verloopt over de dijk.

Daarnaast kan het voorland effect hebben op de sterkte van de dijk. Bij het traject Zwolle-Olst valt het voorland droog in de zomer wat zeer waarschijnlijk een positief effect heeft op de sterkte van de dijk. Doordat de toplaag door het jaar te maken krijgt met zowel droogte als hoogwater zal deze laag zowel scheurvorming vertonen als compleet verzadigd zijn. De weerbaarheid van deze laag zal hierdoor toenemen, wat een positief effect heeft op de sterkte. Op dit moment wordt er echter weinig sterkte aan de dijk toegekend bij lage spanningen. Volgens senior adviseur geotechniek Herman-Jaap Lodder is het waarschijnlijk dat deze sterkte niet zo laag hoeft te zijn als waarmee geschematiseerd wordt. Verder gaf adviseur waterveiligheid Jan Gruppen aan dat het hem niet zou verbazen als de s-ratio, de stabiliteit van de klei, van grote invloed zou zijn op de beoordeling.

## 5.2. OVEREENKOMSTEN EN VERSCHILLEN

Naast de verkregen aanbevelingen zijn de overeenkomsten en verschillen tussen waterschappen en tussen waterkeringbeheerders en specialisten waterveiligheid/geotechniek in kaart gebracht.

### VERSCHILLEN EN OVEREENKOMSTEN TUSSEN WATERSCHAPPEN

#### - *Verschillen*

Waterschap Rivierenland gaat uit van een hoge grondwaterstand het hele jaar door, waar WDODelta ervan uitgaat dat de grondwaterstand daalt in de zomer. Dit komt doordat dijken binnen het gebied van WDODelta voornamelijk bestaan uit zand of een doorlatende soort klei. Bij rivierenland zijn er dijken met een dikke ondoorlatende kleidijk, wat ervoor zorgt dat verschillen in de grondwaterstand miniem zijn gedurende het jaar.

Bij WDODelta wordt aangegeven dat bereikbaarheid meespeelt in de mogelijkheden tot aanscherpen van de conditionele faalkans. Waterschap Rivierenland geeft aan dit geen issue te vinden aangezien al hun dijken een weg bovenop de kruin hebben en verder geen tot weinig bebouwing op de dijk hebben. Ook zonder weg zou volgens hen de dijk vaak goed te bereiken zijn via het achterland.

#### - *Overeenkomsten*

Door alle specialisten werd aangegeven dat het formele uitgangspunt is dat de freatische lijn niet zakt na een val van hoog water. Dit is misschien niet het geval in de realiteit, maar in veel gevallen niet met zekerheid te zeggen.

### VERSCHILLEN EN OVEREENKOMSTEN TUSSEN WATERKERINGBEHEERDERS EN SPECIALISTEN WATERVEILIGHEID/GEOTECHNIEK

#### - *Verschillen*

Waterkeringbeheerders zien weinig verschillen in omgang met STBU ten opzichte van vroeger, waar specialisten hier wel een aantal verschillen opmerken. Omdat deze verschillen plaatsvinden binnen de beoordeling en het ontwerp krijgen keringbeheerders hier niet veel mee te maken. Vandaar dat zij deze verschillen waarschijnlijk niet opmerken.

#### - *Overeenkomsten*

Specialisten en beheerders hebben vrijwel dezelfde tijdelijke herstelmaatregelen in gedachten. Hierbij geven veel specialisten aan dat het best de beheerder gevraagd kan worden. De beheerders noemden in principe dezelfde maatregelen, maar wel in meer detail en met kennis over innovatieve maatregelen.

Daarnaast gaven zowel de beheerders als de specialisten aan geen tot weinig ervaring te hebben met een snelle val van het buitenwater na een periode van hoogwater.



## 6. HUIDIGE ONGANG MET MACROSTABILITEIT BUITENWAARTS

### 6.1. VOORGEKOMEN PROBLEMEN MET MACROSTABILITEIT BUITENWAARTS

#### 6.1.1. PROBLEMEN IN DE PRAKTIJK

Vanuit literatuur en de interviews is gebleken dat er tot op heden weinig problemen in de praktijk zijn voorgekomen met betrekking tot macrostabiliteit buitenwaarts. Echter vonden er wel een aantal buitenwaartse afschuivingen plaats, welke in deze paragraaf beknopt worden weergegeven.

##### - WILNIS

Vanuit de interviews met Bouke van Meekeren en Jan Blinde werd aangegeven dat er een kadebreuk met afschuiving als gevolg heeft plaatsgevonden bij Wilnis.

Op 26 augustus 2003 vond er bij Wilnis, een dijkdoorbraak plaats van een veenkade langs het kanaal (Wikipedia, 2019). Dit had niet zozeer met hoge waterstanden te maken, maar juist met extreme uitdroging van het veen. Hierdoor begon de kade scheurvorming te vertonen en brak er vervolgens een stuk af van zo'n 60 meter in lengte. Het water in het kanaal duwde de grond opzij en zette vervolgens een hele woonwijk onder water, waardoor zo'n 1500 mensen moesten evacueren. Doordat de veenkade doorbrak en er snel veel water uit het kanaal stroomde, traden er in een hoger gelegen deel ten zuiden van de veenkade verzakkingen op. Hierbij braken gas-, water-, en elektriciteitsleidingen (Middendorp, 2019).

##### - REEVEDIEP

In het interview met waterkeringbeheerder Marco de Wit kwam naar voren dat er een afschuiving heeft plaatsgevonden tijdens werkzaamheden van het Ruimte voor de Rivier project IJsseldelta – Reevediep. Er trad hier een afschuiving op van het talud van de zuidelijke Reevediep dijk. Hierbij werd de sloot in het achterland dichtgedrukt en ontstond er golfvorming in het land achter de sloot (Figuur 6).



Figuur 6: Lichte afschuiving tijdens werkzaamheden Reevediep. Linksboven: dichtgedrukte sloot; rechtsboven: golfvorming land achter sloot en onder: lichte afschuiving

Naast deze twee voorbeelden hebben er in het verleden nog een aantal afschuivingen plaatsgevonden. Tijdens hoogwater in 1993 (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1993) en 1995 (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1995) hebben er meerdere afschuivingen van het buitentalud plaatsgevonden (Figuur 7). Daarnaast waren er veel plekken met dijkbeschadiging aan het buitentalud door bijvoorbeeld drijf hout, echter ligt dit buiten de definitie van STBU. Na de afschuivingen hebben er geen grote problemen plaatsgevonden, doordat vrijwel direct tijdelijke maatregelen genomen konden worden.



Figuur 7: Ongeveer twee dagen nadat de topafvoer gepasseerd was, is het buitentalud van de Rijnbandijk bij Ingen verzakt. Vervolgens is deze versterkt met zandzakken.

In Utrecht stortte in oktober 2013 een deel van de kademuur van de bemuurde Weerd in. Hierbij verzakte de kade aan de buitenwaartse zijde (DUIC, 2013).

Keringbeheerder Frank Jansen gaf in zijn interview aan dat hij samen met een collega in Amerika is geweest om ervaringen te delen. Hier was het voorkomen van een grote afschuiving geen zeldzaam fenomeen. De reden hiervoor is dat in de Verenigde Staten kleidijken worden opgebouwd uit klei die rechtstreeks werd afgegraven uit de uiterwaarden. Deze klei is van slechte kwaliteit en daardoor zeer plastisch, wat de kans op het ontstaan van afschuivingen aanzienlijk verhoogd.

#### 6.1.2. PROBLEMEN BINNEN DE BEOORDELING EN HET ONTWERP

Sinds de intrede van de nieuwe normering in 2017 en de overgang van gedraineerd naar ongedraineerd rekenen worden er veel trajecten afgekeurd op buitenwaartse macrostabiliteit. Met de oude methode was dit nog niet het geval. Doordat er veel trajecten worden afgekeurd betekent het dat er van veel van deze trajecten een project binnen het HWBP (Hoogwaterbeschermingsprogramma) wordt gemaakt (Hoogwaterbeschermingsprogramma, 2014). Om de buitenwaartse stabiliteit te verbeteren worden in veel gevallen grote buitenbermen toegepast. Dit zijn bermen tot wel 10 meter in doorsnede, waar vroeger een berm van zo'n 5 meter vaak al voldeed om de stabiliteit te verbeteren. Deze bermen brengen veel kosten met zich mee. De vraag is echter of deze maatregelen tot stand zijn gekomen door een te conservatieve manier van beoordelen. Er zijn namelijk nooit grote problemen geweest met STBU in de tijd dat de oude methode werd gebruikt. Echter worden de belastingen op waterkeringen wel groter door invloed van klimaatverandering. Het zou daardoor wel kunnen dat deze stabiliteitsbermen in de toekomst zeker nodig zijn.

#### 6.2. TIJDELIJKE MAATREGELEN NA EEN BUITENWAARTSE AFSCHUIVING

Na afschuiven van het buitentalud zijn er verscheidene opties om het dijklichaam tijdelijk te herstellen. De toe te passen maatregel is echter sterk afhankelijk van een aantal aspecten:

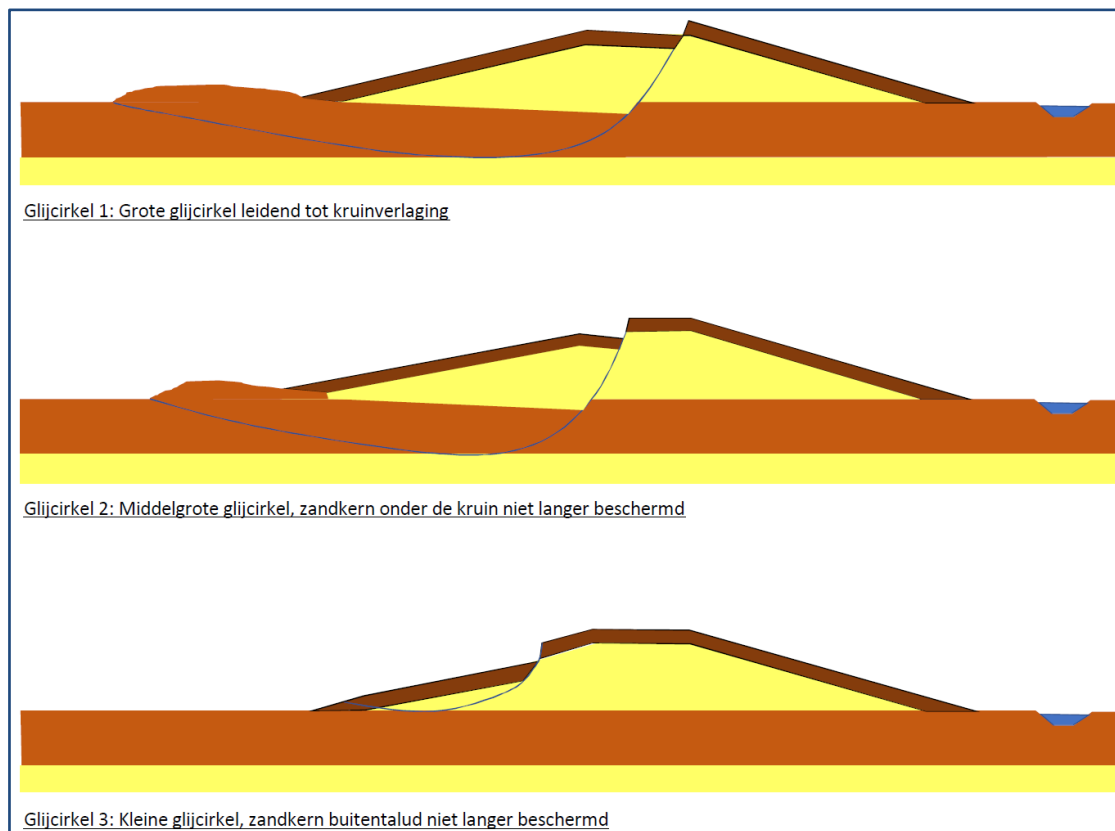
##### - TYPE AFSCHUIVING

Bij een afschuiving van het buitentalud zijn er verschillende scenario's mogelijk. Hierin zijn onder andere de volgende drie types te onderscheiden:

1. Grote glijcirkel leidend tot kruinverlaging (Figuur 8, glijcirkel 1);
2. Middelgrote glijcirkel, zandkern onder de kruin niet langer beschermd (Figuur 8, glijcirkel 2);

3. Kleine glijcirkel, zandkern buitentalud niet langer beschermd (Figuur 8, glijcirkel 3).

Afhankelijk van het type afschuiving dient bijvoorbeeld de kruin wel of niet verhoogd te worden of de kern afgedekt te worden (Kennisplatform Risicobenadering, 2019).



Figuur 8: Type afschuiving (Kennisplatform Risicobenadering, 2019)

- **GROOTTE VAN DE AFSCHUIVING**

De grootte van de afschuiving is met name van invloed op de reststerkte van het overgebleven dijkprofiel. Wanneer slechts een kleine afschuiving heeft plaatsgevonden, zou het overgebleven dijkprofiel voldoende sterk kunnen zijn om een volgende hoogwatergolf te keren. Heeft er echter een grote afschuiving plaatsgevonden, dan kan het overgebleven dijkprofiel dusdanig zijn verzwakt dat het niet meer in staat is een hoogwater te keren. Voor dit laatste scenario is dus een sterkere herstelmaatregel benodigd.

- **KANS OP EEN TWEDE HOOGWATER/URGENTIE**

De kans dat er op korte termijn een tweede hoogwater optreedt is zeer relevant voor het te nemen herstelmaatregel. Wanneer dit al de dag na de afschuiving zou kunnen plaatsvinden is de urgentie erg groot om zeer snel een tijdelijke maatregel toe te passen. Wordt deze kans miniem bevonden dan is er minder haast bij deze maatregel. Deze urgentie kan van invloed zijn op het type maatregel dat wordt toegepast. Bij hoge urgentie zal namelijk een maatregel toegepast moeten worden die ook daadwerkelijk snel bewerkstelligd kan worden.

Uit interviews met de waterkeringbeheerders Marco de Wit en Frank Jansen bleek dat over het algemeen herstelmaatregelen zeer snel uit te voeren zijn, mocht de urgentie hiertoe groot zijn. Hierbij kan voor een kleine afschuiving gedacht worden aan een dag, maar bij een grote afschuiving toch al wel aan een aantal dagen tot een week.

- **BEREIKBAARHEID**

De toe te passen maatregel is in mindere mate ook afhankelijk van de bereikbaarheid van de calamiteit. Wanneer de dijk niet te bereiken is met grof materiaal zullen bijvoorbeeld big bags minder makkelijk vervoerd kunnen worden. Strategisch Technisch Manager Bas Effing gaf in zijn interview aan dat het in deze situaties wel het geval kan zijn dat de dijk via het achterland te bereiken is door rijplaten neer te

leggen. Hierdoor is vervoer van materieel wel uitvoerbaar, maar zal het langer duren voordat de tijdelijke maatregel bewerkstelligd is.

---

### 6.2.1. HUIDIGE PROCEDURE EN MAATREGELEN

Via literatuur en de semigestructureerde interviews met zowel de specialisten waterveiligheid en geotechniek als de waterkeringbeheerders zijn de huidig tijdelijke maatregelen in kaart gebracht. Met de keringbeheerders van WDODelta is nader besproken wat binnen WDODelta de procedure bij calamiteiten inhoudt en welke innovaties er plaatsvinden op dit gebied.

De huidige methodes en materialen, volgens de interviews en Wiki Noodmaatregelen (Deltares, 2019) die worden toegepast na een buitenwaartse afschuiving zijn als volgt:

1. Leggen van geotextiel over de kuil met onderaan en bovenop de kruin stenen op het geotextiel.
2. Grond van het talud wordt afgestort door het in de kuil te gooien die de afschuiving heeft veroorzaakt. Hier kan ook stortmateriaal voor gebruikt worden. Met deze methode maak je het buitentalud verflauwd en de afschuiving opgevuld.
3. Aan de binnenzijde kan een restprofiel gebouwd worden.
4. Toepassen van big bags
5. Plaatsen van zandzakken (wel vrij zwak)
6. Zand met bekramming eroverheen
7. Damwanden
8. Zeilen
9. Het plaatsen van waterdichte zeilen en deze volplaatsen met big bags.

Bij het toepassen van de herstelmaatregel dient vanuit de onderkant te worden gestabiliseerd. Wanneer dit niet mogelijk is, is het tenminste van belang om het ontstane gat na afschuiving op te vullen. Op deze manier zal niet nog meer grond wegstromen (Deltares, 2019).

De materialen, procedure en innovaties binnen WDODelta zien er als volgt uit:

#### - **MATERIAAL**

Binnen het gebied van WDODelta zijn er een aantal dijkmagazijnen aanwezig, zoals bij Tastveld en Grafhorst. Hier ligt vrij veel materiaal op voorraad om tijdelijke maatregelen uit te kunnen voeren. Meer dan honderden meters kering kunnen hiermee versterkt worden. Dit gaat wel tot zo'n 2 kilometer te repareren kering per dijkmagazijn. In een dijkmagazijn liggen 20.000 zandzakken op voorraad. Mocht dit onvoldoende blijken, dan is er een zandzak-vulmachine aanwezig waarmee in korte tijd extra zandzakken bijgemaakt kunnen worden. Materialen die op voorraad liggen binnen de dijkmagazijnen bestaan uit:

1. Zandzakken
2. Worteldoek
3. Bekramming
4. Pennen
5. Draad
6. Big bags

#### - **MANKRACHT EN OEFENING**

Binnen eigen dienst van het waterschap zijn er meerdere werknemers die vrij snel ter plekke kunnen zijn bij calamiteiten. Zij kennen het gebied goed en weten daardoor snel waar ze moeten zijn. Mocht de eigen dienst niet toereikend zijn dan wordt hulp ingeschakeld van een aannemer. Hierbij blijft de aansturing vanuit de eigen dienst. Collega's binnen deze buitendienst worden jaarlijks intern getraind. Dit gebeurt zowel in de praktijk in de vorm van het plaatsen van zandzakken, bekramming en zeil als in theorie door het opleiden voor aansturing.

Bij hoogwater vindt er dagelijkse monitoring plaats. Mocht de interne monitoring niet afdoende zijn bij geval van hoogwater, dan kan beroep gedaan worden op het dijkleger. Dit leger bestaat uit 600 vrijwilligers, waarvan veel affiniteit hebben met water. Dit kunnen zowel mensen zijn die dichtbij een

kering wonen als mensen die werkzaam zijn bij ingenieursbureaus. Binnen dit team met vrijwilligers moet iedereen binnen 2 jaar getraind zijn en een certificaat behalen. Anders wordt men uit het team verwijderd.

Een ander voorbeeld is de samenwerking in geval van calamiteiten bij Kamper-Midden. Bij dit traject is een team van 200 vrijwilligers actief. Er is jaarlijks een oefening in september waarbij het team vrijwilligers in sub-teams oefent met het plaatsen van de tijdelijke kering. Hierbij worden tijdelijke waterkeringen gebouwd met bijvoorbeeld schotbalken en klepkeringen uit het wegdek.

Bij speciale gevallen wordt ook de hulp ingeschakeld van defensie. Deze leveren mankracht en materialen zoals zandzakken en graafmachines en kunnen helpen bij inspecties.

#### - INNOVATIE

Op dit moment wordt gewerkt aan een landelijke standaard voor werkinstructies. Bijvoorbeeld instructies voor het leggen van bekramming of het leggen van zeilen. Via deze landelijke standaard kan beter samengewerkt worden indien nodig.

Qua nieuwe initiatieven wordt er op dit moment getest met een nieuw soort doek voor bekramming. Het traditionele doek met zandzakken is werkt goed maar is erg bewerkelijk. Transporteren van het materiaal vergt hierbij ook vrij veel tijd en moeite. Het nieuwe doek dat getest wordt kan waarschijnlijk gebruikt worden zonder zandzakken en er is ook geen draad benodigd om het doek te spannen doordat het doek zelf al een structuur heeft die hiervoor zorgt. Wel zijn er wat meer pennen nodig om het vast te zetten, maar het doek is stukken lichter en gemakkelijker te vervoeren. In een bocht bij de vecht zijn drie typen bekrammingen getest door deze te spannen op een oever (Figuur 9). Vervolgens stroomt hier de hele zomer water langs.

Daarnaast wordt geprobeerd theorie en praktijk dichter bij elkaar te brengen. Specialisten rekenen alles door en keringbeheerders monitoren in de praktijk, maar de beoordeling van dijken door beide partijen ligt soms ver uit elkaar. Via onderling overleg wordt geprobeerd dit dichter bij elkaar te brengen.

Binnenkort krijgen keringbeheerders een kaart mee op hun computer met alle faalmechanismen bij een bepaalde waterstand en windrichting. Hierop kan een waterhoogte worden ingevoerd om vervolgens te zien welk deel van de dijk nadere inspectie vraagt en voor welk faalmechanisme dit van toepassing is.



Figuur 9: Traditionele bekramming met zandzakken (links) versus innovatieve bekramming met kunststof wapeningsnet (rechts)

## 7. MOGELIJKHEDEN VOOR OPTIMALISATIE VAN DE FAALKANSEIS

Wanneer het bij een beoordeling voorkomt dat op doorsnedeniveau niet wordt voldaan aan de eis aan de kans op macrostabiliteit buitenwaarts zijn er verscheidene opties ter optimalisatie. Deze optimalisatiemogelijkheden zijn voornamelijk van toepassing na de verkenningsfase van een project, omdat hierin nog vrij grof beoordeeld wordt. De eerste berekeningen worden uitgevoerd met de standaard faalkansbegroting en andere startwaarden voor parameters. Na analyse van de resultaten van deze eerste berekeningen kan besloten worden de faalkansbegroting aan te passen. Een mogelijkheid is het aanscherpen van de faalkanseis, wat kan bestaan uit het verruimen van de faalkansruimtefactor en het beter benaderen van de hersteltijd om zo de conditionele faalkans aan te scherpen. In onderstaande formule, een herhaling van vergelijking ( 3 ), is te zien dat het aanpassen van de faalkansruimtefactor en/of het aanpassen van de conditionele faalkans, welke nu een waarde van 10% heeft, effect heeft op de geëiste faalkans per doorsnede voor STBU.

$$P_{eis,dsn} = \frac{\omega(10 * P_{eis})}{N_{dsn}}$$

Waar:

- |                   |   |          |
|-------------------|---|----------|
| - $P_{eis,dsn}$ = | Faalkanseis per doorsnede                   | [1/jaar] |
| - $\omega$ =      | Faalkansruimtefactor (default: STBI = 0,04) | [-]      |
| - $N$ =           | Factor voor het lengte-effect               | [-]      |

### 7.1. FAALKANSRUIMTEFACTOR

Op dit moment is de faalkansruimtefactor binnen de totale faalkansbegroting voor STBU gelijk aan die van STBI met een waarde van 0,04. Echter wordt voor STBU vervolgens nog een factor 10 verrekend doordat STBU gezien wordt als een indirect faalmechanisme. Vanuit de interviews met specialisten op het gebied van waterveiligheid en geotechniek is gebleken dat de faalkansruimtefactor voor macrostabiliteit buitenwaarts alleen aangepast kan worden door deze te ruilen met de faalkansruimtefactor voor piping. Deze faalkansruimtefactor voor piping is in de standaard faalkansbegroting gelijk aan 0,24. Wanneer geruild wordt met piping moet echter wel zijn aan te tonen dat de kans op piping klein genoeg is en deze ruimtefactor dus opgevuld kan worden door STBU. Het omwisselen van deze faalkansruimtefactor gaat alleen op voor het gehele dijktraject en kan niet per dijkvak verschillen.

Volgens de Handreiking Ontwerpen Met Overstromingskansen (Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, 2017) kan het aanpassen van de faalkansbegroting zinvol zijn in de volgende gevallen:

- Wanneer een faalmechanisme kan worden uitgesloten, bijvoorbeeld door een verbetermaatregel, kan de faalkansruimte van dit mechanisme worden benut door andere faalmechanismen.
- Wanneer er voor een mechanisme met een kleine faalkansruimte, zoals STBU, een ontwerpogave ligt. In dit geval kan aanpassen van de faalkansbegroting deze ontwerpogave voorkomen.
- Wanneer via een goedkope maatregel het ruimtebeslag voor een bepaald mechanisme net te groot is. Aanpassing van de faalkansbegroting kan er in dit geval voor zorgen dat een duurdere maatregel kan worden voorkomen.

### 7.2. CONDITIONELE FAALKANS

Omdat STBU een indirect faalmechanisme betreft wordt er gerekend met een kans van 10% voor de conditionele faalkans. De conditionele faalkans luidt als volgt: "De kans dat de waterkering niet binnen de beschikbare hersteltijd zodanig gerepareerd kan worden dat bij het volgende hoogwater er geen overstromingsgevolgen ontstaan" (Kennisplatform Risicobenadering, 2018). Deze 10% is echter een default waarde die niet in alle situaties van toepassing is. Het aanpassen van deze waarde, de conditionele faalkans, heeft effect op de gestelde faalkanseis voor STBU op doorsnede niveau.

Op dit moment wordt er binnen Waterschap Rivierenland gekeken naar het aanpassen van de conditionele faalkans. Bij hen wordt gekeken of van de 10% default waarde 1% of zelfs 0,1% gemaakt kan worden. Hierbij moet wel aangetoond kunnen worden dat er voldoende reparatiecapaciteit

aanwezig is, zowel in de vorm van materiaal als mankracht, voor tijdelijke herstelmaatregelen. Daarnaast is er op dit moment geen statistische onderbouwing voor de default waarde van 10%. Nadere analyse naar het optreden van een tweede hoogwatergolf zou kunnen bijdragen aan de begripsvorming van de conditionele faalkans.

Om de default waarde van 10% aan te passen binnen de bepaling van de faalkanseis dient onderzoek gedaan te worden naar de tijdelijke herstelmaatregelen na een buitenwaartse instabiliteit. Het grootste effect wordt hierbij behaald door het expliciet beschouwen van de hersteltijden, waarbij het finetunen van deze hersteltijden minder relevant is. Als aangetoond kan worden dat in zeer korte tijd een herstelmaatregel gerealiseerd kan worden, kan de faalkanseis hiervoor wel onderbouwd iets verlaagd worden. Hierbij geeft het totale tijdsbestek de totale benodigde hersteltijd na een buitenwaartse instabiliteit:

Totale hersteltijd = Tijd tot opmerken + Tijd uitvoeren herstelmaatregel

Om tot een geschatte hersteltijd te komen dienen meerdere faalpaden opgesteld te worden. STBU staat hierin niet los van andere faalmechanismen. Na een buitenwaartse afschuiving heeft dit ook effect op andere faalmechanismen, bijvoorbeeld overloop. In de KPR-memo 'Advies omgang met STBU in project GoWa' is dit gedeeltelijk uitgewerkt. De uitwerking van deze faalpaden is weergegeven in Tabel 3 (Kennissplatform Risicobenadering, 2019).

Tabel 3: Faalpaden na een buitenwaartse afschuiving

Situatie na STBU	#	Primair mechanisme	Omschrijving
Situatie 1: grote glijcirkel	1	GEKB	<i>Overstroming door erosie kruin en binnentalud</i> Door de buitenwaartse afschuiving is de dijk lager geworden. Bovendien is de bekleding op het binnentalud beschadigd, waardoor de kleilaag eronder versneld kan eroderen. Hierdoor kan het kernmateriaal bloot komen te liggen en vervolgens wegspoelen. Hierdoor kan een proces van terugschrijdende erosie op gang komen, dat ertoe leidt dat de hoogte steeds verder afneemt. Dit leidt tot een groter overslag- of overloopdebiet, wat weer leidt tot meer erosie et cetera. Dit leidt uiteindelijk tot een bres in de waterkering.
	2	GEKB	<i>Overstroming door overschrijden komberging bij standzekere kering</i> Het is ook mogelijk dat de dijk wel blijft staan maar door een zeer groot overslag-/overloopdebiet toch achter de dijk substantiële (overstromings)gevolgen optreden. Gezien het groene achterland moet er zeer veel water over de dijk stromen alvorens de komberging van het achterland wordt overschreden. Er mag vanuit worden gegaan dat de bekleding van het binnentalud eerder bezwijkt en faalpad 1 dus maatgevend is.
	3	STMI	<i>Overstroming door micro-instabiliteit</i> Doordat de bekleding op de kruin en het binnentalud is beschadigd infiltreert er meer overslaand water in de dijk. Hierdoor neemt de kans op micro-instabiliteit toe. Na opbarsten van de binnentaludbekleding onderin het talud wordt zand meegevoerd uit de kern. Hierdoor neemt de hoogte van de dijk uiteindelijk af. Het verdere faalproces is gelijk aan faalpad 1.
	4	STPI	<i>Overstroming door piping</i> Door de buitenwaartse afschuiving kan het intredepunt voor piping dichterbij de dijk komen te liggen. De kans op piping neemt hierdoor toe.
	5	STBI	<i>Overstroming door binnenwaartse afschuiving</i> Door de buitenwaartse afschuiving heeft een verstoring plaatsgevonden van de grondopbouw in het dijklichaam. Hierdoor kan de sterkte zijn afgenomen. Bovendien kan er sprake zijn van een grotere infiltratie, waardoor de freatische lijn hoger wordt en de kans op een binnenwaartse afschuiving verder toeneemt. Na een binnenwaartse afschuiving neemt de hoogte verder af en wordt het faalproces van faalpad 1 verder gevolgd. In <b>Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.</b> is ter illustratie de foutenboom voor dit faalpad nader aangevuld.
Situatie 2: middelgrote glijcirkel	6	...	...
	7	...	...
	8	...	...
	9	...	...
	10	...	...
Situatie 3: oppervlakkige glijcirkel	11	...	...
	12	...	...
	13	...	...
	14	...	...
	15	...	...



### 7.3. VOORBEELD AANPASSINGEN FAALKANSEIS

#### 7.3.1. STBU-BEREKENING STENENDIJK

Om het effect van het omwisselen van de faalkansruimtefactor tussen STBU en piping aan te tonen is gebruik gemaakt van de beoordeling van de Stenendijk te Hasselt (Antea Group, 2019).

In opdracht van WDO Delta heeft Antea Group een nadere stabiliteitsanalyse uitgevoerd voor de Stenendijk te Hasselt. Hierin is voor STBU de norm aangescherpt conform de KPR-factsheet 'Omgang met buitenwaartse macrostabiliteit'. Dit resulteerde in een factor 650 lagere norm met een bijbehorende  $\beta$  van 2,72 en een  $\gamma_{n,STBU}$  van 0,81 (Antea Group, 2019).

Binnen deze normstelling is gewerkt met een faalkansruimtefactor van 0,04 en een factor 650 lagere norm. De gevoeligheid hiervan is getest middels het aanpassen van de faalkansruimtefactor naar 0,24 (omwisselen met piping) en een factor 10 in verlaging van de norm (default waarde).

Door het aanpassen van de faalkansruimtefactor verandert de faalkanseis op doorsnedeniveau voor macrostabiliteit. Bij een faalkansruimtefactor van 0,04 is de faalkanseis als volgt:

$$P_{eis,dsn} = \frac{P_{max} * \omega}{N} = \frac{\left(\frac{1}{300}\right) * 0,04}{26,7} = 5,0 * 10^{-6} \text{ per jaar}$$

Bij een faalkansruimtefactor van 0,24 is de faalkanseis voor als volgt:

$$P_{eis,dsn} = \frac{P_{max} * \omega}{N} = \frac{\left(\frac{1}{300}\right) * 0,24}{26,7} = 3,0 * 10^{-5} \text{ per jaar}$$

Wanneer de bepaling van de faalkanseis op doorsnede niveau met de default waarde van 10% voor de conditionele faalkans uitgevoerd zou worden, zou dit de volgende waarden voor  $\beta$  en  $\gamma_{n,STBU}$  geven bij een faalkansruimtefactor van 0,04:

$$\begin{aligned} \beta &= \Phi(P_{dsn} * 10) = 3,89 [-] \\ \gamma_{n,STBU} &= 0,15\beta + 0,41 = (0,15 * 3,89) + 0,41 = 0,99 [-] \end{aligned}$$

En bij een faalkansruimtefactor van 0,24:

$$\begin{aligned} \beta &= \Phi(P_{dsn} * 10) = 3,43 [-] \\ \gamma_{n,STBU} &= 0,15\beta + 0,41 = (0,15 * 3,43) + 0,41 = 0,92 [-] \end{aligned}$$

De waarden voor de geëiste betrouwbaarheidsindex en de schadefactor voor STBU voor de verschillende faalkansruimtefactoren en factoren voor het verlagen van de norm zijn weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4: Waarden voor betrouwbaarheidsinterval (bèta) en schadefactor (gamma) voor de Stenendijk bij aanpassing van de faalkansruimtefactor en de norm

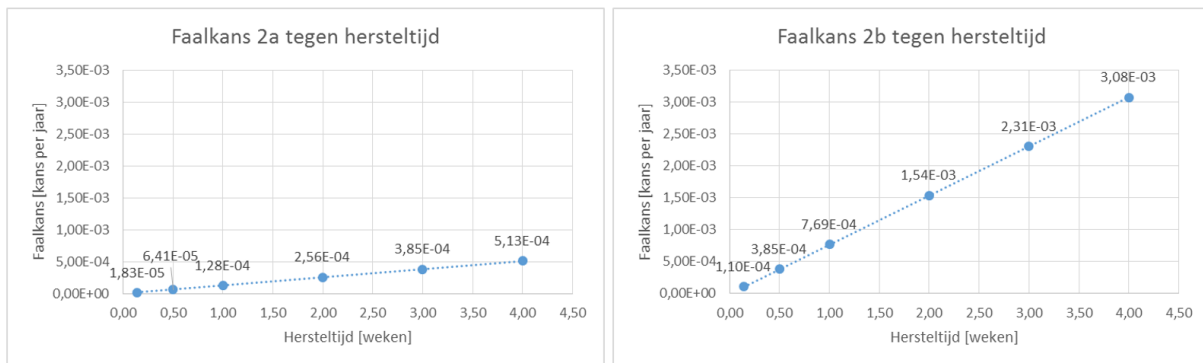
	Factor 650 lagere norm		Factor 10 lagere norm	
	$\beta$	$\gamma_{n,STBU}$	$\beta$	$\gamma_{n,STBU}$
<b>Faalkansruimtefactor 0,04</b>	2,72	0,81	3,89	0,99
<b>Faalkansruimtefactor 0,24</b>	2,06	0,72	3,43	0,92

Naast het aanpassen van de faalkansruimtefactor en het veranderen van de norm is voor dezelfde berekening een gevoeligheidsanalyse gedaan voor de faalkans ten behoeve van de hersteltijd van een tijdelijke maatregel. Binnen de analyse van Antea Group wordt hierbij onderscheidt gemaakt tussen bezwijken van het restprofiel van de kering via verschillende faalpaden. Faalpad 1 is hierbij van toepassing als de waterstand hoger is dan het achterland. De kans hierop is relatief groot, maar hier

wordt altijd aan voldaan als aan faalpad 2a of 2b wordt voldaan. Om deze reden is faalpad 1 niet verder meegenomen in de analyse (Antea Group, 2019). Faalpaden 2a en 2b zijn verder als volgt:

- 2a: Extreme golfoverslag over de verlaagde dijk.
- 2b: Extreme golfaanval op het verzwakte buitentalud.

Antea Group heeft zelf een hersteltijd van 2 weken aangenomen en binnen de gevoeligheidsanalyse is de berekening gedaan voor 1 dag, een halve week, 1 week, 2 weken, 3 weken en 4 weken. Voor beide scenario's is de gevoeligheid van het meenemen van de verwachte hersteltijd in de berekeningen weergegeven in Figuur 10.



Figuur 10: Faalkans 2a (links) en faalkans 2b (rechts) tegen hersteltijd

### 7.3.2. BENADEREN VAN DE HERSTELTIJD

In de KPR-factsheet 'Omgang met buitenwaartse macrostabiliteit' wordt een voorbeeldberekening gegeven met betrekking tot de kans op falen binnen de hersteltijd (Kennisplatform Risicobenadering, 2018). Bij deze berekening wordt uitgegaan van een hersteltijd van twee weken na het optreden van een buitenwaartse instabiliteit. Om het effect op de faalkanseis aan te tonen van de mogelijkheden voor het nader bepalen van de hersteltijd is deze berekening uitgevoerd met een verwachte hersteltijd van 1 week.

In onderstaande wordt de faalkans binnen de hersteltijd nader bepaald door het KPR. Hier is uitgegaan van een hersteltijd van twee weken na optreden van faalgebeurtenis 2 (Welke een kans heeft van optreden van 20%).

*“Na het optreden van faalgebeurtenis 2 moet binnen de hersteltijd een waterstand optreden die hoger is dan het niveau van het binnendijkse maaiveld om tot een overstroming binnendijs te leiden. De overschrijdingskans van deze waterstand is 1/50 per jaar. Als eerste, zeer conservatieve aanname kan worden aangenomen dat de kans (bij benadering)  $2/26 \times 1/50 \approx 1/650$  is dat deze waterstand binnen de hersteltijd van 2 weken optreedt. Hiermee kan de eis aan de kans op buitenwaartse macro-instabiliteit worden aangescherpt. Ten opzichte van het voorbeeld uit paragraaf 2.2 neemt de eis dan toe van  $Peis;dsn = 0,04 \times 1/10.000 / (8 \times 0,1) = 1/200.000$  per jaar naar  $Peis;dsn = 0,04 \times 1/10.000 / (8 \times 1/650) \approx 1/3.000$  per jaar. Als rekening wordt gehouden met het feit dat de kans op dit scenario 20% is, dan mag worden gerekend met een faalkanseis op doorsnedeniveau van 1/600 per jaar.*

*Een eis van 1/600 per jaar komt overeen met  $\beta=2,94$ . De bijbehorende schadefactor bij gebruik van het Mohr-Coulomb model is  $1+0,13 \times (2,94-4) = 0,86$  (was 1,05). Bij gebruik van het CSSM-model hoort in dat geval een schadefactor van  $0,15 \times 2,94 + 0,41 = 0,85$  (was 1,07). Door de kans op falen binnen de hersteltijd nader te bepalen kan dus een significante reductie van de benodigde schadefactor worden bewerkstelligd.*

*Opgemerkt wordt dat deze herstelmaatregel dan wel opgenomen moet zijn in de calamiteitenbestrijdingsplannen van de beheerder.”*

Stel dat de hersteltijd na optreden van faalgebeurtenis 2 slechts een week bedraagt in plaats van twee weken dan heeft dit gevolgen voor de faalkanseis die gesteld wordt. Hetzelfde stappenplan volgend als hierboven weergegeven geeft dit het volgende:

De kans dat de waterstand binnen de hersteltijd optreedt  $\approx 1/1300$ .

Faalkanseis op doorsnedeniveau  $\approx 1/1500$  per jaar

Uitgaande van een kans van 20%: Faalkanseis op doorsnedeniveau =  $1/300$  per jaar.

Een eis van  $1/300$  per jaar komt overeen met  $\beta=2,71$

Bij gebruik van het CSSM-model: schadefactor = 0,82

(Was 1,07 met default uitgangspunten en 0,85 bij hersteltijd 2 weken).

Het aanpassen van de verwachte hersteltijd met één week binnen de berekening geeft in dit specifieke geval een verschil van 0,03 in schadefactor. Dit is geen aanzienlijk verschil. Echter was de schadefactor 1,07 voordat gekeken werd naar hersteltijden. De grootste stap is dus het expliciet maken van de conditionele faalkans en niet zozeer het finetunen van hersteltijden.

## 8. OPTIMALISATIE VAN DE SCHEMATISATIE

Vanuit de interviews en eerder verkennend onderzoek gedaan naar STBU zijn er verscheidene onderdelen binnen de schematisatie die extra aandacht vragen en opties kunnen bieden ter optimalisatie. In dit hoofdstuk worden deze onderdelen benoemd en zal vervolgens de koppeling gemaakt worden naar de kwantitatieve analyse van deze onderdelen.

### 8.1. MOGELIJKHEDEN VOOR OPTIMALISATIE VAN DE SCHEMATISATIE

#### 8.1.1. VERLOOP FREATISCHE LIJN

Het verloop van de freatische lijn kan grote invloed hebben op de beoordeling. Echter is deze zeer lastig te bepalen en vereist dit langdurige metingen waarbij een hoogwater benodigd is. Zowel de ligging van de freatische lijn als de mate van verzadiging zijn hierbij relevant. In de huidige situatie wordt ervan uit gegaan dat het dijlichaam volledig verzadigd met water, waarna deze niet leegloopt bij het snel zakken van de buitenwaterstand (Deltares, 2015). Dit is echter een niet te verwachten situatie, maar doordat de mate waarin de freatische lijn mee zakt met de buitenwaterstand niet bekend is, wordt deze op een conservatieve manier geschematiseerd. Een hoge freatische lijn zorgt er namelijk voor dat er een grotere kans is op een buitenwaartse instabiliteit, wat een lagere safety factor als resultaat van stabiliteitsberekeningen betekent.

De ligging van de freatische lijn is afhankelijk van veel verschillende factoren. Dat is gelijk de reden waarom het lastig te voorspellen is hoe het verloop eruit zal zien. Factoren die de freatische lijn beïnvloeden volgens het TRWG (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 2001) en STOWA (Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, 2016) zijn:

- Het materiaal van het dijlichaam
- De geometrie van de dijk
- Polderpeilen en waterstanden in normale situatie
- De tijdsduur en piek van een hoogwatergolf
- Het al dan niet stationaire karakter van de grondwaterstroming
- De bekleding van het buitentalud

#### 8.1.2. TIJDSVERLOOP BUITENWATERSTANDEN

De snelle val van het buitenwater verdient ook aandacht. Een snelle val van het buitenwater wordt verschillend gedefinieerd, afhankelijk van het type gebied. Bij een storm gedomineerde situatie zal een snelle val kunnen optreden in termen van uren. Bij rivierengebied gaat de op- en afloop van een hoogwatergolf veelal in termen van weken. Hierdoor zal in een benedenrivierengebied waarschijnlijk alleen een snelle val kunnen optreden wanneer omringende dijken bezwijken door een ander faalmechanisme.

De bepaling van de buitenwaterstand na een snelle val bij verschillende type gebieden wordt beschreven in het Technisch rapport ontwerpbelastingen voor het rivierengebied (Expertise Netwerk Waterkeren, 2007) en gaat als volgt:

##### - BOVENRIVIEREN

Rivieren in het bovenrivierengebied zijn enkel afhankelijk van rivierafvoer voor hoogwaterstanden. Dit heeft als gevolg dat de totale hoogwatergolf een relatief lange duur zal hebben. Voor deze rivieren wordt daarom aanbevolen uit te gaan van een waterstandssituatie 10 dagen (240 uur) na de topwaterstand.

##### - BENEDENRIVIEREN

De hoogwatergolf bij benedenrivieren is naast de rivierafvoer ook afhankelijk van zeewaterstanden en stormopzet. Door deze combinatie van factoren is de kans op een kortere duur van de hoogwatergolf groter. Doordat meer dan één factor bepalend is, zal de bepaling van de snelle val daarom voor drie verschillende situaties in Waterstandsverloop worden bepaald. De meest ongunstige van de drie is maatgevend en wordt daardoor genomen als belastingsituatie.

1: Een belastingsituatie met gemiddeld getij op zee zonder wind met de maatgevende afvoergolf. Er wordt hierbij uitgegaan van de waterstand 10 dagen na de topwaterstand.

2/3: Zowel de situatie met open als dichte keringen wordt hierbij bestudeerd. Een combinatie van stochasten die de grootste bijdrage leveren aan de overschrijdingsfrequentie vormen hierbij het maatgevende waterstandsverloop. Hierbij wordt de waterstand 1 dag na de topwaterstand als uitgangspunt genomen.

#### - IJSSEL- EN VECHTDELTA

Voor de IJssel- en Vechtdelta zijn ook drie verschillende belastingsituaties te onderscheiden. Deze zijn grotendeels in lijn met de analogie van de benedenrivieren.

1: Een belastingsituatie met streefpijl op het IJsselmeer en een maatgevende afvoer. Hierbij wordt de waterstand 10 dagen na de topwaterstand als uitgangspunt genomen.

2/3: Een combinatie van stochasten die de grootste bijdrage leveren aan de overschrijdingsfrequentie vormen hierbij het maatgevende waterstandsverloop. Hierbij wordt de waterstand 1 dag na de topwaterstand als uitgangspunt genomen.

---

#### 8.1.3. VERKEERSBELASTING

De verkeersbelasting op een waterkering speelt mee in het momentenevenwicht voor de stabiliteit. Het effect hiervan is afhankelijk van de consolidatiegraad van het materiaal van het dijklichaam en de ondergrond en van de duur van de belasting.

Op dit moment wordt geschematiseerd met een verkeersbelasting van 13,3 kN/m<sup>2</sup> voor STBU, welke is afgeleid uit een belasting van 400kN op een oppervlakte van 12m<sup>2</sup>. Voor binnenwaartse macrostabiliteit mag geschematiseerd worden met een realistische verkeersbelasting tijdens hoogwater. Reden hiervoor is dat tijdens binnenwaartse afschuiving maatgevende hydraulische belastingen op de dijk staan, terwijl deze belastingen na een buitenwaartse afschuiving laag zijn. Volgens de wet is het niet vereist om bij hoge hydraulische belastingen zwaar verkeer op de dijk toe te laten. Hierdoor mag een realistische verkeersbelasting worden geschematiseerd voor STBI, welke vergelijkbaar is met een lichte vrachtauto met pick up (Deltares, 2015).

Beleidsmaatregelen zouden de schematisatie van de verkeersbelasting kunnen beïnvloeden. Wanneer bijvoorbeeld geen vrachtwagens worden toegelaten op de dijk na een buitenwaartse afschuiving mag de belasting in de toetsing lager aangenomen worden. Dit moet dan wel helder zijn voor alle betrokken partijen.

---

#### 8.1.4. GRENSSPANNINGEN

De grensspanning is de maximale historische spanning die de grondlagen hebben ondervonden. Deze grensspanning kan worden weergegeven als de effectieve verticale spanning plus de POP-waarde (Pre Overburden Pressure) of als de effectieve verticale spanning vermenigvuldigd met de OCR (Over-Consolidation Rate). Hierin wordt de effectieve verticale spanning bepaald als de totale verticale spanning minus de waterspanning op dat punt (Deltares, 2015).

$$\sigma'_y = \sigma'_v + POP \quad (8)$$

Dan wel:

$$\sigma'_y = \sigma'_v * OCR \quad (9)$$

Met:

$$OCR = \frac{\sigma'_y}{\sigma'_v} = \frac{\sigma'_v + POP}{\sigma'_v} \quad (10)$$

Waar:

-	$\sigma'_v$	=	Effectieve vertical spanning	[kN/m <sup>2</sup> ]
-	$OCR$	=	Over-consolidation rate	[-]
-	$\sigma'_y$	=	Grensspanning	[kN/m <sup>2</sup> ]
-	$POP$	=	Pre-Overburden Pressure	[kN/m <sup>2</sup> ]

Sinds het rekenen via de ongedraineerde methode zijn de grensspanningen gaan meespelen in de schematisering. De POP-waarden worden bepaald via metingen aan de grensspanningen (Deltares, 2016). De schuifspanning langs het glijvlak volgens de SHANSEP-theorie wordt uiteindelijk als volgt bepaald:

$$\tau_{\alpha} = \sigma'_v * S * OCR^m \quad (11)$$

Waar:

- $\tau_{\alpha}$ =	Shear stress along the slip plane	[kN/m <sup>2</sup> ]
- $s$ =	Ongedraineerde schuifsterkte ratio	[-]
- $m$ =	Sterkte toename exponent	[-]

Het verloop van de grensspanningen over de dijk is erg lastig te bepalen. De grensspanning op het ene punt kan namelijk flink verschillen met de grensspanning een meter hiernaast. Dit maakt dat er een grote onzekerheid in deze spanningen zit. De grensspanningen hebben echter wel een groot effect op de stabiliteitsbeoordeling van het dijklichaam.

## 8.2. KWANTITATIEVE ANALYSE SCHEMATISATIE

### 8.2.1. UITGANGSPUNTEN BEREKENINGEN

Middels een kwantitatieve analyse met behulp van de software van D-Geo Stability is bekeken wat het effect van de schematisatie van de freatische lijn, de grensspanningen en de verkeersbelasting zijn op de stabiliteitsbeoordeling van het dijklichaam. Om deze analyse uit te kunnen voeren zijn negen scenario's opgesteld waarbij onderscheid is gemaakt in drie typen dijkopbouw en 3 typen ondergrondopbouw. Alle andere variabelen zijn binnen deze 9 scenario's hetzelfde, zoals de grondparameters en de geometrie van de dijk. De negen basisscenario's zijn opgesteld in samenspraak met waterveiligheidsspecialisten van WDODelta. Deze fictieve scenario's zijn wel gebaseerd op voorkomende dijkprofielen en ondergronden binnen het beheergebied van WDODelta.

#### - HYDRAULISCHE BELASTINGEN

WBN	maaiveld+3,2m
HBN (kruinhoogte)	maaiveld+4,0m

De kruinhoogte van de dijk is 4m. In deze ontwerphoogte is fictief gerekend met een robuustheidstoeslag van 0,3m en een waakhoogte van 0,5m. Dit resulteert in een WBN van maaiveld+3,2m.

Schematisatie val na hoogwater: 2 meter lager dan WBN = maaiveld+1,2m

#### - GEOMETRIE DIJKLICHAAM

Taludhelling	1:3
Kruinhoogte	maaiveld+4,0m
Kruinbreedte	4m

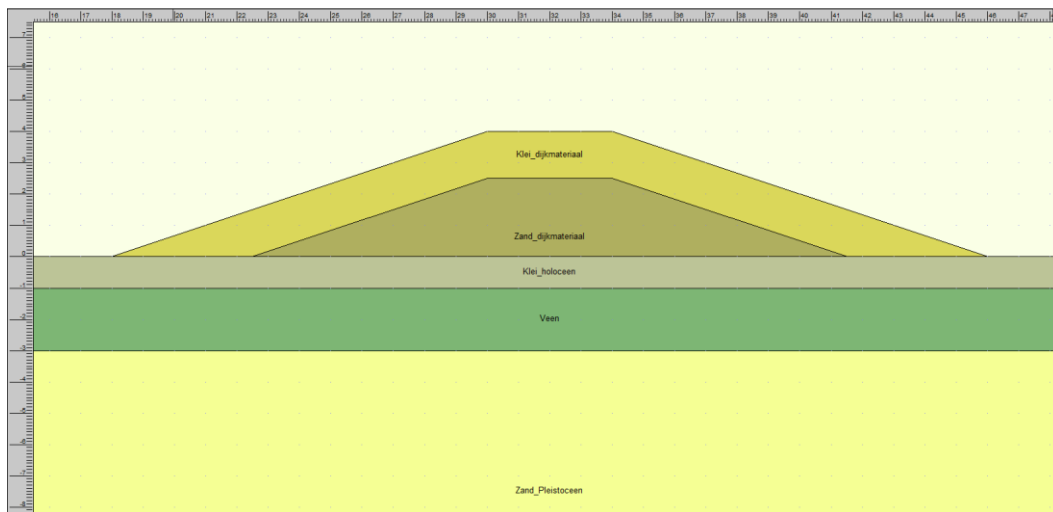
#### - SCENARIO'S VOOR DE DIJKOPBOUW

1. Volledige kleidijk
2. Volledige zanddijk
3. Zanddijk met 1,5m kleibekleding

#### - SCENARIO'S VOOR DE ONDERGRONDSCHEMATISATIES

1. Klei van maaiveld tot mv-1m, zand vanaf mv-1m (pleistoceen)
2. Klei van maaiveld tot mv-1m, veen van mv-1m tot mv -3 m, zand vanaf mv-3m (pleistoceen)
3. Klei van maaiveld tot mv-2m, veen van mv-2m tot mv -3 m, klei van mv-3m tot mv-5m, zand vanaf mv-5m (pleistoceen)

Een voorbeeld van een van de negen basisscenario's is visueel weergegeven in Figuur 11. Hierin is scenario 3 voor het dijkprofiel weergegeven met ondergrondscenario 2.



Figuur 11: Dijkopbouw 3 met ondergrondscenario 2

Een complete weergave van alle uitgangspunten en de resultaten per berekening zijn te vinden in Bijlage D D-Geo Stability berekeningen.

Door het grote aantal variabelen zijn de stabiliteitsberekeningen niet uitgevoerd voor iedere combinatie van variabelen. In Tabel 5 is aangegeven welke scenario's voor dijkopbouw en ondergrondopbouw zijn uitgevoerd per analyse. Per type berekening zijn hierin verschillende scenario's doorberekend, om het effect op aanpassingen in de freatische lijn, verkeersbelasting of grensspanning aan te geven.

Tabel 5: Uitgevoerde stabiliteitsberekeningen in D-Geo Stability. Aangekruisde cellen zijn hierbij uitgevoerd.

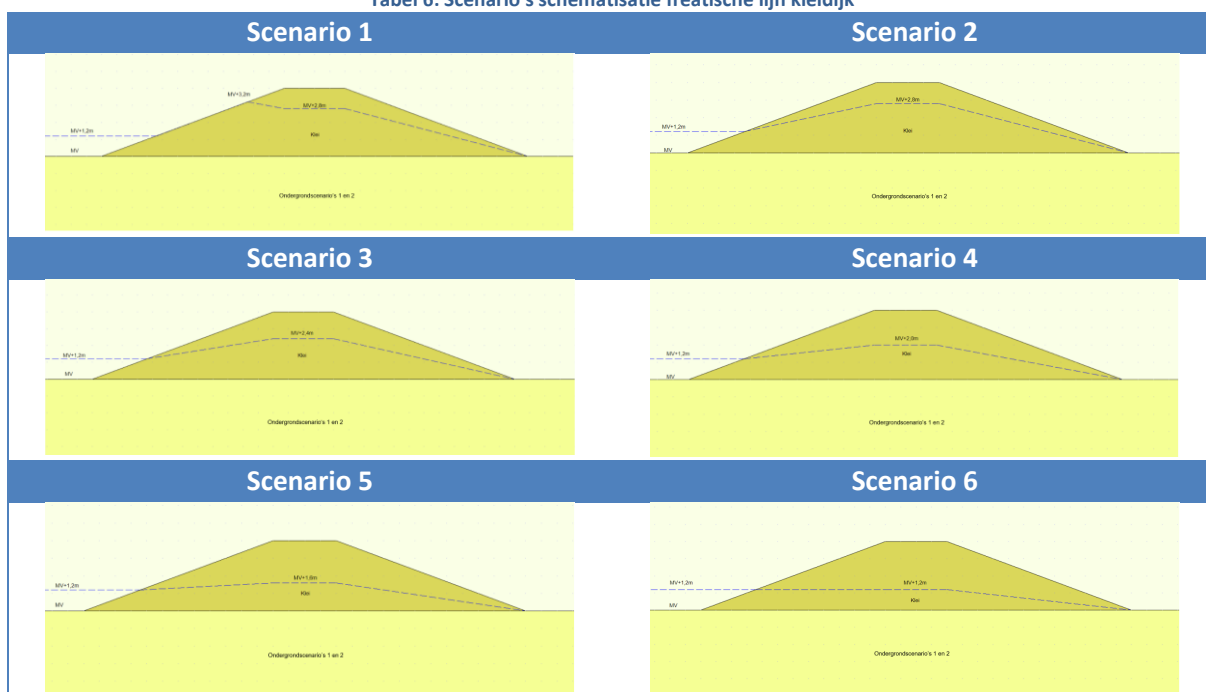
Dijkopbouw (scenario)	Ondergrondopbouw (scenario)	Berekening freatische lijn	Berekening verkeersbelasting	Berekening grensspanning
Kleidijk (1)	Klei-zand (1)			X
Kleidijk (1)	Klei-veen-zand (2)	X	X	X
Kleidijk (1)	Klei-veen-klei-zand (3)			X
Zanddijk (2)	Klei-zand (1)			X
Zanddijk (2)	Klei-veen-zand (2)	X	X	X
Zanddijk (2)	Klei-veen-klei-zand (3)			X
Zanddijk met kleibekleding (3)	Klei-zand (1)			X
Zanddijk met kleibekleding (3)	Klei-veen-zand (2)	X	X	X
Zanddijk met kleibekleding (3)	Klei-veen-klei-zand (3)			X

### 8.2.2. ANALYSE FREATISCHE LIJN

Alle berekeningen aangaande de freatische lijn zijn uitgevoerd voor ondergrondscenario 2. Dit is gedaan omdat dit scenario de laagste safety factor gaf binnen de standaard schematisatie. Bij de zanddijk met kleibekleding was de safety factor het laagst voor ondergrondscenario 3. Om een vergelijking te kunnen maken met de kleidijk en de zanddijk is deze analyse toch uitgevoerd voor ondergrondscenario 2.

Voor het verloop van de freatische lijn zijn meerdere scenario's opgesteld, waarvan vervolgens de glijcirkel met bijbehorende safety factor zijn bepaald. De filosofie achter de scenario's voor de freatische lijn is dat als eerst de buitenteen van het dijklichaam droger zal worden, waarna de freatische lijn zakt onder de buitenkruinlijn. Dit verloop is opgesteld in samenspraak met een waterveiligheidsspecialist van WDOdelta. Een visuele weergave van de scenario's voor de schematisatie van de freatische lijn is weergegeven in Tabel 6. Hierin is het verloop van de freatische lijn voor de kleidijk weergegeven. Dit verloop is voor de andere twee dijkprofielen op dezelfde manier geschematiseerd. De schematisatie van de scenario's voor de freatische lijn zijn te vinden in bijlage D.

Tabel 6: Scenario's schematisatie freatische lijn kleidijk

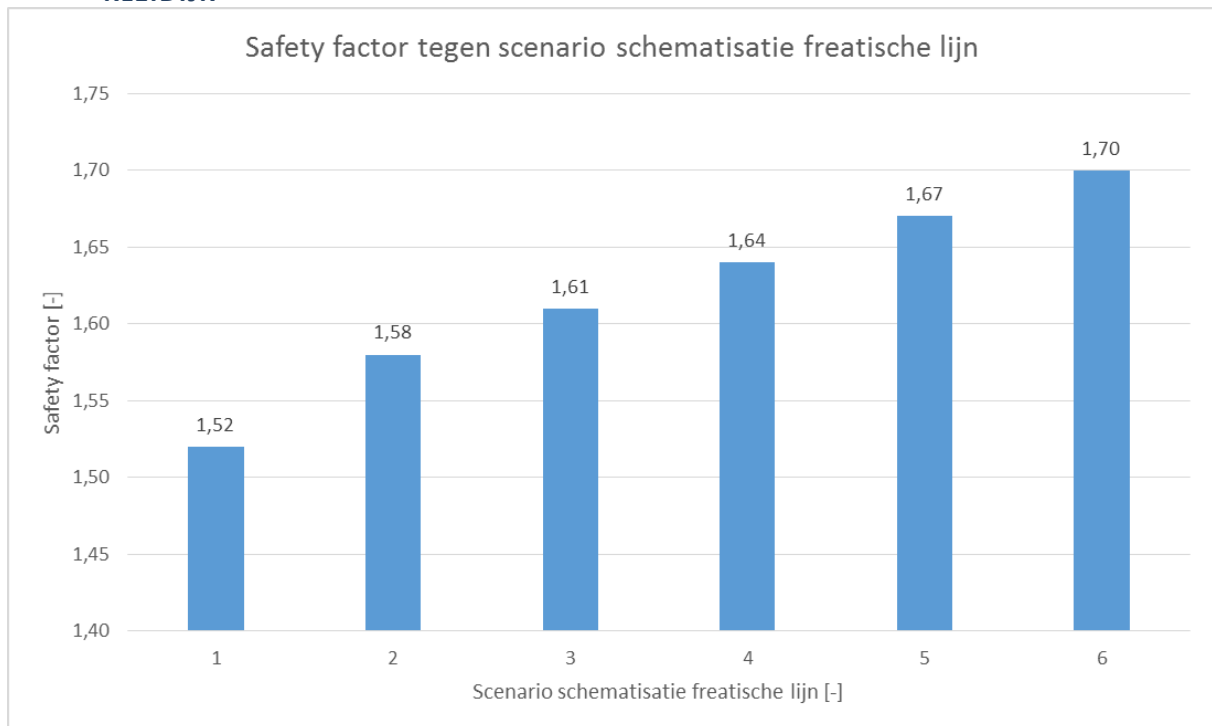




### 8.2.2.1. RESULTATEN

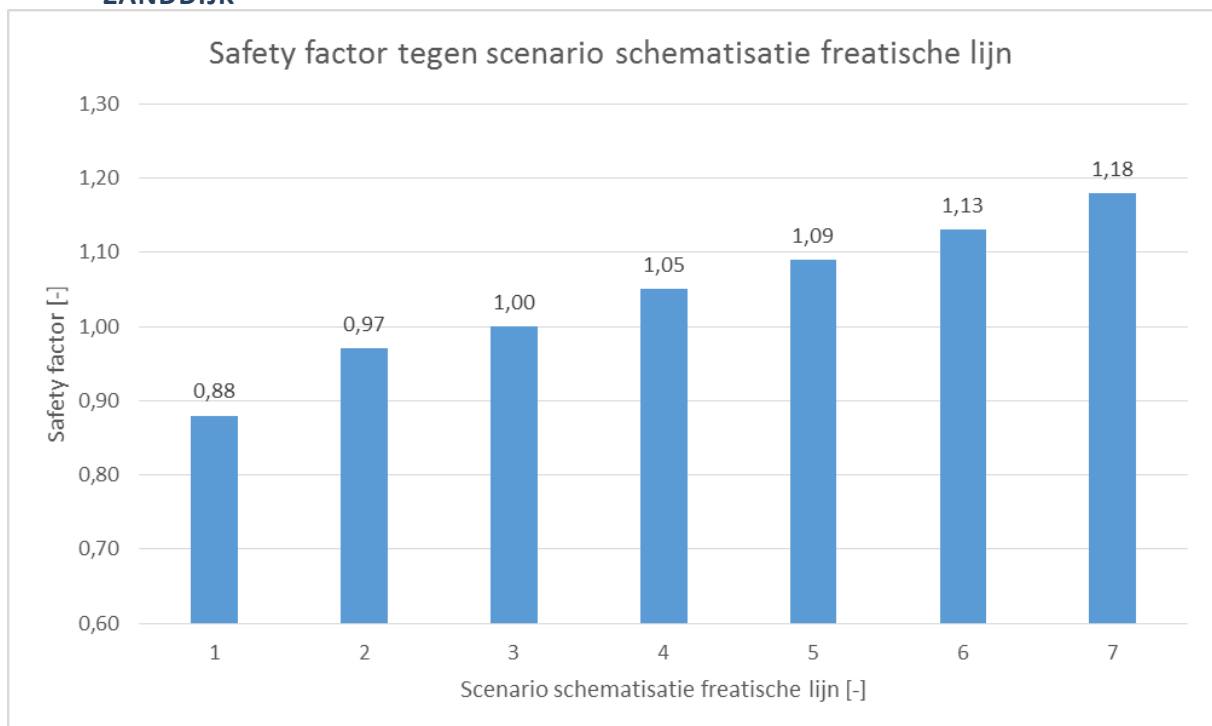
Hieronder zijn de resultaten van de stabiliteitsberekeningen met D-Geo Stability weergegeven voor de kleidijk (Figuur 12), de zanddijk (Figuur 13) en de zanddijk met kleibekleding (Figuur 14).

#### - KLEIDIJK



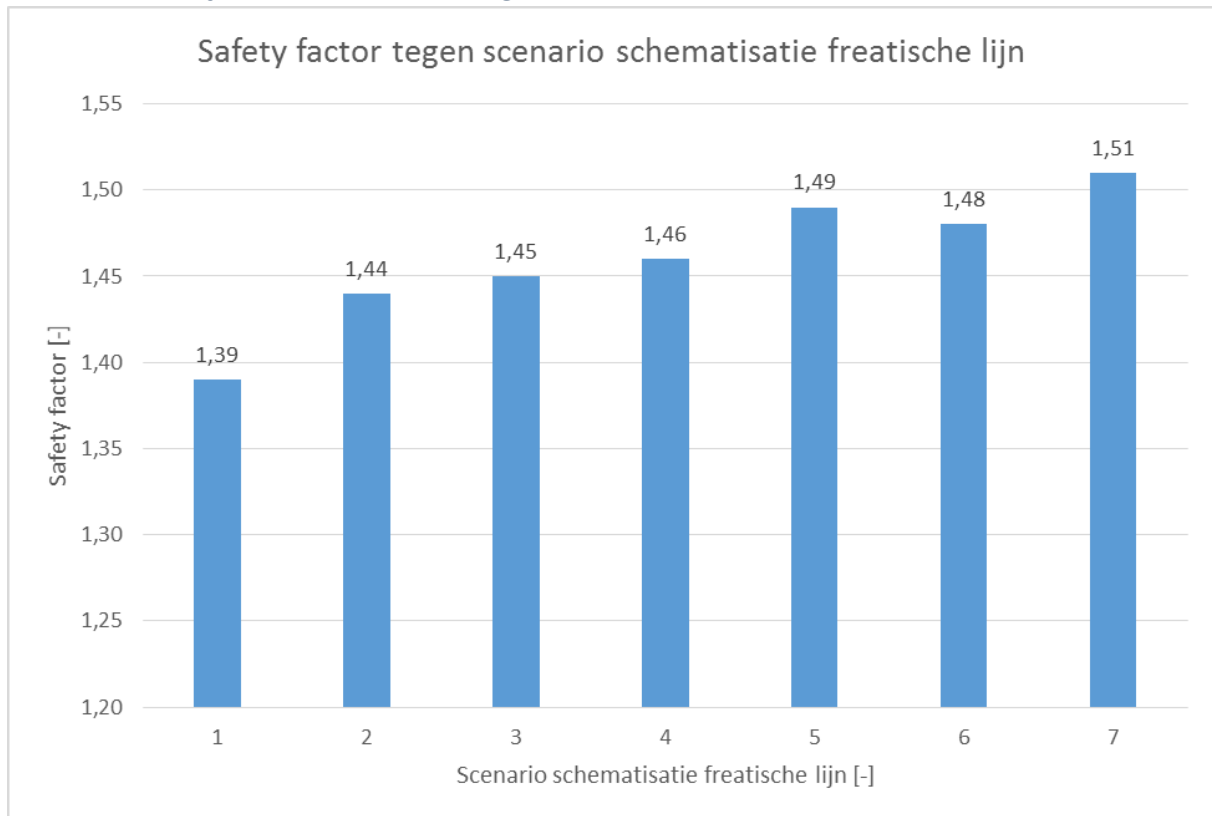
Figuur 12: Safety factors per scenario schematisatie freatische lijn voor een kleidijk met ondergrondscenario 2

#### - ZANDDIJK



Figuur 13: Safety factors per scenario schematisatie freatische lijn voor een zanddijk met ondergrondscenario 2

- **ZANDDIJK MET KLEIBEKLEDING**



Figuur 14: Safety factors per scenario schematisatie freatische lijn voor een zanddijk met kleibekleding met ondergrondscenario 2

**BEVINDINGEN EN OPMERKINGEN:**

Voor alle drie de typen dijkprofielen geldt dat het verlagen van de freatische lijn een aanzienlijk effect heeft op de safety factor volgens de stabiliteitsberekeningen.

De verschillen in safety factor tussen standaard schematisatie (geheel verzadigd dijklichaam) en het laatste scenario waarbij de freatische lijn volledig mee gezakt is met de buitenwaterstand zijn als volgt:

- Kleidijk 0,18 [-]
- Zanddijk 0,30 [-]
- Zanddijk met kleibekleding 0,12 [-]

Het percentuele verschil in safety factor per scenario ten opzichte van scenario 1 (standaard schematisatie) is weergegeven in Tabel 7.

Tabel 7: Percentuele verschillen in safety factor t.o.v. standaard schematisatie voor de kleidijk, zanddijk en zanddijk met kleibekleding

Scenario	Daling t.o.v. scenario 1 [%]		
	Kleidijk	Zanddijk	Zanddijk met kleibekleding
1	0	0	0
2	3,9	10,2	3,6
3	5,9	13,6	4,3
4	7,9	19,3	5,0
5	9,9	23,9	7,2
6	11,8	28,4	6,5
7	-	34,1	8,6

In Tabel 7 is te zien dat het verschil in safety factor tussen scenario 1 en scenario 2 relatief groot is ten opzichte van de stappen tussen de andere scenario's. Dit is te verklaren doordat de drooglegging van

een groot deel van de buitenteen zorgt voor een groter droog oppervlak dan de zakkig van de freatische lijn onder de kruin per stap.

- *Kleidijk*

Vanaf scenario 2 is een lineaire stijging van de safety factor te zien per zakking van de freatische lijn. Dit geeft een verhoging van de safety factor van 0,03 per 40cm zakking van de freatische lijn onder de buitenkruinlijn.

- *Zanddijk*

Bij scenario 1, 4 en 7 kruist de maatgevende glijcirkel de verkeersbelasting op de kruin niet. Bij de andere scenario's is dit wel het geval, wat leidt tot een groter glijvlak bij deze scenario's. De impact hiervan op de safety factor is niet duidelijk te zien in het verloop van Figuur 13.

- *Zanddijk met kleibekleding*

Bij scenario 6 van de schematisatie van de freatische lijn is een lagere safety factor te zien dan bij scenario 5. Dit betreft echter een verschil van slechts 0,01. De berekening binnen D-Geo Stability is niet 100% nauwkeurig wat een verklaring zou kunnen zijn voor dit voorval. In grote lijn is wel te zien dat de safety factor van de zanddijk met kleibekleding stijgt naarmate de freatische lijn daalt.

### 8.2.1. ANALYSE VERKEERSBELASTING

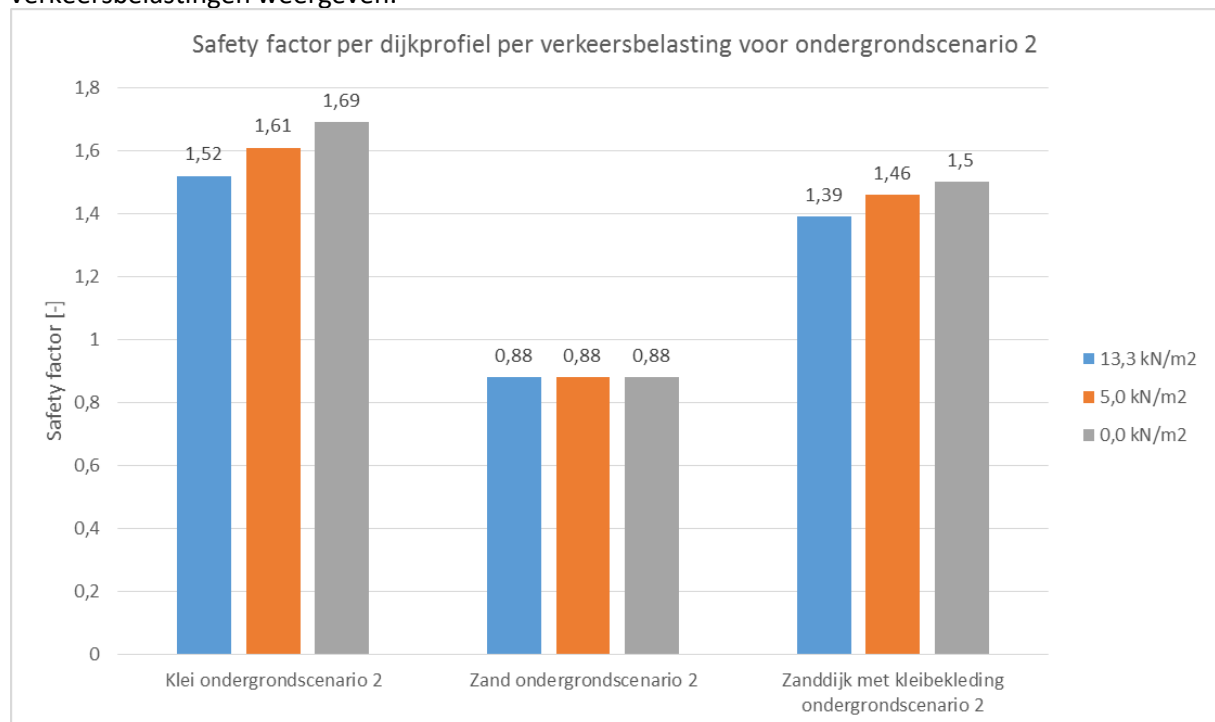
Alle berekeningen voor de verkeersbelasting zijn uitgevoerd voor ondergrondscenario 2 (1 meter klei, 2 meter veen). Dit is gedaan omdat dit scenario de laagste safety factor gaf binnen de standaard schematisatie. Bij de zanddijk met kleibekleding was de safety factor het laagst voor ondergrondscenario 3. Om een vergelijking te kunnen maken met de kleidijk en de zanddijk is deze analyse toch uitgevoerd voor ondergrondscenario 2.

Voor de verkeersbelasting is gerekend met 3 scenario's:

- Standaard schematisatie conform SHM met 13,3 kN/m<sup>2</sup>
- 5,0 kN/m<sup>2</sup> (Tussenoplossing als gevolg van beleidsmaatregel, aangegeven in hoofdstuk 8.1.3)
- Geen verkeersbelasting: 0,0 kN/m<sup>2</sup>

#### 8.2.1.1. RESULTATEN

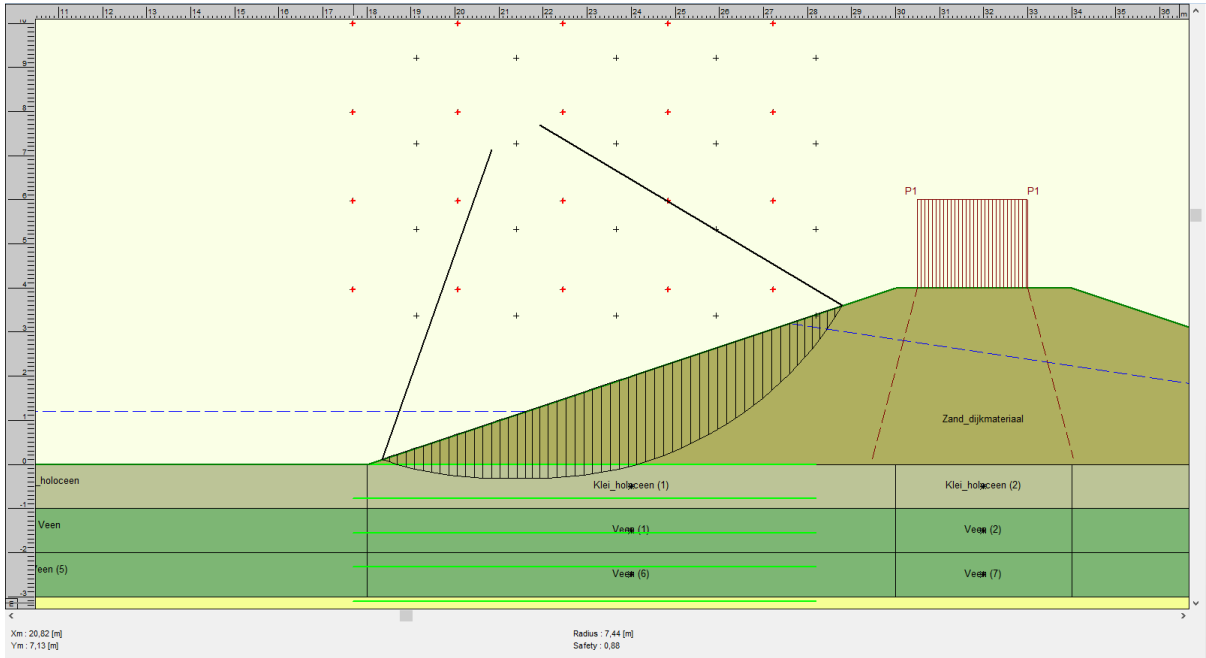
In Figuur 15 zijn de resultaten van de stabiliteitsberekeningen voor de drie verschillende verkeersbelastingen weergegeven.



Figuur 15: Safety factor per dijkprofiel voor verschillende verkeersbelastingen

### BEVINDINGEN EN OPMERKINGEN:

Bij de kleidijk en de zanddijk met kleibekleding stijgt de safety factor naarmate de verkeersbelasting lager wordt. Het effect is hierbij groter bij de kleidijk dan bij de zanddijk met kleibekleding. Dit heeft te maken met de consolidatiegraad van de grondlaag. Deze is voor zand namelijk gelijk aan 100% en voor de andere grondlagen 0%. Aanpassing van de verkeersbelasting heeft geen effect op de zanddijk bij ondergrondscenario 2. Dit is te verklaren doordat de glijcirkel binnen dit scenario niet de verkeersbelasting kruist, zoals te zien is in Figuur 16.



Figuur 16: Resultaat D-Geo Stability berekening zanddijk met ondergrondscenario 2 en een verkeersbelasting van 13,3 kN/m<sup>2</sup>

### 8.2.2. ANALYSE GRENSSPANNINGEN

Alle berekeningen voor de gevoeligheid van de grensspanningen zijn uitgevoerd voor de drie ondergrondscenario's en voor alle drie de dijkprofielen.

Voor de POP-waarden zijn drie scenario's opgesteld. Het basisscenario bevat de POP-waarden grotendeels gebaseerd op de gebruikte POP-waarden binnen de beoordeling van normtraject 10-2 door WDO Delta (Waterschap Drents Overijsselse Delta, 2018). Het tweede en derde scenario zijn opgesteld door middel van de indicatieve waarden voor POP gegeven in de SHM (Deltares, 2015). Voor scenario twee zijn de karakteristieke waarden uit de SHM genomen en voor scenario 3 de verwachtingswaarden.

Voor de POP-waarden voor de verschillende grondlagen zijn de waarden genomen van Dijksmateriaal (klei), Hollandveen en Echteld klei ondiep (Tabel 8).

Tabel 8: Verwachtingswaarden en karakteristieke waarden voor POP voor verscheidene grondsoorten (Deltares, 2015)

Afzetting / grondsoort	WBI-SOS eenheid	Bandbreedte POP (kPa)	Verwachtingswaarde POP (kPa)	Karakteristieke waarde POP (kPa) <sup>2)</sup>
Echteld klei ondiep <sup>1)</sup>	H_R.._..	5 – 65	27	15
Echteld klei diep <sup>1)</sup>	H_R.._..	0 – 75	24	8
Naaldwijk klei ondiep <sup>1)</sup>	H_M.._.. H_E.._..	5 – 60	25	15
Naaldwijk klei diep <sup>1)</sup>	H_M.._.. H_E.._..	0 – 30	14	7
Hollandveen	H_Vhv_v	0 – 60	11	1
Basisveen	H_Vbv_v	10 – 60	25	15
Dijksmateriaal (klei)	H_Aa_ht	0 – 150	30	7
Overig klei	Diversen	0 – 75	22	10

Voor POP-scenario 1 zijn de waarden grotendeels opgesteld op basis van de POP-waarden van normtraject 10-2. Dit geeft de waarden zoals gegeven in Tabel 9 per scenario voor de verschillende grondsoorten.

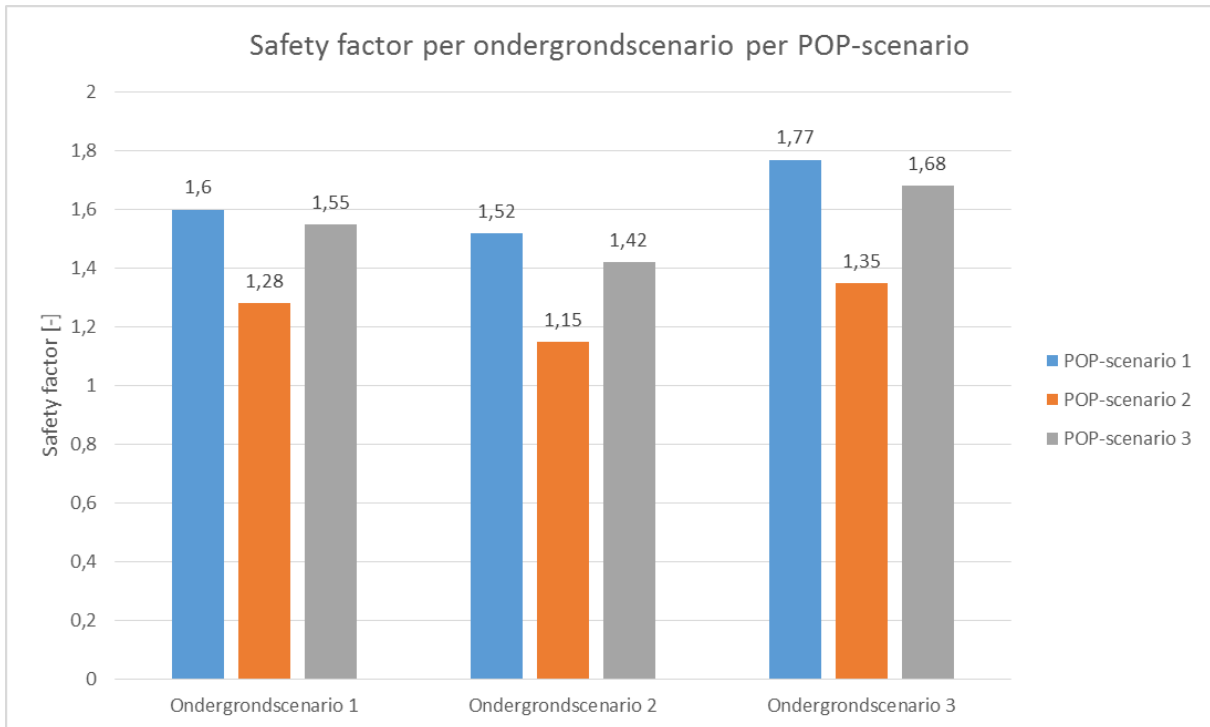
Tabel 9: POP-waarden per grondlaag voor de drie verschillende POP-scenario's

Grondsoort	POP-waarden [kPa]		
	Startwaarden normtraject 10-2	Karakteristieke waarden SHM	Verwachtingswaarden SHM
<b>Klei, dijksmateriaal</b>	43	7	30
<b>Klei Holocene, onder</b>	20	15	27
<b>Klei Holocene, naast</b>	15	15	27
<b>Veen, onder</b>	30	1	11
<b>Veen, naast</b>	5	1	11

### 8.2.2.1. RESULTATEN

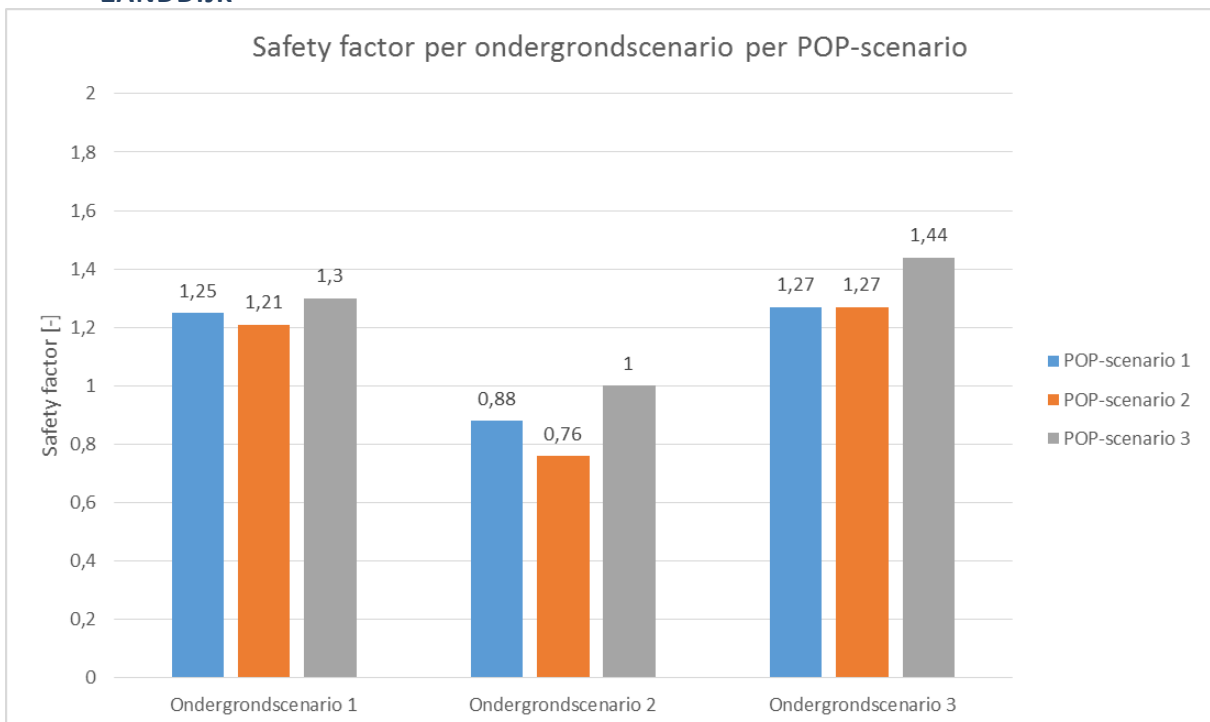
Hieronder zijn de resultaten van de stabiliteitsberekeningen met D-Geo Stability weergegeven voor de kleidijk (Figuur 17), de zanddijk (Figuur 18) en de zanddijk met kleibekleding (Figuur 19).

#### - KLEIDIJK



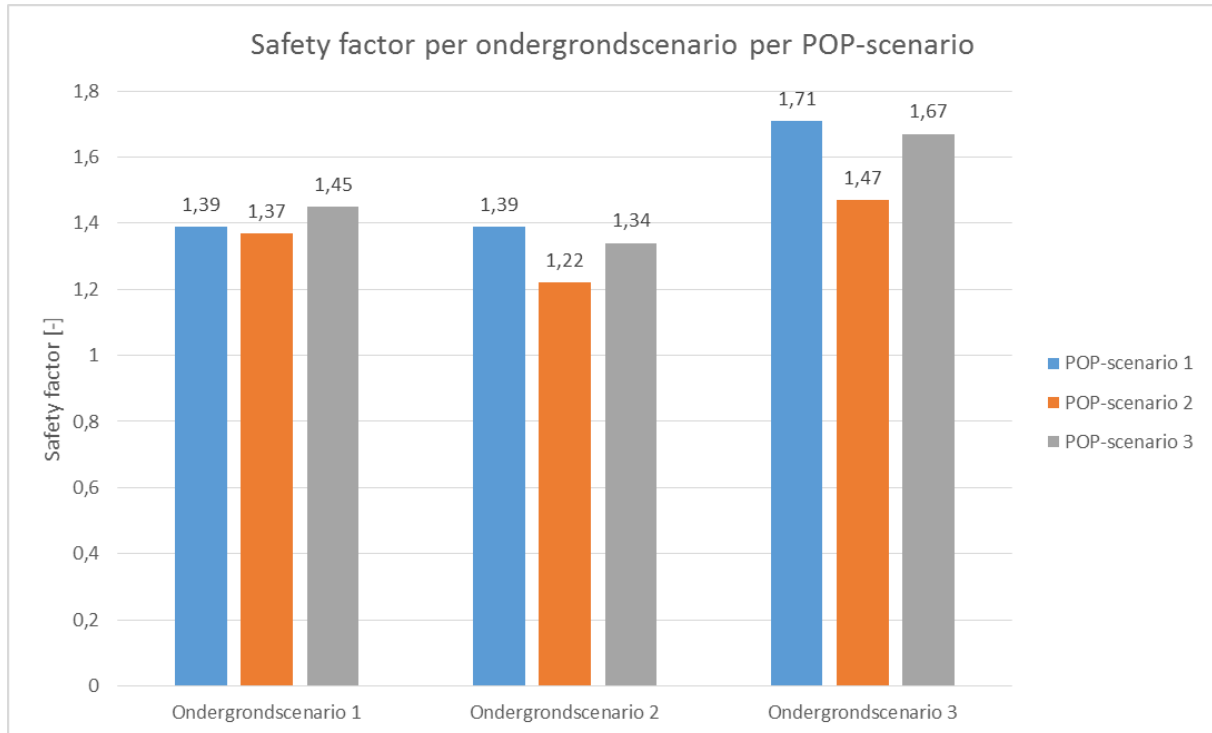
Figuur 17: Safety factor per ondergrondscenario per POP-scenario voor de kleidijk

#### - ZANDDIJK



Figuur 18: Safety factor per ondergrondscenario per POP-scenario voor de zanddijk

## - ZANDDIJK MET KLEIBEKLEDING



Figuur 19: Safety factor per ondergrondscenario per POP-scenario voor de zanddijk met kleibekleding

### BEVINDINGEN EN OPMERKINGEN:

Verandering in de grensspanning heeft het grootste effect bij de kleidijk met een gemiddeld verschil over alle ondergrondscenario's en POP-scenario's van 16,9%. Dit is een logisch gevolg doordat de POP-waarden bij een kleidijk ook in het dijkmateriaal zitten, waar dit voor een zanddijk niet het geval is en voor een zanddijk met kleibekleding in mindere mate.

De grootste verschillen voor de kleidijk en de zanddijk zijn te zien bij ondergrondscenario 2, gevolgd door ondergrondscenario 3 en 1. Voor de zanddijk met kleibekleding is dit verschil het grootst bij ondergrondscenario 3, gevolgd door ondergrondscenario 2 en 1.

Zand ondergrondscenario 3 laat geen verschil in safety factor zien tussen POP-scenario 1 en POP-scenario 2. Dit komt doordat de glijcirkel vrijwel alleen door het buitentalud gaat. Aangezien deze compleet van zand is spelen de POP-waarden hierin geen rol.

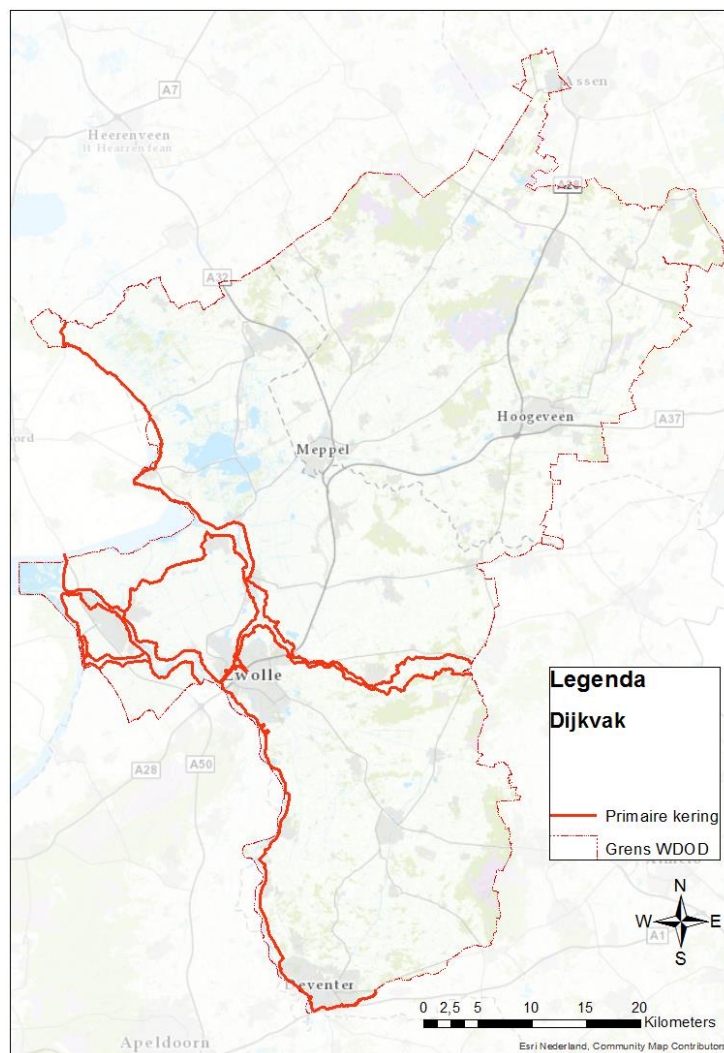
Het grootste verschil binnen de safety factors van de POP-scenario's is te zien bij ondergrondscenario 2, gezien over alle drie de dijkprofielen, met een gemiddeld verschil van 15,4%. Dit komt doordat de veenlaag in dit ondergrondscenario maatgevend is. De POP-waarden verschillen namelijk enorm tussen de verschillende POP-scenario's.

## 9. OPTIMALISATIEMOGELIJKHEDEN BINNEN HET GEBIED VAN WDODELTA

Naast het onderzoek naar de optimalisatiemogelijkheden aangaande STBU is er een analyse gedaan naar de mogelijkheden hiervan binnen het beheergebied van WDOdelta. Het gebied zal hiervoor op een aantal aspecten worden ingedeeld waarbij vervolgens aangegeven wordt wat de eventuele mogelijkheden zijn ter optimalisatie van STBU in die situatie. Resultaten vanuit de eerdere hoofdstukken zullen hierbij de basis vormen voor indeling van het gebied van WDOdelta.

### 9.1. BEHEERGBIED WDODELTA

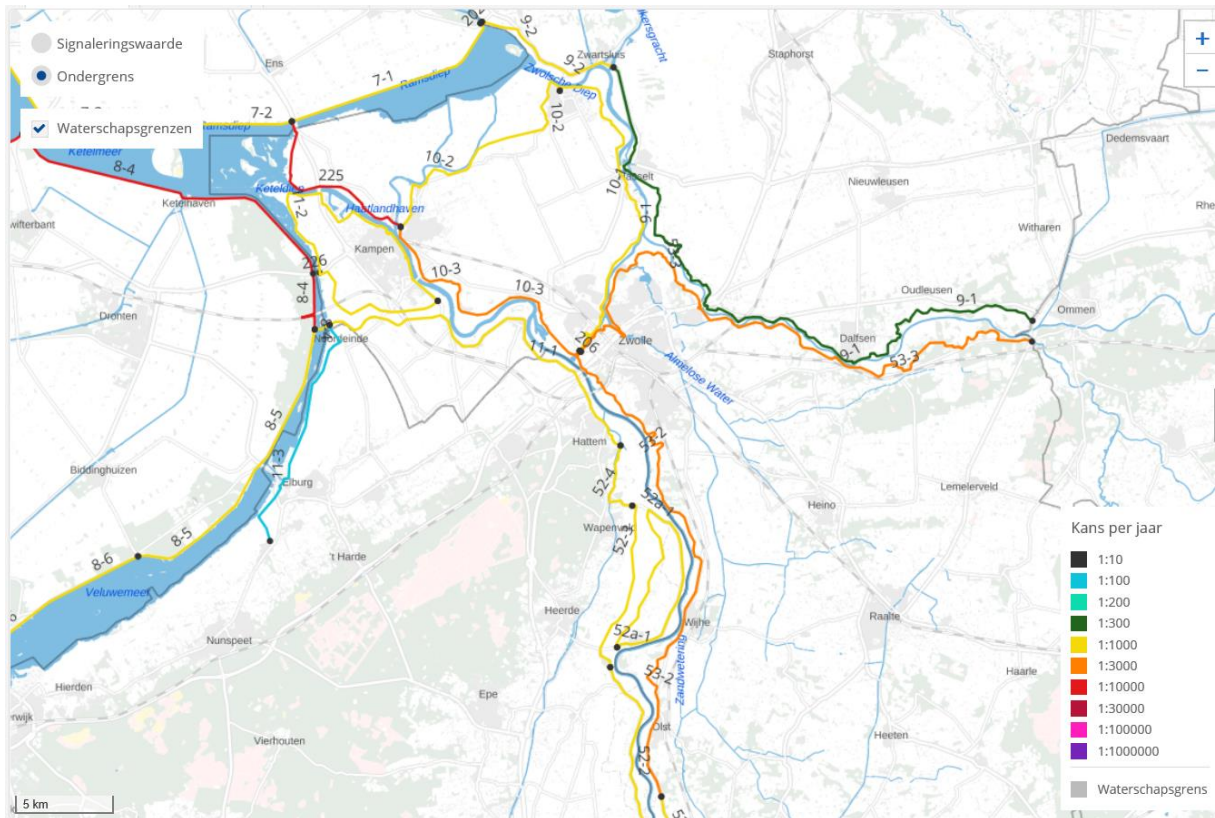
Het Waterschap Drents Overijsselse Delta heeft op dit moment 1005 kilometer aan keringen, waarvan circa 240km primaire kering in haar beheer, weergegeven in Figuur 20 (WDOdelta, 2019). Binnen deze primaire keringen vallen 11 normtrajecten te onderscheiden. De lengte van deze trajecten is variërend tussen de 8,1 km, traject 9-2, en de 39,0 km, traject 9-1 beide onderdeel van dijkkring Vollenhove. De belangrijkste waterwegen door het gebied zijn de Overijsselse Vecht, het Zwarte Water en de IJssel (Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, 2017).



Figuur 20: Beheergebied WDOdelta met weergave primaire keringen



Een overzicht van de ondergrensen per dijktraject voor het gebied van WDOdelta is verkregen vanaf het waterveiligheidsportaal (Informatiehuis Water, 2019) en is te zien in Figuur 21.



Figuur 21: Overzicht normtrajecten met bijbehorende ondergrens (Informatiehuis Water, 2019)

Vanuit deze schematische weergave zijn de waarden voor de norm per dijktraject afgeleid en weergegeven in Tabel 10.

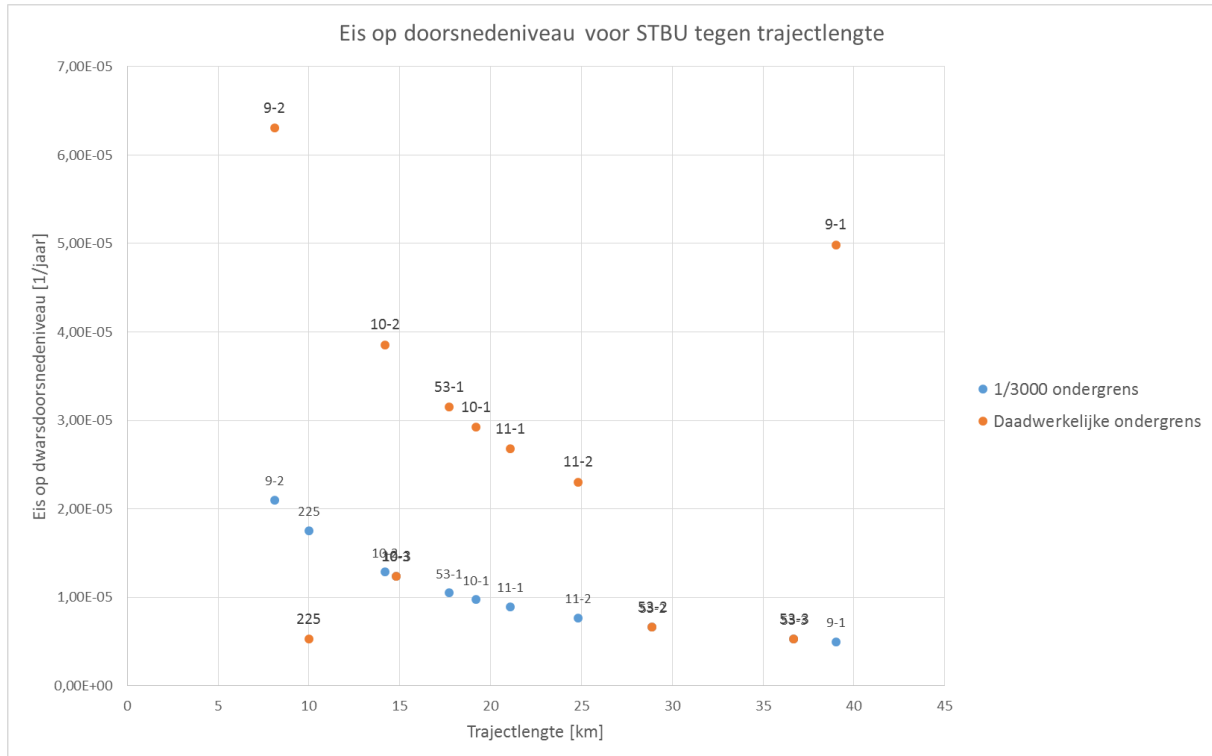
Tabel 10: Overzicht dijktrajecten IJsseldelta WDOdelta inclusief lengte, onderdeel van dijkkring en norm

Dijktraject	Lengte [km]	Onderdeel van dijkkring	Norm (ondergrens)
9-1	39	Vollenhove	1/300
9-2	8,1	Vollenhove	1/1000
10-1	19,2	Mastenbroek	1/1000
10-2	14,2	Mastenbroek	1/1000
10-3	14,8	Mastenbroek	1/3000
11-1	21,1	IJsseldelta	1/1000
11-2	24,8	IJsseldelta	1/1000
53-1	17,7	Salland	1/1000
53-2	28,9	Salland	1/3000
53-3	36,7	Salland	1/3000
225	10	Ramspolkring	1/10000

## - LENGTE-EFFECT

Het lengte-effect heeft invloed op de faalkanseis per doorsnede die aan STBU wordt toegekend. De factor voor het lengte effect is namelijk opgenomen in de formule voor de bepaling van de faalkanseis.

Stel dat ieder dijktraject van WDO Delta dezelfde norm van 1/3000 kans per jaar zou hebben, dan zou de faalkanseis op doorsnedeniveau voor STBU ten opzichte van de lengte van het traject er uitzien als de blauwe reeks in Figuur 22. Als vervolgens de daadwerkelijke norm van alle dijktrajecten wordt genomen heeft dat het resultaat zoals de oranje reeks.



Figuur 22: Eis op doorsnedeniveau voor STBU tegen de trajectlengte voor een 1/3000 ondergrens en de daadwerkelijke ondergrens van het normtraject

De blauwe reeks waarbij de norm hetzelfde is voor ieder traject laat eigenlijk een zuivere weergave van het lengte-effect zien. De kans dat de dijk op een bepaalde plek bezwijkt is kleiner dan de kans dat de dijk ergens binnen het traject bezwijkt. Om deze reden wordt de gestelde faalkanseis per doorsnede groter naarmate de lengte van het traject groter wordt. Echter is de norm die aan ieder traject wordt gesteld niet gelijk, wat ervoor zorgt dat de uiteindelijke faalkanseis eruit ziet zoals de oranje reeks.

## 9.2. OPTIMALISATIEMOGELIJKHEDEN PER DIJKTRAJECT

Om aan te geven waar optimalisatiemogelijkheden per traject kunnen liggen zal ieder traject een score tussen 1 en 5 krijgen, waarbij 5 een grote kans op optimalisatiemogelijkheden biedt. Hierbij is onderscheidt gemaakt tussen optimalisatiemogelijkheden binnen de faalkanseis en optimalisatiemogelijkheden binnen de schematisatie.

Categorieën binnen de faalkanseis bestaan uit:

- Herstel
- Snelle val

Categorieën binnen de schematisatie bestaan uit:

- Talud helling
- Freatische lijn
- Verkeersbelasting

---

### 9.2.1. RELEVANTE KENMERKEN DIJKTRAJECTEN WDODELTA

Om waardes toe te kennen aan ieder dijktraject, is informatie van de dijktrajecten verzameld. Dit is gedaan in samenspraak met specialisten waterveiligheid en een keringbeheerder van WDOdelta. De verzamelde informatie is weergegeven in Tabel 11. Hierin is per dijktraject aangegeven wat de faalkans op doorsnedeniveau is voor STBU en piping; wat globaal gezien de helling van het buitentalud is; hoe globaal gezien het dijkmateriaal eruitziet; hoelang de geschatte hersteltijd is, wat een optelsom is van de tijd tot opmerken en de tijd voor het uitvoeren; hoe de infrastructuur op de kruin eruit ziet. Voor de tijd tot opmerken en de tijd voor het uitvoeren zijn scores gegeven met + en – tekens. Aan de hand hiervan is per dijktraject een geschatte hersteltijd opgesteld in samenspraak met een waterkeringbeheerder.

Tabel 11: Overzicht gegevens dijktrajecten WDOdelta

Dijktraject	$P_{eisdns,STBU}$	$P_{eisdns,pijping}$	Talud helling	Dijkmateriaal	Herstel			Bereikbaarheid
					Opmerken	Uitvoeren	Hersteltijd	
9-1	4,98E-05	2,62E-04	1:3/1:4, oostelijk deel > 1:4	80% zand, 20% klei	++/+/-	++/-	Variërend tussen <1dag en 1 week	Grootste deel voetpad, westelijk stuk N-weg
9-2	6,30E-05	3,53E-04	1:3/1:4	Klei	++	++	<1dag	N-weg
10-1	2,93E-05	1,57E-04	1:3/1:4, delen $\geq$ 1:2	Klei, fracties zand	+/-	-	Variërend tussen 2/3 dagen en 1 week	Weg, fietspad
10-2	3,86E-05	2,09E-04	1:3/1:4	80% klei, 20% zand met kleibekleding	+/-	+	Variërend tussen 2/3 dagen en 1 week	Westelijk stukje weg, verder niets
10-3	1,24E-05	6,70E-04	1:3/1:4	80% klei, 20% zand met kleibekleding	+	++	<1 dag tot 2/3 dagen	Weg, fietspad
11-1	2,68E-05	1,43E-04	1:3/1:4	20% zand met kleibekleding, rest onbekend	+/+	++	2/3 dagen tot 1 week	Weg, fietspad
11-2	2,30E-05	1,22E-04	1:3/1:4	50% klei, 25% zand met kleibekleding, 25% onbekend of kunstwerk	+/+	+	2/3 dagen	Fietspad
53-1	3,15E-05	7,70E-05	1:3/1:4, fractie $\geq$ 1:2	Zand	++	++	<1 dag	N-weg
53-2	6,64E-06	1,58E-05	1:3/1:4, fractie $\geq$ 1:2	80% zand, 20% klei	++	++	<1 dag	Weg, fietspad
53-3	5,29E-06	1,25E-05	1:3/1:4, oostelijk deel > 1:4	Zand, fracties klei	+/-	+/-	2/3 dagen tot 1 week	Fiets
225	5,26E-06	2,91E-05	1:3/1:4	Klei	+/-	+/-	2/3 dagen tot 1 week	Fiets

---

### 9.2.2. SCORES PER CATEGORIE

Voor elke categorie krijgt ieder dijktraject een score tussen 1 en 5. Wanneer meerdere situaties van de criteria voorkomen binnen één dijktraject, zal deze een bandbreedte toegewezen krijgen. De verzamelde relevante kenmerken uit Tabel 11 zijn gebruikt om voor ieder traject per aspect een score toe te kennen voor optimalisatiemogelijkheden. De criteria voor de scores per categorie zijn in de volgende paragrafen weergegeven.

---

#### 9.2.2.1. FAALKANSEIS

##### - HERSTEL

Nadat een buitenwaartse afschuiving heeft plaatsgevonden zal deze opgemerkt moeten worden en bekend moeten worden bij WDODelta. Hierna kan overgegaan worden op het opstellen van een herstelmaatregel welke vervolgens uitgevoerd dient te worden. Het totale tijdsbestek hiervan geeft de totale benodigde hersteltijd na een buitenwaartse instabiliteit:

Totale hersteltijd = Tijd tot opmerken + Tijd uitvoeren herstelmaatregel

De gegeven tijd als criteria staat voor deze tijd tot opmerken plus de benodigde tijd voor het uitvoeren van een herstelmaatregel. Hierbij is geen onderscheid gemaakt tussen verschillende typen herstelmaatregelen. De hersteltijden per dijktraject zijn opgesteld in samenspraak met waterkeringbeheerder Marco de Wit van WDODelta.

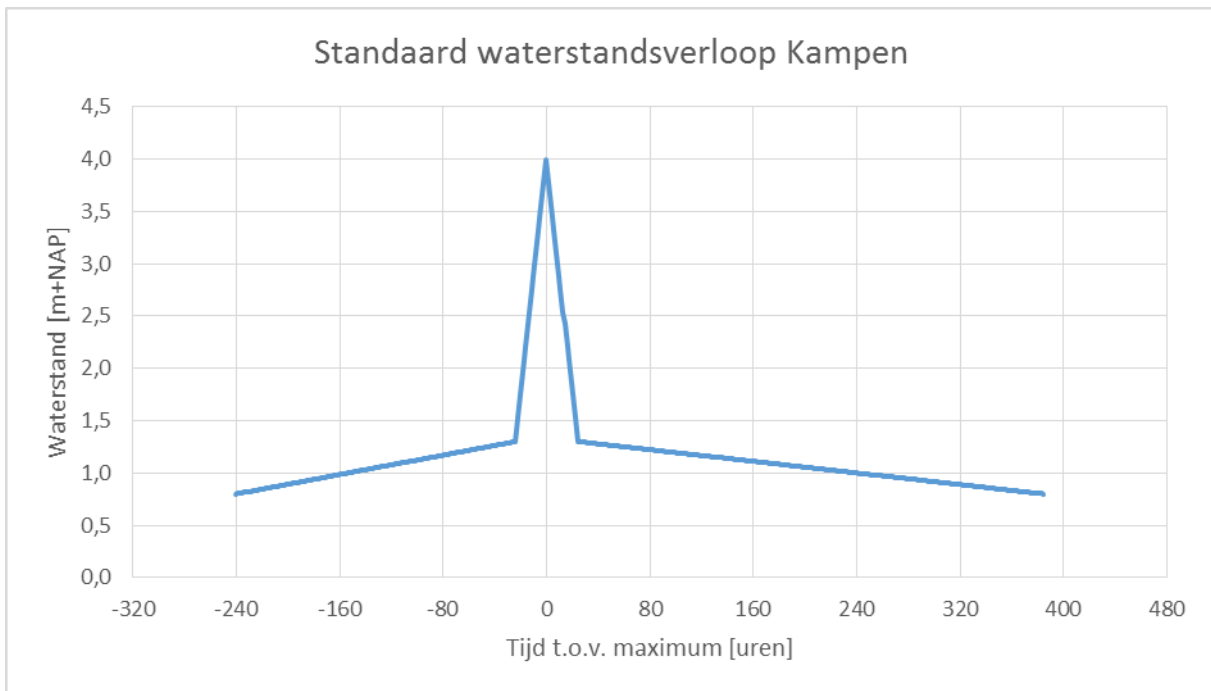
Score	Criteria
1	> 1 week
2	1 week
3	2 - 3 dagen
4	1 - 2 dagen
5	< 1 dag

##### - SNELLE VAL

Binnen het beheergebied van WDODelta zijn er gebieden te onderscheiden waarbij de waterstand invloed ondervindt van het IJsselmeer en waar dit niet het geval is. Om de impact van deze invloed aan te geven zijn hieronder het verloop van een hoogwatergolf weergegeven voor respectievelijk Kampen (Figuur 23) en Olst (Figuur 24). Dit verloop is opgesteld middels de applicatie Waterstandsverloop. Kampen ondervindt hierbij impact vanaf het IJsselmeer, waar dit voor Olst niet het geval is door de ligging verder stroomopwaarts. Vanuit de hoogwatergolven is te zien dat bij Kampen een veel sneller verloop van de buitenwaterstand plaats vindt met een tijdsbestek van circa 24 uur. Voor Olst duurt dit verloop veel langer met een tijdsbestek van circa 12 dagen. Dit maakt dat de kans op een snelle val van het buitenwater groter is voor Kampen dan voor Olst.

*Kampen*

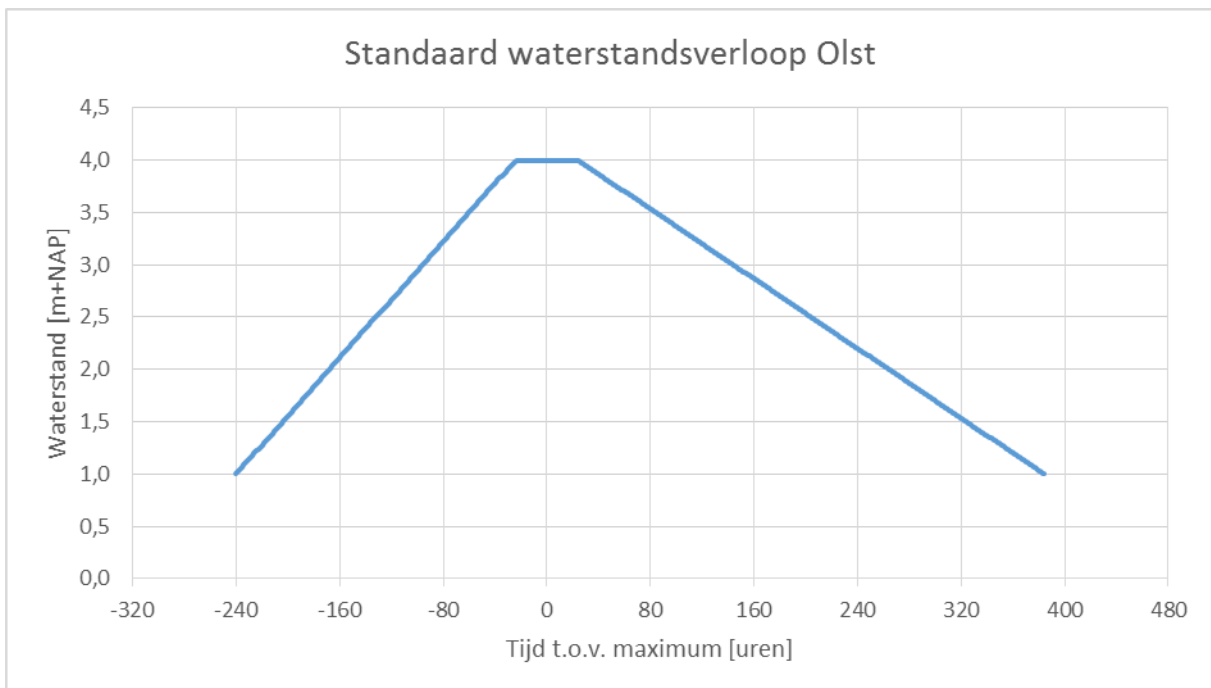
Invoerpunt: 500792  
Waterstand: 4 m+NAP  
Herhalingstijd: 1000 jaar



**Figuur 23: Hoogwatergolf Kampen bij een waterstand van 4m+NAP en een herhalingstijd van 1000 jaar**

*Olst*

Invoerpunt: 501734  
Waterstand: 4 m+NAP  
Herhalingstijd: 1000 jaar



**Figuur 24: Hoogwatergolf Olst bij een waterstand van 4m+NAP en een herhalingstijd van 1000 jaar**

De criteria voor de kans op een snelle val zijn opgesteld op basis van een hoogwatergolfanalyse met de applicatie Waterstandsverloop. Binnen deze analyse zijn voor alle dijktrajecten de hoogwatergolven in kaart gebracht voor het meest oostelijke, meest westelijke en het midden van ieder traject. De resultaten per traject, voor 2m zakking en complete zakking, in uren zijn weergegeven in Tabel 12.

Tabel 12: Resultaten analyse waterstandsverloop

Dijktraject	2m zakking [uren]			Complete zakking [uren]			Opmerkingen		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
9-1	-	230	230	310	240	240			
9-2	-	-	-	310	310	310			
10-1	-	-	-	310	240	240			
10-2	-	-	-	310	310	335			
10-3	185	240	240	360	360	360			
11-1	240	240	240	360	360	360			
11-2	18	-	290	385	385	360	3,7m zakking binnen 24h	1,7m zakking binnen 24h	
53-1							Geen gegevens beschikbaar, snelle val niet aannemelijk vanwege ligging stroomopwaarts		
53-2	240	240	240	360	360	360			
53-3	-	230	230	240	240	240			
225	18	18	-	385	385	385	3,7m zakking binnen 24h	3,7m zakking binnen 24h	1,7m zakking binnen 24h
1 Meest westelijke meting 2 Meting in het midden 3 Meest oostelijke meting									

Score	Criteria
1	Geen 2m zakking en complete zakking >168 uur
2	Geen 2m zakking en complete zakking <168 uur
3	Voorkomen 2m zakking, maar niet binnen 24 uur
4	1m < zakking < 2m binnen 24 uur
5	2m zakking binnen 24 uur

#### 9.2.2.2. SCHEMATISATIE

##### - TALUD HELLING

De helling van het talud heeft invloed op de kans voor het optreden van een buitenwaartse instabiliteit. Via collegiaal overleg zijn criteria opgesteld voor de samenhang tussen de helling van het talud en het risico op een buitenwaartse afschuiving. Een taludhelling gelijk aan of steiler dan 1:2 geeft hierbij een verhoogd risico, een talud helling van 1:3 heeft een gemiddeld risico en een talud helling flauwer dan 1:3 vormt geen risico.

De gedachte achter het meenemen van de helling van het talud is als volgt:

*Hoe steiler de helling van het buitentalud, hoe hoger de kans op een buitenwaartse instabiliteit. Door deze verhoogde kans is er meer baat bij optimalisatie van dit dijktraject.*

Score	Criteria
1	>1:4
2	1:4
3	1:3
4	1:2
5	<1:2

#### - FREATISCHE LIJN

De criteria voor de scores aangaande optimalisatiemogelijkheden met betrekking tot de freatische lijn zijn opgesteld aan de hand van de resultaten van de kwantitatieve analyse met D-Geo Stability. Wanneer er een grote verandering optreedt in safety factor na aanpassing van de freatische lijn, wordt hiervoor een hoge score toegekend. Dit betekent namelijk dat optimalisatie van de ligging van de freatische lijn bij het betreffende dijkprofiel een aanzienlijke winst kan opleveren voor de beoordeling.

<b>Score</b>	<b>Criteria</b>
1	Zanddijk met kleibekleding
2	
3	Kleidijk
4	
5	Zanddijk

#### - VERKEERSBELASTING

De criteria voor de scores aangaande optimalisatiemogelijkheden met betrekking tot de verkeersbelasting zijn opgesteld aan de hand van de resultaten van de kwantitatieve analyse met D-Geo Stability. Wanneer er een grote verandering optreedt in safety factor na aanpassing van de verkeersbelasting, wordt hiervoor een hoge score toegekend. Dit betekent namelijk dat optimalisatie van de ligging van de freatische lijn bij het betreffende dijkprofiel een aanzienlijke winst kan opleveren voor de beoordeling.

<b>Score</b>	<b>Criteria</b>
1	Zanddijk
2	
3	Zanddijk met kleibekleding
4	
5	Kleidijk



### 9.3. RESULTATEN

Na het toekennen van een score tussen 1 en 5 voor ieder dijktraject voor de eerdergenoemde aspecten is een overzicht gemaakt van de optimalisatiemogelijkheden per dijktraject. Dit is gedaan voor de schematisatie als wel de faalkanseis.

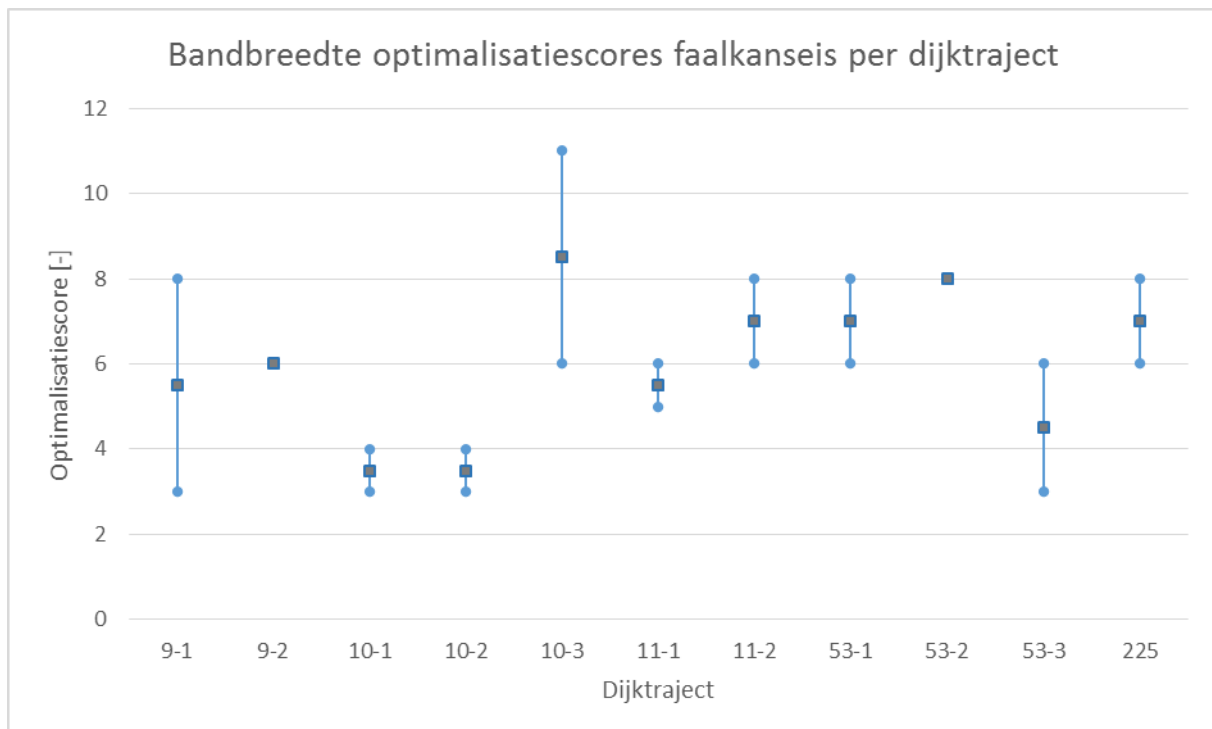
#### 9.3.1. FAALKANSEIS

Het resultaat van de scores per dijktraject met betrekking tot de faalkanseis is te zien in Tabel 13.

Tabel 13: Scores per dijktraject WDOdelta aangaande optimalisatiemogelijkheden ten behoeve van de faalkanseis

Dijktraject	Score herstel	Score snelle val	Totaal
9-1	2 – 5	1 – 3	3 – 8
9-2	5	1	6
10-1	2 – 3	1	3 – 4
10-2	2 – 3	1	3 – 4
10-3	3 – 5	3	6 – 11
11-1	2 – 3	3	5 – 6
11-2	3	3 – 5	6 – 8
53-1	5	1 – 3 <sup>1</sup>	6 – 8
53-2	5	3	8
53-3	2 – 3	1 – 3	3 – 6
225	2 – 3	4 – 5	6 – 8

De bandbreedte in score per dijktraject is weergegeven in Figuur 25.



Figuur 25: Bandbreedte scores per dijktraject ten behoeve van de faalkanseis

<sup>1</sup> In Tabel 12 staat aangegeven dat de kans op een snelle val niet aannemelijk is voor normtraject 53-1. Vandaar dat de scores 4 en 5 kunnen worden uitgesloten en een bandbreedte van 1 – 3 is toegekend.

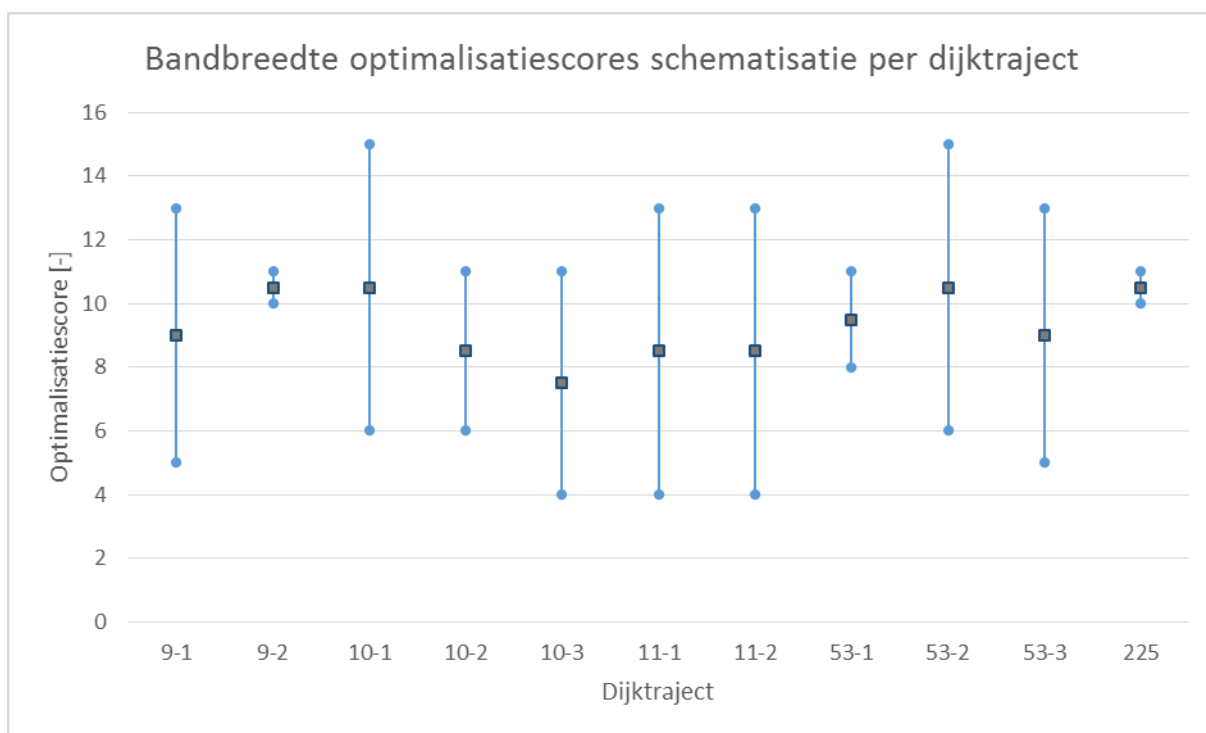
### 9.3.2. SCHEMATISATIE

Het resultaat van de scores per dijktraject met betrekking tot de schematisatie is te zien in Tabel 14.

Tabel 14: Scores per dijktraject WDOdelta aangaande optimalisatiemogelijkheden ten behoeve van de schematisatie

Dijktraject	Score talud helling	Score freatische lijn	Score verkeersbelasting	Totaal
<b>9-1</b>	1 – 3	3 – 5	1 – 5	5 – 13
<b>9-2</b>	2 – 3	3	5	10 – 11
<b>10-1</b>	2 – 5	3 – 5	1 – 5	6 – 15
<b>10-2</b>	2 – 3	1 – 3	3 – 5	6 – 11
<b>10-3</b>	2 – 3	1 – 5	1 – 3	4 – 11
<b>11-1</b>	2 – 3	1 – 5 <sup>2</sup>	1 – 5 <sup>2</sup>	4 – 13
<b>11-2</b>	2 – 3	1 – 5 <sup>2</sup>	1 – 5 <sup>2</sup>	4 – 13
<b>53-1</b>	2 – 5	5	1	8 – 11
<b>53-2</b>	2 – 5	3 – 5	1 – 5	6 – 15
<b>53-3</b>	1 – 3	3 – 5	1 – 5	5 – 13
<b>225</b>	2 – 3	3	5	10 – 11

De bandbreedte in score per dijktraject is weergegeven in Figuur 26.



Figuur 26: Bandbreedte scores per dijktraject ten behoeve van de schematisatie

<sup>2</sup> Gehele bandbreedte vanwege ontbreken informatie grondopbouw dijkprofiel

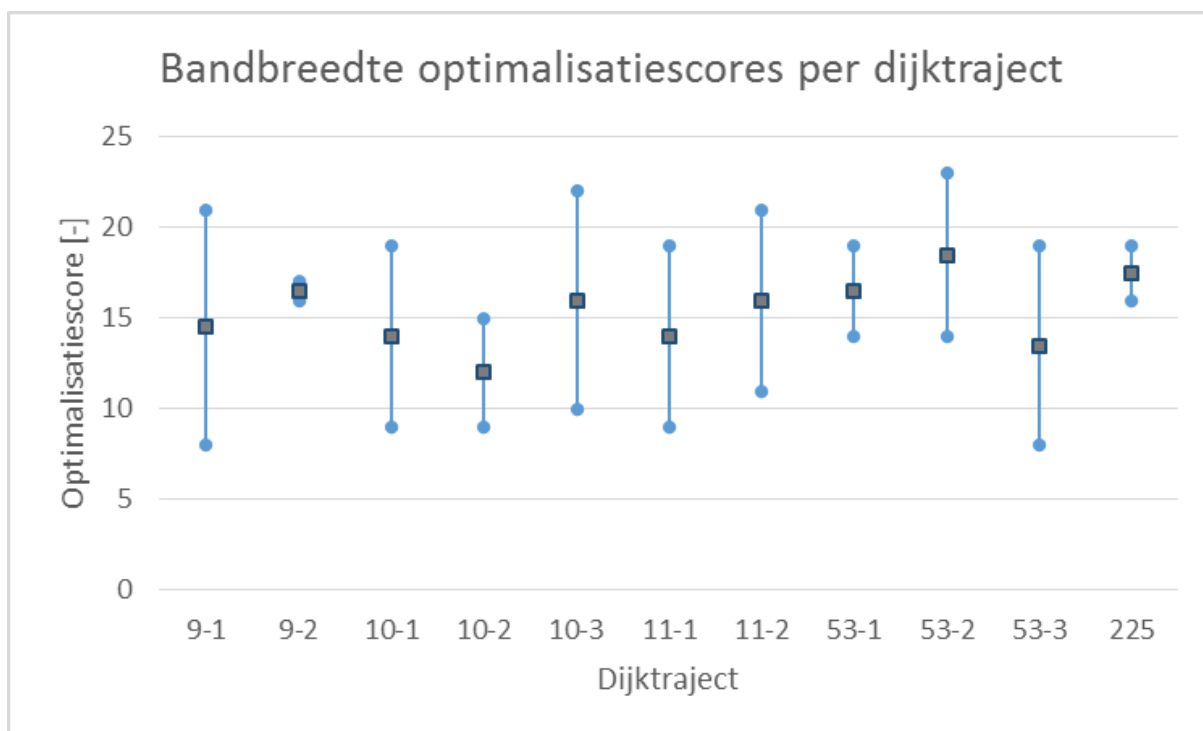
### 9.3.3. TOTAALSCORE

Wanneer de scores van de dijktrajecten op basis van de faalkanseis en van de schematisatie met elkaar gecombineerd worden, geeft dit de totaalscores voor de optimalisatiemogelijkheden per dijktraject zoals weergegeven in Tabel 15.

Tabel 15: Scores per dijktraject WDOdelta aangaande optimalisatiemogelijkheden ten behoeve van de faalkanseis en de schematisatie

Dijktraject	Faalkanseis	Schematisatie	Totaal
9-1	3 – 8	5 – 13	8 - 21
9-2	6	10 – 11	16 - 17
10-1	3 – 4	6 – 15	9 - 19
10-2	3 – 4	6 – 11	9 - 15
10-3	6 – 11	4 – 11	10 - 22
11-1 <sup>3</sup>	5 – 6	4 – 13	9 - 19
11-2 <sup>3</sup>	7 – 8	4 – 13	11 - 21
53-1 <sup>3</sup>	6 – 8	8 – 11	14 - 19
53-2	8	6 – 15	14 - 23
53-3	3 – 6	5 – 13	8 - 19
225	6 - 8	10 - 11	16 - 19

De bandbreedte in totaalscore per dijktraject is weergegeven in Figuur 27.



Figuur 27: Bandbreedte scores per dijktraject ten behoeve van de faalkanseis en de schematisatie

### BEVINDINGEN EN OPMERKINGEN

Op basis van het gemiddelde binnen de bandbreedte scores de trajecten 10-3, 53-2 en 11-2 het hoogst met betrekking tot optimalisatie ten behoeve van de faalkanseis. Voor de normtrajecten 53-2 en 11-2 is dit met de grootste zekerheid te zeggen, doordat deze trajecten een kleine bandbreedte laten zien.

<sup>3</sup> Grotere bandbreedte vanwege ontbreken informatie snelle val en grondopbouw dijkprofiel zoals aangegeven in voetnoten 1 en 2.

De trajecten 10-1 en 10-2 scoren het slechts binnen optimalisatiemogelijkheden ten behoeve van de faalkanseis. Dit hoeft echter niet te betekenen dat optimalisatie compleet zinloos is.

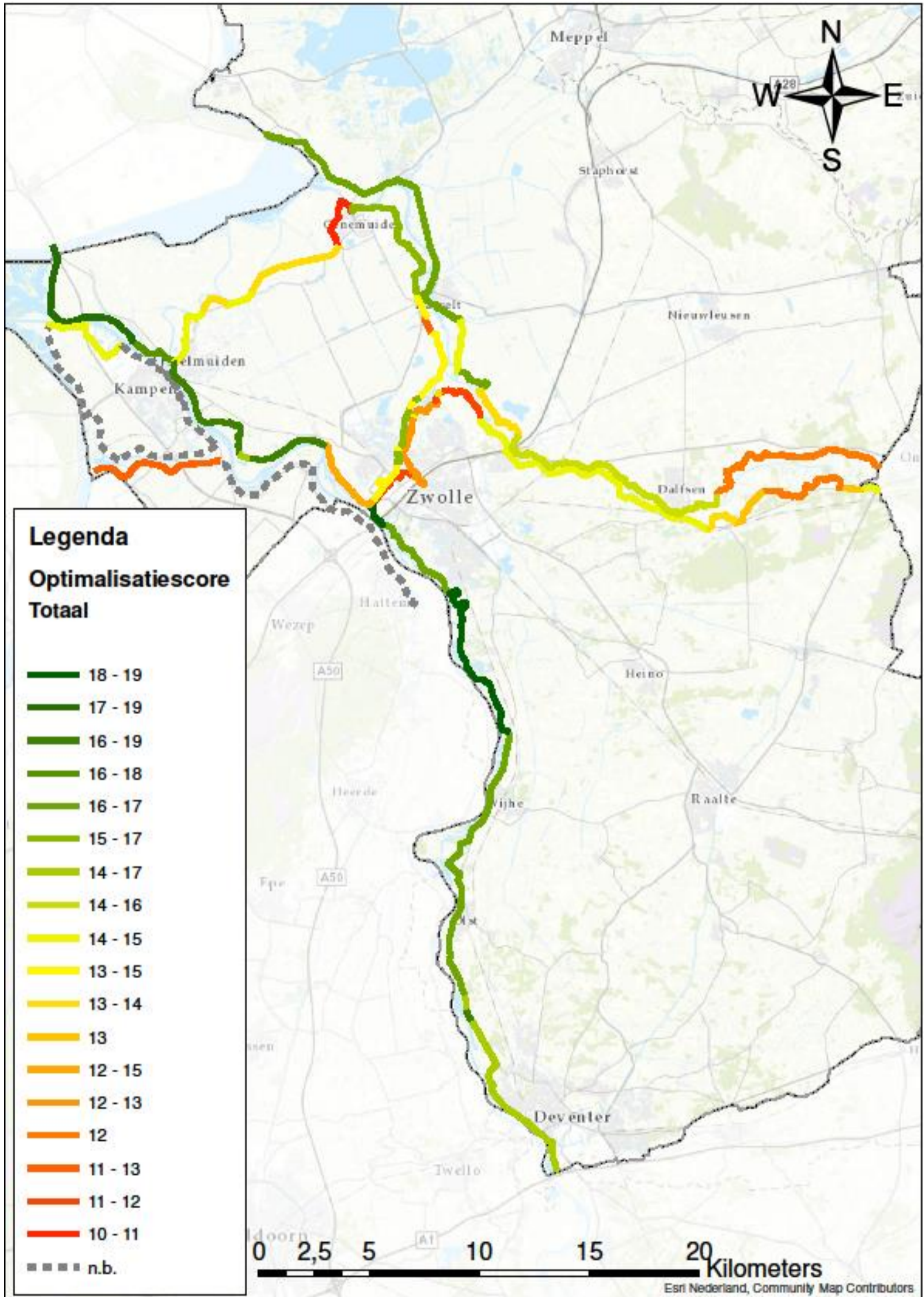
Op basis van het gemiddelde binnen de bandbreedte scoren de trajecten 9-2, 10-1, 53-2 en 225 het hoogst met betrekking tot optimalisatie ten behoeve van de schematisatie (Figuur 26). Voor de normtrajecten 9-2 en 225 is dit met de grootste zekerheid te zeggen, doordat deze trajecten een kleine bandbreedte laten zien. Het normtraject 10-3 behaalt de laagste score, met een gemiddelde score van 7,5. Over het algemeen scoren de dijktrajecten van WDO Delta vrij goed binnen de gestelde criteria voor de scores ten behoeve van de schematisatie. Hierbij liggen alle gemiddelde waarden van de trajecten tussen de 7,5 en de 10,5.

Wanneer gekeken wordt naar de gecombineerde scores van de faalkanseis en de schematisatie, is te zien dat de normtrajecten 53-2, 225, 53-1 en 9-2 het hoogst scoren. De trajecten 9-2 en 225 vertonen de kleinste bandbreedte, wat de hoogste zekerheid geeft op de gegeven score voor optimalisatiemogelijkheden.

---

#### 9.3.4. VISUELE WEERGAVE

Om een duidelijk beeld te geven van de optimalisatiescores per traject, zijn met behulp van ArcGis afbeeldingen gemaakt van de optimalisatiescores per dijktraject. In deze kaarten is binnen de normtrajecten aangegeven wat de verschillende optimalisatiescores zijn op specifieke locaties. Dit geeft aan waar de bandbreedte in de score voor het totale normtraject vandaan komt. De kaarten voor ieder afzonderlijk aspect en voor de totaalscore van faalkanseis en schematisatie zijn weergegeven in Bijlage E. Het overzicht van de totale optimalisatiescore is te zien in Figuur 28.



Figuur 28: Visuele weergave optimalisatiescores dijktrajecten WODelta

## 10. DISCUSSIE

In dit hoofdstuk zullen het proces, de berekeningen en de resultaten bediscussieerd worden.

### - INTERVIEWS

De afgenomen interviews hebben samen met literatuuronderzoek gezorgd voor de basis van het onderzoek. Echter zullen interviews altijd een mate van subjectiviteit in zich hebben. Er is geprobeerd suggestiviteit binnen de vraagstelling te voorkomen en hiermee de objectiviteit van de interviews positief te beïnvloeden. Ondanks deze aanpak is het niet met zekerheid te zeggen dat alle geïnterviewden een geheel zelfgestuurd antwoord hebben gegeven.

Bij de interviews met specialisten op het gebied van waterveiligheid en geotechniek zijn personen geïnterviewd vanuit WDODelta als wel andere waterschappen, een ingenieursbureau en een onderzoeksinstituut. Via deze aanpak is geprobeerd een complete en veelzijdige weergave te geven van de omgang met buitenwaartse macrostabiliteit. De interviews met de waterkeringbeheerders zijn echter alleen uitgevoerd met twee waterkeringbeheerders binnen WDODelta. Hierdoor is niet bekend of de aanpak na een buitenwaartse instabiliteit bij andere waterschappen via dezelfde procedure verloopt. Echter gaven specialisten van WSRL wel aan wat bij hen de te verwachten procedure is. Dit kwam grotendeels overeen met de aanpak bij WDODelta.

### - FAALKANSEIS

Vanuit de interviews werd aangegeven dat de faalkansruimtefactor alleen aangepast kan worden voor een geheel dijktraject. De input voor het opstellen van de geconditioneerde faalkans kan echter wel verschillend zijn binnen een normtraject. Dijkvakken die minder goed inspecteerbaar zijn hebben bijvoorbeeld een langere hersteltijd omdat de 'opmerktijd' langer is.

Een punt ter discussie betreffende het aanpassen van de faalkanseis is het beheer dat wordt toegepast. Wanneer een lagere faalkanseis voor STBU wordt geaccepteerd betekent dit ook dat aangetoond dient te worden dat een waterschap om kan gaan met deze lagere eis. Een lagere eis betekent namelijk ook dat de kering eerder kan bezwijken dan met een standaard faalkanseis. Beheer, in de vorm van procedure, mankracht en materiaal dient hierop aangesloten te zijn.

### - STABILITEITSBEREKENINGEN

Via de applicatie D-Geo Stability van Deltares zijn stabiliteitsberekeningen uitgevoerd voor verschillende scenario's voor dijkopbouw en ondergrondopbouw. Deze opbouw van materialen is opgesteld in samenspraak met een specialist waterveiligheid van WDODelta. Hierbij zijn de verschillende parameters voor de grondlagen vastgesteld. Wanneer op specifieke locaties bepaalde grondlagen andere eigenschappen hebben, heeft dit invloed op de safety factor die verkregen wordt bij de stabiliteitsberekening.

Naast deze gevoeligheid in grondmateriaal is de geometrie van de dijk een discussiepunt. Binnen dit onderzoek is gebruik gemaakt van een zeer strakke geometrie. In praktijk zal de geometrie oneffenheden tonen in helling als wel in bekleding. Dit kan lokaal gevolgen hebben voor de sterkte van het dijklichaam.

In het algemeen kan gezegd worden dat de resultaten van de stabiliteitsberekeningen enkel gelden binnen deze uitgangspunten en schematisatie van dijklichaam en ondergrond. In de praktijk zijn er vele andere scenario's mogelijk en verschilt de dijkopbouw en ondergrondopbouw aanzienlijk over de lengte van een traject. Doordat er veel variabelen zijn die invloed hebben op de uitkomst van de beoordeling dienen de resultaten uit dit rapport gebruikt te worden als denkrichting, niet als letterlijke antwoorden op vragen. Dat wil niet zeggen dat de resultaten uit dit rapport onjuist zijn, maar dat interpretatie hiervan voorzichtig moet gebeuren gezien de mogelijk grote variantie in relevante parameters.

#### *Freatische lijn*

De verscheidene scenario's voor de ligging en het verloop van de freatische lijn zijn opgesteld in samenspraak met een waterveiligheidsspecialist van WDODelta. De filosofie hierachter is dat het buitentalud van het dijklichaam als eerst komt droog te vallen na zakking van de buitenwaterstand. Dit

is beredeneerd vanuit de theorie dat het water afstroomt naar de zijde met de minste tegendruk waarbij de doorlatendheid van de grond over het gehele dijklichaam gelijk is. Na droogvallen van de toplaag van het buitentalud zakt de freatische lijn met gelijke stappen onder de buitenkruinlijn. Het is mogelijk dat specialisten waterveiligheid van andere waterschappen dit op een andere manier geschematiseerd zouden hebben. Daarnaast is het vergelijken van de resultaten tussen de drie dijkprofielen lastiger doordat de basis schematisatie niet voor ieder profiel hetzelfde is. Zakking van de freatische lijn onder de buitenkruinlijn zorgt daardoor voor verschillende percentages in droogvallen van het dijkprofiel per scenario.

De kwantitatieve analyse liet zien dat het effect van aanpassing van de freatische lijn het kleinst was voor een zanddijk met kleibekleding. Een verklaring hiervoor ligt bij de huidige schematisatie. De ligging van de freatische lijn tijdens hoogwater voor de zanddijk met dichte bekleding is namelijk lager dan voor de andere profielen, zoals voorgeschreven in het TRWD (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 2004).

Voor interpretatie van de resultaten van de stabiliteitsberekeningen voor de freatische lijn is het van belang dat de gevoeligheid is aangetoond van de ligging van deze lijn. Of een bepaald scenario in praktijk kan optreden verschilt hierbij per dijkvak. Dit dient per beoordeling of ontwerp bepaald te worden. Deze gevoeligheidsanalyse kan hierbij wel gebruikt worden om in te schatten of nader onderzoek naar de ligging van de freatische lijn nuttig is en een bijdrage kan leveren aan de optimalisatie van de schematisatie.

#### *Verkeersbelasting*

Naast de freatische lijn, zijn ook voor verschillende scenario's voor de verkeersbelasting stabiliteitsberekeningen uitgevoerd. Het uitgangspunt hierbij verschilt echter van deze bij de freatische lijn. Van de freatische lijn is de ligging niet goed bekend, met name na een val van hoogwater. De verkeersbelasting is te beïnvloeden, hier valt winst te boeken door middel van beleidsmaatregelen. De stabiliteitsberekeningen laten zien wat het effect kan zijn van aanpassing van de toegestane verkeersbelasting op het dijklichaam.

#### *Grensspanningen*

Stabiliteitsberekeningen voor de grensspanningen zijn uitgevoerd om aan te tonen wat het effect van deze parameter is op de uiteindelijke safety factor van een dijklichaam. De grensspanningen zijn namelijk lastig te bepalen en kunnen enorm verschillen binnen de dimensies van het dijklichaam.

#### *Combinatie van aanpassingen in schematisatie*

Binnen dit onderzoek zijn aanpassingen in schematisatie uitgevoerd voor de freatische lijn, de verkeersbelasting en de grensspanningen. Echter zijn er geen berekeningen uitgevoerd met een combinatie van bijvoorbeeld een aangepaste freatische én een aangepaste verkeersbelasting. Wellicht kan dit meer inzicht geven op de relatie tussen de drie onderdelen.

### **- OPTIMALISATIEMOGELIJKHEDEN WDODELTA**

De scores voor optimalisatiemogelijkheden binnen het beheergebied van WDOdelta op basis van de gevonden aspecten dienen op een globale manier geïnterpreteerd te worden. De dijktrajecten kunnen namelijk sterk verschillen in eigenschappen over de lengte. Vandaar dat bandbreedtes zijn gegeven voor de scores voor optimalisatiemogelijkheden. Binnen de trajecten met een zeer grote bandbreedte dient goed naar de gestelde criteria voor de gegeven scores te kijken in het geval dat optimalisatie voor STBU toegepast gaat worden. Op specifieke locaties kan de score namelijk hoger of lager zijn dan het gemiddelde over het gehele traject. De criteria voor freatische lijn en verkeersbelasting zijn opgesteld op basis van de verkregen resultaten in hoofdstuk 8.2. Hierbij moet de kanttekening gemaakt worden dat de resultaten binnen dit hoofdstuk zijn verkregen via een fictieve, maar realistische case. Binnen het gebied van WDOdelta zouden de uitkomsten kunnen verschillen door toedoen van andere hydraulische belastingen of dijkprofielen en ondergronden. Daarnaast dienen de criteria voor de scores van het aspect 'snelle val' bediscussieerd te worden. Een val van 2 meter is namelijk zeker relevant ten behoeve van STBU, maar de duur van de complete zakking is hierin minder relevant.

Naast de besproken aspecten voor optimalisatie van de faalkansen en de schematisatie kan het zijn dat er meer mogelijkheden zijn, welke niet naar voren zijn gekomen in dit verslag. De bevindingen gepresenteerd in dit rapport geven een denkrichting en een globaal gevoel bij de verschillende aspecten bij macrostabiliteit buitenwaarts.



## 11. CONCLUSIE

Binnen dit onderzoek zijn optimalisatiemogelijkheden in kaart gebracht voor het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts ten behoeve van de faalkanseis en de schematisatie. Hiervoor zijn interviews afgenomen, is literatuuronderzoek uitgevoerd en zijn berekeningen gedaan naar de impact van aanpassingen binnen de faalkanseis en de schematisatie. Ter afronding van het onderzoek zullen in dit hoofdstuk conclusies gegeven worden op basis van de uitgevoerde methodes en analyse. Naderhand zullen enkele aanbevelingen gedaan worden voor het Waterschap Drents Overijsselse Delta en voor vervolgonderzoek.

De hoofdvraag luidde als volgt:

**Hoofdvraag:** *Hoe kan de faalkanseis en de schematisatie van het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts worden geoptimaliseerd?*

Het antwoord op deze hoofdvraag is verkregen met behulp van vier deelvragen. De conclusies per deelvraag zijn hieronder weergegeven.

**Deelvraag 1:** *Welke problemen worden er nu al ervaren en wat zijn de tijdelijke maatregelen voor dijkherstel met betrekking tot macrostabiliteit buitenwaarts?*

De problemen die ervaren worden zijn in twee categorieën te omvatten: praktische problemen en problemen met de beoordeling of het ontwerp. In praktische zin hebben zich weinig problemen voorgedaan met STBU. In hoofdstuk 6.1.1 zijn wel enkele voorbeelden gegeven van buitenwaartse afschuivingen. Volgens de geïnterviewde experts zijn er weinig problemen in de beoordeling en het ontwerp aangaande STBU geweest. Echter, sinds de invoer van de nieuwe normering en het ongedraineerd rekenen worden veel dijktrajecten afgekeurd op macrostabiliteit buitenwaarts.

De tijdelijke herstelmaatregelen vormen veelal praktische oplossingen voor het opvullen van het achtergebleven 'gat' na een buitenwaartse afschuiving. Dit kan zoal door middel van big bags, geotextiel of verkregen grond. De tijdelijke maatregelen staan beschreven in hoofdstuk 6.2. De meeste maatregelen zijn vrij snel te realiseren. Als de urgentie hoog is, is op veel locaties een herstelmaatregel te realiseren binnen een aantal dagen. Het opmerken van de buitenwaartse afschuiving speelt hierin ook mee. Waar dit bij een traject met een weg op de dijk vrij snel zal gebeuren, zal dit bij een traject zonder infrastructuur op de kruin minder snel het geval zijn.

**Deelvraag 2:** *Hoe kan de faalkanseis voor een dijktraject worden geoptimaliseerd aangaande macrostabiliteit buitenwaarts en wat is het effect van deze optimalisaties op de veiligheidsbeoordeling?*

Het is mogelijk om de faalkansruimtefactor voor STBI aan te passen. Vergroten van deze factor heeft tot gevolg dat de faalkanseis die aan STBU wordt gesteld op doorsnedeniveau groter wordt. Een van de mogelijkheden voor aanpassing is het omwisselen van de faalkansruimtefactor van STBI met deze van piping. Dit maakt dat de faalkansruimtefactor niet 0,04 is, maar 0,24. Deze vergroting met een factor 6 heeft een directe vergroting met dezelfde factor 6 in faalkanseis voor STBU als gevolg. Echter is dit alleen mogelijk als aangetoond kan worden dat de kans op piping zodanig klein is dat deze daardoor strenger kan worden getoetst en toch aan de norm voldoet.

Binnen het ontwerp kan aanpassing van de faalkansruimtefactor zinvol zijn. Stel dat binnen een ontwerp een verticale piping maatregel benodigd is, bijvoorbeeld een heavescherm, en er een buitenwaartse stabiliteitsopgave is. Dan kan de overweging gemaakt worden om toch de faalkansruimtefactoren van piping en STBU te wisselen. Hiermee kan bereikt worden dat de stabiliteitsopgave wegvalt en het heavescherm redelijk eenvoudig is uit te breiden.

Op dit moment wordt gerekend met een default waarde van 10% van de faalkans van STBI voor de kans dat een waterkering niet binnen de beschikbare hersteltijd gerepareerd kan worden na een buitenwaartse afschuiving. Waarbij er bij een volgend hoogwater een bres ontstaat met een overstroming als gevolg. Door hersteltijden te benaderen en uit te werken binnen het opstellen van

de faalkanseis kan winst geboekt worden voor de conditionele faalkans. Via deze weg kan de default waarde van 10% verlaagd worden naar bijvoorbeeld 1% of zelfs 0,1%. Verlagen van de conditionele faalkans heeft een verlaging van de faalkanseis met dezelfde factor als gevolg. Het grootste effect wordt behaald door het expliciet beschouwen van de hersteltijden, waarbij het finetunen van deze hersteltijden minder relevant is.

**Deelvraag 3:** *Hoe kan de schematisatie van het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts worden geoptimaliseerd en wat is het effect van deze optimalisaties op de veiligheidsbeoordeling?*

Een nauwkeurigere modellering van de freatische lijn na een val van hoogwater kan optimalisatiemogelijkheden bieden binnen de schematisatie. Een schematisatie waarbij de freatische lijn is gezakt tijdens een val van de buitenwaterstand heeft namelijk een aanzienlijk effect op de beoordeling van dit dijklichaam. Hoe verder de freatische lijn hierbij gezakt is, hoe hoger de uiteindelijke safety factor uit de stabiliteitsberekening.

Binnen de fictief uitgewerkte situatie met gegeven uitgangspunten heeft zakking van de freatische lijn het grootste effect op de safety factor van een zanddijk, gevolgd door een kleidijk en als laatste een zanddijk met kleibekleding.

Aanpassing van de verkeersbelasting zorgt ervoor dat de belasting op het dijklichaam verlaagd kan worden. Dit heeft het logische gevolg dat het dijklichaam beter beoordeeld wordt bij een lage verkeersbelasting. Het kan hierdoor uitkomst bieden door beleidsmaatregelen op te stellen met betrekking tot de verkeersbelasting. Zo kan zwaar verkeer op de dijk geweigerd worden in de periode na een hoogwater. Per situatie kan het verschillen of dit effect heeft, omdat de verkeersbelasting niet altijd effect heeft op de glijcirkel, zoals te zien in hoofdstuk 8.2.1.

Het tijdsverloop van de buitenwaterstand heeft effect op het verloop van de freatische lijn. Op dit moment is er weinig ervaring met een snelle val van de buitenwaterstand en wordt een vaste waarde voor de waterstand na een vast aantal dagen genomen binnen de schematisatie. Dit is echter een conservatieve waarde. In veel gevallen kan met een hogere waterstand geschematiseerd worden dan op dit moment gedaan wordt, wat een positief effect heeft op de stabiliteitsbepaling van het dijklichaam.

**Deelvraag 4:** *Op basis van welke aspecten kan het beheergebied van WDO Delta worden verdeeld in sub-gebieden rekening houdend met algemene karakteristieken en typische situaties voor het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts?*

Naast het onderzoek naar de optimalisatiemogelijkheden aangaande STBU is er een analyse gedaan naar de mogelijkheden hiervan binnen het beheergebied van WDO Delta. De dijktrajecten met de potentieel meeste optimalisatiekans zijn normtraject 53-2 met een score van 23, 10-3 met een score van 22 en normtrajecten 9-1 en 11-2 met een score van 21. Het gaat hierbij om de bovengrens van de bandbreedte. Dit betekent dat er binnen deze dijktrajecten specifieke locaties kunnen zijn met grote kans op optimalisatiemogelijkheden. De normtrajecten met de hoogste gemiddelde optimalisatiescore zijn normtraject 53-2 met een score van 18,5; 225 met een score van 17,5 en normtrajecten 9-2 en 53-1 met een score van 16,5.

Voor het Waterschap Drents Overijsselse Delta valt het aan te bevelen om de faalkanseis en de schematisatie te optimaliseren op een van de genoemde aspecten wanneer een dijkvak wordt afgekeurd op STBU of wanneer er binnen de ontwerpfasen een dure maatregel nodig is om het stabiliteitsprobleem op te lossen. Wanneer een van deze zaken aan de orde is kan de inschatting van de optimalisatiemogelijkheden zoals gegeven in hoofdstuk 9.2 Optimalisatiemogelijkheden per dijktraject als basis dienen.

## 12. AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK

Binnen dit onderzoek zijn verscheidene manieren voor de optimalisatie van de faalkanseis en de schematisatie van het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts bestudeerd. Echter omvat dit onderwerp een breed scala aan mogelijkheden en vraagstukken. In dit hoofdstuk wordt daarom ingegaan op aanbevelingen voor verder onderzoek, welke niet aan bod zijn gekomen binnen dit project.

### *Voorland en sterkte bij lage spanningen*

Binnen de interviews met specialisten waterveiligheid en geotechniek werd aangegeven dat het voorland en de sterkte bij lage spanningen invloed kunnen hebben op de stabiliteit van een dijklichaam. Zo kan het voorkomen dat het voorland droog komt te liggen tijdens de zomer, wat een positief effect heeft op de sterkte van de grond. De toplaag van het buitentalud kan te maken krijgen met droogte als wel complete verzadiging van water. Hierdoor kan de sterkte van deze laag toenemen. Nader onderzoek naar dit aspect kan toevoegen aan de beoordeling van STBU.

### *Statistische onderbouwing conditionele faalkans doormiddel van analyse naar hoogwatergolven*

De default waarde van 10% voor de conditionele faalkans is op dit moment niet statistisch onderbouwd. Een analyse op historische data naar het voorkomen van een snelle val en het optreden van een tweede hoogwater kort gevolgd op een eerste hoogwater kan bijdragen aan een statistische onderbouwing en meer gevoel geven bij aanpassing van de default waarde.

### *Tijdsafhankelijke waterstandsverloop berekeningen*

Binnen dit onderzoek zijn stabiliteitsberekeningen uitgevoerd voor stationaire geohydrologische en hydraulische belastingen. Echter kunnen meer nauwkeurige berekeningen worden uitgevoerd door middel van tijdsafhankelijke grondwaterstromings-berekeningen. De applicatie Plaxis 2D Plaxflow kan hiervoor gebruikt worden (Plaxis, 2019). Het is hierbij wel van belang dat de input die gegeven wordt aan het model, eerst onderbouwd wordt. Het verloop van de buitenwaterstand en de freatische lijn over de tijd spelen namelijk een grote rol in de stabiliteit van het dijklichaam.

### *Grootschalige praktijkproef*

Om het verloop van de freatische lijn na een snelle val van de buitenwaterstand in kaart te brengen, kan gedacht worden aan het nabootsen van een snelle val onder gecontroleerde omstandigheden. Door een lange periode een hoge waterstand tegen een stuk dijk te zetten en deze vervolgens snel te laten zakken kan gekeken worden hoe de freatische lijn hierop reageert. Dit zou wellicht kunnen bijdragen aan de begripsvorming van de freatische lijn.

### *Combinatie van aanpassingen in schematisatie*

Binnen dit onderzoek zijn enkel berekeningen uitgevoerd met aanpassingen binnen één variabele in de schematisatie. Een verdere bijdrage aan dit onderzoek kan het berekenen van de stabiliteit zijn van een dijklichaam voor simultane aanpassingen in de schematisatie.

Naast bovengenoemde aspecten kan verder onderzoek uitwijzen dat er meerder mogelijkheden zijn ter optimalisatie van de beoordeling van het faalmechanisme STBU. Geadviseerd wordt daarom om dit rapport te gebruiken als basis, maar scherp te blijven op niet genoemde optimalisatiemogelijkheden.

## REFERENTIES

- Antea Group. (2019). *Stabiliteitsanalyse - Stenendijk te Hasselt*.
- Chaoyang University of Technology. (2003). Stress distribution. In D. E. Olson, *Advanced Soil Mechanics*.
- Deltares. (2013). *Technisch Rapport Macrostablieit*.
- Deltares. (2015). *Schematiseringshandleiding Macrostablieit*.
- Deltares. (2016). *D-Geo Stability - Slope stability software for soft soil engineering - User Manual*.
- Deltares. (2018). *Fenomenologische beschrijving*.
- Deltares. (2019, April 29). *Opvullen van afschuivingen van het buitentalud*. Opgehaald van Wiki Noodmaatregelen: [http://v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/index.php/Opvullen\\_van\\_afschuivingen\\_aan\\_het\\_buitentalud](http://v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/index.php/Opvullen_van_afschuivingen_aan_het_buitentalud)
- DUIC. (2013, Oktober 2015). *Historische Kademuur Bemuurde Weerd Ingestort*. Opgehaald van Duic: <https://www.duic.nl/algemeen/historische-kademuur-bemuurde-weerd-ingestort/>
- Expertise Netwerk Waterkeren. (2007). *Technisch Rapport Ontwerpbelastingen voor het rivierengebied*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Expertisenetwerk Waterveiligheid. (2012). *Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken*.
- Helpdesk Water. (2019, Mei 17). *Macrostablieit*. Opgehaald van Helpdeskwater: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen-wbi/beoordelingsproces/uitvoering/toetssporen/info-toetssporen/macrostablieit/>
- Helpdesk Water. (2019, Mei 16). *Producten WBI*. Opgehaald van Helpdeskwater: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen-wbi/producten-wbi/#h87f9af55-efff-4517-ac35-3cb895b82207>
- Helpdesk Water. (2019, Juni 9). *Waterstandsverlopen Tool*. Opgehaald van Helpdeskwater: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/applicaties-modellen/applicaties-per/omgevings/omgevings/waterstandsverlopen/>
- Hoogwaterbeschermingsprogramma. (2014). *Prioriteringsmethode HWBP - Inschatting consequenties nieuwe normering*.
- Informatiehuis Water. (2019, Juni 9). *Landelijk Veiligheidsbeeld*. Opgehaald van Waterveiligheidsportaal: <https://waterveiligheidsportaal.nl/#/nss/nss/norm>
- Kennisplatform Risicobenadering. (2016). *Faalkansbegroting*.
- Kennisplatform Risicobenadering. (2016). *Het lengte-effect*.
- Kennisplatform Risicobenadering. (2018). *Omgang met buitenwaartse macrostablieit (versie 2)*.
- Kennisplatform Risicobenadering. (2019). *Advies omgang met STBU in project GoWa*. Kennisplatform Risicobenadering.
- Kennisplatform Risicobenadering. (2019). *Advies omgang met STBU in project GoWa*.

- Ladd, C., & Foott, R. (1974). *SHANSEP – Stress History And Normalized Soil Engineering Properties*.
- Middendorp, H. (2019, Mei 17). *Dijkdoorbraak in Wilnis in 2003*. Opgehaald van Niet bang voor water: <https://nietbangvoorwater.info/dijkdoorbraak-in-wilnis-in-2003/>
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu; Ministerie van Economische Zaken. (2014). *Deltaprogramma 2015: Werk aan de delta - De beslissingen om Nederland veilig en leefbaar te houden*.
- Plaxis. (2019, Juni 11). *Embankments, foundations and excavations*. Opgehaald van Plaxis: <https://www.plaxis.com/industries/embankments-foundations-and-excavations/>
- Rijkswaterstaat. (2019, Mei 16). *Beoordeling Waterkeringen*. Opgehaald van Rijkswaterstaat: <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/kwaliteit-waterkeringen/beoordeling-waterkeringen.aspx>
- Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving. (2016). *Achtergrondrapport Ontwerpinstrumentarium 2014*.
- Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving. (2017). *Handreiking ontwerpen met overstromingskansen (OI2014v4)*.
- Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving. (2017). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017; Bijlage III Sterkte en Veiligheid*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Ruimte voor de rivier IJsseldelta. (2019, Juni 20). *Ontgraving vaargeul Reevediep*. Opgehaald van Ruimtevoorderivierijsseldelta: <http://www.ruimtevoorderivierijsseldelta.nl/nl/ontgraving-vaargeul-reevediep/>
- Schofield, A., & Wroth, P. (1968). *Critical State Soil Mechanics*.
- Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer. (2016). *Maatgevende Conditie*.
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. (1993). *Water tegen de dijk*.
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. (1995). *Druk op de dijken*.
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. (2001). *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies*.
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. (2004). *Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken*.
- Verruijt, A. (2012). *Soil Mechanics*.
- Waterschap Drents Overijsselse Delta. (2018). *Logboek dijktraject 9-1, Vecht Noord*.
- Waterschap Drents Overijsselse Delta. (2018). *Logboek Normtraject 10-2, Mastenbroek-Zwartenmeer*.
- WDOdelta. (2019, Juni 9). *Over Ons*. Opgehaald van wdodelta.nl: <https://www.wdodelta.nl/overons/>
- WDOdelta. (2019, Juni 24). *Waterstanden IJssel dalen*. Opgehaald van wdodelta: <https://www.wdodelta.nl/@23790/waterstanden-ijssel/>
- Wikipedia. (2019, Mei 17). *Kadebreuk Wilnis*. Opgehaald van Wikipedia: [https://nl.wikipedia.org/wiki/Kadebreuk\\_Wilnis](https://nl.wikipedia.org/wiki/Kadebreuk_Wilnis)

**Te interviewen**

- Frank Jansen (WDOD) Keringbeheerder
- Marco de Wit (WDOD) Keringbeheerder
- Bouke van Meekeren (Antea Group) Externe adviseur waterveiligheid
- Herman-Jaap Lodder (Rivierenland) Adviseur collega waterschap
- Jan Blinde (Deltares) Senior-adviseur onderzoeksinstelling
- Bas Effing (Rivierenland) Strategisch Technisch Manager
- Jan Gruppen (WDOD) Adviseur waterveiligheid

**Doel van het interview**

Doel van het interview is het verzamelen van ervaringen en aanbevelingen met betrekking tot het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts in het algemeen. Hierin zit een verdieping aangaande de faalkanseis en de schematisatie van het faalmechanisme. Resultaten van het interview zullen dienen als input voor de analyse van aanpassingen in faalkanseis en schematisatie.

**Invalshoek**

Binnen het totaal aantal interviews zal er gebruik gemaakt worden van twee verschillende invalshoeken. Bij adviseurs op het gebied van waterveiligheid zal de nadruk liggen op de theoretische benadering van het faalmechanisme. Hier zal nadruk liggen op de schematisatie en de manier van modelleren. Bij keringbeheerders zullen de interviews een meer praktische invalshoek hebben. Keringbeheerders bezitten veel kennis van de keringen binnen het beheersgebied van WDODelta en zijn daardoor betrokken bij de praktische ervaringen met macrostabiliteit.

**Structuur van het interview**

Het interview zal de structuur hebben van semigestructureerde interviews. Deze methode wordt toegepast omdat er incomplete kennis is over het onderwerp bij de interviewer. De basis is aanwezig, maar gedetailleerde kennis ontbreekt. Semigestructureerde interviews stuurt het interview richting het beoogde doel, maar houdt ruimte voor interessante bevindingen. Een aantal hoofdvragen zullen hiervoor worden opgesteld.

**Type vragen en implicaties**

Het interview zal voornamelijk bestaan uit open vragen. Deze laten ruimte voor verklaring van het antwoord en zorgen ervoor dat er minder kans is op het aansturen van antwoorden. Onder de hoofdvragen zijn een aantal subvragen beschreven, deze zullen gesteld worden afhankelijk van het antwoord op de hoofdvraag.

**Verwerking van de resultaten/antwoorden**

De verkregen resultaten zullen gebruikt worden om aanpassingen in de schematisatie en de faalkanseis te analyseren. Daarnaast zal het interview dienen ter ondersteuning van het vergaren van kennis over het onderwerp en de context waar zich dit in afspeelt.

### **Introductie**

Op het moment ben ik bezig met een onderzoek naar optimalisatie van de faalkanseis en de schematisatie van het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts. Met dit interview probeer ik ervaringen met dit faalmechanisme in de praktijk te verzamelen. Hierin ben ik erg benieuwd naar de manier van monitoring van de dijken en de gebruikte tijdelijke maatregelen in geval van dijkfalen. Als keringbeheerder ben je erg betrokken bij de monitoring van de dijken, vandaar dat ik je heb gevraagd om te interviewen.

### **Interview vragen**

#### *Achtergrond van de geïnterviewde*

1. Kan je een korte introductie geven over je achtergrond? (Opleiding, werkervaring, huidige functie/taak)

#### *Ervaringen met buitenwaartse macrostabiliteit*

2. Welke ervaringen heb je met problemen, zowel in de beoordeling als in de praktijk, m.b.t. buitenwaartse macrostabiliteit?
  - a) In welke fase van het project kwam dit naar voren?
  - b) Welke faalgebeurtenis trad er in dit geval op? (Bijv. kruindaling waardoor bepaalde belastingen niet meer gekeerd kunnen worden)
  - c) Veroorzaakte dit ernstige problemen?
  - d) Wat is er vervolgens gedaan om dit op te lossen?
3. Zie je verschillen in omgang met buitenwaartse macrostabiliteit optreden ten opzichte van vroeger?
4. Wat is je ervaring met de stabiliteit van de dijk na een snelle val van het buitenwater of na extreme neerslag of droogte?

#### *Aanbevelingen voor optimaliseren faalkanseis*

5. Wat zijn de huidige tijdelijke maatregelen na afschuiven van het buitentalud en hoeveel hersteltijd vergen deze?
  - a. Welke aspecten van de dijk hebben invloed op het type tijdelijke maatregel dat wordt toegepast?
    - i. Bereikbaarheid, geometrie, bebouwing
  - b. Wat bepaald uiteindelijk welke herstelmaatregel er wordt toegepast?
6. Worden er innovatieve tijdelijke maatregelen getest?
  - a. Kan hiermee de hersteltijd worden verkort?

### **Introductie**

Op het moment ben ik bezig met een onderzoek naar optimalisatie van de faalkanseis en de schematisatie van het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts. Met dit interview probeer ik ervaringen in de schematisatie en mogelijkheden tot aanpassen van de faalkanseis te verzamelen. Hierin ben ik vooral benieuwd naar de manier van modelleren en de achterliggende keuzes die hierbij gemaakt worden. Verder sta ik tijdens dit interview open voor tips en tricks met betrekking tot optimalisatie van de faalkanseis en de schematisatie. Als specialist waterveiligheid/geotechniek ben je erg betrokken bij de beoordeling en het ontwerp van waterkeringen, vandaar dat ik je heb gevraagd om te interviewen.

### **Interview vragen**

#### *Achtergrond van de geïnterviewde*

1. Kan je een korte introductie geven over je achtergrond? (Opleiding, werkervaring, huidige functie/taak)

#### *Ervaringen met buitenwaartse macrostabiliteit*

2. Welke ervaringen heb je met problemen, zowel in de beoordeling als in de praktijk, m.b.t. buitenwaartse macrostabiliteit?
  - e) In welke fase van het project kwam dit naar voren?
  - f) Welke faalgebeurtenis trad er in dit geval op? (Bijv. kruindaling waardoor bepaalde belastingen niet meer gekeerd kunnen worden)
  - g) Veroorzaakte dit ernstige problemen?
  - h) Wat is er vervolgens gedaan om dit op te lossen?
3. Is belasting situatie 1 (snelle val) altijd maatgevend of heb je wel eens meegemaakt dat dit situatie 2 (extreme neerslag) of 3 (laag water 1/10 jaar) was?
4. Zie je verschillen in omgang met buitenwaartse macrostabiliteit optreden ten opzichte van vroeger?

#### *Manier van modelleren/schematisatie*

5. Hoe neem je op dit moment schematisatie van de freatische lijn mee in berekeningen voor buitenwaartse macrostabiliteit?
  - a) Welke uitgangspunten hanteer je hierbij en waarom?
6. Welke conservatieve uitgangspunten neem je op dit moment mee binnen de schematisatie en de beoordeling?
  - a) Tijdsafhankelijk waterstandsverloop
  - b) Duur van een snelle val
7. Welke uitgangspunten of parameters hebben volgens jou de meeste impact op de beoordeling?
8. Wat is je ervaring met de freatische lijn na een snelle val van het buitenwater?
9. Op welke manier kunnen rekenmodellen en/of metingen bijdragen aan de optimalisatie van het verloop van het freatisch vlak?

#### *Aanbevelingen voor optimaliseren faalkanseis*

10. Welke aspecten van de dijk hebben invloed op de mogelijkheid tot vergroten van de faalkansruimtefactor voor buitenwaartse macrostabiliteit?
  - a) Bereikbaarheid, geometrie, bebouwing
11. Zit er een maximum aan wat je gevoelsmatig zou willen optimaliseren?



12. Wat zijn de huidige tijdelijke maatregelen na afschuiven van het buitentalud en hoeveel hersteltijd vergen deze?
13. Stel dat er al een geoptimaliseerde faalkanseis beschikbaar is voor een bepaald traject, zou je deze dan gebruiken bij het ontwerp/de beoordeling?

Open suggesties/vragen/aanbevelingen:

## B. ANTWOORDEN PER INTERVIEWVRAAG

### Resultaten per onderzoeksvraag

#### - Waterkeringbeheerders

1. Kan je een korte introductie geven over je achtergrond? (Opleiding, werkervaring, huidige functie/taak)

#### *Context geïnterviewde*

2. Welke ervaringen heb je met problemen, zowel in de beoordeling als in de praktijk, m.b.t. buitenwaartse macrostabiliteit?

Grotendeels besproken in hoofdstuk 6

#### *Huidige omgang met macrostabiliteit buitenwaarts*

3. Zie je verschillen in omgang met buitenwaartse macrostabiliteit optreden ten opzichte van vroeger?

Beide waterkeringbeheerders zien vrijwel geen verschil in omgang met buitenwaartse macrostabiliteit ten opzichte van vroeger. Er worden tegenwoordig wel wat randvoorwaarden meegegeven binnen projecten die ervoor zorgen dat onderhoud na afronding van het project goed uit te voeren is.

4. Wat is je ervaring met de stabiliteit van de dijk na een snelle val van het buitenwater of na extreme neerslag of droogte?

Beide waterkeringbeheerders hebben geen ervaring met een snelle val van het buitenwater. Extreme neerslag was ook niet echt een issue. Na extreme droogte, zoals afgelopen zomer, is er wel scheurvorming te zien in de dijk. Dit waren scheuren van zo'n 10-15 centimeter breed en 80-90 centimeter diep. Het talud kan hierdoor heel iets afglijden, maar dit is zo miniem dat hier niet iets mee wordt gedaan. De scheuren zijn vrij snel weer weg wanneer de dijk natter wordt.

#### *Aanbevelingen voor optimaliseren faalkanseis*

5. Wat zijn de huidige tijdelijke maatregelen na afschuiven van het buitentalud en hoeveel hersteltijd vergen deze?

Al verwerkt in hoofdstuk 6.2 Tijdelijke maatregelen na een buitenwaartse afschuiving

6. Is er binnen het gebied van WDO Delta verschil in het type tijdelijke maatregel dat wordt toegepast?

Hier zit geen verschil in volgens de beheerders.

7. Worden er innovatieve tijdelijke maatregelen getest?
  - a. Kan hiermee de hersteltijd worden verkort?

Ja, zo wordt er op dit moment gewerkt aan een landelijke standaard voor werkinstructies. Bijvoorbeeld instructies voor het leggen van bekramming of het leggen van zeilen. Via deze landelijke standaard kan beter samengewerkt worden indien nodig.

Daarnaast wordt er getest met een nieuw soort doek voor bekramming. Bij traditionele bekramming wordt worteldoek vastgezet met pennen waar vervolgens draad omheen wordt gespannen om het doek strak te trekken. Bovenop dit doek worden zandzakken bevestigd met pennen. Het nieuwe soort doek dat getest wordt heeft een kunststof bewapening en is stukken lichter. Het kan zeer waarschijnlijk zonder zandzakken gebruikt worden en is daardoor veel lichter hanteerbaar en vervoerbaar.

Verder wordt geprobeerd theorie en praktijk dichter bij elkaar te brengen. Specialisten rekenen alles door en beheerders monitoren in het veld, maar deze beoordeling ligt soms ver uit elkaar. Via onderling overlegd wordt geprobeerd dit dichter bij elkaar te brengen. Binnenkort krijgen keringbeheerders ook een kaart mee op hun computer met alle faalmechanismen bij een bepaalde waterstand en windrichting. Hierop kan een waterhoogte worden ingevoerd om vervolgens te zien welk deel van de dijk nadere inspectie vraagt en voor welk faalmechanisme dit van toepassing is.

- **Specialisten waterveiligheid/geotechniek**

1. Kan je een korte introductie geven over je achtergrond? (Opleiding, werkervaring, huidige functie/taak)

Context geïnterviewde

2. Welke ervaringen heb je met problemen, zowel in de beoordeling als in de praktijk, m.b.t. buitenwaartse macrostabiliteit?

Grotendeels besproken in hoofdstuk 6.1 Huidige problemen met macrostabiliteit buitenwaarts

3. Is belasting situatie 1 (snelle val) altijd maatgevend of heb je wel eens meegemaakt dat dit situatie 2 (extreme neerslag) of 3 (laag water 1/10 jaar) was?

Vanuit de interviews met specialisten waterveiligheid/geotechniek bleek dat situatie 1 over het algemeen maatgevend is. Situatie 2 werd zo nu en dan wel meegenomen maar is vaak niet de maatgevende belastingsituatie. Situatie 3 was in geen van de gevallen echt van toepassing. De reden dat situatie 2 en 3 minder worden bekeken is dat dit niet direct gerelateerd is aan waterveiligheid. Extreme neerslag is niet direct gecorreleerd aan hoge waterstanden. Formeel gezien wordt extreme neerslag dan ook niet meegenomen binnen het WBI 2017. Een lage waterstand die 1/10 jaar voorkomt is niet echt van toepassing meer sinds er gekeken wordt naar overstromingskansen en een overstroming niet plaatsvindt bij een extreem lage waterstand. Daarnaast wordt binnen situatie 1 gerekend met een zeer hoge freatische lijn, waar dit bij situatie 2 en 3 niet het geval is. Dit heeft ook effect op het wel of niet maatgevend zijn van de belastingsituatie.

4. Zie je verschillen in omgang met buitenwaartse macrostabiliteit optreden ten opzichte van vroeger?

In principe zijn de rekenwijze, software en schematisatie grotendeels hetzelfde gebleven. Wat veel wordt opgemerkt is dat de methode is overgegaan van gedraineerd naar ongedraineerd rekenen via Critical State Soil Mechanics (CSSM). De randvoorwaarden zijn ook veranderd, er wordt nu met hogere waterstanden gerekend zowel in als tegen de dijk. Daarnaast is de normering waaraan voldoen moet worden verhoogd. Waar dit vroeger vaak een overschrijdingskansnorm was van 1/1200 jaar is dit nu vaak 1/10.000 jaar. Door deze veranderingen wordt STBU nu als een groter probleem gezien dan vroeger. Waar eerder een 1:3 talud voldeed is dat nu vaak niet het geval en moeten er grote buitenbermen worden toegepast.

Verder was de werkwijze vroeger meer uit praktisch oogpunt. Hierbij ging het om het beheer van het buitentalud. Dit mocht niet te steil zijn omdat het dan simpelweg niet mogelijk is om de buitenberm te maaien.

5. Hoe neem je op dit moment schematisatie van de freatische lijn mee in berekeningen voor buitenwaartse macrostabiliteit?
  - a. Welke uitgangspunten hanteer je hierbij en waarom?

Door alle specialisten werd aangegeven dat het formele uitgangspunt is dat de freatische lijn niet zakt na een val van hoog water. Dit is misschien niet het geval in de realiteit, maar in veel gevallen niet met zekerheid te zeggen. Specialisten van Rivierenland gaven wel aan dat er wordt gemodelleerd met een sprong tussen het Maatgevend Hoog Water (MHW) en het waterstandsniveau onder de kruin. Vanuit

de kruin loop de freatische lijn vervolgens zo'n 30 centimeter achter het talud langs tot de waterstand of tot het maaiveld.

Daarnaast wordt bij Waterschap Rivierenland een grotere val van de buitenwaterstand geschematiseerd dan bij WDO Delta, echter heeft dit ook te maken met hoogte van het MHW.

6. Welke conservatieve uitgangspunten neem je op dit moment mee binnen de schematisatie en de beoordeling?

Freatische lijn, zowel ligging als er vanuit gaan dat de dijk volloopt. Hierbij ga je uit van een stationaire waterstand waarbij de dijk volloopt en niet weer leegloopt.

Een snelle val van het buitenwater wordt verschillend gedefinieerd. Dit hangt af van het type gebied. Bij een storm gedomineerde situatie zal een snelle val kunnen optreden in termen van uren. Bij een benedenrivierengebied gaat de op- en afloop van een hoogwatergolf in termen van weken en zal een snelle val alleen kunnen optreden als dijken bezwijken.

Verder wordt de verkeersbelasting conservatief meegenomen in de schematisatie. Deze belasting is vrij extreem. Dit komt doordat deze belasting drie dimensionaal is terwijl de doorsnede die gebruikt wordt dit niet is.

Wat ook van invloed is, is het effect van het toekennen van weinig sterkte aan de grond bij lage spanningen.

De beoordeling is per definitie wat conservatief, doordat allerlei veilige uitgangspunten bij elkaar op worden geteld.

7. Welke uitgangspunten of parameters hebben volgens jou de meeste impact op de beoordeling?

Vanuit de specialisten werden meerdere uitgangspunten of parameters aangegeven die een grote impact hebben op de beoordeling. Hierin werden de grensspanning onderaan de buitenteen, de freatische lijn/de waterspanningen in de dijk, de sterkte bij lage spanningen en de norm waaraan je gaat toetsen aangegeven.

Daarnaast heeft het voorland ook invloed op de stabiliteit van het dijklichaam. Als dit in de zomer bijvoorbeeld droogvalt is dit positief voor de sterkte van het dijklichaam.

Verder gaf Jan Gruppen aan dat het hem niet zou verbazen als de s-ratio, de stabiliteit van de klei, van grote invloed zou zijn op de beoordeling. Met name voor klei, niet zozeer voor zand.

8. Wat is je ervaring met de freatische lijn na een snelle val van het buitenwater?

Veel van de specialisten gaf aan nooit een snelle val na hoogwater meegemaakt te hebben in de praktijk en hierdoor ook geen metingen beschikbaar zijn. De metingen die er zijn van het freatisch vlak zijn vaak lastig te interpreteren doordat effecten van neerslag, scheepvaart en seizoen allemaal meespelen in dit freatisch vlak. Er heerst dus vooral veel onwetendheid over de freatische lijn. Bij berekeningen is het daardoor ook maar afhankelijk van wat je input is van deze lijn.

9. Op welke manier kunnen rekenmodellen en/of metingen bijdragen aan de optimalisatie van het verloop van het freatisch vlak?

Bas Effing gaf aan dat rekenmodellen kunnen vooral gebruikt worden om de doorlatendheid van het dijk materiaal beter te benaderen. Via metingen kan dit beter in kaart worden gebracht door iedere 100 meter een raai met peilbuizen te plaatsen. Dit brengt echter veel kosten met zich mee. Jan Gruppen had het idee om een lange periode een bak water tegen verschillende typen dijken te zetten om te kijken hoe snel het dijklichaam verzadigd, waarna een snelle val gesimuleerd kan worden. Berekeningen met PlaxFlow of MSheep kunnen zeker wat toevoegen. Deze modellen werken goed, maar hebben wel een set invoer parameters nodig. Dit is juist wat er onzeker is. In de praktijk zou langdurig meten kunnen bijdragen aan de kennis over het freatisch vlak. Echter moet je hiervoor wel

een hoge waterstand kunnen meten die bijvoorbeeld eens in de tien jaar voorkomt. Zoals eerder aangegeven blijft het vervolgens lastig om metingen te interpreteren, omdat er allerlei factoren invloed hebben op het freatisch vlak. Het is dus ook erg lastig om metingen van de freatische lijn te verwerken in modellen tot een daadwerkelijke daling die je modelleert. Het lastige hieraan is ook dat waterdeeltjes op allemaal verschillende plekken de dijk kunnen verlaten.

10. Welke aspecten van de dijk hebben invloed op de mogelijkheid tot vergroten van de faalkansruimtefactor voor buitenwaartse macrostabiliteit?

Route over primaire kering is niet zozeer van belang. Wanneer er wel een dijk op de weg ligt is het maar de vraag of je via deze weg wil vervoeren aangezien er net een afschuiving heeft plaatsgevonden. Via het achterland is de dijk meestal ook wel goed te bereiken, indien er staal- of beton rijplaten worden neergelegd. Geometrie van de dijk voor afschuiving heeft niet zozeer veel invloed, omdat de indringing niet heel veel verschilt per type talud. De geometrie na afschuiving heeft echter wel invloed. Dit bepaalt wat voor herstelmaatregel je moet toepassen en wat de sterkte is van je overgebleven grondlichaam. De ondergrond van de dijk is ook relevant. Wanneer je alleen slappe ondergrond hebt, met name aan de binnendijkse zijde, ga je hier niet zomaar opbouwen.

Daarnaast gaf Herman-Jaap Lodder aan dat er wel een issue kan zijn wanneer je de faalkanseis voor STBU geheel loslaat. Dit betekent dat je schade gaat accepteren en hier moeten beheerders wel mee om kunnen gaan.

11. Zit er een maximum aan wat je gevoelsmatig zou willen optimaliseren?

Uiteindelijk zijn de meeste specialisten het erover eens dat er geen maximum zit aan hoever je zou willen optimaliseren. Echter moet dit dan wel goed onderbouwd zijn er zullen er een aantal onzekerheden beter in kaart gebracht moeten worden. Uiteindelijk kan dan volledig overgegaan worden op probabilistisch rekenen, waarbij geen conservatieve aannames meer gedaan hoeven te worden.

12. Wat zijn de huidige tijdelijke maatregelen na afschuiven van het buitentalud en hoeveel hersteltijd vergen deze?

Al verwerkt in hoofdstuk 6.2 Tijdelijke maatregelen na een buitenwaartse afschuiving.

13. Stel dat er al een geoptimaliseerde faalkanseis beschikbaar is voor een bepaald traject, zou je deze dan gebruiken bij het ontwerp/de beoordeling?

Vrijwel alle specialisten zou de beschikbare geoptimaliseerde faalkanseis gebruiken bij het ontwerp en de beoordeling voor een bepaald traject. In alle gevallen ging het er dan wel om dat deze goed onderbouwd moet zijn. Indien dit het geval is, is er geen reden deze faalkanseis niet te gebruiken. Uiteindelijk dien je je als Waterschap ook te verantwoorden en is het wel belastinggeld waar je mee werkt. Bouke van Meekeren gaf echter aan deze faalkanseis wel te gebruiken in de beoordeling, maar niet in het ontwerp. Dit was omdat het uiteindelijke onderhoudskosten vervolgens meer kunnen gaan kosten dan de realisatie. Echter geeft Jan Blinde hierbij aan dat het gaat om scherp beoordelen en robuust ontwerpen. Binnen het ontwerp is er wel de afweging tussen tijd en geld. Robuust ontwerpen betekent niet conservatief ontwerpen, maar bijvoorbeeld uitgaan van een hogere belasting, wat robuust te verantwoorden is.

Open suggesties/vragen/aanbevelingen:

Een statistische onderbouwing van de conditionele faalkans is er op dit moment niet en zal wel bijdragen aan de begripsvorming van deze faalkans.

Bepaling van de sterkte van het restprofiel is belangrijk, maar erg lastig te voorspellen. Het meenemen van deze sterkte in de beoordeling zou kunnen bijdragen.

C. EXCEL SHEET BEREKENING FAALKANS STENENDIJK

Grootheid	Situatie 1	Situatie 2	Situatie 3	Situatie 4	Situatie 5	Situatie 6
B_zandcunet	6	6	6	6	6	6
H_zandcunet	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Kruindaling	1	1	1	1	1	1
Hersteltijd	0,14	0,5	1	2	3	4
Overslagdebiet	1	1	1	1	1	1
H_as-lijn	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
Kans_Hw	1/50	1/50	1/50	1/50	1/50	1/50
Hoogwateseizoen	26	26	26	26	26	26
Resthoogte	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Golfhoogte_zand	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Golfhoogte_klei	1	1	1	1	1	1
Golfploop_zand	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Golfploop_klei	3	3	3	3	3	3
H_maaiveld	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
HBN	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
R_Erosie	2	2	2	2	2	2
Kans_optreden	3,33E-03	3,33E-03	3,33E-03	3,33E-03	3,33E-03	3,33E-03
Kans_2a	1,83E-05	6,41E-05	1,28E-04	2,56E-04	3,85E-04	5,13E-04
Kans_2b	1,10E-04	3,85E-04	7,69E-04	1,54E-03	2,31E-03	3,08E-03
Terugkeertijd_2a	54600,00	15600,00	7800,00	3900,00	2600,00	1950,00
Terugkeertijd_2b	9100,00	2600,00	1300,00	650,00	433,33	325,00

## D. D-GEO STABILITY BEREKENINGEN

### D.1. UITGANGSPUNTEN BEREKENINGEN

#### Hydraulische belastingen:

WBN maaiveld+3,2m

HBN (kruinhoogte) maaiveld+4,0m

De kruinhoogte van de dijk is maaiveld+4,0m. In deze ontwerphoogte is fictief gerekend met een robuustheidstoets van 0,3m en een waakhogte van 0,5m. Dit resulteert in een WBN van maaiveld+3,2m.

Schematisatie val na hoogwater: 2 meter lager dan WBN (Schematisering volgens methode WDODelta)  
Dit geeft een waterstand na val van hoogwater van maaiveld+1,2m

#### De geometrie is voor alle dijprofielen gelijk genomen:

Taludhelling 1:3

Kruinhoogte maaiveld+4,0m

Kruinbreedte 4m

#### Scenario's voor de dijkopbouw:

1. Volledige kleidijk
2. Volledige zanddijk
3. Zanddijk met kleibekleding

\*Kleibekleding is 1,5m dik onder de kruin en loopt in dezelfde helling als het talud (1:3)

#### Scenario's voor de ondergrondschematisaties:

1. Klei van maaiveld tot mv-1m, zand vanaf mv-1m (pleistoceen)
2. Klei van maaiveld tot mv-1m, veen van mv-1m tot mv -3 m, zand vanaf mv-3m (pleistoceen)
3. Klei van maaiveld tot mv-2m, veen van mv-2m tot mv -3 m, klei van mv-3m tot mv-5m, zand vanaf mv-5m (pleistoceen)

#### Grondparameters

Grondsoort	Volumiek gewicht [kN/m <sup>2</sup> ]		M [-]	S [-]	Hoek van inwendige wrijving [°]
	Onverzadigd ( $\gamma_{unsat}$ )	Verzadigd ( $\gamma_{sat}$ )			
Klei, dijkmateriaal	17	17	0,85	0,33	29,1*
Klei Holocene, onder	15,5	15,5	0,85	0,33	-
Klei Holocene, naast	15,5	15,5	0,85	0,33	-
Veen, onder	10	10	0,85	0,33	-
Veen, naast	10	10	0,85	0,33	-
Zand, dijkmateriaal	18	20	-	-	29,1
Zand, Pleistoceen	18	20	-	-	32,5

\*Klei, dijkmateriaal heeft alleen een hoek van inwendige wrijving binnen het scenario van de zanddijk met de kleibekleding, omdat het dijkmateriaal hier gedraineerd wordt berekend.

- S: Ongedraineerde schuifsterkte ratio

De uniforme verhouding tussen de ongedraineerde sterkte  $s_u$  en de verticale rekgrens  $\sigma'_y$ . De waarde hiervan varieert meestal tussen de 0,18 en 0,40. (Deltares, 2016)

- M: Sterkte toename exponent

D-Geo Stability gebruikt deze parameter om de ongedraineerde schuifsterkte te bepalen. (Deltares, 2016)

### **Gedraineerd/ongedraineerd**

Alle veen en kleilagen binnen de berekeningen zijn ongedraineerd berekend, behalve de kleilaag van het dijklichaam van de zanddijk met kleibekleding. Alle zandlagen zijn gedraineerd berekend.

De parameters voor de grondlagen die ongedraineerd worden berekend zijn ingevuld volgens 'S<sub>u</sub> calculated with yield stress' en de gedraineerde grondlagen volgens 'Default C-phi'.

### **Schematisatie verkeersbelasting**

De verkeersbelasting is in D-Geo Stability geschematiseerd onder een hoek van 15 graden. Dit heeft als reden dat de belasting zich niet loodrecht verplaatst in de grond, door belasting verdeling binnen de grondlagen (Chaoyang University of Technology, 2003). Hierbij is de belasting verdeeld over een breedte van 2,5 meter welke is gepositioneerd 0,50 meter vanaf de buitenkruinlijn bovenop de kruin. De consolidatiegraad is voor alle grondsoorten, behalve zand, gesteld op 0%. Voor zand is deze vastgesteld op 100%. (Verruijt, 2012)

### **Grensspanningen**

Grensspanningen zijn voor alle grondlagen behalve zand bepaald onder zomerse omstandigheden.

Voor een nauwkeurigere bepaling van de grensspanningen is het van belang dat er een verticale lagenscheiding wordt gemaakt. Ook een doorlopende grondlaag wordt hierbij gesplitst. De reden hiervoor is dat de POP sterk kan verschillen in geval van hoog water, waarbij dit effect groot is voor de teen en minder het geval is onder de dijk. (Deltares, 2015)

De verticale lagenscheiding is in dit geval geschematiseerd door iedere meter een scheiding te definiëren. Daarnaast zijn deze lagen horizontaal gescheiden op de overgangen tussen voorland met buitentalud, buitentalud met kruin, kruin met binnentalud en binnentalud met achterland.

Binnen ieder 'vak' is vervolgens in het midden hiervan de grensspanning inclusief POP-waarde onder zomerse omstandigheden bepaald en ingevuld in D-Geo Stability. Dit is gedaan voor alle slappe grondlagen (klei en veen) en niet voor zand. Voor zandlagen wordt niet gerekend met grensspanningen en wordt de default C phi gebruikt voor gedraineerd rekenen. Voor het dijkprofiel met zandkern en kleibekleding wordt het gehele dijkprofiel gedraineerd doorgerekend, met uitzondering van de ondergrondlagen.

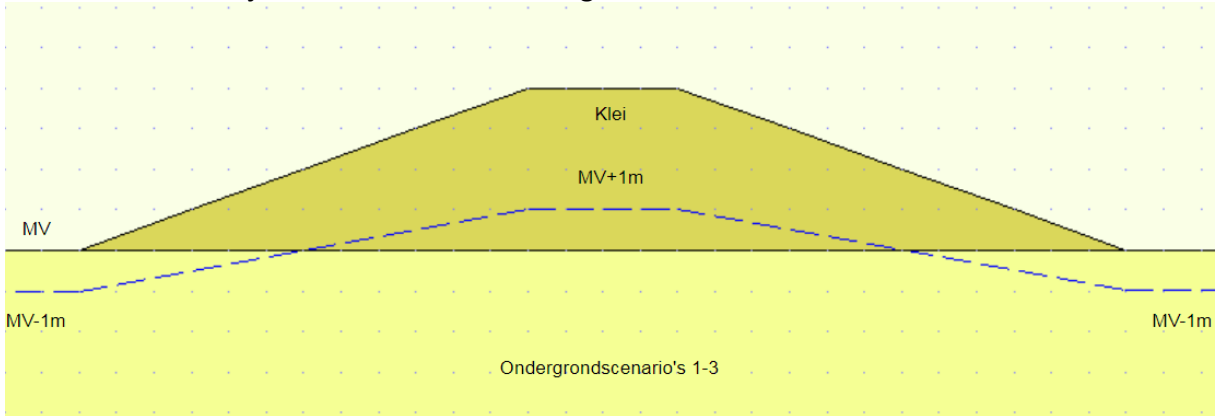
De bepaling van de grensspanningen is uitgevoerd in Excel en een voorbeeld hiervan is onderstaand weergegeven.



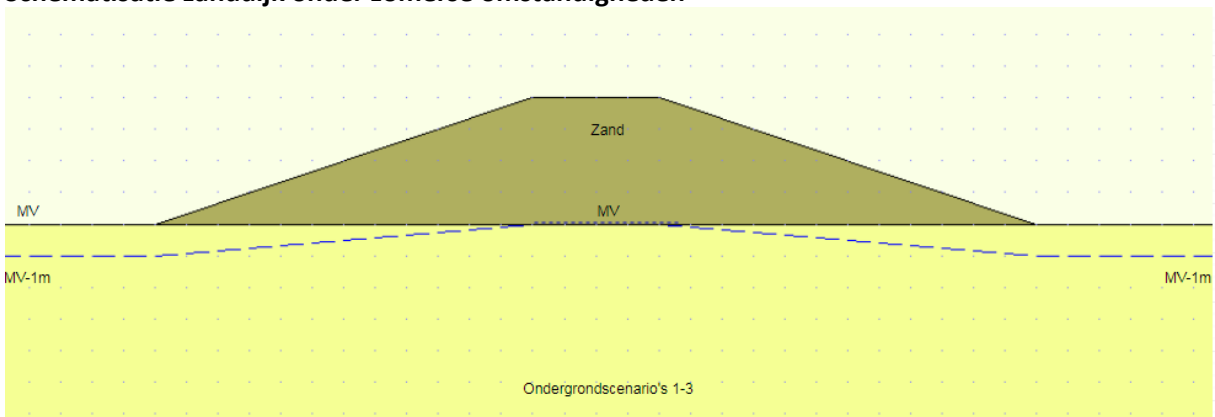
### Dijkprofielen onder zomerse omstandigheden

De grensspanningen zijn voor de dijkprofielen bepaald onder zomerse omstandigheden. De schematisatie van de grondwaterstand en freatische lijn is hiervoor weergegeven in onderstaande figuren. Voor de kleidijk is een binnen- en buitenwaterstand van maaiveld-1m geschematiseerd en een waterstand van maaiveld+1m onder de kruin. Voor de zanddijk en de zanddijk met kleibekleding is ook een binnen- en buitenwaterstand van maaiveld-1m geschematiseerd, maar vervolgens een waterstand onder de kruin ter hoogte van maaiveld. Dit verschil in waterstand heeft te maken met het verschil in doorlatendheid tussen de grondsoorten (Verruijt, 2012).

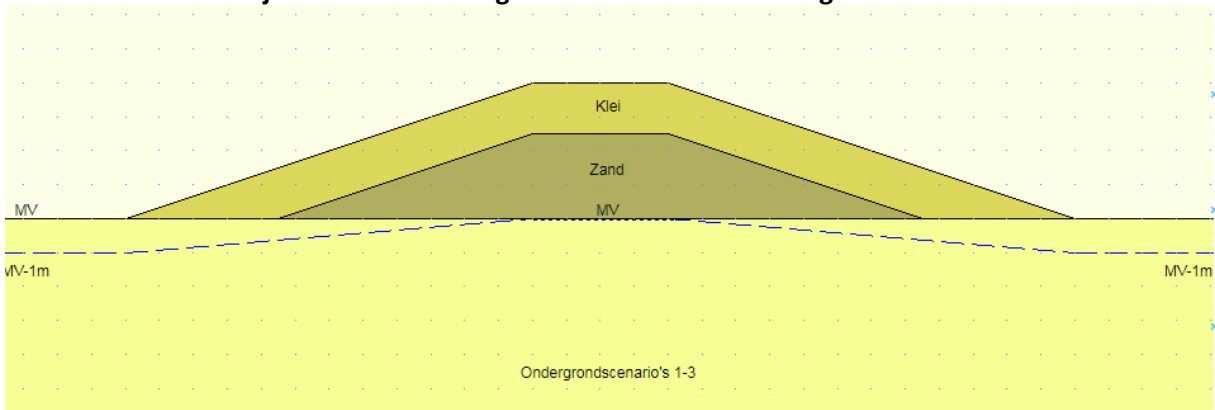
### Schematisatie kleidijk onder zomerse omstandigheden



### Schematisatie zanddijk onder zomerse omstandigheden



### Schematisatie zanddijk met kleibekleding onder zomerse omstandigheden





### Glijvlak model

Als glijvlak model is de glijvlakmethode van Lift-Van gebruikt. Deze methode geeft een glijvlak met een horizontaal deel begrensd door twee cirkels. Dit geeft een grotere vrijheid in het vinden van een maatgevend glijvlak dan de methode van Bishop. (Deltares, 2015)

### Grid en tangent lines

Het berekeningsgrid is voor alle berekeningen hetzelfde en bestaat uit een grid van 10 bij 10 punten met de coördinaten zoals in hieronder weergegeven.

The screenshot shows a dialog box titled "Slip Plane Definition". It is divided into three main sections:

- Grid left:** X-left [m] 17,684; X-right [m] 27,217; Y-top [m] 11,996; Y-bottom [m] 3,959; Number [-] 5.
- Grid right:** X-left [m] 19,127; X-right [m] 28,191; Y-top [m] 11,167; Y-bottom [m] 3,373; Number [-] 5.
- Tangent line:** Y-top [m] 0,000; Y-bottom [m] -7,000; Number [-] 10. There is a checkbox labeled "Automatic at boundaries" which is currently unchecked.

At the bottom of the dialog are buttons for "OK", "Cancel", and "Help".

De tangent lines per dijkprofiel, ondergrondscenario en type berekening zijn weergegeven in onderstaande tabel. Per berekening zijn 10 tangent lines aangehouden, ongeacht de y-coördinaten. De tangent lines zijn niet voor alle berekeningen hetzelfde, omdat dit in een aantal situaties een zeer dun glijvlak opleverde wat niet per definitie gezien wordt als een probleem aangaande STBU. In deze gevallen kan het ook het afschuiven van de grasbekleding betreffen (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2017).

Dijkprofiel	Ondergrondscenario	Y-coördinaten berekeningen freatische lijn [m]	Y-coördinaten berekeningen verkeersbelasting [m]	Y-coördinaten berekeningen grensspanningen [m]
<b>Kleidijk</b>	1	0 tot -7	0 tot -7	0 tot -3
	2	0 tot -7	0 tot -7	0 tot -7
	3	0 tot -7	0 tot -7	0 tot -7
<b>Zanddijk</b>	1	0 tot -7	0 tot -7	0 tot -3
	2	0 tot -7	0 tot -7	0 tot -7
	3	0 tot -7	0 tot -7	0 tot -7
<b>Zanddijk met kleibekleding</b>	1	-1 tot -7	-1 tot -7	-1 tot -3
	2	-1 tot -7	-1 tot -7	-1 tot -7
	3	-1 tot -7	-1 tot -7	-1 tot -7

### Zoekmethode

Als zoekmethode voor de berekeningen is het Genetic Algorithm gebruikt. Deze instelling werkt sneller en kan ook glijvlakken genereren die niet direct gebonden zijn aan de grid punten en tangent lines die zijn opgegeven. Hierdoor ontstaat er meer nauwkeurigheid, doordat het glijvlak ook tussen de grid punten en tangent lines kan liggen.

### Reference level S-ratio

Het referentieniveau voor de s-ratio is geschematiseerd over het maaiveld. D-Geo Stability gebruikt dit referentieniveau om de effectieve verticale spanning te bepalen. (Deltares, 2016)

## Variabelen

- Verkeersbelasting
  1. 13,3 kN/m<sup>2</sup>
  2. 5,0 kN/m<sup>2</sup>
  3. 0,0 kN/m<sup>2</sup>
  
- Freatische lijn
  1. Lijn zakt niet mee
  2. Lijn zakt volledig mee
  3. Lijn zakt deels mee (scenario's staan verderop weergegeven)
  
- POP-waarden

Voor de POP-waarden zijn drie scenario's opgesteld. Het basisscenario bevat de POP-waarden gebaseerd op de gebruikte POP-waarden binnen de beoordeling van normtraject 10-2 door WDO Delta (Waterschap Drents Overijsselse Delta, 2018). Het tweede en derde scenario zijn opgesteld door middel van de indicatieve waarden voor POP gegeven in de SHM (Deltares, 2015). Voor scenario twee zijn de karakteristieke waarden uit de SHM genomen en voor scenario 3 de verwachtingswaarden (**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**).

Voor de POP-waarden voor de verschillende grondlagen zijn de waarden genomen van Dijksmateriaal (klei), Hollandveen en Echteld klei ondiep, zoals hieronder weergegeven.

Afzetting / grondsoort	WBI-SOS eenheid	Bandbreedte POP (kPa)	Verwachtingswaarde POP (kPa)	Karakteristieke waarde POP (kPa) <sup>2)</sup>
Echteld klei ondiep <sup>1)</sup>	H_R.....	5 – 65	27	15
Echteld klei diep <sup>1)</sup>	H_R.....	0 – 75	24	8
Naaldwijk klei ondiep <sup>1)</sup>	H_M..... H_E.....	5 – 60	25	15
Naaldwijk klei diep <sup>1)</sup>	H_M..... H_E.....	0 – 30	14	7
Hollandveen	H_Vhv_v	0 – 60	11	1
Basisveen	H_Vbv_v	10 – 60	25	15
Dijksmateriaal (klei)	H_Aa_ht	0 – 150	30	7
Overig klei	Diversen	0 – 75	22	10

<sup>1)</sup> Met 'diep' is bedoeld onder het Hollandveen en 'ondiep' is boven het Hollandveen. Als Hollandveen afwezig is, kan voor 'ondiep' de bovenste 3 m vanaf maaiveld worden aangehouden.

<sup>2)</sup> Bij de karakteristieke waarden is rekening gehouden met het effect van uitmiddeling van onzekerheid langs een schuifvlak.

De karakteristieke waarden, verwachtingswaarden en waarden op basis van normtraject 10-2 geven de input volgens onderstaande tabel voor de POP-scenario's.

Grondsoort	POP-waarden [kPa]		
	Startwaarden normtraject 10-2	Karakteristieke waarden SHM	Verwachtingswaarden SHM
<b>Klei, dijksmateriaal</b>	43	7	30
<b>Klei Holocéen, onder</b>	20	15	27
<b>Klei Holocéen, naast</b>	15	15	27
<b>Veen, onder</b>	30	1	11
<b>Veen, naast</b>	5	1	11

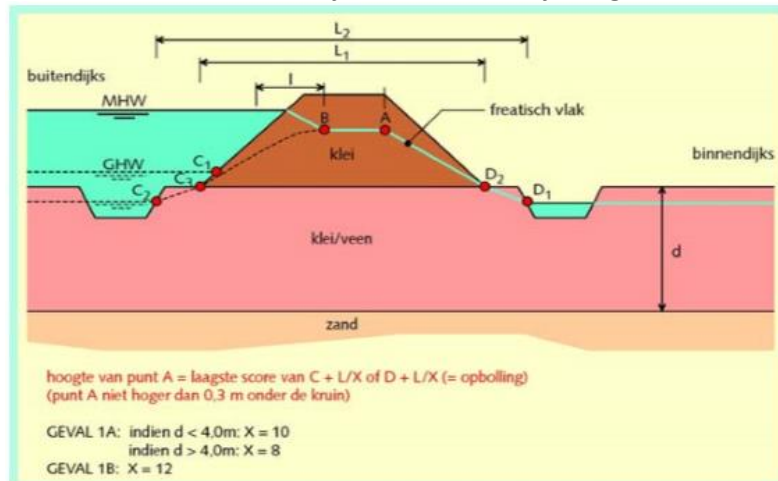
### Schematisatie freatische lijn

De standaard schematisatie is uitgevoerd volgens het TRWD (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 2004) en de werkwijze bij WDOdelta.

#### - Kleidijk

De schematisatie voor de freatische lijn is uitgevoerd zoals hieronder weergegeven.

#### Schematisatie freatische lijn voor een kleidijk volgens het TRWD



De punten A, B, C en D en de Lengte L worden als volgt bepaald:

A = Recht onder de binnenkruinlijn. Hoogte is minimum van  $C + L/X$  of  $D + L/X$ .

Ondergrondscenario 1 en 2:

$L = 28\text{m}$

$D < 4,0\text{m}$ , dus  $X = 10$

Hoogte A:  $0 + (28/10) = 2,8\text{m}$

Ondergrondscenario 3:

$L = 28\text{m}$

$D > 4,0\text{m}$ , dus  $X = 8$

Hoogte A:  $0 + (28/8) = 3,5\text{m}$

B = Recht onder de buitenkruinlijn op dezelfde hoogte als punt A.

C = Hoogte van het freatisch vlak ter plaatse van de buitenteen van de dijk.

Omdat er geen sloot aanwezig is ter plaatse van de buitenteen wordt hiervoor punt  $C_2$  genomen.

D = Hoogte van het freatisch vlak ter plaatse van de binnenteen van de dijk.

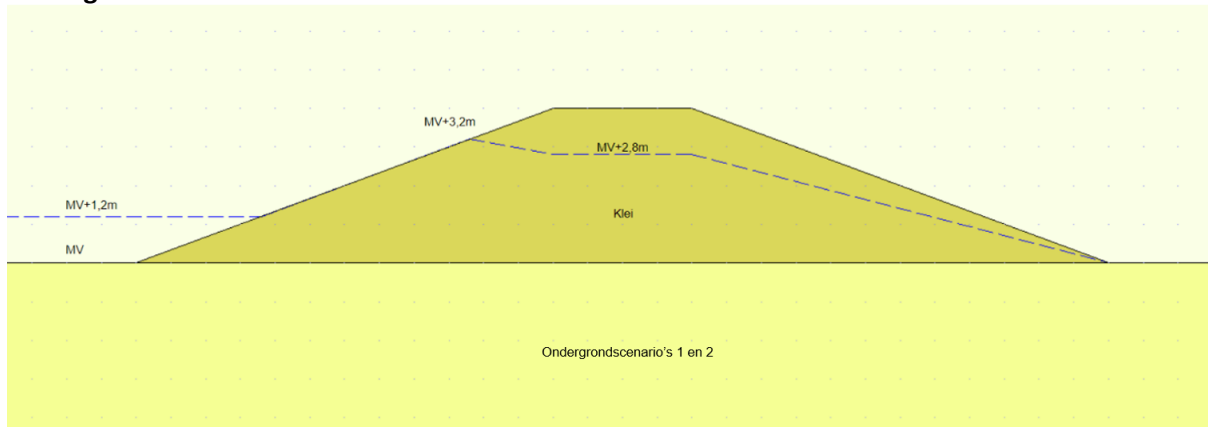
Omdat er geen sloot aanwezig is ter plaatse van de binnenteen wordt hiervoor punt  $D_2$  genomen.

L = Breedte van de dijk basis

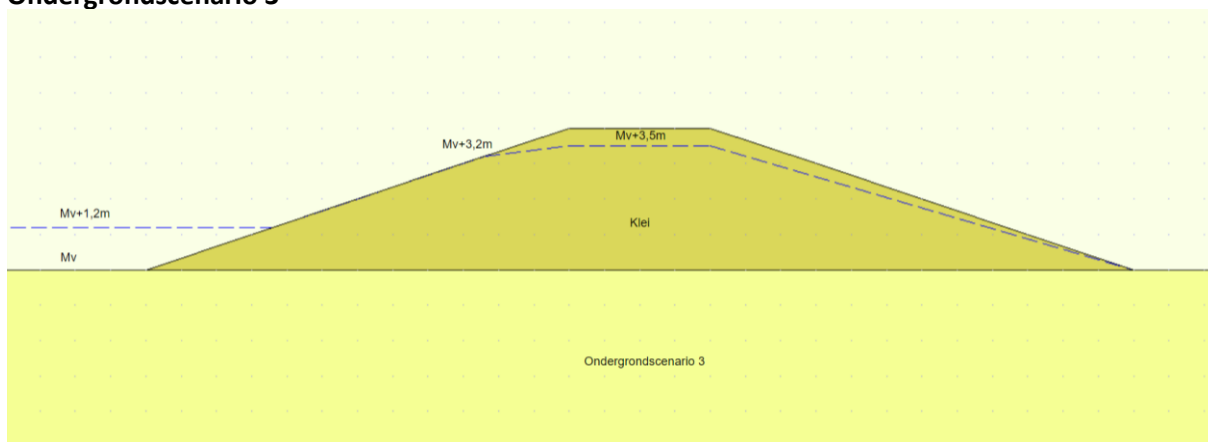
Deze is afhankelijk van de punten C en D en is voor dit geval gelijk aan 28 meter.

Bovenstaande leidt tot de volgende schematische weergave van de freatische lijn volgens de huidige methode uit het TRWD:

### Ondergrondscenario's 1 en 2



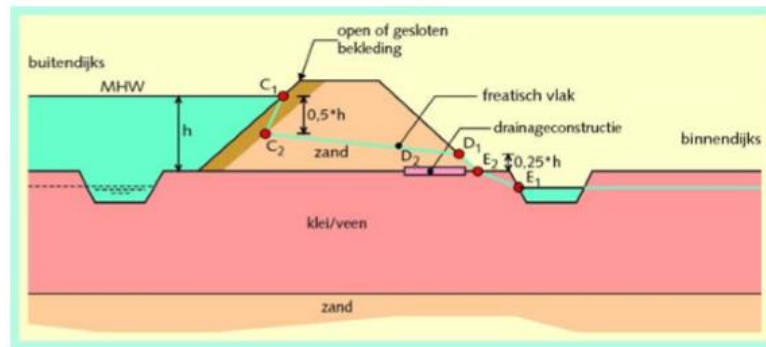
### Ondergrondscenario 3



- **Zanddijk**

De schematisatie voor de freatische lijn is uitgevoerd zoals hieronder weergeven.

**Schematisatie freatische lijn voor een zanddijk volgens het TRWD**



De punten C, D en E worden als volgt bepaald:

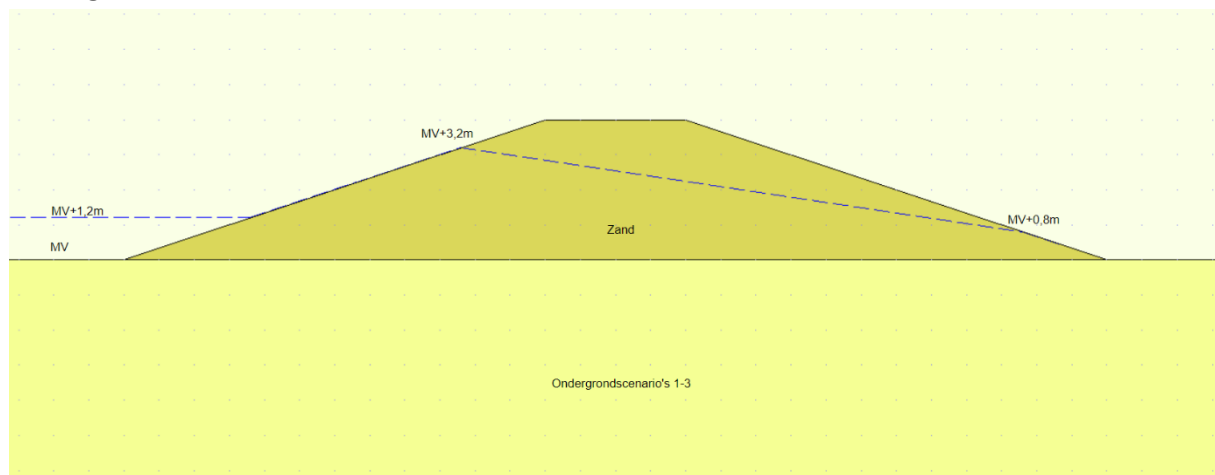
C = Hoogte van het MHW op het buitentalud van het dijklichaam: maaiveld+3,2m  
 Omdat de zanddijk geen dichte bekleding heeft wordt alleen punt C<sub>1</sub> geschematiseerd.

D = Bevindt zich op een hoogte van 0,25\*h op het binnentalud.  
 Hoogte D<sub>1</sub>: 0,25\*3,2 = maaiveld+0,8m  
 Omdat er geen drainageconstructie aanwezig is wordt alleen punt D<sub>1</sub> geschematiseerd.

E = Hoogte van het freatische vlak ter plaatse van de binnenteen van de dijk.  
 Omdat er geen sloot aanwezig is ter plaatse van de binnenteen wordt hiervoor punt E<sub>1</sub> genomen.

Bovenstaande leidt tot de volgende schematische weergave van de freatische lijn volgens de huidige methode uit het TRWD:

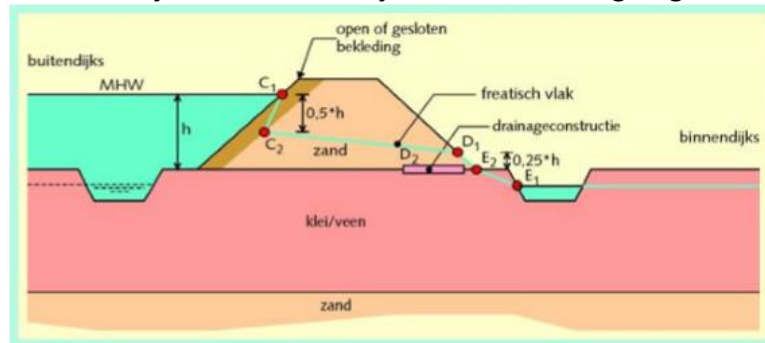
**Ondergrondscenario's 1 t/m 3**



- **Zanddijk met kleibekleding**

De schematisatie voor de freatische lijn is uitgevoerd zoals hieronder weergegeven.

**Schematisatie freatische lijn voor een zanddijk met kleibekleding volgens het TRWD**



De punten C, D en E worden als volgt bepaald:

$C_1$  = Hoogte van het MHW op het buitentalud van het dijklichaam: maaiveld+3,2m

$C_2$  = Bevindt zich op de scheiding tussen de bekleding en de zandkern op een hoogte  $0,5 \cdot h$  lager dan punt  $C_1$ .

$$\text{Hoogte } C_2 = 3,2 - 0,5 \cdot 3,2 = \text{maaiveld} + 1,6\text{m}$$

Het punt  $C_2$  heeft bij een hoogte van maaiveld+1,6m een kleinere x-coördinaat dan het punt  $C_1$  maar D-Geo Stability kan niet werken met een terugspringende lijn. Om deze reden is in de standaardschematisatie het punt  $C_2$  geschematiseerd op een hoogte van 1,7m waarbij dit punt op hetzelfde x-coördinaat ligt als punt  $C_1$ .

D = Bevindt zich op een hoogte van  $0,25 \cdot h$  op het binnentalud.

$$\text{Hoogte } D_1: 0,25 \cdot 3,2 = \text{maaiveld} + 0,8\text{m}$$

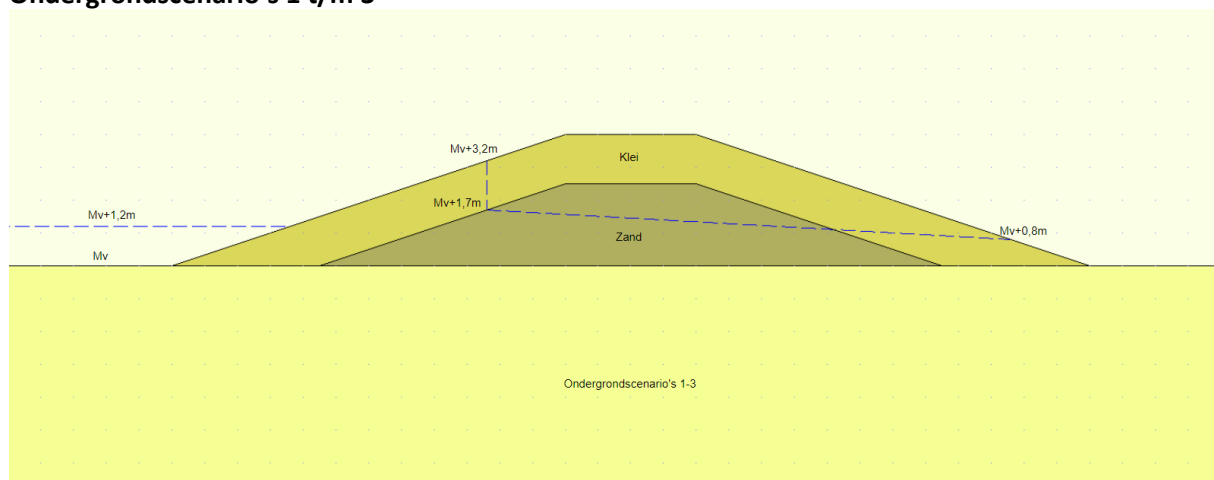
Omdat er geen drainageconstructie aanwezig is wordt alleen punt  $D_1$  geschematiseerd.

E = Hoogte van het freatische vlak ter plaatse van de binnenteen van de dijk.

Omdat er geen sloot aanwezig is ter plaatse van de binnenteen wordt hiervoor punt  $E_1$  genomen.

Bovenstaande leidt tot de volgende schematische weergave van de freatische lijn volgens de huidige methode uit het TRWD:

**Ondergrondscenario's 1 t/m 3**





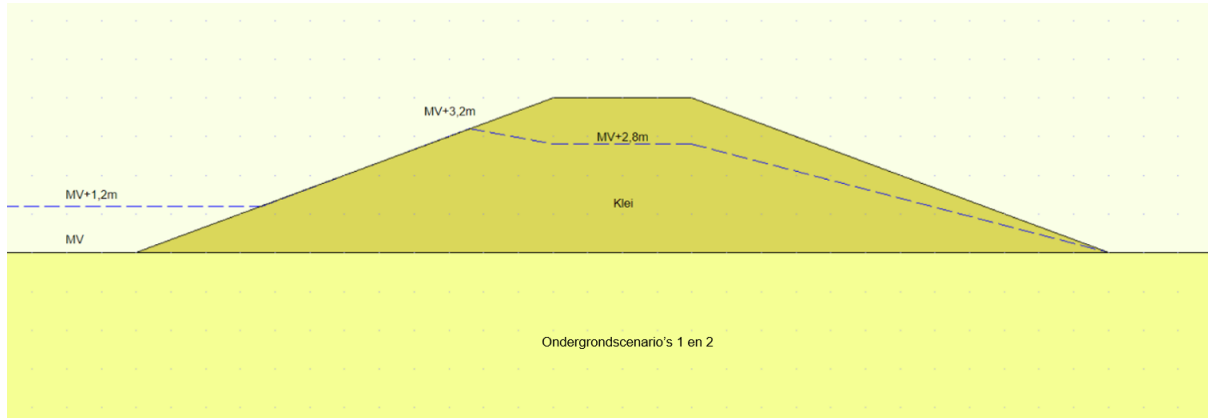
D.2. GEVOELIGHEID FREATISCHE LIJN

- **Kleidijk**

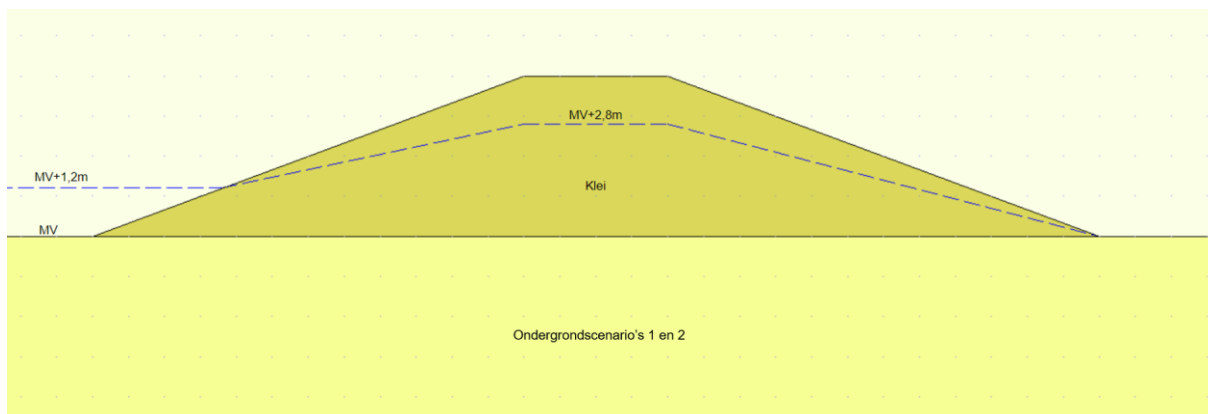
Maatgevend scenario = ondergrondscenario 2 met SF=1,52 (scenario met laagste safety factor onder standaard schematisatie)

**Schematisering freatische lijn**

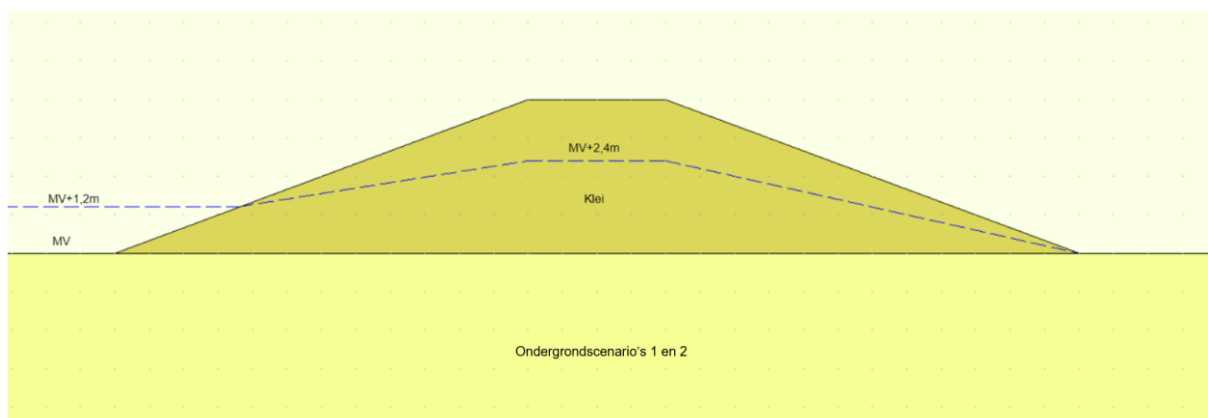
**Scenario 1**



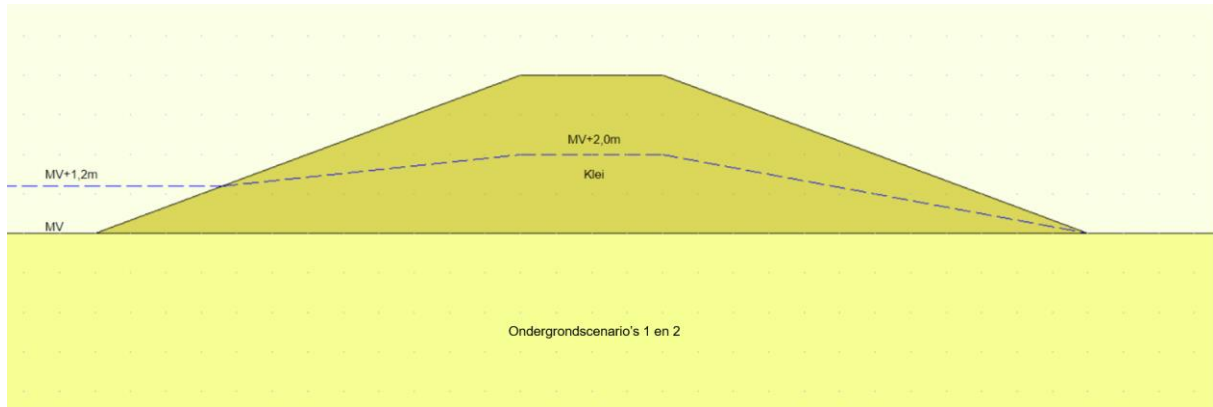
**Scenario 2**



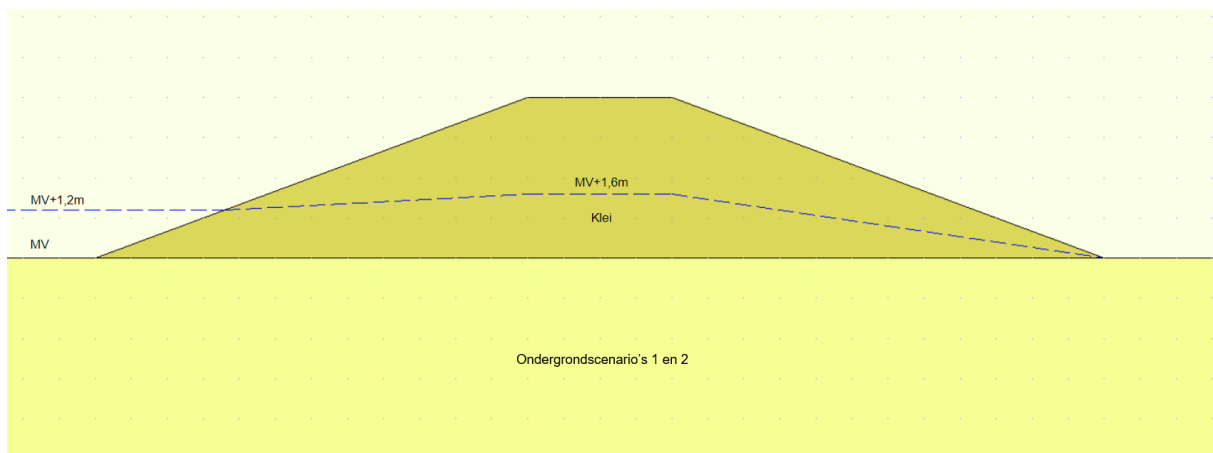
**Scenario 3**



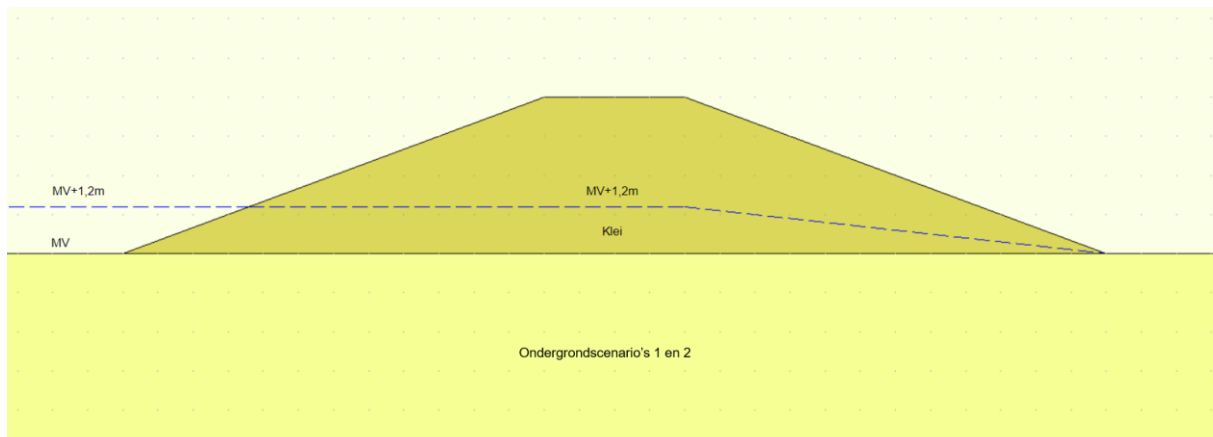
### Scenario 4



### Scenario 5



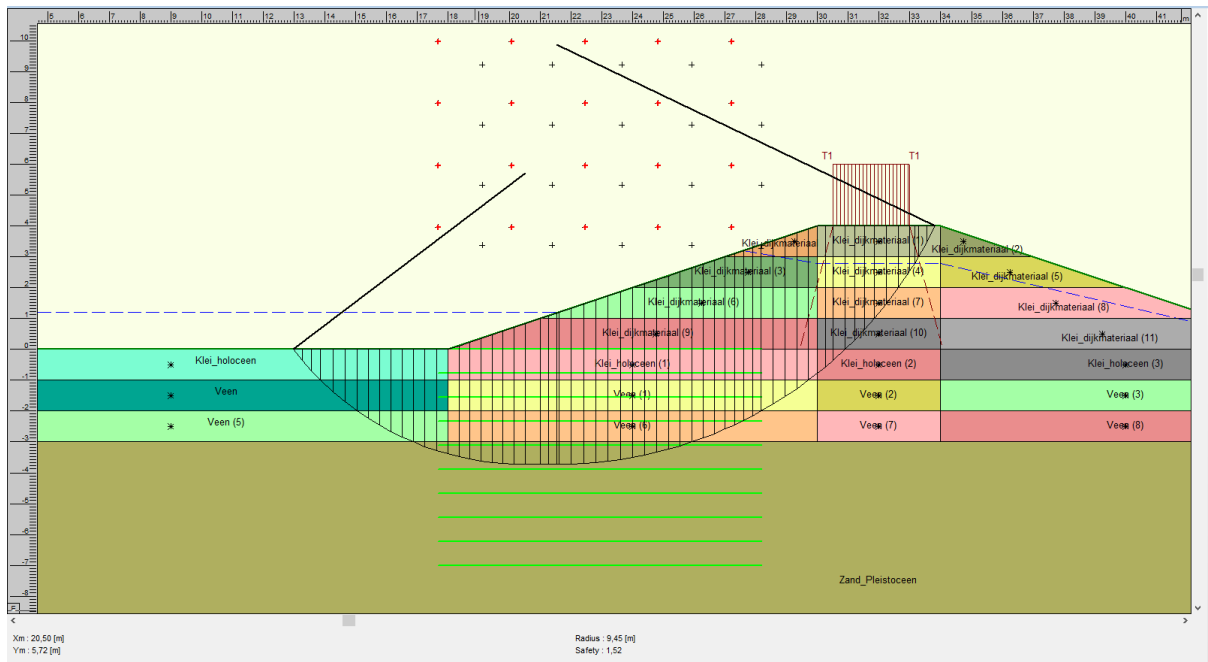
### Scenario 6



- Resultaten

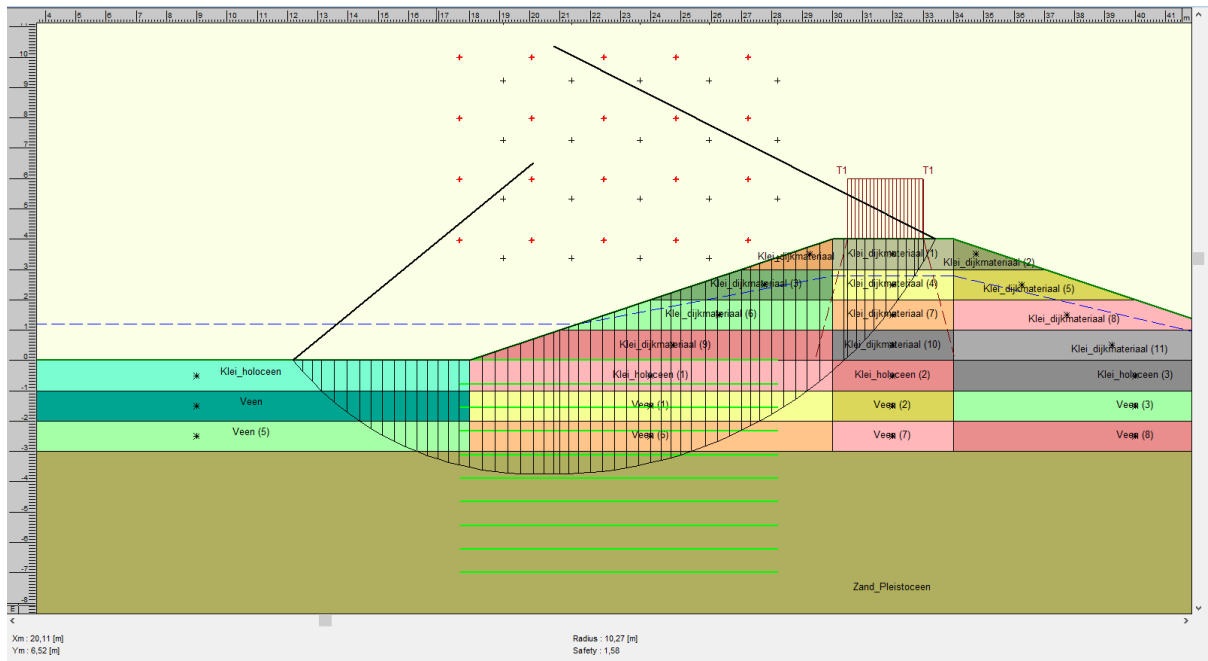
Scenario 1: Standaard schematisatie | 100% verzadigd

SF = 1,52



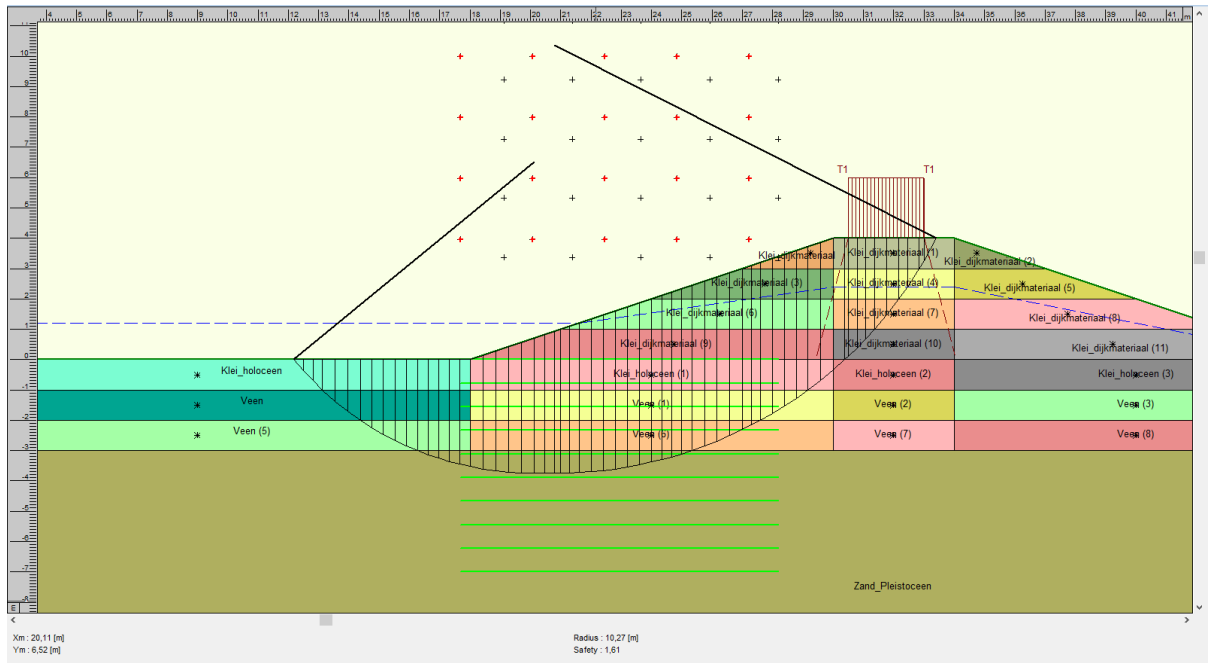
Scenario 2 | Droogvallen buitentalud

SF = 1,58



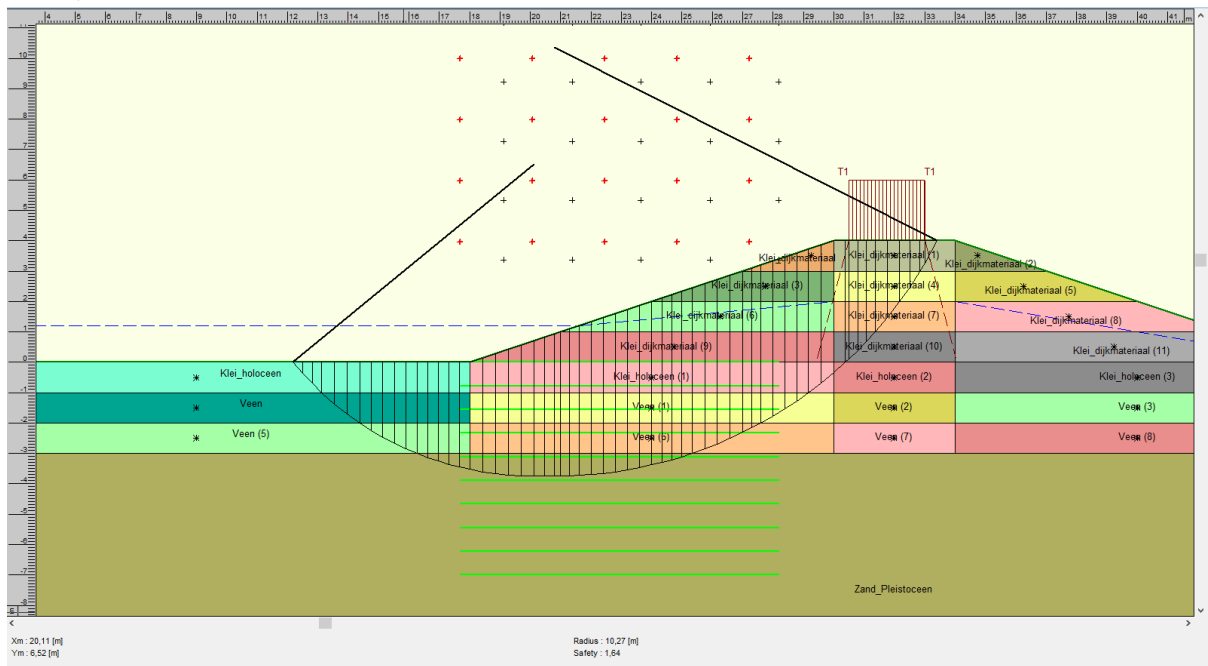
### Scenario 3 | 25% zakking onder buitenkruinlijn

SF = 1,61



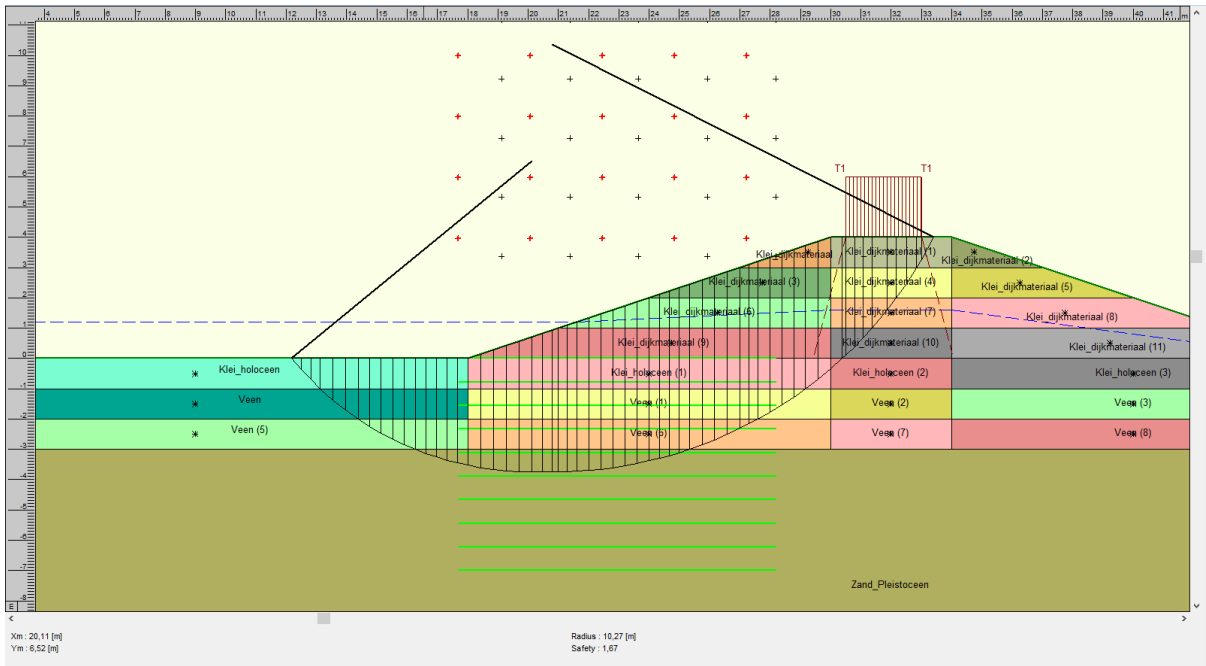
### Scenario 4 | 50% zakking onder buitenkruinlijn

SF = 1,64



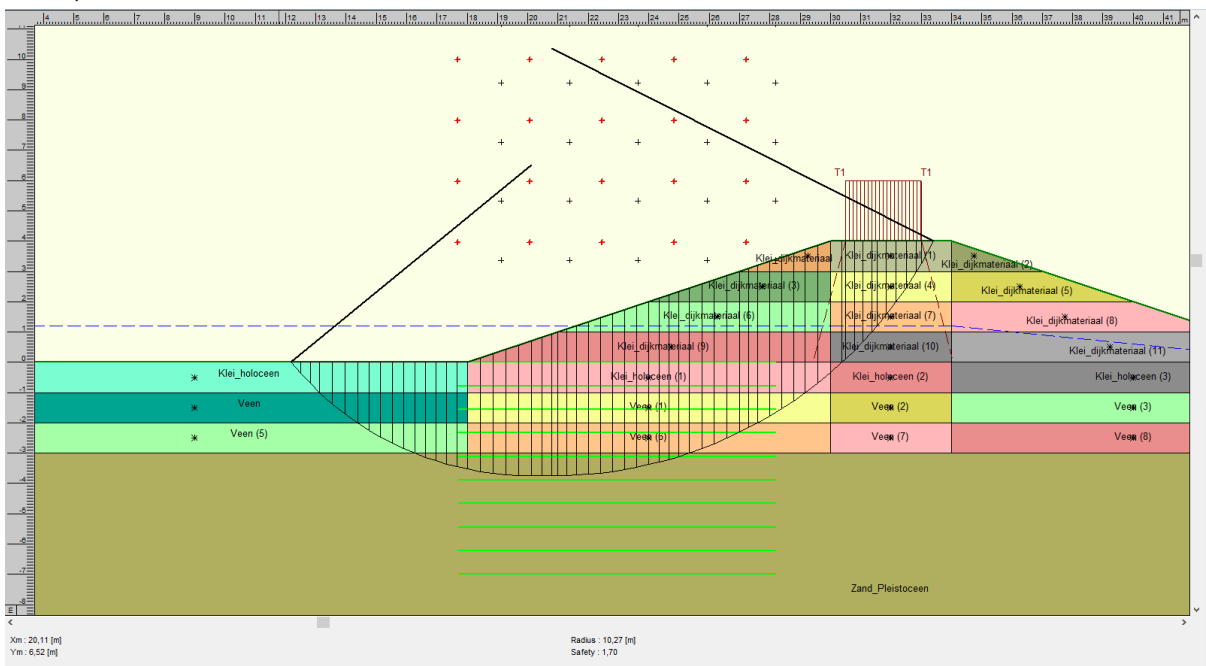
### Scenario 5 | 75% zakking onder buitenkruinlijn

SF = 1,67



### Scenario 6 | Volledige zakking freatische lijn (freatische lijn even hoog als buitenwaterstand)

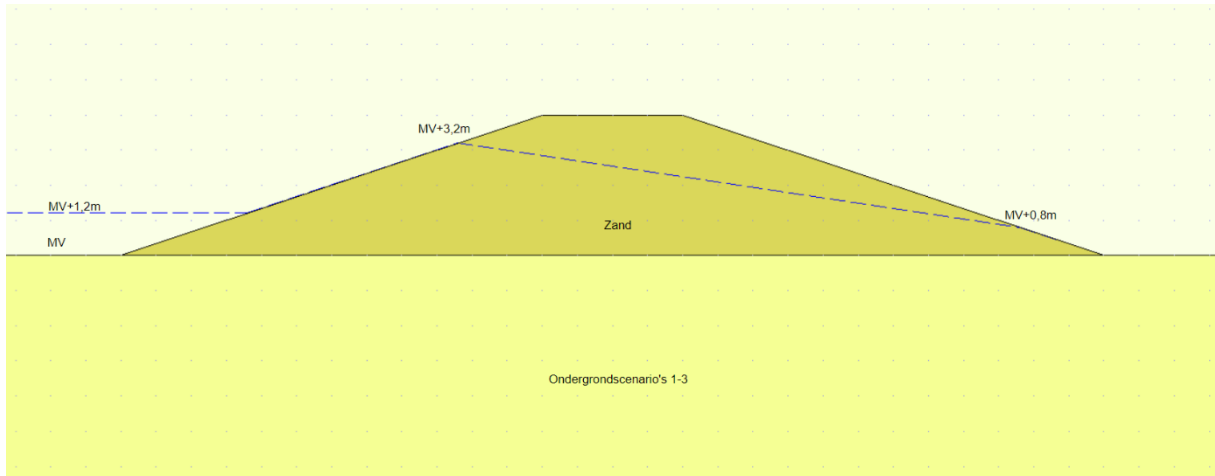
SF = 1,70



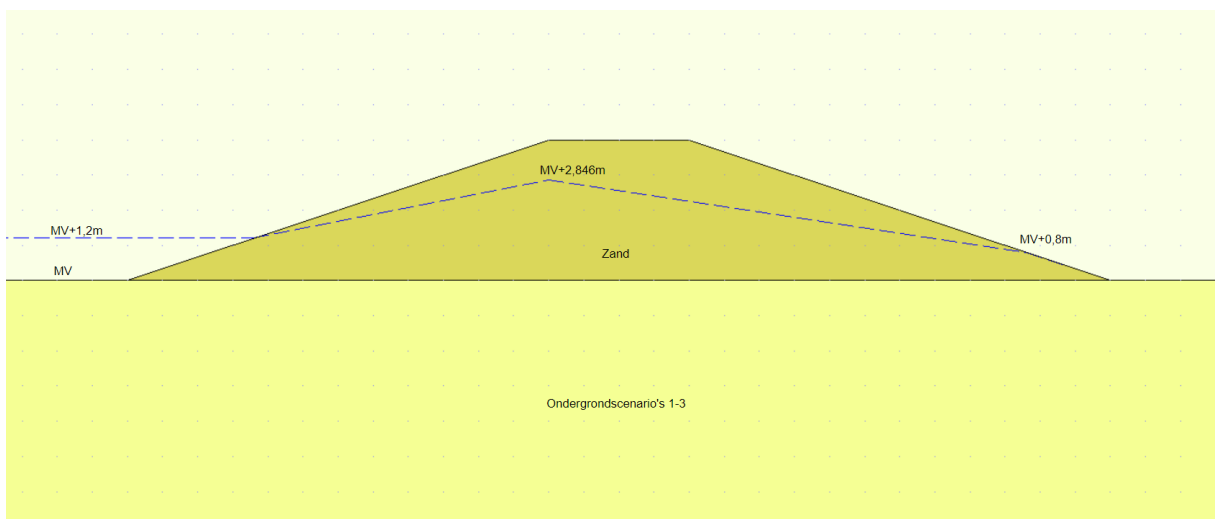
- **Zanddijk**

Maatgevend scenario = ondergrondscenario 2 met SF= 0,88 (scenario met laagste safety factor onder standaard schematisatie).

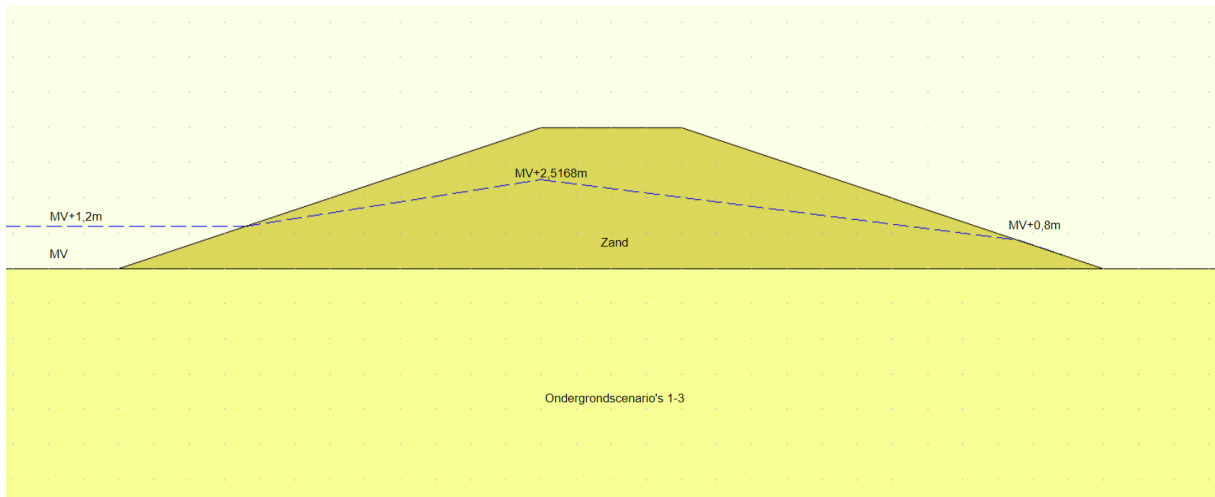
**Schematisering freatische lijn**  
**Scenario 1**



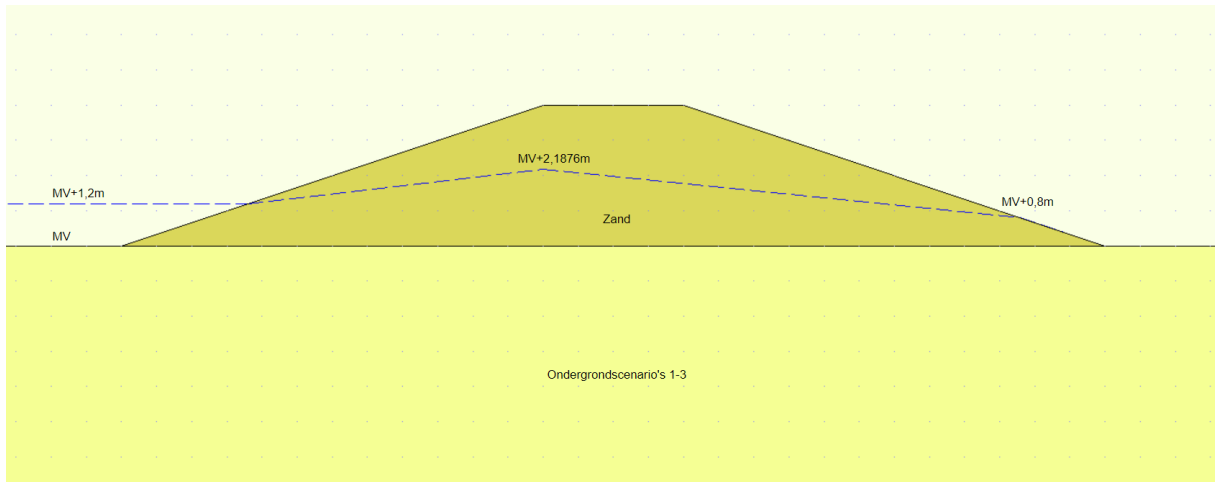
**Scenario 2**



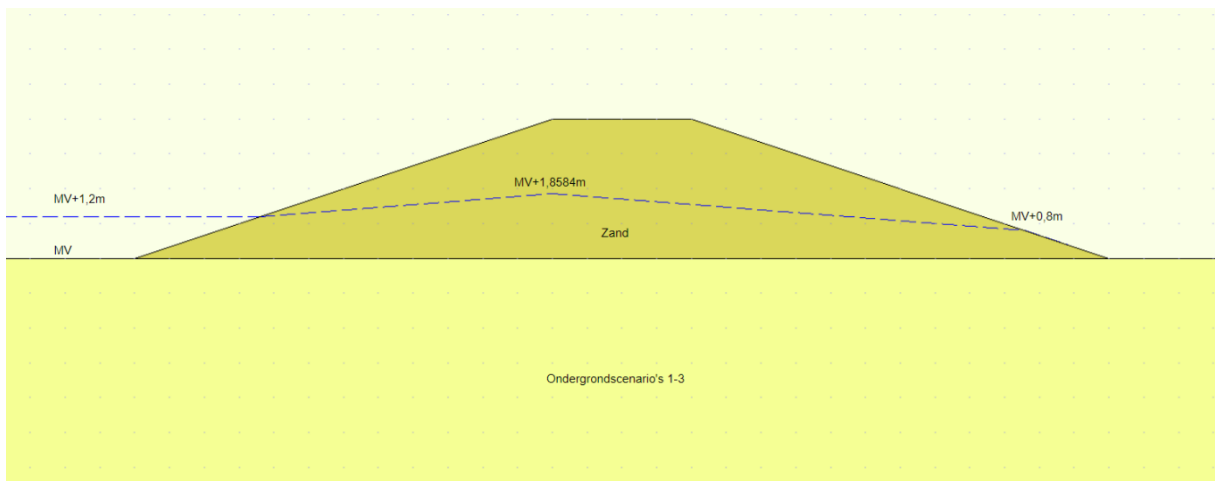
**Scenario 3**



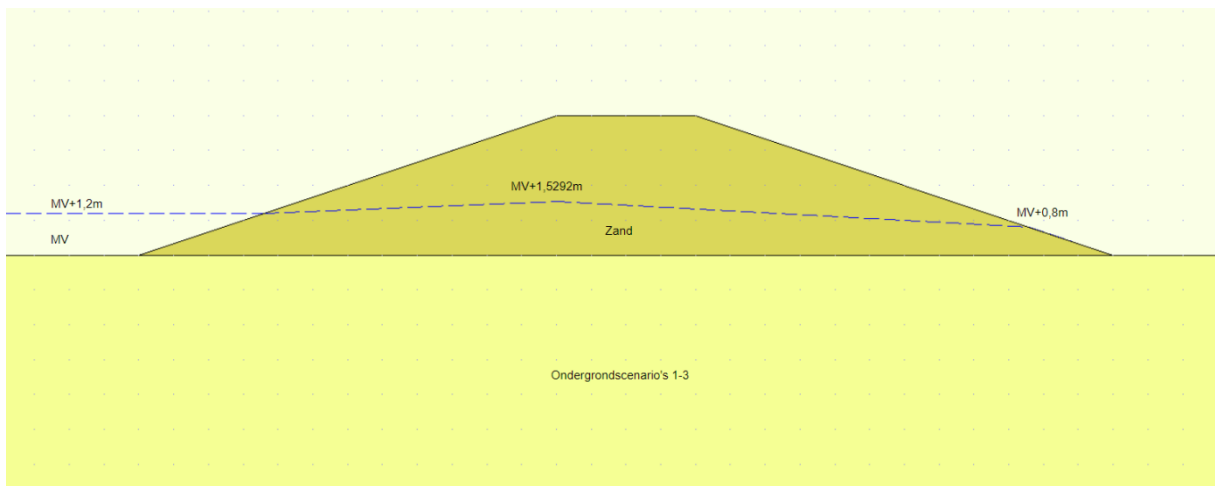
### Scenario 4



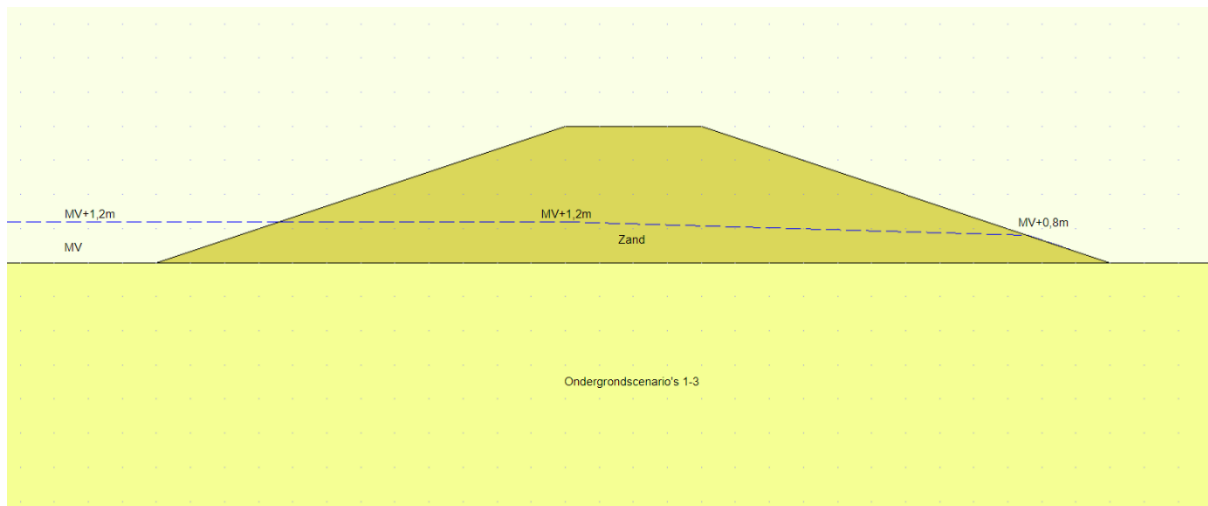
### Scenario 5



### Scenario 6



### Scenario 7

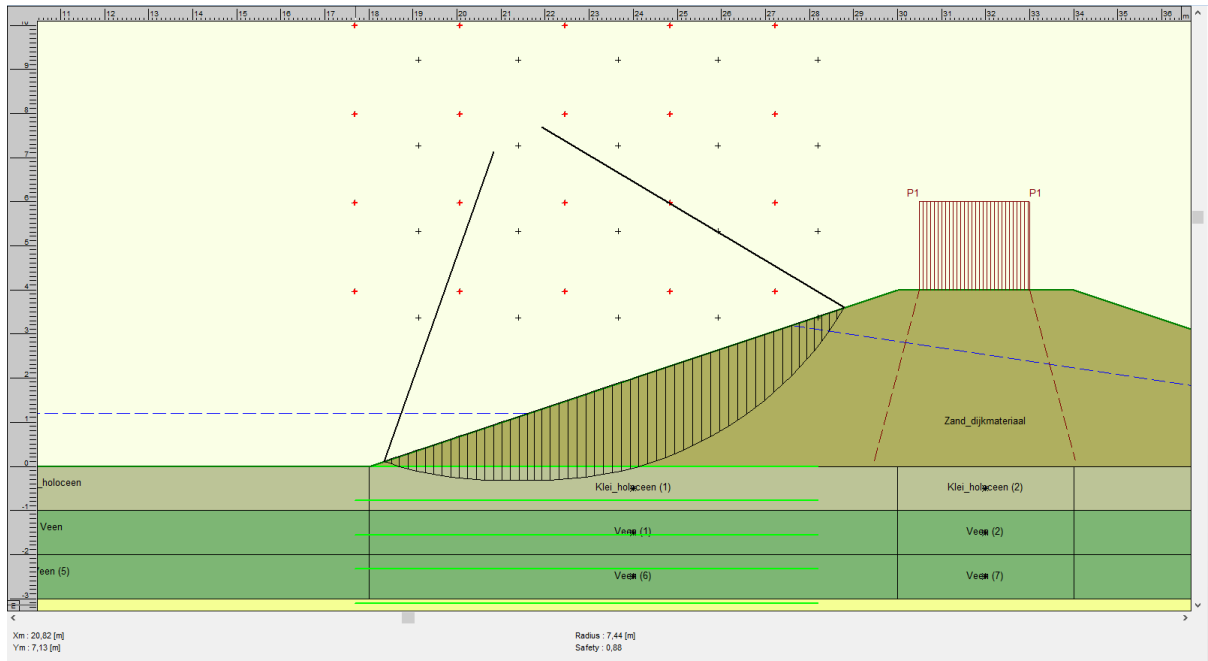




- Resultaten

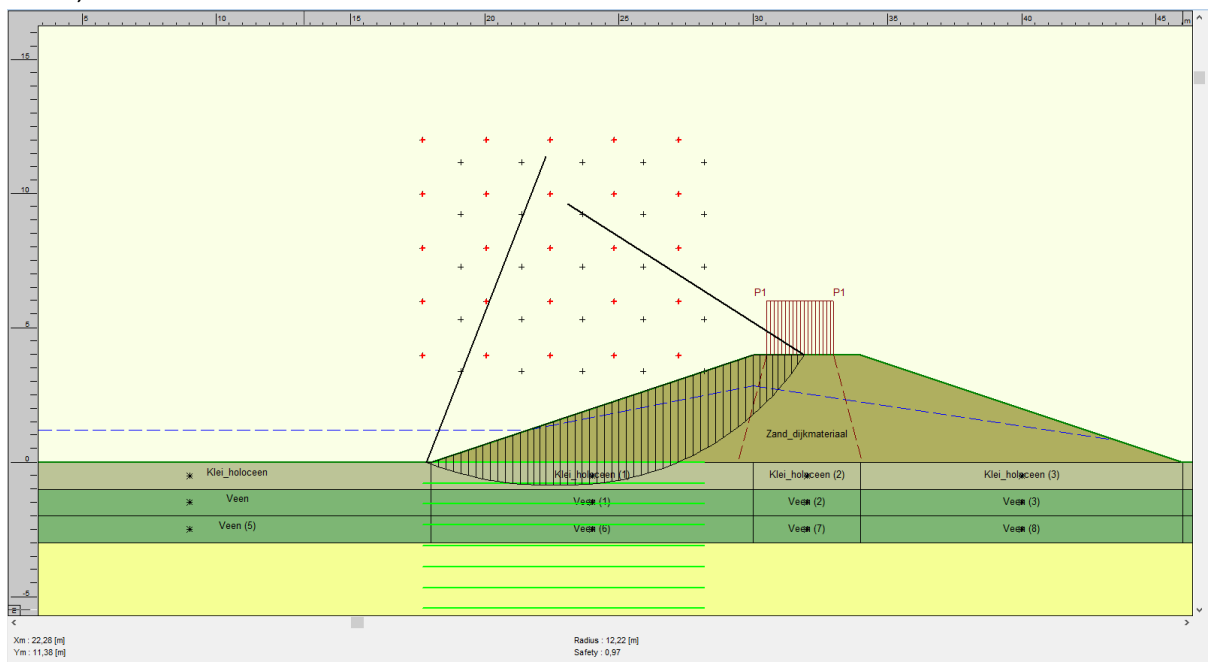
Scenario 1: Standaard schematisatie | 100% verzadigd

SF = 0,88



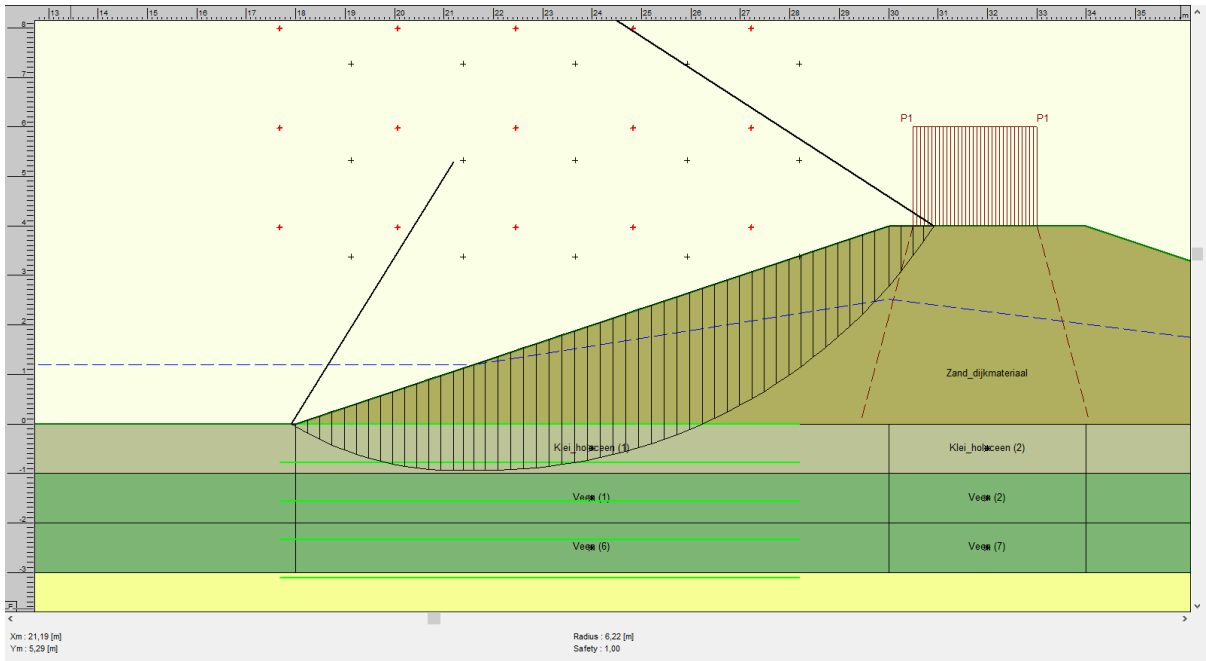
Scenario 2 | Droogvallen buitentalud

SF = 0,97



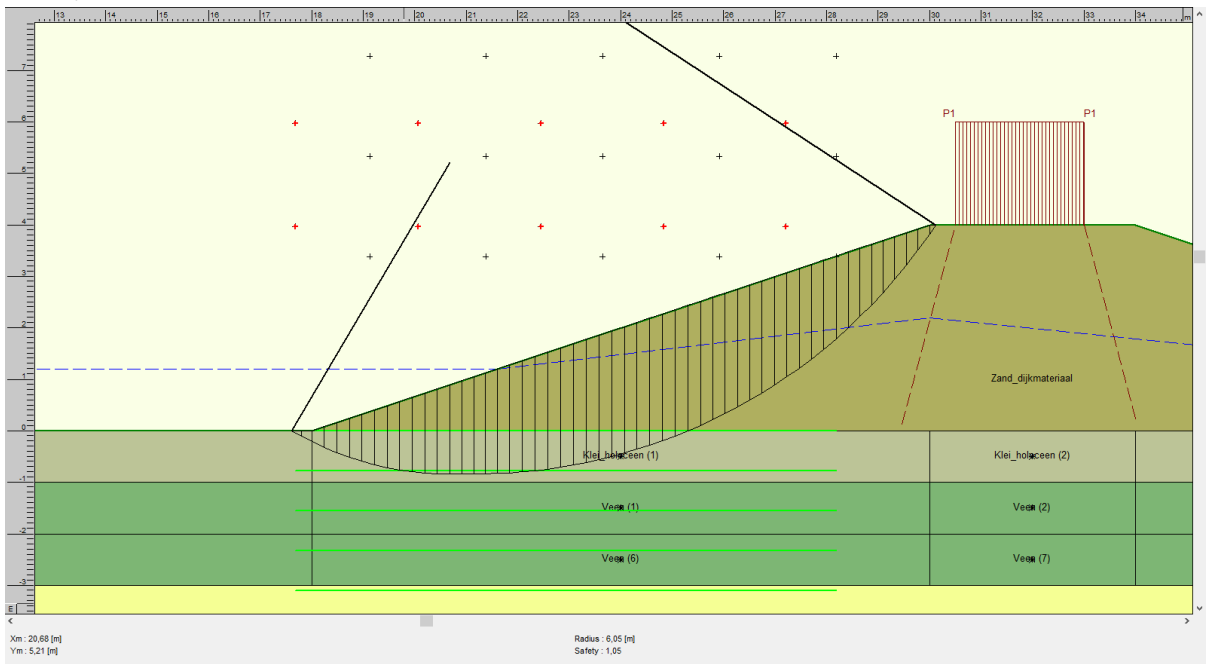
### Scenario 3 | 20% zakking onder de buitenkruinlijn

SF = 1,00



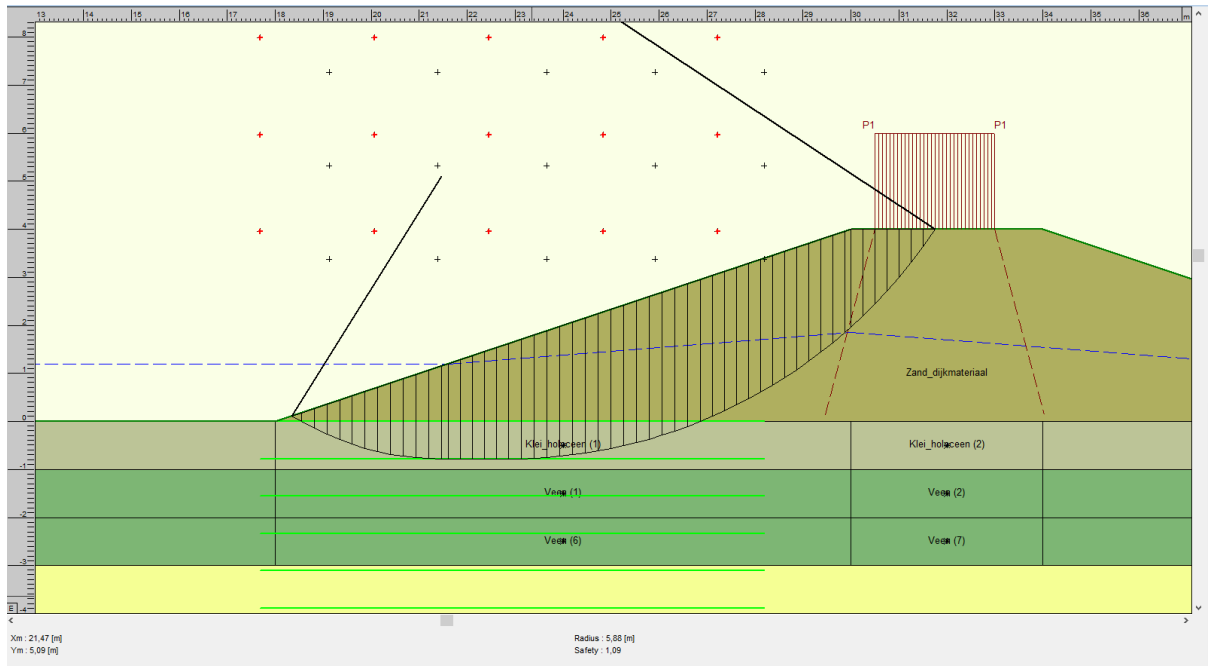
### Scenario 4 | 40% zakking onder de buitenkruinlijn

SF = 1,05



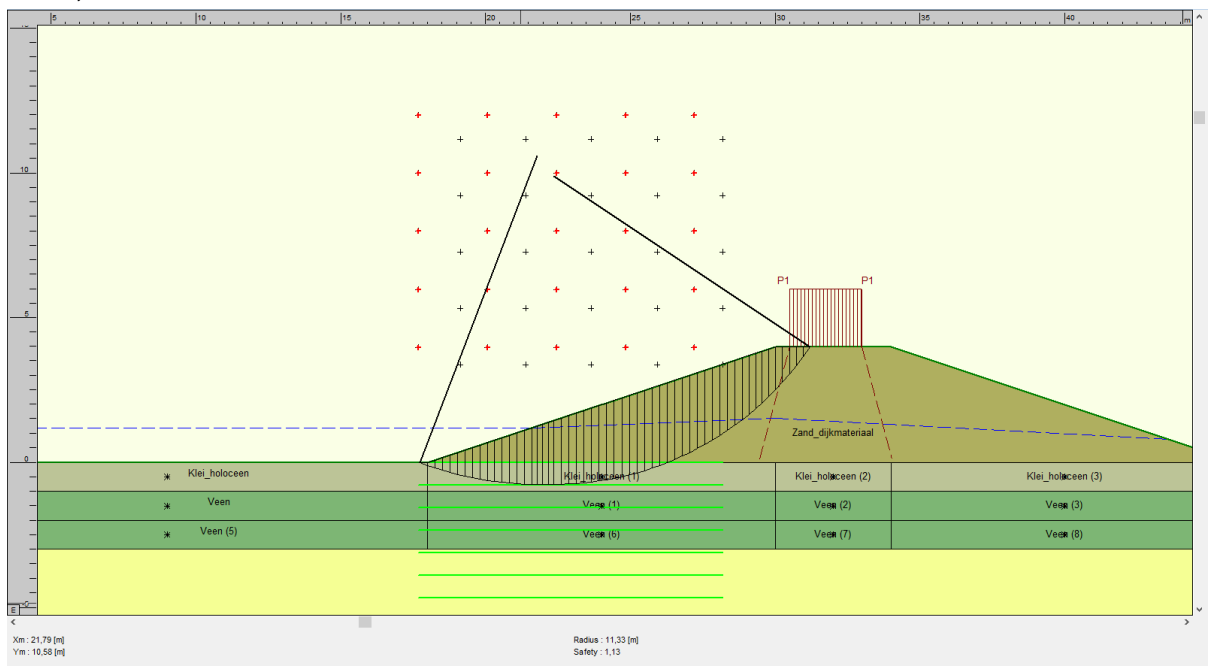
### Scenario 5 | 60% zakking onder de buitenkruinlijn

SF = 1,09



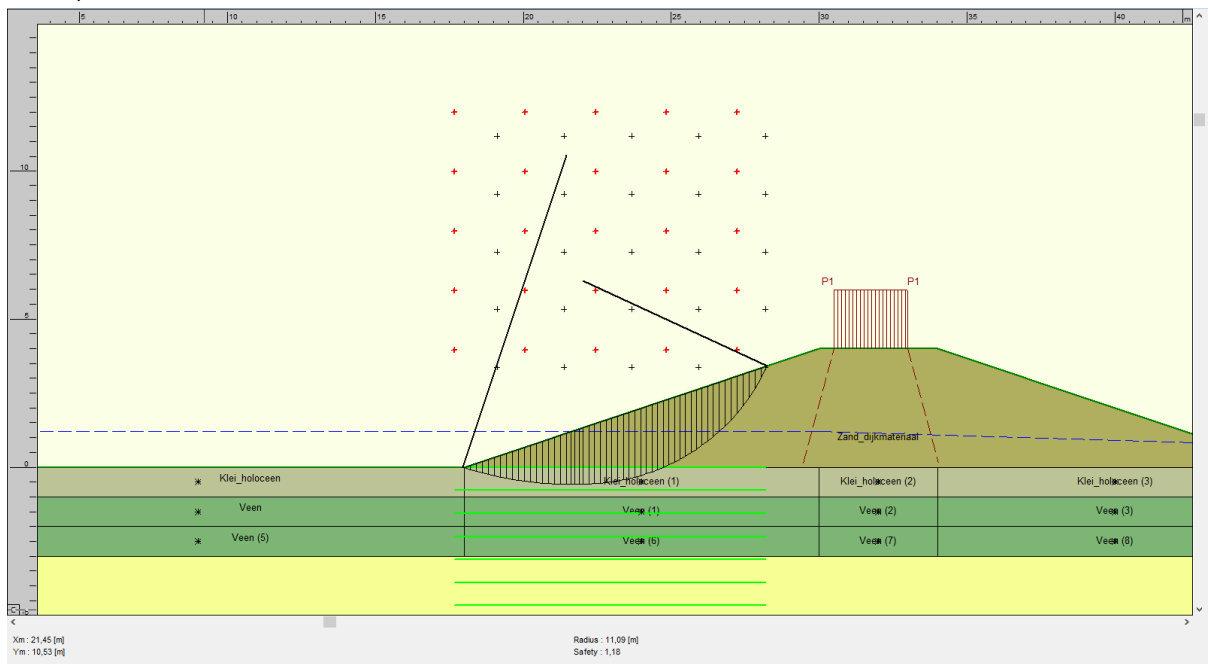
### Scenario 6 | 80% zakking onder de buitenkruinlijn

SF = 1,13



### Scenario 7 | Volledige zakking freatische lijn (freatische lijn even hoog als buitenwaterstand)

SF = 1,18

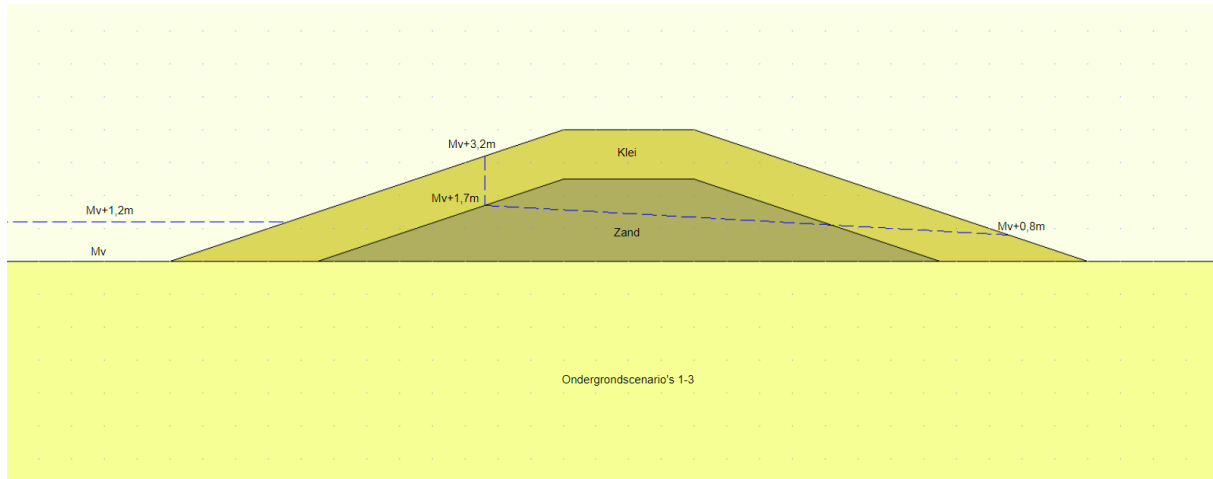


- **Zanddijk met kleibekleding**

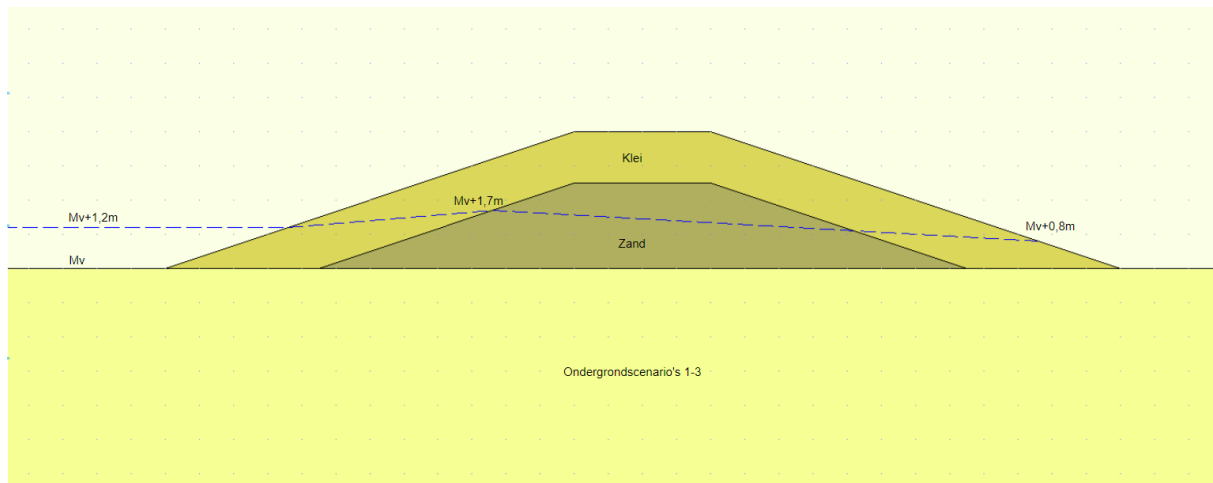
Maatgevend scenario = ondergrondscenario 3 met SF= 1,33 (scenario met laagste safety factor onder standaard schematisatie). Echter is de analyse uitgevoerd voor ondergrondscenario 2 om een vergelijking te kunnen maken met de kleidijk en de zanddijk.

**Schematisering freatische lijn**

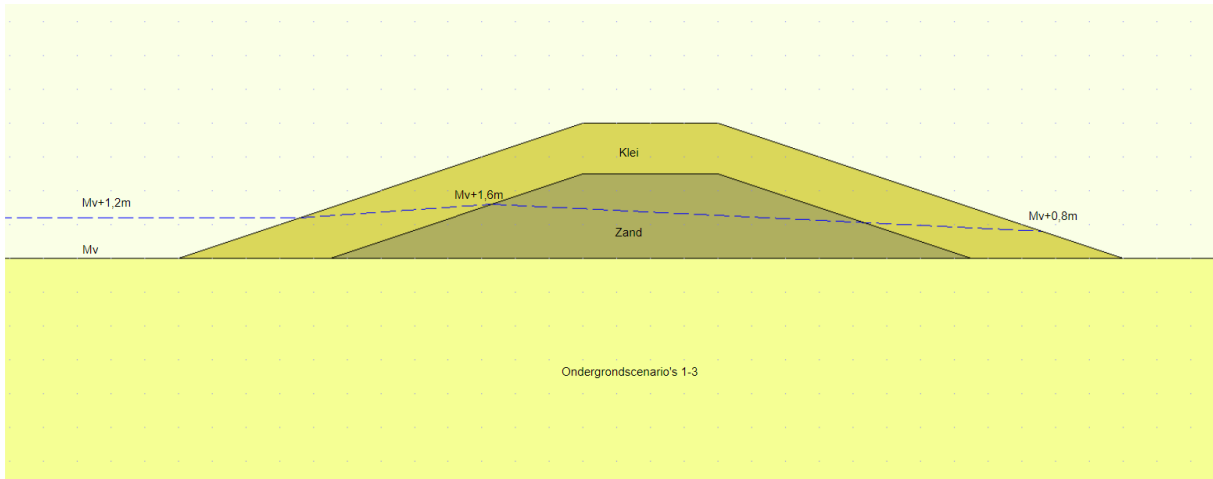
**Scenario 1**



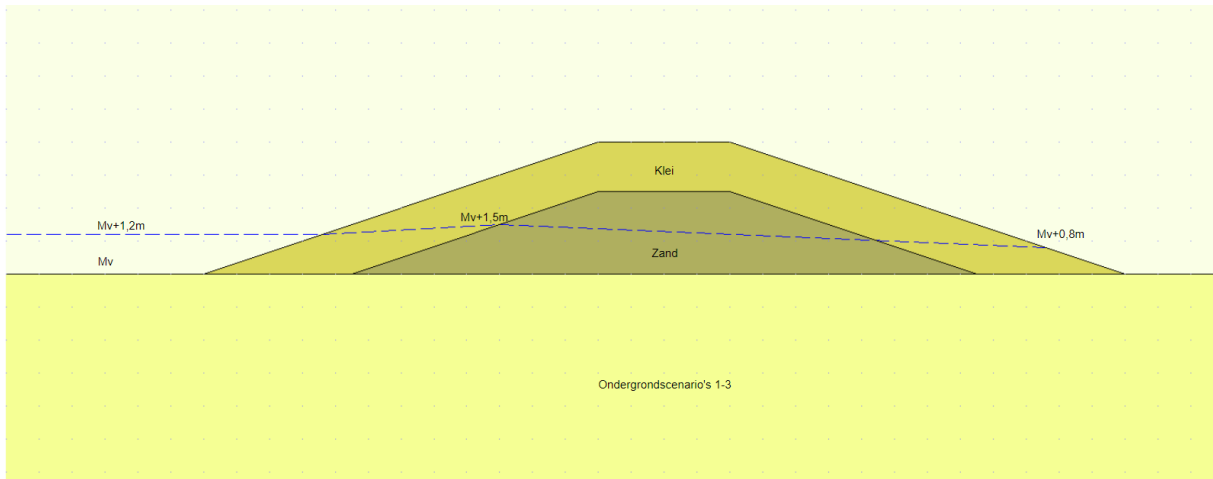
**Scenario 2**



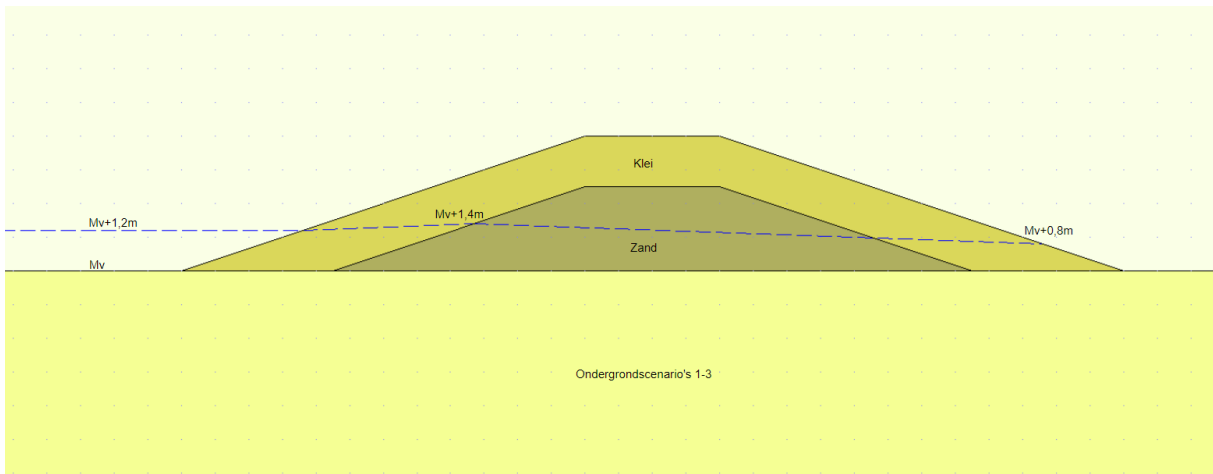
### Scenario 3



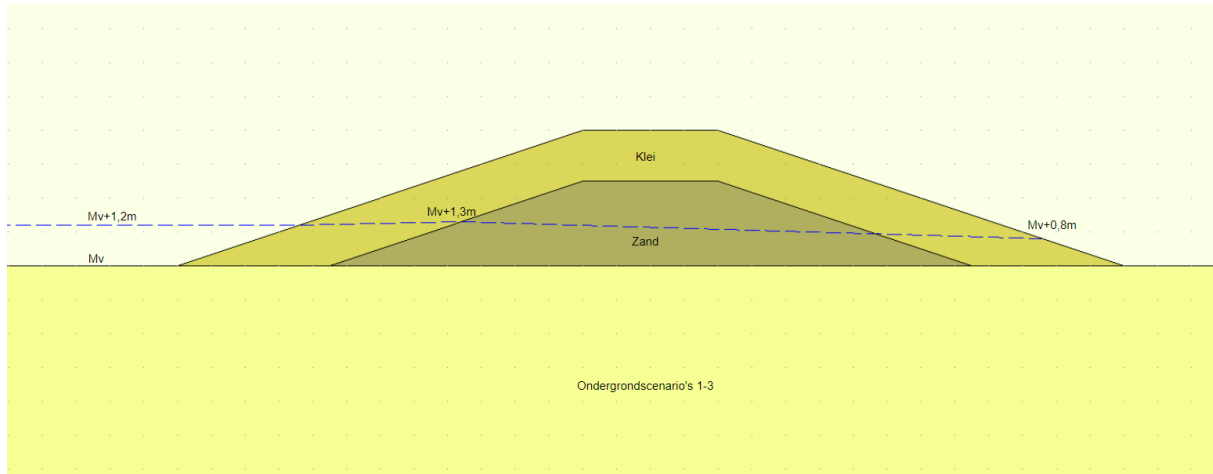
### Scenario 4



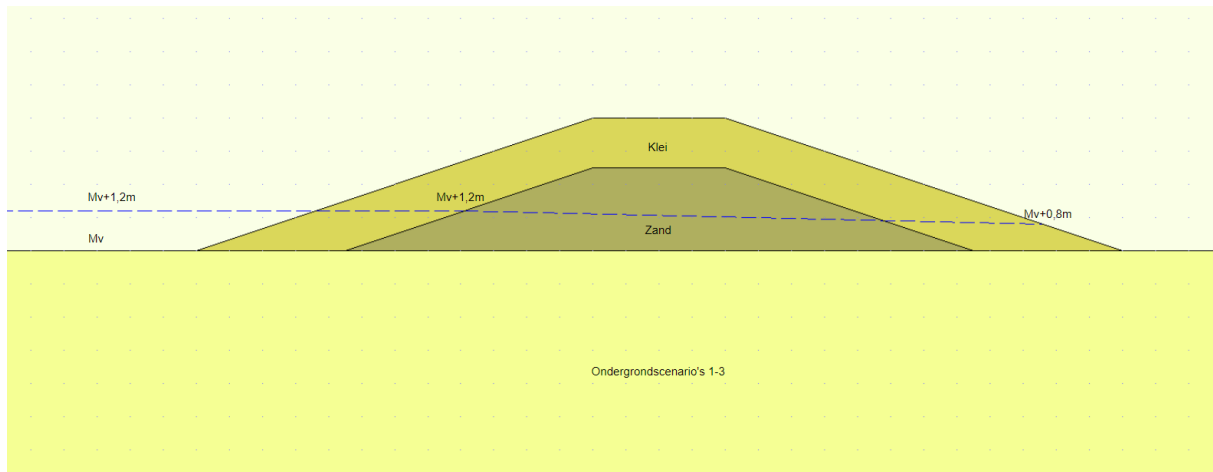
### Scenario 5



### Scenario 6

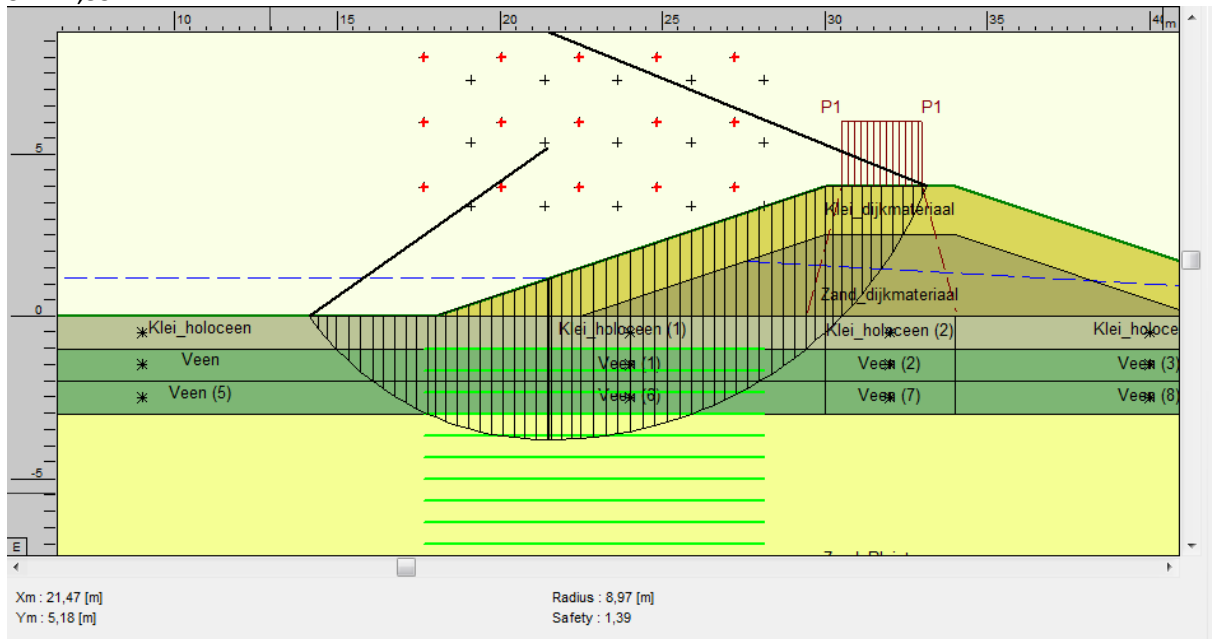


### Scenario 7

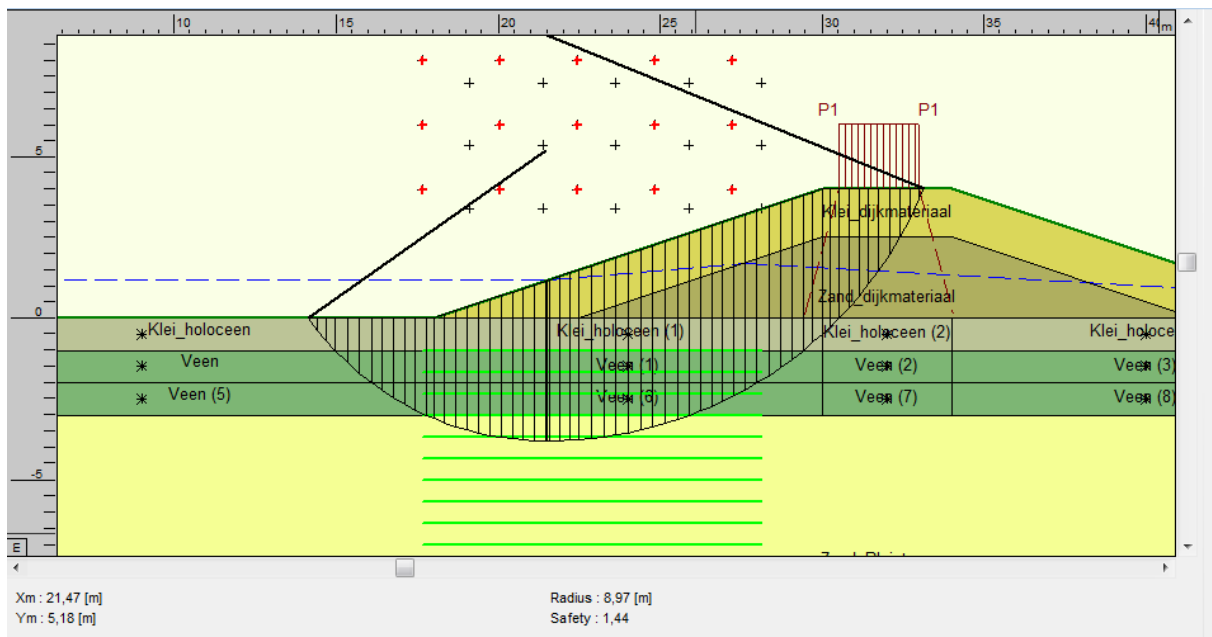


- Resultaten

**Scenario 1: Standaard schematisatie | 100% verzadigd**  
SF = 1,39



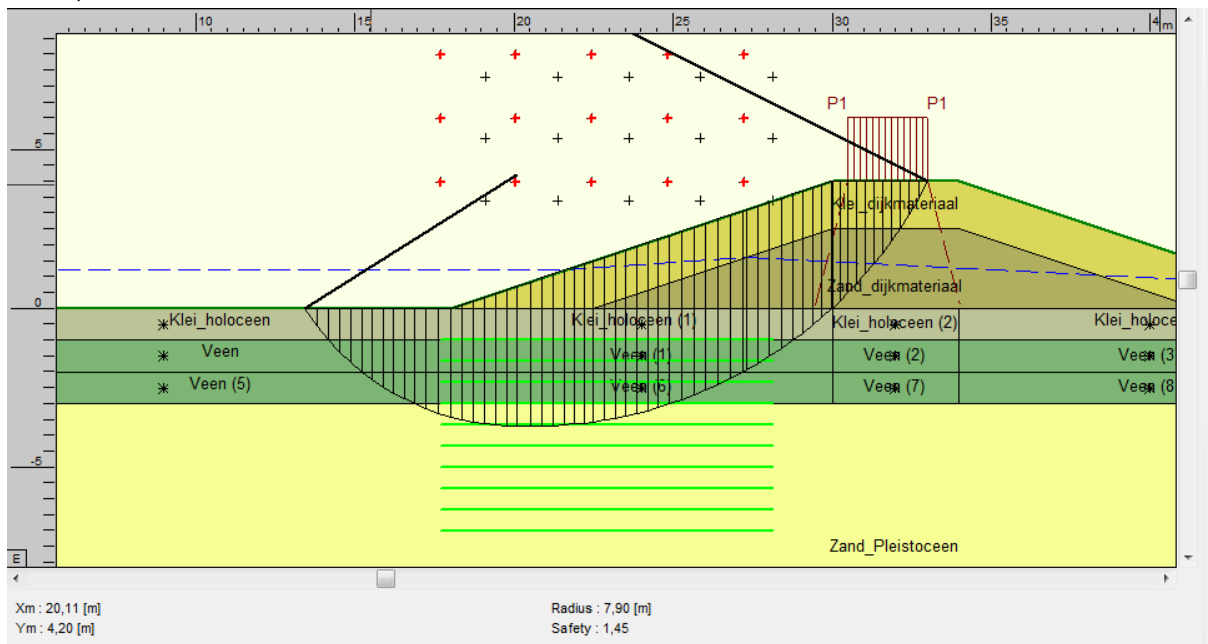
**Scenario 2 | Droogvallen buitentalud**  
SF = 1,44





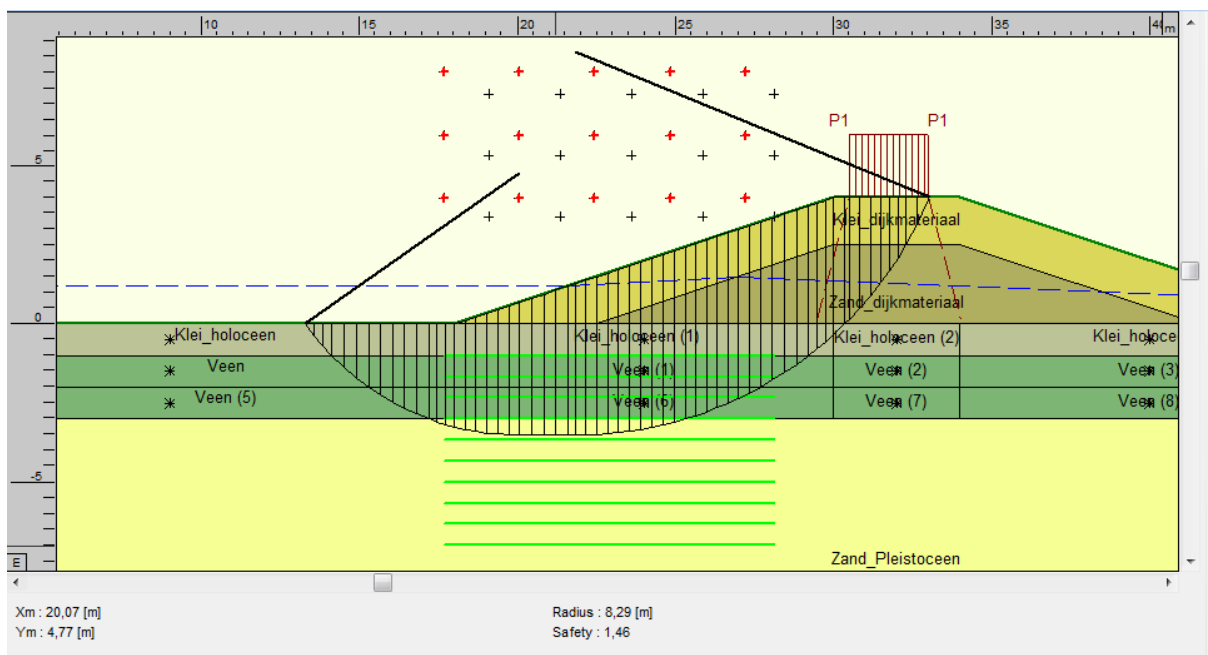
### Scenario 3 | 20% zakking onder de buitenkruinlijn

SF = 1,45

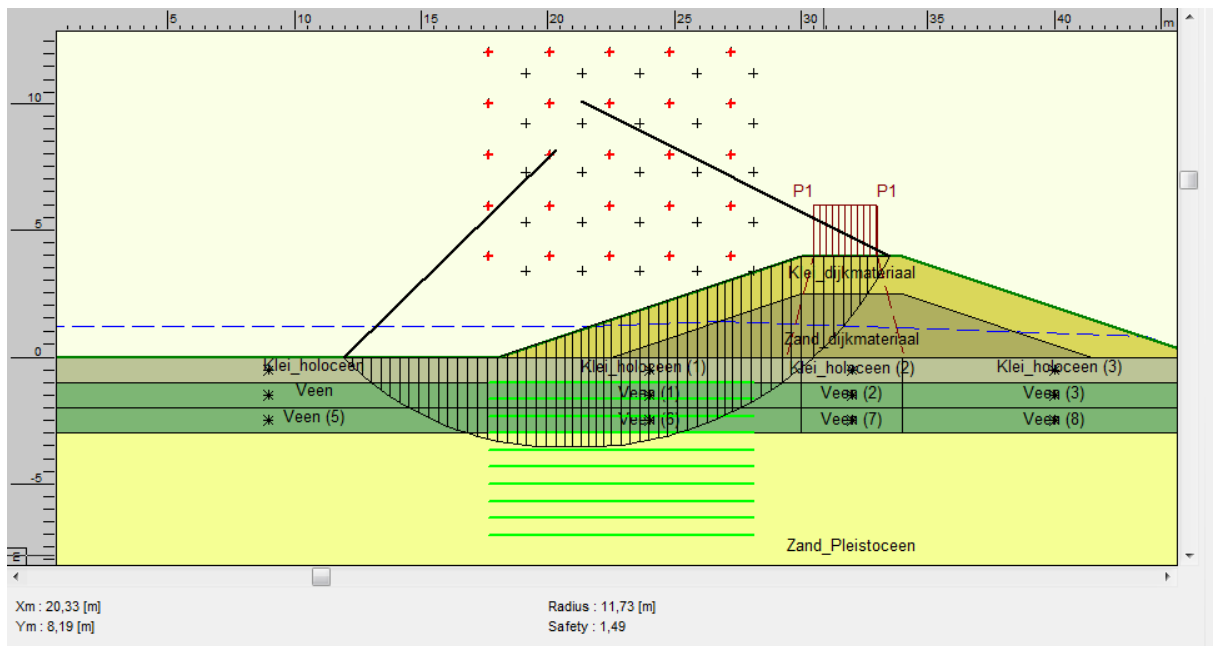


### Scenario 4 | 40% zakking onder de buitenkruinlijn

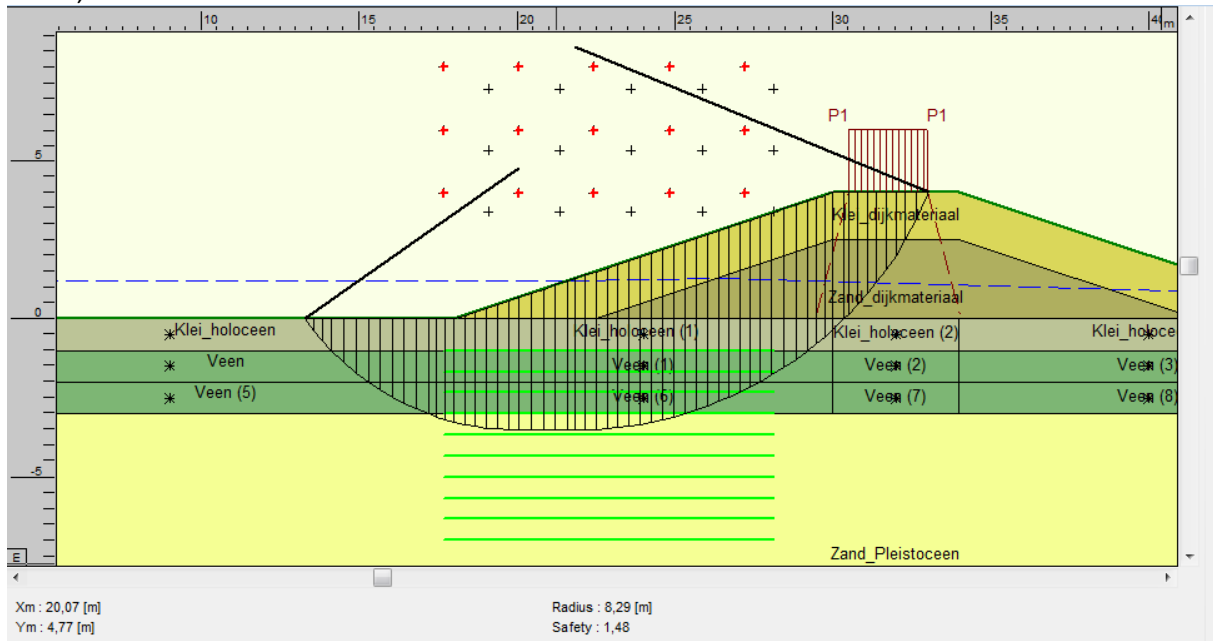
SF = 1,46



### Scenario 5 | 60% zakking onder de buitenkruinlijn SF = 1,49

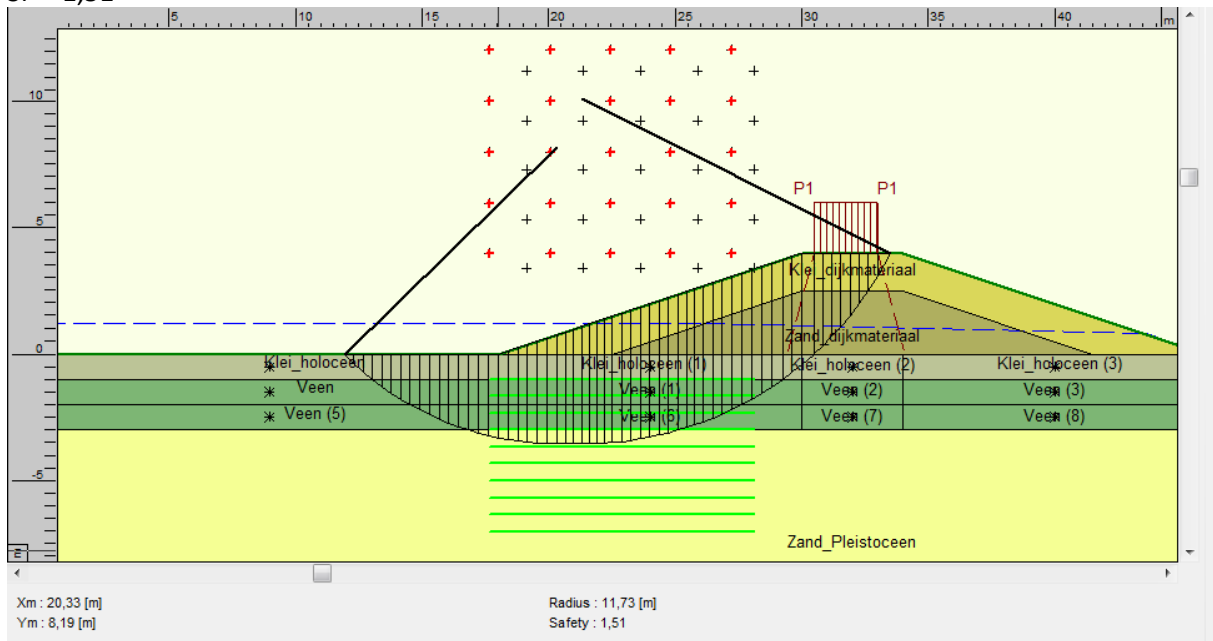


### Scenario 6 | 80% zakking onder de buitenkruinlijn SF = 1,48



### Scenario 7 | Volledige zakking freatische lijn (freatische lijn even hoog als buitenwaterstand)

SF = 1,51



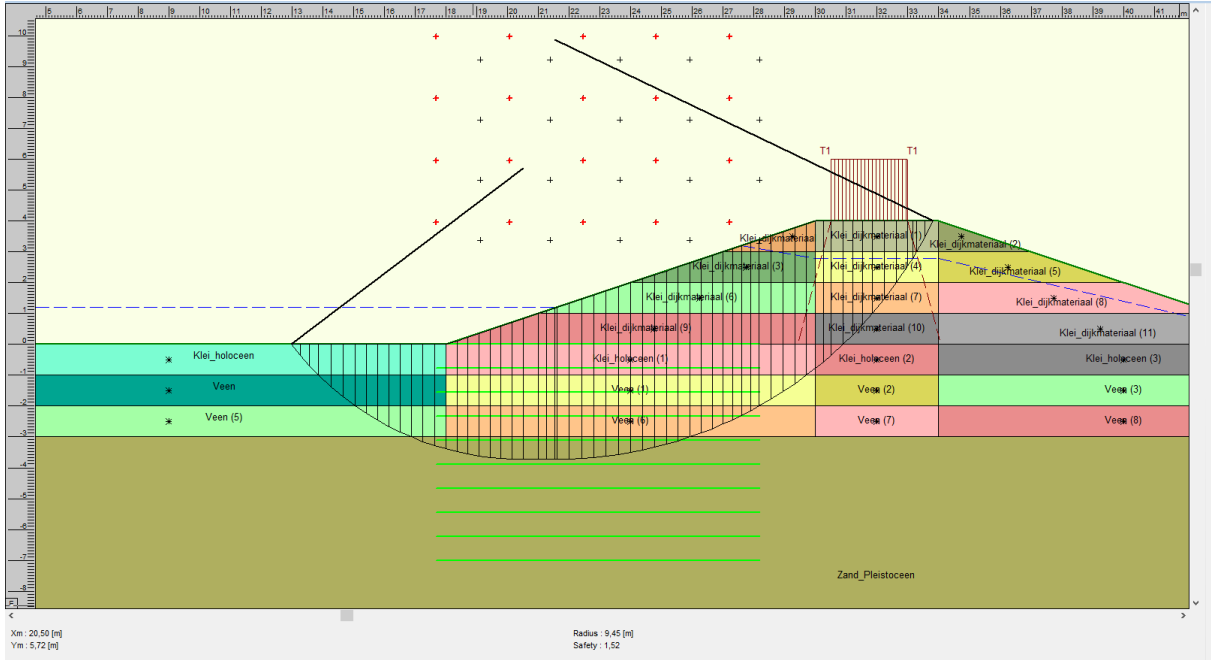
D.3. GEVOELIGHEID VERKEERSBELASTING

- **Kleidijk**

Maatgevend scenario = ondergrondscenario 2 met SF=1,52 (scenario met laagste safety factor onder standaard schematisatie)

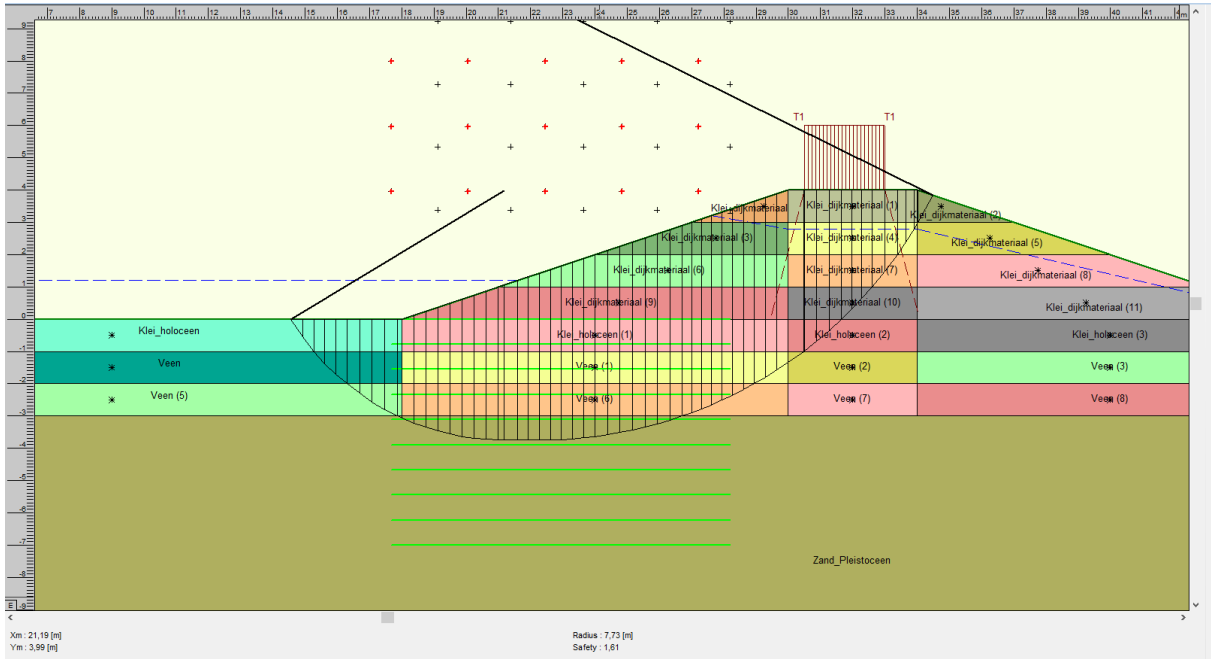
**Scenario 1: Standaard schematisatie | 13,3 kN/m<sup>2</sup>**

SF = 1,52



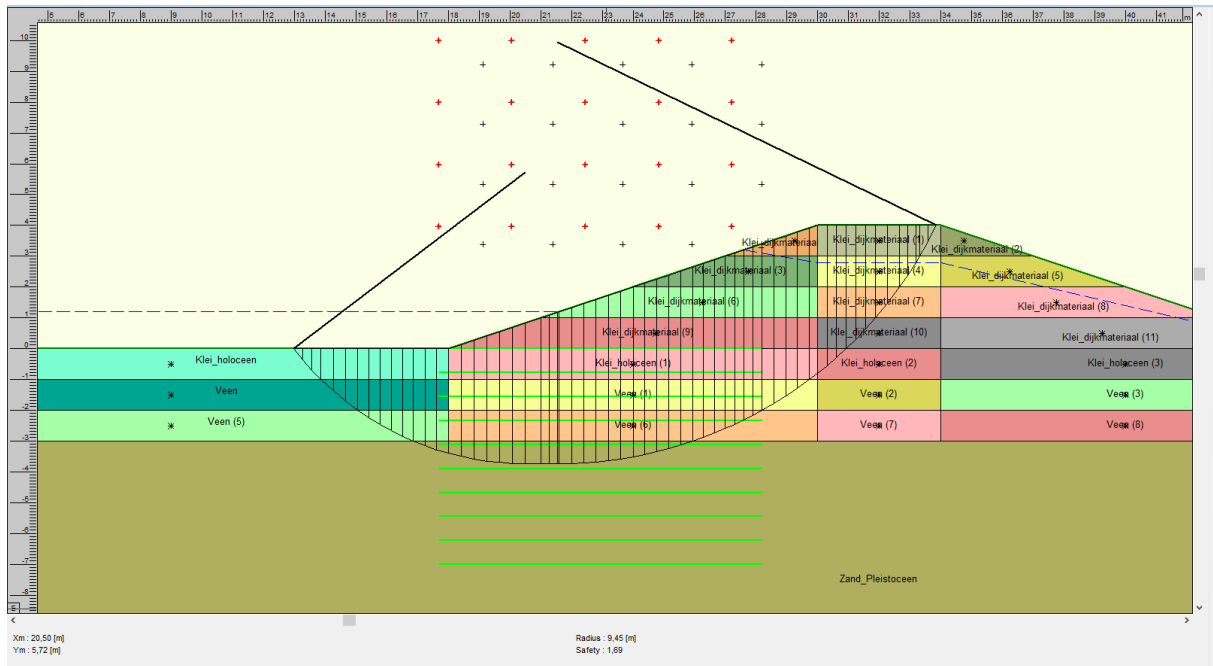
**Scenario 2 | 5,0 kN/m<sup>2</sup>**

SF = 1,61



### Scenario 3 | 0,0 kN/m<sup>2</sup>

SF = 1,69

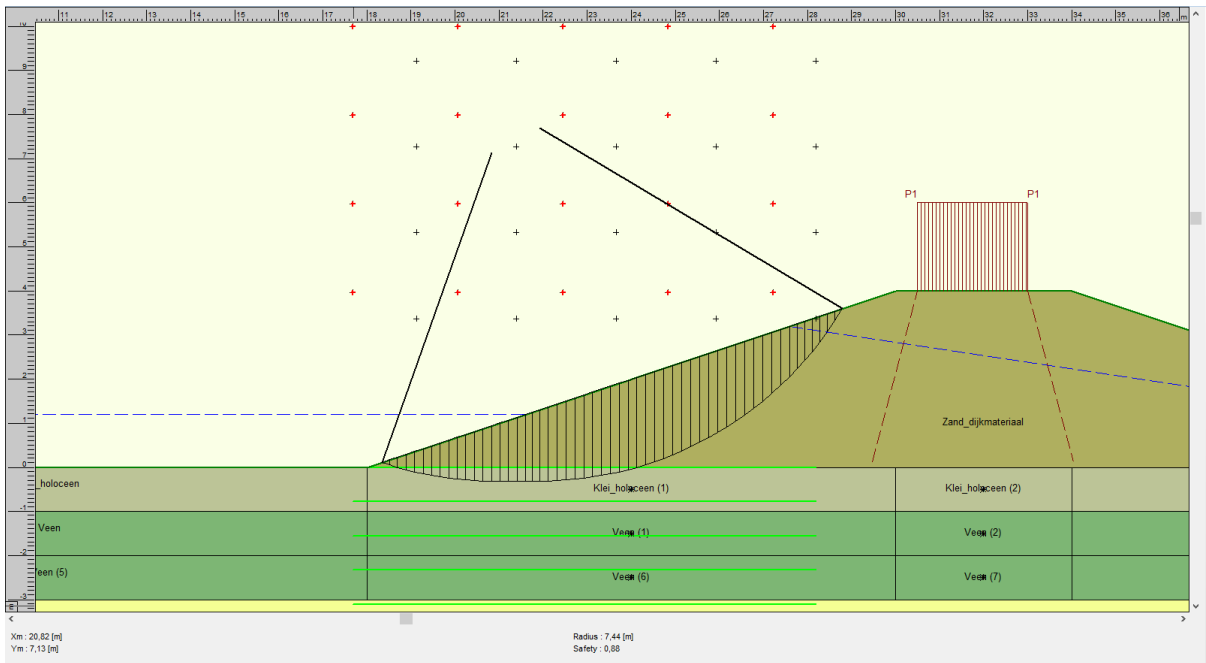


- Zanddijk

Maatgevend scenario = scenario 2 met SF= 0,88 (scenario met laagste safety factor onder standaard schematisatie)

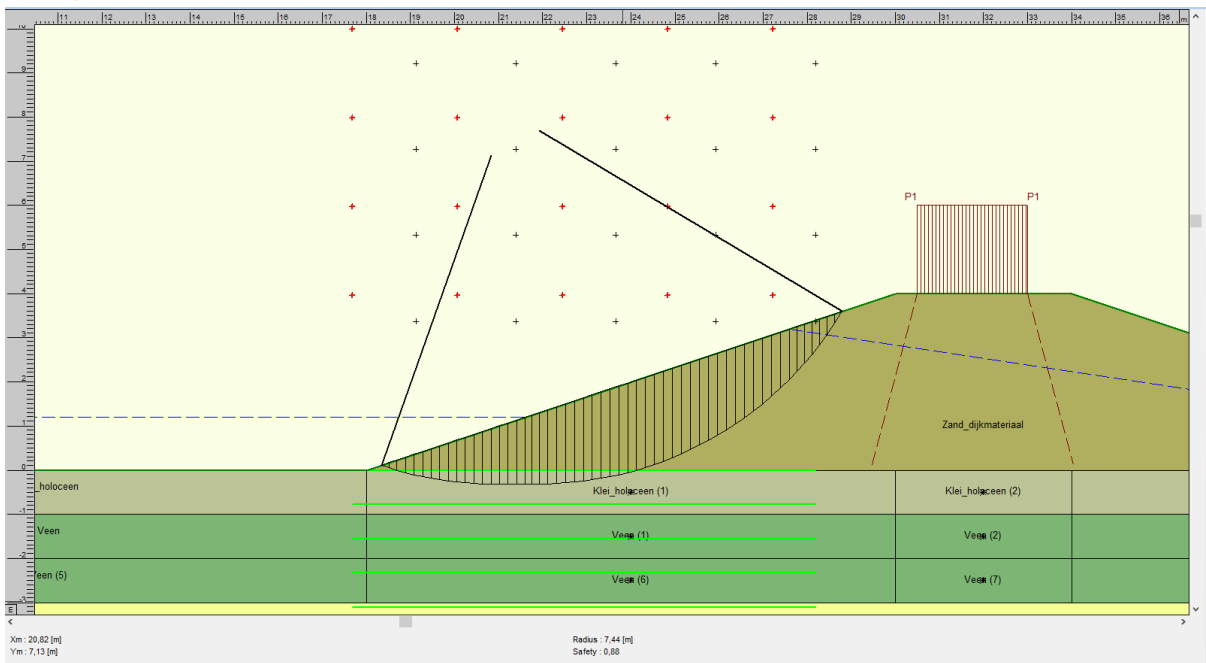
**Scenario 1: Standaard schematisatie | 13,3 kN/m<sup>2</sup>**

SF = 0,88



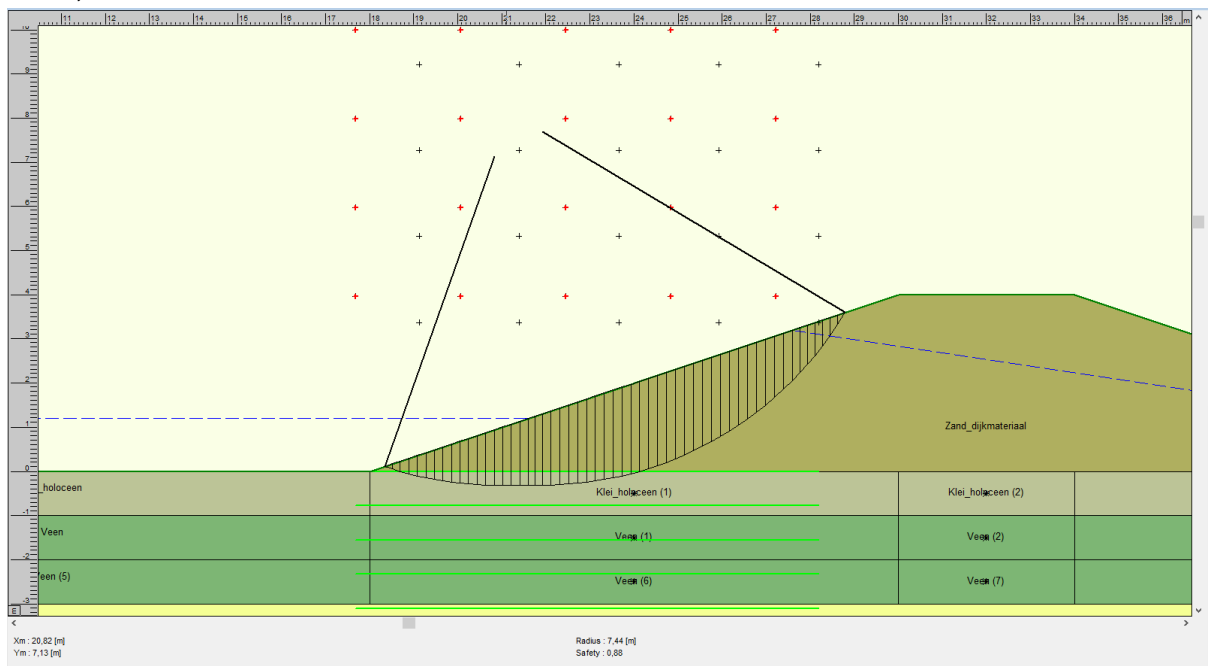
**Scenario 2 | 5,0 kN/m<sup>2</sup>**

SF = 0,88



**Scenario 3 | 0,0 kN/m<sup>2</sup>**

SF = 0,88

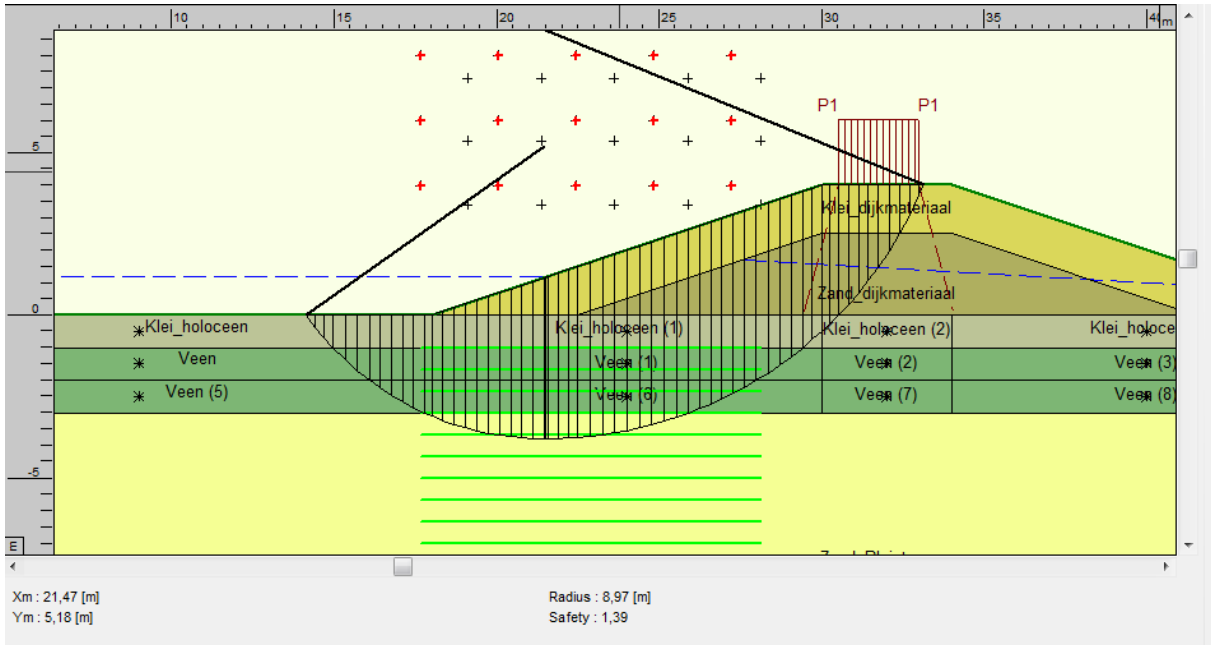


- **Zanddijk met kleibekleding**

Maatgevend scenario = scenario 1 met SF= 1,24 (scenario met laagste safety factor onder standaard schematisatie). Om een goede vergelijking te maken tussen de drie dijkprofielen is de analyse van de verkeersbelasting voor ieder dijkprofiel uitgevoerd met ondergrondscenario 2.

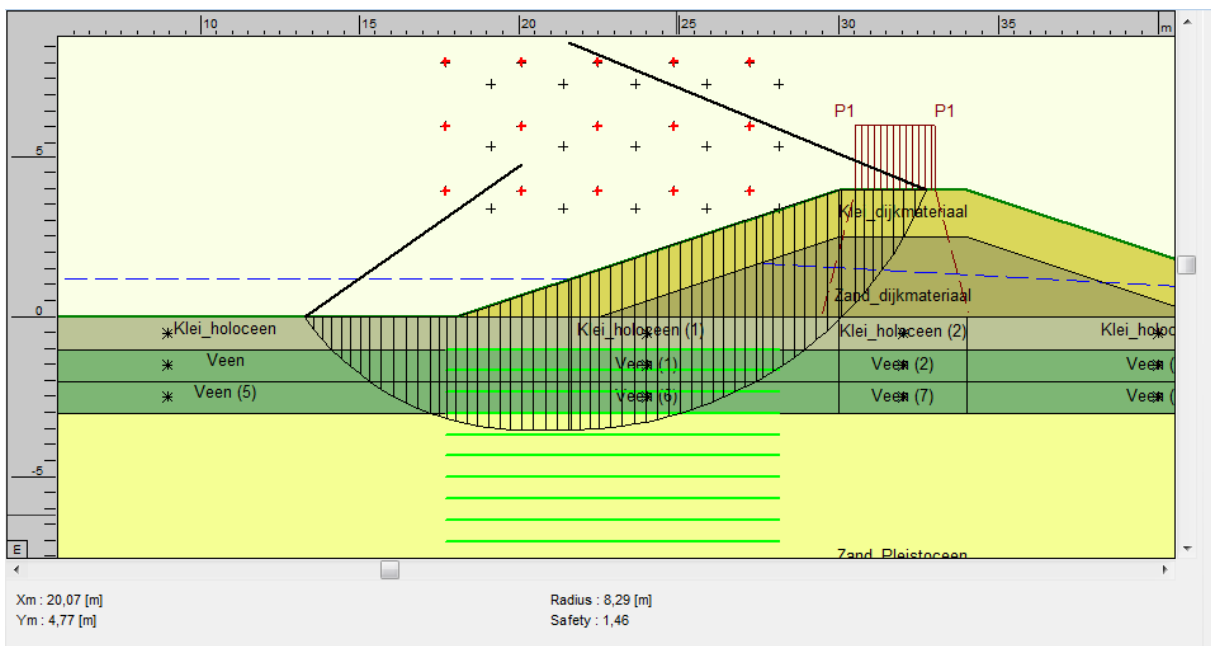
**Scenario 1: Standaard schematisatie | 13,3 kN/m<sup>2</sup>**

SF = 1,39



**Scenario 2 | 5,0 kN/m<sup>2</sup>**

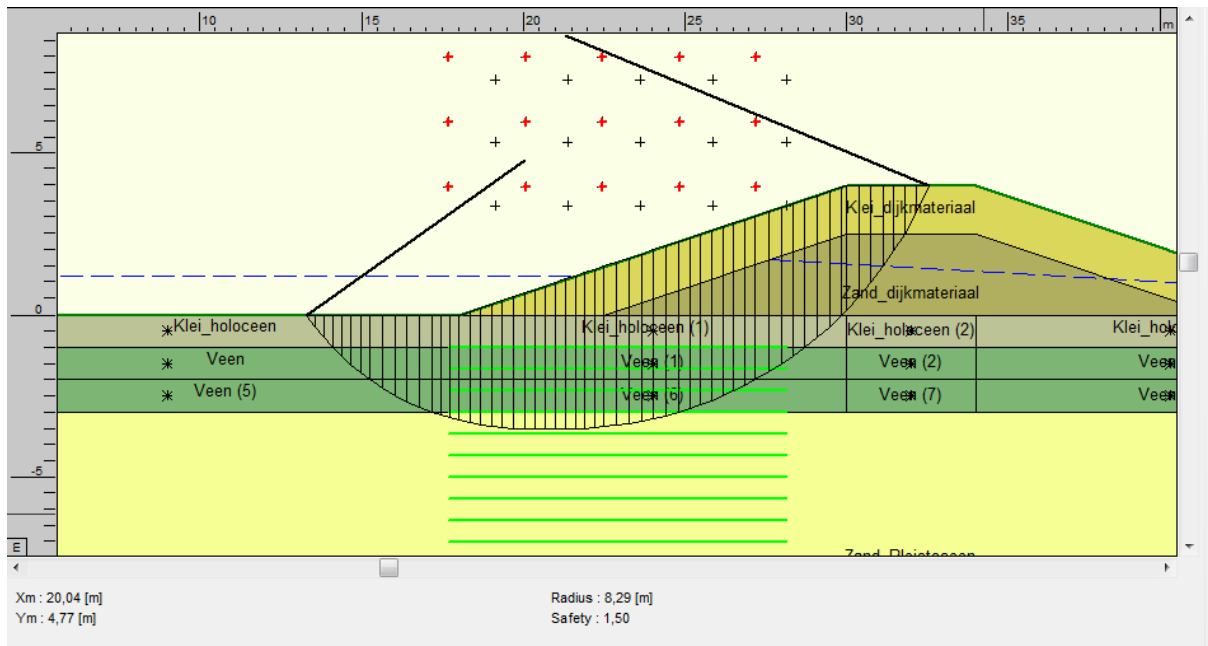
SF = 1,46





**Scenario 3 | 0,0 kN/m<sup>2</sup>**

SF = 1,50



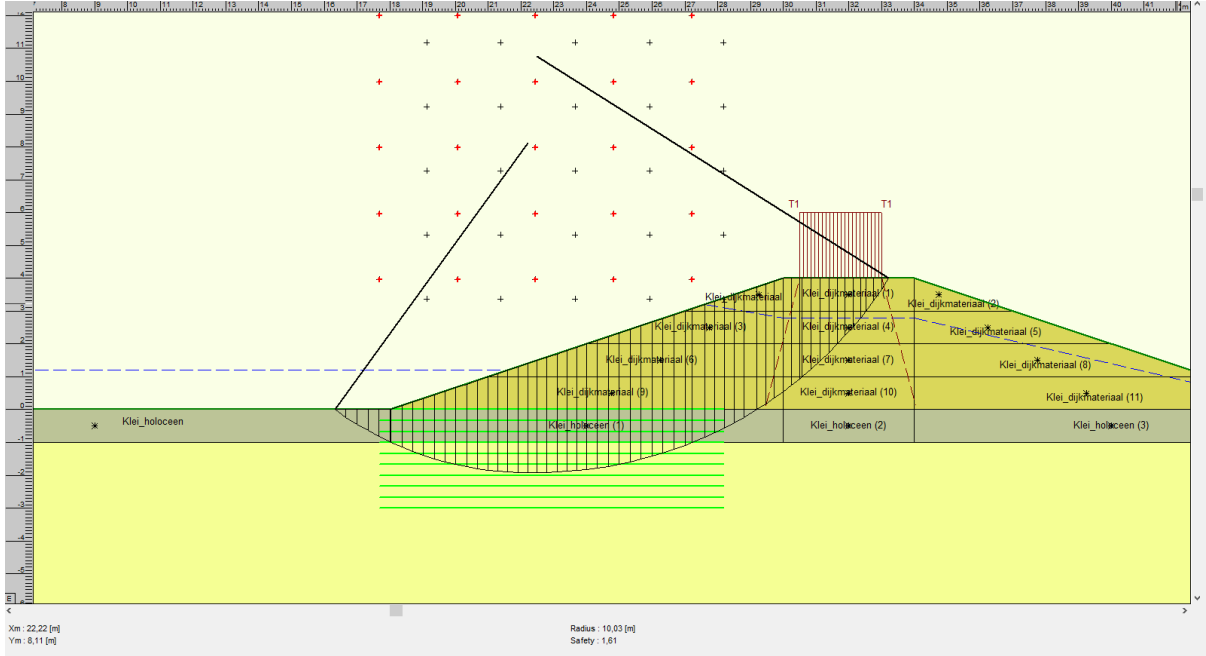
D.4. GEVOELIGHEID POP-WAARDEN

- Kleidijk

**Ondergrondscenario 1**

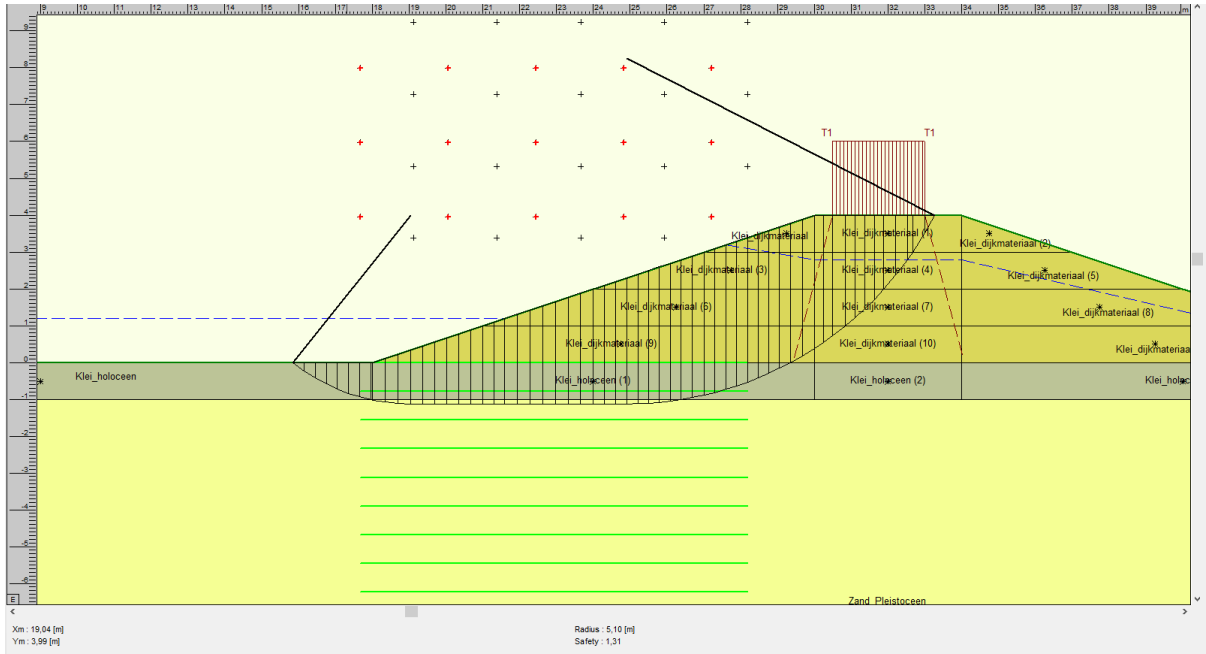
**Standaard POP-waarden op basis van normtraject 10-2 (POP-scenario 1)**

SF = 1,60



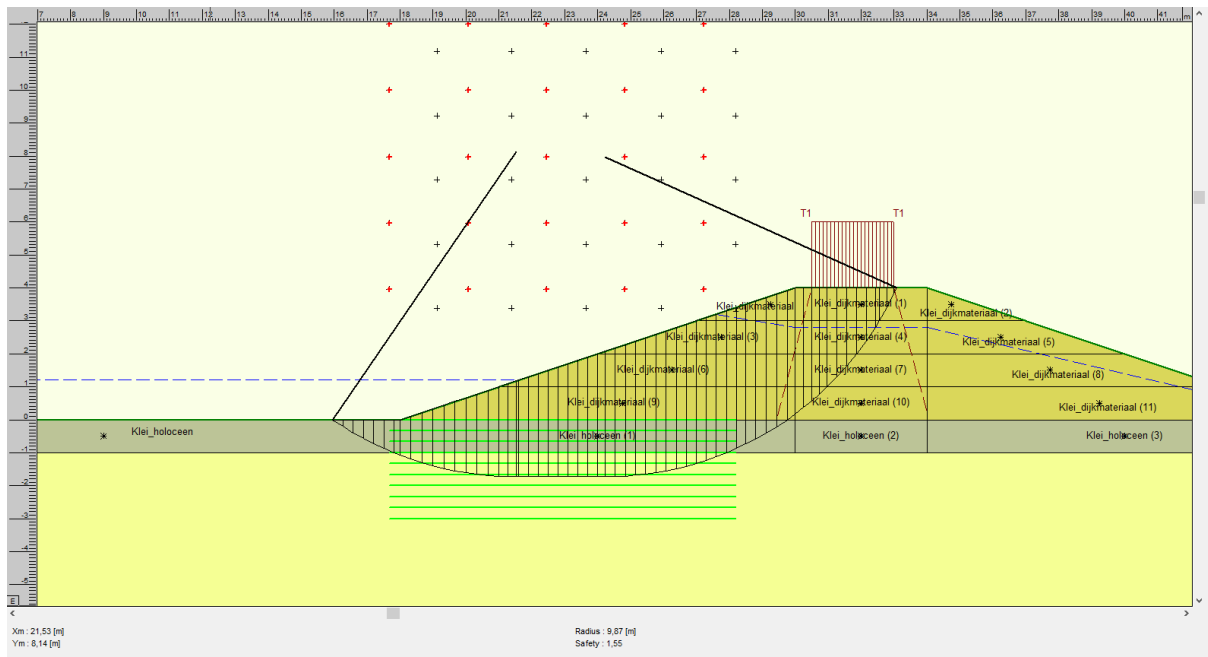
**Karakteristieke POP-waarden volgens SHM (POP-scenario 2)**

SF = 1,31



### Verwachtingswaarden POP volgens SHM (POP-scenario 3)

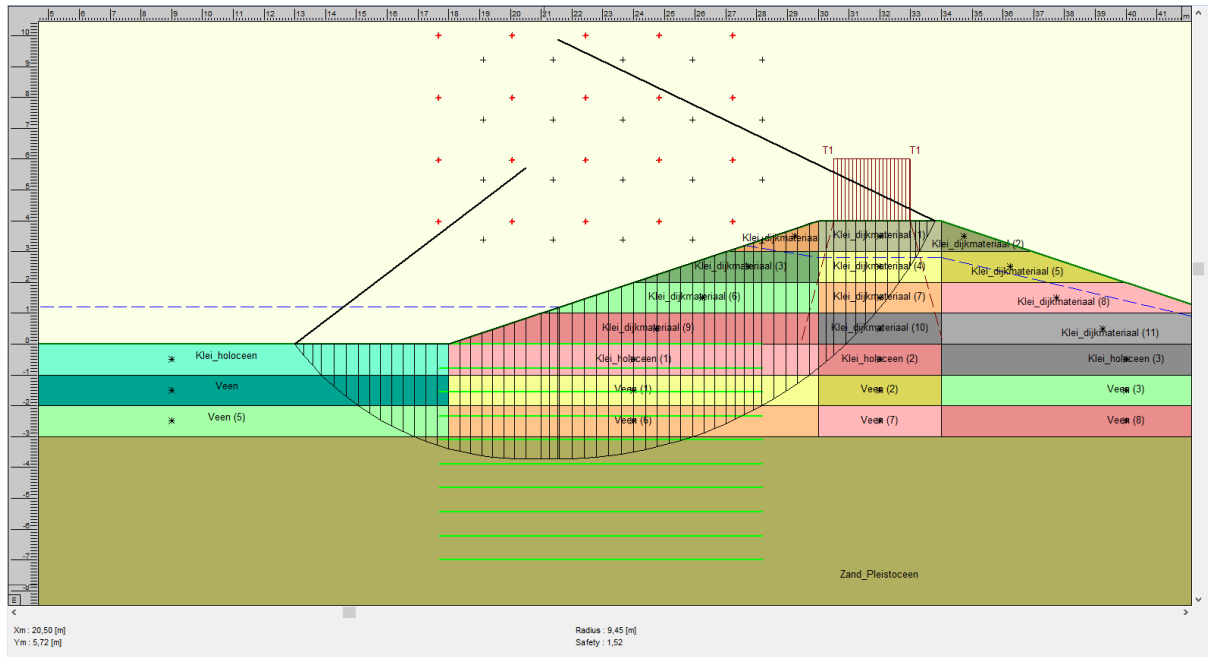
SF = 1,55



### Ondergrondscenario 2

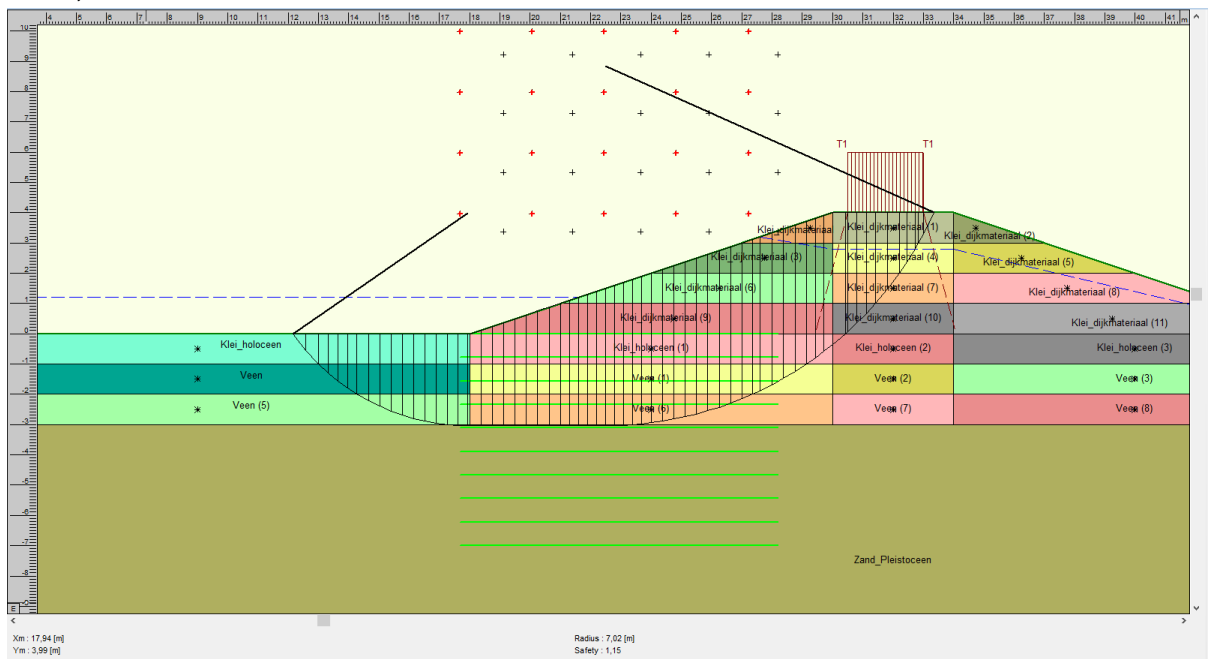
### Standaard POP-waarden op basis van normtraject 10-2 (POP-scenario 1)

SF = 1,52



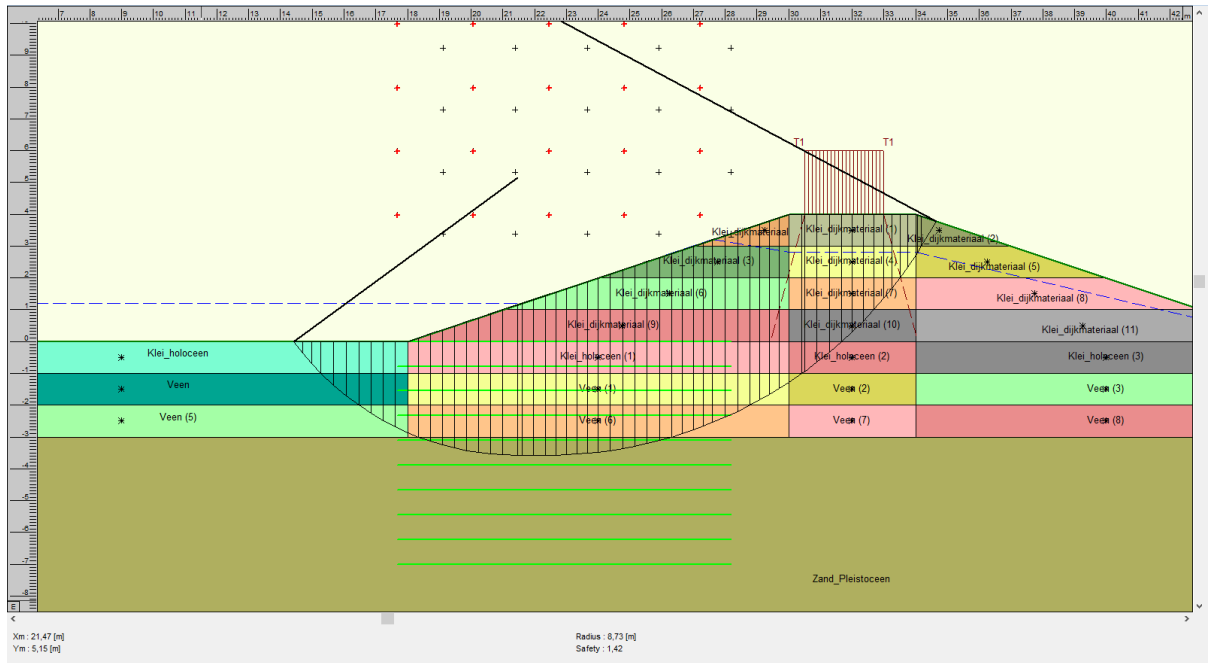
### Karakteristieke POP-waarden volgens SHM (POP-scenario 2)

SF = 1,15



### Verwachtingswaarden POP volgens SHM (POP-scenario 3)

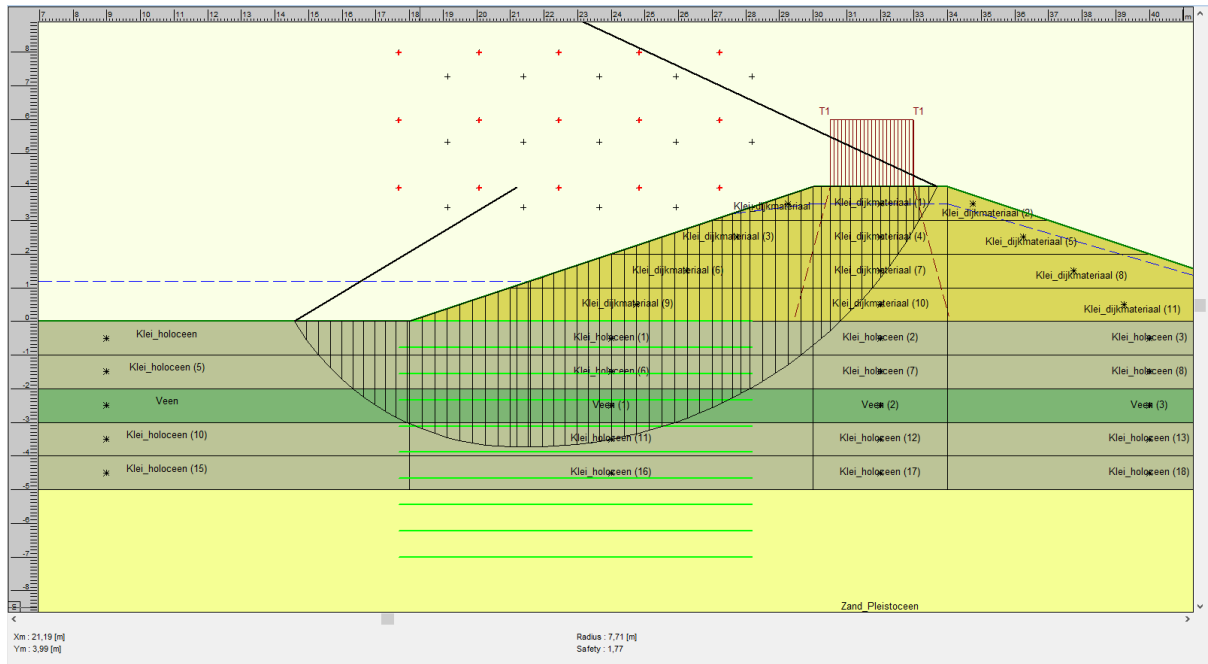
SF = 1,42



### Ondergrondscenario 3

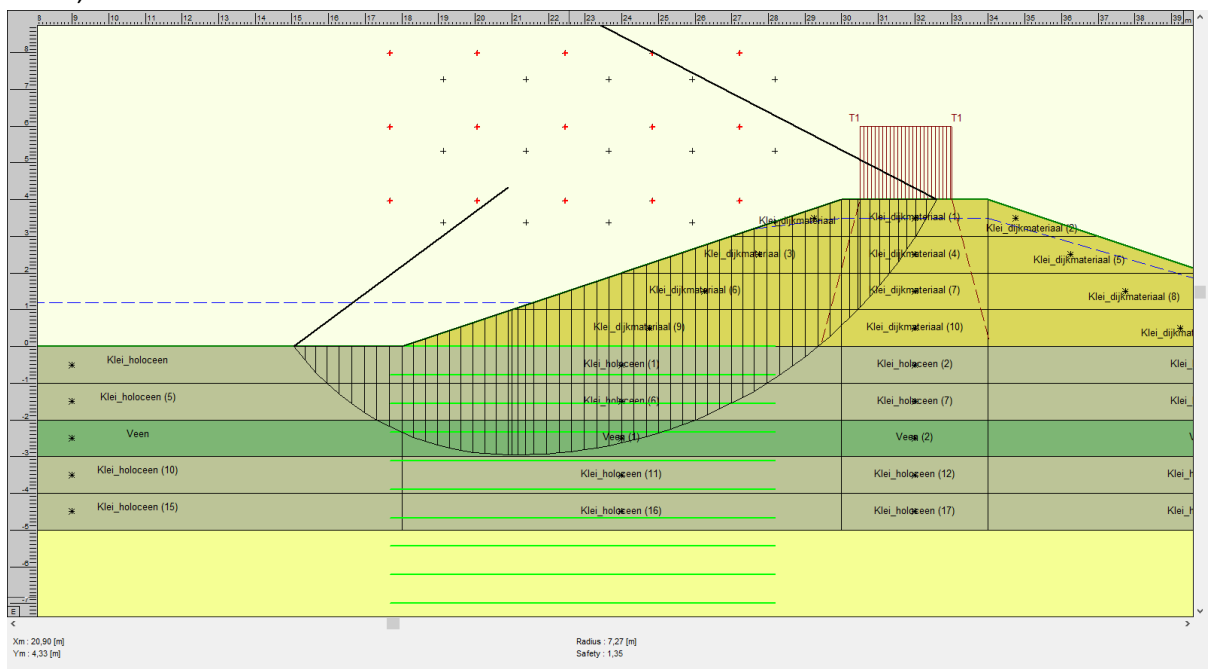
#### Standaard POP-waarden op basis van normtraject 10-2 (POP-scenario 1)

SF = 1,77



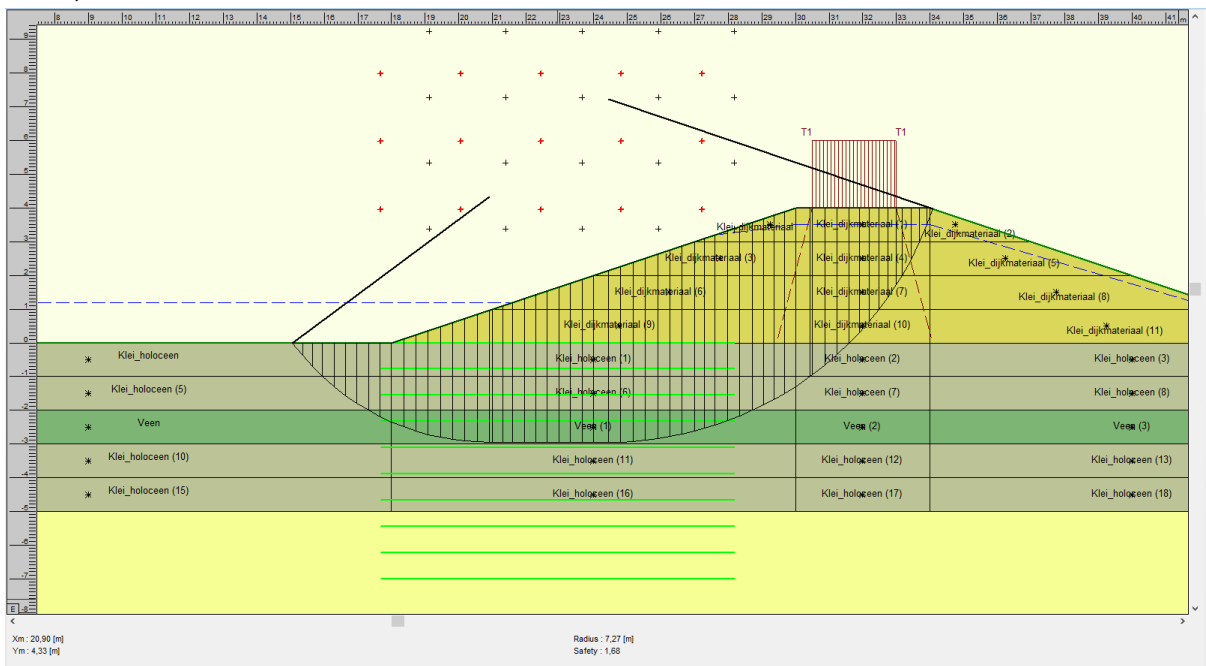
### Karakteristieke POP-waarden volgens SHM (POP-scenario 2)

SF = 1,35



### Verwachtingswaarden POP volgens SHM (POP-scenario 3)

SF = 1,68

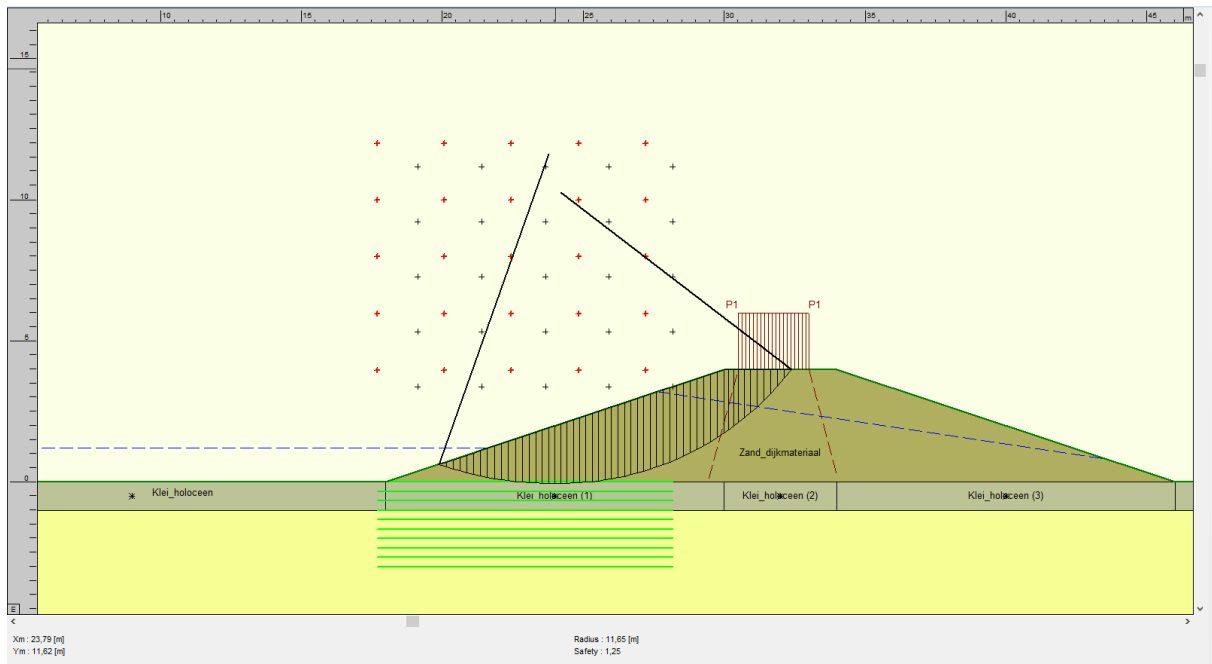


- Zanddijk

**Ondergrondscenario 1**

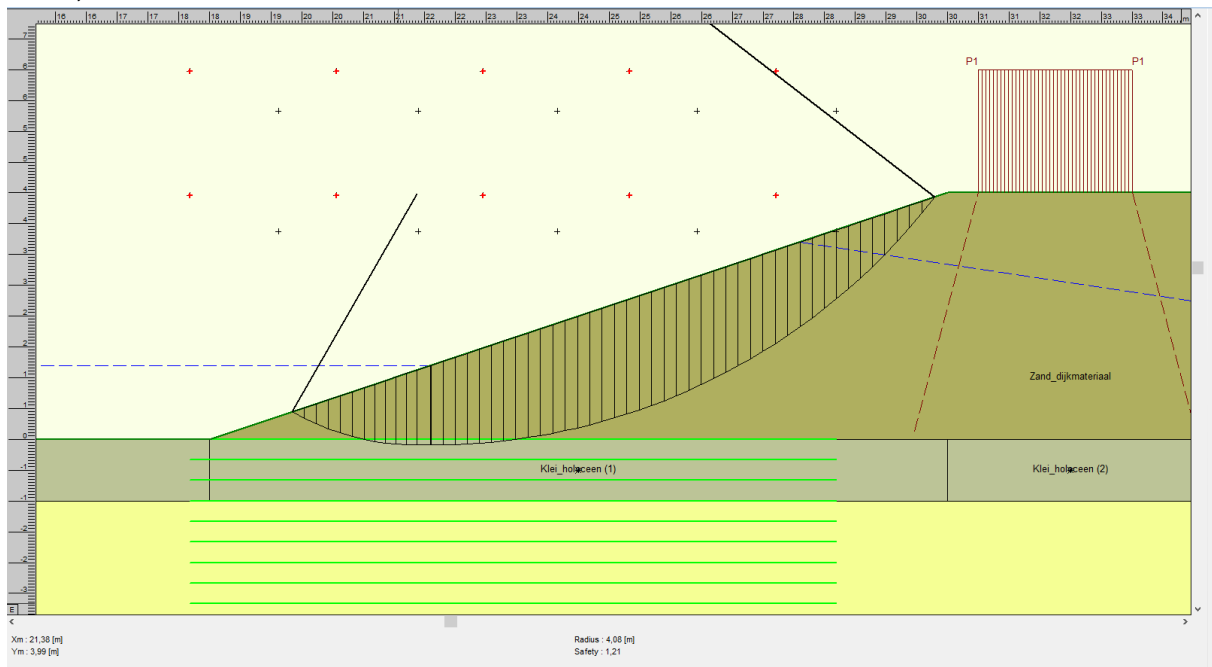
Standaard POP-waarden op basis van normtraject 10-2 (POP-scenario 1)

SF = 1,25



**Karakteristieke POP-waarden volgens SHM (POP-scenario 2)**

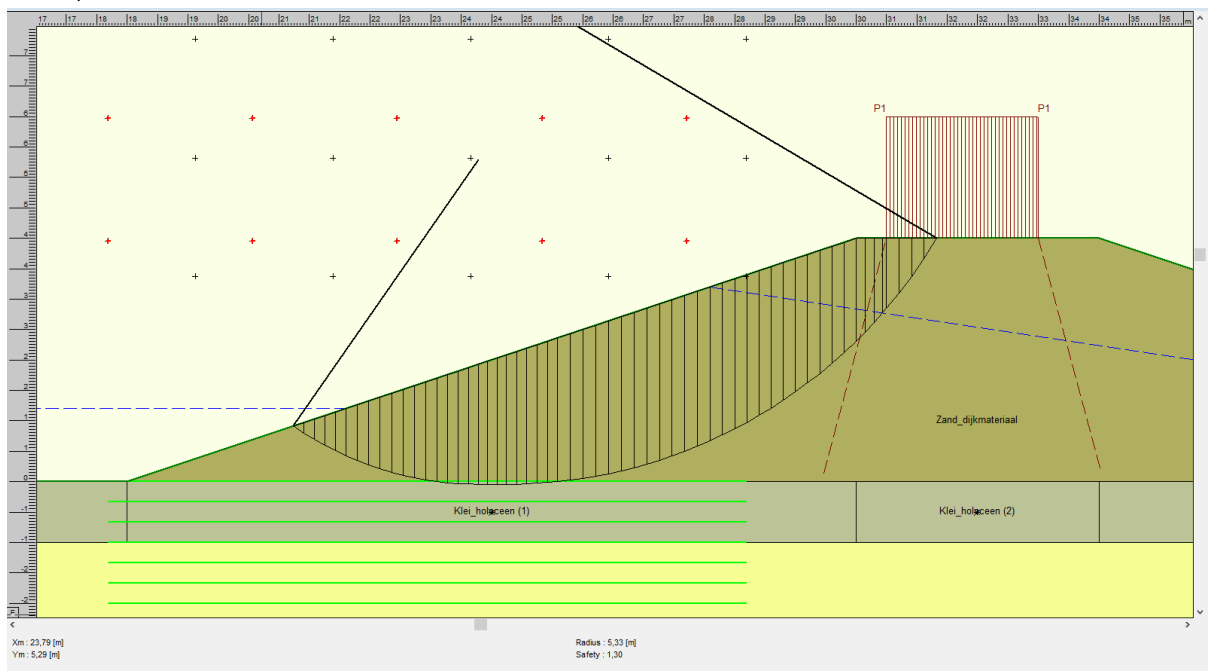
SF = 1,21





### Verwachtingswaarden POP volgens SHM (POP-scenario 3)

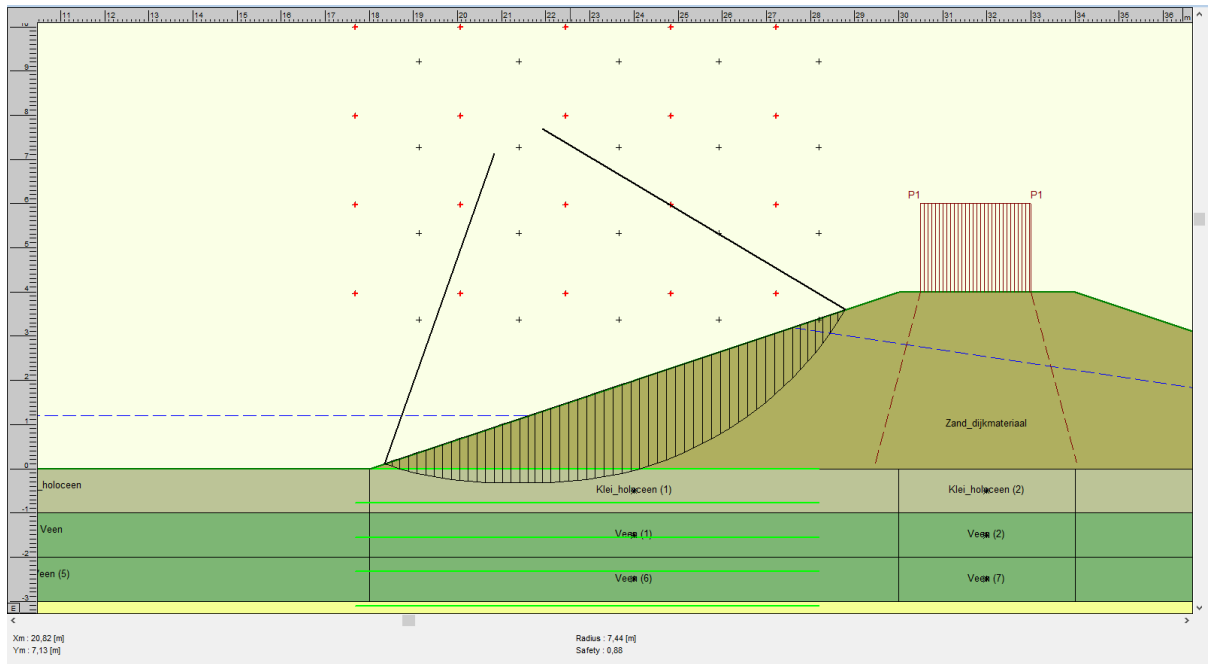
SF = 1,30



### Ondergrondscenario 2

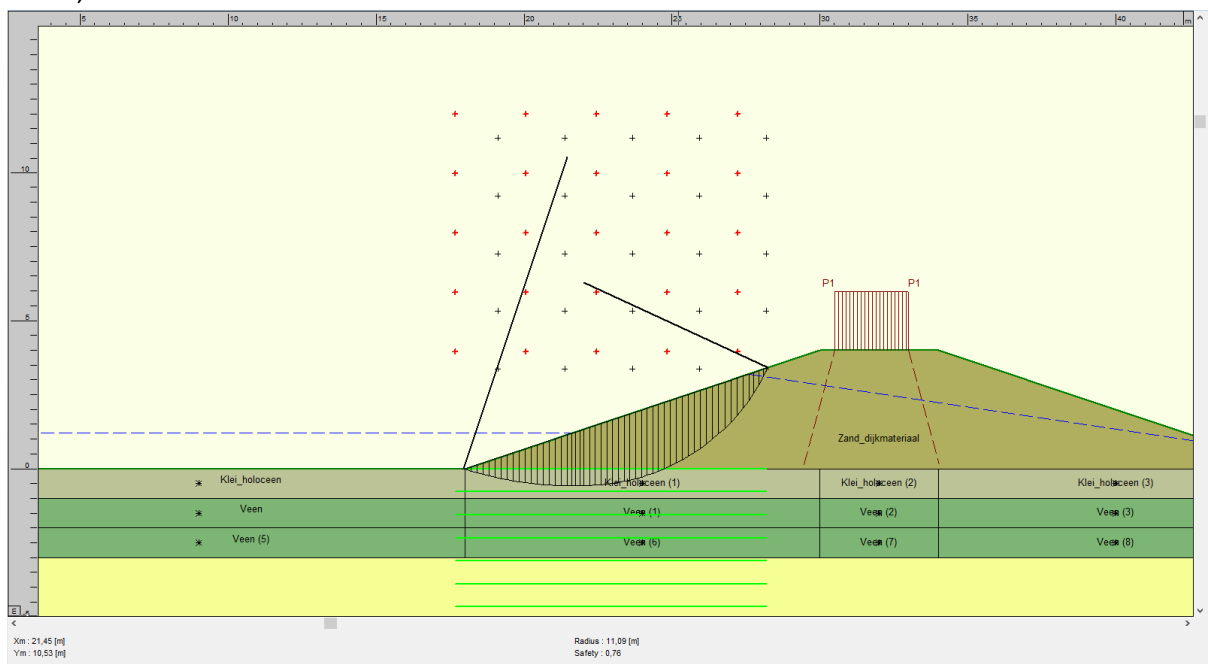
### Standaard POP-waarden op basis van normtraject 10-2 (POP-scenario 1)

SF = 0,88



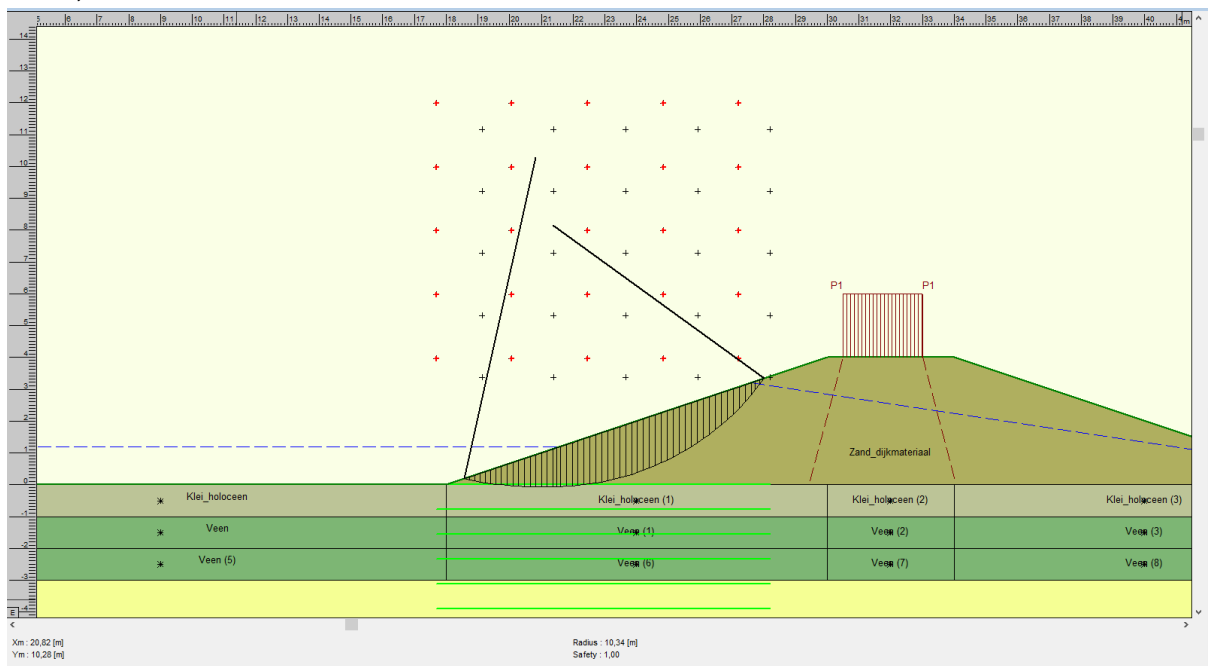
### Karakteristieke POP-waarden volgens SHM (POP-scenario 2)

SF = 0,76



### Verwachtingswaarden POP volgens SHM (POP-scenario 3)

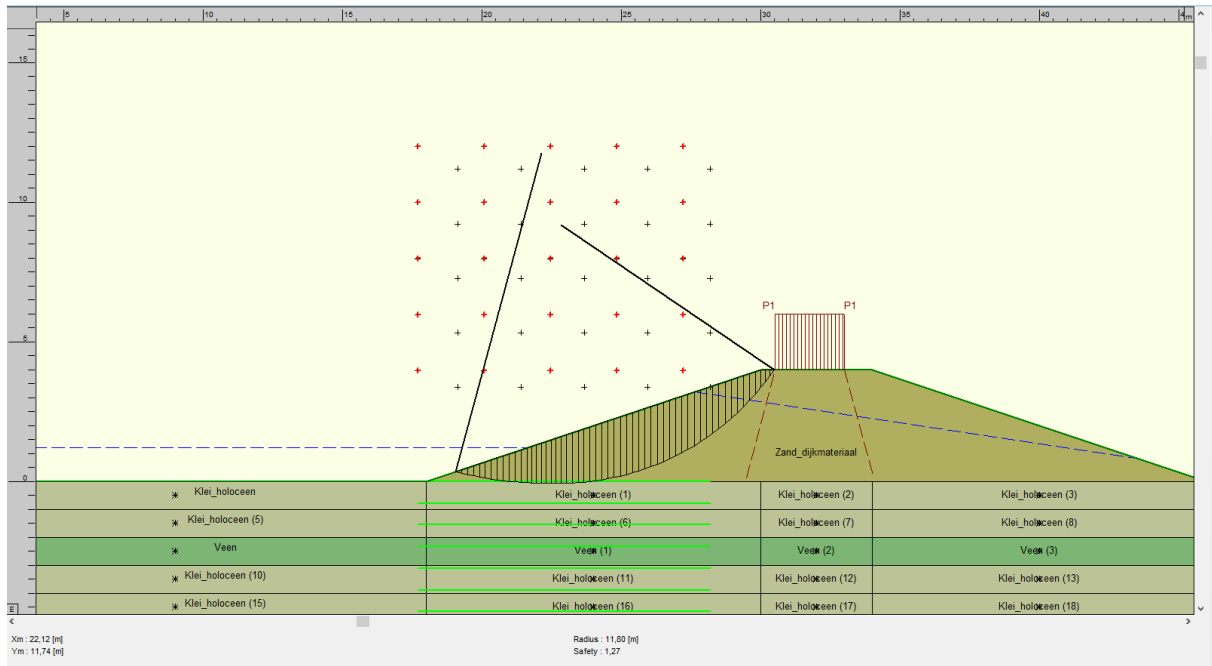
SF = 1,00



### Ondergrondscenario 3

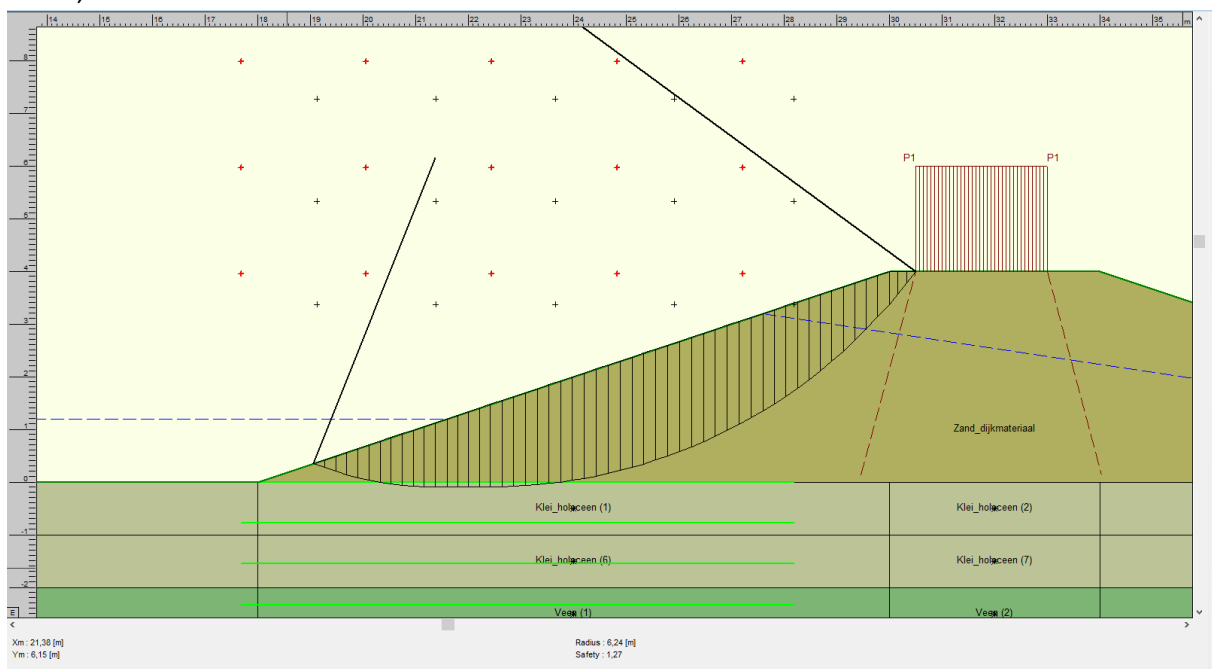
#### Standaard POP-waarden op basis van normtraject 10-2 (POP-scenario 1)

SF = 1,27



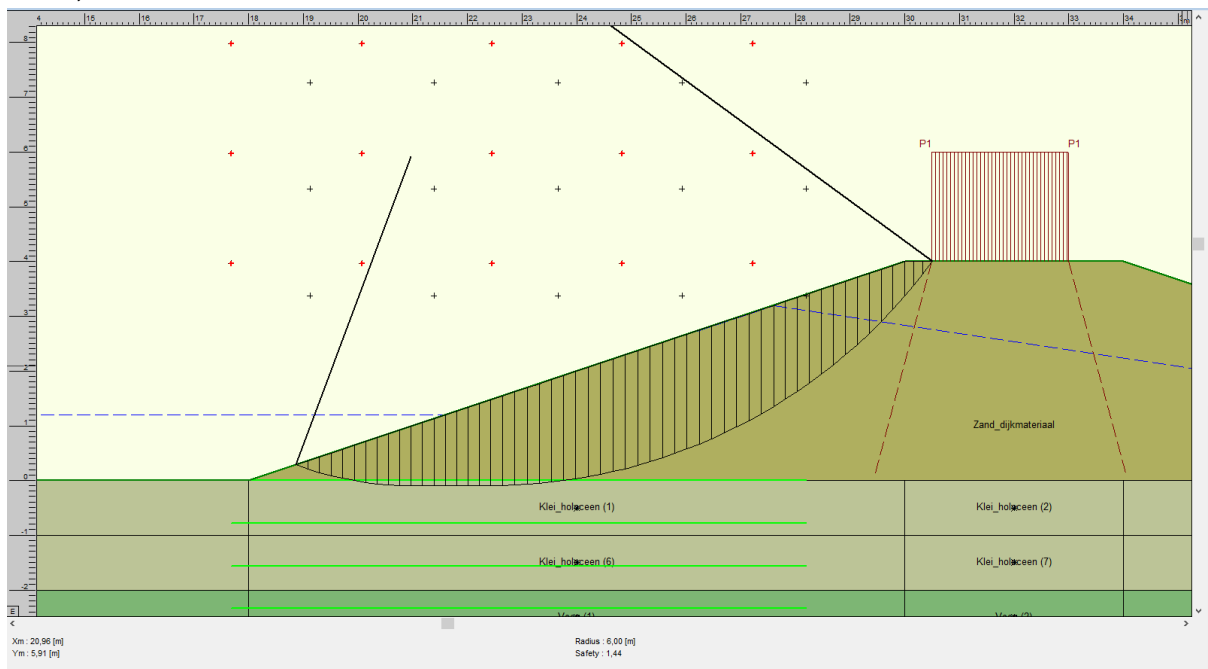
### Karakteristieke POP-waarden volgens SHM (POP-scenario 2)

SF = 1,27



### Verwachtingswaarden POP volgens SHM (POP-scenario 3)

SF = 1,44

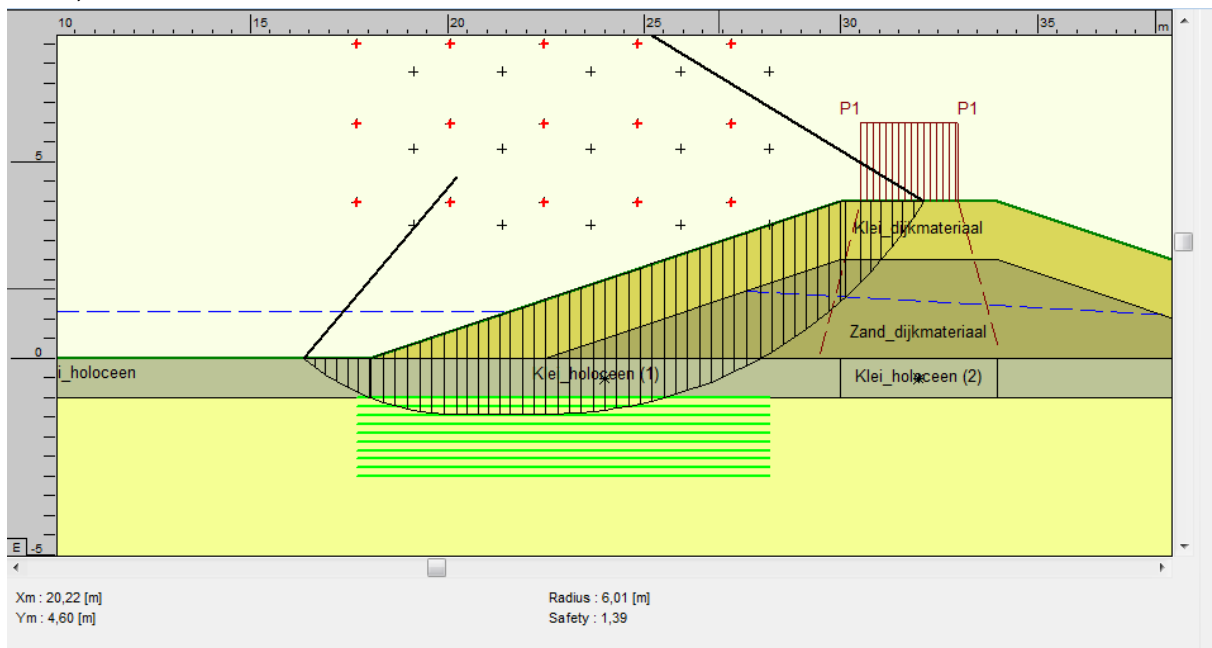


- Zanddijk met kleibekleding

**Ondergrondscenario 1**

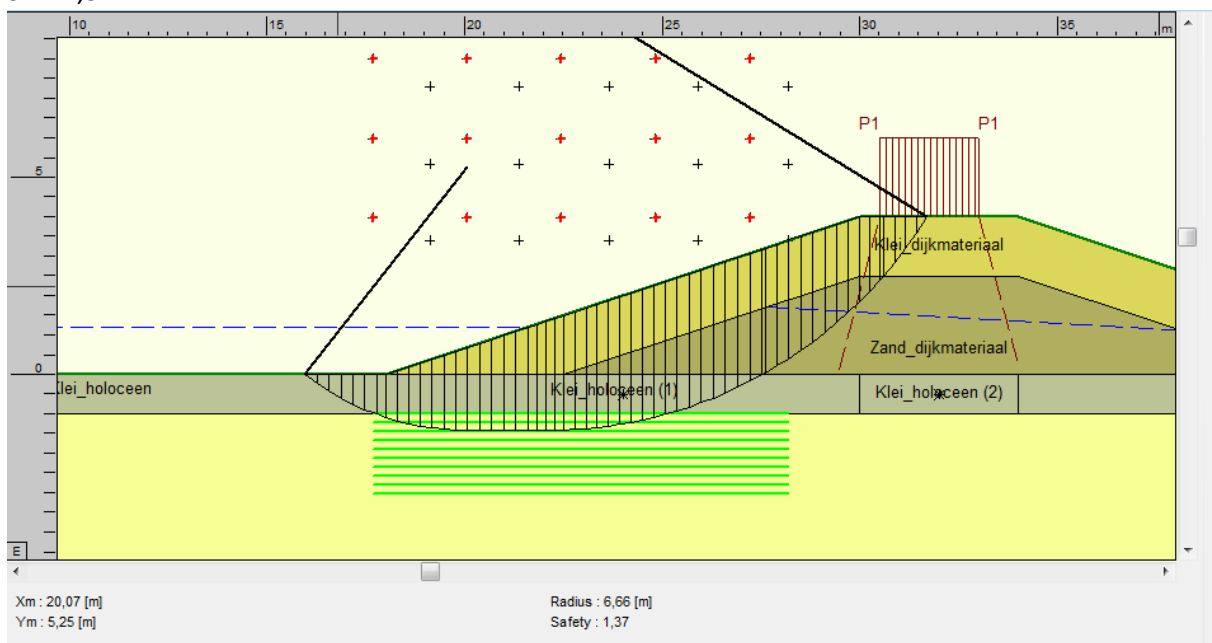
Standaard POP-waarden op basis van normtraject 10-2 (POP-scenario 1)

SF = 1,39



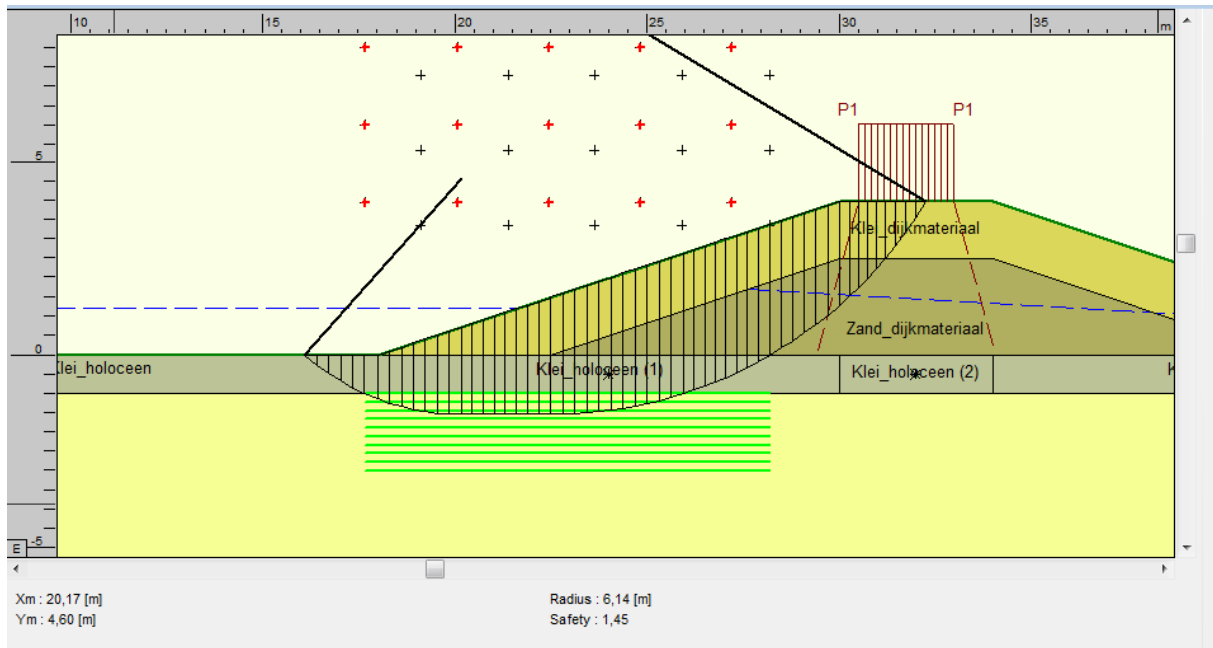
**Karakteristieke POP-waarden volgens SHM (POP-scenario 2)**

SF = 1,37



### Verwachtingswaarden POP volgens SHM (POP-scenario 3)

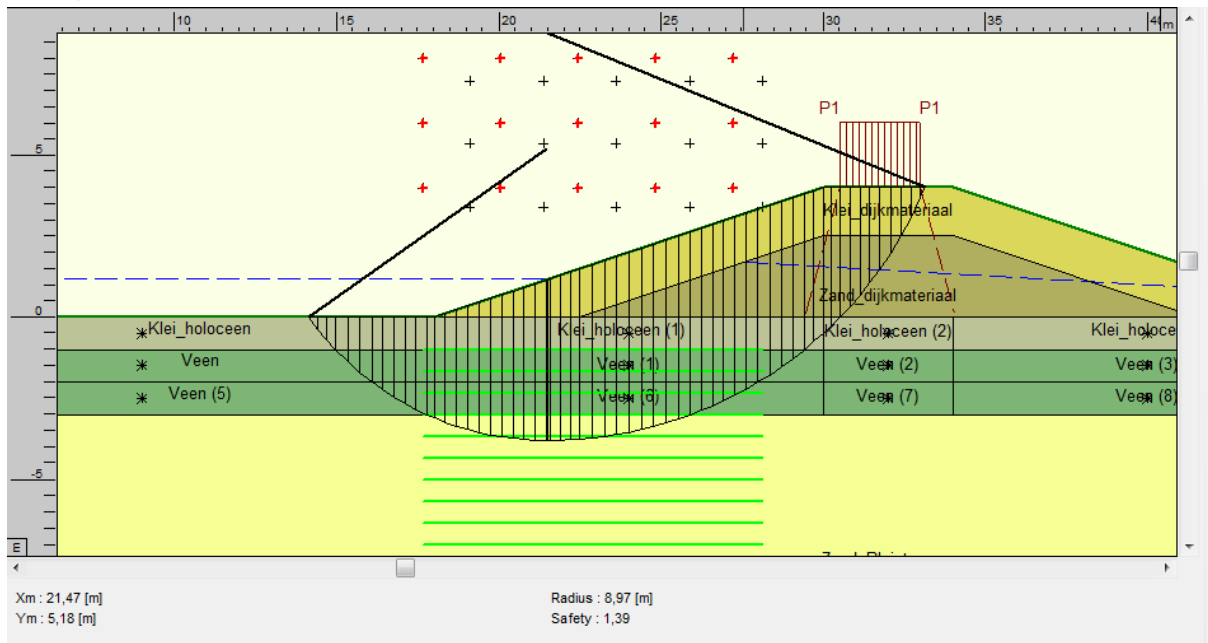
SF = 1,45



### Ondergrondscenario 2

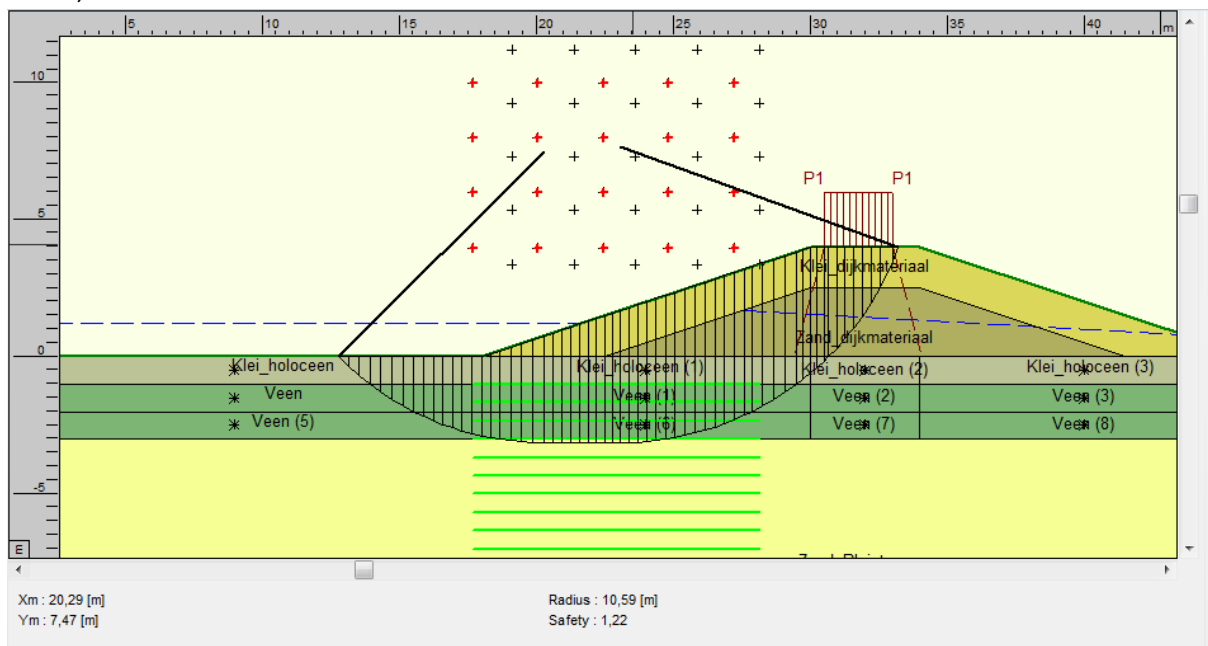
#### Standaard POP-waarden op basis van normtraject 10-2 (POP-scenario 1)

SF = 1,39



#### Karakteristieke POP-waarden volgens SHM (POP-scenario 2)

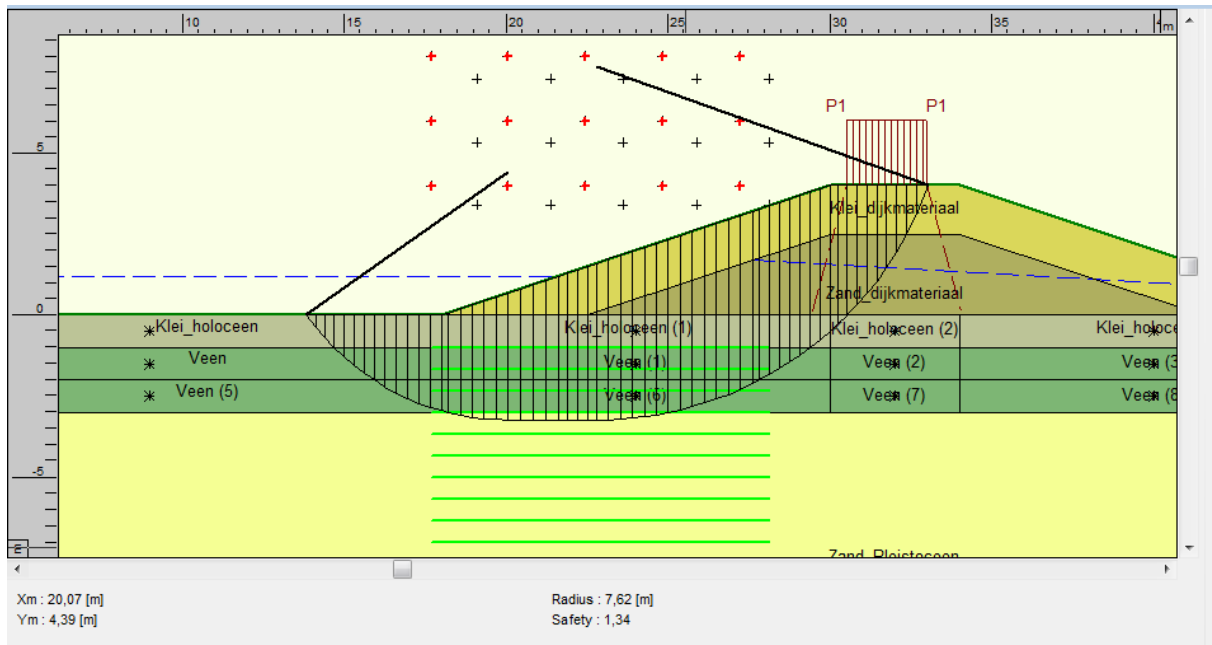
SF = 1,22





### Verwachtingswaarden POP volgens SHM (POP-scenario 3)

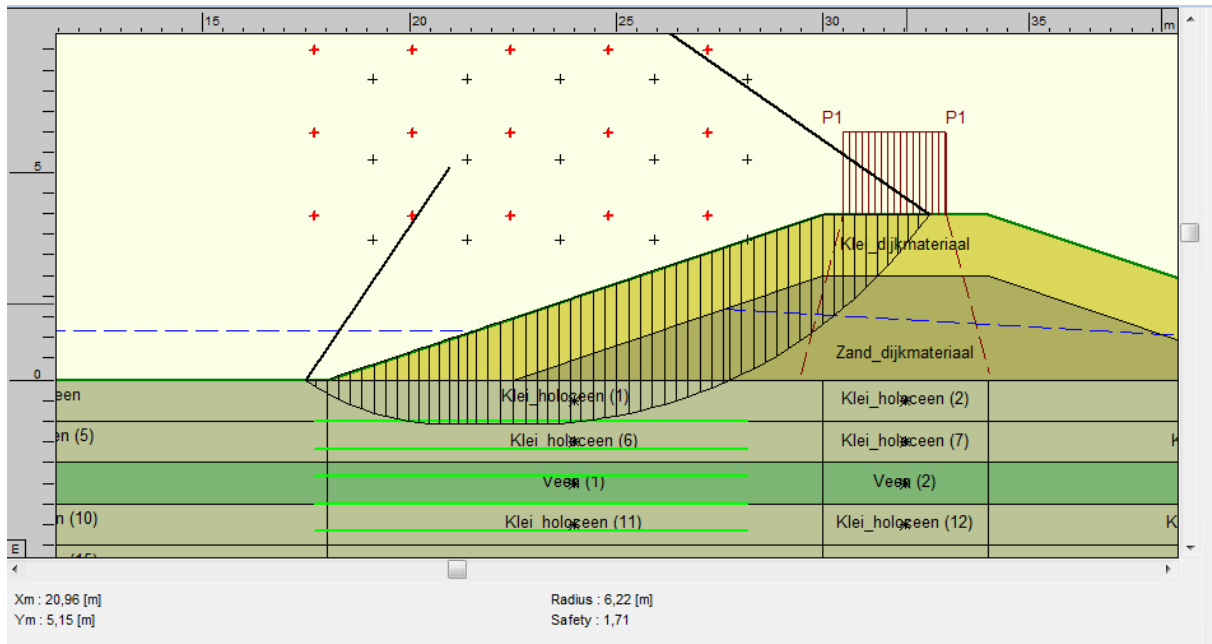
SF = 1,34



### Ondergrondscenario 3

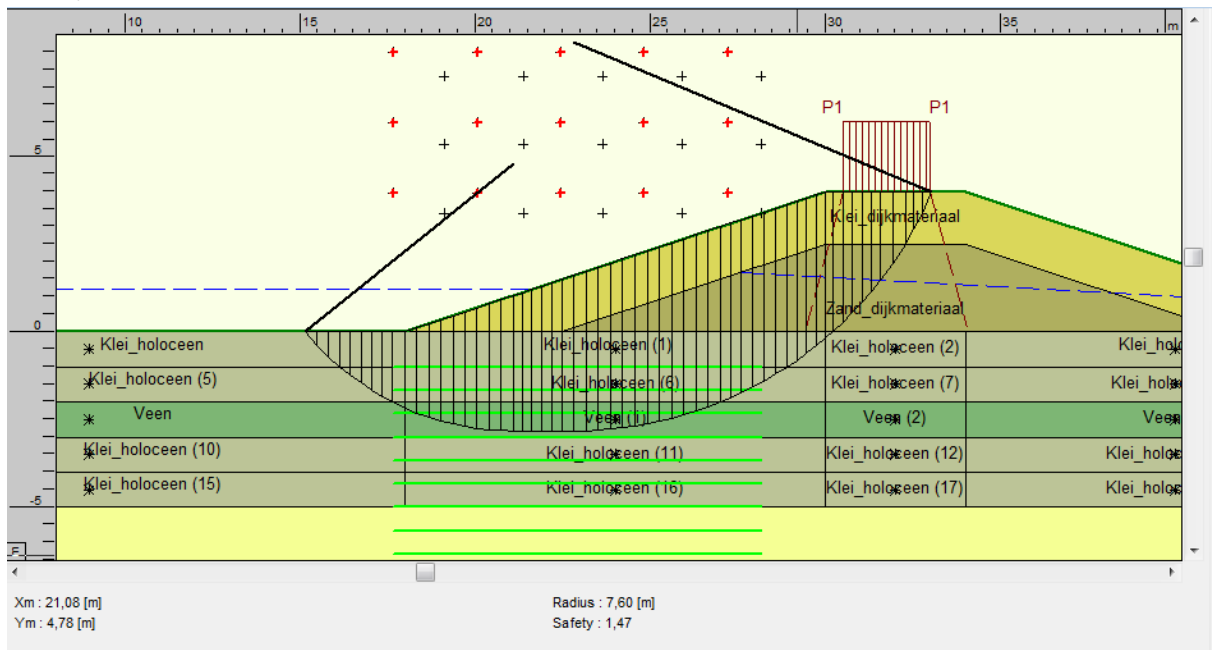
#### Standaard POP-waarden op basis van normtraject 10-2 (POP-scenario 1)

SF = 1,71



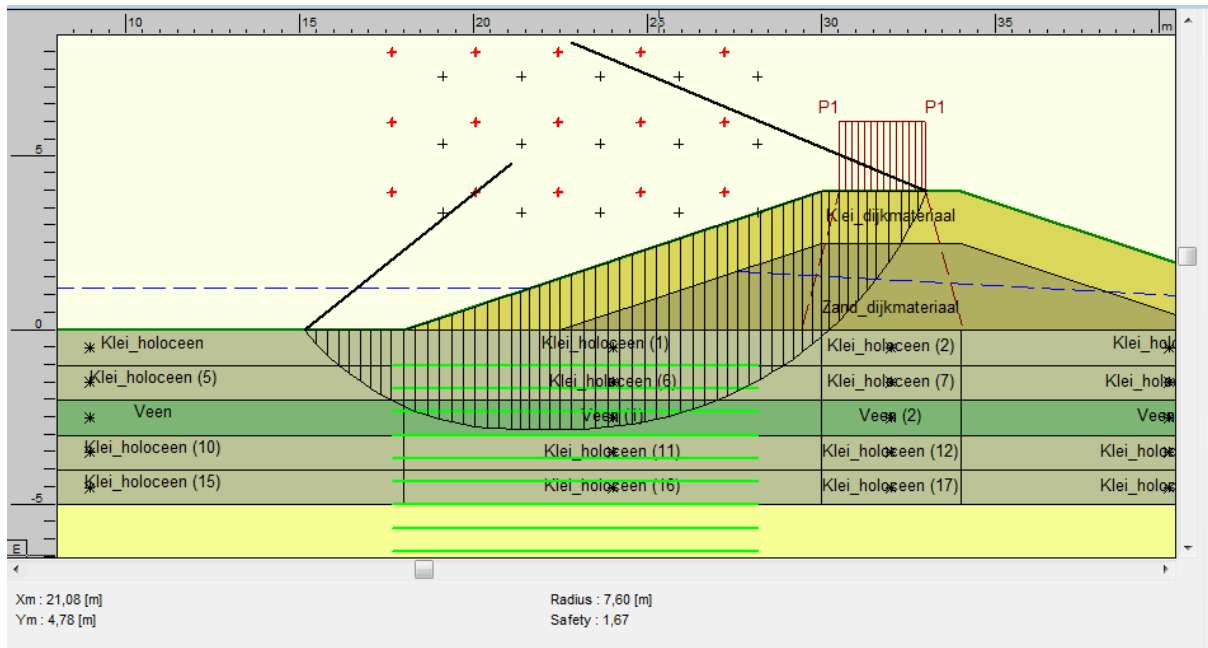
### Karakteristieke POP-waarden volgens SHM (POP-scenario 2)

SF = 1,47



### Verwachtingswaarden POP volgens SHM (POP-scenario 3)

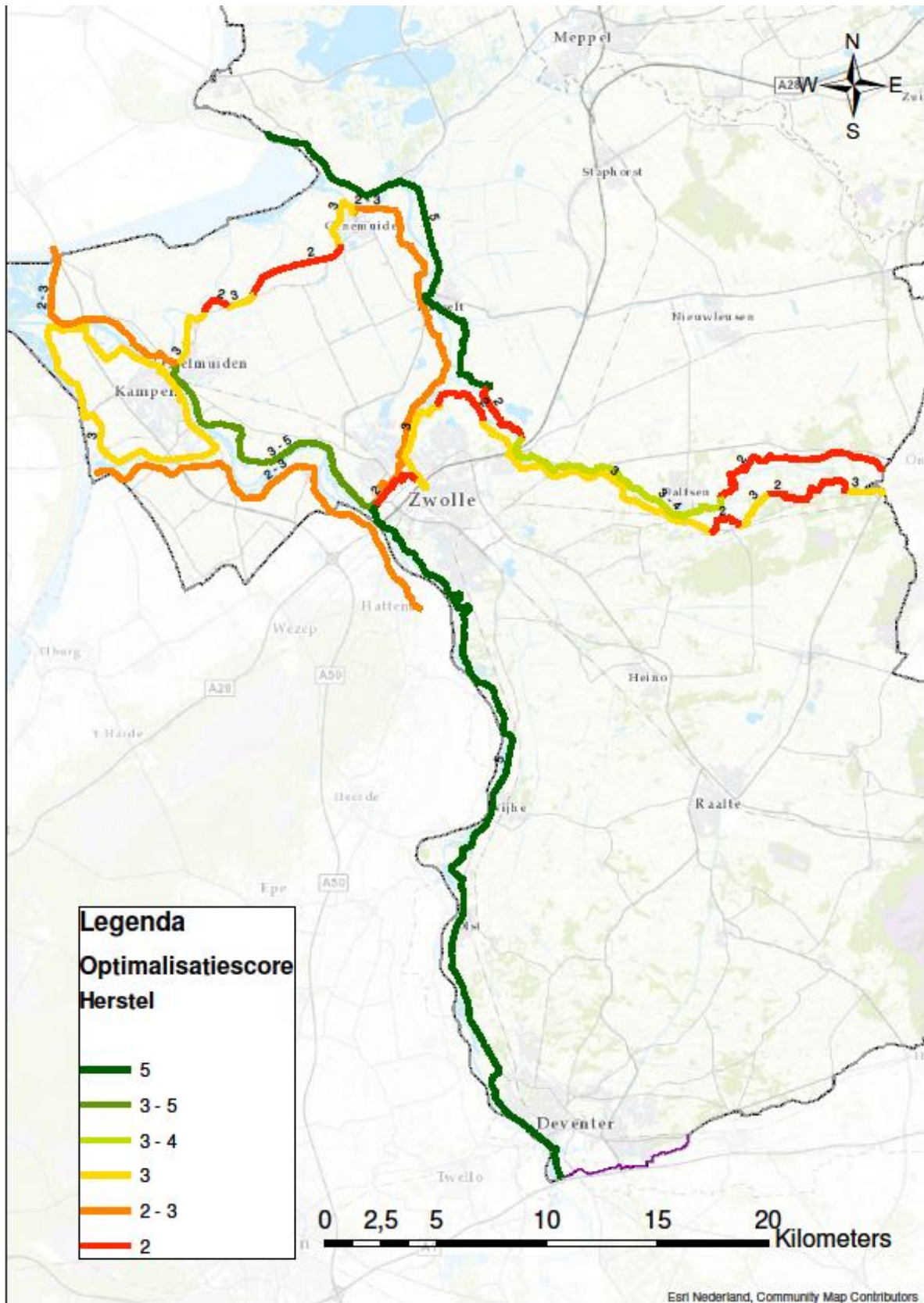
SF = 1,67



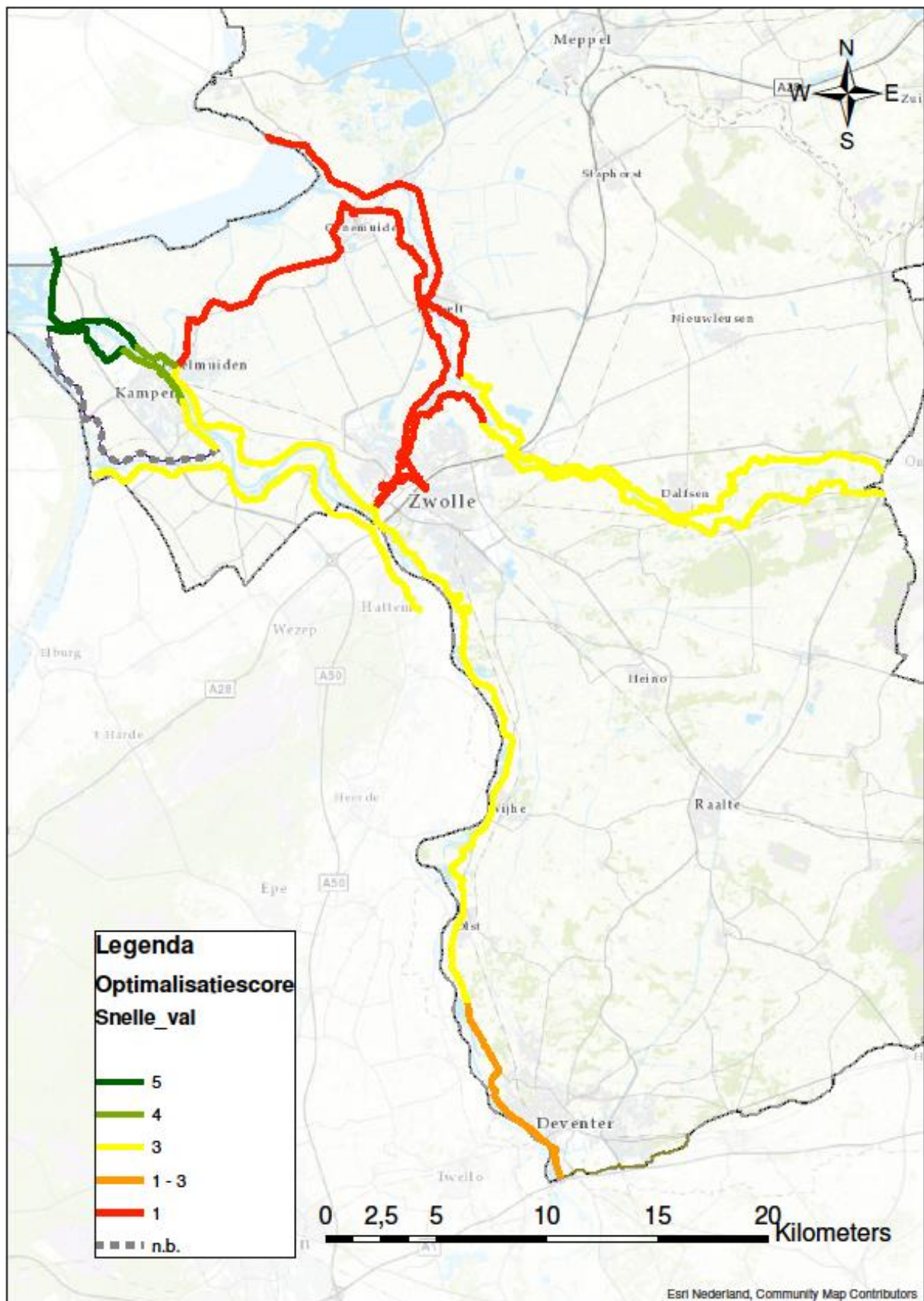
## E. OVERZICHT OPTIMALISATIESCORES

### E.1. FAALKANSEIS

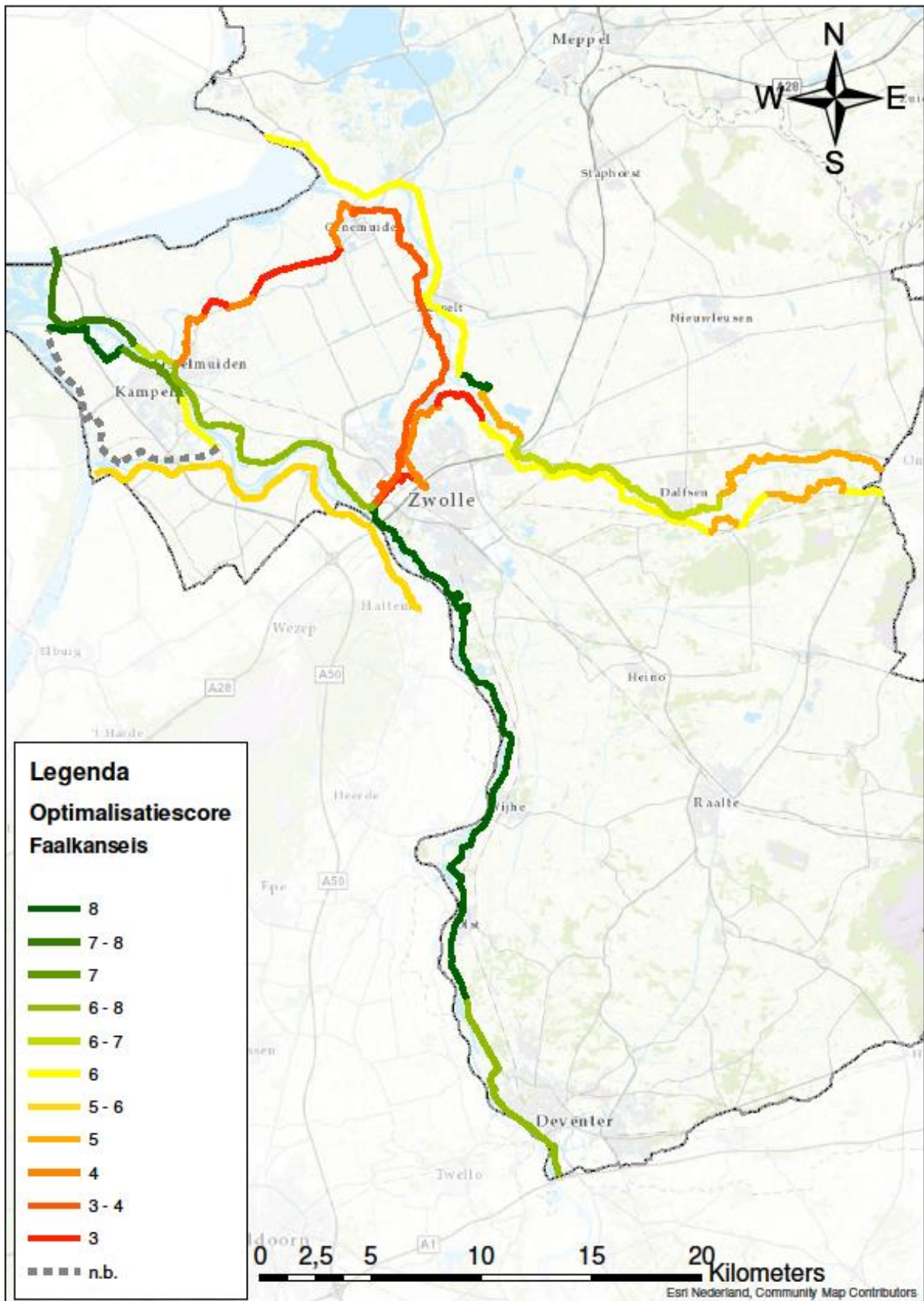
#### - Herstel



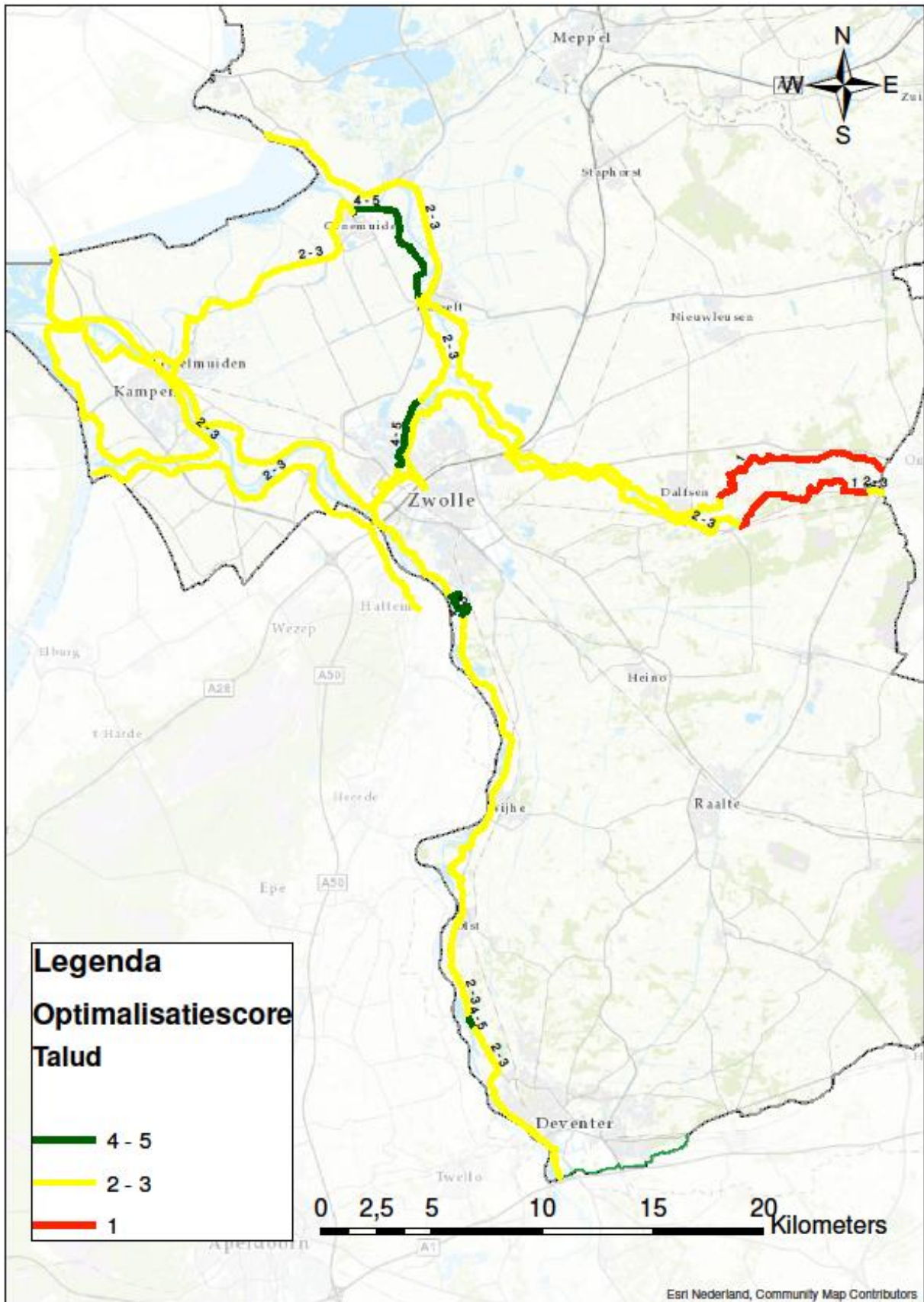
- Snelle val



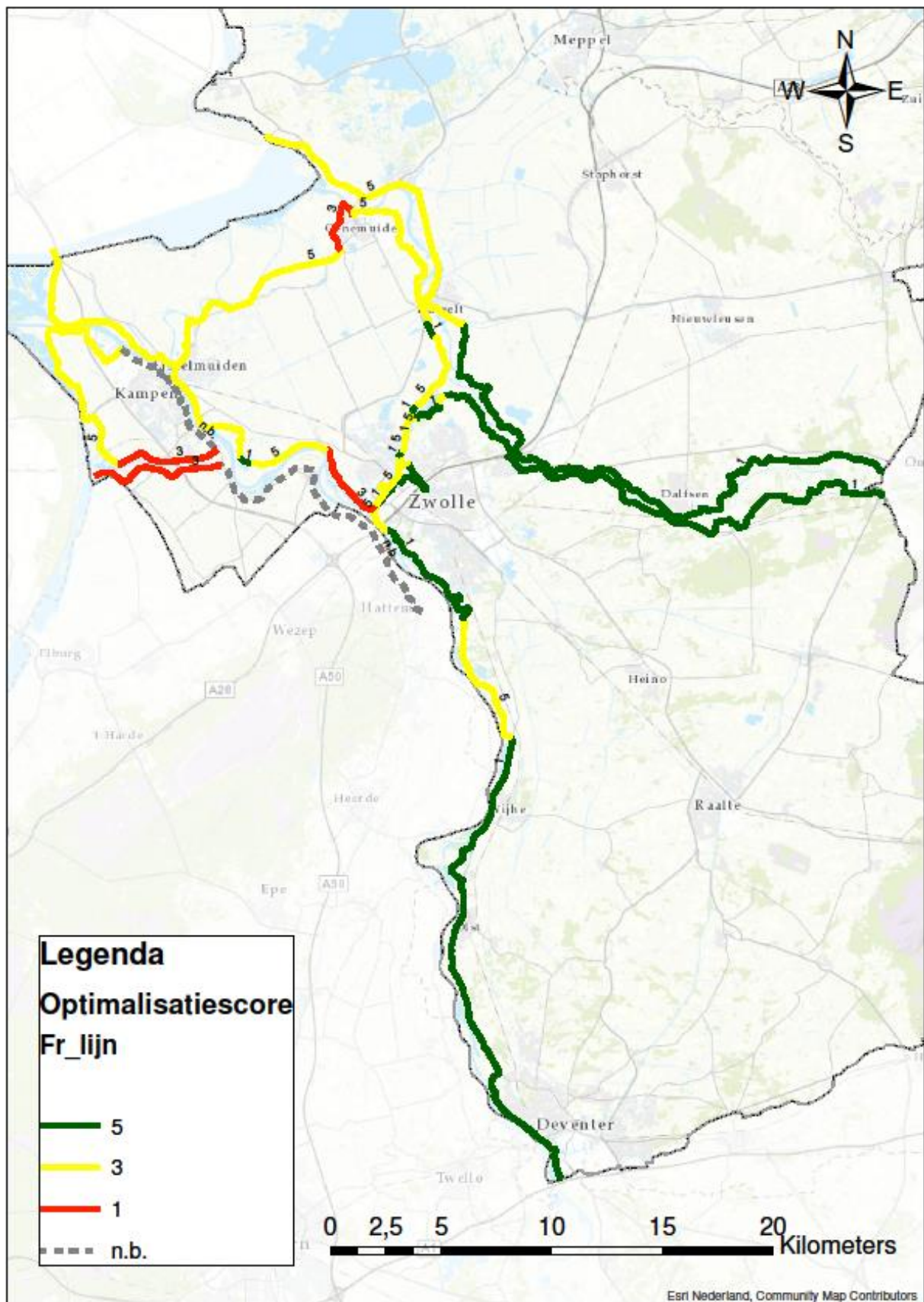
- Faalkanseis totaal



E.2. SCHEMATISATIE  
- Talud

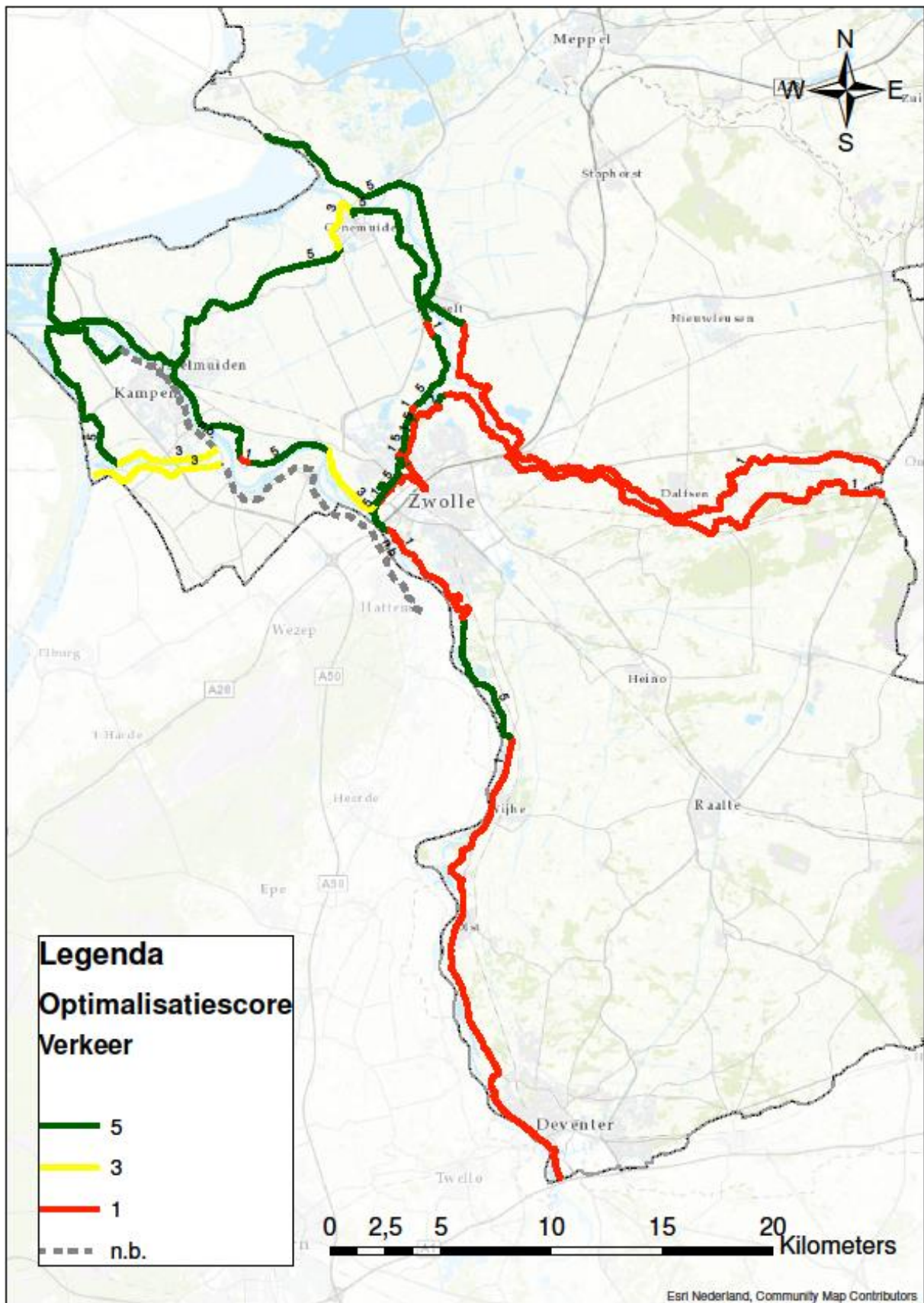


- Freatische lijn





- Verkeer



- Schematisatie totaal

