stowa

ONDERZOEKSRAPPORT

ANALYSE BEREKENING STABILITEIT BUITENWAARTS VAN REGIONALE KERINGEN



RAPPORT 2020 15

stowa

ONDERZOEKSRAPPORT

ANALYSE BEREKENING STABILITEIT BUITENWAARTS VAN REGIONALE KERINGEN

RAPPORT 2020 15

ISBN 978.90.5773.897.5

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op www.stowa.nl

stowa@stowa.nl www.stowa.nl
TEL 033 460 32 00
Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort
POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEUR Luis Benavides Narvaez (Hogeschool van Amsterdam, opleiding Built environment-water)

BEGELEIDERS A.F. Kooij (Hogeschool van Amsterdam)
H. van Hemert (STOWA)

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau
STOWA STOWA 2019-15
ISBN 978.90.5773.897.5

Copyright Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.
Disclaimer Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

TEN GELEIDE

Een nauwkeurige bepaling van de parameters 'cohesie', 'geometrie' en 'waterspanning' zijn bepalend voor een goede beoordeling van de buitenwaardse stabiliteit van regionale keringen. Die nauwkeurige bepaling van deze parameters zorgt voor een beoordeling die vaak beter aansluit bij de ervaring van de keringbeheerder en die onnodige versterking kan voorkomen.

Samenwerking met hogescholen en universiteiten is van groot belang om ook in de toekomst de kennis op hoog niveau te houden. Dit geldt natuurlijk in het algemeen, maar zeker ook voor kennis over dijken. Al jaren bestaat het gevoel dat een tekort dreigt aan specialisten op het gebied van waterveiligheid. Daarom zorgt Stowa er regelmatig voor dat gedreven studenten kunnen werken aan een afstudeeropdracht liefst in samenwerking met één of meerdere waterschappen. Een van deze enthousiaste studenten is Luis Benavides Narvaez.

Luis heeft een studie uitgevoerd met als doel een beter beeld van de buitenwaartse stabiliteit bij regionale keringen te krijgen. Bij toetsingen worden de buitentaluds namelijk vaak afgekeurd terwijl dat niet aansluit bij de ervaring en het gevoel van de beheerder. In zijn afstudeeropdracht heeft Luis zich gericht op het verkrijgen van een meer realistisch beeld van de berekende stabiliteit van buitentaluds van boezem- en kanaalkaden.

In de praktijk wordt bij parameters waarvan de nauwkeurigheid onvoldoende bekend is, vaak gekozen voor zekerheid en voorzichtigheid. Dit kan leiden tot een lage berekende stabiliteit die niet aansluit bij het gevoel en de ervaring van de keringbeheerder. Het gaat hierbij met name om de parameters 'cohesie', 'geometrie' en 'waterspanning'. Een kleine aanpassing in deze parameters kan leiden tot grote toe- of afnamen in de stabiliteitsfactor. Daarom wordt bij een toets op veiligheid aanbevolen deze parameters goed te bepalen, omdat het hanteren van 'veilige' waarden vrijwel zeker tot het afkeuren op de buitenwaartse stabiliteit leidt.

Daarnaast verdient het aanbeveling de onderwatertoestand van het buitentalud goed te inspecteren, omdat aantasting door graverij of erosie tot een sterke afname van de stabiliteit leidt.

Luis heeft zijn afstudeervak met goed gevolg afgerond en is beloond met een 8,9 als eindcijfer. Een mooi resultaat voor een nuttig onderzoek. De resultaten passen goed in het lopende onderzoek van het ontwikkelingsprogramma regionale keringen (ORK) en wordt daarom ook als STOWA rapport beschikbaar gesteld.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

VOORWOORD

Als vierdejaars student van de opleiding Built Environment – Water aan de Hogeschool van Amsterdam presenteer ik in dit document de uitkomsten van mijn afstudeeronderzoek. Dit onderzoek is gerealiseerd om mijn kennis, opgedaan gedurende de afgelopen vier jaar tijdens mijn opleiding, in een onderzoek naar een actueel onderwerp toe te passen.

Voor dit onderzoek heb ik, naar aanleiding van de voorgestelde knelpunten in de “expertsessie stabiliteit buitenwaarts” (Waterkeringen West-Nederland) en in het kader van de “tweede toetsronde van regionale keringen”, het afstudeeronderwerp “analyse van de buitenwaartse stabiliteit berekening” gekozen.

Vanuit de Hogeschool van Amsterdam werd ik begeleid door de docent A. Kooij, die ook de eerste examinator van mijn afstudeeronderzoek is. De heer Kooij heeft me veel geholpen in de beginfase van dit proces met het kiezen van het onderwerp en de juiste partners voor dit onderzoek.

Mijn onderzoek is gerealiseerd in samenwerking met de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). Vanuit STOWA werd ik begeleid door Dhr. van Hemert. Hij heeft zijn ruime kennis in het onderzoeksonderwerp beschikbaar gesteld voor dit onderzoek. Gedurende het hele proces werd ik door hem zowel inhoudelijk als procesmatig begeleid. Tijdens de vier maanden van mijn onderzoek hebben wij regelmatig voortgangsgesprekken gehad waarbij ik bruikbare feedback van hem heb gekregen. Ik wil Dhr. Van Hemert bedanken voor zijn betrokkenheid bij mijn onderzoek.

Ook heb ik regelmatig contact gehad met o.a. Dhr. Haanstra en Dhr. Zonneveld van het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK). Zij hebben mij vooral geholpen met het beschikbaar stellen van de benodigde informatie voor mijn kade analyses. Bovendien zijn beide betrokken geweest bij het schrijfproces van mijn rapport. Ik wil hen en het HHNK ook bedanken voor bijdrage aan dit onderzoek.

SAMENVATTING

De veiligheid van de Nederlandse waterkeringen is erg belangrijk en wordt daarom regelmatig getoetst. Naast de veiligheid van primaire waterkeringen is de veiligheid van regionale waterkeringen ook belangrijk. In dit onderzoek ligt de focus op de toetsing van deze regionale keringen op de buitenwaartse stabiliteit.

De beoordeling van de buitenwaartse stabiliteit (STBU) van regionale keringen is al een tijd een punt van discussie bij sommige Nederlandse waterschappen. Dit proces kent een aantal onzekerheden die met de huidige werkwijze tot onbetrouwbare resultaten kunnen leiden. Vaak is er een inconsistentie tussen het technische oordeel en het beheerdersoordeel van de STBU die een eenduidig veiligheidsoordeel erg lastig maakt. Hierdoor worden de resultaten van de STBU berekeningen in sommige gevallen als 'onrealistisch' beschouwd.

In dit afstudeeronderzoek is de invloed van verschillende uitgangspunten op de buitenwaartse stabiliteit berekening onderzocht. Eerst is een literatuuronderzoek gedaan waarbij de belangrijkste concepten van het onderzoeksonderwerp zijn onderzocht. In dit eerste deel van het onderzoek zijn de achtergrondinformatie en de uitgangspunten van de STBU berekening gepresenteerd. Uit dit literatuuronderzoek is naar voren gekomen dat de schematisering, van de verschillende parameters van een waterkering, van belang is bij de beoordeling van de stabiliteit. De grondsterkte, de geometrie, de verkeersbelasting en de waterspanningen van een waterkering zijn van belang voor de berekende stabiliteit van het buitentalud.

Met behulp van verschillende gevoeligheidsanalyses bepaald in welke mate deze parameters bijdragen aan de uitkomst van de STBU berekening. Hierbij is gekeken naar waar de kansen liggen voor toekomstige optimalisaties die het beoordelingsresultaat van de STBU 'realistischer' kunnen maken. Deze analyses zijn gemaakt met behulp van het programma D-Geostability van Deltares (en geotechnische informatie beschikbaar gesteld door het Hoogheemraadschaap Hollands Noorderkwartier).

De analyses zijn uitgevoerd voor een kade die bestaat uit humeuze klei (met daarin een zandcunet op de kruin) op een betrekkelijk slappe ondergrond, met een buitentalud helling 1 op 1,5 en een kerende hoogte van 3 meter ten opzichte van de boezembodem. Deze situatie wordt representatief verondersteld voor de Nederlandse boezemkaden.

De belangrijkste conclusies van deze gevoeligheidsanalyses naar de cohesie, de geometrie, de verkeersbelasting en de geschematiseerde waterspanningen zijn samengevat in de volgende tabel.

Parameter	**Invloed op STBU**
Cohesie	De invloed van de cohesie op de STBU bij kades met een kleine waakhoogte is groot. Voor dit soort kades leidt een kleine verhoging in de waarden van de cohesie tot een veel hogere stabiliteit. Dit betekent ook dat andersom het toepassen van lage 'onrealistische' cohesiewaarden kan leiden tot een zeer lage buitenwaartse stabiliteit. Een toename van 0kN/m^2 naar 4,2kN/m^2 in de cohesiewaarde van het kademateriaal leidt tot een toename van 36,4% in de stabiliteitsfactor. De invloed van de cohesie op de STBU bij keringen met een grotere waakhoogte is kleiner. Dit kan verklaard worden door de grotere effectieve normaalspanning die bij een hogere kade optreden.
Geometrie	De invloed van deze parameter op de STBU is ook significant. Uit de analyses is naar voren gekomen dat kleine veranderingen in de geometrie van het buitentalud kunnen leiden tot grote af- of toenamen in de stabiliteitsfactor. Een verandering in de buitentaludhelling van 1:1,5 naar 1:3 leidt tot een toename van meer dan 50% in de stabiliteitsfactor.
Verkeers-belasting	De invloed van de verkeersbelasting op de STBU kon met dit onderzoek niet goed worden aangetoond door de positie van de betrekkelijk kleine maatgevende glijcirkels buiten de invloedzone van de verkeersbelasting.
Waterspanningen	De invloed van de waterspanningen op de STBU is significant. De uitkomst van de STBU berekening is sterk afhankelijk van de gekozen schematisering voor de waterspanningen in de kering. Kleine aanpassingen in deze parameter kunnen leiden tot grote toe- of afnamen in de stabiliteitsfactor. Bij het uitsluiten van het zogenaamde naijlingseffect kan de berekende stabiliteitsfactor met ongeveer 20% toenemen.

Ten slotte is, gezien de grote invloed van de cohesie de geometrie en de waterspanningen op de STBU, aan de beheerders aan te bevelen om meer aandacht te gaan besteden aan de werkwijze voor het bepalen van deze parameters. Hierbij is goed meten en monitoren van de buitenwaartse geometrie en de waterspanningen heel belangrijk om een realistisch beeld van de STBU te verkrijgen.

In sommige gevallen; zoals bijvoorbeeld bij de werkwijze om de karakteristieke cohesiewaarde te bepalen, de verkeersbelastingen, de mogelijke sterkte gekregen van rietwortels en het exacte verloop van de waterspanningen in de kering, zal aanvullend onderzoek moeten aantonen hoe mogelijke optimalisaties in de STBU berekening aangepast kunnen worden.

DE STOWA IN HET KORT

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de ‘kennisvragen van morgen’ – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede aan alle waterschappen.

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.

ONDERZOEKSRAPPORT
ANALYSE BEREKENING STABILITEIT BUITENWAARTS VAN REGIONALE KERINGEN

INHOUD

TEN GELEIDE
VOORWOORD
SAMENVATTING
DE STOWA IN HET KORT

1 INLEIDING 1
1.1 Aanleiding 1
1.2 Onderzoeksprobleem 1
1.3 Onderzoeksdoel 2
1.4 Onderzoeksvraag 2
1.5 Deelvragen 2

2 ACHTERGRONDINFORMATIE 3
2.1 Toetsing waterkeringen op veiligheid 3
2.2 Toetsing Regionale waterkeringen 4
2.3 Beoordeling veiligheid van regionale waterkeringen 4
2.3.1 Faalmechanismen 5
2.4 Macrostabiliteit buitenwaarts - STBU 6

3 UITGANGSPUNTEN STBU BEREKENING 9
3.1 Geometrie 9
3.2 Bodemopbouw 9
3.3 Volume gewicht (γ) 10
3.4 Effectieve schuifsterkteparameters 10
3.4.1 Effectieve Hoek van inwendige wrijving (ϕ') 12
3.4.2 Effectieve Cohesie (c') 12
3.5 Belastingen 12
3.5.1 Hydraulische belastingen 13
3.5.2 Verkeersbelastingen 13

4		ANALYSE STBU (GENERIEK DWARSPROFIEL)	14
	4.1	Invloed cohesie op STBU	17
		4.1.1 Invloed cohesie op STBU van hogere kades	24
		4.1.2 Conclusie invloed cohesie op STBU	26
	4.2	Invloed geometrie op STBU	27
		4.2.1 Conclusie invloed geometrie op STBU	30
	4.3	Invloed verkeersbelasting op STBU	31
		4.3.1 Conclusie invloed verkeersbelasting op STBU	33
	4.4	Invloed waterspanningen op STBU	34
		4.4.1 Invloed waterspanningen op STBU	36
5		CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	37
	5.1	Conclusies	37
	5.2	Aanbevelingen	38
		5.2.1 Cohesie	38
		5.2.2 Geometrie	38
		5.2.3 Waterspanningen	39
6		HANDELINGSPERSPECTIEF VOOR KERINGBEHEERDERS	40
		BIBLIOGRAFIE	41
BIJLAGE I		D-GEOSTABILITY KRITISCHE CIRKELS INVLOED COHESIE OP STBU	42
BIJLAGE II		D-GEOSTABILITY VEILIGHEIDSOVERZICHTEN INVLOED COHESIE OP STBU	54
BIJLAGE III		D-GEOSTABILITY RESULTATEN INVLOED COHESIE OP STBU – 'HOGERE KADE'	66
BIJLAGE IV		D-GEOSTABILITY RESULTATEN INVLOED GEOMETRIE OP STBU	77
BIJLAGE V		D-GEOSTABILITY KRITISCHE CIRKELS INVLOED VERKEERSBELASTING OP STBU	84
BIJLAGE VI		D-GEOSTABILITY VEILIGHEIDSOVERZICHT INVLOED VERKEERSBELASTING OP STBU	90
BIJLAGE VII		D-GEOSTABILITY RESULTATEN INVLOED WATERSPANNINGEN OP STBU	96

1

INLEIDING

1.1 AANLEIDING

Momenteel speelt er binnen de Nederlandse waterschappen een discussie over hoe om te gaan met de beoordeling van het faalmechanisme macro-instabiliteit buitenwaarts (STBU). Hoewel bij de toetsing van regionale waterkeringen vaak lage stabiliteitsfactoren worden berekend, zijn er in de praktijk geen significante afschuivingen van buitentaluds gesignaleerd. Deze inconsistentie tussen het technische oordeel en het beheerdersoordeel bij de waterschappen maakt een helder veiligheidsoordeel erg lastig (Van Hemert, 2019).

Op 27 januari 2020 ben ik bij de Expertsessie STBU (Waterkeringen West-Nederland) bij het Hoogheemraadschap van Delfland geweest. Hier heb ik van de vertegenwoordigers van de waterschappen gehoord wat daadwerkelijk de huidige situatie is bij elk waterschap en wat de knelpunten zijn tijdens de beoordeling van de STBU. Bij de meeste waterschappen wordt tot nu toe het beheerdersoordeel als veiligheidsoordeel gezien. Het oordeel wordt gebaseerd op wat er buiten fysiek is waargenomen. Het feit dat de dijk er buiten goed bij ligt, betekent dat de kade voldoet. Mede omdat de maatgevende omstandigheden voor stabiliteit buitenwaarts weinig verschillen van de dagelijkse omstandigheden. In de rekensommen (technisch oordeel) worden kades desondanks wel vaak afgekeurd. De uitkomsten van de technische STBU berekeningen worden vaak niet geloofd omdat ze dan niet met het beheerdersoordeel overeen komen. Er is dus veel vraag naar een “technisch” onderzoek naar mogelijke optimalisaties van de STBU berekening.

Vanuit mijn perspectief, zijn er twee richtingen om dit te onderzoeken. De eerste richting is kijken naar de ervaringen buiten, en op deze manier het beheerdersoordeel optimaliseren. De tweede richting is kijken naar de geotechnische berekening, en onderzoeken welke mogelijkheden er zijn om de verschillende parameters te optimaliseren (grondparameters, sterkte, belastingen, etc.). Aan het eind kunnen deze twee richtingen ook samen één oplossing vormen.

STBU is een onderwerp dat STOWA binnen het Ontwikkelingsprogramma Regionale Keringen (ORK) verder wil onderzoeken. Tijdens mijn afstuderen heb ik aan dit onderwerp gewerkt. Mijn afstudeeronderzoek is vooral gericht op de technische kant van de STBU. Hierbij heb ik me gefocust op de gekozen waarden voor de grondsterkteparameters.

1.2 ONDERZOEKSPROBLEEM

In het kader van de voorbereiding voor de tweede toetsronde regionale keringen die voor 2024 moet worden afgerond, zijn er nog veel vragen over de aanpak tijdens de beoordeling van de STBU. Elk waterschap in Nederland beoordeelt de STBU op een eigen manier. Om over een eenduidig veiligheidsoordeel te kunnen beschikken is er een urgente behoefte aan een standaard proces dat technisch ondersteund kan worden. De resultaten van de huidige STBU

berekening worden vaak in de praktijk als 'onrealistisch' beschouwd. Hierbij is het belangrijk om eerst mogelijke optimalisaties van de berekening te onderzoeken om tot 'realistischere' resultaten te komen.

1.3 ONDERZOEKSDOEL

Het doel van het onderzoek is om mogelijke optimalisaties van de STBU berekening in kaart te brengen. Hiervoor zal kritisch worden gekeken naar de uitgangspunten van de berekening zoals bijvoorbeeld de gekozen grondsterkte, belastingen, etc.

1.4 ONDERZOEKSVRAAG

Hoe kan een realistischer oordeel van de STBU bij regionale keringen worden verkregen?

1.5 DEELVRAGEN

1. Welke parameters dragen bij aan de optimalisatie van de STBU berekening?
2. Wat is de invloed van de verschillende uitgangspunten op de berekende STBU?
3. Zijn de gekozen waarden voor de grondsterkteparameters bij de STBU berekeningen reëel?
4. Hoe kunnen aanpassingen van de grondsterkteparameters bijdragen aan een realistischer technisch oordeel van de STBU?
5. Is het mogelijk om de STBU berekening te optimaliseren? Zo ja, hoe kan de STBU berekening geoptimaliseerd worden?

2

ACHTERGRONDINFORMATIE

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het literatuur vooronderzoek toegelicht. Het zoeken naar achtergrondinformatie is belangrijk om het onderzoeksonderwerp nader te bepalen. Hieronder worden de belangrijkste concepten gepresenteerd. Daarnaast wordt hier ook de aanleiding van het onderzoeksprobleem verder uitgewerkt.

2.1 TOETSING WATERKERINGEN OP VEILIGHEID

Een groot deel van Nederland ligt onder de zeespiegel. Bovendien doorkruist een aantal belangrijke rivieren het land. Om de laaggelegen gebieden van Nederland te beschermen tegen overstromingen zijn er ruim 3.500 kilometer aan primaire waterkeringen en ongeveer 14.000 kilometer aan regionale waterkeringen in dit land aanwezig. Hoewel het toetsen van waterkeringen op veiligheid tegenwoordig vanzelfsprekend is, is dit concept niet zolang geleden geïntroduceerd. Pas naar aanleiding van de watersnoodramp in 1953 worden de Nederlandse waterkeringen technisch beoordeeld (Vergouwe & Sarink, 2014). In de afgelopen 60 jaar is er veel veranderd aan de manier waarop dijken op veiligheid worden getoetst.

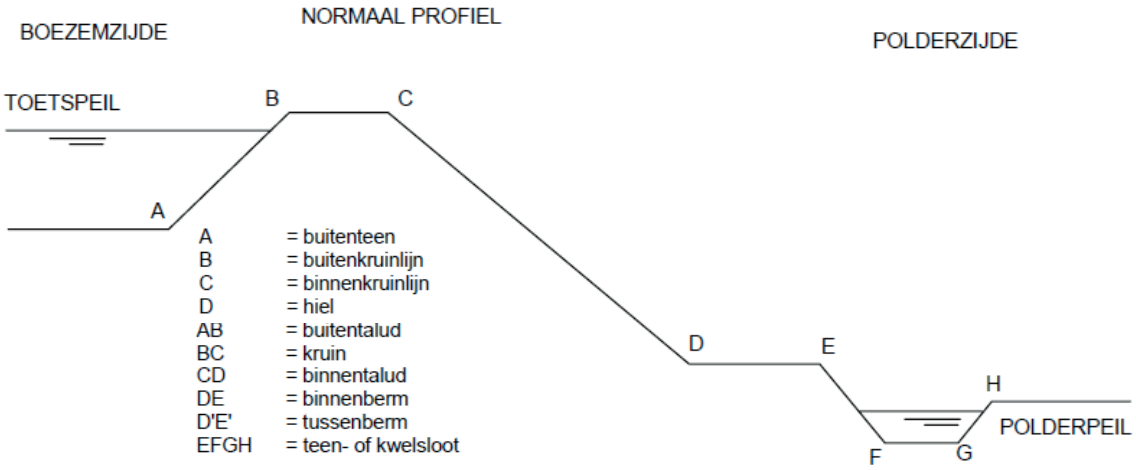
Meteen na de watersnoodramp werd de eerste Deltacommissie opgericht. De aanbevelingen van deze commissie vormen de basis voor de uitgangspunten van de huidige aanpak voor de technisch beoordeling van (primaire) waterkeringen. De normen opgesteld door de Deltacommissie hadden betrekking op de zogenaamde primaire keringen. De primaire keringen beschermen Nederland tegen overstromingen vanuit de grote wateren zoals de zee, de grote rivieren en de grote meren.

Iets later, in 1996 is de wet voor waterkeringen opgesteld. Hierin werd Nederland in 53 dijkringen verdeeld. In deze wet is per dijkring een bijbehorende overschrijdingskans vastgesteld. Daarnaast is toen afgesproken dat deze primaire waterkeringen periodiek zouden worden getoetst aan de voorgestelde veiligheidseisen en normen. In 2009 is de wet op de waterkeringen opgenomen in de waterwet.

Naast de veiligheid van primaire waterkeringen is de veiligheid van regionale waterkeringen ook belangrijk. Regionale waterkeringen bieden bescherming tegen overstromingen vanuit buitenwater zoals bij voorlandkeringen, of binnenwater zoals bij boezems, kanalen en regionale rivieren en ook bij de eventuele doorbraak van andere waterkeringen zoals droge- of compartimenteringskeringen. De focus van dit onderzoek is de toetsing van deze regionale waterkeringen.

Hieronder in Figuur 1 wordt de meest voorkomende vorm van het dwarsprofiel van een boezemkade weergegeven, met daarbij de gebruikelijke benamingen van de daarin voorkomende elementen.

FIGUUR 1 MEEST VOORKOMENDE BOEZEMKADEPROFIEL (STOWA, 2007)



2.2 TOETSING REGIONALE WATERKERINGEN

De veiligheid dient niet alleen te worden gehanteerd voor de primaire keringen maar ook voor de zogenaamde regionale waterkeringen. Er zijn 4 typen regionale waterkeringen: Boezemkades, keringen langs regionale rivieren, compartimenteringskeringen en voorlandkeringen. Volgens de STOWA is er ongeveer 14.000 kilometer aan regionale waterkeringen in Nederland.

De veiligheid van de regionale waterkeringen werd steeds belangrijker door de economische en sociale groei van de omliggende gebieden achter deze keringen. Pas in 1998 werd er serieuze aandacht besteed aan de veiligheid van regionale waterkeringen. Toen is er door het Rijk in de Vierde Nota waterhuishouding besloten dat provincies en waterschappen normen moesten ontwikkelen voor de veiligheid van deze belangrijke waterkeringen.

Naar aanleiding van de Vierde Nota waterhuishouding hebben het InterProvinciale Overleg (IPO) en de Unie van Waterschappen (UvW) besloten om gezamenlijk de ontwikkeling van een instrumentarium voor de verschillende typen regionale keringen aan te pakken. In navolging van dit besluit hebben ze in samenwerking met de STOWA het Ontwikkelingsprogramma Regionale Keringen (ORK) opgericht. Het ORK heeft in 2007 onder andere de “blauwe versie” van de Leidraad Toetsen op Veiligheid regionale waterkeringen ontwikkeld. Later werd deze versie verbeterd in de “groene versie” van de LTV regionale keringen 2015. Aan de hand van deze leidraad kunnen de regionale waterkeringen getoetst worden op veiligheid.

2.3 BEOORDELING VEILIGHEID VAN REGIONALE WATERKERINGEN

De veiligheid van regionale waterkeringen wordt op verschillende faalmechanismen getoetst. De sterkte van een waterkering wordt bepaald door de hoogte en stabiliteit van de kering. Elk faalmechanisme wordt beoordeeld op basis van een toetsspoor. De uitwerking van een toetsspoor kan leiden tot een technisch oordeel maar ook tot een meer pragmatisch oordeel; een beheerdersoordeel. Technisch kunnen de faalmechanismen op twee belasting situaties getoetst worden; namelijk een hoogwater situatie en een langdurige droogte situatie (toetsing op droogte situatie alleen zo nodig bij droogtegevoelige waterkeringen).

De beoordeling van regionale waterkeringen kan op 3 wijzen uitgevoerd worden:

- Niveau 1: eenvoudige beoordeling
- Niveau 2: gedetailleerde beoordeling
- Niveau 3: geavanceerde beoordeling

Deze aanpak is bedoeld om meer aandacht te geven aan waterkeringen die deze aandacht vereisen. Het is niet nodig om alle keringen even uitgebreid te beoordelen. Waterkeringen waar “gemakkelijk” te zien is dat de veiligheid wordt gehanteerd, worden op een eenvoudige manier beoordeeld (niveau 1).

Zoals eerder al benoemd, wordt er naast het technisch oordeel ook rekening gehouden met de ervaringen van de waterkering beheerder met elk faalmechanisme. De beheerder kan de veiligheid van een kering beoordelen op basis van zijn eigen kennis ten aanzien van het gedrag van de kering onder maatgevende omstandigheden. Het zogenaamde beheerdersoordeel maakt ook deel uit van het uiteindelijke veiligheidsoordeel.

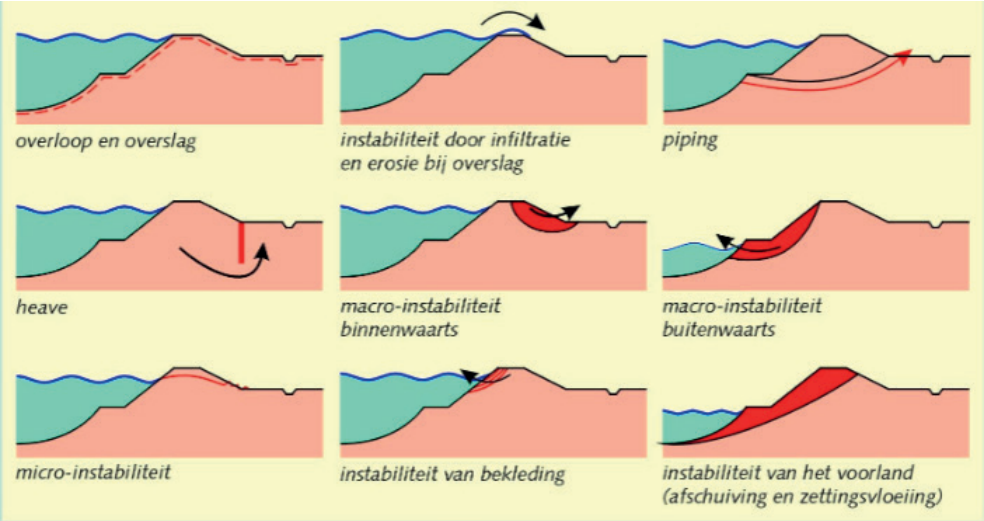
De beoordeling van de veiligheid per faalmechanisme wordt gekwantificeerd in een technische score en een beheerdersoordeel score. In sommige situaties (bijv. bij gebrek aan toetsregels) is het niet mogelijk om een technisch oordeel uit te werken. In deze situatie kan het beheerdersoordeel tot een veiligheidsoordeel leiden. Ook kunnen de oordelen met elkaar overeenkomen, dit maakt een eindoordeel makkelijk te onderbouwen. De oordelen kunnen ook verschillen van elkaar. In dit geval dient het beheerdersoordeel goed onderbouwd te worden.

2.3.1 FAALMECHANISMEN

Er zijn verschillende faalmechanismen die bij regionale waterkeringen kunnen optreden. Deze faalmechanismen hebben een relatie met de hoogte en de stabiliteit van een waterkering, namelijk:

- Hoogte
  - Overlopen
  - Overslag
- Stabiliteit
  - Piping/Heave
  - Macrostabiliteit binnenwaarts - STBI
  - Macrostabiliteit buitenwaarts - STBU
  - Microstabiliteit
  - Bekleding
  - Stabiliteit voorland

FIGUUR 2 FAALMECHANISMEN VAN DIJKEN (DELTARES, 2009)



De toetsing van deze faalmechanismen leidt tot een technisch oordeel, waarbij wordt bepaald of de veiligheid van de waterkering wel of niet aan de norm voldoet. In sommige gevallen kan het gebeuren dat er geen technisch oordeel kan worden geveld op basis van een gedetailleerde toets. In deze gevallen is verder onderzoek nodig met een geavanceerde beoordeling.
Daarnaast kunnen niet-waterkerende objecten, op of langs de waterkering, invloed hebben op de veiligheid. Waterkerende kunstwerken in een waterkering hebben ook invloed op de veiligheid en zijn erg belangrijk tijdens de beoordeling van sommige faalmechanismen.

Zoals al eerder aangegeven ligt de focus van dit onderzoek voornamelijk op het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts.

2.4 MACROSTABILITEIT BUITENWAARTS - STBU

Er is sprake van macro-instabiliteit buitenwaarts wanneer er significante afschuivingen van het buitentalud zijn opgetreden. Deze afschuivingen vinden plaats langs rechte of gebogen glijvakken in een grondlichaam waarin geen krachtenevenwicht meer aanwezig is.

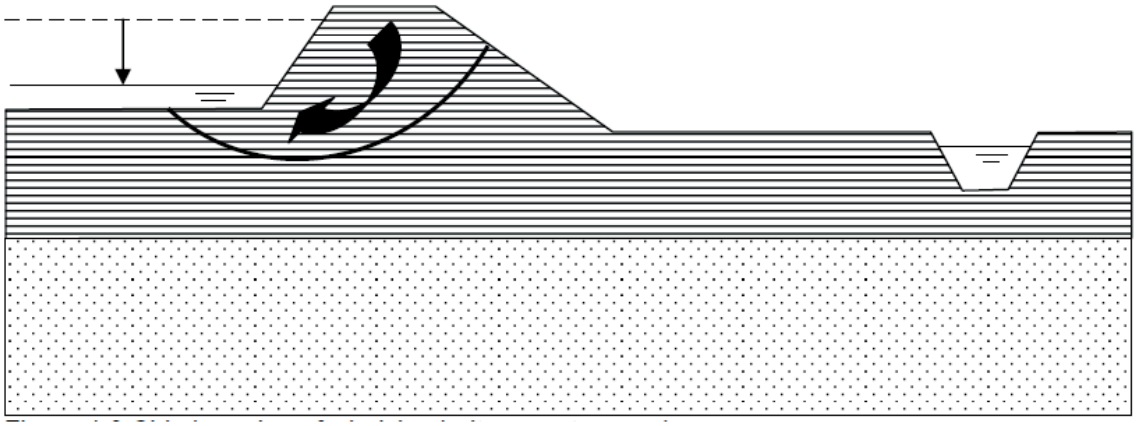
Macro-instabiliteit van het buitentalud wordt in het algemeen veroorzaakt door de volgende situaties:

- Extreem laagwater door natuurlijke variatie (bij boezemkades en rivierkeringen)
- Val van het waterpeil door een calamiteit elders
- Verdieping van waterbodem of vooroever door erosie (stroming of scheepvaart)
- Schade aan beschoeiing;
- Extreme belastingen, bijvoorbeeld door zwaar verkeer;
- Extreem laagwater door verlaging van de waterstand door menselijke activiteiten

Echter betekent dit niet dat het optreden van deze situaties altijd leidt tot macro-instabiliteit van het buitentalud. Bovendien is het niet noodzakelijk om dit faalmechanisme bij alle dijkvakken te beschouwen. De beoordeling van de macro-instabiliteit buitentalud kan achterwege blijven als bijvoorbeeld sprake is van een hoog voorland (hoger dan het ter plaatse geldende toetspeil); het optreden van een 2de hoogwatergolf ‘kort’ na het optreden van de maatgevende afvoergolf kan worden uitgesloten; erosie van oever of onderwaterbodem kan worden uitgesloten, etc.

Om te beoordelen of een waterkering wel of niet voldoet aan de stabiliteit buitenwaarts, worden zogenaamde glijvlak berekeningen uitgevoerd (Figuur 3). Hiervoor is het belangrijk om de geometrie, de bodemopbouw, de sterkte eigenschappen en de belastingen van de waterkering te bepalen.

FIGUUR 3 **METHODE BISHOP, AFSCHUIVING GLIJVLAK IN EEN GRONDLICHAAM – STBU (STOWA, 2007)**



De uitvoering van glijvlak berekeningen resulteert in een waarde voor de buitenwaartse stabiliteit. Deze waarde zegt iets over de stabiliteit van de kering en wordt stabiliteitsfactor genoemd. De stabiliteitsfactor wordt met het symbool *F* gepresenteerd.

De stabiliteitseis bij gebruik van rekenwaarden voor de sterkte van een waterkering wordt hieronder weergegeven:

$$\frac{F}{\gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_s} \geq 1{,}0 \qquad [2.1]$$

Waarin:
F = stabiliteitsfactor berekend bij rekenwaarden van de sterkte [-];
γ_n = schadefactor [-];
γ_d = modelfactor [-];
γ_s = schematiseringsfactor [-].

De schadefactor γ_n is afhankelijk van de veiligheidsnorm opgesteld voor de waterkering. Voor boezemkades en keringen langs regionale rivieren is de waarde van de schadefactor tussen 0,8 en 1,0, bij een overschrijdingsfrequentie tussen 1/10 en 1/1.000 (IPO-klasse I – V). In Tabel 1 is de bijhorende schadefactor bij elke IPO-klasse weergegeven. Voor sommige bijzondere regionale waterkeringen kan een overschrijdingsfrequentie van 1/1.250 worden toegekend. Voor deze waterkeringen wordt een schadefactor van 1,1 gebruikt.

TABEL 1 SCHADEFACTOR VOOR BOEZEMKADES (STOWA, 2007)

COW-stabiliteitseis	Stabiliteitseis TRTB	Stabiliteitseisen behorende bij IPO-veiligheidsklassen		
		IPO-veiligheidklasse	Veiligheidsnorm [1/jr]	Schadefactor γ_n [-]
$F_{COW} \geq 1,3$	$F_{TRTB} \geq 1,0$ bij $\gamma_n = 0,9$	I	1/10	0,80
		II	1/30	0,85
		III	1/100	0,90
		IV	1/300	0,95
		V	1/1.000	1,00

Toelichting:
In de lijst met IPO-veiligheidsklassen is klasse III de gemiddelde klasse. Deze sluit aan op de COW-stabiliteitseis (de stabiliteitsfactor F_{COW} berekend met gemiddelde waarden van de sterkte-eigenschappen, dient ten minste 1.3 te bedragen) alsook de stabiliteitseis uit het TRTB (de stabiliteitsfactor F_{TRTB} berekend met rekenwaarden van de sterkte-eigenschappen dient ten minste 1.0 te bedragen bij een gehanteerde waarde van de schadefactor van $\gamma_n = 0,9$). IPO-veiligheidsklassen IV en V zijn afgedekt is de COW-stabiliteitseis en de stabiliteitseis van het TRTB.

De modelfactor γ_d is afhankelijk van de onzekerheden van het gebruikte rekenmodel. Hieronder in Tabel 2 worden de modelfactoren weergegeven.

TABEL 2 MODELFACTOREN BOEZEMKADE (STOWA, 2015)

Rekenmodel / stabiliteitsanalyse	Modelfactor[14]	Bron
Bishop	1,0	VTV2006 (vigerend)
LiftVan	1,05	VTV2006 (vigerend)
EEM – Mohr Coulomb	1,0	VTV2006 (vigerend)
Spencer – Van der Meij zonder opdrukken	0,95	Concept TR Macrostabiliteit (niet vigerend)
met opdrukken	1,05	Concept TR Macrostabiliteit (niet vigerend)

De schematiseringsfactor γ_s representeert de onzekerheden bij het schematiseringsproces tijdens de bepaling van de geometrie, de bodemopbouw en de waterspanningen. De waarde van deze factor varieert tussen 1,0 en 1,2.

Met behulp van de formule [2.1] en op basis van de laagste en hoogste waarden van deze drie factoren valt te concluderen dat de vereiste veiligheidsfactor (F) voor de buitenwaartse stabiliteit tussen 0,76 en 1,25 ligt.

3

UITGANGSPUNTEN STBU BEREKENING

De beoordeling van de macrostabiliteit van een waterkering wordt gedaan met behulp van glijvlakmodellen. In de huidige Nederlandse aanpak wordt er gebruik gemaakt van een gedraineerde stabiliteitsanalyse met effectieve schuifsterkteparameters; effectieve cohesie (*c'*) en effectieve hoek van inwendige wrijving (ϕ'). Zoals al eerder aangegeven zijn er verschillende methoden om deze berekeningen te realiseren. Een van de meest gebruikte methoden is bijvoorbeeld de Bishop methode, waarbij cirkelvormige glijvakken worden berekend om de stabiliteitsfactor te bepalen. Om dit soort berekeningen te kunnen maken wordt onder andere het programma D-Geostability van Deltares gebruikt.

Voordat er een berekening en een analyse van de stabiliteit gemaakt kan worden, is het noodzakelijk om een aantal uitgangspunten vast te stellen. De uitkomst van de berekening is sterk afhankelijk van deze uitgangspunten. Elk uitgangspunt brengt bepaalde onzekerheden met zich mee. Het doel van dit onderzoek is om te bekijken hoe deze onzekerheden zoveel mogelijk beperkt kunnen worden. Het cumulatieve effect van ongunstige uitgangspunten, kan tot zeer lage en “onrealistische” uitkomsten van de STBU berekening leiden.

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste uitgangspunten van de STBU berekening toegelicht.

3.1 GEOMETRIE

De geometrie van een waterkering wordt bepaald met behulp van terreinmetingen of beschikbare hoogte informatie. Waar gemeten kan worden is de nauwkeurigheid van de terreinmetingen in het algemeen groot. Helaas is het soms bij regionale waterkeringen niet zo eenvoudig om alle geometrieonderdelen, zoals bijvoorbeeld sloot- of kanaalbodems; te meten. Regelmatig worden er aannames gedaan over de onderdelen die niet gemeten zijn.

Op basis van deze informatie worden de verschillende dwarsprofielen bepaald. Deze profielen worden geanalyseerd en gesorteerd per type, bijvoorbeeld; dwarsprofiel met of zonder berm; met verschillende taludhellingen of bermhoogtes; etc. Op basis van de analyse van deze variaties wordt een waterkering in secties verdeeld. Daarnaast wordt er per sectie een maatgevend dwarsprofiel gekozen. De onzekerheden van dit maatgevende dwarsprofiel worden meegenomen in de schematiseringsfactor.

3.2 BODEMOPBOUW

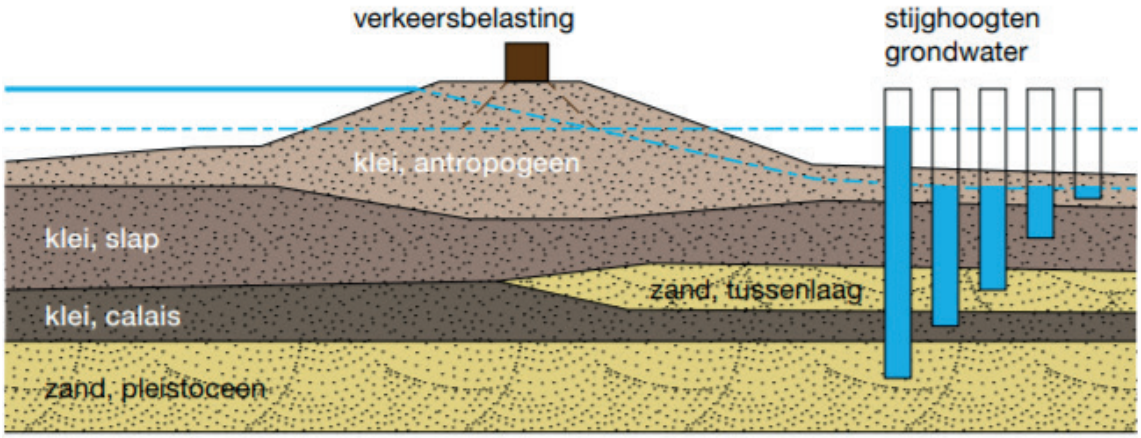
De laagopbouw van de ondergrond en het dijklichaam wordt bepaald door middel van beschikbare grondinformatie al dan niet aangevuld met een aanvullend grondonderzoek. Dit onderzoek wordt meestal gedaan met behulp van boringen en sonderingen ter plaatse van karakteristieke punten van een waterkering zoals de kruin, de binnen- en buitenteen.

De bodemopbouw onder de boezembodem en van het voor- en achterland worden vaak niet gemeten en dus wordt er iets voor aangenomen.

Met deze informatie kunnen er lengteprofielen van de ondergrond bij een waterkering worden vastgesteld. Naast de laagopbouw van de ondergrond, wordt in dit grondonderzoek ook de geohydrologische situatie (stijghoogte en grondwaterstanden) bepaald. Ook hier worden soms aannames gedaan over de laagopbouw van de grond onder de sloot- of kanaalbodems. De opbouw van een waterkering en de ondergrond varieert sterk. Dit maakt een accurate weergave van de bodemopbouw erg lastig. Net als bij de geometrie wordt hier ook een maatgevend geotechnisch dwarsprofiel per sectie gekozen.

In Figuur 4 een voorbeeld van de schematisering van een waterkering.

FIGUUR 4 BASISSCHEMATISERING VAN EEN WATERKERING (ENW, 2012)



3.3 VOLUME GEWICHT (γ)

Op basis van de bodemopbouw worden de verschillende geotechnische eigenschappen per grondlaag bepaald. Een van deze eigenschappen is het volume gewicht. Het volume gewicht is een belangrijke parameter die invloed heeft op het aandrijvend moment, de schuifsterkte via de resulterende grondspanningen en dus op de stabiliteit van een waterkering.

In een stabiliteitsanalyse wordt onderscheid gemaakt tussen het verzadigde volumegewicht (γ_{verz}), het natte volume gewicht normale situatie (γ_{nat}) en het onverzadigde droog volumegewicht (γ_{droog}). Deze parameter wordt altijd meegenomen in het grondonderzoek. De waarden van γ_{nat} en γ_{droog} worden in het laboratorium bepaald. Om rekening te houden met onzekerheden in de bepaling van deze parameter wordt er gewerkt met karakteristieke waarden (een statistisch vastgestelde waarde met een bepaalde onder- of overschrijdingskans) van de materiaaleigenschappen.

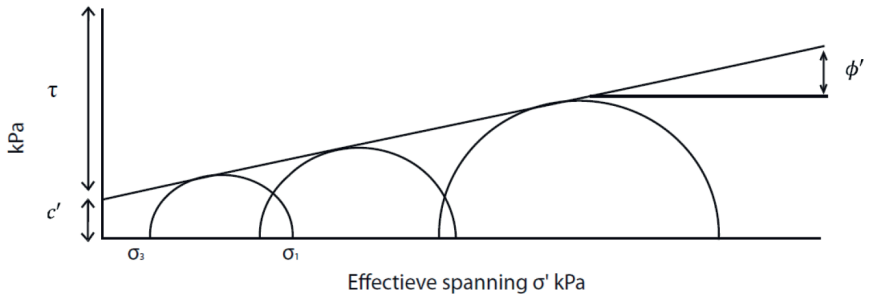
3.4 EFFECTIEVE SCHUIFSTERKTEPARAMETERS

Voor het uitvoeren van een stabiliteitsanalyse wordt gebruik gemaakt van gedraineerde schuifsterkte eigenschappen oftewel effectieve schuifsterkteparameters. De waarden van deze parameters worden met behulp van laboratoriumproeven bepaald. Tegenwoordig worden de effectieve schuifsterkteparameters bepaald door middel van onder andere triaxiaalproeven.

Een voorkomend probleem bij het bepalen van deze parameters is dat de sterkte in sommige gevallen onderschat kan worden. Dit komt doordat de effectieve schuifsterkte parameters bij lage spanningen niet kan worden gemeten. Deze waarden worden geëxtrapoleerd op basis van de gemeten sterkte bij hogere spanningen (Rijkswaterstaat, 2016).

De waardes voor de sterkteparameters zoals de cohesie (c') en de hoek van inwendige wrijving (ϕ') worden gevonden met behulp van de Mohr-Coulomb theorie; door het aanbrengen van een raaklijn langs de geschematiseerde effectieve spanningen die uit de laboratoriumproeven komen. In de cirkel van Mohr staat de effectieve normaal spanning op de horizontale as tegen de schuifspanning op de verticale as zoals weergegeven in Figuur 5. De cirkels worden bepaald door de grootte van de maximaal mogelijke waarde van de verticale spanning (σ_1) bij een zekere horizontale spanning (σ_3) te vinden.

FIGUUR 5 **BEPALING C' EN ϕ' MET CIRKEL VAN MOHR (STOWA, 2012)**



Om de onzekerheden tijdens het bepalen van deze parameters te verdisconteren, wordt gebruik gemaakt van de zogenaamde materiaalfactor. De materiaalfactor is afhankelijk van de grondsoort, maar ook van de beproevingsmethode (STOWA, 2009). Na het toepassen van deze factor wordt er een 'rekenwaarde' van de schuifsterkteparameters bepaald.

TABEL 3 **MATERIAALFACTOR BIJ BOEZEMKADES (STOWA, 2009)**

Grondsoort en parameter			Variatiecoëfficiënt V	γ_m
alle grondsoorten	**volumieke massa nat/droog**	(ρ)		1,0
klei	(TP-CU-5%)			
	- cohesie	(c)	0,45	1,20
	- inwendige wrijving	(tan φ)	0,20	1,15
veen	(TP-CU-5%)			
	- cohesie	(c)	0,80	1,35
	- inwendige wrijving	(tan φ)	0,25	1,15
zand	(TP-CD)			
	- cohesie	(c)	n.v.t.	n.v.t.
	- inwendige wrijving	(tan φ)	0,15	1,15
Samendrukkingsconstanten	- Terzaghi	(C, A)		1,1
	- Buisman-Koppejan	(C_p, C_s)		1,1

TP-CU-5% = triaxiaalproef, geconsolideerd en ongedraineerd, met 2 à 5% vervorming
TP-CD = triaxiaalproef, geconsolideerd en gedraineerd
Bij aantoonbaar lagere variatiecoëfficiënten voor cohesie en inwendige wrijving kunnen aangescherpte materiaalfactoren worden afgeleid. Bijvoorbeeld in het geval van natuurlijke niet-organische klei, waarvoor is aangetoond dat de variatiecoëfficiënten voor cohesie en inwendige wrijving kleiner of gelijk zijn aan respectievelijk $V_c \leq 0{,}275$ en $V\varphi \leq 0{,}15$, geldt $\gamma_{m,c} = 1{,}10$ en $\gamma_{m,tan\varphi} = 1{,}10$. Voor veen waarvoor is aangetoond dat de variatiecoëfficiënten voor cohesie en inwendige wrijving kleiner of gelijk zijn aan respectievelijk $V_c \leq 0{,}45$ en $V_\varphi \leq 0{,}20$, geldt $\gamma_{m,c} = 1{,}20$ en $\gamma_{m,tan\,\varphi} = 1{,}15$.

Hieronder worden de belangrijkste schuifsterkteparameters nog verder toegelicht.

3.4.1 EFFECTIEVE HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING (Φ')

De hoek van inwendige wrijving zegt iets over de mate van wrijving tussen gronddeeltjes. Als de normaalspanning op de grond bij gedraineerd gedrag toeneemt neemt de wrijving tussen de gronddeeltjes ook toe (Rijkswaterstaat, 2016).

De waarde van ϕ' wordt afhankelijk van de grondsoort met een Direct Simple Shear (DSS)-proef of met triaxiaalproeven bepaald. Een DSS-proef wordt in het algemeen gebruikt voor humeuze grondsoorten met een volume gewicht onder de 13 kN/m^2.

Een triaxiaalproef wordt in het laboratorium gedaan door spanning in drie richtingen op een grondmonster uit te oefenen. Dit proces kan op verschillende wijzen uitgevoerd worden. De gebruikte wijze of methode heeft een grote invloed in de uitkomsten van de proef. Het is gebruikelijk om de resultaten van de triaxiaalproef in een regionale proevenverzameling vast te stellen.

3.4.2 EFFECTIEVE COHESIE (*C'*)

Met cohesie wordt de aantrekkingskracht tussen gronddeeltjes bedoeld. Deze parameter is erg belangrijk tijdens een stabiliteitsanalyse en geeft een duidelijk beeld van de sterkte van een grondsoort. De waarden voor *c*' (effectieve cohesie) wordt ook met behulp van onder andere triaxiaalproeven op gestoken grondmonsters bepaald.

De cohesie kan niet rechtstreeks worden gemeten in triaxiaalproeven, maar is het resultaat van een extrapolatie van metingen naar het punt waar de effectieve spanning gelijk is aan nul, in een grafiek van schuifsterkte (y-as) tegen effectieve spanning (x-as) (Rijkswaterstaat, 2016). Bovendien is het erg ingewikkeld om de cohesie bij lage spanningen te bepalen. In dit geval wordt de *c*' afgeleid van de gemeten sterkte bij hogere spanningen.

Daarnaast kan de waarde van *c*' sterk variëren en daarom is het soms erg lastig om de karakteristieke waarde van deze parameter te bepalen. Dit wordt mede veroorzaakt door de heterogeniteit van sommige humeuze grondsoorten zoals veen. Bovendien heeft een kleine verandering in de raaklijn van de proevenresultaten (aanpassen ϕ) een grote impact op de resulterende cohesiewaarde. Door deze grote spreiding in de resultaten van de proeven voor de cohesie bepaling, wordt er een hoge standaardafwijking in de gemiddelde waarden van de cohesie verwerkt. Deze hoge waarde voor de standaardafwijking van de cohesie leidt tot zeer lage karakteristieken waarden. Hierdoor worden in de stabiliteitsberekeningen vaak lage waarden voor de cohesie gebruikt.

3.5 BELASTINGEN

De belastingen op een waterkering kunnen permanent of tijdelijk zijn.

- Permanent:
  - Eigen gewicht
  - Bodemdaling ten gevolge van onttrekking van o.a. grondwater
- Tijdelijk:
  - Hydraulische belastingen
  - Polderpeil, boezempeil
  - Overige belastingen (wind, verkeer, etc.)

Hieronder worden de belangrijkste belastingen voor een stabiliteitsanalyse verder toegelicht.

3.5.1 HYDRAULISCHE BELASTINGEN

Voor de stabiliteitsanalyse is het essentieel om de (grond) waterstanden te bepalen. Voor STBU is de combinatie van een lage buitenwaartse waterstand en een hoge grondwaterstand in de waterkering bepalend.

Voor het beoordelen van de stabiliteit van regionale waterkeringen zijn de volgende hydraulische parameters van belang:

- Waterstanden bij de norm (streefpeil)
- Gemiddelde en lage buitenwaterstanden
- Waterstandsverloop bij maatgevende belasting
- Golfhoogten, golfperiodes, golfrichtingen (windgolven, maar ook scheepsgolven) in verband met overslagdebiet

3.5.2 VERKEERSBELASTINGEN

De aanwezigheid van een verkeerbelasting op een waterkering kan veel invloed hebben op de stabiliteit, omdat deze belasting van invloed is op het momentenevenwicht van de waterkering (Rijkswaterstaat, 2016). De verkeersbelasting op een regionale waterkering kan variëren tussen 0 kN/m^2, 5 kN/m^2 en 13 kN/m^2. Sommige waterschappen zoals bijvoorbeeld het HHNK, rekenen met 5 kN/m^2 voor groene kades, en met 13 kN/m^2 voor verharde kades.

4

ANALYSE STBU (GENERIEK DWARSPROFIEL)

In dit hoofdstuk wordt de STBU berekening zorgvuldig geanalyseerd. Hierbij wordt onder andere de invloed van de verschillende uitgangspunten in kaart gebracht aan de hand van een gevoeligheidsanalyse. In hoofdstuk 3 van dit rapport is al aangegeven wat de parameters zijn die gebruikt worden als uitgangspunt voor de STBU berekening.

Om de invloed van de verschillende uitgangspunten van de berekening op de buitenwaartse stabiliteit van een waterkering te analyseren, is er een generiek dwarsprofiel voor STBU in D-Geostability opgebouwd. Dit profiel is gebaseerd op het Sectie 3 profiel van de polder Heerhugowaard uit het rapport 'Veiligheidstoets Boezemkades Heerhugowaard van het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier', (Kwakman & Haanstra, 2015). Sommige uitgangspunten en parameters van deze kade zijn aangepast om de kade representatief te maken voor de rest van West-Nederland.

Voor de analyse van de STBU uitgangspunten is er uitgegaan van een val van het waterpeil en de natte situatie, maatgevend voor STBU. De aanpassingen bij de kade die gebruikt zijn voor de analyses, zijn gemaakt volgens de leidraad toetsen regionale waterkeringen (2015) en aanvullende gegevens die voor deze studie bij het HHNK zijn aangevraagd.

Voor de schematisering van de 'kade voor analyse' zijn de onderstaande uitgangspunten toegepast:

GEOMETRIE

De geometrie van de kade is gebaseerd op de geometrie van het Sectie 3 profiel van de polder Heerhugowaard van het rapport (Veiligheidstoets Boezemkaden Heerhugowaard, 2015). Om de geometrie wat simpeler en representatiever te maken is er voor gekozen om het buitentalud aan te passen naar een gelijk aflopend talud met een helling 1:1,5.

STIJGHOOGTE

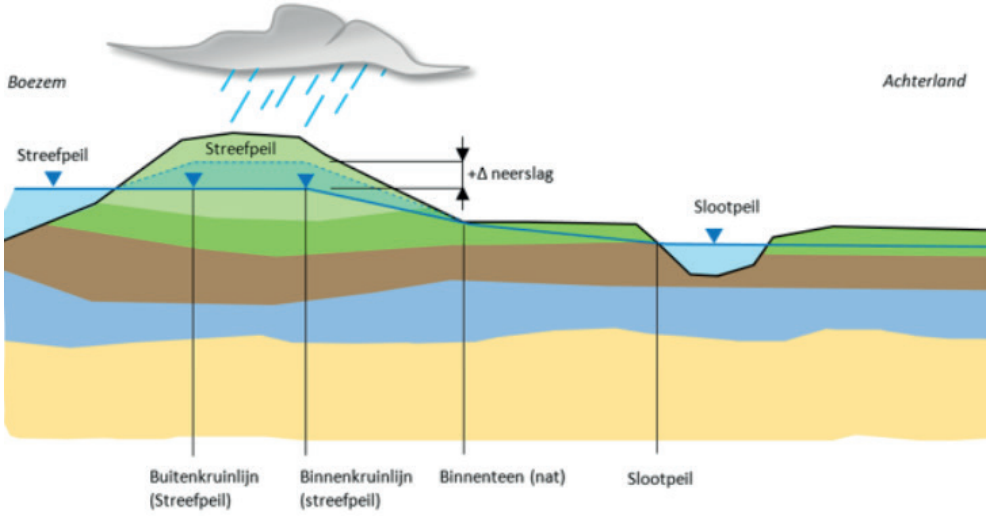
Geen intredeweerstand, lineair verloop naar polderpeil = -3,55 m NAP.

FREATISCHE LIJN

Voor de ligging van de freatische lijn is het maatgevend streefpeil gehanteerd, dit bedraagt -0,25m NAP. Het toetspeil voor deze kade bedraagt -0,60 m NAP. Het polderpeil bedraagt -3,55 m NAP.

De ligging van de freatische lijn in de boezemkade is geschematiseerd volgens de uitgangspunten van het HHNK. Uitgangspunt voor de schematisering voor de beoordeling van STBU: maatgevende freatische lijn in de "natte" situatie bij streefpeil. Er is dus uitgegaan van een veilige schematisering van de freatische lijn bij streefpeil zoals weergegeven in Figuur 6.

FIGUUR 6 INITIËLE VEILIGE SCHEMATISERING FREATISCHE LIJN BIJ STREEFPEIL (HHNK, 2018)



BODEMOPBOUW EN GEOTECHNISCHE GRONDPARAMETERS

Voor de analyse is er gekozen voor een kade die bestaat uit humeuze klei met daarin een zandcunet op de kruin. De eerste laag onder de waterkering bestaat uit ongeveer 0,8 m veen. Hierna volgt een laag van ongeveer 3m humeuze klei. Daaronder bevinden zich verschillende zandpakketten tot aan het pleistoceen zand. Deze bodemopbouw is gekozen om de kade representatief te maken voor West-Nederland.

De geotechnische eigenschappen van het in de kade aanwezige zand, die voor de berekeningen zullen worden toegepast, zijn gehaald uit Tabel b2 van NEN-EN9997-1. Deze grondsterkte parameters van zand zijn weergegeven in Tabel 4.

TABEL 4 GEOTECHNISCHE PARAMETERS ZAND VOLGENS NEN-EN997-1:2011

Grondsoort	γnat/γdroog [kN/m3]	W [%]	φgem [°]	Cgem [kPa]	φkar [°]	Ckar [kPa]	γm;φ	γm;C	φreken [°]	Creken [kPa]
Zand_dijkmateriaal	20,0/18,0	-	-	-	30	0	1,20	1,5	25,7	0
Calais zand	20,0/18,8	-	-	-	30	0	1,2	1,5	25,7	0
Calais zand, kleiig	20,0/18,9	-	-	-	27	0	1,2	1,5	23,0	0

De gehanteerde geotechnische eigenschappen voor de overige in de kade aanwezige grondsoorten, die voor de berekeningen zullen worden toegepast, zijn gehaald uit de 'Regionale proevenverzameling Noord-Holland versie 6.0' (Kwakman, 2014). De gemiddelde waarden, karakteristieke waarden en rekenwaarden zijn berekend. Deze waarden gelden als invoer voor de D-Geostability berekeningen van de STBU.

De geotechnische parameters, versie 6.0 met zijn karakteristieke waarden en rekenwaarden zijn weergegeven in Tabel 5.

TABEL 5 GEOTECHNISCHE PARAMETERS, VERSIE 6.0 (KWAKMAN, 2014)

Grondsoort	γnat/γdroog [kN/m3]	W [%]	φgem [°]	Cgem [kPa]	φkar [°]	Ckar [kPa]	γm;φ	γm;C	φreken [°]	Creken [kPa]
Klei_dijkmateriaal h	13,9/6,9	101	30,8	4,8	30,7	1,1	1,15	1,2	27,3	0,9
Klei_dijkmateriaal z_s	16,7 / 11,5	50	38,5	2,6	38,3	0	1,15	1,2	34,5	0
Klei_bovenveen s_z_h	15,4 / 9,3	78	36,8	3,9	36,5	0	1,15	1,2	32,8	0
Hollandveen_o_dijk – DM	10,0 / 1,8	479	25,3	3,5	24,2	1,5	1,15	1,2	21,4	1,3
Hollandveen_o_dijk – VW (NW)	10,0 / 1,5	593	23,9	4,7	23,7	2,6	1,15	1,2	20,9	2,2
Hollandveen_o_dijk – VW (ZO)	10,0 / 1,6	557	22,7	4,3	22,3	1,6	1,15	1,2	19,6	1,3
Hollandveen_o_dijk – NZ_kanaal	10,0 / 2,2	385	29,1	7	29,7	0	1,15	1,2	26,4	0
Hollandveen_n_dijk	10,0 / 1,4	672	25,3	1,4	25,2	0	1,15	1,2	22,2	0
Kleiig veen / gyttja	11,5 / 4,0	198	23,8	4,8	23,7	2,5	1,15	1,2	20,9	2,1
Klei_onderveen s_z_h_o_dijk	15,4 / 9,0	78	31,8	5,1	31,7	2,9	1,15	1,2	28,2	2,4
Klei_onderveen s_z_h_n_dijk	15,3 / 9,0	72	30	4,3	30	2,1	1,15	1,2	26,7	1,7
Klei_onderveen s_h2_o_dijk	13,9 / 6,9	103	31,3	3,7	30,7	1,1	1,15	1,2	27,3	0,9
Klei_onderveen s_h2_n_dijk	14,0 / 7,1	102	30,4	3,4	30	1,1	1,15	1,2	26,7	0,9
Klei_onderveen s_h2 <-5,5m NAP	14,1 / 7,7	89	21,1	4,1	20,5	0	1,15	1,2	18	0
Klei_wadzanden_gelaagd o_dijk	16,3 / 10,8	54	27,5	5,5	26,1	0,9	1,15	1,2	23,1	0,8
Bijmenging (k2=matig kleiig, s=siltig , z=zandig, h=humeus) Locatie (o= onder de dijk, n= naast de dijk) Bij het Hollandveen onder de dijk is daarnaast nog onderscheid gemaakt tussen DM= droogmakerij, VW= veenweidegebied en NZ_kanaal = Noordzeekanaal										

Het HHNK heeft vorige jaar een nieuwe versie van het rapport 'Regionale proevenverzameling Noord-Holland' opgesteld. Het betreft de versie 7.04 (Kwakman, 2019). In dit rapport van het HHNK zijn naast de geotechnische parameters ook nieuwe ondergrenzen afgeleid op basis van de eurocode voor drie grondsoorten. De geotechnische parameters versie 7.04 met ondergrenzen volgens NEN-EN9997-1 die gebruikt worden voor het HHNK zijn in Tabel 6 weergegeven.

TABEL 6 GEOTECHNISCHE PARAMETERS ONDERGRENZEN VOLGENS NEN-EN9997-1 (KWAKMAN, 2019)

Grondsoort	γnat [kN/m3]	W [%]	Conderg.; kar[kPa]	γm;C	Conderg.; reken[kPa]
Klei_dijkmateriaal h	13,9	101	1	1,2	0,8
Klei_dijkmateriaal z_s	16,7	50	5	1,2	4,2
Klei_bovenveen s_z_h	15,4	78	5	1,2	4,2
Hollandveen_o_dijk – DM	10	479	5	1,2	4,2
Hollandveen_o_dijk – VW (NW)	9,9	593	5	1,2	4,2
Hollandveen_o_dijk – VW (ZO)	9,8	557	5	1,2	4,2
Hollandveen_o_dijk – NZ_kanaal	9,9	385	5	1,2	4,2
Hollandveen_n_dijk	9,8	672	2,5	1,2	2,1
Kleiig veen / gyttja	11,5	198	2,3	1,2	1,9
Klei_onderveen s_z_h_o_dijk	15,4	78	5	1,2	4,2
Klei_onderveen s_z_h_n_dijk	15,3	72	5	1,2	4,2
Klei_onderveen s_h2_o_dijk	13,9	103	1	1,2	0,8
Klei_onderveen s_h2_n_dijk	14	102	1	1,2	0,8
Klei_onderveen s_h2 <-5,5m NAP	14,1	89	1	1,2	0,8
Klei_wadzanden_gelaagd o_dijk	16,3	54	1	1,2	0,8
Bijmenging (k2=matig kleiig, s=siltig , z=zandig, h=humeus) Locatie (o= onder de dijk, n= naast de dijk) Bij het Hollandveen onder de dijk is daarnaast nog onderscheid gemaakt tussen DM= droogmakerij, VW = veenweidegebied en NZ_kanaal = Noordzeekanaal					

VERKEERSBELASTING

Voor de kade is gekozen om met een verkeersbelasting van 13 kN/m^2 over een breedte van 2,50 m te rekenen. Deze belasting is representatief voor kades waar sprake is van een wegverharding.

FIGUUR 7 WATERKERING MET EEN WEGVERHARDING (HEERHUGOWAARD – HUIGENDIJK)

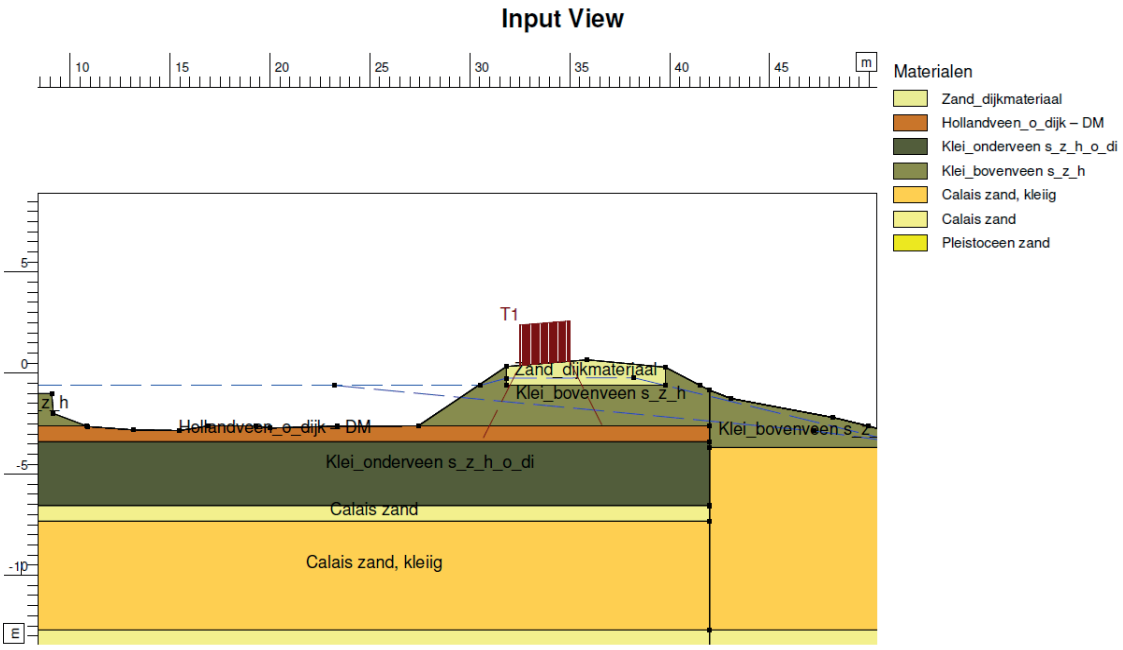


SCHEMATISERINGSFACTOR

Voor de analyseberekeningen wordt een schematiseringsfactor van 1,05 toegepast.

Op basis van de bovenstaande uitgangspunten is in Figuur 8 de geschematiseerde ‘kade voor de analyse’ weergegeven.

FIGUUR 8 SCHEMATISERING ‘KADE VOOR ANALYSE’ (D-GEOSTABILITY)



4.1 INVLOED COHESIE OP STBU

Om de invloed van de cohesie op de STBU van een waterkering te analyseren is het van belang om eerst te kijken naar de manier hoe de STBU berekening wordt uitgevoerd. Zoals eerder in dit rapport vermeld wordt de STBU berekening met behulp van het programma D-Geostability uitgevoerd. Een van de meest gebruikte glijvlakmodel om de stabiliteit berekening uit te voeren is het Bishop glijvlakmodel. Om de stabiliteitsberekening te kunnen realiseren, verdeelt D-Geostability het grondlichaam in lamellen. De verschillende grond-

parameters, effectieve spanningen en waterspanningen worden voor elke afzonderlijke lamel berekend.

De stabiliteit van een waterkering is afhankelijk van onder andere de schuifspanningen op de kering. De schuifsterkte van een waterkering neemt toe bij een toename van de effectieve spanningen. De mate voor de schuifsterkte kan dus worden bepaald door middel van de schuifspanning (shear stress) berekening die, voor regionale waterkeringen vaak, gedaan wordt volgens het Mohr-Coulomb model, met de volgende formule:

$$\tau_i = c_i + \sigma'_{n;i} . \tan \varphi_i \qquad [4.1]$$

Waarin:

c_i is de cohesie op de bodem van lamel *i*, in kN/m^2;

$\sigma'_{n;i}$ is de effectieve normaalspanning op de bodem van lamel *i*, in kN/m^2;

φ_i is de hoek van inwendige wrijving van de grond op de bodem van de lamel *i*, in graden.

In de formule komt naar voren dat de schuifsterkteparameters (*c* en ϕ) erg gevoelige parameters zijn in de schuifspanning berekening. De schuifspanning op de waterkering heeft een grote invloed op de uitkomst van de STBU berekening. Hierdoor kan een gevoeligheidsanalyse naar de grondsterkteparameters van de berekening veel inzicht geven in de parameterwaarden die benodigd zijn om te voldoen aan de STBU.

Uit de formule valt ook te concluderen dat de cohesie van de grond een directe invloed heeft op de uitkomsten van de berekende schuifspanning. Mogelijke optimalisaties van cohesiewaarde die in de berekening wordt toegepast kan dus van grote invloed zijn op de uitkomst van de STBU berekening.

Aan de andere kant, zoals in paragraaf 3.4 gemeld, is de bepaling van de cohesie bij lage spanningen erg lastig. De huidige werkwijze om de cohesie te bepalen, leidt in de praktijk tot erg lage waarden voor deze parameter. Door de grote spreiding van de cohesiewaarden bij een grondsoort wordt er, vanuit de statistiek, een hoge standaardafwijking in de gemiddelde waarden van de cohesie berekend. Deze hoge waarden voor de standaardafwijking leiden tot zeer lage karakteristieke waarden.

Hierdoor is de karakteristieke waarde voor de cohesie die in de stabiliteitsberekeningen wordt toegepast in veel gevallen maximaal de helft tot zelfs maar een klein deel van de berekende gemiddelde waarde.

Deze statistische verdiscontering over de waarde van de cohesie is heel duidelijk te zien in de proevenverzameling versie 6.0 van het HHNK. In Tabel 7 zijn de gemiddelde waarde en de karakteristieke waarde voor de cohesie van sommige grondsoorten in de regionale proevenverzameling versie 6.0 van het HHNK te zien.

TABEL 7 VERGELIJKING GEMIDDELDE WAARDE – KARAKTERISTIEKE WAARDE VOOR DE COHESIE

Grondsoort	γnat/γdroog [kN/m3]	φgem [°]	Cgem [kPa]	φkar [°]	Ckar [kPa]	γm;φ	γm;C	φreken [°]	Creken [kPa]
Klei_dijkmateriaal h	13,9/6,9	30,8	4,8	30,7	1,1	1,15	1,2	27,3	0,9
Klei_dijkmateriaal z_s	16,7 / 11,5	38,5	2,6	38,3	0	1,15	1,2	34,5	0
Klei_bovenveen s_z_h	15,4 / 9,3	36,8	3,9	36,5	0	1,15	1,2	32,8	0
Hollandveen_o_dijk – DM	10,0 / 1,8	25,3	3,5	24,2	1,5	1,15	1,2	21,4	1,3
Hollandveen_o_dijk – NZ_kanaal	10,0 / 2,2	29,1	7	29,7	0	1,15	1,2	26,4	0
Hollandveen_n_dijk	10,0 / 1,4	25,3	1,4	25,2	0	1,15	1,2	22,2	0
Kleiig veen / gyttja	11,5 / 4,0	23,8	4,8	23,7	2,5	1,15	1,2	20,9	2,1
Klei_onderveen s_z_h_o_dijk	15,4 / 9,0	31,8	5,1	31,7	2,9	1,15	1,2	28,2	2,4
Klei_wadzanden_gelaagd o_dijk	16,3 / 10,8	27,5	5,5	26,1	0,9	1,15	1,2	23,1	0,8

Daarnaast wordt bij de afleiding van de rekenwaarde van de cohesie nog de materiaalfactor verdisconteerd. De sterkte van cohesieve grondsoorten als veen of klei worden in de praktijk op deze manier soms onderschat. Hierdoor wordt in sommige gevallen gerekend met een cohesie van nul terwijl er wel wat cohesie in de grond aanwezig is.

Bij de schuifspanning berekening formule [4.1] is te zien dat de cohesie in theorie veel invloed heeft op de sterkte van een waterkering. Om deze invloed van de cohesie op de uitkomsten van de buitenwaartse stabiliteitsberekeningen in kaart te brengen is er een gevoeligheidsanalyse gerealiseerd met behulp van het programma D-Geostability, Bishop methode.

Met de kade die aan het begin van dit hoofdstuk is toegelicht (zie Figuur 8) zijn er verschillende berekeningen voor de STBU uitgevoerd. In deze berekeningen is de waarde van de cohesie van het kademateriaal, 'Klei_bovenveen s_z_h', het enige uitgangspunt dat varieert. De cohesie van het kademateriaal in de proevenverzameling Noord-Holland versie 6.0 bedraagt 0 kN/m^2. Met deze cohesie als beginwaarde zijn er verschillende STBU berekeningen uitgevoerd waarbij de cohesie van het kademateriaal met stappen van 0,5 kN/m^2 toeneemt. Daarnaast is er gekeken naar de STBU van de kade bij het toepassen van de ondergrenzen voor de sterkteparameters zoals voorgesteld in het rapport van Arcadis voor het HHNK (Kwakman, 2019).

De volgende analyses zijn voor de 'kade voor analyse' uitgevoerd:

1. Kade voor analyse, versie 6.0 + 0,0 kN/m^2 cohesie
2. Kade voor analyse, versie 6.0 + 0,5 kN/m^2 cohesie Klei_bovenveen s_z_h
3. Kade voor analyse, versie 6.0 + 1,0 kN/m^2 cohesie Klei_bovenveen s_z_h
4. Kade voor analyse, versie 6.0 + 1,5 kN/m^2 cohesie Klei_bovenveen s_z_h
5. Kade voor analyse, versie 6.0 + 2,0 kN/m^2 cohesie Klei_bovenveen s_z_h
6. Kade voor analyse, versie 6.0 + 2,5 kN/m^2 cohesie Klei_bovenveen s_z_h
7. Kade voor analyse, versie 6.0 + 3,0 kN/m^2 cohesie Klei_bovenveen s_z_h
8. Kade voor analyse, versie 6.0 + 3,5 kN/m^2 cohesie Klei_bovenveen s_z_h
9. Kade voor analyse, versie 7.04 met ondergrenzen voor Klei_bovenveen s_z_h
10. Kade voor analyse, versie 7.04 met ondergrenzen voor alle grondsoorten

Voor de analyses is er uitgegaan van een veilige kade bij een stabiliteitsfactor van 1,05. Deze eis komt veel voor in vergelijkbare kades en is opgebouwd uit de minimale vereiste IPO-klasse vermenigvuldigt met de schematiseringsfactor. Schadefactor IPO-klasse V = 1; schematiseringsfactor = 1,05.

De resultaten van de 10 analyses uitgedrukt in een veiligheidsfactor zijn in Tabel 8 weergegeven. Daarnaast is in deze tabel ook de toename van de veiligheidsfactor per stap en de totale toename van de veiligheidsfactor te zien.

Een overzicht van de kritische cirkel en veiligheidsfactor van elke analyse zoals gepresenteerd in D-Geostability is te zien in Bijlage I.

TABEL 8 **VEILIGHEIDSFACTOREN TOENAME BIJ ELKE ANALYSE VOOR DE 'KADE VOOR ANALYSE'**

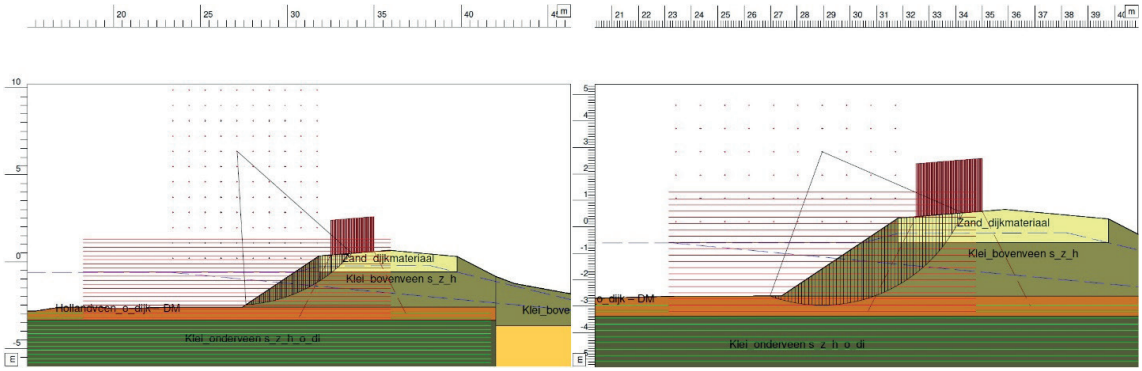
Kade voor analyse	SF	Toename per stap		Toename totaal	
1. Versie 6.0	**0,77**		%		%
2. Versie 6.0 +0,5	**0,85**	0,08	**10,4**	0,08	**10,4**
3. Versie 6.0 +1	**0,90**	0,05	**6,5**	0,13	**16,9**
4. Versie 6.0 +1,5	**0,92**	0,02	**2,6**	0,15	**19,5**
5. Versie 6.0 +2	**0,95**	0,03	**3,9**	0,18	**23,4**
6. Versie 6.0 +2,5	**0,97**	0,02	**2,6**	0,2	**26,0**
7. Versie 6.0 +3	**1,00**	0,03	**3,9**	0,23	**29,9**
8. Versie 6.0 +3,5	**1,02**	0,02	**2,6**	0,25	**32,5**
9. Versie 7.04 +Ondergrenzen Klei_b. s_z_h	**1,05**	0,03	**3,9**	0,28	**36,4**
10. Versie 7.04 +Ondergrenzen alle GS	**1,28**	0,23	**29,9**	0,51	**66,2**

In de resultaten is heel duidelijk te zien dat de cohesie van het kadematerialaal een sterke invloed heeft op de berekende stabiliteitsfactor. Als de cohesie van het kadematerialaal toeneemt, neem de stabiliteitsfactor ook toe.

Opvallend aan de resultaten is dat bij analyse 2 de eerste stap bij een toename van 0,5 kN/m^2; de toename in de veiligheidsfactor meer dan 10 procent bedraagt. Een toename in deze mate komt verder niet meer voor. Dit zou verklaard kunnen worden door het verloop van de kritische cirkel bij de eerste twee analyses. Bij deze analyses gaat de kritische cirkel alleen door het kadematerialaal heen. Dit betekent dat de stabiliteitsfactor alleen afhangt van de sterkteparameters van het kadematerialaal. Omdat hier de cohesie van het kadematerialaal van 0 tot 0,5 kN/m^2 verandert, is een hoge toename bij de veiligheidsfactor wel te verwachten. Bij de andere analyses (3 t/m 8) gaat de kritische cirkel ook door de eerste grondlaag onder het kadematerialaal heen. De waarden voor de cohesie van deze eerste grondlaag onder de kade verandert niet in de eerste 8 analyses.

In Figuur 9 is de kritische cirkel van analyse 1 (die alleen door het kadematerialaal heen gaat) en analyse 3 (die ook door de eerste grondlaag onder het kadematerialaal heen gaat) te zien. Deze cirkels zijn representatief voor de situaties die hierboven zijn beschreven. Een overzicht van alle kritische cirkels (analyse 1 t/m10) is te zien in Bijlage I.

FIGUUR 9 **KRITISCHE CIRKEL ANALYSE 1 EN ANALYSE 3 (D-GEOSTABILITY)**



De toename in de veiligheidsfactor tussen analyse 1 Versie 6.0 en analyse 8 Versie 6.0 +3,5kN/m^2 cohesie 'Klei_bovenveen s_z_h' bedraagt 32,5 procent. Dit percentage kan voor veel kades het verschil maken tussen de technische afkeuring en goedkeuring van de kade. Bij de kade, die gebruikt is voor de analyse, is in totaal bij een toename van 3,5 kN/m^2 cohesie van het kadematerialaal, een toename van de veiligheidsfactor van 0,26. Dit betekent dat een vergelijkbare boezemkade die technisch is afgekeurd met een veiligheidsfactor tussen 0,79 en 1,04; goedgekeurd zou kunnen worden na het toepassen van deze hogere waarde voor de cohesie van het kadematerialaal.

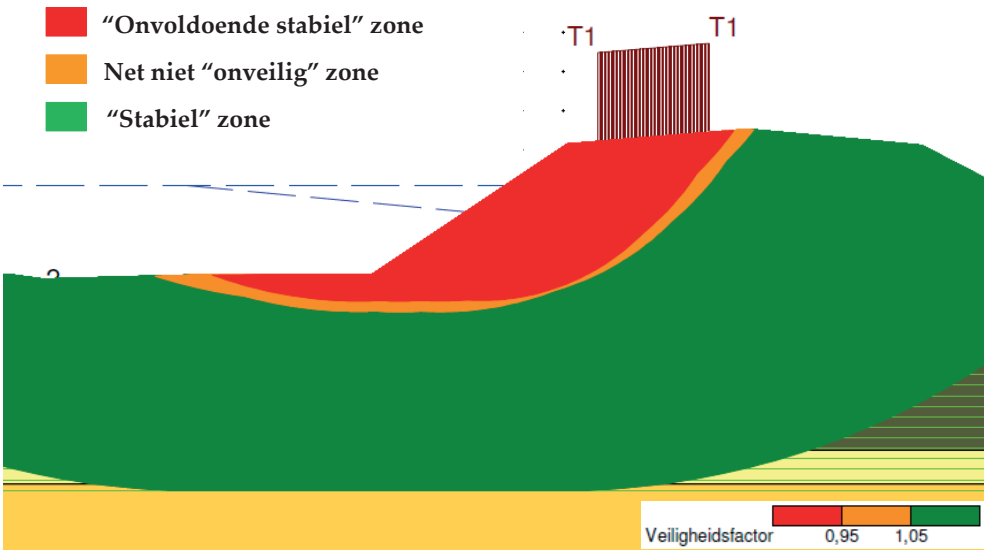
Volgens de ondergrenzen van de sterkteparameters van het HHNK zou een cohesie van 3,5 kN/m^2 voor de grondsoort 'Klei_bovenveen s_z_h' alsnog een veilige aanname zijn. Volgens de ondergrenzen op basis van NEN-EN9997-1, zal de cohesie van deze grondsoort 4,2 kN/m^2 bedragen.

De benodigde cohesie om een vergelijkbare kade te laten voldoen aan een STBU eis van SF= 1,05 is dus in dit geval niet een extreme hoge waarde die veel van de cohesie waarden in de Tabel b2 van NEN-EN9997-1 afwijkt.

Bij het toepassen van een cohesie van 4,2 kN/m^2, als voorgesteld in de ondergrenzen van het HHNK, voor de grondsoort 'Klei_bovenveen s_z_h' voldoet de stabiliteitsfactor precies aan de IPO-klasse V eis van 1,05. En als de ondergrenzen voor alle grondsoorten worden toegepast, is de veiligheidsfactor van de kade 1,28. Deze toename in de veiligheidsfactor bedraagt 66,2 procent. Voor de 'kade voor analyse' zal het toepassen van deze waarden leiden tot een kade die aan de veiligheidseis voldoet, met een hoge stabiliteit uit het technische oordeel. Dit beeld uit het technische oordeel komt meer overeen met het sterkte beeld dat uit het beheerdersoordeel van veel kades in Nederland komt. Het verschil tussen de veiligheidsfactor zonder en met ondergrenzen voor alle grondsoorten bedraagt 0,51.

Naast de veiligheidsfactor is er ook gekeken naar de 'Safety overview' dat door D-Geostability wordt gepresenteerd. Dit veiligheidsoverzicht toont het grondgebied met een veiligheidsfactor binnen een bepaald bereik. Voor deze analyse zijn de grenzen voor het veiligheidsoverzicht tussen 0,95 en 1,05 ingesteld. Dit betekent dat het grondgebied met een veiligheidsfactor boven 1,05 als stabiel (veilig) wordt gezien (groen gebied) en het grondgebied met een veiligheidsfactor onder 0,95 als onvoldoende stabiel (onveilig) is gezien (rood gebied). Zie Figuur 10. Tussen 0,95 en 1,05 is de veiligheid van de kade beperkt maar binnen deze grenzen zou de kade voor bijvoorbeeld de IPO-klasse III eis nog net niet falen (oranje gebied). De stabiliteitsfactoren van 0,95 en 1,05 komen respectievelijk overeen met de IPO-klasse III en V bij het toepassen van een schematiseringsfactor van 1,05.

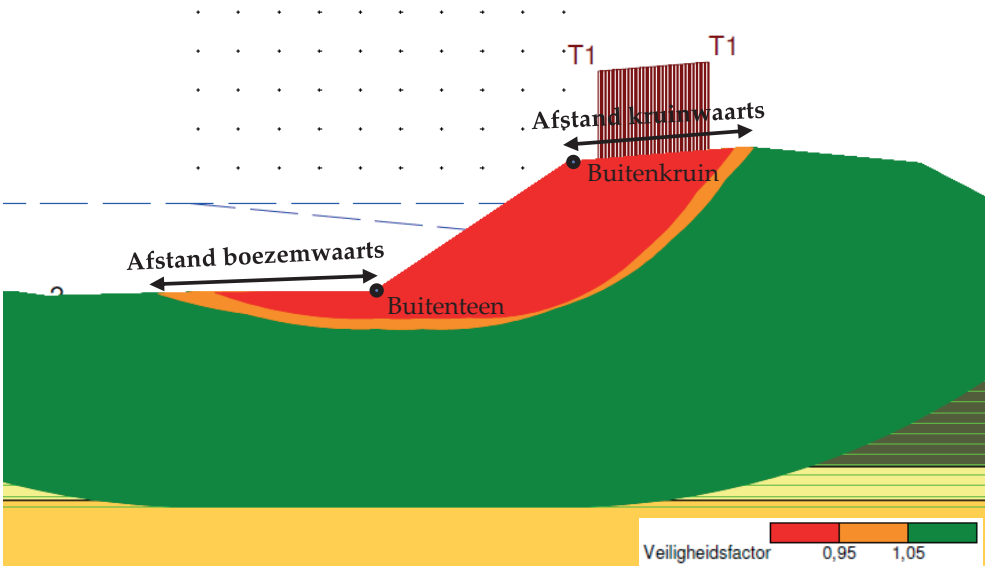
FIGUUR 10 SAFATY OVERVIEW ZOALS WEERGEGEVEN IN D-GEOSTABILITY



In het veiligheidsoverzicht is duidelijk te zien welk grondgebied van de kade het meest en het minst gevoelig is voor instabiliteit. Op deze manier kan er extra duidelijkheid worden gegeven over de invloed van de gebruikte waarden voor de cohesie van het kadematerieal op de stabiliteit van de kade. Een analyse naar het veiligheidsoverzicht kan ook van belang zijn tijdens bijvoorbeeld de beoordeling van een dijklichaam op basis van de restbreedte methode waarbij geanalyseerd wordt welke grondgebied van de kade stabiel is.

Om de grootte van de instabiele zone te beschrijven is in het veiligheidsoverzicht van de verschillende analyses gekeken naar de ligging van het intrede- en uittreedpunt van het instabiele gebied. Zo is de afstand tussen de buitenkruin en het intredepunt verder 'kruinwaarts' en de afstand tussen de buitenteen en het uittreedpunt verder 'boezemwaarts' gemeten en geanalyseerd zoals weergegeven in Figuur 11.

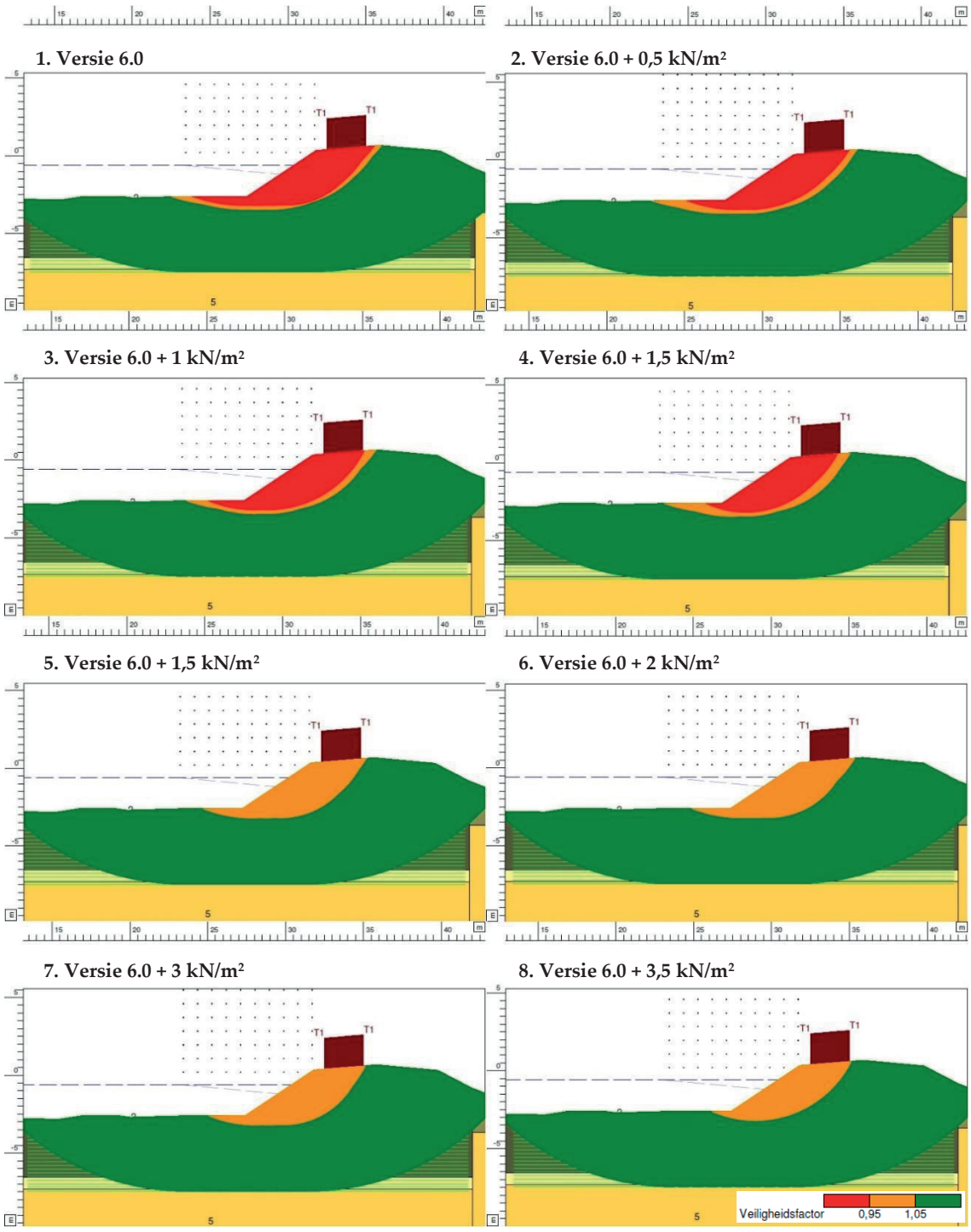
FIGUUR 11 GEMETEN AFSTANDEN VOOR VEILIGHEIDSOVERZICHT ANALYSE



Het veiligheidsoverzicht van de analyses 1 tot en met 8 is in Figuur 12 weergegeven. Hierin zijn de veiligheidsoverzicht plaatjes van de eerste 8 analyses in volgorde naast elkaar gezet. Vanaf analyse 9 voldoet de kade aan de voorgestelde eis van 1,05.

Het veiligheidsoverzicht van elke analyse zoals gepresenteerd in D-Geostability is te zien in Bijlage II.

FIGUUR 12 **VEILIGHEIDSOVERZICHT ANALYSES 1 T/M 8 – INVLOED COHESIE OP STBU**



In het veiligheidsoverzicht van de analyses is te zien dat de onveilige rode en oranje gebieden, per stap steeds kleiner worden. Dit bevestigt de trend bij de vorige analyse naar stabiliteitsfactor en de sterkte van de kade. Deze terugloop in de grote van het rode gebied betekent dat de sterkte van de kade toeneemt bij een stijging van de ingevoerde waarde voor de cohesie van het dijkmateriaal. Hoewel een groei in percentage hier moelijker te bepalen is dan met de stabiliteitsfactor, is wel te zien dat er een grote verandering is in de grootte van het veilige gebied tussen de eerste en het laatste overzicht.

Er is gekeken naar het verschil bij het intredepunt van het oranje gebied bij de kruin oftewel 'kruinwaarts' tussen analyse 1 en 8. Dit verschil bedraagt iets meer dan 1 meter. Dit betekent dat het onveilige gebied bij de kruin ongeveer 1 meter kleiner is geworden. Deze verandering kan het verschil maken tussen de afkeuring of goedkeuring van een kade, bij het toepassen van de zogenaamde restbreedtebenadering. Hierbij wordt geanalyseerd of er na het optreden van een afschuiving voldoende kruinbreedte resteert. Het verschil bij het intredepunt van het oranje gebied bij de buitenteen van de kade; 'boezemwaarts', bedraagt iets meer dan 3,5 meter. Hierdoor is te concluderen dat het toepassen van hogere waarden voor de cohesie in de berekeningen zorgt voor een vermindering in de grootte van het onveilig gebied van een boezemkade.

4.1.1 INVLOED COHESIE OP STBU VAN HOGERE KADES

In de voorgaande analyse, invloed van cohesie op de buitenwaartse stabiliteit, is gekeken naar boezemkades met een kleine waakhoogte (hoogte van de kering boven de waterspiegel in de boezem). Naast dit soort kades zijn er, in sommige gebieden van Nederland, ook hogere regionale keringen waarbij de waakhoogte aanzienlijk groter is (voornamelijk vanwege hogere golven door wind of scheepvaart). Dit is onder andere het geval bij sommige waterkeringen langs regionalen rivieren, meren en brede kanalen.

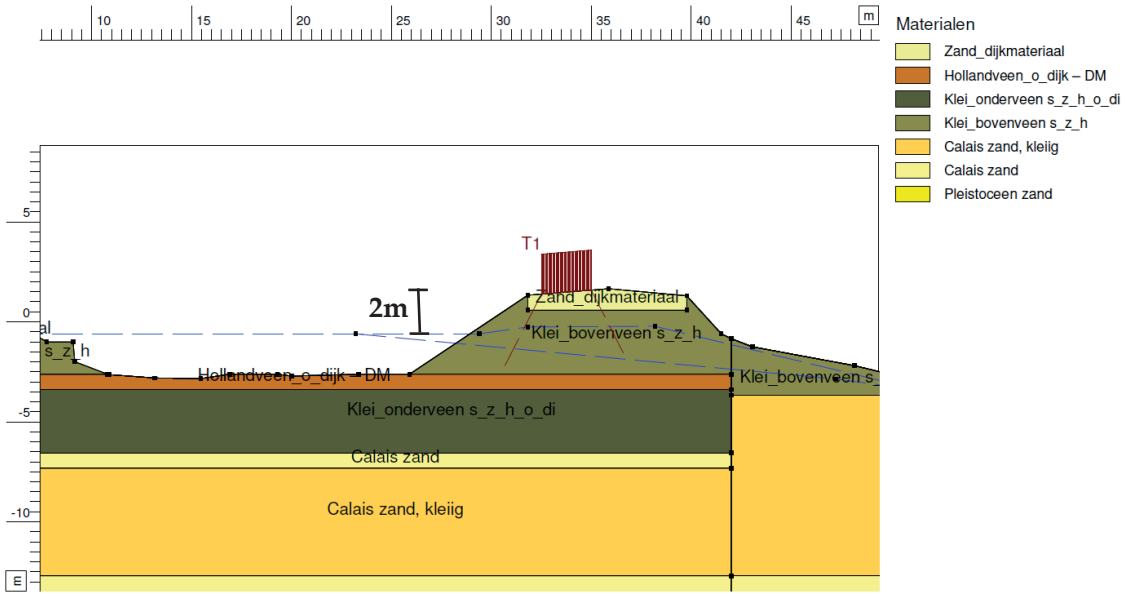
FIGUUR 13 WATERKERING LANGS EEN REGIONALE RIVIER (STOWA, 2007)



In de formule [4.1] uit paragraaf 4.1. is te zien dat de schuifsterkte (τ) niet alleen afhangt van de cohesie maar ook van andere factoren zoals de effectieve spanningen (σ') en de hoek van inwendige wrijving (ϕ). Bij regionale keringen met een grotere waakhoogte zijn de effectieve normaalspanningen veel hoger dan bij kades met een kleine waakhoogte.

Om te bepalen of de invloed van de cohesie op dit soort 'hogere kades' net zo groot is als bij de boezemkade van de vorige analyse, is er een gevoeligheidsanalyse met een nieuw kadeprofiel gemaakt. De algemene parameters zoals de waterhoogte, waterspanningen en belastingen van de kering zijn overgenomen van de kade die aan het begin van dit hoofdstuk is beschreven. De waakhoogte van deze 'hogere kade' is twee meter.

FIGUUR 14 **SCHEMATISERING 'HOGERE KADE' (D-GEOSTABILITY)**



Met dit kadeprofiel, representatief voor wat 'hogere kades', zijn net als bij de vorige analyse een aantal STBU berekeningen met het programma D-Geostability, Bishop methode uitgevoerd. Om specifiek te kijken naar de invloed van de cohesie van het kademateriaal is bij deze berekeningen de waarde van de cohesie van het materiaal, 'Klei_bovenveen s_z_h', het enige uitgangspunt dat varieert. De cohesie van het kademateriaal in de proevenverzameling Noord-Holland versie 6.0 bedraagt 0 kN/m^2. Met deze cohesie als beginwaarde zijn er verschillende STBU berekeningen uitgevoerd waarbij de cohesie van het kademateriaal met stappen van 0,5 kN/m^2 toeneemt. Daarnaast is er net als bij de vorige analyse ook gekeken naar de STBU van de kade bij het toepassen van de ondergrenzen voor de grondsterkteparameters zoals voorgesteld door het HHNK.

De volgende analyses zijn voor de 'hogere kade' uitgevoerd:

1. Hogere kade, versie 6.0 + 0,0 kN/m2 cohesie
2. Hogere kade, versie 6.0 + 0,5 kN/m^2 cohesie Klei_bovenveen s_z_h
3. Hogere kade, versie 6.0 + 1,0 kN/m^2 cohesie Klei_bovenveen s_z_h
4. Hogere kade, versie 6.0 + 1,5 kN/m^2 cohesie Klei_bovenveen s_z_h
5. Hogere kade, versie 6.0 + 2,0 kN/m^2 cohesie Klei_bovenveen s_z_h
6. Hogere kade, versie 6.0 + 2,5 kN/m^2 cohesie Klei_bovenveen s_z_h
7. Hogere kade, versie 6.0 + 3,0 kN/m^2 cohesie Klei_bovenveen s_z_h

8. Hogere kade, versie 6.0 + 3,5 kN/m^2 cohesie Klei_bovenveen s_z_h
9. Hogere kade, versie 7.04 met ondergrenzen voor Klei_bovenveen s_z_h
10. Hogere kade, versie 7.04 met ondergrenzen voor alle grondsoorten

De resultaten van de 10 analyses zijn in Tabel 9 weergegeven. In deze tabel is ook de toename van de veiligheidsfactor per stap en de totale toename van de veiligheidsfactor te zien.

Een overzicht van de kritische cirkel en de veiligheidsfactor van elke analyse zoals gepresenteerd in D-Geostability is te zien in Bijlage III.

TABEL 9 VEILIGHEIDSFACTOREN TOENAME BIJ ELKE ANALYSE VOOR DE 'HOGERE KADE'

Kade waakhoogte 2 meter	SF	Toename per stap		Toename totaal	
1. Versie 6.0	0,92		%		%
2. Versie 6.0 +0,5	0,95	0,03	3,3	0,03	3,3
3. Versie 6.0 +1	0,96	0,01	1,1	0,04	4,3
4. Versie 6.0 +1,5	0,98	0,02	2,2	0,06	6,5
5. Versie 6.0 +2	1,00	0,02	2,2	0,08	8,7
6. Versie 6.0 +2,5	1,02	0,02	2,2	0,1	10,9
7. Versie 6.0 +3	1,04	0,02	2,2	0,12	13,0
8. Versie 6.0 +3,5	1,06	0,02	2,2	0,14	15,2
9. Versie 7.04 +Ondergrenzen Klei_b. s_z_h	1,08	0,02	2,2	0,16	17,4
10. Versie 7.04 +Ondergrenzen alle GS	1,28	0,20	21,7	0,36	39,1

Opvallend aan de bovenstaande resultaten is dat de stabiliteitsfactor bij de eerste analyse van de hogere kade aanzienlijk hoger is dan de stabiliteitsfactor van de eerste analyse van de lage kade in de vorige paragraaf. Deze toename van de stabiliteitsfactor is waarschijnlijk veroorzaakt doordat in deze analyse een grotere deel van de kade droog is. Hierdoor kan de hogere effectieve normaalspanning in de grond leiden tot een hogere stabiliteitswaarde van de kade. Ook is het opvallend dat uiteindelijk bij het toepassen van de ondergrenzen voor alle grondsoorten van het HHNK (analyse 10), de berekende stabiliteitsfactor een gelijke waarde (1,28) heeft als de stabiliteitsfactor bij analyse 10 van de lage kade.

In de resultaten van deze analyses is verder ook te zien dat de invloed van de cohesie in dit geval veel kleiner is dan bij de wat nattere 'kade voor analyse'. Hoewel er nog steeds een positieve invloed op de berekende stabiliteitsfactor bij hogere cohesiewaarden te zien is, is deze invloed gemiddeld niet groter dan 2,2 procent in de eerste 8 analyses per stap verhoging met 0,5kN/m^2. In totaal is er een toename in de stabiliteitsfactor van 17% bij het toepassen van een cohesie van 4,2 kN/m^2 voor het kademateriaal. Bij de wat lagere 'kade voor analyse' was de toename in de stabiliteitsfactor, bij het gebruikt van dezelfde waarde voor de cohesie, meer dan twee keer zo groot.

4.1.2 CONCLUSIE INVLOED COHESIE OP STBU

De huidige werkwijze om de cohesie van humeuze grondsoorten te bepalen kan in de praktijk leiden tot 'onrealistische' lage rekenwaarden voor deze parameter. Er worden statistische en theoretische factoren in de gemiddelde cohesiewaarde verdisconteerd om uiteindelijk tot een karakteristieke waarde te komen. Deze karakteristieke waarde is de 5% ondergrens waarde van een verzameling, hoe groter de spreiding of standaardafwijking hoe lager deze karakteristieke waarde.

Doordat er vaak lage karakteristieke cohesiewaarden in de STBU berekeningen worden toegepast, worden de lage uitkomsten van de geotechnische buitenwaartse stabiliteitsberekeningen in de praktijk niet als betrouwbaar gezien.

In de schuifsterkte formule is te zien dat de cohesie, de effectieve normaalspanning en de hoek van inwendige wrijving een directe invloed hebben op de sterkte van een kering. Om aan te tonen hoe groot de invloed van de cohesie is op de berekende STBU van regionale waterkeringen, zijn er verschillende gevoeligheidsanalyses voor deze parameter uitgevoerd. De invloed van de cohesie die op basis van de theorie werd voorgesteld is bevestigd met deze analyses.

Bij de verschillende gevoeligheidsanalyses is te zien dat er een positieve invloed in de berekende buitenwaartse stabiliteit is bij het toepassen van hogere cohesiewaarden. Maar er is wel een verschil tussen de grootte van de invloed van de cohesie bij verschillende type keringen. Aan de ene kant is de gevoeligheid en invloed van de cohesie op de STBU bij natte kades met een kleine waakhoogte zeer relevant. Voor dit soort kades kan een kleine verhoging van de waarden van de ingevoerde cohesie leiden tot het technisch goedkeuren van een kade die eerst afgekeurd was. Dit betekent ook dat andersom het toepassen van lage 'onrealistische' cohesiewaarden kan leiden tot een zeer lage buitenwaartse stabiliteit.

Bij kades met een kleine waakhoogte van ongeveer 0,5 meter (kade voor analyse) zijn; bij een begin cohesiewaarde van 0 kN/m^2, stijgingen van meer dan 50% in de veiligheidsfactor mogelijk door het toepassen van de grondsterkteparameters zoals voorgesteld in de eurocode. De sterkte van de grond stijgt ook flink mee met de stijging van de cohesie. Uit de veiligheidsoverzichten is te zien dat het grondgebied dat als stabiel wordt beschouwd flink kan toenemen bij de toepassing van hogere waarden voor de cohesie. Deze toename in de grootte van de zone die aan de stabiliteitseis voldoet, kan van groot belang zijn tijdens bijvoorbeeld een restbreedte analyse.

Aan de andere kant is de invloed van de cohesie bij kades met een waakhoogte groter dan één meter veel kleiner. Uit de analyses kwam naar voren dat, bij een kade met een waakhoogte van twee meter, de stabiliteit factor maar 17% toeneemt bij het toepassen van een cohesie van 4,2 kN/m^2 voor het kadematériaal zoals voorgesteld in de HHNK ondergrenzen. Deze toename is iets minder dan de helft van de toename bij een kade met een kleinere waakhoogte.

Deze lagere invloed van de cohesie op de STBU bij dit soort keringen kan verklaard worden door de grotere effectieve normaalspanning bij een hogere kade. In de schuifspanningsformule [4.1] is te zien dat de effectieve spanning ook een belangrijke factor is in de uiteindelijke sterkte van de grond. Doordat bij kades met een hogere waakhoogte de effectieve normaalspanningen vele malen groter zijn dan bij lagere, natte kades is deze factor relevanter voor de berekende schuifsterkte dan de cohesie. Door de grote invloed van de effectieve spanning in de schuifsterkte van de grond, wordt de gevoeligheid en invloed van de cohesie op de STBU berekening in dit geval dus veel minder.

4.2 INVLOED GEOMETRIE OP STBU

De geometrie van een waterkering heeft ook invloed op de uitkomsten van de STBU berekening. Zoals in paragraaf 3.1 is vermeld, is in veel gevallen het onderwaterprofiel van regionale waterkeringen onbekend. Vaak worden er aannames gedaan over de exacte geometrie

van het onderwaterdwarsprofiel van deze waterkeringen. Reden hiervoor is dat onderwater metingen van de geometrie complex en duur zijn om te realiseren. Hierdoor worden onderwater metingen van specifiek het buitentalud regelmatig buiten de scope van toetsingen of versterkingsprojecten gelaten; of worden ze afgeleid van metingen die eigenlijk bedoeld zijn voor andere parameters zoals bijvoorbeeld de waterdiepte. Deze aanpak met aannames, verouderde gegevens, en mogelijke onnauwkeurigheden tijdens de bepaling van de geometrie van het buitentalud leiden tot een grote onzekerheid over de onderliggende waarden voor deze parameter die in de STBU berekening worden gebruikt.

Daarnaast worden kanaal- en boezembodems constant aangetast door externe factoren zoals bijvoorbeeld scheepvaart, golven of gravende dieren. Hierdoor kan de geometrie van het onderwatertalud snel veranderen. Dit soort processen leiden ook tot onzekerheden in de geometrie van het onderwaterprofiel van regionale waterkeringen.

Een andere reden voor de beheerders om te twijfelen aan het gekozen uitgangspunt van een steil onderwater verloop van het buitentalud, is de aanwezigheid van rietplanten in de zone direct boven het buitentalud van een kade. Riet is een plant die groeit in het water op ondiepe gronden. Dit betekent dat deze plant alleen bij een horizontaal- of flauw buitentalud, aan de buitenwaartse kant van een kade, kan groeien. Voor sommige kades worden er berekeningen uitgevoerd met een te steil buitentalud terwijl er riet langs de boezemkade wordt gesignaleerd. Een ander punt van discussie is of de wortels van deze rietplanten ook bijdragen aan de sterkte van de grond en op de stabiliteit van een waterkering. Een eventuele bijdrage aan de grondsterkte door de rietwortels wordt in deze analyse niet verder onderzocht.

FIGUUR 15 **RIET LANGS BOEZEMKADE (JISPERDIJK)**



Om de invloed van de gekozen geometrie van het buitentalud te bepalen zijn er; met de ‘kade voor analyse’ die bovenaan dit hoofdstuk wordt toegelicht, verschillende berekeningen voor de STBU uitgevoerd. Bij deze berekeningen is de helling van het buitentalud van de kade de enige parameter die varieert. De kade met een buitentaludhelling van 1 op 1,5 wordt als uitgangpunt gebruikt om de vergelijkingen te doen bij een flauwere of steilere taludhelling.

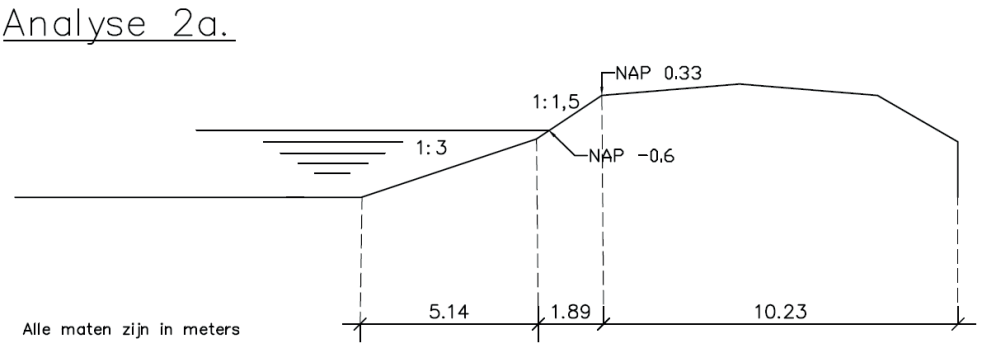
De volgende analyses naar de geometrie van de kade zijn uitgevoerd:

1. Beginsituatie: buitentalud 1:1,5
2. Verflauwingen van het buitentalud.
   a. Buitentalud 1:1,5 + 1:3
   b. Buitentalud 1:2
   c. Buitentalud 1:2,5
   d. Buitentalud 1:3
3. Steiler buitentalud analyse: buitentalud 1:1

De voorgestelde beginsituatie (1) voor deze gevoeligheidsanalyse naar de geometrie van het buitentalud is gelijk aan de beginsituatie van de vorige analyse. Een buitentalud met een helling van 1 op 1,5 komt veel voor in regionale waterkeringen.

Bij de tweede analyse, naar de geometrie, is er voor gekozen om ook de situatie te schetsen van een buitentalud met een knik in het midden waarna de helling iets flauwer wordt. In veel gevallen worden er alleen aannames gedaan over het deel van het buitentalud welke zich onder de waterspiegel bevindt. Hierdoor zou het kunnen zijn dat alleen het gedeelte onder de waterspiegel flauwer verloopt dan de rest van het talud, zoals voorgesteld in situatie 'a' van de tweede analyse zie Figuur 16.

FIGUUR 16 **PROFIEL KADE 2A - BUITENTALUDHELLING 1:1,5 + 1:3**



Door sedimentatie processen kan er een verkeerde schatting worden gemaakt over de helling van het onderwater buitentalud. Hierdoor is er eerst gekeken naar de invloed op de stabiliteitsfactor (SF) van de buitentaludhelling bij wat flauwere buitentaluds.

De resultaten van analyse 1 en 2 waarbij het buitentalud flauwer verloopt dan geschat, zijn weergegeven in Tabel 10. Een overzicht van de kritische cirkel en de veiligheidsfactor van elke analyse zoals gepresenteerd in D-Geostability is te zien in Bijlage IV.

TABEL 10 **RESULTATEN ANALYSE 1 EN 2 – INVLOED GEOMETRIE OP STBU**

Buiten talud	SF	Toename per stap		Toename totaal	
1. 1:1,5	0,77		%		%
2a. 1:1,5 + 1:3	0,85	0,08	10,4	0,08	10,4
2b. 1:2	0,95	0,10	13,0	0,18	23,4
2c. 1:2,5	1,08	0,13	16,9	0,31	40,3
2d. 1:3	1,19	0,11	14,3	0,42	54,5

In de resultaten is te zien dat er een aanzienlijke verandering is in de berekende stabiliteitsfactor bij de verschillende talud hellingen. Zelfs als het talud alleen onderwater flauwer verloopt (analyse 2a) is er al een toename van 10% in de stabiliteitsfactor. Bij een verandering van de buitentaludhelling van 1 op 1,5 naar 1 op 3 is er voor deze kade een toename van meer dan 50% in de stabiliteitsfactor. Zelfs bij kleine veranderingen in de geometrie is er een grote impact op de uiteindelijke stabiliteitswaarde.

Daarnaast is er ook gekeken naar de invloed van de geometrie op de stabiliteitsfactor bij een wat steiler buitentalud. Er is een STBU berekening uitgevoerd van dezelfde kade maar met een buitentaludhelling 1 op 1. Deze verhouding komt ook veel voor in West-Nederlandse kades. Door onnauwkeurige metingen of veranderingen in het onderwater buitentalud door erosie, veroorzaakt door bijvoorbeeld scheepvaart, golven of gravende dieren, kunnen er foutieve aannames gedaan worden bij de bepaling van de juiste taludhelling. De invloed van een aanname van dit type op de stabiliteitsfactor (SF) van een kade, is weergegeven in Tabel 11.

TABEL 11 **RESULTATEN ANALYSE 1 EN 3 – INVLOED GEOMETRIE OP STBU**

Buiten talud	SF	Toename per stap		Toename totaal	
1. 1:1,5	0,77		%		%
3. 1:1	0,59	-0,18	-23,4	-0,18	-23,4

Net als bij de vorige analyses is hier de invloed van de geometrie op de berekende stabiliteitsfactor ook erg groot. In dit geval is deze invloed negatief. Bij een verandering van de helling van het buitentalud van 1 op 1,5 naar 1 op 1 is er een afname van meer dan 20% van de stabiliteitsfactor van de kade.

Om de onzekerheden in de geometrie te verdisconteren wordt in de afleiding van de vereiste stabiliteitsfactor voor de STBU een schematiseringsfactor toegepast. De waarde van de schematiseringsfactor varieert tussen 1,0 en 1,2. Deze schematiseringsfactor is afhankelijk van enerzijds de onzekerheden in het uitgangspunt voor de berekening en anderzijds de invloed daarvan op de berekende stabiliteit. In gevallen waar veel onzekerheid over de geometrie en over andere schematiseringsparameters bestaat, is een hoge schematiseringsfactor benodigd. Het toepassen van een hoge schematiseringsfactor leidt tot een hogere stabiliteitseis.

4.2.1 CONCLUSIE INVLOED GEOMETRIE OP STBU

De geometrie van het onderwatertalud van een kering wordt in veel gevallen niet specifiek gemeten. Hierdoor worden vaak aannames gedaan over de exacte geometrie van het buitentalud van regionale keringen. Bovendien is het buitentalud erg gevoelig voor erosie en sedimentatie processen die de helling van het talud snel kunnen veranderen. Al deze factoren maken van de onderwatergeometrie van een kering een onzekere parameter.

Uit de analyses is naar voren gekomen dat kleine veranderingen in de geometrie van het buitentalud kunnen leiden tot grote af- of toenamen in de berekende stabiliteitsfactor. Dit betekent dat de geometrie van het buitentalud van een kering zeer relevant is in de uitkomsten van de STBU berekening. In sommige gevallen kan, door een verkeerde aanname in de verhouding van de geometrie, deze af- of toename van de stabiliteitsfactor meer dan 50% bedragen. Het belang van meer metingen om de exacte geometrie van een kering te kunnen bepalen en regelmatige monitoring op veranderingen van deze geometrie is gezien de aangetoonde gevoeligheid van deze parameter erg groot.

4.3 INVLOED VERKEERSBELASTING OP STBU

Een andere parameter waar veel discussie over is, is de grootte en de schematisering van de verkeersbelasting die op de kering kan optreden. De verkeersbelasting wordt gezien als een tijdelijke boven belasting op de kruin van de dijk. De grootte van deze parameter wordt bepaald op basis van de 'maximale' belasting die op een kering kan optreden. De verkeersbelasting dient beschouwd te worden bij de beoordeling van de buitenwaartse stabiliteit. Dit geldt ook bij keringen waarop geen rijweg op de kruin aanwezig is. De verkeersbelasting wordt alleen niet beschouwd als een voertuig op de dijkkruin uitgesloten kan worden, omdat dat fysiek onmogelijk is (STOWA, 2015).

In aansluiting met de Handreiking Constructief Ontwerpen (1994) wordt er, bij keringen met een rijweg waar zwaar verkeer mag rijden, gerekend met een belasting van 13 kN/m^2 over een breedte van 2,5 m. Daarnaast wordt in het algemeen voorgesteld om bij keringen waarop alleen inspectievoertuigen mogen rijden met een verkeersbelasting van 5 kN/m^2 te rekenen.

De grootte van de te beschouwen verkeersbelasting is niet de enige factor die kan variëren in dit uitgangspunt. Het effect of de mate van de wateroverspanning die de verkeersbelasting genereert in de ondergrond van het dijklichaam kan ook per situatie variëren. In deze factor (wateroverspanningen) bestaan grote onzekerheden. Niet zo lang geleden werd rekening gehouden met een te conservatief uitganspunt van 100 procent wateroverspanning, ofwel 0 procent aanpassing. Naar aanleiding van een STOWA onderzoek uit 2015 zijn nieuwe aanpassingspercentages (consolidatie graad) voor de stabiliteitsberekeningen voorgesteld.

De kennis die met dit onderzoek van STOWA beschikbaar is gesteld, wordt tegenwoordig door de waterschappen gebruikt in de praktijk. Het HHNK gebruikt deze aanpassingspercentages om zijn kades te berekenen. Hierdoor worden de aanpassingspercentages zoals voorgesteld in het STOWA rapport uit 2015 ook gebruikt om invloed van de verkeersbelasting op de STBU te analyseren.

In Tabel 12 worden deze aanpassingspercentages weergegeven.

TABEL 12 AANPASSINGSPERCENTAGES VOOR COHESIEVE GRONDSOORTEN (STOWA, 2015)

Type kade	Zeer zware belasting [> 13 kN/m2]		Zware belasting [≈ 13 kN/m2]		Lichte belasting [≈5 kN/m2]	
Belastingsituatie	Hoogwater	Droogte	Hoogwater	Droogte	Hoogwater	Droogte
Kade met weg	0%	0%	50%	30%	100%	30%
Kade zonder weg "groene kade''	0%	0%	0%	0%	50%	30%

Om de invloed van de verkeersbelasting op de STBU berekening te analyseren is er een gevoeligheidsanalyse gemaakt. Deze analyse is gerealiseerd met de 'kade voor analyse' die aan het begin van dit hoofdstuk werd gepresenteerd. Er is een aantal berekeningen gemaakt met behulp van het programma D-Geostability van Deltares. In deze berekeningen zijn de grootte en de mate van consolidatie van de verkeersbelasting de enige variabelen die variëren.

Voor deze analyse zijn de volgende berekeningen uitgevoerd:

1. Zware belasting = 13 kN/m^2
   a. Verkeersbelasting 13 kN/m^2 – 70% wateroverspanningen
   b. Verkeersbelasting 13 kN/m^2 – 50% wateroverspanningen

2. Lichte belasting = 5 kN/m^2
   a. Verkeersbelasting 5 kN/m^2 – 70% wateroverspanningen
   b. Verkeersbelasting 5 kN/m^2 – 50% wateroverspanningen
3. Geen verkeersbelasting (geen wateroverspanningen)

De resultaten van de drie analyses zijn in Tabel 13 weergegeven. In deze tabel is ook de toename van de veiligheidsfactor per stap en de totale toename van de veiligheidsfactor te zien.

Een overzicht van de kritische cirkel en de veiligheidsfactor van elke analyse zoals gepresenteerd in D-Geostability is te zien in Bijlage V.

TABEL 13 **RESULTATEN ANALYSE 1 T/M 3 – INVLOED VERKEERSBELASTING OP STBU**

Verkeersbelasting	SF	Toename per stap		Toename totaal	
1a. 13 kN/m2 - 70% wateroverspanningen	0,77		%		%
1b. 13 kN/m2 - 50% wateroverspanningen	0,81	0,04	5,2	0,04	5,2
2a. 5 kN/m2 - 70% wateroverspanningen	0,81	0	0,0	0,04	5,2
2b. 5kN/m2 - 50% wateroverspanningen	0,81	0	0,0	0,04	5,2
3. Geen verkeersbelasting	0,81	0	0,0	0,04	5,2

De uitkomsten van deze gevoeligheidsanalyse tonen niet zo veel verandering in de berekende stabiliteitsfactor. Alleen bij de eerste twee analyses met een verkeersbelasting van 13 kN/m^2 en wateroverspanningen van 70% en 50% is er een kleine verandering van 0,04 ofwel 5,2% in de stabiliteitsfactor.

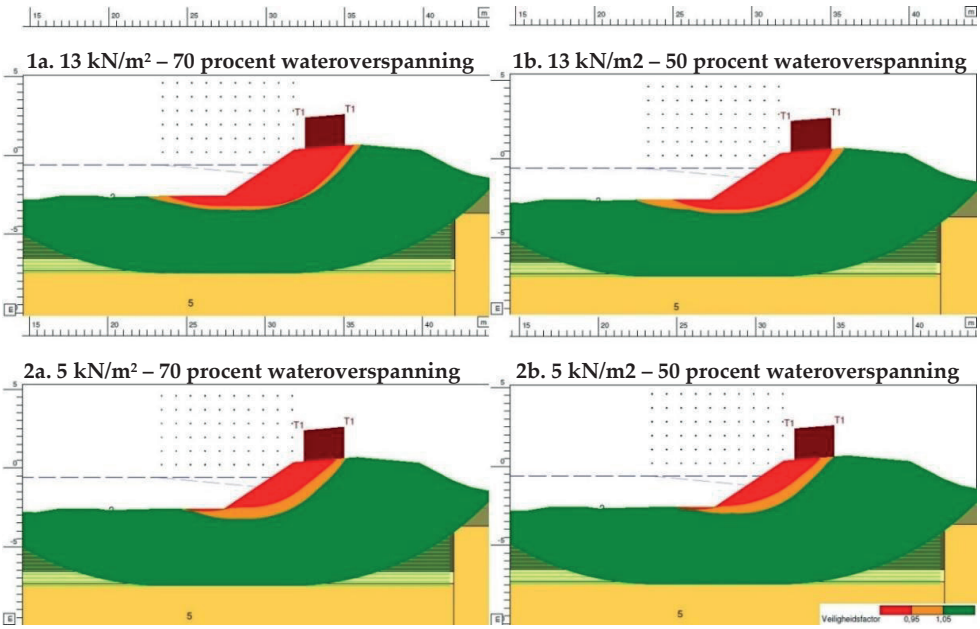
De berekende invloed van de verkeersbelasting is nihil omdat de glijcirkel in deze analyses net naast de verkeersbelasting optreedt. Bij de opgegeven realistische waarde van de spreiding van de verkeersbelasting worden de glijcirkels buiten de verticale zone onder de geschematiseerde belasting niet (significant) beïnvloed.

Naast de stabiliteitsfactor is, voor deze gevoeligheidsanalyse, het veiligheidsoverzicht ook interessant om te analyseren. In dit geval kunnen deze overzichten wellicht een beter beeld geven van de invloed van de verkeersbelasting op de buitenwaartse stabiliteit.

Het veiligheidsoverzicht toont het grondgebied met een veiligheidsfactor binnen een bepaald bereik. Hierbij is het groene grondgebied als het veilige gebied aangemerkt en het rode gebied als onveilig. Voor deze analyse zijn de grenzen voor het veiligheidsoverzicht tussen 0,95 en 1,05 ingesteld. Deze stabiliteitsfactoren komen respectievelijk overeen met de IPO-klasse III en V bij het toepassen van een schematiseringsfactor van 1,05.

Ten eerste is er gekeken naar het verschil tussen het veiligheidsoverzicht van de eerste 2 analyses waarbij een toename van 5,2% in de stabiliteitsfactor is. Hier is het aanpassingspercentage de enige parameter die verandert van 30% tot 50%. Daarnaast zijn de veiligheidsoverzichten van de tweede analyse met 5 kN/m^2 als verkeersbelasting ook geanalyseerd. Deze overzichten zijn in Figuur 17 te zien. Het veiligheidsoverzicht zoals gepresenteerd in D-Geostability is te zien in Bijlage VI.

FIGUUR 17 VEILIGHEIDSOVERZICHT ANALYSE 1 EN 2 – INVLOED VERKEERSBELASTING OP STBU



In deze overzichten is te zien dat de verandering van de grootte van de onvoldoende stabiele zone, veroorzaakt door de verandering van het aanpassingspercentage per soort verkeersbelasting, ook heel klein is. Anders dan bij de stabiliteitsfactor is hier wel een verandering te zien bij het toepassen van verschillende maten van de belasting. Tussen de analyses 1a en 2a is er een verschil bij het intredepunt van het 'onveilig' gebied bij de kruin oftewel 'kruinwaarts' van ongeveer 1 meter. Dit betekent dat het onveilig gebied bij de kruin ongeveer 1 meter kleiner is geworden. En het verschil bij het intredepunt van het 'onveilig' gebied bij de buitenteen van de kade; 'boezemwaarts', bedraagt iets meer dan 2,5 meter. Deze verandering in de grootte van het onveilige gebied, kan het verschil maken tussen de afkeuring en de goedkeuring van een kade, bij het toepassen van de zogenaamde restbreedtebenadering.

4.3.1 CONCLUSIE INVLOED VERKEERSBELASTING OP STBU

De invloed van de verkeersbelasting op de stabiliteitsberekening bestaat uit twee componenten; de grootte van de verkeersbelasting en de mate van wateroverspanning die de belasting veroorzaakt in de ondergrond. De gekozen waarde voor dit uitgangspunt is altijd een punt van discussie geweest. De grootte van de belasting wordt namelijk gekozen op basis van een mogelijke 'maximale' belasting die in sommige kades misschien nooit voorkomt.

Gezien de resultaten van de analyses is te concluderen dat berekende kleine (oppervlakkige) glijvlakken geen goede basis vormen om de invloed van de verkeersbelasting op de stabiliteit van een kering te analyseren. Daarbij geldt dat het programma de verkeersbelasting in de ondergrond spreidt op basis van een opgegeven hoek, de spreidingshoek wordt niet door het programma berekend. Om die reden is het heel lastig om bij dergelijke glijvlakken de invloed van de wateroverspanning als gevolg van een tijdelijke boven belasting (zoals de verkeersbelasting) te analyseren. Als het kritische glijvlak niet onder de verkeersbelasting langs loopt, is de invloed van deze belasting op de berekende stabiliteit nihil.

Hierdoor ontstaat een onzekerheid over de werkelijke invloed van de verkeersbelasting op de stabiliteit, die de uitgevoerde analyse onbetrouwbaar maakt. De mate van deze onzekerheid in de berekende stabiliteitsfactor hangt af van de positie van het glijvlak ten opzichte van

de geschematiseerde verkeersbelasting. Naar verwachting leidt dit voor een maatgevend glijvlak buiten de verticaal onder de boven belasting tot een te gunstig beeld van de invloed van de verkeersbelasting op de stabiliteit van de kering, omdat de verkeersbelasting niet of nauwelijks leidt tot een afname van de effectieve spanningen in het glijvlak. Een meer nauwkeurige methode om de invloed van deze parameter te analyseren is een programma waarin de spreiding van de belasting in de ondergrond wordt berekend (zoals PLAXIS).

4.4 INVLOED WATERSPANNINGEN OP STBU

De waterspanningen in een dijklichaam en de ondergrond vormen een belangrijke belasting van een waterkering (TAW, 2004). Deze waterspanningen dienen altijd geschematiseerd te worden om een STBU berekening te kunnen maken. Metingen om de waterspanningen te bepalen, vooral bij keringen met een lage doorlatendheid, zijn duur en lastig te realiseren.

Veel waterkeringen in West-Nederland zijn opgebouwd van laag doorlatende gronden als klei en veen. Hierdoor worden vaak aannames gedaan om deze parameter te bepalen. Als er geen metingen beschikbaar zijn, worden er aannames gedaan gebaseerd op het zogenaamde ‘expert judgement’, wat betrekkelijk subjectief is, over de schematisering van de waterspanningen.

De schematisering van de grondwaterwaterstad, ofwel de freatische lijn is een van de parameters die, voor regionale waterkeringen, vaak niet wordt gemeten. De freatische lijn wordt regelmatig geschematiseerd op basis van ‘logische’ aannames over de infiltratie- en bergingscapaciteit van de ondergrond van een kering. In het algemeen wordt voorgesteld dat de freatische lijn niet hoger kan liggen dan de maatgevende buitenwaterstand of toetspeil.

Bij waterkeringen opgebouwd uit zand zal de freatische lijn in de dijk vrijwel lineair verlopen van maatgevend boezempeil naar polderpeil. Voor dijken die opgebouwd zijn uit ondoorlatende gronden, is het verloop van het grondwater lastiger te voorspellen. Bij ondoorlatende gronden wordt voorgesteld dat (in dit geval) de reactie van de freatische grondwaterstand op veranderingen in de buitenwaterstand wordt vertraagd. Dit betekent dat bijvoorbeeld bij een forse val van de buitenwaterstand of bij hevige regenval, het een tijdje kan duren voordat de hoogte van de freatische lijn weer is afgenomen naar een gemiddelde stand. In dit geval is het voor te stellen dat het dijklichaam bij slecht doorlatende dijken natter is dan bij zanddijken.

Om de invloed van de waterspanningen op de STBU te bepalen, is er een gevoeligheidsanalyse naar het verloop van de freatische lijn gedaan. Voor deze analyse zijn er drie STBU berekeningen gemaakt met behulp van D-Geostability. Voor de berekeningen is de ‘kade voor analyse’ gebruikt. De enige parameter die varieert in de berekeningen is het verloop van de freatische grondwaterstand.

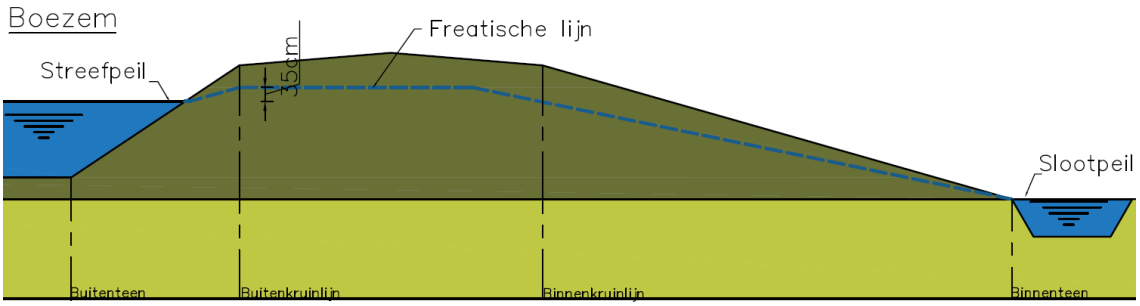
De eerste berekening is gedaan met de schematisering zoals aan het begin van dit hoofdstuk is voorgesteld. Hierbij zijn aannames gedaan bij de schematisering van de waterspanningen op basis van de richtlijnen van het HHNK. Hier werd voorgesteld dat het verloop van de grondwaterstand wordt bepaald door de hoogte van het maatgevende waterpeil in de boezem.

Door de bergingscapaciteit van het dijklichaam, en de ‘vertraging’ in de reactie (op veranderingen in de buitenwaterstand) van ondoorlatende gronden is hierbij voorgesteld dat er na een hoogwatersituatie (of hevige regenval) het grondwater nog een tijdje hoog zal blijven.

Dit wordt het naijlingseffect genoemd. Deze hoge schatting van de waterspanningen wordt heel vaak gebruikt bij keringen waarbij geen metingen van de freatische lijn beschikbaar zijn.

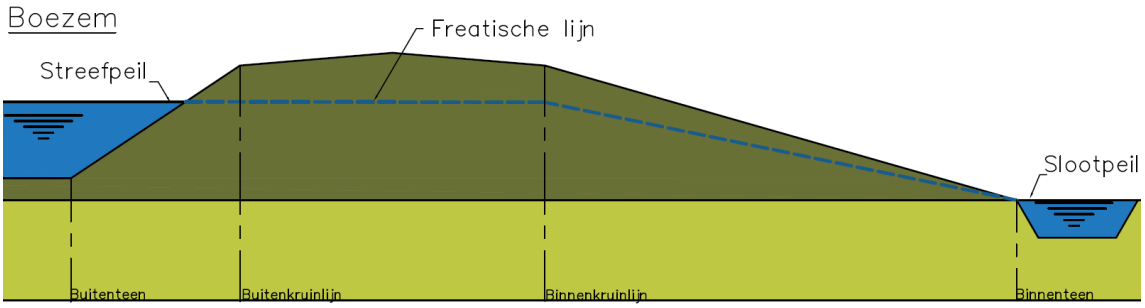
Ten aanzien van vergelijkingen met de andere grondwater situaties is deze eerste situatie als beginsituatie voorgesteld voor de gevoeligheidsanalyse. Deze 'conservatieve' schematisering is in Figuur 18 weergegeven.

FIGUUR 18 **SCHEMATISERING FREATISCHE LIJN - SITUATIE 1**



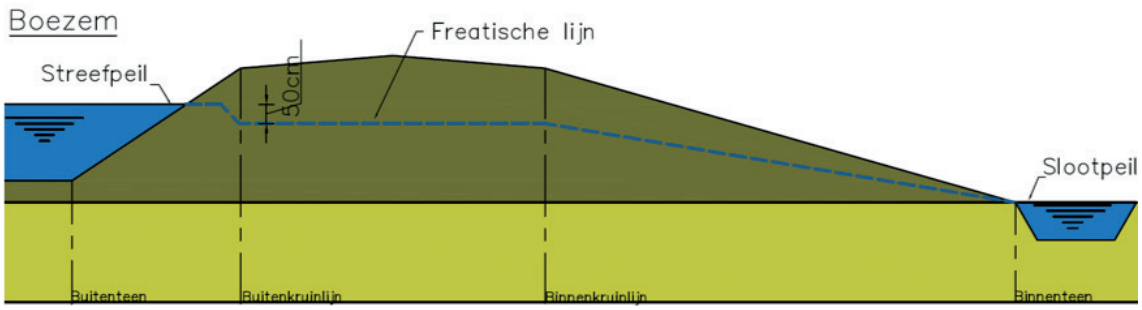
De tweede berekening is gedaan met een ander verloop van het grondwater. In deze situatie wordt geen rekening gehouden met het naijlingseffect. Dit betekent dat voor deze analyse de hoogte van het grondwater in het dijklichaam gelijk zal zijn aan het voorgestelde streefpeil in de boezem. De schematisering van deze tweede situatie is in Figuur 19 weergegeven.

FIGUUR 19 **SCHEMATISERING FREATISCHE LIJN - SITUATIE 2**



De derde berekening is gedaan op basis van een iets drogere kade. In deze situatie is voorgesteld dat de freatische lijn in het dijklichaam is gedaald. Hierbij is de ligging van de freatische lijn in het dijklichaam 50 centimeter lager dan het voorgestelde streefpeil. De schematisering van de derde grondwater situatie is Figuur 20 in weergegeven.

FIGUUR 20 **SCHEMATISERING FREATISCHE LIJN – SITUATIE 3**



De resultaten van de drie berekeningen van de verschillende grondwater situaties worden weergegeven in Tabel 14. De resultaten zoals in D-Geostability gepresenteerd, zijn in Bijlage VII te zien.

TABEL 14 RESULTATEN GEVOELIGHEIDSANALYSE INVLOED WATERSPANNINGEN OP STBU

Waterspanningen	SF	Toename per stap		Toename totaal	
1. Hoog grondwater (naijling)	0,77		%		%
2. Grondwater = streefpeil (geen naijling)	0,91	0,14	18,2	0,14	18,2
3. Laag grondwater	0,96	0,05	6,5	0,19	24,7

In de resultaten is te zien dat bij veranderingen in het verloop van de freatische lijn er een aanzienlijke verandering is in de berekende stabiliteitsfactor. De invloed van de schematisering van de waterspanningen in de STBU berekening is zodoende heel groot. Bij de eerste twee situaties is het verschil in de stabiliteitsfactor 18%. Hierbij is de grondwaterstand maar 35 centimeter verlaagd zodat deze op hetzelfde niveau als het waterpeil in de boezem komt te liggen. Deze schematisering die waarschijnlijk in de praktijk vaak voorkomt leidt tot een grote stijging van de veiligheidsfactor en daarmee van de stabiliteit van de kade.

4.4.1 INVLOED WATERSPANNINGEN OP STBU

Uit de gevoeligheidsanalyse valt te concluderen dat de uitkomst van de STBU berekening sterk afhankelijk is van de gekozen schematisering voor de waterspanningen in de kering. Door een relatief kleine aanpassing zoals het uitsluiten van het zogenaamde naijlingseffect kan de berekende stabiliteitsfactor met ongeveer 20% toenemen.

In de praktijk wordt bij gebrek aan gegevens een veilige schematisering voor de freatische lijn gekozen. Hierbij gaat men ervan uit dat het grondwater hoger dan het streefpeil kan komen te liggen nadat er zich een extreme situatie heeft voorgedaan. Volgens de berekeningen met de ‘kade voor analyse’ heeft dit naijlingseffect een negatieve invloed op de STBU van deze kade. Dit komt waarschijnlijk doordat kleine toenames in de waterspanningen, bij kaden opgebouwd uit humeuze grondsoorten, kunnen leiden tot een relatief grote afname van de korrelspanningen in het dijklichaam. Hierdoor wordt de schuifsterke en dus de stabiliteit van de waterkering aanzienlijk lager.

5

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste conclusies van het onderzoek samengevat. Daarnaast worden aan de hand van de onderzoeksresultaten aanbevelingen gedaan over mogelijke optimalisaties van de STBU berekening en over eventuele vervolg onderzoeken.

5.1 CONCLUSIES

Uit het literatuuronderzoek is gebleken dat de berekende buitenwaartse stabiliteit met name afhankelijk is van vier parameters, te weten de cohesiewaarde, de geometrie, de verkeersbelasting en de schematisering van de waterspanningen. In dit onderzoeksrapport zijn deze vier parameters afzonderlijk in meer detail onderzocht. Met behulp van verschillende gevoeligheidsanalyses is bepaald in welke mate deze parameters bijdragen aan de uitkomst van de STBU berekening. Hierbij is er gekeken naar waar de kansen liggen voor toekomstige optimalisaties die het beoordelingsproces van de STBU 'realistischer' kan maken.

Uit het onderzoek is naar voren gekomen dat (bij keringen met een kleine waakhoogte) de uitkomst van de berekende buitenwaartse stabiliteit sterk afhankelijk is van de gekozen waarden voor de cohesie. De manier hoe deze parameter wordt bepaald is in veel gevallen de oorzaak van mogelijke onderschattingen van de sterkte van sommige waterkeringen. Doordat het lastig is om de waarde voor de cohesie met laboratoriumproeven te bepalen, in combinatie met verschillende statistische en theoretische veiligheidsfactoren, resulteren er zeer lage rekenwaarden voor de cohesie. Gezien de aangetoonde sterke invloed van de cohesie op de stabiliteitsfactor, leidt het toepassen van deze lage waarden voor de cohesie in de STBU berekening logischerwijs ook tot een zeer lage buitenwaartse stabiliteit.

Op basis van de onderzoeksresultaten, van de buitenwaartse geometrie, is te concluderen dat de geometrie van het buitentalud een grote invloed heeft in de uitkomst van de berekende STBU. Hierdoor kunnen te conservatieve aannames over deze parameter leiden tot een zeer lage ('onrealistisch') berekende stabiliteit. Onzekerheden door afwezigheid van goede metingen of kleine veranderingen door aantasting aan de buitentaludhelling leiden tot grote toe- of afnamen van de berekende stabiliteitsfactor.

De invloed van de verkeersbelasting op de STBU berekening was met de D-Geostability berekeningen niet goed te bepalen. Dit komt door de kleine afmetingen van de maatgevende glijvakken. De (opgelegde) spreiding van de verkeersbelasting in de ondergrond heeft in de zone van deze glijvlakken niet geleidt tot een (significante) toename van de waterspanningen. Hierdoor is er in dit onderzoek geen concrete uitkomst over de invloed van deze parameter op de STBU.

Uit het onderzoek is gebleken dat de manier hoe de freatische lijn wordt geschematiseerd een grote invloed heeft op de uitkomst van de SBTU berekening. Bij keringen waar geen gegevens

beschikbaar zijn over de ligging van het freatische grondwater, wordt vaak uitgegaan van een veilige schematisering van de waterspanningen. Hierbij wordt het zogenaamd naijlingseffect in de schematisering van het grondwater toegepast. Uit de resultaten van het onderzoek is te zien dat dit effect een aanzienlijke negatieve invloed heeft op de buitenwaartse stabiliteit.

Uit het onderzoek kan zodoende worden geconcludeerd dat de cohesie, de geometrie en de schematisering van de waterspanningen een grote invloed hebben op de STBU. De huidige werkwijze om deze parameters te bepalen leidt heel vaak tot een zeer lage uitkomst van de berekende buitenwaartse stabiliteit. Kleine optimalisaties in deze parameters kunnen resulteren in een aanzienlijk hogere stabiliteitsfactor, die misschien voldoende is om aan de STBU eisen te voldoen, en die zeker een meer realistisch beeld van de STBU geeft.

5.2 AANBEVELINGEN

Gezien de aangetoonde gevoeligheid van de cohesie de geometrie en de schematisering van de waterspanningen is het van belang dat beheerders meer aandacht gaan besteden aan de werkwijze voor het bepalen van deze parameters. Hierbij is goed meten en monitoren heel belangrijk om een realistisch beeld van de STBU te krijgen. In de komende paragrafen worden nog specifieke aanbevelingen gedaan voor elke parameter en eventuele vervolg onderzoeken.

5.2.1 COHESIE

Bij de bepaling van de karakteristieke cohesiewaarde worden de onzekerheden van het toepassen van het model van Coulomb met verschillende theoretische en statistische factoren verdisconteerd. In de huidige werkwijze wordt eerst de waarde voor de cohesie omgerekend vanuit de resultaten van de laboratoriumproeven. Hierdoor worden de eventuele onzekerheden in de laboratoriumproeven meegenomen in de verdere analyses van de karakteristieke waarde.

In “Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken” (1989) wordt aanbevolen om deze werkwijze aan te passen. Hier wordt voorgesteld dat voor humeuze grondsoorten (die zich moeilijk volgens het model van Coulomb laten beschrijven) het een betere aanpak zal zijn om de schuifsterkten op de gewenste spanningsniveaus direct te interpoleren op de in de proef gevonden cirkels, en die vervolgens als basiswaarnemingen te gebruiken. Deze manier om de sterkteparameters uit de laboratoriumproeven te verwerken, kan tot ‘realistischere’ resultaten leiden van de uiteindelijke karakteristieke cohesiewaarde.

Gezien de aangetoonde gevoeligheid van de cohesie (toename van 0 tot 0,5 kN/m^2 in de cohesie geeft 10% toename in de SF) kunnen dit soort ‘nieuwe’ aanpassingen bij de bepaling van de cohesiewaarde leiden tot een positieve bijdrage aan de berekende STBU. Nader onderzoek naar dit onderwerp is hier aan te bevelen. Daarnaast (gebaseerd op het HHNK onderzoek naar ondergrenzen voor de cohesie) blijkt dat het toepassen van minimale waarden voor de cohesie bij lage spanningen, conform de waarden in de eurocode, een gunstige aanname voor de STBU is.

5.2.2 GEOMETRIE

Voor de bepaling van de buitenwaartse geometrie zijn er grote onzekerheden in de kwaliteit van de gebruikte gegevens. Gezien de gevoeligheid van deze parameter is het aan te bevelen om de geometrie van het buitentalud beter te meten en te blijven monitoren.

Tevens kan uit het onderzoek geconcludeerd worden dat bij kleine verflauwingen van het buitentalud een veel hogere STBU te behalen is. Bij onvoldoende stabiliteit, en in het geval dat er ruimte is voor dit soort aanpassingen, kan met een verflauwing van het onderwatertalud 'eenvoudig' de buitenwaartse stabiliteit worden verbeterd.

Uit de analyse van de invloed van de geometrie is ook naar voren gekomen dat de aanwezigheid van rietplanten in het buitentalud tot twijfels leidt over het onderwater verloop van het buitentalud. Mogelijk vorm de aanwezigheid van riet een eenvoudige indicatie voor een flauw of ondiep buitentalud. Hierbij is het ook interessant om te weten of deze rietplanten (wortels) ook extra sterkte aan het buitentalud kunnen toevoegen. Daarnaast is het ook de vraag hoe deze eventuele sterkte op een goede (veilige) manier verwerkt kan worden in de STBU berekening. Een vervolg onderzoek naar dit onderwerp is aan te bevelen.

5.2.3 WATERSPANNINGEN

De bepaling van het verloop van het freatische grondwater was ook een punt van discussie in dit onderzoek. Bij gebrek aan gegevens worden er conservatieve aannames gedaan van deze parameter. Vaak wordt er gekozen om een hoge freatische lijn te schematiseren in het dijklichaam. Dit naijlingseffect wordt gebaseerd op de gedachte dat het buitentalud zo doorlatend is dat de freatische lijn zich direct aanpast aan een extreme hoge buitenwaterstand. Hierdoor zal ook gedacht kunnen worden dat als het buitentalud zo doorlatend is, het water ook direct na de hoogwater situatie uit het talud kan wegstromen.

Om het verloop van de freatische lijn in slecht-doorlatende grondsoorten te kunnen bepalen is het van belang om deze parameter beter te meten en te monitoren. Een andere aanbeveling is nader onderzoek te doen naar het exacte verloop van het freatische grondwater bij verschillende grondsoorten. Hierbij zou ook geanalyseerd kunnen worden of de huidige 'veilige' aanname (naijlingseffect) te conservatief is. Ook kan een eventuele relatie tussen de doorlatendheid (of andere geotechnische eigenschap) van de grond en het exacte verloop van het grondwater in een kering onderzocht worden.

6

HANDELINGSPERSPECTIEF VOOR KERINGBEHEERDERS

Gebaseerd op de uitkomsten van het onderzoek wordt het volgende handelingsperspectief voor keringsbeheerders voorgesteld. Deze aanbevelingen kunnen leiden tot een gunstiger berekening van de buitenwaartse stabiliteit.

- Kritisch kijken naar de gekozen waarde van de cohesie van humeuze gronden. Minimale waarden voor de cohesie als ondergrens te bepalen (zoals voorgesteld door het HHNK) is aan te bevelen.
- Buitenwaartse geometrie beter in beeld brengen. Aangezien de gevoeligheid van deze parameter (een conservatieve schematisering leidt tot een forse onderschatting van de stabiliteit) wordt bij gebrek aan gegevens aangeraden om de onderwatergeometrie beter te meten en te monitoren.
- Een duidelijke relatie leggen tussen de aanwezigheid van rietplanten en de geometrie van het onderwatertalud. Deze relatie kan voor een gunstige aanname van de buitenwaartse geometrie zorgen.
- Bij onvoldoende stabiliteit kan met een beperkte verflauwing van het onderwatertalud de buitenwaartse stabiliteit aanzienlijk worden verbeterd.
- Keringen beoordelen op basis van de restbreedte methode met behulp van de veiligheidsoverzichten zoals door D-Geostability gepresenteerd.
- Peilbuizen plaatsen om het exacte verloop van het freatische grondwater in beeld te brengen zodat duidelijke wordt of het naijlingseffect uitgesloten kan worden.
- Voor de langere termijn nieuwe strategieën ontwikkelen voor het in beeld brengen van de wateroverspanningen gegenereerd door boven-belastingen. Onnauwkeurigheden in de stabiliteitsfactor door deze parameter kunnen met een nieuwe aanpak beperkt worden (bijv. andere programma's gebruiken om STBU te berekenen of een verdisconteringsfactor te bepalen voor deze parameter).

Gezien de soms grote invloed van deze parameters op de uitkomsten van de STBU berekening, kan het opvolgen van deze aanbevelingen leiden tot een significant hogere berekende stabiliteitsfactor. Deze mogelijke toename in de berekende stabiliteitsfactor kan het verschil maken tussen het af- en goedkeuren van sommige waterkeringen.

BIBLIOGRAFIE

Deltares. (2009). *SBW Buitendijkse zones en afslagbeheer.* Delf: Deltares.

ENW. (2012). *Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken.* 's-Hertogenbosch: Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving.

HHNK. (2018). *Technische richtlijn toetsen en ontwerpen boezemkades.* Heerhugowaard: HHNK.

Kwakman. (2014). *Regionale proevenverzameling Boezemkaden Noord-Holland v6.0.* Heerhugowaard: HHNK.

Kwakman. (2019). *ONDERGRENZEN STERKTEPARAMETERS - Regionale proevenverzameling Noord-Holland v7.04.* Amsterdam: Arcadis Nederland B.V.

Kwakman, L., & Haanstra, J. (2015). *Veiligheidstoets Boezemkaden Heerhugowaard.* Heerhugowaard: Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier.

Rijkswaterstaat. (2016). *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit WBI 2017.* Utrecht: Ministerie van Infrastructuur en Milieu.

STOWA. (2007). *Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen.* Utrecht: STOWA, ISBN 978.90.5773.382.6.

STOWA. (2009). *Materiaalfactoren boezemkaden.* Utrecht: STOWA, ISBN 978.90.5773.420.5.

STOWA. (2012). *Onderzoek naar de invloed van veen op de stabiliteit van regionale waterkeringen.* Amersfoort: STOWA, ISBN 978.90.5773.590.5.

STOWA. (2015). *Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen.* Amersfoort: STOWA.

TAW. (1989). *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken.* 's-Gravenhage: Uitgeverij Waltman.

TAW. (1994). *Handreiking Constructief Ontwerpen .* Delft: Technische adviescommissie voor de waterkeringen.

TAW. (2004). *Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken.* Delft: Technische adviescomissie voor de waterkering.

Van Hemert, H. (2019). *Stabiliteit buitenwaarts: nadere uitwerking.* Amersfoort: STOWA.

Vergouwe, R., & Sarink, H. (2014). *De veiligheid van Nederland in kaart : eindrapportage.* Nederland: Rijkswaterstaat Projectbureau VNK.

BIJLAGE I

D-GEOSTABILITY KRITISCHE CIRKELS INVLOED COHESIE OP STBU

Kritische Cirkel Bishop

Materialen

- Zand_dijkmateriaal
- Hollandveen_o_dijk – DM
- Klei_onderveen s_z_h_o_di
- Klei_bovenveen s_z_h
- Calais zand, kleiig
- Calais zand
- Pleistoceen zand

Xm : 27,11 [m]
Ym : 6,35 [m]

Straal : 8,84 [m]
Veiligheidsfactor : 0,77

Kade voor analyse - Versie 6.0
Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 5-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 7.04.sti

Kade voor analyse - Versie 6.0 +0.5

Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 5-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 7.04 +0.5.stl

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 28,03 [m]
Ym : 4,59 [m]

Straal : 7,08 [m]
Veiligheidsfactor : 0,85

Kritische Cirkel Bishop

Materialen

- Zand_dijkmateriaal
- Hollandveen_o_dijk – DM
- Klei_onderveen s_z_h_o_di
- Klei_bovenveen s_z_h
- Calais zand, kleiig
- Calais zand
- Pleistoceen zand

Xm : 28,95 [m]
Ym : 2,84 [m]

Straal : 5,80 [m]
Veiligheidsfactor : 0,90

Kade voor analyse - Versie 6.0 +1
Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 5-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 +1.sti

Kade voor analyse - Versie 6.0 +1.5

Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 5-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 +1.5.stl

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 28,95 [m]
Ym : 2,84 [m]

Straal : 5,80 [m]
Veiligheidsfactor : 0,92

Kritische Cirkel Bishop

Materialen

- Zand_dijkmateriaal
- Hollandveen_o_dijk – DM
- Klei_onderveen s_z_h_o_di
- Klei_bovenveen s_z_h
- Calais zand, kleiig
- Calais zand
- Pleistoceen zand

Xm : 28,95 [m]
Ym : 2,84 [m]

Straal : 5,80 [m]
Veiligheidsfactor : 0,95

Kade voor analyse - Versie 6.0 +2
Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 5-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 +2.sti

Kade voor analyse - Versie 6.0 +2.5

Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 5-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 +2.5.sti

Kritische Cirkel Bishop

Materialen

- Zand_dijkmateriaal
- Hollandveen_o_dijk – DM
- Klei_onderveen s_z_h_o_di
- Klei_bovenveen s_z_h
- Calais zand, kleiig
- Calais zand
- Pleistoceen zand

Xm : 28,95 [m]
Ym : 2,84 [m]

Straal : 5,80 [m]
Veiligheidsfactor : 0,97

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 28,95 [m]
Ym : 2,84 [m]

Straal : 5,80 [m]
Veiligheidsfactor : 1,00

Kade voor analyse - Versie 6.0 +3
Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 5-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 +3.sti

Kade voor analyse - Versie 6.0 +3.5

Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 5-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 +3.5.stl

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 28,95 [m]
Ym : 2,84 [m]

Straal : 6,03 [m]
Veiligheidsfactor : 1,02

Kade voor analyse - Versie 6.0 +4

Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 5-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 +4.sti

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 28,95 [m]
Ym : 2,84 [m]

Straal : 6,03 [m]
Veiligheidsfactor : 1,04

Kade voor analyse - V7.04 +Ondergrenzen Klei_bove

Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

Xm : 28,95 [m]
Ym : 2,84 [m]

Straal : 6,03 [m]
Veiligheidsfactor : 1,05

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 7.04 + Ondergrenzen Klei_b_s_z_h.sti

datum 30-4-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

Kade voor analyse - V7.04 +Ondergrenzen alle GS
Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam
Tel
Fax

datum 30-4-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 - Kade voor analyse - Versie 7.04 + Ondergrenzen alle GS.sti

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 28,95 [m]
Ym : 3,71 [m]

Straal : 6,67 [m]
Veiligheidsfactor : 1,28

BIJLAGE II

D-GEOSTABILITY VEILIGHEIDSOVERZICHTEN INVLOED COHESIE OP STBU

Overzicht Veiligheid

Kade voor analyse - Versie 6.0

Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 5-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 7.04.sti

Kade voor analyse - Versie 6.0 +0.5

Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 5-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

Overzicht Veiligheid

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 7.04 +0.5.stl

Overzicht Veiligheid

Kade voor analyse - Versie 6.0 +1

Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 5-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 +1.sti

Kade voor analyse - Versie 6.0 +1.5

Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 5-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 +1.5.stl

Overzicht Veiligheid

Overzicht Veiligheid

Kade voor analyse - Versie 6.0 +2
Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Bijl.

form. A4

ctr.

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 5-5-2020

get. LB

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 +2.sti

Kade voor analyse - Versie 6.0 +2.5

Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 5-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 +2.5.sti

Overzicht Veiligheid

Overzicht Veiligheid

Kade voor analyse - Versie 6.0 +3

Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 5-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 +3.sti

Kade voor analyse - Versie 6.0 +3.5

Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 5-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 +3.5.stl

Overzicht Veiligheid

Overzicht Veiligheid

Kade voor analyse - Versie 6.0 +4

Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 5-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 +4.sti

Overzicht Veiligheid

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 7.04 + Ondergrenzen Klei_b s_z_h.stl

Kade voor analyse - V7.04 +Ondergrenzen Klei_bove

Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

Bijl.		30-4-2020	LB
form. A4	ctr.	datum	get.

Overzicht Veiligheid

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 7.04 + Ondergrenzen alle GS.sti

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 30-4-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Kade voor analyse - V7.04 +Ondergrenzen alle GS
Invloed cohesie op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Bijl.

BIJLAGE III

D-GEOSTABILITY RESULTATEN INVLOED COHESIE OP STBU – 'HOGERE KADE'

Kritische Cirkel Bishop

Materialen

- Zand_dijkmateriaal
- Hollandveen_o_dijk – DM
- Klei_onderveen s_z_h_o_di
- Klei_bovenveen s_z_h
- Calais zand, kleiig
- Calais zand
- Pleistoceen zand

Xm : 27,11 [m]
Ym : 4,59 [m]

Straal : 7,79 [m]
Veiligheidsfactor : 0,92

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 hoge kruin.sti

Hogere kade - Versie 6.0
Invloed cohesie buiten talud op STBU
STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 1-6-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

Hogere kade - Versie 6.0 + 0,5

Invloed cohesie buiten talud op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 1-6-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 + 0,5 hoge kruin.sti

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 28,03 [m]
Ym : 3,71 [m]

Straal : 6,91 [m]
Veiligheidsfactor : 0,95

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 28,03 [m]
Ym : 3,71 [m]

Straal : 6,91 [m]
Veiligheidsfactor : 0,96

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 + 1 hoge kruin.sti

Hogere kade - Versie 6.0 + 1
Invloed cohesie buiten talud op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 1-6-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

Hogere kade - Versie 6.0 + 1.5

Invloed cohesie buiten talud op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 1-6-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 + 1.5 hoge kruin.sti

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 28,03 [m]
Ym : 3,71 [m]

Straal : 6,91 [m]
Veiligheidsfactor : 0,98

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 28,03 [m]
Ym : 3,71 [m]

Straal : 6,91 [m]
Veiligheidsfactor : 1,00

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 + 2 hoge kruin.sti

Hogere kade - Versie 6.0 + 2
Invloed cohesie buiten talud op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 1-6-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

Hogere kade - Versie 6.0 + 2.5

Invloed cohesie buiten talud op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 1-6-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 + 2.5 hoge kruin.sti

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 28,03 [m]
Ym : 3,71 [m]

Straal : 6,91 [m]
Veiligheidsfactor : 1,02

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 28,03 [m]
Ym : 3,71 [m]

Straal : 6,91 [m]
Veiligheidsfactor : 1,04

Hogere kade - Versie 6.0 + 3

Invloed cohesie buiten talud op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 1-6-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 + 3 hoge kruin.sti

Hogere kade - Versie 6.0 + 3.5

Invloed cohesie buiten talud op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 1-6-2020

get. LB

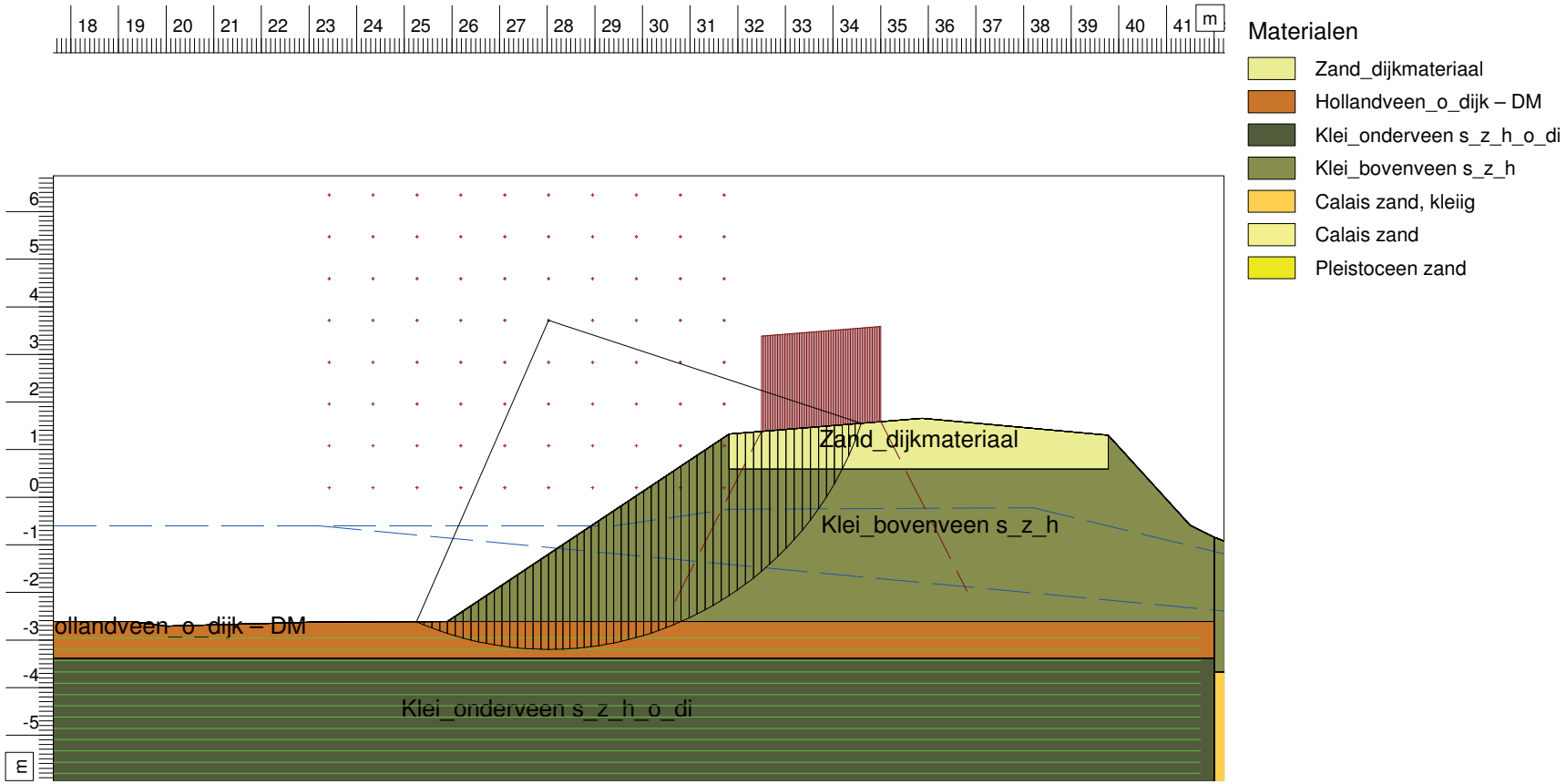
ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 + 3.5 hoge kruin.sti

Kritische Cirkel Bishop



Xm : 28,03 [m]
Ym : 3,71 [m]

Straal : 6,91 [m]
Veiligheidsfactor : 1,06

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 28,03 [m]
Ym : 3,71 [m]

Straal : 6,91 [m]
Veiligheidsfactor : 1,08

Hogere kade - Versie 6.0 + Onderg. Klei_b. s_z_h
Invloed cohesie buiten talud op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

Bijl.		datum 1-6-2020
form. A4	ctr.	get. LB

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 + Onderg. Klei-b. s_z_h hoge kruin.sti

Kritische Cirkel Bishop

Materialen

- Zand_dijkmateriaal
- Hollandveen_o_dijk – DM
- Klei_onderveen s_z_h_o_di
- Klei_bovenveen s_z_h
- Calais zand, kleiig
- Calais zand
- Pleistoceen zand

Xm : 28,03 [m]
Ym : 4,59 [m]

Straal : 7,55 [m]
Veiligheidsfactor : 1,28

Hogere kade - Versie 6.0 + Onderg. alle GS
Invloed cohesie buiten talud op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 1-6-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 + Onderg. alle GS hoge kruin.sti

BIJLAGE IV

D-GEOSTABILITY RESULTATEN INVLOED GEOMETRIE OP STBU

Kade voor analyse - Versie 6.0 Talud 1op1.5

Invloed geometrie buiten talud op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 18-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 1op1.5.stl

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 27,11 [m]
Ym : 6,35 [m]

Straal : 8,84 [m]
Veiligheidsfactor : 0,77

Kritische Cirkel Bishop

Materialen

- Zand_dijkmateriaal
- Hollandveen_o_dijk – DM
- Klei_onderveen s_z_h_o_di
- Klei_bovenveen s_z_h
- Calais zand, kleiig
- Calais zand
- Pleistoceen zand

Xm : 29,87 [m]
Ym : 2,84 [m]

Straal : 4,14 [m]
Veiligheidsfactor : 0,85

Kade voor analyse - Versie 6.0 Talud 1op1.5 -1op3
Invloed geometrie buiten talud op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 18-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 1op1.5 en daarna 1op3.sti

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 28,03 [m]
Ym : 5,47 [m]

Straal : 7,72 [m]
Veiligheidsfactor : 0,95

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 1op2.sti

Kade voor analyse - Versie 6.0 Talud 1op2

Invloed geometrie buiten talud op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 18-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

Kritische Cirkel Bishop

Materialen

- Zand_dijkmateriaal
- Hollandveen_o_dijk – DM
- Klei_onderveen s_z_h_o_di
- Klei_bovenveen s_z_h
- Calais zand, kleiig
- Calais zand
- Pleistoceen zand

Xm : 28,03 [m]
Ym : 4,59 [m]

Straal : 7,79 [m]
Veiligheidsfactor : 1,08

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 1op2.5.sti

Kade voor analyse - Versie 6.0 Talud 1op 2,5
Invloed geometrie buiten talud op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 18-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

Kade voor analyse - Versie 6.0 Talud 1op3

Invloed geometrie buiten talud op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 1-6-2020

get. LB

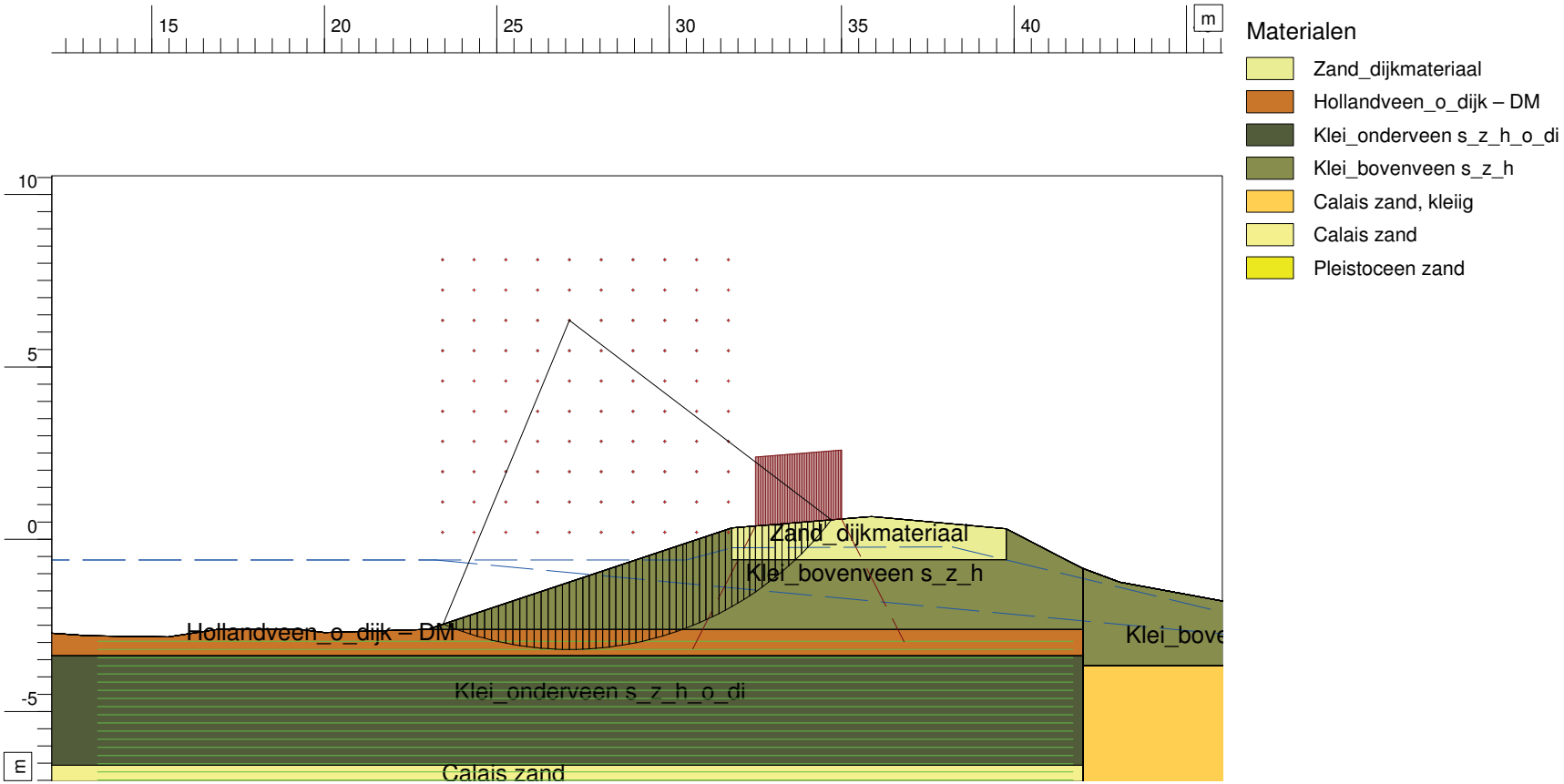
ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 top3.sti

Kritische Cirkel Bishop



Materialen

- Zand_dijkmateriaal
- Hollandveen_o_dijk – DM
- Klei_onderveen s_z_h_o_di
- Klei_bovenveen s_z_h
- Calais zand, kleiig
- Calais zand
- Pleistoceen zand

Xm : 27,11 [m]
Ym : 6,35 [m]

Straal : 9,54 [m]
Veiligheidsfactor : 1,19

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 26,19 [m]
Ym : 6,35 [m]

Straal : 9,31 [m]
Veiligheidsfactor : 0,59

Kade voor analyse - Versie 6.0 Talud 1op1

Invloed geometrie buiten talud op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 1-6-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Versie 6.0 1op1.sti

BIJLAGE V

D-GEOSTABILITY KRITISCHE CIRKELS INVLOED VERKEERSBELASTING OP STBU

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 27,11 [m]
Ym : 6,35 [m]

Straal : 8,84 [m]
Veiligheidsfactor : 0,77

Kade voor analyse - 13kN/m2 - 70%
Invloed verkeersbelasting op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 26-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Verkeersbelasting 13kN.m2 - 70.sti

Kade voor analyse - 13kN/m2 - 50%

Invloed verkeersbelasting op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 26-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Verkeersbelasting 13kN.m2 - 50.stl

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 27,11 [m]
Ym : 4,59 [m]

Straal : 6,84 [m]
Veiligheidsfactor : 0,81

Kritische Cirkel Bishop

Materialen

- Zand_dijkmateriaal
- Hollandveen_o_dijk – DM
- Klei_onderveen s_z_h_o_di
- Klei_bovenveen s_z_h
- Calais zand, kleiig
- Calais zand
- Pleistoceen zand

Xm : 28,03 [m]
Ym : 3,71 [m]

Straal : 5,49 [m]
Veiligheidsfactor : 0,81

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Verkeersbelasting 5kN.m2 - 70.sti

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

Kade voor analyse - 5kN/m2 - 70%
Invloed verkeersbelasting op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

datum 26-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

Kritische Cirkel Bishop

Materialen

- Zand_dijkmateriaal
- Hollandveen_o_dijk – DM
- Klei_onderveen s_z_h_o_di
- Klei_bovenveen s_z_h
- Calais zand, kleiig
- Calais zand
- Pleistoceen zand

Xm : 28,03 [m]
Ym : 3,71 [m]

Straal : 5,49 [m]
Veiligheidsfactor : 0,81

Kade voor analyse - 5kN/m2 - 50%

Invloed verkeersbelasting op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 26-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Verkeersbelasting 5kN.m2 - 50.sti

Kritische Cirkel Bishop

Materialen

- Zand_dijkmateriaal
- Hollandveen_o_dijk – DM
- Klei_onderveen s_z_h_o_di
- Klei_bovenveen s_z_h
- Calais zand, kleiig
- Calais zand
- Pleistoceen zand

Xm : 28,03 [m]
Ym : 3,71 [m]

Straal : 5,49 [m]
Veiligheidsfactor : 0,81

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Zonder Verkeersbelasting.sti

Kade voor analyse - Zonder verkeersbelasting
Invloed verkeersbelasting op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 2-6-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

BIJLAGE VI

D-GEOSTABILITY VEILIGHEIDSOVERZICHT INVLOED VERKEERSBELASTING OP STBU

Overzicht Veiligheid

Kade voor analyse - 13kN/m2 - 70%

Invloed verkeersbelasting op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 26-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Verkeersbelasting 13kN.m2 - 70.sti

Overzicht Veiligheid

Kade voor analyse - 13kN/m2 - 50%

Invloed verkeersbelasting op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 26-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Verkeersbelasting 13kN.m2 - 50.sti

Overzicht Veiligheid

Kade voor analyse - 5kN/m2 - 70%

Invloed verkeersbelasting op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 26-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Verkeersbelasting 5kN.m2 - 70.sti

Overzicht Veiligheid

Kade voor analyse - 5kN/m2 - 50%

Invloed verkeersbelasting op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 26-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Verkeersbelasting 5kN.m2 - 50.sti

Overzicht Veiligheid

Kade voor analyse - Zonder verkeersbelasting

Invloed verkeersbelasting op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 1-6-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - Zonder Verkeersbelasting.sti

BIJLAGE VII

D-GEOSTABILITY RESULTATEN INVLOED WATERSPANNINGEN OP STBU

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 27,11 [m]
Ym : 6,35 [m]

Straal : 8,84 [m]
Veiligheidsfactor : 0,77

Kade voor analyse - Waterspanning situatie 1
Invloed waterspanningen op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel
Fax

datum 28-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - waterspanning 0.sti

Kade voor analyse - Watterspanning situatie 2

Invloed waterspanningen op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 28-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - waterspanning 1.stl

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 25,27 [m]
Ym : 6,35 [m]

Straal : 9,07 [m]
Veiligheidsfactor : 0,91

Kade voor analyse - Waterspanning situatie 3

Invloed waterspannigen op STBU

STBU - streefpeil - verkeersbelasting

Hogeschool van Amsterdam

Tel

Fax

datum 28-5-2020

get. LB

ctr.

form. A4

Bijl.

Kritische Cirkel Bishop

Xm : 25,27 [m]
Ym : 6,35 [m]

Straal : 9,07 [m]
Veiligheidsfactor : 0,96

D-Geo Stability 18.1 : Kade voor analyse - waterspanning 2.sti