

stowa

HET KLIMAAT VERANDERT, DE WATERKERING OOK



RAPPORT

2023
55

HET KLIMAAT VERANDERT, DE WATERKERING OOK

RAPPORT

2023

55

ISBN 978.94.6479.053.5



stowa@stowa.nl www.stowa.nl

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

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

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Jiska Nekkers en Maria Silva, studenten Civiele Techniek aan Hogeschool Windesheim

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Henk van Hemert (STOWA)
Reginald Grendelman (Windesheim)
René van den Hoven (Windesheim)

VORMGEVING Buro Vormvast

STOWA STOWA 2023-55

ISBN 978.94.6479.053.5

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

Klimaat en klimaatverandering hebben invloed op de geotechnische eigenschappen van grondsoorten. Veranderingen in het klimaat hebben zodoende ook effect op de stabiliteit van waterkeringen. Het rapport *Het klimaat verandert, de waterkering ook* verkent dit betrekkelijk onbekende fenomeen. Doelstelling is de invloed van het klimaat inzichtelijk te maken voor beheerders en daarmee een bijdrage te leveren aan de optimalisering van lokaal beheer en onderhoud van waterkeringen.

Eerder Engels onderzoek naar geotechnische eigenschappen toonde al aan dat klimaatverandering van invloed is op de stabiliteit van taluds van grondlichamen. Met dat vertrekpunt onderzochten twee studenten van de Hogeschool Windesheim te Zwolle de invloed op de stabiliteit van waterkeringen. Zij bekeken ook het effect van klimaatverandering voor het toekomstige beheer van de regionale waterkeringen en hoe die informatie verwerkt kan worden in een digitale tweeling. Dit rapport vormt de beknopte samenvatting van hun onderzoeksproject. Het volledige afstudeerrapport is als bijlage toegevoegd.

Op basis van de onderzoeksbevindingen worden aanbevelingen gedaan voor toekomstig beheer van waterkeringen in een veranderend klimaat. Het rapport bevat tevens suggesties voor de verdere invulling van nog niet beantwoorde kennisvragen.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

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.

HET KLIMAAT VERANDERT, DE WATERKERING OOK

INHOUD

	TEN GELEIDE DE STOWA IN HET KORT INHOUD	
1	INLEIDING	1
2	INVLOED VAN HET (VERANDEREND) KLIMAAT OP FAALMECHANISMEN	2
3	STABILITEIT VAN EEN WATERKERING	3
4	INVLOED VAN DROOG/NAT CYCLI OP GEOTECHNISCHE EIGENSCHAPPEN	4
5	INVLOED DROOG/NAT – CYCLI OP DE STABILITEIT VAN DIJKLICHAMEN	7
6	FAALCURVES EN OPTIMALISERING VAN BEHEER EN ONDERHOUD	11
7	CONCLUSIE	13
BIJLAGE	ONDERZOEKSRAPPORT INVLOED VAN HET KLIMAAT OP REGIONALE DIJKEN	16

1

INLEIDING

Beheer en onderhoud van regionale waterkeringen wordt steeds intensiever doordat het klimaat verandert en zich steeds vaker extreme weersomstandigheden voordoet. In Nederland is nog weinig onderzoek gedaan naar de invloeden van het klimaat op sterkte-eigenschappen van de grond en de stabiliteit van een dijk. Zodoende ontbreekt een uniforme aanpak om met deze invloeden om te gaan. STOWA vroeg om een verkenning naar deze invloeden.

In het kader van zorgplicht beschikt de keringbeheerder idealiter over continu inzicht in de werkelijk toestand van de kering. In dat kader werkten STOWA, enkele waterschappen en RWS aan het project “Continu inzicht”. Inmiddels zijn de ambities bij continu inzicht geëvolueerd in het streven naar een zogenaamde voorspellende digitale tweeling van een waterkering. In zo’n tweeling ontstaat een goed beeld van de actuele toestand van de kering en kunnen voorspellingen worden gedaan over de sterkte tijdens naderende extreme belastingssituaties en de noodzaak tot herstel van aantastingen. Een denkbare aantasting vormt de invloed van het klimaat. Doel van dit onderzoek is tweeledig:

- het in kaart brengen van de invloed van het klimaat op de sterkte van een kering;
- de invloed inpasbaar te maken in de digitale tweeling zodat beheer en onderhoud van regionale keringen geoptimaliseerd kan worden.

Dit doel heeft geleid tot de volgende onderzoeksvraag:

Wat is de invloed van het klimaat en de verandering daarvan op de stabiliteit van regionale dijklichamen en hoe kan deze informatie inpasbaar gemaakt worden in een digitale tweeling, voor de optimalisering van beheer- en onderhoudsmethoden van dijklichamen?

Voor de beantwoording van deze vraag zijn vijf deelonderzoeken uitgevoerd, te weten:

1. Welke (veranderende) aspecten van het klimaat beïnvloeden de verschillende faalmechanismen van dijken;
2. Welke grondeigenschappen verzorgen de stabiliteit van een dijk (inclusief modelkeuze om de invloed van het klimaat op stabiliteit goed te kunnen bepalen);
3. Selectie van het klimaataspect om de invloeden op de stabiliteit van de dijk te onderzoeken;
4. Berekening van de invloed van het klimaataspect op de stabiliteit van dijk;
5. Opstellen van een faalcurve voor het betreffende klimaataspect, als toepassing voor de optimalisering van beheer en onderhoud.

Dit rapport vat de resultaten en conclusies van het onderzoek samen. In de bijlage is het volledige onderzoek toegevoegd.

2

INVLOED VAN HET (VERANDEREND) KLIMAAT OP FAALMECHANISMEN

De veiligheid van een kering hangt enerzijds af van de hydraulische belasting en anderzijds van de sterkte van de kering. Een veranderend klimaat kan leiden tot zowel een toename van de hydraulische belasting op de kering als tot aantasting van de sterkte van de kering. Hierdoor neemt de kans op het optreden van faalmechanismen toe, maar dit geldt niet per definitie voor alle faalmechanismen en zeker niet in gelijke mate.

Binnen dit onderzoek is gekozen alleen de invloed van het (veranderende) klimaat op de sterkte van de waterkering te beschouwen, specifiek het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts. Verandering van de optredende hydraulische belasting worden verdisconteerd via de maatgevende belastingsituatie behorende bij de normsituatie en vormen geen onderdeel van deze studie.

Deze keuze voor macrostabiliteit is het resultaat van een proces waarin de faalmechanismen zijn gefilterd op de gevoeligheid voor invloed van het klimaat. Hierbij is een koppeling gemaakt tussen de faalmechanismen en de verschillende kenmerken van het klimaat en de invloeden op de faalmechanismen.

De verwachte veranderingen van kenmerken van het klimaat zijn bepaald op basis van gegevens van het KNMI. Per kenmerk van het klimaat is een inschatting gemaakt hoe deze de faalmechanismen beïnvloed.

Een voorbeeld hiervan is een droog klimaat. Een droog klimaat heeft als gevolg dat het neerslagtekort tijdens de zomerperiode toeneemt. Dit leidt tot onder andere uitdroging van de grond en scheurvorming. Dit kan vervolgens leiden tot het faalmechanisme macro-instabiliteit binnen- en buitenwaarts, afschuiven van het binnentalud en opdrijven of opbarsten.

3

STABILITEIT VAN EEN WATERKERING

De invloed van het klimaat op de stabiliteit van een kering wordt geanalyseerd met behulp van stabiliteitsberekeningen met PLAXIS. PLAXIS beschikt over meerdere grondmodellen. Verkend is welk grondmodel het meest geschikt is om de invloed van het klimaat in rekening te brengen. Beschouwd zijn de grondmodellen Critical State en Mohr-Coulomb, omdat dit de meest gangbare modellen zijn in de huidige adviespraktijk (voor wat betreft de berekening van de stabiliteit van keringen). Deze modellen beschrijven op een verschillende manier de schuifsterkte van de grond.

De berekening van de stabiliteit van een glijvlak kent als parameters de schuifweerstand langs dat glijvlak. De schuifweerstand τ is afhankelijk van de sterkte van de grondlagen in en onder de dijk en het volumiek gewicht daarvan in combinatie met het niveau van de grondwaterstand.

Deze sterkte van de grond bepaalt dus grotendeels de stabiliteit van een grondlichaam. Daarbij is tevens van belang of de grond gedraineerd of ongedraineerd reageert.

Met het grondmodel Mohr-Coulomb (associatief) kunnen de invloeden van het klimaat goed in rekening worden gebracht via (veranderingen van) de hoek van inwendige wrijving en de cohesie en wijziging van de effectieve spanning als gevolg van veranderingen van de grondwaterstand door scheurvorming enerzijds en veranderende neerslagpatronen anderzijds.

Daarom is gekozen om de stabiliteitsberekeningen met Mohr – Coulomb (associatief) uit te voeren, rekening houdend met gedraineerd grondgedrag. De uitgevoerde laboratoriumproeven leveren bruikbare waarden op voor deze parameters.

4

INVLOED VAN DROOG/NAT CYCLI OP GEOTECHNISCHE EIGENSCHAPPEN

Voor de afbakening van het onderzoek is de focus gelegd op de invloeden van droogte (en herbevochtiging) op de stabiliteit van dijken. Deze keuze is onder andere gemaakt omdat de doorbraak van de kade in Wilnis (zomer 2003) aantoont dat droogte een significante bedreiging kan vormen en omdat verwacht wordt dat droogte in de toekomst vaker zal optreden als gevolg van klimaatverandering.

Als casus is een droogtegevoelig dijkprofiel gekozen uit de locaties van het onderzoek “droogtemonitoring”. Van deze dijkprofielen zijn veel gegevens verzameld over met name de variatie in de grondwaterstand. Het gekozen dijkprofiel ligt in de Middelburg Tempel polder (MT-polder). Deze dijk bestaat voornamelijk uit klei en veen en is daardoor droogtegevoelig. Voor deze dijk en het klimaat aspect ‘droog/nat’ – cycli is het faalmechanisme macro-instabiliteit het meest relevant.

Uit de literatuurstudie bleken de volgende invloeden van droogte op de geotechnische eigenschappen van klei en veen:

SCHEUREN

In zowel klei- als veenlagen in dijken ontstaan scheuren door het krimpen en zwellen van de grond bij veranderingen van het vochtgehalte. De scheuren die ’s zomers in de dijk ontstaan zwellen in de winter vaak dicht, maar dit is zeker niet altijd het geval. Indien een dijk tijdens extreme droogte verder uitdroogt dan ooit daarvoor, kunnen ook dieper in het dijklichaam scheuren ontstaan. Door scheurvorming neemt de doorlatendheid toe.

STERKTE EIGENSCHAPPEN

Doordat het water uit de grond verdampt ontstaan zuigspanningen in de grond. Hierdoor neemt de korrelspanning toe. Door droog/nat cycli wordt de potentie om zuigspanning te ontwikkelen kleiner, waardoor de schuifweerstand van onverzadigde grond afneemt. Uit de literatuur is gebleken dat de hoek van inwendige wrijving en de cohesie afnemen onder invloed van het droog/nat cycli. De sterkte neemt na een aantal droog/nat-cycli af van de pieksterkte naar de residuele sterkte (‘softening’).

VOLUMIEK GEWICHT

Droogte leidt tot een versnelling van de afbraak van organische stof. Dit leidt vooraleerst tot een afname van het volumiek gewicht. Bovendien kan afbraak van de vezels ervoor zorgen dat sterke verbindingen in de grond kapotgaan. Bij veen kan bovendien gasvorming ontstaan, wat kan leiden tot een wateroverdruk in de verzadigde zone en een afname van het volumiek gewicht van de verzadigde grond. Bij een blijvend hoge grondwaterdruk in de diepere zandondergrond kan de veenlaag zelfs gaan “opdrijven”, zeker als de onverzadigde zone van een (veen-) dijk door uitdroging ook lichter is geworden.

Om de literatuurstudie te valideren zijn interviews gedaan en is labonderzoek uitgevoerd.

INTERVIEWS

Tijdens de interviews is gevraagd in welke mate de inspecteurs de bevindingen van de literatuurstudie herkennen in de praktijk. Het belangrijkste wat opviel in de interviews is dat de verdroging van de dijk een positieve en negatieve invloed op de dijk kan hebben. De dijk wordt sterker naar mate minder water tussen de korrels zit. Daarentegen zorgt droogte ook voor scheurvorming, afname van gewicht en gasvorming wat kan leiden tot instabiliteit. Ook kunnen scheuren, die gevuld zijn met water, leiden tot wateroverspanning in dijken. Hiervoor moet de scheur wel diep en breed genoeg zijn en moet het regenwater tijdens een gebeurtenis met (extreme) neerslag ook daadwerkelijk in de scheuren blijven staan en niet afstromen naar het achterland. Kleine scheuren (minder dan 0,5 meter diep) worden niet gezien als gevaarlijk. Een waarneming is dat scheuren niet altijd herstellen in de winter, dat geldt met name voor veendijken.

Ook de vegetatie heeft invloed op de verdroging van een waterkering. Diepgewortelde vegetatie kan tijdens droogte leiden tot meer verdamping van grondwater dan ondiep wortelende vegetatie. Lange/hoge vegetatie zorgt voor meer schaduw waardoor minder water uit de grond verdampt. Een goed beheer van de vegetatie is van belang om uitdroging van de dijk te verminderen. De waterschappen hebben nog geen duidelijk zicht op de invloed van droogte op sterkte eigenschappen van dijken. Een indruk is dat een dikkere kleilaag ervoor kan zorgen dat minder water uit de kern van de dijk wordt onttrokken.

LABONDERZOEK

Labproeven zijn uitgevoerd met grond uit de kade van de MT-polder. De proeven zijn uitgevoerd in het lab van de TU Delft. Uit de bovenste grondlagen zijn grondmonsters gestoken, met en zonder vegetatie (zie figuren 1 en 2).

FIGUUR 1 GRONDMONSTER MET VEGETATIE



FIGUUR 3 RESULTATEN VAN DE ONTWIKKELING VAN ZUIGSPANNING VAN BEIDE GRONDMONSTERS



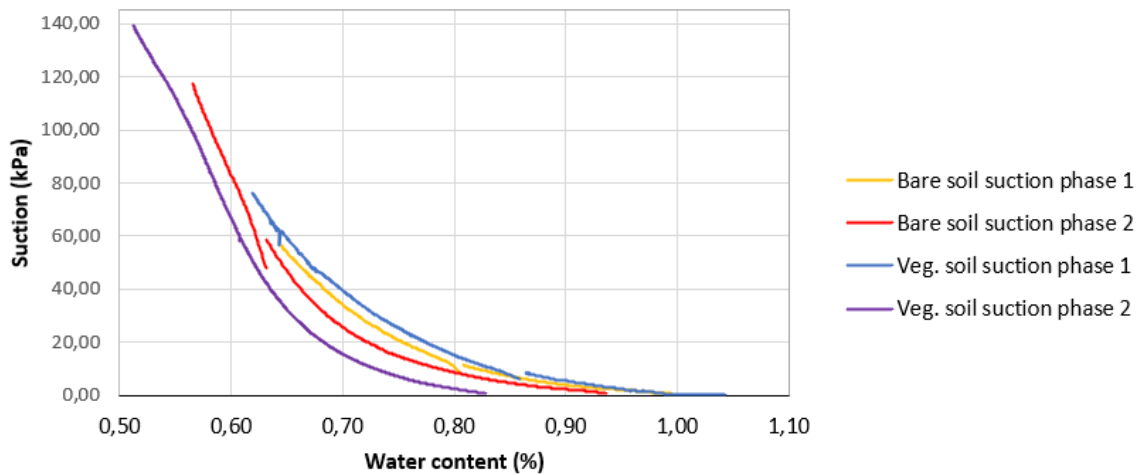
Classificatie grondsoort

De grondsoort is geclassificeerd met behulp van de Atterbergse grenzen. Beide monsters betreffen siltige klei, waarbij de grond zonder vegetatie een gemiddelde plasticiteit heeft en de grond met vegetatie een hoge plasticiteit heeft. Deze classificatie is gebruikt om de benodigde eigenschappen voor de stabiliteitsberekeningen aan de grond toe te kennen.

Bodemvocht retentie

Met de Hyprop proef is voor beide grondmonsters de zuigspanning in het grondmonster gemeten tijdens het uitdrogen (aan de lucht). Nadat de grond tot een bepaalde zuigspanning werd uitgedroogd, is deze weer bevochtigd en is het proces van uitdrogen herhaald. Beide grondsoorten hebben bij de tweede fase van drogen een lagere zuigspanning bij eenzelfde watergehalte dan tijdens de eerste fase van uitdrogen (zie figuur 3). Deze waarneming komt overeen met de literatuur waarin is gevonden dat de zuigspanning na iedere droog/nat fase afneemt.

Suction comparison



Doorlatendheid

Met de Hyprop proef is ook de verandering van de doorlatendheid van beide grondmonsters bepaald. Hierbij is te zien dat, naarmate de grond meer uitdroogt, de doorlatendheid lager wordt. Dit wordt veroorzaakt doordat het water bij een hoge zuigspanning zich alleen nog in de kleinste grondporiën bevindt, in deze poriën kan het water het minst snel stromen. Het effect van scheuren op de doorlatendheid wordt met deze proef niet gemeten.

Schuifsterkte

Als laatste is de Direct Shear proef uitgevoerd. De sterkteparameters van de grond die met deze proef zijn bepaald, zijn gebruikt voor de stabiliteitsberekening. Uit deze proef is gebleken dat de sterkte van de grond zonder vegetatie, na het bereiken van de pieksterkte, maar weinig afneemt. Dit zou kunnen komen doordat de grond verzadigd is waardoor deze plastischer reageert.

5

INVLOED DROOG/NAT – CYCLI OP DE STABILITEIT VAN DIJKLICHAMEN

De afname van de stabiliteit van dijken onder invloed van het droog en nat worden van de dijk is bepaald door middel van een aantal stabiliteitsberekeningen van de kade bij de MT-polder (PLAXIS). Bovenstaand beschreven invloeden van droog/nat – cycli en een veranderend klimaat zijn daarbij vertaald in:

1. een afname van de schuifsterkte van de grondlagen boven de laagste grondwaterstand;
2. een stijging van het niveau van de grondwaterstand.

Ad.1 De verlaging van de sterkteparameters van de bovenste grondlagen volgt uit de invloed van het zwellen en krimpen van de grond (door drogen en nat worden) en de bijbehorende afname van de zuigspanningen. De afname van de schuifsterkte van de grondlagen is op twee wijzen beschouwd:

- a. geleidelijke afname van de sterkte van de zone boven de laagste grondwaterstand;
- b. geleidelijke daling van het niveau van de laagste grondwaterstand (en afname sterkte).

Ad.2 Door een toename van de neerslaghoeveelheid tijdens piekbuien en een verandering in de doorlatendheid van de grond verandert de hoogste grondwaterstand in de toekomst waarschijnlijk. Daarbij gelden twee tegengestelde effecten:

- toenemende scheurvorming zorgt voor een toename in de doorlatendheid, wat leidt tot een snellere wegstroming van het grondwater uit het dijklichaam;
- toename van de neerslaghoeveelheid en -intensiteit tijdens piekbuien leidt tot een toename van het niveau van de hoogste grondwaterstanden.

Ook algemene kenmerken van de dijk zijn van invloed op de mate van verdroging. Te denken valt aan de ligging ten opzichte van het zuiden, de helling van de taluds en overige kenmerken die de grondwaterstroming in het dijklichaam beïnvloeden (de aanwezigheid van een kwelsloot en ontwateringsdiepte, beschoeiing, kweldruk van uit de zandondergrond, etc., etc.). Omdat vaak sprake is van tegengestelde effecten is een algemeen geldende uitspraak over de invloed van een specifiek kenmerk op de verdroging van een dijk niet goed mogelijk.

Overige denkbare invloeden als gasvorming en een afname van het volumiek gewicht zijn niet beschouwd.

Schematisering afname schuifsterkte

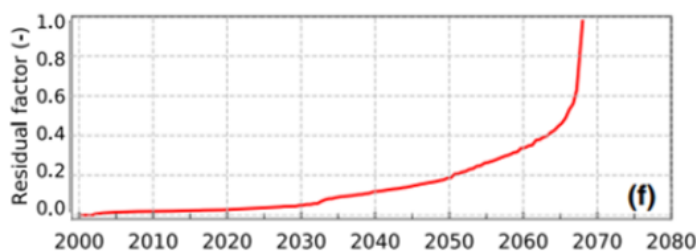
De sterkte van grond neemt na een aantal droog/nat-cycli af van de pieksterkte naar de residuele sterkte ('softening'). Het tempo van de afname van piek naar residuele sterkte wordt uitgedrukt in een zogenaamde residuele factor. Deze factor geeft aan in hoeverre de sterkte van de grond door vervorming is afgenomen van de piek- naar de reststerkte. Bij een residuele factor van 0 heeft de grond nog zijn pieksterkte en bij een residuele factor

van 1 is de grond plastisch geworden en bereikt het zijn residuele sterkte (Metya et al., 2017).

Werkwijze “geleidelijke afname van de sterkte van de zone boven de laagste grondwaterstand”

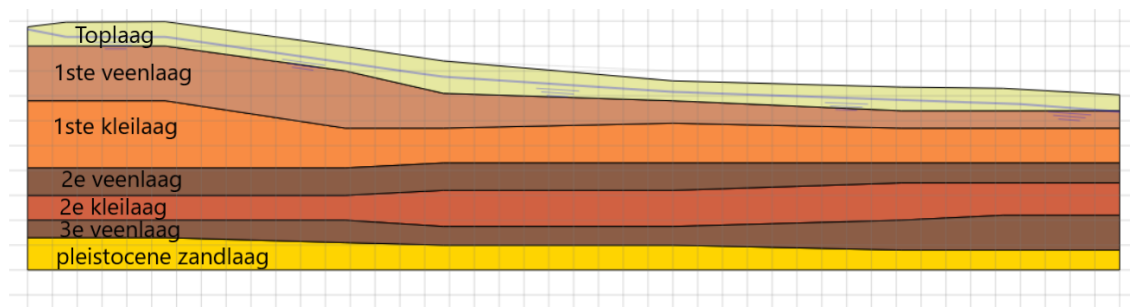
De schuifsterkte voor alle grondlagen boven de laagste grondwaterstand (zone die het zwellen/krimpen ondergaat) neemt geleidelijk af van de pieksterkte tot de residuele sterkte. De geleidelijke afname is bepaald met behulp van een Engels onderzoek, waarin de afname is geschat op basis van de veronderstelde verandering van het klimaat in Engeland (zie Figuur 4). Op basis van deze ‘residual factor’ is per grondsoort de actuele schuifsterkte in verschillende jaren afgeleid. Hierbij is gebruik gemaakt van een landelijke parameter set, op basis waarvan de ratio tussen de residuele sterkte en de pieksterkte van de aanwezige grondlagen is bepaald.

FIGUUR 4 TOENAME RESIDUELE FACTOR (ROUAINIA ET AL., 2020)



Gekozen is de schuifsterkte van de bovenste grondlagen (toplaag en de 1^{ste} veenlaag, zie figuur 5) volledig te laten afnemen van de piek- naar de residuele sterkte. Voor de daaronder gelegen 1^{ste} kleilaag is gekozen de schuifsterkte slechts (geleidelijk, conform het verloop van de residuele factor) te laten afnemen tot de helft tussen de piek- en residuele sterkte. Dit onderscheid is gehanteerd omdat de diepere kleilaag minder wordt blootgesteld aan de invloed van het klimaat, zich deels beneden de verondersteld toekomstige laagste grondwaterstand bevindt en er dus minder sprake zal zijn van ‘softening’ door de cycli van uitdrogen en nat (zwellen en krimpen).

FIGUUR 5 GRONDOPBOUW DIJK MT-POLDER (DE WOLF, Z.D.)



Werkwijze “geleidelijke daling van het niveau van de laagste grondwaterstand (en afname sterkte).”

Door toenemende intensiteit van droogte en neerslag daalt de grondwaterstand tijdens droogte steeds dieper in het dijklichaam. In stappen is de schuifsterkte voor de grondlagen steeds dieper in het dijklichaam (conform de toenemende daling van de laagste grondwaterstand) verlaagd van de pieksterkte tot de residuele sterkte (de verlaging is daarbij verondersteld instantaan op te treden).

Schematisering verandering (hoogste) grondwaterstand

In de berekeningen is de grondwaterstand langzaam verhoogd, als verondersteld netto-effect van een toename van de doorlatendheid en de toename van neerslaggebeurtenissen met een grote hoeveelheid neerslag. In welke mate het veranderende klimaat via scheurvorming de doorlatendheid van een dijklichaam doet veranderen is niet generiek te bepalen. Hierdoor is het onverantwoord bevonden om in dit onderzoek de toename van de hoogste grondwaterstand als gevolg van de toename van de neerslaghoeveelheid te berekenen (met bijvoorbeeld PLAXFLOW). De verhoging van de grondwaterstand is daarom geschat aan de hand van het Nationaal Water Model-Basisprognoses 2016. Deze geeft een verhoging van de hoogste grondwaterstand van bijna 0,2 m in 2050 ten opzichte van de huidige grondwaterstand in de regio van de MT-polder. De verhoging is verondersteld lineair toe te nemen tijdens deze periode.

Het effect van een daling van de laagste grondwaterstand tijdens droogte is niet beschouwd, omdat voor dit profiel de situatie droogte niet maatgevend is gebleken.

RESULTATEN

Werkwijze “geleidelijke afname van de sterkte”

De berekende stabiliteitsfactor daalt van ongeveer 4 tot 3 [-] (zie tabel 1), een afname van ca. 25%.

TABEL 1 AFNAME STABILITEITSFACTOR WERKWIJZE “GELEIDELIJKE AFNAME SCHUIFSTERKTE”

	Tijdstip [in het jaar]	Stabiliteitsfactor [-]
1	2000	3,94
2	2022	3,92
3	2030	3,84
4	2050	3,63
5	2064	3,49
6	2067	3,35
7	2068	3,05

Werkwijze “geleidelijke daling laagste grondwaterstand (en afname sterkte)”

Indien de sterkte van de grondlagen steeds dieper in het dijklichaam afneemt tot de residuele sterkte neemt de berekende stabiliteit significant af (eveneens orde grootte 25%).

TABEL 2 AFNAME STABILITEITSFACTOR WERKWIJZE “DALING LAAGSTE GRONDWATERSTAND”

Afname per laag	Stabiliteitsfactor [-]
Alle grondlagen pieksterkte	3,94
Toplaag naar residuele sterkte	3,63
Top- en veenlaag naar residuele sterkte	3,49
Top-, veen- en kleilaag naar residuele sterkte	3,05

Beide werkwijzen leiden tot een afname van de stabiliteitsfactor van ca. 25% (inherent aan de gelijkwaardige schematisering van beide begin- en eindsituaties). De werkwijze “geleidelijke afname” toont een duidelijk verloop van de berekende stabiliteit in de tijd. Dit geldt in mindere mate voor de werkwijze “geleidelijke daling laagste grondwaterstand”, omdat het verloop van die daling in de tijd niet is bepaald. Beide werkwijzen hebben beperkingen. Zo geldt ten aanzien van de werkwijze “geleidelijke afname schuifsterkte” dat de grondlagen al droogte/nat - cycli hebben doorlopen en de afname van de schuifsterkte dus niet start bij de

pieksterkte. Iets soortgelijks geldt ten aanzien van de werkwijze “geleidelijke daling laagste grondwaterstand”. Hierbij zal de schuifsterkte van de bovenste lagen evenmin de pieksterkte hebben, door overleefde droog/nat – cycli in het verleden. Beide werkwijzen leiden dus tot een overschatting van de afname van de berekende stabiliteit.

Als simpel wordt gesteld dat door het veranderende klimaat de grondwaterstand tijdens droge periode kan dalen van de onderzijde van de veenlaag tot diep in de kleilaag (onderzijde), resulteert een dergelijke daling uiteindelijk in een afname van de stabiliteit met ca. 13% (van 3,49 naar 3,05 [-]).

6

FAALCURVES EN OPTIMALISERING VAN BEHEER EN ONDERHOUD

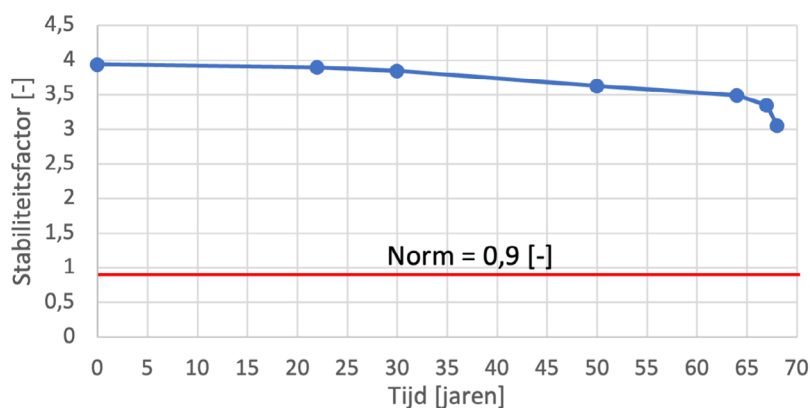
In het kader van continu inzicht dient de staat van de dijk continu bijgehouden te worden. Binnen de toepassing van een digitale tweeling vergt dit het constant vernieuwen van de karakterisering van de dijk op basis van waargenomen veranderingen in het veld. Dit model moet de veiligheid van de kering op een bepaald moment en de ernst van de degradatie van de sterkte weergeven. Naast zichtbare en waarneembare veranderingen (zoals bijvoorbeeld beschadiging van de bekleding of daling van het maaiveld) dient dus ook rekening te worden gehouden met veranderingen in de sterkte van de grondlagen. Daarnaast dient de variatie van de grondwaterstand (door veranderingen van de doorlatendheid) onderdeel te zijn van een dergelijk model.

Dit draagt bij aan de optimalisering van beheer en onderhoud doordat het een duidelijk beeld schetst van de afname van de stabiliteit in de tijd. Hierdoor kunnen waterkeringsbeheerders (de potentiële gebruikers) beheer en onderhoud nauwkeuriger inplannen. In Nederland zijn echter de invloeden van het klimaat op de sterkte van de grond (nog) niet eerder onderzocht. Uit onderzoek blijkt dat het klimaat wel degelijk invloed heeft op deze sterkte. Daarom dient een aanpassing van de sterkte van de grond ook onderdeel te zijn van een digitaal model van de dijk.

Om de invloeden van het klimaat inpasbaar te maken in een digitale tweeling is een faalcurve ontworpen (zie figuur 6). In de faalcurve wordt de degradatie van de stabiliteit van een grondlichaam onder een bepaalde invloed tegen de tijd afgezet. In dit geval zijn de resultaten van de berekeningen verwerkt in de curve. In deze curve is te zien dat gedurende een aantal jaren de stabiliteit afneemt. Voor dijken die nieuw ontworpen worden kan een dergelijke curve gemaakt worden door direct na de bouw de sterkte van de grondlagen te meten. Met een klimaatmodel voor de toekomst kan dan de 'residual factor' worden geschat en inzichtelijk worden gemaakt hoe de schuifsterkte afneemt van de piek- naar de residuele sterkte. Daarmee kan de toekomstige afname van de stabiliteit worden geschat.

FIGUUR 6

FAALCURVE DROOG/NAT-CYCLI EN VERHOOGDE GWS



Voor bestaande dijken is het lastiger om in te schatten hoeveel de sterkte al is afgenomen sinds de bouw van de dijk. Deze dijken hebben sinds de bouw al wel enkele mate van zwellen en krimpen ondergaan met bijkomende afname van de sterkte. Dit geldt voornamelijk voor de toplagen. Verwacht wordt echter dat de zone dat invloed ondervindt van zwellen en krimpen steeds groter wordt. Dit leidt ertoe dat ook lagen onder de bovenste lagen van de dijk steeds meer worden blootgesteld aan de gevolgen van zwellen en krimpen. Door oudere toetsingen en labonderzoeken te vergelijken met huidige toetsingen en labonderzoeken kan een inschatting gemaakt worden van hoeveel de sterkte al is afgenomen.

Belangrijk is ook om mee te nemen dat door periodieke ophogingen van de dijk in het kader van (groot) onderhoud dit weliswaar voor meer belasting op de onderliggende grondlagen zorgt, maar ook een bescherming van de onderliggende lagen biedt tegen het klimaat.

Belangrijk is om mee te nemen dat iedere dijk anders is en dus een eigen faalcurve verdient. In een gevoeligheidsanalyse is onderzocht hoe de faalcurve voor andere dijken verloopt.

Meerdere invloeden kunnen faalmechanismen van een dijk op gang brengen. Door de verschillende invloeden die bijdragen aan de afname van de stabiliteit aan te vullen met de invloeden van het klimaat, kan een digitale tweeling een completer beeld schetsen van de staat van de dijk op een bepaald moment. Het in kaart brengen van de invloeden van het klimaat draagt niet alleen bij aan de optimalisering van beheer en onderhoud maar kan ook meegenomen worden in de ontwerpfase. Door naar de faalcurves van klimaatinvloeden te kijken kunnen klimaatbestendige ontwerpen gemaakt worden.

7

CONCLUSIE

Met behulp van literatuurstudie en experimenten is geconcludeerd dat droog/nat cycli en een toenemende intensiteit daarvan, de volgende invloeden hebben op de stabiliteit van een dijk:

INVLOED VAN DROOG/NAT CYCLI

Door het zwellen en krimpen van de grond van de dijk ontstaan scheurtjes en structuurvorming¹. Omdat de potentie om zuigspanningen te ontwikkelen en behouden hierdoor afneemt, neemt de schuifsterkte van grond af. Wanneer grond droger wordt dan dat het ooit is geweest, of grondlagen dieper in de dijk voor het eerst verdrogen, neemt de schuifsterkte van de lagen af. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn bij klimaatverandering waarin steeds extremere droogte wordt voorspeld. De lagere schuifsterkte veroorzaakt een lagere stabiliteit.

DE VERANDERING IN DOORLATENDHEID

De doorlatendheid in scheuren is in dit onderzoek in kaart gebracht door naar verschillende bronnen te kijken. In sommige van deze bronnen wordt aangegeven dat de doorlatendheid van grond dat uitdroogt kleiner wordt doordat het water eerst snel uit de grote poriën verdampt maar op een gegeven moment bevindt zich nog enkel water in de kleinste poriën. Vanaf dit moment verloopt de verdamping langzamer omdat de poriën klein zijn en het water langzamer eruit stroomt of verdampt. In andere bronnen is echter te lezen dat de doorlatendheid in de grond groter wordt door scheurvorming. In dit geval gaat het waarschijnlijk om diepe brede scheuren waar het water makkelijk in kan stromen. Om hier en duidelijke conclusie over te kunnen trekken zal hier meer onderzoek naar moeten worden gedaan.

EEN GROTERE VARIATIE IN DE GRONDWATERSTAND

Door droogte kan een lagere grondwaterstand in de dijk ontstaan. Een lage grondwaterstand heeft aan de ene kant een positief effect op de korrelspanning en zo dus ook op de schuifsterkte en de stabiliteit van de dijk. Echter kan droogte ook zorgen voor scheuren en dus voor een afname van de schuifsterkte van de dijk zoals al is benoemd. Door meer extreme regenbuien kan de grondwaterstand in de dijk hoger komen te staan. Een hoge grondwaterstand leidt tot een lagere korrelspanning en een lagere schuifsterkte en stabiliteit van de dijk.

GASVORMING

Door het gas, dat kan ontstaan bij de afbraak van veen, kan een wateroverspanning in de dijk ontstaan. Dit proces wordt versterkt door een hoge temperatuur en een lage grondwaterstand. Ook een lage atmosferische druk draagt bij aan dit proces. Door gasvorming worden lege poriën gevuld met gas. Hierdoor ontstaan gasbellen die het water en de grondkorrels aan de kant duwen waardoor de waterspanning in de grond toeneemt en de korrelspanning afneemt. Hierdoor neemt ook de stabiliteit van de dijk af. Dit proces is duidelijker waarneembaar in een stijvere grond omdat slappere grond, zoals veen, makkelijk meebevegen met de gasbel.

¹ Het ontstaan van onregelmatigheden in de grond zoals scheurtjes, brokken en wormgangen (Technische Adviescommissie voor Waterkeringen, 1996).

EEN AFNAME VAN HET GEWICHT VAN DE GROND

Doordat veen veel water bevat kan het ook veel gewicht verliezen door uitdroging. Wanneer een aandrijvende grondmoot gewicht verliest is dit positief voor de stabiliteit. Wanneer een stabiliserende grondmoot gewicht verliest kan de stabiliteit van een dijk afnemen. Ook de gehele dijk kan gewicht verliezen. Wanneer het buitenwater (uit bijvoorbeeld de boezem) contact kan maken met de watervoerende laag onder de dijk kan deze gaan opdrijven.

VERDROGING VAN DE VEGETATIE

Wanneer een dijk droger wordt, verdroogt de vegetatie op de dijk. Verdroogde vegetatie kan ervoor zorgen dat de erosiebestendigheid van de grasmat afneemt. Doordat de dijk aan het verdrogen is, scheurt de grond waardoor de wortels van de vegetatie ook kapotscheuren. Doordat de beschermlaag van de dijk degradeert, wordt de kans op micro instabiliteit groter.

AFNAME STABILITEIT

Voor de invloed van droog/nat-cycli op de stabiliteit zijn stabiliteitsberekeningen met PLAXIS gemaakt. De invloed van het veranderende klimaat is geschematiseerd door de sterkte-eigenschappen (φ en c') in verschillende jaren te laten afnemen en een geleidelijke toename van de grondwaterstand. Dit leidde tot een berekende afname van de stabiliteit met uiteindelijk een afname van circa 25%.

TOEKOMSTIG BEHEER WATERKERINGEN BIJ EEN VERANDEREND KLIMAAT

Met behulp van de resultaten uit het eerste deel van de hoofdvraag is het tweede deel van de hoofdvraag onderzocht, namelijk: *“...hoe kan deze informatie inpasbaar gemaakt worden in een digitale tweeling, voor de optimalisering van beheer- en onderhoudsmethoden van dijklichamen?”*.

De informatie van de invloed van het klimaat op de stabiliteit kan inpasbaar gemaakt worden in een digitale tweeling met behulp van een faalcurve. In een faalcurve wordt de degradatie van de stabiliteit onder invloed van een klimaatinvloed uitgezet tegen de tijd. Door dit in het digitale model te verwerken kan constant bijgehouden worden wat de staat van de dijk is en wat verwacht wordt dat deze zal zijn in de komende jaren. Voordelen voor de optimalisering van beheer en onderhoud die potentiële stakeholders hierin herkennen zijn onder andere:

- ontwerpen van klimaatbestendige dijken wat leidt tot uitstel/minder behoefte van onderhoud;
- optimalisering van de lange termijn asset planning omdat nauwkeurige planningen gemaakt kunnen worden;
- de mogelijkheid om risico gestuurd te handelen, in het algemeen en bij extreme weersomstandigheden;
- completer beheerdersoordeel doordat de degradatie door klimaatinvloeden ook meegenomen worden;
- kosten besparen door het voorkomen van schade door het veranderende klimaat.

In dit onderzoek is een curve gemaakt voor de invloeden van een hoge grondwaterstand en de afname van sterkte door droog/nat-cycli. Conform de bepaalde faalcurve is te zien dat na een bepaalde tijd de pieksterkte afneemt tot de residuele sterkte. Dit betekent dat de stabiliteit van de dijk langzaam afneemt.

Ook voor dijken die bestaan uit een andere grondopbouw, geometrie en die anders gepositieerd zijn ten opzichte van het zuiden zijn illustratieve faalcurves gemaakt. Kwalitatief is ingegaan op variaties in de bodemopbouw (een dijk die meer uit veen bestaat), de geometrie

(steiler en flauwer talud) en de expositie van het binnentalud. Geconcludeerd wordt dat, afhankelijk van onder andere deze factoren, snelheid van degradatie anders loopt. Hierdoor is het belangrijk om voor iedere dijk een eigen faalcurve te ontwerpen.

Klimaataspecten kunnen verschillende faalmechanismen op gang brengen. Voor een integraal ontwerp van een digitale tweeling, moet ook voor de andere klimaataspecten een faalcurve gemaakt worden. Op deze manier kunnen de invloeden van het klimaat inpasbaar gemaakt worden in een digitale tweeling en bijdragen aan de optimalisering van beheer en onderhoud.

BIJLAGE

ONDERZOEKSRAPPORT INVLOED VAN HET KLIMAAT OP REGIONALE DIJKEN

Onderzoek naar de invloeden van het klimaat op de stabiliteit van
(regionale) dijklichamen en hoe deze informatie verwerkt kan worden
in een digitale tweeling



Door

Maria Vieira Salles Silva – 1146885 en Jiska Nekkers – 1146516

Onder begeleiding van

Henk van Hemert (STOWA), Reginald Grendelman (1^e beoordelaar Windesheim) en René van den Hoven (2^e beoordelaar Windesheim)

Civiele Techniek, Hogeschool Windesheim

In opdracht van STOWA te Amersfoort

05-06-2023

Voorwoord

Na 4 maanden onderzoek doen naar de invloeden van het klimaat op dijken presenteren wij, Jiska en Maria, bij deze het onderzoek waarmee wij de studie Civiele Techniek aan Hogeschool Windesheim afronden. Dit onderzoek zou niet mogelijk zijn geweest zonder de hulp en ondersteuning van vele mensen en organisaties. Daarom willen wij onze waardering uitspreken voor STOWA, het bedrijf waar wij stage hebben gelopen en alle mensen die betrokken waren bij dit traject.

Ten eerste willen wij STOWA, de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, bedanken voor de mogelijkheden die zij ons hebben geboden tijdens de stage. De ruimte die het bedrijf ons bood heeft ons geholpen bij het vinden van de juiste informatie. Wij zijn zeer dankbaar voor de kansen die STOWA ons heeft gegeven, zoals het bijwonen van belangrijke conferenties en evenementen die hebben bijgedragen aan ons onderzoek.

Onze speciale dank gaat uit naar Henk van Hemert, onze begeleider vanuit STOWA. Zijn inhoudelijke feedback heeft bijgedragen aan de kwaliteit van ons onderzoek. Daarnaast bedanken wij Henk voor het altijd mee denken in oplossingen en zijn wil om ons niet alleen kennis bij te dragen maar ook ervoor te zorgen dat wij zowel een leerzame maar ook een leuke afstudeerstage hebben. Zo is ook het idee ontstaan om een experiment uit te voeren op de TU in Delft, een waardevolle toevoeging aan ons onderzoek maar vooral ook leuk. Ondanks zijn drukke agenda, heeft hij altijd tijd vrijgemaakt om ons te ondersteunen en wij zijn dankbaar voor zijn betrokkenheid en vertrouwen in ons werk.

Dit onderzoek hadden wij niet kunnen uitvoeren zonder de begeleiding van onze begeleidende docent Reginald Grendelman. Tijdens dit onderzoek heeft hij ons geholpen door feedback te geven en onze eindeloze vragen te beantwoorden. Ook heeft hij het proces van een onderzoek in goede banen geleid en heeft hij met zijn kennis en onmisbare bijdrage geleverd aan ons onderzoek. Wij zijn erg dankbaar voor de tijd en moeite die hij in ons onderzoek en proces heeft gestoken.

Tijdens het uitvoeren van het experiment hebben wij het voorrecht gehad om te werken met Inge de Wolf aan de Technische Universiteit in Delft. Ondanks haar drukke schema als PhD-student, heeft Inge ons voortdurend begeleid bij het uitvoeren van de experimenten, het controleren van ons werk en het geven van waardevolle feedback. Haar expertise en toewijding hebben ons in staat gesteld om onze resultaten te verbeteren en te verfijnen. Wij zijn haar enorm dankbaar voor haar ondersteuning en bereidheid om altijd klaar te staan voor onze vragen.

Verder willen wij onze dank uitspreken aan de professoren Cristina Jommi en Stefano Muraro van de Technische Universiteit in Delft. Hun toestemming om ons experiment in het laboratorium op de TU uit te voeren was essentieel voor ons onderzoek. Wij zijn vereerd dat we gebruik mochten maken van hun faciliteiten en wij zijn hen zeer dankbaar voor hun vertrouwen.

Wij willen ook graag de medewerkers van de waterschappen en onderzoeker Bart Strijker bedanken die de tijd hebben genomen om met ons interviews af te nemen. Hun waardevolle inzichten en bijdragen hebben ons geholpen om een dieper begrip te krijgen van ons onderwerp en hebben ons onderzoek verrijkt.

Tot slot bedanken wij naast STOWA als bedrijf ook de medewerkers van dit bedrijf. Jullie warme ontvangst, behulpzaamheid en ondersteuning hebben het verschil gemaakt tijdens deze stageperiode. In het bijzonder willen wij Oscar van Dam bedanken voor de praktische begeleiding binnen STOWA en het delen van zijn kennis en ervaringen. Jullie openheid om kennis te delen en waardevolle tips te geven tijdens het oefenen van onze presentatie hebben ons geholpen om vertrouwen te hebben in ons werk.

Kortom het voltooien van dit onderzoek zou zonder de steun en begeleiding van STOWA, onze begeleiders, de Technische Universiteit in Delft, en vele anderen niet mogelijk zijn geweest. Onze dank gaat uit naar iedereen die een rol heeft gespeeld in dit proces.

Maria Silva en Jiska Nekkers

Zwolle, 5 juni 2023.

Samenvatting

In Nederland worden de invloeden van het klimaat op de stabiliteit van dijken (nog) niet meegenomen in het toetsen, beheren en onderhouden van dijken. Tegelijkertijd verandert het klimaat en komen steeds vaker extreme weersomstandigheden voor. Dit zorgt ervoor dat het beheer van dijken tijdens extreme perioden steeds intensiever wordt. Ook wordt bevolkingsgroei in de komende jaren verwacht wat ook de risico's van een dijkdoorbraak groter maakt. Vanuit STOWA kwam de vraag om de invloeden van het klimaat op de sterkte eigenschappen van dijken te onderzoeken, met als doel het optimaliseren van beheer en onderhoud. Dit kan door de invloeden van het klimaat met behulp van een faalcurve in een digitale tweeling te implementeren. Dit is een digitaal 3D model van een werkelijke dijk die continu de conditie van de dijk in kaart brengt. Om dit doel te bereiken is de volgende hoofdvraag opgesteld: "Wat is de invloed van het klimaat en de verandering hiervan op de stabiliteit van regionale dijklichamen en hoe kan deze informatie inpasbaar gemaakt worden in een digitale tweeling, voor de optimalisering van beheer- en onderhoudsmethoden van dijklichamen?"

Bij de uitvoering van dit onderzoek is gebruik gemaakt van literatuur, interviews, experimenten en berekeningen. Met de informatie en resultaten uit de literatuur, de interviews en de experimenten zijn de berekeningen voorbereid. Uiteindelijk zijn de resultaten van de berekeningen verzameld en verwerkt in een faalcurve. Om te onderzoeken hoe deze faalcurve kan bijdragen aan optimalisering van beheer en onderhoud zijn interviews gedaan met medewerkers van waterschappen.

Het klimaat heeft invloed op de (grond)eigenschappen van een dijk, wat faalmechanismen induceert. Als gevolg van klimaatverandering zullen bijvoorbeeld extreme buien en droogte vaker voorkomen in Nederland. Dit heeft als gevolg dat de hoogste grondwaterstanden hoger worden en de laagste grondwaterstanden lager. Vooral de macro-instabiliteit wordt hiermee beïnvloedt. Dit komt omdat grondeigenschappen die de stabiliteit van de dijk bepalen degraderen. In dit onderzoek is de focus gelegd op de invloeden van droogte op de sterkte eigenschappen van een klei/veen dijk (een dijk in de MT-polder). Droogte heeft invloed op verschillende eigenschappen van klei en veen, bijvoorbeeld: een afbraak van organisch materiaal en ontstaan van scheuren. Bij klei kan de potentie om zuigspanning te ontwikkelen en vast te houden steeds verder afnemen als het meerdere droog/nat-cycli ondergaat door droogte en regen. Dit leidt tot afname van de schuifsterkte waardoor deze van de pieksterkte naar de residuele sterkte daalt. Dit laatste kan door klimaatverandering versnellen. Uiteindelijk zijn experimenten gedaan in het lab van de TU Delft. Hiervoor zijn grondmonsters verzameld uit een dijk van de MT-polder. Met de Hyprop is de ontwikkeling van de zuigspanning in kaart gebracht en is een verband gelegd met de informatie uit de literatuur. De Atterberg limits zijn gebruikt om de grondsoort van de grondmonsters te bepalen. Uiteindelijk zijn met de Direct Shear proeven, schuifsterkteparameters verzameld die in de berekeningen zijn gebruikt.

Voor de berekeningen in PLAXIS zijn twee invloeden losgelaten op een model van de dijk uit de MT-polder. Dit zijn: een in de jaren geleidelijke toename van de grondwaterstand en een geleidelijke afname van de schuifsterkte eigenschappen. Voor verschillende jaren is vervolgens de stabiliteitsfactor berekend. In de onderzochte casus leidde dit tot een afname van de stabiliteitsfactor van circa 25%. Geconcludeerd wordt dus dat het klimaat (in dit geval droog/nat cycli en verhoogde grondwaterstand) invloed heeft op de stabiliteit van de dijk.

Om de invloeden van het drogen en nat worden van de grond en een verhoogde grondwaterstand inpasbaar te maken voor een digitale tweeling is een faalcurve gemaakt. Dit is een grafiek waarin de afname van de stabiliteit tegen de tijd wordt uitgezet. Als voor alle klimaataspecten die een faalmechanisme van een dijk kunnen induceren een faalcurve gemaakt wordt, kan de invloed van het klimaat op de stabiliteit van dijken in een digitale tweeling worden verwerkt. Een compleet beeld van de degradatie van de stabiliteit in een dergelijk model kan op verschillende manieren bijdragen aan

de optimalisering van beheer en onderhoud. Zo kunnen bijvoorbeeld klimaatbestendige dijken ontworpen worden die in de toekomst minder onderhoud nodig hebben; kan risico gestuurd beheer en onderhoud gepleegd worden omdat een beeld is van wanneer een bepaalde graad van degradatie wordt verwacht en nog meer. Aanbevolen wordt dan ook om de invloeden van andere klimaataspecten ook te onderzoeken en hier ook faalcurves voor te maken.

Abstract

In the Netherlands, the influences of climate on the stability of dikes are not (yet) taken into account in the assessment, management, and maintenance of dikes. At the same time, the climate is changing, and extreme weather conditions are occurring more frequently. This results in more intensive management of dikes during extreme periods. Additionally, population growth is expected in the coming years, which increases the risks of dike breaches. STOWA recognized the need of investigating the influences of climate on the strength properties of dikes, with the aim of optimizing management and maintenance. This can be achieved by implementing the influences of climate in a digital twin using a failure curve. A digital twin is a digital 3D model of an actual dike that continuously shows the condition of the dike. To achieve this goal, the following main question has been formulated: "What is the influence of climate and its changes on the stability of regional dike bodies, and how can this information be incorporated into a digital twin to optimize the management and maintenance methods of dike bodies?"

Literature, interviews, experiments, and calculations were used in the execution of this research. The calculations were prepared with the information and results from the literature, interviews, and experiments. Thereafter, the results of the calculations were collected and incorporated into a failure curve. To investigate how this failure curve can contribute to the optimization of management and maintenance, additional interviews were conducted with employees of water boards.

Climate influences the soil properties of a dike, inducing failure mechanisms. As a result of climate change, extreme rainfall and drought, for example, will occur more frequently in the Netherlands. This results in higher peak groundwater levels and lower minimum groundwater levels. Particularly, macro-instability is affected by this. This is because soil properties that determine the stability of the dike degrade. To limit the scope of the research, the decision was made to focus on the influences of drought on the strength properties of a clay/peat dike (a dike in the MT-polder).

Drought affects various properties of clay and peat, for example: it breaks down organic material and induces the formation of cracks. In clay, the potential to develop and maintain suction decreases further as the soil undergoes multiple dry/wet cycles due to drought and rain. This leads to a decrease in shear strength, transitioning from peak strength to residual strength. This development is increasingly expected due to climate change. Next, experiments were conducted in the laboratory of TU Delft using soil samples collected from the dike in the MT-polder. The Hyprop was used to investigate the development of suction strength in the soil and make a link with the information obtained from the literature. The Atterberg limits were used to determine the soil type of the soil samples. Finally, the Direct Shear test was used to collect shear strength parameters to use in the calculations.

In the calculations in PLAXIS, two influences were applied to a model of the dike from the MT-polder: a gradual increase in groundwater level over the years and a gradual decrease in shear strength properties. The stability factor was then calculated for different years, showing the decrease of the stability factor. In the investigated case, this led to a decrease in the stability factor of approximately 25%. It is therefore concluded that the climate (in this case, dry/wet cycles and increased groundwater levels) affects the stability of the dike.

To incorporate the influences of drying and wetting of the soil and the increased groundwater level into a digital twin, a failure curve was created. This is a graph that plots the decrease in stability over time. If failure curves are created for all climate aspects that can induce failure mechanisms of a dike, the influence of climate on the stability of dikes can be incorporated into a digital twin. A complete picture of the degradation of stability in such a model can contribute to the optimization of management and maintenance in various ways. Two of many examples are: climate-resilient dikes

can be designed that require less maintenance in the future; management and maintenance can be done based on the risks because there is a picture of when a certain degree of degradation is expected. It is therefore recommended to also investigate the influences of other climate aspects and to make failure curves for those as well.

Symbolenlijst

φ'	hoek van inwendige wrijving	[°]
s'	gemiddelde hoofdspinning	[kN/m ²]
σ'_v	verticale korrelspanning	[kN/m ²]
γ_{grond}	volumiek gewicht grondlaag	[kN/m ³]
d_{grond}	dikte grondlaag	[m]
γ_{water}	volumiek gewicht water	[kN/m ³]
d_{water}	afstand tussen grondwaterstand en het beschouwde punt	[m]
σ'_h	horizontale korrelspanning	[kN/m ²]
k	factor afhankelijk van grondsoort en actief-, passief- of neutrale grond	[-]
s_u	de ongedraineerde schuifsterkte	[kN/m ²]
σ'_{vi}	de effectieve spanning	[kN/m ²]
S	de normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio	[-]
σ'_{vy}	maat voor de in situ toestand en de belastinggeschiedenis van de grond	[kN/m ²]
m	weergeeft hoe gevoelig de ongedraineerde schuifsterkte is voor verandering van de effectieve spanning (σ'_{vi}) als gevolg van de ontwikkeling van de waterspanning	[-]
OCR	Over consolidatie ratio	[-]
τ_{max}	het maximaal te mobiliseren schuifweerstand	[kN/m ²]
c'	cohesie	[kN/m ²]
σ'_n	de effectieve normaalspanning op het beschouwde glijvlak	[kN/m ²]
Ψ	dilatantiehoek	[°]
K	doorlatendheid	[m/d]
v	de snelheid	[m/s]
g	de valversnelling	[m/s ²]
h	het hoogteverschil	[m]
P	de druk	[Pa]
ρ	de dichtheid	[kg/m ³]
v	de snelheid	[m/s]
g	de valversnelling	[m/s ²]
h	het hoogteverschil	[m]
P	de druk	[Pa]
ρ	de dichtheid	[kg/m ³]
ΔV_i	de afname van water	[m ³]
Δt_i	het verschil in tijd tussen de twee gekozen punten	[etmaal]
A	het oppervlak van de hyprop sampels	[cm ²]
S_f	de stabiliteitsfactor	[-]

Inhoud

Voorwoord.....	3
Samenvatting.....	5
Abstract	7
Symbolenlijst	9
1. Inleiding.....	14
1.1 Aanleiding.....	14
1.2 Probleemanalyse en doelstelling.....	15
1.2.1 Probleemstelling.....	15
1.2.2 Doelstelling.....	16
1.3 Vraagstelling	16
1.3.1 De hoofdvraag	16
1.3.2 De deelvragen.....	17
1.4 Hypothese	17
1.5 Conceptueel model	17
1.6 Onderzoekopzet.....	18
1.7 Leeswijzer	18
2. Onderzoeksmethoden.....	18
2.1 Randvoorwaarden en uitgangspunten	21
3. Faalmechanismen en de invloed van het klimaat	22
3.1 Inleiding.....	22
3.2 Faalmechanismen.....	22
3.3 Klimaataspecten	24
3.3.1 Neerslag.....	24
3.3.2 Temperatuur	25
3.3.3 Wind	26
3.3.4 Droogte.....	26
3.3.5 Stormen	28
3.3.6 Vorst.....	28
3.3.7 Klimaatverandering	29
3.4 Conclusie	30
4. Bepaling van de stabiliteit van een dijk.....	32
4.1 Inleiding.....	32
4.2 Grondmodellen.....	32
4.2.1 Critical State Soil Mechanics.....	32
4.2.2 Mohr-Coulomb	35

4.3	Gedraineerde- en ongedraineerde stabiliteitsanalyse	36
4.3.1	Gedraineerde stabiliteitsanalyse	36
4.3.2	Ongedraineerde stabiliteitsanalyse	37
4.3.3	Overweging gedraineerd- of ongedraineerde analyse	37
4.4	Bepaling van de stabiliteit	39
4.5	Conclusie	42
5.	De verandering van de grondeigenschappen van een dijk onder invloed van het klimaat	43
5.1	Inleiding	43
5.2	Keuze voor dijk soort en klimaataspect.....	43
5.2.1	Keuze voor klimaataspect.....	43
5.2.2	Keuze dijkopbouw.....	45
5.2.3	Keuze faalmechanisme	45
5.3	Praktijkvoorbeelden: het falen van dijken die te maken hebben met droogte.....	46
5.3.1	Wilnis 2003	46
5.3.2	Reeuwijk 2021	46
5.3.3	Zoetermeer 1947	46
5.3.4	Edenburry	46
5.3.5	Gelijkenis tussen de afschuivingen.....	47
5.4	De invloed van droogte op klei.....	48
5.4.1	Verandering in zuigspanning	48
5.4.2	Scheurvorming.....	50
5.4.3	De afbraak van organisch stof	51
5.5	De invloeden van droogte op veen.....	52
5.5.1	Scheurvorming in veen	52
5.5.2	Gasvorming in veen	52
5.5.3	De afbraak van organische stof	53
5.5.4	Afname van het gewicht.....	53
5.6	Verschillen tussen klei en veen.....	54
5.6.1	Scheurvorming.....	54
5.6.2	Doorlatendheid.....	54
5.7	De invloed van droogte op droogte gevoelige dijklichamen	56
5.7.1	Vegetatie.....	56
5.7.2	Diepte indringing invloed van droogte	56
5.7.3	Verdroging afhankelijk van de geometrie van de dijk	59
5.7.4	Positieve invloeden van droogte op dijken.....	59
5.7.5	Bijdrage toplaag aan de stabiliteit	59

5.8	De invloed van het klimaat op de grondeigenschappen	60
5.9	Casestudie: MT-polder.....	61
5.10	Uitgangspunten proeven	62
5.10.1	Doel van de proeven.....	62
5.10.2	De grondmonsters	62
5.11	Uitwerking van de proeven	63
5.11.1	De Atterberg limits.....	63
5.11.2	De Hyprop proef	66
5.11.3	Direct Shear test	73
5.12	Conclusie	80
6.	De afname van de stabiliteit onder invloed van droogte	82
6.1	Inleiding	82
6.2	Uitgangspunten	82
6.3	Disclaimer	83
6.4	Parameters.....	86
6.4.1	Verandering in de doorlatendheid door scheurvorming.....	86
6.4.2	Verhoogde grondwaterstand.....	89
6.4.3	Piek- en residuele sterkte	90
6.5	Uitvoering berekeningen	96
6.6	Resultaten.....	98
6.7	Conclusie	100
7.	Faalcurves en optimalisering van beheer en onderhoud	102
7.1	Inleiding	102
7.2	Digitale Tweeling	102
7.3	Faalcurve.....	103
7.3.1	Normering regionale keringen.....	103
7.3.2	Faalcurve droog/nat-cycli en verhoogde grondwaterstand	106
7.4	Optimalisering beheer en onderhoud.....	107
7.4.1	Huidige beheer- en onderhoudsmethoden.....	107
7.4.2	Bijdrage faalcurve aan beheer en onderhoud.....	109
7.5	Faalcurves voor andere situaties	111
7.5.1	Faalcurves bij andere hellingen	112
7.5.2	Faalcurve bij andere expositie van het binnentalud.....	113
7.5.3	Faalcurves bij andere grondopbouw	114
7.5.4	Andere klimaataspecten.....	116
7.6	Conclusie	117

8.	Discussie	119
9.	Conclusie en aanbevelingen	121
9.1	Conclusie	121
9.2	Aanbevelingen	124
10.	Bibliografie.....	126
	Bijlagen lijst.....	136
	Bijlage I - Interviews.....	136
	Bijlage II - Overview MT-polder	136
	Bijlage III - Atterberg limits	136
	Bijlage IV - Hyprop proef.....	136
	Bijlage V - Direct shear proef	136
	Bijlage VI - Resultaten PLAXIS	136
	Bijlage VII - Sonderingen.....	136
	Bijlage VIII - Bepaling parameters.....	136

1. Inleiding

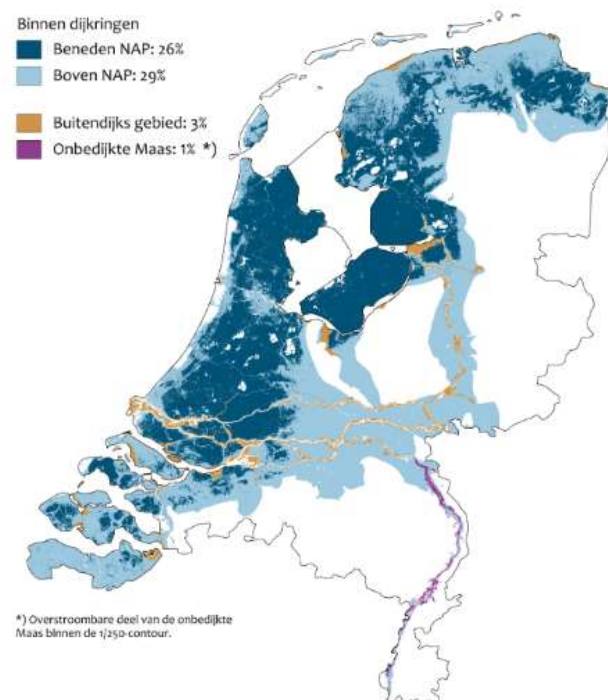
1.1 Aanleiding

Na de watersnoodramp in 1953, waar ruim 1800 mensen om het leven kwamen, werd duidelijker hoe belangrijk het is om Nederland goed te beschermen tegen overstromingen. Deze ramp heeft kunnen gebeuren door de slechte staat van de waterkeringen in die tijd. Bovendien hadden waterschappen weinig onderhoud gedaan in de jaren ervoor. Na de ramp werden strengere veiligheidsnormen opgesteld om herhaling te voorkomen (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, z.d.). De dijkafschuiving in Wilnis in 2003 maakte duidelijk dat ook aandacht nodig was voor de toestand van de regionale waterkeringen in Nederland. Door een extreem droge zomer was het veen in de kade gekrompen en uiteindelijk gebarsten. Hierdoor schoof een stuk dijk van 60 m lang af, liep de ringvaart leeg en stroomde het water de wijk in (Middendorp, 2016). Deze gebeurtenis werd de aanleiding voor de eerste visie waarmee ook de regionale keringen onder de aandacht van de provincies en waterschappen werden gebracht (Informatiepunt Leefomgeving, z.d.) (Helpdesk water, z.d.).

Ongeveer 59% van Nederland is gevoelig voor een overstroming (zie figuur 1-1). Om ervoor te zorgen dat iedereen in Nederland even goed beschermd is tegen overstromingen hebben waterschappen en Rijkswaterstaat tot en met 2050 de tijd om dijken en duinen te versterken (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2015). De provincies zijn verantwoordelijk voor de normering en de Waterschappen hebben de plicht toetsingen uit te voeren en moeten voor noodzakelijke (preventief) beheer en onderhoud zorgen (Rijksoverheid, z.d.-c).

De beheer en onderhoudsactiviteiten zijn gebaseerd op de Leidraad Veiligheid van Regionale Keringen (STOWA, 2015b). Ondanks dat het klimaat verandert, wordt de invloed hiervan op de sterkte-eigenschappen van de grond in Nederland (nog) niet meegenomen bij toetsingen en normeringen van dijklichamen. Uit onder andere Engelse onderzoeken is gebleken dat de sterkte-eigenschappen van de grond, en dus de stabiliteit, echter wel achteruit gaat onder invloeden van het klimaat (Stirling et al., 2021).

Om beheer en onderhoud te optimaliseren ontwikkelt Rijkswaterstaat een digitale tweeling. Dit is een 3D representatie van een werkelijke dijk. In dit computermodel wordt de veiligheid van een waterkering zo goed mogelijk in beeld gebracht. Dit model maakt het zo makkelijker om veranderingen die invloed hebben op een dijklichaam in te voeren en om de gevolgen in te zien. Rijkswaterstaat werkt hiervoor samen met onder andere STOWA. In Nederland is nog weinig onderzoek gedaan naar de invloeden van het klimaat op sterkte-eigenschappen van de grond van een dijk. Ook is geen uniforme aanpak om met deze invloeden om te gaan. Voor STOWA is het daarom interessant om deze invloeden in kaart te brengen en deze inpasbaar te maken voor deze digitale tweeling. STOWA is voor de regionale waterbeheerders in Nederland hét kenniscentrum. Hier wordt kennis verzameld en verspreid binnen de hoofdtakken: watersystemen en ecologie, waterwieren, afvalwatersystemen en waterketen (STOWA, z.d.).



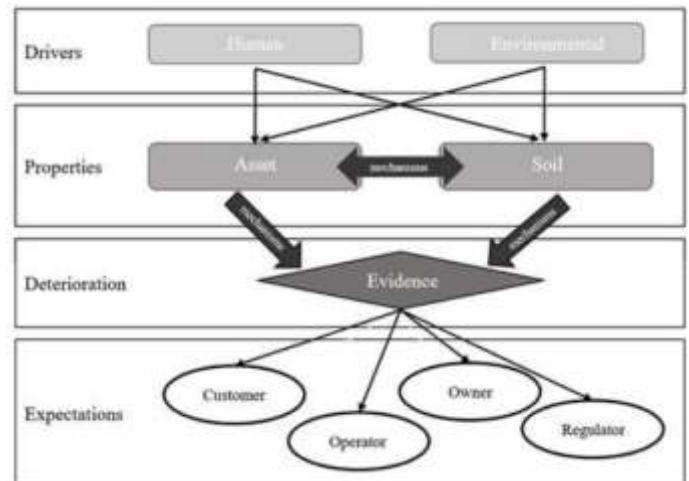
Figuur 1-1 Overstromingsgevoelige gebieden (Planbureau voor de Leefomgeving, z.d.)

1.2 Probleemanalyse en doelstelling

1.2.1 Probleemstelling

Bij extreem weer worden de inspecties van dijken intensief. Wanneer bijvoorbeeld het neerslagtekort boven de 200 mm uitkomt ontstaat een verhoogd risico op macro-instabiliteit, doordat bijvoorbeeld scheuren kunnen ontstaan waardoor de dijk kan afschuiven. Om dit te voorkomen moet de beheerder actie ondernemen. Droogtegevoelige gebieden worden geïnspecteerd en dijken worden gesproeid om ze nat en zwaar te houden (Universiteit Utrecht, 2018). Om het beheer tijdens bijvoorbeeld droogteperiodes minder intensief te maken kwam de vraag vanuit STOWA om onderzoek te doen naar de invloed van het klimaat op de stabiliteit van dijken. Weinig is namelijk bekend over de invloed van het klimaat op dijken in Nederland.

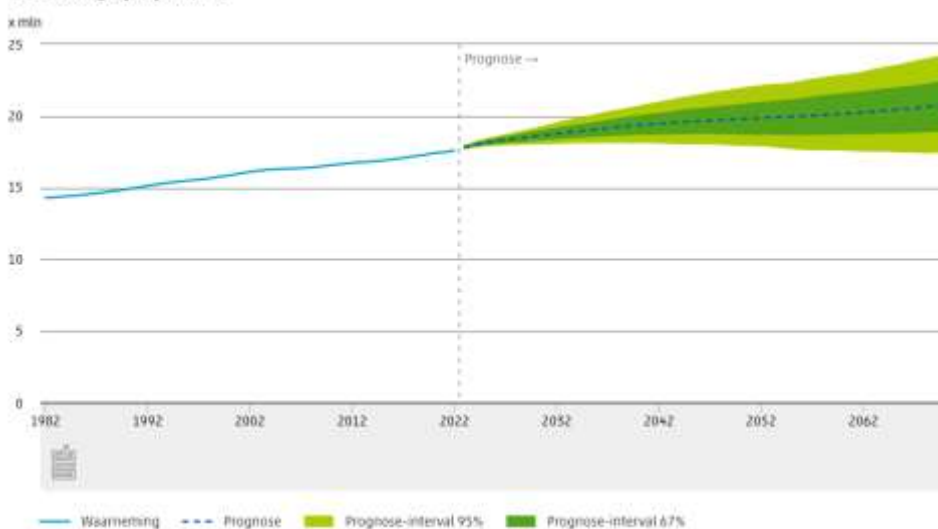
Verschillende zaken kunnen bijdragen aan de verslechtering van een kering (zie figuur 1-2). In andere landen is wel onderzoek geweest naar de veranderende klimaatinvloeden op grondlichamen, zoals spoordijken of rivierdijken (Briggs et al., 2019; Stirling et al., 2021). In 2018 is ook een onderzoek gedaan naar het Hydro thermisch gedrag in dijken onder invloed van het klimaat (An et al., 2018). Door deze effecten in kaart te brengen en door hier berekeningen mee te maken kan de invloed van het klimaat verwerkt worden in een faalcurve. Met deze faalcurve zal het onderhoud van een dijk beter ingepland kunnen worden.



Figuur 1-2 Context van de verslechtering van grondlichamen (Briggs et al., 2019)

Door extremere weersinvloeden en een groeiende bevolking wordt meer van dijken geëist. De kans op laag water in de rivieren neemt toe in de zomer en de kans op hoog water neemt toe in de winter (KNMI, z.d.)(KNMI, z.d.). Bovendien kunnen de grote verschillen in waterstand ook effect hebben op de waterspanningen in de dijken zelf. Daarnaast wordt het risico (kans x gevolg) bij een overstroming groter omdat een bevolkingsgroei wordt verwacht (zie figuur 1-3) (Centraal Bureau voor de Statistiek, z.d.).

Bevolking op 1 januari



Figuur 1-3 Prognose bevolkingsgroei (Centraal Bureau voor de Statistiek, z.d.)

De degradatie van dijken onder invloed van het klimaat komt voor bij alle dijken, in Nederland en in het buitenland. Echter wordt in dit onderzoek de focus gelegd op regionale dijken. Waterschappen merken de invloeden van het klimaat op de dijken het eerste omdat zij bijvoorbeeld bij extreme weersomstandigheden meer inspecties moeten doen (Waterschap Rivierenland, 2021). Daarnaast heeft het probleem ook invloed op mensen en bedrijven die binnen deze dijkringen leven of gevestigd zijn. Wanneer de dijken falen zullen mensen en materieel binnen deze dijk schade en hinder ondervinden.

Het probleem is dat door gebrek aan kennis bij het ontwerpen, inspecteren, toetsen, beheer en onderhoud van keringen geen rekening gehouden wordt met degradatie invloed van het klimaat. Daarom is het dus belangrijk om goed in kaart te brengen welke invloeden het klimaat met zich mee kan brengen als het gaat om de stabiliteit van dijken. Zo weten waterschappen bijvoorbeeld niet welke maatregelen genomen kunnen worden om de schade van droogte te beperken en voorkomen (Strijker, z.d.).

Iedere kering in Nederland wordt beïnvloed door het klimaat, in dit onderzoek ligt de focus op regionale keringen. Tijdens het onderzoek zijn alle soorten regionale keringen beschouwd. Hieruit is een representatieve kering gekozen waarmee de invloed van het klimaat op de stabiliteit van deze dijk berekend is.

1.2.2 Doelstelling

Het doel van het onderzoeksrapport is om de invloed van het klimaat en de verandering hiervan op regionale dijken in kaart te brengen. Ook wordt onderzocht hoe de informatie verwerkt kan worden in een digitale tweeling, dit wordt gedaan door een faalcurve te maken die in een dergelijk model verwerkt kan worden. Hiernaast dient deze faalcurve als een hulpmiddel voor beheer en onderhoud aan dijken omdat het onderhoud hiermee nauwkeuriger ingepland kan worden.

Deze faalcurve zou een opzet kunnen zijn voor de digitale tweeling die ontwikkeld wordt, wat vervolgens door verschillende beheerders gebruikt zou kunnen worden. In dit onderzoek wordt dus een concept versie van een faalcurve gemaakt voor een gekozen dijklichaam. Vervolgens wordt advies gegeven over hoe de curve ook voor andere klimaataspecten of andere dijklichamen opgezet zou moeten worden.

1.3 Vraagstelling

1.3.1 De hoofdvraag

Het doel van dit onderzoek is het onderzoeken van de invloed van het klimaat en de verandering hiervan, op de stabiliteit van dijklichamen. Met de digitale tweeling in ontwikkeling is vanuit daar de interesse ontstaan naar de mogelijkheid voor het implementeren van die informatie in het digitale model. Op deze manier moet beheer- en onderhoud geoptimaliseerd worden aangezien dit steeds belangrijker wordt. Aan de hand hiervan is de volgende open hoofdvraag opgesteld:

Wat is de invloed van het klimaat en de verandering hiervan op de stabiliteit van regionale dijklichamen en hoe kan deze informatie inpasbaar gemaakt worden in een digitale tweeling, voor de optimalisering van beheer- en onderhoudsmethoden van dijklichamen?

1.3.2 De deelvragen

De opgestelde deelvragen luiden:

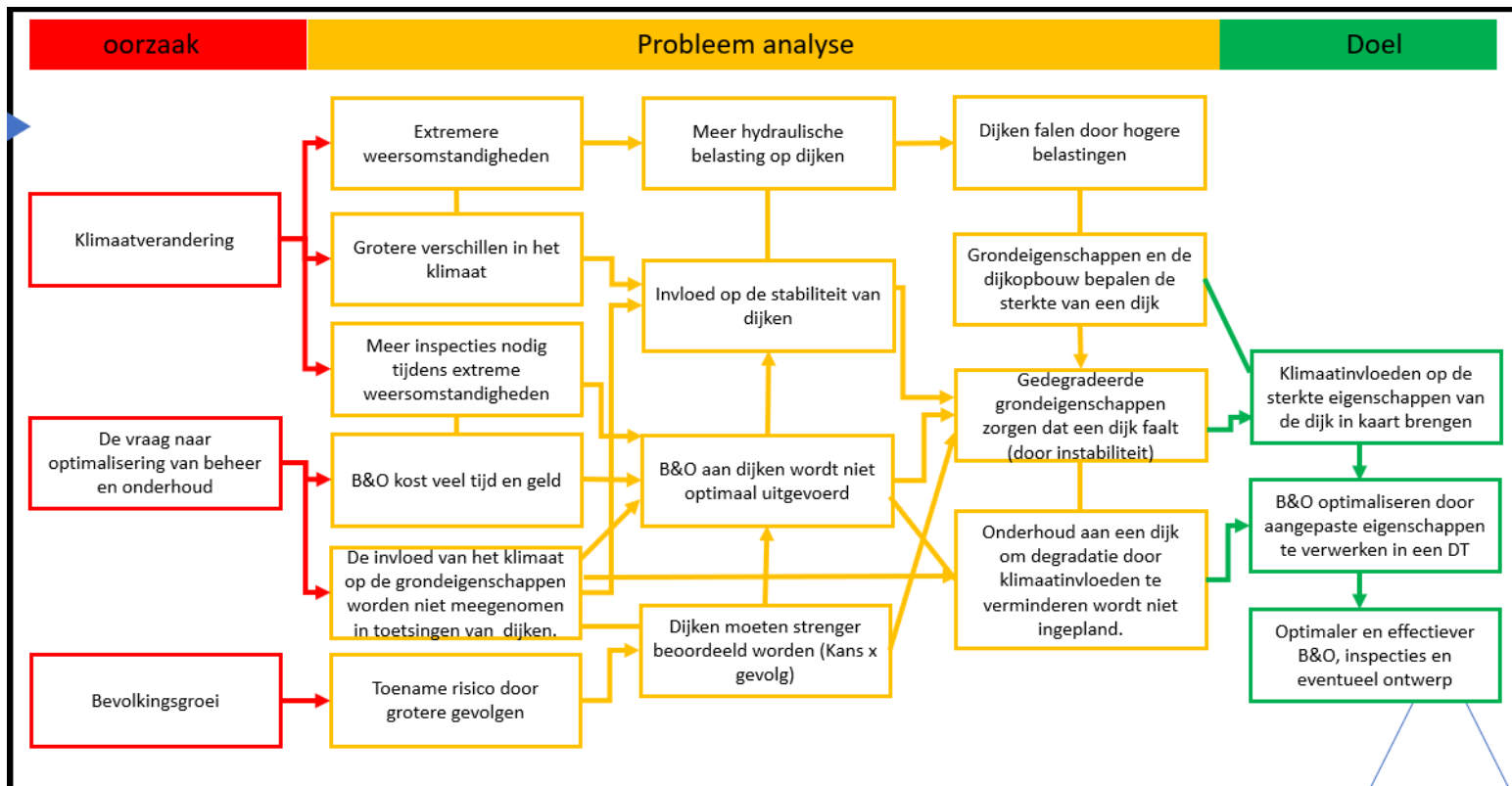
1. Welke faalmechanismen van dijken worden beïnvloed door het klimaat?
2. Hoe bepalen de grondeigenschappen de stabiliteit van de kering?
3. Hoe veranderen de grondeigenschappen en de stabiliteit van dijken onder invloed van het klimaat?
4. Hoe groot is de verandering van de stabiliteit van dijklichamen onder invloed van het klimaat?
5. Hoe kan deze informatie verwerkt worden in een digitale tweeling voor een optimalisering van beheer- en onderhoudsmethoden?

1.4 Hypothese

De invloed van het klimaat en klimaatverandering op dijken is dat deze verdrogen. Hierdoor degraderen dijken in de tijd en zullen deze uiteindelijk bezwijken door blootstelling aan droogte. Deze informatie kan verwerkt worden in een faalcurve waarin de afname van sterkte tot het falen van de dijk te zien is. Deze faalcurve kan in een digitale tweeling verwerkt worden welke gebruikt kan worden om de huidige toestand van de dijk weer te geven. Beheerders kunnen deze digitale tweeling gebruiken om hier inspecties in te verwerken en om het moment van falen uit af te lezen.

1.5 Conceptueel model

In het conceptueel model (zie figuur 1-4) worden verbindingen tussen de oorzaken, de probleemanalyse en de aanbevelingen in kaart gebracht. De causale relaties (oorzaak-gevolg) worden aangegeven met pijltjes en de correlaties (samenhang, geen oorzaak-gevolg) worden aangegeven met lijntjes. In het rood zijn de oorzaken die benoemd die de probleemanalyse hebben gevormd, in het geel de probleemanalyse en in het groen het doel waaruit de hoofdvraag is ontstaan.



Figuur 1-4 Conceptueel model

1.6 Onderzoeksopzet

Tijdens dit onderzoek wordt eerst gezocht naar het verband tussen het klimaat en de stabiliteit van dijklighamen. Voor dit deel geldt dat het onderzoek kwantitatief is, cijfermatige gegevens worden namelijk verkregen. Dit is gedaan door middel van literatuuronderzoek, berekeningen en een experiment. Vervolgens wordt gekeken hoe de verkregen informatie toegepast kan worden. Hiervoor is de context van de onderzochte situatie van belang, elk dijklighaam is namelijk anders. Dit deel van het onderzoek is dan ook kwalitatief.

1.7 Leeswijzer

In het hoofdstuk 1 wordt de aanleiding van het onderzoek uitgewerkt, de hoofd- en deelvragen worden bepaald. In hoofdstuk 2 worden de methoden om tot het uiteindelijke doel van het onderzoek te komen uitgewerkt.

In hoofdstuk 3 worden de verandering van het klimaat onderzocht en welke faalmechanismen van dijken bij deze verschillende klimaataspecten horen. Om dieper in te gaan op de grond mechanische eigenschappen van een dijk wordt in hoofdstuk 4 behandeld hoe de stabiliteit van een dijk bepaald wordt. In hoofdstuk 5 is onderzocht hoe deze grond mechanische eigenschappen beïnvloed worden door het veranderende klimaat wat in hoofdstuk 3 is onderzocht. Ook is in dit hoofdstuk de keuze gemaakt om dieper in te gaan op het klimaataspect droogte. In hoofdstuk 6 worden analyses gedaan naar de stabiliteit van een dijk onder invloed van droogte met de informatie die in hoofdstuk 3, 4 en 5 is verzameld. Met deze stabiliteitsanalyse wordt in hoofdstuk 7 een faalcurve ontworpen. Ook is in dit hoofdstuk bepaald hoe de afname van stabiliteit anders is bij verschillende gronden, geometrieën en de expositie van het binnentalud van de dijk. Als laatste wordt advies gegeven over hoe een beheerder om kan gaan met de invloed van het klimaat op dijken.

In hoofdstuk 8 worden de resultaten van het onderzoek ter discussie gesteld. In de conclusie en aanbevelingen wordt behandeld hoe droogte invloed heeft op een dijk en hoe deze informatie verwerkt kan worden zodat beheerders dit kunnen gebruiken, ook worden aanbevelingen gegeven voor vervolg onderzoek naar dit onderwerp. Dit is te vinden in hoofdstuk 9.

In dit onderzoek wordt in de tekst gerefereerd naar bijlagen en bronnen. In de bibliografie in hoofdstuk 10 zijn deze bronnen terug te vinden en op pagina 124 is een overzicht van de bijlagen te vinden. In de tekst is de uitleg van begrippen terug te vinden in de voetnoten.

2. Onderzoeksmethoden

Tijdens dit onderzoek zijn verschillende onderzoeksmethoden toegepast. In dit hoofdstuk worden deze onderzoeksmethoden per deelvraag toegelicht. Als laatste wordt onderbouwd hoe de validatie van het onderzoek wordt gegarandeerd.

Deelvraag 1: Welke faalmechanismen van dijken worden beïnvloed door het klimaat?

De eerste deelvraag is: *“Welke faalmechanismen van dijken worden beïnvloed door het klimaat?”*. Dit is een beschrijvende deelvraag. De reden hiervoor is omdat na het doen van een literatuurstudie wordt beschreven op welke manieren dijken precies falen.

Met de literatuurstudie van verschillende richtlijnen, leidraden en vakliteratuur zijn de faalmechanismen van dijken in kaart gebracht. Hierna zijn de oorzaken van de faalmechanismen opgezocht en is onderzocht welke faalmechanismen door het klimaat worden beïnvloed.

Hiernaast is een literatuurstudie gedaan naar de veranderingen van het klimaat wat in de komende 50 jaar in Nederland en de invloed daarvan op faalmechanismen, stormen, neerslag en droogte. Hiervoor worden de KNMI klimaatscenario's en wetenschappelijke publicaties gebruikt.

Met deze informatie is geconcludeerd welk faalmechanisme bij welk klimaat aspect hoort. In de Deelvragen hierna is hiermee verder gegaan.

Deelvraag 2: Hoe bepalen de grondeigenschappen de stabiliteit van de kering?

De tweede deelvraag die uitgewerkt zal worden is: *“Hoe bepalen de grondeigenschappen de stabiliteit van de kering?”*. De tweede deelvraag is een definiërende deelvraag.

Nadat de faalmechanismen zijn bepaald in deelvraag 1, is onderzocht hoe grondeigenschappen de stabiliteit van een kering verzorgen. Dit is gedaan met behulp van literatuurstudie. Voor het bepalen van de schuifsterkte van de grond kan onder andere de methode van Mohr-Coulomb of Critical State gebruikt worden (Rijkswaterstaat, 2021). Door de parameters die van belang zijn voor de stabiliteit volgens de wet van Mohr-Coulomb en van Critical State in kaart te brengen, is geconcludeerd hoe deze bijdragen aan de stabiliteit van een dijklichaam.

Deelvraag 3: Hoe veranderen de grondeigenschappen en de stabiliteit van dijken onder invloed van het klimaat?

De derde deelvraag luidt: *“Hoe veranderen de grondeigenschappen en de stabiliteit van dijken onder invloed van het klimaat?”*. Aan het begin van deelvraag 3 is de keuze gemaakt voor welk klimaataspect verder uitgewerkt wordt in de rest van het onderzoek. Dit is gedaan de relevantie van de klimaataspecten te analyseren. Met deze methode is gekozen om de invloeden van het opdrogen en weer nat worden van de grond verder te onderzoeken. Aan de hand van de gekozen invloed is bepaald naar welke soort bodemopbouw van een dijk onderzoek gedaan wordt. In de rest van deelvraag 3 is met een literatuurstudie van verschillende richtlijnen, leidraden en vakliteratuur onderzocht wat de invloed is van het gekozen klimaataspect is op de sterkteparameters van één soort dijk. Bijvoorbeeld: hoe de doorlatendheid of waterspanning van een grondlichaam verandert door droogte.

Naast een literatuurstudie zijn ook interviews gedaan over de invloed van het klimaat op grondeigenschappen om te valideren of de gevonden informatie correct is. De volgende personen zijn geïnterviewd:

- Een PhD kandidaat. De invloeden van droogte op een dijk zijn besproken.
- Robbert Schellen van waterschap Rijnland. Een recente dijkdoorbraak is besproken en hoe andere dijken kunnen bezwijken onder invloed van droogte. Ook de voordelen van een digital twin zijn besproken.
- Specialist Waterkeringen bij Waterschap Rivierenland. Hoe droogte een dijk beïnvloedt en hoe deze waterschap hier mee omgaat is besproken.

De vragen die voorbereid zijn, aan deze personen zijn gesteld en de uitwerking van de interviews zijn toegevoegd in bijlage I.

Tijdens het verloop van het onderzoek moest onderbouwd worden of een experiment uitgevoerd kon worden. Dit in verband met de haalbaarheid van het onderzoek in de tijd, de mogelijkheden binnen STOWA en de ruimte binnen de TU Delft. Uiteindelijk is de keuze gemaakt om wél een experiment uit te voeren. Het uitvoeren van een experiment is waardevol voor dit onderzoek omdat de gevonden informatie uit de interviews en de literatuurstudie hiermee gevalideerd kan worden. Bovendien leverden de experimenten parameters op die in de berekeningen gebruikt konden worden.

De experimenten zijn onder begeleiding van PhD kandidaat Inge de Wolf uitgevoerd op de TU Delft. Inge doet een vervolgonderzoek op het onderzoek van Bart Strijker (PhD kandidaat) over de

droogtemonitoring. Inge doet onderzoek naar hydraulische waarnemingen en de verplaatsing van grondlagen onder invloed van droogte op 3 verschillende dijklichamen. Eén van deze dijklichamen, de MT-Polder, is in dit onderzoek gebruikt om experimenten mee uit te voeren. Met behulp van verzamelde grondmonsters uit de MT-Polder zijn de volgende proeven uitgevoerd:

- Hyprop proef. Om de zuigspanningen en doorlatendheid van de grond in kaart te brengen. Hiermee is een link gelegd met de gevonden informatie uit de literatuur (zie bijlage IV)
- Bepaling van de Atterberg Limits van de grond uit de dijk bepaald zodat de grondsoort gekwalificeerd kon worden (zie bijlage III).
- Direct Shear proeven. Om de schuifsterkteparameters van de grond uit de dijk in kaart te brengen. De resultaten uit dit experiment zijn vervolgens gebruikt voor de eigenschappen van de top laag in de berekeningen (zie bijlage V)

Deelvraag 4: Hoe groot is de verandering van de stabiliteit van dijklichamen onder invloed van het klimaat?

De vierde deelvraag is: *“Hoe groot is de verandering van de stabiliteit van dijken onder invloed van het klimaat?”*. Deelvraag 4 is een definiërende deelvraag. Deze deelvraag wordt beantwoord met behulp van de volgende methoden:

Om de berekeningen te maken is, naast de informatie uit de experimenten, ook informatie uit literatuur gebruikt. Deze informatie was nodig om als input in de berekeningen te verwerken. Met behulp van literatuur is het volgende onderzocht:

- Hoe de doorlatendheid van de grond verandert onder invloed van droogte. Dit is gedaan met behulp van verschillende richtlijnen, leidraden en vakliteratuur. Met de hyprop proef is ook de doorlatendheid in verschillende gronden bepaald na drogen.
- Hoeveel hoger de grondwaterstand wordt in de toekomst. Deze informatie is verkregen met behulp van de klimaat atlas (klimaat-effectatlas, z.d.-b). De resultaten hiervan zijn vervolgens in de berekeningen verwerkt door de huidige grondwaterstand te verhogen. Dit is gedaan met de huidige meetgegevens van de grondwaterstand uit het rapport droogtemonitoring (Strijker, z.d.)
- Hoe (snel) de pieksterkte tot de residuele sterkte daalt als gevolg van zwellen en krimpen door nat en droog worden van de grond. De afname van de piek naar de residuele sterkte in de tijd gemodelleerd met behulp van een Engels klimaatmodel. Dit is gebruikt om de afname van de sterkte van de grondlagen in de MT-polder te onderbouwen. De resultaten hiervan zijn vervolgens in de berekeningen verwerkt door de schuifsterktes voor verschillende jaren in de toekomst te bepalen tot dat de residuele sterkte bereikt wordt.

De berekeningen om de verandering in stabiliteit van de dijk te bepalen zijn gedaan met het programma PLAXIS. Voor het maken van de berekeningen is door Inge de Wolf een model van de dijk (MT-Polder) in PLAXIS gemaakt. Om de afname van de schuifweerstand in PLAXIS in te voeren zijn de schuifsterkteparameters φ en de c van de grondsoorten bepaald en ingevoerd. Hierna zijn de berekeningen uitgevoerd en zijn de stabiliteitsfactoren bepaald.

Deelvraag 5: Hoe kan deze informatie verwerkt worden in een digitale tweeling voor een optimalisering van beheer- en onderhoudsmethoden?

Als laatste wordt de volgende deelvraag uitgewerkt: *“Hoe kan deze informatie verwerkt worden in een digitale tweeling voor een optimalisering van beheer en onderhoudsmethoden?”*. Om beheer en onderhoud te optimaliseren is onderzocht hoe de informatie van de vorige deelvragen verwerkt kan worden in een digitale tweeling. Dit is gedaan door middel van een faalcurve. Deelvraag 5 is een definiërende vraag.

Om de deelvraag te beantwoorden is met behulp van literatuur in kaart gebracht wat een digitale tweeling precies is, wat het doel is van de ontwikkeling van een digitale tweeling en waar deze

tweeling aan moet voldoen. Om de informatie over de invloeden van het klimaat inpasbaar te maken voor in een digitale tweeling, zijn de uitkomsten van de berekeningen uit deelvraag 4 verwerkt in een faalcurve. Ook is beredeneerd hoe faalcurves in andere situaties vergeleken met de faalcurve van de MT-polder zouden lopen. Dit is gedaan voor:

- Andere grondopbouw
- Andere geometrie
- Andere ligging van de het glijvlak van de dijk t.o.v. het zuiden

Met behulp van interviews is vervolgens aan medewerkers van waterschappen (de potentiële gebruikers van het model) gevraagd wat zij vinden dat een digitale tweeling zou moeten kunnen. Ook is aan hen gevraagd hoe zij denken dat het implementeren van klimaatinvloeden in een digitale tweeling kan bijdragen aan de optimalisering van beheer en onderhoud. Door huidige beheer- en onderhoudsmethoden, dat met behulp van literatuur in kaart is gebracht, te vergelijken met wat volgens beheerders nog ontbreekt, is geconcludeerd hoe de faalcurve kan bijdragen aan de optimalisering van beheer en onderhoud. De volgende personen zijn geïnterviewd:

- Robbert Schellen, adviseur waterveiligheid. Hoogheemraadschap Rijnland.
- Henk Eland, adviseur onderhoud en Ruud Bastiaanssen, werkvoorbereider keringen en vaarwegen. Waterschap Brabantse Delta.
- Theo Reuzenaar, adviseur waterkeringen. Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier.
- Ruud Weijs, adviseur asset team waterkeringen. Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden.
- Jannes Haanstra, technisch manager regionale keringen en Jannes Versteegh adviseur waterveiligheid. Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier.

De vragen die gesteld zijn en de uitwerkingen van deze interviews zijn te vinden in Bijlage I.

2.1 Randvoorwaarden en uitgangspunten

Uitgangspunten:

- In hoofdstuk 4 wordt een keuze gemaakt op welk dijklichaam de focus gelegd zal worden. Deze dijk wordt gekozen op basis van de grondsoorten, wanneer een dijk een algemeen profiel heeft met niet meer dan 10 grondlagen is deze geschikt voor dit onderzoek.
- Alle invloeden van het klimaat op een dijk worden besproken. Uit deze invloeden wordt een keuze gemaakt in het begin van hoofdstuk 4 waar de focus op gelegd wordt.

Randvoorwaarden:

- De sterkte van een dijk wordt bepaald door de hoogte en de stabiliteit. Omdat in dit onderzoek alleen wordt gekeken naar de invloed van het klimaat op de grondeigenschappen van een dijk en niet naar de invloed van het klimaat op de hoogte, zal alleen onderzoek worden gedaan naar de stabiliteit van een dijk. Overige belastingen (hydraulisch, door verkeer, door de mens etc.) worden buiten beschouwing gehouden.
- De verschillende faalmechanismen en dijken worden wel benoemd maar niet alle mechanismen en dijken worden verder onderzocht.
- Onderzoek wordt alleen gedaan naar de faalmechanismen die beïnvloed worden door het klimaat. Het falen door andere invloeden zoals het falen van een dijk door bijvoorbeeld afgraving of aardbevingen, wordt niet beschouwd in dit onderzoek.
- Dit onderzoek neemt geen dijken in het buitenland mee, hier wordt ook geen advies voor gegeven. Wel wordt gerefereerd naar buitenlandse onderzoeken die raakvlak hebben met dit onderzoek.
- Daarnaast wordt ook geen onderzoek gedaan naar primaire dijken.
- Dit onderzoek neemt geen klimaat invloeden die de komende 68 jaar niet in Nederland op zullen treden mee, deze invloeden kunnen gevonden worden in de klimaatscenario's van het KNMI (KNMI, z.d.).(KNMI, z.d.).

3. Faalmechanismen en de invloed van het klimaat

3.1 Inleiding



In hoofdstuk 8 wordt de eerste deelvraag beantwoordt, deze luidt: “Welke faalmechanismen van dijken worden beïnvloed door het klimaat?”. Hier is onderzoek naar gedaan door een literatuurstudie te doen naar de faalmechanismen van dijken en door een literatuurstudie te doen naar het klimaat wat de komende 62 jaar in Nederland zal optreden. Bij de faalmechanismen wordt een onderscheid gemaakt tussen falen door het klimaat en door andere factoren. Hoe dit faalmechanisme kan optreden bij een bepaald klimaataspect is in hoofdstuk ... verder uitgezocht. Hiernaast is met de informatie uit dit hoofdstuk, later een keuze gemaakt met welk klimaataspect verder gerekend wordt en waarvoor uiteindelijk een faalcurve ontworpen is (hoofdstuk 7.3.2). De informatie uit dit hoofdstuk wordt in hoofdstuk 5 ook gebruikt om te onderzoeken hoe het veranderende klimaataspect invloed heeft op een dijk en in hoofdstuk 6 wordt het gebruikt om te bepalen hoeveel invloed dit heeft op de stabiliteit van een dijk.


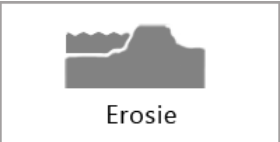
In de volgende paragrafen zal de uitkomst van deze studies worden toegelicht en de deelvraag zal met deze informatie in de conclusie worden beantwoord.

3.2 Faalmechanismen

Algemene faalmechanismen

Om te kunnen onderzoeken wat de invloed is van het klimaat op dijken is eerst onderzocht hoe dijken kunnen falen. Dijken kunnen falen op verschillende manieren. Die verschillende faalmechanismen worden hieronder beschreven (zie tabel 3-1) (*Faalmechanisme - Delta Noodmaatregelen, z.d.*).

Hoofd faalmechanismen	Faalmechanisme	Oorzaak
	Overloop	<ul style="list-style-type: none"> - Kruinverlaging - Vertrappen door vee - Hoge wateren
	Overslag	<ul style="list-style-type: none"> - Hoge buitenwaterstanden - Grote golfhoogte
	Instabiliteit door infiltratie in toplaag binnentalud bij overslag.	<ul style="list-style-type: none"> - Erosie toplaag - Hoogwater - Overloop of overslag
	Opdrijven en opbarsten	<ul style="list-style-type: none"> - Hoogwater - Slappe grondlagen met hieronder een wervoerend pakket.
	Macro-instabiliteit binnenwaarts	<ul style="list-style-type: none"> - Hogere waterspanningen in ondergrond of dijklichaam door hoogwater. - Belasting kruin - Graverij aan binnen teen - Uitstroming van kalk
	Macro-instabiliteit buitenwaarts	<ul style="list-style-type: none"> - Snel stijgend hoogwater met daarna snel zakkend water. - Uitstroming van kalk
	Micro-instabiliteit	<ul style="list-style-type: none"> - Talud steiler dan 1:5 bij zanddijken. - Door kwel bij zanddijken of kleidijken.

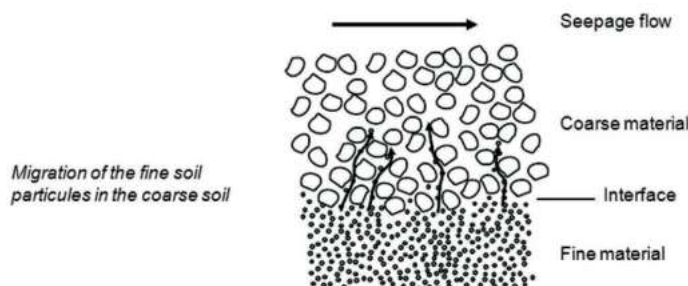
	Instabiliteit bekleding buitentalud	- Hoge golven
	Zettingsvloeiing	- Grond stroomt af van de oever. - Geen steenbestorting op oevers.
	Afschuiven van het binnentalud	- Lang aanhoudend hoogwater
	Wegpersen van slappe lagen in de ondergrond	- De aanleg en het ophogen van een dijk, indien dikke slappe veenlagen voorkomen
 <p>Piping</p>	Opdrijven en opbarsten	- Hoogwater - Slappe grondlagen met hieronder een watervoerend pakket.
	Heave	- Buitenwaterstand stijgt waardoor stroming onder de dijk plaats vindt.
	Piping	- Kan voorkomen wanneer een ondoorlatende deklaag op een zandlaag ligt. - Hoogwater
 <p>Erosie</p>	Erosie binnentalud	- Zware regenval, golfoverslag en overloop bij hoge waterstanden. - Verbranding grasmat
	Erosie buitentalud of vooroever	- Golfaanval - Grote stroomsnelheden - Drijfvuil - Verbranding grasmat
	Contact erosie (Wanneer het fijne zand tussen het grove zand gemengd wordt) (zie figuur 3-1)	- Kan ontstaan als een fijne zandlaag over een grove zandlaag ligt. - Bij stroming tussen de korrels door wateroverspanning.

Tabel 3-1 Faalmechanismen van dijken (Faalmechanisme - Delta Noodmaatregelen, z.d.)

De faalmechanismen kunnen in twee vormen opgedeeld worden. Een dijk kan hydraulisch falen of constructief falen.

- Bij hydraulisch falen van een dijk stroomt water over een dijk heen. Dit kan komen door doorstroming, overloop of overslag en treed op voordat de maximaal kerende hoogte van een dijk is bereikt.
- Bij het constructief falen kan de dijk zijn functie niet meer vervullen doordat de dijk doorbreekt (CIRIA, French Ministry of Ecology, USACE, 2013).

In dit onderzoek zal verder gegaan worden met het constructief falen van dijken.



Figuur 3-1 Contact erosie (CIRIA, French Ministry of Ecology, USACE, 2013)

3.3 Klimaataspecten

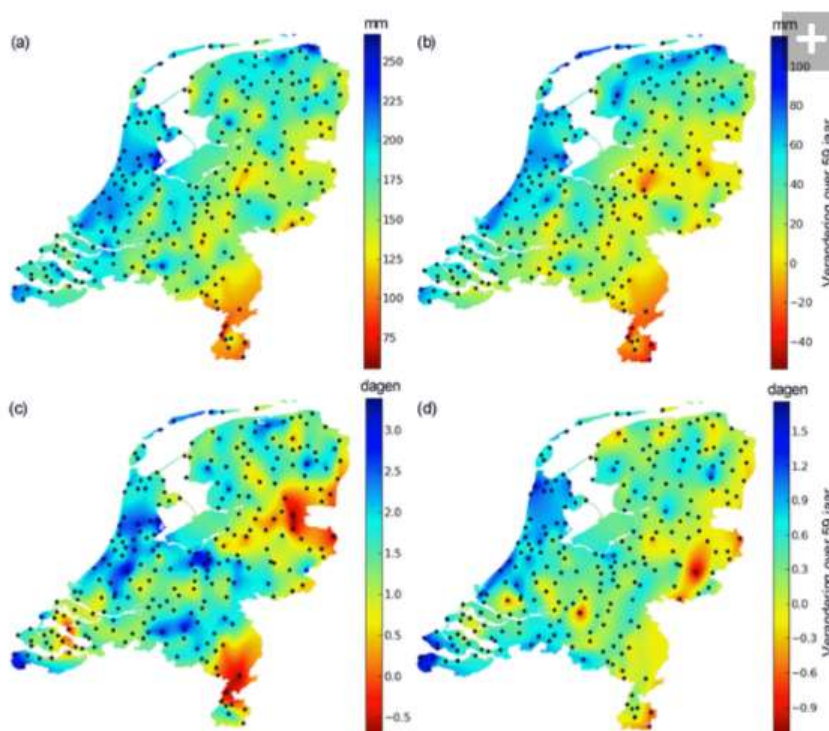
Hieronder worden de klimaataspecten in kaart gebracht die invloed kunnen hebben op de grondeigenschappen welke de stabiliteit van een dijk bepalen. Een toename van de hydraulische belasting wordt niet meegenomen omdat dit geen invloed op de grondeigenschappen van een secundaire dijk.

3.3.1 Neerslag

Tussen 1910 en 2009 is de neerslag in Nederland met 172 millimeter (25%) toegenomen. Hiernaast is in figuur 3-2 te zien dat ook een significante toename is van de winterneerslagen. Daarnaast laat de tabel zien dat het aantal dagen met meer dan 20 of 30 millimeter neerslag ook is toegenomen. Deze trend is alleen minder betrouwbaar omdat het aantal dagen met een neerslag van 30 millimeter meestal maar één per jaar is.

neerslag (mm)	1951-2009			1910-2009		
	absoluut	rel. (%)	Ns (%)	absoluut	rel. (%)	Ns (%)
jaar	118	16	51	172	25	97
winter (okt-mrt)	88	26	74	108	35	98
zomer (apr-sep)	33	8	2	61	16	46
dagen per jaar						
> 20 mm	1,4	44	27	1,9	67	73
> 30 mm	0,4	53	13	0,5	85	27

Figuur 3-2 Verandering van 5 neerslag karakteristieken (KNMI - Neerslagtrends in Nederland 1910-2010, z.d.)



Figuur 3-3 Veranderingen in vier neerslagkarakteristieken gedurende de periode 1951-2009: (a) jaarneerslag (mm); (b) neerslag in het zomerhalfjaar (mm); (c) aantal dagen per jaar met meer dan 20 mm neerslag; (d) aantal dagen per jaar met meer dan 30 mm neerslag. (KNMI - Neerslagtrends in Nederland 1910-2010, z.d.)

In afbeelding 3-3 zijn de veranderingen in neerslag door het land te zien. Wat opvalt in deze plaatjes is dat de neerslag niet overal gelijk toeneemt. In de zomer is een toename te zien in de kust van 60 tot 100 millimeter, maar in het oosten nam de neerslag juist af. De toename aan de kust komt vooral doordat de Noordzee gemiddeld met ruim 1 graden. Ook zijn de periodes waarin regen valt verschoven. In de winter en zomer is de neerslag het meest gestegen, de natte dagen zijn natter geworden. In de lente is het daarentegen juist minder gaan regenen.

Het moeilijk is aan te geven of de trends van klimaatverandering zich in de toekomst kunnen voortzetten omdat de oorzaken nog niet helder zijn. De waargenomen trends zijn deels het gevolg van langjarige variaties van de luchtdruk boven Europa, maar ook het veranderende klimaat speelt een rol. De KNMI'06-scenario's geven voor de periode van 1990 en 2050 een toename van vier tot negen procent van de gemiddelde jaar neerslag (KNMI - Neerslagtrends in Nederland 1910-2010, z.d.).

Door de toename van de absolute hoeveelheid vocht in de atmosfeer bij opwarming nemen de neerslag extremen ook toe. Een stijging van de extreme neerslag van 14% wordt verwacht bij een temperatuur stijging van 2 °C en een gelijkblijvende relatieve vochtigheid¹. Het aantal dagen met een dauwpunt boven de 18 graden is ook verdubbeld wat betekent dat de dagen waarop het vochtiger is ook zijn toegenomen. Aan de kust zijn het aantal dagen met extreme neerslag met 20% gestegen. Dit kan komen door een combinatie van een hogere luchtvochtigheid en de opwarming van de noordzee.

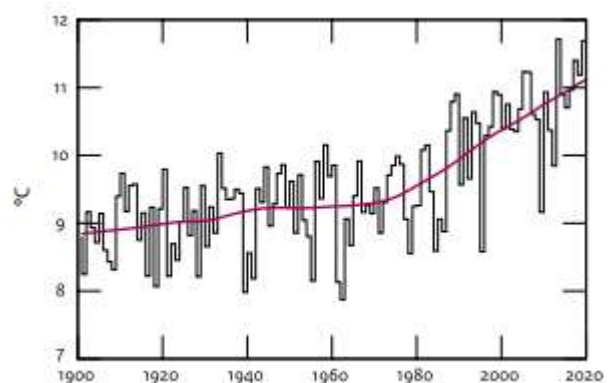
In de laatste 30 jaar is een toename van 10-15% in neerslag per uur bij extreme buien. Naast dat meer regen valt tijdens extreme buien neemt ook het aantal zeer extreme buien toe, dit zijn buien met een neerslag boven de 40-50 mm per uur. In de toekomst zal de vochtigheid in Nederland met 3-7% toenemen per graad wereldgemiddelde opwarming. In de zomer zal de relatieve vochtigheid afnemen, maar dit kan juist weer zorgen voor meer vochtigheid door koude valwinden. Het is aannemelijk dat de buiengrootte en buienclustering zal doorzetten, dit geldt wel alleen voor de zwaarste buien (Van der Steenhoven, 2021).

3.3.2 Temperatuur

In 2019 is het record van 40 graden boven Celsius gehaald in Nederland. Volgens het KNMI is de temperatuur in de periode van 1901 tot 2020 met 2,3 °C gestegen (zie figuur 3-4), dit is ruim twee keer zo veel als de toename van de temperatuur over het wereld gemiddelde in die periode.

Het gemiddeld aantal zomerse dagen per jaar (temperatuur van 25 °C of hoger) nam toe met 9 dagen. Het is waarschijnlijk dat deze temperatuur stijging doorzet door het aantal broeikasgassen wat nu in de lucht zit en wat de komende jaren nog bij komt. Het aantal zeer warme dagen en de hoogste maximum temperatuur namen ook toe (Van der Steenhoven, 2021).

Temperatuur heeft ook invloed op de gasvorming in veen. Het organische materiaal in veen kan langzaam worden afgebroken. Deze afbraak kan onder aerobe en anaerobe omstandigheden plaats vinden. Wanneer deze bacteriën het veen afbreken kunnen



Figuur 3-4 Gemiddelde temperatuur sinds 1901 (Van der Steenhoven, 2021)

¹ De relatieve vochtigheid is de hoeveelheid waterdamp bij de heersende temperatuur.

verschillende stoffen ontstaan zoals gas. Het poriën vloeistof in het veen zal dan verzadigd raken met de gassen en deze gassen kunnen worden uitgescheiden in de vorm van gasbellen onder verschillende omstandigheden bijvoorbeeld; wanneer de concentratie gas het oplosbare evenwicht overschrijdt, wanneer veranderingen zijn in de atmosferische druk, bij temperatuur schommelingen, bij een afname van de grondwaterstand en bij een afname van de spanning in de grond (Muraro & Jommi, 2020).

3.3.3 Wind

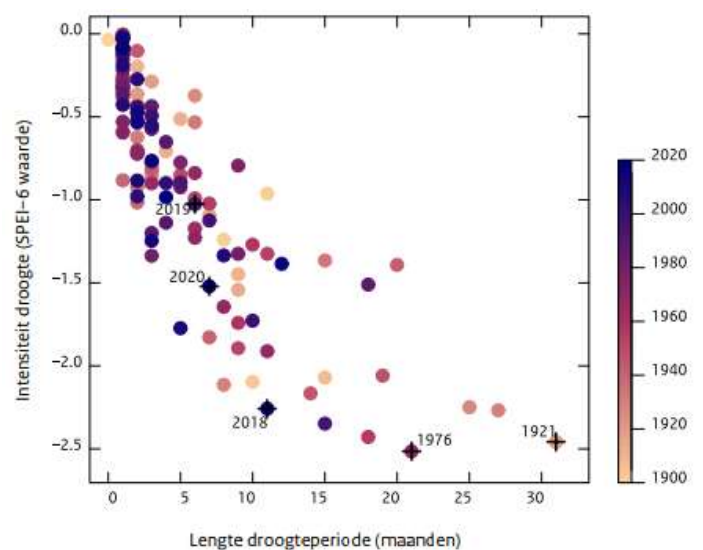
De richting waaruit de wind komt is ook bepalend voor het klimaat. In de klimaatscenario's zijn verschillende scenario's gemaakt voor de veranderingen in de luchtstromingspatronen omdat dit deels bepaalt hoeveel de temperatuur toe zal nemen (zie figuur 3-5) (KNMI14_klimaatscenarios folder, 2015). De windsnelheid is sinds de jaren 90 afgenomen met gemiddeld 2% per tien jaar. Dit komt deels door een toename van de ruwheid van het landoppervlak. In de windrichting zijn geen duidelijke trends te zien maar wel natuurlijke variaties (Van der Steenhoven, 2021).

Variabele	Indicator	Klimaat 1981-2010	Scenario veranderingen voor het klimaat rond 2050				Scenario veranderingen voor het klimaat rond 2085				Natuurlijke variaties gemiddeld over 30 jaar
			G _L	G _H	W _L	W _H	G _L	G _H	W _L	W _H	
Wereldwijde temperatuurstijging:			+1 °C	+1 °C	+2 °C	+2 °C	+1,5 °C	+1,5 °C	+3,5 °C	+3,5 °C	
Verandering in luchtstromingspatroon:			lage waarde	hoge waarde	lage waarde	hoge waarde	lage waarde	hoge waarde	lage waarde	hoge waarde	
Zeespiegel bij Noordzeekust	absolute niveau	3 cm boven NAP	+15 tot +30 cm	+15 tot +30 cm	+20 tot +40 cm	+20 tot +40 cm	+25 tot +60 cm	+25 tot +60 cm	+45 tot +80 cm	+45 tot +80 cm	±1,4 cm
	tempo van verandering	2,0 mm/jr.	+1 tot +5,5 mm/jr.	+1 tot +5,5 mm/jr.	+3,5 tot +7,5 mm/jr.	+3,5 tot +7,5 mm/jr.	+1 tot +7,5 mm/jr.	+1 tot +7,5 mm/jr.	+4 tot +10,5 mm/jr.	+4 tot +10,5 mm/jr.	±1,4 mm/jr.
Temperatuur	gemiddelde	10,1 °C	+1,0 °C	+1,4 °C	+2,0 °C	+2,3 °C	+1,3 °C	+1,7 °C	+3,3 °C	+3,7 °C	±0,16 °C
Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	851 mm	+4%	+2,5%	+5,5%	+5%	+5%	+5%	+7%	+7%	±4,2 %
Zonnestraling	zonne-straling	354 kJ/cm ²	+0,6%	+1,6%	-0,8%	+1,2%	-0,5%	+1,1%	-0,9%	+1,4%	±1,6 %

Figuur 3-5 Klimaatscenario's (KNMI14_klimaatscenarios folder, 2015)

3.3.4 Droogte

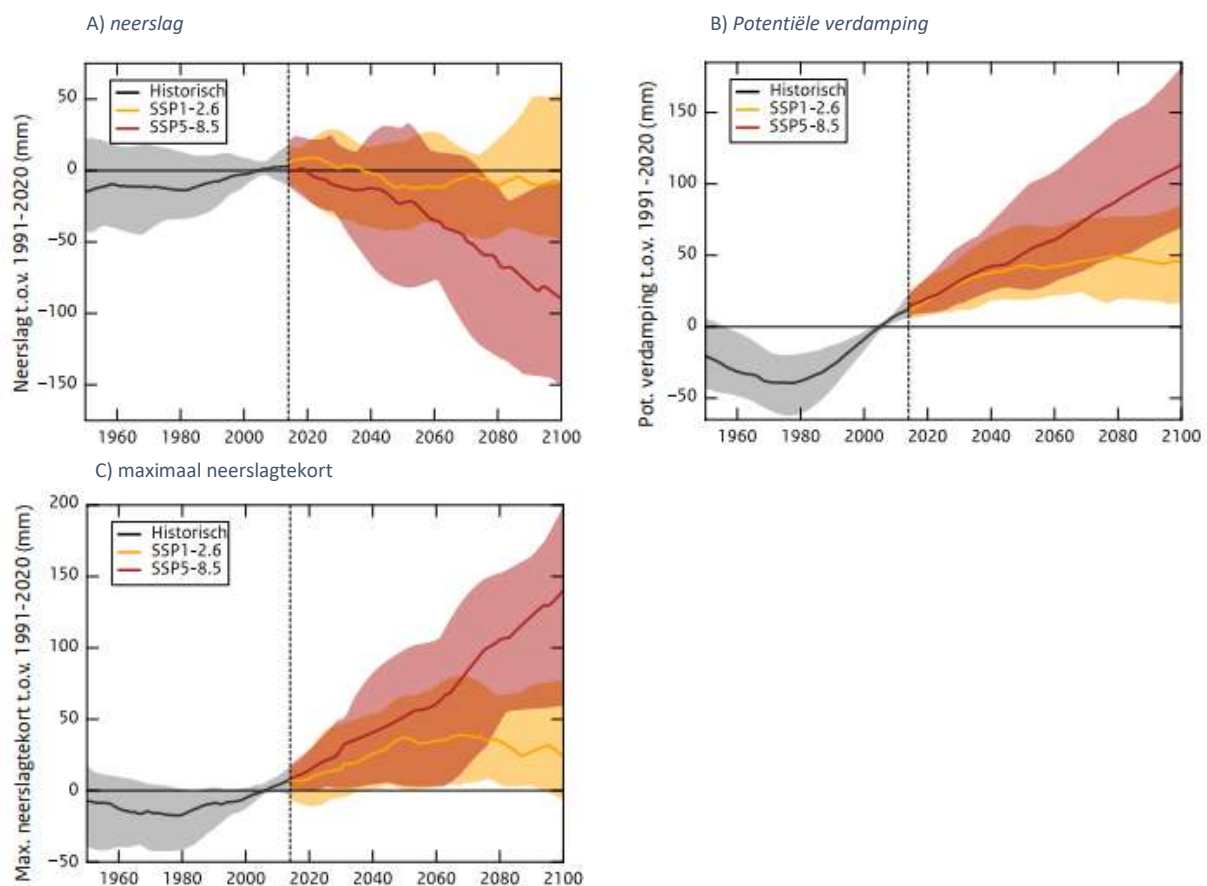
Droogte kan gekwantificeerd worden door SPI (Standardized Percipitation Index), dit is een droogtemaat gebaseerd op neerslag. Ook kan gebruik gemaakt worden van SPEI (Standardized Percipitation- Evapotranspiration Index), en hierbij wordt de potentiële verdamping ook meegenomen. Het verschil in de verdamping en neerslag kan over een bepaalde tijdschaal worden uitgezet, bij SPEI-3 is dit dus over 3 maanden uitgezet. Hiernaast kan de droogte ook bepaald worden door de hoeveelheid bodemvocht en water in de rivieren. De zomers van 2018, 2019 en 2020 hadden allemaal de overeenkomst dat ze droog waren. Dit had vooral te maken met een aanhoudend hogedrukgebied over het westen van Europa. In figuur 3-6 zijn deze droogtejaren in kaart gebracht aan de hand van de SPEI-6 waarden en de lengte van deze periode.



Figuur 3-6 Droogteperioden op basis van het landelijk gemiddelde met SPEI-6 onder nul (Van der Steenhoven, 2021)

In alle seizoenen is de neerslag en de potentiële verdamping toegenomen. Alleen in de zomer is meer verdamping (door een hogere temperatuur en meer zonnestraling) dan neerslag waardoor op dat moment een neerslagtekort is ontstaan. Het binnenland heeft hier het meest last van omdat daar de neerslag het minst is toegenomen en de potentiële verdamping het meest. In het binnenland is het neerslagtekort toe te wijzen aan klimaatverandering door een hogere temperatuur en meer zonneshijn. Dit is onderzocht in het onderzoek: Regional differentiation in climate change induced drought trends in the Netherlands (Philip et al., 2020).

De verschillen in het neerslagtekort door het land is voornamelijk te wijten aan de vorm van wateraanvoer. In de kuststrook wordt naast het regenwater ook water aangevoerd via de rivieren. In het binnenland wordt water alleen aangevoerd door neerslag, en in het binnenland neemt deze neerslag en verdamping af. In de Rijn is ook een kleine afname van het wateraanvoer maar dit is niet significant in vergelijking met het tekort aan water in het binnenland (Lenderink et al., 2009). In figuur 3-7 zijn de neerslag, de potentiële verdamping en het neerslagtekort in het groeiseizoen² gemodelleerd aan de hand van twee emissiescenario's.



Figuur 3-7 Projecties voor de verandering van neerslag, potentiële verdamping en neerslagtekort in het groeiseizoen (Van der Steenhoven, 2021)

SSP1-2.6 is het lage emissiescenario en SSP5 is het hoge emissiescenario. Voor Nederland geven de emissiescenario's geen significante verandering voor de neerslag. De potentiële verdamping zal in beide scenario's toenemen door een hogere temperatuur en meer zonnestraling. Door het verschil van de factoren te projecteren kan gesteld worden dat ook in beide scenario's het neerslagtekort toe neemt. De droogte is ook afhankelijk van de windrichting, deze is lastig te bepalen. Maar wanneer gesteld wordt dat de Middellandse Zee snel opwarmt door klimaatverandering en dat dit bij de

² Het groeiseizoen loopt van 1 april tot en met 30 september

Noord-Atlantische Oceaan minder snel optreed, kan geconcludeerd worden dat vaker droge oosterwinden voor zullen komen (Van der Steenhoven, 2021).

Wanneer dieper ingezoomd wordt op de SPI en SPEI waarden zijn ook duidelijke trends in de droogte zichtbaar. Wanneer de SPI en SPEI waardes van de lentes sinds 1965 vergeleken worden valt op dat de droogte vooral zichtbaar wordt bij de SPEI waardes. Verdamping speelt dus een significante rol bij die droogte. Wanneer naar de herfst- en wintermaanden wordt gekeken valt op dat de SPEI en SPI waardes veel dicht bij elkaar liggen. Dit komt doordat in die maanden weinig verdamping is en het neerslagtekort voornamelijk wordt bepaald door de hoeveelheid regen. Als een conclusie getrokken wordt over de droogte is het dus belangrijk om ook naar de verschillende seizoenen te kijken. Want wanneer naar het neerslagtekort over het hele jaar berekend wordt zal het neerslagoverschot in de winter ervoor zorgen dat het neerslagtekort in de zomer niet opvalt. (*Meteorologica Juni 2021 by Nvbm - Issuu*, 2021).

3.3.5 Stormen

In het huidige klimaat van Nederland komen geen orkanen voor. Dit komt omdat ze ontstaan in gebieden met hoge watertemperaturen, en deze gebieden liggen nog te ver weg van Nederland. Of orkanen in de toekomst in Nederland voor zullen komen is lastig te bepalen, maar ex-orkanen kunnen in de vorm van zware stormen wel bij de Nederlandse kust aankomen. Wanneer de wateren met hogere temperaturen dicht bij Nederland zullen komen kan voorspelt worden dat de ex-orkanen die bij Nederland aankomen sterker zullen zijn. De oostelijke grens van het orkaanontwikkelingsgebied verschuift waarschijnlijk 10 graden naar het oosten. Hierdoor hoeft minder afstand afgelegd worden voordat de stormen Europa bereiken en is de kans groter dat ze hun orkaan kracht behouden. Maar om een echte orkaan te blijven zijn specifieke condities nodig, en de kans dat deze condities de komende jaren optreden is klein (Haarsma et al., 2013). Hiermee kan dus geconcludeerd worden dat de belasting op een dijk en de erosie van een dijk groter worden door extremere stormen. Ook zal bij een toename aan stormen (meer extreme neerslag) de hoogste grondwaterstand voor korte duur verhogen (klimaat-effectatlas, z.d.-b). Deze verhoogde grondwaterstand heeft een negatieve invloed op de korrelspanning en dus op de stabiliteit.

3.3.6 Vorst

Zoals in paragraaf 1.3.2 is onderzocht dat de temperatuur in Nederland sinds 1901 met 2,3 °C graden gestegen, dit heeft natuurlijk ook invloed op de vorst die tijdens de winter voor kan komen. Het aantal vorstdagen (met een minimum temperatuur onder nul) sinds 1901 af is genomen met twintig dagen en het aantal ijsdagen (met de minimum en maximum temperatuur onder nul) is afgenomen van 11 naar 6 (Van der Steenhoven, 2021). Dit betekent dat wanneer de klimaatverandering door zet, de vorst in de toekomst zal afnemen.

3.3.7 Klimaatverandering

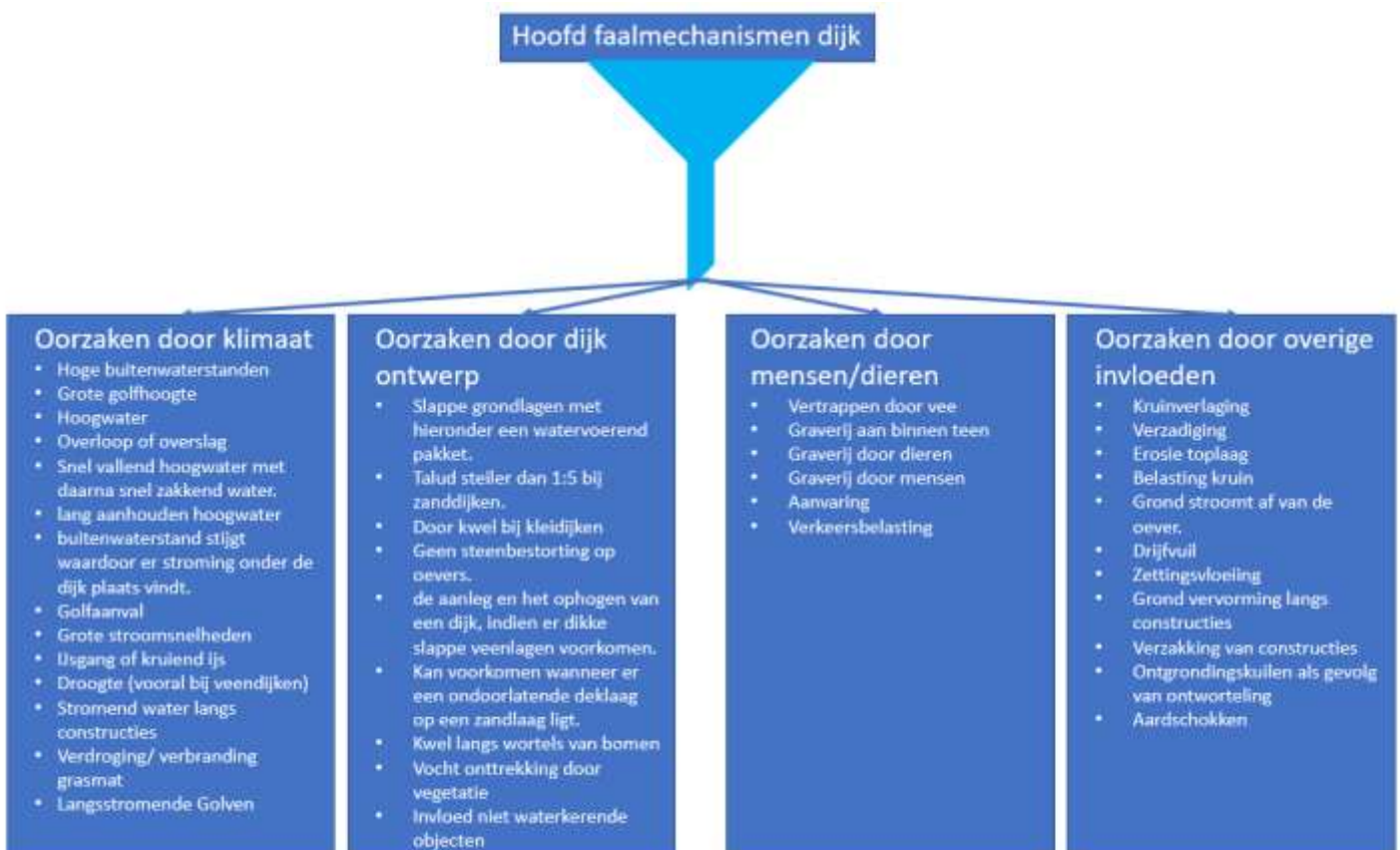
In figuur 3-8 zijn de verandering van het klimaat tussen 1961 en 2020 te zien. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het klimaat de laatste decennia is veranderd en dat dit waarschijnlijk doorzet (Van der Steenhoven, 2021).

Seizoen	Variabele	Indicator	Klimaat 1961-1990	Klimaat 1981-2010	Klimaat 1991-2020
Jaar	Temperatuur	gemiddelde (TG)	9,4 °C	10,1 °C	10,5 °C
		gemiddelde maximum dagtemperatuur (TX)	13,3 °C	14,1 °C	14,5 °C
		gemiddelde minimum dagtemperatuur (TN)	5,4 °C	6,0 °C	6,3 °C
	Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	780 mm	838 mm	851 mm
	Zonnestraling	gemiddelde hoeveelheid	364 kJ/cm ²	368 kJ/cm ²	379 kJ/cm ²
	Verdamping	potentiële verdamping	564 mm	580 mm	603 mm
	Vochtigheid	relatieve vochtigheid	82,7 %	83 %	81,8 %
Wind		gemiddelde windsnelheid	5,2 m/s	5,1 m/s	5,0 m/s
		hoogste daggemiddelde per jaar	14,4 m/s	13,8 m/s	13,7 m/s
		hoogste uurgemiddelde per jaar	20,4 m/s	19,2 m/s	18,9 m/s
		aantal dagen met windrichting tussen zuid en west	146	150	151

Figuur 3-8 Verandering van het Nederlandse klimaat in de periode van 1961 tot 2020 (Van der Steenhoven, 2021)

3.4 Conclusie

Om de hoofdvraag van het eerste deel van dit onderzoek te kunnen beantwoorden zijn de faalmechanismen in lijn gezet met de klimaataspecten en -invloeden. De oorzaken van de faalmechanismen zoals beschreven in de tekst kunnen onderverdeeld worden in oorzaken van faalmechanismen die door het klimaat worden beïnvloed en oorzaken van faalmechanismen die door andere oorzaken worden beïnvloed zoals door mensen (zie figuur 3-9).



Figuur 3-9 Verdeling van de faalmechanismen van dijken (eigen werk)

Door de faalmechanismen te filteren op faalmechanismen die door het klimaat komen, kunnen deze makkelijk gekoppeld worden aan de verschillende klimaatinvloeden. Eerst zijn de klimaat aspecten op een rijtje gezet, hiermee zijn de verschillende klimaatinvloeden in kaart gebracht, dit is weer gekoppeld aan een oorzaak voor faalmechanismen en die oorzaken hebben een bijbehorend faalmechanisme. Bijvoorbeeld een droog klimaat. Een droog klimaat heeft als invloed dat het neerslagtekort toe neemt en de oorzaak van het faalmechanisme wat hierbij hoort is uitdroging van de grond en scheurvorming. Deze oorzaken leiden weer tot het faalmechanisme macro-instabiliteit binnen-/ buitenwaarts, afschuiven van het binnen talud en opdrijven/opbarsten. Voor alle klimaatinvloeden en faalmechanismen zijn de koppelingen te zien in figuur3-9

De deelvraag voor dit deel van het onderzoek naar de invloed van het klimaat op dijken is: “Welke faalmechanismen van dijken worden beïnvloed door het klimaat?”. Het antwoord op deze vraag is te vinden in figuur 3-10 waarin staat welke klimaatinvloeden gekoppeld kunnen worden aan welke faalmechanismen.

Klimaat	Klimaatkenmerken	Oorzaken voor faalmechanismen	Faalmechanismen
Neerslag	Toename neerslag in de winter	Hoge grondwaterstand	Macro-instabiliteit binnenwaarts/ buitenwaarts Afschuiven van het binnentalud
		Uitstroming van kalk	Afschuiving van het binnentalud Macro-instabiliteit binnenwaarts/ buitenwaarts
		Lang aanhoudend hoogwater	Heave/piping Opdrijven en opbarsten
Stormen	Meer extreme stormen	Erosie aan de grasmat	Overslag/overloop
		groot verschil in waterstand	Macro-instabiliteit binnenwaarts/ buitenwaarts Afschuiven van het binnentalud
Temperatuur	Hogere temperatuur	Uitdroging van de grond	Opdrijven en opbarsten Macro-instabiliteit binnenwaarts/ buitenwaarts Afschuiving van het binnentalud
		verbranding grasmat	Erosie binnentalud Erosie buitentalud of vooroever
		Gasvorming	Macro-instabiliteit binnenwaarts
Droogte	Toename neerslag te kort	Uitdroging van de grond	Macro-instabiliteit binnenwaarts/ buitenwaarts Afschuiven van het binnentalud
		Scheurvorming	Macro-instabiliteit binnenwaarts/ buitenwaarts Afschuiving van het binnentalud Opdrijven en opbarsten
Vorst	Afname van het aantal vorstdagen	ijsgang of kruitend ijs	Erosie binnentalud Erosie buitentalud of vooroever

Figuur 3-10 Faalmechanismen die door een klimaataspect wordt beïnvloed

Met deze klimaataspecten zal in hoofdstuk 5 verder onderzocht worden hoe deze een dijk beïnvloeden, in hoofdstuk 6 is deze informatie gebruikt om te berekenen hoeveel een dijk beïnvloed wordt door een klimaataspect.

4. Bepaling van de stabiliteit van een dijk

4.1 Inleiding

De stabiliteit van een dijk wordt gedefinieerd door enerzijds de belasting en anderzijds de weerstand tegen afschuiven (Van Vliet et al., z.d.). In dit onderzoek wordt de verandering van de belasting op de dijk buiten beschouwing gelaten. Onderzocht wordt hoe de eigenschappen van de grond bijdragen aan de weerstand tegen afschuiven. Afschuiven vindt plaats als het korrelskelet de optredende schuifspanning niet meer kan dragen. Gronddeeltjes rollen of schuiven over elkaar heen en een grondmoot bezwijkt (Backhausen & van der Stoel, 2014).

Om toe te lichten hoe grondeigenschappen deze weerstand tegen afschuiven bepalen wordt gebruik gemaakt van de theorie van twee grondmodellen. De modellen Critical State Soil Mechanics (CSSM) en Mohr-Coulomb omschrijven hoe de maximaal mobiliseerbare schuifsterkte (τ_{\max}) bepaald wordt. Door te kijken naar hoe de grondeigenschappen uiteindelijk de schuifsterkte vormen in een glijvlak wordt de koppeling gelegd met de stabiliteit van een dijkdoorsnede. Op deze manier wordt de tweede deelvraag beantwoordt, deze luidt: *“Hoe bepalen de grondeigenschappen de stabiliteit van de kering?”*.

4.2 Grondmodellen

4.2.1 Critical State Soil Mechanics

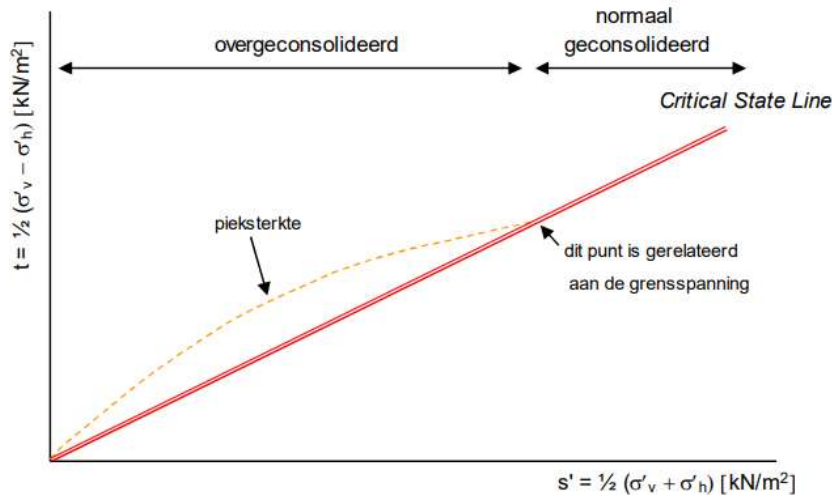
Met Critical State Soil Mechanics (CSSM) kan het sterktegedrag van een grondlichaam bepaald worden. Dit wordt gedaan met behulp van de maximaal te mobiliseren schuifsterkte (Rijkswaterstaat, 2021).

De schuifsterkte die maximaal gemobiliseerd kan worden is de Critical State. Dit is de (theoretische) grens voor het bezwijken van een grondlichaam. Wanneer de grond verticaal wordt belast neemt het volume van de grond af en consolideert de grond. Consolidatie is het proces waarbij de korrelspanning toeneemt en de waterspanning afneemt, doordat water uit de poriën wordt geperst door een belasting die op de grond wordt aangebracht (Aquo, z.d.). Op het punt van Critical State vindt geen volumeverandering meer plaats en is de schuifsterkte maximaal. Cohesie speelt hierbij geen rol omdat cohesie bij Critical State het gevolg is van over consolidatie. De schuifsterkte wordt hier enkel verzorgd door de aanwezige wrijving (Van Duinen, 2014).

Verder wordt bij het Critical State model onderscheid gemaakt tussen een gedraineerde en een ongedraineerde stabiliteitsanalyse. In tegenstelling tot de gedraineerde stabiliteitsanalyse wordt bij de ongedraineerde stabiliteitsanalyse de ontwikkeling van waterspanningen meegenomen in de bepaling van de maximaal toelaatbare schuifsterkte. Deze waterspanningen kunnen ervoor zorgen dat de schuifsterkte hoger of lager uitvallen dan als deze niet meegenomen zouden worden bij de gedraineerde analyse. Meer uitleg over gedraineerde en ongedraineerde stabiliteitsanalyse is in hoofdstuk 4.3 te vinden.

Critical State - de gedraineerde schuifsterkte

Bij de gedraineerde schuifsterkte e wordt de Critical State bepaald met behulp van de hoek van inwendige wrijving (φ') zoals in onderstaande **formule 1** te zien is. De Critical State van de grond is een maat voor de weerstand van de grond tegen taludinstabiliteit. (Rijkswaterstaat, 2021).



Figuur 4-1 Karakterisering van de schuifsterkte volgens het critical state-raamwerk (Rijkswaterstaat, 2021)

$$\tau_{\max} = s' * \sin \varphi'$$

formule 1

Waarin:

τ_{\max} = maximaal mobiliseerbare schuifsterkte [kN/m²]

s' = gemiddelde hoofdspansing (= $(\sigma'_v + \sigma'_h)/2$) [kN/m²]

waarin:

σ'_v = verticale korrelspanning (= $(\gamma_{grond} * d_{grond}) - (\gamma_{water} * d_{water})$) [kN/m²]

γ_{grond} = volumiek gewicht grondlaag [kN/m³]

d_{grond} = dikte grondlaag [m]

γ_{water} = volumiek gewicht water [kN/m³]

d_{water} = afstand tussen grondwaterstand en het beschouwde punt [m]

σ'_h = horizontale korrelspanning (= $K * \sigma'_v$) [kN/m²]

K = factor afhankelijk van grondsoort en actief-, passief- of neutrale grond

φ' = hoek van inwendige wrijving [°]

Voor de bepaling van de schuifsterkte volgens de gedraineerde analyse van Critical State is de volgende grondeigenschap van belang:

- Hoek van inwendige wrijving (φ')

Verder draagt de gemiddelde hoofdspansing (s') ook bij aan de schuifsterkte. De grondeigenschappen die bijdragen aan de gemiddelde hoofdspansing zijn:

- Het volumieke gewicht van grond en water (respectievelijk γ_{grond} en γ_{water})

Afhankelijk van de dikte van de grondlaag waarvoor de schuifsterkte wordt bepaald en de plaats hoogte van het grondwater in die laag kunnen de grondspanning en de waterspanning bepaald worden en zo dus ook de effectieve normaalspanning.

Critical State - de ongedraineerde schuifsterkte

De ongedraineerde schuifsterkte volgens Critical State is afhankelijk van verschillende factoren, namelijk:

- de belastinggeschiedenis van de grond;
- de belastingcondities van de grond.

De ongedraineerde Critical State wordt berekend met behulp van formule 2 (Van Duinen, 2014).

$$s_u = \sigma'_{vi} * S * OCR^m \text{ met } OCR = \frac{\sigma'_{vy}}{\sigma'_{vi}} \quad \text{formule 2}$$

Waarin:

s_u = de ongedraineerde schuifsterkte [kN/m²]

σ'_{vi} = de effectieve spanning [kN/m²] (op dezelfde manier bepaald als σ'_v in formule 1)

S = de normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio = $\frac{s_u}{\sigma'_{vc}}$ [-] waarin σ'_{vc} [kN/m²] gelijk

is aan de spanning waarbij het grondmonster is geconsolideerd. De parameter S wordt in het lab bepaald.

σ'_{vy} = maat voor de in situ toestand en de belastinggeschiedenis van de grond [kN/m²]

m = weergeeft hoe gevoelig de ongedraineerde schuifsterkte is voor verandering van de effectieve spanning (σ'_{vi}) als gevolg van de ontwikkeling van de waterspanning [-]. Deze wordt in het lab bepaald.

De grondeigenschappen die volgens de ongedraineerde stabiliteitsanalyse van Critical State de schuifsterkte-eigenschappen vormen zijn:

- De normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio (S)
- De gevoeligheid van de schuifsterkte als de waterspanningen veranderen (m) (Van Duinen, 2014).

Verder weergeven σ'_{vi} en OCR de spanningsconditie van de grond. Net als bij de gedraineerde schuifsterkte zijn de grondeigenschappen die de effectieve spanning σ'_{vi} verzorgen het volumieke gewicht van de grond en het water.

Normaal geconsolideerd en overgeconsolideerd

De grond kan zich in verschillende graad van consolidatie bevinden. Met de overconsolidatie ratio (OCR) wordt de belastinggeschiedenis van de grond weergegeven. Dit is de verhouding tussen de grensspanning en de actuele spanning. Hierbij is de grensspanning de spanning waarbij het grondgedrag van stijf en voorbelast overgaat naar slap en niet-voorbelast of andersom (Rijkswaterstaat, 2021). Een voorbeeld van wanneer dit gebeurt is wanneer op een stuk grond voor een bepaalde tijd (sinds het verleden) een belasting heeft gewerkt en deze nu (in de actuele tijd) is verwijderd.

Wanneer de grensspanning groter is dan de verticale effectieve spanning, dan is de grond overgeconsolideerd ($OCR > 1$). Wanneer de grens- en effectieve spanning aan elkaar gelijk zijn is de grond normaal geconsolideerd ($OCR = 1$). Zoals in formule 2 te zien is wordt cohesie niet meegenomen in de berekening van de schuifsterkte. Dit geldt als de grond normaal geconsolideerd is. In het Critical State-raamwerk is cohesie een gevolg van overconsolidatie. Zo is sprake van een vorm van cohesie wanneer de grond in grote mate overgeconsolideerd is, dit is het geval bij de pieksterkte (zie figuur 9-1). Bij de bepaling van de pieksterkte zou de cohesie (c') dus wel van belang zijn. Echter is de cohesie niet van belang bij de bepaling van de Critical State-sterkte. In dit punt wordt de resterende sterkte enkel nog bepaald door interne wrijving (Van de Kamp et al., 2022).

4.2.2 Mohr-Coulomb

Het tweede model waarmee de maximaal te mobiliseren schuifweerstand van een massa grond bepaald kan worden is het Mohr-coulomb model. De formule waarmee deze schuifweerstand berekend wordt luidt:

$$\tau_{max} = c' + \sigma'_n * \tan\varphi' \quad \text{formule 3}$$

Waarin:

τ_{max} = het maximaal te mobiliseren schuifweerstand [kN/m²]

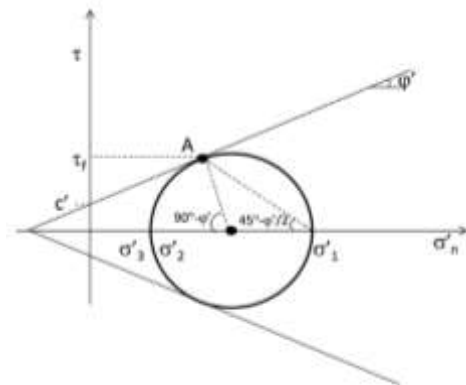
c' = cohesie [kN/m²]

σ'_n = de effectieve normaalspanning op het beschouwde glijvlak [kN/m²]

φ' = de hoek van inwendige wrijving [°]

Om de maximale schuifweerstand te bepalen moet eerst de effectieve normaalspanning bepaald worden. De waarde van de effectieve normaalspanning (σ'_n) kan worden vastgesteld met behulp van de cirkel van Mohr.

De cirkel van Mohr (zie figuur 4-2) is een visuele representatie van de verticale en horizontale effectieve spanningen in een triaxiaalmonster op het moment van bezwijken. Tijdens een triaxiaalproef worden de sterkte en stijfheid van grond bepaald door spanning aan te brengen op een grondmonster (Van de Kamp et al., 2022). Dit kan ook worden gedaan met behulp van de Direct Shear proef (zie paragraaf 5.11.3 en bijlage V). Met behulp van een dergelijke proeven kan dus de waarde van de effectieve normaalspanning worden bepaald. In figuur 4-2 is σ'_1 gelijk aan de verticale effectieve spanning en geldt dat $\sigma'_2 = \sigma'_3$, deze zijn gelijk aan de horizontale effectieve spanning. Het punt waar de cirkel van Mohr de lijn van de vergelijking van het maximaal te mobiliseren schuifweerstand (formule 3) raakt (punt A), geeft bezwijken weer. Dit punt geeft de waarde van σ'_n aan waar bezwijken bij hoort.



Figuur 4-2 Mohr-Coulomb faal criterium (Van de Kamp et al., 2022)

De schuifsterkte zoals deze bepaald wordt in formule 3 gaat uit van het feit dat de dilatatiehoek Ψ (de plastische volumetoename van een materiaal bij schuifvorming) gelijk is aan de hoek van inwendige wrijving φ' . Wanneer $\Psi = \varphi'$ wordt dit het associatief Mohr-Coulomb model genoemd.

Aangezien grond in werkelijkheid nooit homogeen is, bezwijkt het niet overal tegelijk. Hierdoor kan de schuifsterkte waarbij $\Psi = \varphi'$ niet bereikt worden. Een aanname die beter bij de werkelijkheid aansluit is dat $\Psi \leq \varphi'$. In dit geval is de maximaal te mobiliseren schuifweerstand dus lager dan bij $\Psi = \varphi'$. De schuifweerstand berekend op basis van $\Psi \leq \varphi'$ wordt het niet-associatieve Mohr-Coulomb model genoemd (Rijkswaterstaat, 2021). De formule hiervoor luidt:

$$\tau = \frac{(c' * \cos \varphi' + \sigma'_n * \sin \varphi') * \cos \Psi}{1 - \sin \Psi * \sin \varphi'} \quad \text{formule 4}$$

Hierin is:

τ = maximaal te mobiliseren schuifweerstand [kN/m²]

c' = cohesie [kN/m²]

σ'_n = de effectieve normaalspanning op het beschouwde glijvlak (= σ'_v zie formule 1) [kN/m²]

φ' = de hoek van inwendige wrijving [°]

Ψ = dilatatiehoek [°] ($\Psi = 0^\circ$ voor cohesieve grondsoorten en $\Psi = \varphi' - 30^\circ$ met een minimum van 0° voor zand (De Smidt, 2004))

Geconcludeerd wordt dat voor het bepalen van de schuifsterkte van een grondlaag met behulp van Mohr-Coulomb, de volgende grondeigenschappen van belang zijn:

- De cohesie (c');
- Hoek van inwendige wrijving (φ').

Verder draagt de effectieve normaalspanning (σ'_n) ook bij aan de schuifsterkte. De grondeigenschappen die de effectieve normaalspanning bepalen zijn:

- Het volumieke gewicht van grond en water (respectievelijk γ_{grond} en γ_{water});

Afhankelijk van de dikte van de grondlaag waarvoor de schuifsterkte wordt bepaald en de hoeveelheid meters grondwater in die laag kunnen de grondspanning en de waterspanning bepaald worden en zo dus ook de effectieve normaalspanning.

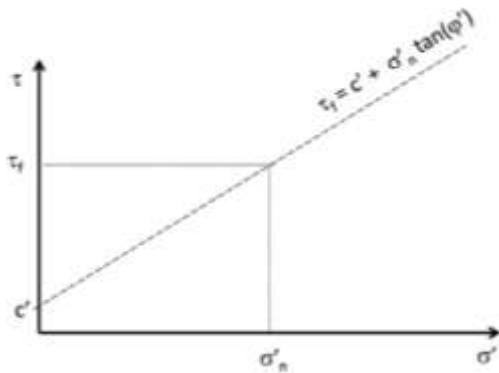
4.3 Gedraineerde- en ongedraineerde stabiliteitsanalyse

Bij het maken van stabiliteitsberekeningen is het van belang om een onderbouwde keuze te maken tussen een gedraineerde- of ongedraineerde stabiliteitsanalyse. Afhankelijk van de grondopbouw moet de invloed van de waterspanningen namelijk wel of niet worden meegenomen in de berekening van de macrostabiliteit. Zowel Mohr-Coulomb als Critical State kunnen met gedraineerde- en ongedraineerde situaties rekenen.

4.3.1 Gedraineerde stabiliteitsanalyse

Gedraineerd grondgedrag hoort bij goed waterdoorlatende grondsoorten, zoals zand en grind. Voor de bepaling van de macrostabiliteit van een grondopbouw met dergelijke lagen wordt dan ook een gedraineerde analyse gebruikt. Deze vorm van analyse is daarnaast ook te gebruiken bij een slecht waterdoorlatende grondopbouw, mits geen verandering in waterspanning ontstaat bij belastingveranderingen op het beschouwde vlak of als de grond volledig geconsolideerd is (Zwanenburg et al., 2013).

Voor het maken van een berekening op basis van een gedraineerde benadering speelt de effectieve normaalspanning (σ'_n) een belangrijke rol. Hierom moet gelden dat de effectieve normaalspanning niet verandert tijdens het bezwijken van een grondlichaam. Het constant blijven van de normaalspanning betekent dat de waterspanning ook niet significant verandert. Hierdoor hoeft deze verandering in waterspanning niet meegenomen te worden in de berekening, zoals past bij een gedraineerde analyse (Zwanenburg et al., 2013). Het geval waarin de normaalspanning constant blijft is van toepassing als het proces van afschuiving langzaam gebeurt in vergelijking met de consolidatiesnelheid van de grond. De gedraineerde sterktebenadering is gevisualiseerd in figuur 4-3.

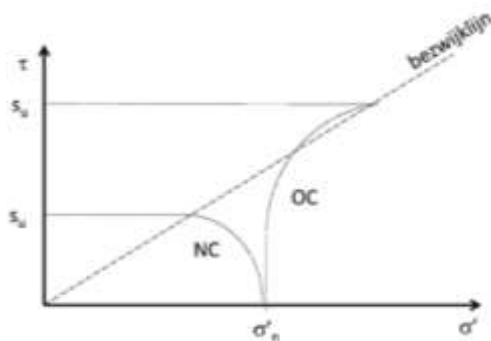


Figuur 4-3 Sterkte benadering gedraineerde stabiliteitsanalyse volgens Mohr-Coulomb (Van de Kamp et al., 2022)

4.3.2 Ongedraineerde stabiliteitsanalyse

Ongedraineerd grondgedrag hoort bij slecht waterdoorlatende grondsoorten, zoals klei en veen. Voor dergelijke grondlagen wordt gebruik gemaakt van de ongedraineerde stabiliteitsanalyse. Wanneer slecht waterdoorlatende grondlagen afschuiven ontstaat wateroverspanning. Dit water kan slecht afstromen door de laag en heeft hierdoor invloed op de effectieve normaalspanning en dus ook op de schuifsterkte (Zwanenburg et al., 2013). In de ongedraineerde stabiliteitsanalyse wordt rekening gehouden met deze verandering in waterspanning.

De invloed van de ontwikkeling van waterspanning in een slecht doorlatende grondlaag is in figuur 4-4 visueel weergegeven. Wanneer een slecht doorlatende laag normaal geconsolideerd of licht overgeconsolideerd is ($OCR < 3$), ontstaat wateroverspanning. Door de wateroverspanning neemt de korrelspanning af en neemt de schuifsterkte dus ook af (NC in figuur 4-4). Andersom ontstaat een wateronderspanning tijdens het afschuiven in een overgeconsolideerde laag. Hierdoor neemt de korrelspanning toe en neemt de schuifsterkte dus ook toe (OC in figuur 4-4) (Van de Kamp et al., 2022). Het punt waar de NC en OC lijn de bezwijklijn raken is dus de werkelijke schuifsterkte gegeven een effectieve normaalspanning, rekening houdend met de ontwikkeling van de waterspanning.



Figuur 4-4 Sterktebenadering in ongedraineerde stabiliteitsanalyse volgens Critical State (Van de Kamp et al., 2022)

4.3.3 Overweging gedraineerd- of ongedraineerde analyse

In eerste instantie kan beredeneerd worden dat de gedraineerde analyse voor goed doorlatende gronden wordt gebruikt en de ongedraineerde analyse voor slecht doorlatende grondlagen. Echter bestaat de grondopbouw in een dijklichaam zelden uit één grondsoort. Wanneer zowel goed- als slecht doorlatende grondsoorten aanwezig zijn in de grondopbouw moet de keuze gemaakt worden op basis van andere argumenten (Van Duinen, 2014). Andere aspecten die van belang zijn bij het maken van de keuze tussen gedraineerd- en ongedraineerd rekenen zijn in de hoofdstukken 4.3.1 en 4.3.2 toegelicht. Deze aspecten zijn overzichtelijk verwerkt in tabel 4-1.

Verder geldt voor grond boven de freatische lijn dat de gedraineerde analyse gebruikt moet worden omdat deze grond niet verzadigd is (Van de Kamp et al., 2022).

Stelling	Antwoord	Keuze analyse
De effectieve spanning langs het glijvlak verandert tijdens het afschuiven	Ja	Ongedraineerd
	Nee	Gedraineerd
De afschuiving van het grondlichaam verloopt snel in relatie tot de consolidatiesnelheid	Ja	Ongedraineerd
	Nee	Gedraineerd
De grondopbouw bestaat uit <u>slecht</u> doorlatende grondlagen	Ja	Ongedraineerd
	Nee	Gedraineerd
De <u>slecht</u> doorlatende grondlaag is <u>sterk</u> overgeconsolideerd (OCR > 3 à 4)	Ja	Ongedraineerd
	Nee	Gedraineerd

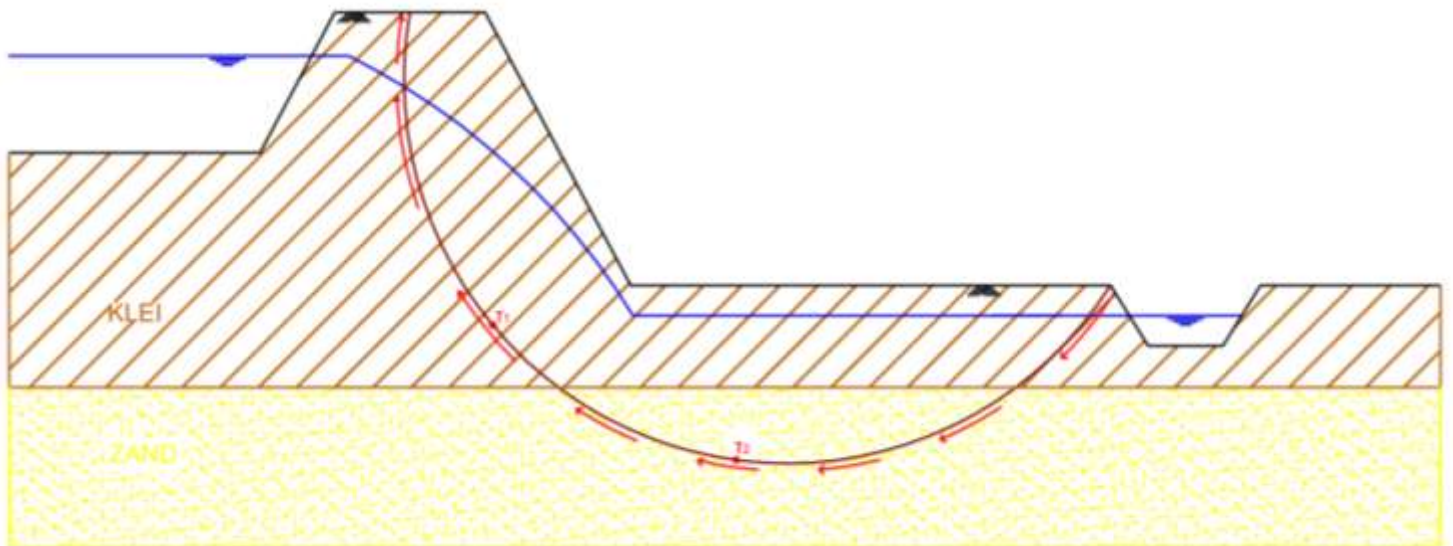
Tabel 4-1 Overweging gedraineerd of ongedraineerd rekenen

Snel optredende belastingveranderingen zijn maatgevend bij primaire dijken, hier moet dus rekening gehouden worden met de ongedraineerde analyse (Rijksoverheid, z.d.-a). In dit onderzoek wordt echter enkel ingegaan op regionale dijken. Doordat het waterpeil in kaden en kanalen gereguleerd worden, zorgt de kortdurende en beperkte verandering hiervan niet voor relevante verandering van de effectieve spanningen in dijken hieromheen. Volgens paragraaf 6.4 van de CUR 162 (Van de Kamp et al., 2022), wordt aanbevolen om voor boezemkaden en kanaaldijken zowel gedraineerd- als ongedraineerd te analyseren en de meest maatgevende situatie in rekening te brengen.

4.4 Bepaling van de stabiliteit

De stabiliteit van een dijklichaam wordt gegarandeerd door de weerstand tegen afschuiven van een glijvlak. Deze weerstand tegen afschuiven wordt omschreven met behulp van de grondmodellen Critical State en Mohr-Coulomb.

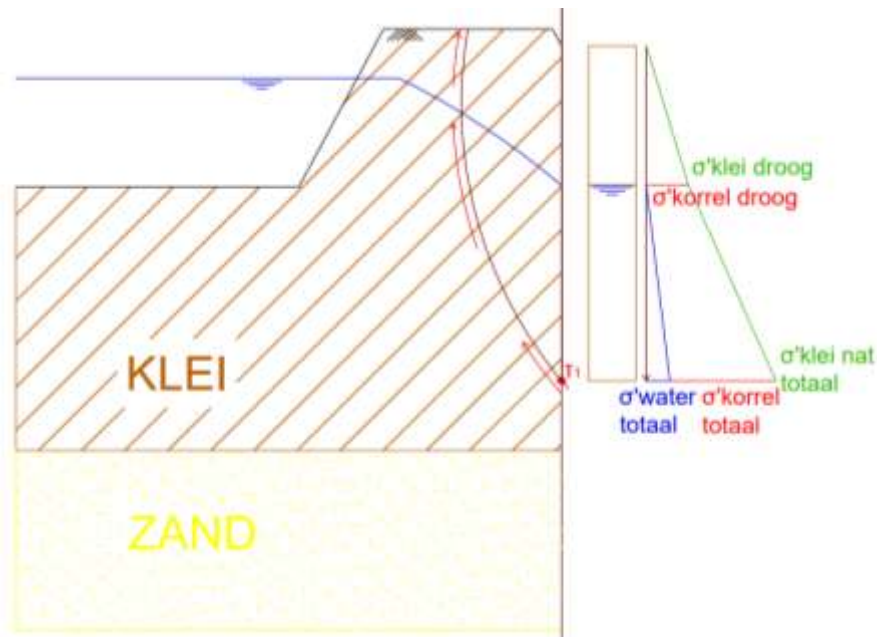
In een dijkdoorsnede is de waarde van de weerstand tegen afschuiven (τ) afhankelijk van de grondopbouw op het beschouwde punt. Voor elk punt langs een bepaalde glijcirkel kan deze waarde van τ bepaald worden (zie figuur...).



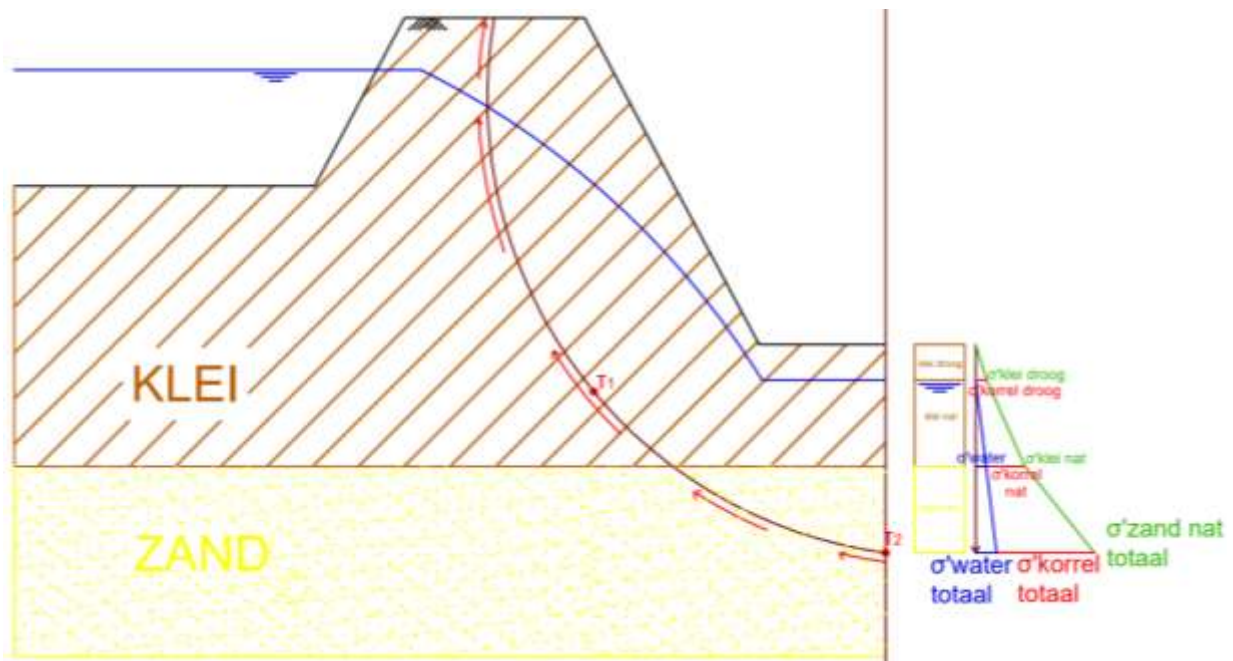
Figuur 4-5 Glijcirkel in dijklichaam (eigen werk)

In de formules van Critical State en Mohr-Coulomb is de waarde van de korrelspanning (σ') de enige dynamische variabele. De waarden van de cohesie en de hoek van inwendige wrijving blijven voor een bepaald punt in de grond gelijk op een bepaald moment. De waarde van de korrelspanning verandert echter afhankelijk van de grondwaterstand boven een beschouwd punt.

De korrelspanning wordt bepaald door de waterspanning van de grondspanning af te trekken (zie formule 1). Onderstaand is te zien hoe de waarde van de korrelspanning op de punten τ_1 en τ_2 van elkaar verschillen door de verschillende grondopbouw.



Figuur 4-6 Korrelspanning op punt τ_1 (eigen werk)



Figuur 4-7 Korrelspanning op punt τ_2 (eigen werk)

Om de stabiliteit van het gehele glijvlak te bepalen moet de waarde van τ over het gehele glijvlak bepaald worden. Bij het spanningsverloop dat bij τ_2 hoort is te zien hoe het grondwater de korrelspanning van eenzelfde grondsoort beïnvloedt. In het droge klei deel wordt de korrelspanning enkel verzorgd door de grondspanning (het gewicht van de droge klei). Bij de overgang van klei naar zand is te zien dat de korrelspanning nu gelijk is aan de grondspanning van de natte klei (gewicht natte klei) minus de waterspanning.

Het volumiek gewicht van een grondsoort (droog of nat) is bijna altijd hetzelfde. Hierdoor verandert de grondspanning op een punt niet. Het volumieke gewicht van water is ook altijd hetzelfde. Hetgeen dat dus voor zorgt dat de korrelspanning continu verandert is de waterspanning omdat deze kan fluctueren afhankelijk van de grondwaterstand. Een aantal factoren kunnen deze waterstand

beïnvloeden namelijk: de bodemopbouw, de hoogteligging van het gebied, de afstand tot een sloot of drainagevoorziening en de doorlatendheid van de bodem (Waterschap Rivierenland, 2015). In dit onderzoek wordt de focus gelegd op de doorlatendheid (K [m/d]) van de bodem. Dit omdat de doorlatendheid ook daadwerkelijk beïnvloedt kan worden door het klimaat en de andere factoren niet. De doorlatendheid van de (klei)bekleding van een dijklichaam draagt dus bij aan de bepaling van de stabiliteit (Van der Kleij, 2001). De invloeden van het klimaat op de doorlatendheid van de grond wordt verder toegelicht in hoofdstuk 6.

4.5 Conclusie

In dit hoofdstuk is literatuuronderzoek gedaan om de tweede deelvraag te beantwoorden, deze luidt: “Hoe bepalen de grondeigenschappen de stabiliteit van de kering?”.

Om te bepalen hoe grondeigenschappen de stabiliteit verzorgen is onderzoek gedaan naar de grondmodellen Critical State en Mohr-Coulomb. Deze modellen beschrijven, op een verschillende manier, hoe de grond met een bepaalde schuifsterkte weerstand biedt tegen afschuiven. Deze weerstand tegen afschuiven bepaalt onder anderen de stabiliteit van een grondlichaam.

Bij het Critical State model wordt onderscheid gemaakt tussen een gedraineerde- en een ongedraineerde stabiliteitsanalyse. In eerste instantie kan beredeneerd worden dat een gedraineerde analyse bij goed waterdoorlatende grondsoorten hoort en ongedraineerde analyse bij slecht waterdoorlatende gronden. Echter bestaat de grondopbouw in een dijklichaam bijna nooit uit enkel doorlatend of ondoorlatende grond. Voor de overweging tussen gedraineerd of ongedraineerd moet dan ook gekeken worden naar onder anderen of de effectieve spanningen veranderen tijdens het afschuiven, of het afschuiven snel/langzaam verloopt in relatie tot de consolidatiesnelheid en de mate van overconsolidatie van de grond.

In tabel 4-2 is te zien welke grondeigenschappen de schuifsterkte-eigenschappen verzorgen bij een gegeven grondmodel.

	c'	φ'	S	m
Critical State gedraineerd		X		
Critical state ongedraineerd			X	X
Mohr-Coulomb	X	X		

Tabel 4-2 Schuifsterkte parameters per grondmodel

Hierin is:

c' = de cohesie

φ' = de hoek van inwendige wrijving

S = de schuifsterkteratio

m = de gevoeligheid van de schuifsterkte voor verandering van de effectieve spanning

Om te concluderen hoe de grondeigenschappen de stabiliteit in een dijkdoorsnede bepalen moet de waarde van schuifsterkte τ langs een glijvlak bepaald worden. τ wordt bepaald met de formules van Critical State en/of Mohr-Coulomb. In deze formules zijn de waarden van c' , φ' , S en m constante gegevens op een beschouwd punt.

De enige variabele die dynamisch verandert is de effectieve korrelspanning (σ'). Deze verandert continu doordat de grondwaterstand in de dijk fluctueert. De grondeigenschappen van een dijk bepalen dus de stabiliteit doordat deze een weerstand tegen afschuiven vormen. De grondwaterstand is hetgeen dat bepaalt hoe groot deze weerstand tegen afschuiven is aangezien andere grondeigenschappen op een beschouwd punt en op een bepaald moment niet veranderen. De waarde van de grondwaterstand is uiteindelijk afhankelijk van een aantal locatie afhankelijke aspecten en de doorlatendheid van de grond.

5. De verandering van de grondeigenschappen van een dijk onder invloed van het klimaat

5.1 Inleiding

Aan het begin van dit hoofdstuk is de keuze gemaakt om onderzoek te doen naar een bepaalde grondsoort en klimaataspect om hier dieper op in te kunnen gaan en om hier berekeningen/experimenten mee uit te voeren. Hier is gekozen om verder te gaan met klei en veen en het klimaataspect droogte, de onderbouwing hiervoor is te vinden in paragraaf 5.2. In de paragrafen hierna wordt antwoord gegeven op de deelvraag: “Hoe veranderen de grondeigenschappen en de stabiliteit van dijken onder invloed van het klimaat?”. Dit is gedaan door een literatuurstudie en een aantal interviews te doen naar de invloed van droogte op de grondsoorten klei en veen, de gelijkenissen en de verschillen. Om een deel van kennis uit de literatuurstudie te valideren zijn een aantal experimenten uitgevoerd. Met deze experimenten worden ook parameters verzameld die gebruikt worden in de berekeningen in hoofdstuk 6. Als laatste worden deze invloeden gekoppeld aan de grondeigenschappen die bepaald zijn in hoofdstuk 4.

5.2 Keuze voor dijk soort en klimaataspect

5.2.1 Keuze voor klimaataspect

Door middel van onderstaande voorwaarden wordt een keuze gemaakt voor een klimaataspect. Het aspect wordt dus gekozen aan de hand van de volgende voorwaarden:

- Dit klimaataspect moet in Nederland voor gekomen zijn en in de toekomst moet dit klimaataspect ook in Nederland blijven voorkomen.
- De klimaatinvloed moet beredeneerbaar invloed hebben op de grond.
- Met dit klimaataspect moet een berekening uit te voeren zijn.
- Met dit klimaataspect moet een experiment uit te voeren zijn.

De uitvoerbaarheid van een experiment en berekening wordt in onderstaande tabel geanalyseerd (zie figuur 5-1).

Klimaataspect	Gevolgen	Uitvoerbaar in een experiment?	Uitvoerbaar in een berekening?
Droogte	Scheurvorming	ja	ja
	Erosie aan de bekleding	misschien	ja
Neerslag	Uitspoeling van mineralen	misschien	misschien
Temperatuur	Vriezen/dooien	niet relevant	niet relevant
	Gasvorming	niet relevant	ja

Figuur 5-1 Uitvoerbaarheid in een berekening of experiment van de klimaataspecten

In de figuur zijn klimaataspecten te zien die onderzocht zijn in hoofdstuk 3. Hierin is vorst niet meegenomen omdat dit niet toeneemt in de toekomst. Ook wordt hoogwater in de boezem niet meegenomen omdat een verhoging van de hydraulische belasting buiten de scope van dit onderzoek valt. Erosie aan de grasmat valt ook buiten de scope van dit onderzoek.

De invloeden van droogte zijn het beste uitvoerbaar in een berekening en een experiment, omdat het makkelijk is het watergehalte tussen de poriën aan de passen door een monster te drogen of juist heel nat te maken. Qua doorlooptijd van dit onderzoek is de invloed van droogte ook het beste te uit te voeren in experimenten omdat hier bestaande proeven voor gebruikt kunnen worden. Het proces van uitspoeling van mineralen is in een experiment uit te voeren door water aan het monster toe te voegen waarna het getest kan worden. Echter is het lastiger om dit binnen de tijd uit te voeren in een berekening en experiment omdat nog weinig bekend is over de stoffen die uit de grond spoelen en

wat de gevolgen hiervan zijn voor dijken. Erosie aan de grasmat zal ook te veel tijd kosten om uit de voeren in een experiment. Vriezen en dooien zal in de toekomst minder voorkomen door klimaatverandering (zie hoofdstuk 3). Gasvorming is minder relevant om te onderzoeken omdat dit meer één aspect is van een stijgende temperatuur, hierdoor is het voor dit onderzoek niet relevant om dit experimenteel te onderzoeken. De mogelijkheden om de experimenten uit te voeren zijn samen met de TU delft bepaald.

Hiernaast wordt onderbouwd hoe vaak deze klimaataspecten in Nederland voorkomen en hoeveel invloed het klimaat heeft op de grondlichamen, zie hiervoor de onderstaande tabel. Hierin is te zien dat droogte in Nederland al vaak voorkomt en wanneer de klimaatverandering doorzet, dit nog veel vaker voor zal komen (zie hoofdstuk 3 paragraaf 3.3.4). Door de 172 dagen gemiddelde neerslag en 1,9 dagen zware neerslag per jaar is het klimaataspect neerslag ook relevant in Nederland. De ijsdagen in Nederland zijn de laatste decennia afgenomen van 11 naar 6 dagen, hieruit kan beredeneerd worden dat het aantal ijsdagen in de toekomst ook verder zal afnemen. Dit betekent dat het klimaataspect vriezen en dooien een steeds minder grote rol zal spelen. Gasvorming treedt op bij een hogere temperatuur en een lage luchtdruk en dit komt voor bij zomerse dagen. Nu komen gemiddeld 28 zomerse dagen per jaar voor en dit zal toenemen door de stijgende temperaturen (Van der Steenhoven, 2021). Dit is samengevat in figuur 5-2.

Klimaataspect	Gevolgen	Dagen dat het kan voorkomen in NL	De hypothetische invloed op de grond
Droogte/nat worden	Scheurvorming	Vanaf april tot september neemt het neerslag tekort toe en gemiddeld is het maximale neerslag tekort per jaar 160 mm.	Afname van de korrelspanning door wateroverspanning en afname van de stabiliteit.
	Schade aan de bekleding	Vanaf april tot september neemt het neerslag tekort toe en gemiddeld is het maximale neerslag tekort per jaar 160 mm.	Verdroging van de bekleding.
Neerslag	Uitspoeling van mineralen	172 dagen met neerslag en 1,9 dagen met zware neerslag.	Uitspoeling van bijvoorbeeld kalk.
Temperatuur	Vriezen/dooien	6 ijsdagen (maximum en minimum temperatuur onder nul).	Uit elkaar drukking van de korrels waardoor er een bodemstructuur ontstaat en de doorlatendheid van de toplaag toeneemt.
	Gasvorming	28 zomerse dagen per jaar (temperatuur van 25 graden of hoger).	Afname van de korrelspanning en afname van de stabiliteit.

Figuur 5-2 Relevantie klimaataspecten

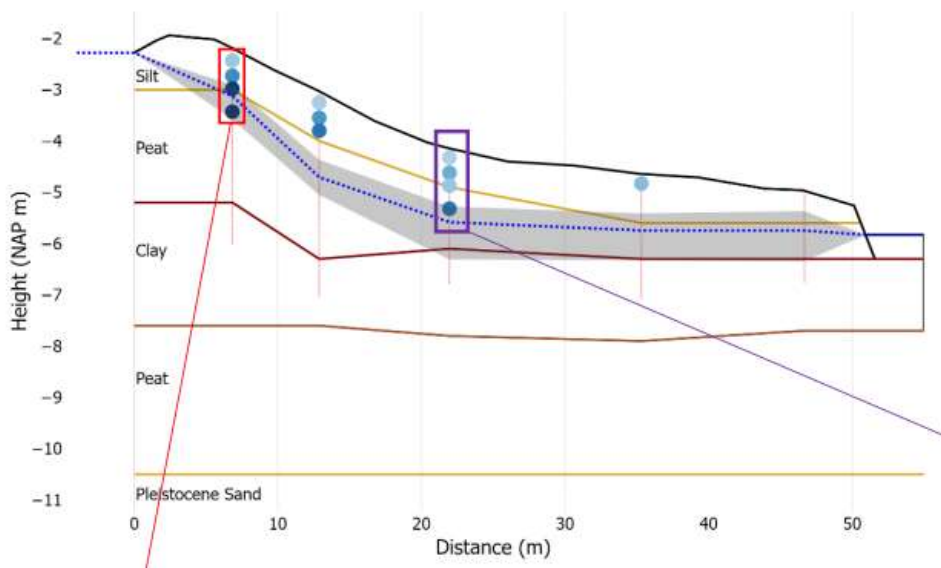
Dat droogte invloed heeft op dijken is te onderbouwen met eerdere dijkdoorbraken (voor verder toelichting (zie paragraaf 5.3). Een voorbeeld hiervan is de doorbraak in Wilnis. Een aantal deskundigen concluderen dat de dijkdoorbraak in Wilnis onder andere komt door het lichter worden van het veen, waarna de dijk kon afschuiven (Rotman, 2004). Gasbellen zijn ook waargenomen bij de dijkdoorbraak in Wilnis en zouden hier ook mee te maken kunnen hebben. Ook op andere plekken zijn gasbellen gemeten met sonderingen zoals in de Bleiswijk polder bij Rotterdam (Muraro & Jommi, 2020). Deze sonderingen zijn gemaakt in verband met een onderzoek naar de veiligheid van de kades in deze polder (Centrum voor Onderzoek Waterkeringen, z.d.).

Keuze klimaataspect

Door de invloeden op deze manier te vergelijken is de keuze gemaakt om in dit onderzoek de focus te leggen op het klimaataspect droogte. Ten eerste zijn de berekeningen en de proeven goed uit te voeren voor de invloed van droogte. Ook komt droogte veel voor in Nederland en zal dit in de toekomst vaker voorkomen. Als laatste kan gerefereerd worden naar een aantal praktijk voorbeelden van dijkdoorbraken in Nederland waarbij de oorzaak te maken heeft met droogte (zie paragraaf 5.3).

5.2.2 Keuze dijkopbouw

De invloeden van droogte is onderzocht door experimenten en berekeningen te doen naar een dijkdoorsnede die bestaat uit klei en veen. Als specifieke dijkdoorsnede voor de proeven en berekeningen is gekozen voor de MT-polder (zie afbeelding 5-3). Deze dijk bevindt zich in de buurt van een eerder afgeschoven dijk in Reeuwijk (zie paragraaf 5.9). In de zomer van 2022 zijn een aantal deformatiescheuren in de dijk gevonden. Dit was een erg droge zomer (zie paragraaf 5.7.2) waardoor dit waarschijnlijk krimp scheuren zijn (zie Bijlage II foto's MT-polder). Dit maakt dat het een interessante dijk is voor een casestudie in dit onderzoek. Hiernaast wordt parallel aan dit onderzoek ook onderzoek gedaan op deze dijk naar de geohydrologie en de grondopbouw en de invloeden van droogte op de dijk door PhD kandidaten van de TU Delft (Strijker, z.d.). De gegevens die bij deze onderzoeken zijn verzameld kunnen gebruikt worden in dit onderzoek, bijvoorbeeld de sonderingen (zie Bijlage VII). Bovendien bestaat de dijk uit klei en veen en deze grondsoorten zijn droogtegevoelig.



Figuur 5-3 Doorsnede dijk MT-polder (De Wolf, 2022)

5.2.3 Keuze faalmechanisme

Voor dit onderzoek is gekozen om berekeningen te doen naar het faalmechanisme macro-instabiliteit. Hiervoor is gekozen omdat in de praktijk bij het falen van dijken, waarbij droogte ook een rol speelde, dit faalmechanisme het meeste voorkomt (zie paragraaf 5.3). Bovendien is het haalbaar om met dit faalmechanisme berekeningen en experimenten te doen. Andere faalmechanismen die ook op kunnen treden bij droogte maar waar niet verder onderzoek wordt gedaan zijn: opdrijven en opbarsten, zettingsvloeiing en erosie van het talud.

5.3 Praktijkvoorbeelden: het falen van dijken die te maken hebben met droogte

Om de invloed van de droogte op klei- en veendijken te onderbouwen zijn een aantal praktijkvoorbeelden op een rij gezet. De oorzaken van deze doorbraken worden uitgelicht en hier wordt verder op ingezoomd.

5.3.1 Wilnis 2003

In augustus 2003 schoof een dijk in Wilnis af (zie figuur 5-4). De dijk in Wilnis was een veendijk welke gefundeerd was op een zandlaag. De doorbraak was een samenloop van verschillende omstandigheden. Het was een droge zomer in 2003, dit heeft waarschijnlijk gezorgd dat het veen uitdroogde wat de grond licht maakte (Bottema et al., 2021). De doorbraak van de dijk vond plaats op een plek waar vroeger petgaten³ zaten. Dit zou voor een kwelstroming onder de dijk kunnen hebben gezorgd waardoor de dijk kon afschuiven (Berendsen et al., 2019).



Figuur 5-4 Afschuiving Wilnis (Middendorp, 2016)

5.3.2 Reeuwijk 2021

In juli 2021 is de tempeldijk vlakbij Reeuwijk afgeschoven. De dijk verschoof in een weiland waardoor de schade beperkt was. Ook deze dijk bestond uit een veen laag (-2 tot -9 NAP), vervolgens een dunne klei laag en uiteindelijk was de dijk gefundeerd op een pleistocene zandlaag (vanaf -10 NAP). Dit is geen stabiele grondopbouw voor een dijk. In 1994 is de dijk opgehoogd in verband met zetting. Het zetten van de slappe grondlagen en de ophoging hebben gezorgd voor scheuren in de kruin van de dijk. De droogte van de laatste jaren hebben voor blijvende scheuren kunnen zorgen en ook bestaat de kans dat gasvorming in de veenlaag bij heeft gedragen aan het afschuiven van de dijk (Witte, 2023). De droogte was dus geen oorzaak van het afschuiven van deze dijk maar dit heeft het proces wel versneld (zie Bijlage I – interview 1).



Figuur 5-5 Afschuiving Reeuwijk (Deltares, 2023)

5.3.3 Zoetermeer 1947

In 1947 in Zoetermeer vond ook een dijk afschuiving plaats die vergelijkbaar was met Wilnis in 2003. Deze dijk schoof ook af in een droge zomer. Echter is de dijk in Zoetermeer na de doorbraak snel hersteld en hier is helaas weinig onderzoek naar gedaan (Bottema et al., 2021).

5.3.4 Edenburry

In Edenburry in Engeland is in 1989 een grote dijk doorbraak geweest met een totale lengte van 350 meter. Tijdens het afschuiven was een scheurend geluid te horen wat kan duiden op het falen van de dijk door een te hoge spanning. Hierna is direct een onderzoek gestart naar de oorzaak van het afschuiven. Scheuren konden in de dijk ontstaan door uitdroging en zetting. Water stroomde door de

³ Petgaten zijn langgerekte stroken waar vroeger veen uit werd gebaggerd (Petgaten - 3 definities - Encyclo, z.d.).

scheuren naar binnen en de grondwaterstand in de dijk steeg. Doordat het veen tegelijkertijd heel licht was geworden door uitdroging ontstond minder schuifweerstand in de dijk waardoor deze kon afschuiven (Nterekas, 2009).

5.3.5 Gelijkenis tussen de afschuivingen

De dijken die de laatste jaren zijn afgeschoven tijdens droogte zijn vaak veendijken op een zand grond. Ook hebben deze dijken allemaal een flauw talud. Deze flauwe taluds hebben een minder snelle grondwaterstroming en hierdoor een grotere fluctuatie in de freatische lijn. Hierom kunnen dit soort dijken sneller afschuiven. Ook hebben scheuren een rol kunnen spelen bij het ontstaan van een wateroverspanning aan de teen van de dijk. De (grootte van de) invloed van droogte wordt verder onderzocht in hoofdstuk 6.

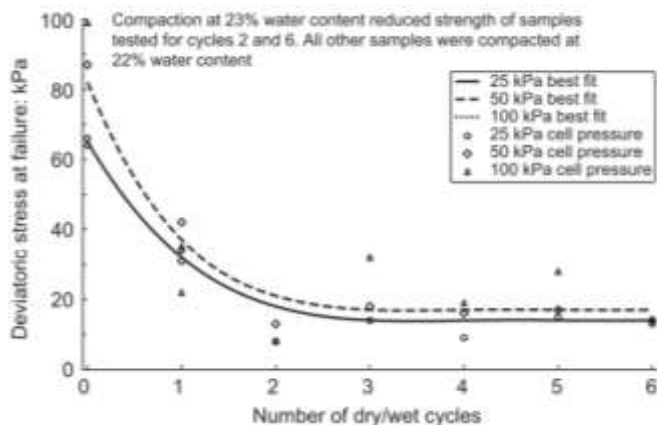
5.4 De invloed van droogte op klei

5.4.1 Verandering in zuigspanning

De zuigspanning die in (de poriën van) de grond aanwezig is heeft invloed op de sterkte van de grond. Een hogere zuigspanning ontstaat wanneer de grond uitdroogt. Doordat het water uit de poriën verdampt, neemt door de capillaire werking de zuigspanning toe. Dit is terug te zien in de uitgevoerde Hyprop proef (zie paragraaf 5.11.2). Een hogere zuigspanning is dus voordelig voor de effectieve korrelspanning omdat de waterspanningen lager zijn waardoor de grond dus sterker is. Echter, is uit een Engels onderzoek (Stirling et al., 2021) gebleken dat de potentie om zuigspanningen te ontwikkelen en deze te behouden in het geding kan komen onder invloed van het klimaat. In deze sub-paragraaf wordt de theorie uit deze studie toegelicht.

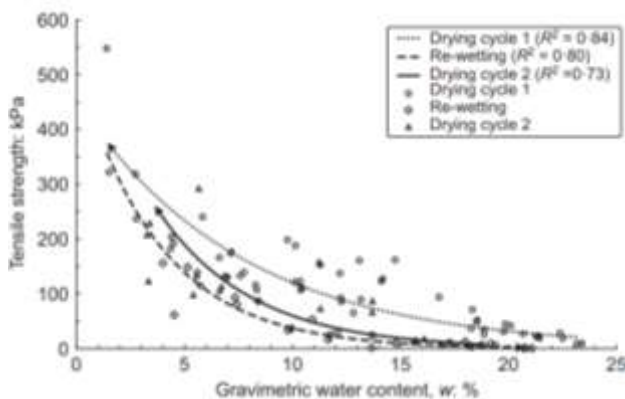
Tijdens droogte perioden kunnen scheuren in een dijk ontstaan. Als het vervolgens regent zwelt de grond en sluit een scheur mogelijk weer. Echter, wanneer de grond meerdere cycli ondergaat van uitdroging en weer nat worden neemt de sterkte van de grond af doordat de grond zich steeds plastischer gaat gedragen

In figuur 5-6 is te zien hoe de sterkte van de grond afneemt na verschillende droog/nat cycli. De “deviatoric stresses” beginnen op 60-100 kPa, wat gelijk staat aan een schuifsterkte van 30-50 kPa. Na 1 droog/nat cyclus daalt de deviatoric stress naar 30-45 kPa met een schuifsterkte van 15-23 kPa. Na 2 droog/nat cycli daalt de schuifsterkte naar onder de 15 kPa. Opvallend is dat de schuifsterkte na de 3^e cyclus niet verder afneemt.



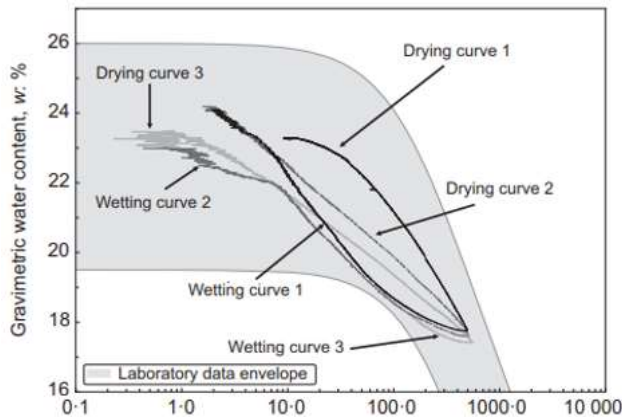
Figuur 5-6 Afname in sterkte na droog/nat cycli (Stirling et al., 2021)

Scheuren ontstaan na overschrijding van een bepaalde treksterkte onder een bepaald watergehalte. Echter is in figuur 5-7 te zien dat ook de treksterkte na verschillende droog/nat cycli bij een gegeven watergehalte afneemt. Het gevolg hiervan is dat scheurvorming zich niet verder voortzet.



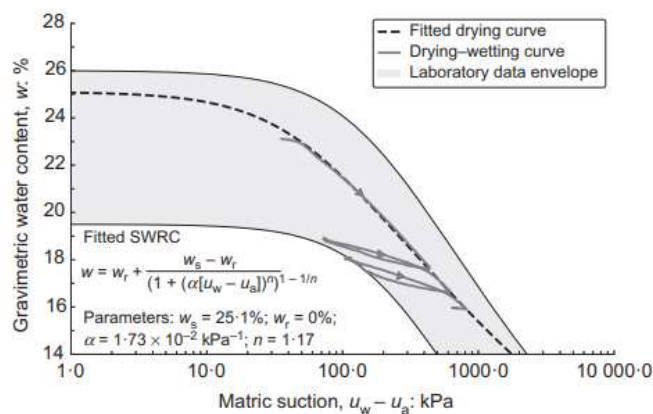
Figuur 5-7 Afname treksterkte na droog/nat cycli (Stirling et al., 2021)

Scheuren zorgen voor grotere openingen in de grond waardoor de potentie voor het ontwikkelen en behouden van zuigspanning afneemt. In figuur 5-8 is dit te zien door de waarden van de zuigspanning bij eenzelfde watergehalte te vergelijken. Bij een watergehalte van 22% is de zuigspanning bij de eerste keer drogen ongeveer 58 kPa, bij de tweede keer drogen 14 kPa en bij de derde keer 7 kPa. Deze afname van zuigspanning komt doordat onherstelbare scheurtjes ontstaan waardoor de grond minder zuigspanning kan vasthouden. De afname van de sterkte van de grond stopt na een aantal droog/nat cycli omdat scheurvorming wordt beperkt door de lagere treksterkte en geen lagere zuigspanningen ontwikkeld kunnen worden.



Figuur 5-8 Afname potentie voor het ontwikkelen en behouden van zuigspanning (Stirling et al., 2021)

In figuur 5-8 is de grond steeds blootgesteld tot een maximale zuigspanning van 500 kPa. Echter is uit het onderzoek gebleken dat wanneer de grond wordt blootgesteld aan hogere zuigspanningen dan ooit tevoren, door bijvoorbeeld extremere droogte, de potentie om zuigspanning te ontwikkelen in de volgende cyclus weer afneemt.



Figuur 5-9 Voortzettende afname van de droog-nat curve na blootstelling aan hogere zuigspanningen (Stirling et al., 2021)

In figuur 5-9 is de grond aan hogere zuigspanningen blootgesteld. Het gevolg hiervan is dat de droog-nat curve steeds verder omlaag opschuift.

Als het klimaat verandert en de temperaturen toenemen, zoals wordt voorspeld door het KNMI (zie hoofdstuk 3), kan de afname van de sterkte na verschillende droog/nat cycli zich verder voortzetten. Het steeds groter wordende verschil tussen de hoge zuigspanningen in de steeds drogere zomers en hoge waterspanningen in de natte winters, zorgen voor een versnelling van de afname van de sterkte. De sterkte neemt steeds meer af tot de grond zich op een gegeven moment plastisch gaat gedragen. Hoe snel dit proces verloopt wordt verder toegelicht in hoofdstuk 6.

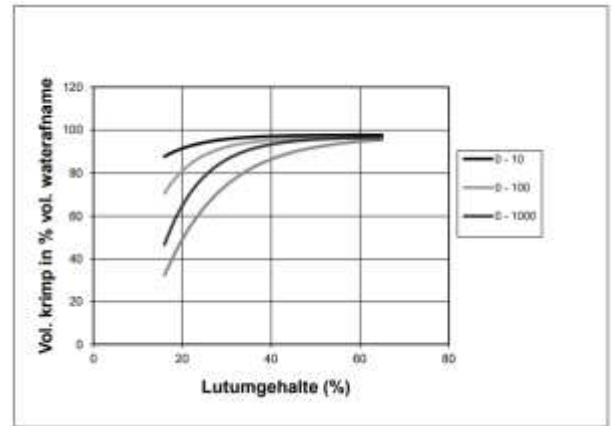
5.4.2 Scheurvorming

Hoe ontstaan scheuren in klei

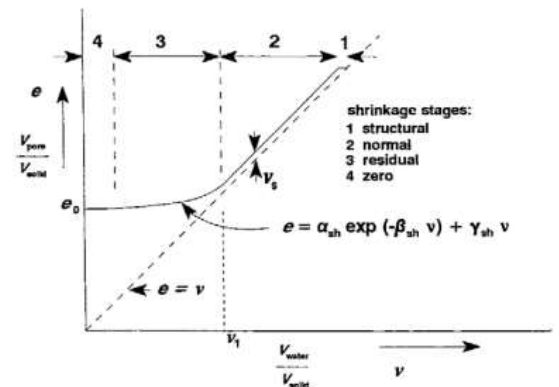
Scheuren ontstaan door het krimpen van klei, dit krimpen komt weer doordat de klei uitdroogt. De krimp van klei is weer te geven in de krimpkarakteristiek. Hierin worden vier krimpfasen onderscheiden (zie figuur 5-11).

1. Structurele krimp. Het vochtgehalte neemt af zonder dat de grond van volume verandert doordat grote poriën zoals wormgangen en scheuren leeg lopen.
2. Normale krimp. Bij deze fase neemt het vochtgehalte en het kleivolume evenveel af en de bodemstructuur blijft volledig verzadigd door de capillaire werking.
3. De restkrimp. In de derde fase komt lucht in de aggregaten waardoor het volume water sneller afneemt dan de volume grond. De volume verandering van de grond kan ervoor zorgen dat trekspanningen in de grond ontstaan, wanneer deze te groot worden zal de grond scheuren.
4. De nul krimp fase. Het vochtgehalte neemt nog verder af zonder verdere volume verkleining van de grond. De hoeveelheid krimp hangt af van de hoeveelheid kleine poriën, de hoeveelheid kleine poriën hangt af van het percentage mineralen in de klei (Van den Akker et al., 2013).

Wanneer de klei veel kleine poriën heeft wordt fase twee groter en neemt de fase van volume verandering recht evenredig met de vochtgehalte verandering toe. Bij een lutum gehalte van 35% blijft bij een waterdruk van 0 tot -1000 mm de volume verandering voor 90% gelijk met de vochtafname. Dit betekent dat pas lucht in de poriën van de klei komt als deze al veel volume verandering heeft ondergaan. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het lutum gehalte een grote invloed heeft op de krimp van de klei.



Figuur 5-10 Krimp t.o.v. lutumgehalte (Van den Akker et al., 2013)



Figuur 5-11 krimpkarakteristiek van klei (Van den Akker et al., 2013)

De invloed van scheuren op de stabiliteit van dijken

Wanneer een grond een aantal cycli van droog en nat worden heeft ondergaan ontstaan scheuren in de grond. Dit heeft verschillende oorzaken. Tijdens de eerste cyclus zullen micro scheuren in de klei ontstaan die zorgen voor een afname van de treksterkte in de klei waardoor grotere scheuren kunnen ontstaan. Dit kan uiteindelijk zorgen voor onomkeerbare schade aan de klei. Dit op zichzelf zorgt ervoor dat een hoge spanning ontstaat in de nog hele klei. De spanning kan op een gegeven moment zo groot worden dat het de limiet van de treksterkte bereikt waardoor de al ontstane scheuren dieper in de grond doordringen (Stirling et al., 2021).

Een korte droogte zorgt voor scheuren waardoor een dijk water verliest maar de instabiliteit wordt niet aangetast. Daarentegen zullen langdurige droogte en meerdere droog-nat cycli ervoor zorgen dat water in de dijk kan infiltreren door scheurvorming, wat ervoor kan zorgen dat de korrelspanning afneemt en daarmee de stabiliteit.

Ook neemt de waterspanning in de scheuren veel toe, deze waterspanning kan interne erosie veroorzaken. Wanneer door droogte het buitenwaterpeil ook snel daalt neemt de waterspanning in de dijk nog meer toe wat de interne erosie versterkt, en deze interne erosie zal weer kunnen leiden tot instabiliteit. Uit metingen is gebleken dat water pas van het talud afstroomt (op de locatie van scheuren) wanneer de scheur is gesloten. Dit betekent dat voor die tijd het water infiltreert in de grond, terwijl op plekken waar geen scheur zat het water op dat moment al afstroomt (Li et al., 2018).

Niet iedere kleigrond scheurt bij dezelfde droogte, het moment van scheuren hangt ook af van de samenstelling van de grond zelf. Slecht verdichte en natte klei zal namelijk snel scheuren. Kleine gelijkmatige scheuren (scheuren minder dan 0,5 meter diep (Ponsteen et al., z.d.)) zullen niet voor een wateroverspanning zorgen maar kunnen wel tot een langzame degradatie van de dijk leiden (zie paragraaf 10.4.1) (Ponsteen et al., z.d.). Wanneer de grond weer vochtig wordt zwellen de scheuren weer gedeeltelijk dicht. Het niet volledig dicht zwellen van de klei scheuren wordt irreversibele krimp genoemd (Van den Akker et al., 2013).

5.4.3 De afbraak van organisch stof

Wanneer geen lucht bij de micro-organismen in de klei kan komen, duurt het lang voordat de organische stoffen afgebroken kunnen worden. Ook de temperatuur heeft invloed op de snelheid waarmee organische stoffen worden afgebroken. Een dynamisch evenwicht ontstaat doordat aan de bovenkant ook weer organische stof aangevoerd kan worden. Door een veranderd klimaat zou dit evenwicht verstoord kunnen worden omdat de gemiddelde temperatuur toeneemt. Hiermee kan dus geconcludeerd worden dat wanneer klei opdroogt en scheurt, de micro-organismen dieper in de klei in contact komen met lucht waardoor de organische stof sneller afgebroken wordt. De afname van organische stof kan ervoor zorgen dat minder water vastgehouden kan worden in de klei waardoor de klei sneller uitdroogt. De organische stof kan hiernaast sterke verbindingen aangaan met gronddeeltjes, wanneer de organische stof minder wordt worden deze verbindingen ook verbroken (Technische Adviescommissie voor Waterkeringen, 1996). Dit betekent dat een toename van de droogte ook zorgt voor een afname van de schuifsterkte doordat de hoeveelheid organische stof afneemt.



Figuur 5-12 Dijk in Delfland met droogtescheuren (Ponsteen et al., z.d.)

5.5 De invloeden van droogte op veen

5.5.1 Scheurvorming in veen

Bij veen is het waterverlies en de krimp hoger dan in kleigronden. De krimp van veen werkt met dezelfde fasen als de krimp van klei (zie paragraaf 5.4.2), het verschil is dat deze fasen op een ander moment optreden (fase 2 duurt bij veen bijvoorbeeld langer). Dit heeft te maken met de verdeling van de fracties⁴ in de grond en de hoeveelheid organische stof. Uit de krimpkarakteristiek blijkt dat bij de uitdroging van verzadigd veen al snel lucht tussen de poriën komt. Omdat eerst de grove poriën worden leeg getrokken is de krimp in dit stadium gering. Bij een veen grond met 80% organisch stof kan veel water aan de grond worden onttrokken zonder dat de grond veel vervormd. (Van den Akker et al., 2013).

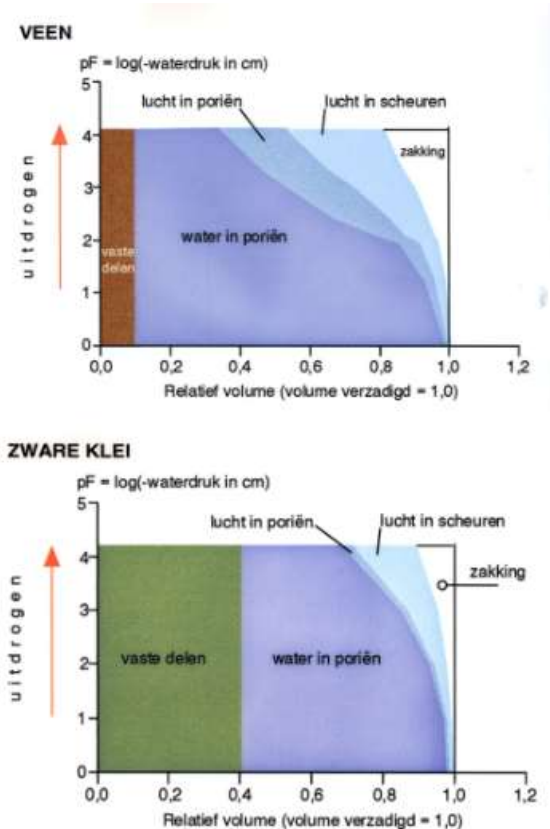
Veen grond droogt niet snel uit omdat veel water tussen de poriën zit. Dit zorgt ervoor dat de grond blijft krimpen en blijft scheuren waardoor het percentage krimp en scheur in veen groter is dan in klei of zand (zie figuur 5-13). Daarnaast herstellen veenlagen trager na een droge zomer. Het duurt langer voordat de onverzadigde zone weer op peil is een de scheuren weer dicht zwellen. Dit kan ervoor zorgen dat de dijk nog niet volledig hersteld is bij de volgende droogteperiode (zie Bijlage I – interview 3).

Als een veenlaag uitdroogt terwijl een belasting op deze laag werkt kan zakking van het maaiveld optreden. Dit ontstaat doordat de poriën met lucht door de belasting dichtgedrukt worden. Door deze belasting worden de scheuren ook dichtgedrukt waardoor deze niet dieper in de dijk kunnen doorgroeien. Zoals verteld neemt de volumieke massa van veen af bij opdroging. Dit komt doordat veen veel water verliest wat weer vervangen wordt door lucht. Doordat veen lichter wordt kan ook geconcludeerd worden dat de kans op scheuren dieper in het veen toeneemt na mate de grond opdroogt. En dit kan vooral een risico opleveren bij groene dijken waarbij weinig boven belasting is. Wat ook kan voorkomen in verband met de gelaagdheid van veen is dat de bovenste laag minder krimp gevoelig is waardoor hier kleine scheuren ontstaan. Als hier onder een krimpgevoelige laag zit kan dit ervoor zorgen dat deze scheur veel groter wordt in die laag.

Het vochtgehalte in een dijk en dus de freatische lijn wordt vooral bepaald door de het weer en de verandering hierin. Daarnaast is de doorlatendheid van het materiaal zelf bepalend voor het ontstaan van de scheuren (Van den Akker et al., 2013).

5.5.2 Gasvorming in veen

Onder invloed van het klimaat kan gas ontstaan in het veen. Dit is de laatste decennia een aantal keer in de praktijk gezien. Tijdens een onderzoek naar de doorbraak van de dijk bij Wilnis zijn gasbubbel waargenomen door middel van een sondering. Gasbubbel werden ontdekt die omhoog kwamen toen water werd weg gepompt tijdens een veldonderzoek op het Markermeer (Muraro & Jommi,

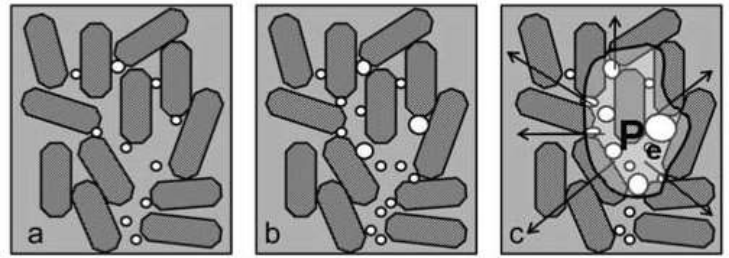


Figuur 5-13 Krimp van klei en veen door uitdroging (Van Asselen et al., 2020)

4

Met fracties wordt de verdeling van de korrelgroottes in de grond bedoeld (Backhausen & van der Stoel, 2014)

2020). Dit gas kan ontstaan bij de afbraak van de organische stof door bacteriën in het veen. Gas zal zich in de poriën bevinden maar kan onder bepaalde omstandigheden uitzetten waardoor een overdruk in het veen ontstaat (figuur 5-14). Dit kan ontstaan wanneer zoveel gas wordt geproduceerd dat het niet meer in de poriën opgeslagen kan worden, wanneer de atmosferische druk afneemt, bij een hoge temperatuur, bij een afname van de grondwaterstand en bij een afname van de spanning in de grond. De gassen die hierbij geproduceerd worden bestaan uit methaan, zwavelstofsulfide en koolstofdioxide (Muraro, 2023).



Figuur 5-14 Gasvorming in veen (Muraro, 2023)

Doordat de gasbubbelen ontstaan bij een lage atmosferische druk en een hoge temperatuur, kan de toename van droogte een voordelig effect hebben op het ontstaan van gasbellen. Wanneer het droger wordt ontstaat een lagedrukgebied en een hoge temperatuur, hierdoor kunnen meer gassen ontstaan waardoor een hogere kans ontstaat op een vermindering van de stabiliteit door gasvorming.

Naast de externe invloeden wordt de invloed van gas ook bepaald door de grondeigenschappen van het veen zelf. Bijvoorbeeld stijvere grondlagen worden veel meer beïnvloed door de aanwezigheid van gas dan een meer flexibelere grondlaag. Dit omdat wanneer gas ontstaat in een flexibele laag deze laag zal mee bewegen en ontstaat dus minder snel overspanning. Dus in een slappere grondlaag zoals veen, moet veel meer gas ontstaan voordat de korrelspanning afneemt (Muraro & Jommi, 2020). Bij veen zou gas ook kunnen zorgen dat de grond lichter wordt doordat het de vloeistof tussen de korrels weg drukt.

5.5.3 De afbraak van organische stof

Langdurige droogte kan leiden tot de afbraak van organische stof (zie paragraaf 5.4.3). Wanneer door bijvoorbeeld scheuren lucht bij de organische stof komt worden dit snel afgebroken door bacteriën. Dit leidt tot volumeverlies, gewichtsverlies en tot afname van de sterkte van het veen. Dit komt door een afname van de samenhang van het veen (Bottema et al., 2019).

5.5.4 Afname van het gewicht

De afname van het gewicht van een dijk door verdroging heeft twee effecten:

- Gewicht van de grondmoot kan afnemen als het vochtgehalte afneemt. Wanneer dit wordt vergeleken met de stabiliteitsberekeningen van dijken kan dit kan leiden tot een positief of negatief effect op de stabiliteit afhankelijk van kade. Als het gewicht van de aandrijvende grondmoot afneemt heeft dit een positief effect op de stabiliteit van een kering. Wanneer het gewicht afneemt en het tegenwerkende moment verminderd, heeft dit een negatief effect op de stabiliteit van een kering.
- Bij een horizontale afschuiving is de gewichtsafname van het gehele dijklichaam belangrijk en kan dat de stabiliteit doen afnemen (zoals bij Wilnis). Hiervoor is de aanwezigheid van een watervoerende laag met een hoge waterspanning met daarboven een licht dijklichaam (veen of organische klei gronden). Hierdoor kan de lichte grond gaan opdrijven, wat ervoor kan zorgen dat de dijk afschuift (zie Bijlage I – interview 3).

Het opdrijven van een veenlaag kan onder andere als kortsluiting optreedt. Dit kan ontstaan wanneer het buiten water in contact komt met de watervoerende laag onder de dijk waardoor hier een hoge waterspanning kan ontstaan. Wanneer een dijk ook lichter is geworden kan dit leiden tot macro-instabiliteit (zie Bijlage I – interview 1).

5.6 Verschillen tussen klei en veen

5.6.1 Scheurvorming

Een van de grootste verschillen tussen klei en veen is de grondsamenstelling en de structuur. Een dijkprofiel met klei heeft een homogener grondopbouw in vergelijking met het veen. Klei heeft daardoor een relatief homogene bodem opbouw waardoor de bodemeigenschappen constant zijn. Verschillen in scheurbreedte zullen daardoor komen door verschillen in vochtgehalte en de geometriefactor. Het vochtgehalte bepaalt de trekspanning in de grond en dus het ontstaan van scheuren en het gewicht van de klei zorgt ervoor dat de grond tegen elkaar wordt gedrukt waardoor dieper in de grond geen scheuren ontstaan. De gelaagdheid van het veen zorgt voor verschillende trends in scheuren, het kan dus voorkomen dat de bovenste veen laag weinig tot geen scheuren vertoont en de lagen daaronder meer. Daarnaast wordt in de praktijk waargenomen dat de gevaarlijkste scheuren het vaakst bij veen voorkomen. De kleine scheurtjes in de klei zijn meestal niet breed of diep genoeg om te kunnen zorgen voor een wateroverspanning (zie bijlage I – interview 1).

Verschillende oorzaken zullen in de toekomst kunnen zorgen dat meer en diepere scheuren in klei en veen ontstaan. Deze oorzaken hebben allemaal meer invloed op veen omdat deze grondsoort het gevoeligst is voor scheurvorming. Des al niet te min kunnen door deze oorzaken ook scheuren ontstaan in klei. Hieronder staan een aantal oorzaken voor het ontstaan van scheuren in klei en veen:

- Een extreem lange en extreem droge periode.
- Het freatische vlak in de kade wordt verlaagd.
- Een toename van de bewortelingsdiepte van begroeiing.
- Aanvoer van water vanuit de boezem vermindert.

5.6.2 Doorlatendheid

De doorlatendheid van een dijk heeft invloed op de stabiliteit. Wanneer een grondsoort een hoge doorlatendheid heeft kan dit ervoor zorgen dat meer water infiltreert vanuit de boezem of door neerslag. Hierdoor neemt de waterspanning in de dijk toe waardoor de korrelspanning in de dijk weer afneemt. Hierdoor neemt de weerstand tegen afschuiven af.

In figuur 5-15 is te zien dat de doorlatendheid van de klei sterk afhangt van de samenstelling van de grond. Zo heeft sterk gescheurd klei een doorlatendheid van 10 tot 100 meter per etmaal. Gemiddeld heeft klei een lage tot zeer lage doorlatendheid van 0,05 tot 0,005 m/etmaal.

<i>grondsoort</i>	<i>door- latendheid [m/etmaal]</i>	<i>kwalificatie door- latendheid *)</i>
<i>klei:</i>		
sterk gescheurd (zuiderzeepolders)	10-100	zeer goed
enige poriën of scheuren	0,5 - 2	goed
zeer dicht (komklei, slechte laag)	0,005 - 0,05	slecht tot zeer slecht
zeer dicht (keileem, zandige klei)	0,05	slecht
zeer dicht (knipklei, potklei)	<0,005	zeer slecht
slap, ongerijpt (zwarte klei)	10^{-4} - 10^{-5}	zeer slecht
ongერიpt, samengeperst	10^{-6}	zeer slecht
lichte zavel, gerijpt	0,02 - 0,2	slecht tot matig

Figuur 5-15 De doorlatendheid van klei (joostdevree, 2023)

In veengrond bestaan grote verschillen in de doorlatendheid. Dit hangt af van de samenstelling van de grond. Veen met een grote fractie zand heeft bijvoorbeeld een grotere doorlatendheid dan veen met een grote klei fractie. Gemiddeld heeft veen een lage doorlatendheid van 0,01 m/etmaal. Dit betekent dat veen en klei allebei sterk kunnen verschillen in doorlatendheid (joostdevree, 2023).

<i>veen:</i>		
zandige leem	0,3	matig
ongerijpt	0,01	slecht
kleiige veen	0,005	zeer slecht

Figuur 5-16 De doorlatendheid van veen (joostdevree, 2023)

5.7 De invloed van droogte op droogte gevoelige dijklichamen

5.7.1 Vegetatie

Uitdroging van de bodem kan onder andere veroorzaakt worden door verschillende proces die te maken hebben met vegetatie. Dit heeft vooral te maken met soort vegetatie, vegetatiegraad⁵ en doorworteling. Een goed en diep doorwortelde bodem maakt dat de grasmat van de dijk goed beschermd is tegen erosie. Maar een goede en diepe doorworteling zorgt daarentegen voor een snellere uitdroging van de dijk en meer kans op scheurvorming omdat dieper in de dijk ook water wordt onttrokken. Dijken met hoge vegetatie hebben meer verdamping dan dijken met lage vegetatie. Bovendien maken bomen de grond doorlatend en zorgen ze voor scheuren. Wanneer de grasmat erodeert kan dit leiden tot micro instabiliteit (CIRIA, French Ministry of Ecology, USACE, 2013).

Bij de krimp van veen kan het gebeuren dat de wortels van de vegetatie ook kapot gaan. Dit kan ook leiden tot een afname van de grondsterkte en daarmee de stabiliteit. Daarnaast kan door de kapotte wortels en het afsterven van de vegetatie erosie ontstaan aan de dijkbekleding.

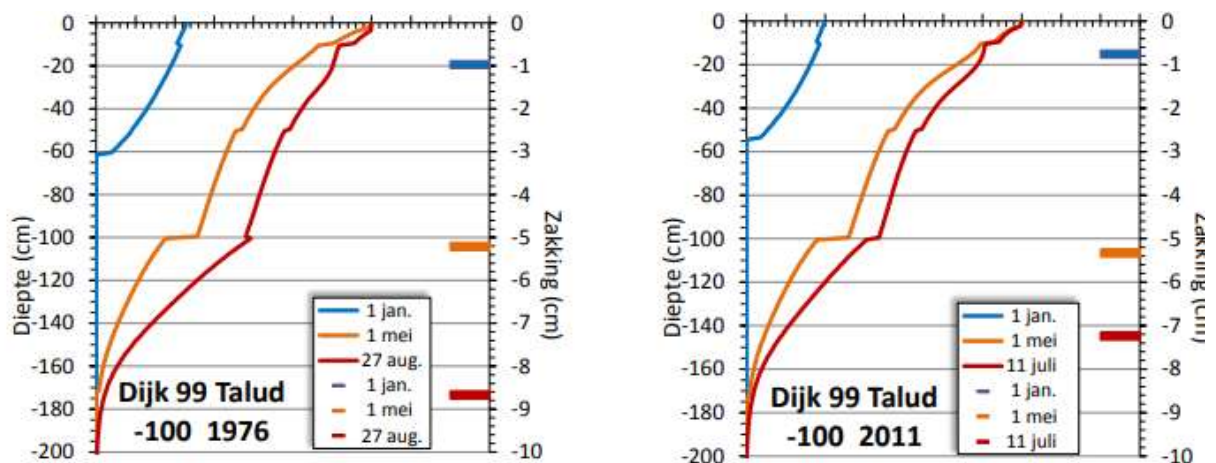
Lange vegetatie kan naast plantverdamping ook leiden tot meer schaduw en daarmee minder verdamping op de grond. Een duidelijk antwoord is nog niet op de vraag welke van de twee soorten verdamping zorgen voor de meeste verdroging van de dijk. Op dit moment worden onderzoeken uitgevoerd naar deze vraag (zie Bijlage I – interview 1) (Technische Adviescommissie voor Waterkeringen, 1996).

5.7.2 Diepte indringing invloed van droogte

Tot hoever dringen de scheuren door in de dijk

In veen zullen over het algemeen meer en diepere scheuren ontstaan (zie paragraaf 5.6), maar onder de goede omstandigheden kunnen scheuren in beide grond typen ver doordringen in de dijk. In het onderzoek: “gedrag van verdroogde kades” worden een aantal kades gemonitord op scheuren tijdens de zomer van 2011. De dijken die in 2011 hiervoor gemonitord waren zijn:

- Locatie 98, de duifpolder
- Locatie 99, de polder in Schieveen



Figuur 5-17 Diepe droogte scheuren in dijk 99 (Van den Akker et al., 2013)

⁵ Dit is het percentage grondoppervlak bedekt met vegetatie.

Door de extreme diepe scheuren tegen elkaar uit te zetten is te zien hoe ver deze in de grond door dringen. Wat opvalt in figuur 5-17 is dat de scheuren tot 1 meter 70 diep reiken. Ook is bijna hetzelfde scheuren patroon in 1976 te zien als in 2011. Hieruit kan een gemiddelde scheurdiepte van 81 cm worden gehaald. In de boorprofielen van de dijken is te zien dat dijk 99 vooral kleiig is. Dijk 98 bestaat uit klei en veen. Wanneer de scheurdieptes met elkaar vergeleken worden is geen duidelijk patroon te zien tussen de grondsoorten en de scheurdieptes. Verder is ongeveer 7 cm zakking opgetreden in de zomer, dit kan deels reversibel zijn. Wanneer de klei weer opzwellt bij neerslag kan het zijn dat de scheuren weer dichtgedrukt worden (Van den Akker et al., 2013).

In landen waar een warmer klimaat heerst zijn nog diepere scheuren gevonden. Een voorbeeld hiervan is een scheur in Frankrijk met een diepte van 3 meter. In Texas zijn scheuren van 2,7 meter diep gevonden (Bottema et al., 2019).

Door de scheuren kan water in de grond infiltreren en kan het water verdampen uit dieptes waar dit normaal niet zou kunnen. Maar wanneer de zuigspanning afneemt door een grotere doorlatendheid neemt de trekspanning ook af. Dit in combinatie met een toename van het gewicht van de grond op grotere diepte zorgt ervoor dat de scheuren niet verder vormen in de grond. Hierdoor ontstaat een “deformatie front”. Na dit front, dus de maximale diepte van de scheuren, zal de dijk niet verder uitdrogen (Stirling et al., 2021).

Invloed van een veranderend peil

Het waterpeil in de boezems van een polder worden kunstmatig gereguleerd door gemalen. Dit zorgt ervoor dat het waterpeil in een boezem niet veel veranderd. Maar wanneer sprake is van langdurige droogte in de zomer kan het water zo laag komen te staan dat de gemalen geen water meer in de boezems kunnen pompen. Hierdoor kan de waterstand in de boezems laag komen te staan waardoor de freatische lijn ook zakt in de dijk. Een lage freatische lijn kan zorgen voor een grotere kans op scheuren in de dijk (Strijker, z.d.). In tegenstelling hierop kan beredeneerd worden dat een hoge stroomsnelheid van het grondwater kan leiden tot wateroverspanning in de dijk wat kan leiden tot instabiliteit (zie Bijlage I – interview 2).

De wet van Bernoulli

$$\frac{v^2}{2g} + h + \frac{p}{\rho g} = H$$

v = de snelheid [m/s]

g = de valversnelling [m/s²]

h = het hoogteverschil [m]

P = de druk [Pa]

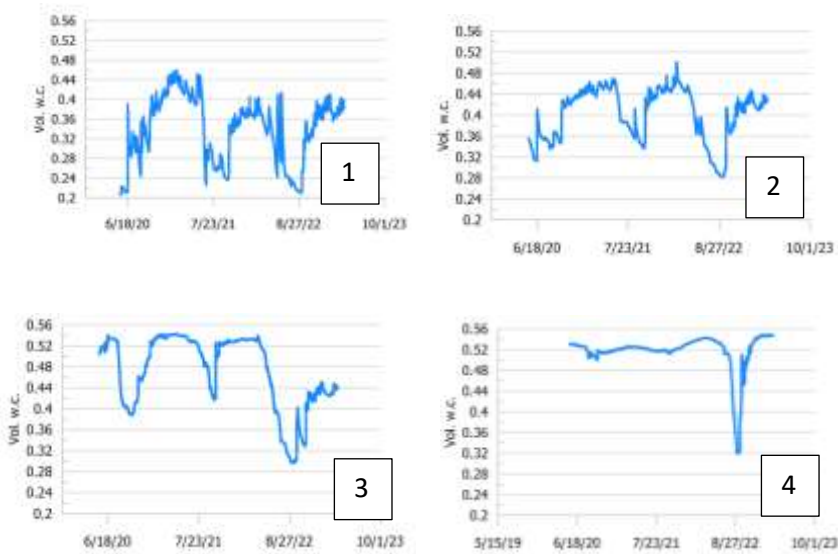
ρ = de dichtheid [kg/m³]

formule 5

Deze formule beschrijft de stijghoogte (totale energie niveau H), welke wordt beïnvloed door de plaats hoogte + de drukhoogte $h+p/(\rho \cdot g)$ en door de het snelheidscomponent (TB241E - Fysische Transportverschijnselen, z.d.). Dit snelheidscomponent wordt verwaarloosd bij grondwater omdat dit zo langzaam stroomt. De vraag is dus of grondwater ooit zo snel kan stromen dat dit een relevante invloed gaat hebben op de stijghoogte. Om deze vraag te beantwoorden zou de hoogst mogelijke stroomsnelheid in dijken bepaald moeten worden, dit valt buiten de scope van dit onderzoek dus hier wordt verder geen onderzoek naar gedaan (zie bijlage I – interview 3).

Met de metingen uit het onderzoek “Droogtemonitoring” kan bepaald worden tot hoever in de dijk droogte invloed heeft. In afbeelding 5-19 is te zien dat de droogte van 2022 tot diep in de dijk nog invloed heeft gehad omdat de laagste vochtmeter ook droogte meet (voor de locaties van de vochtmeters in de dijk zie bijlage II). Door de droogte in de zomers van 2022 en 2020 te vergelijken kan een verschil worden gevonden. Het neerslagtekort in 2022 was namelijk hoger (zie figuur 5-20). De maximum in temperatuur in 2022 (zie figuur 5-18) lijkt weinig te verschillen met de maximum

temperatuur van 2020. Het verschil komt dus doordat weinig neerslag viel en veel verdamping was. In 2022 werd het ook steeds droger terwijl het in 2020 nog een paar keer regende tijdens de droogteperiode. Dit zorgde ervoor dat de grond in 2022 steeds verder kon uitdrogen en dit te merken was op veel diepere lagen (Strijker, z.d.). Ook is in figuur 5-21 is te zien dat meer verdamping in 2022 was in vergelijking met de verdamping van 2020. (*Dagwaarden van weerstations, z.d.*).

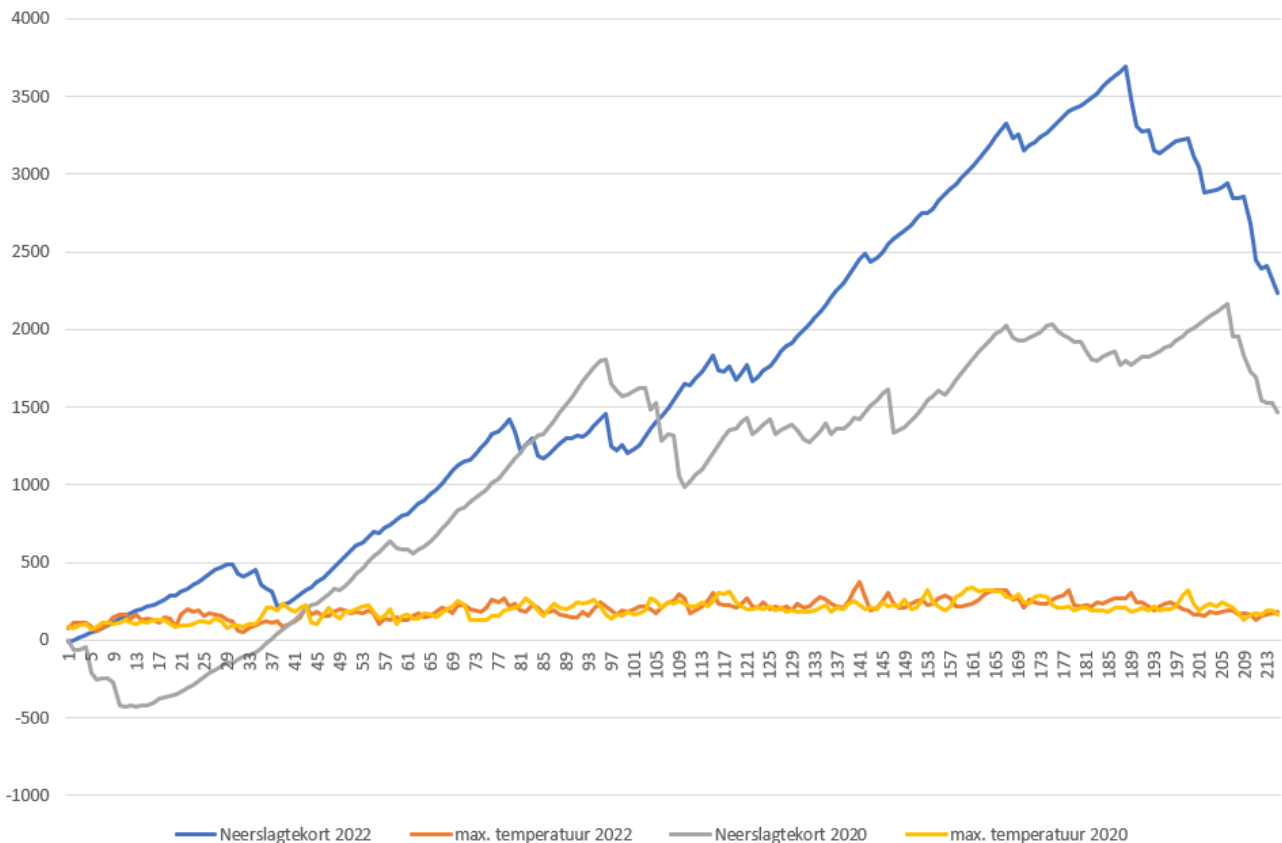


Figuur 5-19 Vochtsensoren. 1= bovenste sensor, 2= tweede sensor, 3= derde sensor, 4= onderste sensor (Strijker, z.d.)

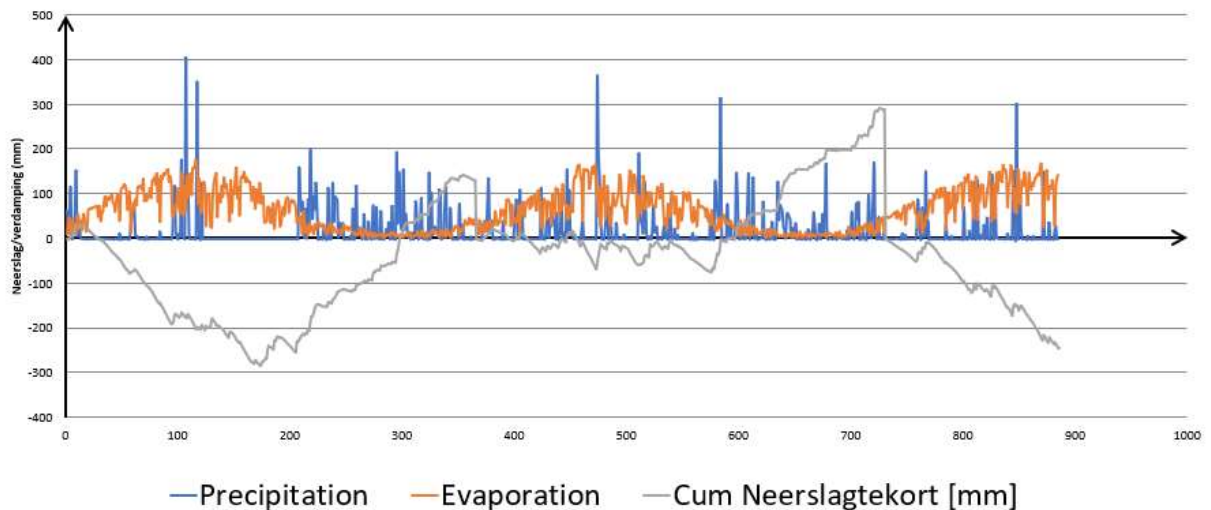


Figuur 5-18 Max. temperatuur 2020 vs 2022 (eigen werk)

Neerslag te kort 2020 vs 2022



Figuur 5-205-20 Neerslagtekort 2020 vs 2022



Figuur 5-21 Neerslag/verdamping (de Wolf)

5.7.3 Verdroging afhankelijk van de geometrie van de dijk

De geometrie van een dijk heeft invloed op de freatische lijn in een dijk. Over het algemeen hebben dijken met een flauwer talud meer grondwaterstroming door de dijk stromen. Bij een steiler talud zal het water sneller afstromen (Strijker, z.d.). Bij steilere dijken kan ook meer grondwaterstroming door de dijk voorkomen. Dit komt doordat het water in de dijk een kortere afstand moet afleggen door de dijk heen. Deze hogere grondwaterstroming zorgt ook voor dat het grondwater beter aangevuld wordt en dat minder fluctuatie is in de freatische lijn (zie Bijlage I – interview 3).

5.7.4 Positieve invloeden van droogte op dijken

De invloed van droogte op dijken kan ook positief werken voor de stabiliteit. Dit kan komen doordat de grondwaterstand afneemt bij droogte wat ervoor kan zorgen dat de waterspanning in een dijk afneemt en de korrelspanning toeneemt. Ook kan een lager grondwaterstand ervoor zorgen dat een zuigspanning ontstaat en de grond een schijnbare cohesie⁶ krijgt wordt (Stirling et al., 2021)). Dit kan uiteindelijk ook voor zorgen dat de stabiliteit van de dijk toeneemt.

Bij sonderingen in een dijk in Waterschap Rivierenland bleek dat de bovenste laag van een dijk zo hard dat doorheen boren met de hand niet mogelijk was. Het gevolg hiervan zou kunnen zijn dat de dijk stabiel is geworden, maar dit moet nog verder onderzocht worden. Het Waterschap denkt dat de dijk zo hard is geworden door de droogte die voor het sonderen plaats had gevonden, ook hier zal meer onderzoek naar gedaan moeten worden (zie Bijlage I – interview 2).

5.7.5 Bijdrage toplaag aan de stabiliteit

Door droogte kan het vochtgehalte afnemen in de toplaag wat effect kan hebben op de volumieke massa van de grond. Scheurvorming kan zorgen voor een afname van de stabiliteit door een toename van de waterspanning wanneer water hierin infiltreert. Het belang van de toplaag is dat het geen water doorlaat. Hierdoor is het belangrijk om te weten tot hoe diep in de toplaag droogte invloed heeft om de minimale dikte te kunnen ontwerpen (zie Bijlage I – interview 2). De toplaag heeft een kleine bijdrage aan het falen van de kering omdat het glijvlak maar voor een relatief kort gedeelte door de toplaag heen gaat. Het draagt dus weinig bij aan de schuifweerstand van een dijk. Hierdoor

⁶ De grond krijgt extra sterkte doordat capillaire krachten ontstaan bij niet verzadigde gronden (Aquo, 2011)

kan geconcludeerd worden dat de sterkte van de toplaag weinig invloed heeft op de stabiliteit van een kering. Wel heeft het invloed op de hoogte van de freatische lijn. Hierdoor kan de doorlatendheid van de toplaag wel invloed hebben op de stabiliteit van een kering (zie Bijlage 1 – Interview 3).

Ook kan een dikkere kleilaag ervoor zorgen dat vegetatie minder makkelijk water uit de kern kan onttrekken. Bovendien kan een dikkere toplaag zorgen voor meer gewicht bij een lichte dijk (veen) wat ook positief bijdraagt aan een weerstand tegen afschuiven. Tegelijkertijd kan een nieuwe toplaag voor meer zetting zorgen (zie Bijlage I – interview 1).

5.8 De invloed van het klimaat op de grondeigenschappen

In deze paragraaf worden de invloeden van droogte gekoppeld aan de grondeigenschappen, zoals is behandeld in hoofdstuk 4. Hier worden alleen de parameters behandeld van de associatieve formule van Mohr-Coulomb, omdat deze formule gebruikt wordt in de berekeningen.

Hoek van inwendige wrijving

Wanneer een grondmonster steeds meer belast wordt zal deze onder een bepaalde hoek scheuren, dit is de hoek van inwendige wrijving. Wanneer door droogte scheuren en kluiten kunnen ontstaan in de grond zal deze hoek af kunnen nemen waardoor de schuifweerstand minder wordt (Van den Akker et al., 2013).

Korrelspanning

De korrelspanning (σ') wordt bepaald door de volumieke massa van de grond, de volumieke massa van het water, de dikte van de beschouwde grondlaag en de afstand tussen de grondwaterstand en het beschouwde punt in de grond. Wanneer minder water in de grond zit, zal de korrelspanning groter worden. Droogte zou dus door verdamping een positief effect kunnen hebben op de korrelspanning.

Droogte kan ook scheuren in de dijk veroorzaken. Wanneer deze scheuren groot genoeg zijn en een hevige bui valt kan in de scheur wateroverspanning ontstaan (zie paragraaf 5.4.2). Deze wateroverspanning kan ervoor zorgen dat de dijk instabiel wordt, dus droogte kan ook een negatief effect hebben op de korrelspanning.

Cohesie

Met de cohesie wordt de aantrekkingskracht tussen de gronddeeltjes bedoeld. De cohesie is dus een sterkte eigenschap van de grond zelf. Tijdens over consolidatie van de grond zal cohesie plaats vinden. Dit treedt dus alleen op bij een ongedraineerde grondsoort die al belast is. Door scheurvorming door droogte ontstaat een structuur⁷ in de grond. Dit kan zorgen voor een afname van de cohesie omdat de korrels hierbij verder uit elkaar staan.

Hiernaast zou de cohesie ook kunnen toenemen door een afname van het water in de grond. Dit kan komen door het leegraken van de poriën door verdamping. Deze poriën kunnen weer dichter naar elkaar toe gedrukt worden (Van den Akker et al., 2013). Een voorwaarde is dat een belasting op het grondlichaam werkt. De cohesie tussen de grondkorrels kan ook afnemen door een afname van de organische stof in de grond (zie paragraaf 5.4.3).

⁷ Het ontstaan van onregelmatigheden in de grond zoals scheurtjes, brokken en wormgangen (Technische Adviescommissie voor Waterkeringen, 1996).

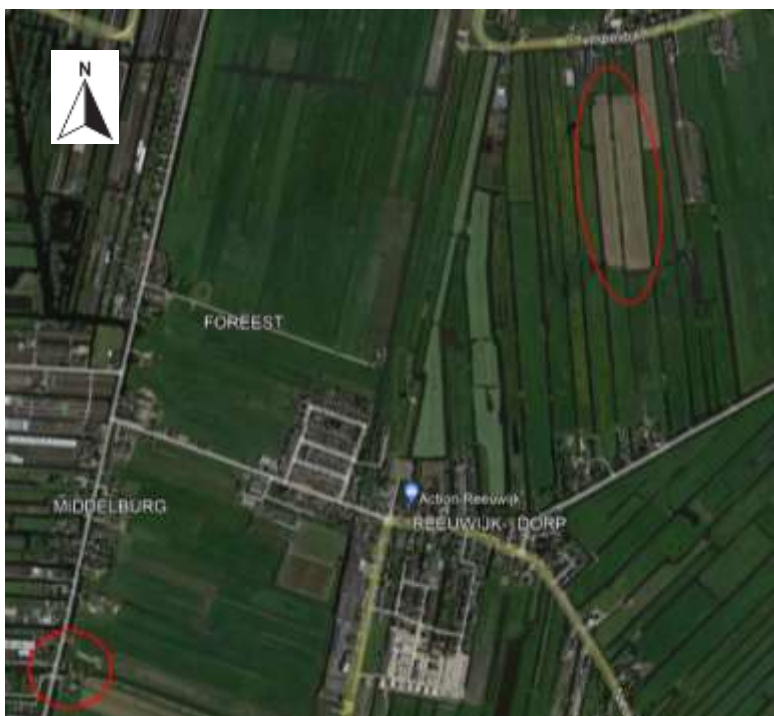
5.9 Casestudie: MT-polder

De proeven en berekeningen zijn uitgevoerd op grondmonsters en de geometrie van de MT-polder. Van deze dijk zijn al een aantal gegevens verzameld om deze te classificeren.

De dijk waar de grondmonsters zijn verzameld voor de experimenten en waarvan de geometrie wordt aangehouden in de berekeningen ligt in de Middelburg en Tempel polder (MT-polder). De MT-polder is gelegen tussen de plaatsen Boskoop, Bodevragen, Reeuwijk, Gouda en Waddinxveen. De dijk in Reeuwijk die in 2021 is doorgebroken (zie paragraaf 5.3.2) ligt hier 1,5 km vandaan (zie afbeelding 5-23). Omdat de dijk uit veen en kleilagen bestaat (zie paragraaf 6.2) wordt deze aangemerkt als een droogtegevoelige dijk (zie interviews bijlage I).



Figuur 5-22 Locatie dijk uit deze casestudie (De Wolf, 2022)



Figuur 5-23 Dijk uit deze casestudie (links) en in 2021 afgeschoven dijk (rechts) (De Wolf, 2022)

5.10 Uitgangspunten proeven

5.10.1 Doel van de proeven

Het doel van de proeven is het valideren van de gevonden informatie uit de literatuurstudie en het verzamelen van gegevens voor de berekeningen. Met behulp van de Hyprop proef wordt bepaald hoe de zuigspanning zich in de grond ontwikkelt en wat de doorlatendheid van de grond is. Met behulp van de resultaten hiervan wordt een verband gelegd met de informatie uit de literatuur. Met de Atterberg limits wordt de grondsoort van de grondmonsters bepaald. Hiermee kan later de juiste parameters gebruikt worden in de berekeningen voor dit specifieke grondsoort. Met de Direct Shear kunnen de schuifsterkteparameters van de dit specifieke grondsoort bepaald worden welke gebruikt kan worden in de berekeningen.

5.10.2 De grondmonsters

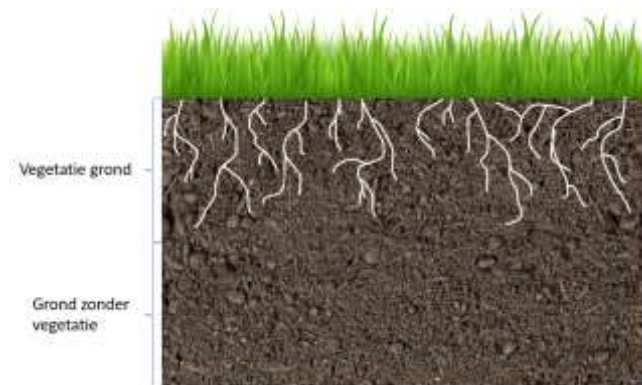
Voor de proeven zijn twee soorten grondmonsters verzameld: grond met vegetatie (vegetated soil) en grond zonder vegetatie (bare soil) (zie figuren 5-24 en 5-25). De grond met vegetatie is direct vanaf de bovenkant van de dijk verzameld en de grond zonder vegetatie ongeveer 20 centimeter onder het maaiveld (zie figuur ...). Dit verschil in grondsoorten is gemaakt om het verschil in eigenschappen tussen deze twee lagen te bepalen en om uiteindelijk te kunnen berekenen of dit verschil in eigenschappen invloed heeft op de stabiliteit van een dijk. Hiernaast kan met de grond met vegetatie bepaald worden wat de doorlatendheid van de bovenkant van de dijk is.



Figuur 5-24 Grond met vegetatie (vegetated soil) (eigen werk)



Figuur 5-25 Grond zonder vegetatie (bare soil) (eigen werk)



Figuur 5-26 Opbouw verzamelde grondmonsters (eigen werk)

5.11 Uitwerking van de proeven

5.11.1 De Atterberg limits

De Atterberg Limits van de grond zijn de Liquid limit en de Plastic limit, hiermee wordt het gedrag van de grond bij verschillende watergehaltes bepaald. Door te bepalen bij welk watergehalte de grond vloeibaar wordt (Liquid limit) en bij welke watergehalte de grond plastisch is (plastic limit), kan de grond geïdentificeerd en geclassificeerd worden. Ook kan hierdoor gesteld worden in welke sterkte klasse de grond valt (MD Sahadat Hossain et al., 2021).

De Atterberg Limits van de grond uit te MT-polder zijn bepaald om deze grond te kunnen classificeren. Deze classificatie wordt gebruikt in hoofdstuk 6 om de juiste parameters te hangen aan de grondsoorten tijdens het maken van de berekeningen. In Bijlage III zijn de uitkomsten van deze proef te vinden. Voor de proevenreeks zijn grondmonsters met en zonder vegetatie gebruikt. Voor beide grondmonsters zijn verschillende limieten bepaald.

Liquid limit

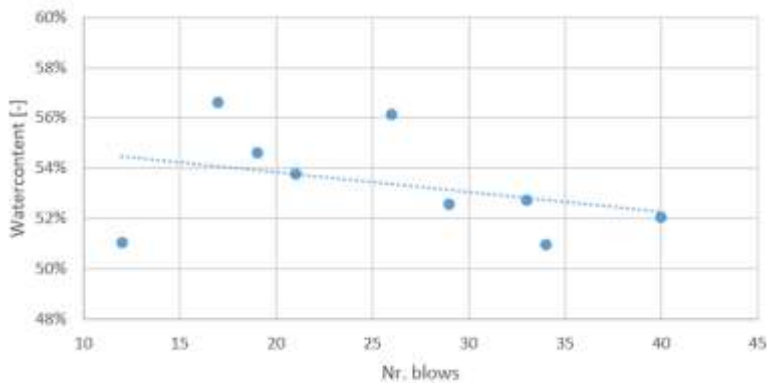
De liquid limit is de grens waarbij een grondsoort vloeibaar is. Dit wordt bepaald door ongeveer 10 gram grond in een bakje (Casagrande apparaat) te doen. In dit bakje wordt een sleuf getrokken (zie figuur 5-27). Door het bakje tegen een oppervlak te laten tikken wordt de liquid limit geformuleerd als het watergehalte waarbij 25 slagen nodig zijn om de sleuf dicht te laten vloeien (zie bijlage III) (Kaerts, 2012).

Na het uitvoeren van de proef zijn met de gevonden gegevens twee grafieken gemaakt (zie figuren 5-28 en 5-29).



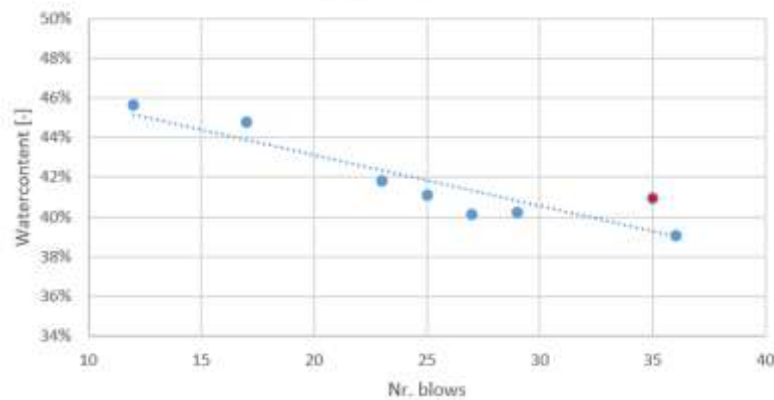
Figuur 5-27 Bepaling liquid limit

LL Veg soil



Figuur 5-28 Liquid limit grond met vegetatie (vegetated soil)

LL Bare soil



Figuur 5-29 Liquid limit grond zonder vegetatie (bare soil)

De stippen zijn de gemeten waarden. Hierin komt naar voren dat de grond met vegetatie en minder eenduidig patroon laat zien. Dit kan verklaard worden doordat deze grond dichter bij het maaiveld verzameld is waardoor deze grond minder homogeen is.

Liquid limit grond met vegetatie: 53,5 %

Liquid limit grond zonder vegetatie: 41,9 %

Plastic limit

De plastic limit bepaalt het moment waarop de grond overgaat van vast naar plastisch. Het punt waarop de grond kan vervormen zonder dat het afbrokkelt (Kaerts, 2012).

De plastic limit is voor 4 grondmonster bepaald, namelijk: twee met vegetatie en twee zonder vegetatie (zie figuur 5-30). Het watergehalte waarbij het materiaal scheurt is de plastic limit (zie bijlage III).

Wat hierbij opvalt is dat het watergehalte van de eerste twee grondsoorten zonder vegetatie ver uit elkaar ligt. Dit kan komen door een fout in het uitvoeren van de proeven. De proeven zijn daarnaast subjectief als het gaat om het bepalen wanneer een grondmonster scheurt. De proef wordt toch gebruikt omdat dit door veel onderzoekers en landen wordt gebruikt om de grond te classificeren. Daarnaast bestaan grote databases van deze gegevens en is het makkelijk om het grondmonster hiermee te vergelijken.

Plastic limit	
Test id	
	w
	(-)
Bare soil PL-1	19,69%
Bare soil PL-2	27,92%
Veg soil PL-1	45,00%
Veg soil PL-2	43,85%
Bare soil PL-3	27,20%
Bare soil PL-4	28,17%

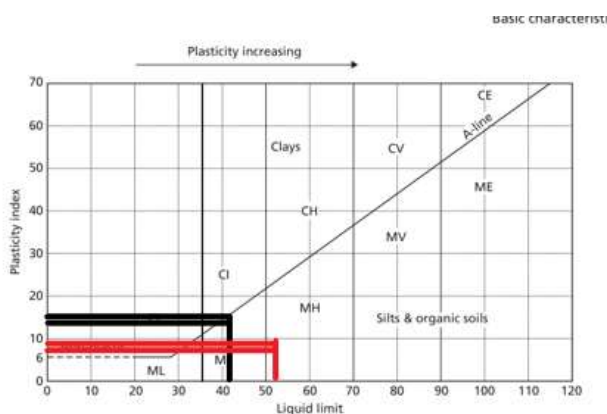
Figuur 5-30 Resultaten plastic limit

Om deze fout uit de proef te halen is de plastic limit nog een keer bepaald voor de grond zonder vegetatie (zie Bare soil PL-3 en Bare soil PL-4 figuur 5-30). Deze waarden lagen dicht bij de waarde van de tweede plastic limit voor de grond zonder vegetatie. Hierom is geconcludeerd om verder te gaan met het resultaat van de tweede plastic limit voor de grond zonder vegetatie.

Grond classificatie

Met behulp van de grafiek in figuur 5-31 kan afgelezen worden wat de classificering is van een bepaald grondmonster. In deze grafiek is de Liquid limit uitgezet tegen de Plasticity index. Om de grondsoort van de twee grondmonsters uit de MT-polder te bepalen wordt eerst de plasticity index bepaald door de Plastic Limit te verminderen met Liquid Limit (zie figuur 5-33).

Met behulp van de eerder bepaalde Liquid limit kan in de grafiek afgelezen worden wat de grondsoorten zijn van de grondmonsters. Te concluderen valt dat beide grondmonsters in de classificering "klei" vallen.



Figuur 5-31 Grondsoort classificatie, zwart grond zonder vegetatie, rood grond met vegetatie (eigen werk)

Met een tabel waarin de omschrijving van de grondsoorten staat (zie figuur 5-32) zijn de volgende grondsoorten bepaald worden:

De grondsoort met vegetatie:
De grondsoort zonder vegetatie:

siltige klei die erg plastisch is
siltige klei die gemiddeld plastisch is

Main terms	Qualifying terms		
GRAVEL	G	Well graded	W
SAND	S	Poorly graded	P
		Uniform	Pu
		Gap graded	Pg
FINE SOIL, FINES	F	Of low plasticity ($w_L < 35$)	L
SILT (M-SOIL)	M	Of intermediate plasticity ($w_L 35-50$)	I
CLAY	C	Of high plasticity ($w_L 50-70$)	H
		Of very high plasticity ($w_L 70-90$)	V
		Of extremely high plasticity ($w_L > 90$)	E
		Of upper plasticity range ($w_L > 35$)	U
		Organic (may be a suffix to any group)	O
PEAT	Pt		

Figuur 5-32 Omschrijving grondsoorten (Kaerts, 2012)

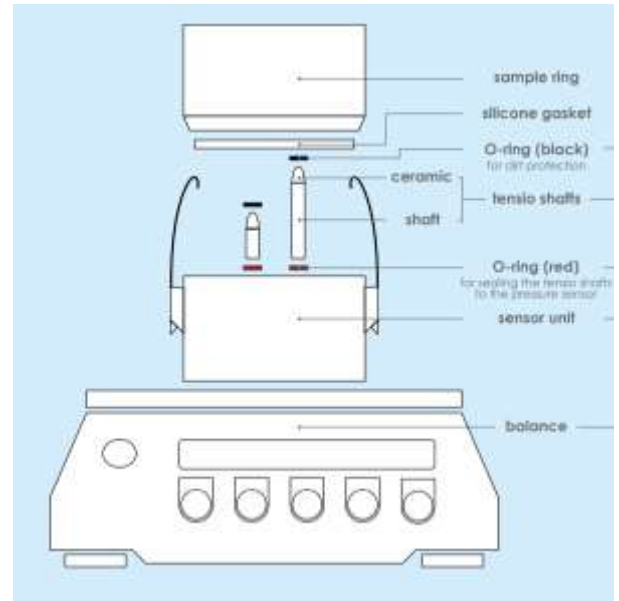
Soil classification	$I_p (=LL-PL)$	classification	
Bare soil PL-1	13,98	MI	Silt, intermediate plasticity
Bare soil PL-2	14,7	MI	Silt, intermediate plasticity
Veg soil PL-1	8,5	MH	Silt, High plasticity
Veg soil PL-2	9,65	MH	Silt, High plasticity

Figuur 5-33 Resultaten classificering van de grondsoorten van de grondmonsters

5.11.2 De Hyprop proef

De Hyprop proef kan gebruikt worden om de waterretentie en de doorlatendheid van verschillende grondmonsters te bepalen. Dit wordt gedaan door de waterspanning in het grondmonster te meten terwijl de grond aan de lucht droogt. Tegelijkertijd wordt het gewicht van het monster gemeten om het watergehalte te bepalen (zie figuur 5-34).

In deze proef zijn twee grondmonsters beproefd: één test voor grond met vegetatie en één test voor grond zonder vegetatie. Hierdoor kan het verschil tussen de grondsoorten bepaald worden. De snelheid waarmee het water uit de grond verdampt is gemeten, hoeveel water moet verdampen om een bepaalde waterspanning te krijgen, wat het verschil is in de toename van zuigspanning tussen de twee grondmonster en hoe snel het gewicht van het grondmonster afneemt bij verdamping. Als laatste is het verschil in doorlatendheid bepaald tussen de twee uitdrogingsfasen (UMS, z.d.).



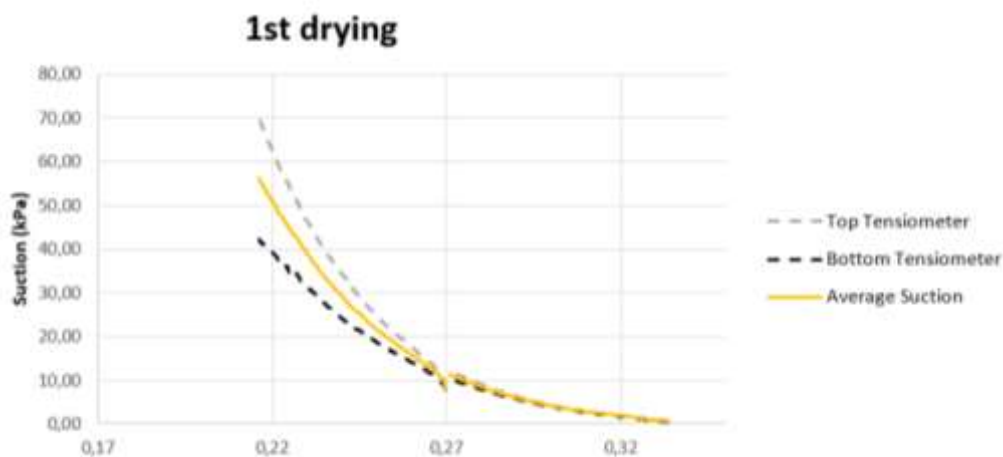
Figuur 5-34 Opstelling Hyprop (Operation Manual Hyprop, z.d.)

Beide grondmonsters ondergaan twee uitdrogingsfasen waartussen de grond handmatig nat wordt gemaakt:

- Uitdrogingsfase 1: de grond bevat op het begin een watergehalte zoals aanwezig in de dijk en droogt uit tot ongeveer 70/80 kPa.
- Nat maken: de grondmonsters worden handmatig opnieuw nat gemaakt tot ongeveer 80% van zijn oorspronkelijke watergehalte (voor de eerste uitdroging).
- Uitdrogingsfase 2: de grond ondergaat een tweede uitdrogingsfase tot dat cavitatie plaatsvindt (zie verloop proef in bijlage IV).

Grond zonder vegetatie

In de onderstaande figuur (figuur 5-35) is de zuigspanning uitgezet tegen het watergehalte⁸ tijdens de eerste periode van het drogen van de grond zonder vegetatie. Hoe meer water verdampt hoe hoger

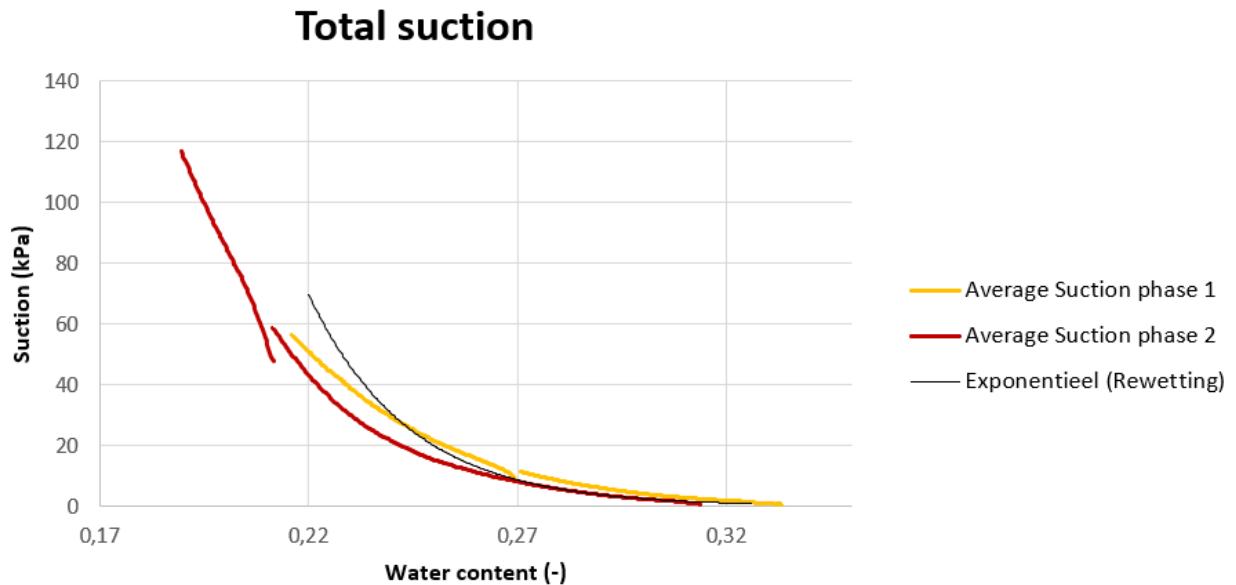


Figuur 5-35 Resultaten eerste keer drogen van grond zonder vegetatie

⁸ Het watergehalte is de hoeveelheid water tussen de grondkorrel. In dit geval is dit berekend door het gewicht van de droge grond van de natte grond af te halen en dit te delen door de droge grond (Backhausen & van der Stoel, 2014)

de zuigspanning wordt, deze spanning neemt dus exponentieel toe. Ook is te zien dat de grond bij een watergehalte van 34 nagenoeg verzadigd is.

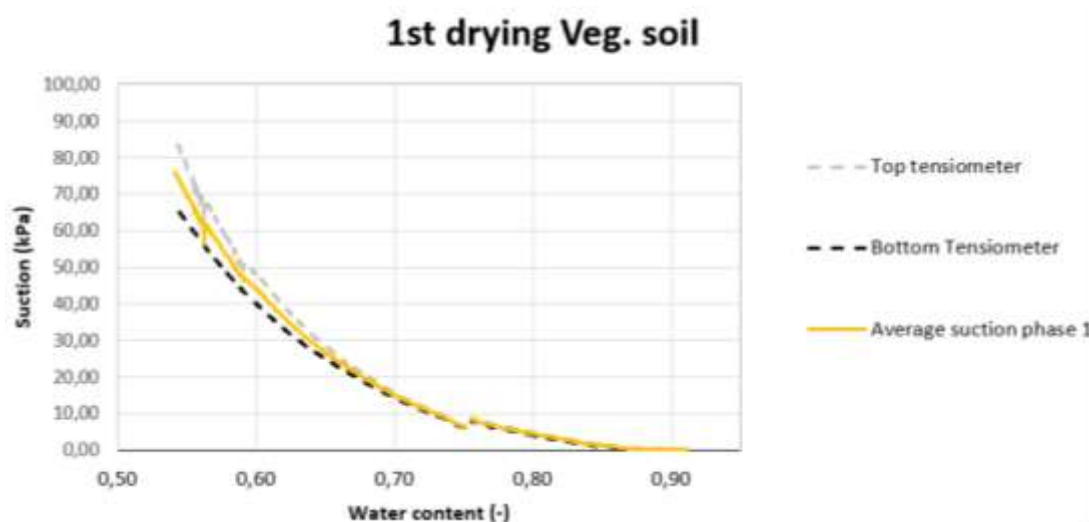
In figuur 5-36 is de zuigspanning tijdens de twee perioden van drogen uitgezet tegen het watergehalte. In dit figuur is te zien dat de zuigspanning tijdens de tweede periode van drogen minder snel toeneemt. Dit zou kunnen doordat de doorlatendheid lager is geworden. Ook is te zien dat wanneer de zuigspanning de maximale uitdroging van de eerste droogteperiode voorbij gaat, dit sneller toeneemt.



Figuur 5-36 Resultaten van de twee perioden van uitdrogen (grond zonder vegetatie)

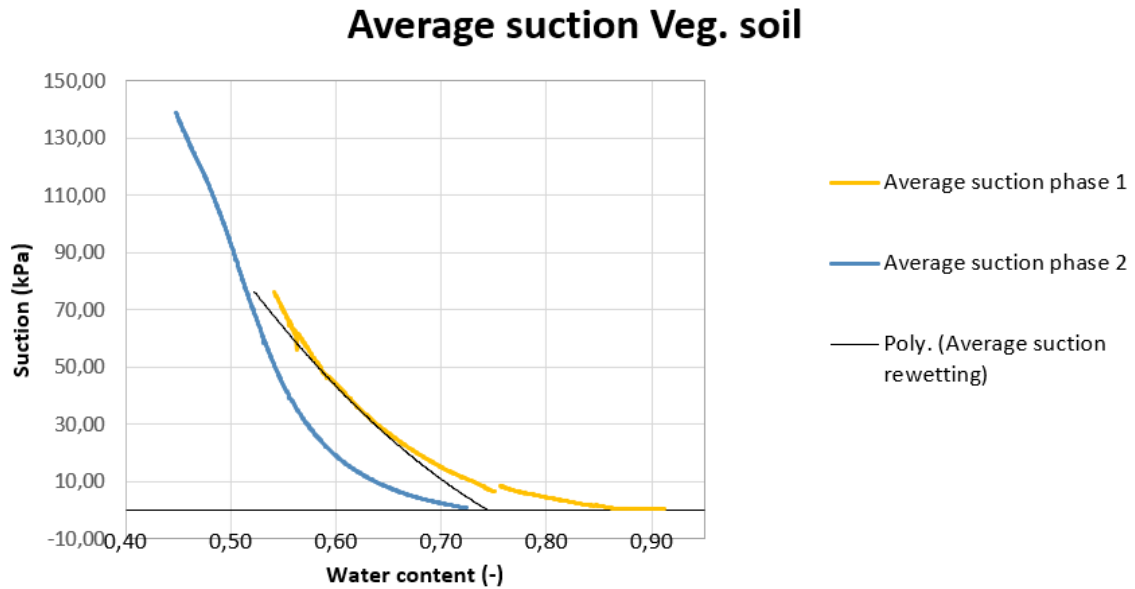
Grond met vegetatie

De eerste periode van uitdroging van het grondmonster met vegetatie is de zuigspanning uitgezet tegen het watergehalte (zie figuur 5-37). Ook bij de grond zonder vegetatie neemt de zuigspanning exponentieel toe. Bij dit grondmonster is de grond pas volledig verzadigd bij een watergehalte van 0,9. Dit leidt ertoe dat de zuigspanning in dit grondmonster ook hoger is bij een hoger watergehalte dan het grondmonster zonder vegetatie. Ook valt op de zuigspanning fluctueert wanneer deze een waarde van 50 kPa bereikt. Dit kan komen door de vegetatie op het grondmonster.



Figuur 5-37 Resultaten eerste periode van uitdrogen (grond met vegetatie)

In figuur 5-38 is de gemiddelde zuigspanning over beide periodes van uitdrogen uitgezet tegen het watergehalte van de grond. Ook hier is te zien dat de zuigspanning minder snel toeneemt bij een lager watergehalte tijdens de tweede periode. Een andere gelijkens is dat de zuigspanning sneller toeneemt wanneer deze een hogere waarde bereikt dan in de fase ervoor.



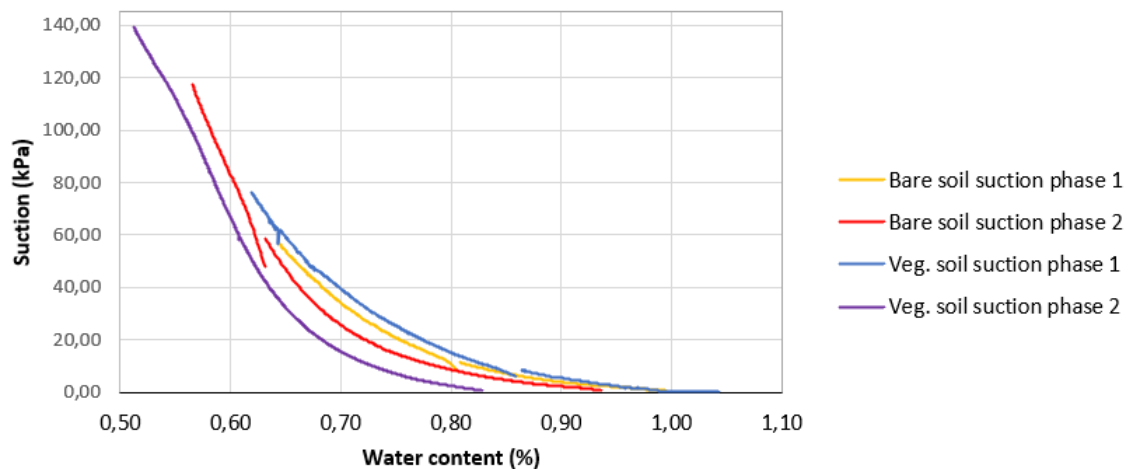
Figuur 5-38 Resultaten gemiddelde zuigspanning tijdens twee periodes van uitdrogen (grond met vegetatie)

Vergelijking twee grondmonsters

In de onderstaande figuur (zie figuur 5-39) is de zuigspanning van de verschillende grondsoorten, uitgezet tegen het huidige watergehalte gedeeld door het start watergehalte per grondsoort. Hierin is te zien dat in de eerste fase van drogen de zuigspanning van de grond zonder vegetatie minder snel hoog wordt dan de zuigspanning van de grond met vegetatie. Ook zit meer verschil tussen de fases van droging tussen de grondsoorten. De tweede fase van de grond zonder vegetatie heeft een veel lagere zuigspanning bij hetzelfde watergehalte dan de eerste fase, bij de grond zonder vegetatie zit minder verschil in zuigspanning tussen de fases.

Wanneer het verschil in zuigspanning tussen de fases van drogen vergeleken wordt met figuur 5-8 in paragraaf 5.4.1 is te zien dat hier dezelfde afname van de zuigspanning van de grond optreedt.

Suction comparison

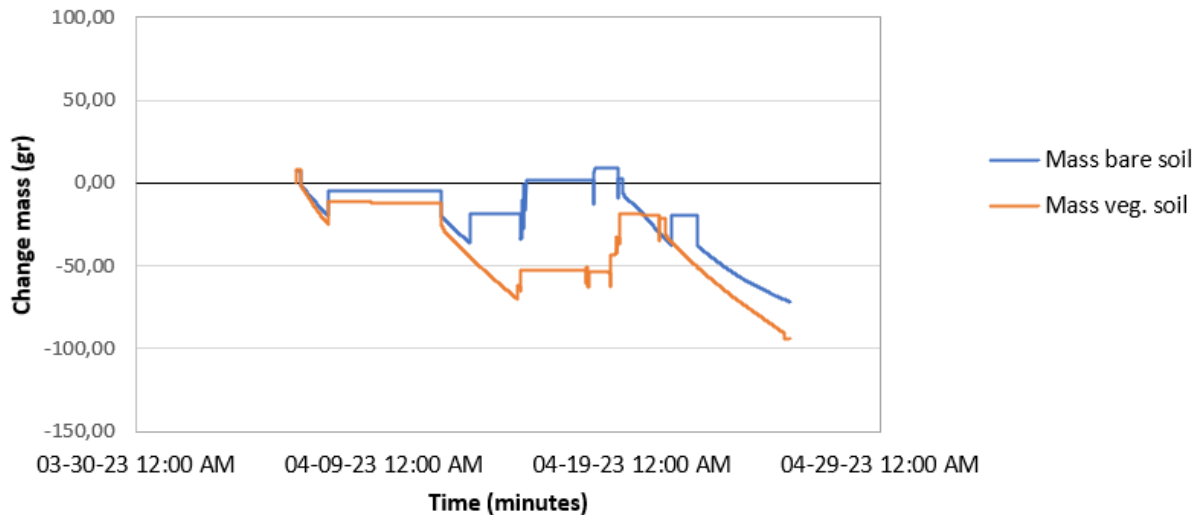


Figuur 5-39 Vergelijking resultaten van beide grondmonsters

Wanneer het verschil in zuigspanning tussen de fases van drogen vergeleken wordt met figuur 5-8 in paragraaf 5.4.1 is te zien dat hier dezelfde afname van de zuigspanning van de grond optreedt. Doordat de zuigspanning in de tweede fase lager is bij hetzelfde watergehalte zal deze spanning minder bijdragen aan de sterkte. Verdroging zorgt dus voor dat de potentie om zuigspanning te ontwikkelen minder wordt (Stirling et al., 2021).

Naast de zuigspanning is ook de afname van het gewicht tijdens de Hyprop proef bijgehouden (zie onderstaande figuur). Hierin is te zien dat beide grondsoorten al snel veel gewicht verliezen. Wel is te zien dat de grond met vegetatie meer verlies in gewicht ervaart. Dit laat zien dat de laag met vegetatie meer verdampt en dus gevoeliger is voor krimpen en zwellen dan de lagen eronder. Lagen die zich meer aan de top bevinden ondervinden dus een snellere afname van de sterkte.

Decrease of mass comparison



De doorlatendheid

De doorlatendheid kan berekend worden met het verschil in zuigspanning, het oppervlak van de grondmonsters van de Hyprop en het debiet van de verdamping, zie formule 6 en 7 (UMS, z.d.).

$$k_i(h_i) = -q_i / \{(\Delta h_i / \Delta z) - 1\} \quad \text{formule 6}$$

k_i = de doorlatendheid [m/etmaal]

Δh_i = Het verschil in zuigspanning over de twee gekozen tensiopunten [Pa]

Δz = het hoogteverschil van de tensiometers [m]

q_i = Het debiet van de verdamping [m^3 /etmaal]

Het debiet van de verdamping kan op de volgende manier berekend worden:

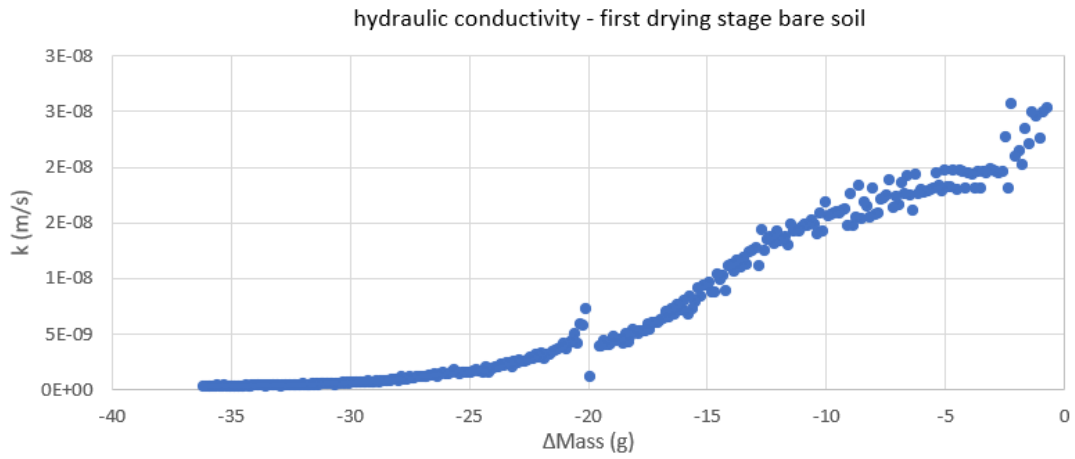
$$q_i = \frac{\frac{1}{2} * \left(\frac{\Delta V_i}{\Delta t_i}\right)}{A} \quad \text{formule 7}$$

ΔV_i = de afname van water [m^3]

Δt_i = het verschil in tijd tussen de twee gekozen punten [etmaal]

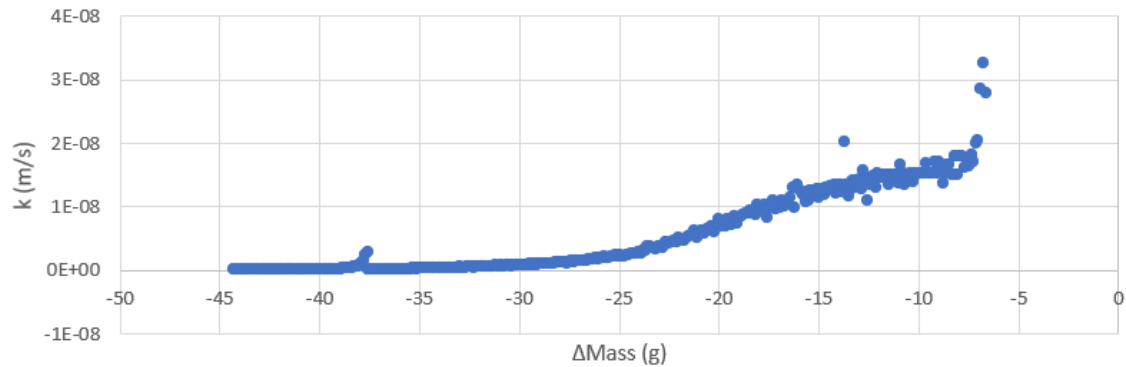
A = het oppervlak van de hyprop sampels [cm^2]

In de figuren 5-40 en 5-41 is de doorlatendheid voor de grond zonder vegetatie berekend. Hierin is te zien dat naar mate meer water verdampt de grond minder doorlatend wordt. Dit komt omdat het water eerst uit de grote poriën verdampt en daarna uit de kleine poriën en in deze kleine poriën stroomt het water minder hard. Na deze eerste keer drogen is de grond weer nat gemaakt. Wat opvalt is dat de grond bij de tweede fase van drogen minder doorlatend wordt. De doorlatendheid is dus niet herstelt naar dezelfde doorlatendheid die heerste bij de eerste keer uitdrogen.



Figuur 5-40 Resultaten ontwikkeling van de doorlatendheid grond zonder vegetatie (eerste periode van drogen)

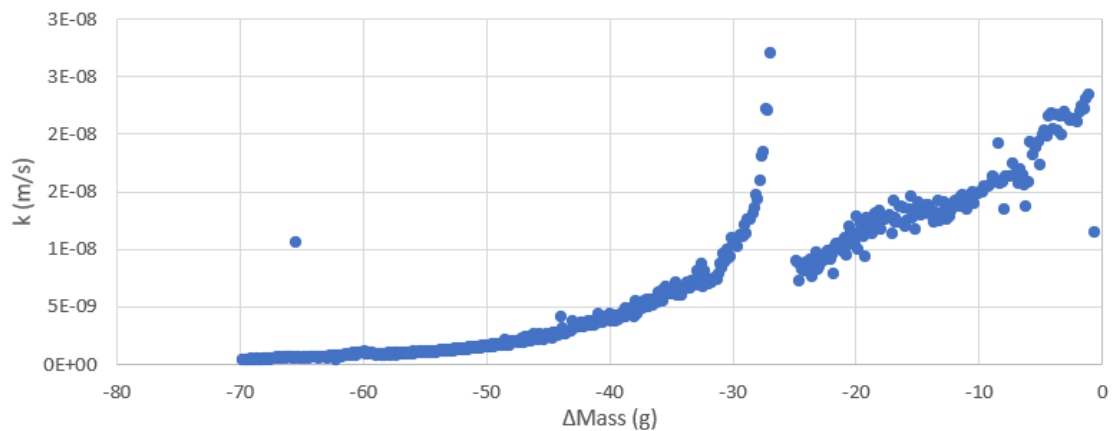
hydraulic conductivity - second drying stage bare soil



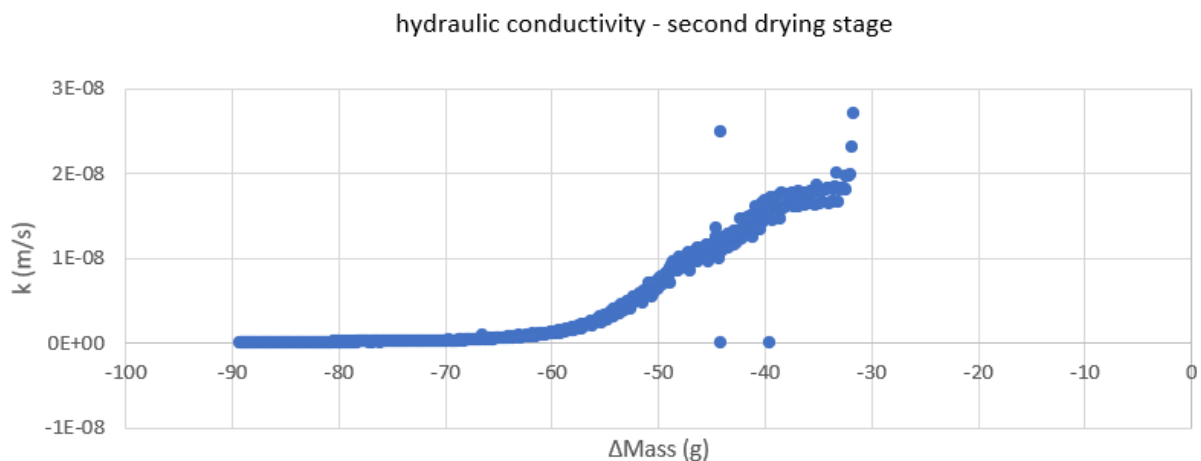
Figuur 5-42 40 Resultaten ontwikkeling van de doorlatendheid grond zonder vegetatie (tweede periode van drogen)

In figuur 5-41 is de doorlatendheid van de grond met vegetatie berekend. Net zoals bij de grond zonder vegetatie wordt de grond minder doorlatend naar mate deze uitdroogt en in de tweede fase wordt de grond ook minder doorlatend. Wat wel anders is, is dat de grond met vegetatie minder snel minder doorlatend wordt. Bij de grond zonder vegetatie is de grond al bijna niet meer doorlatend bij 30 gram gewicht verlies, bij de grond met vegetatie is te zien dat deze dan nog redelijk doorlatend is. Dit kan komen doordat de grond meer water en poriën in de grond heeft waardoor het langer duurt voordat alleen nog water in de kleinste poriën bevindt.

hydraulic conductivity - first drying stage



Figuur 5-41 Resultaten ontwikkeling van de doorlatendheid grond met vegetatie (eerste periode van drogen)



Figuur 5-43 Resultaten ontwikkeling van de doorlatendheid grond met vegetatie (tweede periode van drogen)

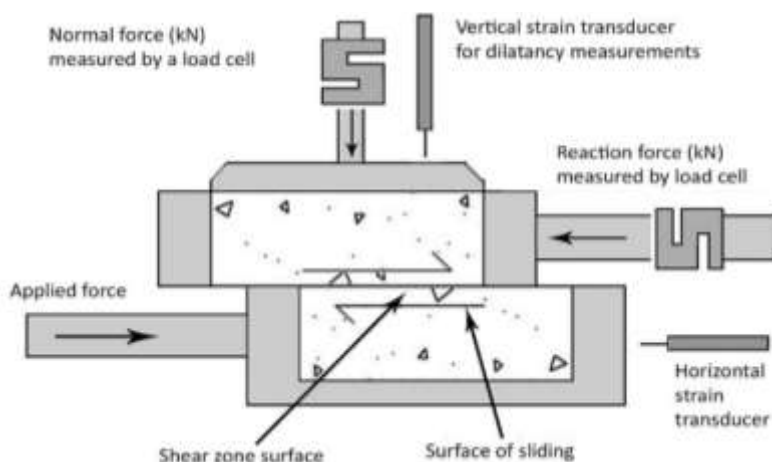
5.11.3 Direct Shear test

De Direct Shear test wordt uitgevoerd om schuifsterkteparameters van een grondmonster te bepalen. Dit wordt gedaan door een rond grondmonster in de Direct Shear opstelling te plaatsen (zie figuur 5-44 en 5-45). Hierna wordt een verticaal gewicht aangebracht en duwt een horizontale belasting tegen het monster met een bepaalde snelheid. Het monster zal afschuiven en de snelheid van verplaatsing wordt gemeten om uiteindelijk de hoek van inwendige wrijving en de cohesie te kunnen bepalen (zie bijlage V direct shear test) (Reddy, z.d.).



Figuur 5-44 Direct Shear apparaat TU Delft

De test is uitgevoerd bij drie verschillende normaal belastingen om uiteindelijk de phi en de c te kunnen bepalen met de theorie van Mohr-Coulomb. De sterkte eigenschappen die uiteindelijk hier uit komen worden gebruikt voor de berekeningen in PLAXIS. Zes direct shear testen zijn uitgevoerd.



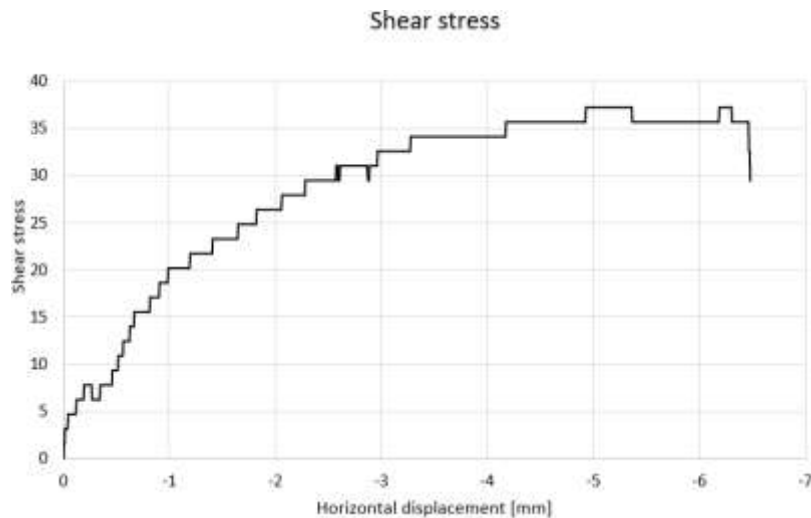
Figuur 5-45 Werking Direct Shear (Reddy, z.d.)

1. Volledige verzadigd monster bij een normaal belasting van 4,5 kg en een vochtpercentage van ongeveer 7%.
2. Volledige verzadigd monster bij een normaal belasting van 9,5 kg en een vochtpercentage van ongeveer 7%.
3. Volledige verzadigd monster bij een normaal belasting van 18,5 kg en een vochtpercentage van ongeveer 7%.
4. Niet volledig verzadigd monster bij een normaal belasting 4,5 kg en een vochtpercentage tijdens de test van 56,61% en na de test van 6,89%.
5. Niet volledig verzadigd monster bij een normaal belasting 9,5 kg en een vochtpercentage tijdens de test van 56,61% en na de test van 6,89%.

6. Niet volledig verzadigd monster bij een normaal belasting 18,5 kg en een vochtpercentage tijdens de test van 56,61% en na de test van 6,89%

Grond zonder vegetatie volledig verzadigd

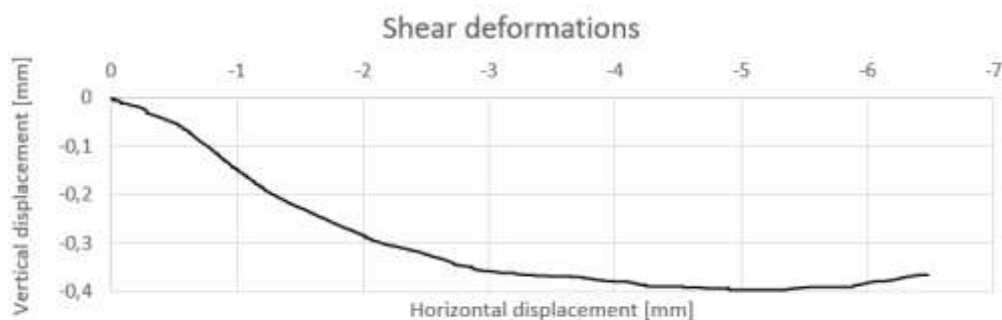
Eerste proef



Figuur 5-46 Resultaten eerste proef grond zonder vegetatie volledig verzadigd

De resultaten van de eerste Direct Shear proef is in de bovenstaande figuur te zien (zie figuur 4-46). De maximale shear load⁹ die bij dit monster op trad is 37,19 kN. Daarnaast is te zien dat de proef is gestopt bij een verplaatsing van ongeveer 6 mm. Bij deze verplaatsing is ook te zien dat de schuifweerstand afneemt en de grond dus op dit moment geen weerstand tegen verplaatsing meer geeft.

De horizontale verplaatsing is ook uitgezet tegen de verticale verplaatsing (zie figuur 5-47). Hierbij is te zien dat hoe meer het monster afschuift hoe meer verticale verplaatsing van het monster plaats vindt. Wanneer het monster de maximale schuifspanning heeft bereikt blijft de verticale verplaatsing gelijk en neemt de hoogte zelfs toe. Dit kan komen doordat de korrels over elkaar worden geschoven.



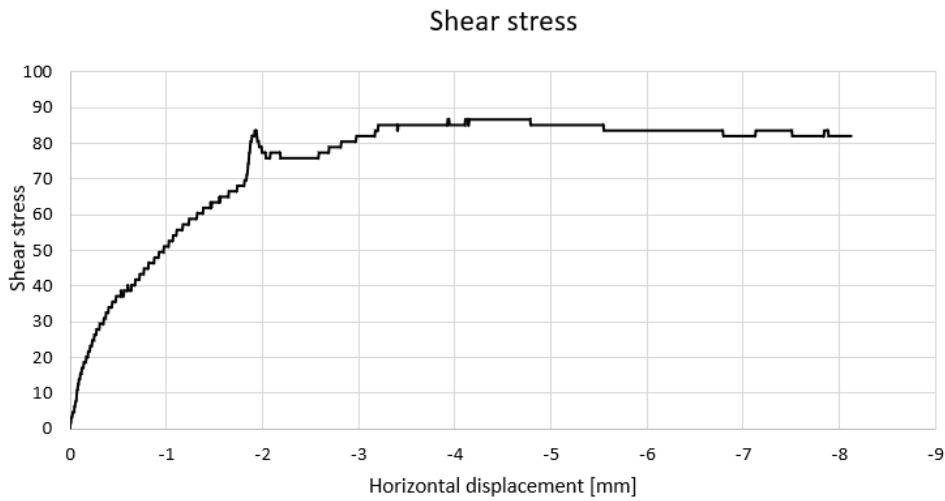
Figuur 5-47 Verticale verplaatsing uitgezet tegen horizontale verplaatsing eerste proef

Tweede proef

Tijdens de tweede proef (zie figuur 5-48) is een maximale shear load opgetreden van 86,78 kN. Deze proef is doorgedaan tot een verplaatsing van 8 mm. De maximale schuifweerstand is op dit moment al opgetreden maar hierna neemt de schuifweerstand niet direct af. Het grondmonster lijkt dus een plastische weerstand tegen het afschuiven te geven. In de onderstaande grafiek (zie figuur 5-49) is te

⁹ De shear load is de kracht waarmee het monster afgeschoven kan worden bij een bepaalde snelheid. Dit is een waarde voor de schuifweerstand van de grond (Reddy, z.d.)

zien dat het grondmonster gedurende de proef alleen maar zakt. Wel blijft de verticale verplaatsing stabiel wanneer het monster zijn pieksterkte bereikt. Dit kan komen omdat op dit moment de

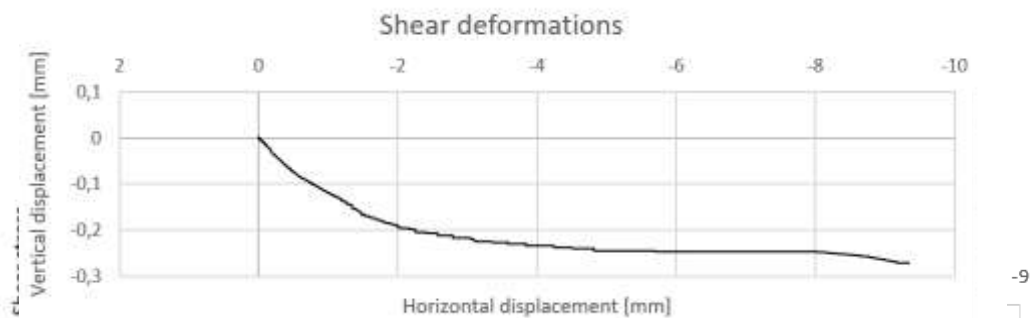


Figuur 5-48 Resultaten tweede proef grond zonder vegetatie volledig verzadigd

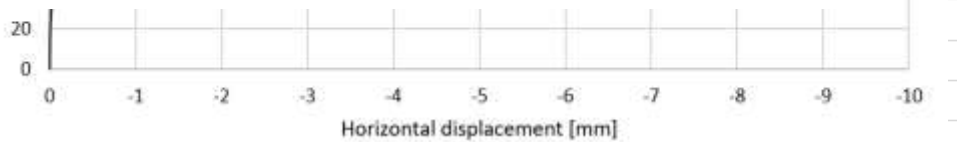
grondkorrels sterke korrelspanning ontstaat waardoor de korrels weinig verplaatsen.

Derde proef

In de figuur 5-50 is te zien dat het grondmonster een maximale shear load van 168,9 N bereikt bij een verplaatsing van 5,5 mm. Na deze verplaatsing neemt de schuifspanning nog niet af. In de grafiek van de verticale verplaatsing (figuur 5-51) is te zien dat de hoogte afmeting van dit grondmonster afneemt.

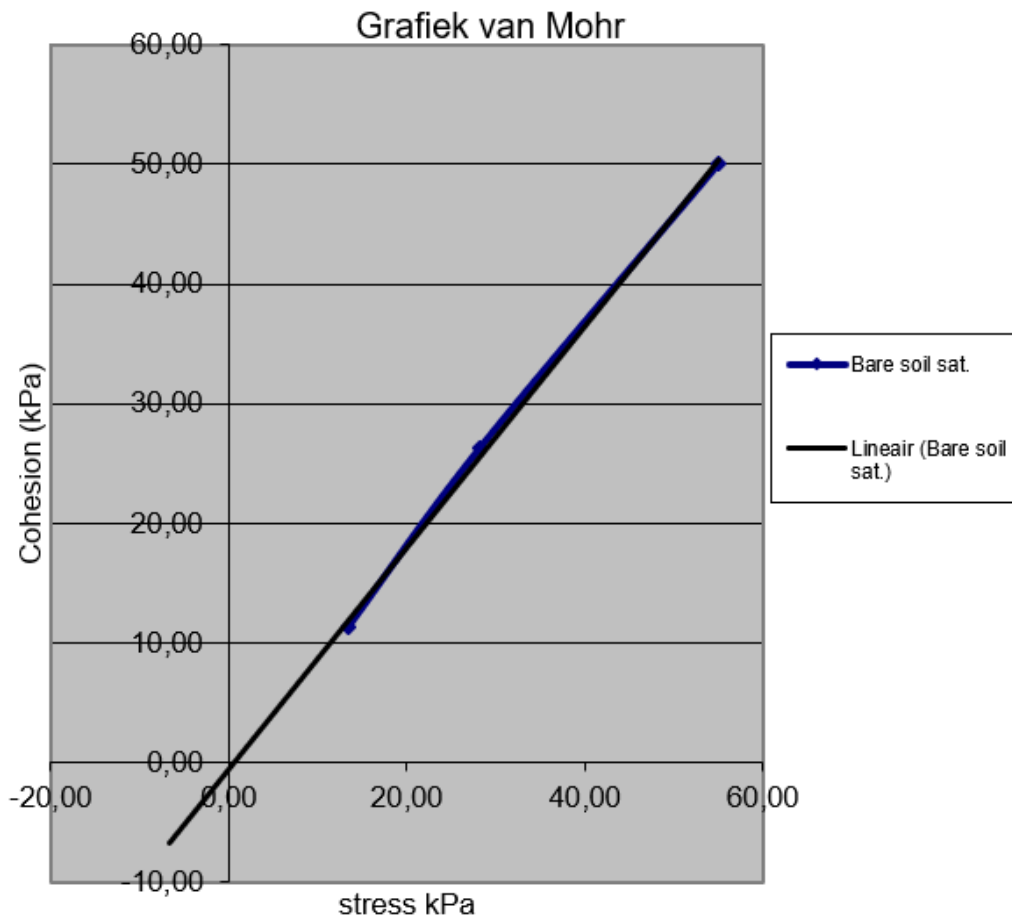


Figuur 5-51 Verticale verplaatsing uitgezet tegen horizontale verplaatsing derde proef



Figuur 5-50 Resultaten derde proef grond zonder vegetatie volledig verzadigd

De verzamelde gegevens zijn verwerkt in een grafiek van Mohr-Coulomb (zie figuur 5-52). Uit deze grafiek kan gehaald worden dat cohesie van het monster 0 is (omdat deze volledig verzadigd is) en dat de hoek van inwendige wrijving 42,34 graden is.



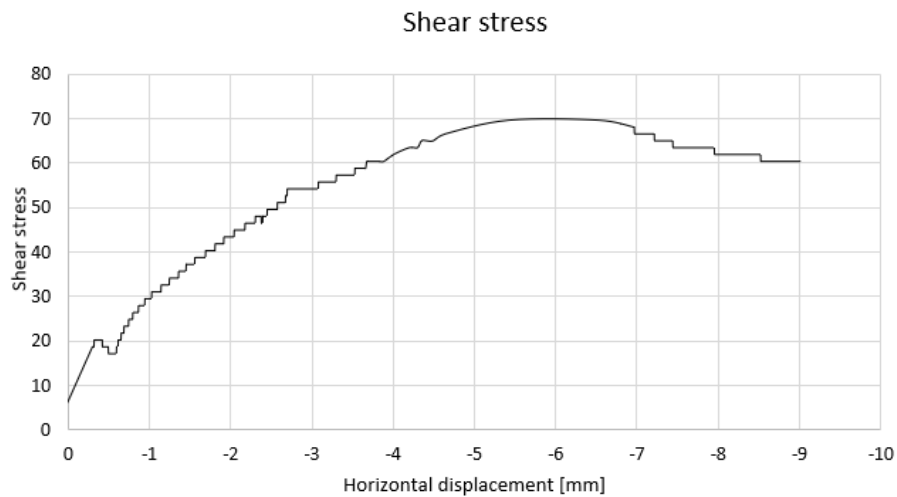
Figuur 5-52 Grafiek van Mohr Bare soil verzadigd, opgesteld met behulp van de resultaten van de Direct Shear (eigen werk)

Grond met vegetatie niet volledig verzadigd

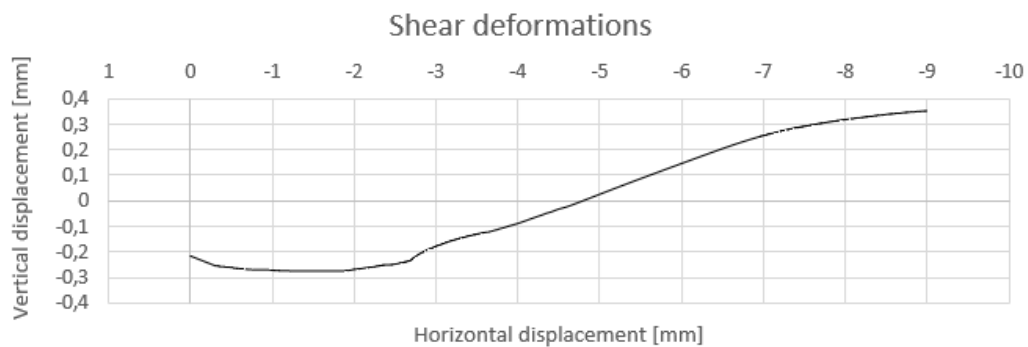
Eerste proef

In figuur 5-53 is te zien dat het grondmonster een maximale shear load van 71,28 N bereikt bij een verplaatsing van 6 mm. Na deze verplaatsing is te zien dat de schuifweerstand afneemt.

In de grafiek van de verticale verplaatsing is te zien dat dit grondmonster juist toeneemt in hoogte (zie figuur 5-54). Dit kan komen door de grondkorrels die over elkaar geschoven worden.



Figuur 5-53 Resultaten eerste proef grond met vegetatie niet volledig verzadigd



Figuur 5-54 Verticale verplaatsing uitgezet tegen horizontale verplaatsing eerste proef

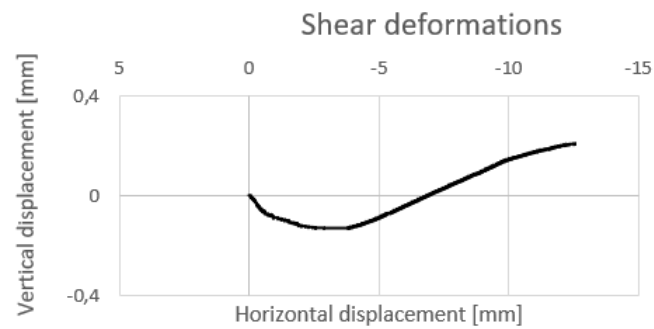
Tweede proef

in figuur 5-55 is te zien dat het monster de pieksterkte al heeft bereikt bij een verplaatsing van 3,5 mm, dit monster is dus brosser dan de vorige grondmonsters. Hier bereikt het monster een shear load van 158,06 N.

het grondmonster neemt tijdens de proef weer toe in hoogte (zie figuur 5-56). Dit komt waarschijnlijk door het over elkaar schuiven van de grondkorrels.



Figuur 5-55 Resultaten tweede proef grond met vegetatie niet volledig verzadigd

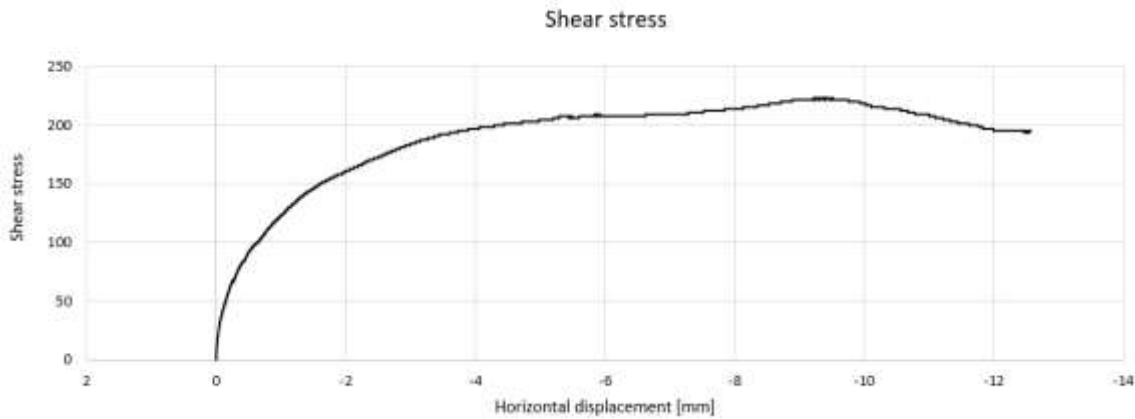


Figuur 5-56 Verticale verplaatsing uitgezet tegen horizontale verplaatsing tweede proef

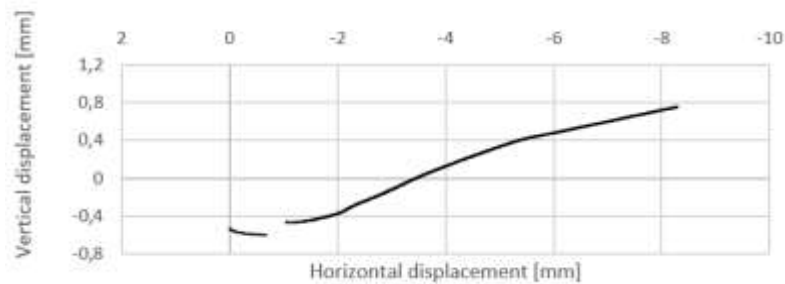
Derde proef

In de derde proef bereikt het grondmonster zijn pieksterkte na een vervorming van 9 mm (zie figuur 5-57). Dit monster bereikt daarbij een shear load van 210 N.

In figuur 5-57 is te zien dat de grond eerst lager wordt en bij een verplaatsing van 4 mm wordt de grond hoger.



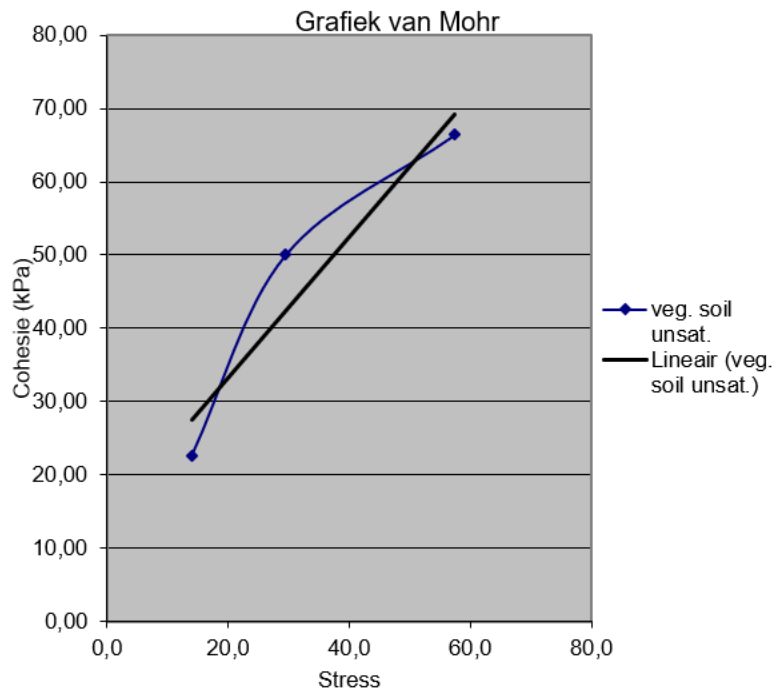
Figuur 5-58 Resultaten derde proef grond met vegetatie niet volledig verzadigd



Figuur 5-57 Verticale verplaatsing uitgezet tegen horizontale verplaatsing derde proef

Vergelijking

In figuur 5-59 is de Mohr-Coulomb grafiek opgesteld met behulp van de verzamelde gegevens uit de proef. In deze grafiek is te zien dat de grond bij een bepaalde korrelspanning een hogere cohesie krijgt. Dit komt waarschijnlijk omdat de grond onverzadigd is waardoor een extra zuigspanning op treedt. Bij deze grafiek hoort een cohesie van 0 en een hoek van inwendige wrijving van $59,28^\circ$. Uit deze figuur blijkt ook dat de schuifsterkte hoger wordt in de niet verzadigde situatie. In meerdere studies is voorgesteld om voor de niet verzadigde situatie een extra parameter in de Mohr-Coulomb formule toe te voegen (Walrave et al., 2022). Met deze parameter zou de extra zuigspanning meegenomen kunnen worden in de berekening. Om een veilige benadering mee te nemen in de berekeningen wordt verder gegaan met de verzadigde situatie.



Figuur 5-59 Grafiek van Mohr opgesteld met behulp van de resultaten van de Direct Shear (eigen werk)

5.12 Conclusie

In dit hoofdstuk is deelvraag “Hoe veranderen de grondeigenschappen en de stabiliteit van dijken onder invloed van het klimaat?” behandeld. Om deze deelvraag te beantwoorden is vooraf de keuze gemaakt om specifiek de invloed van droogte op de grondeigenschappen te onderzoeken. De keuze om droogte te onderzoeken is gemaakt omdat een aantal praktijkvoorbeelden laten zien dat dit invloed heeft op een dijk. Bovendien is droogte relevant omdat verwacht wordt dat dit steeds vaker zal optreden als gevolg van klimaatverandering.

Nadat is bepaald dat droogte de focus krijgt, is voor de casestudie een droogtegevoelig dijkprofiel gekozen. Het dijkprofiel dat is gekozen ligt in de MT-polder. Deze bestaat voornamelijk uit klei en veen en is gefundeerd op een pleistocene zandlaag. Dit betekent dat de dijk droogtegevoelig is. Bij deze gekozen dijk soort en klimaat invloed is het faalmechanisme macro-instabiliteit het meest relevant.

Om te concluderen wat de invloed van droogte is op een dergelijke droogtegevoelige dijk is eerst een literatuurstudie gedaan. Uit de literatuurstudie bleek dat in het verleden een aantal dijken zijn bezweken door onder andere de invloed van droogte. De dijk in Wilnis is hier een goed voorbeeld van. Dit was een boezemkade die bestond uit een dikke veenlaag. Het veen droogde op en een grondwaterstroming ontstond onder de dijk waardoor de kade begon “op te drijven”. Droogte heeft een aantal invloeden op de eigenschappen van klei en veen.

Ten eerste scheuren klei en veen gronden in dijken allebei door het krimpen en zwellen van de dijken. De scheuren die in de dijk ontstaan zwellen in de winter vaak dicht, maar bij de grootste scheuren gebeurt dit niet. Scheuren ontstaan tot een bepaalde diepte, maar wanneer de dijk droger wordt dan dat het ooit is geweest kunnen de scheuren dieper door groeien. Doordat het water uit de grond verdampt ontstaan zuigspanningen in de grond, hierdoor neemt de korrelspanning toe. Echter wordt de potentie om zuigspanning te ontwikkelen wordt na meerdere droog/nat cycli waardoor de schuifweerstand afneemt. Hierom wordt in de volgende hoofdstukken van dit onderzoek gefocust op het niet alleen uitdrogen, maar ook het weer nat worden van de grond.

Ook wordt de afbraak van organische stof versneld wanneer de grond droger wordt. Dit kan ervoor zorgen dat sterke verbindingen in de grond kapot gaan. Bij veen kan bovendien gasvorming optreden, wat kan zorgen voor een wateroverdruk. Wanneer dit optreedt als de veendijk licht is geworden door uitdroging kan de dijk gaan “opdrijven”. Langere vegetatie kan zorgen voor het sneller uitdrogen van een dijk. Het is daarom belangrijk dat de vegetatie onderhouden wordt.

Verder zegt de geometrie ook iets over de uitdroging van een dijk. Bij een steile dijk zorgt meer infiltratie vanuit de boezem, door een groter verhang, dat de dijk minder snel uitdroogt.

Als laatste is uit de literatuur ook gebleken dat de hoek van inwendige wrijving, de cohesie en de korrelspanning veranderen onder invloed van het klimaat. Deze informatie wordt verder gebruikt in hoofdstuk 6. Deze informatie wordt verder gebruikt in hoofdstuk 6.

Vervolgens zijn interviews gedaan om de literatuurstudie te valideren. Het belangrijkste wat opviel in de interviews is dat de verdroging van de dijk een positieve en negatieve invloed op de dijk kan hebben. De dijk wordt sterker naar mate minder water tussen de korrels zit. Daarentegen zorgt droogte ook voor scheurvorming, afname van gewicht en gasvorming wat kan leiden tot instabiliteit. Ook kunnen scheuren, die gevuld zijn met water, leiden tot wateroverspanning in dijken. Hiervoor moet de scheur wel diep en breed genoeg zijn en moet een extreme bui optreden. Kleine scheuren (minder dan 0,5 meter diep) worden niet gezien als gevaarlijk. Ook herstellen scheuren niet altijd in de winter en herstellen veendijken minder snel. Diep gewortelde vegetatie kan leiden tot meer verdamping in een dijk, daarentegen zorgt langere vegetatie ook voor meer schaduw waardoor

minder water uit de grond verdampt. Een goed beheer van de vegetatie is van belang om uitdroging van de dijk te verminderen. De waterschappen hebben nog geen duidelijk zicht op de invloed van droogte op sterkte eigenschappen van dijken. Wel zou een dikkere kleilaag ervoor kunnen zorgen dat minder water uit de kern van de dijk wordt onttrokken. De dijken die gevoelig zijn voor droogte worden op dit moment gekenmerkt door dikke veenlagen met hieronder een zandlaag. Het veen wordt licht en scheuren zullen ontstaan. Door de zandlaag kan wateroverspanning in de dijk ontstaan.

Als laatste zijn ook proeven uitgevoerd om de literatuurstudie te valideren. Deze proeven zijn uitgevoerd met grond van de MT-polder, een dijk met klei en veen lagen. De proeven zijn gedaan op de bovenste grondlagen. Dit zijn lagen met en zonder vegetatie. De grondsoort van deze grondlagen is geclassificeerd aan de hand van de Atterberg limits. De grond zonder vegetatie is een siltige klei met een gemiddelde plasticiteit en de grond met vegetatie is een siltige klei met een hoge plasticiteit. Deze classificatie wordt gebruikt in de berekeningen om eigenschappen aan de grond toe te kennen. Bij de Hyprop proef zijn ook twee grondmonsters getest, met en zonder vegetatie. Hier viel op dat het grondmonster met vegetatie meer water verloor tijdens het uitdrogen. Ook heeft de grond zonder vegetatie een hogere zuigspanning bij hetzelfde watergehalte. Beide grondsoorten hebben bij de tweede fase van drogen een lagere zuigspanning bij eenzelfde watergehalte dan tijdens de eerste fase van uitdrogen. Dit valideert de literatuur waarin is gevonden dat de zuigspanning bij iedere droog/nat fase afneemt. Als laatste is de doorlatendheid van de grond bepaald met de Hyprop proef. Hierbij is te zien dat naarmate de grond meer uitdroogt de doorlatendheid lager wordt. Dit komt waarschijnlijk doordat het water uit de kleinste grondpориën moet stromen als het verder is uitgedroogd, in deze poriën kan het water het minst snel stromen. Als laatste is de direct shear proef uitgevoerd, de sterkte van de grond die met deze proef wordt bepaald, is in hoofdstuk 6 gebruikt voor de berekening. Als laatste is de Direct Shear proef uitgevoerd, de sterkte van de grond die met deze proef wordt bepaald, is in hoofdstuk 6 gebruikt voor de berekening. Wat in deze proeven opvalt is dat bij de grond zonder vegetatie naar het bereiken van de pieksterkte de sterkte van de grond weinig afneemt. Dit zou kunnen komen doordat de grond verzadigd is waardoor deze plastischer reageert. Ook valt op dat de verticale verplaatsing bij de grond met vegetatie toeneemt en bij de grond zonder vegetatie niet. Ook dit kan komen door het verschil in watergehalte, bij de grond zonder vegetatie die verzadigd is kunnen de korrels makkelijker over elkaar heen bewegen omdat door het water meer ruimte tussen de korrels zit.

6. De afname van de stabiliteit onder invloed van droogte

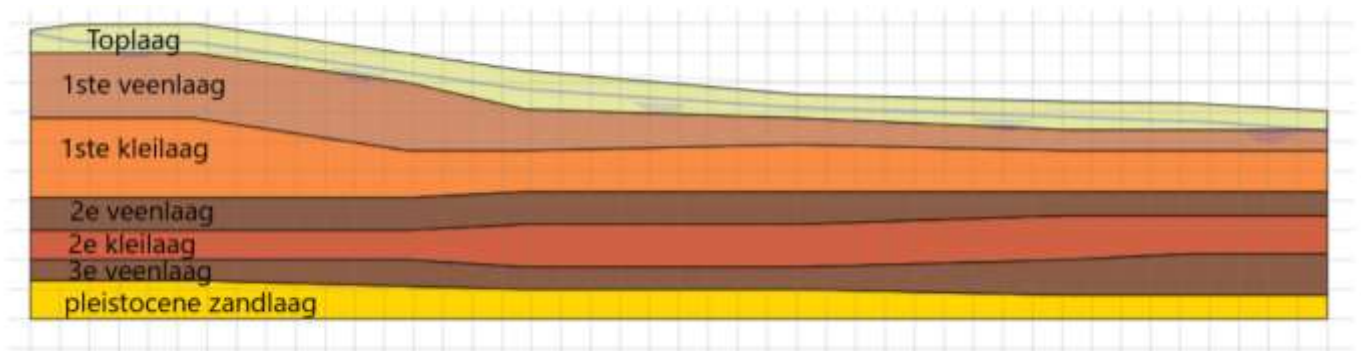
6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt deelvraag 4 behandeld, namelijk: “Hoe groot is de verandering van de stabiliteit van dijklichamen onder invloed van het klimaat?” beantwoord. Dit wordt gedaan door berekening te maken van de stabiliteit van een dijk met parameters die veranderen onder invloed van het klimaat. In hoofdstuk 5 is onderzocht welke grondparameters veranderen onder invloed van het klimaat en in dit hoofdstuk 6 wordt uitgezocht hoeveel deze parameters en de stabiliteitsfactor veranderen. Hierbij wordt de informatie uit hoofdstuk 3 over hoe het klimaat verandert gebruikt. Uit hoofdstuk 4 is de informatie gebruikt over hoe een stabiliteitsberekening uitgevoerd wordt met Mohr-Coulomb associatief. Onderzoek is gedaan naar: de veranderende doorlatendheid van de grond, de afname van de sterkte van piek naar residueel en de veranderende grondwaterstand. Een afname van piek- naar residuele sterkte betekent de afname van de hoogste te meten sterkte van die grondsoort naar de laagst te meten sterkte van de grondsoort bij afschuiven. Nadat deze parameters bekend zijn, zijn de berekeningen van de stabiliteit uitgevoerd. De uitkomsten van deze berekeningen worden in hoofdstuk 7 in een faalcurve verwerkt.

6.2 Uitgangspunten

Dijkopbouw

In figuur 6-1 is het model van de MT-polder uit PLAXIS te zien. Deze dijk bestaat uit een toplaag, 1^{ste} veenlaag, 1^{ste} kleilaag, 2^e veenlaag, 2^e kleilaag, 3^e veenlaag en een pleistocene zandlaag. Deze lagen zijn bepaald aan de hand van de sonderingen (zie bijlage VII).



Figuur 6-1 Dijkopbouw van de MT-polder uit PLAXIS (eigen werk)

In het model zijn de volgende soortelijke gewichten ingevuld voor iedere laag (zie figuur 6-2). Deze waarden zijn aangenomen met behulp van tabel 2b uit NEN9997-1+C2:, 2017 en de PhD kandidaat aan de TU delft (Normcommissie 351 006 Geotechniek, 2017).

grondlaag	γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)
toplaag	16	18
1ste veenlaag	10,5	11,5
1ste kleilaag	12,5	14
2e veenlaag	10,5	11
2e kleilaag	13	14,5
3e veenlaag	10,5	11
pleistocene zandlaag	18	20

In de berekeningen worden enkel de grondeigenschappen van de toplaag, veen 1 en klei 1 aangepast. Aangenomen wordt dat de grondlagen die zich daar onder bevinden geen invloed van zwellen en krimpen zullen ervaren omdat deze beschermd worden tegen uitdrogen door de lagen erboven.

Figuur 6-2 Soortelijke gewichten grondlagen (Normcommissie 351 006 Geotechniek, 2017)

Computerprogramma

Plaxis 2D Ultimate.

Grondmodel

Mohr-Coulomb associatief (zie formule 3 in paragraaf 4.2.2).

Hier is voor gekozen omdat volgens de leidraad, Mohr-Coulomb de vigerende werkwijze is voor de berekening van de stabiliteitsfactoren van regionale keringen (STOWA, 2015a).

Verder is voor het associatieve model gekozen omdat dit een meer simpele formule oplevert. Hoewel het niet-associatieve model beter de werkelijkheid representeert (zie paragraaf 4.2.2) is omwille van de tijd voor de versimpelde versie gekozen. Bovendien worden geen eisen gesteld voor het kiezen tussen associatief en niet associatief. Zo kan met de versimpelde versie makkelijker alsnog het doel van de berekeningen behaald worden, namelijk: het in kaart brengen van de afname van de stabiliteit.

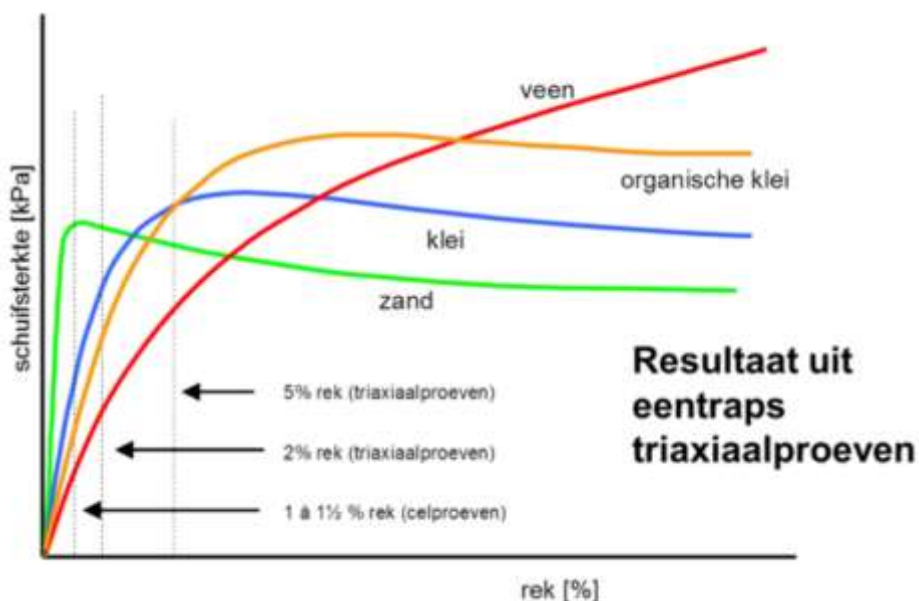
Klimaatscenario

UK Climate Projections 2009. Zie toelichting in paragraaf 6.4.3.

6.3 Disclaimer

Afname veensterkte

In de Engelse onderzoeken die gebruikt worden om de snelheid van afname van piek naar residuele sterkte te bepalen worden enkel klei lagen beschouwd. In dit onderzoek wordt ook de afname van piek naar residuele sterkte van veen bepaald. Wanneer naar de eentrapsges triaxiaalproeven (zie figuur 6-3) van de verschillende grondsoorten wordt gekeken valt op dat veen langer doet over het bereiken van de pieksterkte dan klei. Dit betekent dat de sterkte van veen nog aan het toenemen is terwijl de sterkte van klei al aan het verzwakken is. Echter heeft veen ook een residuele sterkte, deze is aangenomen zoals omschreven in paragraaf 6.4.3. De bijdrage van de veenlaag aan de stabiliteit is in de berekening echter klein vergeleken met de bijdrage van de klei lagen. De veenlaag heeft ten eerste een kleiner verschil tussen piek- en residuele sterkte waardoor de afname van de sterkte minder is dan bij de klei lagen. Ten tweede gaat het glijvlak door de kleilaag (zie bijlage VI) en heeft deze laag de grootste invloed op de afname van de stabiliteitsfactoren. Bij gebrek aan bronnen over het tempo van de afname van de sterkte van veen is, om deze redenen, gekozen om het tempo in de berekeningen gelijk te houden aan de afname van klei (zie tabel 6-4).



Figuur 6-3 Eentrapsges triaxiaalproeven (Stoop & Van Logchem, z.d.)

Stabiliteitsfactoren

Met deze berekeningen wordt geen oordeel gemaakt over de stabiliteit van dijk uit de MT-Polder in een bepaald jaar. Het wordt enkel gebruikt ter illustratie van de afname van de factor onder invloed van het droog en nat worden van de grond en bij steeds hogere grondwaterstand.

Afname vanaf het jaar 2000

In de berekeningen wordt een afname van de schuifsterkte vanaf het jaar 2000 meegenomen. Echter wordt de MT-polder al veel langer aan het krimpen en zwellen van de grond blootgesteld. De pieksterkte van de dijk is dus waarschijnlijk al eerder afgenomen dan het jaar 2000. Om een juiste faalcurve te maken moet deze gemaakt worden vanaf het begin van de bouw van de dijk om zo de juiste afname van piek naar residuele sterkte mee te kunnen nemen. Toch wordt in dit onderzoek gekozen om te rekenen vanaf het jaar 2000. Dit jaartal volgt uit een grafiek in een Engels onderzoek waarin de afname van de pieksterkte tot de residuele sterkte wordt weergegeven. In die grafiek wordt aangenomen dat de dijk in het jaar 2000 de pieksterkte heeft. In paragraaf 6.4.3 wordt toegelicht waarom de keuze gemaakt is om dit Engelse onderzoek te volgen.

6.4 Parameters

De parameters waarmee de stabiliteit van de dijk voor de komende jaren berekend kan worden zijn onderzocht. Naar de volgende parameters wordt in deze paragraaf onderzoek gedaan:

- Verandering van de hoogste grondwaterstand als gevolg van verandering van de doorlatendheid van de grond
- Afname piek- naar residuele sterkte

6.4.1 Verandering in de doorlatendheid door scheurvorming

Om te beredeneren hoe de hoogste grondwaterstand zal veranderen in de toekomst, onderzoek gedaan naar hoe de doorlatendheid zal veranderen onder invloed van droogte.

De huidige doorlatendheid van de toplaag

In hoofdstuk 5 paragraaf 5.6.2 is behandeld dat klei en veen een verschillende doorlatendheid hebben. In de proeven is de grondsoort van de toplaag van de MT-polder in kaart gebracht. Met de Atterberg limits is bepaald dat de grond zonder vegetatie een siltige klei is met een gemiddeld plasticiteit. De grond met vegetatie is ook een siltige klei met een hoge plasticiteit.

Aan deze gronden is een doorlatendheid gekoppeld met behulp van onderstaande figuur (zie figuur 6-4). De gronden uit de proeven komen overeen met de categorie B11 (kleigrond) van de Staringreeks (Heinen et al., 2020). De grondmonsters bevinden zich in de eerste meter van de dijk en vallen dus onder de categorie bovengronden. Hierdoor kunnen de volgende waarden van doorlatendheid aan de gronden gekoppeld worden:

Zwak siltige klei met een gemiddeld plasticiteit: 0,08 (cm/dag)
 Zwak siltige klei met een hoge plasticiteit: 4,53 (cm/dag)

Boven-Gronden	h(cm) p _f	1	10	20	31	50	100	250	500	1000	2500	5000	10000	16000
<i>Klei</i>														
B10	K	0,70	0,14	0,10	0,07	0,05	2,4E-2	7,8E-3	2,9E-3	1,0E-3	2,4E-4	8,1E-5	2,7E-5	1,3E-5
	?	0,430	0,427	0,424	0,420	0,414	0,398	0,362	0,327	0,289	0,243	0,212	0,185	0,169
	S1	0,0	7,2	12,5	17,5	24,5	37,1	54,4	65,6	73,8	80,9	84,3	86,6	87,7
	S2	0,0	5,7	9,3	12,6	16,9	24,1	33,3	39,0	43,2	46,7	48,4	49,6	50,1
B11	K	4,53	0,15	0,08	0,05	0,03	1,2E-2	3,3E-3	1,2E-3	4,0E-4	9,5E-5	3,2E-5	1,1E-5	5,2E-6
	?	0,590	0,581	0,573	0,565	0,553	0,529	0,490	0,459	0,428	0,389	0,362	0,336	0,320
	S1	0,0	8,1	13,2	17,4	22,7	30,4	39,0	43,8	47,2	50,0	51,3	52,2	52,8
	S2	0,0	7,0	10,4	13,0	16,1	20,3	24,7	27,1	28,8	30,2	31,0	31,4	31,8
B12	K	5,37	0,12	0,06	0,04	0,02	7,7E-3	1,9E-3	6,3E-4	2,0E-4	4,5E-5	1,4E-5	4,6E-6	2,1E-6
	?	0,540	0,531	0,523	0,516	0,505	0,485	0,453	0,427	0,402	0,370	0,348	0,327	0,313
	S1	0,0	7,9	12,4	16,0	20,1	25,5	30,8	33,4	35,2	36,6	37,2	37,7	38,0
	S2	0,0	6,7	9,6	11,8	14,1	17,0	19,6	21,0	22,0	22,6	23,0	23,1	23,3

Figuur 6-4 Doorlatendheid (K) bij verschillende grondsoorten (Heinen et al., 2020)

De huidige doorlatendheid van de overige grondlagen

Ook aan de resterende grondlagen is een waarde van doorlatendheid gekoppeld met behulp van de Staringreeks. De doorlatendheid van de bovenkant van elke grondlaag wordt gebruikt omdat deze het meest doorlatend is, dus het meest maatgevend.

Grondsoort	Bovenkant grondlaag (m t.o.v. NAP)	Onderkant grondlaag (m t.o.v. NAP)	Diepte bovenkant t.o.v. maaiveld	Y_{sat} (kg/m ³)	Kwalificatie vanuit de staringreeks
Zwak siltige klei met een gemiddeld plasticiteit	-1,8	-2	0	1800	B11
Gemiddeld siltige klei met een gemiddeld plasticiteit	-2	-2,3	-0,2	1800	B11
Veen	-2,3	-6	-0,5	1150	O18
Klei	-6	-7,5	-4,2	1400	O12
Veen	-7,5	-9	-5,7	1100	O18
Klei	-9	-10	-7,2	1450	O11
Veen	-10	-10,85	-8,2	1100	O18
Pleistocene zandlaag	-10,85	-22	-9,05	2000	O1

Figuur 6-5 Bepaling van de grondsoort per grondlaag (eigen werk)

Na het bepalen van de grondsoorten met behulp van de Staringreeks, zijn de doorlatendheden aan de overige grondlagen gekoppeld zoals in figuur 6-6 is weergegeven.

Grondsoort	Huidige doorlatendheid (cm/dag)
Zwak siltige klei met een gemiddeld plasticiteit	4,53
Gemiddeld siltige klei met een gemiddeld plasticiteit	0,08
Veen	1,76
Klei	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Veen	$6,0 \cdot 10^{-1}$
Klei	$2,0 \cdot 10^{-3}$
Veen	$5,3 \cdot 10^{-3}$
Pleistocene zandlaag	$3,2 \cdot 10^{-6}$

Figuur 6-6 Doorlatendheid per grondlaag van de dijk in de MT-polder (eigen werk)

Verandering doorlatendheid onder invloed van droogte

Grotere doorlatendheid

In de toekomst zal de doorlatendheid van een grondsoort groter kunnen worden door scheurvorming onder invloed van droogte (voor toelichting zie hoofdstuk 5 paragraaf 5.4.2) (Stirling et al., 2021). Gescheurde klei kan een doorlatendheid krijgen van 0,05 tot 0,005 m/etmaal (Joostdevree, 2023). Wanneer scheurvorming optreedt in klei kan de doorlatendheid van de toplaag (eerste paar meter van de dijk) meer op dat van zand gaan lijken (Utili et al., 2008). Deze toename van de doorlatendheid door scheurvorming treedt enkel op bij dijken die diepe brede scheuren hadden.

Hiernaast kan de toename van doorlatendheid vergeleken worden met de doorlatendheid van de bovenste grondlagen. Door droogte en scheurvorming gaat de doorlatendheid van de diepere grondlagen meer lijken op de doorlatendheid van de bovenste grondlaag. In de Staringreeks wordt een verschil gemaakt in de doorlatendheid van de bovengronden en de ondergronden.

In landen met een warmer klimaat komen meer scheuren voor (CIRIA, French Ministry of Ecology, USACE, 2013). In Frankrijk zijn scheurdieptes van 3 meter gevonden (zie paragraaf 5.7.2). Omdat het klimaat in Nederland in de toekomst meer gaat lijken op het klimaat in Frankrijk (zie hoofdstuk 3), kan berekend worden dat scheuren van 3 meter in de toekomst mogelijk ook in Nederland voor kunnen komen.

Lagere doorlatendheid

In paragraaf 5.11.2 is met behulp van de Hyprop proef, de doorlatendheid van twee verschillende grondmonsters bepaald na twee cycli van drogen. In de tweede fase van drogen was de doorlatendheid lager en hieruit is geconcludeerd dat de doorlatendheid afneemt naar mate de grond droger wordt. Wel zijn de grondmonsters licht gescheurd en los gekomen van de Hyprop ring door krimp (zie figuren 6-5 en 6-6). Deze scheuren zouden te klein zijn om de doorlatendheid te kunnen vergroten. Dit komt omdat wanneer de grond verdroogd is het beetje water wat nog in de grond zit uit de kleinste poriën moet stromen waar de stroomsnelheid het laagste is, hierdoor duurt de verdamping hierbij langer. In andere literatuur komt dit ook naar voren. Een lagere doorlatendheid door een drogere grond kan leiden tot minder infiltratie en dat de regen sneller van de dijk afstroomt (Rouainia et al., 2020).

Omdat nog weinig onderzoek is geweest naar de verandering van de doorlatend de grond kunnen kan er geen conclusie getrokken worden over of deze hoger of lager wordt. Wel kan met deze informatie berekend worden dat het verschil in grondwaterstand groter kan worden door scheuren. De grondwaterstand zal in de zomer door een hoge doorlatendheid meer zakken door een verhoogde verdamping. Ook zorgt een hoge doorlatendheid tijdens neerslag dat de grondwaterstand verder stijgt. Aangezien geen waarden voor de doorlatendheid bepaald kan worden, wordt in paragraaf 6.4.2 de verhoging van de hoogste grondwaterstand met behulp van kaarten bepaald.



Figuur 6-7 Grond zonder vegetatie na Hyprop proef



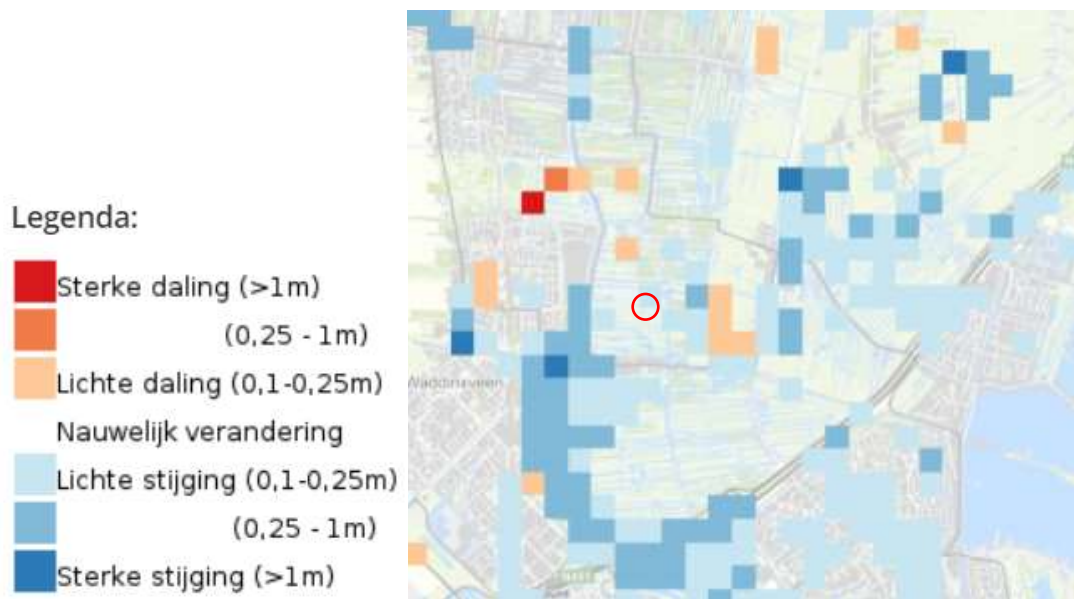
Figuur 6-8 Grond met vegetatie na Hyprop proef

6.4.2 Verhoogde grondwaterstand

Een verhoogde grondwaterstand kan in de toekomst optreden doordat de neerslag en doorlatendheid hoger worden. In hoofdstuk 3 is te zien wat de toekomstige neerslag situaties worden. In de vorige paragraaf is geconcludeerd dat het niet mogelijk is om de verhoogde grondwaterstand met behulp van de verandering van de doorlatendheid af te leiden. Om de berekening toch mogelijk te maken is gekozen om de waarde van de hoogste grondwaterstand met behulp van voorspellingen in PLAXIS te modelleren.

Op de klimaateffectatlas is de GHG (Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand¹⁰) gemodelleerd (klimaateffectatlas, z.d.-b). Deze stijging van de GHG houdt rekening met de klimaatverandering welke is gebaseerd op het WH-scenario van 2050. De kaart is gebaseerd op de uitkomsten van het Nationaal Water Model-Basisprognoses 2016 (zie paragraaf .. verlaagde waterstand). Deze uitkomsten geven een beeld van de verwachte ontwikkeling van de GHG voor het jaar 2050 op landelijk niveau. Hiermee kan de verhoging of verlaging van de grondwaterstand per gebied verschillen door lokale invloeden. Hierdoor kan het voorkomen dat de grondwaterstand in de toekomst meer of minder zal stijgen of dalen. Om toch een indicatie te kunnen geven van de verlaging wordt gekozen om dit model te gebruiken omdat het gebaseerd is op betrouwbare bronnen zoals de klimaatscenario's van het KNMI (Klein Tank et al., 2015).

In figuur 6-9 is te zien dat in de omgeving van de MT-polder de GHG tussen de 0,1 en 0,25 m zal stijgen (zie rode cirkel in figuur 6-9) . De grondwaterstand van de laatste jaren is te zien in de metingen die zijn uitgevoerd (Strijker, z.d.) (de locatie van de peilbuizen is te zien in bijlage II). In tabel 6-1 zijn de Gemiddeld Hoogste Grondwaterstanden in 2050 te zien. Hier is de grondwaterstand 0,175 m gestegen.



Figuur 6-9 Verhoging grondwaterstand MT-polder in 2050 ((klimaateffectatlas, z.d.-b)

¹⁰ De gemiddeld hoogste grondwaterstand welke doorgaans in de winter wordt bereikt (klimaateffectatlas, z.d.-a)

Nummer peilbuis	Hoogte maaiveld t.o.v. NAP	Maximale grondwaterstand t.o.v. NAP	Maximale grondwaterstand t.o.v. maaiveld	Maximale grondwaterstand t.o.v. maaiveld in 2050
1	-2,2	-2,9	-0,7	-0,575
2	-3	-4,3	-1,3	-1,175
3	-4,1	-5,25	-1,15	-1,025
4	-4,6	-5,4	-0,8	-0,675
5	-5	-5,3	-0,3	-0,175

Tabel 6-1 Verwachte hoogste grondwaterstand in 2050 in de dijk van de MT-polder

6.4.3 Piek- en residuele sterkte

In hoofdstuk 5 paragraaf 5.4.1 is beredeneerd dat de sterkte van de grond na meerdere droog/nat cycli afneemt van de pieksterkte naar de residuele sterkte. Om de degradatie van de stabiliteit in de loop van de tijd in kaart te brengen wordt eerst beredeneerd in welk tempo de sterkte afneemt van piek- naar residuele sterkte.

Met behulp van “De Landelijke Grondparameterset” (Kindermann & Tigchelaar, 2022) is de gemiddelde ongedraineerde schuifsterkeratio S [-] bepaald voor de piek- en residuele sterkte voor de grondsoorten uit de MT-polder. Deze ratio drukt de verhouding tussen de ongedraineerde schuifsterkte (S_u) en de spanning waarbij de grond normaal geconsolideerd is (σ'_{vc} bij OCR=1) uit, zie onderstaande formule.

$$S = \frac{S_u}{\sigma'_{vc}} = \frac{t}{s'_c + t_c}$$

formule 7

In onderstaande tabel zijn de waarden voor deze ratio per grondlaag te zien. De classificatie is gedaan met behulp van de sonderingen in bijlage VII en de NEN 9997-1 (Normcommissie 351 006 Geotechniek, 2017).

Grondlaag	Gradatie	Ongedraineerde schuifsterkte ratio S [-] pieksterkte	Ongedraineerde schuifsterkte ratio S [-] residuele sterkte
Klei, siltig (toplaag Ks1 en Ks2)	Ks1	0,5	0,41
	Ks2	0,54	0,45
Veen 1	Vk3	0,48	0,45
Klei 1	Kh3	0,58	0,46
Veen 2	Vk3	Schuifsterkte wordt constant gehouden in berekening (zie paragraaf 6.2 voor toelichting)	
Klei 2	Kh2		
Veen 3	Vk3		
Pleistocene zandlaag	Kz3		

Tabel 6-2 Ongedraineerde schuifsterkte ratio bij piek- en residuele sterkte

Vervolgens is de formule omgeschreven om de piek- en residuele ongedraineerde schuifsterkte vrij te maken, dit geeft:

$$S_u = S * \sigma'_{vc}$$

Zo kan voor elke grondlaag bepaald worden wat de verhouding is tussen de piek- en residuele schuifsterkte. Zo geldt voor de toplaag bijvoorbeeld het volgende:

Grond met vegetatie uit de toplaag (siltige klei met een gemiddelde plasticiteit (Ks1)):

Schuifsterkteratio pieksterkte: $S_u = 0,5 * \sigma'_{vc}$

Schuifsterkte ratio residuele sterkte: $S_u = 0,41 * \sigma'_{vc}$

De pieksterkte is een factor 1,22 groter dan de residuele sterkte ($0,5/0,41 = 1,22$). De verhouding tussen de pieksterkte en de residuele sterkte is in onderstaande tabel, voor de grondlagen die in de berekening worden aangepast, weergegeven.

Grondlaag	verhouding pieksterkte/residuele sterkte
Klei, siltig (toplaag Ks1 en Ks2)	1,22
	1,20
Veen 1	1,07
Klei 1	1,26
Veen 2	Wordt niet aangepast in de berekeningen
Klei 2	
Veen 3	
Pleistocene zandlaag	

Tabel 6-3 Verhouding tussen piek- en residuele sterkte (eigen werk)

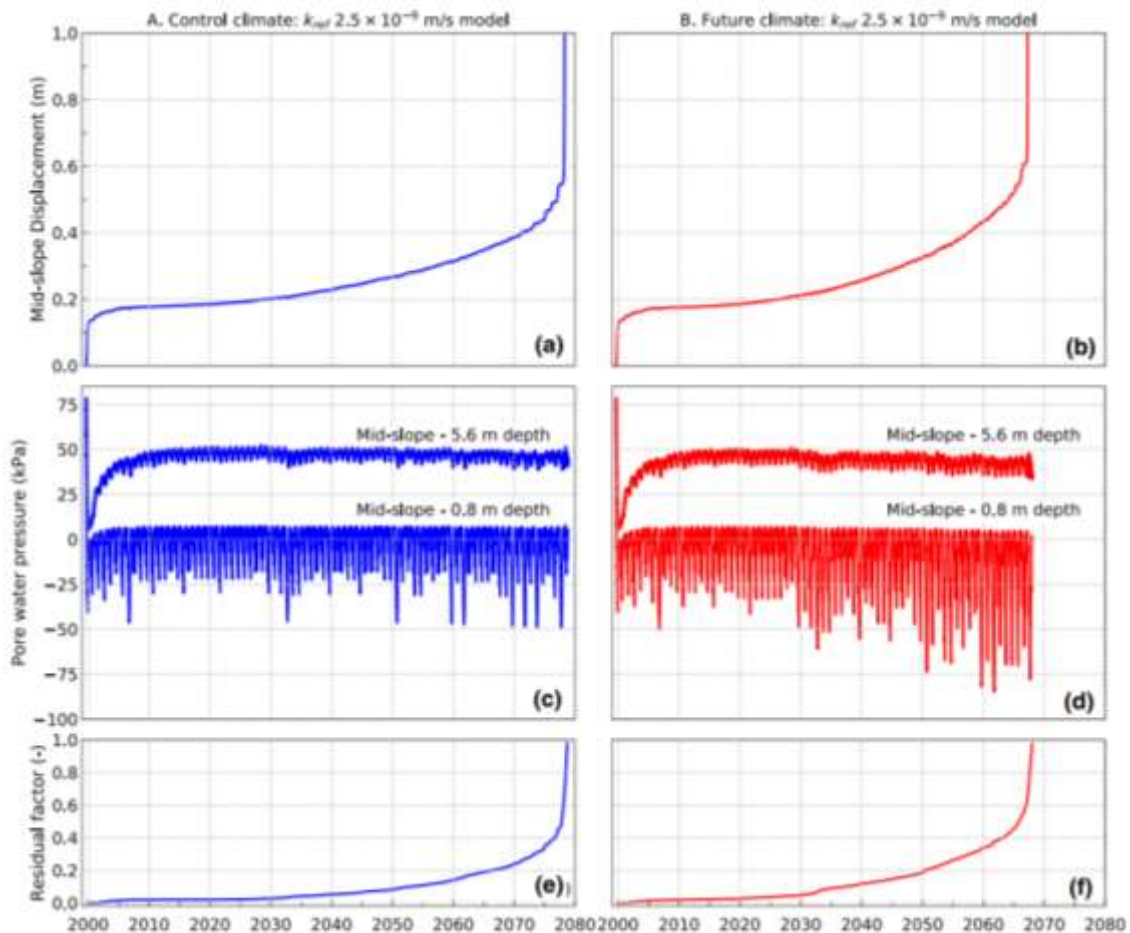
Tempo afname van piek- naar residuele sterkte

Het tempo waarin de pieksterkte afneemt naar de residuele sterkte als gevolg van droog/nat-cycli is van belang omdat zo een tijdsaspect gekoppeld kan worden aan de faalcurve in hoofdstuk 7. uit paragraaf 7.3.2. In de faalcurve is de afname van de stabiliteit onder invloed van droogte uitgezet tegen de tijd in jaren. Hoe snel de sterkte afneemt is dus bepalend voor de snelheid van de afname van de stabiliteit.

Om te bepalen hoe snel de sterkte afneemt van piek- naar residuele sterkte is een beeld nodig van het toekomstige klimaat. Aangezien de sterkte afneemt door het zwellen en krimpen van de grond onder invloed van droogte- en regen cycli moet een toekomstscenario geschetst worden voor de ontwikkeling van zwellen en krimpen van een dijk. Voor Nederland is nog geen model gemaakt dat de ontwikkelingen in de zuig- en waterspanningen onder invloed van het klimaat aantoont.

Daarom is gebruik gemaakt van een toekomstig klimaatmodel uit Engeland. Met behulp van de UK Climate Projections 2009 Weather Generator is een toekomst klimaatscenario gemodelleerd waarin de ontwikkeling van deze droogte- en regen cycli te zien is. Deze generator gebruikt de ontwikkeling van het klimaat uit de periode van 1962-1995 om een toekomstscenario te kalibreren (Rouainia et al., 2020).

In figuur 6-12 is in het blauw de voorspelling van het klimaat te zien als geen klimaatverandering is (grafieken a, c en e), en in het rood is de situatie te zien waarin het klimaat wel verandert (grafieken b, d en f). Verder vertonen de grafieken a en b de verplaatsing van de dijk als gevolg van veranderende gronddruk in de dijk, zoals weergegeven in grafieken c en d. Grafieken e en f tonen de toename van de residuele factor als gevolg van de veranderende gronddruk.



Figuur 6-12 Toename van de residuele factor (Rouainia et al., 2020)

De residuele factor toont aan in hoeverre de grond zich plastisch is gaan gedragen. Als de grond plastischer is gaat de sterkte dichter bij de residuele sterkte zitten. Bij een residuele factor van 0 heeft de grond nog zijn pieksterkte en bij een residuele factor van 1 is de grond plastisch geworden en bereikt het zijn residuele sterkte (Metya et al., 2017).

Met behulp van de toename van de residuele factor zoals voorspeld voor het Engelse klimaat, is voor de berekeningen voor een aantal jaren bepaald hoe groot de sterkte op dat moment is. Hierbij is gekeken naar de rode grafieken, en dus de situatie waarin klimaatverandering is gesimuleerd.

Van 2000 tot 2023: De residuele factor blijft relatief constant. In deze periode is te zien dat de ontwikkeling van de waterspanning (pore water pressure) vrijwel constant is gebleven. De sterkte is niet afgenomen omdat ondanks de droogte/nat-cycli, de grond nog niet is blootgesteld aan hogere zuigspanningen door extreme droogte waardoor de druk in de poriën ook relatief constant zijn.

Van 2030 tot 2050: De residuele factor neemt in kleine mate toe. Vanaf 2030 worden voor het Engelse klimaat vaker extreme droogte voorspeld. Dit zorgt ervoor dat de grond van de dijk vaker blootgesteld wordt aan hoge zuigspanningen die nooit eerder zijn voorgekomen waardoor de

ontwikkeling van de afname van de sterkte zich kan voortzetten (zie omschrijving in paragraaf 5.4.1). Dit zorgt ervoor dat de grond van de dijk vaker blootgesteld wordt aan hoge zuigspanningen die nooit eerder zijn voorgekomen waardoor de ontwikkeling van de afname van de sterkte zich kan voortzetten (zie toelichting in paragraaf 5.4.1). In grafiek d is te zien dat vanaf 2030 de waterspanning in de toplaag steeds kleiner wordt. Hogere pieken van de zuigspanningen (bijvoorbeeld in de droge zomer) leiden tot lagere waterspanningen in de grond (Kovacevic et al., 2001; Rouainia et al., 2020). Bovendien zorgen de hogere zuigspanningen in de toplaag ook voor een onderdrukking van de waterspanningen op grotere diepten. Ook dit zorgt voor een toename van de residuele factor.

Van 2050 tot 2064: De residuele factor neemt verder en sneller toe. Steeds grotere verschillen ontstaan tussen hoogste en laagste waterspanningen. Dit komt door de hogere zuigspanningen in de steeds drogere zomers en lagere zuigspanningen in de winter. Dit versnelt het plastisch worden van de grond.

Van 2064 tot 2067: De residuele factor neemt weer iets sneller toe door de grote verschillen tussen hoogste en laagste waterspanningen.

Van 2064 tot 2067: De residuele factor neemt in deze periode sterker toe.

Van 2067 tot 2068: De residuele factor neemt tot zijn maximum toe. Volgens het Engelse model zal de sterkte in 2068 dus de residuele sterkte bereiken en zal de grond zich plastisch gaan gedragen.

Van de vijf perioden zijn stabiliteitsfactoren berekend waarin de sterkte dus steeds is verminderd op basis van de voorspellingen van het Engelse toekomstmodel. In onderstaande tabel (figuur 6-6) is te zien met hoeveel procent de pieksterkte bij elke berekening is verlaagd.

De afname van de sterkte in dit tempo is echter alleen meegenomen voor de lagen die direct invloed ondervinden van zwellen en krimpen dat geïnduceerd wordt door het klimaat (droogte en regen). In deze berekening zijn dat enkel de toplaag, de eerste veenlaag en gedeeltelijk de eerste kleilaag.

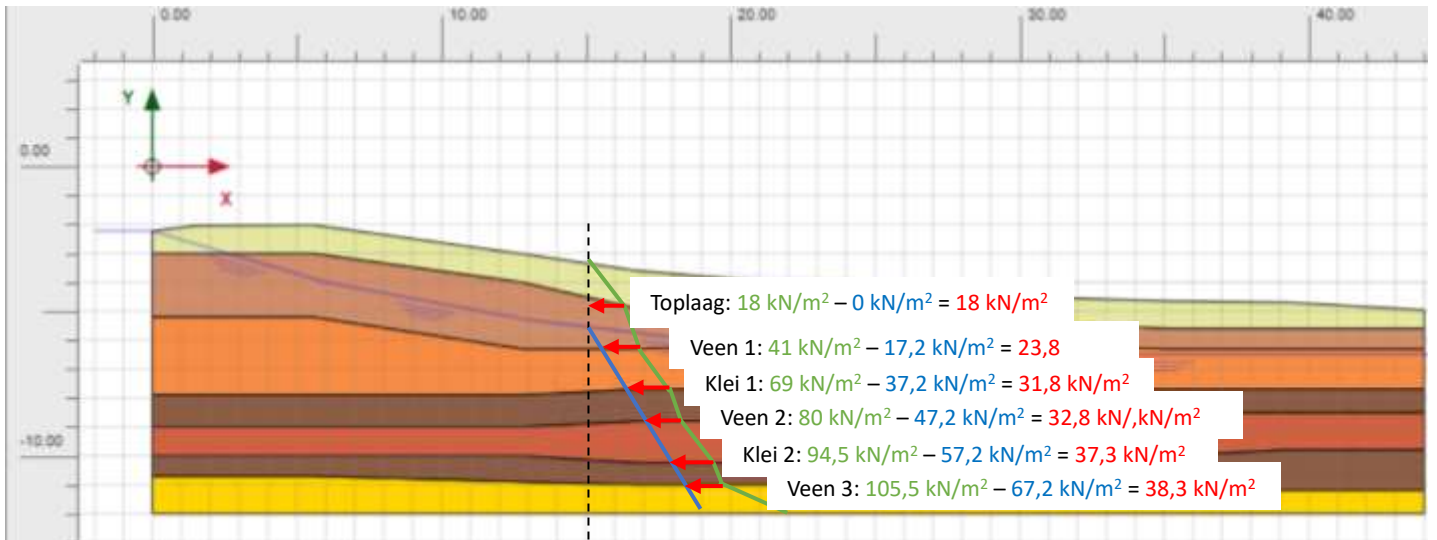
Berekening	1 (2000-2030)	2 (2030-2050)	3 (2050-2064)	4 (2064-2067)	5 (2067-2068)
Toename residuele factor	Van 0,0 naar 0,03	Van 0,03 naar 0,2	Van 0,2 naar 0,4	Van 0,4 naar 0,6	Van 0,6 naar 1
Afname van piek-naar residuele sterkte per periode [%]	3%	17%	20%	20%	40%

Tabel 6-4 Procentuele afname van de schuifsterkte per tijdsperiode (Rouainia et al., 2020)

In de overzichtstabel (zie figuur 6-6) zijn de waarden van de schuifsterkteparameters te zien die in elke berekening, per grondlaag uit de MT-polder is gebruikt.

De volgende stappen zijn genomen om tot de waardes van tabel 6-5 te komen:

Stap 1: De korrelspanning halverwege het binnentalud is voor elke laag bepaald (zie schets 6-14).



Figuur 6-13 Korrelspanningen in de MT-polder (eigen werk)

Stap 2: Met de korrelspanningen is de schuifsterkte per grondlaag bepaald van MT-polder, voor de huidige staat van de dijk (2022). Hiervoor is het associatieve formule van Mohr-Coulomb gebruikt (zie formule 3). De waarden van de φ' en de c' zijn voor de toplaag in 2022 uit de Direct Shear gehaald. De φ' en de c' van de overige lagen in het jaar 2022 zijn aangenomen met behulp van tabel 2b uit NEN9997-1+C2:, 2017 en de PhD kandidaat aan de TU delft (Normcomissie 351 006 Geotechniek, 2017).

Met behulp van de huidige schuifsterktes (2022) en de verhoudingen tussen piek- en residuele sterkte uit tabel 6-3 is terug gerekend naar wat de schuifsterkten waren in het jaar 2000 (de pieksterktes). Met deze verhoudingen is ook vooruit gerekend naar wat de residuele sterktes in 2068 zal zijn. In onderstaande tabel staan de schuifsterkten voor de periode 2000 t/m 2068. De afname van het verschil tussen piek en residueel per periode is gelijk aan de percentages die staan in tabel 6-4.

Grondlaag MT-polder	Schuifsterkte per grondlaag per berekening [kN/m ²]						
	Pieksterkte (2000)	Huidige sterkte (2022)	1 (2030)	2 (2050)	3 (2064)	4 (2067)	5 Residuele sterkte (2068)
Toplaag Ks1	16,17	16,06	16,05	15,55	14,96	14,47	13,23
Veen 1	20,97	20,93	20,92	20,69	20,41	20,16	19,59
Klei 1	21,64	21,63	21,61	21,20	20,70	20,19	19,19
Veen 2	Niet aangepast	29,72	Niet aangepast				
Klei 2		27,41					
Veen 3		33,86					

Tabel 6-5 Schuifsterkte per grondlaag per berekening

Stap 3: In PLAXIS kan enkel een waarde voor de φ' en de c' ingevoerd worden. Als laatste is dus berekend hoe groot deze parameters in de tussenliggende perioden moeten zijn om de schuifsterkten die in tabel 6-5 staan te verzorgen. In komende paragraaf wordt toegelicht hoe dit is gedaan. Voor de toplaag is de schuifsterkte bepaald met behulp van de φ' en de c' die uit de Direct Shear proef zijn gekomen.

6.5 Uitvoering berekeningen

In PLAXIS wordt voor Mohr-Coulomb de hoek van inwendige wrijving (φ') en de cohesie (c') ingevoerd als schuifsterkteparameters. In deze paragraaf worden deze berekend voor de verschillende tijdsperioden waarvoor de afname van de schuifsterkte is berekend.

Bepaling hoek van inwendige wrijving

Volgens de formule van Mohr-Coulomb (zie formule 3) nemen de hoek van inwendige wrijving en de cohesie af wanneer de schuifsterkte afneemt. De schuifsterkte en de korrelspanning zijn in de vorige paragraaf bepaald (zie paragraaf 6.4.3). Tussen de piek sterkte en de residuele sterkte bevindt zich de "Critical State"-sterkte. Bij de Critical State is de cohesie nul. Gebruikelijk is het dus om bij de residuele sterkte, die lager is dan de Critical State, aan te nemen dat de cohesie nul is (Van Duinen, 2014). Voor de toplaat en de eerste kleilaag wordt dus aangenomen de cohesie dus 0 in het jaar 2068.

Voor de residuele sterkte (2068) wordt de φ' vrijgemaakt door de c' gelijk te stellen aan 0. Hierbij verandert de korrelspanning niet. Met de volgende formule is de φ' berekend:

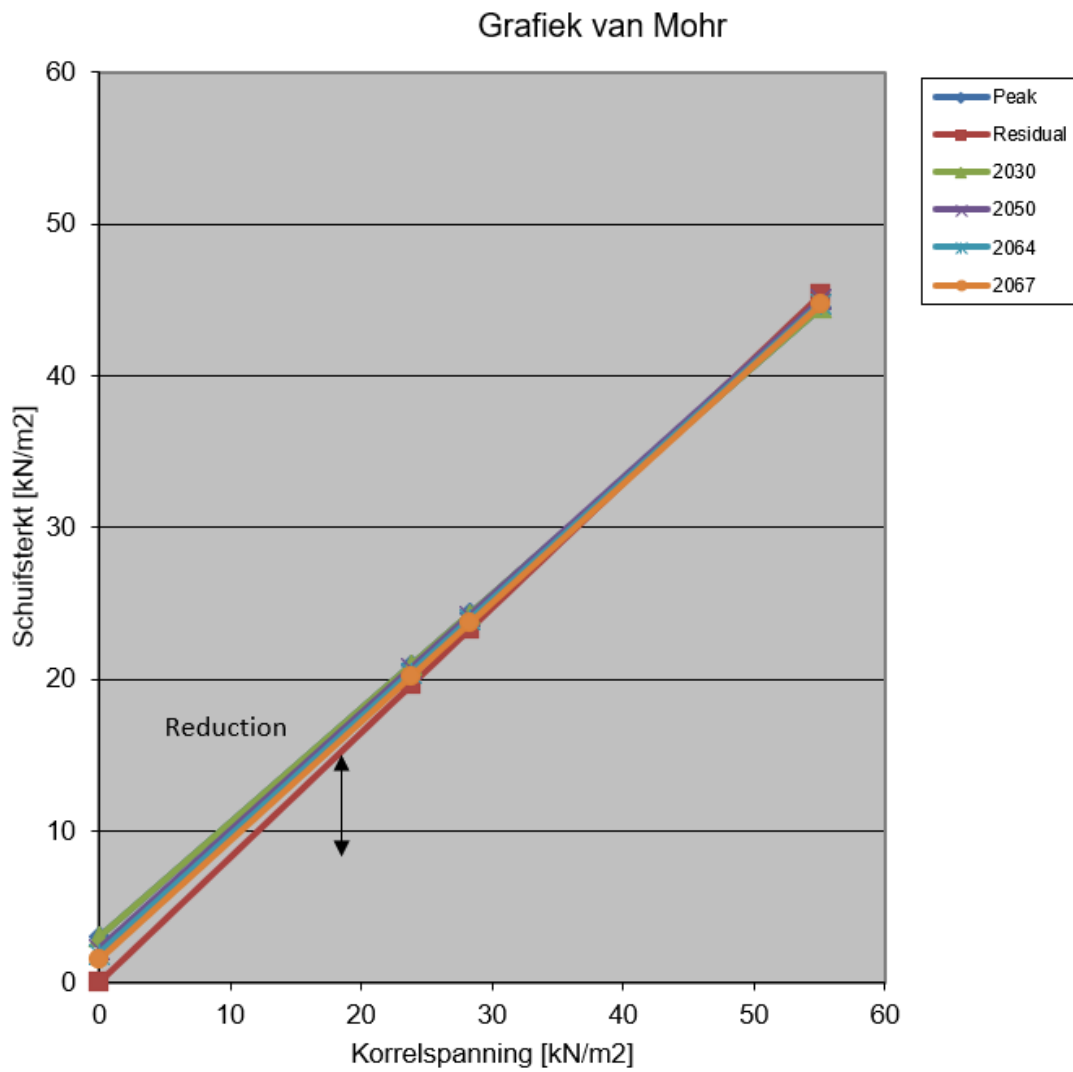
$$\varphi' = \tan^{-1}\left(\frac{\tau}{\sigma'_n}\right) \quad \text{formule 8}$$

De bepaling van de φ' en de c' van de tussenliggende perioden is gedaan door de hoek van inwendige wrijving en cohesie iteratief te berekenen met de schuifsterkten uit tabel 6-5 (zie voorbeeld in figuur 6-15). Figuur 6-15 toont het verschil tussen de piek en de residuele sterkte (voor veen in dit geval 1,37 kN/m²). De te verwachten schuifsterkte in 2030 (genoemd: "De te bereiken schuifsterkte in 2030") wordt bepaald met behulp van bijbehorende procentuele afname. In de periode 2000 t/m 2030 neemt de pieksterkte af met 3% van het verschil tussen piek en residueel (zie percentages per periode in tabel 6-4). De sigma's zijn de korrelspanningen bij bepaalde belastingen. Een korrelspanning van 23,80 kN/m² is bepaald met figuur 6-14. De overige korrelspanningen volgen uit de belastingen van de Direct Shear proef. Met behulp van deze verschillende korrelspanningen kunnen 3 punten worden uitgezet in de grafiek van Mohr waar een lijn doorheen getrokken wordt (zie figuur 6-16). De φ en de c worden vervolgens iteratief bepaald aan de hand van de vooraf bepaalde schuifsterkte voor bijbehorende jaar. In onderstaande voorbeeld geeft een c van 2,98 en een φ van 37,01 een schuifspanning van 20,921 kN/m². Dit komt overeen met de schuifsterkte die 2030 behoort te hebben volgens de afname voor deze periode.

verschil piek er rest			1,371577471
De te bereiken schuifsterkte in 2030			20,92567833
situatie in 2030		sigma (kN/m2)	Tau (kN/m2)
cohesion kPa	2,98	0	2,98
		23,80	20,92109989
angel of friction	37,01	28,27	24,29070983
		55,06	44,48575462

Figuur 6-14 Voorbeeld bepaling hoek van inwendige wrijving en cohesie

Figuur 6-16 weergeeft de afname van de cohesie en de hoek van inwendige wrijving (steilheid van de lijn) in de grafiek van Mohr-Coulomb.



Figuur 6-15 Grafiek van Mohr-Coulomb voor laag Veen1 (eigen werk)

6.6 Resultaten

In de vorige paragrafen zijn de parameters voor de berekeningen van de stabiliteit van de dijk bepaald. Door deze parameters in PLAXIS in te voeren is gecontroleerd of hier ook realistische waardes uit kwamen. Tijdens het berekenen zijn de ingevoerde parameters een paar keer aangepast om tot de meest realistische faalcurve te komen.

Sterkte afname verdeeld over de phi en de c

Omdat de schuifsterkte in PLAXIS bij Mohr coulomb uitgedrukt wordt in een φ' en een c' waarde moet de afname van de φ' en de c' bepaald worden. Om de afname van de schuifsterkte zo realistisch mogelijk in PLAXIS in te voeren, moet een verhouding tussen de φ' en de c' bepaald worden. Als eerste is gekozen om de φ' en c' zo gelijk mogelijk te laten afnemen. Hieruit zijn de volgende stabiliteitsfactoren gekomen:

- Voor 2030 is de Sf: 3,775
- Voor 2050 is de Sf: 3,517
- Voor 2064 is de Sf: 3,331
- Voor 2067 is de Sf: 3,136
- Voor 2068 is de Sf: 2,766

Hieruit is te zien dat de stabiliteit onrealistisch sterk afneemt. Dit betekent dat de phi en de c waardes niet op deze manier bepaald kunnen worden.

Verzwakte waardes per lagen

Om te bepalen welke grondlaag de meeste bijdrage levert aan de afname van de stabiliteit wordt een stabiliteitsfactor uitgerekend waarbij van één grondlaag de sterkte wordt afgenomen tot de residuele sterkte. Dit is gedaan voor het jaar 2068 omdat hier de sterkte het meest is afgenomen en zo duidelijk gezien kan worden welke grondlaag de meeste bijdrage levert aan de stabiliteit. Hieruit zijn de volgende waardes gekomen:

- Aangepaste top laag: 3,634
- Aangepaste veen laag: 3,615
- Aangepast klei laag: 2,903

Dit maakt duidelijk dat de klei laag de meeste bijdrage levert aan de stabiliteit van de dijk.

Na het aanpassen van deze waarden is het volgende geconcludeerd. De c' van de top laag en eerste veen laag nemen af tot 0 omdat deze lagen sterk beïnvloed worden door het klimaat en uiteindelijk de residuele sterkte bereiken (zie paragraaf 6.5). De eerste klei laag wordt in mindere mate beïnvloed door het klimaat omdat deze zich op grotere diepte bevindt. Voor deze laag is aangenomen dat de schuifsterkte tot de helft van het verschil tussen piek- en residueel afneemt. Daarom neemt de cohesie in deze laag voor de helft af (zie figuur 6-17). Verder wordt aangenomen dat de lagen daaronder niet beïnvloed worden door het klimaat omdat ze hier te diep voor liggen, het krimpen en het zwellen door droogte en regen zal niet zo ver doorwerken in de dijk. In figuur 6-12 is ook te zien dat de waterdruk op een diepte van 5,6 m al in veel mindere mate fluctueert dan op 0,8 m en maar weinig wordt beïnvloed.

Veranderde grondwaterstand

In figuur 6-18 zijn de stabiliteitsfactoren bij de juiste hoek van inwendige wrijving en cohesie te zien. Wat hierbij opviel was dat veel verschil zat tussen de waardes van 2022 en 2030. Hierom is een nieuwe berekeningen gedaan bij een gelijkblijvende grondwaterstand. Hier is te zien dat de stabiliteitsfactoren gelijkmatiger afneemt. Door beter naar de ingevoerde waardes voor de grondwaterstand in PLAXIS te kijken bleek dat de grondwaterstand voor de jaren 2000 en 2022 nog niet overeen kwamen met de gemeten data. Hierna is de juiste grondwaterstand voor de jaren

ingevuld en neemt de grondwaterstand voor de overige jaren ook meer gelijkmatig toe (zie figuur 6-17).

Berekening	Omschrijving	Toplaag Ks1				Veen 1				Klei 1				Grondwaterstand (m t.o.v. maaiveld)
		schuifsterkte	φ (°)	σ (kN/m ²)	C (kN/m ²)	schuifsterkte (kN/m ²)	φ (°)	σ (kN/m ²)	C (kN/m ²)	schuifsterkte	φ (°)	σ (kN/m ²)	C (kN/m ²)	
1	Berekening Stabiliteit 2000 bij de hoogste grondwaterstand	16,17	38,13	18	2,05	20,97	36,94	23,8	3,07	21,64	29,02	31,8	4,00	-0,72
2	Berekening Stabiliteit 2022 bij de hoogste grondwaterstand	16,06	38,00	18	2,00	20,93	37,00	23,8	3,00	21,63	29,00	31,8	4,00	-0,70
3	Berekening Stabiliteit 2030 bij de hoogste grondwaterstand	16,05	37,99	18	1,99	20,92	37,01	23,8	2,98	21,61	28,99	31,8	3,99	-0,67
4	Berekening Stabiliteit 2050 bij de hoogste grondwaterstand	15,55	37,62	18	1,68	20,69	37,85	23,8	2,20	21,20	28,90	31,8	3,64	-0,62
5	Berekening Stabiliteit 2064 bij de hoogste grondwaterstand	14,96	37,10	18	1,35	20,41	37,89	23,8	1,89	20,70	28,50	31,8	3,43	-0,59
6	Berekening Stabiliteit 2067 bij de hoogste grondwaterstand	14,47	36,92	18	0,95	20,16	38,10	23,8	1,50	20,19	28,19	31,8	3,15	-0,58
7	Berekening Stabiliteit 2068 bij de hoogste grondwaterstand	13,23	36,31	18	-	19,59	39,46	23,8	-	19,19	28,40	31,8	2,00	-0,58

Figuur 6-17 Ingevoerde parameters per berekening (eigen werk)

In de bovenstaande figuur (zie figuur 6-17) zijn de omschrijvingen van de gemaakte berekeningen te zien. Ook zijn de ingevoerde parameters per berekening te zien.

Stabiliteitsfactoren

In figuur 6-18 zijn de resultaten van de berekeningen te zien. De stabiliteitsfactor neemt af van 3,942 naar 3,057, dit betekent dat de stabiliteitsfactor iets minder dan 1 [-] is afgenomen. In 2068 zou in deze situatie de stabiliteit lager zijn geworden maar de dijk zal nog niet afschuiven. In bijlage VI zijn de resultaten van de berekeningen bijgevoegd. In deze figuur worden de waardes uit de laatste kolom gebruikt voor de faalcurve.

omschrijving	Veiligheidsfactor bij de eerste grondwaterstand (-)	Veiligheidsfactor bij een gelijk blijvende grondwaterstand (-)	Veiligheidsfactor bij de juiste grondwaterstand (-)
1 Berekening Stabiliteit 2000 bij de hoogste grondwaterstand	4,251	4,259	3,942
2 Berekening Stabiliteit 2022 bij de hoogste grondwaterstand	4,245	4,245	3,924
3 Berekening Stabiliteit 2030 bij de hoogste grondwaterstand	3,774	4,245	3,842
4 Berekening Stabiliteit 2050 bij de hoogste grondwaterstand	3,582	4,123	3,626
5 Berekening Stabiliteit 2064 bij de hoogste grondwaterstand	3,451	4,01	3,493
6 Berekening Stabiliteit 2067 bij de hoogste grondwaterstand	3,319	3,893	3,348
7 Berekening Stabiliteit 2068 bij de hoogste grondwaterstand	3,057	3,611	3,054

Figuur 6-18 Resultaten berekening stabiliteitsfactoren (eigen werk)

6.7 Conclusie

In dit hoofdstuk is de deelvraag “Hoe groot is de verandering van de stabiliteit van dijklichamen onder invloed van het klimaat?” beantwoord. Dit is gedaan door een aantal stabiliteitsberekeningen te doen met de afgenomen schuifsterkte en de toegenomen grondwaterstand. Eerst is hiervoor de dijk van de MT-polder in kaart gebracht. Om de berekeningen uit te voeren is voor het programma PLAXIS gekozen. Hierin is gekozen om te werken met Mohr-Coulomb associatief. Hieronder zijn de parameters voor de klimaatinvloeden bepaald, hierbij wordt ingegaan op de grondwaterstand en de schuifsterkte.

Om de grondwaterstand in de toekomst in kaart te brengen is bepaald hoeveel hoger de hoogste grondwaterstand wordt. Door een toename in piekbuien (zie hoofdstuk 3) en een verandering in de doorlatendheid van de grond wordt de hoogste grondwaterstand in de toekomst waarschijnlijk nog hoger. De doorlatendheid verandert doordat het aantal scheuren in de dijk toe zal nemen door onder andere droogte, ook kunnen deze scheuren breder en dieper worden waardoor de doorlatendheid zal toenemen. In paragraaf 6.4.1 worden voorbeelden gegeven waarbij scheuren zorgen voor een toename in de doorlatendheid. Aan de andere kant kan een drogere dijk ook minder doorlatend worden doordat het water wat nog in de dijk zit alleen in de kleinste poriën van de grond zit. Het is duidelijk dat de neerslag met een bepaalde hoeveelheid toe zal nemen. Daarnaast is het niet duidelijk hoe de doorlatendheid onder invloed van het klimaat zal veranderen. Hierdoor is het onverantwoord om met een verhoging van de neerslag en een verandering van de doorlatendheid een toename in de grondwaterstand te berekenen. De verhoging van de grondwaterstand is daarom bepaald met kaarten van het Nationaal Water Model-Basisprognoses 2016. Dit geeft een verhoging van de hoogste grondwaterstand van 0,175 m in 2050 ten opzichte van de huidige grondwaterstand.

Naast een hogere grondwaterstand wordt in de berekeningen ook een verlaging van de pieksterkte naar de residuele sterkte meegenomen. Zoals in hoofdstuk 5 is uitgelegd neemt de pieksterkte van de grond af naar een aantal droog/nat-cycli. Dit proces wordt versterkt wanneer de grond droger wordt dan dat het ooit is geweest. Per grondsoort kan een ratio bepaald worden waarmee aangegeven wordt hoeveel lager de residuele sterkte is ten opzichte van de pieksterkte van de grond. De pieksterktes in 2022 van de grond zijn bepaald op basis van de grondsoort en met bijbehorende ratio is de residuele sterkte bepaald. Om het tempo van de afname van piek naar residuele sterkte te bepalen is een Engels onderzoek gebruikt waarin de deze afname gemodelleerd is onder invloed van het klimaat. Door het percentage afname van de sterkte naar een aantal jaar te berekenen kan dit model ook gebruikt worden om de afname van de sterkte van de grond bij de MT-polder te gebruiken. Omdat dit model bepaald is voor het klimaat van een ander land kunnen de uitkomsten minder accuraat zijn. Wel is het Engelse klimaat vergelijkbaar met het klimaat van Nederland en lijken de voorspellingen van de Engelse klimaatscenario's op die van het KNMI. Hierom is ervoor gekozen om dit model wel te gebruiken. Met het Engelse model is bepaald wat de afname van de piekschuifsterkte naar de residuele schuifsterkte is.

Omdat in PLAXIS met Mohr-Coulomb de schuifsterktes worden gekarakteriseerd met φ en c , zijn de afgenomen schuifsterktes omgezet in φ en c waardes. Bij de eerste twee grondlagen is ervoor gekozen om de cohesie gelijk te stellen aan nul in 2068 omdat in dit jaar volgens dit model de residuele sterkte wordt bereikt. Bij de residuele sterkte mag aangenomen worden dat de cohesie nul is geworden. Bij een gelijkblijvende korrelspanning is vervolgens de φ vrijgemaakt. Daarna is de φ en de c van de andere jaren uitgerekend door dezelfde snelheid van afname als de schuifsterkte aan te houden. Bij de derde grondlaag zal het klimaat minder invloed hebben en is ervoor gekozen om hierbij de afname van de piek- naar residuele sterkte slechts te halveren. De helft van de totale cohesie is hierbij ingevoerd en daarmee is de hoek van inwendige wrijving berekend.

Nadat alle parameters compleet waren zijn de berekeningen uitgevoerd. Hieruit is gekomen dat de stabiliteitsfactor van de grond afneemt van ongeveer 4 tot 3 [-]. Dit is een afname van circa 25% maar de dijk voldoet nog steeds aan de norm.

7. Faalcurves en optimalisering van beheer en onderhoud

7.1 Inleiding

De berekeningen uit hoofdstuk 6 worden in dit hoofdstuk samengevoegd tot een faalcurve. Deze faalcurve zou als input kunnen dienen voor in een digitale tweeling. Met behulp van literatuur en interviews is eerst een beeld geschetst van wat een digitale tweeling is en van wat waterkeringsbeheerders vinden dat een dergelijk model zou moeten kunnen om beheer en onderhoud te optimaliseren.

De faalcurve voor de dijk uit de MT-polder weergeeft de afname van de stabiliteitsfactor onder invloed van droog/nat-cycli en een verhoging van de grondwaterstand. Om vervolgens aan te tonen dat het verloop van de degradatie afhankelijk is van verschillende factoren, is de curve van de MT-polder geïndexeerd. Met behulp van deze grafiek zijn andere situaties vergeleken met de dijk van de MT-polder. Zo wordt weergegeven dat de afname van de stabiliteit bij een steilere of flauwere dijk, dijken bestaande uit andere grondsoorten en dijken waarvan het binnentalud gericht is naar het zuiden, anders loopt. Hiermee wordt aangetoond dat iedere dijk een eigen faalcurve dient te hebben.

Hiermee is uiteindelijk een antwoord gegeven op deelvraag 5 *“Hoe kan deze informatie verwerkt worden in een digitale tweeling voor een optimalisering van beheer- en onderhoudsmethoden?”*.

7.2 Digitale Tweeling

Een digitale tweeling (DT) is een virtuele 3D representatie van de werkelijkheid. Rijkswaterstaat werkt aan een dergelijke digitale tweeling voor een dijklichaam. In het kader van de zorgplicht dienen waterkeringsbeheerders inzicht te hebben in de toestand van een waterkering. Met deze inzicht kan benodigde onderhoud ingepland worden of kan ingegrepen worden in geval van extreme situaties zoals hoogwater, droogte, storm, extreme neerslag et cetera.

Om inzicht te verkrijgen in de stabiliteit van een kering is het monitoren en analyseren van het gedrag van de kering van belang. Door in het model data van de huidige conditie van de dijk te verwerken, verandert het model met de werkelijkheid mee. Hierdoor kan continu de stabiliteit in kaart gebracht worden. Beheer en onderhoud kan zo geoptimaliseerd worden doordat betere voorspellingen gedaan kunnen worden (STOWA, 2021; Van Hemert, 2021).

Het doel van de ontwikkeling van deze digitale tweeling is dan ook het continu zo goed mogelijk in beeld brengen van de veiligheid van een waterkering. Het inzicht dat de digitale tweeling met zich meebrengt verkleint ook onzekerheden over de eigenschappen van de kering (en de ondergrond). Dit resulteert in meer realistische en gunstige uitgangspunten bij het ontwerpen of beoordelen van een kering. Dit zorgt ervoor dat het beschermen tegen overstromingen doelmatig blijft (Van Hemert, 2021).

Volgens de plannen van Rijkswaterstaat dient de digitale tweeling het volgende te kunnen:

- het voorspellen van de veiligheid van de kering tijdens extreme belastingen, inclusief de waarschijnlijke faalmechanismen. Zo kunnen inspecties en eventuele noodmaatregelen gespecificeerd worden;
- een inschatting maken van de ernst van de degradatie van de sterkte en de tijdsperiode waarin deze degradatie hersteld moet worden.

Aan medewerkers van waterschappen (potentiële gebruikers van de DT) is ook gevraagd wat zij zouden willen dat een digitale tweeling zou kunnen doen (zie Bijlage I – interviews 4 t/m 7):

- waarschuwing geven van wanneer de grondwaterstand te hoog of te laag is waardoor problemen met de stabiliteit kunnen ontstaan;

- waarschuwing geven wanneer de vochtigheid in de kleilaag te laag is en scheuren kunnen ontstaan (zodat preventieve maatregelen genomen kunnen worden);
- risico's in kaart brengen om risico gestuurd beheer en onderhoud te kunnen plegen;
- helpen bij het vormen van beheerdersoordeel door stabiliteitsberekeningen te maken van de huidige conditie;
- aangeven hoe urgent een schadebeeld is;
- het in kaart brengen van deformaties;
- stabiliteit van een gekozen dwarsprofiel in de dijk berekenen;
- als onderbouwing voor het maken van bepaalde keuzes (zoals het wel of niet uitvoeren van een dijkversterking op een bepaalde plek op de dijk).

7.3 Faalcurve

Een van de punten waaraan de digitale tweeling moet voldoen is dat het de ernst van de degradatie van de sterkte moet monitoren. Een beeld van de degradatie zelf is dus nodig om te concluderen hoe ernstig de degradatie daadwerkelijk is.

Verschillende invloeden kunnen leiden tot een degradatie van de stabiliteit van de dijk (zie hoofdstuk 5). In Nederland wordt (nog) geen rekening gehouden met de invloeden van het klimaat op de degradatie van de sterkte van de grondeigenschappen van een kering. Echter heeft het klimaat weldegelijk invloed op deze grondeigenschappen. Met behulp van de uitgevoerde literatuurstudie en de uitkomsten van de PLAXIS berekeningen wordt in dit hoofdstuk een faalcurve voor de effecten van droogte op de grondeigenschappen ontworpen.

In een faalcurve wordt de degradatie van de stabiliteit van een grondlichaam onder een bepaalde invloed tegen de tijd afgezet. In dit geval wordt invloed van het droog en nat worden van de grond en een verhoogde grondwaterstand gedurende een bepaalde tijdsperiode in kaart gebracht. De snelheid van de toekomstige verandering van de sterkte kan dus afgelezen worden in de grafiek (Briggs et al., 2019). De curve is nodig om deze invloeden te verwerken in de digitale tweeling. Bovendien zou de faalcurve ook kunnen bijdragen bij het ontwerpen van klimaatbestendige dijken. Zo zou met behulp van de faalcurve een beeld van de degradatie van de toplaag geschetst kunnen worden. Hiermee kan de optimale dikte van de toplaag al in de ontwerpfasen bepaald worden om de kern van de dijk lang tegen de invloeden van het klimaat te beschermen (zie Bijlage I – interview 2).

7.3.1 Normering regionale keringen

De verantwoordelijke voor het normeren van keringen langs boezems en regionale rivieren zijn de provincies. Deze veiligheidsnormen zijn uitgedrukt in een gemiddelde overschrijdingskans per jaar. Elk dijkvak moet afzonderlijk berekend worden op deze gemiddelde overschrijdingskans (Rijksoverheid, z.d.-b).

De provincies kunnen de regionale dijken normeren met behulp van door STOWA opgestelde richtlijnen. Volgens deze richtlijnen moeten de normen geformuleerd worden op basis van een minimale eis voor de veiligheid: de afkeurgrenzen. Dit betekent dat de veiligheid van de dijk aan deze grenzen moet voldoen. Zo niet, dan moet de dijk versterkt worden. Voor regionale keringen aangenomen dat een kering faalt zodra de waterstand het toetspeil¹¹ overschrijdt. De norm die aan een kering wordt gekoppeld weergeeft de gevolgschade die geaccepteerd wordt bij het falen van de kering, hierin worden slachtoffers niet meegenomen (Tienstra et al., 2008).

¹¹ Toetspeil: de gebruikte waterstand bij de beoordeling van de toestand van de waterkering met een overschrijdingsfrequentie conform de norm (Tienstra et al., 2008)

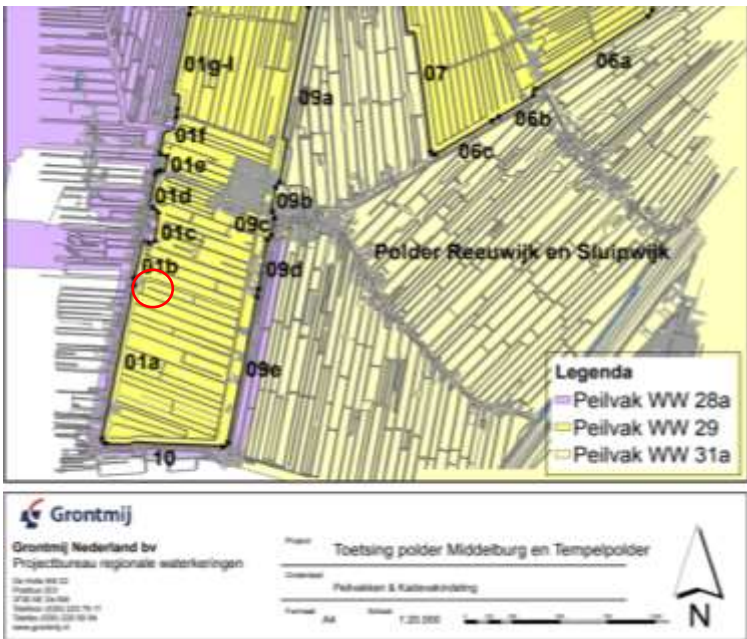
Aangezien de normen gebaseerd zijn op de mogelijke gevolgschade naar het falen van een dijk(vak), verschilt de norm per dijkvak. De norm is daarom verdeeld in verschillende klassen. Afhankelijk van de te verwachten gevolgschade kan een klasse gekoppeld worden aan een bepaald dijkvak (zie figuur 7-1).

Klasse	Veiligheidsnorm	Gevolgschade voor de klasse [mln. Euro]	Frequentie van de maatgevende rivierwaterstand voor bepaling gevolgschade
I	1/10	< 8	1/10
II	1/30	8 - 25	1/30
III	1/100	25 - 80	1/100
IV	1/300	80 - 250	1/300
V	1/1.000	>250	1/1.000

Figuur 7-1 Normering voor keringen langs regionale rivieren en boezemkaden (Tienstra et al., 2008)

De dijk in de MT-polder valt onder klasse III en heeft dus een veiligheidsnorm van 1/100. Dit betekent dat de kering een waterstand (het toetspeil) moet kunnen keren die gemiddeld 1 keer in de 100 jaar voorkomt. Het kade vak waar de grondmonsters zijn verzameld voor de proeven en waar de berekeningen voor zijn gemaakt valt op de grens van peilvakken WW29 01a en WW29 01b (zie figuur 7-2). Hierbij hoort een toetspeil van -2,08 [m t.o.v. NAP] en een boezempeil van -2,23 [m t.o.v. NAP] (zie figuur 7-3).

Tussen de kruin en het toetspeil van de dijk uit de MT-Polder zit een marge van 8 cm (zie schets in figuur 7-4). Als de kruin 8 cm zou dalen (door bijvoorbeeld onomkeerbare krimp) wordt de norm overschreden. Dit betekent dat maatregelen getroffen worden. Het ophogen van de kruin zorgt echter voor meer gewicht dat op de teen “hangt” en kan de deformatie in de teen versterken. Ophogingen zouden dus kunnen leiden tot een sneller afname van de sterkte van de onderliggende lagen, waardoor de stabiliteit sneller zou afnemen en de curve steiler zou lopen. Ondanks de extra belasting, zou de extra aangebrachte laag voor de ophoging de verzwakte lagen eronder meer bescherming bieden tegen uitdroging. Ophogingen zouden dus ook voor een langzamere degradatie kunnen zorgen. Om te concluderen of ophogen een meer positief of negatief effect heeft op de degradatie van de sterkte onder invloed van drogen en nat worden van de grond, dient hier meer onderzoek naar gedaan te worden. In de aanbeveling wordt hier verder op ingegaan (zie paragraaf 9.2).

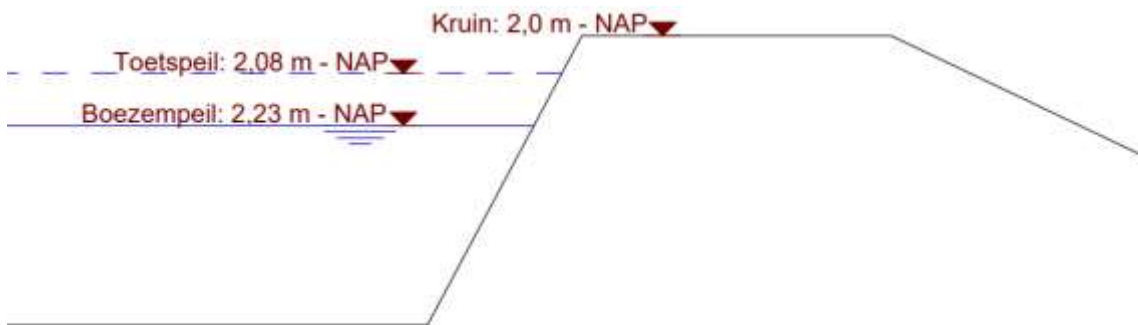


Kadevak	Boezempeil winterpeil = zomerpeil [m tov NAP]	Toetspeil ¹ (situatie hoogwater) [m tov NAP]	Hoog boezempeil ¹ (situatie droogte) [m tov NAP]
WW29-32-01	-2.23	-2.08	-2.15
WW29-32-02	-2.23	-2.08	-2.15
WW29-32-03	-2.23	-2.08	-2.15
WW29-32-04	-2.20	-2.06	-2.12
WW29-32-05	-2.20	-2.06	-2.12
WW29-32-06	-2.20	-2.06	-2.12
WW29-32-07	-2.20	-2.06	-2.12
WW29-32-08	-2.20	-2.06	-2.12
WW29-32-09a-c	-2.20	-2.06	-2.12
WW29-32-09d-e	-2.40	-2.25 ²	-2.32
WW29-32-10	-2.23	-2.08	-2.15

¹ Toetspeil = MBP + windopzet;
² Afwijkend peil voor deze kade: Toetspeil = Streefpeil NAP +0,15 m (= verschil tussen streefpeil en toetspeil van peilgebied WW-28a). Vastgesteld in overleg met J. Veldhuisen;
³ Schatting: 0,08 m boven streefpeil (in overleg met voormalig beheerder, A. van Elswijk);

Figuur 7-2 Streefpeilen boezem (Van der Beek, 2009)

Figuur 7-3 Peilvakken en kadevakindeling MT-polder (Van der Beek, 2009)



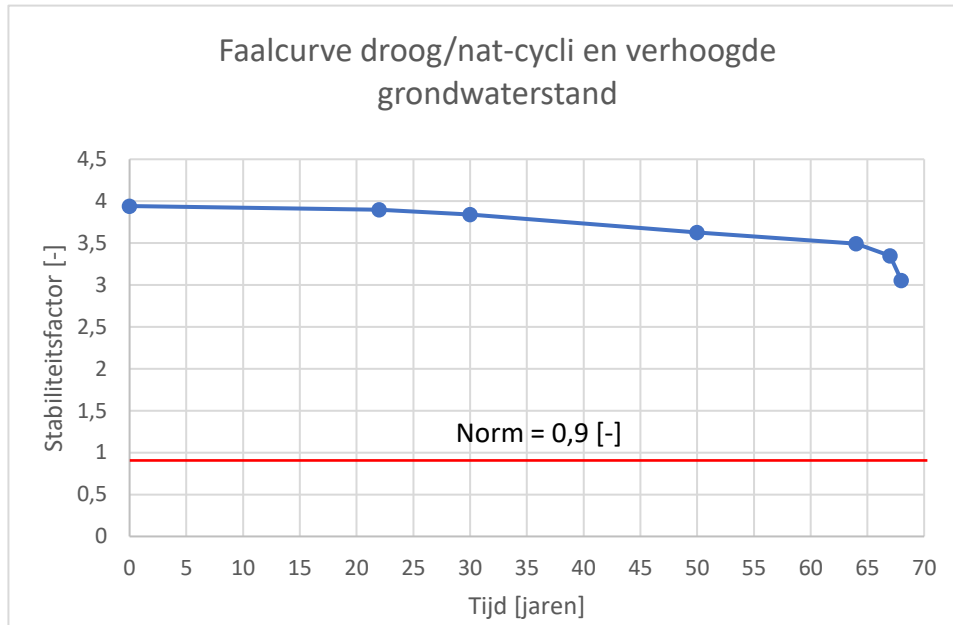
Figuur 7-4 Schets MT-Polder met boezempeil, toetspeil en kruinhoogte (eigen werk)

Vereiste stabiliteitsfactor

Verder geldt voor de dijk uit de MT-polder dat deze (voor de macrostabiliteit) bij een semi-probabilistische berekening een stabiliteitsfactor van groter dan 0,9 [-] moet hebben om te voldoen aan de norm (Van der Beek, 2009). Door de norm mee te nemen in de faalcurve kan makkelijk afgelezen worden of/wanneer de dijk de norm overschrijdt. Hierdoor kunnen waterkeringsbeheerders meer risico gestuurd te werk gaan. In figuur 7-5 is te zien dat voor dit voorbeeld, de dijk (nog) voldoet aan de norm.

7.3.2 Faalcurve droog/nat-cycli en verhoogde grondwaterstand

De stabiliteitsfactoren die berekend zijn in hoofdstuk 6 voor de dijk in de MT-polder, zijn in onderstaande grafiek (Zie figuur 7-5¹²) tegen de tijd uitgezet. In deze grafiek is de degradatie van de sterkte te zien onder invloed van een steeds hogere grondwaterstand en het nat worden en weer opdrogen van de grond naar een bepaald aantal jaren sinds de bouw van de dijk. De stabiliteitsfactor daalt door de degraderende schuifsterkte van de grond.



Figuur 7-5 Faalcurve door droog/nat-cycli en verhoogde grondwaterstand (eigen werk)

In $t = 0$ jaren is de sterkte van de grond net zo groot als de pieksterkte en in jaar $t = 68$ jaar is de sterkte afgenomen naar de residuele sterkte. Dit geldt enkel voor de grondlagen die beïnvloed worden door droogte en regen en dus zwellen en krimpen (zie hoofdstuk 4.6). Naarmate het klimaat verandert en extremere droogten en regenbuien optreden, wordt de zone van de grond die zwelt en krimpt steeds groter. Dit omdat de hoogste grondwaterstand hoger wordt, en de laagste grondwaterstand lager.

De dijk in de MT-Polder is echter al ouder dan 68 jaar. Het heeft nog niet de heftige klimaatverandering ondergaan die is meegenomen in de uitgangspunten van de berekeningen. Echter heeft de grond van de dijk sinds de bouw al wel enkele mate van zwellen en krimpen ondergaan. Dit geldt voornamelijk voor de bovenste lagen van de dijk en zijn deze dus al in enkele mate verzwakt. De lagen hieronder zijn nog niet/weinig verzwakt. Aangezien verwacht wordt dat de zone die wordt beïnvloed door het zwellen en krimpen van de grond steeds groter wordt door klimaatverandering, wordt ook een verzwakking van de onderliggende lagen verwacht. Voor een meer realistische faalcurve van bestaande dijken is het dus belangrijk om een inschatting te maken van in hoeverre de sterkte al is afgenomen sinds de bouw van de dijk. Dit zou kunnen door oudere toetsingen en labonderzoeken te vergelijken met de huidige labonderzoeken en toetsingen.

De faalcurve uitgezet tegen de tijd kan makkelijker ingeschat worden voor nieuw te bouwen dijken. Dit kan door direct naar de bouw te meten wat de sterkte is van de grondlagen (in situ en/of in het lab) en met behulp van een klimaatmodel te beredeneren wanneer en hoe snel deze afneemt naar de residuele sterkte.

¹² De stabiliteitsfactoren in de curve zijn voor de gemiddelde waarden van de sterkte bepaald. Deze sterkte schetst een meer realistisch beeld van de sterkte van dijk omdat deze nog niet is gedeeld door veiligheidsfactoren.

7.4 Optimalisering beheer en onderhoud

7.4.1 Huidige beheer- en onderhoudsmethoden

Volgens de zorgplicht hebben waterkeringsbeheerders de plicht om ervoor te zorgen dat keringen voldoen aan de veiligheidseisen. Bovendien moet de beheerder voor (preventief) beheer en onderhoud zorgen. De Inspectie voor Leefomgeving en Transport (ILT) controleert waterschappen op deze plicht (Waterschap Aa en Maas, z.d.).

Beheren van de dijk

Om ervoor te zorgen dat een kering zijn functie duurzaam kan uitvoeren is een geheel van activiteiten dat onder het beheren van de dijk valt om dit doel te bewerkstelligen. Een van de kernactiviteiten die onder beheren valt is het inspecteren van de dijk. Met behulp van deze inspecties wordt de staat van de kering in kaart gebracht en kan, op basis van onder andere hiervan, de dijk getoetst worden.

Inspecties worden als volgt onderverdeeld:

- reguliere inspecties, voor het opnemen van eventuele schade aan de kering;
- inspecties tijdens maatgevende situaties. Hiermee moet schade dat tot bezwijken kan leiden vroegtijdig gesignaleerd worden zodat noodmaatregelen getroffen kunnen worden (Fugro Ingenieursbureau BV et al., 2007).

Regionale dijken worden geregeld geïnspecteerd en getoetst. Echter worden afspraken hierover per provincie gemaakt waardoor de frequentie en het moment van inspecteren per waterschap kan verschillen (Unie van Waterschappen & ABF Research, 2022).

Een van de inspecties tijdens maatgevende situaties zijn droogte inspecties. Door de verschillende afspraken met de provincies verschilt de frequentie en de beredenering voor wanneer deze droogte inspecties worden uitgevoerd. In tabel 7-1 is verwerkt hoe vaak een aantal waterschappen een droogte inspectie heeft uitgevoerd in het jaar 2022 (Kloosterboer & Biemans, 2023). In de tabel ontbreken duidelijke waarden van bijvoorbeeld de frequentie, dit is niet volledig duidelijk uit het interview te herleiden maar schetst wel een algemeen beeld.

De tabel is aangevuld met informatie uit een interview met Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier en een met Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden dat voor dit onderzoek is afgenomen (zie Bijlage I – interviews 4, 6 en 7).

Tabel 7-1 Frequentie droogte-inspecties per waterschap (Kloosterboer & Biemans, 2023) (aangevuld met eigen werk)

Waterschap	Frequentie droogte-inspectie
Aa en Maas	Wekelijks
Rivierenland	Eén keer per week
Zuiderzeeland	Meegenomen in dagelijkse inspectie
Hollandse Delta	Vanaf 175 mm neerslagtekort, om de twee weken inspecteren.
Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard	Drie inspectierondes
Rijnland	Droogtegevoelige keringen 6 keer visueel geïnspecteerd. Bovendien wekelijks beheeroordeel gemaakt aan de hand van grondboringen op 4 referentievakken.
Brabantse Delta	Kering met zand toplaag: één keer intensief.

	Keringen met gebreken: twee keer per week in de eerste weken en later afgebouwd naar één keer per week.
Waterschap Limburg	Droogte inspectie indien sprake van een hittegolf. Uiteindelijk geen droogte inspectie gedaan maar tijdens najaar inspectie extra aandacht aan droogteschades.
Drents Overijsselse Delta	Enkel op plekken waar in het verleden scheurvorming is vastgesteld. Deze locaties zijn één keer bezocht.
Hoogheemraadschap Delfland	5 keer visuele droogte-inspecties (in week 20, 30, 32, 34 en 36)
Wetterskip Fryslan	Visuele inspectie (niet duidelijk of alleen in droogteperiode en hoe vaak)
Rijn en IJssel	Droogte inspectie meegenomen in maandelijkse reguliere inspectie
Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier	Alert fase 175 mm neerslagtekort: droogtesymptomen worden gerapporteerd, nog geen inspectie. Alert fase 225 mm neerslagtekort: start inspecties droogtegevoelige dijken Alarmfase 1: 275 mm neerslagtekort: waterschap actieteam van Crisisbeheeringsorganisatie komt in de lucht. Afweging om inspecties uit te breiden naar alle risicovolle primaire- en regionale keringen. Alarmfase 2: 325 mm neerslagtekort
Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden	Bij 175 mm neerslagtekort

Uit bovenstaande gegevens is te zien dat de frequentie waarop droogte inspecties worden uitgevoerd verschillen per waterschap. De keuze voor het wel of niet uitvoeren van een droogte inspectie wordt onderbouwd op basis van ervaring, gevoel en bij sprake is van een neerslagtekort (zie Bijlage I – interviews 4 t/m 7).

Toetsen van de dijk

Nadat inspecties zijn gedaan kan op basis van eventuele nieuwe waarnemingen een eindoordeel gevormd worden van een bepaalde dijk. Dit eindoordeel wordt met behulp van de “Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale Waterkeringen” gevormd. Aan de hand van dit oordeel kan beredeneerd worden of een dijk wel of niet voldoet aan de norm. Bij het toetsen van de dijk wordt de sterkte van de dijk vergeleken met de (hydraulische) belastingen die bij de norm horen (Fugro Ingenieursbureau BV et al., 2007).

In de leidraad wordt een kader geschetst om te komen tot een beheerdersoordeel waaruit de veiligheid van een kering moet blijken. Het formuleren van het beheerdersoordeel verloopt volgens de leidraad in 4 stappen (STOWA, 2015b), namelijk:

1. **Algemene inventarisatie.** Dit is het verzamelen en delen van informatie over de conditie en het gedrag van de kering. Dit volgt bijvoorbeeld uit inspectie resultaten, eerdere toetsrapporten et cetera.

2. **Verzamelen van gegevens en informatie voor overtuigende onderbouwing.** Voor de onderbouwing wordt één of meerdere van onderstaande bouwstenen gebruikt:
 - a. Waarnemingen
 - b. Metingen
 - c. Praktijkproeven
 - d. Nieuwe kennis
3. **Concept beheerdersoordeel.** Een concept oordeel wordt gedaan met behulp van de onderbouwingen uit stap 2.
4. **Interne validatie en vaststelling definitief beheerdersoordeel.** Als laatste wordt met (interne) experts overlegd of het concept oordeel voldoende overtuigend is.

Momenteel worden afspraken gemaakt over wat de frequentie dient te zijn voor het normeren en toetsen van regionale keringen. Aan de ene kant kan de norm van een dijk veranderen wanneer bijvoorbeeld nieuwe woonwijken binnen de dijkkring worden gebouwd. Daarnaast kunnen de hydraulische belastingen op de dijk en de sterkte van de dijk veranderen. In de leidraad worden de volgende voorbeelden gegeven voor de afname van de sterkte van de dijk:

- Verouderingsmechanismen zoals zettingen en krimp;
- Biologische aantastingen van de kaden, zoals graverijen;
- Spoorvorming door verkeer of vee;
- Aanpassingen van de kering door bijvoorbeeld het steiler worden door ophogingen;
- Aantasting door golfslag en erosie.

Mede door deze argumenten is het belangrijk om toetsingen periodiek uit te voeren. Aan de hand van een oordeel kan vervolgens bepaald worden of eventueel noodzakelijk onderhoud nodig is aan een dijk.

Onderhouden van de dijk

Met onderhoud wordt ervoor gezorgd dat het profiel van de dijk wordt gewaarborgd. Dit kan onderverdeeld worden in:

- Direct noodzakelijk onderhoud. Dit wordt aangepakt.
- Groot onderhoud. Wordt met de passende urgentie aangepakt.

Hoe vaak en wanneer onderhoud wordt uitgevoerd verschilt per waterschap en is afhankelijk van de omstandigheden en staat van de kering.

7.4.2 Bijdrage faalcurve aan beheer en onderhoud

Voor de formulering van een onderbouwde beheerdersoordeel wordt in de leidraad van STOWA ruimte gemaakt voor de toepassing van nieuwe kennis, hierin mag ook internationale kennis worden meegenomen (STOWA, 2015b). De ontworpen faalcurve uit figuur 7-5 is gebaseerd op een Engels onderzoek waaruit bleek dat de sterkte van klei afneemt naar verschillende droog/nat cycli. Bovendien wordt deze degradatie voortgezet bij extremere droogte. Aangezien deze kennis in Nederland (nog) niet wordt meegenomen bij het toetsen, beheren en onderhouden van dijken, zou dit met behulp van de faalcurve geïntroduceerd kunnen worden.

Een van de doelen van de ontworpen faalcurve is dat deze kan bijdragen aan de optimalisering van beheer en onderhoud aan regionale keringen. Om dit doel te bereiken zou de faalcurve als input moeten dienen voor in de digitale tweeling, aangezien deze een inschatting van de degradatie van de sterkte moet kunnen maken (zie paragraaf 7.2). De degradatie van de sterkte onder invloed van droogte kan dus met behulp van de faalcurve als input dienen voor in de digitale tweeling. De degradatie van de sterkte onder invloed van andere klimaataspecten, zoals omschreven in hoofdstuk 8, zou daarnaast ook onderzocht kunnen worden. Zo kan een compleet pakket aan klimaatinvloeden geïmplementeerd worden in de digitale tweeling van een dijklichaam.

Om beheer en onderhoud als gevolg van de afname van de sterkte door droog/nat-cycli in de toekomst te kunnen beperken is het belangrijk om hier in de ontwerpfase aandacht aan te besteden. Een steilere dijk leunt meer op de teen waardoor deformaties in de teen groter zijn. Het ontwerpen van flauwere dijken zou dus voor een minder snelle afname van de sterkte in de teen kunnen zorgen. Ook het steeds ophogen van de dijk kan voor snellere afname van de originele lagen zorgen. Het extra gewicht dat erop wordt gezet zorgt voor meer deformatie van de al slapper geworden originele laag. Een robuust ontwerp op het begin zorgt ervoor dat (langere tijd) geen extra gewicht op een al slappere laag aangebracht hoeft te worden.

Verder herkennen de potentiële gebruikers van de digitale tweeling de volgende voordelen van het implementeren van de invloeden van het klimaat in de digitale tweeling, die bijdragen aan de optimalisering van beheer en onderhoud (Bijlage I – interviews 4 t/m 7):

- Het helpt bij het ontwerpen van klimaatbestendige dijken. Het ontwerp zo vormgeven dat de dijk de verwachtingen van de degradatie kan opnemen (dikkere toplaag, overweging voor beste materiaal voor de toplaag/kern, uitgangspunten in berekeningen etc.);
- Het optimaliseert de lange termijn asset planning. Bij een duidelijk beeld van de afname van de stabiliteit kan beheer en onderhoud nauwkeuriger ingepland kunnen worden.
- Bij kritieke weersomstandigheden kan het model een waarschuwing geven over kritieke toestanden zoals lage stabiliteit, te hoge/lage grondwaterstanden en vochtgehalten etc. Zo kan op dat moment snel actie ondernomen worden;
- Een completer beheerdersoordeel. Doordat de degradatie door klimaatinvloeden dan ook meegenomen worden;
- Kosten besparen doordat schade door het klimaat voorkomen kan worden aangezien dan een beeld is van welke schade kan ontstaan. Ook minder kosten door het nauwkeuriger inplannen van inspecties;
- Kosten besparen doordat het gedrag van de kering beter wordt begrepen (door meer metingen) en onzekerheidsmarges geminimaliseerd worden waardoor minder (zwaar) versterkt hoeft te worden;
- Kosten besparen doordat op een hoger detailniveau getoetst kan worden. Dit doordat de digitale tweeling op een klein interval of dwarsprofiel geautomatiseerd zou kunnen doorrekenen. Hierdoor hoeft minder (zwaar) versterkt te worden.

Naast deze voordelen verdient het principe van de digitale tweeling ook een kritisch aandachtspunt, volgens een van de geïnterviewden. Het is namelijk lastig om een perfecte digitale tweeling van een dijk te ontwerpen (zie bijlage I – interview 4). Een dijk is niet homogeen; de historie is complex, terwijl dit ook belangrijk is voor de huidige staat van de dijk; de dijkopbouw is complex; veel processen spelen een rol die makkelijk vergeten worden of moeilijk te digitaliseren zijn. Het modelleren van een digitaal beeld van de werkelijkheid vergt dus een bepaalde graad van nauwkeurigheid wat lastig te behalen zou kunnen zijn. Dit kan ertoe leiden dat het beeld dat geschetst is door de digitale tweeling niet geheel realistisch is. “Ondanks dit is het in kaart brengen van de invloeden van het klimaat op de dijken wel belangrijk”, wordt benadrukt tijdens het interview. Dit bevordert namelijk de waterveiligheid en daarom is het belangrijk om hier onderzoek naar te doen.

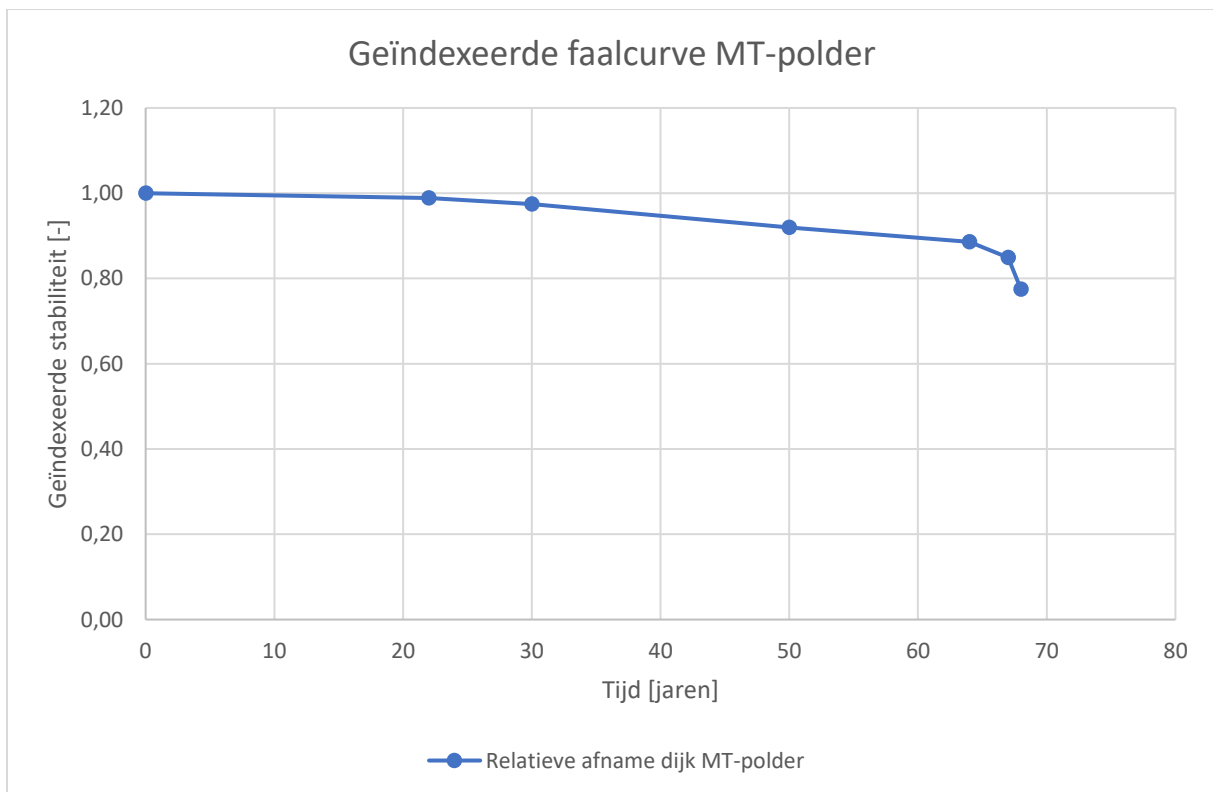
Dat het moeilijk is om het digitale model zo precies mogelijk na te maken is echter geen reden voor het niet gebruiken van het model. Een digitale tweeling kan wel andere onzekerheden weg nemen, zoals over de huidige stabiliteit. Het model kan samen met proeven (in veld/lab) en waarnemingen in het veld bijdragen aan de vorming van een oordeel over een dijk (bijlage I – interview 5).

7.5 Faalcurves voor andere situaties

De faalcurve uit paragraaf 7.3.2 is gemaakt voor de invloeden van een hogere grondwaterstand en het drogen en weer nat worden van de grond van de dijk uit de MT-polder. Om aan te geven dat de afname afhankelijk is van verschillende factoren is in deze paragraaf, door te beredeneren, een mogelijk verloop van de afname van de stabiliteitsfactor bij andere situaties in kaart gebracht. Hierbij wordt gekeken naar de snelheid van degradatie en de grootte van de afname tussen piek- en residuele sterkte.

Om dit mogelijk te maken is de faalcurve van de MT-polder geïndexeerd om een procentuele afname van de stabiliteitsfactor in kaart te brengen (zie grafiek 2). De faalcurves in het vervolg worden met deze geïndexeerde curve van de MT-polder vergeleken.

Belangrijk is dat de grafieken van de verschillende sub-paragrafen niet weer met elkaar vergeleken mogen worden. Zo kan het verloop van de lijn van een steilere dijk (grafiek 3) niet vergeleken worden met de lijn van een dijk met een glijvlak gericht naar het zuiden (grafiek 4).

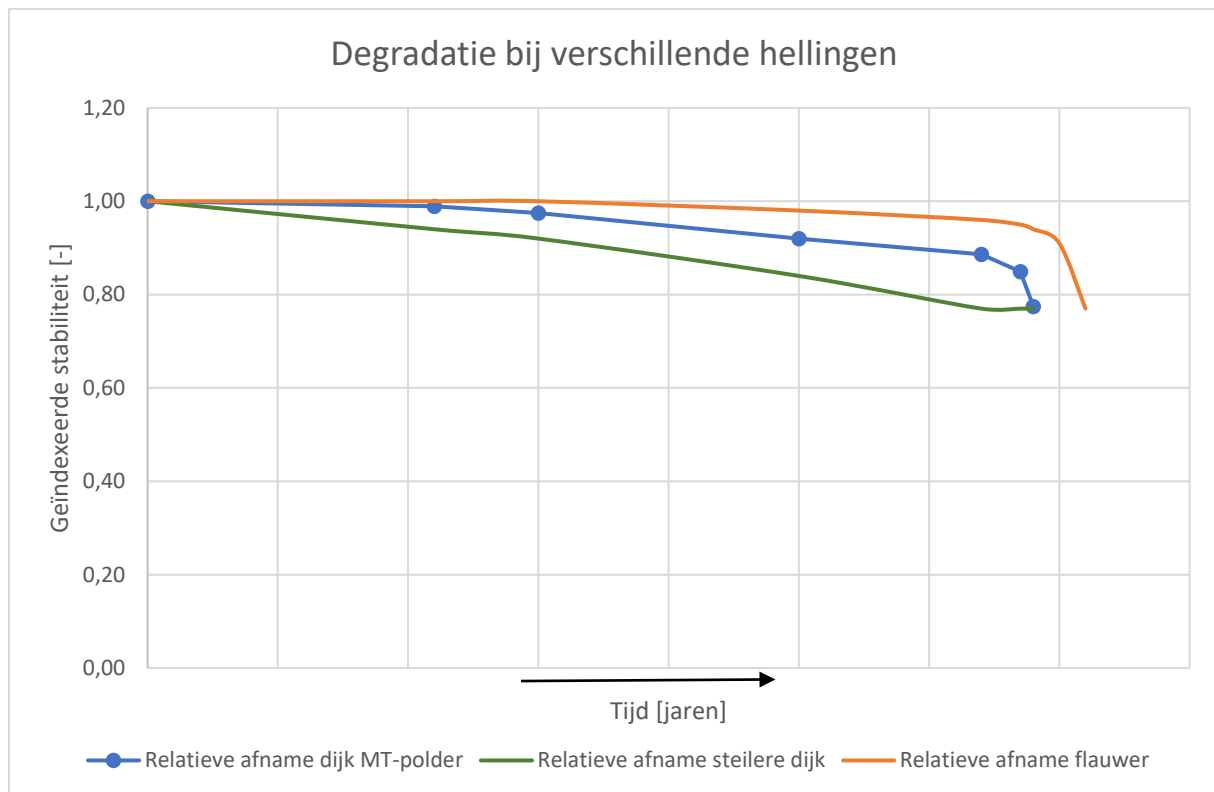


Figuur 7-6 Geïndexeerde faalcurve MT-polder

7.5.1 Faalcurves bij andere hellingen

De MT-polder heeft relatief gezien een flauwe helling, namelijk ongeveer 1:7. In onderstaande grafiek (zie figuur 7-7) is het theoretische verloop van de degradatie van de stabiliteit van een minder steile- en een steilere dijk, in vergelijking tot de dijk uit de MT-polder indicatief weergegeven.

De afname van de schuifsterkte en dus van de stabiliteit is afhankelijk van de mate van de deformatie door zwellen en krimpen. Deformatie induceert namelijk de verzwakking van de sterkte in de teen van de dijk (zie paragraaf 5.4.1).



Figuur 7-7 Faalcurve degradatie bij verschillende hellingen

Een dijk met precies dezelfde bodemopbouw als de MT-polder bereikt dezelfde stabiliteitsfactor als de dijk uit de MT-polder wanneer deze is gedegradeerd tot de residuele sterkte. Voor zowel een steilere- als flauwere dijk is dit in de grafiek te herkennen aan dat beiden op het einde ook een stabiliteit van 0,77 bereiken. Het verschil is dat afhankelijk van de helling van het talud, de degradatie sneller of langzamer verloopt.

Voor een steilere dijk geldt dat deze sneller degradeert. De groene lijn bereikt eerder de factor die bij de residuele sterkte hoort, dan de flauwere dijk uit de MT-polder. Zoals in paragraaf 5.4.1 is onderzocht, zorgt het extra gewicht van een steilere dijk voor meer deformatie in de teen. Dit versnelt de afname van de sterkte.

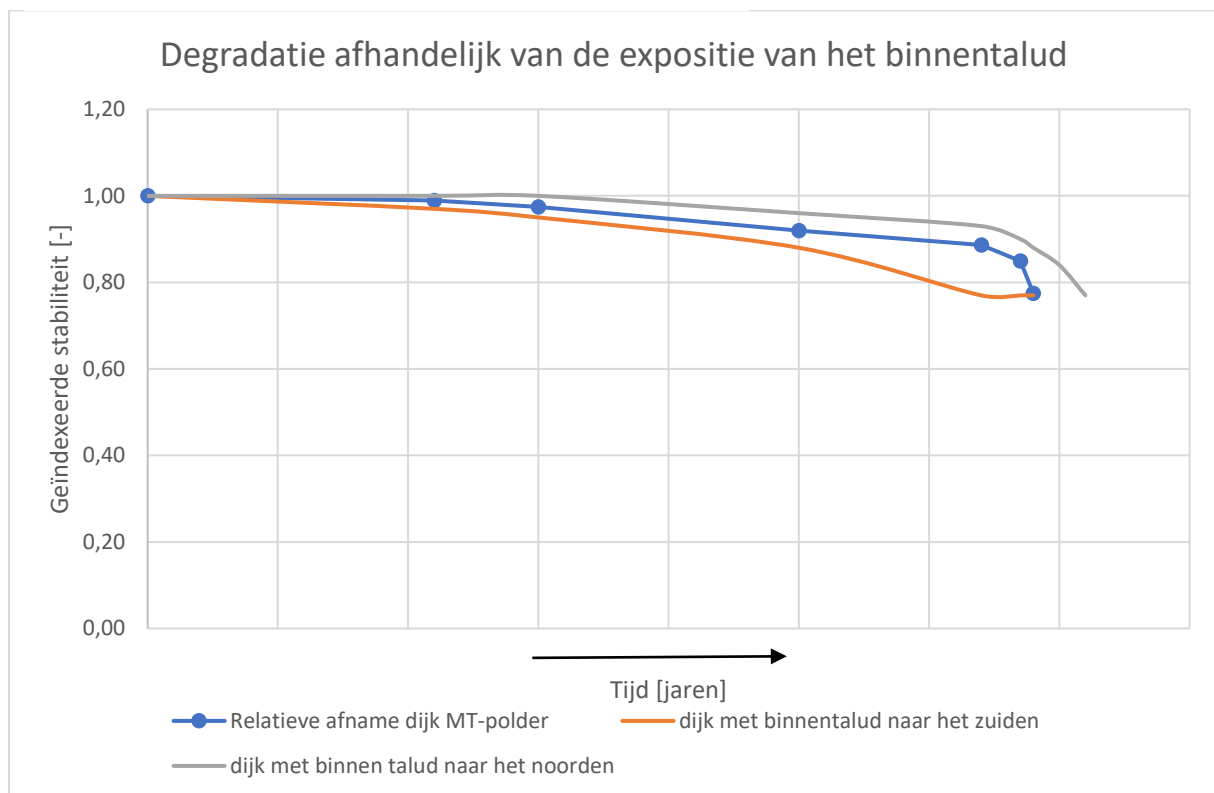
Bij een flauwere dijk geldt het tegenovergestelde. Minder belasting “hangt” belasting aan de teen, waardoor minder deformatie optreedt en de sterkte minder snel afneemt. Dit zorgt ervoor dat het langer duurt voordat de sterkte afneemt van piek naar residueel. Dit is in de grafiek te zien aan dat de flauwere dijk de stabiliteitsfactor behorend bij de residuele sterkte, pas later dan het voorbeeld van de MT-polder bereikt.

7.5.2 Faalcurve bij andere expositie van het binnentalud

Afhankelijk van hoe het glijvlak van het binnentalud gelegen is ten opzichte van het zuiden verloopt de degradatie van de sterkte en de stabiliteit anders. Zoals in hoofdstuk 5 en 6 is toegelicht, daalt de sterkte sneller wanneer de grond wordt blootgesteld aan steeds hogere zuigspanningen door droogte. Het talud dat gericht is naar het zuiden verdroogt meer dan een talud dat gericht is naar het noorden omdat deze de hele dag blootgesteld wordt aan de zon (zie figuur 7-8). Het verschil tussen hoe de taluds met glijvlakken gepositioneerd zijn, is in onderstaande grafiek geplot (zie figuur 7-9).



Figuur 7-8 De verdroging van een dijk afhankelijk van de expositie van het binnentalud (Eland, z.d.)



Figuur 7-9 Faalcurve afhankelijk van de expositie van het binnentalud

In figuur 5-22 in paragraaf 5.9 is te zien dat het binnentalud met glijvlak van de MT-polder oostzuidoost georiënteerd is. Voor dijken die verder qua bodemopbouw gelijk zijn aan de dijk uit de MT-polder zal de stabiliteitsfactor bij het bereiken van de residuele sterkte gelijk zijn aan die van de dijk uit de MT-polder.

De grond in het glijvlak van een dijk die gericht is naar het zuiden zal sneller de residuele sterkte bereiken omdat deze vaker hogere zuigspanningen bereikt dan wanneer deze naar het noorden is

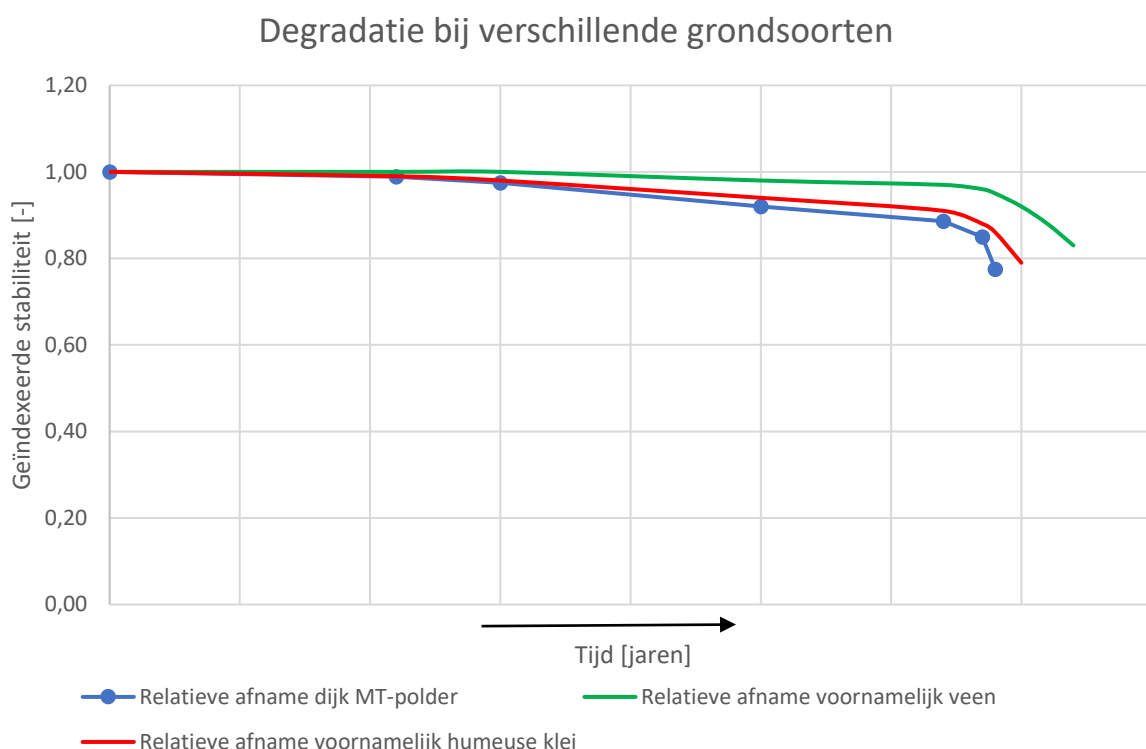
gericht. Dit is in figuur 7-9 indicatief weergegeven. In de grafiek bereikt deze dus in het jaar 64 al de stabiliteitsfactor die bij de residuele sterkte hoort.

Andersom wordt een talud dat gericht is naar het noorden minder blootgesteld aan de zon dan de dijk uit de MT-polder en verdroogt dus minder. Hierdoor bereikt het lagere zuigspanningen en duurt het dus langer voordat de sterkte degradeert tot de residuele sterkte. In de grafiek bereikt deze de stabiliteitsfactor die bij de residuele sterkte hoort daarom pas later.

7.5.3 Faalcurves bij andere grondopbouw

In figuur 6-1 in paragraaf 6.2 is te zien dat de dijk uit de MT-polder afwisselend uit klei en veen bestaat en uiteindelijk gefundeerd is op een pleistocene zandlaag. Hoe dichterbij de top, hoe meer invloed een laag ondervindt van het zwellen en krimpen door drogen en nat worden en dus hoe sneller de sterkte afneemt. Afhankelijk van de grondsoort hebben de verschillende lagen ook een andere verhouding tussen piek- en residuele sterkte. In grafiek 5 is te zien hoe de degradatie van de sterkte van de dijk verloopt afhankelijk van de grondopbouw.

Bij de beredenering van hoe de degradatie van de stabiliteit van andere grondsoorten in figuur 7-10 verloopt, is wel vanuit gegaan dat de geometrie (helling, breedte, etc.) van de dijk verder gelijk is aan die van de MT-polder. Ook is enkel gekeken naar het verloop van de stabiliteit van humeuze klei en veen terwijl een dijk ook uit meerdere grondsoorten opgebouwd kan zijn. Deze grafiek dient alleen om aan te tonen dat afhankelijk van de grondopbouw, de degradatie van de stabiliteit anders kan lopen. Dit verschil in verloop is aangetoond door de MT-polder te vergelijken met twee andere grondsoorten.



Figuur 7-10 Faalcurve afhankelijk van grondsoort in de dijk

In de dijk uit de MT-polder bestaat de laag die de meeste invloeden van zwellen en krimpen ondervindt uit voornamelijk siltige klei (twee klei lagen en een veen laag (zie figuur 6-1). Als de laag die beïnvloed wordt door zwellen en krimpen voornamelijk uit veen zou bestaan zou deze langer erover doen om de residuele sterkte te bereiken. Dit komt omdat veen langer doet over het

bereiken van de pieksterkte dan klei (zie figuur 6-3 in paragraaf 6.3). Daarna gaat deze dus pas afnemen richting de residuele sterkte. In de grafiek is te zien dat veen pas de stabiliteitsfactor die bij de residuele sterkte hoort later bereikt dan de dijk uit de MT-polder. Ook is te zien dat de stabiliteitsfactor bij de residuele sterkte van veen hoger ligt dan wanneer de dijk meer uit klei bestaat. De reden hiervoor is omdat veen een lagere verhouding tussen piek- en residuele sterkte heeft (zie tabel 6-3 paragraaf 6.4.3). De sterkte neemt dus uiteindelijk in verhouding minder af evenals de stabiliteitsfactor (tussen de piek- en residuele sterkte).

In figuur 7-10 wordt uitgegaan van dat de siltige kleilagen uit de MT-polder vervangen worden door een humeuze kleilaag. Dit betekent dat de opbouw met veenlagen verder hetzelfde is. In (figuur 6-3 in paragraaf 6.3) is te zien dat humeuze klei later de pieksterkte bereikt dan siltige klei. Bovendien heeft humeuze klei ook een kleiner verschil tussen piek- en residuele sterkte dan siltige klei (Kindermann & Tigchelaar, 2022). In de grafiek is dit te herkennen aan dat de stabiliteitsfactor die bij residuele sterkte hoort bij humeuze klei hoger is en later wordt bereikt dan bij de dijk uit de MT-polder (waar de kleilagen siltig zijn).

Aan de andere kant bevat humeuze klei meer organisch materiaal dan siltige klei (Nutrinorm, z.d.). Dit zorgt ervoor dat humeuze klei meer zwelt en krimpt dan siltige klei (zie hoofdstuk 5) waardoor de afname van de sterkte juist sneller zou kunnen gaan dan bij siltige klei.

In dit voorbeeld is gekozen om de stabiliteit van humeuze klei langzamer te laten afnemen tot de residuele sterkte omdat is aangenomen dat humeuze klei meer op veen lijkt dan siltige klei door het organische materiaal dat het bevat. Daarom is gekozen om de degradatie van de humeuze klei toch meer richting dat van veen te laten lopen in plaats van deze omlaag te halen en het verder van veen te zetten. Wel is gekozen ontwikkeling van de degradatie dichtbij dat van siltige klei te houden omdat het meer kenmerken heeft van klei dan van veen. Voor een juiste conclusie over het sneller of langzamer verloop van de degradatie van een dijk met humeuze klei is nader onderzoek nodig.

7.5.4 Andere klimaataspecten

In het begin van dit onderzoek werd de keuze gemaakt om de focus te leggen op de invloeden van droogte op de stabiliteit van dijken. Dit is gedaan om het onderzoek af te bakenen om het haalbaar te maken binnen de beschikbare tijd. Echter kunnen ook andere klimaataspecten de stabiliteit van een dijk beïnvloeden. In hoofdstuk 3 is een overzicht gemaakt van de faalmechanismen die door het klimaat worden beïnvloed (zie figuur 3-10 in paragraaf 3.4).

Om in een digitale tweeling de invloeden van het klimaat te kunnen meenemen moeten de invloeden van andere klimaataspecten ook onderzocht worden. Door voor een beschouwde dijk te bepalen hoeveel invloed al deze klimaataspecten uitoefenen op de stabiliteit kunnen meerder faalcurves gemaakt worden. Zo ontstaat een compleet beeld van de invloeden van het klimaat op een dijklichaam. In Nederland wordt nog geen rekening gehouden met de degradatie van de sterkte van de grond onder invloed van het klimaat. Door de gegevens van de verschillende faalcurves te implementeren in de digitale tweeling, kan deze de conditie van een dijk met behulp van een completer beeld continu doorrekenen.

7.6 Conclusie

In dit hoofdstuk is de vijfde deelvraag behandeld, namelijk: *“Hoe kan deze informatie verwerkt worden in een digitale tweeling voor een optimalisering van beheer- en onderhoudsmethoden?”*.

De digitale tweeling die door Rijkswaterstaat ontwikkeld wordt moet een 3D model van een bestaand dijklichaam weergeven. Met dit digitale model kan de staat van de dijk continu bijgehouden worden door de informatie in het model constant te vernieuwen op basis van veranderingen in het veld. Dit model moet de veiligheid van de kering op een bepaald moment en de ernst van de degradatie van de sterkte weergeven. Een belangrijk aandachtspunt voor een dergelijk digitaal model is dat het precies namaken van een bestaande kering complex kan zijn. Ondanks dit draagt een digitale tweeling volgens medewerkers van waterschappen wel bij aan het in kaart brengen van de waterveiligheid en het optimaliseren van beheer en onderhoud en is het dus nuttig om deze te ontwikkelen.

De digitale tweeling kan bijdragen aan de optimalisering van beheer en onderhoud doordat het een duidelijk beeld schetst van de afname van de stabiliteit in de tijd. Hierdoor kunnen waterkeringsbeheerders (de potentiële gebruikers) nauwkeuriger beheer en onderhoud inplannen. In Nederland zijn echter de invloeden van het klimaat op de sterkte van de grondeigenschappen (nog) niet eerder onderzocht. Uit onderzoek blijkt dat het klimaat wel degelijk invloed heeft op deze sterkte.

Om de invloeden van het klimaat inpasbaar te maken voor in een digitale tweeling is in dit hoofdstuk een faalcurve ontworpen. In de faalcurve wordt de degradatie van de stabiliteit van een grondlichaam onder een bepaalde invloed tegen de tijd afgezet. In dit geval is de invloed van het nat worden en weer opdrogen van de grond en een toename van de grondwaterstand in kaart gebracht gedurende een bepaalde tijdsperiode. In deze curve is te zien dat gedurende een aantal jaren de sterkte afneemt van de piek- naar residuele sterkte. Voor dijken die nieuw ontworpen worden kan een dergelijke curve gemaakt worden door direct na de bouw de sterkte van de grondlagen te meten. Met een klimaatmodel voor de toekomst kan dan inzichtelijk worden wanneer de sterkte is afgenomen van piek- naar residueel.

Voor bestaande dijken is het lastiger om in te schatten hoeveel de sterkte al is afgenomen sinds de bouw van de dijk. Deze dijken hebben sinds de bouw al wel enkele mate van zwellen en krimpen ondergaan met bijkomende afname van de sterkte. Dit geldt voornamelijk voor de toplagen. Verwacht wordt echter dat de zone dat invloed ondervindt van zwellen en krimpen steeds groter wordt. Dit leidt ertoe dat ook lagen onder de bovenste lagen van de dijk steeds meer worden blootgesteld aan de gevolgen van zwellen en krimpen. Door oudere toetsingen en labonderzoeken te vergelijken met huidige toetsingen en labonderzoeken kan een inschatting gemaakt worden van hoeveel de sterkte al is afgenomen.

Belangrijk is ook om mee te nemen dat wanneer onderhoud wordt gepleegd en de dijk wordt opgehoogd, dit aan de ene kant voor meer belasting op de onderliggende grondlagen zorgt. Dit leidt tot tijdelijk meer deformatie door zakking wat ook voor een afname van de sterkte zorgt. Echter kan het ook betekenen dat deze ophoging de onderliggende, verzwakte lagen weer bescherming biedt tegen het klimaat. Door bij deze ophogingen na te denken over de juiste kwaliteit van de grond kan zo de klimaatbestendigheid van de dijk opnieuw gegarandeerd worden. Deze laag wordt immers de nieuwe laag die aan het klimaat wordt blootgesteld.

Meerdere invloeden kunnen faalmechanismen van een dijken induceren (zie hoofdstuk 3). Door de verschillende invloeden die bijdragen aan de afname van de stabiliteit aan te vullen met de invloeden van het klimaat, kan een digitale tweeling een completer beeld schetsen van de staat van de dijk op een bepaald moment. Het in kaart brengen van de invloeden van het klimaat draagt niet alleen bij

aan de optimalisering van beheer en onderhoud maar kan ook meegenomen worden in de ontwerpfase. Door naar de faalcurves van klimaatinvloeden te kijken kunnen klimaatbestendige ontwerpen gemaakt worden.

8. Discussie

Hypothese

In de hypothese wordt gesteld dat dijken verdrogen onder invloed van het klimaat. Uit de literatuurstudie is gebleken dat het klimaat steeds droger wordt. Gebleken is dat de sterkte eigenschappen van dijken degraderen door het zwellen en krimpen van de dijk (door droogte en regen) wat leidt tot een afname om van de potentie om zuigspanning te ontwikkelen door de grond. Hierdoor zorgt het opdrogen en weer nat worden van de dijk voor een afname van de schuifsterkte. Ook ontstaan scheuren wat de doorlatendheid van de dijk zal kunnen verhogen, hoeveel de doorlatendheid hoger wordt is nog niet duidelijk. Aangenomen wordt dat in de toekomst de hoogste grondwaterstand hoger kan komen te staan tijdens extreme buien. Dit leidt tot een afname van de korrelspanning.

Met de berekeningen uit hoofdstuk 6 is bepaald hoeveel de stabiliteit in een bepaalde tijd afneemt. Wanneer de grond een de residuele sterkte bereikt neemt de stabiliteit van de dijk af. Het falen van de dijk hangt af van de norm en de initiële stabiliteit. Dit betekent dat het bezwijken van de dijk uit de hypothese niet onderbouwd kan worden, omdat niet alle dijken zullen falen. De afname van de schuifsterkte is daarbij wel significant (circa 25% in de casestudie).

Ook wordt in de hypothese gesteld dat invloed van droogte in een faalcurve verwerkt kan worden. In hoofdstuk 7 is een faalcurve gemaakt. Hierin is de degradatie van een dijk te zien onder invloed van krimpen en zwellen en een verhoging van de grondwaterstand. Niet alle invloeden van droogte zijn in de faalcurve meegenomen dus deze stelling kan maar gedeeltelijk onderbouwd worden. Daarentegen zou het veel inzicht kunnen geven om zo veel mogelijk invloeden in een faalcurve te verwerken (zie paragraaf 9.2).

Als laatste stelt de hypothese dat met behulp van een faalcurve de invloeden van het klimaat in een digitale tweeling verwerkt kan worden, de conditie van de dijk weer te geven. Het verwerken van een faalcurve in een digitale tweeling is wel mogelijk. Het vergt veel inzicht in de opbouw van de dijk om een realistische (betrouwbare) tweeling te maken (zie paragraaf 7.4.2 en bijlage I interview 4 en 7). Beheerders denken dat een digitale tweeling wel gebruikt zou kunnen worden om inspecties in te verwerken en de degradatie af te lezen. Het moment van falen zou dan af te lezen zijn maar voor een precies moment is ook een precieze tweeling nodig. Dit zou nu dus nog niet mogelijk zijn, maar met meer onderzoek kunnen steeds meer onzekerheden worden weggenomen. Ook denken belanghebbenden dat het bij andere zaken kan helpen, zoals bij het ontwerpen van een dijk (zie paragraaf 7.4.2). De laatste stelling kan dus ook gedeeltelijk onderbouwd worden.

Meenemen Engelse verwachten

In het Engelse onderzoek, wat gebruikt is of de afname van de schuifsterkte te bepalen, is de afname van een kleidijk bepaald aan de hand van de klimaatscenario's van de UK. De beschouwde grondsoorten uit dit Engelse onderzoek zijn niet exact hetzelfde als de grondsoorten uit de deze casestudie. Ook zijn klimaatscenario's van het KNMI precies hetzelfde als die van Engeland, wel zijn deze vergelijkbaar (zie paragraaf 6.4.3). Dit betekent dat de berekende afname van de stabiliteit niet precies overeenkomt met de werkelijkheid. Daarentegen is de faalcurve bedoelt om de degradatie van de dijk te schetsen en niet om een moment van falen te bepalen waardoor de gevonden informatie geschikt is voor dit doeleind.

Een aanname van de grondwaterstand

In dit onderzoek is een verandering in de doorlatendheid bij droogte onderzocht en is met de klimaatscenario's een toename van de neerslag bepaald. Het is daarentegen niet gelukt om bruikbare waardes te vinden voor de verandering van de doorlatendheid. Hierdoor is besloten om de hoogste

grondwaterstand te bepalen aan de hand van de klimaat effectatlas. Deze kaart is gebaseerd op het Nationaal Water Model-Basisprognoses 2016 (zie paragraaf 6.4.2). Deze kaart geeft de ontwikkeling van de grondwaterstand op landelijk niveau. Hiermee kan de verlaging van de grondwaterstand per gebied verschillen door lokale invloeden. Wel wordt met de faalcurve een beeld geschetst van de werkelijkheid waardoor deze gegevens voldoende zijn voor dit doel.

Is de MT-polder representatie voor de dijken in Nederland?

De MT-polder heeft een flauw talud. Dit is representatie voor veel veendijken in Nederland (zie paragraaf 5.3.1). Kleidijken hebben daarentegen een steiler talud waardoor de MT-polder minder representatief is voor dit soort dijken. Hierdoor zouden voor deze dijken andere faalcurves gemaakt moeten worden.

De keuze voor Mohr-Coulomb associatief?

In dit onderzoek is gekozen om de schuifsterkte van de grond te berekenen met Mohr-Coulomb associatief. In paragraaf 4.2.2 is verteld dat het niet-associatieve model van Mohr-Coulomb meer representatieve waarden oplevert. Echt wordt verwacht dat bij deze glijvlakberekeningen dit weinig verandering op zal leveren. Daarom zou voor een vervolgonderzoek bepaald moeten worden of het gebruik van het niet-associatieve model relevante verschillen oplevert (zie paragraaf 8.2).

Faalcurve is afhankelijk van klimaatscenario

Wanneer het klimaat verandert en het duidelijker wordt richting welk klimaat scenario van het KNMI op gegaan wordt, zal de faalcurve ook moeten veranderen. Hierom wordt het advies gegeven om deze curve in een dynamisch model te verwerken (zoals een digital twin) waardoor de invloed van deze verandering eenvoudig bepaald kan worden (zie paragraaf 8.2).

Afname vanaf het jaar 2000

Doordat de MT-polder eerder is gebouwd dan het jaar 2000 is het dus niet correct om met de afname van de sterkte vanaf dit jaar te rekenen. De dijk ondergaat namelijk al veel langer droog/nat-cycli (zie paragraaf 6.3). Hierdoor is de afname van de sterkte wel een overschatting waardoor dit een veilige aanname is.

PLAXIS

Voor PLAXIS is gekozen omdat dit programma een vrij glijvlak berekent wat resulteert in een realistische afschuiving.

Andere klimaatinvloeden buiten beschouwing gelaten

Doordat andere klimaatinvloeden, die de stabiliteit negatief beïnvloeden (bijvoorbeeld gasvorming door droogte), niet meegenomen worden is de faalcurve een onderschatting. Hierom wordt aanbevolen om een faalcurve te maken waarin de andere klimaatinvloeden ook meegenomen worden (zie paragraaf 8.2)

Klimaat verandering

Zoals het KNMI zelf als zegt in het artikel: "Hoe zijn oude klimaatvoorspellingen uitgekomen?" is het lastig om het klimaat in de toekomst te voorspellen. Maar wanneer de oude klimaatscenario's vergeleken worden met wat uiteindelijk in de realiteit is gebeurd, zitten deze voorspellingen op het gebied van CO₂ uitstoot niet ver naast. Hierdoor kan ervan uitgegaan worden dat de werkelijkheid dicht in de buurt komt van wat voorspeld is. Wanneer de invloed van het klimaat op deze scenario's wordt gebaseerd zal hier dus ook een resultaat uitkomen waarvan gezegd kan worden dat het waarschijnlijk op zal treden (*KNMI - Hoe zijn oude klimaatvoorspellingen uitgekomen?*, z.d.). Echter kan dit nooit met volledige zekerheid gezegd worden.

9. Conclusie en aanbevelingen

In dit hoofdstuk wordt met behulp van de conclusies van deelvragen 1 t/m 5 antwoord gegeven op de hoofdvraag en een conclusie getrokken. Daarna worden aanbevelingen gedaan.

9.1 Conclusie

De hoofdvraag van dit onderzoek luidt: *“Wat is de invloed van het klimaat en de verandering hiervan op de stabiliteit van regionale dijklichamen en hoe kan deze informatie inpasbaar gemaakt worden in een digitale tweeling, voor de optimalisering van beheer- en onderhoudsmethoden van dijklichamen?”* Deze vraag kan in twee delen opgesplitst worden.

Deel 1

In de hoofdstukken 3, 4, 5 en 6 is gekeken naar het eerste deel van de hoofdvraag: *“Wat is de invloed van het klimaat en de verandering hiervan op de stabiliteit van regionale dijklichamen?”*. In het eerste hoofdstuk zijn eerst de faalmechanismen van een dijk in kaart gebracht en is bepaald welke hiervan invloed ondervinden van het klimaat. Vervolgens is onderzocht welke klimaataspecten in Nederland voorkomen en hoe door het KNMI verwacht wordt dat het klimaat zal veranderen. Om het onderzoek in te kaderen is in hoofdstuk 5 een onderbouwde keuze gemaakt om de invloeden van droogte op een klei/veendijk (MT-polder) verder te onderzoeken. Met behulp van literatuurstudie en experimenten is geconcludeerd dat droogte de volgende invloeden heeft op de stabiliteit van een dijk: een verandering in de doorlatendheid van de grond, groter verschil tussen laagste- en hoogste grondwaterstand in de dijk, toename van gasvorming en daarmee wateroverspanning, een afname van het gewicht van de grond, een verdroging van de vegetatie en een afname van de sterkte-eigenschappen van de grond door droog/nat-cycli. Omdat dit een groot aantal invloeden op de stabiliteit zijn worden deze hieronder verder uitgelegd.

Invloed van droog/nat cycli

Door het zwellen en krimpen van de grond van de dijk ontstaan scheurtjes en structuurvorming¹³ in de grond van de dijk. Door deze structuurvorming komt de potentie om zuigspanningen te ontwikkelen en behouden in het geding. Naar een aantal cycli van zwellen en krimpen stopt dit omdat de scheurvorming niet verder doorzet. Wanneer de grond droger wordt dan dat het ooit is geweest zal de scheurvorming weer verder doorgaan waardoor de potentie om zuigspanningen te ontwikkelen en hiermee de schuifspanning nog verder afneemt. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn bij klimaatverandering waarin steeds extremere droogte wordt voorspeld. Een toename in droogte zorgt voor een lagere zuigspanning en daarmee een lagere schuifsterkte van de dijk. Deze lagere schuifsterkte veroorzaakt een lagere stabiliteit.

De verandering in doorlatendheid

De doorlatendheid in scheuren is in dit onderzoek in kaart gebracht door naar verschillende bronnen te kijken. In sommige van deze bronnen wordt aangegeven dat de doorlatendheid van grond dat uitdroogt kleiner wordt doordat het water eerst snel uit de grote poriën verdampt maar op een gegeven moment bevindt zich nog enkel water in de kleinste poriën. Vanaf dit moment verloopt de verdamping langzamer omdat de poriën klein zijn en het water langzamer eruit stroomt/verdampt. In andere bronnen is echter te lezen dat de doorlatendheid in de grond groter wordt door scheurvorming. In dit geval gaat het waarschijnlijk om diepe brede scheuren waar het water makkelijk in kan stromen. Om hier een duidelijke conclusie over te kunnen trekken zal hier meer onderzoek naar moeten worden gedaan.

Een hogere variatie in de grondwaterstand

¹³ Het ontstaan van onregelmatigheden in de grond zoals scheurtjes, brokken en wormgangen (Technische Adviescommissie voor Waterkeringen, 1996).

Door droogte kan een lagere grondwaterstand in de dijk ontstaan. Een lage grondwaterstand heeft aan de ene kant een positief effect op de korrelspanning en zo dus ook op de schuifsterkte en de stabiliteit van de dijk. Echter kan droogte aan de andere kant zorgen voor scheuren en dus voor een afname van de schuifsterkte van de dijk zoals al is benoemd.

Door meer extreme regenbuien kan de grondwaterstand in de dijk hoger komen te staan. Een hoge grondwaterstand leidt tot een lagere korrelspanning en zo dus ook tot een lagere schuifsterkte en stabiliteit van de dijk.

Gasvorming

Door het gas dat kan ontstaan bij de afbraak van veen kan een wateroverspanning in de dijk ontstaan. Dit proces wordt versterkt door een hoge temperatuur en een lage grondwaterstand. Ook een lage atmosferische druk draagt bij aan dit proces. Doordat veel gas ontstaat raken de lege poriën van de grond vol. Hierdoor ontstaan gasbellen die het water en de grondkorrels aan de kant duwen waardoor de waterspanning in de grond toeneemt en de korrelspanning dus afneemt, hierdoor neemt ook de stabiliteit van de dijk af. Dit proces is duidelijker waarneembaar in een stijvere grond omdat slappere grond zoals veen makkelijke meebewegen met de gasbel.

Een afname van het gewicht van de grond

Doordat veen veel water bevat kan het ook veel gewicht verliezen door uitdroging. Wanneer een aandrijvende grondmoot gewicht verliest is dit positief voor de stabiliteit, wanneer een stabiliserende grondmoot gewicht verliest kan de stabiliteit van een dijk afnemen. Ook de gehele dijk kan gewicht verliezen. Wanneer het buitenwater (uit bijvoorbeeld de boezem) contact kan maken met de watervoerende laag onder de dijk kan deze gaan opdrijven.

Verdroging van de vegetatie

Wanneer een dijk droger wordt verdroogd de vegetatie op de dijk ook. Verdroogde vegetatie kan ervoor zorgen dat de erosiebestendigheid van de grasmat afneemt. Doordat de dijk aan het verdrogen is scheurt de grond. Wanneer de grond aan het scheuren is zullen de wortels van de vegetatie ook kapot scheuren. Doordat de beschermlaag van de dijk degradeert wordt de kans op micro instabiliteit groter.

Naar het in kaart brengen van de invloeden van droogte op een dijklichaam, zijn in hoofdstuk 6 berekeningen gemaakt om een beeld te schetsen van hoe groot de invloeden zijn. Met behulp van een model van de dijk uit de MT-polder zijn berekeningen gemaakt in PLAXIS. De een aantal invloeden die in hoofdstukken 3 tot en met 5 zijn onderzocht zijn hierin ingevoerd voor verschillende jaren. Zo is de invloed van droog/nat-cycli in het model gezet door de sterkte-eigenschappen (ϕ en c') in verschillende jaren te laten afnemen en is de, door het KNMI verwachte, toename van de grondwaterstand per berekening geleidelijk per jaar erin gezet. Dit leidde tot een aantal berekeningen waaruit duidelijk werd dat de stabiliteit steeds verder afnam.

Deel 2

Met behulp van de resultaten uit het eerste deel van de hoofdvraag is het tweede deel van de hoofdvraag onderzocht worden, namelijk: *"...hoe kan deze informatie inpasbaar gemaakt worden in een digitale tweeling, voor de optimalisering van beheer- en onderhoudsmethoden van dijklichamen?"*.

De informatie van de invloed van het klimaat op de stabiliteit kan inpasbaar gemaakt worden voor in een digitale tweeling gemaakt met behulp van een faalcurve. In een faalcurve wordt de degradatie van de stabiliteit onder invloed van een klimaatinvloed uitgezet tegen de tijd. Door dit in het digitale model te verwerken kan constant bijgehouden worden wat de staat van de dijk is en wat verwacht wordt dat deze zal zijn in de komende jaren. Voordelen voor de optimalisering van beheer en onderhoud die potentiële stakeholders hierin herkennen zijn onder andere:

- ontwerpen van klimaatbestendige dijken wat leidt tot uitstel/minder behoefte van onderhoud;
- optimalisering van de lange termijn asset planning omdat nauwkeurige planningen gemaakt kunnen worden;
- de mogelijkheid om risico gestuurd te handelen. In het algemeen en bij extreme weersomstandigheden
- completer beheerdersoordeel doordat de degradatie door klimaatinvloeden ook meegenomen worden;
- kosten besparen door het voorkomen van schade door het veranderende klimaat.

Vanuit de waterschappen wordt het duidelijk dat een realistische digitale tweeling lastig te maken zal zijn doordat veel aspecten de stabiliteit van een dijk beïnvloeden. Wel is het belangrijk dat hier onderzoek naar gedaan wordt.

In dit onderzoek is een curve gemaakt voor de invloeden van een hoge grondwaterstand en de afname van sterkte door droog/nat-cycli.

In de faalcurve in hoofdstuk 7 is te zien dat naar een bepaalde tijd de pieksterkte afneemt tot de residuele sterkte. Dit betekent niet dat de dijk bezwijkt maar de grond minder sterk is en dus dat de stabiliteit afneemt.

Ook voor dijken die bestaan uit een andere grondopbouw, geometrie en die anders gepositioneerd zijn t.o.v. het zuiden zijn illustratieve faalcurves gemaakt. Bij een dijk die meer uit veen bestaat zal de sterkte langzamer afnemen en bij een dijk die meer uit meer klei bestaat dan het voorbeeld van de MT-polder zal de sterkte sneller afnemen. Voor dijken met een steiler talud zal gelden dat de stabiliteit eerder zal afnemen en voor dijken met een flauwer talud zal het langer duren tot de stabiliteit is afgenomen. Ook de positie van het talud waar het glijvlak door heen gaat bepaalt de snelheid van afnamen. Bij dijken waarvan het glijvlak op het zuiden gelegen is zal de stabiliteit sneller afnemen dan bij dijken waarbij deze op het noorden gelegen is. Geconcludeerd wordt dat afhankelijk van onder andere deze factoren snelheid van degradatie anders loopt. Hierdoor is het belangrijk om voor iedere dijk een eigen faalcurve te ontwerpen.

De keuze om enkel voor de invloeden van droogte een faalcurve te maken werd gemaakt om het onderzoek af te bakenen. In hoofdstuk 3 is echter is onderzocht dat meerdere klimaataspecten verschillende faalmechanismen kunnen induceren. Om ervoor te zorgen dat de digitale tweeling die ontworpen wordt met behulp van een compleet pakket aan invloeden de stabiliteit berekent, moet ook voor de andere klimaataspecten een faalcurve gemaakt worden. Op deze manier kunnen de invloeden van het klimaat inpasbaar gemaakt worden voor in een digitale tweeling en bijdragen aan de optimalisering van beheer en onderhoud.

9.2 Aanbevelingen

Voor de haalbaarheid van dit onderzoek binnen de beschikbare tijd zijn een aantal zaken afgebakend. In deze paragraaf wordt advies gegeven over wat (nog) gedaan moet worden om de resultaten van de faalcurve te verfijnen en de invloeden van het klimaat beter mee te kunnen nemen in een digitale tweeling.

Advies voor verfijning droog/nat-cycli faalcurve:

- Faalcurve bij laagst verwachte grondwaterstanden (GWS). Hoewel de hoogste grondwaterstand vaak als maatgevend gezien wordt (omdat het een lagere korrelspanning oplevert) is uit de praktijk gebleken dat tijdens droogte ook falen kan optreden. Bovendien zijn ook andere invloeden, naast het nat/droog worden van de grond, die kunnen bijdragen aan degradatie van de stabiliteit, zoals gasvorming. Een faalcurve bij lage GWS is dus ook van belang;
- Meer droog/nat-cycli uitvoeren met Hyprop proef. Uit literatuur is gebleken dat de sterkte niet verder afneemt naar 3-4 cycli. In dit onderzoek zijn slechts 2 cycli uitgevoerd. Daarom wordt aanbevolen om cycli van droog/nat worden uit te voeren tot de sterkte niet verder afneemt bij een x aantal testen. Hiermee kan de aannahme uit de literatuur bevestigd worden. hiervoor wordt het advies gegeven om de volgende stappen uit te voeren:
 - o Schuifsterkte parameters bepalen met Direct Shear van gelijke grondmonsters die in de Hyprop beproefd worden. Voor een beeld van de schuifsterkte vóór droog/nat worden van de grond.
 - o Na 6-7 cycli (of als patroon van afname zuigspanning niet voortzet), de beproefde grondmonsters uit Hyprop in Direct Shear stoppen om de afname van de sterkte in kaart te brengen.
- De grond tot hogere zuigspanningen laten uitdrogen. Nadat een beeld is gevonden van wanneer de sterkte niet verder daalt, kan de grond verder uitgedroogd worden tot hogere zuigspanningen. Zo kan de aannahme uit de literatuur, dat de sterkte verder afneemt naar blootstelling aan zuigspanningen die niet eerder zijn voorgekomen, bevestigd worden.
 - o Naar een aantal keer de grond laten uitdrogen tot hogere zuigspanningen, de beproefde Hyprop grondmonsters in een Direct Shear proef doen om verdere afname van schuifsterkte parameters in kaart te brengen.
- De doorlatendheid. Geadviseerd word om te onderzoeken of de doorlatendheid van de grond toe gaat nemen in de komende jaren door bijvoorbeeld scheurvorming of structuurvorming van de grond.
 - o Hierbij kan ook onderzocht worden of een wateroverspanning in de dijk kan ontstaan door scheurvorming.

Algemene adviezen:

- Afname van de stabiliteit. Om de faalcurve realistischer te maken wordt geadviseerd om een klimaatmodel voor Nederland te ontwikkelen waarin de invloeden van klimaatverandering op de eigenschappen van de grond te zien zijn (zoals het Engelse model waarin de invloeden op de waterspanningen, deformatie en dus de afname van de sterkte te zien is).
- Andere klimaat aspecten. Geadviseerd wordt om Invloeden van andere klimaataspecten op dijken ook te onderzoeken. Ook zouden deze invloeden in faalcurves te zetten om deze zo realistisch mogelijk te maken.
- Een verhoging van de grondwaterstand. Aanbevolen wordt om te onderzoeken of een toegenomen doorlatendheid van de grond samen met extreme neerslag kan leiden tot een verhoging in de grondwaterstand.

- Andere invloeden. Ook wordt geadviseerd om de andere invloeden van droogte op een dijk, zoals onderzocht in hoofdstuk 5 in een faalcurve te verwerken (lage grondwaterstand, gasvorming etc.).
- Digitale tweeling. Om zo een verandering in de klimaatverwachtingen eenvoudig door te kunnen voeren wordt aanbevolen om de faalcurve te verwerken in een dynamisch model zoals een digitale tweeling.
- Een faalcurve ontwikkelen voor dijken met verschillende grondsoorten. Hierbij moet ook binnen de grondsoort onderscheid gemaakt worden. Bijvoorbeeld een faalcurve voor siltige klei en humeuze klei enz.
- Mohr-Coulomb associatief. Voor toekomstige stabiliteitsberekeningen wordt aanbevolen om te onderzoeken of Mohr-Coulomb niet associatief meer representatieve waardes oplevert voor de stabiliteitsberekeningen in vergelijking met Mohr-Coulomb associatief.

Advies voor beheer, onderhoud en de toetsing van dijken

- De deformatie van de dijk bijhouden. Een beeld van de deformatie draagt bij aan het inzicht van wat de huidige sterkte van de grond is. Omdat softening vooral bij de teen van een dijk begint is het belangrijk dat vooral de deformatie aan de teen van de dijk bijgehouden wordt.
- Onderzoeken van de invloeden van ophogingen bij onderhoud. Heeft het een negatief invloed op de sterkte doordat het extra gewicht voor meer deformatie zorgt. Of heeft het een positief invloed op de sterkte doordat de lagen die blootgesteld worden aan zwellen en krimpen nu meer beschermd worden door de nieuw aangebrachte laag.
 - o Om de dijk bestendiger te maken tegen droogte kan bijvoorbeeld gekozen worden voor om bij ophoging minder scheurgevoelige grond aan te brengen. Dit kan door de meest optimale consistentie index (I_c) te bepalen (zie Bijlage I – interviews 4 en 7). Deze index zegt iets over hoeveel water de kleisoort bij een bepaalde zuigspanning kan vasthouden (Technische Adviescommissie voor Waterkeringen, 1996).
- Bewezen sterkte. In de praktijk wordt een dijk soms getoetst met bewezen sterkte. Dit houdt in dat uit een toetsing kan komen dat de dijk instabiel is, maar omdat deze al jaren water keert zonder door te breken wordt de dijk toch als voldoende stabiel beoordeeld. Als wordt gekeken naar de afname van de stabiliteit kan gesuggereerd worden dat in de tijd dat de dijk het water succesvol keert de sterkte toch wel is afgenomen. Wanneer dit proces nog langer aanhoudt zal de dijk op een gegeven moment wel kunnen bezwijken ook al leek de dijk niet instabiel. Hierom wordt aanbevolen om bij een toetsing met bewezen sterkte de eigenschappen van de dijk goed in kaart te brengen om de afname van de sterkte van de grond te kunnen bepalen. Hierdoor kan op tijd onderhoud worden gepleegd waardoor de dijk niet “plotseling” zal bezwijken.
- De sterkte van de grond in een dijk monitoren. Aanbevolen wordt om bij de bouw van de dijk en bij vervorming de sterkte van de dijk te monitoren. Omdat vooral de ongedraineerde schuifsterkte belangrijk is om te beproeven (zie paragraaf 5.4.1) wordt aanbevolen om de schuifsterkte te bepalen met vin proeven (Rijkswaterstaat, z.d.).

10. Bibliografie

- An, N., Hemmati, S., Cui, Y., Maisonnave, C., Charles, I., & Tang, C. (2018). Numerical analysis of hydro-thermal behaviour of Rouen embankment under climate effect. *Computers and Geotechnics*, 99, 137–148. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.03.008>
- Aquo. (z.d.). *Consolidatie*. Geraadpleegd 20 februari 2023, van <https://www.aquo.nl/index.php/Id-197551c1-a848-451b-b5dd-fb9020c804fa>
- Aquo. (2011, april 7). *schijnbare cohesie—AQUO*. <https://www.aquo.nl/index.php/Id-035a9bb6-4706-4ade-b6ae-ca719e3c7a9f>
- Backhausen, U., & van der Stoel, A. E. C. (2014). *Reader Geotechniek*. Kivi, Den Haag. <https://www.kivi.nl/uploads/media/5644e664bc67d/Reader%20Geotechniek.pdf>
- Berendsen, J. W., Derksen-Hooijberg, M., & Hofman, P.-J. (2019, november 4). *Historisch onderzoek veenkaden*. Historisch onderzoek veenkaden. <https://www.stowa.nl/publicaties/historisch-onderzoek-veenkaden>
- Bottema, M., Gunn, N., Van Haastrecht, B., Vonk, B., & Van Hemert, H. (2021). *Managing drought effects on levees in The Netherlands and England*. <file:///C:/Users/Beheerder/Downloads/FLOODrisk2020FULLPAPERBOTTEMA-GUNNDrought-effects-on-levees-and-their-mangt-UPDATE-final-corr.pdf>
- Bottema, M., Vonk, B., Janssen, H., & Waveren, H. (2019). *Mitigating drought risk for levees*. *Mitigating drought risk for levees*.
- Briggs, K. M., Dijkstra, T. A., & Glendinning, S. (2019). *EVALUATING THE DETERIORATION OF GEOTECHNICAL INFRASTRUCTURE ASSETS USING PERFORMANCE CURVES*. Cambridge centre for Smart Infrastructure & Construction. [file:///C:/Users/Beheerder/Documents/afstuderen/Litratuur/EVALUATING%20THE%20DETERIORATION%20OF%20GEOTECHNICAL\[2570\].pdf](file:///C:/Users/Beheerder/Documents/afstuderen/Litratuur/EVALUATING%20THE%20DETERIORATION%20OF%20GEOTECHNICAL[2570].pdf)

Centraal Bureau voor de Statistiek. (z.d.). *Bevolkingsteller* [Webpagina]. Centraal Bureau voor de Statistiek. Geraadpleegd 8 februari 2023, van <https://www.cbs.nl/nl-nl/visualisaties/dashboard-bevolking/bevolkingsteller>

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen. (z.d.). *Onderzoek naar de veiligheid van de boezemkade van de polder bleiswijk cum annexis*.

CIRIA, French Ministry of Ecology, USACE. (2013). *The international Levee Handbook*. CIRIA.

Dagwaarden van weerstations. (z.d.). Geraadpleegd 5 mei 2023, van <https://daggegevens.knmi.nl/>

De Smidt, J. Th. (2004). *Technisch Rapport Kistwanden en Diepwanden in Waterkeringen*.

file:///C:/Users/silva/Downloads/tr22_technischrapportkistdammenendiepwandeninwaterkeringen.pdf

Faalmechanisme—Delta Noodmaatregelen. (z.d.). Geraadpleegd 20 maart 2023, van <https://vweb002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/index.php/Faalmechanisme>

Fugro Ingenieursbureau BV, GeoDelft, & STOWA. (2007). *Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale Waterkeringen*.

https://www.agv.nl/contentassets/a4eca7226b3b44f681fbca6d8a67e121/stowa_2007-02_leidraad-toetsen-op-veiligheid-regionale-waterkeringen.pdf

Heinen, M., Bakker, G., & Wösten, J. H. M. (2020). *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: De Staringreeks : Update 2018*. Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/512761>

Helpdesk water. (z.d.). *Regionale waterkeringen* [Webpagina]. Helpdesk water. Geraadpleegd 8 februari 2023, van <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/regionale/>

Informatiepunt Leefomgeving. (z.d.). *Regionale waterkeringen algemene beschrijving* [Webpagina].

Informatiepunt Leefomgeving; Rijkswaterstaat. Geraadpleegd 20 februari 2023, van <https://iplo.nl/thema/water/waterveiligheid/regionale-waterkeringen/regionale-waterkeringen-algemene-beschrijving/>

joostdevree. (2023, maart 24). *K-waarde, doorlatendheid, hydrologische conductiviteit*.

<https://www.joostdevree.nl/shtmls/k-waarde.shtml>

Kaerts, T. (2012). *Craig's Soil Mechanics 8th edition*.

Kindermann, P., & Tigchelaar, J. (2022). *Landelijke Grondparameterset*.

Klein Tank, A., Beersma, J., Bessembinder, J., Van den Hurk, B., & Lenderink, G. (2015). *KNMI 14*

klimaatscenario's voor Nederland. KNMI.

https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/070/616/original/Brochure_KNMI14_NL.pdf?1640271317

klimateffectatlas. (z.d.-a). *Gemiddelde Hoogste Grondwaterstand—Huidig*. Geraadpleegd 24 mei

2023, van <https://hub.arcgis.com/maps/esrinl-content::gemiddelde-hoogste-grondwaterstand-huidig/about>

klimateffectatlas. (z.d.-b). *Kaartviewer—Klimateffectatlas*. Geraadpleegd 24 mei 2023, van

<https://www.klimateffectatlas.nl/nl/>

Kloosterboer, H., & Biemans, R. (2023). *Inventarisatie droge zomer 2022, waterkeringen*.

<https://edepot.wur.nl/586972>

KNMI. (z.d.). *KNMI - KNMI Klimaatsignaal'21*. Geraadpleegd 8 februari 2023, van

<https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/knmi-klimaatsignaal-21>

KNMI - Hoe zijn oude klimaatvoorspellingen uitgekomen? (z.d.). Geraadpleegd 16 maart 2023, van

<https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/hoe-zijn-oude-klimaatvoorspellingen-uitgekomen>

KNMI - Neerslagtrends in Nederland 1910-2010. (z.d.). Geraadpleegd 10 maart 2023, van

<https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/ruimtelijke-verdeling-van-neerslagtrends-in-nederland-in-de-afgelopen-100-jaar>

KNMI14_klimaatscenario's folder. (2015). KNMI.

Kovacevic, N., Potts, D. M., & Vaughan, P. R. (2001). *Progressive failure in clay embankments due to seasonal climate changes*.

file:///C:/Users/silva/OneDrive/Bureaublad/School/Afstuderen/Bronnen/Progressive%20failure%20in%20clay%20embankments%20due%20to%20seasonal%20climate%20changes.pdf

Lenderink, G., van Meijgaard, E., & Selten, F. (2009). Intense coastal rainfall in the Netherlands in response to high sea surface temperatures: Analysis of the event of August 2006 from the perspective of a changing climate. *Climate Dynamics*, 32(1), 19–33.
<https://doi.org/10.1007/s00382-008-0366-x>

Li, Z., Ye, W., Marence, M., & Bricker, J. (2018). Unsteady Seepage Behavior of an Earthfill Dam During Drought-Flood Cycles. *Geosciences*, 9, 17. <https://doi.org/10.3390/geosciences9010017>

MD Sahadat Hossain, P. D., Islam, M. A., Badhon, F. F., & Imtiaz, T. (2021). *Atterberg Limit Test*.
<https://uta.pressbooks.pub/soilmechanics/chapter/atterberg-limit-test/>

Meteorologica Juni 2021 by nvbm—Issuu. (2021, juni 1).
<https://issuu.com/nvbm/docs/jeweuiyw3rerb8ha>

Metya, S., Bhattacharya, G., & Chowdhury, R. (2017). *Residual factor as a variable in slope reability analysis*.

Middendorp, H. (2016, augustus 8). Dijkdoorbraak in Wilnis in 2003. *Boek: Niet Bang Voor Water*.
<https://nietbangvoorwater.info/dijkdoorbraak-in-wilnis-in-2003/>

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (z.d.). *Watersnoodramp 1953* [Webpagina].
Geraadpleegd 8 februari 2023, van
<http://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/watersnoodramp-1953>

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2015, september 16). *Maatregelen tegen overstromingen*. Ministerie van Algemene Zaken.
<https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/water/maatregelen-tegen-overstromingen>

Muraro, S. (2023). *Influence of gas on the behaviour of peat*. Faculty of Civil Engineering and Geosciences Department of Geoscience and Engineering.
file:///C:/Users/Beheerder/AppData/Local/Packages/microsoft.windowscommunicationsapps

_8wekyb3d8bbwe/LocalState/Files/S0/2/Attachments/Expertgroep_Geotechniek_Stefano_Muraro[2713].pdf

Muraro, S., & Jommi, C. (2020). Modelling free gas overpressure in peat layers. *E3S Web of Conferences*, 195, 02027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019502027>

Murphy, J. M., Sexton, D. M. H., Jenkins, G. J., Boorman, P. M., Booth, B. B. B., Brown, C. C., Clark, R. T., Collins, M., Harris, G. R., Kendon, E. J., Betts, R. A., Brown, S. J., Howard, T. P., Humphrey, K. A., McCarthy, M. P., McDonald, R. E., Stephens, A., Wallace, C., Warren, R., ... Wood, R. A. (z.d.). *Climate change projection*. Department for Environment, Food and Rural Affairs. file:///C:/Users/Beheerder/Documents/afstuderen/Literatuur/climate_projections_Uk.pdf

Normcommissie 351 006 Geotechniek. (2017). *NEN 9997-1+C2 Geotechnisch ontwerp van constructies—Deel 1: Algemene regels*. Nederlands Normalisatie-instituut. <https://connect.nen.nl/standard/openpdf/?artfile=592571&RNR=3535337&token=db72a4d8-f9e4-447b-8a6a-fcc0fe1d2946&type=pdf#pagemode=bookmarks>

Nterekas, D. (2009). *Failure of peat dikes due to drought*.

Nutrinorm. (z.d.). *Indeling van de grondsoorten*. NutriNorm. Geraadpleegd 31 mei 2023, van <https://nutrinorm.nl/bodem/aandachtspunten-op-zand-klei-en-veenbodems/indeling-van-de-grondsoorten/>

Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>

Petgaten—3 definities—Encyclo. (z.d.). Geraadpleegd 30 maart 2023, van <https://www.encyclo.nl/begrip/petgaten>

Philip, S. Y., Kew, S. F., Wiel, K. van der, Wanders, N., & Oldenborgh, G. J. van. (2020). Regional differentiation in climate change induced drought trends in the Netherlands. *Environmental Research Letters*, 15(9), 094081. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab97ca>

Ponsteen, W., Willemsen, G., Hogervorst, F., & Halter, W. (z.d.). *Droogtescheuren in dijken afdichten met zwelklei-nut en noodzaak*. Hoogheemraadschap van Delfland. Geraadpleegd 22 maart 2023, van file:///C:/Users/Beheerder/Documents/afstuderen/Litatuur/2019-04-P08-Ponsteen.pdf

Reddy, K. (z.d.). *Experiment 13- Direct Shear Test*. UIC.

Rijksoverheid. (z.d.-a). *In welke situatie moet er ongedraineerd worden gerekend en in welke situatie gedraineerd?* [Webpagina]. Helpdesk water. Geraadpleegd 10 maart 2023, van <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen/vragen/macrostabieliteit/macrostabieliteit/welke-situatie/>

Rijksoverheid. (z.d.-b). *Normeren* [Webpagina]. Helpdesk water. Geraadpleegd 2 mei 2023, van <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/regionale/normeren/>

Rijksoverheid. (z.d.-c). *Zorgplicht* [Overzichtspagina]. Helpdesk water. Geraadpleegd 20 februari 2023, van <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/wetgeving-beleid/handboek-water/wetgeving/wet-milieubeheer/zorgplicht/>

Rijkswaterstaat. (z.d.). *Boringen—Grondmechanisch en geo-hydrologisch onderzoek*. Technische Leidraden; Rijkswaterstaat. Geraadpleegd 2 juni 2023, van <https://tl.iplo.nl/@192699/boringen-grondmechanisch-geo-hydrologisch/>

Rijkswaterstaat. (2021). *Schematiseringshandleiding macrostabieliteit*. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. https://liveadminwindesheim.sharepoint.com/sites/O365-Afstuderen597/Gedeelde%20documenten/General/3_Literatuur/sh-macrostabieliteit-v4-28-mei-2021.pdf?CT=1678370182179&OR=ItemsView

Rotman, V. onze verslaggever R. (2004, januari 9). *Extreme droogte oorzaak dijkdoorbraak Wilnis*. de Volkskrant. <https://www.volkskrant.nl/nieuws-achtergrond/extreme-droogte-oorzaak-dijkdoorbraak-wilnis~b89bb198/>

- Rouainia, M., Helm, P., Davies, O., & Glendinning, S. (2020). Deterioration of an infrastructure cutting subjected to climate change. *Acta Geotechnica*, 15(10), 2997–3016.
<https://doi.org/10.1007/s11440-020-00965-1>
- Stirling, R. A., Toll, D. G., Glendinning, S., Helm, P. R., Yildiz, A., Hughes, P. N., & Asquith, J. D. (2021). Weather-driven deterioration processes affecting the performance of embankment slopes. *Géotechnique*, 71(11), 957–969. <https://doi.org/10.1680/jgeot.19.SiP.038>
- STOWA. (z.d.). *Over STOWA*. Over STOWA. Geraadpleegd 1 juni 2023, van <https://www.stowa.nl/over-stowa>
- STOWA. (2015a). *LEIDRAAD TOETSEN OP VEILIGHEID REGIONALE WATERKERINGEN*. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.
<https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202015/STOWA%202015-15%20Update/STOWA%202015-15%20MODULE%20A%20Algemeen%20gedeelte.pdf>
- STOWA. (2015b). *LEIDRAAD TOETSEN OP VEILIGHEID REGIONALE WATERKERINGEN - MODULE G*. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.
<https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202015/STOWA%202015-15%20Update/STOWA%202015-15%20MODULE%20G%20Beheerdersoordeel.pdf>
- STOWA. (2021). *STOWA Ter Info. Ter Info*.
<https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/NIEUWS/STOWA%20ter%20Info's/STOWA%20ter%20Info%2080/sti%2080%20web.pdf>
- Strijker, B. (z.d.). *Droogtemonitoring* (Nr. V3). TU Delft.
- TB241E - *Fysische Transportverschijnselen*. (z.d.). Geraadpleegd 13 april 2023, van https://eduweb.eeni.tbm.tudelft.nl/TB241E/?wet_van_Bernoulli
- Technische Adviescommissie voor Waterkeringen. (1996). *Technisch rapport klei voor dijken*.
<https://edepot.wur.nl/369272>
- Tienstra, ir. H., Van den reek, ir. B., Smid, drs. W., Boere, ir. E., Hendriks, ing. F. J., Van Hal, ir. A., Jalving, H., Van Mispelaar, ing. S. C., Nijmeijer, ir. N., & Van Hemert, ir. H. (2008). *Richtlijn—*

Normering keringen langs regionale rivieren.

file:///C:/Users/silva/Downloads/ork_2008_04_normeren_krr%20(1).pdf

UMS. (z.d.). *Operation Manual hyprop*. UMS.

file:///C:/Users/Beheerder/Documents/afstuderen/Onderzoeksrapport/Proeven/Hyprop_Manual[3116].pdf

Unie van Waterschappen & ABF Research. (2022). *Themarapportage—Waterveiligheid*. https://live-waves.databank.nl/jive/jivereportcontents.ashx?report=wsp_thema_veiligheid

Universiteit Utrecht. (2018, juli 23). *Wat is het risico op dijkdoorbraak bij droogte?* Nieuws.

<https://www.uu.nl/nieuws/wat-is-het-risico-op-dijkdoorbraak-bij-droogte>

Utili, S., Zielinski, M., & Dyer, M. (2008). *Desiccation fissuring induced failure mechanisms for clay levees*.

file:///C:/Users/Beheerder/AppData/Local/Packages/microsoft.windowscommunicationsapps_8wekyb3d8bbwe/LocalState/Files/S0/2/Attachments/Desiccation-fissuring-induced-failure-mechanisms-for-clay-levees[3566].pdf

Van de Kamp, R., Bisschop, R., Van Boeven, P., Delfgaauw, S., Dykstra, C., Van Eeten, S., Feddema, A., Hoogvliet, M., De Koning, M., Kwast, E., Ter Linde, M., Van Meekeren, B., Van der Meer, J., Van der Putte, E., Van Seters, A., Van der Sman, R., Spruit, R., Van, M., & Zwanenburg, C. (2022). *CUR162 Construeren met grond*. <https://kennisbank-crow-nl.windesheim.idm.oclc.org/Kennismodule#114047>

Van den Akker, J. J. H., Hendriks, R. F. A., Frissel, J. Y., Oostindie, K., & Wesseling, J. G. (2013). *Gedrag van verdroogde kades*. Alterra Wageningen UR.

<https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/297906>

Van der Beek, I. J. (2009). *Toetsrapport polder Middelburg en Tempelpolder*.

Van der Kleij, W. (2001). *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies*.

Van der Steenhoven, G. (2021). *KNMI Klimaatsignaal '21—Hoe het klimaat in Nederland snel verandert*. 72.

Van Duinen, A. (2014). *Handreiking voor het bepalen van schuifsterkte parameters*.

Van Hemert, H. (2021). *Memo Fieldlab predictive twin waterkeringen*. Rijkswaterstaat.

<https://liveadminwindesheim.sharepoint.com/sites/O365->

[Afstuderen597/Gedeelde%20documenten/General/3_Literatuur/FL%20Predictive%20twin%20waterkeringen%20211221%5B2455%5D.pdf?CT=1677861904043&OR=ItemsView](https://liveadminwindesheim.sharepoint.com/sites/O365-Afstuderen597/Gedeelde%20documenten/General/3_Literatuur/FL%20Predictive%20twin%20waterkeringen%20211221%5B2455%5D.pdf?CT=1677861904043&OR=ItemsView)

Van Vliet, L., De Bruin, T. J., De vries, G., & Zwanenburg, C. (z.d.). *Stabiliteit veenkades*. STOWA.

Geraadpleegd 17 maart 2023, van

<https://www.stowa.nl/deltafacts/waterveiligheid/waterveiligheidsbeleid-en-regelgeving/stabiliteit-veenkades>

Walrave, N., Koopmans, R., Van Gelder, I., & Zwanenburg, C. (2022). *EEN EXPERIMENTELE STUDIE NAAR DE INVLOED VAN INITIEEL ONVERZADIGDE KLEI OP DE MACROSTABILITEIT VAN RIVIERDIJKEN*.

[file:///C:/Users/Beheerder/AppData/Local/Packages/microsoft.windowscommunicationsapps_8wekyb3d8bbwe/LocalState/Files/S0/2/Attachments/Walrave_Geotechniek_2022\[4427\].pdf](file:///C:/Users/Beheerder/AppData/Local/Packages/microsoft.windowscommunicationsapps_8wekyb3d8bbwe/LocalState/Files/S0/2/Attachments/Walrave_Geotechniek_2022[4427].pdf)

Waterschap Aa en Maas. (z.d.). *Waterveiligheid* [Webpagina]. Waterschap Aa en Maas; Waterschap Aa en Maas. Geraadpleegd 18 april 2023, van

<https://www.aaenmaas.nl/onswerk/waterveiligheid/>

Waterschap Rivierenland. (2015, augustus 20). *Grondwater en kwel* [Pagina]. Waterschap

Rivierenland; Waterschap Rivierenland. <https://www.waterschaprivierenland.nl/grondwater-en-kwel>

Waterschap Rivierenland. (2021, juli 21). *Hoogwater 2021—Een overzicht* [Nieuwsbericht].

Hoogwater 2021 - een overzicht; Waterschap Rivierenland.

<https://www.waterschaprivierenland.nl/hoogwater-2021-een-overzicht>

Witte, R. F. (2023, februari 23). *Dit is hoe de dijk in Reeuwijk kon verzakken en weilanden onder water zette*. AD.nl. <https://www.ad.nl/bodegraven-reeuwijk/dit-is-hoe-de-dijk-in-reeuwijk-kon-verzakken-en-weilanden-onder-water-zette~a9a4aecf/>

Zwanenburg, C., Van Duinen, A., & Rozing, A. (2013). *Technisch Rapport Macrostabiliteit*. Deltares. <https://edepot.wur.nl/368735>

Bijlagen lijst

Bijlage I - Interviews

Bijlage II - Overview MT-polder

Bijlage III - Atterberg limits

Bijlage IV - Hyprop proef

Bijlage V - Direct shear proef

Bijlage VI - Resultaten PLAXIS

Bijlage VII - Sonderingen

Bijlage VIII - Bepaling parameters

Bijlage I - Interviews

Bijlage I - Interviews

Interviews 1 t/m 3 komen voornamelijk terug in deelvraag 1 en 3.

Interviews 4 t/m 6 komen voornamelijk terug in deelvraag 5.

Bijlage I - Interview 1: Hoogheemraadschap Rijnland (Robbert Schellen)

Welk klimaataspect is het meest interessant bij regionale dijken in uw beheergebied (droogte, regen, vriezen/dooien)?

Voornamelijk droogte. Sinds de afschuiving in Wilnis is er nu ook een droogteprotocol. Vooral droogtegevoelige dijken worden hiermee beter in de gaten gehouden. Een punt waar bijvoorbeeld naar gekeken wordt is scheurvorming. De keuze voor het uitvoeren van de droogteprotocol wordt gedaan als de KNMI van neerslagtekort spreekt (vanaf 175 mm) en op basis van handboring waarmee informatie verzameld wordt over hoe droog de grond is en hoe snel deze grond opdroogt.

Verder heeft Rijnland 1200 km aan regionale keringen in het beheergebied. Op basis van inspecties worden dijken gecategoriseerd en wordt een beeld gemaakt van welke dijken droogtegevoelig zijn. Op dit moment is ongeveer 5 km droogtegevoelig.

Hoe denkt u dat klimaatverandering invloed zal hebben op de regionale dijken?

Buien van 1 op 1000 komen naar verwachting wel vaker voor. Dus zo'n bui die in Limburg is gevallen (2021) kan misschien vaker voorkomen. Het water dat regionale dijken keren wordt vaak gereguleerd. Echter als er meer regen valt in een korte tijd dan dat er weggepompt kan worden kan dit meer van deze dijken vragen. Er wordt al wel gewerkt aan piekbergingen. Tijdens zo'n bui kan dan een schot geopend worden zodat het water vanuit de boezem naar deze berging kan stromen. Echter kan dit alleen als daar plek voor is. Wij weten dus verder nog niet heel goed hoe wij daar mee om moeten gaan.

Droogte is ook erg belangrijk. Voornamelijk voor de droogtegevoelige dijken. Op de degradatie van (veen)keringen onder invloed van droogte is nog geen goed zicht. Wel wordt hierop de anticipeert door droogtegevoelige keringen te overlagen met een halve meter klei. Om het effect duidelijk een beeld te brengen zou dus meer onderzoek nodig zijn.

Hoe belangrijk is de toplaag van een dijk?

Bij droogtegevoelige dijken, zoals dijken met een veen kern, is de toplaag van belang. Door bijvoorbeeld een dikkere kleilaag aan te brengen kan de veenlaag beter beschermd worden tegen bijvoorbeeld droogte. Ook kan een dikkere kleilaag ervoor zorgen dat vegetatie minder makkelijk water uit de kern onttrekken. Bovendien kan een dikkere toplaag zorgen voor meer gewicht bij een lichte dijk (veen) wat ook positief bijdraagt aan een weerstand tegen afschuiven.

Wat doet vegetatie met het grondwater van de dijk?

Vegetatie onttrekt vocht uit de kering. Langer gewas onttrekt water uit diepere lagen. Bovendien verdampt langer gewas meer water. Maar aan de andere kant heb je ook meer schaduw bij langer gewas waardoor het ook voor minder warmte zorgt en dus ook voor minder verdamping. Er zijn een aantal onderzoeken gedaan naar welke van de twee de meeste invloed heeft.

Kunt u iets vertellen over de afschuiving van de dijk in Reeuwijk?

De opbouw van de dijk bestond uit een dikke laag veel veen (-2 tot -9 nap), vervolgens een klein klei laagje en als laatste de pleistocene zandlaag (rond -10). In de begin situatie was het dus al een zwakke dijk. De dijk werd eerder al een keer opgehoogd omdat de locatie al was gezet. Bovendien was de kleilaag ook slap. Door het zakken waren er scheuren in de kering ontstaan waardoor er extra belasting op de kering op kwam.

Oorzaak is dus: scheuren in de kruin, zetting en lokale slappe lagen. Droogte heeft het enkel versnelt of verergert.

Naar aanleiding van het falen van deze dijk zouden polderkades meer aandacht moeten krijgen.

Neemt grond zijn oorspronkelijke sterkte aan na een cyclus droog en nat worden?

Het is niet duidelijk of grond weer zijn oorspronkelijke sterkte aanneemt als het een keer droog is geweest en daarna weer nat is geworden.

Zijn scheuren gevaarlijk voor de stabiliteit?

Hier is niet echt een vast kader voor. Het is afhankelijk van het complete plaatje. Een scheur op zich is niet gelijk een risicofactor. Afhankelijk van hoe lang/diep een scheur is kan afhankelijk van de gehele situatie pas bepaald worden of het gevaarlijk is.

Kan er een gevaar ontstaan als water in een scheur infiltreert?

Ja, dit kan leiden tot ongelijke waterspanningen in een dijk. Bovendien zou het in theorie kunnen leiden tot micro-instabiliteit maar dit is nog niet eerder gezien. Een scheur wordt als 'diep' gezien vanaf ongeveer 50 cm. Maar er is niet echt een maatstaf voor hoe diep nou echt gevaarlijk is.

Worden scheuren die in de zomer ontstaan, in de winter opnieuw gemonitord om de infiltratie van regenwater in de winter te monitoren?

Nee, scheuren uit de zomer worden niet opnieuw gecontroleerd. Er wordt enkel een algehele inspectie gedaan van dijken in het voorjaar. Echter wordt er geen specifieke inspectie gedaan voor 'zomerscheuren'. De meeste scheuren herstellen namelijk vanzelf en meer hevige scheuren worden gelijk al opgevuld met tuinaarde.

Hoe vaak vinden inspecties aan een dijk plaats?

Rijnland heeft enkel 1 vast inspectiemoment namelijk, in het voorjaar. Verder worden er extra inspecties uitgevoerd in de volgende gevallen bij neerslagtekort.

- Droogte inspectie: bij 125 mm tekort wordt op 4 locaties gekeken hoe de keringen erbij liggen. Bij 150 mm neerslagtekort en bij 175 mm worden ook andere droogtegevoelige keringen geïnspecteerd.

Denkt u dat een faalcurve die wij willen ontwerpen met dit onderzoek op een bepaalde manier kan bijdragen aan het beheren en onderhouden van dijken?

Ja, een faalcurve kan handig zijn omdat er nu enkel één toets moment is en vervolgens ervan uit wordt gegaan dat de kering komende tijd dus ook goed is. Het kan dus helpen bij het prioriteren van beheer en onderhoud. Het kan onderdeel worden van de lange termijn asset planning. Als je een duidelijk beeld in kaart kan brengen van de afname van de stabiliteit als gevolg van een bepaalde invloed zou je het moment voor het uitvoeren van beheer en onderhoud veel nauwkeuriger kunnen inschatten.

Bijlage I - interview 2: Rivierenland (Specialist waterkeringen)

Hoe wordt er momenteel voor gezorgd dat dijken de effecten van het (veranderende) klimaat kunnen weerstaan? (Wordt er überhaupt rekening gehouden met het klimaat?)

De specialist waterkeringen verteld dat bij de toetsing van de stabiliteit van dijken binnen Rivierenland geen rekening wordt gehouden met het veranderende klimaat. De belastingen worden wel verhoogt in verband met een hogere zeespiegel en een toename van heviger stormen. Maar degradatie van het dijklichaam wordt niet meegenomen bij de toetsing.

Wateroverspanning in de dijk kan leiden tot afschuiven, deze overspanning kan ontstaan wanneer de 'waterbalans' van de kering niet in orde is. Belangrijk daarin is dat de het buitentalud goed 'waterdicht' is. Een dikke kleilaag zou de oplossing voor dit probleem kunnen bieden. Daarbij is het nog wel de vraag in welke mate de toenemende structuurvorming door droogte/klimaatontwikkelingen leidt tot een vermindering van de 'waterdichtheid'.

Tot welke diepte doet verdroging iets met de eigenschappen van klei?

Verdroging kan zorgen door een toenemende structuurvorming en daarmee infiltratie van het binnentalud potentieel leiden tot Grasbekleding Afschuiving van het Binnentalud (GABI) verteld de geïnterviewde. Dit fenomeen wordt nader onderzocht in het innovatieproject STG (Stabiliteit bij Overslag). Wanneer water in de dijk kan infiltreren zal de korrelspanning laag worden en de dijk instabiel. Dit treedt vooral op bij dijklichamen met zand/zandscheggen, daarom is een waterdichte bekleding erg belangrijk.

In welke mate is klei in staat zichzelf te herstellen in winterperiode?

Begin volgend jaar zal er gestart worden met infiltratieproeven bij Rivierenland. De specialist waterkeringen verteld dat hij zelf ons niet verder kan helpen met het herstellen van scheuren. Bij Deltares kan meer informatie opgezocht worden over hoe klei zich herstelt na een droge periode. Over dit onderwerp kan contact opgenomen worden met een collega. De geïnterviewde weet hiernaast dat de universiteit van Wageningen ook bezig is met dit onderwerp.

Hoe wordt een stabiliteit berekend van de dijk?

Momenteel speelt er een kennisontwikkeling: sterkte van de initieel onverzadigde zone. Meer sterkte mag toegekend worden aan het dijksmateriaal bij de initiële fase zich boven de freatische lijn bevindt en bij hoogwater verzadigd. Hier wordt op dit moment onderzoek naar gedaan. Als dit goed onderbouwd wordt kan er veel sterkte hierin gewonnen worden. De moeilijkheid zit m in de aantoonbaarheid van deze extra sterkte en hoe en welk onderzoek je daarvoor moet uitvoeren.

Einde winter

Het einde van de winter is volgens de geïnterviewde de gevaarlijkste periode omdat de grasmat hier het slechtste is terwijl het wel al wat belasting heeft ondergaan. Dit komt omdat de grasmat is geërodeerd door het slechte weer in de winter. Daarnaast is voor primaire keringen de winterperiode representatief omdat doorgaans de hoogwaters door smelt en regenwater in de winter/voorjaar optreden

Maria vraagt hoe het kan dat er dan toch doorbraken in de droge perioden voorkomen?

De specialist waterkeringen verteld dat dit komt omdat Regionale keringen altijd belast worden door het water in het boezem kanaal. Het water in de boezem kanalen wordt gereguleerd met gemalen, deze gemalen pompen het water uit de polder waardoor deze droog blijft. Primaire keringen keren alleen water bij een hoge waterstand, en dit komt voornamelijk in de winter voor. Daarom zijn de gefaald keringen in de zomers Regionale keringen. De geïnterviewde weet niet zeker of de zomer de

maatgevende periode is voor de instabiliteit van de keringen. Hij weet wel dat een hoge waterspanning kan zorgen voor instabiliteit en hiervoor moet het water hoog staan of moet er regen zijn.

Worden scheuren die in de zomer ontstaan verder in de winter gemonitord om de gevaren van infiltratie van water in kaart te brengen? Waarom wel/niet?

Bij de inspecties wordt geen extra rekening gehouden met scheuren die in de zomer zijn ontstaan. Elk jaar wordt een voorjaar- en najaar schouw gehouden, hierbij wordt vooral naar de bekleding van de dijk gekeken. Verschillende collega's kunnen gecontacteerd worden voor meer vragen.

De geïnterviewde speculeert dat gemiddelde lage waterstanden kunnen ook wat doen met de sterkte van het materiaal in de kern. Wanneer er aan een dijk gerekend wordt reken je met twee waterstanden: een dagelijkse situatie en maatgevend hoogwater situatie. Wanneer in de dagelijkse situatie sprake is van een lagere waterstand zou de grond kunnen extra kunnen consolideren wat bevorderlijk is voor de stabiliteit van de dijk tijdens maatgevende waterstanden.

Klei in het voorland zorgt voor meer weerstand en leidt tot een lagere opwaartse druk bij de binnenteen.

Welke grondeigenschappen worden door het klimaat beïnvloed?

- **Hoe veranderen de grondeigenschappen onder invloed van het klimaat?**

De grondsoorten veen en klei wordt het meest beïnvloed door droogte. Klei en veen zullen in volume afnemen waardoor klei zal scheuren en veen zal zetten (wat kan leiden tot bodemdaling) Omdat zand al drainerend is en het water hier snel doorheen zal stromen wordt dit weinig beïnvloed door droogte. Een dijk ligt meestal op oude zand ruggen. Wanneer er bodemdaling optreedt door zetting van het veen kan er een hoog waterstand verschil ontstaan. Dit kan zorgen voor meer belasting op de dijk.

Kunt u voorbeelden geven van dijken die zijn gefaald onder invloed van droogte?

- **Wat deed droogte met de grondeigenschappen waardoor de stabiliteit afnam?**

De specialist waterkeringen verteld dat er een dijk was in hun gebied, waarbij de toplaag door een neerslag te kort in de lente was uitgedroogd. De bovenste laag van de dijk was waarschijnlijk van klei en ze waren van plan een aantal handboringen uit te voeren op deze dijk. Door de droogte bleek dat bijna niet door de grond heen te boren was. De kleilaag was door de droogte enorm hard geworden. Omdat dit in het voorjaar plaats vond waren de lagen onder de toplaag waarschijnlijk wel nat.

Hoe denkt u dat het ontwikkelen van een faalcurve (en dus de in kaart brenging van de invloeden van het klimaat) kan bijdragen aan de optimalisering van beheer en onderhoud?

De geïnterviewde denkt dat een faalcurve vooral voordeel op kan leveren bij de ontwerp opgave. Hierbij zou het met de faalcurve makkelijk te bepalen zijn hoeveel de kleilaag onder invloed van droogte degradeert. Ook zou de biodiversiteit in de faalcurve moeten worden opgenomen om de grasmat te verbeteren. Voor beheer en onderhoud zou de faalcurve gebruikt kunnen worden bij het inplannen van het maaien.

Bijlage I - Interview 3: PhD kandidaat TU Delft (Bart Strijker)

In je onderzoeksrapport: “Droogtmonitoring, analyse van de waterhuishouding in boezemkades tijdens perioden van droogte” zeg je onderzoek te doen naar drie deelvragen. Kan de derde deelvraag: “Hoe wordt de sterkte en stabiliteit van een dijk beïnvloed door de waterhuiskundige status (vochtgehalte en grondwaterstand) en wat het effect is van kortsluiting, scheuren en gasvorming, op de stabiliteit” al beantwoordt worden?

Waterhuishoudkundige status van kering (waterspanningen en vochtgehaltes) kunnen positieve en negatieve effecten hebben op stabiliteit:

- Positieve effecten van droogte op de stabiliteit:
 - o Waterspanning: hoe hoger, hoe minder stabiel een kade beoordeeld wordt. Wat ertoe leidt dat keringen afgekeurd worden. Droogte zou hier juist een positief effect op hebben omdat dat ervoor zorgt dat de waterspanning in een dijk afneemt.
 - o Wanneer de freatische lijn lager komt te liggen en het vochtgehalte in een dijk afneemt kan de zuigspanning in de onverzadigde zone toenemen wat tot hogere effectieve korrelspanningen leidt en een stabielere kade wat ook bekend staat als “schijnbare” cohesie. Dit kan een positief effect hebben op de stabiliteit.
- Negatieve effecten van droogte op de stabiliteit
 - o Gewicht van de grond neemt af als het vochtgehalte afneemt, waardoor de effectieve spanningen ook kunnen afnemen. Afhankelijk van waar in het profiel de gewichtsafname plaats vindt, kan dit kan leiden tot een positief of negatief effect op de stabiliteit van een kade. Als het gewicht van de aandrijvende grondmoot afneemt heeft dit een positief effect op de stabiliteit van een kering. Wanneer het gewicht afneemt en het tegenwerkende moment verminderd, heeft dit een negatief effect op de stabiliteit van een kering.
 - o Bij een horizontale afschuiving is de gewichtsafname van het gehele dijklichaam belangrijk en kan dat de stabiliteit doen afnemen (zoals bij Wilnis). Hiervoor is de aanwezigheid van een watervoerende laag met een hoge waterspanning met daarboven een licht dijklichaam (veen of organische klei gronden). Hierdoor kan de lichte grond gaan opdrijven, wat ervoor kan zorgen dat de dijk afschuift.
- Conclusie: het is lastig te zeggen of waterhuishoudkundige status van kering in het algemeen een positief of negatief effect heeft op de stabiliteit. Dit is sterk afhankelijk van de opbouw van een kering.

Zijn de resultaten van je onderzoek naar de hydrologische huishouding in een dijk tot nu toe zoals verwacht?

Bart was verrast door de grote variatie aan meetresultaten per dijk. Hij mat grote verschillen in grondwaterstanden, vochtgehaltes etc. tussen locaties. Doordat er zoveel variatie was kwam Bart erachter dat 10 locaties te weinig was om een duidelijk patroon te herkennen. Hij beredeneerd daarna wel dat het veel tijd zal kosten en duur zal zijn om dit onderzoek uit te breiden naar meer locaties. En het is dan nog de vraag of je wel een patroon zal kunnen vinden.

Niet-triviaal probleem: je observeert iets maar deze observatie kan komen door een aantal verschillende factoren en de invloed van deze factoren is niet te onderscheiden. Er was dus weinig patroon te herkennen op basis van geometrie en ondergrond. Versturende elementen in de dijk kunnen ook effecten hebben op grondwaterstromingen. Hiermee wordt dus bedoeld, grond lagen die niet in kaart zijn gebracht bij de sonderingen zoals zand lenzen of stukken puin. De geometrie alleen zegt niet veel over hoe de stijghoogten verschillen.

Hoe kan de kwaliteit van de toplaag de stabiliteit beïnvloeden?

Dit is ook weer locatie afhankelijk. Het vochtgehalte kan afnemen in de toplaag wat effect kan hebben op het volumieke gewicht. Scheurvorming kan zorgen voor een afname van de stabiliteit door een toename van de waterspanning a.g.v. vergrootte infiltratie.

De toplaag zelf lijkt een kleine bijdrage te hebben aan totale falen van de kering. Het is een relatief kleine deel van een glijvlak. Het draagt dus weinig bij aan de schuifsterkte. Dit is wanneer we het vergelijken met de situatie dat we geen rekening houden met zuigspanningen. Als we het vergelijken met de situatie dat we wel rekening houden met hoge effectieve spanningen a.g.v. zuigspanningen (wat in werkelijkheid kan optreden), kan scheurvorming en het verlies van schuifsterkte wellicht een grotere invloed hebben.

Perspectief Bart: Relatief gezien draagt de toplaag weinig bij aan schuifsterkte van een kering.

Tot hoeverre heeft invloed van droogte een negatief en wanneer heeft droogte positieve invloed op de stabiliteit van een dijk?

- Klei dijken:
 - o droogte laat de grond consolideren: droogte leidt dus tot consolidatie en dus tot een sterkere dijk. Een dijk met veel kleilagen in de diepere lagen wordt sterker door deze consolidatie.
- Veen dijken (op zandige ondergrond):
 - o Deze dijken hebben als eigenschap dat ze droogte gevoelig zijn. Wanneer de zandige ondergrond een hoge stijghoogte heeft en de veen laag gewicht verliest dan kan uitdroging bijdragen aan instabiliteit. Veendijken herstellen ook veel trager dan dijken met andere grondsoorten.

Dit zijn slechts enkele elementen. Er zijn meer aspecten van droogte die de stabiliteit op lange termijn kan beïnvloeden, zoals deformaties en structuurvorming.

Herstellen scheuren volledig en komen ze weer terug bij een volgende droogte periode?

Bart had geen scheuren geconstateerd tijdens zijn onderzoek. Maar scheuren dichtten inderdaad niet altijd volledig. Het kan voorkomen dat scheuren niet volledig herstellen in de winter waardoor je het voorjaar ingaat met scheuren. Bart vraagt zich hierna af wat er erg is aan een scheur in een dijk.

- Scheur in combinatie met veel regen → kan leiden tot een heel natte dijk. De vraag is of dit in de praktijk ook gebeurt.

Het is niet duidelijk of een scheur bijdraagt aan een grotere infiltratie aangezien een dijk niet altijd helemaal vol zit met scheuren. Er zijn hiernaast geen duidelijke praktijkvoorbeelden over de ernst van scheuren.

- Vervolg vraag: Zou er meer onderzoek naar gedaan moeten worden naar het effect van scheurvorming op dijken?

Bart denkt van wel. Er wordt nog niet logisch geïnspecteerd: tijdens droogte wordt een dijk geïnspecteerd maar wanneer het dan gaat regenen wordt de dijk niet geïnspecteerd. Juist op dat moment zou geïnspecteerd moeten worden om te bepalen wat de invloed is van deze scheur op een dijk.

Patroon gezien in veen en klei dijken over waterhuishouding?

Waterhuishouding wordt nog kwantitatief geanalyseerd. Maar je ziet dus dat veenkaden trager herstellen. Het duurt langer voordat de vochtgehalten in de onverzadigde zone dus weer op peil zijn.

De meeste dijken zijn hiernaast een combinatie van klei en veenlagen waardoor het moeilijk te zeggen is wanneer een dijk een klei dijk is of een veen dijk. Dit maakt het moeilijk om te kwantificeren hoe de waterhuishouding verschilt.

Vochtgehalte in toplaag wordt al aangevuld maar dieper nog niet.

Als er neerslag valt kan het water of naar de onverzadigde of de verzadigde zone gaan. De onverzadigde zone kan het water vasthouden waardoor het water rond de toplaag wordt vastgehouden. Hierdoor wordt de dieper gelegen grondwaterstand nog niet aangevuld.

Als vochtgehalte nog niet toeneemt kan de grondwaterstand ook al toenemen. Dit kan komen door waterstromingen vanuit het boezem kanaal. Grondwaterstromingen zijn alleen moeilijk te meten omdat het water ook om de sensoren heen kan stromen.

Als grondwaterstand laag wordt, wordt stabiliteit groter. Heeft dit een maximum? Dat op een gegeven moment een verlaging van grondwaterstand niet meer leidt tot meer stabiliteit?

Alleen een lage grondwaterstand leidt inderdaad tot hogere stabiliteit. Maar Bart weet niet of dit voor alle gevallen geldt. Bij sommige dijken zie je een maximale uitdroging. Bij sommige gevallen lijkt grondwaterstand bij droogte op een gegeven moment niet meer te dalen. Er lijkt dan dus een maximum te zijn. Het grondwaterstand wordt namelijk vanaf een gegeven moment weer aangevuld vanuit de boezem.

In steile dijken ontstaat die maximale grondwaterstand minder snel. Dit komt doordat het water sneller aangevuld wordt vanuit de boezem. Bij flauwere dijken moet het water een langere afstand door de grond moet afleggen dan bij steile dijken. Ook de doorlatendheid van de grond speelt een grote rol bij de grondwaterstroming door een dijk. Bij steile dijken is er minder fluctuatie in de grondwaterstand.

Kan je iets zeggen over gasvorming in veenlagen?

Bart weet hier weinig van. Het kan inderdaad gebeuren en het kan effect hebben op het gewicht van de dijk. Je ziet het veel bij bodems van kanalen en teensloten maar het kan ook in de dijk zelf gebeuren. Bart speculeert dat dit ertoe kan leiden dat de dijk lichter wordt maar hij heeft dit zelf nooit mee gemaakt.

Kun je iets zeggen over de invloed van vegetatie op de verdroging van een dijk?

Bij de veldmetingen is het moeilijk om een verband te leggen tussen de verdroging van een dijk en de vegetatie. Wel zegt de theorie hoe hoger de vegetatie hoe meer water verdampt. Meer biomassa zorgt voor meer verdamping waardoor de verdroging ook toeneemt. Ook Bloemrijke dijken kunnen impact hebben op de waterhuishouding. Bart kan echter niet veel zeggen over de mate van verdamping van deze bloemen. Er wordt vaak enkel gekeken naar vegetatie als bescherming tegen erosie maar er wordt nog niet veel gekeken naar de verdamping door vegetatie. Hier zou meer onderzoek naar gedaan moeten worden.

Zijn er dingen die in dit rapport die niet naar voren zijn gekomen die jij tijdens het onderzoek wel tegen bent gekomen? Nieuwe inzichten?

Niet hydrostatische waterspanningen zijn relevant bij droogte. Stijghoogten in diepe gronden kunnen hoog zijn terwijl deze in hogere lagen laag zijn. Dit kan tot ongunstige situaties kan leiden. Zo kan je tegelijk uitdroging in toplaag hebben en hoge stijghoogte in diepte. Dit zou voor instabiele situaties kunnen zorgen.

Er wordt nog te veel gefocust op het te nat of te droog zijn van dijken. Maar de situaties daar tussenin worden nog weinig onderzocht. Bijvoorbeeld wanneer de bovenste grondlagen van de dijk al aan het verdrogen zijn maar de onderste lagen nog niet waardoor hier een hoge waterspanning kan ontstaan. De overgang van droge zomers naar natte winters worden ook nog weinig onderzocht.

Zijn er naast droogte ook andere klimaatinvloeden die relevante invloed hebben op een dijk?

Bart vraagt zich af of droogte überhaupt belangrijk is voor de veiligheid. Er is veel kennis over droogte bij dijken maar er is geen volledig beeld over de gevaren. Er wordt nog heel verschillend gedacht over de gevaren van droogte. Er is echter nog geen eenduidig antwoord over wat deze gevaren zijn.

laatste samenvattende vragen:

Wat ben je tijdens je onderzoek tegen gekomen over de invloed van droogte op de hydrologie in dijken?

Er is een enorme variatie tussen locaties waar Bart zelf onderzoek naar heeft gedaan. De invloed van droogte op een is dijk erg afhankelijk van lokale kenmerken zoals de grond opbouw en de grondwater stromingen. Een patroon herkennen is erg lastig door de heterogeniteit van de dijk.

Dijk die meest gevoelig zijn voor droogte zijn veendijken op een zandlaag, klopt dit?

Zandpakket met hoge stijghoogte met daarboven een veenlaag → dit zijn droogtegevoelige dijken.

Bijlage I - Interview 4: Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (Theo Reuzenaar)

Hoe vaak worden er inspecties gedaan aan dijken?

Tabel 2.3 Inspectieplanning waterkeringen

	Inspectietype	Inspectiemaand													
		jan	feb	mrt	1-15 apr	15-30 apr	maji	juni	juli	aug	sep	1-15 okt	15-31 okt	nov	dec
Standaardinspecties	Voorjaarsinspectie (1x)														
	Najaarsinspectie (1x)														
	Dagelijkse inspectie														
Bijzondere inspecties	Hoogwater														
	Storm														
	Droogte														
	Crisisinspectie														
	Bomen (in project)														
	Lodigen (uitbesteed)														
Aandachtspunten	Uitvoering tijdens	Inspectiemaand aandachtspunten													
Grasbekleding	Voorjaars- en najaarsinspectie														
Natte plekken	Voorjaars- en najaarsinspectie en hoogwater														
Onkruidhaarden	Standaardinspecties														
Verzakking/opbolling	Voorjaars- en najaarsinspectie														
Opschot/houtopslag															
Steenbekleding incl. stortwerk															
Asfaltbekleding															
Damwanden/beschoeiingen															
NWO's en WO's															
Duinafslag	Voorjaars- en najaarsinspectie en na storm														
Duinovergangen															
Stuifgaten															
Strandhoofden	Voorjaarsinspectie en na storm														
Helmgras	Voorjaars- en najaarsinspectie														
Afrasteringen	Dagelijkse inspectie														
Stuifschermen	Dagelijkse inspectie in het gesloten seizoen														

Opmerkingen bij de tabel:

- De najaarsinspectie is alleen voor de primaire keringen
- De strandhoofden en stortbermen inspecteren bij extreem laag water
- De bomen worden in een project aangepakt en zijn nog niet ingepland
- Storm en hoogwater kunnen het hele jaar door voorkomen.
- De gebruikte kleuren staan voor de verschillende inspectietypen, waarin de aandachtspunten terugkomen.

Hoe vaak worden er droogte inspecties gedaan aan dijken?

Droogtefasen waterkeringen

De droogtefasen bij waterkeringen met neerslagtekort en uitgangspunt zijn:

Droogtefase	Neerslagtekort	Uitgangspunt
Alertfase (zie blz. 10)	175 millimeter 225 millimeter	Wanneer het neerslagtekort van 175 millimeter in de regio Waterland wordt bereikt, waarbij de verwachting is dat de droogte nog langer aanhoudt, treedt het Draaiboek Droogte waterkeringen in werking en begint de Alertfase. De gebiedsbeheerders rapporteren de droogtesymptomen van de waterkeringen. Dit is een globaal beeld van de droogte op de waterkeringen (nog geen inspectie). Bij 225 mm neerslagtekort in de regio Waterland start de inspectie van de droogtegevoelige waterkeringen (59 km) en de consignatie van de adviseur Waterveiligheid. Tevens wordt de beweiding van de dijken in de gaten gehouden op aanwezigheid of ontstaan van schade aan grasmat.
Alarmfase 1 (zie blz. 12)	275 millimeter	Wanneer het neerslagtekort van 275 millimeter in de regio Waterland wordt bereikt begint de Alarmfase 1 en komt het waterschapsactieteam (WAT) van de Crisisbeheersingsorganisatie (CBO) in de lucht. Er wordt tevens de afweging gemaakt om de inspectie uit te breiden naar alle risicovolle regionale en primaire waterkeringen (450 km).
Alarmfase 2 (zie blz. 14)	325 millimeter	Wanneer het neerslagtekort van 325 millimeter in de regio Waterland wordt bereikt begint de Alarmfase 2.
Alarmfase 3 (zie blz. 16)	n.v.t.	Dreigende crisis (bijv. dreigende dijkdoorbraak)
Alarmfase 4 (zie blz. 17)	n.v.t.	Dreigende crisis (bijv. dreigende dijkdoorbraak en beheergebiedbreed)

Tabel: Fasering droogte waterkeringen

Hoe vaak wordt er beheer en onderhoud gedaan aan dijken?

Dit is erg afhankelijk van soort onderhoud. Daar zijn raamwerkcontracten voor. Maar dit verschilt per dijk.

Hoe vaak wordt er beheer en onderhoud gedaan als gevolg van een klimaatinvloed (in dit geval droogte)?

Komt niet heel veel voor. Bij waterschap Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier is in Purmer en bij het Bijlmermeer wel wat gedaan aan scheuren door droogte. Maar het is best duur waardoor er veel wordt uitgesteld. Met bentonietkorrels wordt er een vreemd materiaal in de dijk aangebracht. Het mengsel komt niet goed in de scheuren omdat het erg plakkerig is. Het verdeelt zich niet goed in de scheur. Het is dus lastig en duur om deze scheuren aan te pakken omdat er afgegraven moet worden en de laag opnieuw aangebracht moet worden.

Naast droogtescheuren zijn er ook scheuren door zettingsverschillen na een dijkversterking. Het ene versterkt het andere.

Hoeveel kosten is waterschap X jaarlijks kwijt aan droogte inspecties en beheer- en onderhoud door droogteschade?

De geïnterviewde heeft geen precies beeld van hoeveel de kosten zijn. Maar de kosten tijdens droogte bestaan voornamelijk uit de uren en als schade niet makkelijk te herstellen is. Afhankelijk van de droogtefase (zoals bij vraag 2 is omschreven) moet continu aandacht besteed worden aan droogtegevoelige dijken. De uren die nodig zijn voor inspecties en als droogte aanzet en calamiteitenorganisatie opgeroepen moet worden, is wat de kosten doet stijgen.

Op welk gebied (inspecties/beheer en onderhoud) zouden kosten bespaard kunnen worden?

Als het gaat om droogte, kunnen kosten bespaard worden door te voorkomen dat scheuren ontstaan. Dit kan door grond aan te brengen die minder scheurgevoelig is. Dit wordt bepaald aan de hand van de juiste consistentie index (I_c). De grond moet niet te vochtig maar ook niet te droog zijn. Dit kan je opnemen in je bestek om zo scheuren te voorkomen.

Met een digitale tweeling wordt een dijk in een computermodel weergegeven. Door data uit de huidige conditie van de dijk te verwerken, verandert het model met de werkelijkheid mee. Zo kan continu de status van de stabiliteit op een bepaald moment in kaart gebracht worden. Het doel van ons onderzoek is om de invloed van het klimaat inpasbaar te maken voor in zo'n digitale tweeling.

In dit onderzoek wordt er voor de invloed van droogte een faalcurve ontwikkelt. Hierin wordt de afname van de stabiliteit onder invloed van droogte in beeld gebracht. Deze curve zou in een digitale tweeling geïmplementeerd kunnen worden.

Wat zou u als waterkeringsbeheerder willen dat een Digitale Tweeling zou doen?

Meneer Reuzenaar denkt dat het erg lastig is om een digitale tweeling te ontwikkelen. Een dijk is niet homogeen, de historie is complex, de dijkopbouw is complex. Daarom kan het moeilijk zijn om een model te maken die precies de realiteit weergeeft. Er spelen zo veel processen dat er dingen vergeten worden of niet te modelleren zijn waardoor er geen realistisch beeld geschetst kan worden.

Welke vormen van aantasting van een dijk moeten meegenomen worden in een digitale tweeling om een realistisch beeld van de conditie van de dijk weer te geven?

-

Denkt u dat het implementeren van de invloeden van het klimaat in een digitale tweeling kunnen bijdragen aan de optimalisering van inspecties, beheer en onderhoud?

Ondanks dat het modelleren van een perfecte digitale tweeling erg moeilijk is, is het wel belangrijk om de invloeden van het klimaat op een dijk in kaart te brengen. Oxidatie van veen en zetting van klei kunnen de sterkte van de dijk aantasten. Het doodgaan van het grasmat door droogte kan de erosiebestendigheid aantasten. En zo zijn er nog meer invloeden mogelijk.

Hoe denkt u dat het inpasbaar maken van klimaatinvloeden (in dit geval droogte) kan bijdragen aan een optimalisering van inspecties, beheer en onderhoud?

Het in kaart brengen van de invloeden van het klimaat is belangrijk om er voor te zorgen dat medewerkers dezelfde inzichten hebben. Er stromen constant nieuwe medewerkers binnen bij waterschappen zoals afgestudeerden of mensen vanuit andere bedrijven/waterschappen. Iedereen is daarom een andere manier van werken gewend. Het in kaart brengen van de klimaatinvloeden zorgt dat mensen die er aan werken hetzelfde beeld voor zich hebben. Het kan dus bijdragen aan het omhoog brengen van het kennisniveau in Nederland.

Hoe denkt u dat het inpasbaar maken van klimaatinvloeden (in dit geval droogte) kan bijdragen aan een optimalisering van de kosten die gemaakt worden voor inspecties, beheer en onderhoud?

Het in kaart brengen van de klimaatinvloeden geeft voornamelijk inzicht in waterveiligheid. Het gaat meer kosten omdat er onderzoek gedaan moet worden naar deze invloeden maar onderzoek is wel erg belangrijk.

Bijlage I - Interview 5: Brabantse Delta (Henk Eland en Ruud Bastiaanssen)

Hoe vaak worden er inspecties gedaan aan dijken?

Regionale keringen in eigendom van het waterschap worden twee wekelijks geïnspecteerd.

Hoe vaak worden er droogte inspecties gedaan aan dijken?

Droogte inspecties worden afhankelijk van de situaties uitgevoerd. In ons beheersgebied zijn nagenoeg geen droogte gevoelige waterkeringen. Met uitzondering enkele primaire keringen met een dunne klei bekleding en met gebreken. Deze keringen worden in een droogte periode wekelijks gecontroleerd.

De meeste regionale kering zijn in ons beheersgebied niet droogte gevoelig. Bij slecht 1% van het areaal speelt een droogte probleem. Veendijken komen niet voor in ons beheersgebied.

Hoe vaak wordt er beheer en onderhoud gedaan aan dijken?

Beheer en onderhoud van de waterkeringen in onderhoud bij het waterschap wordt uitgevoerd aan de hand van het AOWW en daaruit voortvloeiende maaibestek en of pachtcontract

Onderhoud kan per situatie wisselen. Gemiddeld genomen worden de keringen 2 maal per jaar gemaaid, gehooid en het maaisel afgevoerd

Hoe vaak wordt er beheer en onderhoud gedaan als gevolg van een klimaatinvloed (in dit geval droogte)?

Hoeveel kosten is waterschap X jaarlijks kwijt aan droogte inspecties en beheer- en onderhoud door droogteschade?

De kosten door droogte worden niet specifiek bijgehouden. Kosten zitten hoofdzakelijk in extra controle en inspecties.

Met een digitale tweeling wordt een dijk in een computermodel weergegeven. Door data uit de huidige conditie van de dijk te verwerken, verandert het model met de werkelijkheid mee. Zo kan continu de status van de stabiliteit op een bepaald moment in kaart gebracht worden. Het doel van ons onderzoek is om de invloed van het klimaat inpasbaar te maken voor in zo'n digitale tweeling. In dit onderzoek wordt er voor de invloed van droogte een faalcurve ontwikkeld. Hierin wordt de afname van de stabiliteit onder invloed van droogte in beeld gebracht. Deze curve zou in een digitale tweeling geïmplementeerd kunnen worden.

Wat zou u als waterkeringsbeheerder willen dat een Digitale Tweeling zou doen?

Dat het continu een beeld schetst van de stabiliteit van de dijk. In dit beheersgebied zijn er geen/weinig droogte gevoelige dijken. Wel zijn er dijken met stabiliteitsproblemen. Als het model continu bij fluctuerende grondwaterstanden de stabiliteit berekend is er constant een beeld van de veiligheid van de dijk. Het model zou dan ook een waarschuwing moeten geven wanneer een waterstand gevaarlijk hoog of laag is.

Welke vormen van aantasting van een dijk moeten meegenomen worden in een digitale tweeling om een realistisch beeld van de conditie van de dijk weer te geven?

Vervorming van de kering, conditie grasmat, aanwezige graverijen, aanwezige niet waterkerende objecten aanwezigheid van wegbelasting, begrazing continu of maaibeheer.

Invloeden van de huidige en te verwachte waterstanden, golf belastingen door wind en/of scheepsvaart (scheepvaart klasse), al dan niet de aanwezigheid van beplanting en met name bomen, gebouwen kelders wijze van fundaties. Soorten bekleding zoals bv asfalt, stortsteen of zetsteen

Denkt u dat het implementeren van de invloeden van het klimaat in een digitale tweeling kunnen bijdragen aan de optimalisering van inspecties, beheer en onderhoud?

Ja met name bij beslissingen van grootschalige waterstaatskundig onderhoud.

Als er een grote database is en je ook echt voorspellingen kan doen kan je best veel werkzaamheden nauwkeurig plannen en misschien uitstellen of juist wel eerder aanpakken.

Het kan ook dienen als argument om een bepaalde beheer- of onderhoud type wel of niet meer te doen. Als het duidelijk is dat iets bijvoorbeeld vaker voorkomt dan gedacht zou je daar meer focus op kunnen leggen.

Hoe denkt u dat het inpasbaar maken van klimaatinvloeden (in dit geval droogte) kan bijdragen aan een optimalisering van de inspecties?

Inspecties in het veld blijven noodzakelijk. Niet alle factoren zijn te meten (bijvoorbeeld hoe de begroeiing precies in de dijk ligt). Beheerdersoordeel met behulp van waarnemingen blijft noodzakelijk.

Hoe denkt u dat het inpasbaar maken van klimaatinvloeden (in dit geval droogte) kan bijdragen aan een optimalisering van beheer en onderhoud?

Het zou een hulpmiddel kunnen zijn om te onderbouwen waarom geplande werkzaamheden nog niet met zwaar materieel uitgevoerd hoeft te worden. Ook kan hiermee onderbouwd worden of er maatregelen getroffen dienen te worden.

Op welk gebied (inspecties/beheer en onderhoud) zouden kosten bespaard kunnen worden?

-

Hoe denkt u dat het inpasbaar maken van klimaatinvloeden (in dit geval droogte) kan bijdragen aan een optimalisering van de kosten die gemaakt worden voor inspecties, beheer en onderhoud?

Kosten welke gemaakt worden bij het inspecteren zoude gereduceerd kunnen worden. De vraag blijft zullen deze kosten opwegen tegen de voordelen?

De kosten van regulier onderhoud zullen nagenoeg niet wijzigen.

Het beheer/waterstaatskundig onderhoud zal geoptimaliseerd kunnen worden

Denkt u dat beheer en onderhoud geoptimaliseerd kan worden doordat er betere voorspellingen gedaan kunnen worden?

Ja, veel zaken gaan nu automatisch (zoals frequenties voor het uitvoeren van een bepaalde zaak) en met de inzichten die betere voorspellingen meebrengen ga je misschien weer beter redeneren. Zo kunnen weer onderbouwde keuzes maken voor bijvoorbeeld wanneer droogte inspecties gedaan moeten worden. Ook kan je misschien zaken voorkomen, doordat je tijdig maatregelen kan nemen om verslechtering tegen te gaan. Voorkomen van degradatie van de dijk zodat hij langer mee gaat in plaats van in een keer in kritieke toestand heel groot onderhoud te moeten plegen.

Als de dijk goed wordt onderhouden zou je misschien niet meer hoeven te toetsen, alleen bij nieuwe hydraulische toestanden.

Het precies modelleren van een van een digitale tweeling van een bestaande dijk kan erg complex zijn waardoor het moeilijk kan zijn om de werkelijkheid te benaderen, hoe denkt u hier over?

Hoe meer gegevens hoe betrouwbaarder en hoe meer onzekerheden worden uitgesloten, ondanks het niet precies in beeld brengen van alle details (zoals hoe vegetatie in de dijk zit). Er is een combinatie nodig tussen het 3D model, proeven in het veld en waarnemingen om samen een oordeel te vormen.

Bijlage I - Interview 6: Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden (Ruud Weijs)

Hoe vaak worden er inspecties gedaan aan dijken?

Hoe vaak worden er droogte inspecties gedaan aan dijken?

Bij 175 mm neerslagtekort wordt er geïnspecteerd. Echter kom je dit bijna elk jaar wel tegen, het verschilt per jaar alleen of het in mei al gebeurt of pas in september. Als de droogte snel toeneemt is het gevaar voor scheuren pas groter.

Hoe vaak wordt er beheer en onderhoud gedaan aan dijken?

Hoe vaak wordt er beheer en onderhoud gedaan als gevolg van een klimaatinvloed (in dit geval droogte)?

Ongeveer 1x in de 2 of 3 jaar.

Hoeveel kosten is waterschap X jaarlijks kwijt aan droogte inspecties en beheer- en onderhoud door droogteschade?

Droogteschade kan erg duur zijn. Een half miljoen is wel eens voorgekomen en dit is fors. Het is wel eens minder ook wel eens rond 30 tot 50 duizend euro (naast regulier onderhoud).

Bij dijken met een dikkere kleilaag wordt minder schade geconstateerd omdat ze robuuster zijn geworden. Dit bespaart dus in de kosten. Dit kan ook gedaan worden met de kwaliteit van de klei. 1x per tien jaar wordt de bovenste laag wel

Met een digitale tweeling wordt een dijk in een computermodel weergegeven. Door data uit de huidige conditie van de dijk te verwerken, verandert het model met de werkelijkheid mee. Zo kan continu de status van de stabiliteit op een bepaald moment in kaart gebracht worden. Het doel van ons onderzoek is om de invloed van het klimaat inpasbaar te maken voor in zo'n digitale tweeling. In dit onderzoek wordt er voor de invloed van droogte een faalcurve ontwikkelt. Hierin wordt de afname van de stabiliteit onder invloed van droogte in beeld gebracht. Deze curve zou in een digitale tweeling geïmplementeerd kunnen worden.

Wat zou u als waterkeringsbeheerder willen dat een Digitale Tweeling zou doen?

We moeten meer zoeken naar bij welke vochtpercentage de klei gaat scheuren. De digitale tweeling zou dan een waarschuwing kunnen geven voor wanneer dit percentage te laag is en de dijk aandacht nodig heeft.

- Vochtpercentage → afhankelijk per grondsoort

Het is niet duidelijk of de snelheid van de afname van de vochtpercentage invloed heeft.

Welke grondeigenschappen van een dijk moeten meegenomen worden in een digitale tweeling om een realistisch beeld van de conditie van de dijk weer te geven?

Denkt u dat het implementeren van de invloeden van het klimaat in een digitale tweeling kunnen bijdragen aan de optimalisering van inspecties, beheer en onderhoud?

Ja. Als je kan aanwijzen waar de risico's zitten kan je je beheer en onderhoud hier op sturen. Dit zorgt dus voor meer alertheid.

Hoe denkt u dat het inpasbaar maken van klimaatinvloeden (in dit geval droogte) kan bijdragen aan een optimalisering van de inspecties?

Hoe denkt u dat het inpasbaar maken van klimaatinvloeden (in dit geval droogte) kan bijdragen aan een optimalisering van beheer en onderhoud?

Op welk gebied (inspecties/beheer en onderhoud) zouden kosten bespaard kunnen worden?

De inzet van inspecties kan specifiek ingezet worden.

Het is niet duidelijk of onderhoud op de lange termijn bespaard kan worden

Hoe denkt u dat het inpasbaar maken van klimaatinvloeden (in dit geval droogte) kan bijdragen aan een optimalisering van de kosten die gemaakt worden voor inspecties, beheer en onderhoud?

Denkt u dat beheer en onderhoud geoptimaliseerd kan worden doordat er betere voorspellingen gedaan kunnen worden?

-

Het precies modelleren van een van een digitale tweeling van een bestaande dijk kan erg complex zijn waardoor het moeilijk kan zijn om de werkelijkheid te benaderen, hoe denkt u hier over?

Het is afhankelijk van wat voor sensoren je kan gebruiken. Als je lokaal gaat meten moet het wel representatief zijn. Met een drone of satelliet kan je grotere velden in kaart brengen. Het zou mooi zijn als satellietbeelden gebruikt kunnen worden. Als het materieel goed genoeg is kan het wel. Bovendien kan een indicatie ook al erg nuttig zijn.

Bijlage I – Interview 7: Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (Jannes Haanstra en Hannes Versteegh)

Hoe vaak worden er inspecties gedaan aan dijken?

Reguliere inspecties 2 x in het jaar: voorjaarsinspectie (hoe zijn de dijken uit het stormseizoen gekomen) en najaarsinspectie (zijn de dijken klaar voor het storm seizoen, of moeten er spoed reparaties worden uitgevoerd. En op aanvraag tijdens bijzondere omstandigheden (storm, extreem nat).

Hoe vaak worden er droogte inspecties gedaan aan dijken?

Vanaf 225 mm neerslag tekort wordt 65 km droogtegevoelige dijken geïnspecteerd en vanaf 275 wordt gekeken om 450 km droogtegevoelige dijken te inspecteren.

Hoe vaak wordt er beheer en onderhoud gedaan aan dijken?

Dit is een doorlopend iets en kent vele aspecten. Vanaf inspecteren tot onderhouden en het houden van toezicht en handhaven. Ook is het toetsen/beoordelen, versterken en opleveren naar beheer onderdeel van het beheren van onze dijken.

Regulier onderhoud = maaien , correctief onderhoud = gebreken herstellen (onderhoudsplichtige), groot onderhoud = versterking (HHNK)

Hoe vaak wordt er beheer en onderhoud gedaan als gevolg van een klimaatinvloed (in dit geval droogte)?

Enkele keren per jaar vinden er herstelmaatregelen plaats om scheuren te dichten als gevolg van droogte. Dit kan zowel in grasbekleding als in asfaltbekleding.

Moeilijk te zeggen wat het exacte effect is van klimaatverandering. Wel hebben we in droge perioden te maken met droogtescheuren/natte plekken. Die scheuren worden gemonitord en soms hersteld/opgevuld.

Hoeveel kosten is waterschap X jaarlijks kwijt aan droogte inspecties en beheer- en onderhoud door droogteschade?

Goede vraag, in zijn totaliteit duren de inspecties ongeveer 3 weken. De inspecties worden uitgevoerd door ongeveer 20 man. Zij zijn ongeveer 4 uur per dag aan het inspecteren. Het rekensommetje is dan eenvoudig gemaakt.

Met een digitale tweeling wordt een dijk in een computermodel weergegeven. Door data uit de huidige conditie van de dijk te verwerken, verandert het model met de werkelijkheid mee. Zo kan continu de status van de stabiliteit op een bepaald moment in kaart gebracht worden. Het doel van ons onderzoek is om de invloed van het klimaat inpasbaar te maken voor in zo'n digitale tweeling. In dit onderzoek wordt er voor de invloed van droogte een faalcurve ontwikkelt. Hierin wordt de afname van de stabiliteit onder invloed van droogte in beeld gebracht. Deze curve zou in een digitale tweeling geïmplementeerd kunnen worden.

Wat zou u als waterkeringsbeheerder willen dat een Digitale Tweeling zou doen?

Ik zie het als een database waar 'de dijk' in zit. De geometrie, de bodemopbouw, alle niet-waterkerende objecten, misschien zelfs grondwaterstanden. Waar je scenario's mee kunt doorrekenen, wat als - de dijk natter wordt, droger wordt, etc. Maar dit kan ook met andere modellen dan de digital twin.

Een digitale tweeling zou een goede bron moeten zijn voor alle actuele data over de dijk zodat alle belanghebbenden op één plek toegang hebben tot dezelfde informatie.

Overige taken die dit model zou moeten kunnen:

- Stabiliteitsberekeningen
- Dwarsprofielen kunnen trekken voor elke locatie
- Voor een gekozen dwarsprofiel geautomatiseerd berekeningen uitvoeren
- Ondergrondmodel in digital tweeling en met grondonderzoek steeds aanvullen, dit is cruciaal.
- Om te gebruiken om mee te communiceren naar de omgeving toe.
- Onderbouwde keuzes maken. Bijvoorbeeld bij het bepalen of er dijkversterkingen nodig zijn. Bij crisissituaties snel zien waar het probleem misschien zit. Dit kan je in andere programma's niet nabootsen.
- Urgentie van schadebeelden beoordelen (doordat je alle data bij elkaar hebt)

Welke vormen van aantasting van een dijk moeten meegenomen worden in een digitale tweeling om een realistisch beeld van de conditie van de dijk weer te geven?

- Zetting en bodemdaling
- Aanpassingen aan boezem en sloten
- Evt hogere grondwaterstand
- Vervormingen
- Natte plekken
- Scheuren
- Uitgevoerd correctief onderhoud, grondverbeteringen en ophogingen
- (Langs)constructies die de conditie van de dijk verbeteren/beschermen

Voor een realistisch beeld van de conditie is makkelijk updaten dus van groot belang

Nadeel van digital twin is wel dat het valt of staat met hoe goed de ondergrond er in zit. Dijk is in de praktijk erg heterogeen en dus vergt dit aandacht.

Denkt u dat het implementeren van de invloeden van het klimaat in een digitale tweeling kunnen bijdragen aan de optimalisering van inspecties, beheer en onderhoud?

225 mm tekort worden keringen geïnspecteerd. 375 mm tekort wordt alles geïnspecteerd. Als je droogte effecten beter in kaart hebt kan je misschien inschatten welke keringen wel en welke niet. Dus zelf je grenzen kunnen bepalen .

Hoe denkt u dat het inpasbaar maken van klimaatinvloeden (in dit geval droogte) kan bijdragen aan een optimalisering van de inspecties?

Hoe denkt u dat het inpasbaar maken van klimaatinvloeden (in dit geval droogte) kan bijdragen aan een optimalisering van beheer en onderhoud?

Regulieronderhoud blijft altijd. Bij klein onderhoud kan je schades verhelpen die in de inspecties zijn voorgekomen.

Op welk gebied (inspecties/beheer en onderhoud) zouden kosten bespaard kunnen worden?

In de versterking van dijken als die zijn afgekeurd. De goede grond toepassen is belangrijk omdat bij een verkeerde vochtgehalte scheurvorming kan ontstaan in de toekomst (juiste consistentie-index). Dit vooraf bepalen kan kosten besparen. Ook het detecteren van scheuren m.b.v. drones, algoritmes en foto's kan bijdragen aan kostenbesparing. Zo kunnen beheerders gericht op pad gestuurd worden. Dan bespaar kosten omdat werkuren bespaard worden.

Ook kunnen kosten op de volgende manieren bespaard worden:

- zodra we het gedrag van onze keringen beter begrijpen (meer meten) kunnen we de onzekerheidsmarges minimaliseren en hoeven we minder (zwaar) te versterken
- zodra we gemakkelijk op een hoger detailniveau kunnen toetsen (op een klein interval geautomatiseerd doorrekenen en/of dwarsprofielen trekken in de Digital Twin) hoeven we minder (zwaar) te versterken

Hoe denkt u dat het inpasbaar maken van klimaatinvloeden (in dit geval droogte) kan bijdragen aan een optimalisering van de kosten die gemaakt worden voor inspecties, beheer en onderhoud?

Als droogte inderdaad (voldoende betrouwbaar) geïmplementeerd kan worden, kunnen we aan de hand daarvan onze droogtegevoelige keringen updaten voor de realtime situatie / een verwacht scenario en daar efficiënt onze inspecties op afstemmen.

Denkt u dat beheer en onderhoud geoptimaliseerd kan worden doordat er betere voorspellingen gedaan kunnen worden?

Ja. Als je beter weet hoe het echt zit, ga je minder aannames doen. En meer op het juiste moment onderhoud plegen. Bij meer informatie ken je beter het eindlevensduur bepalen en voorkomen dat ze onder de norm vallen.

Het precies modelleren van een van een digitale tweeling van een bestaande dijk kan erg complex zijn waardoor het moeilijk kan zijn om de werkelijkheid te benaderen, hoe denkt u hier over?

In stappen moeten onzekerheden geëlimineerd worden. Er moet geprioriteerd worden welke onzekerheden eruit gehaald moeten worden. Onzekerheden zijn er ook bij gewone toetsingen, daarom is er veel conservatisme. Een digitale tweeling heeft wel alle informatie op een plek. Het beheerdersoordeel blijft echter wel net zo belangrijk.

Bijlage II - Overview MT-polder

Bijlage II – Overview MT-Polder

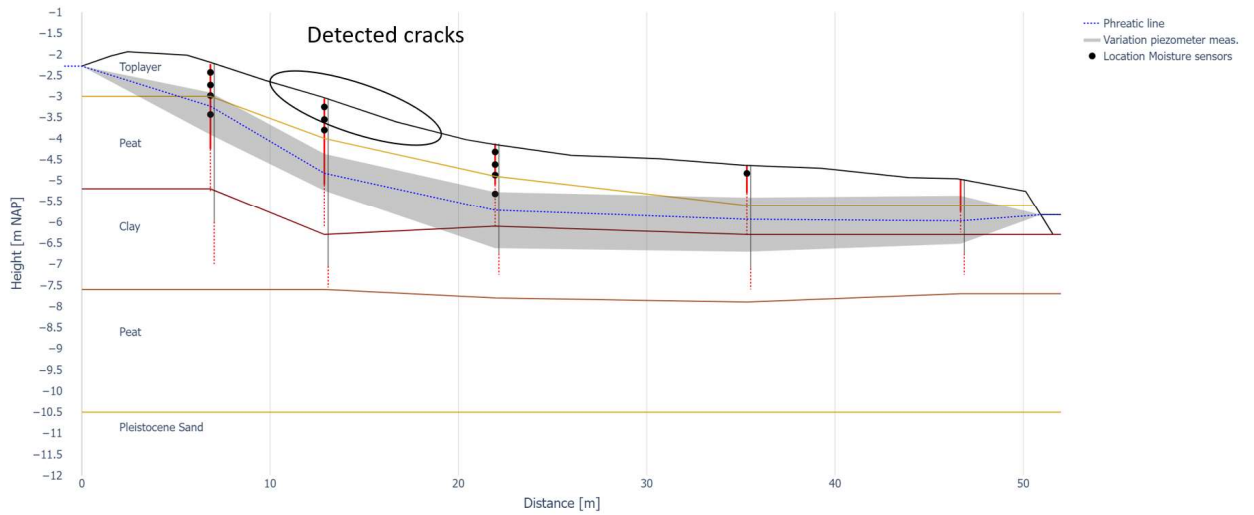
Peilbuizen



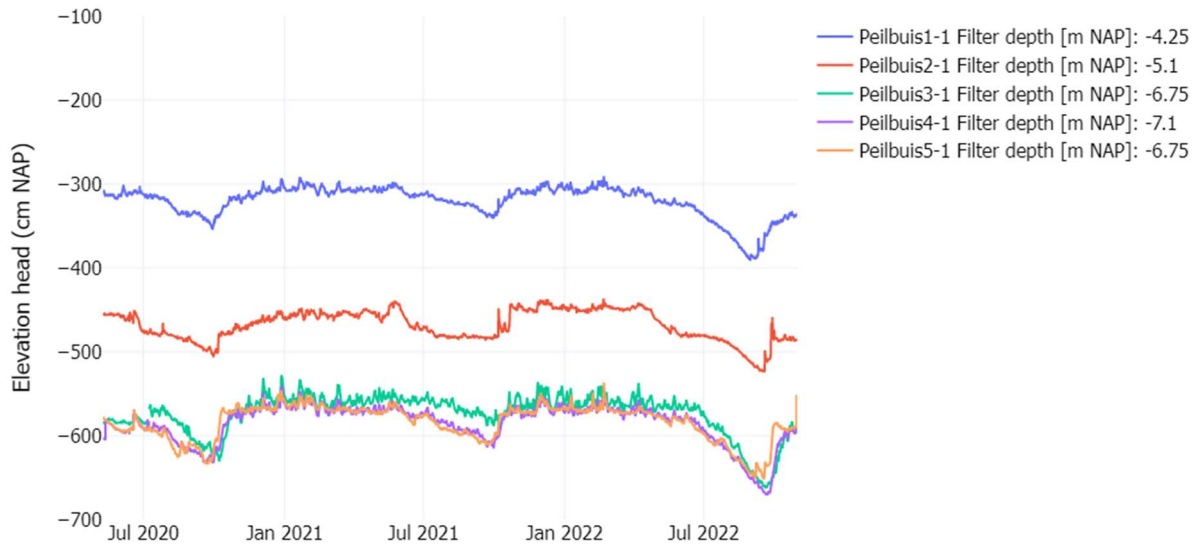
Scheuren in MT-Polder



Locatie scheuren en pijlbuizen in dijklichaam MT-Polder



Stijghoogte MT-Polder



Bijlage III - Atterberg limits

Bijlage III – De Atterberg Limits

Verloop bepaling Liquid Limit

Stap 1

De test wordt voorbereid door twee bakjes met daarin 400 gram van iedere grondsoort te drogen in de oven. Wanneer deze grond gedroogd is wordt het vermalen en door een zeef gehaald.



Stap 2

Wanneer de grond gezeefd is worden twee initiële mixen gemaakt. Hierbij wordt 120 gram van beide grondsoorten in een apart bakje gedaan. Hierbij wordt water gedaan totdat de grond zichtbaar plastisch is.

Stap 3

De grond wordt in het apparaat van Casagrande gesmeerd. Hierbij moet goed opgelet worden dat de grond goed verdeeld wordt en dat de laag dikte zo dik is dat alleen de punt van het mesje om de sleuf te trekken door de grond gaat.

Stap 4

Na het aanbrengen van het materiaal wordt een sleuf getrokken met het mesje.



Stap 5

Na het trekken van de sleuf kan aan het hendeltje gedraaid worden waardoor het bakje gaat tikken. De tik beweging zorgt ervoor dat de sleuf op een gegeven moment dicht vloeit. Wanneer dat moment optreedt moet het tikken gestopt worden.

Stap 6

Het aantal tikken wat nodig is om de sleuf dicht te laten vloeien wordt opgeschreven. Van het grondmonster in het apparaat wordt 10 gram afgewogen en in de oven gezet om het watergehalte te bepalen.

Stap 7

In een grafiek wordt het watergehalte uitgezet tegenover het aantal tikken, hierin worden de gevonden waardes gezet. Door deze waardes kan een lijn getrokken worden. Het watergehalte bij 25 tikken is de liquid limit.

Verloop bepaling Plastic Limit

Stap 1

Voor de plastic limit worden dezelfde grondsoorten gebruikt zoals bij de liquid limit.

Stap 2

Van de grond met en zonder vegetatie, wordt een balletje gemaakt van 20 gram. Dit balletje wordt weer verdeeld in twee balletjes van 10 gram. Hierna worden deze balletjes van 10 gram weer verdeelt in 4 gelijke stukjes.

Stap 3

Elk stukje wordt uitgerold tot rolletjes van ongeveer 10 mm hierna. Worden de rolletjes voorzigt uitgerold tot slierten van 3 mm. Als deze slierten scheuren en afbrokkelen is de plastic limit bereikt. Wanneer dit nog niet het geval is zullen de sliertjes weer tot balletjes worden gemaakt en opnieuw uitgerold worden tot ze wel afbrokkelen.

Stap 4

De afgebrokkelde sliertjes worden in schaaltes gelegd (verdeeld volgens de bolletjes van 10 gram). Deze worden in de ovens gezet om het watergehalte te bepalen. Dit watergehalte is dan de plastic limit.



Plasticity index	LL	PL	Ip (=LL-PL)	
Bare soil PL-2		41,9	27,92	13,98
Bare soil PL-3		41,9	27,2	14,7
Veg soil PL-1		53,5	45	8,5
Veg soil PL-2		53,5	43,85	9,65

Plastic limit Date 6-4-2023

Test id	MT-Polder	Container (g)	Container+Soil (g)	Container + dry soil (g)	Dry soils (g)	w (-)	Comments
Bare soil PL-1		41,49	52,25	50,48	8,99	19,69%	
Bare soil PL-2		41,95	51,48	49,4	7,45	27,92%	
Veg soil PL-1		44,97	54,25	51,37	6,4	45,00%	
Veg soil PL-2		47,58	56,7	53,92	6,34	43,85%	
Bare soil PL-3		46,62	56,02	54,01	7,39	27,20%	
Bare soil PL-4		42,8	52,31	50,22	7,42	28,17%	

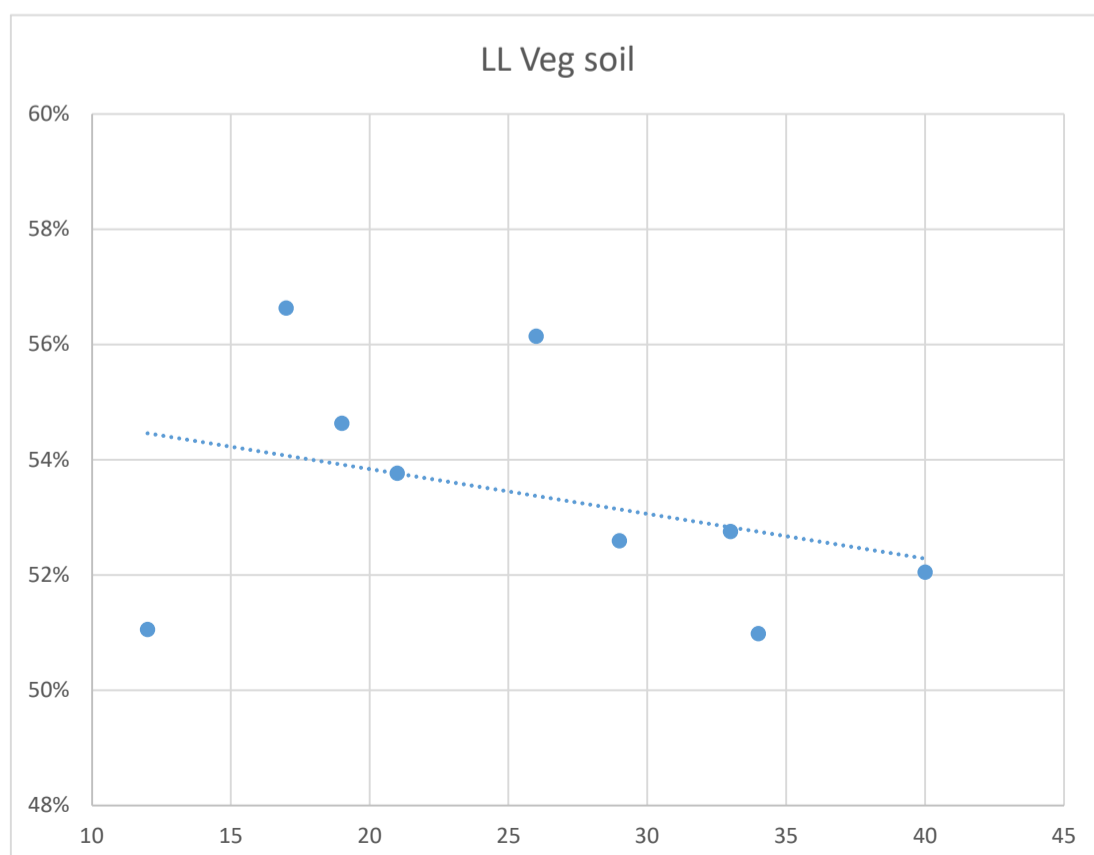
Liquid limit Date 6-4-2023 Veg Ip 11
 Test id Date Bare soil Ip 17

Initiele mix:	Container (g)	Container+soil (g)	added water (g)	Initial water content [-]
	83	209	53	0,253589

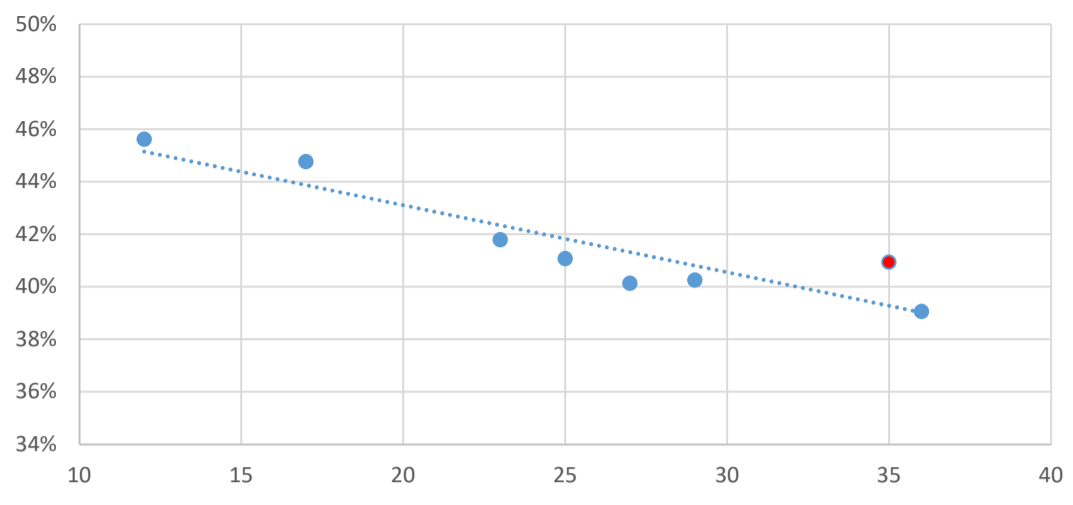
	Container (g)	Container+Soil (g)	Container + dry soil (g)	dry soil (g)	w (-)	Blow nr	Comments
Bare soil 1 LL	2,19	12,13	9,2	7,01	41,80%	23	/21 blows
bare soil 2 LL	2,19	12,19	9,32	7,13	40,25%	29	31 blows
Bare soil 3 LL	2,19	12,15	9,25	7,06	41,08%	25	24 blows
Bare soil 4 LL	2,19	12,21	9,34	7,15	40,14%	27	26 blows
Bare soil 5 LL	2,19	12,23	9,41	7,22	39,06%	36	37 blows
Bare soil 6 LL	2,18	12,2	9,29	7,11	40,93%	35	36 blows
Bare soil 7 LL	2,19	12,15	9,07	6,88	44,77%	17	16 blows
Bare soil 8 LL	2,19	12,18	9,05	6,86	45,63%	12	11 blows
Initiele mix:	83	203	63				
Grass soil 1 LL	2,19	12,18	8,73	6,54	52,75%	33	34 blows
Grass soil 2 LL	2,19	12,2	8,82	6,63	50,98%	34	35 blows
Grass soil 3 LL	2,19	12,2	8,7	6,51	53,76%	21	22 blows
Grass soil 4 LL	2,19	12,21	8,78	6,59	52,05%	40	41 blows
Grass soil 5 LL	2,19	12,21	8,67	6,48	54,63%	19	20 blows
Grass soil 6 LL	2,19	12,2	8,75	6,56	52,59%	29	30 blows
Grass soil 7 LL	2,19	12,23	8,62	6,43	56,14%	26	27 blows
Grass soil 8 LL	2,19	12,23	8,6	6,41	56,63%	17	18 blows
Grass soil 9 LL	2,19	12,22	8,83	6,64	51,05%	12	13 blows

Soil classification

	Ip (=LL-PL)	classification
Bare soil PL-1	13,98	MI Silt, intermediate plasticity
Bare soil PL-2	14,7	MI Silt, intermediate plasticity
Veg soil PL-1	8,5	MH Silt, High plasticity
Veg soil PL-2	9,65	MH Silt, High plasticity



LL Bare soil



Bijlage IV - Hyprop proef

Bijlage IV – Hyprop proef

Verloop van de Hyprop

Onderstaand worden de stappen toegelicht die zijn doorlopen voor de uitvoering van de Hyprop proef.

Stap 1

Hyprop apparaat wordt aan de computer gekoppeld en algemene informatie wordt in het bestand ingevoerd (gewicht Hyprop-ring, naam monster etc.)

Stap 2

Het grondmonster wordt gewogen voordat het in de Hyprop wordt geïnstalleerd.



Grondmonster in Hyprop ring

Stap 3

Er worden gaatjes in het grondmonster voorgeboord op de locatie waar de shafts van de Hyprop komen. Dit wordt gedaan omdat de shafts anders niet in de grondmonsters kunnen doordringen en dan beschadigd raken.



Boren van gaatjes in grondmonster

Stap 4

Het grondmonster wordt opnieuw gewogen omdat er nu grond verwijderd is voor de gaatjes van de shafts.

Stap 5

De voorgeboorde gaatjes worden met een slurry gesmeerd. Dit is een mengsel van water en grond (dezelfde grond als het monster). Dit wordt gedaan om te garanderen dat er contact is tussen de shafts en het grondmonster en dat er dus geen lege ruimte tussen zit.

Voordat de shafts in het grondmonster worden geplaatst worden deze in de tussentijd met watergevulde pipetjes afgedekt zodat deze niet uitdrogen.



Grond/water mengsel



Hyprop apparaat met afgedekte shafts met pipetjes

Stap 6

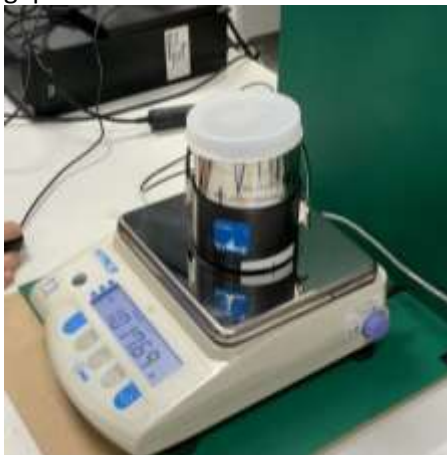
Het grondmonster is nu volledig voorbereid en wordt op de Hyprop apparaat geplaatst.

Stap 7

Het grondmonster wordt met de Hyprop apparaat gewogen.

Stap 8

Grondmonster in Hyprop worden weer aan de computer aangesloten en op de Hyprop weegschaal geplaatst.



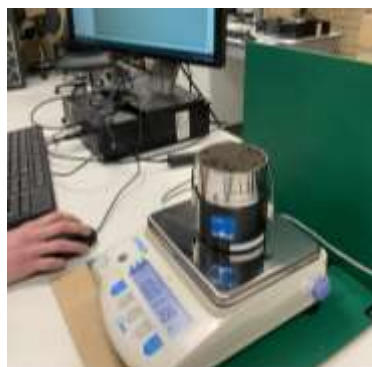
Hyprop met grondmonster op Hyprop weegschaal

Stap 9

De metingen worden gestart. De eerste paar uur wordt het grondmonster nog afgedekt zodat het kan stabiliseren. De slurry beweegt bijvoorbeeld nog wat in de gaatjes en hierdoor is de meting op het begin nog instabiel. Na een aantal uren wordt het grondmonster blootgesteld aan de lucht zodat deze kan gaan uitdrogen aan de lucht en de werkelijke meting van de toenemende zuigspanning kan beginnen.



Grondmonster afgedekt laten stabiliseren



Grondmonster wordt aan lucht blootgesteld voor start opdroging

Stap 10

De proef wordt afgesloten als de zuigspanning een waarde rond de 70 kPa heeft bereikt.

Eerste natmaking van het grondmonster

Na dat het grondmonster aan de lucht is uitgedroogd en een zuigspanning van rond de 70 kPa heeft bereikt wordt het grondmonster, tot ongeveer 80% van het voormalige watergehalte, in stappen natgemaakt (met gedemineraliseerd water). Als de zuigspanning een waarde aanneemt tussen de 0 en de 1 kPa kan de proef herpakt worden en kan het grondmonster weer aan de lucht opdrogen. Dit wordt gedaan om een beeld in kaart te brengen van wat het uitdrogen en weer nat maken van de grond doet met de zuigspanningen. De proef zal nu doorlopen tot er cavitatie plaatsvindt.

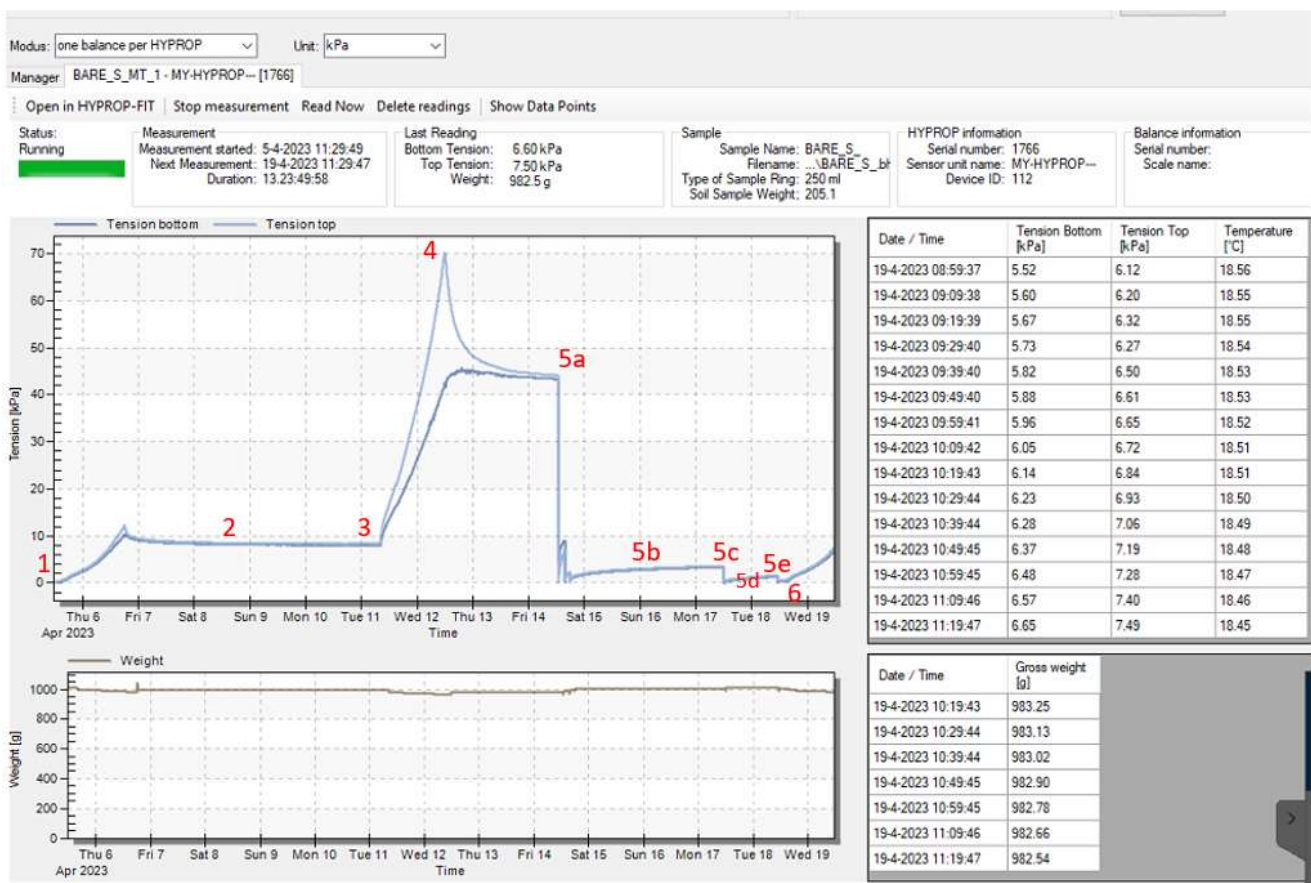
In onderstaande figuur is te zien hoe de zuigspanningen zich ontwikkelden tijdens de eerste uitdroging en na het natmaken van de grond.

Stap 1:

Het grondmonster wordt in stappen natgemaakt (zie figuur) zodat het water tijd heeft om zich over de gehele monster homogeen te verdelen.

Stap 2:

Het grondmonster wordt weer aan de lucht blootgesteld totdat cavitatie plaatsvindt.

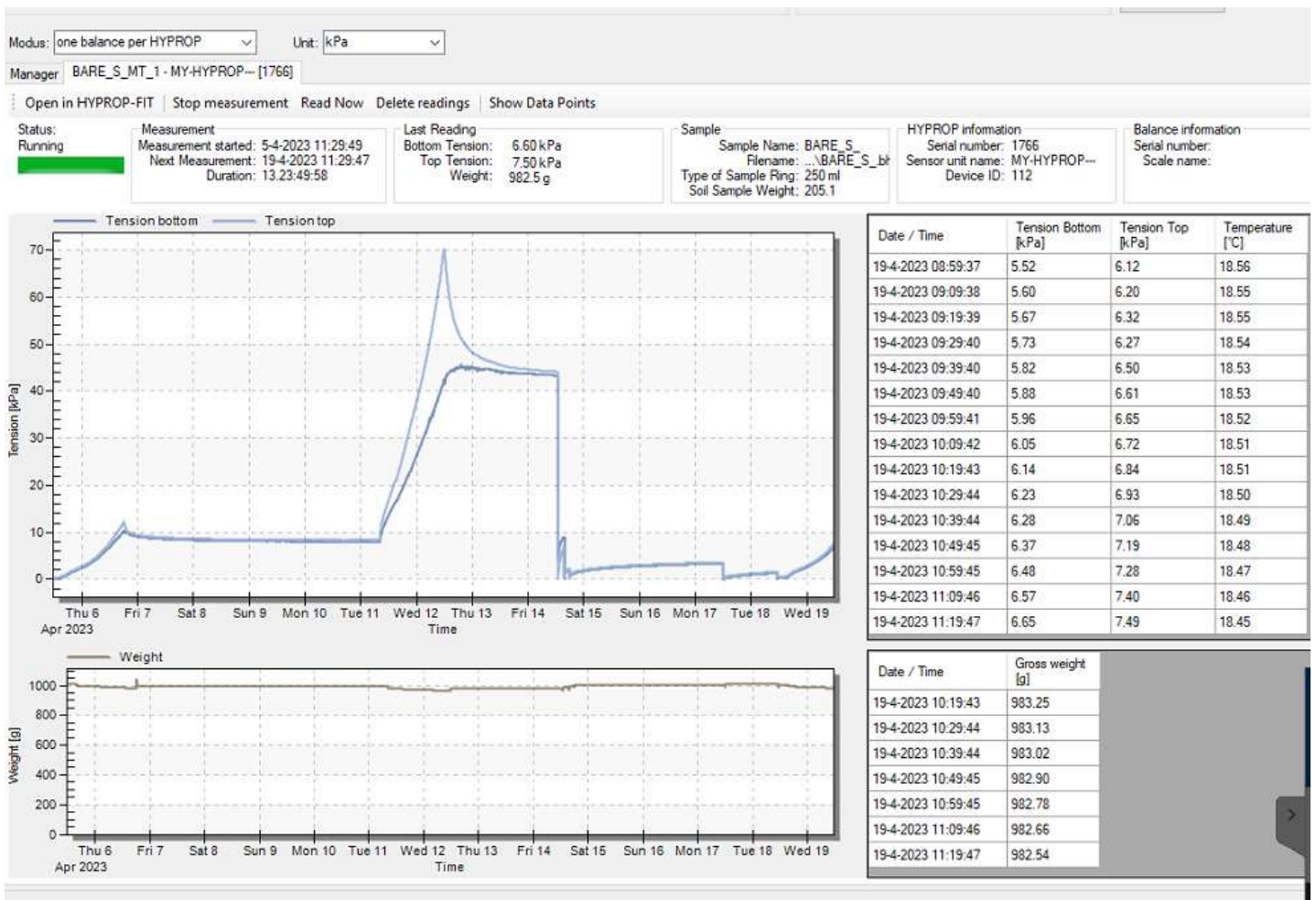


Legenda figuur:

1. Stap 9. Het grondmonster wordt voor het eerst aan de lucht blootgesteld.
2. Het grondmonster wordt in het paasweekend tijdelijk afgesloten door het grondmonster af te dekken waardoor er geen verdamping plaatsvindt en dus ook geen ontwikkeling in de zuigspanning. Dit wordt gedaan omdat er geen toegang is tot het lab in het paasweekend en

dus om te voorkomen dat het monster in dit weekend een zuigspanning van 70 kPa bereikt en de proef dan niet afgesloten kan worden.

3. Het grondmonster wordt weer aan de lucht blootgesteld en de proef wordt hervat.
4. Stap 10. De langste shaft bereikt een zuigspanning van rond de 70 kPa (tension top) en dus wordt de proef afgesloten door het grondmonster weer af te dekken.
5. Begin natmaking tot **80%** van het voormalige watergehalte (in stappen).
 - a. Eerste natmaking
 - b. Zuigspanning blijft rond de 5 kPa hangen
 - c. Tweede natmaking
 - d. Zuigspanning blijft nog rond de 2 kPa hangen
 - e. Derde, en laatste, natmaking. Zuigspanning blijft tussen de 0 en 1 kPa.
6. Start uitdroging tot cavitatie plaatsvindt.



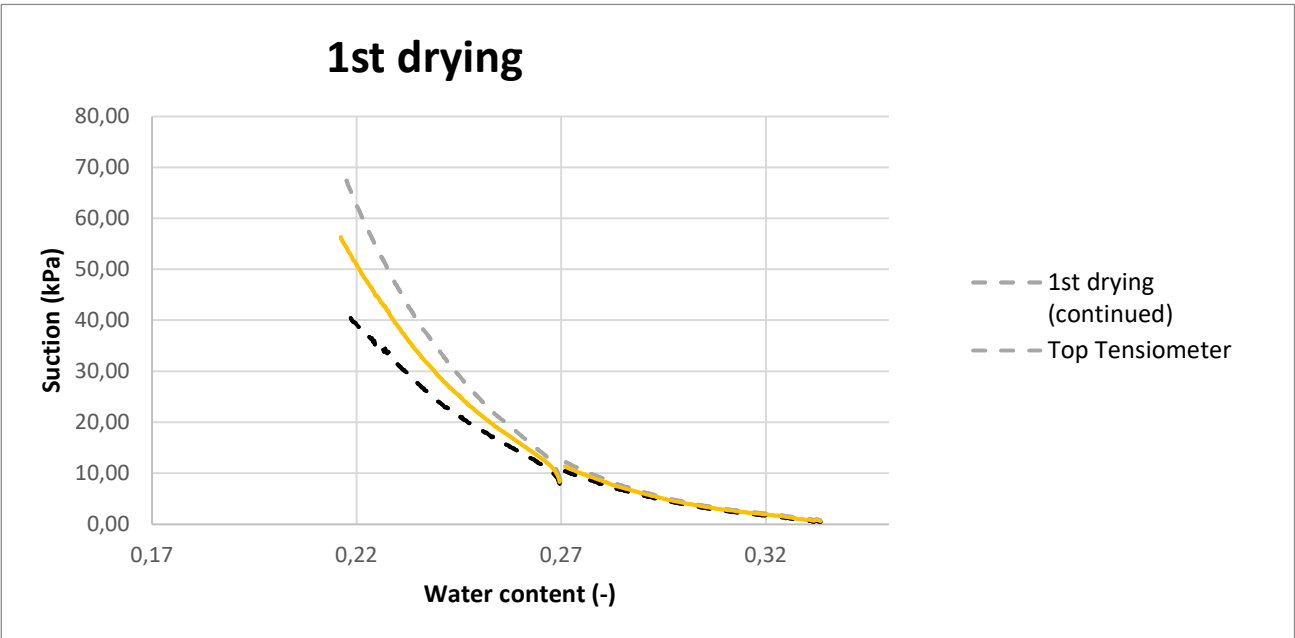
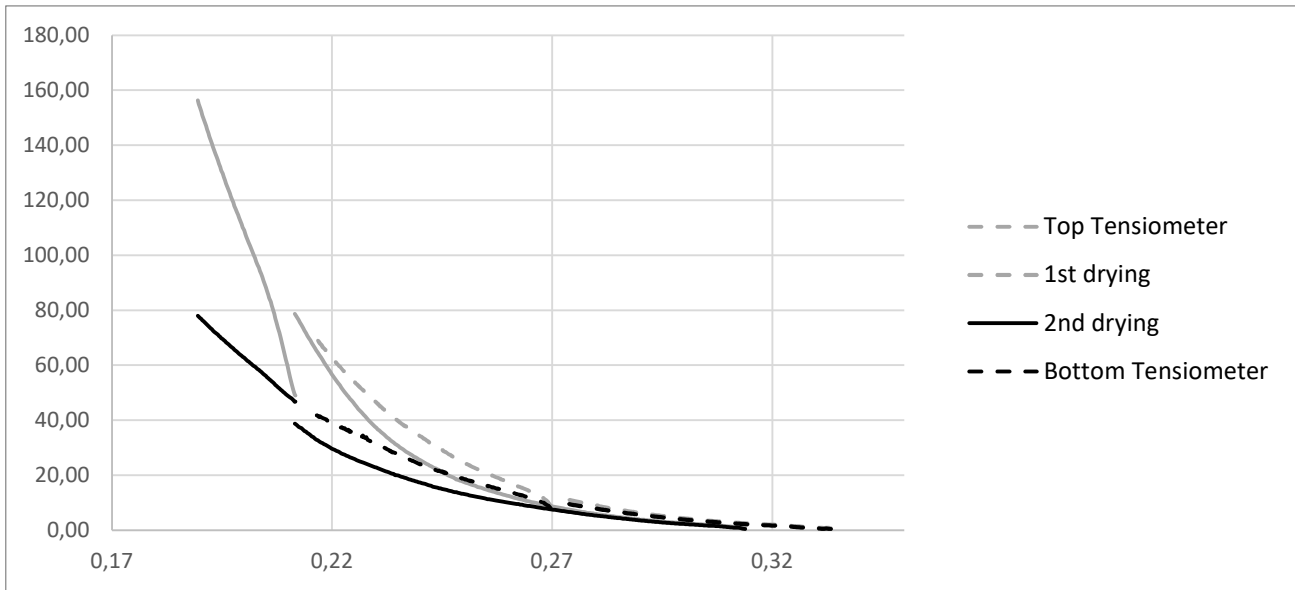
Information	value	unit	Description
<i>Before test</i>			
Assembly	583,97	gr	Hyprop empty assembly without soil
Assembly & soil	990,29	gr	
Wet soil	406,32	gr	Soil inside hyprop
<hr/>			
<i>After test</i>			
Soil in Dew Point	5,04		Disassembling hyprop soil of hyprop used for dew point dry soil measured after dismounting
Mass solids Hyprop	300,06	gr	hyprop (dew point weight added) Total dry soil that was present in
Mass solids	304,34	gr	hyprop (dew point weight added)
<hr/>			
<i>Soil properties</i>			
Gs	2,4728		
water content_start	33,51%		
water content meas	36,90%		# water content of soil taken before hyprop install.

Time	Mass loss (gr)	Mass (gr)	Suc. Bottom (kPa)	Suc. Top (kPa)	h (m)
04-05-23 11:29 AM	0,00	406,32	0,15	0,42	0,042507645
04-05-23 11:30 AM	16,59	422,91	0,14	0,40	0,041182467
04-05-23 11:31 AM	16,57	422,89	0,12	0,39	0,039857288
04-05-23 11:32 AM	62,18	468,50	0,12	0,39	0,040163099
04-05-23 11:33 AM	7,66	413,98	0,06	0,38	0,038328236
04-05-23 11:34 AM	7,65	413,97	0,05	0,37	0,037410805
04-05-23 11:35 AM	7,65	413,97	0,04	0,36	0,037003058
04-05-23 11:36 AM	7,65	413,97	0,03	0,36	0,036391437
04-05-23 11:37 AM	7,64	413,96	0,02	0,35	0,035881753
04-05-23 11:38 AM	7,63	413,95	0,02	0,35	0,035474006
04-05-23 11:40 AM	7,63	413,95	0,02	0,35	0,035168196
04-05-23 11:41 AM	7,63	413,95	0,01	0,34	0,034862385
04-05-23 11:42 AM	7,63	413,95	0,02	0,34	0,034658512
04-05-23 11:43 AM	7,62	413,94	0,02	0,34	0,034352701
04-05-23 11:44 AM	7,63	413,95	0,02	0,33	0,034046891
04-05-23 11:45 AM	7,62	413,94	0,02	0,33	0,033944954
04-05-23 11:46 AM	7,61	413,93	0,03	0,33	0,033741081
04-05-23 11:47 AM	7,61	413,93	0,03	0,33	0,033537207
04-05-23 11:48 AM	7,61	413,93	0,03	0,33	0,03312946
04-05-23 11:49 AM	7,61	413,93	0,03	0,32	0,032925586
04-05-23 11:50 AM	7,61	413,93	0,04	0,32	0,033027523
04-05-23 11:51 AM	7,61	413,93	0,03	0,32	0,033027523
04-05-23 11:52 AM	7,60	413,92	0,04	0,32	0,033027523
04-05-23 11:53 AM	7,59	413,91	0,05	0,32	0,033027523
04-05-23 11:54 AM	7,59	413,91	0,05	0,32	0,032925586
04-05-23 11:55 AM	7,60	413,92	0,05	0,32	0,032823649
04-05-23 11:56 AM	7,59	413,91	0,05	0,32	0,032925586
04-05-23 11:57 AM	7,59	413,91	0,06	0,32	0,033027523
04-05-23 11:58 AM	7,59	413,91	0,06	0,32	0,032925586
04-05-23 11:59 AM	7,59	413,91	0,06	0,32	0,032925586
04-05-23 12:00 PM	7,58	413,90	0,06	0,32	0,032721713
04-05-23 12:01 PM	7,58	413,90	0,06	0,32	0,032823649
04-05-23 12:02 PM	7,59	413,91	0,06	0,32	0,033027523
04-05-23 12:03 PM	7,59	413,91	0,05	0,32	0,032619776
04-05-23 12:04 PM	7,57	413,89	0,06	0,32	0,032517839
04-05-23 12:05 PM	7,57	413,89	0,05	0,32	0,032110092
04-05-23 12:06 PM	7,58	413,90	0,06	0,32	0,032212029
04-05-23 12:07 PM	7,57	413,89	0,06	0,32	0,032313965
04-05-23 12:08 PM	7,57	413,89	0,06	0,32	0,032313965
04-05-23 12:09 PM	7,57	413,89	0,06	0,32	0,032212029
04-05-23 12:10 PM	7,57	413,89	0,06	0,32	0,032212029
04-05-23 12:11 PM	7,56	413,88	0,06	0,32	0,032212029
04-05-23 12:12 PM	7,57	413,89	0,06	0,32	0,032110092
04-05-23 12:13 PM	7,46	413,78	0,06	0,32	0,032313965
04-05-23 12:14 PM	7,56	413,88	0,06	0,32	0,032110092
04-05-23 12:15 PM	7,55	413,87	0,06	0,32	0,032110092
04-05-23 12:16 PM	7,56	413,88	0,06	0,32	0,032212029
04-05-23 12:17 PM	7,56	413,88	0,06	0,32	0,032212029
04-05-23 12:18 PM	7,55	413,87	0,06	0,32	0,032110092
04-05-23 12:19 PM	7,54	413,86	0,06	0,32	0,032110092
04-05-23 12:20 PM	7,56	413,88	0,06	0,31	0,032008155
04-05-23 12:21 PM	7,55	413,87	0,06	0,32	0,032110092
04-05-23 12:22 PM	7,54	413,86	0,06	0,32	0,032313965
04-05-23 12:23 PM	7,54	413,86	0,06	0,32	0,032212029

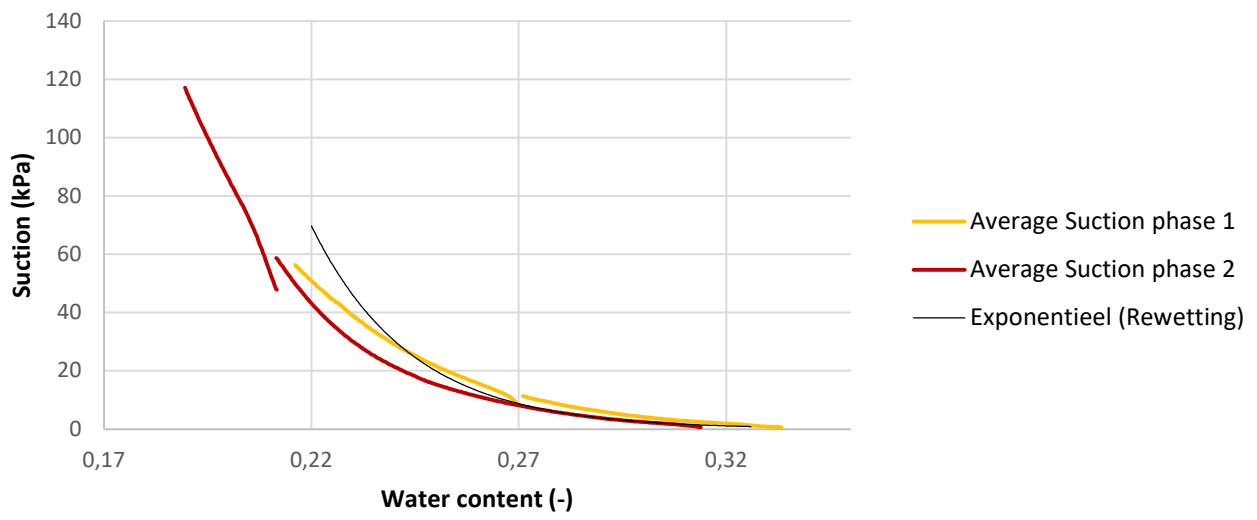
04-05-23 12:24 PM	7,54	413,86	0,06	0,32	0,032212029
04-05-23 12:25 PM	7,53	413,85	0,06	0,32	0,032212029
04-05-23 12:26 PM	7,54	413,86	0,06	0,32	0,032212029
04-05-23 12:27 PM	7,53	413,85	0,06	0,32	0,032313965
04-05-23 12:28 PM	7,53	413,85	0,06	0,32	0,032212029
04-05-23 12:29 PM	7,53	413,85	0,06	0,32	0,032313965
04-05-23 12:39 PM	7,52	413,84	0,06	0,32	0,032619776
04-05-23 12:49 PM	7,49	413,81	0,07	0,33	0,033231397
04-05-23 12:59 PM	7,48	413,80	0,07	0,34	0,034250765
04-05-23 01:09 PM	7,47	413,79	0,08	0,35	0,035372069
04-05-23 01:19 PM	7,45	413,77	0,09	0,36	0,036799185
04-05-23 01:29 PM	7,44	413,76	0,10	0,38	0,038430173
04-05-23 01:39 PM	7,42	413,74	0,11	0,39	0,040061162
04-05-23 01:49 PM	7,41	413,73	0,12	0,41	0,041488277
04-05-23 01:59 PM	7,38	413,70	0,14	0,42	0,043119266
04-05-23 02:09 PM	7,38	413,70	0,15	0,44	0,044444444
04-05-23 02:19 PM	7,36	413,68	0,17	0,45	0,046279307
04-05-23 02:29 PM	7,35	413,67	0,18	0,47	0,048012232
04-05-23 02:39 PM	7,33	413,65	0,20	0,49	0,049745158

0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,19
0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,19
0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,19
0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,19
0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,19
0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,19
0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,19
0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,20
0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,20
0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,21
0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,22
0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,24
0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,25
0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,26
0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,28
0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,29
0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,31
0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,33
0,36	0,89	1,07	1,07	Sealed	0,35

Mass (gr)	Suc. Botton (kPa)	Suc. Top (kPa)	h (m)	w (-)	ew (-)	w/w0	ew/ew0	Description	Average suc (kPa)
405,78	0,472	0,748	0,0762487	0,3332939	0,8241692	0,9947046	0,9947046	1st drying	0,61
386,39	7,964	8,539	0,8704383	0,2695831	0,6666251	0,8045619	0,8045619	1st drying	8,2515
387,42	43,292	44,054	4,4907238	0,2729674	0,6749939	0,8146623	0,8146623	sealed	43,673
399,86	0,475	0,836	0,0852192	0,3138422	0,7760691	0,9366518	0,9366518	drying_2	0,6555
386,08	46,915	48,917	4,9864424	0,2685645	0,6641063	0,8015219	0,8015219	sealing	47,916



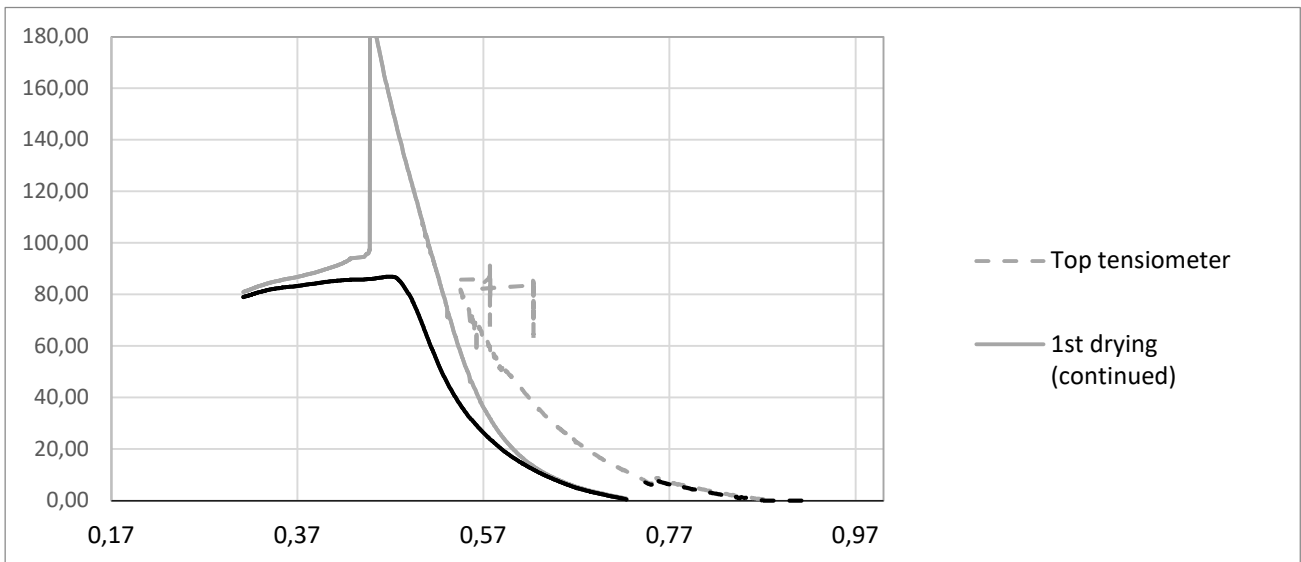
Total suction



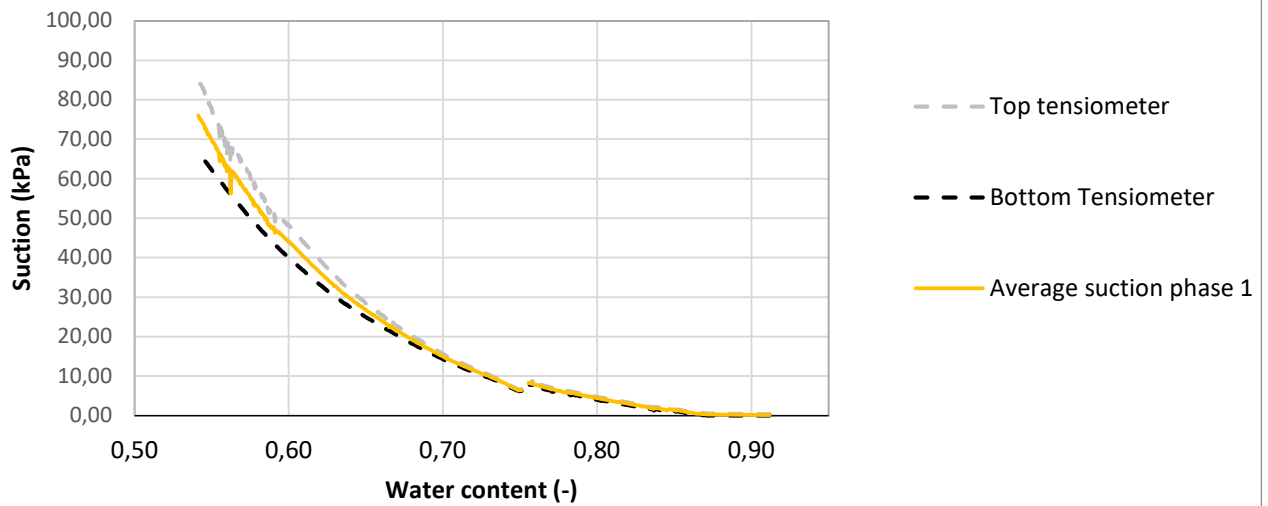
Information	value	unit	Description
<i>Before test</i>			
Assembly	561,65	gr	Hyprop empty assembly without soil
Assembly & soil	954,62	gr	
Wet soil	392,97	gr	Soil inside hyprop
<hr/>			
<i>After test</i>			
Soil in Dew Point	3,93		Disassembling hyprop soil of hyprop used for dew point dry soil measured after dismounting hyprop (dew point weight added)
Mass solids Hyprop	206,95	gr	Total dry soil that was present in hyprop (dew point weight added)
Mass solids	209,70	gr	
<hr/>			
<i>Soil properties</i>			
Gs	2,3236		
			# Water content could be overestimated because of presense of vegetation (grass + its roots) that are degredating over
water content_start	87,39%	test duration	
water content meas	66,00%	before hyprop install.	

Time	Mass loss (gr)	Mass (gr)	Suc. Bottom (kPa)	Suc. Top (kPa)	h (m)
04-05-23 12:30 PM	0,00	392,97	0,01	0,00	0
04-05-23 12:31 PM	0,01	392,98	0,02	0,20	0,020795107
04-05-23 12:32 PM	0,02	392,99	0,02	0,25	0,025076453
04-05-23 12:32 PM	0,02	392,99	0,02	0,27	0,027319062
04-05-23 12:32 PM	0,02	392,99	0,03	0,29	0,029357798
04-05-23 12:32 PM	482,37	875,34	0,02	0,31	0,031906218
04-05-23 12:32 PM	0,02	392,99	0,02	0,34	0,034454638
04-05-23 12:33 PM	0,01	392,98	0,01	0,42	0,042507645
04-05-23 12:33 PM	0,01	392,98	0,01	0,43	0,043832824
04-05-23 12:34 PM	0,01	392,98	0,03	0,42	0,043221203
04-05-23 12:34 PM	8,32	401,29	0,00	0,14	0,014678899
04-05-23 12:34 PM	8,33	401,30	0,00	0,27	0,027522936
04-05-23 12:35 PM	8,32	401,29	0,00	0,33	0,033741081
04-05-23 12:35 PM	8,32	401,29	0,00	0,36	0,036901121
04-05-23 12:35 PM	8,32	401,29	0,00	0,37	0,037716616
04-05-23 12:36 PM	8,33	401,30	0,00	0,42	0,042303772
04-05-23 12:37 PM	8,32	401,29	0,00	0,43	0,043425076
04-05-23 12:38 PM	8,34	401,31	0,00	0,45	0,04587156
04-05-23 12:39 PM	8,34	401,31	0,00	0,44	0,044954128
04-05-23 12:40 PM	8,34	401,31	0,00	0,44	0,044750255
04-05-23 12:41 PM	8,34	401,31	0,00	0,42	0,042915392
04-05-23 12:42 PM	8,35	401,32	0,00	0,33	0,034046891
04-05-23 12:43 PM	8,34	401,31	0,00	0,60	0,060652396
04-05-23 12:44 PM	8,33	401,30	0,00	0,62	0,062691131
04-05-23 12:44 PM	8,31	401,28	0,00	0,60	0,06146789
04-05-23 12:45 PM	8,35	401,32	0,00	0,59	0,059836901
04-05-23 12:46 PM	8,36	401,33	0,00	0,42	0,043017329
04-05-23 12:47 PM	8,35	401,32	0,00	0,38	0,0382263
04-05-23 12:48 PM	8,35	401,32	0,00	0,37	0,037410805
04-05-23 12:49 PM	8,17	401,14	0,00	0,34	0,034760449
04-05-23 12:49 PM	8,21	401,18	0,00	0,35	0,035575943
04-05-23 12:50 PM	8,33	401,30	0,00	0,34	0,034556575
04-05-23 12:51 PM	8,35	401,32	0,00	0,15	0,015188583
04-05-23 12:52 PM	8,35	401,32	0,00	0,53	0,054332314
04-05-23 12:53 PM	8,35	401,32	0,00	0,20	0,019877676
04-05-23 12:54 PM	8,35	401,32	0,00	0,57	0,057900102
04-05-23 12:55 PM	8,35	401,32	0,00	0,52	0,052701325
04-05-23 12:56 PM	8,35	401,32	0,00	0,70	0,071457696
04-05-23 12:57 PM	8,35	401,32	0,00	0,47	0,047604485
04-05-23 12:58 PM	8,34	401,31	0,00	0,41	0,04138634
04-05-23 12:59 PM	8,34	401,31	0,00	0,39	0,039959225
04-05-23 01:01 PM	8,34	401,31	0,00	0,39	0,039449541
04-05-23 01:02 PM	8,34	401,31	0,00	0,40	0,04077472
04-05-23 01:03 PM	8,34	401,31	0,00	0,38	0,0382263
04-05-23 01:04 PM	8,34	401,31	0,00	0,38	0,0382263
04-05-23 01:05 PM	8,33	401,30	0,00	0,37	0,037614679
04-05-23 01:06 PM	8,34	401,31	0,00	0,40	0,040570846
04-05-23 01:07 PM	8,33	401,30	0,00	0,34	0,035066259
04-05-23 01:08 PM	8,33	401,30	0,00	0,35	0,035474006
04-05-23 01:09 PM	8,33	401,30	0,00	0,36	0,036697248
04-05-23 01:10 PM	8,33	401,30	0,00	0,35	0,035575943
04-05-23 01:11 PM	8,33	401,30	0,00	0,36	0,037003058
04-05-23 01:12 PM	8,33	401,30	0,00	0,35	0,03567788

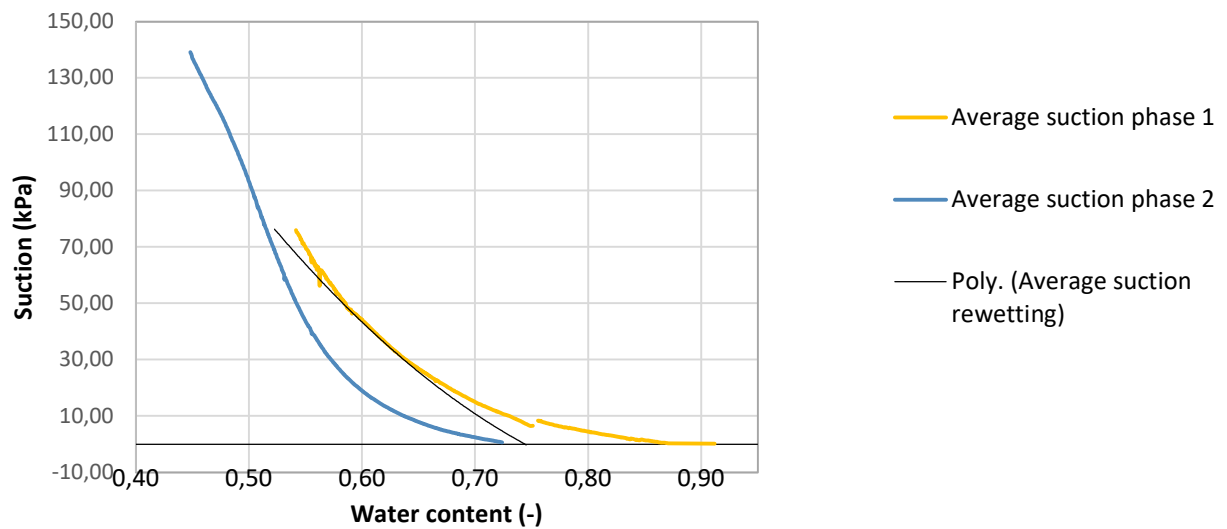
w (-)	ew (-)	w/w0	ew/ew0 (-)	Description	average suction
				Initial	
0,87	2,03	1,00	1,00	measurement	0,00
0,87	2,03	1,00	1,00	Sealed	0,11
0,87	2,03	1,00	1,00	Sealed	0,14
0,87	2,03	1,00	1,00	Sealed	0,15
0,87	2,03	1,00	1,00	Sealed	0,16
3,17	7,38	3,63	3,63	Sealed	0,17
0,87	2,03	1,00	1,00	Sealed	0,18
0,87	2,03	1,00	1,00	Sealed	0,21
0,87	2,03	1,00	1,00	Sealed	0,22
0,87	2,03	1,00	1,00	Sealed	0,23
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,07
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,14
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,17
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,18
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,19
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,21
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,21
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,23
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,22
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,22
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,21
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,17
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,30
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,31
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,30
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,29
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,21
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,19
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,18
0,91	2,12	1,04	1,04	Sealed	0,17
0,91	2,12	1,04	1,04	Sealed	0,17
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,17
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,07
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,27
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,10
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,28
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,26
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,35
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,23
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,20
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,20
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,19
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,20
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,19
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,19
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,18
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,20
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,17
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,17
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,18
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,17
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,18
0,91	2,12	1,05	1,05	Sealed	0,18



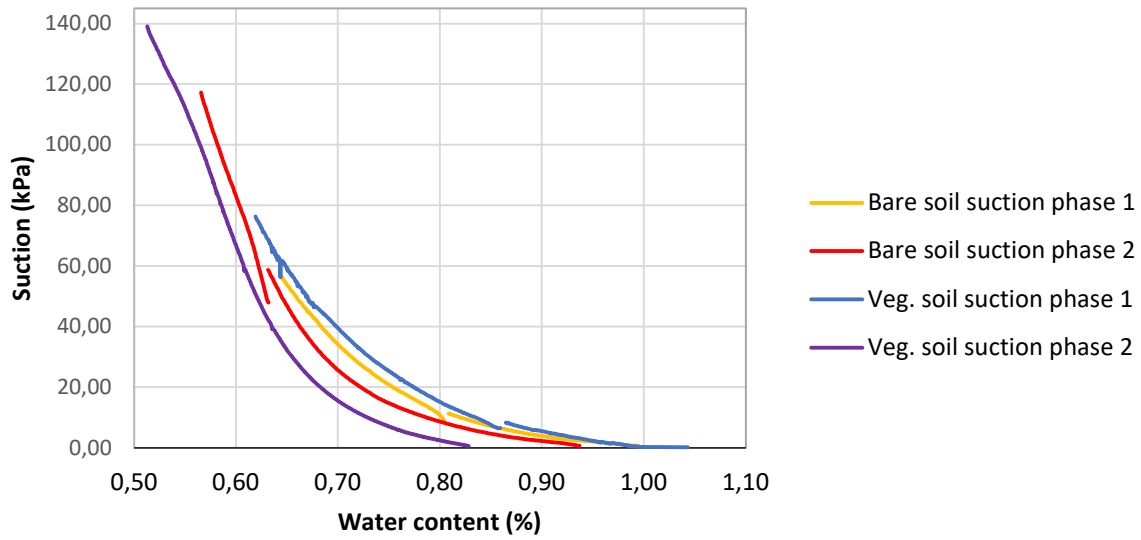
1st drying Veg. soil



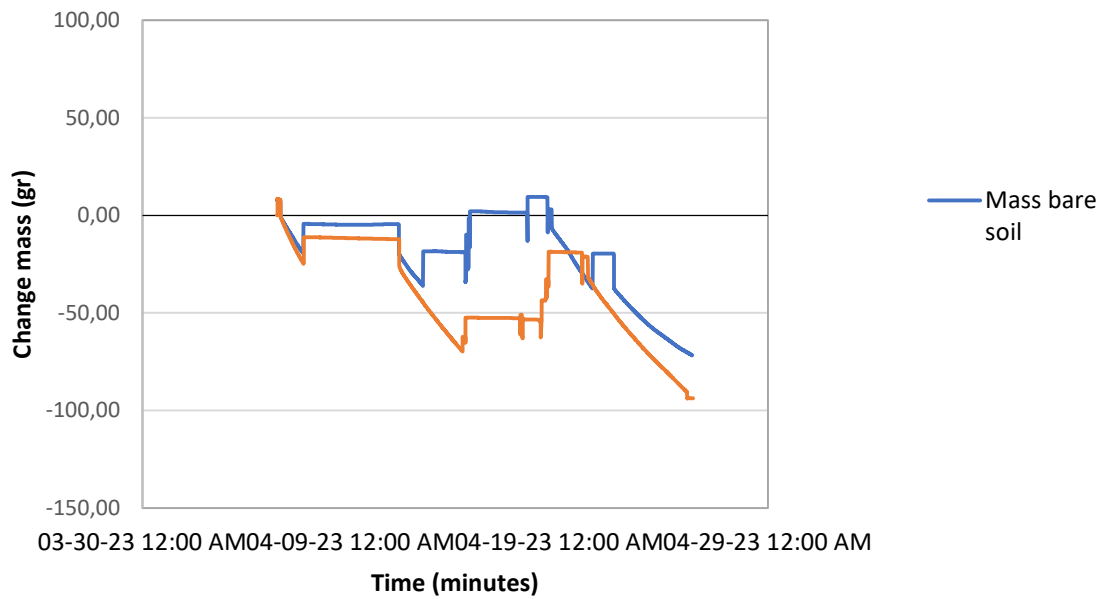
Average suction Veg. soil



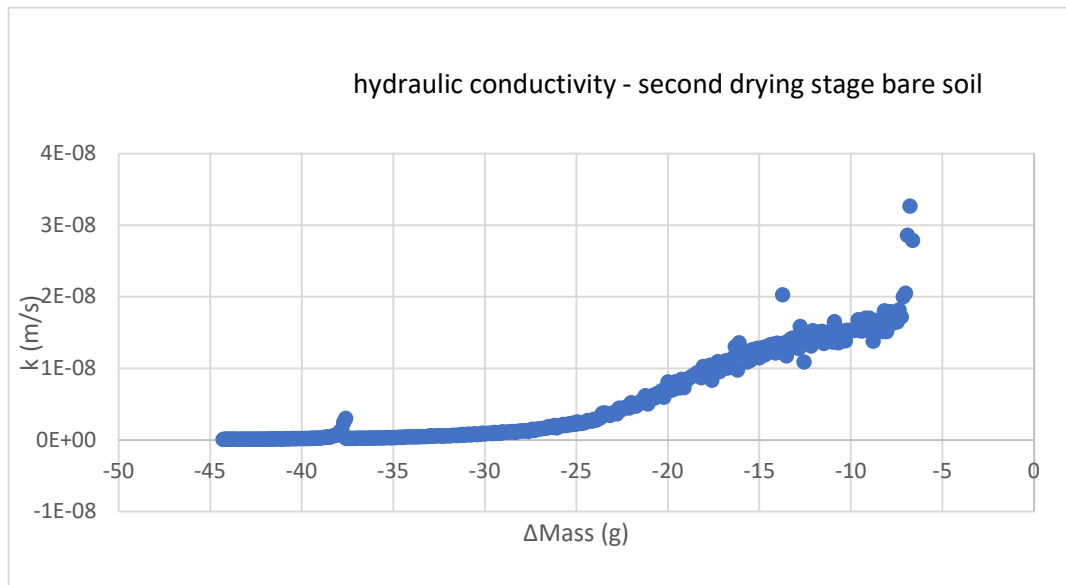
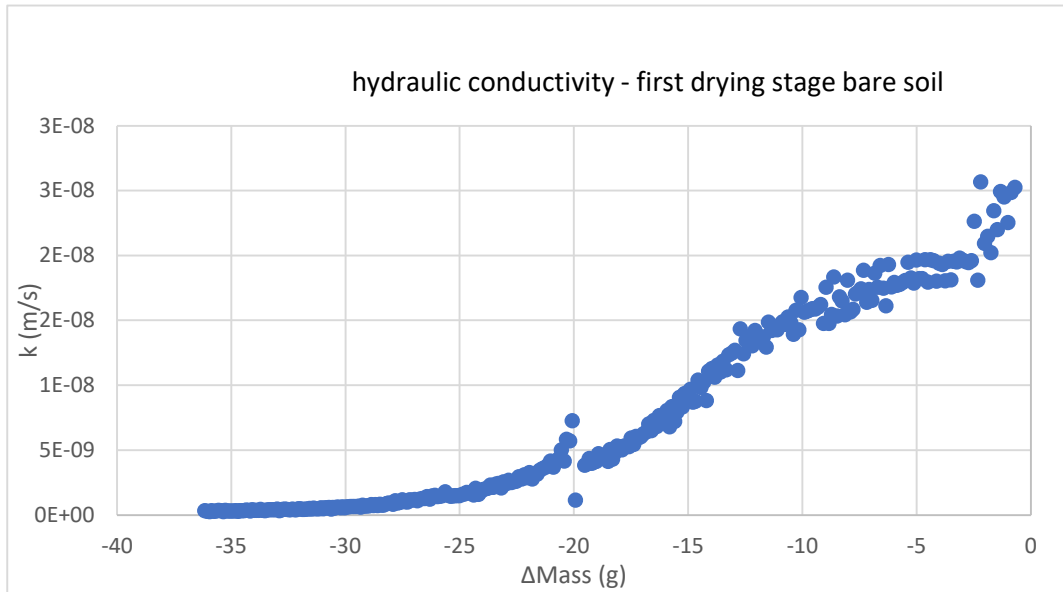
Suction comparison



Decrease of mass comparison



Description	Average suction	dh/dz	dV/dt/A	K	Mass loss (cm3)
1st drying	0,61	1,1	-0,000326	1,53369E-06	-0,49
1st drying	0,74	1,1	-5,28E-06	2,52403E-08	-0,63
1st drying	0,82	1,1	-5,3E-06	2,48646E-08	-0,77
1st drying	0,65	1,2	-4,97E-06	2,25356E-08	-0,91
1st drying	0,73	1,2	-5,3E-06	2,4517E-08	-1,05
1st drying	0,82	1,1	-5,3E-06	2,49205E-08	-1,20
1st drying	0,83	1,1	-4,63E-06	2,20056E-08	-1,32
1st drying	0,81	1,1	-4,97E-06	2,34614E-08	-1,46
1st drying	0,90	1,1	-4,3E-06	2,02275E-08	-1,58
1st drying	0,94	1,2	-4,64E-06	2,14785E-08	-1,70
1st drying	0,96	1,2	-4,64E-06	2,09332E-08	-1,83
1st drying	1,04	1,2	-5,63E-06	2,566E-08	-1,98
1st drying	1,07	1,2	-3,97E-06	1,81014E-08	-2,09
1st drying	1,15	1,2	-4,97E-06	2,26302E-08	-2,23
1st drying	1,21	1,2	-4,31E-06	1,95901E-08	-2,34
1st drying	1,28	1,2	-4,3E-06	1,94581E-08	-2,46
1st drying	1,34	1,2	-4,31E-06	1,95255E-08	-2,58
1st drying	1,39	1,2	-4,31E-06	1,96396E-08	-2,69
1st drying	1,37	1,2	-4,3E-06	1,97913E-08	-2,81
1st drying	1,47	1,2	-4,3E-06	1,94999E-08	-2,93
1st drying	1,53	1,2	-4,31E-06	1,95522E-08	-3,05
1st drying	1,57	1,2	-3,98E-06	1,81311E-08	-3,15
1st drying	1,63	1,2	-4,3E-06	1,95531E-08	-3,27
1st drying	1,64	1,2	-3,98E-06	1,80554E-08	-3,38
1st drying	1,65	1,2	-4,31E-06	1,92989E-08	-3,50
1st drying	1,72	1,2	-4,3E-06	1,94062E-08	-3,61
1st drying	1,75	1,2	-3,98E-06	1,8023E-08	-3,72
1st drying	1,80	1,2	-4,29E-06	1,95914E-08	-3,84
1st drying	1,85	1,2	-4,31E-06	1,9673E-08	-3,95
1st drying	1,87	1,2	-3,97E-06	1,79532E-08	-4,06
1st drying	1,92	1,2	-4,31E-06	1,96653E-08	-4,18
1st drying	1,92	1,2	-3,97E-06	1,82232E-08	-4,29
1st drying	1,94	1,2	-3,97E-06	1,82091E-08	-4,40
1st drying	2,00	1,2	-4,31E-06	1,96402E-08	-4,51



Bijlage V - Direct shear proef

Bijlage V – De direct shear proef

Verloop van de Direct shear proef

Onderstaand worden de stappen toegelicht die zijn doorlopen voor de uitvoering van de Direct Shear test (Reddy, z.d.). In figuur 1 is te zien uit welke onderdelen een Direct Shear apparaat bestaat (Celtest, z.d.).

Stap 1

Het grondmonster wordt samen met het bakje gewogen. Weeg is de ring waar mee het grondmonster voor de proef mee uitgestoken wordt. Steek het grondmonster uit in een ring met een diameter geschikt voor de direct shear proef. Schrijf het gewicht op van de ring en het gewicht van de ring met het monster.

Stap 2

Meet de diameter en hoogte van de ring. Bereken 15 procent van de doorsnede in millimeters.

Stap 3

Zet het afschuifdoosje voorzichtig in elkaar en plaats het in de machine. Leg een poreuze steen met hierop een filter papier in het afschuifdoosje.

Stap 4

Zet de ring op het afschuifdoosje en druk met een stempel het grondmonster in het afschuifdoosje zodat er geen grond verloren gaat (zie figuur 2). Leg hier ook een filterpapier op met een poreuze steen en sluit daarna het doosje af met de afsluitplaat.

Stap 5

De twee schroeven worden uit het afschuifdoosje verwijderd. Het bovenste doosje wordt iets opgetild en de schroeven worden weer vast gedraaid. Hierdoor zou er een kleine ruimte moeten ontstaan tussen de twee doosjes.

Stap 6

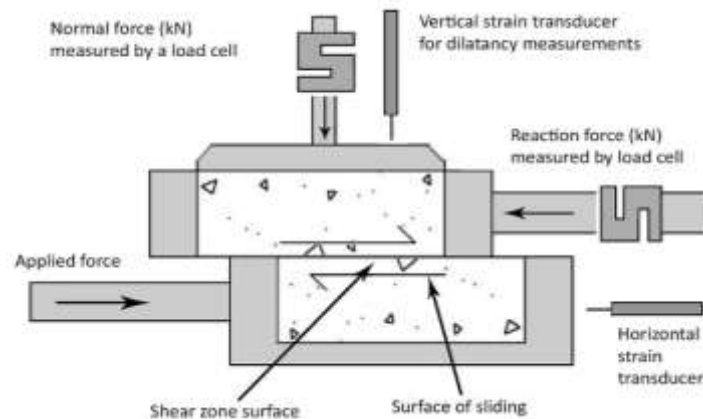
Het bakje uit stap één wordt nog een keer gewogen en het gewicht van het grondmonster wordt bepaald.

Stap 7

De rest van de direct shear wordt in elkaar gezet en de horizontale verplaatsingsmeter en de afschuifbelasting meter worden op nul gezet.

Stap 8

De verticale belasting wordt aangebracht door deze op de afsluitplaat te plaatsen (zie figuur 3). Direct hierna moet de verticale verplaatsingsmeter op de belasting aangebracht worden. Dit wordt gedaan door de pin omhoog te



Figuur 1 Onderdelen direct shear apparaat (Celtest, z.d.)



Figuur 2 Grondmonster in de Direct Shear



Figuur 3 Plaatsing van de verticale belasting

drukken waardoor deze kan zakken bij verticale verplaatsing. De verticale verplaatsingsmeter wordt ook op nul gezet.

Stap 9

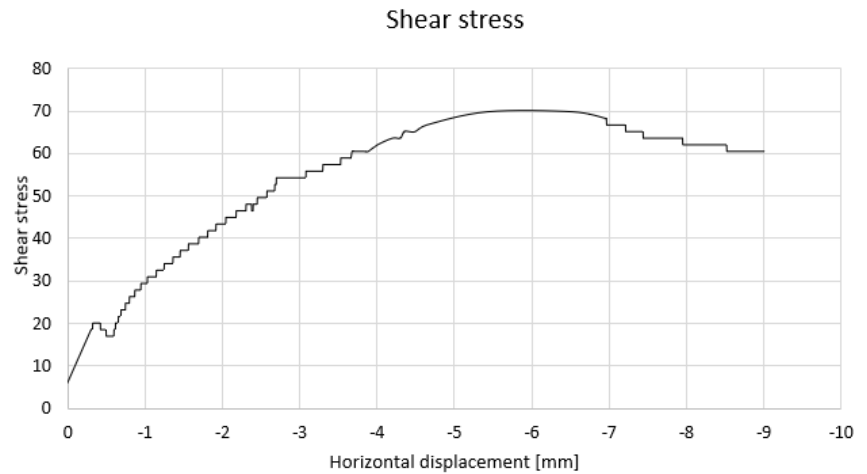
Het monster moet nu 24 uur rusten om te consolideren. Bereken met de verticale verplaatsing, die het monster tijdens het consolideren heeft ondervonden, de snelheid van afschuiven zonder dat er wateroverspanning ontstaat.

Stap 10

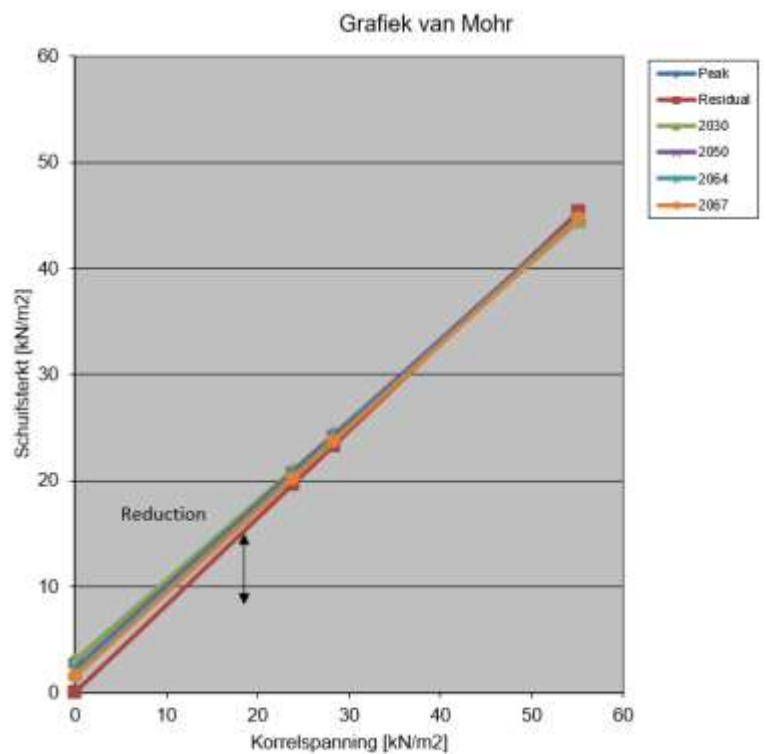
Zet de motor aan met de bereken deze snelheid. Er wordt gecontroleerd of alle meters de juiste data meten. De data is te zien op de aangesloten computer, deze laat ook direct een afschuifgrafiek zien (zie figuur 4). De maximaal te behalen afschuiving is ongeveer 10 mm. De proef wordt gestopt wanneer het deze afschuiving heeft bereikt of wanneer de afschuifspanning zijn piek heeft bereikt en deze aan het afnemen is.

Stap 11

Uit de afschuifgrafiek kan de piek schuifspanning gelezen worden. Door deze uit te zetten tegen de verticale belasting kan de grafiek van Mohr bepaald worden (zie figuur 5). Deze grafiek wordt verder gebruikt in de berekeningen (zie hoofdstuk 6 onderzoeksplan). Met de grafiek waarin de verticale verplaatsing uit is gezet tegen de horizontale verplaatsing is het gedrag van de grond tijdens het verplaatsen uit te lezen.

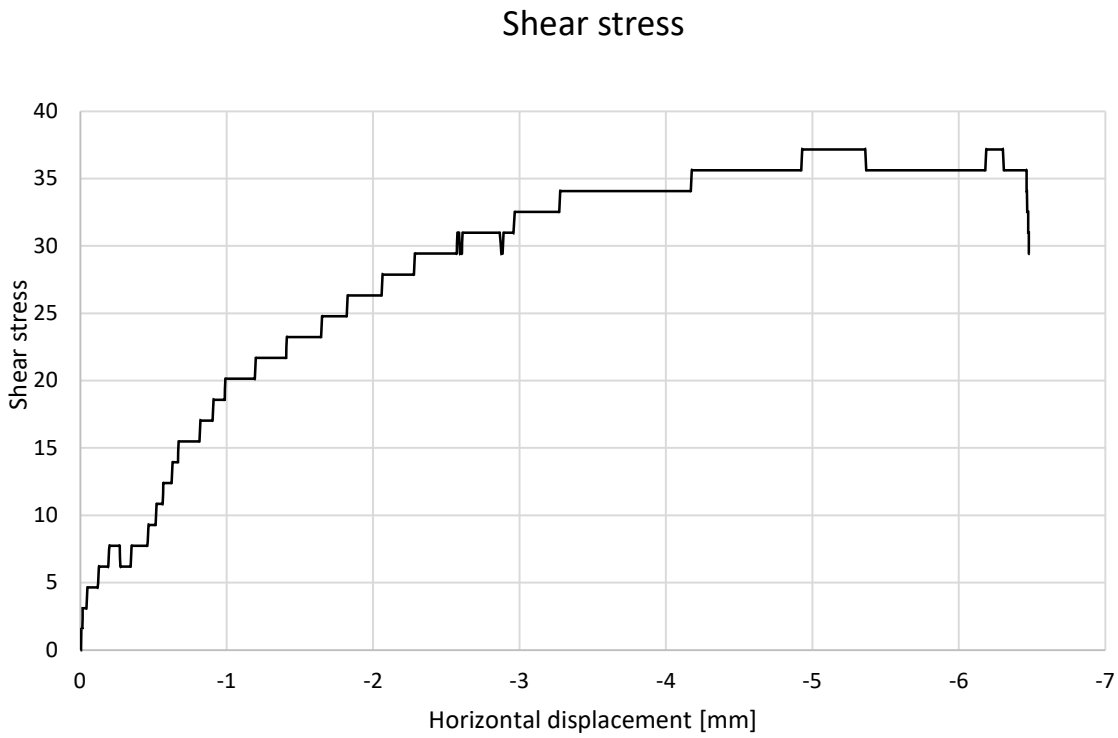
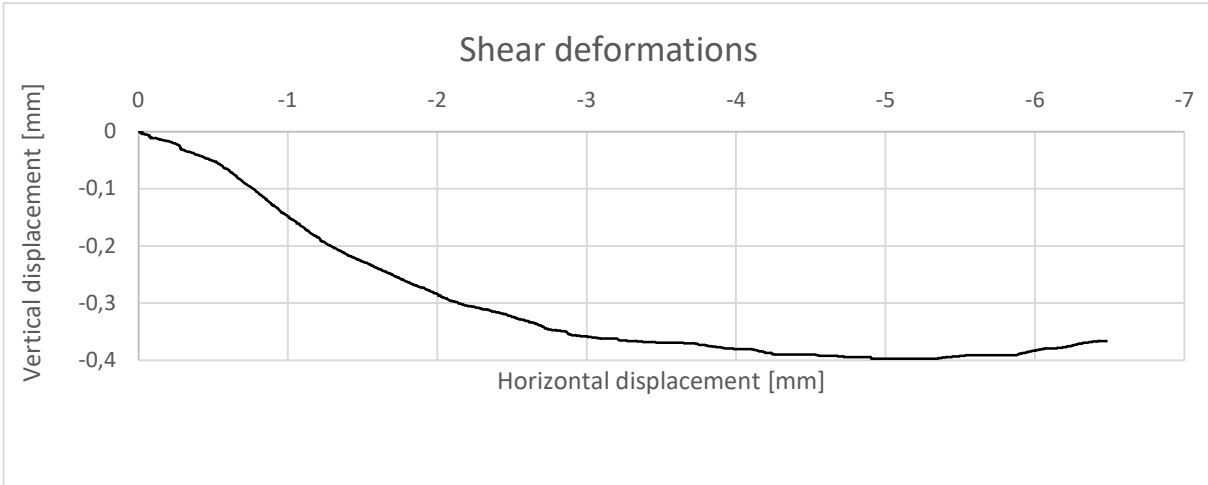


Figuur 4 voorbeeld afschuif grafiek

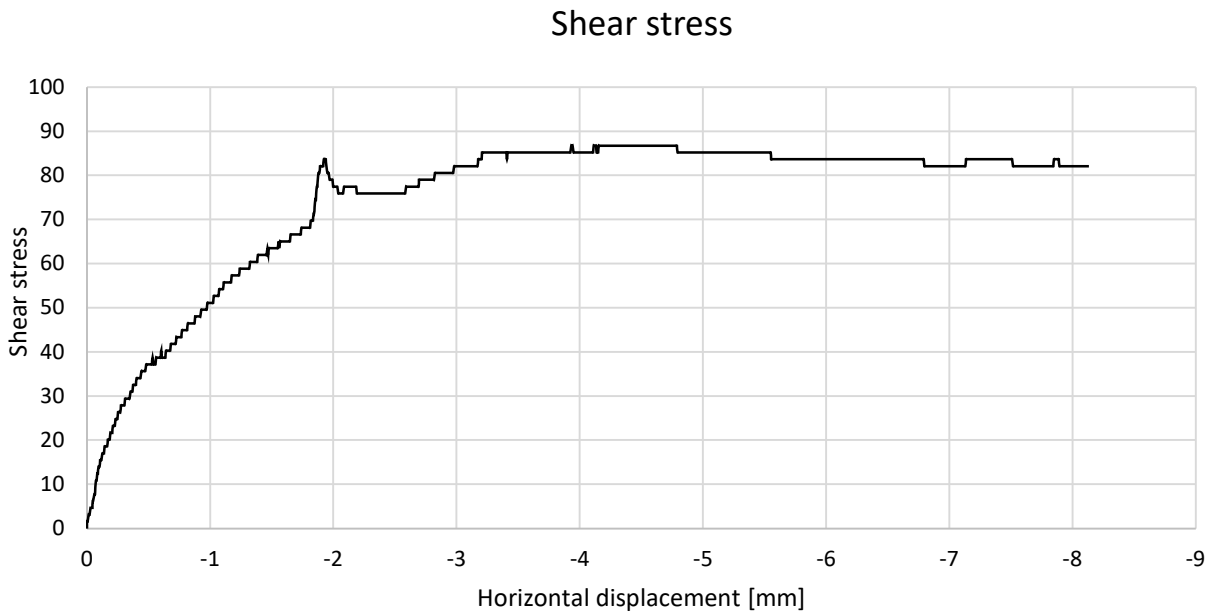
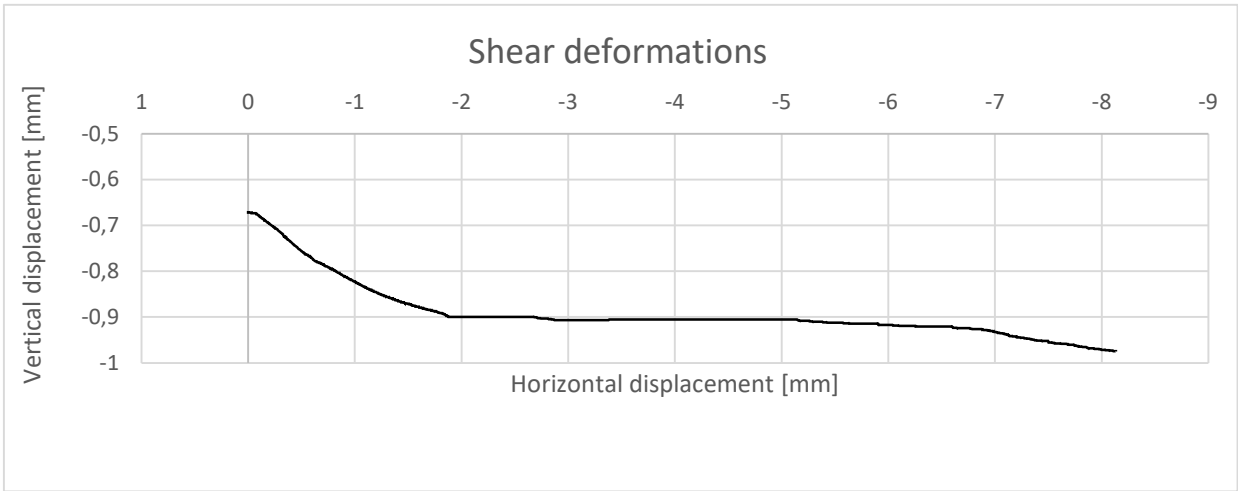


Figuur 5 Voorbeeld grafiek van Mohr

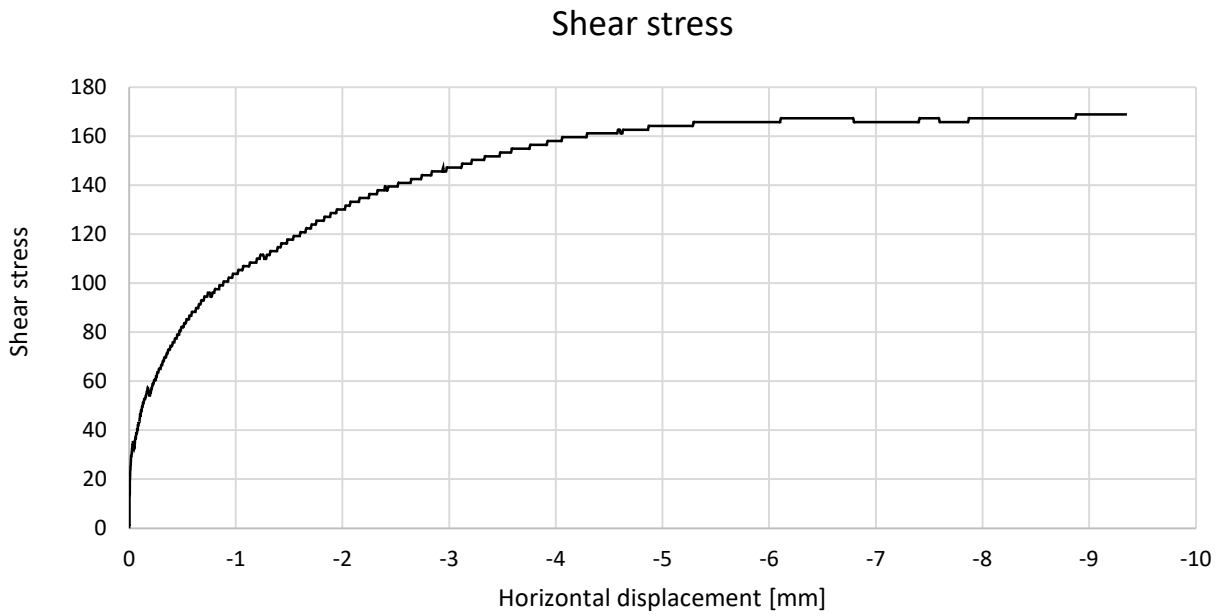
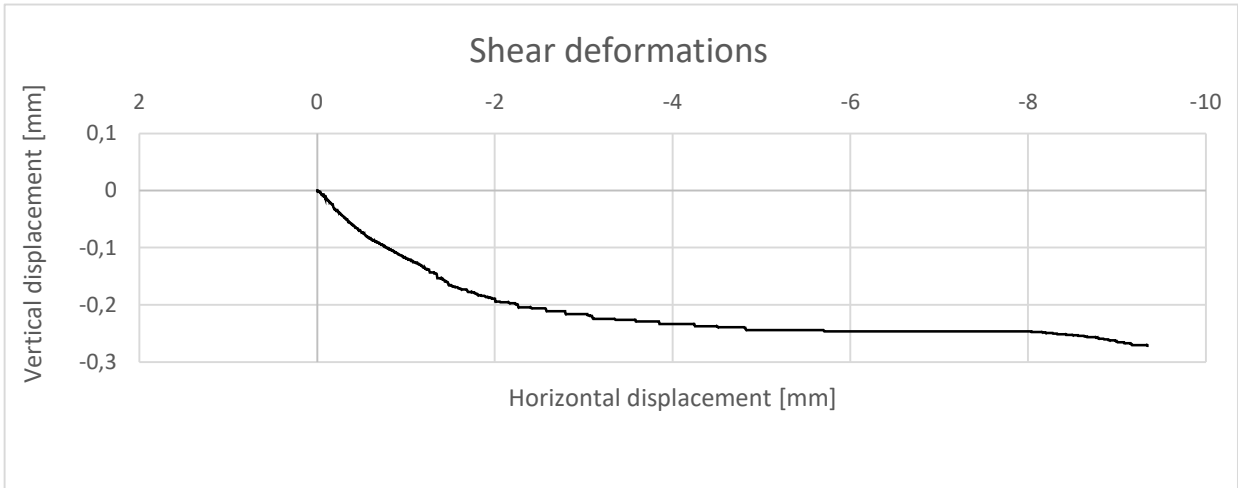
Max Shear load	37,1904 N
A_sample	33 cm ²
max shear stress	11 kPa
Top strength at horizontal displ	5 mm
Top strength at strain level:	8%
Diameter sample	64,8 mm



Max Shear load	86,7776 N
A_sample	33 cm ²
max shear stress	26 kPa
Top strength at horizontal displ	4,5 mm
Top strength at strain level:	7%
Diameter sample	64,8 mm



Max Shear load	168,9064 N
A_sample	33 cm ²
max shear stress	51 kPa
Top strength at horizontal displ	5,5 mm
Top strength at strain level:	8%
Diameter sample	64,8 mm



direct shear box on sample		Veg_soil_1		dimensions shear box: diameter mm		63,44 mm
Undrained, unconsolidated, moisture content as received				height sample mm		19,1 mm
				area sample		31,59337376 cm ²
				volume sample		60,34334388 cm ³
moisture content as received	Sample	mass cup g	mass sample wet with cup g	mass sample dry with cup g	Mass sample dry g	moisture %
	Veg_soil_1	76,63	163,27	86,64	-76,63	-213,06

moisture content test sample start test	Sample	mass ring	mass sample with ring	mass sample dry with cup g	Mass sample dry g	moisture %	Dry density Mg/m ³	volumetric water content	volume solids cc	volume voids cc	degree of saturation Sr %
	Veg_soil_1	76,63	239,9	163,27	104,25	56,61	1,73	59,02	39,34	21,00	281,00

moisture content test sample after test	Sample	mass cup g	mass sample with cup	mass sample dry with cup g	Mass sample dry g	moisture %
	Veg_soil_1	141,43	252,86	245,68	104,25	6,89

Load on hanger	normal load	highest shearforce	highest shear load
kg	kPa	N	kPa
0	13,9729	71,2816	22,56
5	29,4983	158,06	50,03
14	57,4440	210,00	66,47

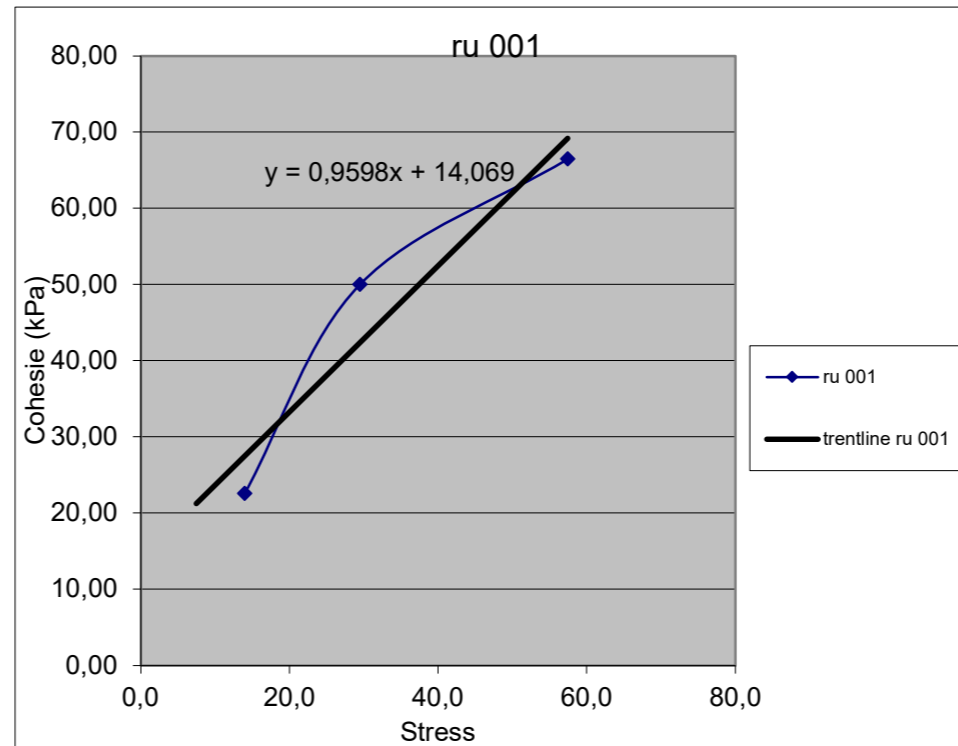
Cv shear load N | 14-17 kN in het veld

trentline quotation with cohesion

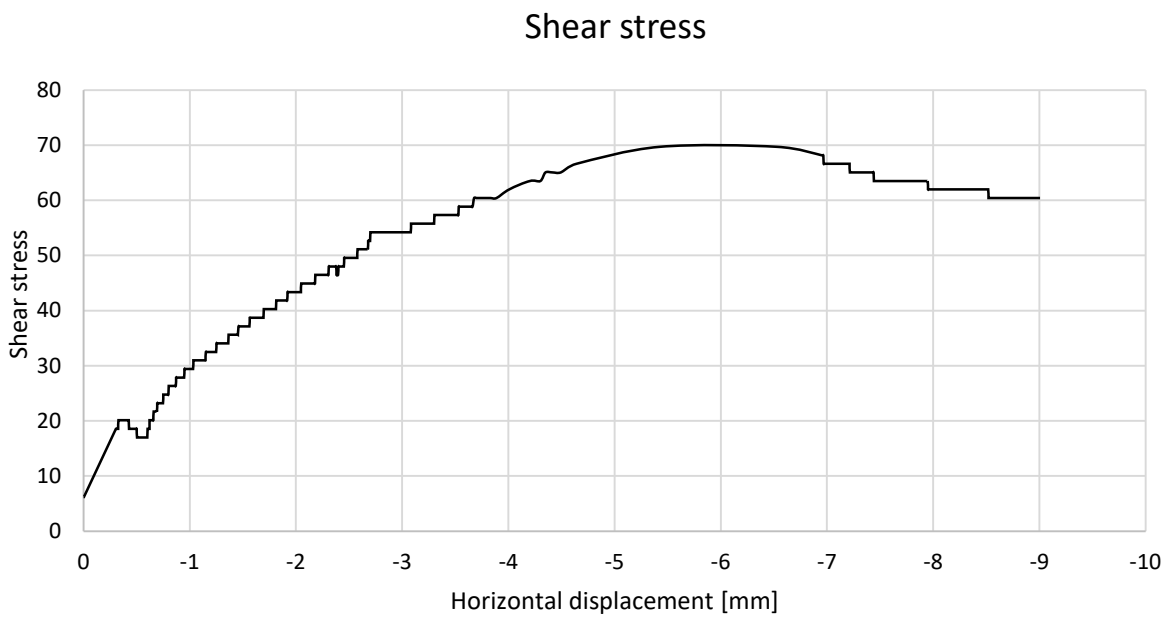
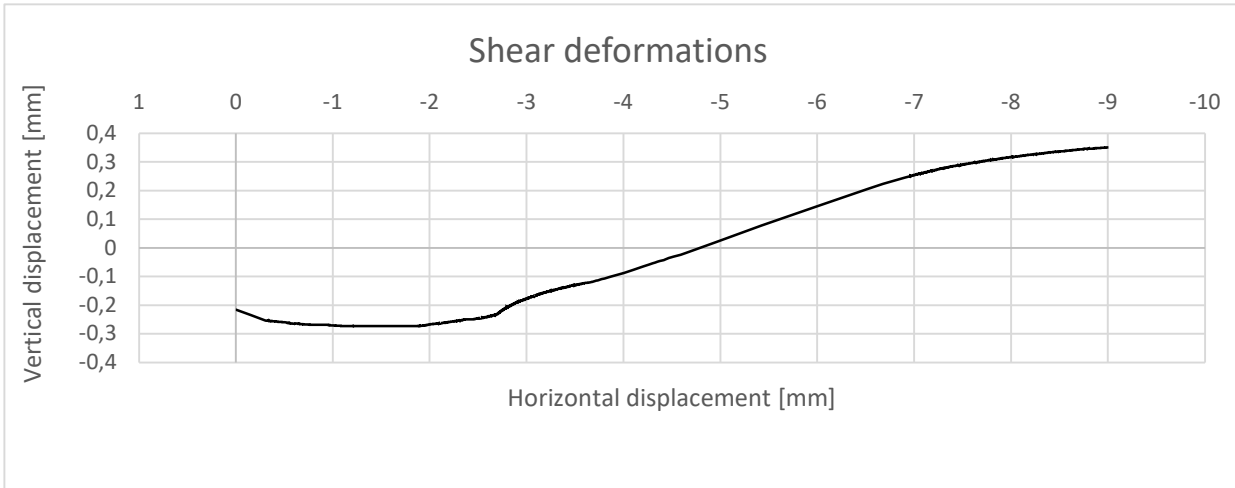
x 1

y 1,6811

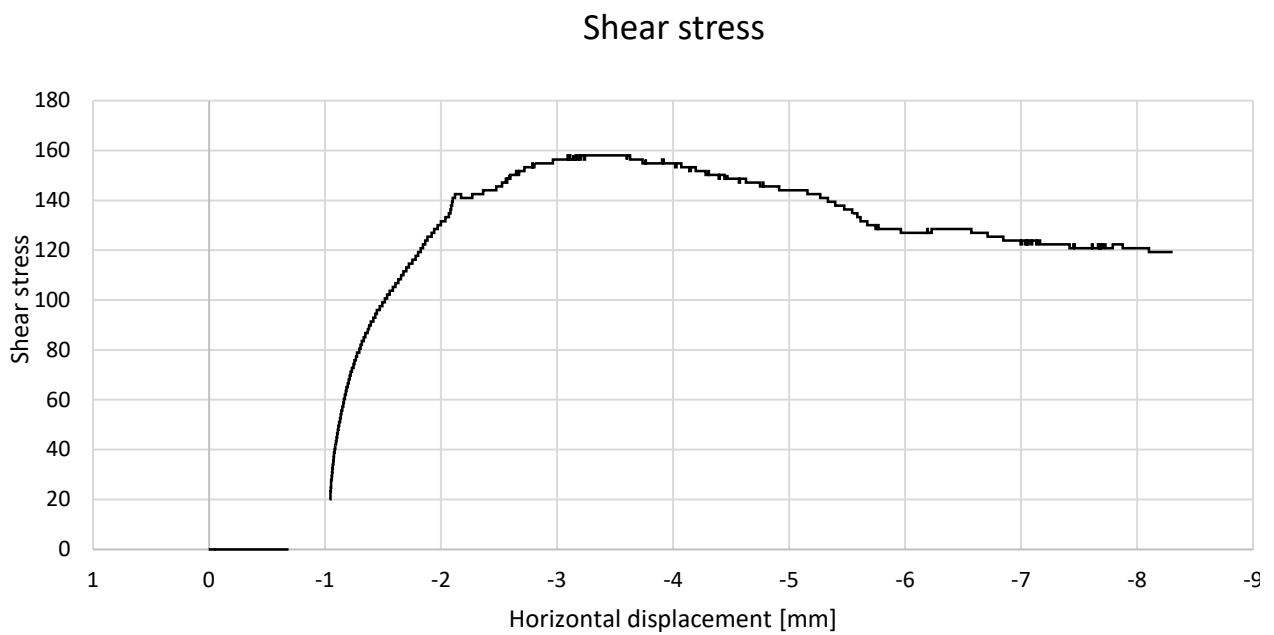
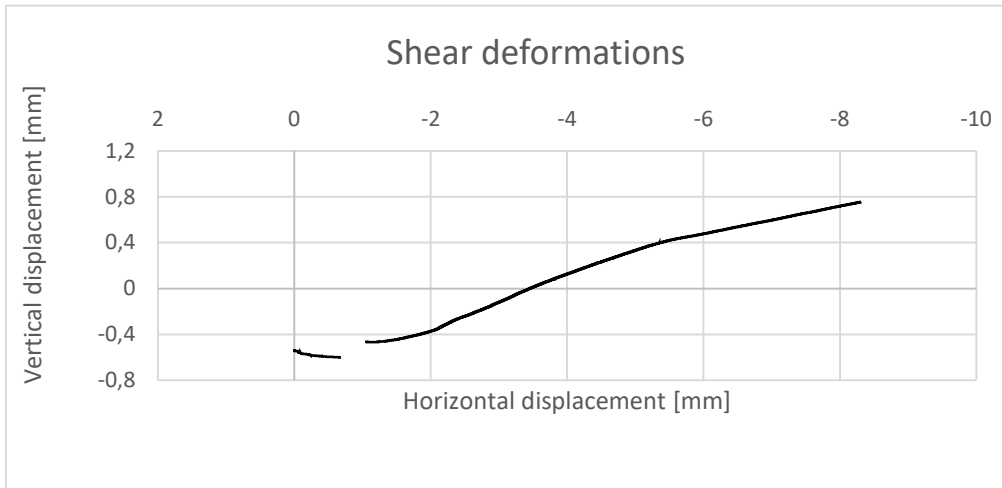
	with cohesion
cohesion kPa	0
angel of friction	59,28



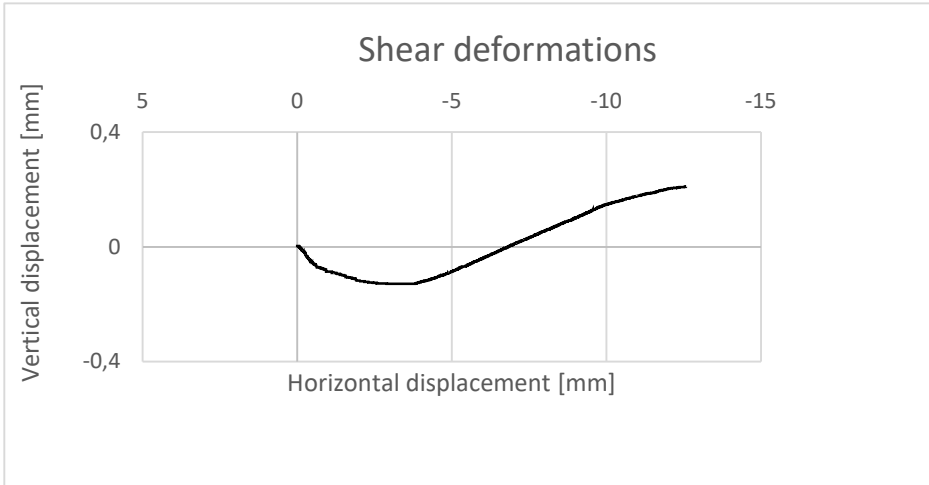
Max Shear load 71,2816 N
 A_sample 33 cm²
 max shear stress 22 kPa
 Top strength at h 6 mm
 Top strength at st 9%
 Diameter sample 64,8 mm
 Ratio peak/rest 14%



Max Shear load	158,0592 N
A_sample	33 cm ²
max shear stress	48 kPa
Top strength at horizontal displ	3,5 mm
Top strength at strain level:	5%
Diameter sample	64,8 mm
Ratio peak/stress	-34%



Max Shear load	210 N
A_sample	33 cm ²
max shear stress	64 kPa
Top strength at horizontal di:	7 mm
Top strength at strain level:	11%
Diameter sample	64,8 mm



direct shear box on sample		F4		dimentions shear box: diameter mm		64,8 mm	
Undrained, unconsolidated, moisture content as received				height sample mm		19 mm	
				area sample		32,962464 cm ²	
				volume sample		62,6286816 cm ³	
moisture content as received	Sample	mass cup g	mass sample with cup g	mass sample before test g	mass sample dry with cup g	Mass sample dry g	moisture %
	F4	141,79	243,26	101,47	237,01	95,22	6,56

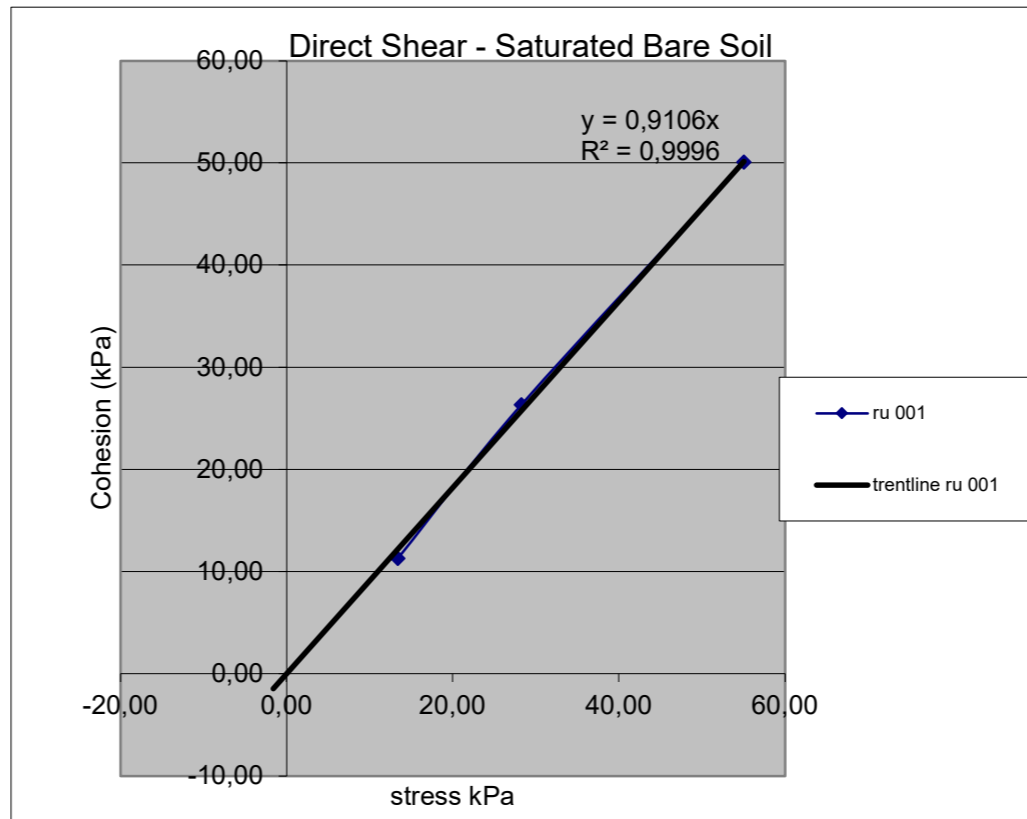
moisture content test sample start test	Sample	mass ring	mass sample with g	mass sample before test g	mass sample dry with cup g	Mass sample dry g	moisture %	Dry density Mg/m ³	volumetric water content ss water/density wa	volume solids cc	volume voids cc	degree of saturation Sr %
	F4	76,74	188,48	111,74		104,25	7,18	1,66	7,49	39,34	23,29	32,16

moisture content test sample after test	Sample	mass cup g	mass sample with g	mass sample after test g	mass sample dry with cup g	Mass sample dry g	moisture %
	F4	141,43	252,86	111,43	245,68	104,25	6,89

Load on hanger kg	normal load kPa	highest shear N	highest shear load kPa
0	13,39	37,19	11,28
5	28,27	86,78	26,33
14	55,06	165,00	50,06

trentline quotation with cohesion
x 1
y 0,9106

	with cohesion
cohesion k	0
angel of fric	42,34



on

Bijlage VI - Resultaten PLAXIS

Project description : MTPolder-Safety_analysis_Overpressure Calculation 2000.3
 Company : Technical University
 Project filename : MTPolder-Safety_analysis_Overpressure Calculation 2000.3
 Output : Calculation information

Output Version 22.2.0.1078

Date : 28-5-2023

Page : 1

Step info

Phase	Stabiliteit [Phase_1]
Step	Initial
Calculation mode	Classical mode
Step type	Safety
Updated mesh	False
Solver type	Picos
Kernel type	64 bit
Extrapolation factor	1,000
Relative stiffness	0,8248E-9

Multipliers

Soil weight			ΣM_{Weight}	1,000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0,5663E-3	ΣM_{sf}	3,942
Time	Increment	0,000	End time	0,000

Staged construction

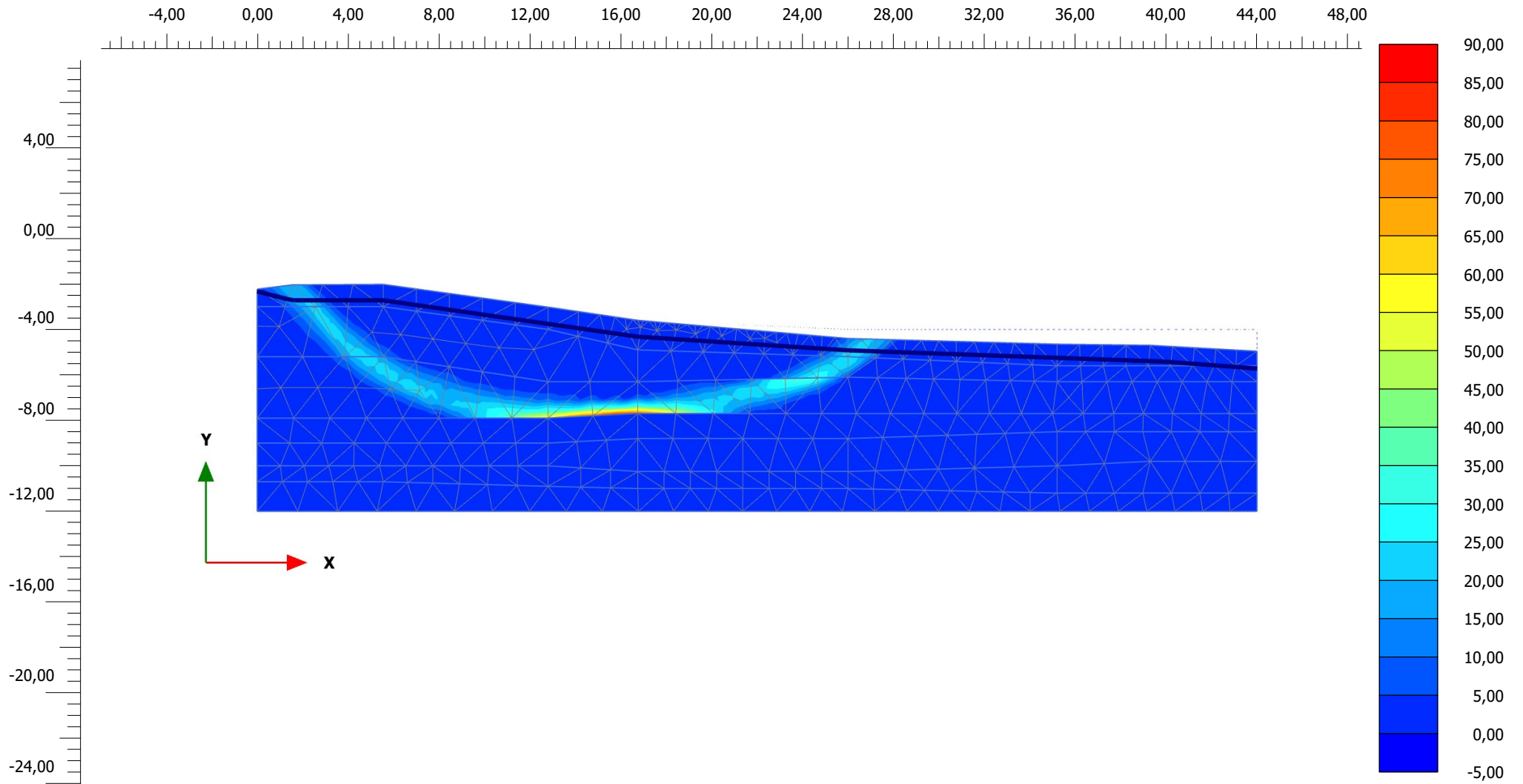
Active proportion total area	M_{Area}	0,000	ΣM_{Area}	0,9647
Active proportion of stage	M_{Stage}	0,000	ΣM_{Stage}	0,000

Forces

F_x	0,000 kN/m
F_y	0,000 kN/m

Consolidation

Realised $P_{\text{Excess,Max}}$	0,000 kN/m ²
----------------------------------	-------------------------



Phase deviatoric strain $P\gamma_s$ (scaled up 0,0200 times)

Maximum value = 85,93 (Element 287 at Node 3662)

Minimum value = 0,06710*10⁻³ (Element 621 at Node 404)



PLAXIS® 2D
CONNECT Edition

Project description
MTPolder-Preliminary

Project filename
MTPolder-Safety_analysis_ ...

Date
28-5-2023

Company
Technical University

Project description : MTPolder-Safety_analysis_Overpressure Calculation 2022.3
 Company : Technical University
 Project filename : MTPolder-Safety_analysis_Overpressure Calculation 2022.3
 Output : Calculation information

Output Version 22.2.0.1078

Date : 28-5-2023

Page : 1

Step info

Phase	Stabiliteit [Phase_1]
Step	Initial
Calculation mode	Classical mode
Step type	Safety
Updated mesh	False
Solver type	Picos
Kernel type	64 bit
Extrapolation factor	2,000
Relative stiffness	8,180E-9

Multipliers

Soil weight			ΣM_{Weight}	1,000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0,2148E-3	ΣM_{sf}	3,899
Time	Increment	0,000	End time	0,000

Staged construction

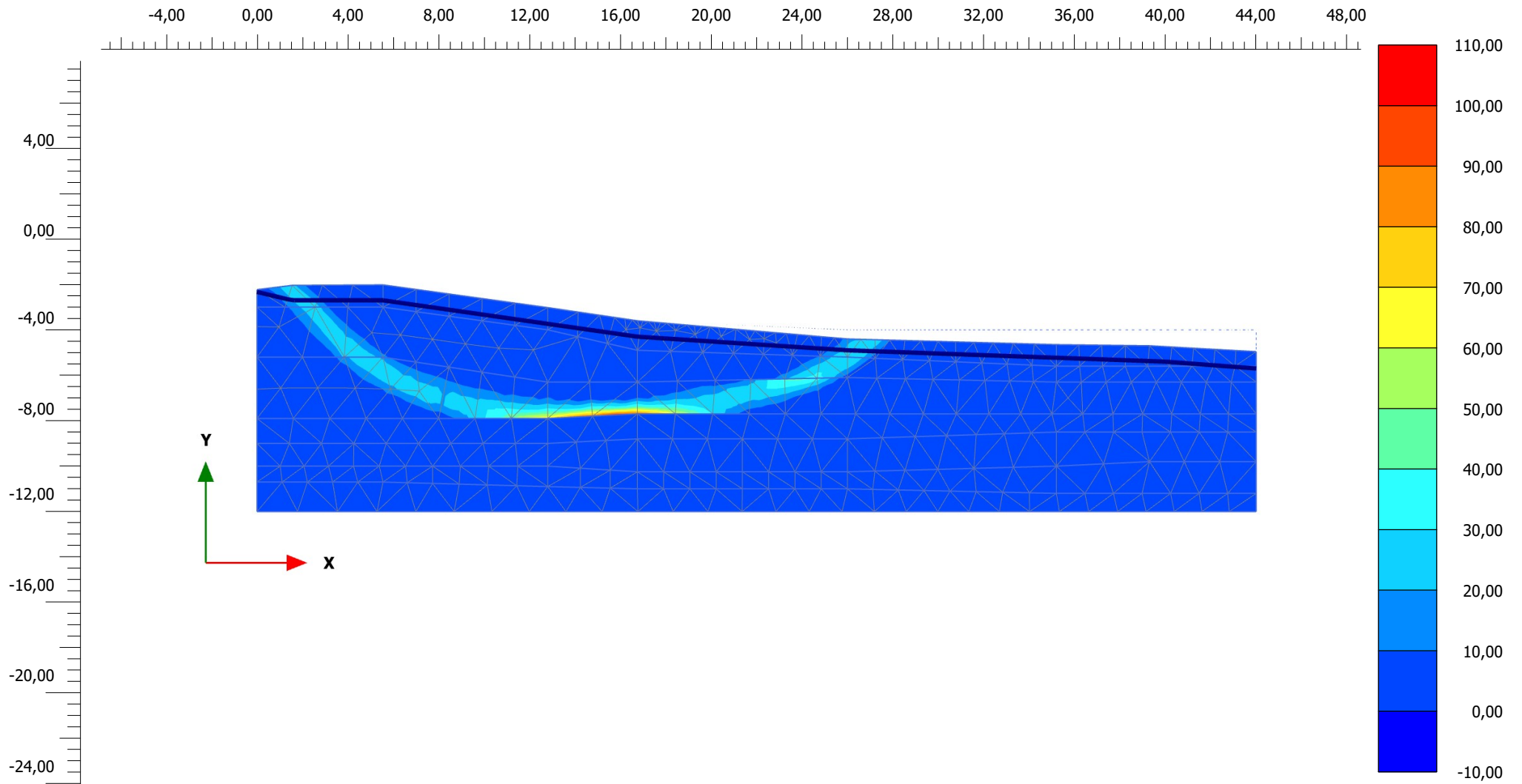
Active proportion total area	M_{Area}	0,000	ΣM_{Area}	0,9647
Active proportion of stage	M_{Stage}	0,000	ΣM_{Stage}	0,000

Forces

F_x	0,000 kN/m
F_y	0,000 kN/m

Consolidation

Realised $P_{\text{Excess,Max}}$	0,000 kN/m ²
----------------------------------	-------------------------



Phase deviatoric strain P_{y_s} (scaled up 0,0100 times)

Maximum value = 100,2 (Element 287 at Node 3662)

Minimum value = $0,06641 \cdot 10^{-3}$ (Element 621 at Node 404)



PLAXIS® 2D
CONNECT Edition

Project description

MTPolder-Preliminary

Project filename

MTPolder-Safety_analysis_ ...

Date

28-5-2023

Company

Technical University

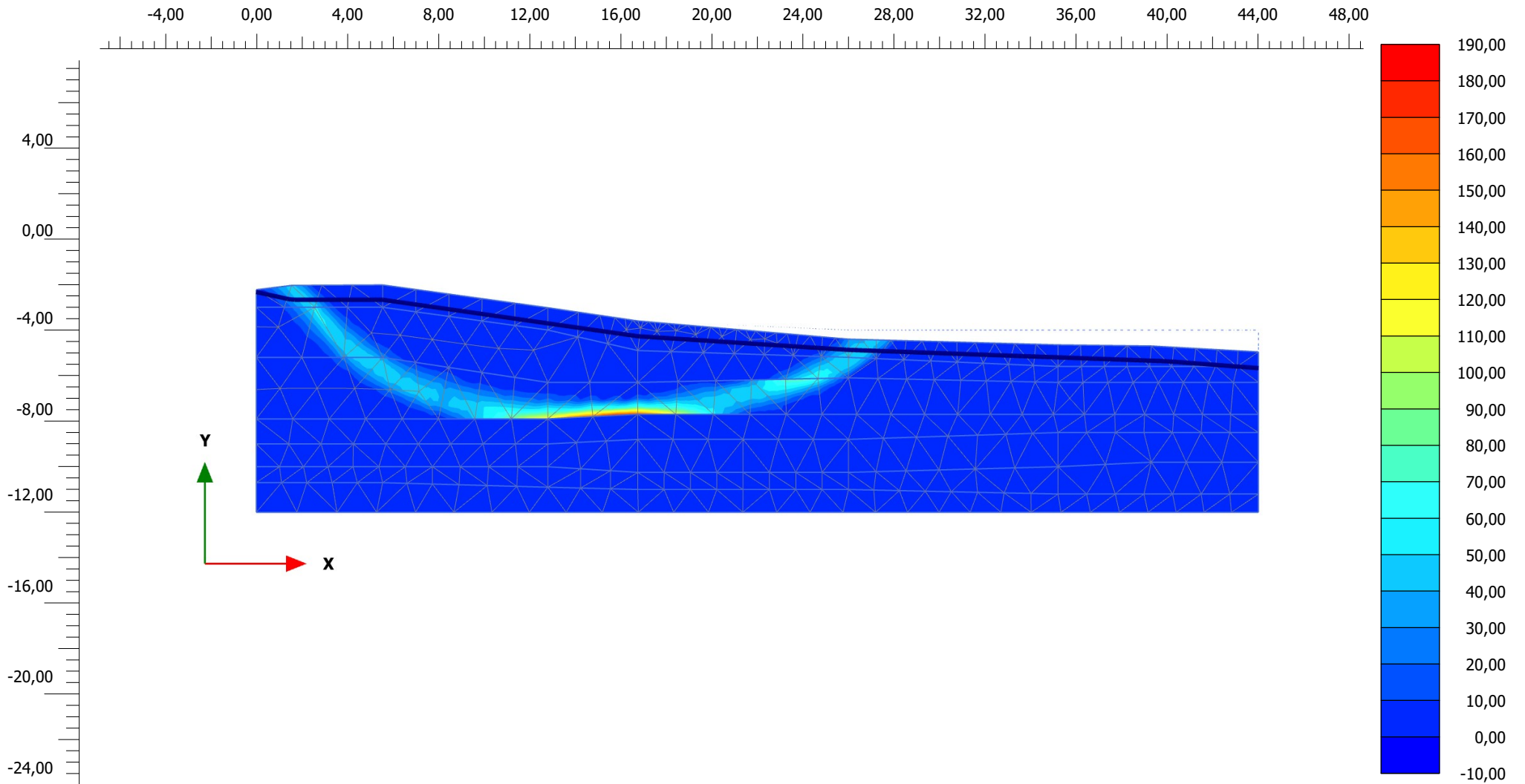
Project description : MTPolder-Safety_analysis_Overpressure Calculation 2030.3
 Company : Technical University
 Project filename : MTPolder-Safety_analysis_Overpressure Calculation 2030.3
 Output : Calculation information

Output Version 22.2.0.1078

Date : 28-5-2023

Page : 1

Step info				
Phase	Stabiliteit [Phase_1]			
Step	Initial			
Calculation mode	Classical mode			
Step type	Safety			
Updated mesh	False			
Solver type	Picos			
Kernel type	64 bit			
Extrapolation factor	1,000			
Relative stiffness	1,981E-9			
Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1,000
Strength reduction factor	M_{sf}	0,1269E-3	ΣM_{sf}	3,842
Time	Increment	0,000	End time	0,000
Staged construction				
Active proportion total area	M_{Area}	0,000	ΣM_{Area}	0,9647
Active proportion of stage	M_{Stage}	0,000	ΣM_{Stage}	0,000
Forces				
F_x	0,000 kN/m			
F_y	0,000 kN/m			
Consolidation				
Realised $P_{\text{Excess,Max}}$	0,000 kN/m ²			



PLAXIS® 2D
CONNECT Edition

Project description

MTPolder-Preliminary

Project filename

MTPolder-Safety_analysis_ ...

Date

28-5-2023

Company

Technical University

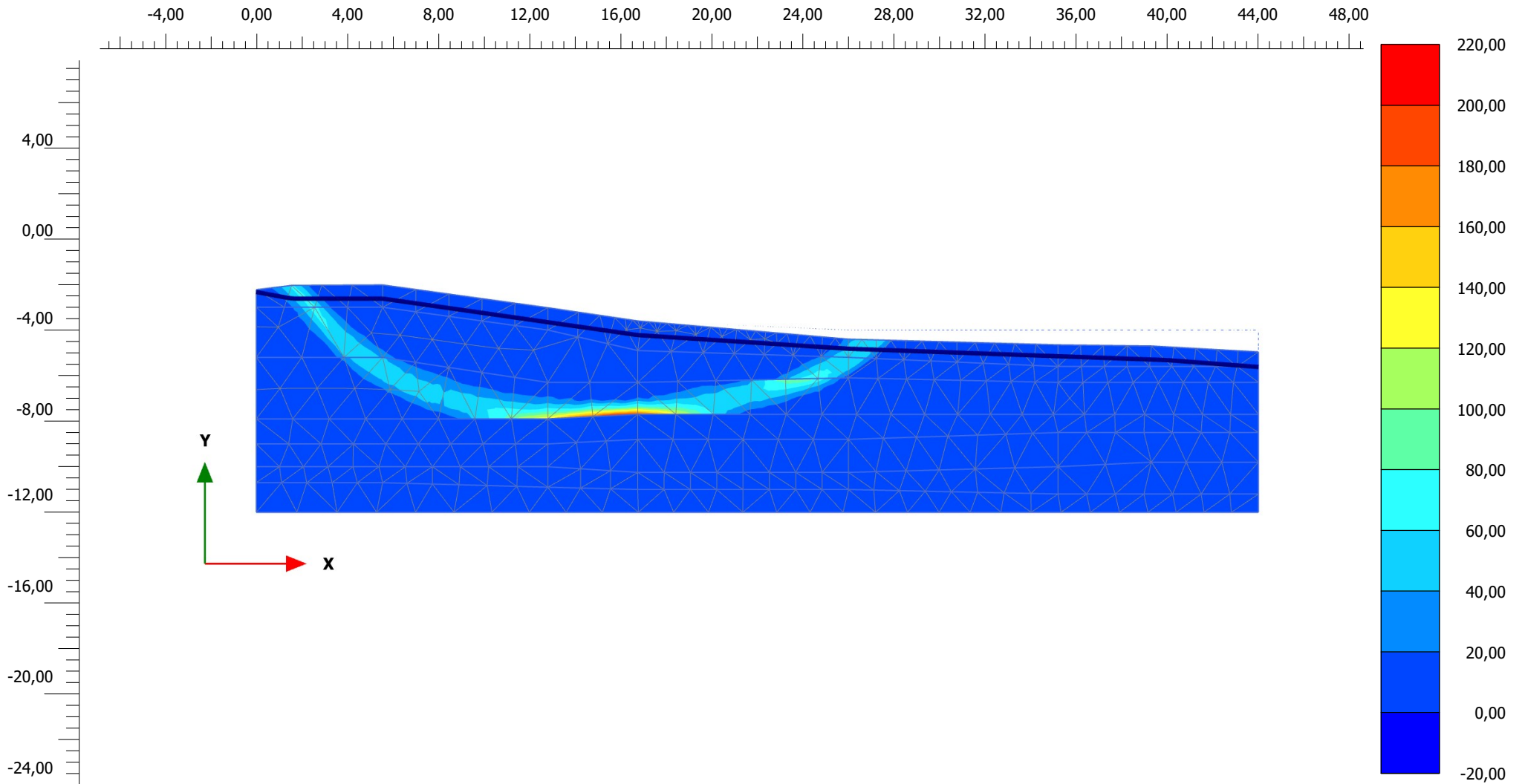
Project description : MTPolder-Safety_analysis_Overpressure Calculation 2050.3
 Company : Technical University
 Project filename : MTPolder-Safety_analysis_Overpressure Calculation 2050.3
 Output : Calculation information

Output Version 22.2.0.1078

Date : 28-5-2023

Page : 1

Step info				
Phase	Stabiliteit [Phase_1]			
Step	Initial			
Calculation mode	Classical mode			
Step type	Safety			
Updated mesh	False			
Solver type	Picos			
Kernel type	64 bit			
Extrapolation factor	1,000			
Relative stiffness	-1,312E-9			
Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1,000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0,8341E-3	ΣM_{sf}	3,626
Time	Increment	0,000	End time	0,000
Staged construction				
Active proportion total area	M_{Area}	0,000	ΣM_{Area}	0,9647
Active proportion of stage	M_{Stage}	0,000	ΣM_{Stage}	0,000
Forces				
F_x	0,000 kN/m			
F_y	0,000 kN/m			
Consolidation				
Realised $P_{\text{Excess,Max}}$	0,000 kN/m ²			



Phase deviatoric strain P_{y_s} (scaled up $5,00 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 208,0 (Element 287 at Node 3662)

Minimum value = $0,06197 \cdot 10^{-3}$ (Element 621 at Node 404)



PLAXIS® 2D
CONNECT Edition

Project description
MTPolder-Preliminary

Project filename
MTPolder-Safety_analysis_ ...

Step
100

Company
Technical University

Date
28-5-2023

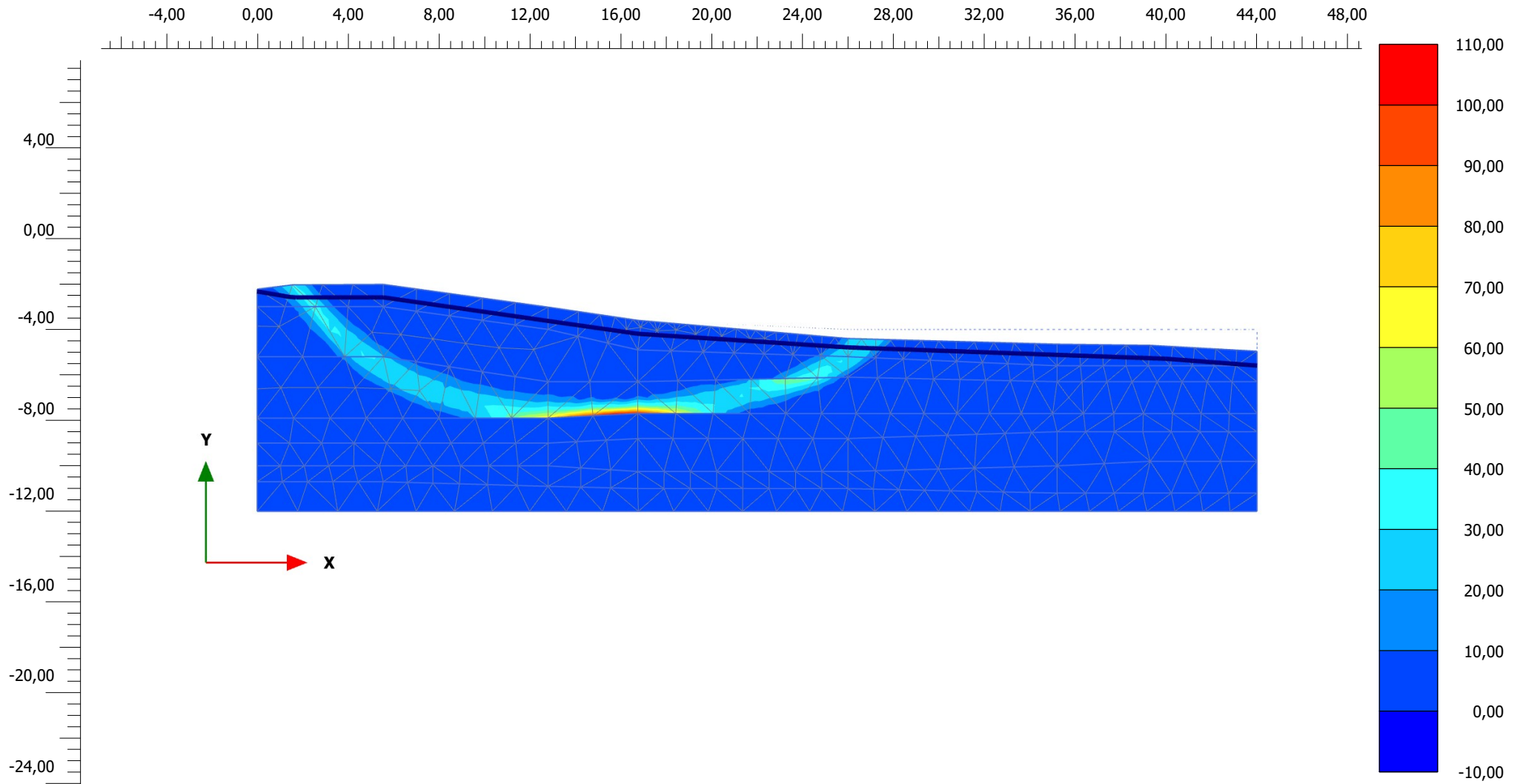
Project description : MTPolder-Safety_analysis_Overpressure Calculation 2064.3
 Company : Technical University
 Project filename : MTPolder-Safety_analysis_Overpressure Calculation 2064.3
 Output : Calculation information

Output Version 22.2.0.1078

Date : 28-5-2023

Page : 1

Step info				
Phase	Stabiliteit [Phase_1]			
Step	Initial			
Calculation mode	Classical mode			
Step type	Safety			
Updated mesh	False			
Solver type	Picos			
Kernel type	64 bit			
Extrapolation factor	1,000			
Relative stiffness	4,563E-9			
Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1,000
Strength reduction factor	M_{sf}	0,6436E-3	ΣM_{sf}	3,494
Time	Increment	0,000	End time	0,000
Staged construction				
Active proportion total area	M_{Area}	0,000	ΣM_{Area}	0,9647
Active proportion of stage	M_{Stage}	0,000	ΣM_{Stage}	0,000
Forces				
F_x	0,000 kN/m			
F_y	0,000 kN/m			
Consolidation				
Realised $P_{\text{Excess,Max}}$	0,000 kN/m ²			



PLAXIS® 2D
CONNECT Edition

Project description

MTPolder-Preliminary

Project filename

MTPolder-Safety_analysis_ ...

Date

28-5-2023

Company

Technical University

Project description : MTPolder-Safety_analysis_Overpressure Calculation 2067.2
 Company : Technical University
 Project filename : MTPolder-Safety_analysis_Overpressure Calculation 2067.2
 Output : Calculation information

Output Version 22.2.0.1078

Date : 28-5-2023

Page : 1

Step info

Phase Stabiliteit [Phase_1]
 Step Initial
 Calculation mode Classical mode
 Step type Safety
 Updated mesh False
 Solver type Picos
 Kernel type 64 bit
 Extrapolation factor 0,5000
 Relative stiffness 0,02241E-6

Multipliers

Soil weight			ΣM_{Weight}	1,000
Strength reduction factor	M_{sf}	0,6097E-3	ΣM_{sf}	3,348
Time	Increment	0,000	End time	0,000

Staged construction

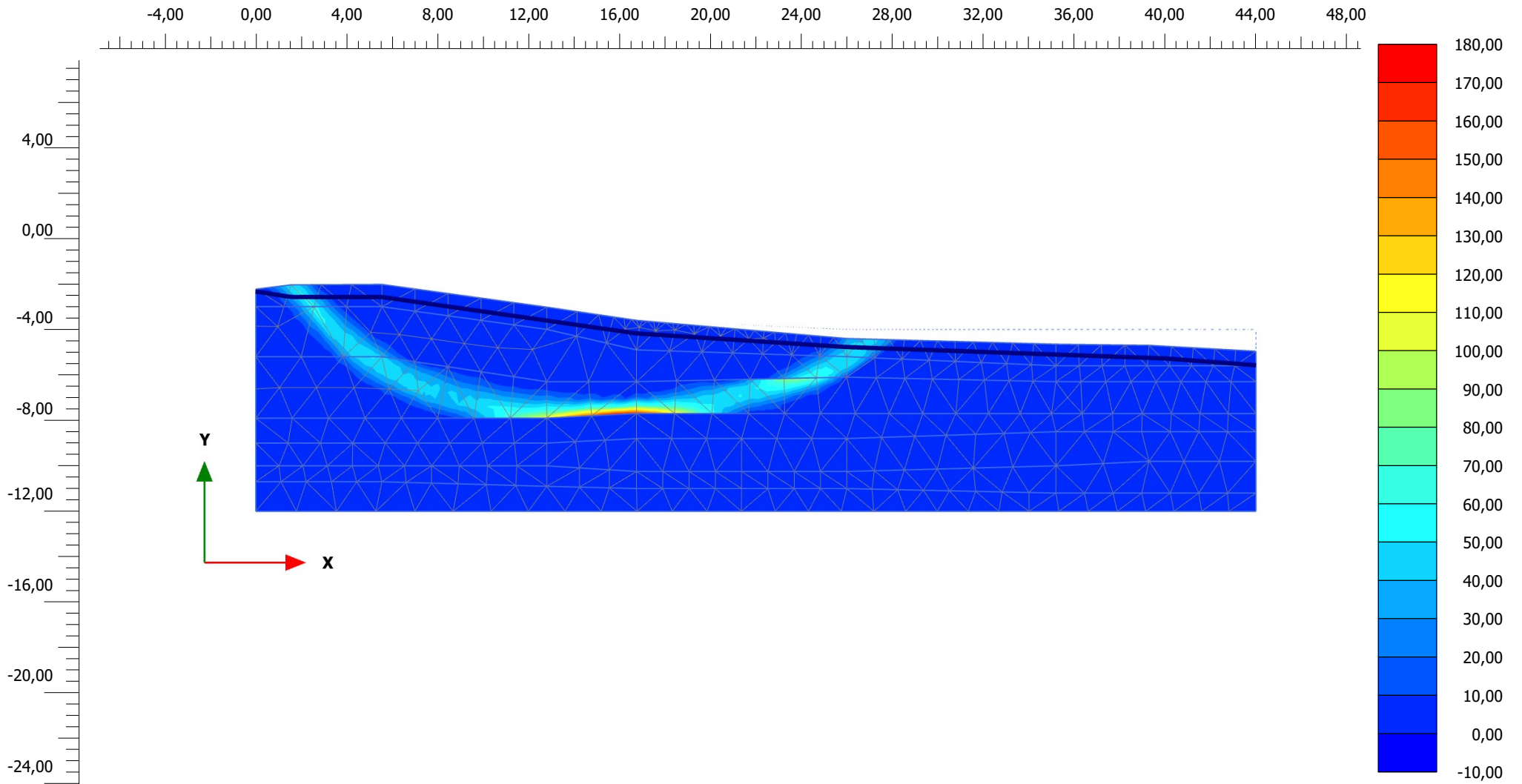
Active proportion total area	M_{Area}	0,000	ΣM_{Area}	0,9647
Active proportion of stage	M_{Stage}	0,000	ΣM_{Stage}	0,000

Forces

F_x 0,000 kN/m
 F_y 0,000 kN/m

Consolidation

Realised $P_{\text{Excess,Max}}$ 0,000 kN/m²



Phase deviatoric strain P_{y_s} (scaled up $5,00 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 176,8 (Element 287 at Node 3662)

Minimum value = $0,05656 \cdot 10^{-3}$ (Element 621 at Node 404)



PLAXIS® 2D
CONNECT Edition

Project description
MTPolder-Preliminary

Project filename
MTPolder-Safety_analysis_ ...

Date
28-5-2023

Company
Technical University

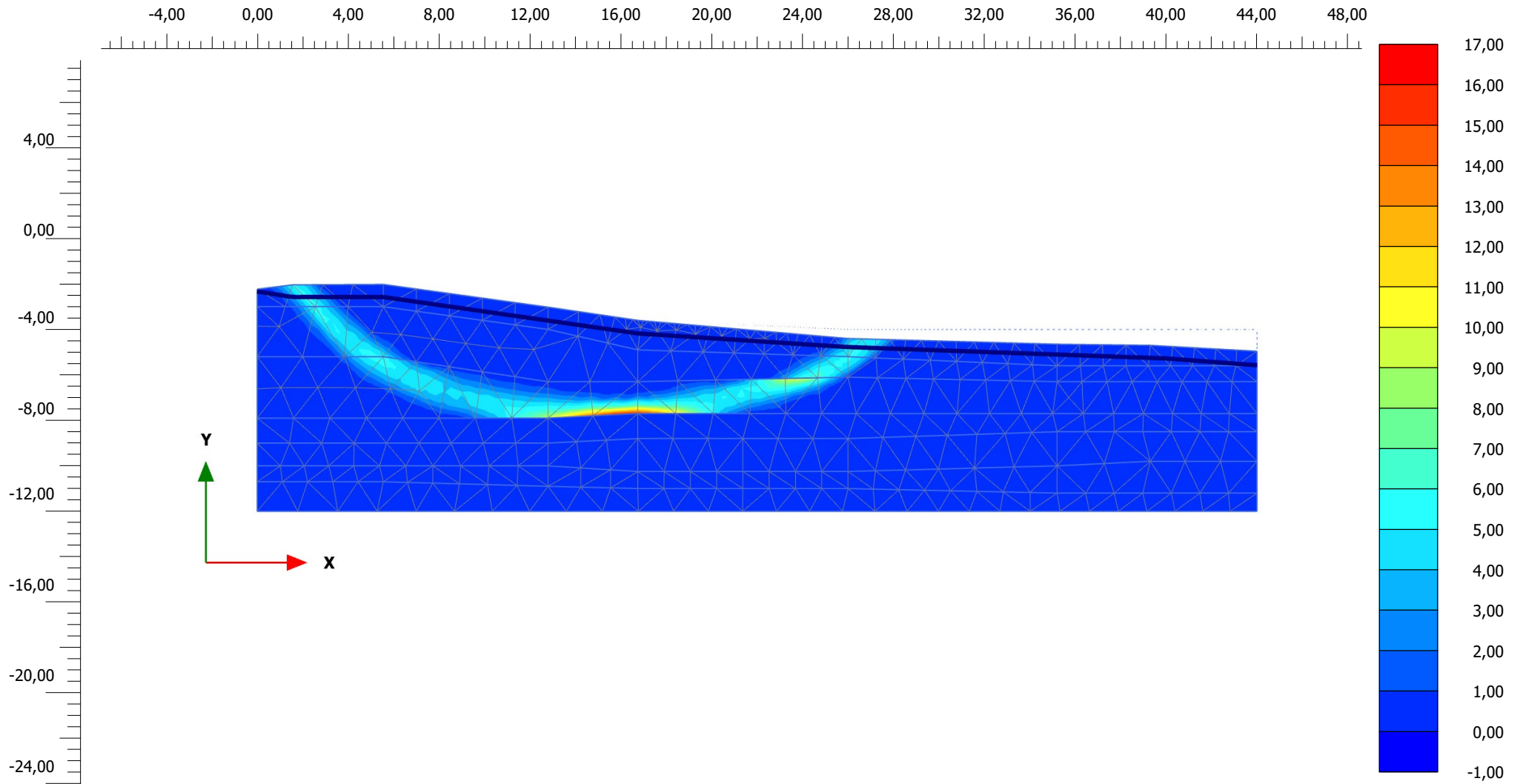
Project description : MTPolder-Safety_analysis_Overpressure Calculation 2068.3
 Company : Technical University
 Project filename : MTPolder-Safety_analysis_Overpressure Calculation 2068.3
 Output : Calculation information

Output Version 22.2.0.1078

Date : 28-5-2023

Page : 1

Step info				
Phase	Stabiliteit [Phase_1]			
Step	Initial			
Calculation mode	Classical mode			
Step type	Safety			
Updated mesh	False			
Solver type	Picos			
Kernel type	64 bit			
Extrapolation factor	0,5000			
Relative stiffness	0,03553E-6			
Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1,000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0,1519E-3	ΣM_{sf}	3,054
Time	Increment	0,000	End time	0,000
Staged construction				
Active proportion total area	M_{Area}	0,000	ΣM_{Area}	0,9647
Active proportion of stage	M_{Stage}	0,000	ΣM_{Stage}	0,000
Forces				
F_x	0,000 kN/m			
F_y	0,000 kN/m			
Consolidation				
Realised $P_{\text{Excess,Max}}$	0,000 kN/m ²			



Phase deviatoric strain $P\gamma_s$ (scaled up 0,0500 times)

Maximum value = 16,24 (Element 287 at Node 3662)

Minimum value = $0,04970 \cdot 10^{-3}$ (Element 621 at Node 404)



PLAXIS® 2D
CONNECT Edition

Project description
MTPolder-Preliminary

Project filename
MTPolder-Safety_analysis_ ...

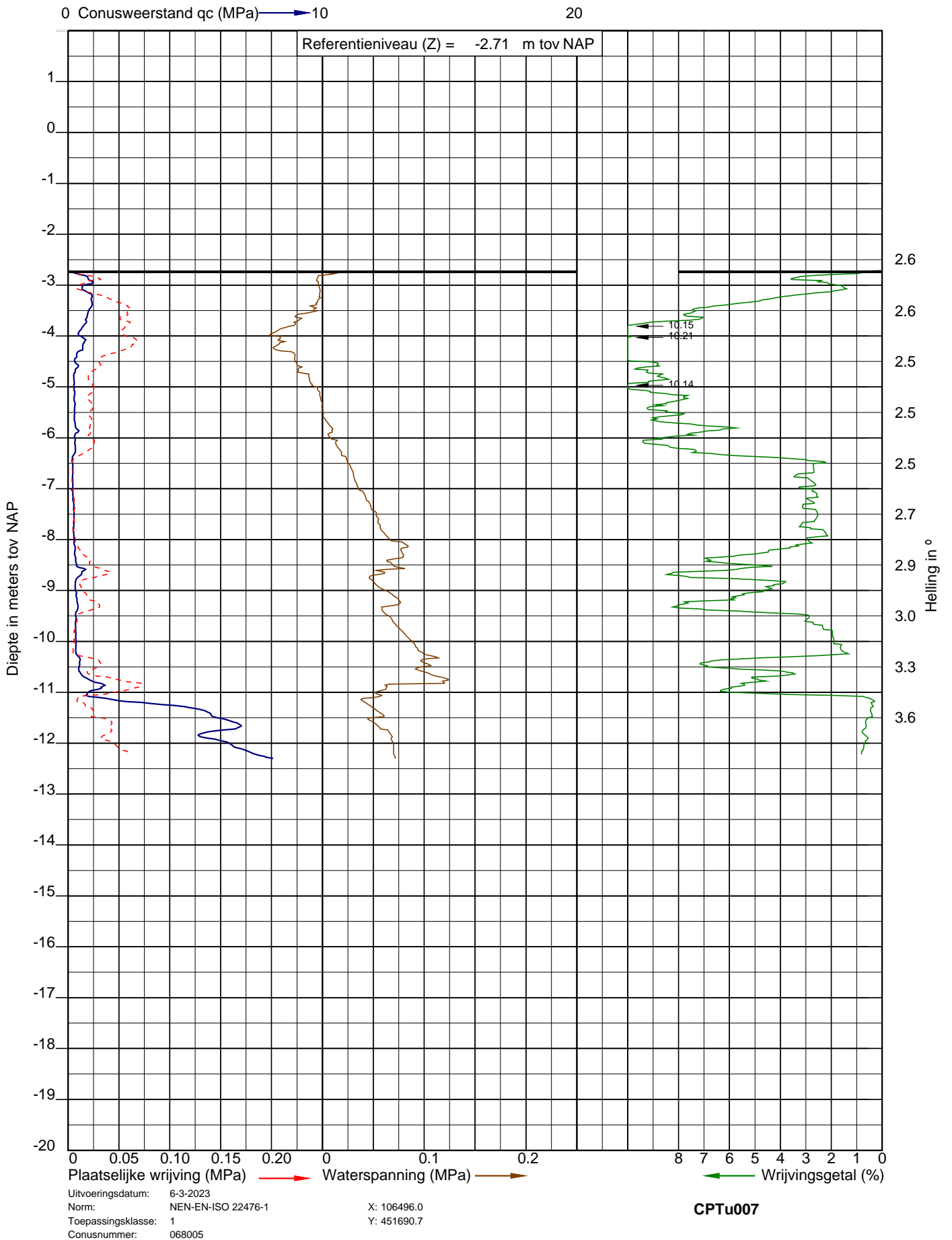
Date
28-5-2023

Company
Technical University

Bijlage VII - Sonderingen

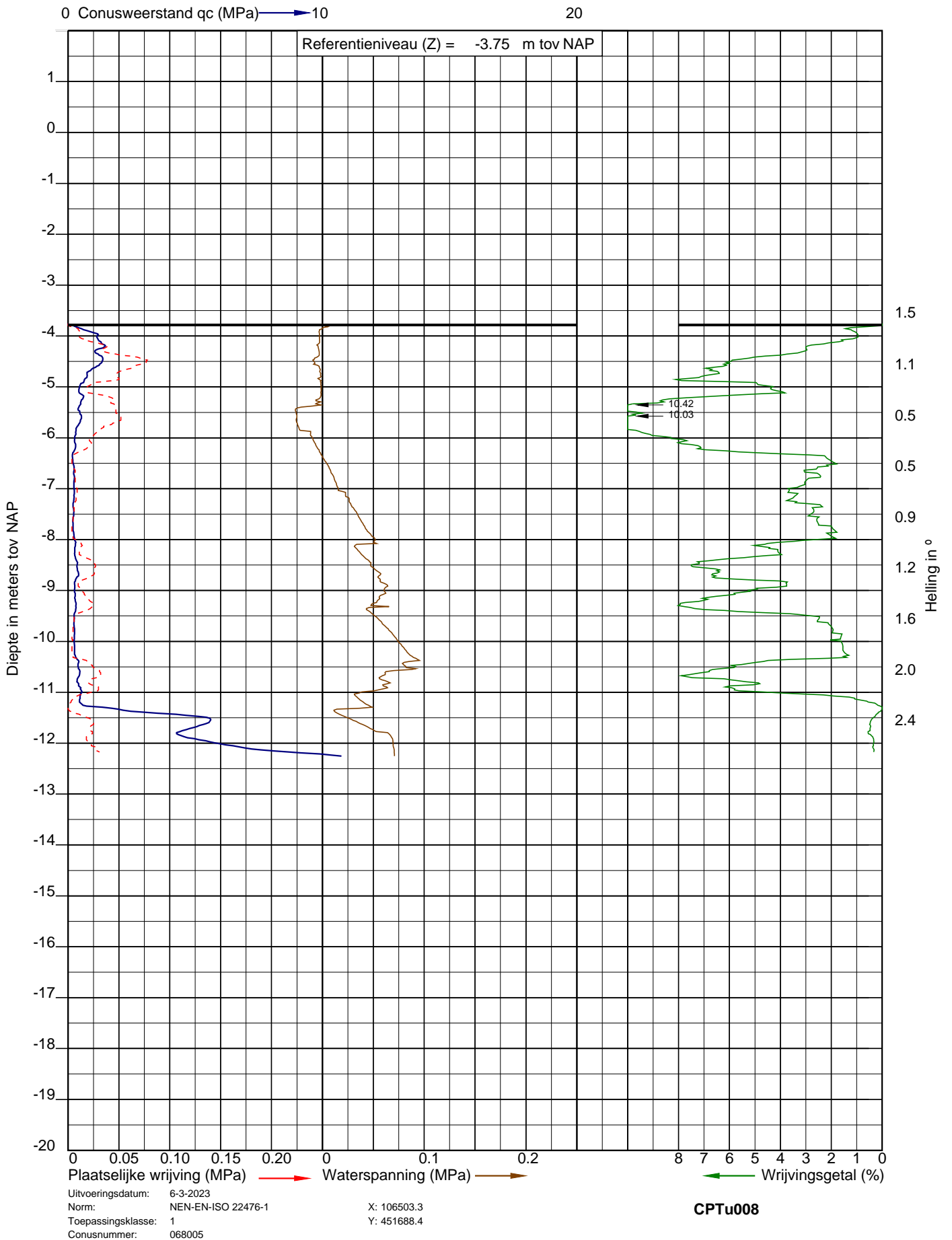


Project: Project Droogtemonitoring: aanvullend grondonderzoek en monitoring
 Opdracht: 22WP0448-01
 Betreft: Sondeergrafiek



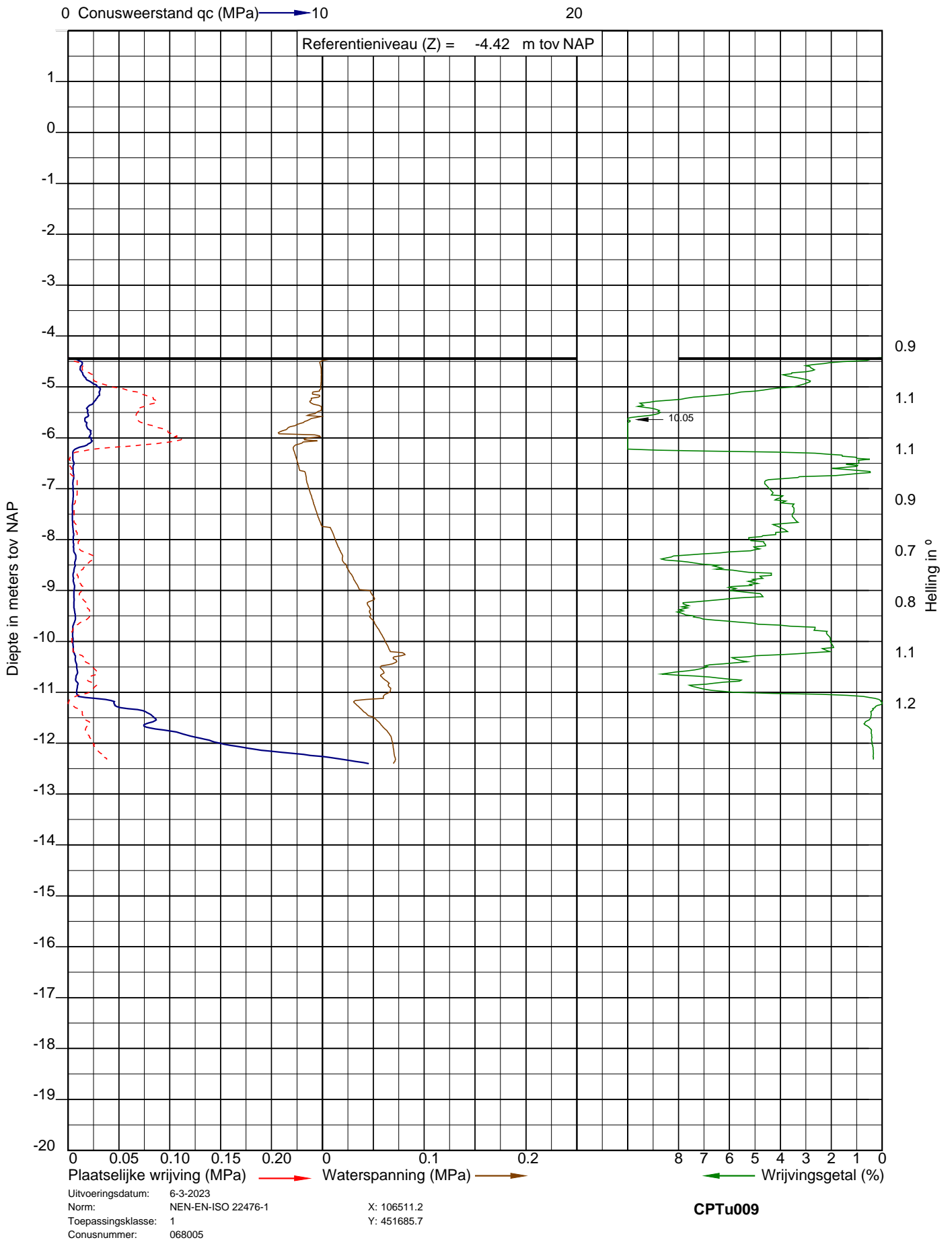


Project: Project Droogtemonitoring: aanvullend grondonderzoek en monitoring
 Opdracht: 22WP0448-01
 Betreft: Sondeergrafiek



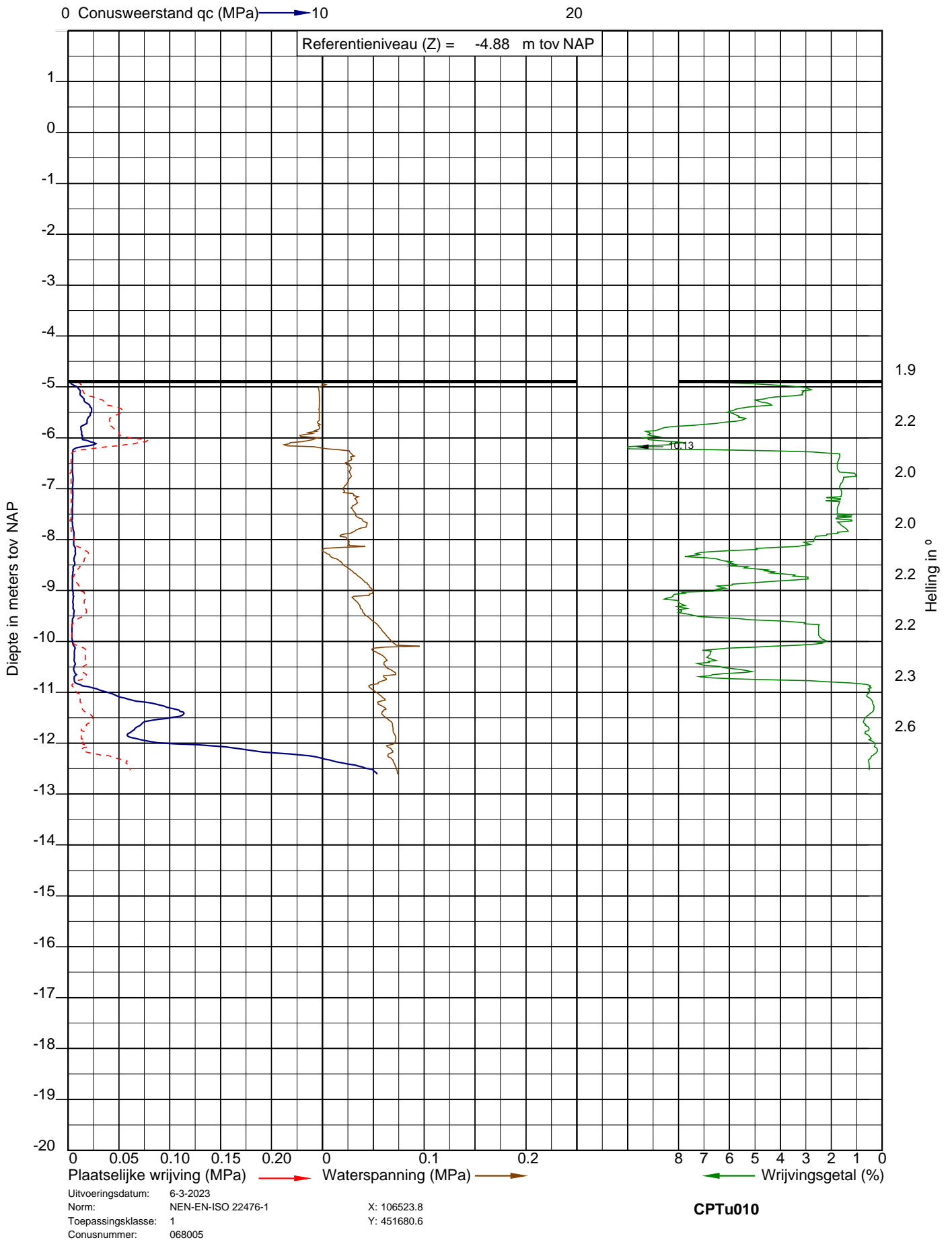


Project: Project Droogtemonitoring: aanvullend grondonderzoek en monitoring
 Opdracht: 22WP0448-01
 Betreft: Sondeergrafiek





Project: Project Droogtemonitoring: aanvullend grondonderzoek en monitoring
 Opdracht: 22WP0448-01
 Betreft: Sondeergrafiek



Bijlage VIII - Bepaling parameters

Toplaag				Veen 2		
c'	2 kN/m2			c'	2 kN/m2	
φ'	40 o	0,698131701 rad		φ'	32 o	0,558505 rad
σ'	16 kN/m2			σ'	32 kN/m2	
ψ	0 o			ψ	0 o	
τ	11,81669064 kN/m2			τ	18,65351265 kN/m2	

Veen 1				Klei 2		
c'	2 kN/m2			c'	5 kN/m2	
φ'	37 o	0,645771823 rad		φ'	31 o	0,541052 rad
σ'	19 kN/m2			σ'	36,5 kN/m2	
ψ	0 o			ψ	0 o	
τ	13,03175646 kN/m2			τ	23,08472624 kN/m2	

Klei 1				Veen 3		
c'	5 kN/m2			c'	2 kN/m2	
φ'	29 o	0,506145483 rad		φ'	32 o	0,558505 rad
σ'	31 kN/m2			σ'	37,5 kN/m2	
ψ	0 o			ψ	0 o	
τ	19,40219676 kN/m2			τ	21,5680686 kN/m2	

Veen 1						
c'	2					
		Hoeveel	Waarde die τ			
	Afname C in	c'afneemt	Waarde c' per	moet zijn per		
Berekening	procenten	[kN/m2]	berekening	berekening	φ' in grad	φ' in rad
						τ bij juiste φ'
1 (2030)	3%	0,06	1,94	13,02620963	37,15	0,64839
2 (2050)	17%	0,34	1,6	12,88105382	37,7	0,657989
3 (2064)	20%	0,4	1,2	12,71028227	38,3	0,668461
4 (2067)	20%	0,4	0,8	12,53951072	38,85	0,67806
5 (2068)	40%	0,8	0	12,19796763	39,93	0,69691

Klei 1						
c'	5					
		Hoeveel	Waarde die τ			
	Afname C in	c'afneemt	Waarde c' per	moet zijn per		
Berekening	procenten	[kN/m2]	berekening	berekening	φ' in grad	φ' in rad
						τ bij juiste φ'
1 (2030)	3%	0,15	4,85	19,39238147	29,28	0,511032
2 (2050)	17%	0,85	4	18,7078716	29,4	0,513127
3 (2064)	20%	1	3	17,90256587	29,56	0,515919
4 (2067)	20%	1	2	17,09726014	29,7	0,518363
5 (2068)	40%	2	0	15,48664867	29,97	0,523075

Veen 2						
c'	2					
		Hoeveel	Waarde die τ			
	Afname C in	c'afneemt	Waarde c' per	moet zijn per		
Berekening	procenten	[kN/m2]	berekening	berekening	φ' in grad	φ' in rad
						τ bij juiste φ'
1 (2030)	3%	0,06	1,94	18,64147726	32,02	0,558854
2 (2050)	17%	0,34	1,6	18,43374847	31,85	0,555887
3 (2064)	20%	0,4	1,2	18,18936165	31,65	0,552397
4 (2067)	20%	0,4	0,8	17,94497483	31,45	0,548906
5 (2068)	40%	0,8	0	17,4562012	31,05	0,541925

Klei 2						
c'	5					
		Hoeveel	Waarde die τ			
	Afname C in	c'afneemt	Waarde c' per	moet zijn per		
Berekening	procenten	[kN/m2]	berekening	berekening	φ' in grad	φ' in rad
						τ bij juiste φ'
1 (2030)	3%	0,15	4,85	23,07242208	31,05	0,541925
2 (2050)	17%	0,85	4	22,28322454	30,19	0,526915
3 (2064)	20%	1	3	21,35475685	29,18	0,509287
4 (2067)	20%	1	2	20,42628916	28,21	0,492357
5 (2068)	40%	2	0	18,56935379	26,3	0,459022

Veen 3
c'

	2	Hoeveel	Waarde die τ				
	Afname C in	c'afneemt	Waarde c' per	moet zijn per			
Berekening	procenten	[kN/m ²]	berekening	berekening	φ' in grad	φ' in rad	τ bij juiste φ'
1 (2030)	3%	0,06	1,94	21,55986508	32,01	0,55868	21,52255642
2 (2050)	17%	0,34	1,6	21,35204934	31,81	0,555189	21,1260857
3 (2064)	20%	0,4	1,2	21,10756022	31,56	0,550826	20,64967957
4 (2067)	20%	0,4	0,8	20,86307111	31,33	0,546812	20,18209064
5 (2068)	40%	0,8	0	20,37409288	30,85	0,538434	19,22970951

	Schuifsterkte 2022	Schuifsterkte 2000 (= pieksterkte)	Vershil piek- en residuele sterkte	Schuifsterkte 2030	Schuifsterkte 2050	Schuifsterkte 2064	Schuifsterkte 2067	Schuifsterkte 2068 (= reststerkte)	(Controle schuifsterkte 2068)
toplaag1									
Toplaag2									
Veen 1	13,03175646	13,05182536	0,85385773	13,02620963	12,88105382	12,71028227	12,53951072	12,19796763	12,19796763
Klei 1	19,40219676	19,51317733	4,02652866	19,39238147	18,7078716	17,90256587	17,09726014	15,48664867	15,48664867
Veen 2	18,65351265	18,67813528	1,22193408	18,64147726	18,43374847	18,18936165	17,94497483	17,4562012	17,4562012
Klei 2	23,08472624	23,21169223	4,64233845	23,07242208	22,28322454	21,35475685	20,42628916	18,56935379	18,56935379
Veen 3	21,5680686	21,59653845	1,22244557	21,55986508	21,35204934	21,10756022	20,86307111	20,37409288	20,37409288

Berekening
pieksterkte

	Verhouding piek/residuele sterkte	Vershil piek- en residuele sterkte	Afname 2000 - 2030	Sterkte in 2030	Procentuele afname 2030	Sterkte in 2050	Procentuele afname t/m 2050	Sterkte in 2064	Procentuele afname t/m 2064	Sterkte in 2067
Toplaag 1										
Toplaag 2										
Veen 1	1,07	0,07	0,0021	0,9979	0,21	0,986	1,4	0,972	2,8	0,958
Klei 1	1,26	0,26	0,0078	0,9922	0,78	0,948	5,2	0,896	10,4	0,844
Veen 2	1,07	0,07	0,0021	0,9979	0,21	0,986	1,4	0,972	2,8	0,958
Klei 2	1,25	0,25	0,0075	0,9925	0,75	0,95	5	0,9	10	0,85
Veen 3	1,06	0,06	0,0018	0,9982	0,18	0,988	1,2	0,976	2,4	0,964

Procentuele		Procentuele	
afname t/m	Sterkte in	afname t/m	Pieksterkte
2067	2068	2068	in 2000
4,2	0,93	7	13,051825
15,6	0,74	26	19,513177
4,2	0,93	7	18,678135
15	0,75	25	23,211692
3,6	0,94	6	21,596538

Load on hanger	normal load	highest shearforce	highest shear load
kg	kPa	N	kPa
0	13,39	37,19	11,28
5	28,27	86,78	26,33
14	55,06	165,00	50,06

trentline quotation
x
y

2022	with cohesion	sigma
cohesion kPa	2	
angel of friction	38,00	

	Tau
0	2
18,00	16,06314128
28,27	24,08934197
55,06	45,016087

Percentage toename schuifsterkte
De te berekenen schuifsterkte in 2000

0,484
16,14088688

2000	with cohesion	sigma
cohesion kPa	2,00968	
angel of friction	0,00	

	Tau
0	2
18,00	2,00968
28,27	24,08934197
55,06	45,016087

percentage afname van de schuifsterkte
De te bereiken schuifsterkte in 2068

22
1,647278689

2068	with cohesion	sigma
cohesion kPa	0	
angel of friction	5,23	

	Tau
0	0
18,00	1,647278689
28,27	2,587423504
55,06	5,038666823

Verschil tussen peik en rest
De te bereiken schuifsterkte in 2030

0,362401311
 16,13001484

2030	with cohesion	sigma
cohesion kPa	1,99	
angel of friction	37,99	

	Tau
0	1,99
18,00	16,04808272
28,27	24,06899992
55,06	44,99211304

De te bereiken schuifsterkte in 2050

16,06840662

2050	with cohesion	sigma
cohesion kPa	1,68	
angel of friction	37,62	

	Tau
0	1,68
18,00	15,55187828
28,27	23,4665555
55,06	44,11253435

De te bereiken schuifsterkte in 2064

15,47939802

2064	with cohesion	sigma
cohesion kPa	1,35	
angel of friction	37,10	

	Tau
0	1,35
18,00	14,96329308
28,27	22,73043308
55,06	42,99155095

De te bereiken schuifsterkte in 2067

15,40691776

2067	with cohesion
cohesion kPa	0,95
angel of friction	36,72

sigma

Tau

0	0,95
18,00	14,37656309
28,27	22,03716326
55,06	42,02036466

De te bereiken schuifsterkte in 2068

15,26195723

2068	with cohesion
cohesion kPa	0
angel of friction	36,31

sigma

Tau

0	0
18,00	13,22715192
28,27	20,77397693
55,06	40,46038803

Load on hanger	normal load	highest shearforce	highest shear load
kg	kPa	N	kPa
0	13,39	37,19	11,28
5	28,27	86,78	26,33
14	55,06	165,00	50,06

trentline quotation
x
y

situatie in 2022	
cohesion (kPa)	3
angel of friction (°)	37,00

sigma (kN/m2)

Tau (kN/m2)

0	3
23,80	20,93458639
28,27	24,30528522
55,06	44,48923963

Percentage toename schuifsterkte
De te berekenen schuifsterkte in 2000

0,154

20,96682566

2000 with cohesion	
cohesion kPa	3,07
angel of friction	36,94

sigma

Tau

0	2
23,80	20,96554135
28,27	24,302973
55,06	44,490686

Percentage afname
De te bereiken schuifsterkte in 2068

1,07

19,59396388

situatie in 2068	
cohesion kPa	0
angel of friction	39,46

sigma (kN/m2)

Tau (kN/m2)

0	0
23,80	19,59396388
28,27	23,27653283
55,06	45,32798498

verschil piek er rest
De te bereiken schuifsterkte in 2030

1,371577471

20,92567833

situatie in 2030		sigma (kN/m ²)	Tau (kN/m ²)
cohesion kPa	2,98		0 2,98
			23,80 20,92109989
angel of friction	37,01		28,27 24,29070983
			55,06 44,48575462

De te bereiken schuifsterkte in 2050 20,69251016

situatie in 2050		sigma (kN/m ²)	Tau (kN/m ²)
cohesion kPa	2,2		0 2,2
			23,80 20,69446084
angel of friction	37,85		28,27 24,16800033
			55,06 44,98592495

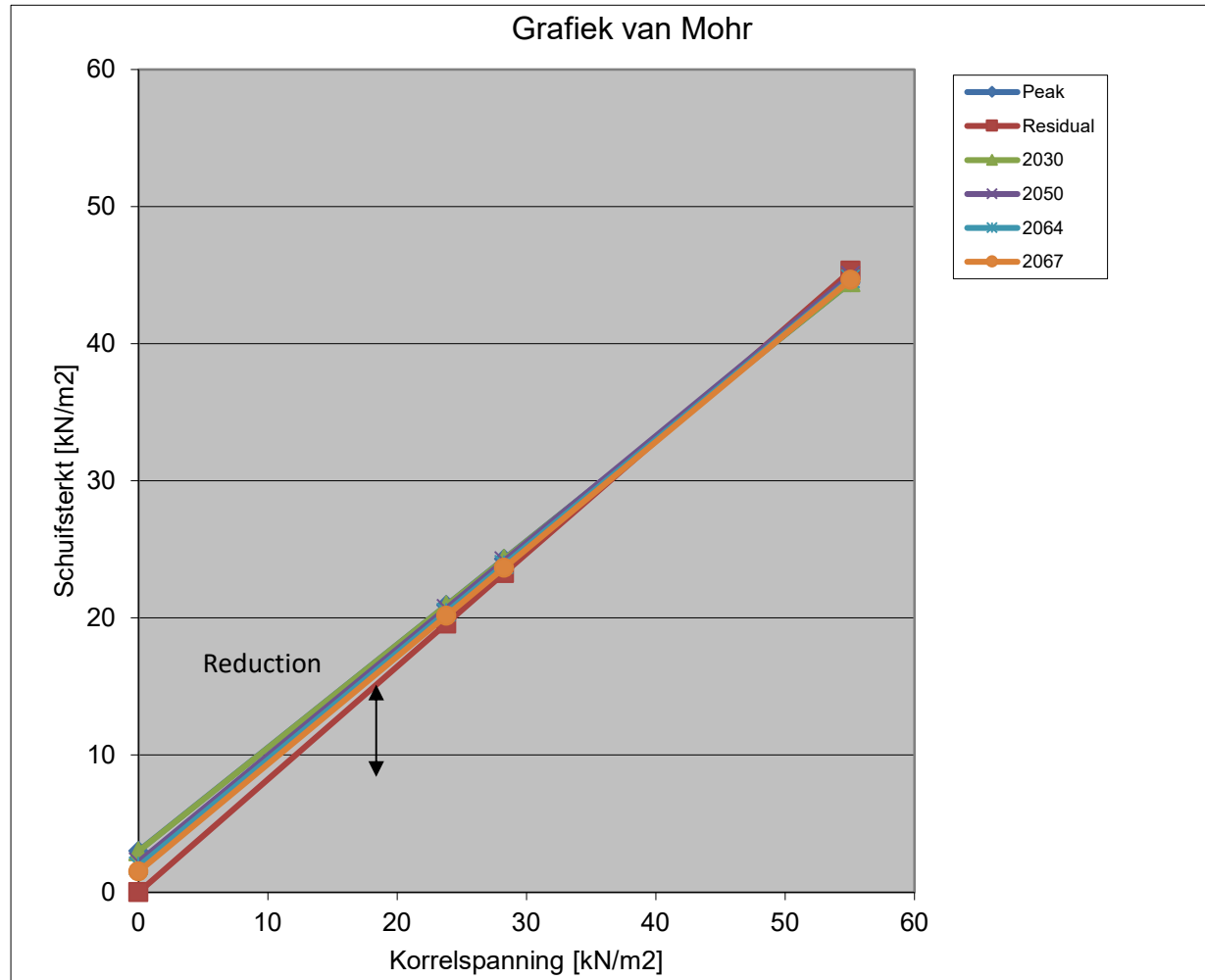
De te bereiken schuifsterkte in 2064 20,41819467

situatie in 2064		sigma (kN/m ²)	Tau (kN/m ²)
cohesion kPa	1,89		0 1,89
			23,80 20,41112414
angel of friction	37,89		28,27 23,88967141
			55,06 44,73760904

De te bereiken schuifsterkte in 2067 20,14387917

situatie in 2067		sigma (kN/m ²)	Tau (kN/m ²)
cohesion kPa	1,5		0 1,5
			23,80 20,16158376
angel of friction	38,10		28,27 23,66651147
			55,06 44,67255471

with cohesion
1
0,9106



Load on hanger	normal load	highest shearforce	highest shear load
kg	kPa	N	kPa
0	13,39	37,19	11,28
5	28,27	86,78	26,33
14	55,06	165,00	50,06

trentline quotation
x
y

situatie in 2022	
cohesion (kPa)	4
angel of friction (°)	29,00

sigma (kN/m²)

Tau (kN/m²)

0	4
31,80	21,62702784
28,27	19,67201774
55,06	34,51919244

percentage toename van de schuifsterkte
De te bereiken schuifsterkte in 2000

0,00286
21,68888114

situatie in 2000	
cohesion (kPa)	4,02
angel of friction (°)	29,05

sigma (kN/m²)

Tau (kN/m²)

0	4,02
31,80	21,68332279
28,27	19,72258287
55,06	34,60309914

Verhouding piek/residuele sterkte
Sterkte in 2068

1,13
19,19370012

situatie in 2068	
cohesion (kPa)	2
angel of friction (°)	28,40

sigma (kN/m²)

Tau (kN/m²)

0	2
31,80	19,19419586
28,27	17,28719107
55,06	31,76979313

Vershil piek en rest
Sterkte in 2030

2,495181016
21,61402571

situatie in 2030		sigma (kN/m2)	Tau (kN/m2)
cohesion (kPa)	3,999		0 3,999
			31,80 21,61877306
angel of friction (°)	28,99		28,27 19,66456759
			55,06 34,50563162

Sterkte in 2050

21,18984493

situatie in 2050		sigma (kN/m2)	Tau (kN/m2)
cohesion (kPa)	3,642		0 3,642
			31,80 21,19654312
angel of friction (°)	28,90		28,27 19,24957229
			55,06 34,0356934

Sterkte in 2064

20,69080873

situatie in 2064		sigma (kN/m2)	Tau (kN/m2)
cohesion (kPa)	3,43		0 3,43
			31,80 20,69599125
angel of friction (°)	28,50		28,27 18,78102365
			55,06 33,32409868

Sterkte in 2067

20,19177253

situatie in 2067		sigma (kN/m2)	Tau (kN/m2)
cohesion (kPa)	3,15		0 3,15
			31,80 20,19386522
angel of friction (°)	28,19		28,27 18,30353357
			55,06 32,65951274

with cohesion

