

Waterschap Groot Salland
T.a.v. mevrouw S. van Mispelaar-Schalkx
Postbus 60
8000 AB ZWOLLE

Datum	Ons kenmerk	Aantal pagina's
14 juli 2015	1220595-000-BGS-0004	32
Contactpersoon	Doorkiesnummer	E-mail
Gerard Kruse	+31(0)88335 7428	gerard.kruse@deltares.nl

Onderwerp
Klei eigenschappen in verband met het project "Ruimte voor de Rivier IJsseldelta"

Geachte mevrouw Van Mispelaar-Schalkx,

Hierbij doen wij u onze bevindingen over aspecten van grond en opbouw van de dijken voor het in hoofde genoemd project toekomen. De bevindingen zijn opgesteld als eventuele toelichting bij een adviesaanvraag aan het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW) over aspecten van grond en opbouw van de dijken voor het in hoofde genoemd project. De bevindingen betreffen constatering en overwegingen ten aanzien van het organische stofgehalte van kleigrond voor dijkbekleding en ten aanzien van de geometrie van de kleibekleding in relatie tot de functie van de kleibekleding in de genoemde dijken.

De overwegingen en bevindingen komen voort uit analyses op basis van gepubliceerde bronnen en van door u ter beschikking gestelde gegevens van grondonderzoek en classificatieproefbepalingen.

Aangaande het organische stofgehalte wordt met name ingegaan op: (i) het functioneren van grond in een kleibekleding, met name ten aanzien van vormvastheid en ontgronding door golfwerking, stroming en overslag en overloop (ii) normen en vereisten aan grond voor kleibekledingen, (iii) kleigrond en beschikbare kleigrond in het gebied, en (iv) invloeden op de waarden die met de classificatieproeven zijn bepaald.

Aangaande de opbouw van de dijk wordt de benodigde dikte van de kleibekleding op het buitentalud van de dijken in verband met respectievelijk de grondmechanische stabiliteit ervan nagegaan onder maatgevende omstandigheden bij vallend buitenwater en voor beheer. Daarvoor wordt ingegaan op met name: (i) doorlatendheid van kleibekledingen, (ii) sterkte-eigenschappen van kleibekledingen, (iii) overwegingen over de mate van ontgronding en (iv) de stabiliteit van de kleibekleding op de dijk onder maatgevende omstandigheden.

In de volgende paragrafen wordt één en ander beknopt behandeld en worden de bevindingen samengevat.

1 Organische stofgehalte van kleibekleding voor dijken

1.1 Organische stof in kleigrond

Vanwege de verschillende effecten van organische stof op eigenschappen van grond wordt hier een samenvatting van de aard van organische stof in grond en van de effecten ervan op kleigrond gegeven.

Verskillende eigenschappen van kleigrond hangen direct of indirect samen met de organische stof erin, en met de vormen waarin het erin voorkomt. Organische stof komt voornamelijk voor als vezels en soortgelijke resten van biota in grond (in publicaties vaak als particulate organic matter aangeduid, POM) en als moleculair verdeelde stoffen, waarbij de moleculen meest zeer groot zijn. De effecten van beide soorten organische stof in kleigrond verschillen en in het volgende wordt kort de achtergrond van de verschillen besproken.

In grond is de moleculair verdeelde organische stof bijna geheel geadsorbeerd aan de minerale en organische vaste stof. Deze organische stofcomponent wordt in verband met landbouw en milieutechniek intensief bestudeerd. De hoeveelheid organische stof die geadsorbeerd wordt hangt nauw samen met het zogenaamde specifiek oppervlak van de vaste stof. (Het specifiek oppervlak van zandgrond is hooguit 20 m² per gram grond en is voor vette kleigrond regelmatig meer dan 100 m² per gram.) In zandgrond zit dan ook weinig moleculair verdeelde vaste stof en in kleigrond veel meer, afhankelijk van de hoeveelheid en de aard van het vast stofoppervlak; dit betreft een deel van de trends in de classificatie van grond in verband met organische stof in NEN (zie Figuur 1.1 in paragraaf 1.3 van deze brief). De gewichtsfractie van moleculair verdeelde organische stof gaat van minder dan 1 % voor zeer zandige klei tot meer dan 3 % voor zeer vette klei. De moleculair verdeelde organische stof beïnvloedt de binding van water (leidt tot verlaging van de bindingsenergie) en opgeloste stoffen aan de vaste stof en daarmee eigenschappen als geroerde sterkte en het waterhoudend vermogen van gronddeeltjes. De vele landbouwkundige onderzoeken naar sterkte van bodemaggregaten van gronddeeltjes in grond in de onverzadigde zone wijzen op hogere sterkte bij een hoger geadsorbeerd organische stofgehalte, hetgeen kan worden toegeschreven aan de toename van onderlinge binding tussen gronddeeltjes door de hecht geadsorbeerde organische stofmoleculen.

De resten van biota (zoals plantenvezels) zijn vaak een belangrijk deel van het organische stofgehalte in kleigrond in Nederland die niet langdurig boven grondwater heeft gelegen. Deze organische stof heeft een betrekkelijk lage specifieke bulk en vaste stof massa dichtheid (1400 - 1550 kg/m³), heeft een zeer groot specifiek oppervlak (> 200 m² per gram) en heeft daarmee invloed op veel grondeigenschappen. De hoeveelheid van deze organische stof in kleigrond die niet lang boven grondwaterpeil heeft gelegen, heeft voor veel fijnkorrelige afzettingen een correlatie met de fijnste minerale fractie van sedimenten (zie ook Figuur 1.1) omdat dit lichte organische materiaal in rustig water wordt afgezet net als de fijnste minerale deeltjes. Het gehalte aan deze plantenresten en dergelijke is ook relatief hoog in doorwortelde delen van grond, met name in de zodelaag van graslanden en het direct daaronder gelegen deel van de bodem. Voor de bodemlaag met veel wortels is er geen relatie tussen samenstelling van de grond en het organische stofgehalte.

Kleibekledingen van dijken in Nederland van tenminste enige jaren oud hebben beneden de wortellaag een organische stofgehalte dat meestal lager is dan 3 % [M/M] (Grondmechanica Delft 1988) en niet hoger dan 5 % naar de bevindingen in dat rapport. Deze percentages betreffen een organische stofbepaling die berust op het meten van gewichtsverlies van de vast

stof van een monster door omzetting in CO₂ (kooldioxide) van het merendeel van de organische stof bij een behandeling met H₂O₂ (waterstofperoxide). De in het rapport genoemde hogere percentages die werden bepaald voor kleibekledingen van sommige dijken langs de Waddenzee en Zeeuwse wateren zijn, naar het zich laat aanzien, het gevolg van het oplossen van zout uit de grond, wat bijdraagt aan het met de proef bepaalde percentage gewichtsverlies.

Er zijn enige waarnemingen over de tijdsperiode waarin organisch materiaal in dijken wordt omgezet, dan wel verdwijnt. In de bovenste decimeters van een kleibekleding, beneden de zodelaag, bereikt het organisch materiaalgehalte binnen enige jaren een evenwichtswaarde van zo'n 3 % tot 4 %. De organische stof van een graszode begraven op ongeveer 0.8 m diepte bleek in een periode van 2 decennia voor een groot deel te zijn omgezet. Waarnemingen aan doorgraven dijken wijzen erop dat in een periode van 6 decennia wortels van planten voor een groot deel zijn omgezet, verdwenen, in het boven grondwater gelegen deel van de kern van die dijken.

Bij het vaststellen van de waarde voor het organische stofgehalte is geen differentiatie toegepast voor de toename van het organische stofgehalte met een toename van het specifiek oppervlak en daarmee met een toename van de fijne fractie van kleigrond. Dit effect is niet nader beschouwd bij het vaststellen van keuringseisen voor klei vanwege de vele, complexe, invloeden op het functioneren van kleigrond als bekleding van dijken en vanwege de invloeden van bepalingwijzen op het vastgestelde gehalte.

1.2 Organische stof en functionele eigenschappen kleigrond voor dijkbekleding

1.2.1 Stevigheid

De moleculair verdeelde organische stof doet de stevigheid van binding tussen fijne gronddeeltjes zeer sterk toenemen in grond in de onverzadigde zone (meest boven het grondwater gelegen). Bodemaggregaten in de onverzadigde zone hebben q_u -waarden van vele 10-tallen tot meer dan 100 kPa (q_u is unconfined compressive strength). In geroerde toestand, waarin de sterkte van de binding tussen individuele gronddeeltjes wordt bepaald door de interactie met watermoleculen en opgeloste stoffen, neemt de binding tussen deeltjes juist enigszins af met toename van de moleculair verdeelde organische stoffen. De q_u van niet gerijpte of sterk gecompacteerd kleigrond met veel organisch materiaal bedraagt mede daardoor slechts enige kPa's (door de vingers te persen).

De plantenvezels en andere resten van biota vervormen gemakkelijk in vergelijking met een skelet van minerale gronddelen. De stijfheid van kleigrond neemt dan ook sterk af met toenemend organische stofgehalte. De plantenresten hebben een geringe trek- en buigsterkte en mede door het volume dat ze innemen in de grond is de sterkte van niet gerijpte of niet sterk gecompacteerd kleigrond met veel organisch materiaal daardoor slechts enige kPa's.

Door toename van de stevigheid van bindingen tussen gronddeeltjes neemt in kleigrond de sterkte na intensief roeren binnen 3 weken met 3 tot 5 kPa toe (ageing). De C_u sterkte van kleigrond in de onverzadigde zone is echter door ontwatering en daarmee gepaard gaande afname van de porositeit van bodemaggregaten al relatief hoog. De plantenvezels met moleculair verdeelde organische stof in kleigrond hebben na rijping een geringe invloed op de stevigheid. De q_u -waarden van gerijpte kleigrond met 7 % organische stofgehalte bedragen vele 10-tallen tot meer dan 100 kPa (duim kan er met weinig dan wel grote moeite ingedrukt worden), zoals uit de ervaringen in onder andere het IJsselmeerpoldergebied blijkt en uit ander

correlatie-onderzoek (onder andere Wroth en Wood 1978). Deze stevigheid wordt in de bovenste decimeters binnen één jaar bereikt en is binnen 3 jaar bereikt voor tenminste de bovenste meter in omstandigheden als in Nederland. In de kern van de dijk is de ongedraineerde schuifsterkte (f_{undr}) meer dan 10 kPa voor kleigrond met 7 % organische stofgehalte bij een watergehalte overeenkomend met een consistentie-index hoger dan 0.6 (Wroth en Wood 1978).

De plantenvezels in een actieve wortellaag van kleigrond hebben een relatief grotere treksterkte, waardoor de wortellaag van een redelijk gesloten graszode een treksterkte van enige kN/m' heeft in combinatie met een grote flexibiliteit.

Samenvattend kan worden gesteld dat de stevigheid van kleigrond wordt beïnvloed door de organische stof en direct na aanbrengen lager zal zijn bij een hoger organische stofgehalte. De stevigheid van de grond in de kleibekleding is ook bij een organische stofgehalte van 7 % bij aanbrengen ruim voldoende voor de stabiliteit en erosiebestendigheid als de klei voldoende ontwaterd, gerijpt, is en het watergehalte in overeenstemming is met een consistentie-index hoger dan 0.6 (voor kleibekleding een consistentie-index hoger dan 0.75, TAW 1996).

1.2.2 Volume en volumieke massa

De organische stof gronddeeltjes, resten van biota, nemen volume in de grond in. Dat volume kan veranderen door omzetting van die deeltjes. Het organische stofgehalte van kleigrond na aanbrengen in een kleibekleding verandert na verloop van jaren naar een evenwichtgehalte van enige procenten. Het gehalte aan organische stof zal afnemen voor klei met meer organisch materiaal en dat betreft voornamelijk afname van de massa plantenvezels in de grond. Het volume plantenresten in de grond neemt daarmee af. Op basis van bulk en vaste stof massadichtheid van organische stof in grond en van minerale gronddelen (gevalideerd door metingen van grond van kleibekledingen) kan een overzicht van de invloed worden gegeven. Bijvoorbeeld, van grond met aanvankelijk 6 % [M/M] organisch materiaal en een droge volumieke massa van 1300 kg/m^3 neemt het volume van het vaste stofskelet af met ongeveer 9 %. Het effect op de kleibekleding zou een toename van de volumieke massa tot 1410 kg/m^3 inhouden en de dikte van de kleibekleding zou met 6 % afnemen. Echter, na aanbrengen en verdichten van kleigrond verandert de volumieke massa van de grond ook door de vorming van bodemstructuur als gevolg van onder meer de voortdurende vervormingen door krimpen en zwellen en vergraven. Dat effect van de vorming van bodemstructuur hangt af van de omgevingsomstandigheden (diepteligging, grondwater, vegetatie) en in het algemeen neemt de volumieke massa daardoor enigszins toe na aanbrengen, hetgeen extra klink veroorzaakt naast het effect van de afname van organische stofgehalte.

De droge specifieke bulk massa van kleigrond van kleibekledingen in Nederland bedraagt ongeveer $1200 - 1600 \text{ kg/m}^3$. De relatieve verandering van de droge specifieke bulk massa van een kleibekleding bedraagt over de seizoenen 10 - 15 %, overeenkomend met een volumeverandering van de kleibekledingslaag tot eveneens ongeveer 15 %. Deze volumeverandering is in alle 3 ruimtelijke dimensies en leidt tot een dikteverandering van bijna 5 % over de seizoenen.

Samenvattend kan worden gesteld dat een hoger organische stofgehalte bij aanbrengen tot meer klink van een kleibekleding leidt. De toename van de klink bedraagt in veel gevallen enig procenten en de klink bedraagt bij grond met bij aanbrengen 6 % organisch materiaal ongeveer 6 %. De volumeverandering door een eventuele afname van organische stofgehalte in de kleibekleding heeft een relatief beperkte omvang ten opzichte van de compactie van de plantenvezels en de seizoensmatige volumeveranderingen van kleibekledingen.

1.2.3 Doorlatendheid

De specifieke doorlatendheid van kleigrond in een kleibekleding wordt bepaald door de bodemstructuur in de kleibekleding. Het organische stofgehalte van een kleibekleding tendeert na aanleg in samenhang met de ontwikkeling van de bodemstructuur naar een waarde die door de omgevingsinvloeden (diepteligging, grondwater, vegetatie) wordt bepaald. Het organische stofgehalte heeft op den duur daarom geen invloed op de doorlatendheid van de kleibekleding. Direct na aanleg heeft het organische stofgehalte van kleigrond evenmin een effectieve invloed op de specifieke doorlatendheid, tenzij het materiaal door de vezels, veen, wordt gedomineerd.

Samenvattend kan worden gesteld dat de infiltratiecapaciteit van de kleibekleding niet effectief door het organische stofgehalte wordt beïnvloed.

1.2.4 Erosiebestendigheid

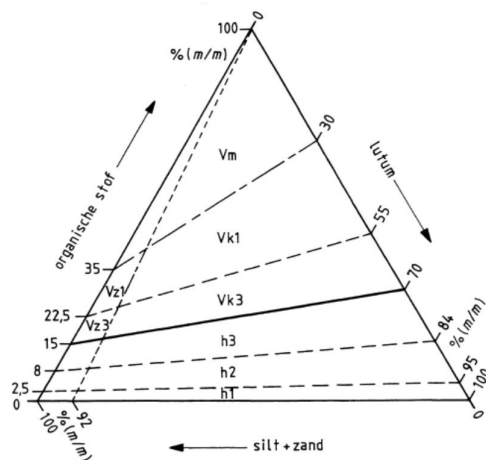
Erosiebestendigheid van kleigrond in dijkbekleding hangt grotendeels samen met de hiervoor beschreven karakteristieken, te weten stevigheid van bodemaggregaten en de bodemstructuur (Deltares 2010), en wordt niet significant en hooguit indirect door het organische stofgehalte beïnvloed.

1.3 Classificatie met betrekking tot organische stofgehalte

1.3.1 Indelingen

Ten aanzien van de classificatie van kleigrond in verband met het organische stofgehalte ervan is er de NEN 5104 indeling (zie Figuur 1.1) en is er de eis in het TAW Technisch rapport "Eisen klei voor dijken" (TAW 1996) dat het gehalte organisch materiaal lager dan 5 % moet zijn voor gebruik in kleibekleding van dijken in Nederland.

Figuur 1.1 Classificatie van grond met betrekking tot gehalte organische stof volgens NEN 5104. De begrenzing van de verschillende klassen gaat van een lager organische stof gehalte voor zandige grond naar een hogere waarde voor kleigrond en het verschil daartussen neemt toe met toename van het lutumgehalte. De trends zijn deels het gevolg van de hoeveelheid molecuulair verdeelde organische stof die met het specifiek oppervlak samenhangt en deels het gevolg van de toename van deeltjes organisch materiaal die samen met de lutumfractie worden afgezet in rustiger water. (NB h1 is en zwak en h2 is matig humeus).



Het organische stofgehalte genoemd in de eis, 5 %, is iets hoger dan de grens tussen zwak en matig humeus (zie Figuur 1.2). De grens is een geringe aanpassing van de eis van minder dan 4 % [M/M] organisch materiaal in daarvoor veel gebruikte eisen aan klei voor dijken. Het onderzoek dat werd verricht voor het opstellen van de vigerende eisen aan klei voor dijken stelt echter voor om in verband met het functioneren van kleigrond voor dijken de grens bij een organische stofgehalte van 8 % te leggen (Grondmechanica Delft 1988) en wel vanwege mogelijke beïnvloeding van erosieprocessen door de lokale heterogeniteit door de plantenresten en vanwege volumeafname.

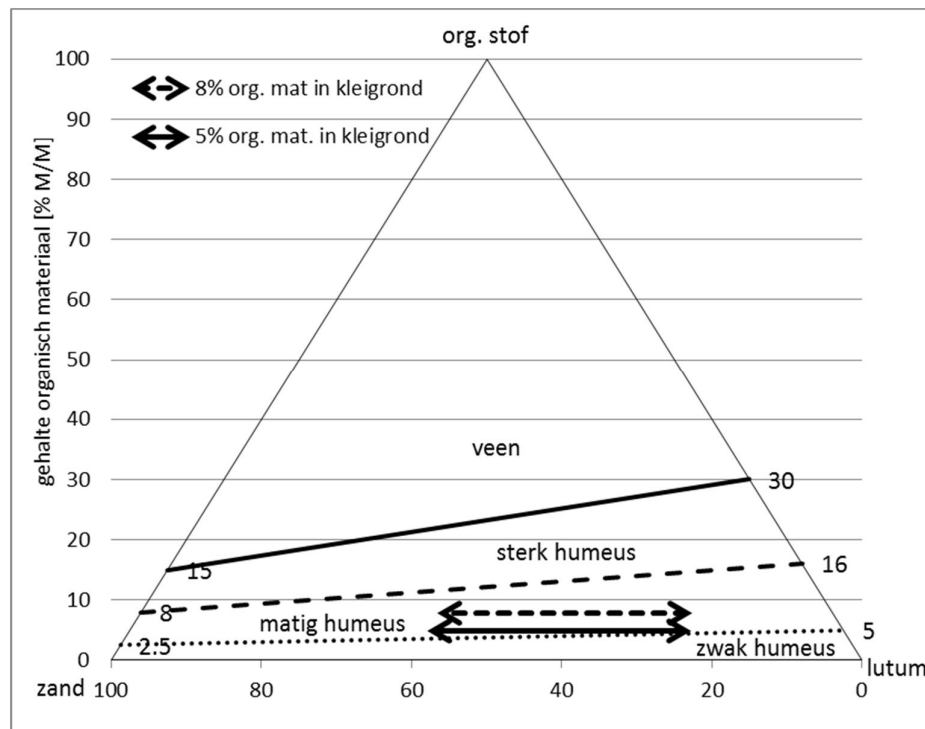
In het onderzoek dat wordt samengevat in Deltares (1988) wordt gerapporteerd dat het organische stofgehalte van kleigrond die langere tijd als bekleding op een dijk heeft gelegen meest lager is dan 3 % en op niet hoger dan 5 % wordt bepaald (zie paragraaf 1.1 van deze brief). In het rapport wordt gesteld dat het organische stofgehalte tot 8 % [M/M] kan bedragen voor kleigrond voor een bekledingslaag. In TAW (1996) wordt de eis 5 % gesteld “met het oog op beperking van de krimp”. Er worden geen andere redenen genoemd dan beperking van de krimp voor de eis van 5 % organisch materiaalgehalte in TAW (1996) en die worden evenmin eenduidig vastgesteld in de genoemde achtergrondrapportage voor het technisch rapport (Grondmechanica Delft 1988), dat 8 % noemt. In paragraaf 1.2.2 van deze brief is op de invloed van het organische stofgehalte op volumeverandering ingegaan. Aangezien de krimp van ontgraven kleigrond met een eventueel hoger organische stofgehalte door verandering van watergehalte wordt bepaald, beperkt de eis voor de consistentie-index, I_c , van 0.6 voor de kern van de dijk en respectievelijk 0.75 voor de kleibekleding de mogelijke krimp, ongeacht het organische stofgehalte.

1.3.2 Classificatieproeven organisch materiaal

Mede vanwege de vele definities en omschrijvingen van wat organisch materiaal is, zijn er veel bepalingswijzen voor het organische stofgehalte van grond. De bepalingswijzen betreffen meting van de hoeveelheid koolwaterstofverbindingen, of veel in grond aangetroffen soorten daarvan, tot meting van het gewichtsverlies na verhitting tot enige honderden graden of na behandeling in een H_2O_2 , waterstofperoxide oplossing en na afgieten en verdampen van de vloeistof waaruit de resterende gronddeeltjes zijn uitgezakt. Bij beide laatste methoden verdwijnt er meer dan slechts organisch materiaal uit het grondmonster. Voor het bepalen van het organische stofgehalte voor klei voor dijken is de voor grondwerken gangbare waterstofperoxidemethode gebruikelijk en wordt deze in “Eisen klei voor dijken” daarvoor genoemd.

Het gemeten gewichtsverlies bij waterstofperoxidebehandeling, met afgieten en droogdampen, leidt tot een hogere schatting van organische stofgehalte dan de in de bodemchemie gebruikte bepalingswijzen. Deze afwijking kan tot meer dan 1 % bedragen en betreft onder andere oxidatie tot oplosbare en of vluchtige stoffen en zwevende vaste stof in het water dat wordt afgegoten bij de bepaling.

Figuur 1.2 NEN 5104 diagram voor classificatie in verband met organisch materiaalgehalte; de bovengrenzen van de klassen zijn weergegeven, de bovengrens van sterk humeus is de ondergrens van veen. In het driehoeksdiagram zijn de 5 % en 8% waarden aangegeven voor samenstellingen van kleigrond in Nederland met zandgehalte lager dan 40 %. De waarde van 5% voor het organische stofgehalte ligt bij de grens tussen matig en zwak humeus voor kleigrond met een zandgehalte van minder dan 40 %, hetgeen met de siltfractie samen minder dan ongeveer 55 % wordt voor Nederlandse grond.



1.4 Samenvatting bevindingen over organische stofgehalte

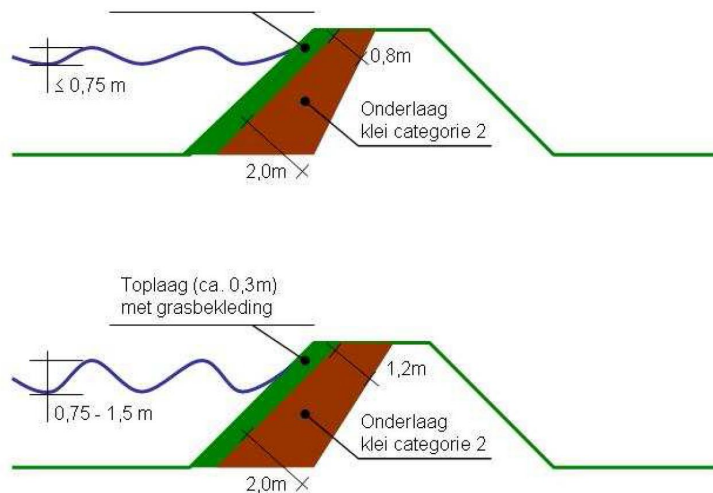
Er zijn, behalve dat er meer klink van een kleibekledingslaag kan optreden, geen overwegingen om een algemene eis van maximaal 5 % [M/M] te stellen aan het organisch materiaalgehalte van de kleigrond bij aanbrengen. De waarde van 5% [M/M] begrenst niet een categorie in functioneel gedrag van de grond. De waarde geeft wel een goede indicatie voor het gehalte waarboven op extra klink moet worden geanticipeerd bij het ontwerpen van kleibekledingen. Klei met een organische stofgehalte bij aanleg van 6 % functioneert op dezelfde wijze voor een kleibekleding wat betreft erosie, stabiliteit en bodemvorming als klei met een lager organische stofgehalte. Voor de volledigheid wordt opgemerkt dat kleigrond met een hoger organisch materiaalgehalte vaak ook een relatief hoog watergehalte heeft in natuurlijke voorkomens. De relatief geringe stevigheid van te natte kleigrond kan door drogen en dergelijke voldoende gemaakt worden voor toepassing in dijken.

Beschikbare waarnemingen wijzen erop dat verwacht kan worden dat de klink als gevolg van de nagenoeg algehele degradatie van organisch materiaal in klei beneden ongeveer 1.5 m beneden maaiveld tenminste 3 tot 7 decennia vergt. De klei in de kleibekleding zal binnen 2 decennia grotendeels zijn omgezet en grotendeels zijn verdwenen. Opgemerkt kan worden dat de omzetting van organische stof in het algemeen exponentieel afneemt in de tijd.

2 Stabiliteit buitentalud bij vallend buitenwater

In het Addendum I ten behoeve van het ontwerpen bij de Leidraad Rivieren (ENW 2008) wordt in de paragraaf 3.3 "Ontwerpmethode voor grasbekleding op buitentalud" een met de hoogte afnemend, wigvormig, dikteverloop van kleibekleding op het buitentalud van dijken in het rivierengebied als richtlijn en als ontwerpregel gegeven (zie Figuur 2.1). De motivering daarvoor is drieërlei en wel dat (i) de lagere delen op het talud langer aan de belasting van bewegend water blootstaan dan hoger op het talud (ii) dat infiltratie in dat deel van het talud dat het langst onder water staat erdoor wordt gehinderd en dat (iii) de stabiliteit bij vallend buitenwater water hoger zou zijn. Er wordt in het addendum gesteld dat "Categorie 2" klei het best voldoet omdat zowel een grasmat zich er goed op kan ontwikkelen, als dat de doorlatendheid ervan beperkter zou zijn dan van "Categorie 3" klei en er een betere stabiliteit van het talud zou bestaan doordat de kans op afschuiven van een toplaag erdoor beperkt zou worden.

Figuur 2.1 In verband met vragen ten aanzien van de Leidraad Rivieren is een addendum uitgebracht waarin een schets voor het ontwerp van kleibekledingslaag op een buitentalud is opgenomen (ENW 2008)



In verschillende TAW/ENW Leidraden en -Technische Rapporten wordt op aspecten van het ontwerpen van dergelijke bekledingen ingegaan. In genoemd addendum en in het begeleidend schrijven bij dat addendum wordt gesteld dat de richtlijnen die hieruit zijn voorkomen onvoldoende zijn toegesneden op het ontwerpen op erosiebestendigheid van een gras-/kleibekleding op het buitentalud van een rivierdijk. Aangezien de Leidraad Rivieren geen rekenregels voor het ontwerpen van een grasbekleding op het buitentalud geeft, is genoemd addendum daarom bij de Leidraad Rivieren gevoegd. In het begeleidend schrijven bij het addendum dd. 10 december 2008, en in het addendum staat dat het Addendum I wordt gebruikt door Rijkswaterstaat om dijkontwerpen te beoordelen in het kader van het programma Ruimte voor de Rivier en het Hoogwaterbeschermingsprogramma. Bij die beoordeling is het belangrijk dat, als bij het ingediende dijkontwerp wordt afgeweken van het Addendum I, dit ontwerp kan worden vergeleken met een dijkontwerp dat strikt volgens dit Addendum I is opgesteld. Wanneer bij het ontwerp van een rivierdijk wordt afgeweken van het Addendum I,

stelt de brief, dan dienen de afwijkingen ten opzichte van een ontwerp volgens het Addendum I derhalve te worden gekwantificeerd en gemotiveerd.

Omdat de richtlijnen onvoldoende zijn toegesneden op het ontwerpen op erosiebestendigheid van een gras-/kleibekleding op het buitentalud van een rivierdijk stelt het addendum in 2008: "Om deze reden zal Deltares op korte termijn starten met een onderzoek dat moet leiden tot een op rivierdijken toegesneden ontwerpmethod. In afwachting van resultaten van dit onderzoek wordt in dit addendum een ontwerpmethod gegeven. Deze ontwerpmethod wordt geacht voor dit moment voldoende robuust te zijn.". Het bedoelde onderzoek is inmiddels afgerond en gerapporteerd (Deltares 2010). Onder andere zijn aspecten van dat onderzoek voorzover van belang voor grasbekleding aan de orde geweest in het ENW Techniek overleg op 12 november 2010. Een van de belangrijke aspecten voor het onderzoek waarover wordt gerapporteerd is de dikte van de kleibekleding in verband met de stabiliteit ervan. In het volgende wordt ingegaan op de invloeden op de stabiliteit van een kleikleding op het buitentalud bij vallend buitenwater en specifiek op de doorlatendheid van de kleibekleding en de sterkte ervan.

In het onderzoek (Deltares 2010) wordt geconcludeerd dat de ontgroning bij golfbelasting tot $H_s = 0.75$ m niet tot significante schade leidt en dat met golven tot 1.5 m de standtijd van een kleibekleding met een goede graszode ook voldoende is voor een stormduur van 12 uur. De beperkte schade (0.4 m diep) die zou kunnen ontstaan door dergelijke golven treedt alleen hoger in het talud van de dijken op, hetgeen afhankelijk is van de geometrie van de bodem van het buitenwater.

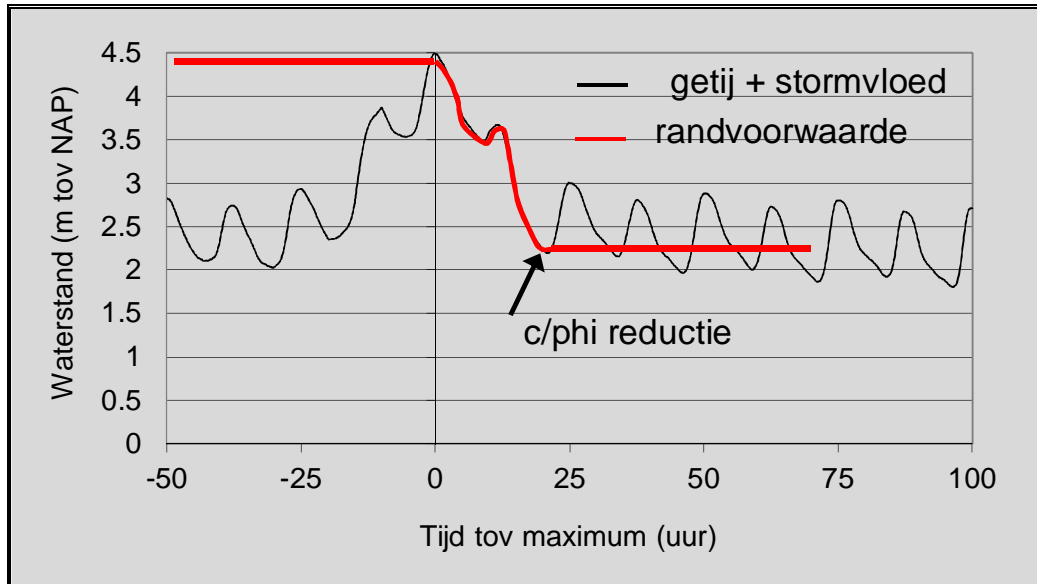
In genoemd rapport worden resultaten van berekeningen gepresenteerd waarvoor genoemde doorlatendheden en sterkte-eigenschappen worden gebruikt zoals die voor dijkbekledingen zijn bepaald, zodanig dat de effecten van bodemstructuur en dergelijke daarin zijn begrepen. De berekeningen zijn uitgevoerd met PLAXFLOW en PLAXIS (thans beide geïntegreerd in PLAXIS) voor kleibekledingen van 0.8 m respectievelijk 1.2 m dikte op een 1:2.5 talud op een aanvankelijk geheel verzadigde dijk met vallend buitenwater als in Figuur 2.2.

De effecten van de bodemstructuur van kleibekledingen betreffen met name de aan te houden waarden voor parameters voor doorlatendheid en sterkte die hierna kort worden toegelicht (zie ook de informatie in paragraaf 1.2 over invloed van organische stofgehalte van deze brief). In de praktijk heeft een kleibekleding op een dijk een infiltratiecapaciteit die varieert van 10^{-6} m/s (met slechts geringe bodemstructuur) tot soms meer dan 3×10^{-5} m/s (met volledig ontwikkelde bodemstructuur). Voor uit de dijk stromend water bij vallend buitenwater gelden diezelfde snelheden. Deze waarden voor infiltratiecapaciteit van kleibekledingen van dijken zijn bepaald met metingen die een groter oppervlak dan het representatieve elementary volume betreffen ($0.6 \times 1.2 \text{ m}^2$), overloopprouven over dijkstaluds, en met prouven met in de taluds gedrukte buizen (diameter 0.4 m) en komen overeen met waarden in gepubliceerde bodemkundige bronnen (onder ander Scheffer, Schachtschabel 1998). Deze gemeten waarden leiden tot een meer doorlatende bekleding dan vaak bij het ontwerpen werd toegepast, en waarin het gehele stijghoogteverschil werd geacht te bestaan over de dikte van een nagenoeg ondoorlatende kleilaag. De waarden voor de sterkteparameters voor de gebruikelijke berekeningen (Mohr-Coulomb model) van kleibekledingen die in de onverzadigde zone zijn gelegen zijn in verschillende onderzoeken bepaald op monsters met representatieve afmetingen voor de bodemstructuur (triaxiaalprouven op monsters met diameter 0.4 m) alswel op de courante monsters met een diameter van ongeveer 60 mm. De sterkte van individuele bodemaggregaten is hoog gebleken (q_u – waarde van 10 tot veel meer dan 100 kPa, onder andere Grondmechanica Delft 1988). Naar de internationaal gangbare veldclassificaties voor de sterkte van de grond van kleibekledingen is de sterkte, uitgedrukt als q_u , 25 kPa (met vingers vervormbaar) tot meer dan 100 kPa (duim kan er nog ingedrukt worden). Voor de

stabiliteit van de bekledingslaag hebben deze waarden slechts indirecte invloed. Op basis van genoemde proeven kunnen daarom voor kleibekleding met bodemstructuur voor de sterkte de waarden van 5 kPa voor cohesie en 25° voor de effectieve hoek van inwendige wrijving worden aangehouden (vergelijk onder andere met vaste zwak zandige klei in NEN 9997 tabel 2b), waarbij het effect van de wrijvingshoek gering is door de zeer geringe verticale belasting. Deze waarden betreffen behoudende schattingen van de sterkte van kleibekledingen.

Uit de PlaxFlow en PLAXIS berekeningen volgt dat een kleilaag met een dikte van 1.2 m ruim voldoende stabiliteit heeft ($F_s = 1.36$) om de dijk de genoemde belasting te laten doorstaan zonder stabiliteitsverlies. Dat geldt ook als de kleilaag geheel gerijpt is en een dikte van 0.8 m heeft. Voor een net aangelegde kleilaag (1^{ste} jaar) met een nog onvoldoende ontwikkelde bodemstructuur heeft de veiligheidsfactor voor een kleibekleding van 0.8 m dikte een waarde van bijna 1. In bijlage 1 bij deze brief is het hoofdstuk uit het rapport over de bepaling van de stabiliteit van een 1.2 m dikke kleibekledingslaag opgenomen. De berekeningsresultaten bevestigen de aanname dat de druk van het water in de dijk geleidelijk over de gehele dikte van de kleibekleding en de buitenkant van de kern afneemt. Er ontstaat geen groot verschil in druk over de bekleding en de kern aan de buitenwaterkant heeft geen hoge poriewaterdruk bij vallend buitenwater. De aannamen en bepalingswijze die hebben geleid tot de geometrie van de wigvormige kleibekleding op het buitentalud van dijken in het riviereengebied beschreven in paragraaf 3.3 van genoemd Addendum1, leiden voor een maximaal maatgevende afname van buitenwaterpeil tot een zeer dikke kleilaag aan de teen. De in Deltares (2010) gepresenteerde bevindingen wijzen erop dat ook een 1.2 m dikke kleibekleding tot ruim voldoende stabiliteit leidt. Deze ruim voldoende stabiliteit is met name het gevolg van de doorlatendheidopbouw van de kleibekleding op de dijk waardoor er geen grote drukval bestaat in en over een kleibekleding met bodemstructuur op een dijk bij vallend buitenwater.

Het talud in de berekeningen is aanmerkelijk steiler (1 : 2.5) dan voorzien voor de Reevediep dijken (1 : 4 en flauwer). De maatgevende daling voor het Reevediep bedraagt lokaal 5 m in 24 uur in plaats van de in de berekening gebruikte 2.2 m. Het volgende wordt opgemerkt in verband met de relevantie van de hiervoor genoemde berekeningen voor de Reevediep dijken. Door de veel geringere taludhelling van de Reevediepdijken (1:4 versus 1:2.5) is de belasting die tot afschuiven kan leiden geringer en de weerstand tegen afschuiven veel groter voor de Reevediep dijken dan voor het in de genoemde berekeningen gebruikte 1:2.5 dijktaalud. Het niet ontstaan van een grote drukval over en in de kleibekleding draagt in hoge mate bij aan de stabiliteit. Het is daarom de verwachting dat de stabiliteit van de Reevediepdijken bij de voorziene buitenwaterstandsverlaging voldoende is.



Figuur 2.2 Buitenwaterstandverlooptlijn en modelrandvoorwaarde zoals gebruikt voor berekening van de stabiliteit van kleibekledingslagen. Aangegeven is de toestand waarvoor de stabiliteit met PLAXIS is bepaald met c/ϕ reductie.

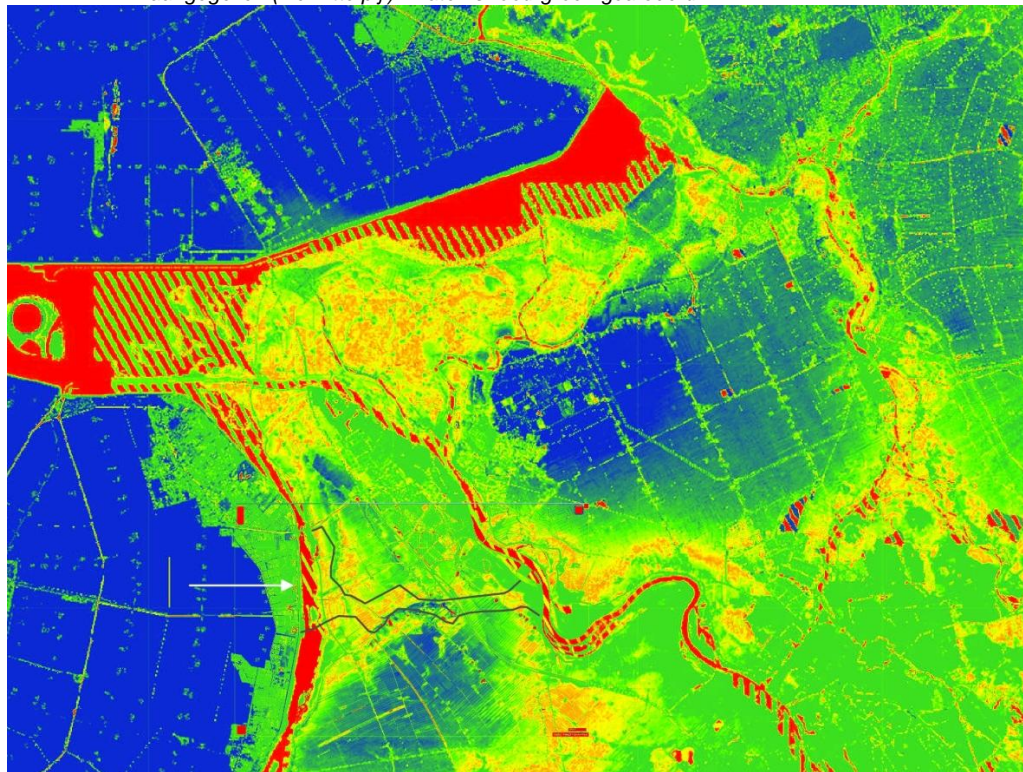
3 Kleigrond in het projectgebied

3.1 Ligging van het gebied

In het project “Ruimte voor de Rivier IJsseldelta” komt klei beschikbaar. De ondergrond in het gebied is opgebouwd uit verschillende zandpakketten waarop in grotere delen van het gebied een veenlaag met een dikte van enige decimeters tot enige meters is gelegen. Aan het oppervlak van bijna het gehele gebied ligt een kleilaag van decimeters tot meer dan 1.5 m dikte.

Het projectgebied is gelegen ten zuiden van eigenlijke delta van de IJssel (zie Figuur 3.1) die zich na de 11^{de} eeuw begon te vormen (onder andere Ente, 1971. Geologie Mijnbouw 50, pp. 373-382). In het westelijke deel zijn vroegere strandruggen van de Zuiderzee te herkennen die de kust van een veengebied vormden. Het veengebied is regelmatig overstromd geraakt en er is klei op het veen afgezet. Het westelijke deel van het projectgebied volgt ongeveer een vroegere getijdegeul die het bestaande veenlandschap binnendrong. Direct ten zuiden van het projectgebied ligt een bedijking van het veengebied die rond het begin van de 14^{de} eeuw is aangelegd.

Figuur 3.1 *Overzicht van de IJsseldelta (AHN, rood en geel is hoger gelegen en groen en blauw laag). De begrenzing van het project is onderaan in de figuur links van het midden met donkere lijnen aangegeven (zie witte pijl). Water is rood-groen gearceerd.*



Door aanvoer van klei vanuit de rivier en vanuit de Zuiderzee zijn door met name daling van het maaiveld van het veengebied en door de in korte tijd sterk toegenomen invloed van de rivier de IJssel, kleilagen op het veen afgezet in het projectgebied. Kleilagen komen tevens voor als onderdeel van de direct bij de stroomgeul van de rivier behorende afzettingen en als onderdeel van de afzettingen van de voormalige getijdegeul in het westelijke en middendeel van het projectgebied.

3.2 Organische stofgehalte klei in het projectgebied

Er zijn in totaal in 4 rapportages beschikbaar met resultaten van in totaal bijna 390 classificatieproeven uitgevoerd op monsters van kleigrond uit het projectgebied. Die rapportages zijn:

- Tauw d.d. 18 augustus 2010: 88 bepalingen in Geotechnisch onderzoek bij rapport R001-4679632WDO-cmn-V01-NL
- Boskalis d.d. 22 april 2014: 60 bepalingen in Laboratoriumonderzoek
- Tauw d.d. 27 september 2013: 216 bepalingen in Aanvullend fysisch-chemisch bodemonderzoek te Kampen
- Boskalis Environmental d.d. 18 februari 2015: 18 bepalingen in Laboratoriumonderzoek.

In genoemde rapportages zijn ook andere onderzoeken van grondeigenschappen en grondopbouw opgenomen.

De gegevens over organische stofgehalte in de rapportages betreffen monsters over een diepteinterval van 0.5 m of meer. De voor de klei bepaalde organische stofgehalten zijn in de regel ongeveer 3 – 7 %. Het is niet in detail na te gaan of er systematische verschillen in samenstelling van de grond met betrekking tot organische stofgehalte bestaan voor het gebied. Op grond van algemene overwegingen is het aannemelijk te veronderstellen dat in de omgeving van de rivier de IJssel en van het Randmeer dikkere kleilagen aanwezig zijn met zwak en matig humeuze klei. In het deel van het Reevediep daartussen is het aannemelijk dat er meer sterk humeuze klei voorkomt op de veenlaag.

4 Bevindingen

Er zijn behalve dat er meer klink kan optreden van een kleibekledingslaag, geen overwegingen om een algemene eis van maximaal 5 % [M/M] te stellen aan het organisch materiaalgehalte van de kleigrond bij aanbrengen. De waarde van 5% [M/M] begrenst niet een categorie in functioneel gedrag van de grond. De waarde geeft wel een goede indicatie voor het gehalte waarboven op extra klink moet worden geanticipeerd bij het ontwerpen van kleibekledingen. Het is daarom aan te bevelen een overhoogte aan te houden voor kleibekledingen als de grond bij aanbrengen een organische stofgehalte van meer dan 5 % heeft. Een overhoogte van 6 % van de dikte van de kleibekleding compenseert het dikteverlies door afname van een aanvankelijk organische stofgehalte van 6 % naar een te verwachten evenwichts organische stofgehalte van 3 %. Voor klei in de kern gelegen boven grondwaterniveau gelden dezelfde overwegingen. Verwacht kan worden dat de klink als gevolg van de omzetting van organisch materiaal in klei beneden ongeveer 1.5 m beneden maaiveld tenminste 3 tot 7 decennia vergt. De organische stof in de kleibekleding zal binnen 2 tot 3 decennia grotendeels zijn omgezet en grotendeels zijn verdwenen.

Datum
14 juli 2015

Ons kenmerk
1220595-000-BGS-0004

Pagina
14/32

Er komt in het gebied een aanmerkelijk volume kleigrond met een organische stofgehalte van minder dan 6 % voor. Klei met een organische stofgehalte bij aanleg van 6 % functioneert op dezelfde wijze voor een kleibekleding wat betreft erosie, stabiliteit en bodemvorming als klei met een lager organische stofgehalte.

De stabiliteit van een over de gehele hoogte 1.2 m dikke kleibekleding met een taludhelling van 1 : 2.5 en waarin zich de gebruikelijke bodemstructuur voor zulke kleilagen heeft ontwikkeld, is ruim voldoende voor een buitenwaterstandsval van 2.2 m in 24 uur. De stabiliteit van de in genoemd project voorziene dijken met een taludhelling van 1 : 4 kan op grond van de aard van de poriewaterdrukgradienten over de buitenste lagen van de dijk en de geringe taludhelling, worden aangenomen voldoende te zijn bij een daling van de buitenwaterstand van 5 m in 24 uur.

Literatuur referenties:

Deltares 2010: Studie voor richtlijnen klei op dijktaluds in het rivierengebied. Deltares report 1202512-000-GEO-0002, 110 pp.

ENW 2008: Addendum I bij de leidraad rivieren, ten behoeve van het ontwerpen van rivierdijken. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag, 23 pp.

Grondmechanica Delft 1988: Onderzoek naar het beoordelen van de geschiktheid van kleigrond voor bekleding van dijken met grasbedekking. GeoDelft rapport 275925 voor Rijkswaterstaat DWW, Delft, 79 pp.

Wroth, C. P., D. M. Wood 1978: The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils. Canadian Geotechnical Journal 15(2), pp. 137-145

Scheffer, F., P. Schachtschabel 1998: Lehrbuch der Bodemkunde. Berlin 570 pp.

TAW 1996: Technisch rapport Klei voor dijken. TAW Technisch Rapport 17, Rijkswaterstaat, Lelystad, 52 pp.

Hoogachtend,



drs. G.A.M. Kruse
Senior Specialist



Datum
14 juli 2015

Ons kenmerk
1220595-000-BGS-0004

Pagina
15/32



Datum
14 juli 2015

Ons kenmerk
1220595-000-BGS-0004

Pagina
16/32

Bijlage 1

Hoofdstuk 8 uit:
Deltares 2010: Studie voor richtlijnen klei op dijktaluds in het rivierengebied Deltares rapport
1202512-000-GEO-0002 voor RWS Delft.

8 Stabiliteit kleilaag op het buitentalud

8.1 Inleiding

De buitenkant van een dijklichaam kan behalve door golven en overslag door instabiliteit worden aangetast. De instabiliteit van de buitenkant van een overigens stabiel dijklichaam kan met name worden veroorzaakt door een hoge waterdruk in het dijklichaam. Voor het ontstaan van de waterdruk zijn infiltratie en berging van water in het dijklichaam van belang, in relatie tot de stijg- en daalsnelheden van buitenwater en tot overslag. Dijken met een zandkern zijn uit dat oogpunt maatgevend.

In deze paragraaf wordt nader ingegaan op de stabiliteit van een kleilaag op een dijk met een zandkern en wel ten tijde van vallend buitenwater, aangezien de maximale belasting dan optreedt. De stabiliteit van de kleilaag bij een snelle waterstanddaling kan maatgevend zijn.

Bij een snelle daling van de buitenwaterstand na een hoogwater kan een kleibekleding afschuiven. Door de snelle waterstanddaling treedt een buitenwaarts gericht verhang op wat ongunstig is voor de stabiliteit van de bekledingslaag.

De invloed van de dikte van de bekledingslaag op de grondmechanische stabiliteit is nagegaan voor een maatgevende snelle waterstanddaling. Hiertoe zijn infiltratie en stabiliteitsberekeningen gemaakt voor een kleibekleding op een zandkern.

De stabiliteit van de bekleding is afhankelijk van de volgende aspecten:

- Taludhelling
- Dijkopbouw en kleilaagdikte
- Wrijvingseigenschappen klei en zand
- Doorlatendheid kleibekleding en zandkern
- Waterstandsverloop

De verschillende aspecten worden per punt behandeld in de volgende paragraaf .

8.2 Uitgangspunten en randvoorwaarden

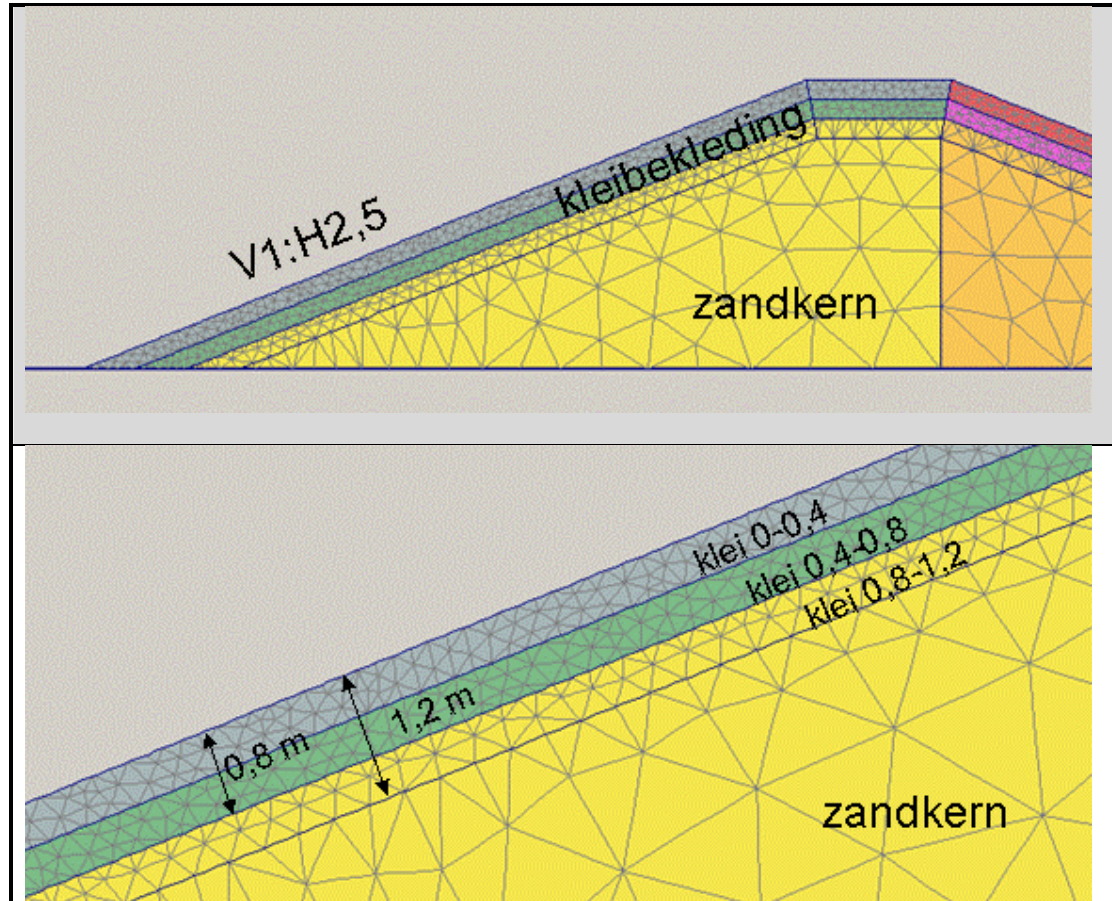
Taludhelling

De berekeningen zijn uitgevoerd voor een helling 1:2,5. De helling van buitentaluds zijn zelden steiler dan dit. Hoe steiler het talud hoe ongunstiger dit is voor de stabiliteit.

Dijkopbouw en kleilaagdikte

Er zijn berekeningen gemaakt met een kleilaagdikte van 0,8 en 1,2 m dikte op een zandkern. Een laagdikte op het buitentalud tussen deze waarden is in de praktijk momenteel gangbaar. Volgens de huidige rekenregels echter dient een kleilaag aanzienlijk dikker te zijn om voldoende erosiebestendig te zijn.

De aangehouden dijkopbouw staat in onderstaande figuur. De dijk is 6 m hoog. De bekleding is opgebouwd uit 2 of 3 laagjes (0,8 of 1,2 m) van 0,4 m dikte, die elk verschillende eigenschappen hebben. De dijk staat op een ondoorlatende basis, wat niet ondenkbeeldig is indien de dijk op een heel slecht doorlatende klei of veenlaag is gefundeerd. Het water heeft daardoor geen kans om via de ondergrond de dijk in of uit te stromen.



Figuur 8.1 Dijkopbouw – kleibekleding 0,8 / 1,2 m dik op zandkern

Wrijvingseigenschappen kleibekleding en zandkern

Hiervoor is aangehouden: $c'=5$ kPa en $\phi'=25^\circ$. Dit zijn waarden die in de praktijk voorkomen in kleibekledingen van goede kwaliteit. Het gaat om gemiddelde waarden. Een overweging hierbij is dat het verwachte mechanisme niet door de klei zal gaan, maar zal bestaan uit het afschuiven van de kleilaag over de zandkern of het opdrukken hiervan. Voor de wrijvingseigenschappen van zand zijn $c'=0,1$ kPa en $\phi'=30^\circ$. Voor de cohesie is een kleine waarde aangehouden in verband met de numerieke afhandeling van de stabiliteitsanalyse.

Aan de binnenzijde van de dijk hebben de materialen een hogere sterkte gekregen (cohesie van 20 kPa) om te voorkomen dat de dijk hier kapot zou gaan. Bezwijken van het binnenbeloop is geen onderdeel van het onderzoeksdoel.

Doorlatendheid kleibekleding en zandkern

De doorlatendheid van de klei en het zand zijn conservatieve schattingen van gemiddelden. De doorlatendheid werkt bij dit mechanisme zowel gunstig als ongunstig. In een heel doorlatende dijk zal als gevolg van het hoge water snel verzadigd raken, maar tijdens het dalen van de waterstand zal de grondwaterstand in de dijk snel volgen, waardoor het verhang beperkt blijft. Een heel ondoorlatende dijk zal weinig water opnemen, maar het water dat erin komt zal de

buitenwaterstand slecht kunnen volgen. Of een hoge of een lage doorlatendheid gunstig is, is niet voor de hand liggend.

De gehanteerde waarden voor de PlaxFlow berekeningen zijn samengevat in de onderstaande tabellen. Voor een kleilaagdikte van 0,8 m zijn twee varianten berekend, één met een beste schatting van de doorlatendheid van de laag 0,4-0,8 m en één met een lage doorlatendheid. Voor zand is een materiaal uit de dataset van Staring gebruikt, die in PlaxFlow aanwezig zijn. De kenmerken van het type staan in de onderste tabel.

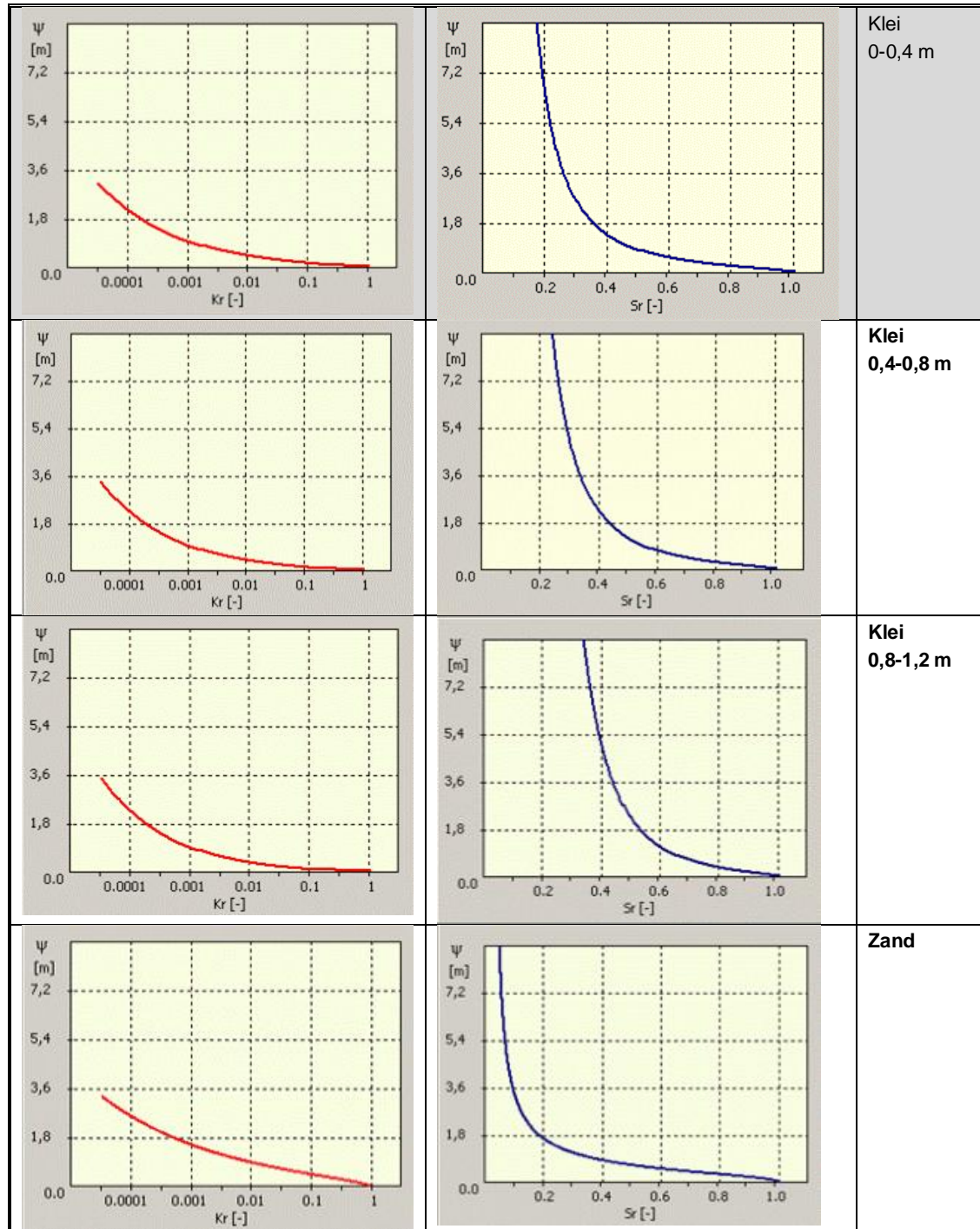
Grond	K_x (m/s)	K_y (m/s)	e (-)	C_{sat} (m ⁻¹)	ψ_{unsat} (m)
Klei 0 – 0,4 m	$0,5 \times 10^{-4}$	$0,5 \times 10^{-4}$	1	1×10^{-4}	1×10^4
Klei 0,4 – 0,8 m	2×10^{-5}	2×10^{-5}	1	1×10^{-4}	1×10^4
Klei 0,4 – 0,8 m slecht doorlatend	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1	1×10^{-4}	1×10^4
Klei 0,8 – 1,2 m	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1	1×10^{-4}	1×10^4
Zand	1×10^{-4}	1×10^{-4}	0.5625	1×10^{-4}	1×10^4

Tabel 8.1 Parameters kleibekleding en zandkern t.b.v. PlaxFlow (1)

Grond	S_{res} (-)	S_{sat} (-)	g_n (-)	g_a (m ⁻¹)	g_i (-)
Klei 0 – 0,4 m	0.027	1	1.5	5	0
Klei 0,4 – 0,8 m	0.027	1	1.4	5	0
Klei 0,4 – 0,8 m slecht doorlatend	0.027	1	1.4	5	0
Klei 0,8 – 1,2 m	0.027	1	1.3	5	0
Zand	Data set – Staring/ Model Van Genuchten/ Type Sand (O1)/ Mediaan 105 – 2000 μ m 4% < 2 μ m; 7% < 63 μ m; 100% < 2 mm				

Tabel 8.2 Parameters kleibekleding en zandkern t.b.v. PlaxFlow (2)

De parameters resulteren met het Van Genuchten model tot relaties tussen zuigspanning en verzadiging en tussen zuigspanning en doorlatendheid. De resultaten worden in PlaxFlow gegeven bij de materiaaleigenschappen en zijn in de onderstaande figuur weergegeven.



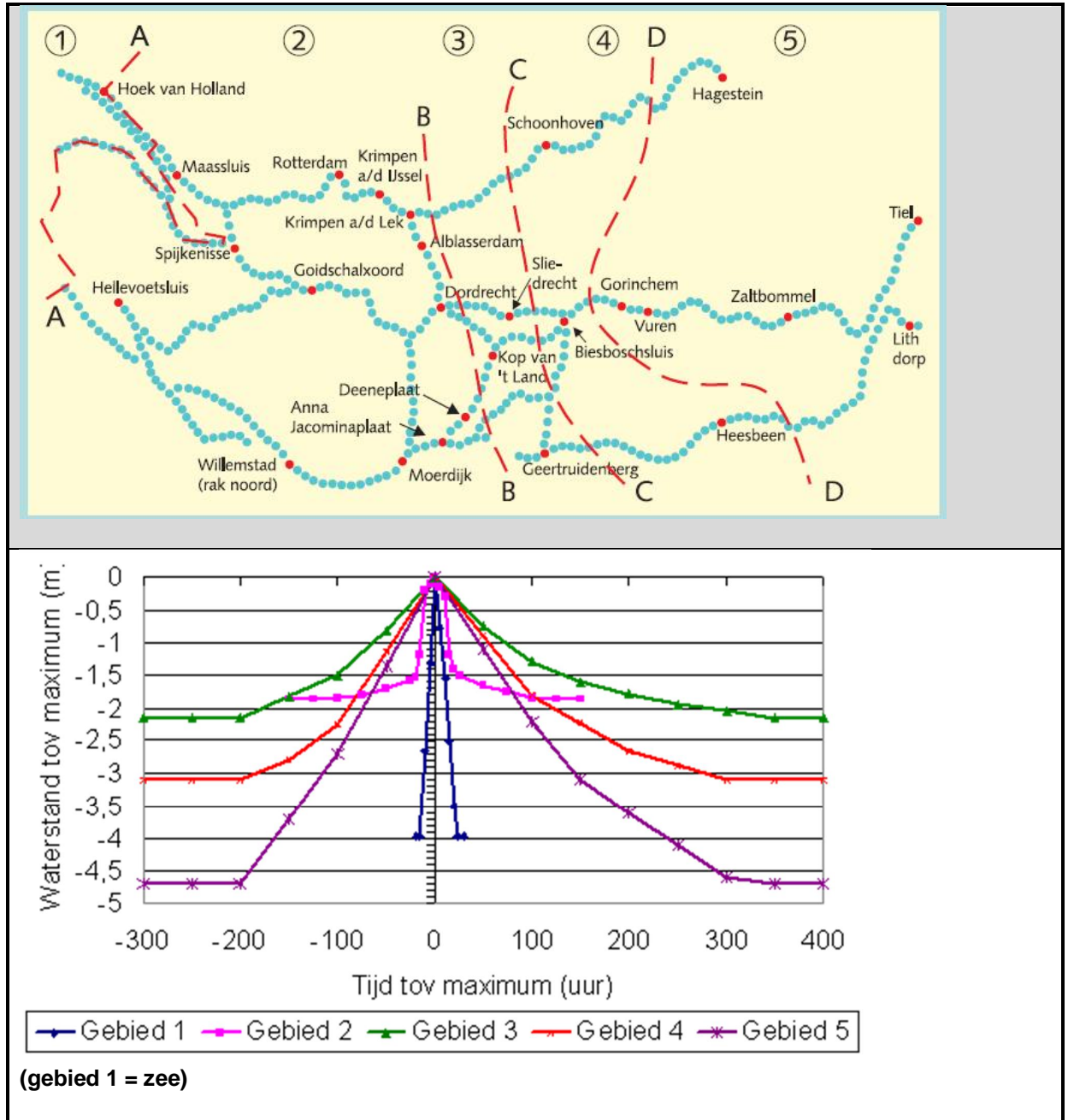
Figuur 8.2 Grafieken relatieve doorlatendheid K_r (-) vs zuigspanning ψ (meter waterkolom) en grafieken relatieve verzadiging S_r (-) vs ψ (meter waterkolom) voor de kleibekleding (in lagen van 40 cm) en de zandkern

Waterstandverloop

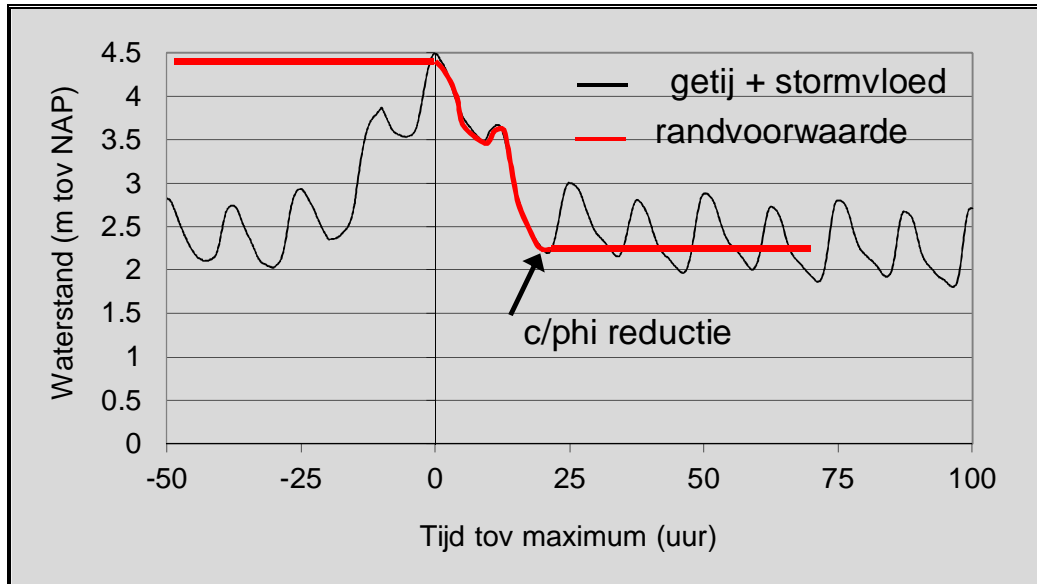
De meest ongunstige situatie treedt op bij een snelle daling van de buitenwaterstand. Als de (grond)waterstand in de dijk de buitenwaterstand niet kan volgen dan treedt er een buitenwaarts gericht verhang op, wat ongunstig is voor de stabiliteit. Binnen het rivierengebied is daarom gezocht naar de grootst mogelijke daalsnelheid van de waterstand na een hoogwater.

Voor het waterstandverloop in het rivierengebied is uitgegaan van de Hydraulische Randvoorwaarden 2006. Er worden 5 gebieden onderscheiden, waarvoor verschillende verlooplijnen gelden (Figuur 8.3). Deze waterstandverlooplijnen moeten worden gebruikt voor de toetsing van geotechnische mechanismen van de primaire waterkeringen. De grootste daalsnelheid van de waterstand komt voor in gebied 1 (zee). Deze daalsnelheid is gelijk aan 0,2 m/uur. In gebied 2 (rivier) is de maximale daalsnelheid iets lager: 0,18 m/uur (0,9 m in 5 uur). In de gebieden 3, 4 en 5 is de maximale daalsnelheid nog maar 0,02 m/uur (bijvoorbeeld 3,1 m in 150 uur).

In de gebieden 1 en 2 is een duidelijk getij aanwezig, waardoor de waterstand rond de gegeven verlooplijn slingert. Tijdens de neergaande getijbeweging zal de waterstand extra snel dalen ten opzichte van de bovenstaande waterstandsverlooplijn. Voor bijvoorbeeld Dordrecht (Gebied 2) is een gemiddeld getij op de waterstandverlooplijn gezet (Zwarte lijn in Figuur 8.4)



Figuur 8.3 Waterstandverlooppijnen voor rivieren (Hydraulische Randvoorwaarden 2006)



Figuur 8.4 Waterstandverlooptlijn voor dijkkring 16 ter hoogte van Dordrecht (gebied 2) en modelrandvoorwaarde voor de berekening naar de stabiliteit van de bekledingslaag (rode lijn)

De grootste daalsnelheid van de waterstand is 0,36 m/uur indien het getij wordt meegenomen bij de waterstandverlooptlijn. Dit is een verdubbeling van de daalsnelheid ten opzichte van de daalsnelheid van alleen de waterstandverlooptlijn.

Voor de berekeningen naar de stabiliteit is de rode lijn in Figuur 8.4 aangehouden. Initieel is er een stationaire waterstand gelijk aan de maatgevende hoogwaterstand, waarna de waterstand daalt volgens de kromme uit de Hydraulische Randvoorwaarden 2006. Dit is een veilige aanname.

8.3 Resultaten

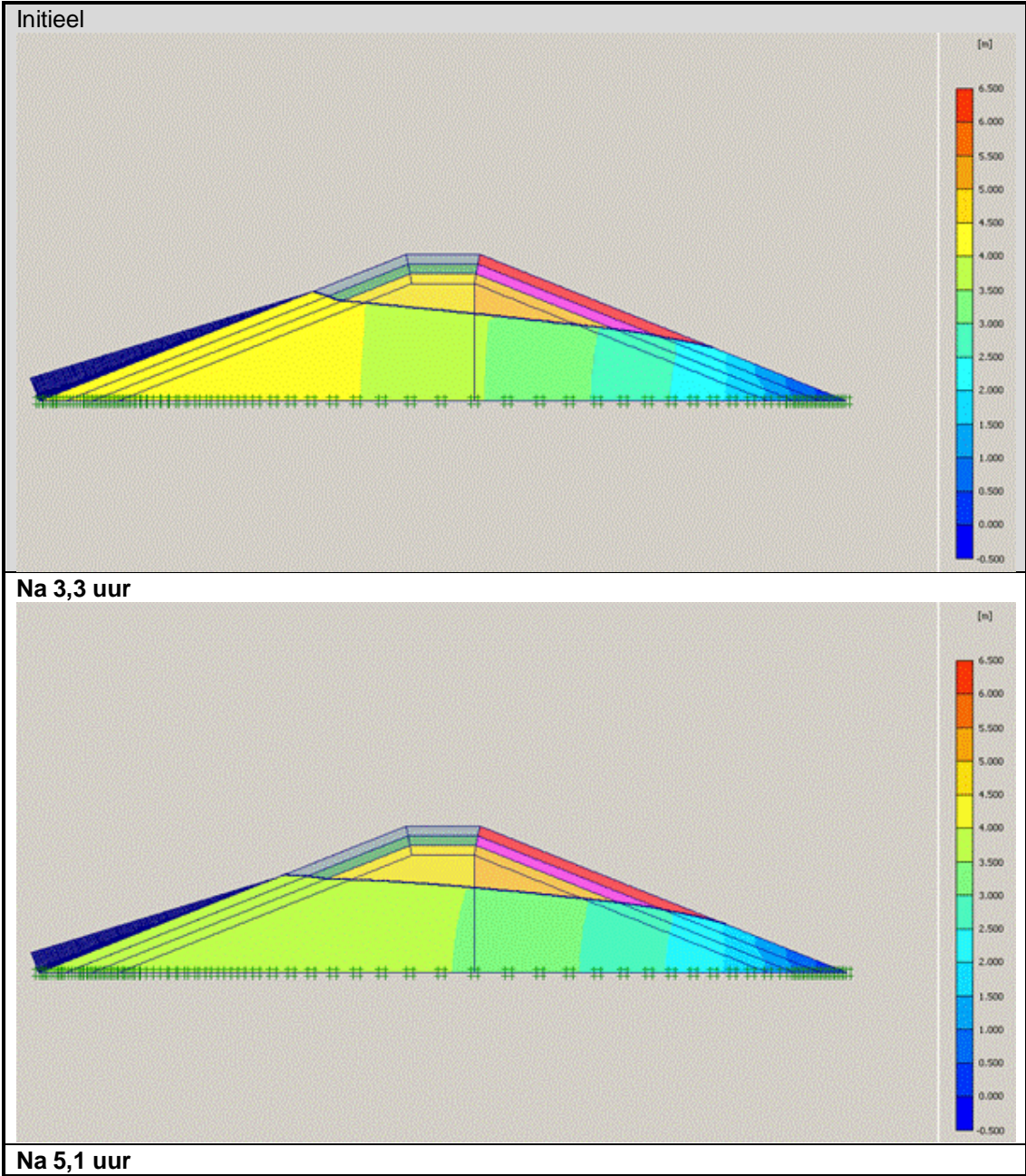
De berekeningen naar de stabiliteit zijn gemaakt volgens de eindige elementen methode met het programma Plaxis. Er is gebruik gemaakt van het Mohr Coulomb materiaalmodel.

De waterspanningen zijn berekend met PlaxFlow, dat wordt opgestart vanuit Plaxis. Er is gebruik gemaakt van het Van Genuchten stromingsmodel voor onverzadigde grond.

De berekening naar de stabiliteit (met Plaxis) vindt plaats op elk van de tijdstappen waarop door PlaxFlow een waterspanningverdeling is uitgerekend. Voor elk van de tijdstappen is door Plaxis op basis van de door PlaxFlow berekende waterspanningen een nieuwe spannings-rek situatie berekend. Dit betekent dat de dijk in deze situaties stabiel is, maar het is onbekend hoe stabiel. Voor de laatste stap is een c/phi reductie uitgevoerd om de reserve van het talud te bepalen (aangegeven in Figuur 8.7).

8.3.1 Kleibekleding 0,8 m – beste schatting doorlatendheid

In de onderstaande figuren is een beeld gegeven van het gevolg van de waterstanddaling op de stijghoogte in de dijk voor het geval van een 0,8 m dikke kleilaag met een beste schatting van de doorlatendheid.

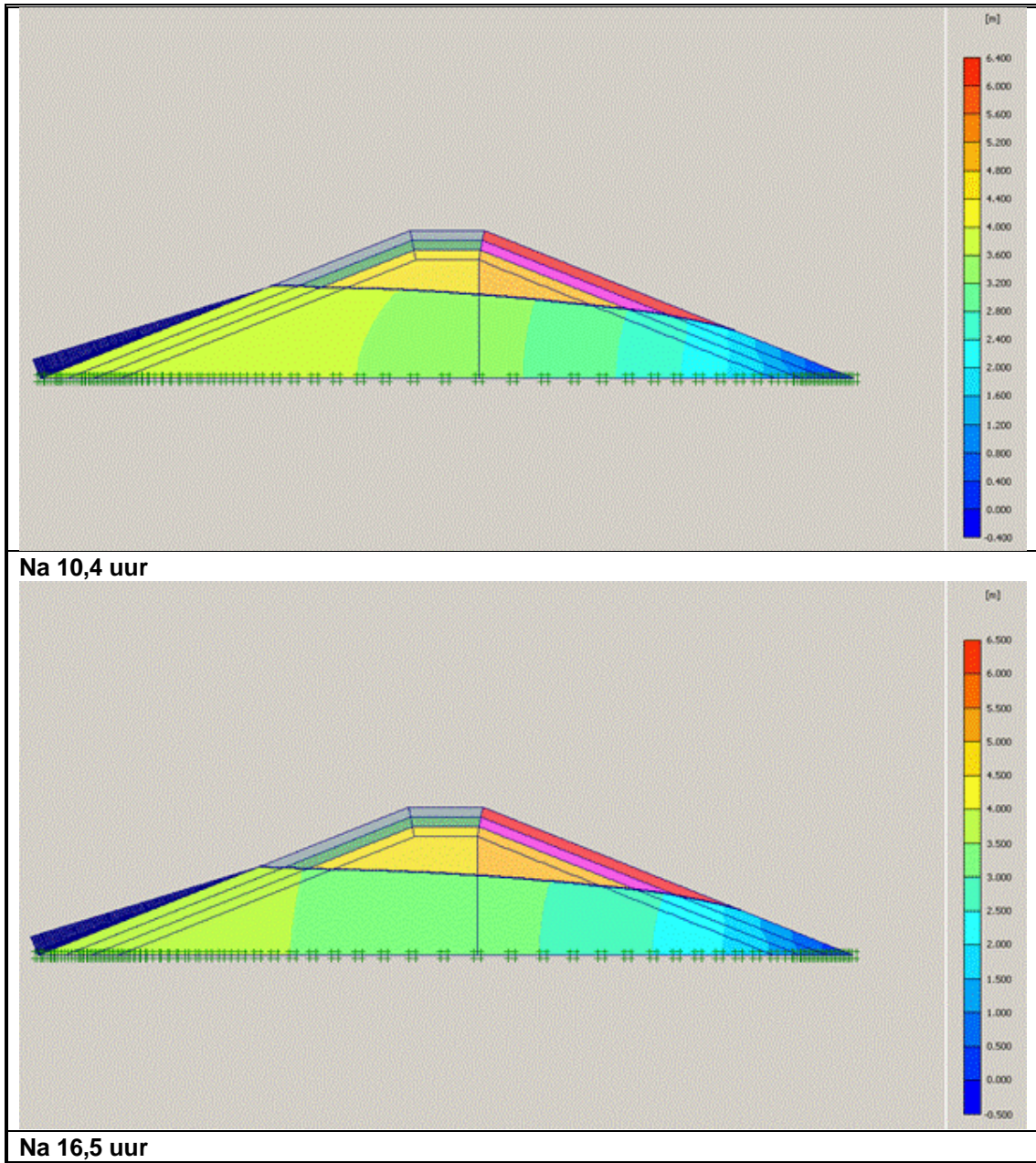


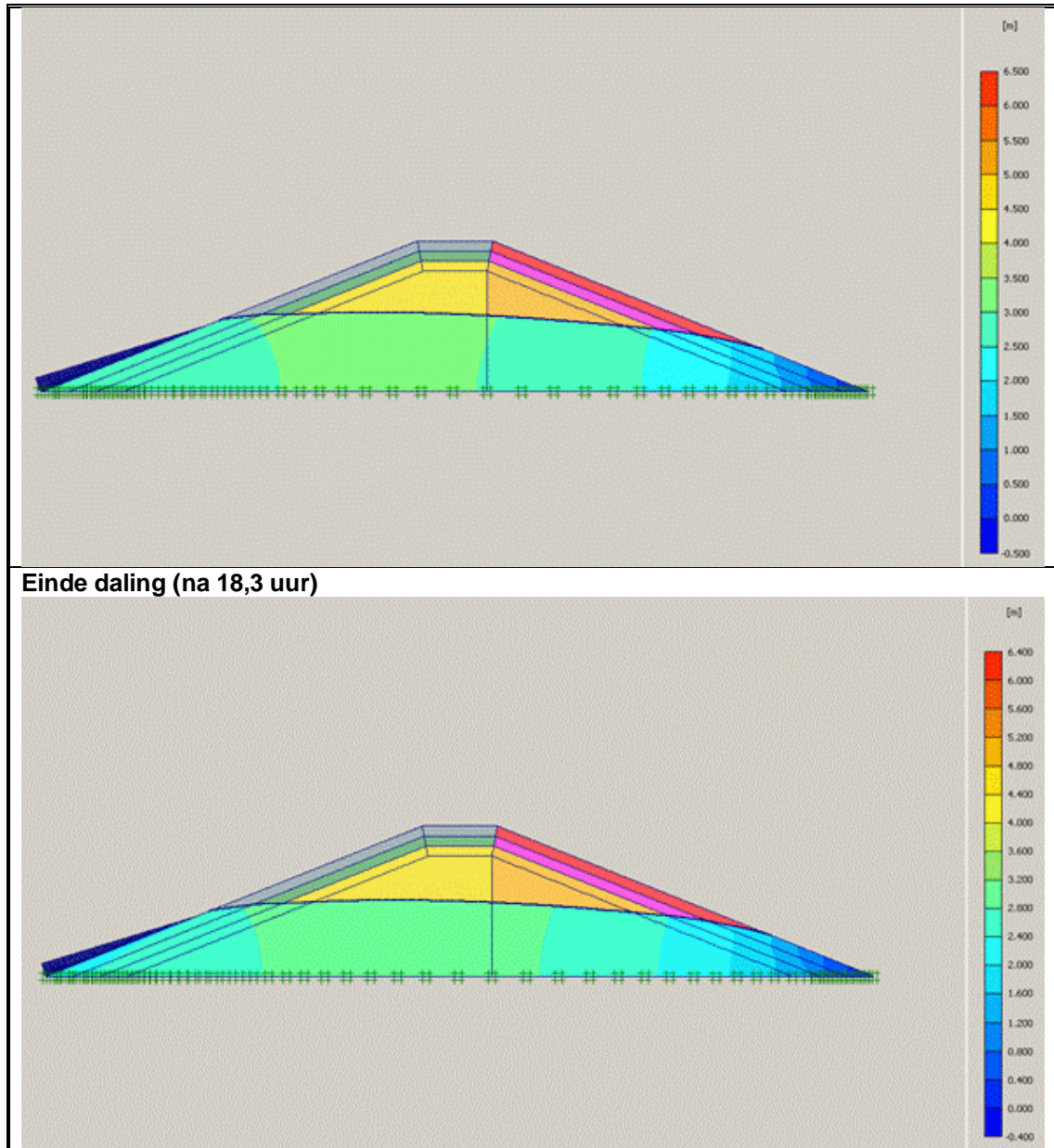


Datum
14 juli 2015

Ons kenmerk
1220595-000-BGS-0004

Pagina
25/32

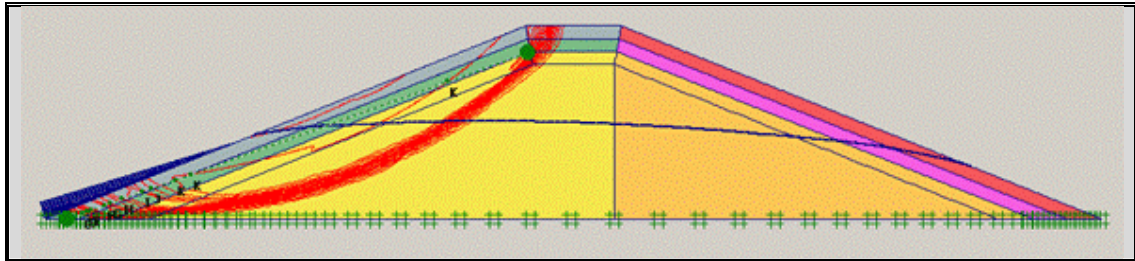




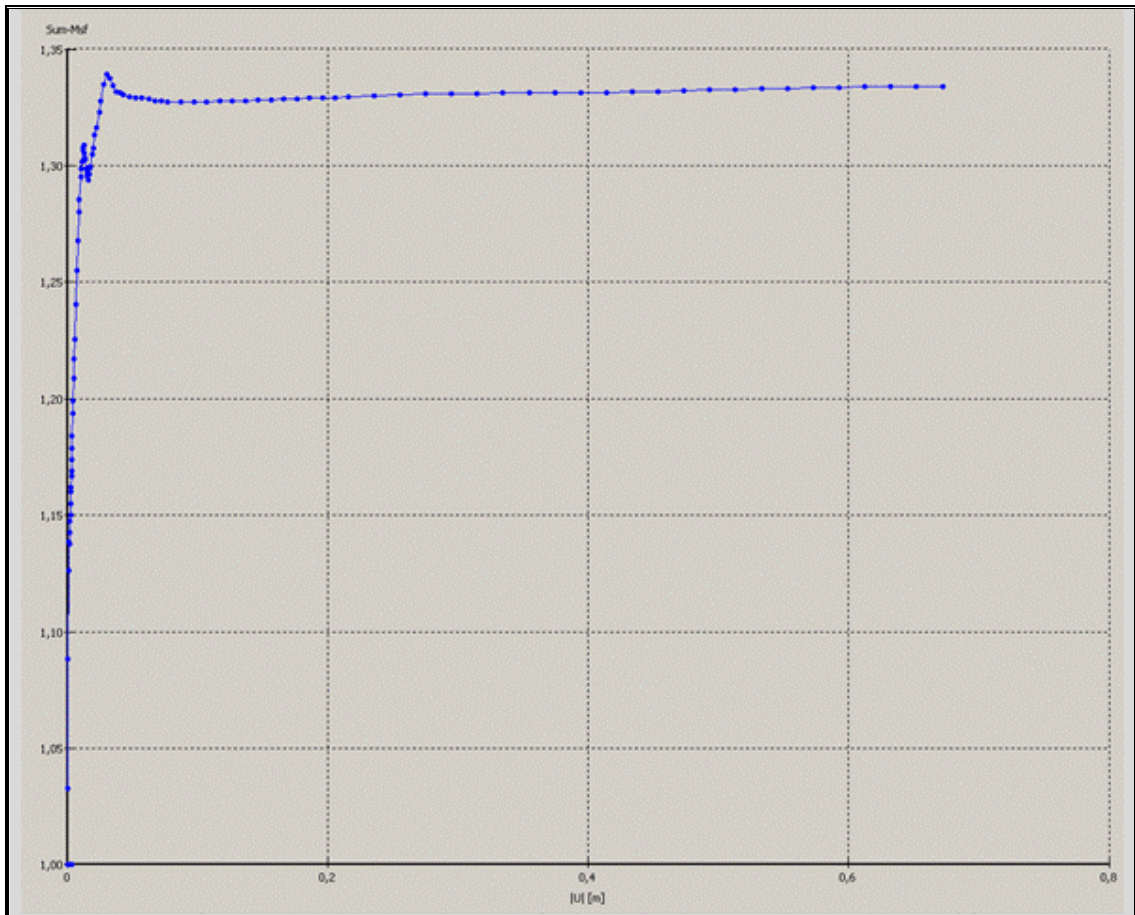
Figuur 8.5 Stijghoogte in de dijk (m ten opzichte van teenniveau) gedurende de waterstanddaling

De stijghoogte in de dijk volgt de waterstand aan de buitenzijde zonder veel vertraging. De hoogste daalsnelheid van de buitenwaterstand is 0,36 m/uur, ofwel 1×10^{-4} m/s. De gemiddelde daalsnelheid is circa 0,1 m/uur, ofwel 3×10^{-5} m/s. Dit is van gelijke orde van grootte als de doorlatenheid van de onderste kleilaag (klei 0,4 – 0,8 m 2×10^{-5} m/s).

Aan het einde van de waterstanddaling is door middel van een c/phi reductie bepaald wat het maatgevende mechanisme (Figuur 8.7) is en welke stabiliteitsfactor (SF) daarbij hoort (Figuur 8.7).



Figuur 8.6 Mechanisme bij snelle waterstanddaling bij een kleilaag van 0,8 m dik op een zandkern



Figuur 8.7 SF vs verplaatsing (1,33 bij 0,7 m verplaatsing)

Het mechanisme gaat door de hele zandkern. De stabiliteit van de kleibekleding is beter dan die van het dijklichaam als geheel. De stabiliteitsfactor van alleen de bekleding zal dus hoger zijn dan de gevonden 1,33. Hoewel moet worden opgemerkt dat voor eindige elementen berekeningen nog geen veiligheidsfilosofie voor primaire kringen is opgezet, lijkt deze gevonden stabiliteitsfactor, in vergelijking met de aanpak bij conventionele berekeningen, (Bishop benadering stabiliteit zoals in MStab) ruim voldoende om voor deze situatie geen problemen te verwachten ten aanzien van de stabiliteit van de bekleding.

- 8.3.2 Kleibekleding 0,8 m – lage schatting doorlatendheid (net na aanleg kleilaag)
Dezelfde berekening als hierboven (par. 2.3.1) is uitgevoerd, maar dan met een lage schatting voor de verzadigde doorlatendheid van de laag 0,4-0,8 m. Hiervoor is 1×10^{-6} m/s aangehouden (Grondmechanica Delft 1988) in plaats van 2×10^{-5} m/s uit de bovenstaande berekening. Deze situatie kan voorkomen net na aanleg van de kleilaag, als de bodemstructuur in de laag nog niet is ontwikkeld.

Bij een val van een stationaire hoge waterstand (4,5 m boven teenniveau) blijkt de bekledingslaag juist niet stabiel. Het freatisch vlak in de zandkern volgt de buitenwaterstand minder snel door de lage doorlatendheid, waardoor het verval over de kleilaag te groot wordt. Bezijken treft op bij een buitenwaterstand van 2,46 m boven teenniveau, de totale waterstanddaling gaat tot 2,39 m boven teenniveau. Voor de volledigheid wordt hier opgemerkt wordt dat de dijk geheel verzadigd is verondersteld bij aanvang van de waterstanddaling. Deze aanname is conservatief omdat het freatisch vlak in de dijk bij een lagere doorlatendheid natuurlijk minder snel het dijklichaam kan instromen dan bij de berekening met een hogere doorlatendheid van de kleilaag, waarbij het talud wel stabiel is.

Er ontstaat een zone met tension cut off points in de kleilaag net boven het punt waar het freatisch vlak in de dijk achterblijft en een zone met plastische punten in het zand net onder de kleibekleding (zie Figuur 8.8)

- 8.3.3 Kleibekleding 1,2 m – beste schatting doorlatendheid
Voor een kleilaagdikte van 1,2 m is dezelfde berekening gemaakt. De (grond)waterstand in de dijk blijft in dit geval iets verder achter bij de buitenwaterstand, wat kan worden verklaard door de lagere doorlatendheid van de bekleding ten opzichte van de daalsnelheid van het buitenwater.

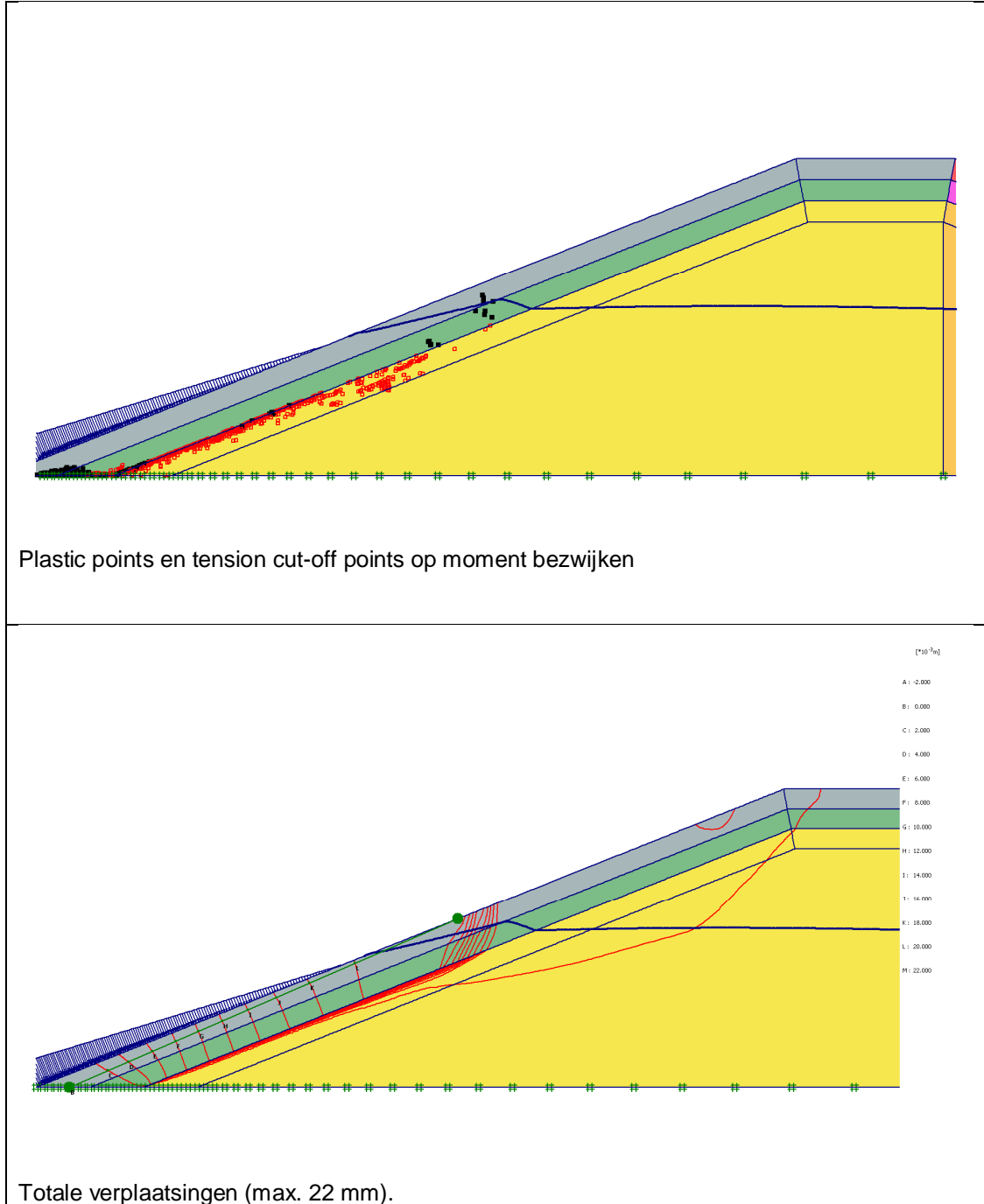
De stijghoogte in de dijk na de waterstanddaling staat in Figuur 8.9, het mechanisme en de stabiliteitsfactor staan in Figuur 8.10 en Figuur 8.11.

Ondanks het grotere verhang door de wat meer achter blijvende (grond)waterstand in de dijk, is de stabiliteitsfactor (SF) iets hoger (1,36) dan bij een 0,8 m dikke laag. Het positieve effect van de kleilaagdikte weegt kennelijk op tegen het iets ongunstiger waterspanningsverloop. Het verschil is echter zeer klein.

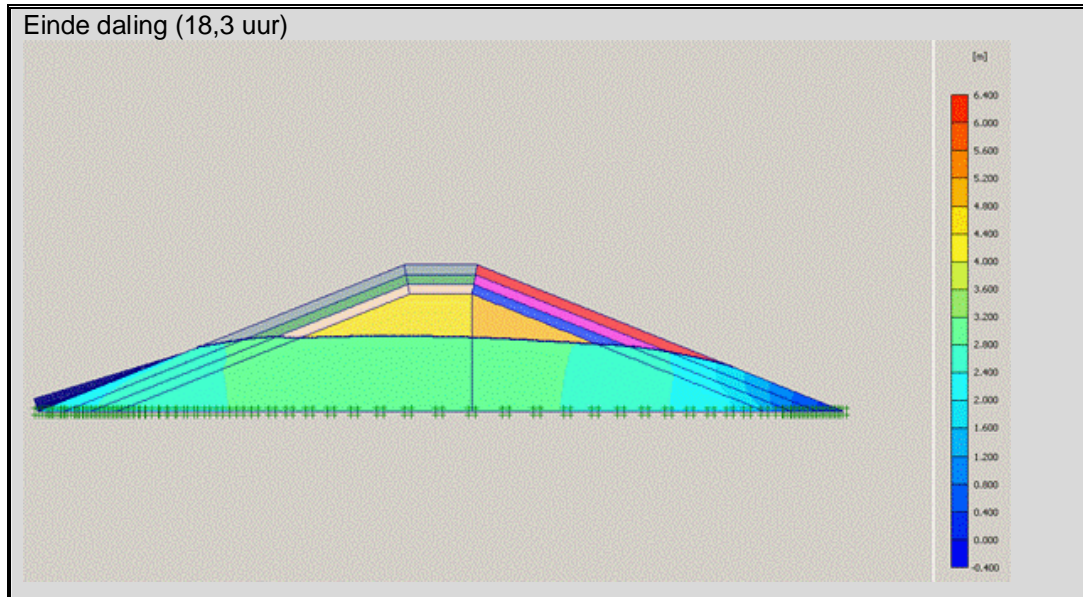
Voor de berekeningen naar de stabiliteit is de rode lijn in Figuur 8.4 aangehouden. Initieel is er een stationaire waterstand gelijk aan de maatgevende hoogwaterstand, waarna de waterstand daalt volgens de kromme uit de Hydraulische Randvoorwaarden 2006. Dit is een veilige aanname.

8.4 Stabiliteit kleilaag bij vallend buitenwater

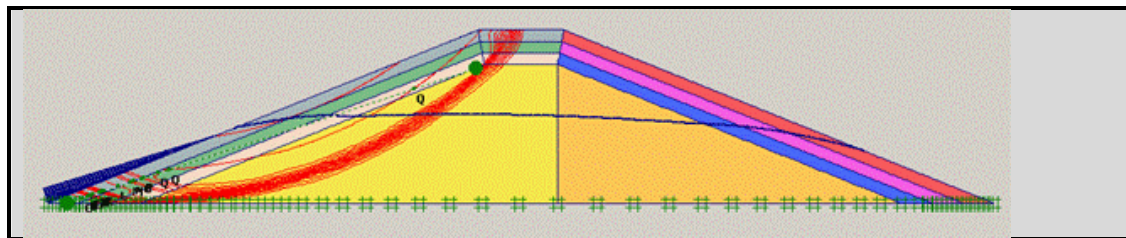
Samenvattend kan worden gesteld dat een kleilaag van 1.2 m dikte stabiel is op een zandkern bij een steil talud van 1:2.5 bij realistische aannamen over de eigenschappen van kleilagen op dijken. De kleilaag van 1.2 m dikte is ook stabiel direct na aanleg wanneer de doorlatendheid van de kleilaag nog laag is. Een kleilaag van 0.8 m dikte is eveneens stabiel bij maatgevend vallend buitenwater. Echter, in de periode direct na aanleg is een laag van 0.8 m klei mogelijk enige tijd niet stabiel op een buitentalud van 1:2.5. Na verloop van ongeveer 1 jaar is de doorlatendheid van de 0.8 m klei zodanig toegenomen dat de laag wel als stabiel beschouwd kan worden.



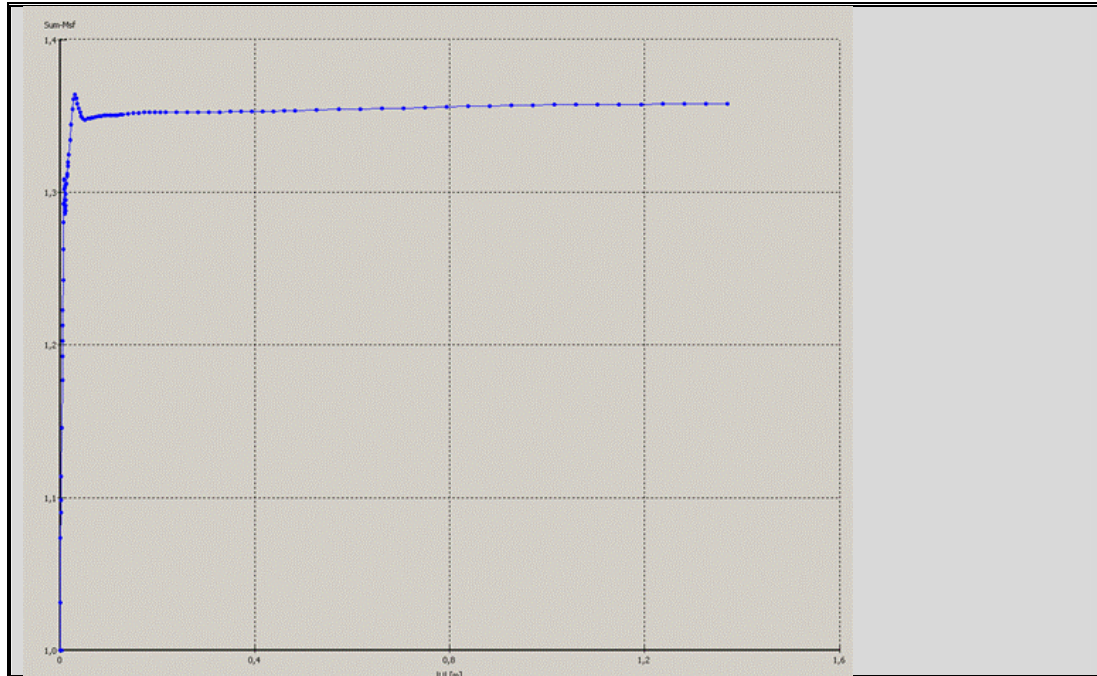
Figuur 8.8 Punten waarvoor permanente vervorming is berekend voor een 0.8 m dikke kleilaag met lage doorlatendheid (als na aanleg) en lijnen met de berekende verplaatsingen daarbij die aangeven dat de kleilaag vanaf de groene punt van het talud afglijdt



Figuur 8.9 Stijghoogte in de dijk na de waterstanddaling bij een kleilaagdikte van 1,2 m op een zandkern



Figuur 8.10 Mechanisme bij snelle waterstanddaling bij een kleilaag van 1,2 m dik op een zandkern



Figuur 8.11 SF vs verplaatsing (1,36 bij 1,5 m verplaatsing)

In bovenstaande beschouwing is uitgegaan van een dijk met een zandkern. Het komt ook voor dat een deel van de kern van de dijk uit zand bestaat. In dat geval is de hoeveelheid in de dijk geborgen water geringer en zal de waterdruk in het zand sneller dalen en een geringere belasting uitoefenen.

8.5 Opmerking over stabiliteit bij overslag

Bij overslag kan er veel water in een binnentalud infiltreren waardoor de waterdruk in de dijk relatief snel kan oplopen en het binnentalud zijn stabiliteit kan verliezen. Instabiliteit van het binnentalud door infiltratie van golfoverslag lag vaak ten grondslag aan het beschadigen en doorbreken van dijken in 1953, naar het zich laat aanzien. Daarbij wordt de kanttekening gemaakt dat de binnentaluds van die dijken relatief steil waren (1:1.5 – 1:2.5). Een dijktaalud met een taludhelling 1:1.5 van voornamelijk zand bezweek tijdens overloopprouven bij een debiet van ongeveer 1.5 ltr/m/s (Grondmechanica Delft 1995b).

De overslagprouven met hoog debiet die in SBW verband die in 2008 - 2010 zijn uitgevoerd geven geen inzicht in de stabiliteit bij overslag vanwege de betrekkelijk geringe breedte van de beproefde taludsecties. Bij infiltratieprouven over grotere breedtes op taluds 1:3 (Boonweg, Afsluitdijk, Oostelijk Flevoland dijk) met taluds van 1:2.5 of flauwer zijn bij maximale infiltratie, zoals bij overslag gedurende meer dan 1 etmaal, geen instabiliteiten waargenomen. Voorlopige berekeningen sluiten instabiliteit als gevolg van infiltratie echter niet uit voor een kleilaag van 0.6 m dikte in zo'n geval. Filmopnamen van overloop van rivierdijken in Duitsland, Oostenrijk en de VS over taluds naar schatting steiler dan 1:2.5, wijzen erop dat langdurige hoge overloopdebieten (>> 10ltr/m/s) tenminste niet altijd tot instabiliteit van zulke binnentaluds leiden.



Datum
14 juli 2015

Ons kenmerk
1220595-000-BGS-0004

Pagina
32/32

Voorshands wordt er hier van uitgegaan dat een 0.8 m dikke kleilaag op een zandkern op een talud 1:2.5 voldoende stabiel is. Er zijn echter geen rechtstreekse bepalingen van of berekeningen beschikbaar voor deze aanname over de stabiliteit bij hogere overslagdebieten.