STERKE LEKDIJK

Notitie

Notitie Omgang met GABI bij Sterke Lekdijk

Van: Technisch team SLD (Auteur: Derk-Jan Sluiter en Arnold van der Kraan)

Aan: Technisch managers deelprojecten

Datum: 25-1-2022

Versie: DEFINITIEF

Registratienr. DM: PM

Inleiding

Bij de verschillende deelprojecten binnen Sterke Lekdijk (SLD), zijn geen eenduidige uitgangspunten beschikbaar voor de beoordeling en het ontwerp van de waterkering op het faalmechanisme Gras Afschuiven Binnentalud (GABI) bij kleidijken. Dit leidt tot het hanteren van onderling verschillende (en contraire) uitgangspunten bij de deelprojecten, waarmee er geen eenduidig inzicht bestaat in de opgave voor GABI.

Daarnaast bestaat er onduidelijkheid over de toepassing van de verschillende rekenmodellen en de samenhang met andere faalmechanismen.

Deze situatie is voorgelegd aan het Adviesteam Dijkontwerp (Adviesteam). Het Adviesteam heeft vervolgens een memo[1] opgesteld met een perspectief voor zowel bepalen van de veiligheidsopgave als het ontwerpvraagstuk.

Deze notitie vat Memo van het Adviesteam samen en vertaalt deze naar een concrete werkwijze voor SLD. Relevante onderdelen van deze notitie neemt het Technisch team SLD uiteindelijk op in de Strategische Nota van Uitgangspunten (SNvU). De volgende paragraaf beschrijft de route naar de SNvU.

[1] Memo, Advies nr. 119 – GABI Sterke Lekdijken. Versie 2, 27-5-2021

Route naar opname in SNvU

In de SNvU nemen we de werkwijze uit deze notitie voor GABI over. We volgen daarbij de stappen zoals geschetst in DM1765463, SNvU, nieuwe ontwikkelingen . Onderstaande tabel geeft de stappen en resultaten weer.

Stap	Actie	Door	Stand van zaken
1 en 2	Registreren GABI als onderwerp voor de SNvU in DM1765463 en bespreken in Technisch team	Auteur	Afgerond
3	Opstellen concept notitie	Auteur	Concept01 afgerond
4a	Review concept01 door Technisch team	Technisch team	Afgerond (2-7-2021)
4b	Review concept 09 door Technisch team	Technisch team	Deze versie
4c	Review eindconcept door TM-overleg	TM-overleg	November 2021
5	Opstellen definitieve notitie en registreren in DM	Auteur	Januari 2022
6	Opnemen in SNvU en communiceren met TM-ers	Auteur	Januari 2022

Voorstel aanpassingen in SNvU

1. Deze notitie integraal opnemen als bijlage bij de SNvU. In de hoofdtekst van de SNvU (o.a. paragraaf 11.1.2) nemen we een samenvatting met de belangrijkste punten uit deze notitie op.

Samenvatting Advies Adviesteam

De Memo van het Adviesteam geeft een advies over de omgang met GABI en inhoudelijke achtergronden. Hieronder vatten we het advies samen en vertalen we het naar de SLD-situatie. Voor een uitgebreide beschrijving en inhoudelijke achtergronden verwijzen we naar de Memo van het Adviesteam (bijlage I bij deze notitie).

De kern van het advies luidt, samengevat:
In het WBI 2017 zijn voor de beoordeling van het mechanisme GABI de regels uit het VTV 2006 overgenomen. Deze regels zijn niet gekalibreerd. Wanneer aan de regels wordt voldaan kan worden verondersteld dat de kans op overstroming door een afschuiving van het binnentalud aanvaardbaar klein is.[2] *Andersom kan niet zomaar worden geconcludeerd dat er een grote veiligheidsopgave is wanneer niet wordt voldaan aan de regels uit de eenvoudige en gedetailleerde toets. Voor het programmeren en prioriteren van versterkingsprojecten wordt daarom door het HWBP dan ook geen rekening gehouden met dit mechanisme. Het mechanisme wordt in het algemeen niet beschouwd als een drager van een veiligheidsopgave.*

Wanneer er echter een veiligheidsopgave door andere mechanismen aanwezig is en een kering wordt versterkt, wordt het mechanisme in de dimensionering wel meegenomen. Dit kan door het beperken van het overslagdebiet of verflauwen van het talud. Maatregelen die vaak toch al nodig zijn om de stabiliteit en / of andere mechanismen te verbeteren.

Onderstaand is in het kort de geadviseerde aanpak weergegeven.

1. *Bepaal eerst de opgave door andere mechanismen. Voor deze locaties adviseert het Adviesteam GABI mee te nemen via een ontwerpoplossing. Vaak kan bijvoorbeeld via de ontwerpoplossing voor macro-stabiliteit binnenwaarts ook de ontwerpoplossing voor GABI worden gecreëerd.*

[2] Bij de ontwikkeling van het WBI 2017 is verondersteld dat niet gekalibreerde regels uit het VTV 2006 'veilig' zijn. Wanneer er geen concrete inzichten waren dat het niet het geval is, zijn de regels uit het VTV 2006 overgenomen. Op dit moment vindt onderzoek aan de TU Delft plaats waarmee mogelijk op termijn regels kunnen worden aangescherpt.

2. *Voor die locaties waar geen andere opgave is, adviseert het Adviesteam om via een faalpadanalyse te onderbouwen of het reëel is dat afschuiven van het binnentalud (GABI) tot een overstroming kan leiden.*

Vertaling advies naar perspectief SLD

Het Technisch team Sterke Lekdijk stelt voor om op basis van het advies van het Adviesteam de volgende stappen van grof naar fijn achtereenvolgens te doorlopen bij het bepalen van de opgave en het ontwerp voor GABI, zie ook Figuur 1. De activiteiten in de stappen worden binnen de deelprojecten uitgevoerd, in afstemming met het technisch team. In de navolgende paragrafen zijn de stappen verder uitgewerkt.

1. Ga na of GABI *mogelijk* kan optreden. Bepaal o.b.v. het WBI en default parameters of mogelijk sprake is van een opgave voor GABI.
   Resultaat: grove scheiding tussen locaties waar het *zeker niet* optreedt en waar het *mogelijk wel* optreedt.

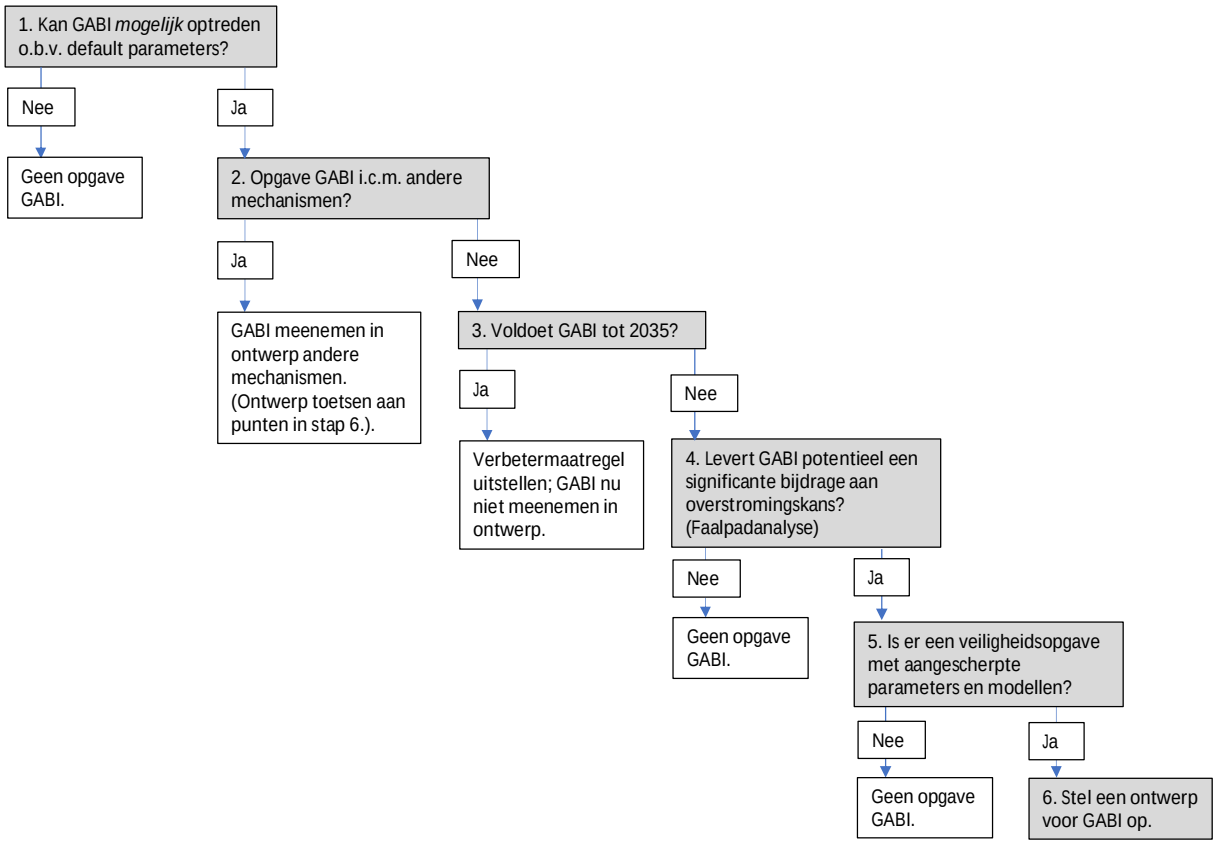
2. Bepaal de opgave voor andere mechanismen. Als de mogelijke opgave voor GABI daarmee samenvalt, neem GABI dan mee via een ontwerpoplossing voor de andere mechanismen wanneer dat redelijkerwijs mogelijk is.
   Resultaat: inzicht in de locaties waar sprake is van een (mogelijke) *enkelvoudige opgave* voor GABI.

3. Stel een verbetermaatregel uit voor die locaties waar mogelijk *na 2035* een enkelvoudige opgave voor GABI is. Op grond van nieuwe kennis die beschikbaar komt in de tweede beoordelingsronde kan dan definitief vastgesteld worden of er een veiligheidsopgave is.
   Resultaat: inzicht in de locaties waar GABI mogelijk geen urgent probleem is en waar *veilig een verbetermaatregel uitgesteld kan worden*.

4. Onderbouw, voor die locaties waar mogelijk, en vóór 2035, een enkelvoudige opgave voor GABI is, of GABI potentieel *significant bijdraagt aan de overstromingskans* door middel van een faalpadanalyse.
   Resultaat: inzicht in de kans op een doorbraak *als* GABI zou optreden.

5. Bepaal de versterkingsopgave indien GABI tot overstroming kan leiden o.b.v. een nadere analyse met behulp van bijvoorbeeld een lokale proevenverzameling en een geavanceerd rekenmodel.
   Resultaat: inzicht in waar GABI fysisch *zeer waarschijnlijk wel* optreedt voor de locaties met een significante overstromingskans.

6. Stel een verbetermaatregel op voor de locaties waar GABI een enkelvoudige opgave is.



Figuur 1:Schematische weergave stappenplan GABI

Toelichting perspectief SLD

Hieronder lichten we de bovengenoemde stappen toe op basis van de Memo van het adviesteam en vullen we het advies aan. De aanvullingen van het technisch team SLD zijn in grijze tekstboxen weergegeven.

1. Bepaal of GABI *mogelijk* kan optreden.

We bepalen of er voor GABI *mogelijk* een opgave is door het uitvoeren van de eenvoudige toets volgens het WBI uit én, voor de locaties die op basis daarvan niet goedgekeurd kunnen worden, een analyse met Edelman Joustra (of Spencer – Van der Meij) met een eenduidige set default parameters.

Omdat de huidige veiligheidsanalyses met verschillende uitgangspunten zijn uitgevoerd, moeten deze eerst herijkt worden o.b.v. een set uniforme uitgangspunten.

We hanteren de volgende rekenwaarden:

- Laagdikte met structuurvorming: 1 m
- Cohesie: 3 kPa
- hoek van inwendige wrijving: 24 graden

Deze waarden als rekenwaarde (ondergrens) zijn besproken in een Lekdijk-breed expertoverleg op 16 december 2021. Daar is het volgende besproken:

- Laagdikte met structuurvorming:
  Schematiseringshandleiding Grasbekleding.

- Cohesie:
  Uit recent onderzoek van de POVM, 'Handelingsperspectief schuifsterkte onverzadigde zone', wordt een verwachtingswaarde van 10 kPa verondersteld, maar met de waarschuwing dat deze niet als defaultwaarden gebruikt moeten worden. Vanwege onzekerheid over scheurvorming in de bovenste laag wordt daarom een lage rekenwaarde van 3 kPa gehanteerd.
- Hoek van inwendige wrijving:
  Op basis van een zelfde inschatting als bij cohesie. Vanwege de onbekendheid van het effect van de structuurvorming, wordt ook voor de hoek van inwendige wrijving een lage rekenwaarde gehanteerd.

NB: Aanscherping van de parameterwaarden met behulp van bijvoorbeeld een proevenverzameling is vindt plaats in stap 5, nadat alle andere stappen doorlopen zijn.

Het resultaat van stap 1 is inzicht in locaties waar GABI zeker niet optreedt en waar GABI mogelijk wel optreedt.

<u>2. Bepaal de opgave voor andere mechanismen.</u>
Bepaal de opgave voor andere mechanismen. Voor locaties waar GABI samenvalt met andere opgaven voor andere mechanismen, adviseert het Adviesteam GABI mee te nemen via een ontwerpoplossing, als dat redelijkerwijs mogelijk is. Vaak kan bijvoorbeeld via de ontwerpoplossing voor macrostabiliteit ook de ontwerpoplossing voor GABI worden gecreëerd.
Toets de ontwerpoplossing aan de onder stap 5 genoemde (aandachts)punten.

De opgave voor de andere mechanismen wordt op reguliere wijze in beeld gebracht en valt buiten het bestek van deze notitie.

Ga verder met stap 3 voor de locaties waar *geen* sprake is samenvallen van een mogelijke opgave voor GABI met een opgave voor andere mechanismen.

Het resultaat van deze stap is inzicht in locaties waar sprake is van een mogelijke enkelvoudige opgave voor GABI én locaties waar GABI meegenomen kan worden in een ontwerpoplossing voor andere mechanismen.

<u>3. Stel een verbetermaatregel uit waar mogelijk *na 2035* een enkelvoudige opgave voor GABI is</u>

De analyse van de veiligheidsopgave vindt in het algemeen plaats o.b.v. het zichtjaar bij de ontwerphorizon (bijvoorbeeld 50 jaar). Ga na *wanneer* GABI mogelijk een probleem wordt, bijvoorbeeld door na te gaan op welk moment het overslagdebiet groter is dan 0,1 l/s/m.
In het kader van de ontwikkeling van het BOI is het de verwachting dat voor de tweede beoordelingsronde (LBO2) nieuwe kennis over GABI in beschikbaar komt, waarmee GABI fysisch scherper, én gekoppeld aan de geldende trajectnorm, beoordeeld kan worden. Mocht in LBO2 blijken dat GABI toch een probleem is, kan de daaruit volgende versterkingsopgave alsnog en uiterlijk 2035 (einde LBO2) geprogrammeerd worden bij het HWBP.

Wanneer GABI pas na 2035 mogelijk een probleem vormt, kan de versterking dus veilig uitgesteld worden. Uiteraard blijft het een projectspecifieke afweging of de versterking ook daadwerkelijk uitgesteld wordt.

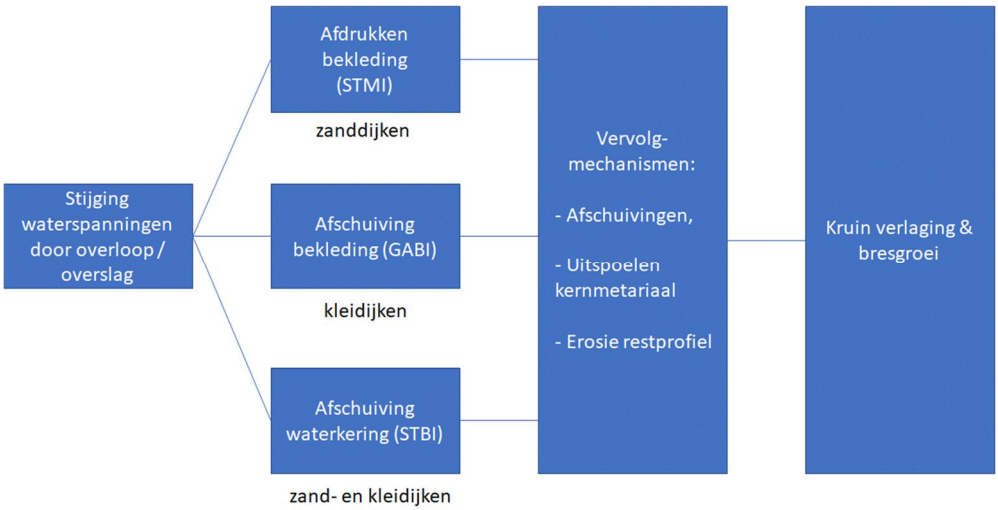
Resultaat: inzicht in de locaties waar GABI mogelijk geen urgent probleem is en waar *veilig een verbetermaatregel uitgesteld kan worden*.

4. Onderbouw of een mogelijke GABI leidt tot *overstroming*

Voor die locaties waar geen andere opgave is (én waar GABI mogelijk voor 2035 optreedt), adviseert het Adviesteam om via een faalpadanalyse te onderbouwen of het reëel is dat GABI tot een overstroming kan leiden.

Over de faalpadanalyse geeft de Memo van het Adviesteam Dijktonwerp het volgende aan:

De invloed van GABI op de overstromingskans kan inzichtelijk worden gemaakt aan de hand Figuur 2.



Figuur 2: Hoofdlijn faalpad GABI en relatie met andere mechanismen

Uit de figuur blijkt dat een overstroming door afschuiving van het binnentalud bij kleidijken kan optreden wanneer 1) er voldoende overloop / overslag is waardoor 2) het talud verzadigd is én 3) instabiliteit van de bekleding optreedt en 4) vervolgmechanismen leiden tot kruinverlaging of bresgroei. Wanneer aan een van deze voorwaarden niet wordt voldaan zal GABI niet leiden tot overstroming.

De Memo van het Adviesteam Dijkontwerp beschrijft niet gedetailleerd hoe een dergelijke faalpadanalyse te doorlopen en tot onderbouwde en plausibele conclusies te komen. Bijlage II bevat een handreiking en aandachtspunten voor een faalpadanalyse. Deze wordt in een later stadium nader uitgewerkt voor een concrete casus en als voorbeeld toegevoegd aan bijlage II.

Indien deze stap van toepassing is, wordt de faalpadanalyse door de deelprojecten en in afstemming met het technisch team in detail uitgewerkt.

Het resultaat van deze stap is inzicht in de significantie van de kans op doorbraak door GABI, verondersteld dat GABI optreedt.

5. Bepaal de versterkingsopgave

Indien de kans op een overstroming als GABI optreedt significant is, zijn er verschillende modellen beschikbaar om nader te analyseren *of* GABI optreedt: Edelman Joustra en Spencer – Van der Meij,

zoals geprogrammeerd in D-GeoStability. Daarnaast kunnen de parameterwaarden lokaal bepaald worden met behulp van een proevenverzameling.

Voor het doorlopen van stap 5 geldt dat afstemming met het technisch team daarover nodig is.

Modellen.
Spencer – Van der Meij geeft een nauwkeuriger beeld van de stabiliteit. Bij het gebruik van deze benadering moet het freatisch vlak gelijk genomen worden aan het talud (maaiveld). Verder hanteren we dezelfde partiele factoren als bij Edelman Joustra (en niet de methodiek van STBI, omdat de kalibratie hiervan te verschillend is).
Ook kan een projectspecifieke probabilistische analyse kan worden uitgevoerd.

Aanscherping parameterwaarden.
Edelman Joustra en Spencer – Van der Meij gebruiken grofweg dezelfde parameters, waarvan dikte van de afschuivende laag cohesie en hoek van inwendige wrijving dominant zijn (zie ook de analyse van RPS voor Salmsteke[3]).
Bij de bepaling daarvan gelden de volgende aandachtspunten:

- Dikte afschuivende laag:
    - Er zijn in ieder geval twee scenario's denkbaar: 1) afschuiven aangebrachte toplaag (preferent glijvlak) en 2) afschuiven zone met structuurvorming. Wanneer scenario 2 zich kan voordoen, is die maatgevend. Wanneer scenario 2 zich niet kan voordoen, moet gecontroleerd worden of scenario 1 kan voorkomen. Met behulp van een guts kan in het veld eenvoudig nagegaan worden of er een duidelijk overgang zichtbaar is.
    - De dikte van de afschuivende laag met structuurvorming is typisch orde 1 m. De dikte van deze laag is in te schatten aan de hand van de trekscheurdiepte. Deze is te bepalen m.b.v. The International Levee Handbook, zie bijlage III. Daarvoor zijn de cohesie, hoek van inwendige wrijving en volumiek gewicht nodig. Daarnaast geldt ook hier dat met behulp van een guts in het veld de dikte van de laag met structuurvorming nagegaan kan worden.
- Cohesie en hoek van inwendige wrijving
    - De effectieve sterkteparameters kunnen worden bepaald middels een serie isotroop geconsolideerde ongedraineerde triaxiaal proeven op verzadigde klei bij in-situ dichtheid en een aangepast spanningsbereik[4]. Hierbij kan bijvoorbeeld worden uitgegaan van 2 proeven bij lage spanning (bijvoorbeeld 10kPa) en 2 proeven ruim voorbij de grensspanning. Hierbij is het wel van belang dat de proefstukken homogeen zijn. Bepaling van de cohesie is niet altijd eenduidig omdat het een schijnbare parameter is die het resultaat is van regressieanalyse en extrapolatie. De bepaling moet samen worden uitgevoerd met de hoek van inwendige wrijving.
    - Als alternatief kan de ongedraineerde schuifsterkte worden bepaald uit veldproeven, zoals handsondering of veldvintest (torvane/handvane), of correlaties met de consistentieindex (incl. dichtheid en Atterbergse grenzen). Dit vraagt dan nog wel een omrekening naar effectieve sterkteparameters of een ongedraineerde evenwichtsbeschouwing.

[3] Notitie Salmsteke GABI, RPS, 2 maart 2021. Referentie: 2020116970
[4] Cover layer stability during wave overtopping. WTI 2017 Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium, Deltares 1209437-003. Delft, maart 2015.

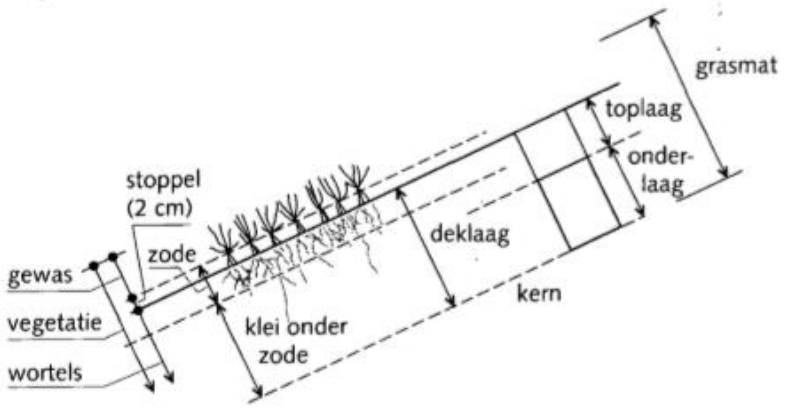
6. Stel een ontwerp voor GABI op

Wanneer GABI potentieel een significante bijdrage levert aan de overstromingskans (stap 4) én het fysisch mogelijk is (stap 5), is er een enkelvoudige ontwerpopgave. Bij het ontwerp kunnen de eenvoudige beslisregels uit het WBI worden toegepast (robuuster ontwerp) of de onder stap 5 genoemde methoden. Verder gelden de volgende aandachtspunten:

- In het OI 2014 (tabel 5) wordt bij een kritiek overslagdebiet van meer dan 1 l/s/m aanbevolen om:
    - Gesloten - of open zode op een kleilaag dikte van minimaal 0,4m toe te passen,
    - Afschuiven (en afdrukken) van de kleibekleding te controleren en
    - Uit te gaan van een minimale helling talud 1H:2,3V.
- De bepaling van de sterkte-eigenschappen zijn niet expliciet benoemd in het OI. Ook de verwerking en verdichting van de kleilaag, die in grote mate bepalend zijn voor de sterkte zijn niet expliciet benoemd in het OI2014. De specificatie ten aanzien van minimale en maximale waarden van het watergehalte voor optimale verwerking zijn opgenomen in diverse richtlijnen. De maximale waarde dient tevens om structuurvorming te beperken, en daarmee de mate van scheuren en verzadiging bij overslag.

  Onderstaand zijn een aantal relevante bepalingen overgenomen uit verschillende richtlijnen, inclusief de achterliggende reden of functie. Geadviseerd wordt een overwogen keuze te maken bij toepassen van deze bepalingen in de projecten aangezien er ook wat overlap in zit:
    - Addendum Leidraad Rivieren geeft minimale en maximale waarden voor het lutum gehalte. De minimale waarde dient voor de waterdichtheid, echter is die tevens afgedekt met eisen die gesteld worden aan stevige klei. Het maximum lutumgehalte van 35% is relevant om structuurvorming te beperken.
    - TR Klei voor dijken; na verdichting moet de droge dichtheid tenminste 97% van de proctordichtheid (éénpuntsproctorproef) bij het aanwezige watergehalte bedragen.
    - TR Klei voor dijken; het in-situ (onverzadige) watergehalte waarbij de klei in de deklaag verwerkt moet tenminste gelijk zijn aan het optimum watergehalte (proctorproef) en maximaal gelijk aan de getalswaarde voor het watergehalte bij consistentieindex van 75%: $w_{opt} < w_n < w_L - 0{,}75 * I_P$. De bovengrens dient tevens om structuurvorming te beperken.
    - Update inzichten in gebruik van klei voor ontwerp en uitvoering van dijkversterking [6]; het in-situ watergehalte bij verwerking moet tenminste gelijk zijn aan 90% van de uitrolgrens: $0{,}9 * w_P < w_n$. Het maximale watergehalte is gelijk aan dat van TR Klei voor dijken.

Met betrekking tot de definitie van kleilaag dikte in het OI2014 en de specificatie in de richtlijnen is het niet evident of dit de gehele deklaag of alleen de onderlaag betreft. Geadviseerd wordt de minimale kleilaagdikte en verwerkingsspecificaties tenminste toe te passen op de onderlaag, zoals weergegeven in Figuur 3.



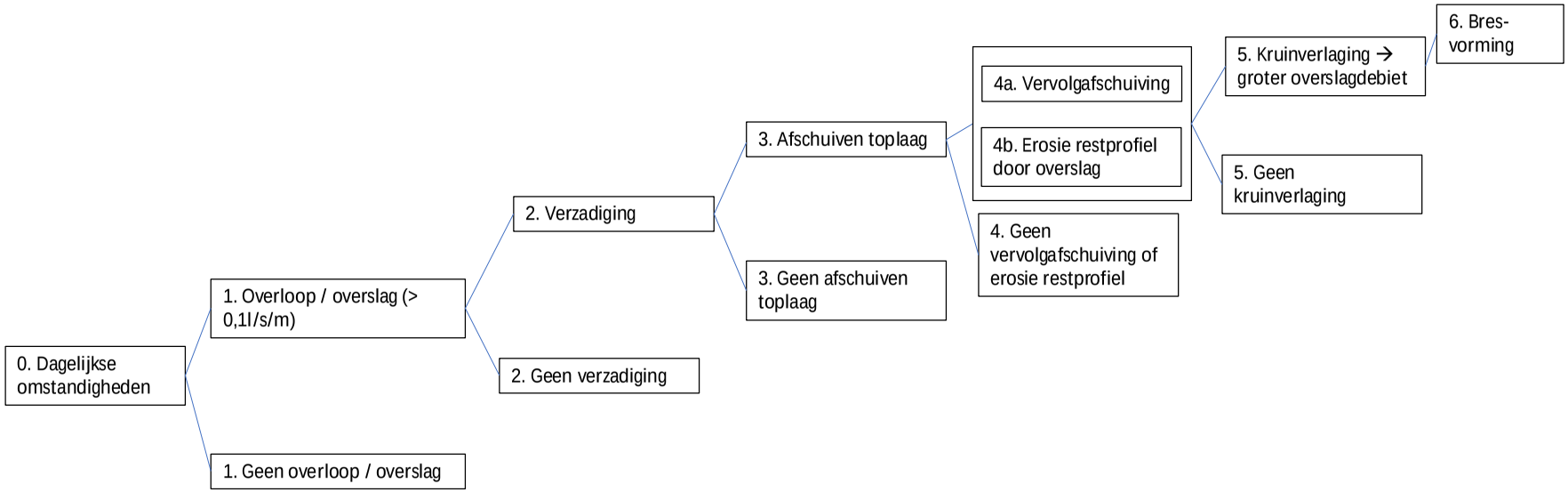
Figuur 3: Definitie kleibekleding

Bijlage I – Memo advies 119 Adviesteam Dijkontwerp

Bijlage II – Handreiking en aandachtspunten faalpadanalyse GABI

Deze handreiking (zie figuur volgende pagina) is tot stand gekomen in een tweetal sessies (op 2 juli 2021 en op 31 augustus 2021) op basis van een casus bij Salmsteke. Bij deze sessies waren specialisten van het Adviesteam, het technisch team HDSR en de betrokken innovatiepartners betrokken.

De handreiking bevat, sterk op hoofdlijnen, het faalpad tot bresvorming. Per knoop in het faalpad is een aantal aandachtspunten aangegeven. NB. Per locatie en deelproject kan het faalpad er anders uitzien. Betrek bij de uitwerking van een faalpadanalyse het technisch team van HDSR.



Aandachtspunten algemeen:
- Objectieve en herleidbare kwantificering van de knoopkansen is een aandachtspunt. Betrek daarbij experts.

Aandachtspunten knoop 1:
- 0,1 l/s/m als grenswaarde, getal voor 'geen overslag = geen probleem' niet: 'vanaf 0,1 l hebben we een probleem'. Vraag is dus: hoeveel overslag is er en hoe lang?
- Kans op >0,1l/s/m

Aandachtspunten knoop 2:
- Duur overslagperiode (vermoedelijk orde 12 uur)
- Door structuurvorming lastig in te schatten tot welke diepte de verzadiging optreedt
- Scheuren zullen snel vollopen en de sterkte van de grond neemt snel af. Een cohesie van 5 kPa is echter redelijk om aan te nemen
- 'Geen verzadiging' kan ook door actief ingrijpen bereikt worden (bv door het verminderen van de overslaghoeveelheid door zandzakken of beperken van de infiltratie door afdekken binnentalud). Of dergelijke ingrepen realistisch zijn, dient te worden afgestemd met het Assetteam.

Aandachtspunten knoop 3:
- Door structuurvorming lastig in te schatten op welke diepte het afschuifvlak optreedt.
- Welke sterkte heb je nodig? En is dat realistisch?

Aandachtspunten knoop 4a:
- Stabiliteit neemt toe als bekleding naar ondertalud schuift (weerstandbiedend deel)
- Blijft het afgeschoven materiaal liggen? (Mogelijk een losse knoop)
- De vorm van het initiële glijvlak is medebepalend voor de vervolgprocessen.
- Mogelijkheid voor actief ingrijpen en 'hersteltijd' (zie ook aandachtspunt bij knoop 2).

Aandachtspunten 4b:
- Je hebt maximaal orde 12 uur (duur storm) met maximaal 5 l/s/m voor erosie restprofiel
- 5 l/m/s leidt waarschijnlijk niet tot erosie van de kleikern. Wel kan de funderingslaag van de weg eroderen waarna de kruin daalt en het overslagdebiet toeneemt. De onderlaag bestaat waarschijnlijk uit verdicht aangestampt granulaat dat minder erosiegevoelig is. Ook is genoemd dat de gradiënt waaronder de onderlaag erodeert wellicht niet tot kruinverlaging leidt ter plaatse van de rivierzijde.
- Onzekerheid opbouw dijk: opbouw /afmeting wegconstructie: puin, zand, klei?
- Water kan minder makkelijk infiltreren dan in de toplaag (kern minder poreus)

Bijlage III – Bepalen laagdikte volgens het International Levee Handbook

8.6.3.6 Cracking assessment

When soils at the crest of the slope have cohesion, the calculated values for the normal forces and side forces in this area are often negative. Negative forces are consistent with what would be calculated by classical earth pressure theories for the active condition. The negative stresses result from the tensile strength that is implicit for any soil having a Mohr-Coulomb failure envelope with a cohesion intercept. This type of shear strength envelope implies that the soil has tensile strength. Because few soils have tensile strength that can be relied on for slope stability, tensile stresses should be eliminated before an analysis is considered acceptable. Tensile stresses can be eliminated from an analysis by introducing a vertical tension crack near the upper end of the slip surface. The slip surface is terminated at the point where it reaches the bottom of crack elevation (Figure 8.96). The appropriate crack depth can be determined in either of the following ways:

- a range of crack depths can be assumed and the factor of safety calculated for each depth. The crack depth producing the minimum factor of safety is used for final analyses. The depth yielding the minimum factor of safety will correspond closely to the depth where tensile stresses are eliminated, but positive (driving) stresses are not
- the crack depth can be estimated as the depth over which the active Rankine earth pressures are negative. For total stresses and homogeneous soil the depth is given by:

$$d_{crack} = \frac{2c}{\gamma \tan(\pi/4 - \varphi/2)} \tag{8.176}$$

where C and φ represent the developed cohesion (kPa) and friction angle (°) respectively, γ the soil unit weight (kN/m³). Similar expressions can be developed for the depth of tension for effective stresses and/or non-homogeneous soil profiles.

In some cases the depth of crack computed using Equation 8.176 will be greater than the height of the slope. This is likely to be the case for low embankments of well-compacted clay. For embankments on weak foundations, where the crack depth computed using Equation 8.176 is greater than the height of the embankment, the crack depth used in the stability analyses should be equal to the height of the embankment, so the crack should not extend into the weak foundation. In this case, the engineer must take great care concerning the validity of the limit equilibrium assumptions and the definition of the slip surface. Stress-deformation may be necessary.

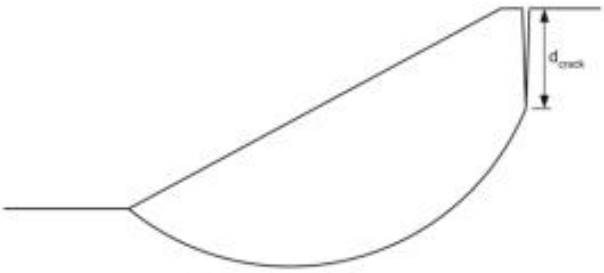


Figure 8.96 Vertical crack modelling