

WTI2017
Faalmechanismebeschrijving
grasbekleding

Product 5.26



WTI2017
Faalmechandisebeschrijving
grasbekleding

Product 5.26

Andre van Hoven

1220086-002

Titel
WTI2017 Faalmechanismebeschrijving grasbekleding

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	1220086-002	1220086-002-HYE-0001- gbh	23

Trefwoorden

faalmechanismebeschrijving grasbekleding, afschuiven, erosie, golfklappen, golfploop, golfoverslag, wettelijke toetsinstrumentarium 2017, WTI2017, graszode, kleibekleding

Samenvatting

Binnen het kader van het WTI2017 programma wordt het toetsinstrumentarium ontwikkeld voor de vierde toetsronde van de primaire waterkeringen. Het instrumentarium bestaat uit bouwstenen waarvan de faalmechanismebeschrijving voor het mechanisme grasbekledingen er één is. Het faalmechanisme grasbekledingen bestaat uit vier sporen, afschuiven van de grasbekleding van het binnen- en buitentalud en erosie van de grasbekleding van het binnen- en buitentalud. Deze rapportage bevat de procesmatige beschrijving van het mechanisme, in tekst en in een schema. De rapportage is opgesteld door het inhoudelijke cluster Macrostabieleit en wordt opgeleverd aan het cluster A Raamwerk.

Summary

Within the WTI2017 framework safety assessment rules are developed for use in the fourth statutory safety assessment of Dutch water defences. The assessment of grass revetments is one part of the overall safety assessment and holds four failure mechanisms; erosion of the water side slope and landward slope and slip failure of the water side slope and landward slope. This report holds the description of the failure process from initial damage to failure of the dike and which part of the failure process is actually assessed. The report is a product for WTI cluster 'Framework'.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	mei 2015	Ir. A. van Hoven		Ing. H.T.J. De Bruijn		Ir. L. Voogt	
2	aug 2015	Ir. A. van Hoven		Ing. H.T.J. De Bruijn		Ir. L. Voogt	

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Grasbekleding afschuiven buitentalud (GABU)	3
2.1	Inleiding en afbakening	3
2.2	Fenomenologische procesbeschrijving GABU	3
2.3	Schematisch overzicht aan de hand van gebeurtenissenboom GABU	6
2.4	Te toetsen onderdelen GABU	7
3	Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU)	9
3.1	Inleiding en afbakening	9
3.2	Fenomenologische procesbeschrijving GEBU	9
3.2.1	Erosie door golfklappen	9
3.2.2	Erosie door golfoploop	11
3.3	Schematisch overzicht aan de hand van gebeurtenissenboom GEBU	12
3.4	Te toetsen onderdelen GEBU	13
3.4.1	Erosie door golfklapbelasting	13
3.4.2	Erosie door golfoploop	13
4	Grasbekleding afschuiven binnentalud (GABI)	15
4.1	Inleiding en afbakening	15
4.2	Fenomenologische procesbeschrijving GABI	15
4.3	Schematisch overzicht aan de hand van gebeurtenissenboom GABI	19
4.4	Te toetsen onderdelen GABI	19
5	Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB)	21
5.1	Inleiding en afbakening	21
5.2	Fenomenologische procesbeschrijving GEKB	21
5.3	Schematisch overzicht aan de hand van gebeurtenissenboom GEKB	23
5.4	Te toetsen onderdelen GEKB	23
	Bijlage(n)	
	Referenties	1

1 Inleiding

Het WTI2017 programma wordt door Rijkswaterstaat WVL en Deltares uitgevoerd en moet leiden tot de oplevering van het Wettelijk Toetsinstrumentarium voor de vierde toetsronde. Het toetsinstrumentarium bestaat uit verschillende bouwstenen, waarvan de faalmechanismebeschrijving voor het faalmechanisme grasbekledingen er één is. Dit betreft product 5.26 uit het projectplan voor cluster 5. Het product wordt opgeleverd aan het cluster raamwerk (cluster A).

Er zijn vier faalmechanismen gedefinieerd voor grasbekledingen. Afschuiven buitentalud (GABU), erosie buitentalud (GEBU), erosie kruin en binnentalud (GEKB) en afschuiven binnentalud (GABI). Elk van de mechanismen is apart beschreven. De faalmechanismen kunnen, al dan niet gevolgd door vervolgmecanismen, leiden tot een bres. Bij het ontstaan van een bres faalt de waterkering.

2 Grasbekleding afschuiven buitentalud (GABU)

2.1 Inleiding en afbakening

Het mechanisme betreft stabiliteitsverlies van het geheel van graszode en kleilaag op het grensvlak met een onderliggende zandlaag. De zandlaag zal in het algemeen de zandkern van een dijk zijn, het is echter ook mogelijk dat sprake is van een plaatselijk aanwezige zandlaag of zandinsluiting onder de kleilaag (bijvoorbeeld een zogenaamde zandscheg).

De faalmechanismebesrijving is deels ontleend aan [1]. Deze studie is onder andere uitgevoerd voor de situatie van een steenzetting op een kleilaag op zand, maar is evengoed toepasbaar voor een graszode op een kleilaag.

Het toetspoot heet 'afschuiven', echter hiermee wordt stabiliteitsverlies bedoeld. De kleilaag kan als gevolg van een te groot drukverschil over de kleilaag namelijk afschuiven, maar ook opdrukken of een combinatie van beide mechanismen vertonen.

Dit mechanisme gaat niet om de gevolgen van golfklappen op de gras- en kleibekleding. Golfklappen zouden door een cyclische belasting van het onderliggende zand ook voor tijdelijke en gedeeltelijke verweking van het zand kunnen zorgen, waardoor de kleilaag plaatselijk de steun van het zand verliest en als gevolg daarvan vervormt. Aangenomen wordt dat dit effect voor gangbaar aanwezige kleilaagdikttes geen rol van betekenis speelt.

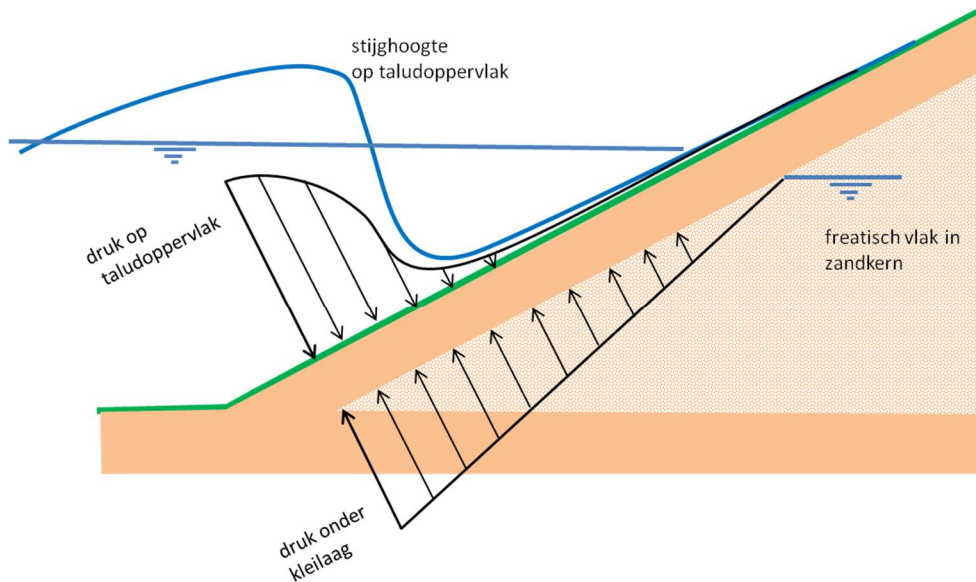
Ook plaatselijke vervormingen van de kleilaag zelf als gevolg van golfklappen maken geen onderdeel uit van het hier beschreven mechanisme. Deze vervormingen worden geacht binnen de perken te blijven indien wordt voldaan aan de criteria die worden gesteld aan het toetspoot GEBU.

Er is een gelijkenis van het mechanisme met het mechanisme buitenwaartse macrostabiliteit. De belasting bij buitenwaartse macrostabiliteit bestaat uit een val van hoogwater, en het achterblijven van hoge waterspanningen in de dijk (falen is daarmee niet gecorreleerd aan hoogwater). Het effect van golven wordt bij het mechanisme buitenwaartse macrostabiliteit niet meegenomen. De karakteristieke tijd waarbinnen het mechanisme kan optreden is in de orde van een etmaal tot dagen, waarbij relatief diepe glijvlakken kunnen optreden. Bij het mechanisme GABU is dit anders. De belastingsituatie is gekoppeld aan een hoogwatersituatie in combinatie met hoge golven en dus niet strikt aan een situatie met een lage buitenwaterstand na hoogwater. Bij GABU wordt alleen de stabiliteit van de kleibekleding beschouwd (relatief ondiepe glijvlakken) Bij de belasting wordt de mate van golferugtrekking beschouwd. De karakteristieke tijd is in de orde van seconden.

2.2 Fenomenologische procesbeschrijving GABU

Tijdens extreme omstandigheden, bij een hoge waterstand en hoge golven, kan een voor de stabiliteit van de bekleding op het buitentalud ongunstige situatie optreden. Als het freatisch vlak in het zand onder de klei hoog is, dan is ook de druk onder de kleilaag hoog. Echter op het moment van golfneerloop, vlak voordat er een volgende golf op het talud klappt, is de druk op het talud juist laag. Hierdoor ontstaat over een deel van de kleilaag een ongunstig buitenwaarts gericht verval. Op het punt van maximale golfneerloop is het drukverschil over de kleilaag het grootst (Figuur 2.1). Hier zal de effectieve spanning op het grensvlak tussen de kleilaag en het zand het meest afnemen of zelfs helemaal verloren gaan, wat kan leiden

tot stabiliteitsverlies van de kleilaag. Het al dan niet optreden van stabiliteitsverlies van de kleilaag is wat wordt getoetst, reststerkte wordt bij dit mechanisme niet in rekening gebracht.



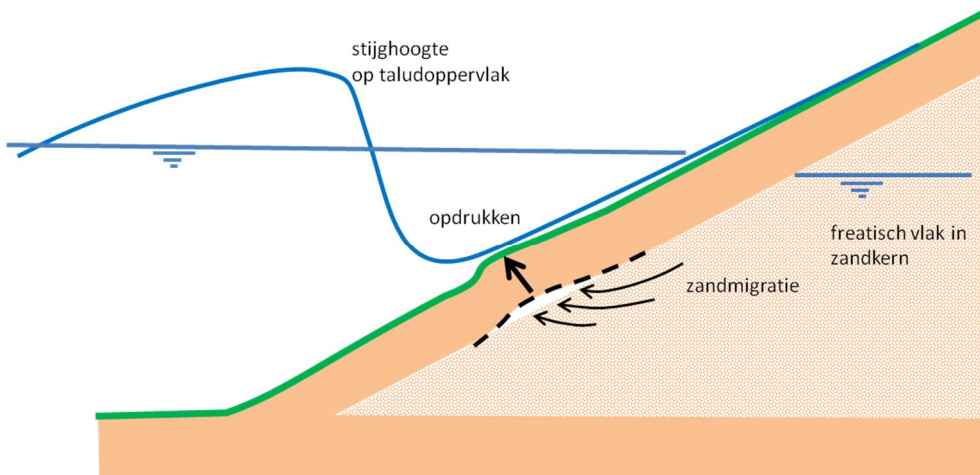
Figuur 2.1 Schematische weergave kritische situatie voor de stabiliteit van de kleibekleding bij golfneerloop

Voor het optreden van een ongunstig verval over de kleilaag is het van belang dat in het zand onder de kleilaag een relatief hoog freatisch vlak aanwezig is, in elk geval hoger dan het punt van maximale golfneerloop. Dit is denkbaar als de bekleding, of in elk geval een deel van de bekleding, relatief doorlatend is en er tijdens een hoogwater water in het zand dringt. Hierbij wordt opgemerkt dat ook in de golfoploopzone water in de dijk kan infiltreren, waardoor het freatische vlak stijgt. Ook indien het onderliggende zandlichaam klein is, bijvoorbeeld in het geval van een zandscheg, dan zal het freatische vlak hierin snel kunnen oplopen.

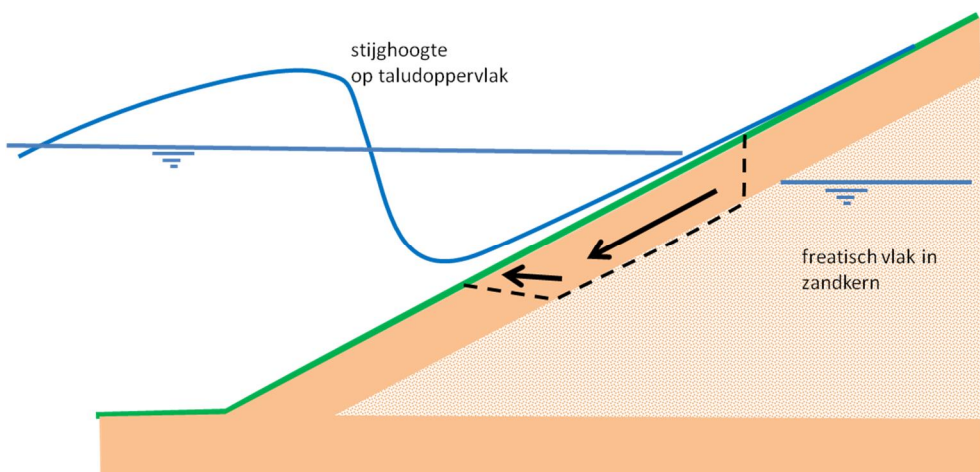
Een hoog freatisch vlak in de dijk kan ook optreden indien er onder dagelijkse omstandigheden onvoldoende drainage van de zandkern mogelijk is in combinatie met een langdurige regenperiode. Dit kan dan leiden tot stabiliteitsproblemen van de kleilaag en/ of het uitspoelen van zand, ofwel wel micro-instabiliteit. Het zal echter alleen tot een veiligheidsprobleem kunnen leiden als dit gelijktijdig optreedt met een extreem hoogwater in combinatie met hoge golven. Bij de toetsing op veiligheid van primaire waterkeringen wordt hiermee voor het buitentalud geen rekening gehouden.

Een tweede factor van belang voor een ongunstig verval is de golfneerloop. Bij grote golven is het verschil tussen de buitenwaterstand en het punt tot waar de golf zich terugtrekt het grootst. Hoe groter de golfhoogte hoe ongunstiger dit is.

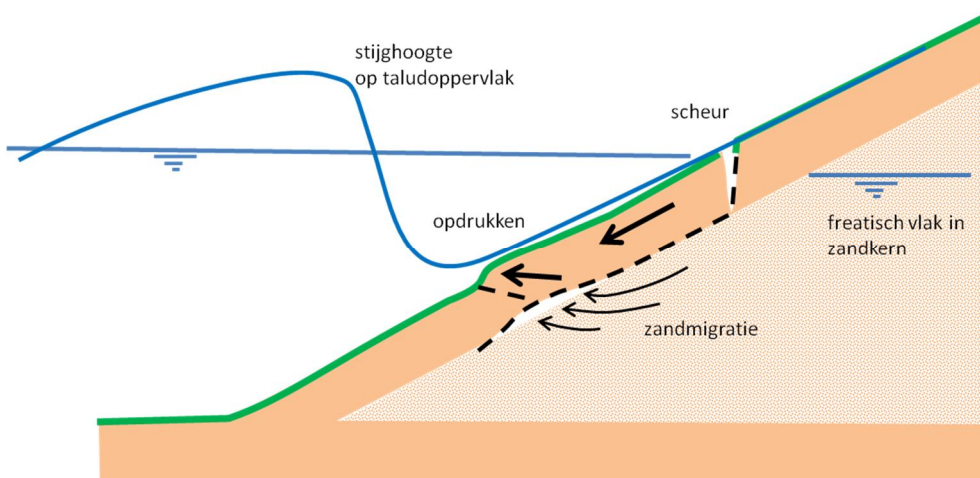
Het ongunstige verval over een deel van de kleilaag kan leiden tot opdrukken van de kleilaag (Figuur 2.2), tot afschuiven van de kleilaag (Figuur 2.3) of tot een combinatie van beide mechanismen (Figuur 2.4). Welk van de mechanismen maatgevend is, hangt af van de specifieke situatie, zoals van de sterkte van de kleilaag, de dikte en het gewicht van de kleilaag, de drukverdeling over de kleilaag en de taludhelling.



Figuur 2.2 Opdrukken van de kleilaag als de druk onder de kleilaag plaatselijk hoger is dan de druk boven de kleilaag plus de gewichtsc component van de kleilaag loodrecht op het talud



Figuur 2.3 Afschuiven van de kleilaag. Hierbij hoeft geen opdrukken op te treden



Figuur 2.4 Combinatie van opdrukken en afschuiven

Voor het opdrukken van de kleilaag (Figuur 2.2) is het nodig dat de druk onder de kleilaag minimaal gelijk is aan gewichtsc component van de kleilaag loodrecht op het talud plus de eventueel nog aanwezige waterdruk op het talud. In een grootschalige Deltagoot proef is waargenomen dat een 1,4 keer hogere druk niet heeft geleid tot falen door opdrukken [1]. Dit kan mogelijk worden verklaard doordat het opdrukken slechts plaatselijk optreedt; de drukverdeling over de kleilaag boven en onder het punt van maximale golfterugtrekking is gunstiger. Daarbij heeft een kleilaag mogelijk enige sterkte tegen doorbuiging door enerzijds boogwerking in de klei en aanvullend hierop, specifiek voor grasbekledingen, een treksterkte bovenin de kleilaag door de wortels in de zode.

Bij het regelmatig onder golfwerking enigszins opdrukken van de kleilaag kan de ontstane holte tussen de kleilaag en de zandkern worden opgevuld door migratie van zand. Dit leidt tot irreversibele kleine vervormingen van de kleilaag. Dit hoeft niet tot het falen van de bekleding te leiden, tenzij de vervormingen zodanig worden dat de klei en de graszode breken. Dit zou een geleidelijk proces kunnen zijn veroorzaakt door opeenvolgende grote golven die telkens voor een klein beetje extra deformatie zorgen.

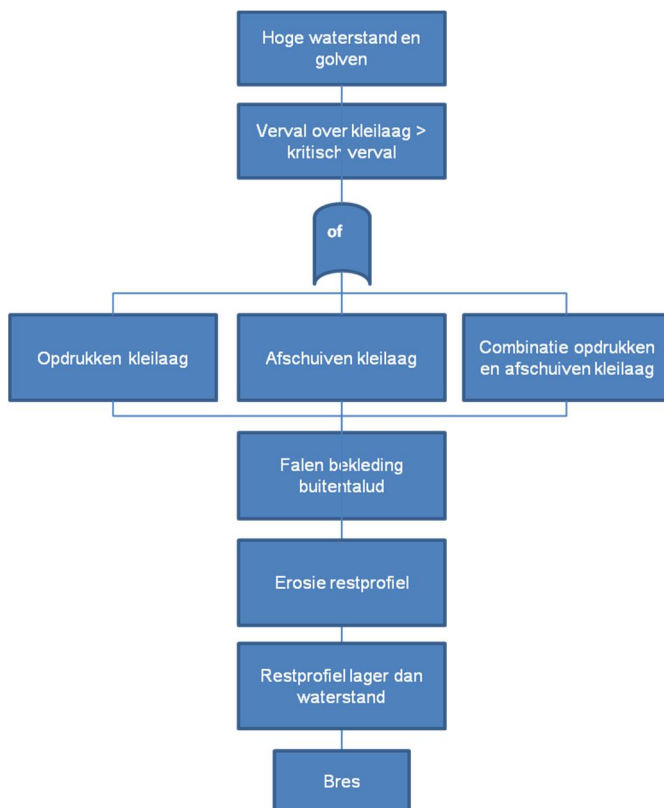
Wordt de druk te hoog dan zal de kleilaag opbarsten en breekt de kleilaag, inclusief de graszode. Dit kan gepaard gaan met het plotseling uitspoelen van zand. Bovendien zal de erosiebestendigheid van de bekleding, graszode en klei, zijn aangetast. Golven zullen eerst de restanten van de kleilaag en vervolgens het onderliggende zand eroderen. Uiteindelijk kan dit leiden tot een zodanig erosie dat een bres ontstaat en overstroming van het achterland optreedt.

Ook zonder opdrukken van de kleilaag kan falen optreden door afschuiven van een deel van de kleilaag optreden (Figuur 2.3). Bij steile taludhellingen kan de schuifsterkte op het vlak tussen de kleilaag en de zandkern al grotendeels zijn gemobiliseerd, enkel door het gewicht van de kleilaag. Een ongunstige verandering van het verval over de kleilaag kan daarop leiden tot het afschuiven van de kleilaag. De kleilaag zal min of meer evenwijdig aan het talud afschuiven. Onderaan, waarschijnlijk nabij het laagste punt van de terugtrekkende golf, zal de grondmoot uitbreken. Bovenaan zal een scheur ontstaan. Na het gedeeltelijk afschuiven van de kleilaag is een verder proces tot aan overstromen van het achterland mogelijk zoals hierboven omschreven.

Een derde, gecombineerde, mogelijkheid van falen is het opdrukken en opbarsten van de kleilaag, aansluitend gevolgd door het afschuiven van de bovenliggende kleilaag (Figuur 2.4). Door het opbarsten verliest de bovenliggende grond zijn steun. Het opdrukken en opbarsten helpt als het ware het uitbreken van het stukje glijvlak onderaan de afschuivende kleilaag. Het vervolproces tot aan eventueel overstromen van het achterland verloopt ook hier zoals boven beschreven.

2.3 Schematisch overzicht aan de hand van gebeurtenissenboom GABU

Het proces dat leidt tot een bres als gevolg van instabiliteit van de grasbekleding op het buitentalud staat in het onderstaande stroomschema.



Figuur 2.5 Gebeurtenissen leidend tot bezwijken dijk door afschuiven van de grasbekleding op het buitentalud

2.4 Te toetsen onderdelen GABU

Voor de gedetailleerde toetsing wordt het black-box model gebruikt dat is ontwikkeld voor steenzettingen op een kleilaag (zie [1] en [2]). Alleen de dikte van de kleilaag, golfhoogte en de taludhelling worden beschouwd. Op basis van een empirische formule wordt met deze parameters getoetst of de kans op afschuiven van de bekleding voldoende klein is. Rest sterkte wordt niet meegenomen. Een afschuivende bekleding zal op een zand ondergrond liggen, waarvan de reststerkte mogelijk gering is en nog onvoldoende bekend.

In een toets op maat kan een schatting worden gemaakt van de optredende waterspanningen in het onderliggende zand en op het talud en kan de geotechnische stabiliteit worden berekend. Hiervoor zijn diverse modellen beschikbaar, bijvoorbeeld D-Geostability met het Spencer - van der Meij model [3], of een FEM-programma.

3 Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU)

3.1 Inleiding en afbakening

Falen van de grasbekleding treedt op als de toplaag van ongeveer 20 cm dikte verdwenen is door erosie. Deze dikte bevat in elk geval de graszode, maar ook nog een stukje onder de zode waar nog veel wortels in zitten en waar wortels nog een grote positieve bijdrage leveren aan de erosiebestendigheid van de grond. Falen van de waterkering treedt op als na het falen van de grasbekleding ook de reststerkte onvoldoende is en er een bres ontstaat.

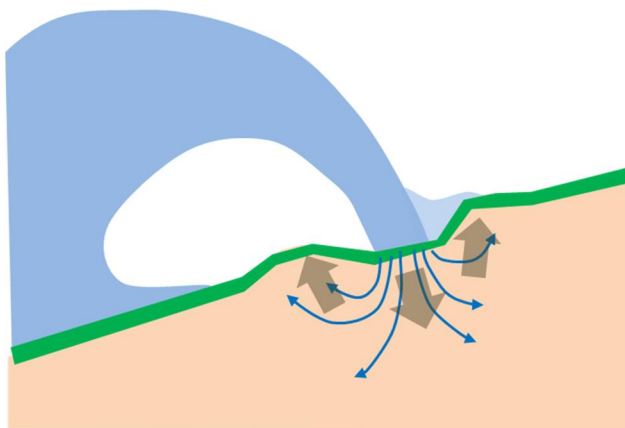
Bij de toetsing van de grasbekleding op erosie van het buitentalud worden twee belastingtypes beschouwd, de golfklapbelasting en de golfloop belasting. Aan stroming langs de dijk wordt geen aandacht besteed.

Een golfklapbelasting treedt op iets onder de waterlijn. In de toetsing wordt ervan uitgegaan dat golfklappen optreden in de zone tussen het waterpeil en een halve significante golfhoogte onder dit peil. Met het variëren van het waterpeil gedurende een hoogwatergolf of stormopzet varieert dus ook de plek waar de golfklappen optreden. Golfloop treedt op in de zone boven het waterpeil, tot de hoogte die door de oplopende golftong wordt bereikt. Ook deze zone varieert dus met de waterstand en de golfcondities.

3.2 Fenomenologische procesbeschrijving GEBU

3.2.1 Erosie door golfklappen

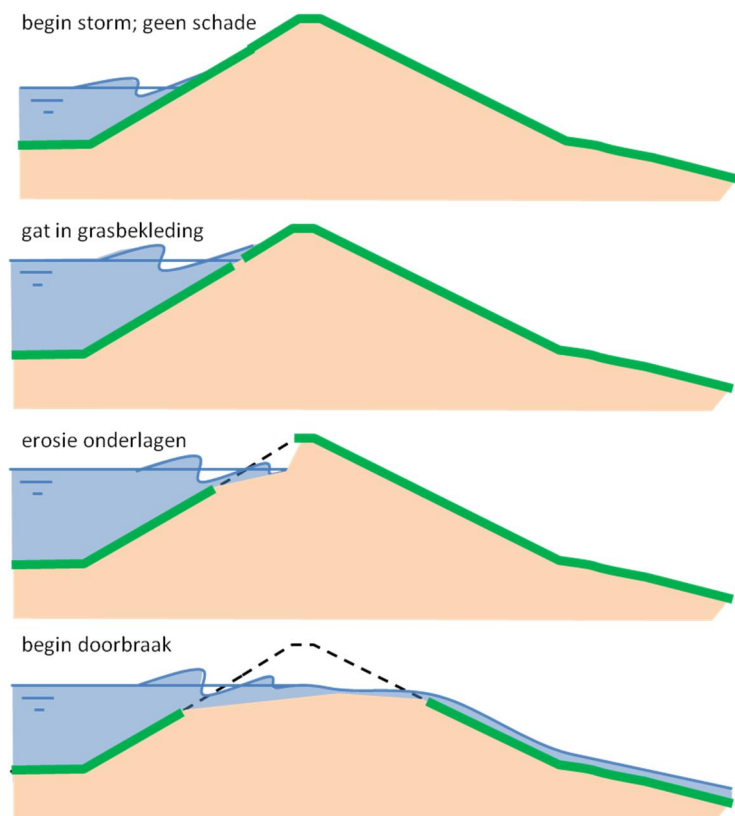
Een golfklap door een brekende golf op het talud geeft een kortdurende lokale hoge waterdruk op het talud. Deze drukpuls dringt door in de zode en de onderliggende dijk en veroorzaakt hier drukgradiënten, die de zode kunnen beschadigen en delen ervan verwijderen uit de grasbekleding. Tijdens het optreden van de piekdruk wordt de zode naar binnen, zijwaarts en naar buiten gedrukt (Figuur 3.1, overgenomen uit [4]). Net na het wegvallen van de druk door de golfklap, kan er een situatie ontstaan waarbij in en onder de zode nog even een overdruk aanwezig is, waardoor een buitenwaarts gerichte drukgradiënt ontstaat die de zode naar buiten drukt. Bij grote golfklappen wordt grond plastisch en treden irreversibele vervormingen op. Dit alles gebeurt in heel korte tijd, in een fractie van de golfperiode.



Figuur 3.1 Schematische weergave van een golfklap op het talud, de grondwaterstroming (dunne blauwe peilen) en grondverplaatsing (dikke bruine peilen)

Een dicht gewoven wortelnet van een graszode heeft een grote sterkte en veerkracht. Uit golfgootproeven en ervaringen tijdens hoogwater in het verleden is gebleken dat de dichtheid van het wortelnet een veel belangrijker factor is in de erosiebestendigheid van de grasbekleding dan de erosiebestendigheid van de grond [5]. Een gesloten zode met een gesloten wortelnet op een weinig erosiebestendige schrale grond zal een golfklapbelasting veel langer kunnen weerstaan dan een open zode met een minder dicht wortelnet in combinatie met een erosiebestendige grond. Een dicht wortelnet houdt de grond in de zode op een effectieve manier vast. Echter, onder herhaalde belastingen van golfklappen kan het wortelnet uiteindelijk toch scheuren en eroderen. Dit is een deelmechanisme van GEBU. Zowel de golfhoogte als de tijdsduur van de golfklapbelasting zijn hierbij van belang.

Na het ontstaan van een gat in de graszode wordt de dijk aangesproken op reststerkte, het tweede deelmechanisme binnen GEBU. De losse klei vlak onder de zode zal snel eroderen. Het gaat om de laag van maaiveld tot circa 0.3 m diepte die bestaat uit een relatief losse stapeling van aggregaten, waar het wortelnet van de graszode afwezig is, of in elk geval niet meer zo effectief is als in de bovenste circa 0.2 m. De direct naast het gat gelegen zode wordt ondermijnd, doordat de losse grond van onder de zode kan wegspoelen. De randen van het ontstane gat in de zode kunnen ook aanleiding zijn voor een concentratie van de belasting. Bij verder gaande erosie van de klei onder de graszode ontstaat een flauw talud (terras) net onder de waterlijn en een steile wand bij de insteek van de erosiekuil (Figuur 3.2). Naar dit proces van erosie van de onderlagen, is veel onderzoek gedaan, mede door middel van grote golfgootproeven. In klei zal dit proces uiteraard veel langzamer gaan dan in zand. Als er zand aanwezig is, dan wordt er geen reststerkte in rekening gebracht. Voor klei wordt onderscheid gemaakt tussen de laag tot 0,5 m onder het taludoppervlak en klei die dieper zit. Voor beide lagen is een apart erosiemodel.



Figuur 3.2 Schematische weergave doorbraakproces na falen van de grasbekleding door golfklappen

Als erosie leidt tot een resterend dijkprofiel dat lager is dan de waterstand dan overstroomt het achterland en faalt de dijk. Verlaging van het profiel beneden de waterstand kan optreden als gevolg van doorgaande erosie. Het is echter ook mogelijk dat in een eerdere fase van het erosieproces, waarbij nog maar een deel van de dijk is verwijderd door erosie, een ander mechanisme optreedt. Door het steeds smaller wordende profiel kan het binnentalud van de dijk eerder afschuiven door toenemende waterspanningen in de dijk (micro- of macro-instabiliteit) of door overslaande golven (stabiliteit bekleding bij golfoverslag).

3.2.2 Erosie door golfoploop

De belasting die erosie van de grasbekleding kan veroorzaken bestaat in geval van de oploopzone uit stroming door golfoploop en golfneerloop. De voor golfklappen karakteristieke waterdruk-puls blijft bij golfoploop achterwege.

Een met gras bekleed talud dat wordt blootgesteld aan golven zal als eerste falen in de golfklapzone, want de golfklapbelasting is maatgevend boven de golfoploopbelasting. In veel gevallen zal in de zone in het dijkprofiel waar zware golfklappen worden verwacht een harde bekleding liggen en zal alleen het bovenste deel van het talud zijn bekleed met gras. Er zijn veel gevallen waarbij het gras boven de harde bekleding alleen door golfoploop en neerloop wordt belast. Opgemerkt wordt dat in dergelijke gevallen altijd sprake is van een overgang van een harde bekleding naar een grasbekleding. Deze overgang is een zwakke plek, omdat het de sterkte van het gras hier wat lager is en omdat de belasting door oneffenheid op de overgang en/of ruwheidsverschillen, juist wat hoger is. Ook rondom objecten en langs bijvoorbeeld kunstwerken zal de belasting op de grasbekleding hoger zijn en de sterkte vaak lager.

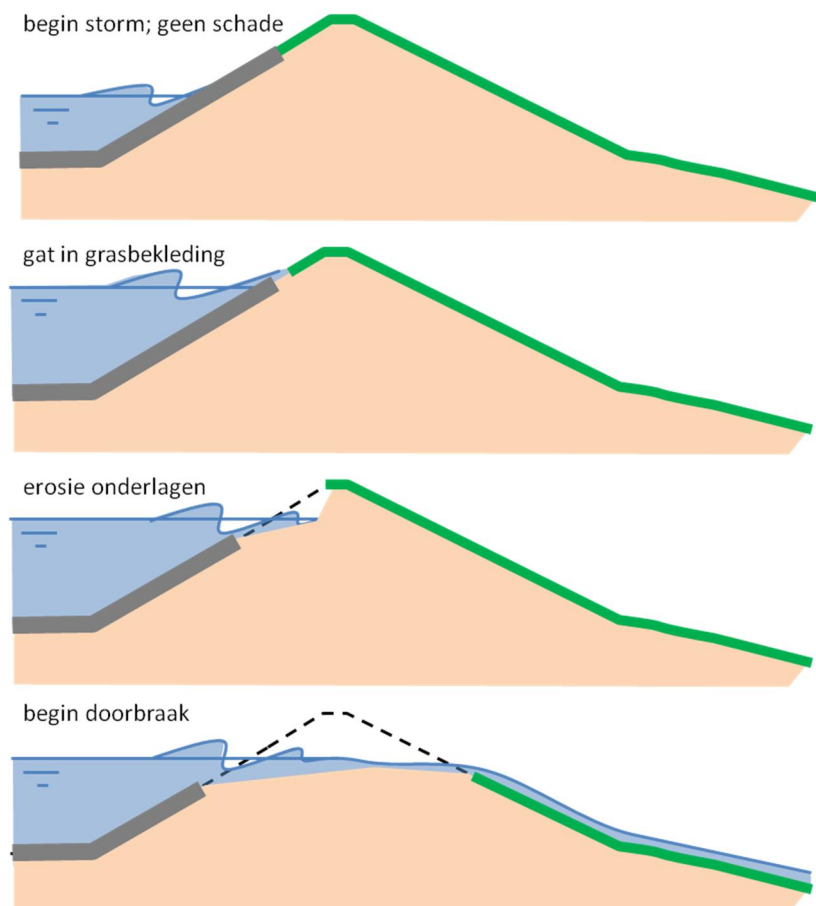
De stroming van de oplopende en neergaande golftong is turbulent, waardoor de graszode wordt onderworpen aan een snel wisselende waterdruk. De drukwisselingen planten zich gedempt en vertraagd door in de zode en de hieronder liggende grondlagen. Hierdoor en door de ruimtelijke variabiliteit van de wisselende druk over het talud, wordt de zode blootgesteld aan binnen- en buitenwaarts gerichte drukgradiënten. De drukgradiënten met een buitenwaartse richtingscomponent kunnen op den duur stukken zode uit de grasbekleding trekken. De grootte van de belasting is afhankelijk van de laagdikte en snelheid van de golftong en van de turbulentie-intensiteit. Deze parameters zijn weer afhankelijk van de golfhoogte en van de hoogte van de te toetsen graszode ten opzichte van de stilwaterlijn. Ook de stormduur, of eigenlijk de tijd dat een te toetsen grasbekleding zich in de golfoploopzone bevindt, is van belang.

Uit drukmetingen bij golfoploopproeven nabij Colijnsplaat in Zeeland blijkt dat vooral bij de golfoploop de graszode wordt belast met een snel wisselende druk. De amplitude van de drukwisselingen bij de golfneerloop zijn aanzienlijk kleiner. Ook de frontnelheid van de oplopende golftong is aanzienlijk hoger dan de stroomsnelheid van de golfneerloop. Hieruit is afgeleid dat het vooral de golfoploop is die zorgt voor erosie en in veel mindere mate de golfneerloop. Tevens is geconstateerd dat vanaf de stilwaterlijn de golftong met min of meer constante frontnelheid het talud op loopt tot circa 75% van de uiteindelijk te bereiken oploophoogte. In de laatste 25% neemt de snelheid af tot stilstand, waarna de stroming langzaam weer versnelt in neerwaartse richting.

Net als bij erosie door golfklappen wordt de weerstand tegen erosie bij golfoploop hoofdzakelijk verzorgd door het wortelnet van de graszode. Hoe dichter dat wortelnet hoe beter de zode bestand is tegen erosie. De erosiebestendigheid van de grond is minder belangrijk. Voor het verkrijgen van een dicht gewoven wortelnet is een goed beheer

noodzakelijk. Hierover is in de literatuur veel informatie te vinden, waarbij wordt opgemerkt dat het beheer moet zijn gericht op het verkrijgen van een dicht wortelnet.

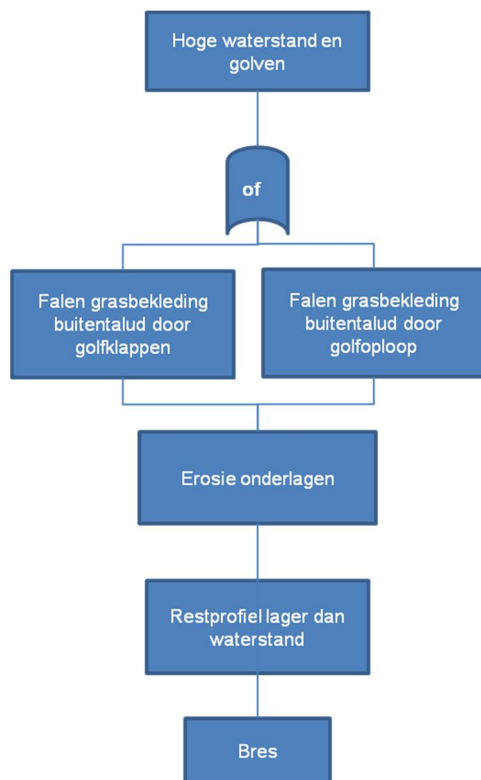
Na het falen van de grasbekleding, dat wil zeggen het doorbreken van de sterk doorwortelde toplaag met een dikte van circa 0,2 m kan de erosie van de onderlagen uiteindelijk leiden tot kruindaling en falen van de dijk. Dit is de reststerkte van de dijk na initieel falen van de grasbekleding. Dit proces verloopt vergelijkbaar met dat bij falen van de grasbekleding door golfklappen (paragraaf 2.2), met dien verstande dat falen hoger op het talud zal plaatsvinden, waar het profiel smaller is, maar waar de belasting kleiner is. Er is weinig bekend over de reststerkte na falen van de graszode in de golfoploopzone. Het kan zijn dat een schade die optreedt ter plaatse van de overgang tussen de harde bekleding en de grasbekleding, eerst de harde bekleding zal ondermijnen tot het stil waterniveau, waarna eenzelfde terrasvormige erosiekuil ontstaat als na falen van het gras door golfklappen en kan worden aangenomen dat vervolgens een vergelijkbaar erosieproces optreedt als in de golfklapzone (Figuur 3.3). Als dit echter niet gebeurt, dan is het onbekend hoe snel de erosie kan voortschrijden.



Figuur 3.3 Schematische weergave doorbraakproces na falen van de grasbekleding door golfoploop

3.3 Schematisch overzicht aan de hand van gebeurtenissenboom GEBU

Het proces dat leidt tot een bres als gevolg van falen van de grasbekleding op het buitentalud als gevolg van golfklappen of golfoploop staat in het onderstaande stroomschema (Figuur 3.4).



Figuur 3.4 Gebeurtenissen leidend tot bezwijken dijk door erosie van de grasbekleding op het buitentalud en erosie van onderlagen

3.4 Te toetsen onderdelen GEBU

3.4.1 Erosie door golfklapbelasting

In de toetsing komen zowel het falen van de grasbekleding (deelmechanisme) als erosie van de onderlagen bestaande uit klei (deelmechanisme) aan bod. De standtijd van de grasbekleding en die van de onderlagen bestaande uit klei samen vormen de sterkte en worden vergeleken met de belastingduur. Bij de berekening van de erosie van de onderlagen wordt nog onderscheid gemaakt tussen de klei tot een diepte van 0,5 m en dieper gelegen klei. Aantasting van een zandkern na het doorbreken van de kleilagen maakt geen onderdeel uit van de toetsing.

3.4.2 Erosie door golfoploop

Bij de toetsing wordt, alleen rekening gehouden met het falen van de grasbekleding. Voor de olopzone geen reststerktemodel beschikbaar.

4 Grasbekleding afschuiven binnentalud (GABI)

4.1 Inleiding en afbakening

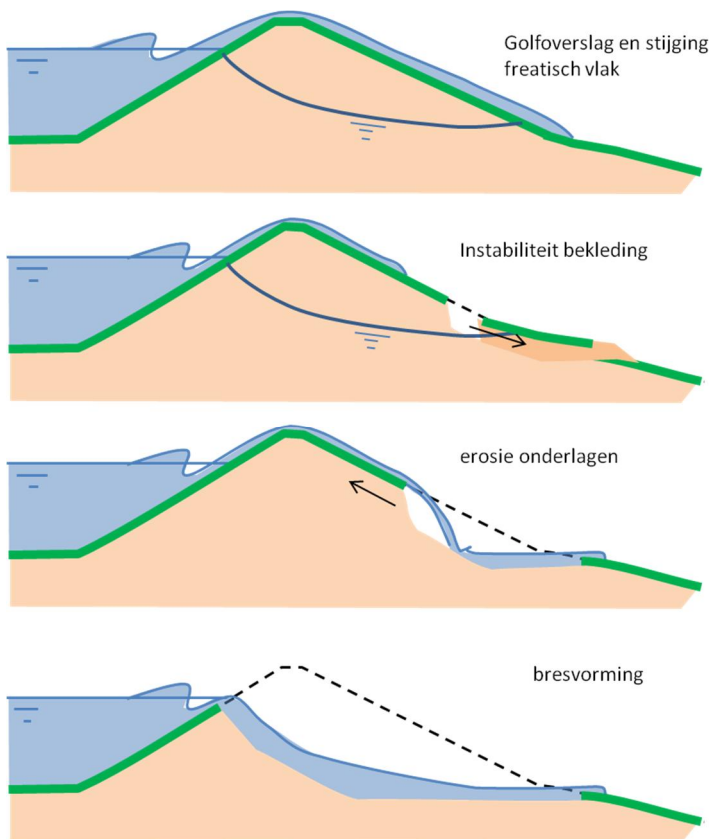
Het toetspoot heet 'afschuiven', echter hiermee worden meerdere vormen van stabiliteitsverlies bedoeld. De bekleding kan als gevolg van een te groot drukverschil over de bekleding opdrukken, afschuiven of een combinatie van beide mechanismen vertonen. Ook kan zand uitspoelen als gevolg van een buitenwaarts gerichte gradiënt veroorzaakt door uittredend water.

Naast grasbekledingen moeten onder dit mechanisme ook kleibekledingen op het binnentalud zonder gras en zandtaluds onder water worden gecontroleerd op mogelijk stabiliteitsverlies als er sprake is van een significante hoeveelheid golfoverslag.

Het mechanisme afschuiven van de grasbekleding, de graszode plus eventueel de kleilaag, bij golfoverslag is nauw verwant met het mechanisme micro-instabiliteit (STMI) [6]. Bij micro-instabiliteit worden problemen veroorzaakt door water dat door de dijk sijpelt. Er hoeft geen golfoverslag te zijn. Bij het mechanisme GABI worden problemen veroorzaakt door water dat door de dijk sijpelt *en* door golfoverslag. De mechanismen zijn verder als gelijk te beschouwen, zodat bij een significante golfoverslag ($>0,1$ l/s/m) het mechanisme GABI altijd maatgevend zal zijn en zonder significante golfoverslag het mechanisme STMI.

4.2 Fenomenologische procesbeschrijving GABI

Als gevolg van een hoge buitenwaterstand in combinatie met infiltratie van water door golfoverslag stijgen de waterspanningen in de dijk. Door de toename van de waterspanning onder het binnentalud kan hier instabiliteit van de grasbekleding optreden en/ of kan zand uitspoelen leidend tot het falen van de grasbekleding. Verdere erosie van het kernmateriaal kan vervolgens leiden tot bresvorming (Figuur 4.1).



Figuur 4.1 Schematische weergave doorbraakproces na instabiliteit van de grasbekleding op het binnentalud

De mate waarin de waterspanningen in de dijk oplopen is afhankelijk van het waterstandsverloop en de duur en hoeveelheid golfoverslag. Dijken die worden aangevallen door stormopzet, al dan niet in getijdewater, worden relatief kort bloot gesteld aan een hoge buitenwaterstand, terwijl dijken in het bovenrivierengebied juist langdurig aan een hoge buitenwaterstand worden blootgesteld. Verondersteld wordt echter dat de duur van golfoverslag voor alle watersystemen ongeveer gelijk is, namelijk in de orde van uren. Hoeveel van het over de dijk slaande water infiltreert in de dijk is naast de doorlatendheid van de bekleding ook afhankelijk van de intensiteit van de golfoverslag. Bij een gelijk gemiddeld overslagdebiet, veroorzaakt door een kleine golfhoogte bij een relatief hoge waterstand, slaan veel kleine volumes over de dijk die het talud continu nat houden en waardoor er continu water infiltreert. Bij hetzelfde gemiddelde overslagdebiet, veroorzaakt door hoge golven bij een relatief lage waterstand, slaan er weinig, maar heel grote volumes over de dijk. Als de tijd tussen de overslaande volumes groot wordt, zal het talud tijdelijk droog staan en is er tijdelijk geen infiltratie [5].

De ontwikkeling van waterspanningen bij hoogwater is naast de genoemde hydraulische randvoorwaarden ook afhankelijk van de dijkgeometrie, de opbouw van de dijk en de bekleding en de onderliggende grondlagen en de doorlatendheid hiervan.

Bij **kleidijken** is de kern relatief ondoorlatend en de bovenste laag relatief doorlatend als gevolg van de vorming van bodemstructuur. Bodemstructuur vormende processen hebben vooral invloed tot circa één meter onder het maaiveld. In deze zone zijn de wisselingen in vochtgehalte, temperatuur (vorst) en de activiteit van flora en fauna het meest intensief. Bij infiltratie door golfoverslag zullen de macroporiën in de laag met ontwikkelde bodemstructuur

snel verzadigen. Het water zal nauwelijks in de relatief ondoorlatende kern doordringen en afstromen door de grondlaag met bodemstructuur, parallel aan het talud. De hierbij optredende waterspanning is ongunstig voor de stabiliteit, waardoor deze parallel aan het talud kan afschuiven. Dit mechanisme is in de praktijk vaak waargenomen bij steile taluds in combinatie met golfoverslag. De afschuiving wordt bijna altijd voorafgegaan aan het vormen van een langs-scheur in de kruin of bovenaan het talud, waardoor er nog meer water in de laag met bodemstructuur infiltreren. Onderaan het talud kan de teen eventueel nog steun geven, maar als deze te gering is, dan schuift de hele grondlaag parallel aan het talud af. De bloot komende kern kan vervolgens verder eroderen wat uiteindelijk kan leiden tot een daling van de profielhoogte onder de waterstand gevolgd door bresvorming en overstroming van het achterland.

Uitgaande van een dijk met een **zandkern**, al dan niet met een kleibekleding, kunnen de volgende mogelijkheden worden onderscheiden op basis van geometrische kenmerken de [8]. Deze geometrische kenmerken zijn van belang bij de beoordeling van het kunnen optreden van instabiliteit.

- Het binnentalud is zeer flauw: hiervoor wordt momenteel een talud van 1V:5H gehanteerd als kritische grens. De onderbouwing van deze grens is niet heel duidelijk [9], maar lijkt op zich geen overdreven optimistische aanname. Bij dergelijk flauwe taluds zal stabiliteit van de bekleding geen veiligheidsprobleem zijn.
- Onder het binnentalud of in de binnenteen is een drainageconstructie aanwezig. In de leidraden wordt gesteld dat indien de werking van de drainage goed is er geen stabiliteitsproblemen optreden.
- Het binnentalud bestaat uit een afdekkende kleilaag overgroeid met gras. Hier kan de situatie optreden dat de afdekkende kleilaag minder doorlatend is dan de kern, waardoor overdrukken nabij de binnenteen ontstaan. In deze omstandigheid kan de kleilaag worden opgedrukt (de waterdruk wordt groter dan het gewicht van de afdekkende kleilaag) of de laag kan afschuiven over de zandkern. Een combinatie van deze beide fenomenen is ook mogelijk. Eveneens kan het fenomeen optreden dat door bestaande scheuren of gaten in de kleilaag of scheuren die ontstaan door opdrukken en of afschuiven zand van onder de kleilaag wegspoelt. Bij dit type dijk moet op opdrukken en afschuiven van het binnentalud worden gecontroleerd.
- Het binnentalud bestaat uit zandig materiaal, normaal gesproken overgroeid met gras. De invloed van het gras wordt meestal genegeerd. In sommige beschouwingen is sprake van 'schijnbare cohesie' die het gras kan leveren. Meestal gaat het echter in eerste instantie om de stabiliteit op het niveau van een enkele korrel op het binnentalud. Of uitspoelen en erosie van zandkorrels op het binnentalud voor kan komen, dient te worden gecontroleerd.

Naast de bovengenoemde geometrische kenmerken bij dijken met een zandkern is ook de grondwaterstroming van belang bij de beoordeling van de stabiliteit. De volgende stromingspatronen worden onderscheiden:

- Stroming loodrecht op het talud. Dit doet zich voor bij zandige taluds onder water.
- Horizontale uitstroming van water. Dit kan zich voordoen bij zandige taluds boven water en vormt de grootste bedreiging ten aanzien van uitspoelen van zanddeeltjes.
- Opbouw van waterdrukken onder een afdekkende kleilaag. Dit kan zich voordoen bij een zandkern met een afdekkende kleilaag aan de binnenzijde, zowel onder als boven water.

Uit het bovenstaande kan worden afgeleid dat de volgende vormen van instabiliteit op kunnen treden:

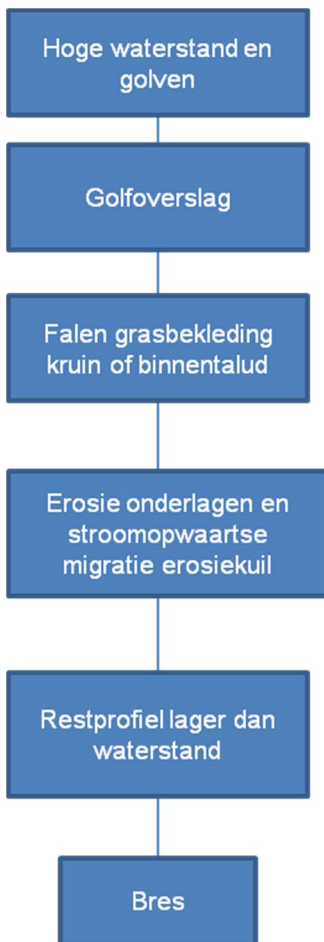
- A Bij een zanddijk met afdekkende kleilaag op het binnentalud:
 - 1 Afschuiven van (een deel van) het binnentalud door waterdruk onder de kleilaag.
 - 2 Opdrukken van de kleilaag op het binnentalud door waterdruk onder de kleilaag.
 - 3 Combinatie van afdrukken en afschuiven door waterdruk onder de kleilaag.
- B Bij een zanddijk met zandige toplaag boven water:
 - 1 Afschuiven bij horizontaal uittredend grondwater.
 - 2 Uitspoelen bij horizontaal uittredend grondwater.
- C Bij een zanddijk met zandige toplaag onder water:
 - 1 Afschuiving bij stroming loodrecht op het talud.
 - 2 Uitspoeling bij stroming loodrecht op het talud.

Geval C, zandtaluds onder water betreffen bijvoorbeeld dijken met binnendijs gelegen wielen en strangen. Deze kunnen relatief diep zijn en een zandtalud onder water hebben, waarbij onder extreme omstandigheden het kritische uittrede verhang wordt overschreden. Omdat dit zich onder water afspeelt kan het pas laat worden opgemerkt [10].

Indien een primair mechanisme van instabiliteit van de bekleding op het binnentalud is opgetreden ontstaat er een gat in het binnentalud van de dijk. Dit is het mechanisme dat wordt getoetst. Erosie van de zandkern kan vervolgens leiden tot een profielhoogte onder het waterpeil, gevolgd door bresvorming en overstroming van het achterland. Dit laatste maakt geen onderdeel uit van de toetsing.

4.3 Schematisch overzicht aan de hand van gebeurtenissenboom GABI

Het proces dat leidt tot een bres als gevolg van instabiliteit van de grasbekleding op het binnentalud als gevolg van golfoverslag staat in het onderstaande stroomschema.



Figuur 4.2 Gebeurtenissen leidend tot bezwijken dijk door instabiliteit van de bekleding door golfoverslag

4.4 Te toetsen onderdelen GABI

De toetsing beslaat alleen de stappen 'stijging van freatisch lijn door hoge buitenwaterstand en golfoverslag' en 'Instabiliteit van de bekleding binnentalud'. In de eenvoudige en gedetailleerde toetsing wordt geen rekening gehouden met erosie van de onderlagen.

5 Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB)

5.1 Inleiding en afbakening

Het mechanisme erosie van de grasbekleding op de kruin en het binnentalud betreft het doorbreken van de toplaag van circa 20 cm. Uit proeven is gebleken dat deze laag onder invloed van wortels veel erosiebestendiger is dan de daaronder gelegen grond.

Voorheen maakte deze toets onderdeel uit van de toets op hoogte, echter in het WTI2017 zit geen expliciete toets op hoogte meer.

5.2 Fenomenologische procesbeschrijving GEKB

Bij golfoverslag slaan de hoogste golven over de kruin van de dijk. De over de dijk slaande golven geven telkens gedurende enkele seconden een hoge stroomsnelheid op het talud, waardoor de grasbekleding wordt blootgesteld aan een sterk wisselende waterdruk en kan eroderen. Uit grootschalige golfoverslagproeven is gebleken dat een graszode met een dicht wortelnet zeer effectief is in het vasthouden van grond in deze stroming. Het wegspoelen van gronddeeltjes uit de zode leidt binnen de duur van golfoverslag dan ook niet tot falen van de bekleding. Waargenomen is dat falen van de bekleding begint bij het ineens uit de bekleding loskomen van een stuk van de zode. Vervolgens breidt deze schade uit tot sprake is van falen van de grasbekleding.

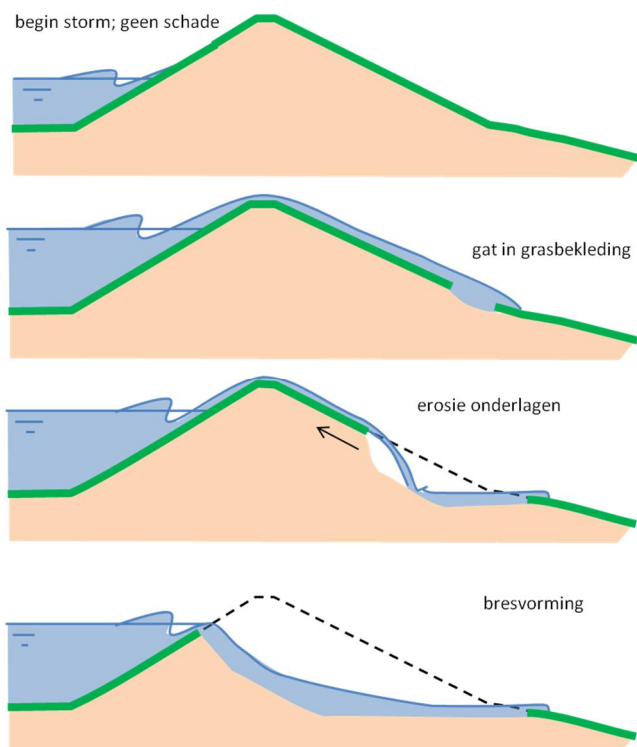
Falen van de grasbekleding treedt op als de toplaag van circa 20 cm dikte doorbreekt. Dit is het mechanisme dat wordt getoetst. De toplaag bestaat uit de graszode van 5 à 10 cm dikte en de hieronder gelegen zone waar de wortels nog een grote invloed hebben op de erosiebestendigheid van de grond.

Er is bij meerdere overslagproeven waargenomen dat een eerste schade leidt tot het benedenwaarts afstropen van de zode en de schade slechts langzaam verdiept. Een eerste schade kan worden veroorzaakt doordat een grote overslaande golf een stukje van de zode meeneemt, maar deze kan ook al aanwezig zijn in de vorm van een rijspoor of andere kleine beschadiging. Hier kan dan vrij snel een eerste gaatje in de zode ontstaan, zonder dat dit gelijk tot falen van de grasbekleding leidt. Overigens was in één geval de tijd tussen het begin van schade door het oppakken van een stuk zode door een grote golf en falen van de bekleding relatief kort. Dit gebeurde bij een heel grote overslagbelasting, waarbij er in één keer door een groot overslagvolume een relatief groot stuk zode los kwam. Verdieping en doorbraak van de toplaag ging daarop relatief snel. De bepalende factor voor de verschillende manieren van falen van de grasbekleding is nog niet gevonden. Opgemerkt wordt dat het modelmatig voorspellen van falen van de grasbekleding veel beter gaat dan het voorspellen van een eerste schade. Dat laatste blijkt veel meer afhankelijk van toevallige variaties in de sterkte van de zode op kleine schaal.

Na het falen van de grasbekleding zal het onderliggende materiaal verder eroderen. Een erosiekuil kan verdiepen en zich stroomopwaarts uitbreiden, wat uiteindelijk kan leiden tot een profiel dat lager is dan de buitenwaterstand (Figuur 5.1). Op dat moment is er sprake van een bres en wordt er vanuit gegaan dat de waterkering faalt. Het is afhankelijk van het onderliggende materiaal en de plek waar de grasbekleding faalt hoelang dit proces in beslag neemt en of dit nog voldoende reststerkte heeft om een bres te voorkomen. Binnen de eenvoudige en gedetailleerde toetsing wordt reststerkte na falen van de grasbekleding op het binnentalud niet in rekening gebracht.

De belasting, golfoverslag, wordt in het algemeen gekarakteriseerd door het gemiddeld overslagdebiet in $m^3/s/m$ of $l/s/m$. Het maakt echter een groot verschil of het golfoverslagdebiet een gevolg is van een relatief hoge waterstand en lage golven of een relatief lage waterstand en hoge golven. In het eerste geval zullen relatief veel golven over de dijk slaan, maar slechts kleine volumes met een lage snelheid. In het tweede geval gaat het om weinig overslagvolumes, maar wel heel grote met een hoge stroomsnelheid. Dit laatste geeft een veel grotere belasting op de grasbekleding.

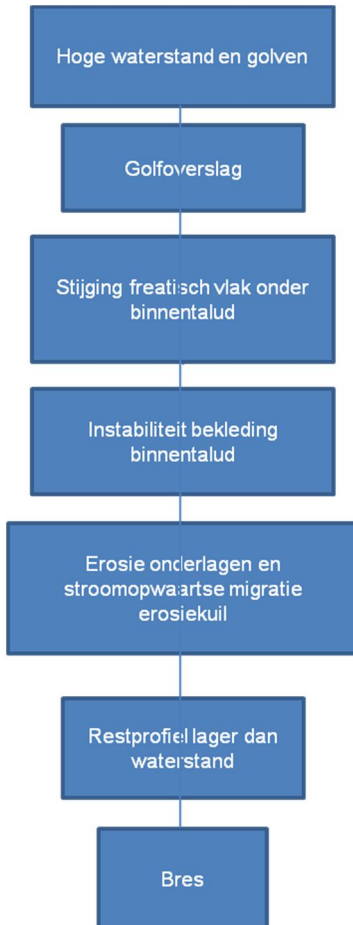
Overgangen in een grasbekleding zijn vaak de zwakste plek. Kleine objecten, zoals paaltjes of kleine schades, leveren geen significante aantasting van de erosiebestendigheid. Echter scherpe knikken in een talud, grotere objecten zoals bomen of bebouwing en overgangen tussen gras en bijvoorbeeld een weg, zijn wel aanzienlijk zwakker. Zowel de sterkte van de graszode kan rondom een overgang lager zijn, bijvoorbeeld omdat het gras niet vastgroeit aan een object, en de belasting zal groter zijn doordat de drukgradiënten over de grasbekleding groter zijn rondom een overgang.



Figuur 5.1 Schematische weergave doorbraakproces na falen grasbekleding door erosie door golfoverslag

5.3 Schematisch overzicht aan de hand van gebeurtenissenboom GEKB

Het proces dat leidt tot een bres, als gevolg van erosie van de grasbekleding op de kruin of het binnentalud als gevolg van golfoverslag staan in het onderstaande stroomschema (Figuur 5.2).



Figuur 5.2 Gebeurtenissen leidend tot bezwijken dijk door erosie van de grasbekleding door golfoverslag

5.4 Te toetsen onderdelen GEKB

Alleen het falen van de grasbekleding door erosie door golfoverslag wordt getoetst. Hierbij wordt rekening gehouden met de kwaliteit van de grasbekleding, het overslagdebiet en de golfhoogte. Binnen de eenvoudige en gedetailleerde toetsing wordt reststerkte van de onderlagen niet meegenomen.

Referenties

- [1] Black box model voor afschuiving bij steenzettingen', WL|Delft Hydraulics rapport H4635, november 2007
- [2] Aanpassing toetsmethodiek Afschuiving bij steenzettingen, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Ruud Bosters, 1 september 2008, Rapportnummer PZDT-R-08300
- [3] Van der Meij, R. and J.B. Sellmeijer, A Genetic Algorithm for Solving Slope Stability Problems: from Bishop to a Free Slip Plane, in 7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE). 2010, Balkema, Rotterdam: Trondheim
- [4] Studie voor richtlijnen klei op dijktafsluitingen in het rivierengebied, Deltares rapportnummer 1202512-000-GEO-0002, juli 2010
- [5] Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde, Rijkswaterstaat 2012
- [6] WT12017 Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium Product 2.3B Faalmechanismebeschrijving microstabiliteit, Deltares nummer 1220083.002, *CONCEPT* februari 2015
- [7] Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies, Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, juni 2001
- [8] Microstabiliteit overzicht modellering, GeoDelft kenmerk 393440/81, 2000
- [9] Micro-instabiliteit binnentalud zanddijk, Delft Cluster, Deltares kenmerk 418020-0009, maart 2008
- [10] TAW 1985, Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken – deel 1 Bovenrivierengebied, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, september 1985