

7 Stabiliteit bekleding gras

7.1 Inleiding

Grasbekledingen kunnen op de dijk zowel op het buitentalud, op de kruin, als op het binnentalud aanwezig zijn. Afhankelijk van de hoogteligging van de bekleding ten opzichte van de waterstanden die kunnen optreden krijgt de bekleding verschillende belastingen te verwerken. Op het buitentalud, even onder de waterlijn wordt de bekleding belast door golfklappen; op het buitentalud boven de waterlijn is er sprake van golfoplooptongen die de bekleding belasten. Als de dijk niet al te hoog is, worden kruin en binnentalud belast door golfoverslag. Voor al deze belastingen die leiden tot erosie, geldt dat discontinuïteiten in de bekleding tot lokaal hogere belastingen en dus grotere erosie leiden.

Andere storm gerelateerd belastinggevallen die schade aan grasbekledingen kunnen opleveren, zijn (ook) gerelateerd aan een relatief hoge grondwaterstand. Door hoogwater stijgt de grondwaterspiegel in de dijk en dat kan zodanig zijn dat het binnentalud als gevolg van uittredend grondwater instabiel wordt. Dit mechanisme, micro-instabiliteit wordt beschreven in hoofdstuk [4]. Is er veel sprake van golfoverslag, dan zal er veel water via het binnentalud infiltreren. Dat kan leiden tot afschuiven van het binnentalud. Na extreem hoog water kan de grondwaterstand in de dijk hoog zijn opgelopen, waardoor bij een vallende buitenwaterstand de bekleding op het buitentalud eventueel kan afschuiven.

Voor grasbekledingen zijn er vier faalmechanismen onderscheiden die in dit hoofdstuk worden behandeld:

- Erosie buitentalud (GEBU) (klappen en golfoploop).
- Afschuiven buitentalud (GABU).
- Erosie kruin en binnentalud (GEKB).
- Afschuiven binnentalud (GABI).

De volgende vier paragrafen gaan in op deze mechanismen.

7.2 Grasbekleding erosie buitentalud

7.2.1 Inleiding en afbakening

Erosie van de grasbekleding op het buitentalud treedt op als gevolg van twee belastingtypes: de golfklapbelasting en de golfoploop belasting. Ook stroming langs de dijk kan tot enige erosie leiden, maar hieraan wordt in deze rapportage geen aandacht besteed.

De grondlaag tot ca. 20 cm onder maaiveld levert de belangrijkste sterkte tegen erosie. Deze laag bevat in elk geval de graszode, maar ook nog een stukje kleilaag onder de zode waar nog veel wortels in zitten en waar wortels nog een grote positieve bijdrage leveren aan de erosiebestendigheid van de grond. De kleilaag onder deze toplaag levert ook nog een bijdrage aan de erosie-sterkte, maar wordt voor dit mechanisme niet gerekend tot de grasbekleding.

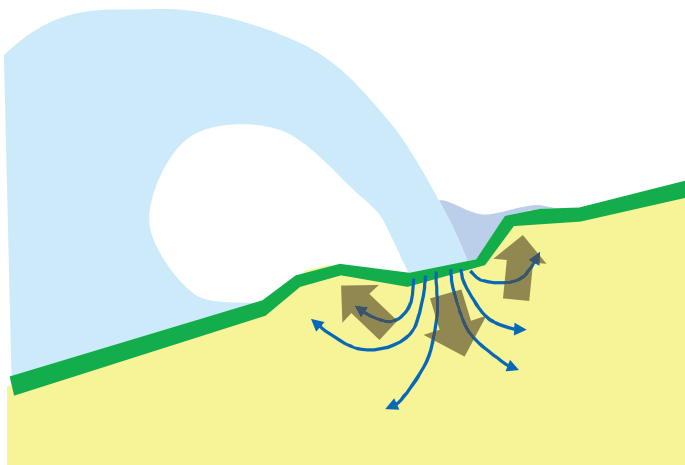
Een golfklapbelasting treedt op iets onder de waterlijn. In de toetsing wordt ervan uitgegaan dat golfklappen optreden in de zone tussen het waterpeil en een halve significante golfhoogte onder dit peil.

Met het variëren verloop van het waterpeil gedurende een hoogwatergolf of stormopzet varieert dus ook de plek waar de golfklappen optreden. Golfoploop 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.

7.2.2 Fenomenologische procesbeschrijving van erosie buitentalud

7.2.2.1 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, zie Figuur 7.1 (overgenomen uit [5]). 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.

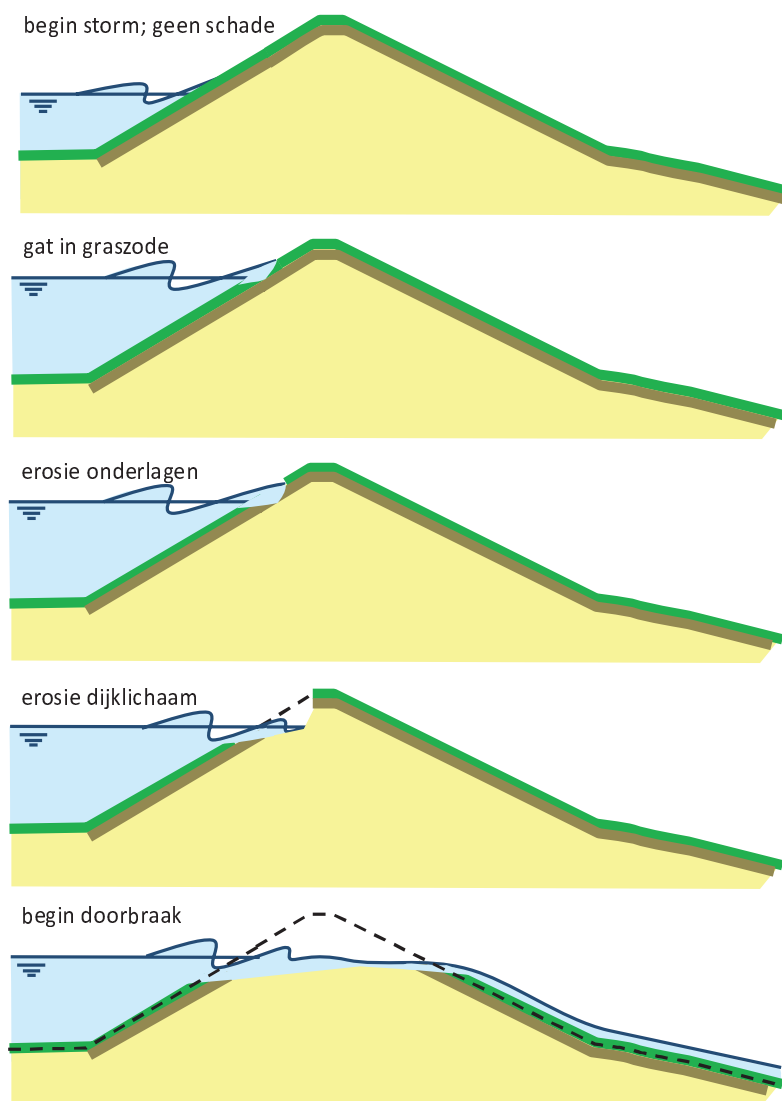


Figuur 7.1 Schetsmatige weergave van een golfklap op het talud, de grondwaterstroming (dunne blauwe peilen) en grondverplaatsing (dikke bruine peilen)

Een dicht gewoven wortelnet van een graszode heeft een grote sterkte en veerkracht. Uit golfgoetproeven 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 [6]. 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 erosie-sterkte, 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, zie Figuur 7.2. 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 erosie-sterkte 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. Aannemende dat de dijk een zandkern heeft met daarop een kleilaag met grasbekleding, wordt falen van de grasbekleding ten gevolge van erosie door golfklappen gedefinieerd als het moment waarop de kleilaag lokaal is weggeërodeerd en de erosie van het zandlichaam dus begint (faaldefinitie).



Figuur 7.2 Schetsmatige weergave faaltraject veroorzaakt door erosie 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 gedurende het

erosieproces, wanneer nog maar een deel van het dijklichaam is aangetast door erosie, er een ander mechanisme optreedt. Door het steeds smaller wordende profiel kan het binnentalud van de dijk eerder instabiel worden door toename van de waterspanningen in de dijk (micro- of macro-instabiliteit) of door overslaande golven (stabiliteit bekleding bij golfoverslag).

7.2.2.2 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.

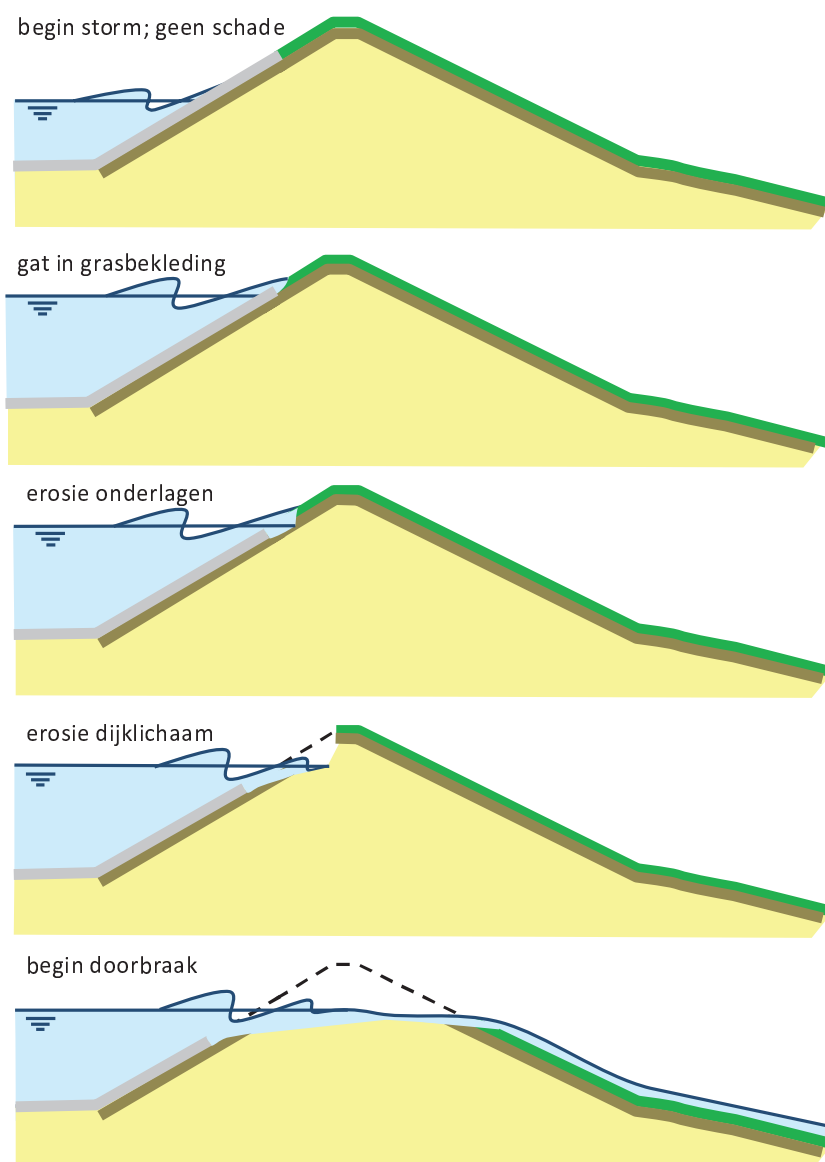
De stroming van de oplopende en neergaande golftong is turbulent, waardoor de graszode wordt onderworpen aan een snel wisselende waterdruk. De drukwisselingen planten zich gedempt en vertraagd door in de zode en de hieronder liggende grondlagen. Hierdoor en door de ruimtelijke variabiliteit van de wisselende 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 hoogteligging 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 golfoploop de graszode wordt belast met een snel wisselende druk. De amplitude van de drukwisselingen bij de neerloop 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.

Falen van de grasbekleding ten gevolge van erosie door golfploop wordt gedefinieerd als het moment waarop de sterk doorwortelde toplaag met een dikte van circa 0,2 m lokaal wordt doorbroken en de erosie van de onderlaag begint (faaldefinitie).

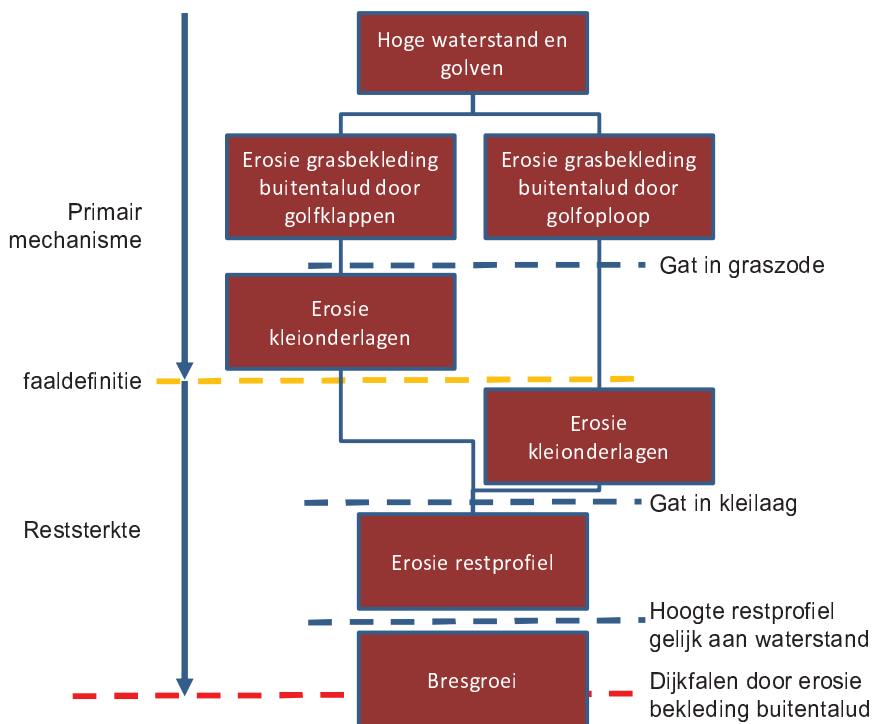
Na het falen van de grasbekleding kan de erosie van de onderlagen en de dijk kern uiteindelijk leiden tot kruindaling en uiteindelijk tot falen van de dijk. Dit is de reststerkte van de dijk na falen van de grasbekleding. Dit proces verloopt vergelijkbaar met dat bij falen van de grasbekleding door golfklappen (paragraaf 7.2.2.1), 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 golfploopzone. 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, zie Figuur 7.3. Als dit niet gebeurt, dan is het onbekend hoe snel de erosie kan voortschrijden.



Figuur 7.3 Schetsmatige weergave faaltraject veroorzaakt door erosie van de grasbekleding door golfploop

7.2.3 Overzicht van het faaltraject erosie grasbekleding op buitentalud

Het traject dat leidt tot falen van de waterkering als gevolg van falen van de grasbekleding op het buitentalud als gevolg van golfklappen of golfoploop staat in de volgende Figuur 7.4.



Figuur 7.4 Gebeurtenissen leidend tot falen dijk als gevolg van erosie van de grasbekleding op het buitentalud

7.2.4 Beknopte modelbeschrijving van de toets voor erosie buitentalud

7.2.4.1 Erosie door golfklapbelasting

In de toets (laag 1 en 2) komen zowel het falen van de grasbekleding (deelmecanisme) als erosie van de onderlagen bestaande uit klei (deelmecanisme) aan bod. Voor beide processen is er een empirisch model waarmee op grond van de belasting en de bekledingseigenschappen een conservatieve tijdsduur voor het proces kan worden bepaald: de zogenaamde standtijd. De standtijd van de grasbekleding en die van de onderlagen bestaande uit klei worden bij elkaar opgeteld en 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 de zandkern na het doorbreken van de kleilagen maakt geen onderdeel uit van de Gedetailleerde toets, maar wordt tot de reststerkte gerekend.

7.2.4.2 Erosie door golfoploop

Bij de toets (laag 1 en 2) wordt alleen rekening gehouden met het falen van de grasbekleding. Voor de modellering van erosie van de onderlagen in de olopzone is geen model beschikbaar. Die erosie en de erosie van de zandkern, de reststerkte, kan eventueel in de Toets op maat worden gekwantificeerd. De stabiliteit van de overgangsconstructie van gras naar eronder gelegen harde bekleding dient daarbij in het oordeel te worden betrokken.

7.3 Grasbekleding afschuiven buitentalud

7.3.1 Inleiding en afbakening

Voor het mechanisme afschuiven wordt tot de grasbekleding gerekend het gras inclusief de kleilaag die op de ondergrond van zand ligt. Het mechanisme betreft stabiliteitsverlies van het geheel van graszode en kleilaag. 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). In geval de grasbekleding direct op een kleikern ligt, kan er geen afschuiving van de bekleding optreden.

De faalmechanismebeschrijving is deels ontleend aan [2]. 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.

Hoewel we spreken van 'afschuiven', zou stabiliteitsverlies een betere benaming zijn. De kleilaag kan als gevolg van een te groot drukverschil over de kleilaag opdrukken, afschuiven 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 kleilaagdiktes geen rol van betekenis speelt.

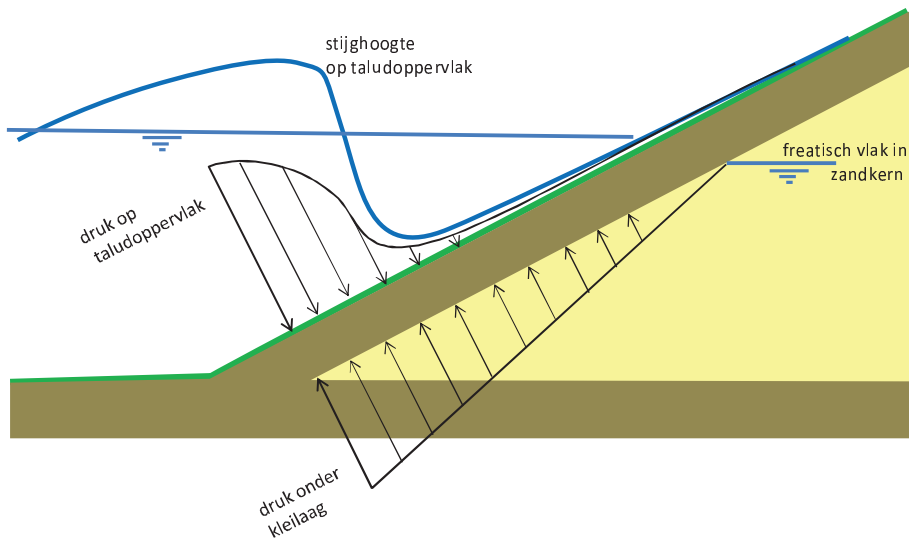
Ook plaatselijke vervormingen van de kleilaag zelf als gevolg van golfklappen maken geen onderdeel uit van het hier beschreven mechanisme.

Er is een gelijkenis van het mechanisme met het mechanisme buitenwaartse macro-instabiliteit. De belasting bij de beoordeling van de buitenwaartse macrostabiliteit bestaat uit een val van hoogwater, en het achterblijven van hoge waterspanningen in de dijk. Het effect van golven wordt bij het mechanisme buitenwaartse macro-instabiliteit niet meegenomen. De karakteristieke tijd waarbinnen het mechanismen 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 en niet aan een situatie met een lage buitenwaterstand na hoogwater. Bij GABU wordt alleen de stabiliteit van de kleibekleding beschouwd (relatief ondiepe glijvlakken). De belasting is afhankelijk van de mate van golfnietrekking. De karakteristieke tijd is in de orde van seconden.

7.3.2 Fenomenologische procesbeschrijving van afschuiven buitentalud

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 golfnietloop, 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 golfnietloop is het drukverschil over de kleilaag het grootst, zie Figuur 7.5. 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.



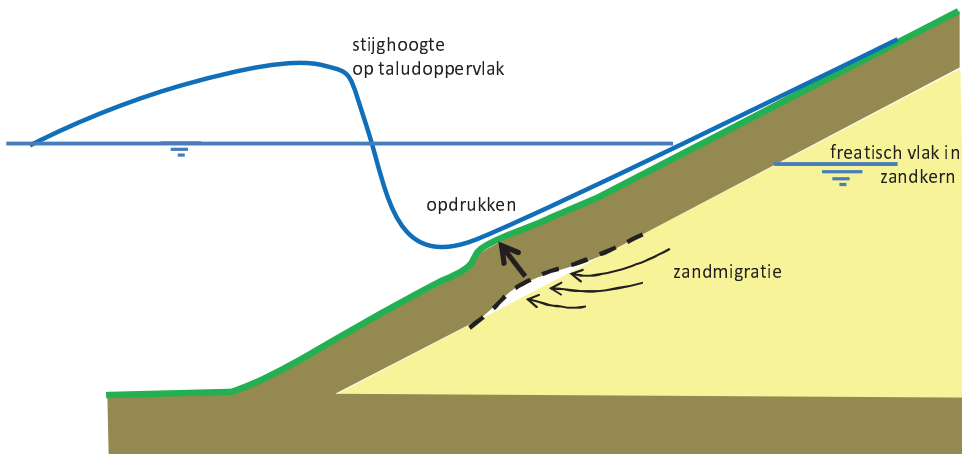
Figuur 7.5 Gemodelleerde weergave kritische situatie voor de stabiliteit van de kleibekleding bij golfneerloop

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 makkelijk water in het zand dringt. Hierbij wordt opgemerkt dat ook in de golfoploopzone water in de dijk kan infiltreren, waardoor het freatisch vlak stijgt. Ook indien het onderliggende zandlichaam klein is, bijvoorbeeld in het geval van een zandscheg, dan zal het freatisch vlak hierin snel kunnen oplopen.

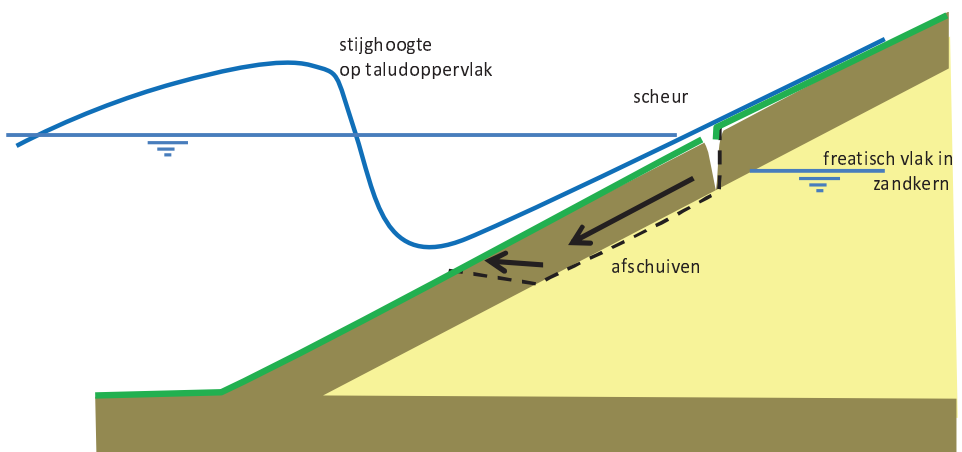
Een hoog freatisch vlak in de dijk kan ook optreden indien er onder dagelijkse omstandigheden onvoldoende drainage van de zandkern mogelijk is in combinatie met een langdurige regenperiode. Dit kan dan leiden tot stabiliteitsproblemen van de kleilaag en/ of het uitspoelen van zand, of wel micro-instabiliteit. 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.

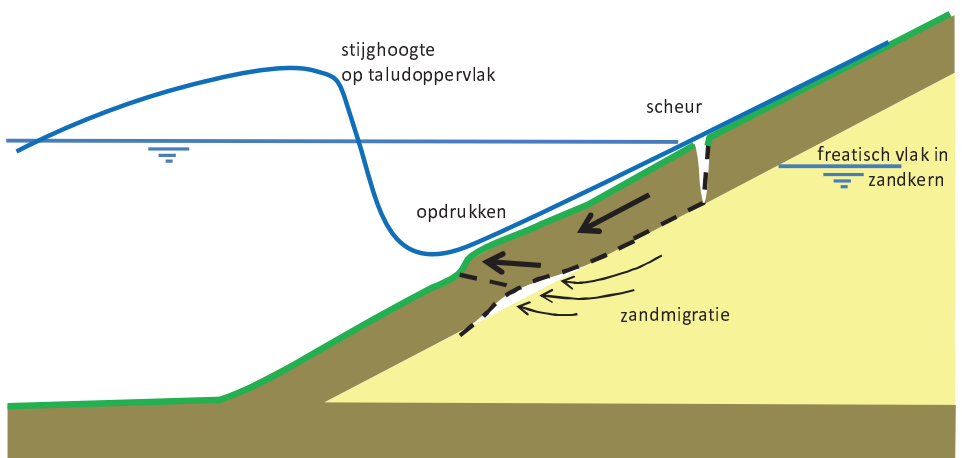
Het ongunstige verval over een deel van de kleilaag kan leiden tot opdrukken van de kleilaag (Figuur 7.6), tot afschuiven van de kleilaag (Figuur 7.7) of tot een combinatie van beide mechanismen (Figuur 7.8). Welk van de mechanismen maatgevend is, hangt af van de specifieke situatie, zoals van de sterkte van de kleilaag, de dikte en het gewicht van de kleilaag, de drukverdeling over de kleilaag en de taludhelling.



Figuur 7.6 Opdrukken van de kleilaag als de druk onder de kleilaag plaatselijk hoger is dan de druk boven de kleilaag plus de gewichtscomponent van de kleilaag loodrecht op het talud



Figuur 7.7 Afschuiven van de kleilaag. Hierbij hoeft geen opdrukken op te treden



Figuur 7.8 Combinatie van opdrukken en afschuiven

Voor het opdrukken van de kleilaag, zie Figuur 7.6, is het nodig dat de druk onder de kleilaag minimaal gelijk is aan gewichtscomponent 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 [3].

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.

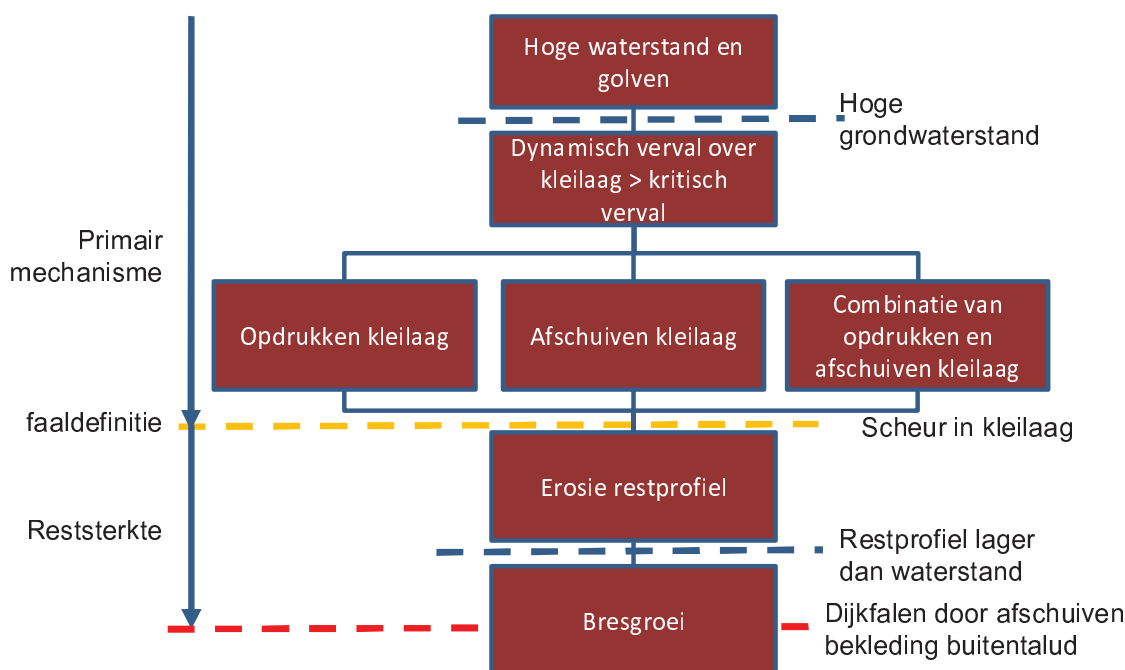
Wordt de druk te hoog dan wordt verondersteld dat de kleilaag opbarst: de klei met de graszode breekt. Dit kan gepaard gaan met het plotseling uitspoelen van zand. Bovendien zal de erosiebestendigheid van de bekleding, graszode en klei, zijn aangetast. Golven zullen eerst de restanten van de kleilaag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

Ook zonder opdrukken van de kleilaag kan de bekleding falen optreden door afschuiven van een deel van de kleilaag optreden, zie Figuur 7.7. 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 het proces tot aan overstromen van het achterland zoals hierboven bij opdrukken omschreven.

Een derde, gecombineerde, mogelijkheid van falen van de bekleding is het opdrukken en opbarsten van de kleilaag, aansluitend gevolgd door het afschuiven van de bovenliggende kleilaag, zie Figuur 7.8. 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.

7.3.3 Overzicht van het faaltraject afschuiven grasbekleding op buitentalud

Het traject dat leidt tot falen van de dijk als gevolg van instabiliteit van de grasbekleding op het binnentalud als gevolg van golfoverslag staat in Figuur 7.9.



Figuur 7.9 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk als gevolg van afschuiven van de grasbekleding op het buitentalud

7.3.4 Beknopte modelbeschrijving van de toets op afschuiven buitentalud

Voor de Gedetailleerde toets op afschuiving van het buitentalud (GABU) wordt een empirische relatie (black-box model) gebruikt die is ontwikkeld voor steenzettingen op een kleilaag (zie [2] en [3]). 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. Reststerkte wordt niet meegenomen. Een afschuivende bekleding zal op een zand ondergrond liggen, waarvan de reststerkte gering is of nog onvoldoende bekend.

In een geavanceerde toets 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 [4], of een FEM-programma.

7.4 Grasbekleding erosie kruin en binnentalud

7.4.1 Fenomenologische procesbeschrijving van erosie kruin en binnentalud

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 de kruin en het binnentalud, waardoor de grasbekleding wordt blootgesteld aan een sterk wisselende waterdruk en kan eroderen.

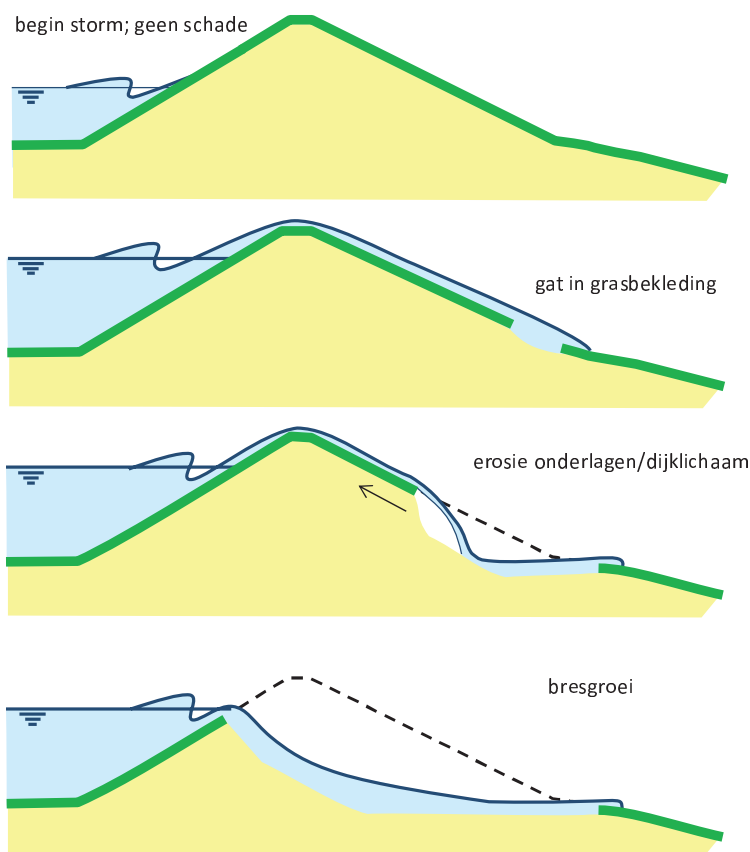
De sterkte van de grasbekleding concentreert zich in de toplaag van circa 20 cm dikte. Deze toplaag bestaat uit de graszode van 5 à 10 cm dikte en de hieronder gelegen zone waar de wortels nog een grote invloed hebben op de erosiebestendigheid van de grond. Uit grootschalige golfoverslagproeven is gebleken dat een graszode met een dicht wortelnet zeer

effectief is in het vasthouden van grond in deze stroming. Het geleidelijk wegspoelen van gronddeeltjes uit en door de zode blijkt dan ook niet maatgevend voor de sterkte van de bekleding.

Uit waarnemingen is gebleken dat de wortelmat ergens scheurt waardoor ineens een stuk van de zode uit de bekleding loskomt. Er is bij meerdere overslagproeven geconstateerd dat een eerste gat in de zode leidt tot het benedenwaarts afstropen van de zode en de schade slechts langzaam verdiept. In een enkel geval verdiepte de erosiekuil zich echter veel sneller.

Voor het mechanisme erosie van kruin en binnentalud is falen van de grasbekleding gedefinieerd door het moment dat de sterk doorwortelde toplaag met een dikte van circa 0,2 m lokaal wordt doorbroken en de erosie van de onderlaag begint (faaldefinitie).

Na het falen van de grasbekleding, zal het onderliggende materiaal verder eroderen. Een erosiekuil kan verder verdiepen en zich stroomopwaarts uitbreiden, wat uiteindelijk kan leiden tot een profiel dat lager is dan de buitenwaterstand en bresvorming, zie Figuur 7.10. 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 bresvorming te voorkomen. Binnen de Eenvoudige en Gedetailleerde toets wordt reststerkte na falen van de grasbekleding op het binnentalud niet in rekening gebracht.



Figuur 7.10 Schetsmatige weergave van het faaltraject door erosie van de grasbekleding door golfoverslag

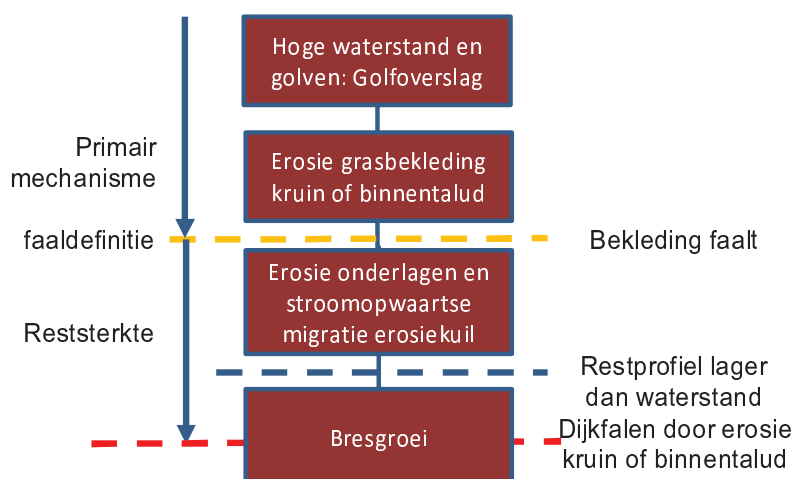
De belasting, golfoverslag, wordt gekarakteriseerd door het gemiddeld overslagdebiet in $m^3/s/m$ of $l/s/m$. Het maakt echter een groot verschil of het golfoverslagdebiet een gevolg is van een relatief hoge waterstand en lage golven of een relatief lage waterstand en hoge golven. In het eerste geval 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, kunnen wel aanzienlijk zwakker zijn. Zowel de sterkte van de graszode kan rondom een overgang lager zijn, bijvoorbeeld omdat het gras niet vastgroeit aan een object, en de belasting kan groter zijn doordat de drukgradiënten op het talud groter zijn rondom een overgang.

7.4.2 Overzicht van het faaltraject erosie grasbekleding op kruin en binnentalud

Het traject dat leidt tot falen van de dijk, als gevolg van erosie van de grasbekleding op de kruin of het binnentalud als gevolg van golfoverslag staat in het onderstaande Figuur 7.11.



Figuur 7.11 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk door erosie van de grasbekleding op kruin of binnentalud

7.4.3 Beknopte modelbeschrijving van de toets voor erosie kruin en binnentalud

Alleen het falen van de grasbekleding, de doorwortelde toplaag van ca. 20 cm, door erosie door golfoverslag wordt getoetst (Toetslaag 1 en 2). De modellering die daarvoor in het kader van WTI ter beschikking gestelde software is opgenomen, bestaat uit empirische formules geijkt aan de resultaten van diverse grootschalige proeven. In deze modellering wordt rekening gehouden met de kwaliteit van de grasbekleding, het overslagdebiet, de golfhoogte. Binnen de Eenvoudige en Gedetailleerde toets wordt reststerkte van de onderlagen niet meegenomen.

7.5 Grasbekleding afschuiven binnentalud

7.5.1 Inleiding en afbakening

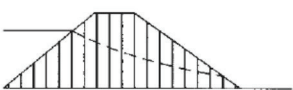



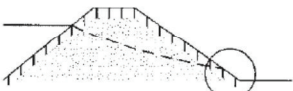
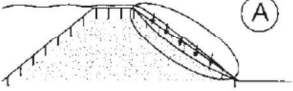


Hoewel 'afschuiven' de alom geaccepteerde benaming voor dit faalmechanisme is, zou stabiliteitverlies een betere benaming zijn. De bekleding kan als gevolg van een te groot drukverschil over de bekleding opdrukken, afschuiven of een combinatie van beide

mechanismen vertonen. Ook kan zand uitspoelen als gevolg van een buitenwaarts gerichte gradiënt veroorzaakt door uittreidend water.

Ook is in sommige gevallen geen sprake van een grasbekleding. Het mechanisme treedt ook op bij kleibekledingen op het binnentalud zonder gras. En zelfs zandtaluds onder water kunnen erdoor bezwijken als er sprake is van een significante hoeveelheid golfoverslag.

Het mechanisme afschuiven van de grasbekleding (GABI), de graszode plus de eventuele kleilaag, bij golfoverslag is nauw verwant met het mechanisme micro-instabiliteit (STMI), hoofdstuk [4]. Grote delen van de onderstaande tekst komen dan ook overeen met passages uit hoofdstuk [4]. 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 bron van de belasting kan een andere zijn bij deze mechanismen, maar de stabiliteitsproblemen zijn hetzelfde. Bij een significante golfoverslag ($> 0,1$ l/s/m) wordt verondersteld dat het mechanisme GABI maatgevend is, terwijl zonder significante golfoverslag het mechanisme STMI maatgevend is.

De verschillen (en overeenkomsten) worden geïllustreerd door Figuur 7.12 uit [1].

type dijk	microstabiliteit	stabiliteit bij overslag
kleidijk	 geen probleem	 infiltratie en afschuiven
zanddijk	 uitspoelen	 erosie binnentalud
zanddijk met kleiafdekking	 afdrukken/afschuiven	 infiltratie en afschuiven (A)
		 infiltratie en micro-instabiliteit (B)
		 afschuiven bovenste deel talud

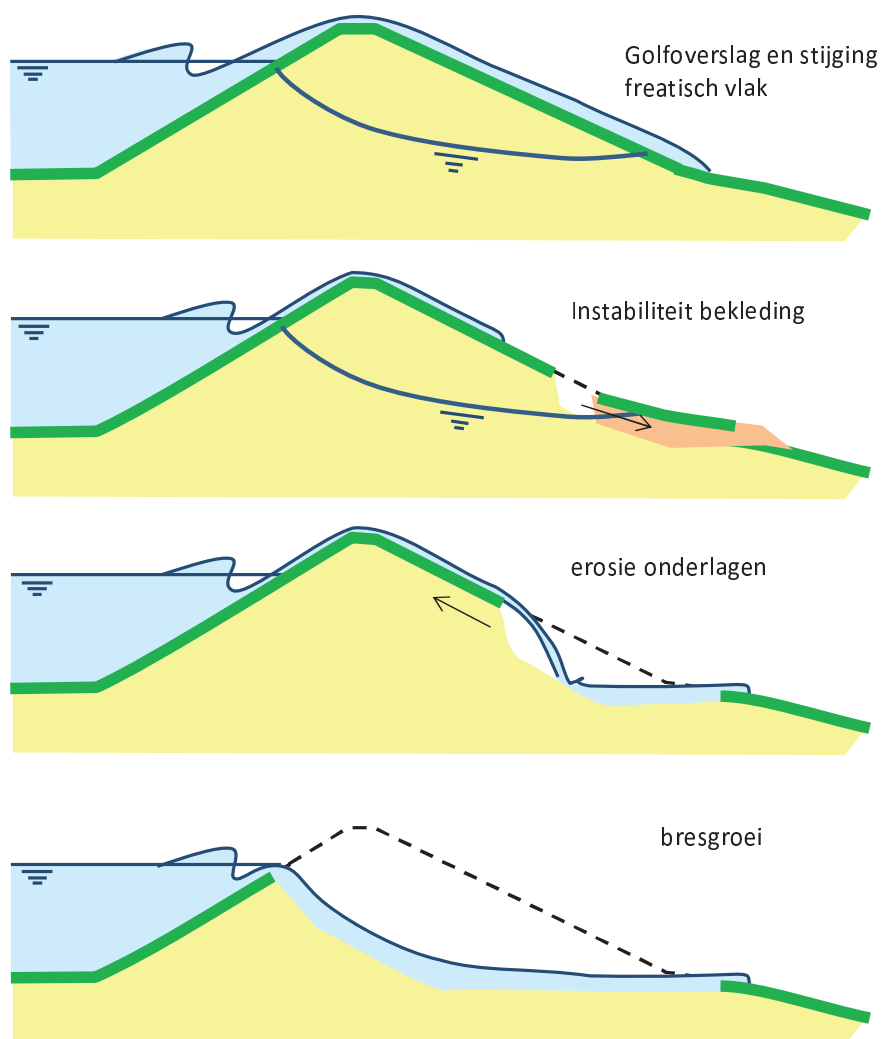
Figuur 7.12 Schematische weergave onderscheid tussen microstabiliteit en stabiliteit bekleding bij golfoverslag of overloop (overgenomen uit [1])

7.5.2 Fenomenologische procesbeschrijving van afschuiven binnentalud

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 bezwijken van de grasbekleding. Verdere erosie van het kernmateriaal leidt tot terugschrijdende erosie en kan vervolgens leiden tot bresvorming, zie Figuur 7.13.

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. 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 [6].



Figuur 7.13 Schetsmatige weergave doorbraakproces na instabiliteit van de grasbekleding op het binnentalud

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 in het algemeen de kern relatief ondoorlatend en de bovenste laag 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 zal 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 infiltreert. 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, zijn er de volgende mogelijkheden [2]:

- Het binnentalud is zeer flauw. Bij dergelijk flauwe taluds zal stabiliteit van de bekleding geen veiligheidsprobleem zijn.
- Onder het binnentalud of in de binnenteen is een drainageconstructie aanwezig. In het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies [1] 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.
- 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.

Naast de geometrie-elementen bij dijken met een zandkern is ook de grondwaterstroming van belang. De volgende stromingspatronen kunnen 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:

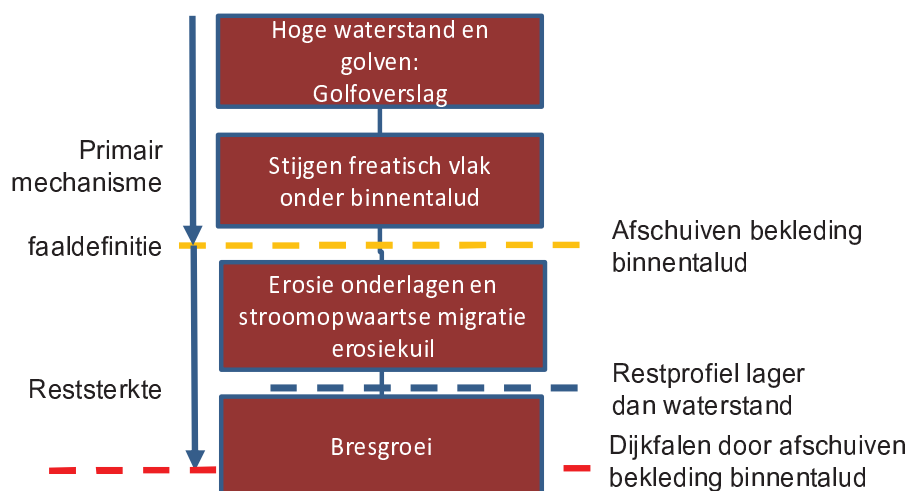
- A Bij een zanddijk met afdekkende kleilaag op het binnentalud:
 - 2 Afschuiven van (een deel van) het binnentalud door waterdruk onder de kleilaag.
 - 2 opdrukken van de kleilaag op het binnentalud door waterdruk onder de kleilaag.
 - 3 Combinatie van afdrücken en afschuiven door waterdruk onder de 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 binnendijks 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 [4].

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.

7.5.3 Overzicht van het faaltraject afschuiven van grasbekleding op binnentalud

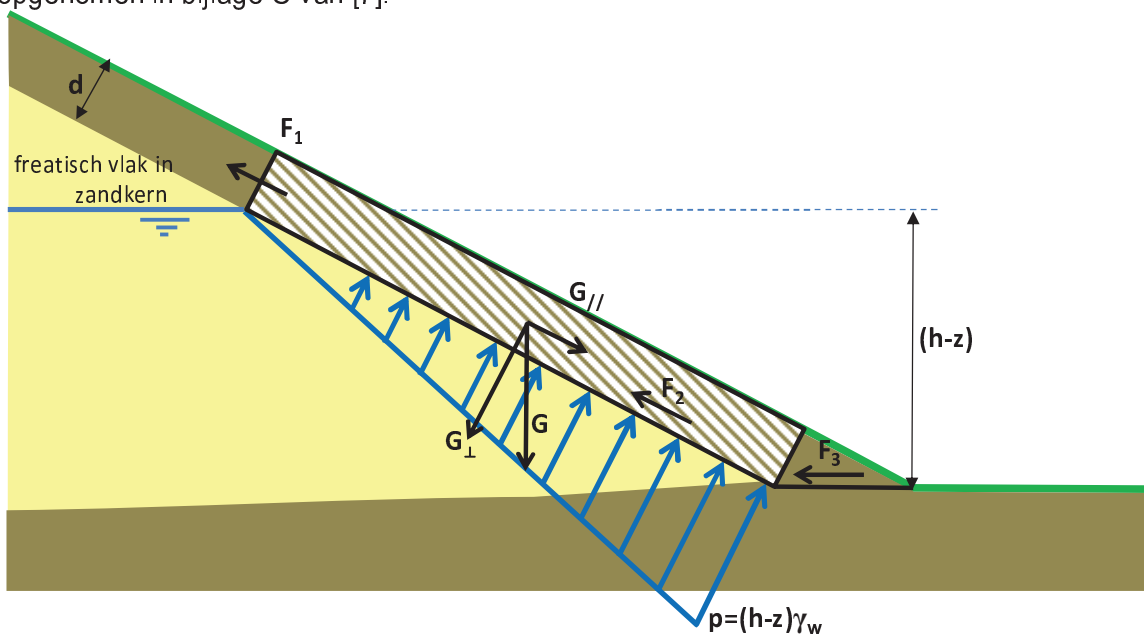
Het proces dat leidt tot falen van de dijk als gevolg van instabiliteit van de grasbekleding op het binnentalud als gevolg van golfoverslag staat in Figuur 7.14.



Figuur 7.14 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk door afschuiven van de bekleding op het binnentalud

7.5.4 Beknopte modelbeschrijving van de toets afschuiven binnentalud

De Gedetailleerde toets (laag 2) beslaat alleen de stappen 'stijging van freatisch lijn door hoge buitenwaterstand en golfoverslag' en 'Instabiliteit van de bekleding binnentalud'. De modellering die daarvoor in de toetssoftware is opgenomen, bestaat uit een set formules die gebaseerd zijn op evenwichtsbeschouwingen van de laag die afschuift. Een voorbeeld van de daarbij gehanteerde uitgangspunten is gegeven in Figuur 7.15. De volledige set formules is opgenomen in bijlage C van [7].



Figuur 7.15 Modellering van krachten op een grondmoot voor de beschrijving van het evenwicht parallel aan het talud

In de Eenvoudige en Gedetailleerde toets wordt geen rekening gehouden met de reststerkte ten gevolge van erosie van de onderlagen en de terugschrijdende erosie van de schade richting buitenwaterstand.

7.6 Literatuur grasbekledingen

- [1] *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies, Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, juni 2001.
- [2] *Black box model voor afschuiving bij steenzettingen*. WL|Delft Hydraulics rapport H4635. Delft, november 2007.
- [3] *Aanpassing toetsmethodiek Afschuiving bij steenzettingen*. R. Bosters. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rapportnummer PZDT-R-08300, 1 september 2008.
- [4] *A Genetic Algorithm for Solving Slope Stability Problems: from Bishop to a Free Slip Plane*, Van der Meij, R. and J.B. Sellmeijer. Proceedings 7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE) Trondheim. Balkema, Rotterdam, 2010.

- [5] *Studie voor richtlijnen klei op dijktaluds in het rivierengebied*, Deltares rapportnummer 1202512-000-GEO-0002. Delft, juli 2010.
- [6] *Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde*. Rijkswaterstaat 2012.
- [7] *Toetsschema's en foutenboom grasbekledingen, Product 5.25. WTI2017 Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium*. A. van Hoven. Deltares rapport 1220086-001-HYE-0001, september 2015.
- [8] *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken – deel 1 Bovenrivierengebied*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, september 1985.
- [9] *Microstabiliteit overzicht modellering*. GeoDelft kenmerk 393440/81, Delft, 2000.
- [10] *Micro-instabiliteit binnentalud zanddijk*. Delft Cluster, Deltares kenmerk 418020-0009, Delft, maart 2008.
- [11] *Schematiseringshandleiding voor toetsing grasbekledingen, WTI-2017, cluster 5, Product 5.27*. A. van Hoven. Deltares rapportnr. 1220086-003-HYE-0002, Versie 2. Delft, december 2015.
- [12] *Functional design semiprobabilistic assessments Ringtoets*. R.B. Jongejan, W.J. Klerk. Deltares rapport 1209431-008-ZWS-0009. Delft, May 2015.
- [13] *Semi-probabilistic assessment of wave impact and runoff on grass revetments, WTI Product C.4*. W.J. Klerk, R. Jongejan. Deltares report 1220080-005-ZWS-0003. Delft, December 2015.