

TR-12

TECHNISCH RAPPORT EROSIEBESTENDIGHEID VAN GRASLAND ALS DIJKBEKLEDING



Colofon

Uitgave

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
Delft, augustus 1998

Bron

Oorspronkelijke tekst ir. H.J. Verheij (Waterloopkundig Laboratorium), in samenwerking met drs. G.A.M. Kruse (grondmechanica Delft), ir. J.H. Niemeijer (Heidemij Advies) en drs. J.T.C.M. Sprangers (Landbouw Universiteit Wageningen). Bewerkt door dr J.T. de Smidt (Rijksuniversiteit Utrecht) en ir. P. J. M. Wondergem (Dienst Weg- en Waterbouwkunde).

Ontwerp, eindredactie en realisatie

Van Hasselt Van Everdingen & Partners
Den Haag

Druk

RS Drukkerij BV
Rijswijk

Foto's

Dienst Weg- en Waterbouwkunde.

**TECHNISCH RAPPORT
EROSIEBESTENDIGHEID VAN GRASLAND
ALS DIJKBEKLEDING**

T echnische
A dviescommissie voor de
W aterkeringen

Inhoud

1. Inleiding.....	7
2. Conclusies en aanbevelingen	9
2.1. Algemene conclusies en aanbevelingen.....	9
2.2. Conclusies en aanbevelingen voor rivierdijken.....	11
2.3. Conclusies en aanbevelingen voor zee- en meerdijken.....	11
3 Beschrijving onderzoeksresultaten.....	13
3.1 Civieltechnisch en vegetatiekundig onderzoek	13
3.2 Opbouw en sterkte van graszoden	13
3.2.1 Samenhang in de zode.....	13
3.2.2 Verticale opbouw van de zode	16
3.3 Grootschalige laboratoriumonderzoeken	16
3.3.1 Proef Scheldebak 1994	16
3.3.2 Proef Deltagoot 1992	18
3.4 Botanische samenstelling en erosiebestendigheid van grasland	19
3.4.1 Plantengemeenschappen op rivierdijken.....	20
3.4.2 Plantengemeenschappen op zeedijken	22
3.5 Proefprojecten aanleg en beheer.....	24
3.5.1 Bemesting, beweiding en hooien	24
3.5.2 Inzaai	24
3.6. Ervaringen tijdens hoogwaters op de rivieren	25
4. Huidige stand van de modellen.....	26
4.1 Beschrijvend model	26
4.1.1 Invloed taludhelling.....	27
4.1.2 Taluddeel met golfoploop en -neerloop	27
4.2 Empirisch gedrags- c.q. schademodel.....	28
4.3 Uitwerking belastingmodel.....	30
4.4 Relaties tussen zodekwaliteit en beheer	31
4.4.1 Dichtheid van de zode	31
4.4.2 Invloed van beheermethoden	32
4.4.3 Zodekwaliteit als functie van beheervorm en zodedichtheid	34

Bijlagen

1. Overzicht van op graserosie gerichte activiteiten	35
2. Literatuur	37

1. Inleiding

Vrijwel alle rivierdijken en de meeste zeedijken in Nederland zijn bekleed met grasland. De erosiebestendigheid van deze dijken wordt grotendeels bepaald door de sterkte van de bekleding. Die sterkte hangt in hoge mate af van de manier waarop het gras wordt beheerd en van de eigenschappen van de grond. De eisen die aan de erosiebestendigheid moeten worden gesteld, hangen af van de hydraulische belasting. Dit rapport gaat over bestendigheid van grasbekledingen tegen erosie bij belasting door golven. Tot 1990 was hierover vrijwel niets bekend. Nu, acht jaar later, is er inmiddels meer te zeggen over ontwerp, onderhoud en toetsing van grasmatten en is er een eerste aanzet tot een model.

Aanleidingen tot onderzoek

Oude dijken zijn meestal nog geheel uit klei opgetrokken. Sinds 1953 zijn echter veel verzwaarde dijken opgebouwd uit een kern van zand met een bekleding. Deze opbouw stelt zwaardere eisen aan de bekleding. Dit geldt zeker voor grasland op een kleilaag. Deze en andere ontwikkelingen hebben geleid tot de behoefte aan meer inzicht in de sterkte van grasland als dijk-bekleding en in de mogelijkheden om deze beter te beheersen. Regelmatig onderhoud is essentieel voor grasbekledingen en bovendien zijn zij de eerste jaren na aanleg relatief gevoelig voor schade. Ook oudere grasbekledingen vertonen soms onverwachte schades. Deze brengen kosten met zich mee en veroorzaken twijfel over de sterkte onder extreme omstandigheden. Verder vereist de *Wet op de waterkering* een vijfjaarlijkse toetsing op veiligheid van de bestaande primaire waterkeringen. De bekledingen vormen daarin een belangrijk onderdeel.

Door beperkt inzicht in de sterkte van de grasbekleding bestaat bij beheerders de neiging om het zekere voor het onzekere te nemen en een harde bekleding aan te brengen. Dat werkt een verdere afname van de karakteristieke kruidenrijke graslanden in de hand. Aan andere maatschappelijke functies van dijken zoals het behoud van landschap, natuur, cultuurhistorie, recreatie en landbouw kan daardoor minder worden voldaan. Veiligheid staat voorop, zowel bij rivier- als zee- en meerdijken. Omdat dijken voor alles een waterkerende functie hebben, kan pas aan andere functies ruimte worden gegeven als aan de vereiste erosiebestendigheid van de bekleding duurzaam wordt voldaan. Het onderzoek is dan ook gericht geweest op vergroting van het inzicht in de sterkte van grasland als dijkbekleding en op maatregelen die de sterkte desgewenst kunnen vergroten.

Doelstellingen van dit rapport

De Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) heeft vanaf het begin van de jaren '80 incidentele publicaties over aanleg, beheer en onderhoud van gras uitgebracht [TAW, 1981]. Sinds 1990 is onderzoek naar grasland gestructureerd aangepakt in het zogenaamde Grasplan. Het onderzoek moet vragen uit de praktijk van aanleg en beheer van dijken beantwoorden. In de afgelopen jaren zijn onder auspiciën van de TAW en in opdracht van de dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat enkele onderzoeken naar de erosiebestendigheid van grasland afgerond. De

onderzoeksrapporten zijn echter slechts toegankelijk voor een kleine doelgroep. Dit is, mede in relatie tot de recente ervaringen met hoogwater op de rivieren, aanleiding om de resultaten samen te vatten en ruimer te verspreiden. De doelstelling van dit rapport is daarom:

Duidelijkheid verstrekken over de erosiebestendigheid van grasland als dijkbekleding onder hydraulische belasting, aanbevelingen doen voor het maken van de afweging tussen grasland of een harde dijkbekleding, het efficiënt beheren van een grasbekleding, voor het toetsen van een bestaande grasbekleding op veiligheid en voor mogelijke verbeteringen van de samenstelling en sterkte na een onvoldoende toetsresultaat.

In het rapport ligt de nadruk op de erosiebestendigheid van grasland als dijkbekleding, dat wil zeggen op de vraag of deze sterk genoeg is bij normale en extreme belastingen. Voor het maken van een goede beoordeling zijn schademodelen (c.q. gedragsmodellen) nodig, in dit geval voor de grasmat als zelfstandig element. Hierin staan de relaties tussen grondsoort, taludhelling, vegetatie, beheer, doorworteling en sterkte centraal. Schademodellen voor afschuiving van steile (binnen)taluds door ondiepe afschuiving bij overslaand water vallen buiten de reikwijdte van dit rapport. Hetzelfde geldt voor schademodelen voor de grasmat als deel van de waterkering bij een inundatierisico-benadering (waarbij ook de reststerkte van de klei onder de zode een rol speelt).

De conclusies en aanbevelingen in dit rapport zijn bedoeld voor toepassing in TAW-leidraden en kunnen direct worden toegepast, zowel bij beheer en onderhoud als bij aanleg van dijken. Daarnaast zullen de hier beschreven inzichten dienen als basis voor het bijstellen van de toetsregels in de *Leidraad Toetsen op veiligheid*.

2. Conclusies en aanbevelingen

Op grond van de onderzoeken die ten grondslag liggen aan dit rapport is een aantal algemene conclusies te trekken over grasland op zowel rivierdijken als meer- en zeedijken.

Gras als dijkbeclading is in staat aanzienlijke golfbelastingen te weerstaan. Golven zoals die in het rivierengebied voorkomen, vormen voor een goede, erosiebestendige grasmat geen probleem. Op zee- en meerdijken zullen golven tot 0,75 m hoogte (en mogelijk hoger) geen schade aanrichten bij een gelijkmatige, gesloten grasmat met een hoge worteldichtheid. Het beheer is hierbij de sturende factor: onbemest hooien en licht bemest weiden leiden tot een sterke zode. Na inzaai op kale grond is de grasmat in drie tot vijf jaar op sterkte.

Onbemest hooien leidt tot de hoogste erosiebestendigheid en is organisatorisch eenvoudig uit te voeren. Licht bemest weiden leidt ook tot een goede erosiebestendigheid, maar is organisatorisch ingewikkelder omdat het in korte perioden moet gebeuren met een nauwkeurigheid op de biomassa-productie afgestemde veebezetting. Bovendien is aanvullend onderhoud nodig aan de grasmat en de rasters.

Over dijken in het rivierengebied is nu voldoende bekend om eisen te formuleren voor een grasmat die sterk genoeg is om de voorkomende hydraulische belastingen te weerstaan. Hetzelfde geldt voor grasbekledingen van zee- en meerdijken, mits de golfhoogte niet groter is dan 0,75 m. Voor golfhoogten groter dan 0,75 m is het nog niet mogelijk een beheerwijze te formuleren die schade uitsluit. Ook ontbreekt nog een afdoende methode voor het vaststellen van de aanwezigheid van de vereiste sterkte.

2.1. Algemene conclusies en aanbevelingen

- Een grasmat met een hoge erosiebestendigheid bestaat uit een gesloten begroeiing met een hoge worteldichtheid in de laag van 0-0,15 m. Voor hooiland geldt een bedekking > 70% met een gelijkmatige verdeling van spruiten, voor weiland een bedekking > 85%. De sterkte zit grotendeels in het niet zichtbare deel: de wortellaag. Het bereiken van een gesloten grasmat en een dichte doorworteling hangt af van het gevoerde beheer en, in mindere mate, van de grondeigenschappen. Bij het juiste beheer wordt de erosiebestendigheid van de zode beter dan die van goed erosiebestendige klei.
- Essentieel voor de zodevorming is het afvoeren van het geproduceerde gewas door hooien of beweiden. Verder is de hoogte van de mestgift bepalend. Onbemest hooien en licht bemest beweiden (tot maximaal 75 kg N per hectare per jaar) leiden tot een sterke zode. De beheermethoden die hieraan voldoen, sluiten aan bij de voor rivierdijken onderscheiden categorieën *waterstaatkundig, aangepast agrarisch en natuur-*

technisch beheer [Fliervoet, 1992]. Als bij beweiding plekken onbegraasd blijven, moeten die alsnog worden gemaaid, waarna het maaisel wordt afgevoerd. Veel schapen in korte periodes telkens een perceel laten afgrazen dat daarna een aantal weken rust krijgt, is de beste beweidingmethode.

- Bij onbemest hooilandbeheer kan de grasbekleding van de dijk naast de gewenste sterkte ook een hogere natuurwaarde krijgen. Er ontstaat een grote soortenrijkdom met een relatief groot aantal (overblijvende) kruiden die karakteristiek zijn voor het rivierengebied en daarbuiten zelden voorkomen.
- Zoden met een lage worteldichtheid zijn slecht erosiebestendig. Zo'n lage worteldichtheid komt voor bij grasmatten met veel open plekken en hoog opgaande gewassen (onder andere Gewone berenklaauw, Grote brandnetel en Fluitenkruid). Deze zoden ontstaan vooral bij onderhoud in de vorm van maaien zonder afvoer van het maaisel (klepelmaaien). Ook intensief bemesten met weiden of hooien leidt tot een geringe doorworteling. Dit soort grasmatten, waarin onder andere Gewoon herderstasje, Ridderzuring, Akkerdistel en Straatgras groeien, kunnen 'gesloten' lijken, maar zijn dat niet. De hier veel voorkomende eenjarige soorten sterven 's winters af en er is veelal een oppervlakkige doorworteling met weinig variatie aan wortels.
- Extensivering van beheer, dat wil zeggen het stoppen of verminderen van de bemesting, leidt tot een verbetering van de erosiebestendigheid. Bij de overgang van intensief weiden naar onbemest hooien blijkt al binnen enkele jaren een gunstig effect: de doorworteling neemt toe.
- Ook de grondsoort is van invloed op de zodevorming. Uit ervaring met bestaande, goed erosiebestendige grasmatten blijkt dat (matig) erosiebestendige klei (categorie 1 of 2 volgens het *Technisch rapport klei voor dijken* [TAW, 1996]) voldoende is. Een dicht wortelnet ontwikkelt zich echter sneller en beter in een zandiger klei die wordt geclassificeerd als categorie 3. Bij toepassing van een bekleding van erosiebestendige klei wordt daarom een toplaag aanbevolen van zandige klei met een zandgehalte van maximaal 50% en enige cohesie. Hierbij moet een dikte worden aangehouden van ca. 0,25 m (minimaal 0,15 m, maximaal 0,35 m). Aan deze eisen voldoen vrijwel alle natuurlijke kleisoorten in Nederland.
- Op zandiger klei kan een kruidenrijkere vegetatie tot ontwikkeling komen met karakteristieke en zeldzame rivierbegeleidende soorten. Deze natuurwinst kan een extra reden zijn voor een toplaag van zandige klei.
- De belasting op het dijktafval als gevolg van stroming van water is minder dan die van golven van enige decimeters hoogte. Daardoor is deze belasting niet maatgevend als er ook sprake is golfbelasting.
- Binnentaluds worden bij golfoverslag belast door afstromend water. Bij een matige tot goede gesloten grasmat zal tot een gemiddeld overslagdebiet van 10 l/s/m geen schade door erosie ontstaan.

2.2. Conclusies en aanbevelingen voor rivierdijken

- Golven in het rivierengebied zullen tijdens een hoogwater niet hoger worden dan enkele decimeters. Een grasmat met een gesloten begroeiing en met een hoge worteldichtheid is dan altijd toereikend. Kleine beschadigingen en aanwezige gaten, waaronder mollengangen, leiden niet tot schade. Voorwaarde is wel dat de gaten niet groter zijn dan zo'n 900 cm² en niet dieper dan 0,10 m. Om te voorkomen dat de beschadigingen aan de grasmat te groot worden moet drijfvuil tijdig worden verwijderd.
- Als er twijfel bestaat aan de mogelijkheid tot handhaving van het vereiste graslandbeheer, waardoor tijdens hoogwater met belasting door golven risico voor schade ontstaat, moet de onderlaag uit minimaal matig erosiebestendige klei bestaan. Voor de totale dikte van de deklaag van klei moet dan, overeenkomstig de *Leidraad voor het ontwerpen van Rivierdijken*, minimaal 1m worden aangehouden.
- Een talud steiler dan 1:3 vormt op zichzelf geen belemmering voor het laten groeien van gras en het toepassen van een graslandbekleding. In de praktijk kan het onderhoud moeilijker te verwezenlijken zijn, bijvoorbeeld omdat langere maaiaermen nodig zijn. De belasting zal met de steilheid van het talud toenemen, maar die toename is gering ten opzichte van de marges in de sterkte.
- Bij de bepaling van de golfbelasting op dijken moet rekening worden gehouden met de golfdempende invloed van gradiënten in de stroomsnelheid van de rivier en de uiterwaarden en met de voortplantingsrichting van de golven.

2.3. Conclusies en aanbevelingen voor zee- en meerdijken

- Golven tegen de buitentaluds van zee- en meerdijken kunnen hoogten bereiken van meer dan 1,5 m. Op basis van de huidige kennis mag er niet op worden gerekend dat een goede grasmat (op een talud van 1:3 à 1:4) brekende golven van deze hoogte lang genoeg (voor de duur van een zware stormvloed) kan weerstaan.
- Tot nog toe ontbreken de criteria om een willekeurige grasmat op de vereiste kwaliteit te beoordelen. Wel is gebleken dat zeer goede grasmaten (op een talud van 1:3 à 1:4) op erosiebestendige ondergrond golven van 1,0 m kunnen doorstaan. Na meer dan een etmaal ontstond geen ernstige schade. Bij golfhoogten van iets meer dan 1m bleek de schadevrije periode korter, maar nog lang genoeg voor een stormvloed-hoogwater.
- Goede grasmaten zullen bij golfhoogten tot 0,75 m tijdens een stormvloed geen schade lijden. Voor zeer flauwe taluds (1:6 en flauwer) geldt dit naar evenredigheid ook voor hogere golfbelastingen.

- Bij grote golfhoogten zoals die bij zee- en meerdijken kunnen voorkomen, is het risico van een uitbreiding van een kleine schade veel groter dan bij rivierdijken. Daarom moet er altijd een onderlaag van voldoende erosiebestendige klei zijn. Deze moet minstens 1 à 1,5 m dik zijn, afhankelijk van de belasting en de verdere opbouw van de dijk.
- Voor een grasmat net boven de stilwaterlijn (dat wil zeggen boven het ontwerppeil tijdens de maatgevende stormvloed) is de belasting door golfoploop veel geringer dan in de brekerzone. Daarom is de erosiesnelheid vier keer zo laag. De grasmat boven de stilwaterlijn kan dan ook een twee keer zo grote golfhoogte weerstaan als een grasmat in de brekerzone. Dit geldt voor een vlak talud met een niet te gladde, harde bekleding (bijvoorbeeld haringmanblokken of basaltzuilen) en met een overgang naar de grasbekleding zonder opstaande randen of spleten.

3. Beschrijving onderzoeksresultaten

3.1. Civieltechnisch en vegetatiekundig onderzoek

Het onderzoek naar de erosiebestendigheid van graslandbekledingen is aanvankelijk gestart langs twee gescheiden en onafhankelijke sporen:

1. vanuit een *civieltechnisch* oogpunt met de vraag om modellering van de relatie belasting-sterkte-schade;
2. vanuit een *vegetatiekundig* oogpunt, gericht op de vraag of en hoe het mogelijk is om een grasmat zodanig te onderhouden dat de vegetatie karakteristieke en zeldzame soorten kan herbergen.

Spoedig bleek dat de beide sporen dienden te worden geïntegreerd. Daarbij zijn twee benaderingen gevolgd. De ene benadering vraagt veel tijd en biedt fundamenteel inzicht. Het is een meer theoretische benadering gebaseerd op de analyse van erosieproeven. De andere is een *black box*-benadering, die in korte tijd zou kunnen leiden tot een bruikbaar, eenvoudig erosiemodel. Daarbij ontstaat echter geen inzicht in de onderliggende mechanismen, zodat de toepassing beperkt is tot empirisch onderzochte situaties.

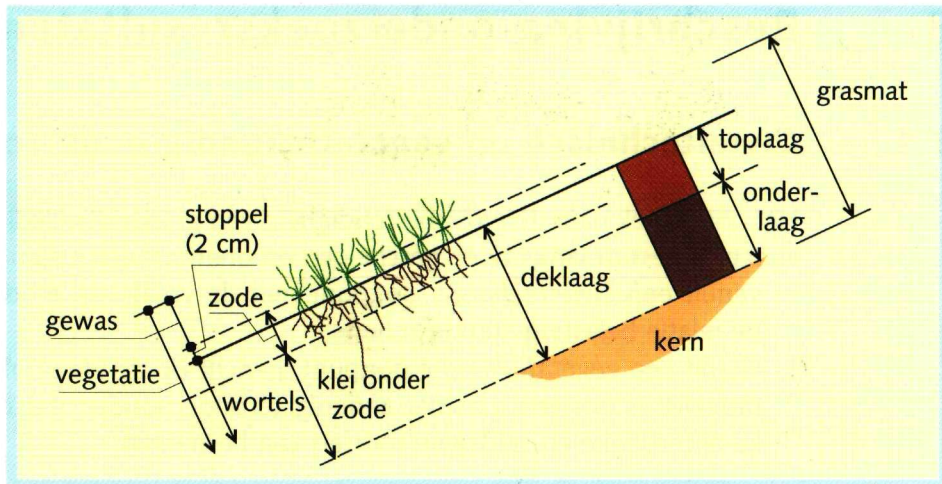
Aangezien beide onderzoeklijnen zijn gericht op het verkrijgen van een gedrags- c.q. schademodel voor gras als zelfstandig element, zijn ze in de loop van de tijd steeds meer op elkaar afgestemd. In de ene lijn is onderzoek gedaan naar de sterkte van grasland, de daarbij behorende relevante erosiemechanismen en de oorzaken van de erosiebestendigheid. In de andere lijn zijn de hydraulische belastingen bij golfaanval bestudeerd (watersnelheden, golfloop, golfklap, etc.). In de volgende paragrafen zijn de resultaten van beide soorten onderzoek kort samengevat.

3.2. Opbouw en sterkte van graszoden

3.2.1. Samenhang in de zode

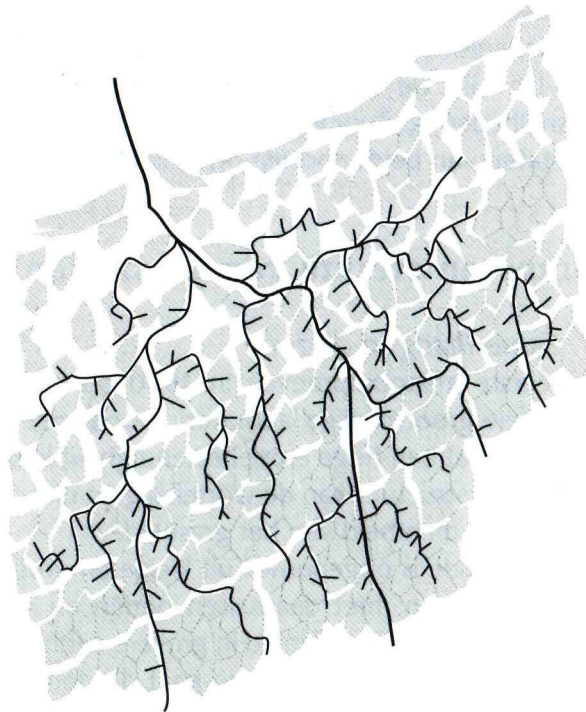
Uit de eerste afstroomproeven in 1970 op de Knardijk, uitmondend in onder andere grootschalige laboratoriumonderzoeken [Burger, 1984], bleek dat een grasmat een hoge erosiebestendigheid kan bezitten. Deze zit voornamelijk in de structuur van de wortellaag en niet, zoals tot dan veelal werd gedacht, in de dichtheid van het grasblad.

Grond in de zode is opgebouwd uit kleine en grotere brokjes, zogenoemde structuurelementen, met daartussen poriën en wortels. Fijne brokjes van minder dan 20 mm zijn verenigd in grovere eenheden. Deze vormen op hun beurt weer grovere brokken en zo gaat dit door tot aggregaten van enige centimeters. De brokken ontstaan door wisselingen in vochtigheid en temperatuur aan het maaiveld, door ijsvorming, gravende dieren en wortelgroei. Ze kunnen bestaan door cementerende stoffen die deeltjes aan elkaar plakken. Plantenwortels en vooral de chemische processen in de directe nabijheid van de wortels dragen in belangrijke mate bij aan het ontstaan van deze cementerende stoffen.



figuur 3.1: Opbouw deklaag grasmat met onderdelen. (Bron: Rijkswaterstaat)

De plantenwortels zelf zijn ook een belangrijk middel om de brokken in de grond bij elkaar te houden. De zeer fijne haarwortels en symbiotische schimmeldraden in de grond houden de fijne aggregaten bijeen doordat ze er in of er op zijn verankerd. De grovere plantenwortels houden brokken en brokjes bijeen door een kooiwerking. Het netwerk van grotere en fijnere wortels maakt een zode tot een sterke, veerkrachtige en flexibele laag, die kan vervormen zonder te scheuren. Ook is de zode zeer doorlatend, waardoor het water weinig aangrijpingspunten heeft om de zode te eroderen.

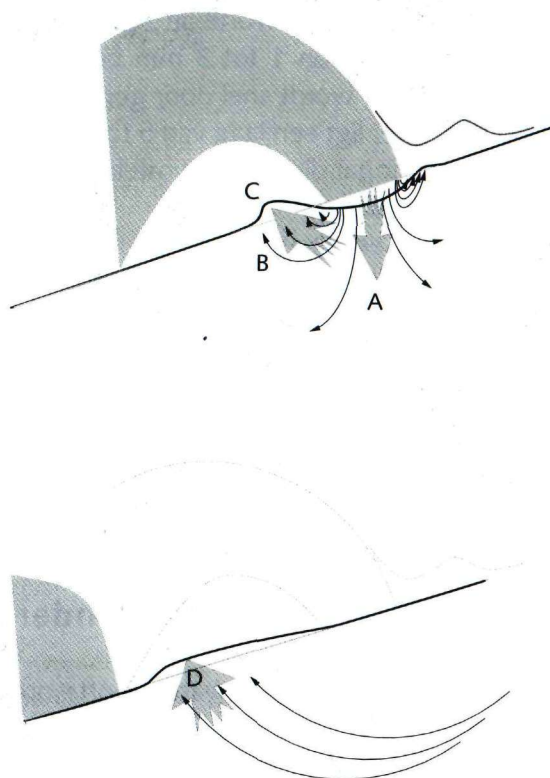


figuur 3.2: Schematische weergave van de opbouw van de zode. (Bron: Grondmechanica Delft).

Toelichting:

Wortels, soms meer dan 1 m per cm³ zode, wapenen de grond door zich in de brokjes te verankeren en de brokjes als in een net bijeen te houden. De veerkrachtige verbinding die de kronkelende worteltjes tussen de gronddeeltjes in stand houden, is een belangrijke oorzaak van de erosiebestendigheid van een graszode.

De beschermende werking van de zode berust op twee eigenschappen die elk een rol spelen bij een bepaalde mate van belasting:



figuur 3.3: Waterstroming door grond en beweging van de grond bij golfaanval.
(Bron: Grondmechanica Delft)

Toelichting:

- A: indrukken door de kracht van het neervallende water
- B: waterstroming door de grond van de golfinslagzone vandaan
- C: omhoog en opzij bewegingen van de grond direct naast de golfinslagzone
- D: omhoog bewegen van de grond door waterdruk als de golf is weggetrokken.

- De *flexibiliteit en veerkracht van de zode*. Hierop wordt een beroep gedaan bij belasting door golfklappen. Door de grote krachten waarmee het inslaan van hoge golven gepaard gaat en door de waterdrukken in de grond kan een deel van het dijktaalud instabiel worden, vooral beneden de stilwaterlijn tijdens en na golfinslag. De flexibiliteit en de veerkracht van de zode houden dan de grond bijeen. Uit proeven en berekeningen bleek dat de veerkracht van de zode voldoende is om kleitaluds te beschermen die zonder zode zeer snel eroderen.
- *Het bijeenhouden van brokken grond door het wortelnet*. Hierop wordt een beroep gedaan bij golfwerking op het talud, dat wil zeggen in zones met golfoploop en -afloop. Individuele gronddeeltjes worden alleen door stromend water meegenomen als ze niet voldoende aan elkaar vastzitten door cementatiebindingen, zoals in zandige grond. Bovendien kunnen de bovengrondse plantendelen de interactie tussen het bewegende water en de grond beperken.

3.2.2. Verticale opbouw van de zode

De zode heeft een verticale opeenvolging van dieptezones. Hoe de zones precies liggen, hangt af van de grondsoort en het type en de ouderdom van de vegetatie. Bij goed doorwortelde zoden is de opbouw als volgt:

- De bovenste laag van 1 tot 3 mm bestaat uit rulle grond en plantenresten. Deze laag wordt snel door golven weggespoeld.
- Direct daaronder ligt een laag van 5 tot 50 mm waarin de zode losgepakt is en meestal nogal dicht doorworteld. Deze laag wordt daardoor maar langzaam geërodeerd.
- Daaronder ligt een laag tussen 5 en 15 cm waarin de zode vaak iets dichter is gepakt en de hoeveelheid wortels aanzienlijk minder is. Deze zone wordt pas bij langdurige golfbelasting aangetast.
- Verder naar beneden neemt de doorworteling af en de pakking van de grond toe.

In horizontale richting kan de structuur van deze verticale zones over enkele meters afstand sterk verschillen. Dit is het gevolg van lokale verschillen in de wisselwerking tussen plantenwortels, bodemdieren en de bodem.

3.3. Grootschalige laboratoriumonderzoeken

Er zijn twee modelproeven op ware grootte op grastaluds uitgevoerd. Eén ervan¹ betrof een proef met relatief lage golven ($H_s = 0,3$ m) op een aantal zoden van graslandtaluds gestoken uit dijken in het bovenrivierengebied. De andere² was er één met hogere golven ($H_s < 1,35$ m) op een zode gestoken uit de Friese Waddenzeedijk.

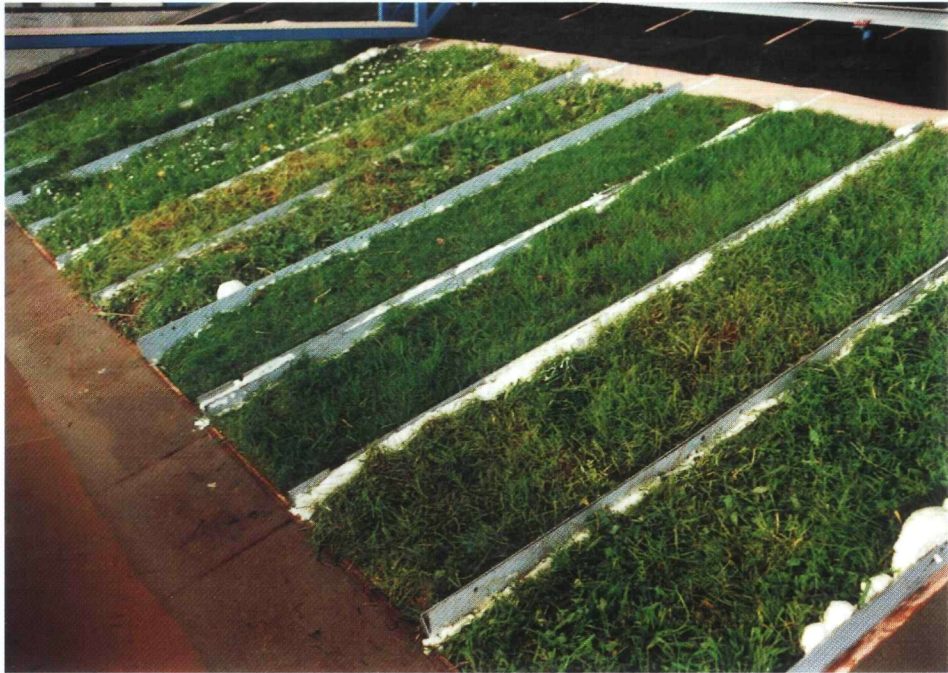
3.3.1. Proef Scheldebak 1994

De proef met lage golven had tot doel om van verschillende graslandtypen de minimale erosiesterkte te bepalen die nodig is om een gegeven golfbelasting zonder aanmerkelijke schade te kunnen doorstaan. De maatgevende condities waren een golfhoogte van 0,3 m met een periode van 2,5 s. De duur van de golfbelasting was 60 uur. De zoden waren ingebouwd onder een talud van 1:3. De wijze en mate van ontgroning zijn waargenomen door metingen en visuele inspecties. Ook de samenstelling en opbouw van vegetatie en grond zijn vastgesteld. Verschillende rivierdijkgraslandtypen met uiteenlopend beheer werden getest. Het ging om grasmatten in voorjaarsconditie. Sterk zandige bodems en intensief bemeste bodems zijn niet onderzocht. Bij de proeven bleek dat:

- de erosie na vele tientallen uren belasting van goed doorwortelde graszoden niet meer dan de bovenste paar centimeter van de zodegrond had verwijderd;
- van een talud met een zeer matig doorwortelde zode meer dan 0,1 m grond verdween;
- waar een zode nagenoeg ontbrak op het talud zeer snel gaten van meer dan 0,2 m diepte ontstonden.

¹ Scheldebak, Waterloopkundig Laboratorium, 1994.

² Deltagoot, Waterloopkundig Laboratorium, 1992.



figuur 3.4: Grootschalige proeven met rivierdijkgraszoden. (Bron: Waterloopkundig Laboratorium)

De aantasting van het gras en de grond trad vooral op in de zone waar de golven breken. Ook in de golfoploopzone trad duidelijk waarneembare erosie op en werd de begroeiing aangetast.

Mollen- en muizengangen bleken de ontgronding niet merkbaar te beïnvloeden behalve op plaatsen met een dicht vertakt gangennetwerk in de zode. Ook met opzet in de grasmat gemaakte gaten ter grootte van een stoeptegel bleken na 12 uur belasting niet groter geworden.

De samenstelling van de grond in de zode vertoonde per locatie grote verschillen. Het merendeel van de grondmonsters van de onderzochte zoden betrof de categorie *goed erosiebestendig*, volgens het Technisch Rapport klei voor dijken [TAW, 1996]. Volgens die indeling van klei voor dijken waren er twee locaties behorend tot de categorie *weinig* respectievelijk *matig erosiebestendige* grond.

De waargenomen mate van erosie werd overheerst door de kwaliteit van de doorworteling en niet door het type grond in de zode. Goed doorwortelde zoden werden nauwelijks waarneembaar geërodeerd, zij het dat bij twee zoden met een in aanleg weinig erosiebestendige klei in aanvang een iets sterkere erosie werd gemeten dan bij zoden met een in aanleg matig tot goed erosiebestendige klei. De sterkste erosie werd echter waargenomen bij zoden met een goed erosiebestendige klei, maar met een slechte doorworteling. Deze slechte doorworteling was het gevolg van een beheer dat bestond uit klepelmaaien.

De conclusie is dat een goede doorworteling van de zode de doorslaggevende factor is voor de erosiebestendigheid. De erosiebestendigheidscategorie van de klei is dan minder van belang. Deze bevindingen komen overeen met veldwaarnemingen van erosieschade door golven van 0,4 m langs een zeedijk in Zeeuws-Vlaanderen. Daar ontstond in een zeer slecht ontwikkelde graszode in 48 uur schade tot enige decimeters diepte ondanks een matig tot goed erosiebestendige grond.

3.3.2. Proef Deltagoot 1992

Bij de proef met hogere golven is een grasmat uit een zeedijk onderzocht. Deze grasmat is onder een talud van 1:4 ingebouwd en belast met golven van 0,75 m en 1,35 m (bijbehorende golfperioden respectievelijk 3,4 s en 4,7 s). De beproefde grasmat kende een matige bemesting en relatief sterke beweiding. De belastingduur was meer dan een etmaal. Het doel was het meten van de erosie van de graszode als functie van de golfbrandvoorwaarden en een analyse van de erosieprocessen om meer kennis op te doen over de relatie belasting-sterkte. Hiertoe zijn visuele waarnemingen aan de erosie gedaan en hebben er peilingen van het talud plaatsgevonden. Ook zijn de vervorming van de grond en de waterbeweging en -drukken op en in het talud gemeten.

Waarneming van de gevolgen voor het binnentalud van overstromend water door golfoverslag met debieten variërend van 0,1 tot 25 l/s/m lieten geen erosie van de graszode zien.



figuur 3.5: Gat na 11 uur golven bij een grootschalige proef met zeedijkgraszode.
(Bron: Waterloopkundig Laboratorium)

De graszode met een soortenarme vegetatie die doorgaans weinig erosiebestendig is, kon toch zeer lange tijd hoge golven weerstaan. De zode was redelijk doorworteld in erosiebestendige grond. Bij golven van 0,75 m hoog gedurende meer dan een etmaal bezweek deze niet. Het grasblad raakte wel zwaar beschadigd, maar de zode had slechts de bovenste paar centimeters grond verloren. Bij golven van bijna 1,4 m hoogte bezweek de zode na ongeveer 16 uur golfbelasting. Na ongeveer 6 uur ontstond er een klein gat, maar dat groeide slechts langzaam. Op grond van soortensamenstelling werd de beproefde grasmat ingedeeld bij de doorgaans weinig erosiebestendige beemdgras-raaigrasweide. Deze tegenstrijdigheid kan als volgt worden verklaard. De zode was afkomstig van een oude dijk, waar zich een hecht wortelpakket had ontwikkeld. Deze dijk bleek pas de laatste tien jaar intensiever bemest en beweide, waardoor een floristische verarming is opgetreden. Er werden dan ook als najffect van de vorige toestand enkele soorten aangetroffen die kenmerkend zijn voor een erosiebestendiger type (kamgrasweide). Hieruit blijkt dat de voorgeschiedenis ook een factor is die de mate van erosiebestendigheid mede bepaald.

Tijdens een deel van de proef zijn de waterdrukken in de kleilaag onder de zode gemeten. Deze waterdrukken zijn, zeker voor hogere golven, een belangrijke factor voor de krachten die tot ontgronden leiden. De geregistreerde waterdrukken waren vaak hoog genoeg om grond uit het talud opwaarts te bewegen. Uit berekeningen waarin de waterdrukken in de ondergrond en de directe golfbelasting op het talud zijn opgenomen, blijkt dat slechts een sterke en veerkrachtige zode een sterke ontgroning van het talud voorkomt. Deze conclusie werd bevestigd door de sterke ontgroning die werd geconstateerd bij vergelijkbare proeven met hoge golven op taluds met klei zonder of met slechte doorworteling. Om kwantitatieve gegevens te verkrijgen zijn *in situ* en in het laboratorium proeven op zode en ondergrond uitgevoerd. Hiervoor zijn zeer grote monsters gebruikt om de variaties binnen graszoden en in bodemstructuur te verdisconteren.

3.4. Botanische samenstelling en erosiebestendigheid van grasland

Op een groot aantal rivier- en zeedijklocaties zijn de plantengemeenschap, het type graslandbeheer, de bodemsamenstelling, de beworteling en de erosiebestendigheid onderzocht. Op enkele proefvakken op rivierdijken en op twintig proefvakken op zeedijken is het type beheer veranderd om het effect op vegetatie, beworteling en erosiebestendigheid in de tijd te kunnen volgen. De gevonden relaties worden hierna per plantengemeenschap beschreven.

Tabel 3.1: Plantengemeenschappen en kenmerkende soorten

PLANTENGEMEENSCHAP	KENMERKENDE SOORTEN
Droog stroomdalgrasland	Akkerhoornbloem, Zachte haver, Muizenoor, Grote tijm, Geel walstro, Gewone zandmuur, Kleine bevernel, Echte kruisdistel, Sikkelklaver, Trilgras, Veldsalie, Gewoon reukgras
Glanshaverhooiland	Heggewikke, Beemdlangbloem, Groot streepzaad, Glad walstro, Scherpe boterbloem
Kamgrasweide	Glad walstro, Timoteegras, Vijfvingerkruid, Madeliefje, Brunel, Kleine leeuwentand, Jakobskruiskruid, Kamgras, Knolboterbloem, Hondsdraf
Glanshaverhooiland met zoomsoorten	Heksenmelk, Wilde marjolein, Kruisbladwalstro, Viltig kruiskruid, Rapunzelklokje
Beemdgras-raaigrasweide (productieweiland)	Engels raaigras, Madeliefje, Zachte ooievaarsbek
Verruigd hooiland	Fluitenkruid, Kleefkruid, Grote vossenstaart, Gewone berenklaauw

Tabel 3.1 geeft een overzicht van de plantengemeenschappen op rivier- en zeedijken met vermelding van enkele kenmerkende soorten.

Uit tabel 3.2 blijkt dat het merendeel van de dijken een minder erosiebestendige grasmat heeft. Dit wil echter niet zeggen dat op die dijken de grasmat per definitie onvoldoende sterk is. Het betekent wel dat er bij hoogwater, afhankelijk van de golfbelasting, een grotere kans is op schade en dat eerder aanvullende maatregelen moeten worden getroffen. Het betekent ook dat op die dijken het beheer niet is gericht op de bescherming en ontwikkeling van de voor die dijken kenmerkende natuurwaarden.

3.4.1. Plantengemeenschappen op rivierdijken

De soortenrijke gemeenschappen op rivierdijken zijn, in volgorde van afnemende erosiebestendigheid:

- droog stroomdalgrasland;
- glanshaverhooiland waarbij het beheer bestaat uit één tot twee maal per jaar maaien met afvoer van het maaisel en het achterwege laten van bemesting;
- kamgrasweide, met een beheer van weiden zonder bemesting.

De verschillende gemeenschappen die op rivierdijken en zeedijken voorkomen zijn in tabel 3.2 aangegeven met het geschatte procentuele aandeel dat zij van het totale dijkareaal aan rivier- of zeedijken innemen. Het voorkomen van de verschillende plantengemeenschappen is vooral afhankelijk van het gevoerde beheer en in mindere mate van grondsoort en overige standplaatsfactoren. Droog stroomdalgrasland kent een beperkte verspreiding op relatief zandige bodems. Glanshaverhooiland en kamgrasweide liggen verspreid in het rivierengebied en zijn sterk in oppervlakte achteruitgegaan door veranderingen in het beheer. Glanshaverhooiland met zoomsoorten komt vooral in Zeeland op binnendijken voor. Ongeveer 70% van het areaal op de rivierdijken bestaat uit soortenarme gemeenschappen: beemdgras-raaigrasweide (productieweiland) of verruigd hooiland.

Tabel 3.2: Plantengemeenschappen van rivierdijken, primaire en secundaire zeedijken (inclusief meerdijken)

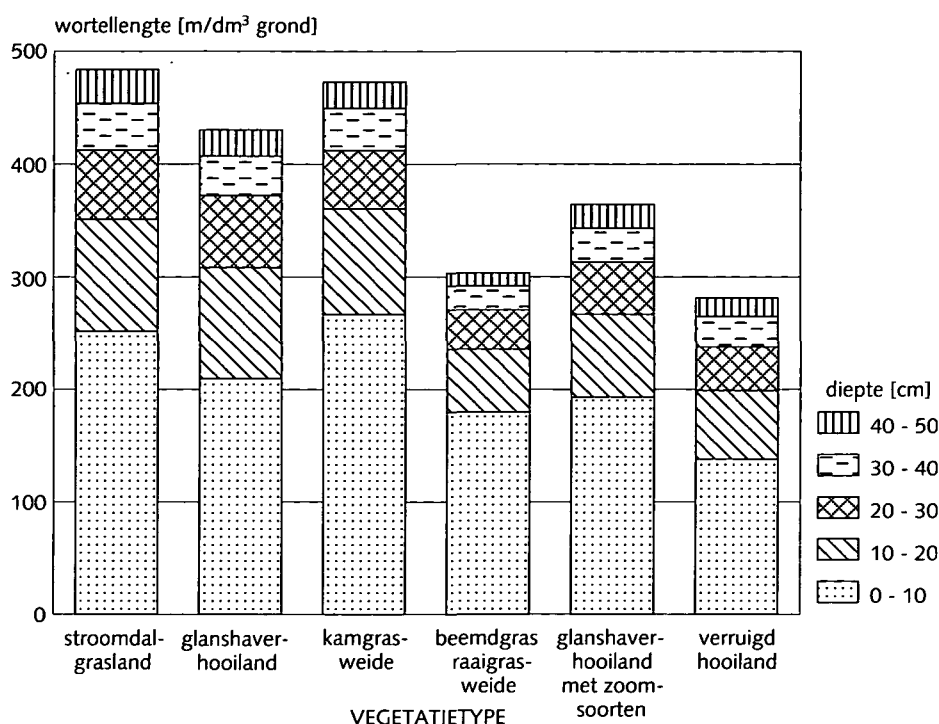
TYPE	AANTAL SOORTEN	EROSIE-BESTENDIGHEID	% RIVIERDIJK	% 2 ^E DIJK (MEERDIJK)	% 1 ^E ZEEDIJK	BEHEER
stroomdalgrasland	30	++ zeer goed	0,5-1			onbemest, 1 x hooien
glanshaverhooiland met zoomsoorten	27	+ goed	0,1-0,3	5	0,05	onbemest onregelmatig hooien
glanshaverhooiland soortenrijk	32	++ zeer goed	2-4	1	0,05	onbemest 1-2 x hooien
glanshaverhooiland soortenarm	13	0 matig		5	10	bemest hooien
verruigd hooiland	8-20	slecht	20-30	20	10	zwaar bemest hooien of klepelmaaien
kamgrasweide soortenrijk	36	++ zeer goed	2-4	1	0,5	onbemest weiden
kamgrasweide soortenarm	15	+ goed		15	20	licht bemest weiden
beemdgras- raaigrasweide	12-18	0 matig	60-70	50-55	60	zwaar bemest weiden

Droog stroomdalgrasland, glanshaverhooiland en kamgrasweide hebben een goede erosiebestendigheid door een dichte zode. Ze hebben een diepere en intensievere doorworteling dan productieweiland en verruigd hooiland. Bij de velderosieproef spoelde bij stroomdalgrasland, kamgrasweide en glanshaverhooiland het minste materiaal uit. Bij de erosiecentrifugeproef bleek tussen de gemeenschappen geen significant verschil in de benodigde tijd voor eenzelfde massaverlies. Productieweiland heeft ondanks een goede bedekking een relatief lage erosiebestendigheid. Dit is



figuur 3.6: Proefopstelling sproeikopproef (Bron: Landbouw Universiteit Wageningen)

het gevolg van een lage worteldichtheid, waarbij wortels zich vrijwel uitsluitend in de bovenste 10 cm van de bodem bevinden. Het percentage monsters dat het einde van de erosiecentrifugeproef niet haalde was bij productiegrasland het grootst. Met de velderosieproef spoelde in veruigd hooiland vijf tot twintig keer zoveel materiaal uit als bij de andere beheervormen. Dit type heeft een lage worteldichtheid en daarbij ook een zeer open zode.



figuur 3.7: Gemiddelde worteldichtheid per plantengemeenschap. (Bron: Landbouw Universiteit Wageningen)

Bij de velderosieproef hangt de hoeveelheid uitgespoeld materiaal af van de dichtheid van de zode. Gemeten met de erosiecentrifugeproef hangt de erosiebestendigheid af van de combinatie van doorworteling en korrelgrootteverdeling.

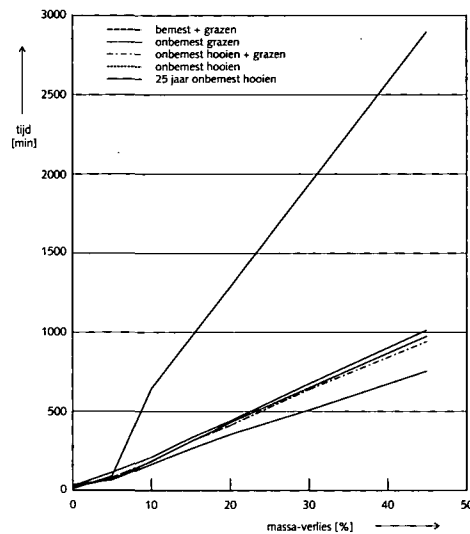
Geconcludeerd kan worden dat vegetaties met een grote soortenrijkdom zeer goed bestand zijn tegen lage golven zoals in het rivierengebied. Aan deze dijkgraslanden wordt een hoge natuurwaarde toegekend.

3.4.2 Plantengemeenschappen op zeedijken

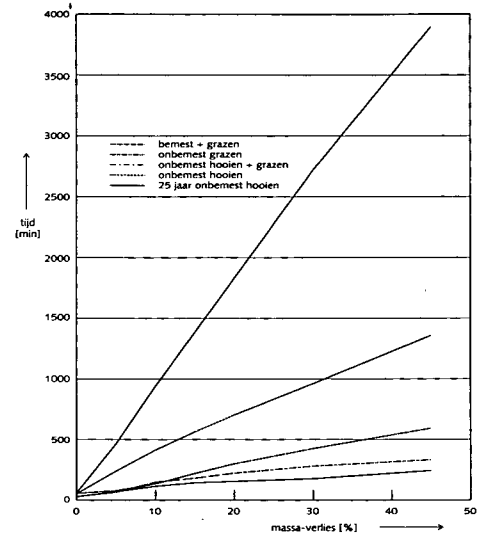
Als gevolg van bemesting van weiland en hooiland is de soortenrijkdom van zeedijken bijna overal laag. Waar niet wordt bemest komt soortenrijk glanshaverhooiland en kamgrasweide voor. Van de kamgrasweide komt op relatief zandige plekken op de zeedijken in het noorden van het land een soortenarme variant voor die niet op rivierdijken wordt gevonden. In deze variant is de bedekking van Rood zwenkgras hoog. Op zeedijken in Zeeland komt van het glanshaverhooiland ook een soortenarme variant voor. De vegetatie kent vaak maar enkele grassoorten (Glanshaver, Rood zwenkgras, Kweek, Rietzwenkgras, Kropaar) en kruiden (Gewone berenklauw). Dit is

bemest hooiland met een dermate hoge productie dat twee à drie keer per jaar wordt gehooid. Verruigd hooiland komt ook veel voor op zeedijken. Dit ontstaat bij klepelen. Het overgrote deel is begroeid met bemeste soortenarme beemdgras-raaigrasweide. De soortenrijke vegetaties van kamgrasweide en glanshaverhooiland zijn nog sporadisch te vinden op overhoeken of lokaal op een tweede dijk.

Ook op zeedijken zijn de onbemeste, soortenrijke gemeenschappen het meest erosiebestendig. Dit bleek uit een centrifugeproef, waarin de lagen van 0-5 cm en 5-10 cm apart zijn getest.



figuur 3.8 a: Erosiecentrifugeproef laag 0-5cm. De relatie tussen massaverlies in % en benodigde tijd per beheervorm wordt aangegeven in cm. (Bron: Landbouw Universiteit Wageningen).



figuur 3.8b: Erosiecentrifugeproef laag 5-10cm. De relatie tussen massaverlies in % en benodigde tijd per beheervorm wordt aangegeven in cm.

Naast deze proef werd ook een velderosieproef gedaan en is de afschuifweerstand gemeten. Hier werd echter geen verschil aangetoond tussen onbemest glanshaverhooiland en bemeste graslanden (soortenarm glanshaverhooiland, soortenarme kamgrasweide en beemdgras-raaigrasweide).

Evenals bij rivierdijken heeft het meest erosiebestendige type (soortenrijk glanshaverhooiland) de hoogste worteldichtheid met hoge waarden voor zowel wortellengte als totaal wortelmassa. Een extra aanwijzing dat de weerstand door wortels wordt geleverd is dat deze geteste zode een lage bovengrondse bedekking heeft van stengels en blad. Ter vergelijking: soortenarme, bemeste kamgrasweide heeft een geringere weerstand tegen erosie bij een hoge bovengrondse bedekking en een ondiep wortelstelsel. Goed ontwikkelde bovengrondse plantendelen (stengels en bladeren) dragen dus weinig bij aan erosiebestendigheid.

3.5. Proefprojecten aanleg en beheer

3.5.1. Bemesting, beweiding en hooien

Stoppen met bemesten en minder intensief weiden of één à twee keer per jaar hooien verandert de botanische samenstelling en daarmee de doorworteling. Dit bevordert de erosiebestendigheid. Op rivierdijken is een beheerexperiment uitgevoerd met het wel en niet afvoeren van maaisel. Na drie jaar bleek de wortelhoeveelheid in de proefvakken met maaiselafvoer te zijn toegenomen. De hoeveelheid uitgespoeld materiaal was daardoor lager dan in de proefvakken zonder afvoer van maaisel.

Op zeedijken is in de periode 1991-1995 een serie experimenten uitgevoerd in bemest weiland, waarbij de bemesting is gestopt en drie beheervarianten zijn gestart:

- twee periodes weiden;
- één keer hooien met nabeweiding;
- twee keer hooien.

De 'twee-keer-hooien-variant' had een toename van doorworteling tot gevolg in de laag 6-10 cm. Er ontstond een relatief diep wortelpakket met dikke en dunne wortels, net als in soortenrijk hooiland. Ondiep wortelende soorten als Engels raaigras en Vogelmuur namen af en dicht wortelende soorten als Rood zwenkgras namen toe. Uit deze experimenten blijkt dat overgang van een bemest agrarisch naar een niet bemest natuurtechnisch beheer al op relatief korte termijn gunstig is voor de erosiebestendigheid.

3.5.2. Inzaai

Bij Pannerden is een rivierdijktalud ingezaaid met diverse graszaadmengsels in verschillende dichtheden, waarbij een beheer wordt toegepast van maaien met afvoer en schapenbeweiding. Er blijkt dat de samenstelling van het ingezaaide graszaadmengsel bepalend is voor de vegetatie. Ook na zeven tot acht jaar blijken in alle vakken soorten van de opgebrachte mengsels te domineren.

De dominante rol van de zaden die er het eerst zijn in de uiteindelijke samenstelling van een zich nieuw ontwikkelende grasbekleding bleek ook uit een experiment in het proefvak Zaltbommel. Na dijkverzwaring werd het effect bestudeerd van verschil in aanleg en beheer. Voor herstel van soortenrijk, erosiebestendig grasland bleken de volgende aspecten belangrijk:

- Het terugzetten van zodegrond, afkomstig van plekken met soortenrijk grasland. Hierin bevindt zich veel zaad van stroomdalsoorten, zodat die zich sneller opnieuw kunnen vestigen.
- Snelle ontwikkeling van erosiebestendig grasland wordt ook op gang gebracht door inzaai met een zadenmengsel dat gewonnen is op plekken met soortenrijk grasland. Hierbij is het belangrijk dat het zaad wordt gewonnen op het moment dat de meeste soorten rijp zaad hebben.
- Inzaai met een weidegraszaadmengsel (bijvoorbeeld BG5) in hoge dichtheid (70 kg/ha) vertraagt de ontwikkeling van een soortenrijke, erosiebestendige vegetatie en wordt daarom afgeraden.
- Inzaai met Italiaans raaigras (20-25 kg/ha) levert, omdat het eenjarig gewas is, ook een geringe doorworteling op. Als alleen commercieel graszaad beschikbaar is, verdient het toch de voorkeur boven het BG5-

- mengsel. Italiaans raaigras legt de bovengrond vast maar blijft niet dominant. Daardoor kunnen zich geleidelijk stroomdalsoorten vestigen.
- De beheervorm twee keer maaien met afvoer levert de hoogste erosiebestendigheid doordat het leidt tot een vegetatie met hoge worteldichtheid.
 - Beweiding levert door de lagere en ondiepere worteldichtheid een lagere erosiebestendigheid.

3.6. Ervaringen tijdens hoogwaters op de rivieren

In het bovenrivierengebied zijn op tien locaties schadeproefvakken geselecteerd om ervaring op te doen met het gedrag van grasland tijdens hoogwaters, in het bijzonder wat betreft de erosiebestendigheid [Heidemij, 1994]. In de verslagperiode, najaar 1991 - najaar 1994, is slechts één hoogwaterperiode voorgekomen waarbij de taluds onder water kwamen te staan. Dit was van december 1993 t/m februari 1994 met een piek rond kerstmis 1993. De windsnelheid was gering en in combinatie met strijklengte, oriëntatie van de dijk, etc., kwamen golven van maximaal 0,30 m voor bij een belastingduur van minder dan 12 uur en golven van maximaal 0,20 m bij een belastingduur van meer dan 12 uur.

Na het hoogwater is op een aantal locaties duidelijke schade geconstateerd. Voor een deel is deze veroorzaakt door wrakhout en is er geen relatie met de kwaliteit van het grasland. Een ander deel ontstond bij een slecht doorwortelde, bemeste zode. De schade bleef echter beperkt doordat de golfslag gering was. Bij een grotere golfslag zou de schade groter zijn geweest.

In de periode januari/februari 1995 zijn op zowel Rijn als Maas zeer hoge waterstanden voorgekomen [TAW, 1995]. Bovendien stond er een wind met een kracht van ongeveer 5 Beaufort uit zuidwestelijke richtingen die (geschatte) golfhoogten veroorzaakte van maximaal 0,15 m. Op verschillende plaatsen op buitentaluds aan de noordoostzijde van de rivieren is schade ontstaan die overigens niet ernstig was. Het gebeurde vooral op plaatsen waar de grasmat een slecht ontwikkeld wortelstelsel had door een ongunstig beheer. Voorbeelden zijn het traject Opijnen-Heesselt, het traject langs de Fraterwaard bij Doesburg en het traject Lent-Oosterhout. Deze ervaringen stemmen overeen met die in de periode december 1993 t/m februari 1994. Verder zijn lokaal gaten geconstateerd als gevolg van drijf-hout, beschadigingen ter plaatse van lichtmasten, of bij zandige taluds, waar soms meer dan 0,15 m grond was geërodeerd over meer dan 100 m lengte. Bij het onderzoeken van de schadeproefvakken bleek dat de waargenomen golfhoogte aanmerkelijk lager was dan de golfhoogte die was voorspeld met de golfgroeikrommen van Brettschneider. De gemeten golfhoogte bedroeg ongeveer de helft van de voorspelde golfhoogte. Op de voorspelling van de golfhoogte heeft de strijklengte een belangrijke invloed. Pas als een strijklengte wordt aangenomen die overeenkomt met de afstand tot de dijk van de laatste sterke gradiënt in de stroomsnelheid, blijkt de voorspelde golfhoogte gelijk aan de gemeten golfhoogte. Dit betekent dat stromings-effecten een dempende werking hebben op de hoogte van de golven. Nader onderzoek is nodig om deze effecten in rekenregels te vatten.

4. Huidige stand van de modellen

Een gedrags- c.q. schademodel beschrijft het verband tussen belasting en sterkte. Bij de uitgevoerde onderzoeken is verreweg de meeste aandacht uitgegaan naar de sterkte van grasland als dijkbekleding. Er was slechts beperkte aandacht voor het aspect van de belasting.

Een geïntegreerd gedragsmodel dat de relatie grondsoort-vegetatie-beheer-doorworteling-sterkte-belasting omvat, is nog niet beschikbaar. Aanzetten hiertoe zijn er al wel. De onderzoeksresultaten hebben geleid tot een beschrijvend model en een eenvoudig empirisch gedrags- c.q. schademodel. Deze modellen worden in de komende paragrafen behandeld. Ook worden aanzetten gegeven tot een model waarmee het effect bij golfbelasting op een combinatie van een aantal erosiemechanismen kan worden voorspeld. Tot slot komen relaties tussen beheer en zodekwaliteit aan de orde.

4.1. Beschrijvend model

Op grond van de huidige inzichten, afgeleid uit bovengenoemde proeven en praktijksituaties, is voor de golfklapzone³ het volgende beschrijvende model opgesteld.

Golfhoogte < 0,4 m

DOORWORTELING GRASMAT	DUUR	RESULTAAT
goed	1-2 etmalen	zeer weinig erosie, zelfs bovengrondse delen intact
zeer slecht	enkele uren	gaten tot 0,4m diepte
<i>bijzondere situatie:</i> matig op zeer zandige grond	binnen 1 etmaal soms	gaten tot 0,3m diepte

Golfhoogte 0,4 - 1,0 m

DOORWORTELING GRASMAT	DUUR	RESULTAAT
goed	1-2 etmalen	zeer beperkte erosie, bovengrondse delen binnen 1 etmaal sterk aangetast
slecht	binnen 1,5 etmaal	gaten tot meer dan enkele decimeters (afhankelijk van toplaag, onderlaag en kern)

Golfhoogte 1,0 - 1,5 m

DOORWORTELING GRASMAT	DUUR	RESULTAAT
matig - goed	0,5 - 0,75 etmaal	zode bezwijkt
slecht	binnen enkele uren	diepe erosie (afhankelijk van deklaag en ondergrond)
<i>bijzondere situatie:</i> ernstig beschadigde grasmat	binnen enkele uren	talud ernstig beschadigd

³ Voor de andere zones is de belasting lager.

Erosie is een voortschrijdend proces. De totale belasting is een product van belastingduur en belastingzwaarte. Daarom kan de belasting bij rivierdijken, hoewel de golfhoogten veel geringer zijn dan bij zeedijken, door de langere duur toch aanmerkelijk zijn.

Stroming langs het buitentalud veroorzaakt een lagere belasting dan de 30cm hoge golven die een erosiebestendige grasmat zonder problemen doorstaat. Stroming levert daarom maar een geringe bijdrage extra aan de erosiebelasting.

Uit grootschalige proeven [Klein Breteler en Smith, 1996] bleek dat golf-overslag tot 10 l/s/m een geringe erosiebelasting betekent voor het binnentalud. De belastingduur is daarbij altijd geringer dan die op het buitentalud. Daaruit is te concluderen dat een matig tot goed doorwortelde grasmat dit zonder schade kan doorstaan.

4.1.1. Invloed taludhelling

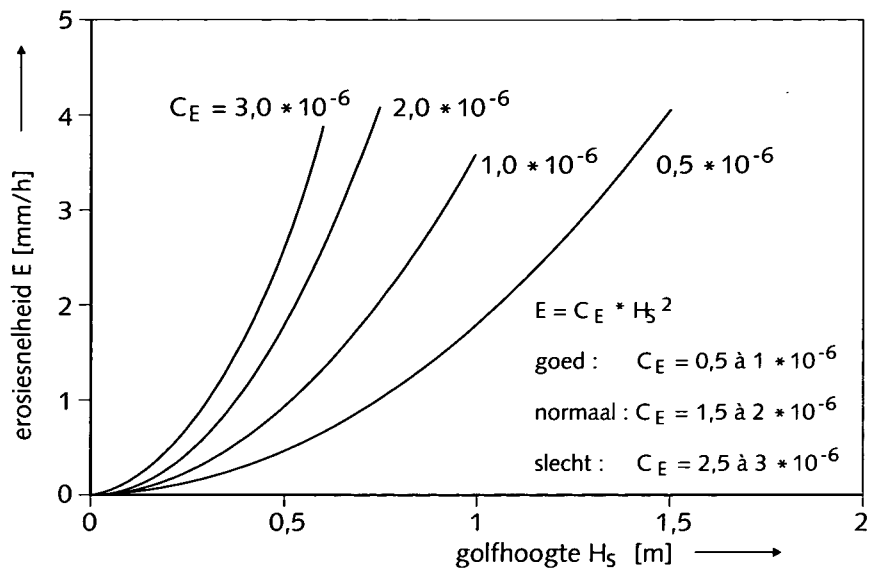
De invloed van de taludhelling is in de beschreven onderzoeken niet systematisch onderzocht. Op grond van ervaringen is hier echter wel iets over te zeggen. De invloed van verschil in taludhelling is relatief gering ten opzichte van de variatie in sterkte van de grasmat. Bij taluds steiler dan 1:2,5 speelt de helling wel een rol aangezien de zwaartekracht de grasmat verzwakt, vooral bij matige en slechte doorworteling. Dit effect moet niet worden verward met het lastiger onderhoud van gras op steile taluds. Bij taluds steiler dan 1:2,5 (tot 1:1; steiler komt bij dijken niet voor) is het wel mogelijk een goede grasmat te verkrijgen door gebruik van speciale apparatuur voor het maaien. Bij zeer steile taluds ontstaan door kruip soms 'schapenpaadjes'. Dit betekent een verzwakking van de samenhang (en daarmee van de sterkte) van de wortellaag. Van zeer flauwe taluds (flauwer dan 1:5) is onder andere uit onderzoek van Burger [1984] gebleken dat de belasting in belangrijke mate vermindert doordat brekende golven op het talud worden gedempt door een nog van de voorgaande golfoploop aanwezige waterlaag. Een belastingcorrectie recht evenredig met de afwijking van de taludhelling ten opzichte van de onderzochte hellingen 1:3 à 1:4, lijkt een goede eerste benadering voor het berekenen van de invloed van de taludhelling op de erosie.

4.1.2. Taluddeel met golfoploop en -neerloop

Voor zee- en meerdijken is het relevant om te weten wat de grasmat kan hebben in het gedeelte van het talud met golfoploop en -neerloop als gevolg van golven die op een harde bekleding breken. De belasting op de grasmat is daar aanmerkelijk lager dan in de brekerzone. Tijdens de grootschalige proef met golfhoogten van 1.35 m, waarin dit verschijnsel is gemeten, trad in het oploopegebied geen schade op. De erosiesnelheid was boven de stilwaterlijn steeds minder dan een kwart van die in de brekerzone, en nam naar boven toe nog verder af. Een grotere toegelaten golfhoogte ten opzichte van die in de brekerzone lijkt dan ook gerechtvaardigd, mits door de vormgeving van de overgang van de harde bekleding naar de grasmat geen vergroting van de belasting optreedt. Hierbij is de erosiesnelheid recht evenredig gesteld aan de belasting, die op zijn beurt waarschijnlijk evenredig is met de golfhoogte tot de macht 1.5 à 2. Bij lage golfbelasting is de afname van de erosiesnelheid in de oploopezone ten opzichte van die in de brekerzone veel geringer.

4.2. Empirisch gedrags- c.q. schademodel

Met de bevindingen van grootschalige laboratoriumproeven is een voorlopige empirische vergelijking tussen golfaanval en erosiesnelheid van graszoden opgesteld. Op theoretische gronden is aangenomen dat de erosiesnelheid toeneemt met het kwadraat van de golfhoogte en dat het effect van de kwaliteit van de graszode in een evenredigheidsconstante kan worden uitgedrukt (figuur 9):



figuur 4.1: Erosiesnelheid als functie van de golfhoogte (Bron: Waterloopkundig Laboratorium).

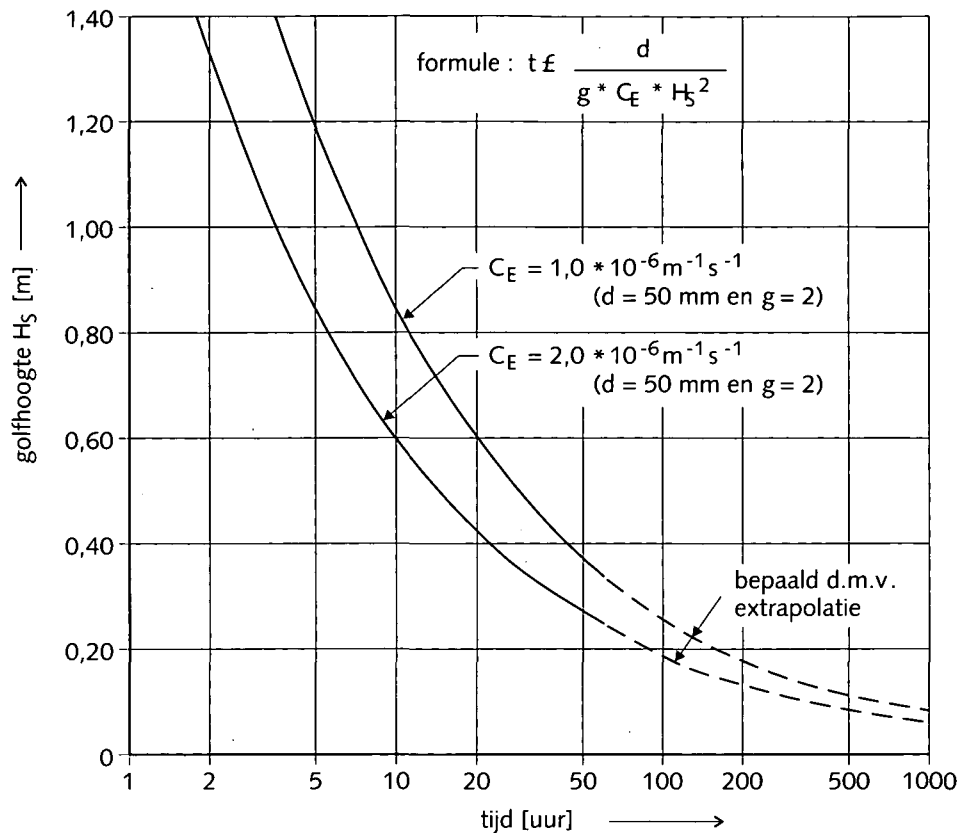
$$E_{\text{gras}} = c_E H_s^2$$

met E_{gras} = erosiesnelheid (m/s)
 c_E = graserosiecoëfficiënt ($\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$)
 H_s = significante golfhoogte (m)

Voor de coëfficiënt c_E kan met de resultaten van de grootschalige proeven de volgende conservatieve classificatie worden gegeven:

EROSIEBESTENDIGHEID GRASLAND	VERWACHTINGSWAARDE VOOR c_E
goed	$0,5 \text{ à } 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}\text{s}^{-1}$
matig	$1,5 \text{ à } 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}\text{s}^{-1}$
slecht	$2,5 \text{ à } 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}\text{s}^{-1}$

Deze relatie kan tamelijk eenvoudig worden vertaald in een toelaatbare duur van de golfbelasting bij een gegeven golfhoogte, dikte en erosiebestendigheid van de zode:



figuur 4.2: Toelaatbare belastingduur versus golffhoogte en zodekwaliteit
(Bron: Waterloopkundig Laboratorium).

$$t_{\max} = d / (\gamma C_E H_s^2)$$

met t_{\max} = maximale toelaatbare belastingduur (s)

d = zodedikte (m)

γ = veiligheidscoëfficiënt (-)

Engelse proeven waarbij de belasting van grasland door overstromend water is onderzocht [Hewlett et al, 1987] ondersteunen dit verband.

Er zijn pogingen gedaan om de graserosiecoëfficiënt te relateren aan de kwaliteit van de doorworteling en van de grond tussen de wortels. De relevante parameters zijn dichtheid van de wortels, de wortellengte en het gehalte aan fijne afslibbare deeltjes. De proefresultaten geven echter nog geen eenduidige getallen. Ook bleek het niet mogelijk een eventuele invloed van de golfperiode (of golfsteilheid) en taludhelling in bovenstaande relaties op te nemen. Het onderscheidend vermogen bij de proeven was daarvoor te gering (van 2,5 s bij $H_s = 0,30$ m en talud 1:3 via 3,4 s bij $H_s = 0,75$ m en talud 1:4 tot 4,7 s bij $H_s = 1,35$ m en talud 1:3). Cijfermatige duidelijkheid over relevante, eenvoudig meetbare parameters is dus nog niet verkregen. Verder is ook de betekenis onduidelijk van de resultaten van kleinschalige velderosieproeven met sproeikop en van laboratoriumproeven met het erosiecentrifuge toestel. In het zeedijkenonderzoek blijkt uit de centrifugeproef wel duidelijk verschil in erosiebestendigheid tussen langdurig onbemest hooiland met hoge worteldichtheid en bemest weiland met lage worteldichtheid.

Samenvattend moet worden gesteld dat het empirische model nog aanzienlijke onzekerheden bevat in toepassingsgebied en nauwkeurigheid. Daarom kan het nog niet zonder meer worden gebruikt in de ontwerppraktijk.

Een verbetering van het model is te verkrijgen door de volgende deelprocessen te onderscheiden in het erosieproces van een graszode:

- (a) het wegspoelen van losliggende gronddeeltjes en -brokken;
- (b) het bezwijken van (haar-) wortels die brokken en brokjes grond bijeen houden;
- (c) het ineens of geleidelijk aan scheuren of openbreken van de zode.

Er zijn indicaties beschikbaar voor de mate waarin de verschillende deelprocessen optreden in relatie tot golfhoogte en kwaliteit van de zode. Met deze aanpak is ontkoppeling van de belasting en sterkte mogelijk en kunnen de effecten van dichtheid en sterkte van wortels, grond, talud en golfbelastingparameters onafhankelijk worden gemodelleerd. Het is zo bijvoorbeeld ook mogelijk om na te gaan wat de invloed is van de taludhelling, of van de verschillende typen doorworteling, zoals effectiviteit van de wat geringere doorworteling dieper in de grond, de effectiviteit van een dunne net aangelegde zode, het verschil tussen een zode met veel dunne wortels en een minder dichte zode van wat dikkere wortels, enzovoort.

Voorshands dient het model vooral voor het verbeteren van het inzicht. Voor de huidige versie van het model geldt dat losliggende kleine gronddeeltjes en brokjes reeds bij golven van een paar decimeters wegspoelen van het grondoppervlak. Wortels kunnen echter brokjes grond langdurig bijeen houden en sterke erosie van de zode zal dan niet optreden. Bij belasting met golven hoger dan een paar decimeter zal sterke ontgronding optreden bij een open wortelnet, maar bij een dicht wortelnet (redelijke tot goede kwaliteit graszode) zijn wortels sterk genoeg om golven van 0,75 m te weerstaan. Bij belasting met golven hoger dan zo'n 1 m wordt de zode bij elke golfklap vele millimeters opgetild en uitgerekt. De wortels in de zode bezwijken op den duur door deze voortdurende relatief sterke bewegingen tussen gronddeeltjes.

Voor bredere toepassing en geldigheid van het model voor de graszode moet de sterkte van (individuele) graswortels en de gehele zode nader worden onderzocht. Dit kan met behulp van gegevens uit de literatuur, sterkteberekeningen en experimenten. Ook moet de mate waarin losliggende brokken kunnen wegspoelen nader kwantitatief worden beschreven. Daarvoor is een nadere analyse van de gegevens van de verschillende proeven nodig.

4.3 Uitwerking belastingmodel

Er is slechts in beperkte mate aandacht besteed aan een belastingmodel. In Engels onderzoek zijn watersnelheden gehanteerd als belastingparameter [Hewlett et al, 1987]. Tijdens de in dit rapport beschreven proeven met golfbelasting zijn naast de golfhoogte en golfperiode ook golfomloop, laagdikte en watersnelheden gemeten. Watersnelheden door golven op het

talud kunnen worden voorspeld met de gebruikelijke formules zoals die zij afgeleid voor civieltechnische bekledingen [Meijer et al, 1994]. Op dit moment is het echter nog niet goed mogelijk de golfbelasting door onregelmatig brekende golven te vertalen in watersnelheden of schuifspanningen.

Voor de golfoploop kon een reductiecoëfficiënt ten gevolge van de ruwheid van het talud ten opzichte van een glad talud worden bepaald gelijk aan 0,55 à 0,65 voor kleine golven tot 0,9 à 1,0 voor de grotere golven. Een nadere analyse leerde dat voor golven kleiner dan 0,75 m de reductiecoëfficiënt blijkt af te hangen van de golfhoogte volgens:

$$r = 1,15 H_s^{0.5}$$

r is de reductie coëfficiënt, H_s is de significante golfhoogte.

Dit heeft direct te maken met de geringere waterlaagdikte bij kleinere golfhoogten en de dientengevolge naar verhouding grotere hydraulische ruwheid. Met andere woorden: bij geringere golfhoogte zijn de golven relatief laag ten opzichte van de vegetatie.

4.4. Relaties tussen zodekwaliteit en beheer

Ondanks de onzekerheden in het empirische model kan toch een verband worden gelegd tussen de wijze van beheer en de kwaliteit van de zode.

4.4.1. Dichtheid van de zode

Uit de proeven blijkt dat de erosiebestendige eigenschappen van grasbekleding op dijken worden bepaald door de grond in combinatie met zodedichtheid. Het belangrijkste deel van de zode is het wortelstelsel. Hierin bevindt zich de voornaamste weerstand tegen golfaanval. Het bovengrondse deel van de zode (stengels en bladeren) levert voornamelijk een bijdrage aan de weerstand tegen afstromend water, dus bij golfoverslag op het binnentalud. Voor een erosiebestendige grasmat moeten zowel de grond, als de zodedichtheid aan bepaalde minimum eisen voldoen.

De bovenste 0,15 m krijgt door bodemvorming heel andere eigenschappen dan de oorspronkelijke grond. Hierin kan zich een erosiebestendige wortellaag ontwikkelen. Daarvoor is geen erosiebestendige klei vereist. Een zandige klei voldoet ook, mits deze enige cohesie bezit. Een zandgehalte van maximaal 50% lijkt daarbij een in de praktijk bruikbare en voldoende veilige grens. Aan deze eisen zullen natuurlijke kleisoorten in Nederland meestal voldoen.

Het voorgaande lijkt op het eerste gezicht in tegenspraak te zijn met de eisen voor klei op dijken, zoals geformuleerd in het *Technisch Rapport Klei voor Dijken* [TAW, 1996]. Men moet hierbij echter de volgende twee beperkingen van erosiebestendige klei betrekken:

- Een goed erosiebestendige grasmat is erosiebestendiger dan de meest erosiebestendige klei (categorie 1 volgens [TAW, 1996]). De sterkte van de graszode ontwikkelt zich op zandige klei sneller en beter dan

op vette klei. Aangezien een grasmat echter altijd kwetsbaar blijft voor bijvoorbeeld verstikking of mechanische beschadigingen, kan de erosiebestendigheid van een onderliggende kleilaag van belang zijn voor de veiligheid van de dijk als geheel bij beschadiging van de grasmat.

- Erosiebestendige klei (categorie 1) verliest op den duur de erosiebestendigheid in de bovenste decimeters ten gevolge van chemische en fysische processen ('structuurvorming'), waarbij scheurvorming en verbrokkeling optreden. Een graszode kan deze functie overnemen. Een grasmat heeft echter, na aanleg of herstel, enige seizoenen nodig om een sterke zode te ontwikkelen. Direct na aanleg of herstel kan een erosiebestendige klei wel, tenminste in het eerste winterseizoen, voor een voldoende erosiebestendigheid zorgen.

Als bij dijkaanleg of dijkverzwaring voor een bekleding met erosiebestendige klei is gekozen, wordt het toepassen van een toplaag van zandige klei aanbevolen voor een betere ontwikkeling van de grasmat. De zwakte van het eerste seizoen kan, zoals gezegd, worden ondervangen door de erosiebestendige klei voor de eerste winter te verdichten en glad af te werken, om vervolgens de toplaag van zandiger klei in het voorjaar aan te brengen. Dit neemt niet weg dat de grasbekleding in alle gevallen enkele seizoenen relatief kwetsbaar is.

4.4.2. Invloed van beheermethoden

Dichtheid van de bovengrondse vegetatie en worteldichtheid worden direct beïnvloed door het graslandbeheer. De door Fliervoet [1992] onderscheiden vormen van beheer voor een in waterstaatkundig opzicht voldoende gesloten en doorwortelde grasmat op rivierdijken (waterstaatkundig, aangepast agrarisch en natuurtechnisch beheer) geven een goed houvast. Op basis van het eerder beschreven vegetatieonderzoek [Sprangers, 1996] kunnen deze beheervormen als volgt worden gespecificeerd, waarbij hoogte van de mestgift en mate van onderhoud cruciale factoren zijn:

- *Hooien zonder bemesting (waterstaatkundig beheer en natuurtechnisch beheer)* geeft de hoogste worteldichtheid (dicht wortelpakket met vooral in de laag tot 0,15m diep veel dikke en dunne wortels), bij een redelijk gesloten vegetatie (figuur 4.3d). De natuurwaarde van het grasland kan bij deze vorm van beheer het grootst worden. Weiden zonder bemesten kan ook, maar hooien is praktischer, aangezien er dan geen rasters, drinkwatervoorzieningen en bijkomende onderhoudswerkzaamheden nodig zijn.
- *Bij schapenbeweiding met lichte bemesting (aangepast agrarisch beheer)* ontstaat een goed gesloten zode, maar de doorworteling (dicht wortelpakket met veel dunne wortels) is vooral ontwikkeld in de bovenste 0-10 cm van de bodem (figuur 4.3c). In waterstaatkundig opzicht voldoet dit beheer goed. Deze vorm van schapenbeweiding vereist een nauwkeurig op de lokale situatie afgestemd beheerplan. De beweiding is immers niet gericht op schapenteelt maar op een erosiebestendige grasmat. De veedichtheid moet dan ook precies overeenkomen met de gewasproductie zodat die geheel wordt afgegraasd. Perioden van enkele weken intensieve begrazing moeten worden afgewisseld met rustperioden, onder andere voor de vruchtzetting van grassen en kruiden.

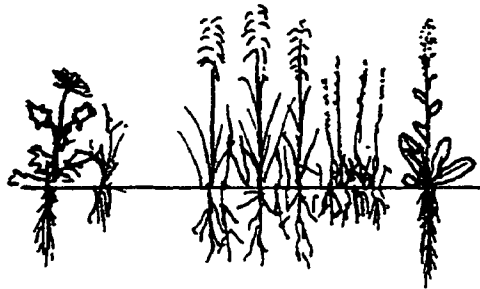
Dit betekent voortdurend omweiden naar andere percelen. Het gras moet kort (tot 10 cm) de winter in gaan en dan niet meer worden beweid tot het voorjaar. Aanvullend onderhoud is nodig om onbegaasde plekken en ruigten af te maaien en molshopen glad te slepen.

- *Intensieve bemesting met beweiding of hooien* leidt in het algemeen tot een vegetatie met open plekken met een lage worteldichtheid (figuur 4.3a en 4.3b).
- Ook twee keer per jaar *klepelmaaien waarbij het maaisel blijft liggen* leidt tot open plekken en daardoor tot een lage erosiebestendigheid.
- Bij *gazonbeheer* (zeven tot acht keer per jaar maaien) blijft ook het maaisel liggen, maar doordat zeer vaak wordt gemaaid blijft de hoeveelheid maaisel per maaibeurt gering. Het wortelstelsel vormt een dicht maar ondiep wortelpakket, geconcentreerd in de bovenste 5 cm.



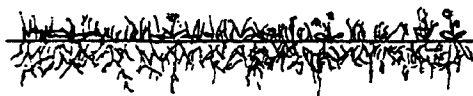
4.3a.

beweiden + bemesten +
herbicidengebruik



4.3b.

hooien + bemesten of
klepelmaaien zonder afvoer



4.3c.

beweiden + lichte bemesting



4.3d.

hooien zonder bemesting

Figuur 4.3 a t/m d: Typen grasland bij verschillende beheersvormen.
(Bron: Landbouw Universiteit Wageningen)

4.4.3. Zodekwaliteit als functie van beheervorm en zodedichtheid

In tabel 4.1 zijn enkele beheervormen en daarmee te verkrijgen zodedichtheids categorieën aangegeven, die zijn vertaald in zodekwaliteit 'goed', 'matig' of 'slecht'. Aan de laatste categorie is in de praktijk op zowel rivierdijken (hoogwater 1995) als op zeedijken (februari 1990) erosieschade geconstateerd.

Tabel 4.1: Kwaliteit zode als functie van beheervorm en zodedichtheid

TYPE BEHEER	DICHTHEID ZODE	DOORWORTELING	KWALITEIT ZODE
Hooien zonder benesting	Bedekking > 70%	veel dikke en dunne wortels in laag 0-15 cm	goed
Beweiding bemesting max 75 kg N/ha	Bedekking > 85%	veel dunne wortels in laag 0-8 cm	goed
Beweiding bemesting 75-100 kg N/ha	Bedekking > 85%	veel dunne wortels in laag 0-5 cm	matig
Gazonbeheer (7-8 keer maaien per jaar) geen bemesting	Bedekking > 85%	veel dunne wortels in laag 0-5 cm	matig
Beweiding met bemesting > 100 kg N/ha	Bedekking > 85%	weinig dunne en enkele dikke wortels in laag 0-5 cm	slecht
Hooien met bemesting	Bedekking < 60%	enkele dikke wortels in laag 0-15 cm	slecht
Maaien zonder afvoer	Bedekking < 60%	enkele dikke wortels in laag 0-15 cm	slecht

Bijlage 1

Overzicht van op graserosie gerichte activiteiten

Sinds ongeveer 1970 vindt grasonderzoek plaats. Dit begon met de uitvoering van afstroomproeven op de Knardijk, over een zomerkade in Gelderland en in stroomgoten op kleine gestoken monsters.. Sinds 1990 is er sprake van systematisch onderzoek naar grasbekleding, waarbij het Grasplan 1990 richtsnoer is. Onder auspiciën van de TAW-A3 *Projectgroep Grasland als dijkbe-kleding* hebben de volgende activiteiten plaats gehad:

- 1986-1996 Onderzoek inzaaiexperiment dijk Pannerden. [Fliervoet, 1996]
- 1987-1996 Beheerproef Groot Maas en Waal (Zaltbommel): Effecten van verschillende methoden van aanleg en beheer van grasland tijdens en na dijkverzwaring. [Liebrand, 1996]
- 1988-1992 Botanische samenstelling en erosiebestendigheid van rivierdijken. [Van der Zee, 1992]
- 1990-1991 Bronnenonderzoek naar de opbouw van de grond in graszoden en beschouwingen over erosieprocessen voor zodegrond, aangevuld met een beperkt laboratoriumexperiment naar doorlatendheid en erosieprocessen in graszoden inclusief beschrijvingen van de beproefde zoden. [van Essen, 1994] [Kruse, 1993]
- 1990 Waterbeweging op grasdijken door golfaanval: bureaustudie naar golfoploop, watersnelheden en ruwheid van grasland. [Meijer et. al., 1993]
- 1991-1996 Onderzoek extensief graslandbeheer op zeedijken: effecten op vegetatie, wortelgroei en erosiebestendigheid. [Sprangers, 1996]
- 1992 Brochure *Aanleg en beheer van grasland op rivierdijken*. [Fliervoet, 1992]
- 1992-1996 Deltagootproef graslandtalud van zeedijk 1:4 (1992): metingen van effecten van golfbelasting in en op het talud en waarnemingen van schade aan gras en erosieprocessen, inclusief golfoverslag over het binnentalud. [Kruse, 1994a] [Kruse, 1994b] [Kruse, 1996] [Smith, 1993] [Meijer, 1994]
- 1992-1994 Schadeproefvakken op rivierdijken: inventarisatie schade na een hoogwater. [Heidemij, 1994]
- 1993-1995 Gerichte waarnemingen aan conditie en aantasting zode op rivierdijktaluds door golven tijdens en na zeer hoogwater. [TAW, 1994] [TAW, 1995]
- 1994-1995 Scheldebakproef op rivierdijk graszoden (1994): Grootschalig vergelijkend onderzoek naar schadeontwikkeling bij rivierdijk graszoden, verbanden tussen ontgroning, grondsamenstelling en vegetatie. [Verheij et al, 1995]
- 1990-1996 Opstellen van het *Technisch rapport klei voor dijken* door TAW-B6 projectgroep. Formeel behoorde dit tot een ander onderzoekprogramma, maar de resultaten die dit heeft opgeleverd zijn wel in de modellen en aanbevelingen van dit rapport betrokken.
- permanent Bijdragen leveren aan *Leidraad Toetsing*: aandragen methode voor beoordeling bestaande grasbekledingen onder extreme condities.

De belangrijkste onderzoeken voorafgaand aan deze reeks zijn:

- de golfsimulatieproeven met zeedijkgraszoden in de stroomgoot bij Lith in 1983 [van Meerendonk, 1984];
- de Deltagootproef op een graszode van een zeedijk met een 1:8 talud in 1984 [Burger, 1984];
- het onderzoek naar klei voor dijken [Kruse, 1988], de golfgootproeven op de Technische Universiteit Delft met graszoden van rivierdijken [Wolffenbuttel, 1989];
- het onderzoek naar rivierdijkvegetaties [Sykora en Liebrand, 1987] en zeedijkvegetaties [Sprangers, 1989].

Naast grootschalige onderzoeksmiddelen is bij de onderzoeken ook gebruik gemaakt van de erosiecentrifuge, waarbij water langs een zodemonster stroomt, en van de velderosieproef, waarbij de hoeveelheid afgespoeld materiaal wordt bepaald. Ook is bij enkele onderzoeken de afschuifweerstand bepaald als mogelijke maat voor de erosiebestendigheid. Dit heeft echter geen resultaten opgeleverd.

Bijlage 2

Literatuur

Burger, A.M., 1984: *Sterkte van het buitenbeloop van een groene dijk tijdens een superstormvloed*. Waterloopkundig Laboratorium, verslag grootschalig modelonderzoek M1980, Delft.

Essen, H.M. van, 1994: *Experiments on internal erosion of grass sods from dikes*. Grondmechanica Delft, rapport CO-329370/17, Delft.

Fliervoet, L.M., 1992: *Aanleg en beheer van grasland op rivierdijken*. Unie van Waterschappen, 's-Gravenhage.

Heidemij, 1994: *Erosie onderzoek buitentaluds van dijken*. Heidemij Advies, rapport 634/EA/G567/50251, Deventer.

Hewlett, H.W.M., L.A. Boorman and M.E. Bramley, 1987: *Design of reinforced grass waterways*. CIRIA, report 116, London.

Klein Breteler, M. en G.M. Smith, 1996: *Grasdijken - aanvullende analyse stroomsnelheden op het binnentalud*. Waterloopkundig Laboratorium, verslag grootschalig modelonderzoek H1991, Delft.

Kruse, G.A.M., 1988: *Onderzoek naar het beoordelen van de geschiktheid van kleigrond voor bekleding van dijken met grasbedekking*. Grondmechanica Delft, rapport CO-275925/14, Delft.

Kruse, G.A.M., 1993: *Opbouw en erosie van graszode op dijken*. Grondmechanica Delft, rapport CO-307282/18, Delft.

Kruse, G.A.M., 1994a: *Meetverslag grastaludproeven*. Grondmechanica Delft, rapport CO334430/17, Delft.

Kruse, G.A.M., 1994b: *Eerste analyse van Deltagootproeven op een grastalud*. Grondmechanica Delft, rapport CO-334430/25, Delft.

Kruse, G.A.M., 1996: *Analyse van Deltagootproeven op een grastalud*. Grondmechanica Delft, rapport, Delft (in voorbereiding).

Liebrand, C.I.J.M., 1996: *Brochure Groot Maas en Waal*. Landbouwuniversiteit Wageningen, Wageningen.

Meerendonk, E. van, 1984: *Erosiebestendigheid van gras op kleitaluds*. Waterloopkundig Laboratorium, verslag M1930, Delft.

Meijer, D.G., J.F. Ruff en H.J. Verheij, 1993: *Waterbeweging op grasdijken door golfaanval*. Waterloopkundig Laboratorium, bureaustudie Q1247, Delft.

- Meijer, D.G., 1994: *Grasdijken - analyse meetresultaten*. Waterloopkundig Laboratorium, verslag grootschalig modelonderzoek Q1584 (concept), Delft.
- Smith, G.M., 1993: *Grasdijken - graserosie, reststerkte en golfoverslag*. Waterloopkundig Laboratorium, meetverslag grootschalig onderzoek H1565, Delft.
- Sprangers, J.T.C.M., 1989: *Vegetaties van Nederlandse zeedijken, plantengemeenschappen in relatie tot standplaatsfactoren*. Landbouwniversiteit Wageningen, vakgroep TON, rapport, Wageningen.
- Sprangers, J.T.C.M., 1995: *Erosiecentrifugeproeven op zeedijkgrasland, verwerking en interpretatie van gegevens*. Landbouwniversiteit Wageningen, vakgroep TON, zeedijkrapport nr.11, Wageningen.
- Sprangers, J.T.C.M., 1996: *Extensief graslandbeheer op zeedijken - effecten op vegetatie, wortelgroei en erosiebestendigheid*. Landbouwniversiteit Wageningen, vakgroep TON, rapport, Wageningen.
- Sykora, K.V. en C.I.J.M.Liebrand, 1987: *Natuurtechnische en civieltechnische aspecten van rivierdijkvegetaties*. Landbouwniversiteit Wageningen, vakgroep TON, Wageningen.
- TAW, 1981: *Aanleg, beheer en onderhoud van de grasmat op rivierdijken*. Rapport no.1 van subwerkgroep 9A, TAW, 's-Gravenhage.
- TAW, 1994: *Water tegen de dijk, de toestand van de rivierdijken tijdens het hoogwater van 1993*. TAW, Delft.
- TAW, 1995: *Druk op de dijken 1995, de toestand van de rivierdijken tijdens het hoogwater van januari/februari 1995*. TAW, Delft.
- TAW, 1996: *Technisch rapport klei voor dijken*. TAW, Delft.
- Verheij, H.J., D.G. Meijer, G.A.M. Kruse, G.M. Smith en M. Vesseur, 1995: *Onderzoek naar de sterkte van graszoden van rivierdijken*. Waterloopkundig Laboratorium, rapport Q1878, Delft.
- Wolffenbittel, Th., 1989: *Laboratoriumproeven erosie en afslag van grastaluds*. Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, afstudeerverslag, Delft.
- Zee, F.F. van der, 1992: *Botanische samenstelling, oecologie en erosiebestendigheid van rivierdijkvegetaties*. Landbouwniversiteit Wageningen, Vakgroep TON, rapport, Wageningen.

De Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen werd door de Minister van Verkeer en Waterstaat ingesteld.

De commissie adviseert de minister omtrent alle technisch-wetenschappelijke aspecten die van belang kunnen zijn voor een doelmatige constructie en het onderhoud van de waterkeringen, dan wel voor de veiligheid van door waterkeringen beschermde gebieden.

Met vragen omtrent werk van de TAW kan men zich wenden tot het werkorgaan van de commissie, ondergebracht bij de Dienst Wegen Waterbouwkunde van de Rijkswaterstaat.

Postbus 5044, 2600 GA Delft,
Tel. (015) 251 84 36

E-mail: tawsecr@dww.rws.minvenw.nl

Delft, augustus 1998