

DIJKEN MET GCL (BENTONIETMAT)

Handreiking voor toepassing van GCL in voorlanden en op taluds van primaire en regionale waterkeringen (groene versie)

POV-DGG

12 JUNI 2023



DIJKVERBETERING BEESEL 2022 (FOTO GER PEETERS)

VOORWOORD

De handreiking

In het kader van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP), de alliantie tussen RWS en alle waterschappen, is een project overstijgende verkenning naar dijkverbetering met gebiedseigen grond (POV-DGG) opgezet en uitgevoerd (2018-2022). Het HWBP, het bedrijfsleven en de kennisinstututen zoeken hierin samen naar manieren om de toepassing van lokaal aanwezige grond te bevorderen. Het doel daarbij is om dijkversterking beter, sneller en goedkoper te realiseren. Trekker van deze POV is het Waterschap Limburg.

Eén van de producten die de POV-DGG oplevert, is een handreiking voor de toepassing van bentonietmatten (in Engels: Geo Clay Liner of kortweg GCL) in voorlanden en op taluds van dijken. Met GCL's is het mogelijk om in veelvoorkomende situaties langs rivierdijken een aan te brengen afdichtende laag van "vette klei" achterwege te laten en gebruik te maken van lokaal vrijkomende gebiedseigen grond, die vaak een zandig karakter heeft.

Het vertrekpunt bij het opstellen van de handreiking is geweest dat een waterkering met een GCL grotendeels een gewone waterkering is. In voorlanden zorgt de GCL voor intredeweerstand die er anders niet zou zijn vanwege de lokale bodemopbouw. Op taluds neemt de GCL deels de erosiebestendigheidfunctie en volledig de waterdichtheidsfunctie van de kleilaag over. De zandige grond fungeert als substraat voor een grasmat, waaraan een bepaalde erosiebestendigheid wordt toegekend. Op de meeste punten moet het bestaande beoordelingsinstrumentarium (WBI2017) daarom gebruikt kunnen worden om de waterkering te ontwerpen of te beoordelen.

Vanuit praktische overwegingen is een keus gemaakt voor het toepassingsbereik, namelijk dat deze handreiking geldig is voor primaire waterkeringen langs rivieren. Zeedijken met overwegend grote golven vallen buiten het toepassingsbereik, omdat een grasmat op zandige grond zonder aanvullende maatregelen niet voldoende erosiebestendigheid bezit. Regionale keringen en boezemkaden hebben een andere veiligheidsfilosofie en vaak een andere belasting en bodemopbouw. Door de beperkingen die zijn aangegeven in deze handreiking in acht te nemen, is het toepassingsgebied wel op te rekken tot specifieke regionale keringen en boezemkaden.

Omdat deze handreiking de leidraad vormt bij dijkversterkingsprojecten, is het van groot belang dat de inhoud ervan breed wordt gedragen door de sector. Om dat te borgen is een commissie van deskundigen samengesteld om een bijdrage te leveren en de inhoud te reviewen en aan te vullen (Klankbordgroep). De materiaaleisen zijn in overleg met verschillende leveranciers tot stand gekomen.

Het ENW advies

In maart 2022 is het ENW advies gevraagd over het gebruik van deze handreiking, destijds nog als OBOR (Ontwerp-, Beoordelings- en Onderhoudsrichtlijn) benoemd.

Het ENW (advies ENW 22-05) heeft geconcludeerd dat het document een goede verzameling van beschikbare informatie is op het gebied van GCL's en het daarmee een zeer praktische handreiking is. Na het aanpassen en opnemen van enkele door het ENW voorgestelde verbeterpunten resteren nu hoofdzakelijk nog twee verbeter- of ontwikkelpunten:

- 1) Het document is niet opgebouwd vanuit de veiligheidsfilosofie/principes die worden gehanteerd in de documenten in het BOI, dat vigerend is vanaf 2023. Het document is opgesteld met het WBI2017 als basis, dat tot 2023 vigerend was voor het uitvoeren van de beoordeling. Het is daardoor nog niet duidelijk wat de positie van deze handreiking is na 2023. Om het aan te laten sluiten aan de structuur van het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI) en De innovatieversneller (DIV) van het Hoogwaterbeschermingsprogramma is het advies om de fysica en faalpaden als uitgangspunt te nemen en niet, zoals nu, de modellen/rekenvoorschriften/producten. Conform het ENW advies is derhalve de 'OBOR' hernoemd in 'handreiking'.

Het ENW adviseert voorts om de inhoud door te ontwikkelen zodat deze aansluit bij die van het BOI en DIV. Het product GCL zou uiteindelijk in DIV-structuur onder de verschillende thema's kunnen worden opgehangen.

- 2) De reststerkte van de GCL op het dijktaalud als de toplaag is bezweken behoeft nader onderzoek en onderbouwing.

Het ENW stelt voor het initiatief voor de doorontwikkeling niet bij een enkel waterschap te laten, maar deze doorontwikkeling op te pakken binnen de kennisprogramma's van het directoraat-generaal Water en Bodem (Kennis voor Keringen) of het Hoogwaterbeschermingsprogramma (De Innovatieversneller).

Bijdragers

Het schrijfteam voor de handreiking bestond uit de volgende personen:

- Rimmer Koopmans (Arcadis)
- Kees Dorst (waterschap Limburg)
- Jelle van Zuijlen (Arcadis)

Voor de handreiking was de samenstelling van de Klankbordgroep als volgt:

- Laura Taal (waterschap Rivierenland)
- Mathijs Bos (waterschap Rivierenland)
- Jaap Bronsveld (waterschap Rivierenland)
- William van Ruiten (waterschap Limburg)
- Daan Jumelet (De Vries en van de Wiel)
- Cor Bisschop (Greenrivers)
- Joris van den Berg (Huesker)
- Rijk Gerritsen (Naue-Prosé Geotechniek)
- Peter Kraaijenbrink (Deltares)
- Joost Lansink (Witteveen + Bos)

De projectleiding van het schrijfproces en redactie is in handen geweest van Rimmer Koopmans.

De inhoud van deze rapportage is gebaseerd op de medio 2022 beschikbare kennis en ervaring, die met name op gebied van erosiebestendigheid van gras op zand sterk in ontwikkeling is.

De POV-DGG en waterschap Limburg spreken hun dank uit aan de leden van het Schrijfteam en aan de Klankbordgroep, die met veel inzet en enthousiasme en in samenwerking met diverse partijen hebben samengewerkt aan de realisatie van de handreiking.

Roermond, 2023

Eén van de eerste dijkversterkingsprojecten in Nederland waarbinnen een bentonietmat of GCL is toegepast, is die in Neer. De GCL is geplaatst in het voorland, in plaats van een traditionele grondverbetering met klei, om de intredeweerstand te verhogen en het intredepunt naar buiten op te schuiven waardoor de kwelweg wordt vergroot en zo de kans op piping afdoende is gereduceerd.



*Figuur 1: aanleg bentonietmat of GCL in voorland bij Neer.
(foto: "Wiel aan den Boom")*



*Figuur 2: afrollen van een bentonietmat of GCL in het voorland bij Neer.
(foto: "Wiel aan den Boom")*

SAMENVATTING

Veel dijkverbeteringen vinden plaats langs rivieren waar over het algemeen de “vettere klei” schaars is en zandig gebiedseigen materiaal meer voorradig is. Met een bentonietmat (in Engels: Geo Clay Liner of kortweg GCL) is het mogelijk om met gebiedseigen zandig materiaal toch een voldoende waterdichte en veilige dijk te realiseren.

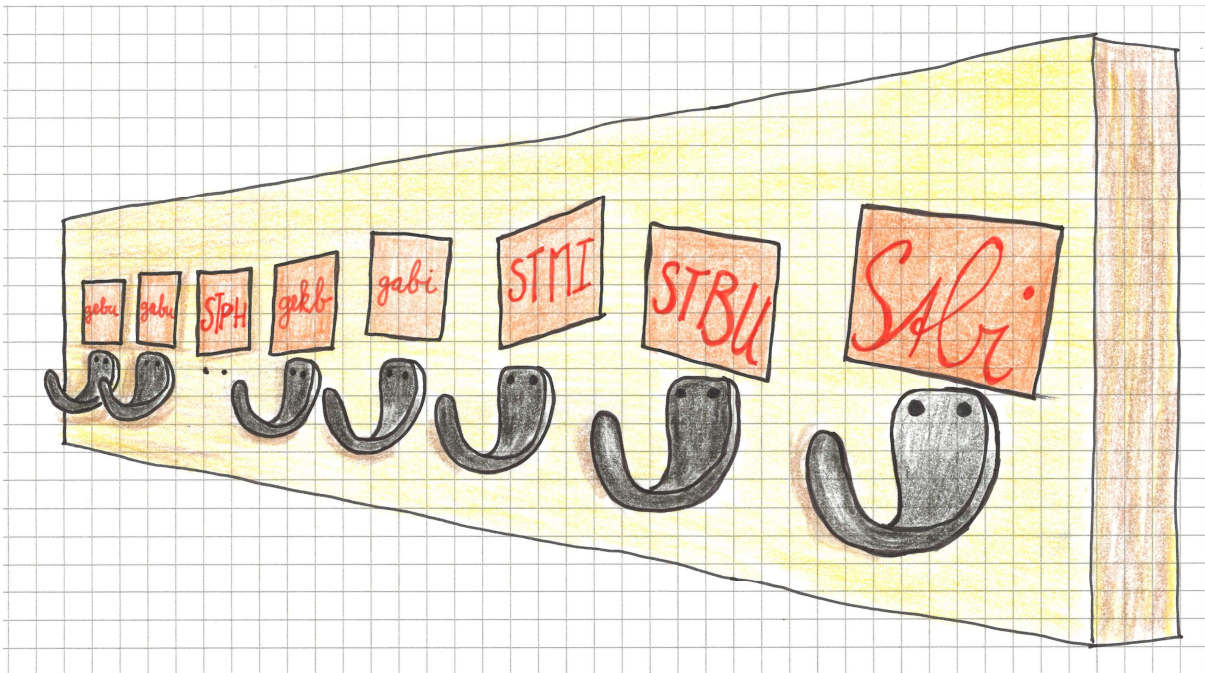
Vanwege de combinatie van GCL met gebiedseigen grond zijn de eisen voor de dagelijkse beheer situatie (bruikbaarheidsgrenstoestand = BGT) erg belangrijk. Daarom is de overstromingsrisico benadering (uiterste grenstoestand = UGT) niet volledig toepasbaar.

Deze handreiking

De handreiking omschrijft alle ontwerpaspecten waaraan het voorland en de alternatieve taludbekleding met een bentonietmat ofwel Geo Clay Liner (hierna GCL genoemd) moet voldoen om als volwaardig geaccepteerd alternatief voor een “vette kleilaag” toegepast te kunnen worden. Want zonder handreiking, zal toepassing van een GCL niet geaccepteerd worden door de dijkbeheerder of mogelijk leiden tot juridische conflicten bij aanbestedingen. Ook geeft de handreiking invulling aan de eis van de dijkbeheerder, dat een ontwerp toetsbaar moet zijn en kan worden beheerd en onderhouden. En tenslotte is de handreiking noodzakelijk voor acceptatie door HWBP en ENW. Deze groene versie van de handreiking gaat uit van toepassing van de GCL in combinatie met zandige gebiedseigen grond.

De kapstok

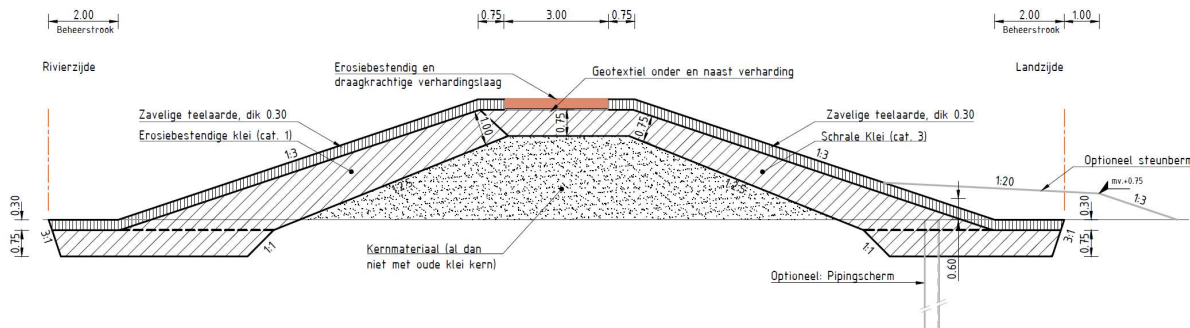
De handreiking is zodanig vormgegeven dat deze in Nederland toepasbaar is voor primaire rivierdijken, in gebieden met een ondergrond van vooral zand, leem of klei en weinig veen. De waterkering kan bijvoorbeeld een voorland van zandige grond bezitten of een waterkering wordt aangelegd, verbreed of verhoogd met (gebiedseigen) zandige grond in de kern of op het buiten- of binnentalud. Natuurlijke zandige grond of zandhoudende klei heeft een hogere doorlatendheid en lagere erosiebestendigheid dan “vette klei” en dit is ongewenst als toepassing voor waterkeringen. De GCL compenseert dit. In deze handreiking wordt een overzicht gegeven van alles wat komt kijken bij de toepassing van GCL's in waterkeringen.



De wijze van ontwerpen en beoordelen sluit aan bij het WBI2017 en dit vormt dus de spreekwoordelijke “kapstok”. Op de twee punten dat de waterkering met GCL afwijkt (intredeweerstand en erosiebestendigheid), voorziet deze handreiking in een koppeling met de bestaande veiligheidsfilosofie.

Het principe ontwerp

Conventionele waterkeringen zijn meestal voorzien van een grasbekleding op een kleiige laag, hebben vaak een voorland met klei houdende grond, bezitten over het algemeen taludhellingen van 1:2,5 tot 1:5 en dikwijls is binnendijks een steunberm aanwezig voor macrostabiliteit. Met deze veel voorkomende rivierdijk in Nederland in het achterhoofd is deze handreiking voor GCL's opgesteld en zodoende wordt maximale toepassing van gebiedseigen zandige grond gemaakt.



Figuur 3: conventioneel ontwerp van veelvoorkomende waterkering in Nederland.

De GCL neemt deels de erosiebestendigheidsfunctie en volledig de waterdichtheidsfunctie van de kleilaag over. De GCL wordt aangelegd onder een beschermende afdeklaag van gebiedseigen grond met daarop een grasmat. De gebiedseigen grond vormt derhalve ook het substraat voor de grasmat, waaraan een bepaalde erosiebestendigheid wordt toegekend.

Benodigde gegevens

De gegevensbehoefte voor een ontwerp met GCL's is niet wezenlijk anders dan voor een conventioneel ontwerp. In beide gevallen zullen tenminste analyses van hoogte, piping, macrostabiliteit en bekleding moeten worden gemaakt. De daarvoor benodigde basisgegevens zoals: grondonderzoek en dwarsprofielen worden in deze handreiking niet behandeld. Qua ontwerpberekeningen en analyses wordt alleen ingegaan op zaken die specifiek voor de GCL toepassingen nodig zijn of op zaken die afwijkend zijn van het OI2014 en WBI2017.

Faalmechanismen

Om in de vingers te krijgen wat specifiek benodigd is voor en afwijkend is aan een waterkering met een GCL is een analyse gemaakt van de afwijkende faalmechanismen. Dit zijn:

- Erosie van de grasmat op de afdeklaag van zandige gebiedseigen grond (afwijkend van WBI2017);
- Stabiliteit van de bekledingslaag inclusief de GCL (afwijkend van WBI2017);
- Ongemerkt falen van de GCL (nieuw ten opzichte van WBI2017), waarbij door bijvoorbeeld een niet opgemerkte externe oorzaak of onvoorziene degradatie proces een defect aan de GCL is opgetreden.

Ter ondersteuning van de analyse van de faalmechanismen is een gebeurtenissenboom opgesteld en voor het ontwerp, uitvoering en het beheer een tabel met beheersmaatregelen samengesteld. Uitgangspunt bij de faalpaden is dat gebiedseigen zandig materiaal wordt toegepast als afdekking en ook als kernmateriaal aanwezig is.

Bij de nadere uitwerking van de gebeurtenissen naar voorschriften en rekenmethoden is zoveel mogelijk aangesloten bij het WBI2017. Alleen de faalmechanismen die nieuw zijn ten opzichte van het WBI2017 of anders zijn door de aanwezigheid van de GCL zijn uitgewerkt in deze handreiking. Indien het WBI2017 gevolgd kan worden is volstaan met een korte verwijzing.

Ontwerp

De toepassing van de GCL past, door het gebruik in combinatie met zandig materiaal, niet volledig binnen de reguliere sporen van het WBI2017. Terwijl een onderbouwing juist wel noodzakelijk is om met vertrouwen de GCL te kunnen toepassen. Daarbij is niet alleen de sterkte van belang, maar onder andere ook de

gevolgen voor de beheerorganisatie. Om een goed ontwerp te kunnen vervaardigen en realiseren moeten specificaties, eisen aan plaatsing, aansluitingen en uitvoeringsrichtlijnen in detail worden beschouwd. De handreiking voorziet hierin, met als belangrijkste aandachtspunten erosiebestendigheid en waterdichtheid.

Grootschalige erosie kan alleen ontstaan door een lage sterkte (bijvoorbeeld fragmentarische grasmat) of zware belasting (grote golven, langdurige belasting of grote overslag) en de kans hierop is klein bij een goed ontwerp. Wanneer deze omstandigheden met erosie zich onverhoopt toch kunnen voordoen, komt de GCL bloot te liggen en dat dient meegenomen te worden in het ontwerp. Het restrisico van het losliggende GCL wordt gezien als calamiteit, die beheerst kan worden met noodmaatregelen.

Waterdichtheid is een vaststaand gegeven met een bepaalde invloed op de grondwaterstand, waarvan het effect op het ontwerp bepaald moet worden.

Uitvoering

De exacte wijze waarop een waterkering wordt aangelegd is de verantwoordelijkheid van de aannemer, maar er zijn wel enkele dwarsverbanden met het ontwerp, de beoordeling en het beheer. Enkele specifieke punten worden in de handreiking aangestipt.

Beoordeling

Na realisatie van een met deze handreiking ontworpen waterkering met GCL, zal periodiek een veiligheidsbeoordeling uitgevoerd moeten worden. Beoordelen is een activiteit waarin ook ervaringen van dijkbeheerders een plaats hebben. Maar bij innovaties is er dikwijls een gebrek aan ervaring, waardoor er altijd een onbekend risico blijft bestaan (zowel gedrag bij hoogwater als uitvoeringskennis). Toepassing van GCL's is op zich geen innovatie en dus spelen er weinig onbekende risico's. De innovatie en dus onbekendheid zit vooral in de toepassing van de GCL met zandige afdekgrond (voorzien van een grasmat) als bekleding en de invloed daarvan op de erosiebestendigheid. En toepassing van de GCL over een grote breedte als pipingmaatregel (kwelweg > twee maal dijkbasis).

De beoordeling van de bekledingssporen STPH, GEBU, GABU, GEKB en GABI is daarom uitgeschreven, alsmede een twee nieuwe sporen "ongemerkt falen GCL" en "blootliggend GCL". De andere faalsporen sluiten aan op het WBI2017.

Onderhoud

Onderhoud is een belangrijke taak voor de dijkbeheerder, maar heeft ook een relatie met het ontwerp en de uitvoering. De website van Stowa (<https://handreikinggrasbekleding.nl/>) biedt een uitgebreid overzicht van alles wat komt kijken bij onderhoud van de grasmat. Enkele specifieke punten worden in de handreiking aangestipt.

INHOUDSOPGAVE

VOORWOORD	2
SAMENVATTING	5
1 INLEIDING	15
1.1 Achtergrond	15
1.2 Deze handreiking	15
1.3 ENW advies	15
1.4 Doelstelling	15
1.5 Leeswijzer	16
1.5.1 Literatuur	16
1.5.2 Doelgroep	17
2 PRINCIPE ONTWERP	18
2.1 Wat is een GCL	18
2.1.1 Beschrijving samenstelling	18
2.1.2 Typen bentoniet	19
2.1.3 Referenties	20
2.2 Wanneer een GCL	21
2.2.1 Toepassingsvoorwaarden	21
2.2.2 Toepassingsbereik	22
2.2.3 GCL en zoutinvloed	22
2.2.4 Duurzaamheid, levenscyclus en levensduur	22
2.2.4.1 Duurzaam GWW	22
2.2.4.2 Levensduur GCL	22
2.2.4.3 Duurzaamheid GCL	23
2.2.4.4 Levenscyclus	23
2.2.5 Faalmechanismen	24
2.2.5.1 Bijzonderheden voorland (STPH)	24
2.2.5.2 Bijzonderheden buitentalud (STBU, GEBU, GABU)	24
2.2.5.3 Bijzonderheden kruin en binnentalud (GEKB, GABI, STBI, STMI)	24
2.3 Vormgeving	26
2.3.1 Grasmatt	27

2.3.2	GCL	27
2.3.3	Kruinverharding	27
2.4	Status Duitse norm BRAD16	29
2.5	Definities bekledingslaag	29
3	BENODIGDE GEGEVENS	31
3.1	Specificaties GCL	31
3.1.1	Hydraulische weerstand en zwelvermogen	31
3.1.1.1	Referentie situatie	31
3.1.1.2	Doorlatendheid bentoniet	31
3.1.1.3	Degradatie	32
3.1.1.4	Zelfhelend vermogen	32
3.1.2	Sterkte-eigenschappen	32
3.1.3	Relatie locatie, faalmechanismen en specificaties	33
3.2	Ondergrond en grondwater	33
3.3	Zetting, optredende overloop of overslag	34
3.4	Piping	34
3.5	Erosiebestendigheid bekleding	34
3.6	(macro)Stabiliteit	34
4	FAALMECHANISMEN	35
4.1	Veiligheidsfilosofie	35
4.1.1	Schematisering	35
4.1.2	Belastingen	36
4.1.3	Veiligheidseisen	37
4.1.3.1	Piping (STPH)	37
4.1.3.2	Stabiliteit bekleding (GABU, GABI, STMI)	37
4.1.3.3	Macrostabiliteit (STBU, STBI)	39
4.1.3.4	Aansluitingen	39
4.2	Positieve en negatieve effecten	39
4.3	Gebeurtenissenboom	40
5	ONTWERP	48
5.1	Relatie faalmechanismen en ontwerp	48
5.2	Plaatsing in het voorland (STPH)	49
5.2.1	Extra voorland meenemen	49
5.2.2	Detailering	49
5.3	Plaatsing op kruin en taluds	50
5.3.1	Keuze afdeklaag groene dijk (GEBU, GEKB)	51

5.3.2	Keuze grasmengsel (GEBU, GEKB)	52
5.3.3	Keuze drainagelaag (GABU, GABI)	53
5.3.4	Erosiebestendigheid (GEBU, GEKB)	54
5.3.5	Voorkomen graafschade aan de GCL	55
5.3.6	Blootliggend GCL	56
5.3.6.1	Opzwellen GCL	56
5.3.6.2	Oplichten en opklappen GCL op buitentalud	57
5.3.6.3	Oplichten door drukverschillen op buitentalud	57
5.3.6.4	Buitentalud (instabiliteit dijkkern)	57
5.3.6.5	Erosie dijkkern onder GCL op binnentalud	57
5.3.7	Vaststellen freatische lijn	58
5.3.7.1	Door GCL lagere freatische lijn	58
5.3.7.2	GCL en lokaal hoge freatische lijn	58
5.3.7.3	Invloed drainage	58
5.3.8	Stabiliteit bekledingslaag (GABU, GABI en STMI)	58
5.3.8.1	Invloed GCL op berekeningsmethodiek	58
5.3.8.2	Invloed drainage binnenteen	59
5.3.9	Zettingen	59
5.3.10	Constructief falen (GABU en GABI)	60
5.3.11	Aanlegdiepte	60
5.3.11.1	Vorst-dooi, zout en droogte inwerking	60
5.3.11.2	Dekking en aansluiting op kruinverharding	60
5.4	Aansluitingen	60
5.4.1	Overgang GCL's	60
5.4.2	Verankering en inklemming	62
5.4.3	Overgangen en aansluitingen	62
5.4.4	Kabels en leidingen	63
5.5	Ontwerplevensduur en uitbreidbaarheid	63
6	UITVOERING	64
6.1	Relatie faalmechanismen en uitvoering	64
6.2	Uitvoering in de droge	64
6.2.1	Afwerkeisen onderlaag	64
6.2.2	Positionering GCL	65
6.2.3	Verwerken afdekgrond	66
6.3	Installeren in den natte	67
6.4	Kwaliteitscontrole	67
6.4.1	Tijdens uitvoering	67
6.4.2	Kwaliteitscontrole rapportage	68

7	BEOORDELING	69
7.1	Relatie faalmechanismen en beoordelingsmethode	69
7.2	Beoordelingsmethode	70
7.2.1	STBU / STBI	70
7.2.2	GEBU / GEKB	70
7.2.3	GABU / GABI	71
7.2.4	STMI	71
7.2.5	STPH	71
7.2.6	Ongemerkt falen	72
7.3	Beheer	73
7.3.1	Beheerplan	73
7.3.2	Periodieke keuring	73
7.3.3	Inspectie frequentie	74
7.3.4	Nut en noodzaak monitoring	74
7.3.5	Sturing op grasmatkwaliteit	74
7.3.6	Vergunnen van grondonderzoek	74
8	ONDERHOUD	76
8.1	Relatie faalmechanismen en onderhoud	76
8.2	Dagelijks onderhoud	76
8.2.1	Grasmat	76
8.2.2	Bomen	77
8.3	Onderhoud tijdens hoogwater	77
8.4	Herstellen van schade	77
9	REFERENTIELIJST	78

TABELLEN

Tabel 1: belastinggevallen van een veel voorkomende rivierdijk in Nederland.	24
Tabel 2: overzicht locatie, faalmechanismen en specificaties.	33
Tabel 3: mogelijke unieke belastinggevallen van een waterkering met GCL bekleding.	36
Tabel 4: reductie- en partiële veiligheidsfactoren voor stabiliteit bekledingslaag (Mohr-Coulomb).	38
Tabel 5: aanbevolen rekenwaarde van de (schuif)sterkte voor ongescheurde bekledingslagen van gebiedseigen grond.	38
Tabel 6: standaard partiële veiligheidsfactoren conform WBI2017 voor CSSM.	39
Tabel 7: effecten van aanwezigheid van een GCL op verschillende (faal)mechanismen.	39
Tabel 8: overzichtstabel met gebeurtenissen die leiden tot topgebeurtenis (falen waterkering).	42
Tabel 9: overzicht faalmechanismen en ontwerp.	48

Tabel 10: benodigd vochtleverend vermogen (mm), vrij naar Locher en de Bakker.	51
Tabel 11: volumefractie beschikbaar hangwater per grondsoort, vrij naar Locher en de Bakker.	52
Tabel 12: plantenassociaties op schrale dijken.	53
Tabel 13: overzicht faalmechanismen en uitvoering.	64
Tabel 14: overzicht faalmechanismen beoordeling.	69
Tabel 15: mu en sigma waarden voor een gesloten zode op zand in benedenriviergebied (bron: ref 22).	70
Tabel 16: overzicht faalmechanismen onderhoud.	76
Tabel 17: legenda gebeurtenissenboom.	79
Tabel 18: invoerpaneel van de rekensheet.	82
Tabel 19: minimumeisen GCL.	88

FIGUREN

Figuur 1: aanleg bentonietmat of GCL in voorland bij Neer.	4
Figuur 2: afrollen van een bentonietmat of GCL in het voorland bij Neer.	4
Figuur 3: conventioneel ontwerp van veelvoorkomende waterkering in Nederland.	6
Figuur 4: samenstelling van GCL en tot stand brengen verbinding met needle-puncturing techniek.	19
Figuur 5: GCL van non-woven (links) en weefsel (rechts).	19
Figuur 6: mogelijke posities waar een GCL kan worden toegepast.	25
Figuur 7: voorbeeld conventioneel ontwerp.	26
Figuur 8: voorbeeld innovatief ontwerp als bekleding.	28
Figuur 9: definitieschets van de bekledingslaag met drainagelaag.	30
Figuur 10: faalstructuur in vereenvoudigde vorm (hoofdsporen die leiden tot falen van dijklichaam).	41
Figuur 11: stroomschema ontwerp afdeklaag op kruin en taluds van rivierdijken met beperkte belasting.	50
Figuur 12: bekleding van uniforme dikte met drainagelaag (links) en wigvorm (rechts).	53
Figuur 13: standtijd toplaag per significante golfhoogten, zodekwaliteit en grondsoort (bron: ref 19).	54
Figuur 14: standtijdlijnen (bron: Eindadvies beoordeling gras op zandbekledingen, Deltares januari 2022).	55
Figuur 15: aanbrengen grindhoudend grof zand (Kinzig dijken 2001).	56
Figuur 16: voorbeeld bevergaas (ofwel Biber Gitter).	56
Figuur 17: positieve overlap.	61
Figuur 18: voorbeeld van een eenvoudige verankering op de kruin.	62
Figuur 19: uitrollen van GCL in voorland (foto: Wiel aan de Boom).	65
Figuur 20: de bocht om met GCL in voorland (foto: Wiel aan de Boom).	66
Figuur 21: gedetailleerde weergave doorsnede type BZ 13-B bentonietmat (totaal 14 kg/m ²).	67
Figuur 22: drijfvuilshade bij Olburgen 1995 (foto: WRIJ).	77
Figuur 23: voorbeeld van invoer voor de berekeningen.	82
Figuur 24: schematisering van de berekening voor opbarsten.	83
Figuur 25: schematisering van de berekening stabiliteit afschuiven inclusief GCL.	84
Figuur 26: schematisering berekening stabiliteit bekledingslaag op de GCL inclusief kielspit.	84
Figuur 27: schematisering berekening afschuiven bekledingslaag op de GCL exclusief kielspit.	85

Figuur 28: schematisatie afschuiven bekledingslaag op de GCL inclusief verkeersbelasting waarbij het freatisch niveau onder de bekledingslaag aanwezig is.	86
Figuur 29: verbetering Oederdijk 2018 (foto Kees Dorst).	90
Figuur 30: aanvoer van gebiedseigen grond per schip, vanuit Heel naar Beesel (foto: Wiel aan den Boom).	90
Figuur 31: verwerken gebiedseigen grond en GCL op dijk bij Beesel (foto: Wiel aan den Boom).	91
Figuur 32: mengwoeler voor stabilisatie van de toplaag op de kruin.	91
Figuur 33: stabilisatie toeslagstof (links) en gemengde grondlaag (rechts).	92
Figuur 34: verschillende soorten spelden (Y-pins) en haarspelden (U-pins) van betonstaal en “zachtstaal”.	92
Figuur 35: Schroefpennen met ring (van links naar rechts Wormi, Gripple, Peggypeg).	93

BIJLAGEN

BIJLAGE A GEBEURTENISSENBOOM GCL “GESNOEID”	79
BIJLAGE B VOLLEDIGE GEBEURTENISSENBOOM GCL	80
BIJLAGE C STABILITEIT BEKLEDINGSLAAG	81
BIJLAGE D MINIMUMSPECIFICATIES GCL	87
BIJLAGE E FOTOBIJLAGE	90

COLOFON 94

1 INLEIDING

1.1 Achtergrond

Vroeger werden waterkeringen met name van lokaal beschikbare grond en materialen gemaakt. Bijvoorbeeld: de Afsluitdijk bestaat uit kades van keileem, met daartussen zand uit de voormalige Zuiderzee. Veenkaden worden met name in het westen van Nederland langs drooggemaakte polders aangetroffen (ontginning van veen) en rivierdijken in het rivierengebied bestaan vaak uit rivierklei. Ergo: de samenstelling van de waterkering heeft een logisch verband met het streven naar zo weinig mogelijk transport van het hoofdbestanddeel van een waterkering; grond.

Grond bestaat er in vele verschijningsvormen. Na de watersnoodramp van 1953 zijn in toenemende mate strengere regels opgesteld waar de verschillende grondsoorten aan moeten voldoen. Hierdoor worden vrijwel alle waterkeringen op dezelfde manier gebouwd, met voornamelijk zand en klei. Dit heeft te maken met de eisen die gesteld worden aan de doorlatendheid, de gevoeligheid voor zetting en klink en de erosiebestendigheid tezamen met het waterremmend vermogen van de buitenzijde van de waterkeringen. De combinatie van eisen kan soms op gespannen voet staan met de wens om lokaal beschikbare grond toe te passen.

Het logische verband tussen lokaal (op provincie schaal gezien) in grote hoeveelheden beschikbare grond en de samenstelling van de waterkering is in de afgelopen decennia op de achtergrond geraakt. Hieruit vloeit de doelstelling van de project overstijgende verkenning naar dijkverbetering met gebiedseigen grond (POV-DGG) voort, namelijk: “Hoe kunnen we sneller, goedkoper én duurzamer de waterkeringen versterken met gebiedseigen grond?”. Aan de doelstelling wordt invulling gegeven door inzichten uit de POV-DGG om te zetten in concrete instrumenten. De voorliggende handreiking voor GCL's (Geo Clay Liners) ofwel bentonietmatten is hier een onderdeel van en faciliteert in het toepassen van lokaal beschikbare zandige grond.

1.2 Deze handreiking

De handreiking omschrijft alle ontwerpaspecten waaraan het voorland en de alternatieve taludbekleding met een bentonietmat ofwel Geo Clay Liner (hierna GCL genoemd) moet voldoen om als volwaardig geaccepteerd alternatief voor een “vette kleilaag” toegepast te kunnen worden. Want zonder handreiking, zal toepassing van een GCL niet geaccepteerd worden door de dijkbeheerder of mogelijk leiden tot juridische conflicten bij aanbestedingen. Ook geeft de handreiking invulling aan de eis van de dijkbeheerder, dat een ontwerp toetsbaar moet zijn en dat de waterkering kan worden beheerd en onderhouden en beoordeeld.

1.3 ENW advies

In maart 2022 is het ENW advies gevraagd over het gebruik van deze handreiking, destijds nog als OBOR (Ontwerp-, Beoordelings- en Onderhoudsrichtlijn) benoemd. Het ENW (advies ENW 22-05) heeft geconcludeerd dat het document een goede verzameling van beschikbare informatie is op het gebied van GCL's en het daarmee een zeer praktische handreiking is. De door het ENW voorgestelde aanpassingen zijn doorgevoerd en verbeterpunten zijn overgenomen, behoudens de ontwikkelpunten aansluiting op BOI en reststerkte van blootliggend GCL. De handreiking is daarmee geaccepteerd voor Limburgse situaties waar geen (bruikbare) klei beschikbaar is.

1.4 Doelstelling

De doelstelling van de handreiking is: rivierdijkversterking met GCL op veilige wijze mogelijk maken en geaccepteerd krijgen, zodat meer lokale grond, die niet of nauwelijks aan strenge eisen hoeft te voldoen, zoveel mogelijk gebruikt kan worden.

Deze publicatie is hiermee een belangrijke invulling van de project overstijgende verkenning (POV-DGG) met als doelstelling om waterkeringen sneller, goedkoper en duurzaam te kunnen versterken met gebiedseigen grond. De kosten van dijkversterkingen kunnen hiermee worden verlaagd. Tevens kan de toepassing bijdragen om de CO₂-uitstoot van het ontwerp/uitvoering van dijkversterkingen te verlagen, door een substantiële vermindering van de transportafstand bij grondverzet door gebruik van zoveel mogelijk lokaal aanwezige grond.

Hiermee kan ook een belangrijke bijdrage worden gegeven aan de doelstelling vanuit Rijkswaterstaat om in 2030 volledig CO₂-neutraal en circulair te werken¹ met hoogwaardig hergebruik van alle materialen en halvering van het gebruik van primaire grondstoffen.

1.5 Leeswijzer

De handreiking is zodanig vormgegeven dat deze in Nederland toepasbaar is voor primaire rivierdijken, in gebieden met een ondergrond van zand, leem of klei. De waterkering kan bijvoorbeeld een voorland van zandige grond bezitten. Ook kan een waterkering worden aangelegd, verbreed of verhoogd met (gebiedseigen) zandige grond in de kern of op het buiten- of binnentalud. Zandige grond of zandhoudende klei heeft een hogere doorlatendheid en lagere erosiebestendigheid dan “vette klei” en dit is ongewenst voor waterkeringen. De GCL compenseert dit. In deze handreiking wordt een overzicht gegeven van alles wat komt kijken bij de toepassing van GCL's in waterkeringen met een (deels) zandig karakter. De wijze van ontwerpen en beoordelen sluit aan bij het WBI2017 en dit vormt dus de spreekwoordelijke “kapstok”. Op het punt dat de waterkering met GCL afwijkt (intredeweerstand en erosiebestendigheid) voorziet deze handreiking in een koppeling met de bestaande veiligheidsfilosofie.

De toepassing van GCL's op bijvoorbeeld zeedijken, onder steenbestortingen en zetsteenbekledingen en op boezemkades is ook mogelijk, maar hierop is deze handreiking niet specifiek toegesneden. De belangrijkste reden voor deze beperking is van praktische aard. De toepassing van een GCL onder een laag zandige gebiedseigen grond ligt juist bij grote golven (op zeedijken en bij steenbekledingen) niet voor de hand en ook onder een laag slecht doorlatend kleilig veen in een droogmakerij (boezemkade) niet. Ter voorkoming van uitdroging van veenkades is een GCL wellicht mogelijk, maar dit is niet verder onderzocht in het kader van deze handreiking.

Er is eerst een beeld geschetst hoe een waterkering met GCL er uit ziet en wat daaraan op het oog anders is dan een gewone waterkering. Daarna zijn de mogelijke faalmechanismen aan de hand van een “gebeurtenissenboom” behandeld. Er is bewust gekozen voor een gebeurtenissenboom (en niet voor een faalboom) om aan te sluiten bij de dagelijkse ontwerppraktijk (zie §4.1 op pagina 35).

De specificaties aan een GCL qua producteisen, plaatsing in dwarsprofiel en uitvoeringswijze hebben een aparte plek, omdat deze aspecten dikwijls in een overeenkomst met een aannemer vastgelegd zijn (opstellen ontwerp, levering en aanleg).

Duurzaamheidsaspecten krijgen ook bij dijkversterkingen een steeds prominentere positie. Dit geldt te meer voor de toepassing van GCL's, gelet op de toenemende aandacht voor het gebruik van kunststoffen in GWW. Duurzaamheid is echter één van de criteria die worden meegewogen in de variantenafweging voor een dijkontwerp. Deze handreiking komt in beeld als de keuze voor GCL toepassingen is gemaakt. Wel zijn in deze handreiking enkele aandachtspunten opgenomen die gebruikt kunnen worden in de beoordeling van duurzaamheidsaspecten voor GCL's.

De handreiking sluit af met een beschrijving van aandachtspunten bij de beheerfase, waarbij de verantwoordelijkheid bij de dijkbeheerder komt te liggen.

1.5.1 Literatuur

De handreiking vormt een slechts overzicht voor toepassing van GCL's in waterkeringen. Voor alle verschillende toepassingen en uitvoeringstechnieken zijn er namelijk vaak al specifieke rekenmethoden en richtlijnen beschikbaar in de vorm van CUR handboeken, normbladen, publicaties of anderszins. De belangrijkste richtlijnen zijn de schematiseringshandleidingen behorende bij het WBI2017 en de POVM publicatie grondverbeteringen [ref 16]. In de referentielijst (Hoofdstuk 9 op pagina 78) wordt een gedetailleerd overzicht gegeven van publicaties.

In de komende jaren zal het WBI2017 worden vervangen door het BOI2023. Wanneer dat geëffectueerd is, zal deze handreiking geredigeerd moeten worden.

¹ [Naar klimaatneutrale en circulaire rijksinfrastructuurprojecten | Rapport | Rijksoverheid.nl](#)

1.5.2 Doelgroep

Het ontwerpgedeelte in deze handreiking is geschreven voor een deskundig gebruiker die bekend is met de voorschriften, (deel)faalmechanismes en modellen die van toepassing zijn voor deze handreiking. Tevens wordt verondersteld dat de informatie uit de WBI2017 documenten bekend is. Het beheer en onderhoudsgedeelte is minder specifiek en daardoor voor een breder publiek toegankelijk.

2 PRINCIPE ONTWERP

Veel dijkverbeteringen vinden plaats langs rivieren waar over het algemeen de “vettere klei” schaars is en zandig gebiedseigen materiaal meer voorradig is. Deze waterkeringen zijn meestal voorzien van een grasbekleding op een kleiige laag, hebben vaak een voorland met klei houdende grond, bezitten over het algemeen taludhellingen van 1:2,5 tot 1:5 en dikwijls is binnendijks een steunberm aanwezig voor macrostabiliteit. Met deze veel voorkomende rivierdijk in Nederland in het achterhoofd is deze handreiking voor GCL's opgesteld en zodoende wordt maximale toepassing van gebiedseigen zandig materiaal mogelijk gemaakt. De GCL neemt deels de erosiebestendigheidfunctie en volledig de waterdichtheidsfunctie van de kleilaag over. De GCL wordt aangelegd onder een beschermende afdeklaag van gebiedseigen grond met daarop een grasmat, die ook substraat is voor de grasmat waaraan erosiebestendigheid wordt toegekend.

Vanwege de combinatie van GCL met gebiedseigen grond zijn de eisen voor de dagelijkse beheer situatie (bruikbaarheidsgrenstoestand = BGT) erg belangrijk. Daarom is de overstromingsrisico benadering (uiterste grenstoestand = UGT) niet volledig toepasbaar.

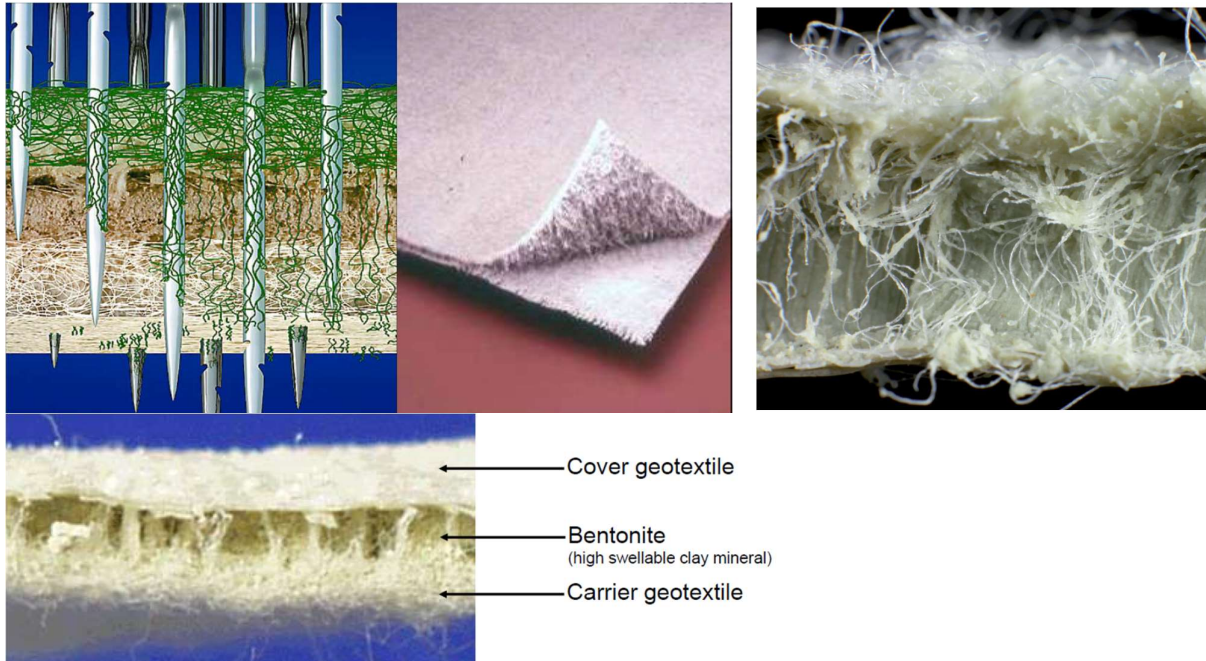
2.1 Wat is een GCL

Er zijn vele typen GCL verkrijgbaar van verschillende producenten. Een GCL bestaat in de basis uit twee geotextielen, met daartussen bentoniet. Het bentoniet zorgt voor de zeer lage waterdoorlatendheid en het geotextiel voor inklemming van het bentoniet alsmede sterkte en erosiebestendigheid van de GCL als geheel.

2.1.1 Beschrijving samenstelling

GCL's kunnen op verschillende manieren geproduceerd worden. 'Het is bijvoorbeeld mogelijk om twee non-woven geotextielen met de needle-punch techniek en een thermisch proces tot één geheel maken. Duizenden naalden met weerhaken duwen en trekken de vezels van de beide doeken door elkaar wat leidt tot een zeer hechte verbinding (zie Figuur 4). Het is ook mogelijk om weefsels te gebruiken, die aan elkaar genaaid worden (zie Figuur 5); stitch-bondingsamenstellingstechniek.

Naast de soort en hoedanigheid van de bentoniet verschillen de verkrijgbare GCL's ook in opbouw. Ze kunnen bestaan uit twee, drie of meer lagen geotextiel. Ook zijn speciale uitvoeringen verkrijgbaar, waardoor het mogelijk is om deze mat af te zinken of die de mat geschikt maakt om direct af te storten met breuksteen 5-40 of 10-60 kg. Bij normale niet verzwaarde en versterkte matten kan dit doorgaans niet, omdat de puntige druklasten van de stenen de bentoniet kunnen verdringen (squeezezen), waardoor de doorlatendheid van de GCL flink kan toenemen. Tevens zijn GCL's leverbaar die een oppervlaktebehandeling hebben ondergaan, waardoor wortel-ingroei wordt voorkomen.



Figuur 4: samenstelling van GCL en tot stand brengen verbinding met needle-punching techniek.



Figuur 5: GCL van non-woven (links) en weefsel (rechts).

2.1.2 Typen bentoniet

Bentoniet is een kleisoort met een groot zwelvermogen. Er zijn verschillende soorten bentoniet, namelijk sodiumbentoniet (dit is hetzelfde als natriumbentoniet) en calciumbentoniet. Alle soorten bentoniet ondergaan kationenuitwisseling, dat wil zeggen natriumbentoniet verandert in calciumbentoniet en daardoor veranderen de eigenschappen in de tijd.

2.1.3 Referenties

De GCL's worden sinds de ontwikkeling in de jaren '80 vooral gebruikt voor afdichtingen van afval- en reststoffenbergingen en waterbassins. Met name vanuit de toepassing bij stortplaatsen worden hoge eisen gesteld aan de eigenschappen en de aantoonbaarheid daarvan. Dit heeft ertoe geleid dat de GCL's intensief zijn getest, op met name waterremmend vermogen en gedrag daarvan in droog-nat cycli. Het betreft niet alleen laboratoriumtesten van nieuwe GCL's, ook heeft onderzoek plaats gevonden aan 6 tot 12 jaar oude opgegraven GCL's (bron: ref 7).

Buiten het werkveld van de waterkeringen zijn er derhalve zeer veel referenties van deze techniek beschikbaar, waardoor gesteld kan worden dat deze techniek daar als 'bewezen' wordt gezien. Op waterkeringen in Duitsland worden GCL's inmiddels regelmatig toegepast in voorlanden en op buitentaluds (zie onderstaande foto's) en gezien als een volwaardige techniek voor het vervangen van een afdichtende kleilaag.



Versterking van de Lippe dijk

Versterking van de Kinzig dijken in 2001



Versterking van de Oder dijk, 2018

Versterking van de Donau dijk bij Neustadt, 2006



Versterking van de Mulde dijk, 2004

Versterking van de Rijndijk bij Rheinhausen, 2005

2.2 Wanneer een GCL

Met een GCL kan een dunne (centimeters) nagenoeg water ondoorlatende laag worden gerealiseerd. Ten opzichte van de conventionele methode met een kleilaag van > 1m dik, kan met GCL's in veel gevallen een technische verbetering, snellere aanleg en een kosten- en duurzaamheidsvoordeel worden behaald. De volgende toepassingen in dijkversterkingsprojecten zijn reeds gerealiseerd en zijn tevens onderwerp van deze handreiking:

1. Als kwelwegverlenging in het voorland om piping te voorkomen: intredeweerstand aanbrengen in een zandig en doorlatend voorland, alsmede meer dan tweemaal de dijkzate als kwelweg in rekening brengen. Ten opzichte van een conventionele voorlandverbetering met een kleilaag zitten de voordelen van een GCL in het niet hoeven aanbrengen (aankopen, aanvoeren) van klei, een minder diepe ontgraving, installatie onder water mogelijk zonder bemaling (met speciaal GCL).
2. Als waterremmende laag op het buitentalud tegen verhoging van de freatische lijn als alternatief voor conventionele maatregelen voor macro- en micro-instabiliteit. Het is denkbaar dat deze GCL tevens reststerkte toevoegt, of anders gezegd een laag vormt met additionele sterkte onder de afdeklaag met grasmat, tegen erosie van de dijkkern. Het betrekken van deze reststerkte in ontwerp en beoordeling is in de praktijk tot op heden nog niet gedaan en is geen onderdeel van deze handreiking.
3. Als waterremmende laag op de kruin en binnentalud. Het is denkbaar dat deze wordt aangelegd tegen ongewenste infiltratie van regenwater en golfoverslag en als reststerktelaag onder de afdeklaag tegen erosie van de dijkkern door golfoverslag.

De derde toepassing, een GCL als waterremmende laag op de kruin en binnentalud (overigens in combinatie met een GCL op het buitentalud), is als eerste in Nederland gerealiseerd in de dijkversterking van Beesel in 2022. Dit als pilot ten behoeve van het doorlopen van het gehele ontwerp- en uitvoeringsproces als input voor deze handreiking. Met een GCL op het binnentalud kan ook hier grond met een lagere kwaliteit worden gebruikt, maar dit voordeel heeft een keerzijde. De pilot heeft duidelijk gemaakt dat deze toepassing risico's introduceert die weliswaar beheersbaar zijn, maar speciale (extra) aandacht vragen. Het sealen van het binnentalud kan immers leiden tot overdrukken onder de bekleding (van water en lucht) wat juist in combinatie met een minder erosiebestendige toplaag en een relatief groot overslaggebied problematisch kan worden zonder extra maatregelen. In deze handreiking is de toepassing van een GCL op de kruin en binnentalud wel benoemd en uitgewerkt, maar op voorhand kan worden gesteld dat dit alleen zou moeten worden gedaan indien daar speciale redenen voor zijn. De luchtinsluiting onder het GCL is in deze handreiking niet verder benoemd. De maximale luchtdrukopbouw die door stijging van het buitenwater door het grondwater, boven het niveau van de beëindiging op het binnentalud van het GCL, op kan treden, moet kunnen worden opgevangen door het gewicht van de toplaag. Anders moet in overleg met de producent kunnen worden uitgesloten dat bij de toe te passen GCL dit een probleem kan vormen of welke maatregelen anders nodig zijn.

In de kansenscan (bron: ref 9) zijn de mogelijk toepassingen nader uitgeschreven en in Figuur 6 is schetsmatig weergegeven op welke positie een GCL mogelijk is.

2.2.1 Toepassingsvoorwaarden

Een GCL kan bij primaire waterkeringen langs rivieren worden toegepast als aan de volgende basisvoorwaarden is voldaan (voor afwijkende situaties moet per geval beoordeeld worden of toepassing van GCL's haalbaar is):

- De ondergrond en de waterkering bestaat uit zand, leem en/of klei en alleen in zeer beperkte mate uit veen. De toepassing van veen als gebiedseigen grond is in deze handreiking niet beschreven en de aansluiting op de norm (Stowa2015-15) voor regionale keringen, die vaak op veengrond liggen, is niet gemaakt;
- Er is een minimale gronddekking aanwezig op de GCL van 80 cm (met uitzondering van de kruin), zodat:
 - Er een grasmat kan ontstaan met een bepaalde sterkte, die niet jaarlijks afsterft door verdroging;
 - Beschadiging wordt voorkomen door groundbewerkingen in het voorland;
 - Er grondmechanisch evenwicht kan worden bereikt;
- De GCL op het buitentalud in ieder geval verankerd is bij de buitenteen en op de kruin, zodat "losliggen" wordt voorkomen;

- De hellingen van het binnen en buitentalud, bij een dijk kern van zandig materiaal met natuurlijke ontstaansgeschiedenis, niet steiler dan 1:2 is, zodat macrostabiliteit geen extra knelpunt vormt.

2.2.2 Toepassingsbereik

Vanuit praktische overwegingen is een keus gemaakt voor het toepassingsbereik van deze handreiking, zijnde primaire waterkeringen langs rivieren met een veelvoorkomende taludhelling (orde grootte 1:2,5 tot 1:5). Zeedijken met overwegend grote golven vallen buiten het toepassingsbereik, omdat een grasmat op zandige grond zonder aanvullende maatregelen niet voldoende erosiebestendigheid bezit. Regionale keringen en boezemkaden hebben een andere veiligheidsfilosofie en vaak een andere belasting en bodemopbouw. Door de beperkingen die zijn aangegeven in deze handreiking in acht te nemen, is het toepassingsgebied wel op te rekken tot specifieke regionale keringen en boezemkaden

Dit toepassingsbereik kan breder zijn in specifieke omstandigheden. Bijvoorbeeld bij een grote golfhoogte met korte stormduur of bij een flauwe taludhelling en fragmentarische grasmat, zou wel een GCL kunnen worden toegepast.

2.2.3 GCL en zoutinvloed

Gevoeligheid voor Calcium en zout water in de ondergrond:

- Contact met Calcium vergroot de doorlatendheid beperkt. GCL's met 7000-8000 g/m² bentoniet een factor 3 tot 4; GCL's met 4000-5000 g/m² een factor 6 tot 7.
- Contact met zout water is toegestaan als de GCL eerst door zoet water is gehydrateerd.

Per specifiek project waar dit aan de orde kan zijn moet samen met de producent en ontwerper worden bekeken of GCL's kunnen worden toegepast en aan welke specifieke eisen die dan moeten voldoen.

2.2.4 Duurzaamheid, levenscyclus en levensduur

2.2.4.1 Duurzaam GWW

Alle waterschappen in Nederland hebben zich in januari 2017, via ondertekening van de Green Deal Duurzaam GWW 2.0, gecommitteerd aan de doelstelling om per 2020 in alle projecten verantwoord om te gaan met grondstoffen en materialen. Hiervoor is een praktische handreiking ontwikkeld. In de handreiking staat onder meer een stappenplan om met de Aanpak Duurzaam GWW aan de slag te gaan. Ook worden vier instrumenten toegelicht die deze aanpak ondersteunen: de Omgevingswijzer, het Ambitiweb, de CO₂-Prestatieladder en DuboCalc.

Het instrument Dubocalc kan ingezet worden om de duurzaamheid en milieukosten van verschillende ontwerp- en uitvoeringsvarianten te vergelijken. Alle milieueffecten komen in beeld van winning tot aan de sloop- en hergebruikfase. Als resultaat worden de milieueffecten uitgedrukt in euro's en dit wordt de Milieukostenindicator (MKI) genoemd. De methode is gebaseerd op de rekenmethodiek van de Levenscyclusanalyse (LCA) gespecificeerd in de SBK Bepalingsmethode Milieuprestatie Gebouwen en Bouwwerken. DuboCalc volgt updates van deze bepalingmethode.

2.2.4.2 Levensduur GCL

Een bentonietmat bestaat uit geokunststoffen en bentoniet. Sinds de ontwikkeling en productie van geokunststoffen worden ze over de hele wereld gebruikt als bouw materiaal in GWW projecten. De kwaliteit en levensduur van geokunststoffen is de laatste decennia zodanig verbeterd dat aan hoge eisen en normen wordt voldaan. Zo kan een levensduur van 100 jaar conform gestandaardiseerde beproevingsmethoden aantoonbaar worden gehaald.

In het algemeen is de levensduur van geotextielen afhankelijk van chemische omstandigheden in de bodem (onder andere pH) en ook van UV straling. Voor GCL's onder een afdeklaag is alleen dat eerste van belang. De chemische resistentie voor het milieu waarin het moet functioneren hangt daar dus mee samen. De leverancier moet, op grond van geformuleerde randvoorwaarden, de ontwerplevensduur van zijn

geotextielen onderbouwen en vastleggen op certificaten. Voor meer informatie wordt verwezen naar CUR243 [ref 12].

2.2.4.3 Duurzaamheid GCL

De duurzaamheid van een GCL wordt bepaald door de afzonderlijke componenten: het geotextiel (bijvoorbeeld polypropyleen) en bentonietpoeder. Polypropyleen is een hoogwaardig materiaal en heeft een CED (Cumulated Energy Demand) van 47 MJ/kg. De productie geeft een uitstoot van CO₂ en andere gassen. Vanwege ecologische en economische redenen zou polypropyleen voor zover mogelijk alleen gebruikt moeten worden in slimme hoogwaardige toepassingen met technisch of economisch voordeel. Dit is het geval voor GCL's, want van het totaal gewicht van de GCL (4 à 6 kg/m²), bestaat 10 tot 15 gewichtsprocent uit Polypropyleen. Ook bentoniet is een hoogwaardig mineraal materiaal met een aanzienlijk lagere, maar toch niet te verwaarlozen CED en dus CO₂ uitstoot voor winning, drogen en transport vanuit Europa of daarbuiten.

Een GCL kan ook vervaardigd worden met andere synthetische materialen zoals HDPE, PES of PE en daarvoor geldt een vergelijkbare redenering ten aanzien van CED.

In de bodem speelt de degradatie door UV straling geen rol. En de toevoeging van additieven vertraagt het oxidatieproces. Er komen ook geen losse vezels vrij. Naast de zeer lange levensduur van het product is het nog relevanter dat geotextielen en GCL's ook voor die lange levensduur worden toegepast. Derhalve zijn deze bouwmaterialen niet te vergelijken met wegwerp plastic afval wat we in het milieu tegenkomen. Geokunststoffen houden hun energie-inhoud welke bij ontmanteling van de constructie vrij kan komen bij regeneratie of verbranding. De nu gebruikte geokunststoffen lossen niet op in water en er is geen sprake van een schadelijke hoeveelheid uitloging met gevolgen voor flora en fauna.

Bentoniet is net als klei een natuurproduct. Net als voor geokunststoffen (van bijvoorbeeld polypropyleen) is er veel energie nodig om deze producten te maken. Maar de hoeveelheden materiaal zijn in verhouding tot het werkoppervlak klein, in ieder geval veel kleiner dan de hoeveelheid klei die in een conventionele kleilaag nodig is. Voor klei zijn winning en transport belangrijke milieubelastende factoren.

Vergelijken we de productie en de aanleg van bentonietmatten met de aanleg van een kleilaag dan scoort de bentonietmat op duurzaamheids- en milieuaspecten (CED (Cumulative Energy Demand) en CO₂ uitstoot) al snel (met name afhankelijk van de transportafstand van klei) veel beter.

Een Duitse LCA studie heeft aangetoond dat met transportafstanden van klei van 35 km en van de GCL van 580 km een CED en CO₂ reductie van resp. 40% en 50% gehaald wordt (bron: ref 20). Dit is slechts een voorbeeld omdat een LCA altijd project specifiek is. In het algemeen scoort verlading, transport en installatie van GCL's vele malen beter dan toepassing van grote hoeveelheden grond. In één vrachtwagen kan circa 4.000 m² aan GCL worden getransporteerd, terwijl één vrachtwagen hooguit 25 m² kleiafdichting van 1,0 m dik beladen kan worden. Ondanks de initieel hoge CED van GCL's kunnen deze qua duurzaamheid toch beter scoren dan conventionele afdichtingen door de hoge CED van het transport van de klei. De grote volumes klei die moeten worden getransporteerd zijn hierin de bepalende factor.

2.2.4.4 Levenscyclus

Bij de afweging voor de toepassing van een materiaal zijn de kosten en de technische en uitvoeringsvoordelen lang niet meer alleen bepalend. Tegenwoordig worden ook duurzaamheidsaspecten meegewogen, waarbij de gehele levenscyclus van het materiaal wordt beschouwd. De milieubelasting door de productie, transport, plaatsing en verwijdering tot aan regeneratie of stort moet dan voor de verschillende technisch mogelijke materialen worden vergeleken en afgezet tegen de milieuwinst die de toepassing oplevert. Voor een GCL zijn het kunnen gebruiken van gebiedseigen grond en het daarmee het voorkomen van kleitransporten en ook uitvoeringsvoordelen de belangrijkste factoren.

Voor wat betreft de kosten moet niet alleen de aanschaf, transport en de realisatie beschouwd worden, maar ook de sloop na 100 jaar. Want als de theoretische levensduur ten einde is gekomen dan zal het GCL theoretisch ook niet meer voldoen. Het GCL moet daarna vervangen worden, eventueel in combinatie met verwijderen van het oude. Vanzelfsprekend zijn ook hier kosten mee gemoeid, die in een LCC berekening netto contant gemaakt kunnen worden.

2.2.5 Faalmechanismen

Voor de veel voorkomende rivierdijk in Nederland zijn de (belangrijkste) faalsporen met een relatie naar een GCL weergegeven in Tabel 1. In Tabel 3 op pagina 36 is de invloed van de GCL op dezelfde faalsporen in beeld gebracht. Een voorbeeld van een GCL in een waterkering is gegeven in Figuur 8.

Tabel 1: belastinggevallen van een veel voorkomende rivierdijk in Nederland.

Toepassing GCL	Faalspoor	Belastinggeval	Omschrijving belasting
in voorland	STPH	WBN	waterstroom onder het dijklichaam
op buitentalud	STBU	Val na hoogwater	na-ijlen hoge waterspanning in dijk kern
op buitentalud	GEBU	Golfklap, langs stroming	n.v.t. (belasting niet anders bij GCL)
op buitentalud	GABU	Verzadiging bekleding buitentalud	verzadiging bekleding buitentalud
op kruin (en binnentalud)	GEKB	Golfoverslag, overloop	n.v.t. (belasting niet anders bij GCL)
op binnentalud	GABI	WBN	verzadiging bekleding binnentalud
op binnentalud	STBI	WBN, verzadiging bij overslag	verzadiging dijklichaam bij overslag
op binnentalud	STMI	WBN, hoge waterspanning onder deklaag	wateroverdruk in de dijk kern

WBN = waterstand bij norm

2.2.5.1 Bijzonderheden voorland (STPH)

In het voorland kan de GCL worden toegepast als maatregel tegen het faalmechanisme piping en onderloopsheid, waarbij de kans op een pipe onder de GCL beoordeeld dient te worden. Het mechanisme is niet afwijkend ten opzichte van een conventionele waterkering. Er kan wel meer intredelengte aan het voorland worden toegekend (zie §5.2.1 pagina 49).

2.2.5.2 Bijzonderheden buitentalud (STBU, GEBU, GABU)

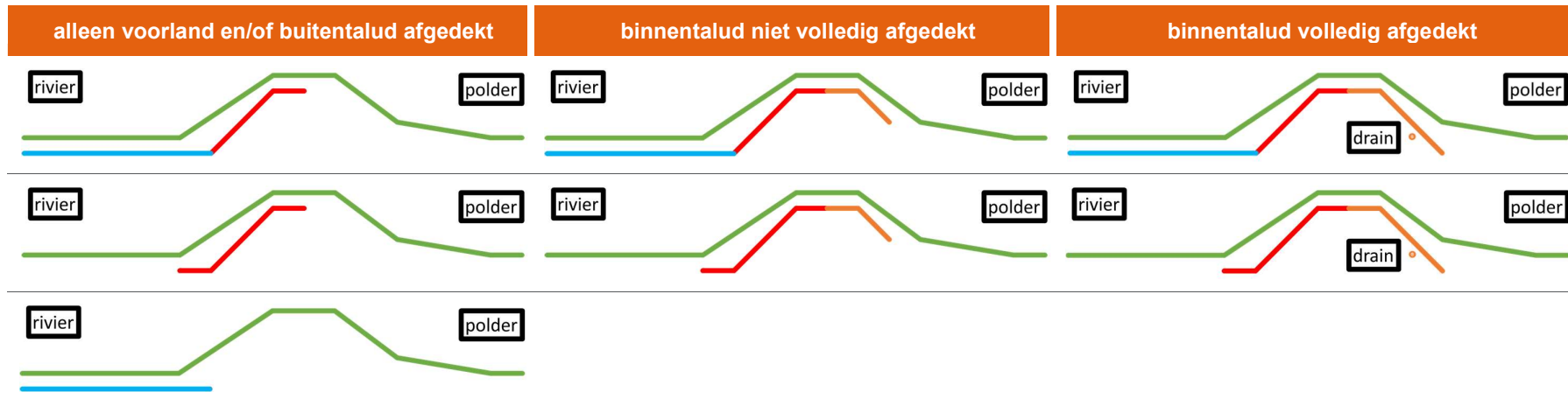
De GCL is toegepast als bekleding met weerstand tegen erosie en weerstand tegen indringen van water (waterdichtheidsfunctie), maar heeft ook reststerkte bij erosie van de afdeklaag. Naast de standaard mechanismen dienen de volgende bijzondere mechanismen beoordeeld te worden:

- Sterkte grasmat op afdeklaag van gebiedseigen grond (GEBU), ook in bruikbaarheidsgrenstoestand;
- afschuiven afdekgrond over GCL (deels in GABU spoor WBI);
- Reststerkte GCL bij erosie afdekgrond (niet in WBI2017);
- Opdrukken afdekgrond en GCL (GABU en deels in macrostabiliteit buitenwaarts STBU).

2.2.5.3 Bijzonderheden kruin en binnentalud (GEKB, GABI, STBI, STMI)

De GCL is in eerste instantie toegepast als bekleding met weerstand tegen indringen van water, maar heeft ook reststerkte bij erosie van de afdeklaag. Naast de standaard mechanismen dienen de volgende bijzondere mechanismen beoordeeld te worden:

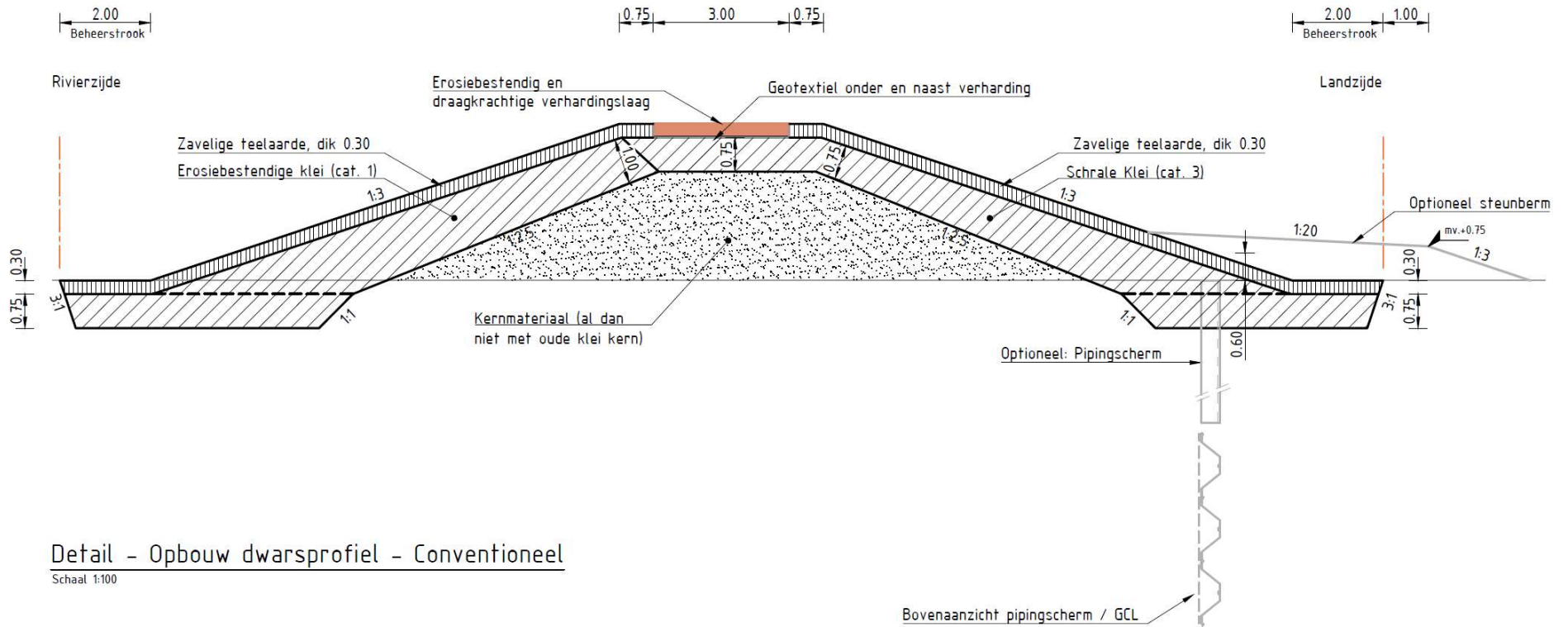
- Sterkte grasmat op afdeklaag van gebiedseigen grond (GEKB), ook in bruikbaarheidsgrenstoestand;
- Reststerkte GCL bij erosie afdekgrond (niet in WBI2017);
- Opdrukken afdekgrond en GCL = microstabiliteit (GABI/STMI);
- Macrostabiliteit binnentalud met specifieke freatische lijn (STBI).



Figuur 6: mogelijke posities waar een GCL kan worden toegepast.
(blauw = voorland, rood = buiten talud, oranje = binnen talud)

2.3 Vormgeving

Tekening met een conventionele waterkering met grondverbetering van klei in het voorland en kleibekleding met een grasmat op de taluds.



Figuur 7: voorbeeld conventioneel ontwerp.

Het voorbeeld van het principe ontwerp met GCL's kan vragen oproepen en de meeste van deze vragen kunnen beantwoord worden met deze handreiking. Op voorhand worden de meest in het oog springende aspecten toegelicht.

2.3.1 Grasmatt

De grasmatt biedt samen met de afdekgrond weerstand tegen hydraulische belastingen. Op een toplaag van gebiedseigen grond zou een minder goede grasmatt kunnen groeien dan op een conventionele dijkbekleding en ook de gebiedseigen afdekgrond zou minder erosiebestendig kunnen zijn dan "vette klei". Maar in combinatie met de GCL kan er een afdoende bescherming van de dijk kern tegen erosie worden verkregen.

2.3.2 GCL

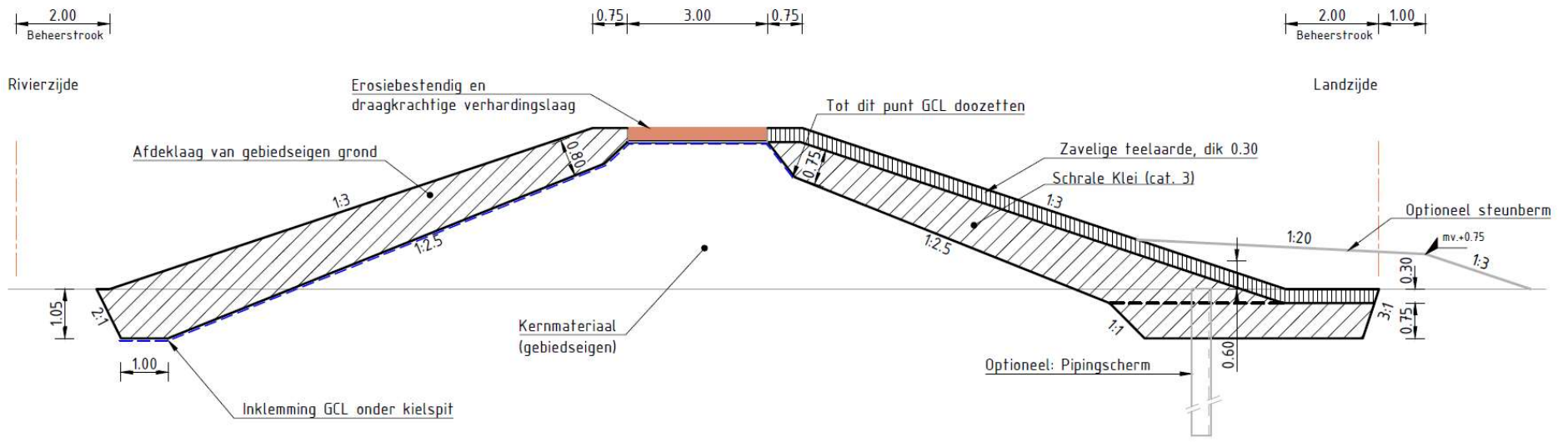
Een GCL op de waterkering zorgt, door de zeer lage waterdoorlatendheid, voor een vertraagde en geringere stijging van de freatische lijn in de dijk kern. Een GCL op het buitentalud hindert infiltratie van buitenwater en een GCL op de kruin en het binnentalud hindert infiltratie door overslag (en ook neerslag). Desondanks kan de freatische lijn zodanig stijgen, bijvoorbeeld bij een doorlatende ondergrond waardoor grondwater onder de GCL door kan worden aangevoerd. In een dergelijk geval zou er wateroverdruk onder de GCL en afdeklaag op het binnentalud kunnen ontstaan. In principe is dit niet anders dan bij een conventionele waterkering omdat de totale laagdikte en daarmee het gewicht van de bekleding nagenoeg hetzelfde is. De oplossing hiervoor is het toepassen van een uitgekiende wigvormige afdeklaag.

Over het algemeen heeft de GCL een lagere doorlatendheid dan een (gestructureerde) kleilaag. Ook zou de dikte en daarmee het gewicht van de toplaag gedurende de hoogwaterperiode kunnen afnemen, door erosie als gevolg van te grote overslaggebieden voor de minder erosiebestendige gebiedseigen grond. Om die reden is een drainagevoorziening (bijvoorbeeld een buis, grindkoffer of geocomposiet) aan de binnentoezijde opgenomen in het principe ontwerp. Dit is echter niet verplicht. Het afstemmen van het toelaatbare overslaggebied op de (erosiebestendige) eigenschappen van de toplaag of juist hier een overdikte (overgewicht) aanbrengen zijn ook opties. Ook is het mogelijk om het onderste deel van het binnentalud niet te voorzien van een GCL en hier juist een filter aan te brengen, zodat water vrij kan uitstromen bij de binnentoezijde (kwellen).

2.3.3 Kruinverharding

Op de kruin is een erosiebestendige en voldoende draagkrachtige verhardingslaag nodig, zodat bij onverhoopte erosie van de afdekgrond op het buitentalud het kruinniveau op gewenste hoogte blijft. Zodoende kan de GCL onder HBN worden aangelegd en wordt in feite voorkomen dat de kruin een overhoogte moet krijgen. In de dijkversterking van Beesel, waar in 2022 een GL op de dijk is toegepast, is een verhardingslaag van in situ grondstabilisatie aangebracht (met GeoCrete). Deze is ter plekke op de kruin gemengd met de aanwezige grond wat qua duurzaamheid, kosten en werktempo de voorkeur heeft ten opzichte van mengen op een locatie naast de dijk. Voor deze uitvoeringswijze geldt wel een waarschuwing:

Waarschuwing: indien de verhardingslaag op de kruin wordt gemengd, bestaat de kans op beschadiging van de GCL. Indien er voor gekozen wordt een dunne grondlaag (circa 0,15 m) als marge aan te houden tussen mengdiepte en GCL, dient het GCL boven de ontwerpwaterstand te liggen teneinde onderloopbaarheid van de kruinverharding te voorkomen. In de hoogte moeten uitvoeringstoleranties, het verschil tussen signaleringswaterstand en ontwerpwaterstand alsmede zetting en klink zijn verdisconteerd.



Detail - Opbouw dwarsprofiel - GCL op buiten talud

Figuur 8: voorbeeld innovatief ontwerp als bekleding.

De GCL op het buitentalud moet een "ondoorlatende" overgang maken met de klei in het voorland en kan derhalve ook hierin verticaal worden ingegraven (Duitse methode). Een GCL in het voorland, zoals bij de dijkversterking in Neer is toegepast, moet een "ondoorlatende" overgang maken met de klei van het buitentalud en moet derhalve doorlopen tot onder deze kleilaag. Bij een combinatie-toepassing van voorland en buitentalud moet hier een ruime overlap van 1 m aanwezig zijn (bij voorkeur voorland GCL over buitentalud GCL). Zie ook paragraaf 5.4.2.

2.4 Status Duitse norm BRAD16

De status van de BRAD16 is informatief voor de Nederlandse adviespraktijk op het gebied van waterveiligheid. De onderhavige handreiking neemt de functie van BRAD16 in Nederland over, voor wat betreft eisen aan leveranties, ontwerp en kwaliteitsborging.

Door het Landesamt für Umwelt (Ministerie voor Landelijke Ontwikkeling, Milieu en Landbouw) van de Duitse deelstaat Brandenburg is een richtlijn uitgegeven voor het gebruik van GCL's. De zogenaamde BRAD16 richtlijn [ref 8] geldt voor dijkversterkingsmaatregelen (nieuwbouw en sanering) in de deelstaat Brandenburg voor alle fases van de dijkverbetering. Dus zowel planning, aanbesteding en gunning als ook bouw en kwaliteitsborging is de BRAD16 verplicht. Volgens deze richtlijn is de afdichting van waterkeringen met GCL's in het bijzonder doelmatig bij doorlatende en erosiegevoelige gronden of bij afwezigheid van voldoende gebiedseigen klei.

Volgens de Brandenburgse richtlijn volgt het voordeel van GCL's bij toepassing in dijkversterkingen uit de minimalisering van grondtransport en grondvervanging, evenals de controleerbare kwaliteit van de afdichting.

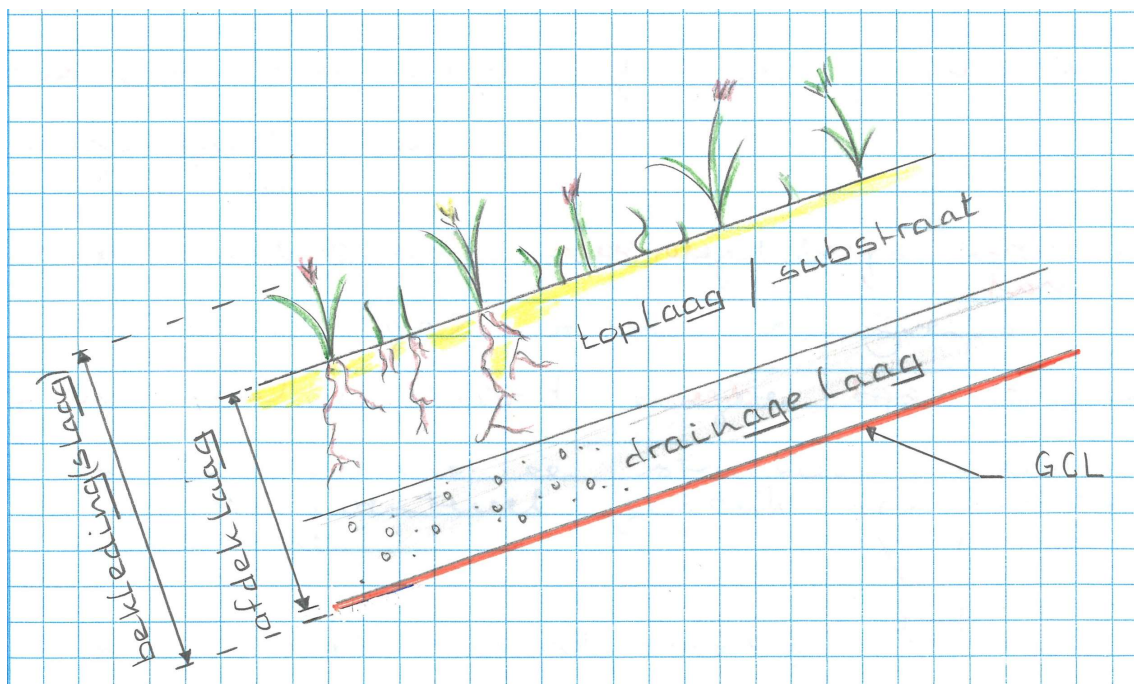
De opdrachtnemer dient de geschiktheid van de toe te passen GCL aan te tonen volgens de BRAD16. Voor de start van de uitvoering moet zowel aan de hand van productbladen van het productiebedrijf als ook aan de hand van testrapporten van geaccrediteerde materiaalonderzoeksinstituten de geschiktheid worden aangetoond.

De vertaling van de specificaties, volgens bijlage A van de BRAD16 richtlijn, zijn in §3.1 (pagina 31) aangegeven.

2.5 Definities bekledingslaag

In deze handreiking worden onderstaande begrippen met bijbehorende definities gehanteerd (zie Figuur 9):

- Bekleding(slaag) = gehele constructie van grasmat, afdeklaag en GCL;
- Afdeklaag = zandige, zwak tot matig humeuze en klei houdende grond (gebiedseigen grond met homogene samenstelling) of een combinatie van gebiedseigen topklaag op een drainagelaag;
- Topklaag = de laag van substraat op de drainagelaag;
- Substraat = gebiedseigen zandige, zwak tot matig humeuze en klei houdende zandige grond qua biologische en bodemkundige samenstelling geschikt (gemaakt) voor ontwikkeling van de grasmat;
- Drainagelaag = goed doorlatende laag (bijvoorbeeld van uiterst grof zand, met $M63 > 420 \mu\text{m}$) tussen de GCL en het substraat in.



Figuur 9: definitieschets van de bekledingslaag met drainagelaag.

3 BENODIGDE GEGEVENS

De gegevensbehoefte voor een ontwerp met GCL's is niet wezenlijk anders dan voor een conventioneel dijkontwerp. In beide gevallen zullen tenminste analyses van hoogte, piping, macrostabiliteit en bekleding moeten worden gemaakt. De daarvoor benodigde basisgegevens zoals: grondonderzoek en dwarsprofielen worden in deze handreiking niet behandeld. Qua ontwerpberekeningen en analyses wordt alleen ingegaan op zaken die specifiek voor de GCL toepassingen nodig zijn of op zaken die afwijkend zijn van het OI2014 en WBI2017.

3.1 Specificaties GCL

De volgende eigenschappen dienen minimaal aantoonbaar te zijn met een certificaat van de leverancier en daaraan ten grondslag liggend onderzoek om toepassing van de GCL in een Nederlandse waterkering toe te kunnen staan:

- Bentonietgehalte en Montmorillonietgehalte;
- Doorlatendheid;
- Soort (weefsel of vlies) bovenlaag en onderlaag geotextiel;
- Doorpanssterkte;
- Treksterkte;
- Afpelsterkte;
- Weerstand tegen verschuiven van boven en onderlaag (korte en lange termijn);
- Weerstand tegen uitspoeling van bentoniet;
- Levensduur.

De minimumspecificaties zijn opgenomen in Bijlage D en in de navolgende paragrafen wordt enige context gegeven.

3.1.1 Hydraulische weerstand en zwelvermogen

3.1.1.1 Referentie situatie

Een veelgebruikte laagdikte van afdekklei in waterkeringen is 1,0 m voor zowel voorlanden als afdekragen op de waterkering, met meer dan 20% lutum en minder dan 35% zand. Deze kleilaag wordt normaliter afgedekt met een laag zwak humeuze zavelige teelaarde (>10% lutum) van enkele decimeters, afhankelijk van het grondgebruik. Een in de praktijk veel gehanteerde waarde voor de hydraulische weerstand (C) van deze meter klei bedraagt $C = 10$ dagen. En voor een natuurlijk afgezette klei in vochtige toestand (met dichtgezwollen scheuren) is dit een reële waarde. Een licht uitgedroogde klei op de waterkering met enkele scheuren heeft een weerstand van 0,5 tot 2 dagen volgens CUR2003-7 [ref 10]. Een sterk gestructureerde klei heeft een weerstand die nog één of twee ordes kleiner is (factor 10 à 100). De waarden in het rapport "Vier quick wins grond en klei" [ref 17] komen overeen met CUR2003-7.

3.1.1.2 Doorlatendheid bentoniet

Bentoniet heeft een groot vermogen tot zwellen bij contact met (grond)water. Opgesloten tussen de geotextielen, geeft het de GCL daarom een zeer lage waterdoorlatendheid. Het bentonietpoeder zal steeds weer snel opzwellen met slechts ± 1 liter/m² vocht na uitdroging (ofwel 1 mm neerslag). Hoe meer bentonietpoeder per vierkante meter in de GCL is aangebracht, hoe groter de hydraulische weerstand (C) zal zijn. In Duitsland is 4.500 g/m² bentoniet een gebruikelijke waarde, waarvan de hydraulische weerstand proefondervindelijk is vastgesteld op $C = 4 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ onder laboratoriumomstandigheden (omgerekend circa 2.900 dagen).

In zoet water kunnen k -waarden gehaald worden van 10^{-10} m/s of nog lager. In zout of brak water kan de k -waarde een factor 100 groter zijn. Ook onder invloed van chemische vervuiling kan de k -waarde afnemen. Desondanks is de weerstand van een circa 1 cm dikke GCL dusdanig veel groter dan die van licht uitgedroogde bekledingsklei dat, bij toepassing van de minimale hoeveelheid bentonietpoeder er ruim (verschilfactor=100), wordt voldaan aan de eisen ten aanzien van de doorlatendheid vanuit waterveiligheid (mits continu en correct aangebracht/aanwezig).

Metingen bij aangebrachte natuurlijke kleilagen geven een zeer grote spreiding van de behaalde doorlatendheid na het aanbrengen en verdichten van de kleilaag. Bij toepassing van GCL's is deze spreiding in de doorlatendheid vele malen kleiner, waardoor de vereiste waterdichtheid in grotere mate kan worden geborgd.

Moderne granulaire bentoniet GCL's hebben dezelfde kwaliteit als poeder GCL's. Dit is bevestigd door de ongedifferentieerde specificatie in de Brad-16 en de veel strengere LAGA (Landfill Applications) waarin zowel granulaire als poeder bentoniet GCL's goedgekeurd zijn.

3.1.1.3 Degradatie

Alle soorten bentoniet ondergaan kationenuitwisseling, dat wil zeggen natriumbentoniet verandert in calciumbentoniet en daardoor zal het zwelvermogen in de tijd afnemen. Om die reden wordt in de BRAD16 aanbevolen om minimaal 1,0 m gronddekking op de GCL aan te brengen (zie §5.3.11). Hoe hoger de bovenbelasting, hoe kleiner de scheuren zullen zijn omdat ze tot een bepaald stadium onderdrukt worden. En hoe gemakkelijker de scheuren kunnen worden gedicht omdat de belasting de verminderde zweldruk ondersteunt.

De Universiteit Gent onderzoekt de toevoeging van polymeren aan bentoniet om de hydraulische weerstand in zoet water, brak water (bron: ref 13) of onder vochtigheidsveranderingen te verbeteren (bron: ref 14). Op basis van het onderzoek kan 12 jaar vooruit worden gekeken, maar het is nog te vroeg om conclusies te trekken over het gedrag op de lange termijn. Het gebruik van deze zogenaamde Hyper Clay (bentoniet met polymeren) wordt daarom voorlopig afgeraden.

Ook hier kan een vergelijking met de referentie situatie (een kleilaag) gemaakt worden. Na uitdroging (rijping en structuurvorming) hervindt klei nooit meer volledig en slechts langzaam de oorspronkelijke eigenschappen in termen van doorlatendheid. Voor een GCL is degradatie in beperkte mate derhalve ook te accepteren.

3.1.1.4 Zelfhelend vermogen

Een GCL heeft door de zwelcapaciteit van de bentoniet ook in zekere mate een zelfherstellend vermogen bij kleine beschadigingen in de orde grootte van centimeters (bijvoorbeeld bij penetratie met een sondeerconus). Dit vermogen is groter naarmate de omgeving vochtiger is en de verticale spanning hoger is.

3.1.2 Sterkte-eigenschappen

In Duitsland is in een golfgoot de stabiliteit onderzocht van een met zand verzwaarde bentonietmat met golfloop condities (zie Figuur 21), in het Grosse Welle Kanal in Hamburg. Het totaal gewicht van deze geocomposit is hiermee 14 kg/m² in plaats van 6 kg/m². Door het extra gewicht is de mat meer stabiel bij (hydraulische) belasting en kan tevens onder water worden geïnstalleerd. Deze verzwaarde mat kan nog steeds worden gezien als relatief dun (orde grootte centimeter) en is dus uitwisselbaar met een normale onverzwaarde mat van ongeveer een halve centimeter dik.

Daarnaast heeft de universiteit van Hannover een grootschalig onderzoek uitgevoerd naar de stabiliteit van een GCL onder golfbelasting. Het ging hierbij eveneens om een bepaald verzwaard type GCL (Naue BZ 13-B) op een relatief flauw 1:10 talud zonder GCL-overlappen (bron: ref 25).

Sterkte

In verband met onder andere belastingen tijdens de uitvoering en levensduur gelden er minimale sterkte eisen. Er is echter voor gekozen om de sterkte van het geotextiel niet als zodanig mee te nemen in berekeningen van macrostabiliteit maar wel in de bekledingssporen (zie §4.1 op pagina 35).

Weerstand tegen verschuiven

Door de needle-punch of stitch-bonding samenstellingstechniek en het additioneel thermisch vastzetten is de afpelsterkte van de GCL's hoog en niet maatgevend ten opzichte van de wandwrijving. Met andere woorden de boven- en onderlaag kunnen niet ten opzichte van elkaar verschuiven / zijn niet makkelijk van elkaar te scheiden.

Zwilvermogen

De zweleigenschappen van het bentonietpoeder maken dat een gat in de GCL met een doorsnede van 2 cm binnen 24 uur volledig is dichtgezwollen.

3.1.3 Relatie locatie, faalmechanismen en specificaties

Tabel 2 dient als volgt te worden gelezen:

- Bepaal de beoogde toepassing en locatie van de GCL (bijvoorbeeld binnentalud);
- Stel de relevante bezwijkmechanismen vast (GEKB bij binnentalud);
- Lees de mogelijke gebeurtenissen (bijvoorbeeld O3, U10 en B1 voor substraat op binnentalud) en specificaties af (bijvoorbeeld 11 = geotechnische stabiliteit van binnentalud bekleding).

Voor de gebeurtenissen wordt verwezen naar Tabel 8 en voor de specificaties naar Tabel 19 in Bijlage D.

Tabel 2: overzicht locatie, faalmechanismen en specificaties.

locatie GCL	mechanisme	# gebeurtenis	specificatie
voorland	STPH	n.v.t. (niet wezenlijk anders dan bij het ingraven van een laag klei en daarom zijn er geen gebeurtenissen gedefinieerd), omgang met extra voorland is in §5.2.1 (pagina 49) toegelicht	hoeveelheid bentonietpoeder (1), doorlatendheid (2)
buitentalud	STBU	O13 + U9 + B6 (woeldieren), O15 en O16 (instabiliteit)	doorlatendheid (2), geotechnische stabiliteit (11)
	GEBU	O3 + U10 + B1 (substraat), O5 + U3 (overlap), B10 (schade)	geotechnische stabiliteit (11), erosiebestendigheid (12)
	GABU	O6 (drainagelaag), O7 + U4 (stabiliteit bekleding/wigvorm), O8 (wandwrijving)	minimale sterkte (5+6+7), geotechnische stabiliteit (11)
kruin en binnentalud	GEKB	O3 + U10 + B1 (substraat), O5 + U3 (overlap), O9 + U5 (hoogte), O11 + U2 + U7 (inklemming)	doorlatendheid (2), minimale sterkte (5+6+7), geotechnische stabiliteit (11)
binnentalud	STBI	O9 + U5 (hoogte), O13 + U9 + B6 (woeldieren), O15 en O16 (instabiliteit)	doorlatendheid (2), geotechnische stabiliteit (11)
	STMI	O1 + U11 + U12 + B9, O14 (drainage), B8 (schade)	geotechnische stabiliteit (11)
	GABI	O6 (drainagelaag), O7 + U4 (stabiliteit bekleding/wigvorm), O8 (wandwrijving)	minimale sterkte (5+6+7), geotechnische stabiliteit (11)
buitentalud en binnentalud	ongemerkt falen	O2 + U1 (vlakheid), O4 + U8 (sterkte), O10 + U6 + B3 (afdeklaag), O11 + U2 + U7 (inklemming), O12, U13, B2, B4 (vervorming), B5, B7 (schade)	boven en onderlaag (3), sterkte (4+8+9), levensduur (13+14)

Ongemerkt falen omvat de situatie waarbij bijvoorbeeld door een niet opgemerkte externe oorzaak of onvoorzien degradatie proces een defect aan de GCL is opgetreden.

3.2 Ondergrond en grondwater

Toepassing in voorland

De samenstelling van de ondergrond tot de aanlegdiepte dient bekend te zijn wanneer de GCL in het voorland wordt aangebracht. Vaak is dit de eerste circa 1,5 meter vanaf maaiveld. Daarbij is het van belang om niet alleen naar fysische grondeigenschappen te kijken (is het zand, klei of veen), maar ook naar de (bio)chemische eigenschappen in relatie tot het grondgebruik (bijvoorbeeld dikte bouwvoor landbouwgrond).

De grondwaterstand onder dagelijkse omstandigheden dient bekend te zijn om de noodzaak van het toepassen van een bemaling tijdens de aanleg te kunnen vaststellen of een keuze voor een afzinkbare mat te maken.

Toepassing op een waterkering

De samenstelling van de dijk kern dient bekend te zijn om de stabiliteit van de bekledingslaag (GCL met bovengrond) te kunnen berekenen.

De grondwaterstand onder dagelijkse omstandigheden dient bekend te zijn om een afweging te kunnen maken van de invloed van de GCL op de ligging van het freatisch vlak. Indien de ligging van het freatisch vlak normaliter hoog is, kan er uitdroging ontstaan hetgeen relevant is bij verdrogingsgevoelig kernmateriaal.

3.3 Zetting, optredende overloop of overslag

Voor elke waterkering is het relevant om de te verwachten zetting, klink of kruip te kennen, zodat de waterveiligheid geborgd kan worden. Voor een waterkering met GCL is dat niet anders, maar er is wel extra aandacht nodig voor de weerstand tegen overloop en overslag, vanwege:

- De trekspanningen in het geotextiel die door zetting veroorzaakt worden;
- De bijzondere functie van de verhardingslaag op de kruin voor het inklemmen van de GCL;
- De mogelijk lagere erosiebestendigheid van de grasmast op een substraat van gebiedseigen grond.

3.4 Piping

De functie van een GCL in het voorland is, net als van een laag klei, het verhinderen van infiltratie en verlengen van de kwelweg. Een belangrijk gegeven bij het beoordelen van infiltratie en kwelweg is de intreedeweerstand die toegekend kan worden aan het voorland. De intreedeweerstand kan berekend worden uit de doorlatendheid; een standaard specificatie (zie §3.1).

3.5 Erosiebestendigheid bekleding

De samenstelling van de afdeklaag (zie §5.3.1) op de taluds dient nauwkeurig bekend te zijn vanwege de eisen die daaraan gesteld worden in de beheerfase, maar ook vanwege de veiligheidsbeoordeling.

De erosiesnelheid van bentoniet uit de GCL is één van de standaard specificaties (zie §3.1) die bekend moet zijn. Dit is slechts van belang indien de GCL door een geërodeerde toplaag bloot komt te liggen of beschadigd is door een externe oorzaak. Het uitspoelen van bentoniet kan de doorlatendheid van de GCL vergroten maar heeft geen effect op de erosiebestendigheid van de GCL zelf.

De erosiebestendigheid van een GCL, die door bepaalde omstandigheden bloot is komen te liggen, vormt in de meeste gevallen een acceptabel restrisico (zie §5.3.4).

3.6 (macro)Stabiliteit

Als de sterkte-eigenschappen van de GCL voldoen aan de standaard specificaties (zie §3.1), kan de (macro)stabiliteit van GCL en grondlagen bepaald worden zonder extra eisen aan (en dus gegevens van) de GCL. De GCL functioneert niet als een trekelement of een grondwapening, tenzij er een combinatie van verschillende geotextielen is toegepast (bijvoorbeeld een non-woven in combinatie met een geogrid of rekstijf weefsel).

De GCL is echter wel een slecht doorlatende laag met invloed op de freatisch lijn in de kern van de waterkering. Derhalve is de eis voor (en zijn de gegevens van) de doorlatendheid wel relevant (standaard specificaties in §3.1).

4 FAALMECHANISMEN

Om duidelijkheid te krijgen wat specifiek is aan een waterkering met een GCL is een analyse gemaakt van de afwijkende faalmechanismen. Dit zijn:

- Erosie van de grasmat op de zandige gebiedseigen grond (afwijkend van WBI2017);
- Afschuiven van de bekledingslaag over een GCL (afwijkend van WBI2017);
- Afschuiven van de bekledingslaag inclusief de GCL (afwijkende belasting en als gevolg daarvan kans op opdrukken van de bekleding);
- Ongemerkt falen van de GCL (nieuw ten opzichte van WBI2017), waarbij door een niet opgemerkte externe oorzaak (bijvoorbeeld grondonderzoek of aanleg nutsvoorziening of onvoorzien degradatie proces een defect aan de GCL is opgetreden).

Ter ondersteuning van de analyse van de faalmechanismen is een gebeurtenissenboom opgesteld en ten behoeve van het ontwerp, uitvoering en het beheer een tabel met beheersmaatregelen. Uitgangspunt bij de faalpaden in de gebeurtenissenboom, is dat gebiedseigen zandig materiaal wordt toegepast als afdekking en ook zandig kernmateriaal aanwezig is.

Bij de nadere uitwerking van de gebeurtenissen naar voorschriften en rekenmethoden wordt zoveel mogelijk aangesloten bij het WBI2017. Alleen de faalmechanismen die nieuw zijn ten opzichte van het WBI2017 of anders zijn door de aanwezigheid van de GCL zijn uitgewerkt in deze handreiking. Indien het WBI2017 gevolgd kan worden, wordt volstaan met een korte verwijzing.

4.1 Veiligheidsfilosofie

Voor het bepalen van de invloed die een GCL heeft op de veiligheid van de waterkering zijn er verschillende mogelijkheden. Bijvoorbeeld via faalkansbijdrage of via schematisering. Een uitgebreide beschrijving hierover is gegeven in hoofdstuk 2 van de POVM publicatie grondverbeteringen [ref 16].

Het bepalen van de faalkansbijdrage kan met een foutenboom, maar hiervoor is niet gekozen. In het geval van deze foutenboom dient men voor veel menselijke handelingen een faalkans in te schatten. Dit zou leiden tot veel arbitraire of “expert judgement” waarden, waarmee de uiteindelijk berekende faalkans twijfelachtig is.

4.1.1 Schematisering

Falen van de GCL is een “indirect faalmechanisme”, want falen leidt niet direct tot falen van de waterkering, maar is onderdeel van een ander faalmechanisme, bijvoorbeeld GABU of GEKB. Deze definitie leidt echter niet tot een praktische ontwerpmethode. Daarom is het volgende onderscheid gemaakt om een keus te kunnen maken tussen “schematiseren en beschouwen als “indirect mechanisme”:

1. Bij de stabiliteitssporen (STBU, STBI en STMI) verandert alleen de omstandigheid (belasting) door toepassing van een GCL wezenlijk;
2. In de bekledingssporen (GEBU, GABU, GEKB en GABI) verandert de sterkte van de waterkering door toepassing van een GCL.

Ad 1 veranderende omstandigheid

De veranderde belasting, door aanwezigheid van de GCL, kan eenvoudig worden geschematiseerd, in reeds bekende mechanismen en bestaande programmatuur. Dit heeft praktische voordelen voor ontwerpers en beoordelaars. De GCL wordt daarom in de stabiliteitssporen mee-geschematiseerd in de bekledingslaag. Het eventueel niet functioneren van de GCL wordt afgedekt in de schematiseringsfactor. Voor een waterkering met een GCL op één of twee taluds wordt de eventuele additionele treksterkte van aanwezige GCL's verwaarloosd bij de beschouwing van macrostabiliteit.

Redenen hiervoor zijn:

- Niet meenemen van treksterkte bij macrostabiliteit is conservatief en dus veilig vanuit hoogwaterveiligheid bezien;
- De ligging evenwijdig aan het talud/maaiveld waardoor potentiële glijvlakken niet doorsneden worden;
- De relatief lage rekstijfheid.

Ad 2 indirect mechanisme

Voor de afwijkende sterkte geldt dat dit niet alleen opgelost kan worden met schematisatie, want een GCL kent ook nieuwe deelmechanismen, zoals het falen van de inklemming of de onderlinge aansluiting tussen de matten (overlap). Tevens zijn er anders te beoordelen mechanismen, zoals sterkte van een blootliggend GCL na erosie van de afdeklaag. Het falen van de GCL wordt daarom in de bekledingssporen als indirect mechanisme beschouwd. Daarbij mag wel de treksterkte van aanwezige GCL's worden meegenomen.

De gebeurtenissenboom (in Bijlage A of Bijlage B) kan gebruikt worden om de aandachtspunten per faalmechanisme aan te geven wanneer een waterkering met GCL wordt ontworpen. De boom dient dan ook te worden gezien als "gebeurtenissenboom" (event-tree) en niet als foutenboom (fault-tree).

4.1.2 Belastingen

In Tabel 3 zijn de belastingen die uniek zijn voor waterkeringen met GCL toepassingen weergegeven. Voor waterkeringen met een GCL in het voorland als kwelwegverlenging tegen piping is het belastinggeval niet anders dan voor een conventionele waterkering. Voor waterkeringen met een GCL op het talud is de belasting en sterkte juist wel anders, want een goed functionerend GCL zal infiltratie voorkomen en een andere weerstand tegen erosie hebben dan een "vette kleilaag".

Tabel 3: mogelijke unieke belastinggevallen van een waterkering met GCL bekleding.

Faalspoor	Belastinggeval	Omschrijving belastingen
STPH	WBN	n.v.t. (belastinggeval is gelijk aan conventionele waterkering), omgang met extra voorland is in §5.2.1 (pagina 49) toegelicht
STBU	Val na hoogwater	Hogere waterspanning in dijk kern door aanwezigheid GCL op buitentalud (accumulatie van bovenaf infiltrerend water of via buitentalud sneller er in dan er uit), met simultaan opdrukken bekleding
GEBU	Golfklap, langs stroming	Golf- en stromingsaanval direct op GCL na bezwijken van grasmat en erosie van afdeklaag buitentalud
GABU	Verzadiging bekleding buitentalud	Extra verzadiging door niet functioneren drainagelaag op buitentalud
GEKB	Golfoverslag, overloop	Golf- en stromingsaanval op de aansluiting (GCL en verharding) bij de buitenkruin + stromingsaanval direct op GCL na bezwijken van grasmat en erosie van afdeklaag binnentalud
GABI	Verzadiging bekleding binnentalud	Extra verzadiging door niet functioneren drainagelaag op binnentalud
STBI	WBN	Hogere waterspanning in dijk kern door schade aan GCL buitentalud of ontbreken drainage in binnenteen, met simultaan opdrukken bekleding
STBI	Verzadiging bij overslag	Hogere waterspanning in dijk kern door schade aan GCL op kruin of binnentalud
STMI	WBN, hoge waterspanning onder deklaag	Hogere waterspanning binnenteen door schade aan GCL buitentalud of ontbreken drainage in binnenteen

WBN = waterstand bij norm

De werking van de drainage bij de binnentoevoer wordt geacht niet van invloed te zijn op het belastinggeval STBU, omdat deze alleen in combinatie met een GCL op het binnentalud wordt toegepast. In de situatie met GCL op binnentalud is er normaliter geen infiltratie van bovenaf.

4.1.3 Veiligheidseisen

De macrostabiliteit van primaire waterkeringen in Nederland wordt berekend met het critical state soilmechanics model (CSSM), terwijl veel normen, voor toepassing van geotextielen in de wegenbouw en/of het buitenland, uitgaan van het Mohr-Coulomb model. Ook is er een verschil in wijze waarop de betrouwbaarheid wordt uitgedrukt voor waterkeringen (per jaar) en voor andere infra projecten (per levensduur). Het is belangrijk om dit altijd in ogenschouw te nemen als er berekeningen worden toegeleverd door een leverancier van GCL's.

4.1.3.1 Piping (STPH)

Voor een waterkering met een GCL in het voorland verandert de berekeningsmethode en veiligheidseis voor piping niet. Derhalve is geen gebeurtenissenboom opgesteld voor het faalmechanisme piping en is alleen een specificatie van toe te passen GCL gegeven in §5.2 (op pagina 49).

De veiligheidsfactor voor piping uit het WBI2017 dient te worden toegepast in combinatie met de analytische rekenregel van Sellmeijer en in beginsel met een maximale kwelweg van tweemaal de dijkbasis. In §5.2.1 op pagina 49 is op hoofdlijnen aangegeven onder welke voorwaarde een grotere breedte mag worden meegenomen.

4.1.3.2 Stabiliteit bekleding (GABU, GABI, STMI)

De bekledingslagen op de taluds (grasmat, afdeklaag en GCL samen) zullen door andere belastingcombinaties en op een andere wijze deformeren dan een "flinke laag vette klei". Er is namelijk een veel grotere kans op preferente glijvlakken, op het grensvlak dat de GCL vormt, waardoor een Toets op Maat (ToM) nodig is. Daarom is een keus gemaakt voor het toe te passen model en bijbehorend grondgedrag en zijn veiligheidsfactoren bepaald. Er is onderscheid gemaakt in stabiliteit van a) de afdeklaag op de GCL en b) de stabiliteit van de gehele bekledingslaag inclusief bovenste deel van de dijk kern.

Stabiliteit van de afdeklaag op de GCL

Vanwege het mogelijk zandige karakter van de toegepaste gebiedseigen grond ligt gedraineerd grondgedrag voor de hand (dus hoge phi waarde). Als tussenoplossing kan, zolang niet duidelijk is hoe de sterkte van uitdrogende oppervlaktelagen bepaald moet worden, gekozen worden voor:

- Toepassen van het Mohr-Coulomb model (met rekenwaarden voor phi en cohesie). Het zandige karakter houdt ook in dat terughoudend moet worden omgegaan met toekennen van cohesie. Aanbevolen wordt een bandbreedte van 0,5 kPa tot 2 kPa aan te houden (voor kleiig zand respectievelijk zandige klei) als representatieve waarde voor de cohesie bij een representatieve waarde voor de phi van 27,5° respectievelijk 25°. Deze waarden zijn gebaseerd op ervaring in het oosten van Nederland;
- Partiële materiaalfactoren volgens Tabel 4:
 - de Eurocode (ofwel NEN9997), waarbij de betrouwbaarheid per jaar volgens de waterwet is omgerekend naar een betrouwbaarheid voor de levensduur, zodat een relevante CC klasse gekozen kan worden. Daarbij dient voor de levensduur een waarde van 10 jaar te worden aangehouden (mede omdat er nog geen lengte effect-factor is bepaald) en voor de faalruimte $\omega = 0,10$ (standaardwaarde voor bekledingen). Aangezien de Eurocode geen schadefactor en/of modelfactor kent, is de waarde daarvan per definitie 1,0;
 - de SH grasbekledingen (bron: ref 4) en Bijlage C;
- Voor de wandwrijvingshoek (δ) van GCL met afdeklaag moet de waarde conform het productblad van de leverancier worden aangehouden. In de praktijk blijkt dat dit voor de meeste geotextielen gelijk is aan: $\delta \approx 0,9 * \varphi$ (met φ = karakteristieke waarde hoek van inwendige wrijving van de afdeklaag);
- De cohesie dient vanwege het gladde oppervlak van de GCL gereduceerd te worden met een factor 1,5. Deze factor is een inschatting die gebaseerd is op ervaring.

Tabel 4: reductie- en partiële veiligheidsfactoren voor stabiliteit bekledingslaag (Mohr-Coulomb).

gehanteerde norm	Ervarings-reductiefactoren	schadefactor (γ_n)	modelfactor (γ_d)	materiaalfactor (γ_m)
NEN9997	$\delta \approx 0,9 * \varphi$ $c' \text{ effectief} = c' / 1,5$	$\gamma_n = 1,0$	$\gamma_d = 1,0$	$\gamma_{m;\phi} = 1,2 \text{ à } 1,3$ en $\gamma_{m;c'} = 1,3 \text{ à } 1,6$ afhankelijk van RC
SH grasbekleding (ref 4)		$\gamma_n = 1,1$	$\gamma_d = 1,1$	$\gamma_{m;\phi} = 1,1$ en $\gamma_{m;c'} = 1,25$

Stabiliteit van de gehele bekledingslaag

Vanwege de grote bijdrage van cohesie aan de stabiliteit van oppervlaktelagen, zal bij het consequent doorvoeren van CSSM (dus met phi waarde en cohesie = 0 kPa) een knelpunt ontstaan in het aantonen van de stabiliteit van de bekleding en eventueel de buitenste laag van de dijk kern, waar het glijvlak in de dijk kern insnijdt. Daarom wordt aanbevolen:

- Toepassen van CSSM voor de kern van de waterkering en de ondergrond conform WBI2017 in combinatie met een schuifsterkte (su) voor de bekledingslaag. Ook hier geldt dat vanwege het mogelijk zandige karakter terughoudend moet worden omgegaan met het toekennen van de sterkte. Aanbevolen wordt de waarden Tabel 4 aan te houden, die zijn gebaseerd op expert judgement.
- Bij vooral “vette klei” rekening te houden met scheurvorming en daarmee samenhangende reductie van de schuifsterkte met circa 50% afhankelijk van de scheurgrootte.
- Een schadefactor voor macrostabiliteit en modelfactor voor het glijvlakmodel conform het WBI2017;
- Voor de stabiliteit van oppervlaktelagen, die met kwaliteitsborging worden aangebracht, hoeft geen schematiseringsfactor te worden afgeleid, zoals voor macrostabiliteit wel nodig is bij een bepaalde onzekerheid in wisselingen in bodemopbouw.

De aan te houden schuifsterkte (su) van bekledingslagen is weergegeven in Tabel 5. Deze waarden zijn gebaseerd op expert judgement.

Tabel 5: aanbevolen rekenwaarde van de (schuif)sterkte voor ongescheurde bekledingslagen van gebiedseigen grond.

grondsoort	“vette klei” ($\pm 30\%$ lutum)	lichte zavel ($>10\%$ lutum)	lemig zand ($> 25\%$ silt)	humeus fijn zand (5% +/- 3% o.s.)	humusarm fijn zand (1,5% +/- 0,5% o.s.)
su (kPa)	15	12,5	7,5	rekenen met φ_{cs} en $c' \text{ schijnbaar} = 1 \text{ kPa}$	rekenen met φ_{cs} en $c' \text{ schijnbaar} = 1 \text{ kPa}$

Waarin:

- su = ongedraineerde schuifsterkte van grond zonder droogte scheuren
- φ_{cs} = critical state waarde hoek van inwendige wrijving
- $c' \text{ schijnbaar}$ = schijnbare cohesie als gevolg van zuigspanningen en wapeningseffect van wortels
- lutum = fractie kleiner dan $2 \mu\text{m}$
- silt = fractie tussen 2 en $63 \mu\text{m}$
- o.s. = organische stof

In theorie is het mogelijk om zand met een hoger organisch stofgehalte van 8% tot 16% toe te passen. Matig tot sterk humeus zand is namelijk veel minder krimpgevoelig, zoals klei dat wel is. Daarom geldt voor klei een eis van organische stof <5% (en bij uitzondering <6%) en niet voor zand. Een hoog organisch stofgehalte geeft echter kans op de ontwikkeling van een zode met stikstof minnende soorten (zoals brandnetel en fluitenkruid), die tot een zode met beperkte erosiebestendigheid leiden. Daarom moet toepassing van $\geq 8\%$ organische stof altijd afgewogen worden ten opzichte van een extra beheerinspanning (bijvoorbeeld extra maaironde) en te verwachten golfbelasting.

Vanwege de ligging van de GCL parallel aan het talud en de kans op preferente glijvlakken, wordt aanbevolen om een berekening te maken met Spencer (glijvlak dat insnijdt in dijk kern) in combinatie met de methode in §5.3.8 op pagina 58 (glijvlak direct onder GCL). De uiteindelijke keus voor het meest geschikte berekeningsmodel is de verantwoording van de ontwerper.

4.1.3.3 Macrostabiliteit (STBU, STBI)

Door de keuze voor het schematiseren van het effect van de GCL kan van de standaard relatie voor de benodigde veiligheid uit het WBI2017 worden uitgegaan (zie Tabel 6). De door de GCL beïnvloede ligging van de freatische lijn, wordt geschematiseerd in de macrostabiliteitssporen. De situatie is niet wezenlijk anders dan bij een waterkering met een klei- of zandkern met een bekleding van een “flinke laag vette klei”.

Tabel 6: standaard partiële veiligheidsfactoren conform WBI2017 voor CSSM.

veiligheidsfactor (FoS)	schadefactor (γ_n)	modelfactor (γ_d)	schematiseringsfactor (γ_b)
$FoS \geq \gamma_n * \gamma_d * \gamma_b$	$\gamma_n = 0,15 * \beta_{eis;dsn} + 0,41$	$\gamma_d = 1,06 \text{ à } 1,11$	$\gamma_b = 1,0 \text{ à } 1,3$

De doorsnede-eis ($\beta_{eis;dsn}$) volgt uit de trajectlengte (L), de norm (P_{max}) en de faalruimte voor macrostabiliteit (standaard waarde $\omega = 0,04$).

Vanwege de ligging van de GCL parallel aan het talud en de kans op preferente glijvlakken, is een berekening met Spencer een vereiste (modelfactor $\gamma_d = 1,07$). Ter controle van de met Spencer berekende afschuifveiligheid is ook een berekening met Bishop en UpliftVan nodig. De uiteindelijke keus voor de meest geschikte berekeningsmethode is de verantwoording van de ontwerper.

Door het toepassen van een GCL neemt de onzekerheid in de (indirecte) waterdrukbelastingen af. De grootte daarvan is immers niet meer afhankelijk van een heterogene en deels onbekende bodemopbouw, maar van een gecontroleerd gefabriceerd en aangebracht product. In de afleiding van de schematiseringsfactor mag derhalve een kleinere kans op afwijkingen in de freatische lijn en stijghoogte worden aangenomen. De freatische lijn in de dijkkern kan zowel hoger komen te liggen (bijvoorbeeld bij infiltratie van bovenaf of door ongemerkt falen van de GCL) of lager (door beperking inzijging via buitentalud), zie verder §5.3.7.

4.1.3.4 Aansluitingen

Voor waterkeringen met een GCL in het voorland of op het talud verandert het feit niet dat aansluitingen, net als bij conventionele dijken, langsconstructies of kunstwerken, voldoende gedetailleerd moeten worden ontworpen. De eis is dat de aansluiting niet zwakker mag zijn dan de “reguliere ongestoorde doorsnede”.

4.2 Positieve en negatieve effecten

Een GCL heeft meestal positieve effecten maar kan ook negatieve effecten hebben. Daarom is in Tabel 7 een overzicht gegeven van mogelijke (bij)effecten van een GCL. Een sprekend voorbeeld: een GCL in het voorland is bedoeld om de overstromingskans door piping te verkleinen, maar kan onder bepaalde omstandigheden ook een negatieve invloed hebben op de macrostabiliteit buitenwaarts. Bijvoorbeeld doordat de grondwaterstand bij vallend buitenwater langer hoog blijft (lage doorlatendheid GCL) of door wateraccumulatie als gevolg van tegenschot (ontwerp- / uitvoeringsfout).

Tabel 7: effecten van aanwezigheid van een GCL op verschillende (faal)mechanismen.

mechanisme	in voorland	op buitentalud	onder kruin/op binnentalud
STBU	n.v.t.	de freatische lijn in de afdeklaag en de dijkkern wijzigen (zowel hoger als lager is mogelijk), waardoor de taludstabiliteit wordt beïnvloed	n.v.t.
GEBU	n.v.t.	toepassing van een gebiedseigen zandige afdeklaag (meer erosie- en verdrogingsgevoelig) wordt mogelijk, daarmee veranderen	n.v.t.

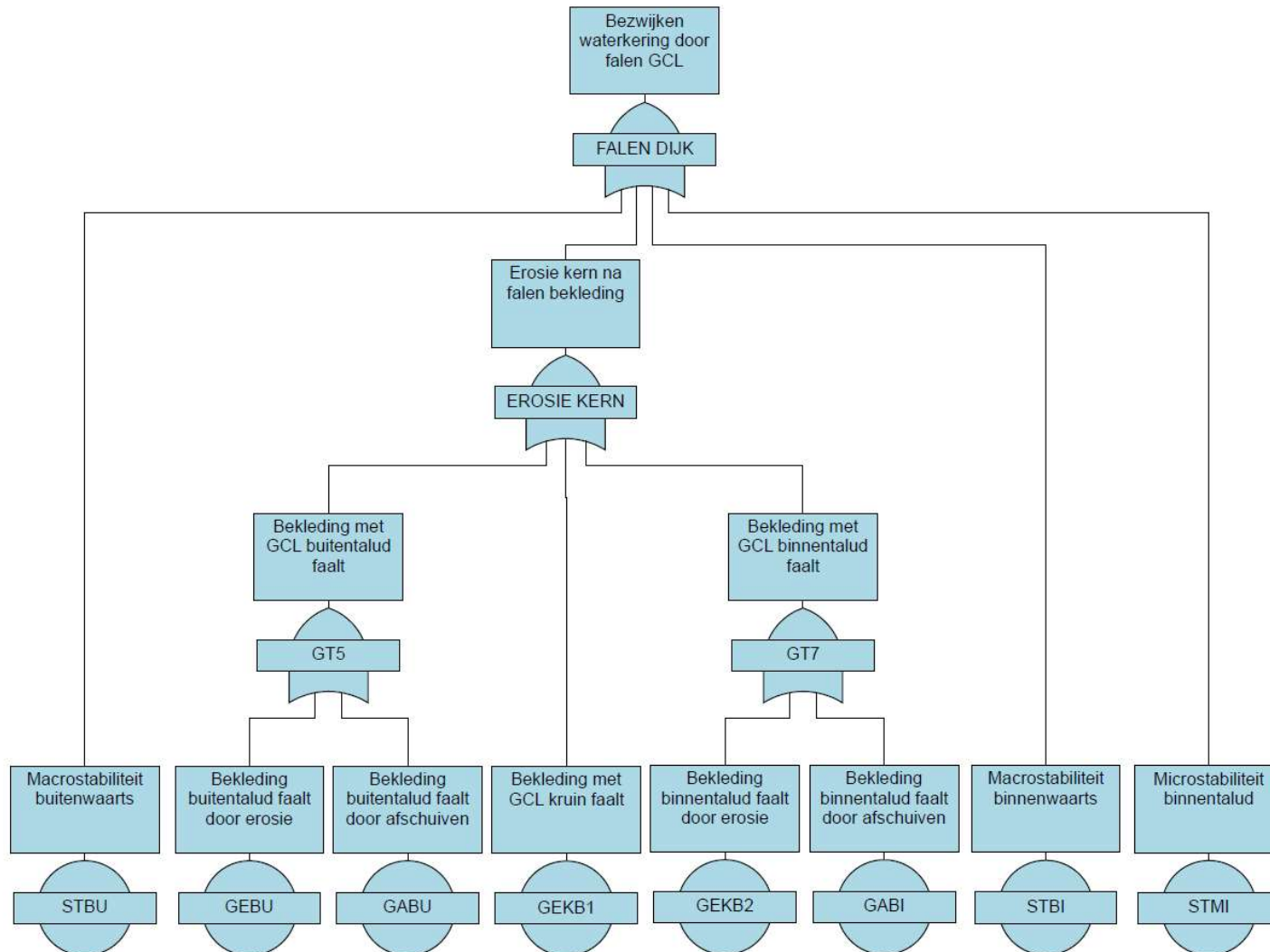
mechanisme	in voorland	op buitentalud	onder kruin/op binnentalud
		de eisen aan en het bezwijkmechanisme van de bekledingslaag als geheel	
GABU	er kan (door “tegenschot”) wateraccumulatie op de GCL ontstaan met verlaging van schuifsterkte nabij de buiteenteen en afname van de taludstabiliteit	verzadiging van de afdeklaag is mogelijk en lagere wandwrijving, waardoor de stabiliteit van de bekleding afneemt	n.v.t.
GEKB	n.v.t.	n.v.t.	toepassing van een gebiedseigen zandige afdeklaag (meer erosie- en verdrogingsgevoelig) wordt mogelijk, daarmee veranderen de eisen aan en het bezwijkmechanisme van de bekledingslaag als geheel
GABI	n.v.t.	de freatische lijn in de dijkkern komt lager te liggen, waardoor de stabiliteit van het talud toeneemt	de freatische lijn in de afdeklaag wijzigt (zowel hoger als lager is mogelijk) en lagere wandwrijving, waardoor de weerstand tegen afschuiven wordt beïnvloed
STBI	de intredeweerstand van het voorland wordt beïnvloed door de GCL en daarmee de stijghoogte bij de binnenteen	de freatische lijn in de dijkkern komt lager te liggen, waardoor de schuifsterkte in de waterkering toeneemt	de freatische lijn in de dijkkern wijzigt afhankelijk van de aanwezigheid en werking van de drainage bij de binnenteen en optredende overslag, waardoor de taludstabiliteit wordt beïnvloed
STMI	n.v.t.	de freatische lijn in de dijkkern komt lager te liggen, waardoor de kans op microstabiliteit afneemt	de freatische lijn in de dijkkern komt hoger te liggen afhankelijk van de aanwezigheid en werking van de drainage bij de binnenteen

4.3 Gebeurtenissenboom

In Figuur 10 zijn de belangrijkste gebeurtenissen die tot falen kunnen leiden weergegeven. De uitgebreide gebeurtenissenboom is opgenomen in Bijlage A, inclusief een legenda van de gebruikte symbolen. Het betreft dus puur gebeurtenissen en niet iedere tak heeft eenzelfde kans van voorkomen. De boom mag derhalve niet worden opgevat als een foutenboom ter kwantificering van de faalkans.

In Figuur 10 wordt, naast de vakjes met beschrijvingen en de rondjes met faalmechanismen, slechts één bijzonder symbool gebruikt voor het bundelen van gebeurtenissen die samenkomen bij falen waterkering, erosie kern, GT5 en GT7. Dit is de “of” poort met de vorm van een soort “raketje”, waarbij geldt: één van de onderliggende gebeurtenissen dient op te treden.

In Tabel 8 is een overzicht gegeven van gebeurtenissen vanuit Ontwerp (O), Uitvoering (U) en Beheer (B), die via een bepaald faalpad leiden tot de topgebeurtenis (erosie dijkkern).



Figuur 10: faalstructuur in vereenvoudigde vorm (hoofdsporen die leiden tot falen van dijklichaam).

Gebeurtenissen vanuit Ontwerp (O), Uitvoering (U) en Beheer (B). De tabel moet als volgt worden gebruikt of gelezen:

- Tijdens het ontwerp zijn de gebeurtenissen met de letter O van toepassing en daarom is ook beschreven welke actie tijdens het ontwerp genomen dient te worden. In sommige gevallen is tijdens het ontwerp een doorkijk mogelijk naar een volgende fase (uitvoering of beheer).
- Tijdens de uitvoering en het beheer zijn de gebeurtenissen met de letter U en B van toepassing. Tijdens de uitvoering is er in sommige gevallen een relatie met een andere fase.
- Voor elke fase (O, U of B) dient nagegaan te worden of de gebeurtenis van toepassing is en dient het mogelijk gevolg meegenomen te worden in de beschouwing van het faalmechanisme dat van toepassing is op de gebeurtenis.

Tabel 8: overzichtstabel met gebeurtenissen die leiden tot topgebeurtenis (falen waterkering).

#	Gebeurtenis	Gevolg	Faalmechanisme	Actie ontwerp	Actie uitvoering	Actie beheer
O1	Drainage onder met GCL afgedekte binnenteen functioneert niet (water kan niet weg)	Indien drainage niet functioneert, kan freatische lijn hoger uitvallen dan is bedacht in het ontwerp	STBI, STMI	Drainage goed ontwerpen is, zodat water uit de waterkering kan, met specifieke aandacht voor uitstroom op talud en doorspuitputten	Zie U11 en U12	Zie B9
O2	Onjuiste of ontbrekende eis vlakheid en verdichting aanlegniveau GCL	De bentonietmat ligt niet vlak op het talud waardoor trekspanningen ontstaan of de GCL kapot zwelt Ook mogelijk bij te veel ongelijkmatige zetting	Ongemerkt falen GCL	Vlakheid en verdichting van het cunet, de ondergrond, of de kern beschouwen in ontwerp	Zie U1	Zettingsgedrag in de gaten houden
O3	Eisen aan substraat te laag of incompleet	Grasmat komt niet tot ontwikkeling en/of is extra droogtegevoelig	Erosie afdeklaag	Dikte en materialisatie substraat bepalen	Zie U10	Zie B1
O4	Gekozen GCL minder sterk dan belasting	GCL scheurt bij niet maatgevende trekspanning (al dan niet opgemerkt)	Ongemerkt falen GCL, falen bekleding	Benodigde sterkte berekenen met voldoende zekerheid	Controleren geleverde kwaliteit, - zie U8	-

#	Gebeurtenis	Gevolg	Faalmechanisme	Actie ontwerp	Actie uitvoering	Actie beheer
O5	Overlap te klein of verkeerd hechtmiddel	GCL heeft niet de gewenste kwaliteit bij overgang	Ongemerkt falen GCL, falen bekleding	Overlap robuust ontwerpen (bv. "self healing" overlap)	Zie U3	-
O6	Drainagelaag bovenop GCL slecht ontworpen	Toplaag raakt verzadigd en schuift af	Afschuiven talud, falen bekleding	Rekening houden met verzadiging toplaag	-	-
O7	Wigvorm niet stabiel ontworpen	Stabiliteit van de afdeklaag op de GCL is onvoldoende en deze kan afschuiven	Afschuiven talud, falen bekleding	Berekenen hoeveel "wig" er moet zijn voor evenwicht	Zie U4	-
O8	Lagere wrijving tussen GCL en grond niet verdisconteerd	Doordat de wandwrijving tussen GCL en grond lager is dan tussen grond en grond kan de afdeklaag iets makkelijker afschuiven	Afschuiven talud, falen bekleding	In het ontwerp dient men de verlaagde schuifweerstand in rekening te brengen	-	-
O9	(te) Lage ontwerphoogte (HBN) zorgt voor te hoog overslagdebiet	Door relatief laag HBN, treedt een overslagdebiet op waar de bekleding niet tegen bestand is	Erosie kruin en binnentalud, falen bekleding	Er dient rekeningen te worden gehouden met een beperking aan het overslagdebiet	Zie U5	Hoogte regelmatig controleren op onverwachte zettingen
O10	Minimale laagdikte afdeklaag te klein ontworpen	De GCL is onvoldoende beschermd en raakt gemakkelijk beschadigd, bijvoorbeeld bij belasting met zwaar materieel	Ongemerkt falen GCL	Rekening houden met de minimale dekking van de GCL	Zie U6	Zie B3
O11	Inklemming niet juist ontworpen	Aan de bovenzijde is de GCL onvoldoende verankerd	Ongemerkt falen GCL, falen bekleding	Zorgen dat voldoende verankering van de GCL wordt geëist	Zie U7	-
O12	Aanwezigheid zettingsgevoelige lagen/verschilzetting onderschat	Door (ongelijke) zettingen treden trekkrachten op in GCL, met mogelijk scheuren tot gevolg	Ongemerkt falen GCL	Zettingsgevoelige lagen opsporen en goede zettingsprognoses maken	-	-

#	Gebeurtenis	Gevolg	Faalmechanisme	Actie ontwerp	Actie uitvoering	Actie beheer
O13	Ontwerp is niet graafdier bestendig	Graverij door bevers of andere grotere (knaag)dieren leidt tot schade aan de GCL	Falen bekleding	Bevergaas of ander type bescherming opnemen in ontwerp	Zie U9	Zie B6
O14	GCL binnentalud tot beneden in talud doorgetrokken (water kan niet weg)	Water kan niet weg, druk bouwt op kan leiden tot problemen met macro of micro stabiliteit	STMI, STBI	Drainage aanleggen of zorgen dat GCL niet tot in de binnenteen door loopt	Zie U12	-
O15	Talud steiler dan 1:5 (zand) of 1:6 (klei)	Grondmechanisch afschuiven	STBI, STBU, afschuiven bekleding	Ontwerphelling afstemmen op grondsoort	-	-
O16	Scenario hoge freatische lijn niet beschouwd	Onvoldoende marge in stabiliteit talud en/of opdrukken bekleding	STBU / STBI	verificatie op scenario met extra hoge freatische lijn	-	-
U1	Ongelijke zetting waterkering door slechte verdichting of aanwezigheid van kuilen	De GCL ligt niet mooi/vlak op het talud waardoor trekspanningen kunnen ontstaan (als het zand eronder te veel gaat werken kan dit ook gebeuren) of de GCL zwelt kapot	Ongemerkt falen GCL	Zie O2	Zorgen voor: adequate verdichtingsmethode, verificatie met proeven, controle op kuilen en een kwaliteitscontrole rapportage	Monitoring zettingsgedrag
U2	Onvoldoende verankering gerealiseerd	Aan de bovenzijde is de GCL onvoldoende ingeklemd	Ongemerkt falen GCL	Zie O11	Zorgen dat verankering volgens ontwerp wordt aangelegd en hierop goed controleren	-
U3	Overlap te klein of hechting niet goed	GCL heeft niet de gewenste kwaliteit bij overgang	Ongemerkt falen GCL, falen bekleding	Zie O5	Overlap aanleggen volgens voorschrift, strenge controle op uitvoering overgang	-
U4	Wigvorm niet stabiel aangebracht	Door ontbreken wigvorm is stabiliteit van de afdeklaag op de GCL onvoldoende en kan deze afschuiven	Afschuiven talud, falen bekleding	Zie O7	Controleren aanlegprofiel o.b.v. inmetingen en revisie tekeningen	-

#	Gebeurtenis	Gevolg	Faalmecanisme	Actie ontwerp	Actie uitvoering	Actie beheer
U5	(te) Lage aanleghoogte zorgt voor te hoog overslagdebiet	Doordat de waterkering (te) laag is, treedt een overslagdebiet op waar de bekleding niet tegen bestand is	Erosie kruin en binnentalud, falen bekleding	Zie O9	Goed monitoren dat de aanleghoogte wordt gehaald en zettingen in de gaten houden, zodat de opleverhoogte ook niet te laag is	Hoogte regelmatig controleren op onverwachte zettingen
U6	Minimale laagdikte afdeklaag te klein aangelegd	De GCL is onvoldoende beschermd en raakt gemakkelijk beschadigd, bijvoorbeeld bij belasting met zwaar materieel	Ongemerkt falen GCL	Zie O10	Controleren aanlegdikte via inmetingen en revisie tekeningen en wigvorm controleren, zie ook U4	Zie B3
U7	Niet erosiebestendige kruinverharding toegepast	Doordat de kruinverharding kan eroderen, kan de GCL niet goed ingeklemd worden	Ongemerkt falen GCL, falen bekleding	Zie O11	Juiste type verharding toepassen en dit ook controleren in het werk	-
U8	Kwaliteitscontrole leverantie faalt	Er wordt een verkeerde GCL geleverd / specificaties GCL worden niet gehaald	Afschuiven bekleding, falen bekleding, ongemerkt falen GCL	Voorschrijven specificaties GCL, zie ook O4	Leveranties controleren, zorgen dat certificaten op orde zijn en vastleggen in kwaliteitscontrole rapportage	-
U9	Bescherming tegen woedieren niet of verkeerd aangebracht	Graverij door bevers of andere grotere (knaag)dieren leidt tot schade aan de GCL	Falen bekleding	zie O13	Toezien op juiste aanleg (bescherming op de GCL en niet er onder), verificatie sterkte geleverde beschermingsmateriaal	Zie B6
U10	Aangebracht substraat is niet geschikt voor standplaats (voldoet niet aan ontwerpisen)	Beoogde grasmatkwaliteit wordt niet gerealiseerd	Erosie buitentalud en binnentalud	Zie O3	Biologische en bodemkundige samenstelling in het werk bepalen en indien nodig verbeteren met bijvoorbeeld compost, kunstmest, steenmeel en/of micro-organismen	Zie B1
U11	Drainage binnenteen onjuist aangelegd	Drainage binnenteen functioneert niet (water kan niet weg), waardoor freatische lijn hoger uitvallen dan is bedacht in het ontwerp	STBI, STMI	Zie O1	Toezien op juiste aanleg (ligging drainage, soort filtergrind en aantal uitstroomopeningen)	Zie B9

#	Gebeurtenis	Gevolg	Faalmechanisme	Actie ontwerp	Actie uitvoering	Actie beheer
U12	GCL binnentalud tot beneden in talud doorgetrokken (water kan niet weg)	Drainage binnenteen functioneert niet (water kan niet weg), waardoor freatische lijn hoger uitvallen dan is bedacht in het ontwerp	STBI, STMI	Zie O1	Toezien op juiste aanleg (GCL niet tot in binnenteen)	Zie B9
U13	Aanleg GCL in den natte of bij regenval	Er ontstaat squeezing van gezwollen bentoniet tijdens afdekken met grond of GCL zwelt kapot	Ongemerkt falen GCL	speciaal type GCL toepassen	Toezien op aanleg in den droge of afdekking anders aanbrengen (dunne lagen)	-
B1	Verkeerde beheervorm leidt tot slechte kwaliteit grasmat	Verdroging grasmat en daardoor minder weerstand tegen erosie	Erosie buitentalud, erosie kruin en binnentalud	-	-	Beheervorm aanpassen op substraat- en grasmatkwaliteit
B2	Schade aan GCL niet opgemerkt en niet hersteld	Na erosie of afschuiven afdeklaag zal direct een deel van de kern open liggen en eroderen	Erosie kern, ongemerkt falen GCL	-	-	Kwaliteit GCL controleren op plaatsen waar deformaties worden geconstateerd
B3	Spoorvorming	Schade aan GCL indien deze onvoldoende beschermd is, door golfaanval of bij overslag	Erosie kruin, ongemerkt falen GCL	-	-	Spoorvorming bekleding voorkomen door toepassen licht materieel of eventueel rijplaten Spoorvorming herstellen door aanvullen kuilen
B4	Beschadigen GCL met zwaar beheervoertuig of ander zwaar materieel	Remmend zwaar voertuig kan de afdeklaag doen verschuiven ten opzichte van het (gladde) GCL, waardoor trekspanningen optreden en scheuren ontstaan	Ongemerkt falen GCL, falen bekleding	-	-	Zware verkeersbelasting niet toestaan op taluds, geschikt materieel inzetten bij regulier beheer (aslast < 5 ton)
B5	Niet rekening houden met GCL bij vergunnen/aanleggen	Graafwerkzaamheden voor bijvoorbeeld aanleg kabels en leidingen leidt tot beschadiging	Ongemerkt falen GCL	-	-	In de beleidsregels opnemen dat bij waterkeringen met GCL niet (diep) mag worden

#	Gebeurtenis	Gevolg	Faalmechanisme	Actie ontwerp	Actie uitvoering	Actie beheer
	objecten in en om waterkering	aan GCL en wordt niet of onjuist gerepareerd				gegraven en toezien op reparatie conform instructies leverancier
B6	Woeldieren niet tijdig verjaagd	Graverij door bevers of andere grotere (knaag)dieren leidt tot schade aan de GCL	Falen bekleding	Zie O13	Zie U9	Wanneer bevers of andere woeldieren worden gesignaleerd deze verjagen of verplaatsen, zie ook B7
B7	Schade aan GCL door grondonderzoek of graverij niet tijdig hersteld of opgemerkt	Wanneer schade niet tijdig hersteld is en er treedt een hoogwater op, is aantasting van de dijk kern mogelijk met bresvorming tot gevolg	Falen bekleding, erosie - kern		-	Bentonietmat en afdeklaag repareren conform instructie leverancier nadat schade door graverij is gemeld, zie ook B6
B8	Beschadiging teen/talud door grondroering (ploegen, woelen, enzovoorts)	Sijpelend water kan grond meenemen door beschadiging	STMI	-	-	Goed op letten bij dijkinspectie, en/of zorgen dat het niet kan gebeuren (bv. kernzone in het veld afrasteren)
B9	Drainage onder met GCL afgedekte binnenteen niet goed onderhouden	Drainage binnenteen functioneert niet (water kan niet weg), waardoor freatische lijn hoger uitvalt dan is bedacht in het ontwerp	STBI, STMI	Zie O1	Zie U11 en U12	Drainage periodiek onderhouden (doorspuiten) en defecten terugmelden
B10	Schade aan afdeklaag door drijfvuil	Schurende werking van drijfvuil leidt tot erosie en kan de GCL beschadigen	GEBU	Flauwe bochten ontwerpen die het vuil wegleiden van de waterkering	n.v.t.	Drijfvuil verwijderen tijdens hoogwater

Niet alle gebeurtenissen (O3, O9, O15, B1 en B8) hebben een directe relatie met GCL's, maar zijn voor de volledigheid toch genoemd.

5 ONTWERP

In hoofdstuk 4 is beschouwd wat specifiek benodigd is voor een waterkering met een GCL. Hiertoe is onder andere een gebeurtenissenboom opgesteld en een tabel met beheersmaatregelen. Uitgangspunt bij de faalpaden is dat gebiedseigen zandig materiaal wordt toegepast als afdekking en ook als kernmateriaal aanwezig is. Dit is wezenlijk anders dan bij conventionele waterkeringen.

De toepassing van de GCL past, door het gebruik in combinatie met zandig materiaal, niet volledig binnen de reguliere sporen van het Beoordelings- en OntwerpInstrumentarium (BOI). Terwijl een onderbouwing juist wel noodzakelijk is om met vertrouwen de GCL te kunnen plaatsen. Daarbij is niet alleen de doorlatendheid en afdichtende functie van belang, maar onder andere ook de gevolgen voor de beheerorganisatie. Om een goed ontwerp te kunnen vervaardigen en realiseren moeten specificaties, eisen aan plaatsing, aansluitingen en uitvoeringsrichtlijnen in detail worden beschouwd.

5.1 Relatie faalmechanismen en ontwerp

Voor de beschrijving van gebeurtenissen wordt verwezen naar Tabel 8.

Tabel 9: overzicht faalmechanismen en ontwerp.

locatie GCL	mechanisme	# gebeurtenis	ontwerpvoorschrift
voorland	STPH	n.v.t. (niet wezenlijk anders dan bij het ingraven van een laag klei en daarom zijn er geen gebeurtenissen gedefinieerd)	schematiseringshandleiding piping, in combinatie met toelichting in §5.2
buitentalud	STBU	O13 (woeldieren), O15 en O16 (instabiliteit)	schematiseringshandleiding macrostabiliteit, in combinatie met toelichting in §5.3.7
	GEBU	O3 (substraat), O5 (overlap)	zie §5.3 en §5.4
	GABU	O6 (drainagelaag), O7 (stabiliteit bekleding/wigvorm), O8 (wandwrijving)	zie §5.3.3
kruin en binnentalud	GEKB	O3 (substraat), O5 (overlap), O9 (hoogte), O11 (inklemming)	schematiseringshandleiding grasbekleding schematiseringshandleiding hoogte in combinatie met toelichting in §5.3.2
binnentalud	STBI	O9 (hoogte), O13 (woeldieren), O15 en O16 (instabiliteit)	schematiseringshandleiding macrostabiliteit KPR factsheet werkwijze macrostabiliteit i.c.m. golfoverslag in combinatie met toelichting in §5.3.7
	STMI	O1, O14 (drainage)	schematiseringshandleiding microstabiliteit en grasbekledingen, in combinatie met toelichting in §5.3.8
	GABI	O6 (drainagelaag), O7 (stabiliteit bekleding/wigvorm), O8 (wandwrijving)	zie §5.3.3
buitentalud en binnentalud	ongemerkt falen	O2 (vlakheid), O4 (sterkte), O10 (afdeklaag), O11 (inklemming), O12 (vervorming)	zie Bijlage D

5.2 Plaatsing in het voorland (STPH)

Een kwelwegverlenging dient te worden ontworpen met het wettelijke instrumentarium voor het berekenen van het mechanisme piping (zie ook §4.1.3 op pagina 37). Anno 2020 is dat het OI2014 versie 4 en de Schematiseringshandleiding piping versie 4.0 van 28 mei 2021. De berekening geschiedt op dezelfde wijze als normaal, zijnde een kleidijk met een uiterwaard (waarin een afdeklaag van klei aanwezig is) op een ondergrond van zand. Bij toepassing van een GCL is het mogelijk om meer dan tweemaal de dijkbasis als totale kwelweg in rekening te stellen.

In het Kennis voor Keringen Voorlanden onderzoek zijn handvatten vastgesteld om op basis van locatie specifieke kenmerken (doorlatendheid en dikte van watervoerend pakket en doorlatendheid en dikte (of hydraulische weerstand) van voorland en achterland) een inschatting te maken of deze maximale kwelweglengte bij toepassing van de rekenregel van Sellmeijer kan worden opgerekt.

5.2.1 Extra voorland meenemen

Wanneer een GCL (zo goed als) ondoorlatend is en de kans op kortsluiting nihil is kan de breedte van de GCL in het voorland opgeteld worden bij de dijkbasis voor de piping analyse met de rekenregel van Sellmeijer. Dat zou dan inhouden dat toepassen van één strekkende meter GCL het meenemen van één strekkende meter extra voorland mogelijk maakt. Ter verduidelijking een voorbeeld:

- Wanneer de dijkbasis (buitenteen tot uittredepunt) 20 m is, zou zonder maatregelen de kwelweg worden afgeknot op maximaal 2 keer de dijkbasis, dus 40 m.
- Als er voor deze waterkering nu een 10 m breedte GCL wordt aangebracht dat (zo goed als) ondoorlatend is en waarbij geen kans op kortsluiting bestaat kan dit met betrekking op piping gezien worden als een verlenging van de dijkbasis naar 30 m. Dan kan als maximale kwelweglengte 60 m meegenomen worden. Indien uit het KvK voorlanden onderzoek zou blijken dat in deze situatie drie keer de dijkbasis als kwelweg meegenomen kan worden zou dat ook gelden voor de situatie met GCL.

Hierbij geldt in alle gevallen dat het wel zo moet zijn dat de intredeweerstand van het voorland buitenwaarts van de GCL ook hoog genoeg moet zijn, zodat de fictieve kwelweglengte (SH Piping) ook daadwerkelijk zo lang is. Dus het gaat om situaties waar de afknotting de beperkende factor is.

Wanneer er echter wel stroming door de GCL naar de pipe mogelijk is, kan deze de pipegroei beïnvloeden waardoor de rekenregel van Sellmeijer niet meer toepasbaar is als de pipe onder de GCL loopt (ondanks dat de kans op kortsluiting nihil is). Wanneer de hydraulische weerstand van de GCL bekend is, kan deze met D-Geo Flow worden gemodelleerd. Daarmee kan een beheerder voor de specifieke situatie onderbouwen dat meer voorland meegenomen kan worden.

In eerste instantie kan dit door een berekening te maken om de pipe lengte te bepalen waarbij de pipe nog onder de dijkbasis blijft (en dus niet onder de GCL groeit). In D-Geo Flow wordt het effect van de hydraulische weerstand van de GCL tegen stroming naar het watervoerend pakket en de pipe meegenomen. De Factsheet D-Geo Flow (versie 2020) biedt hiervoor de eerste handvatten voor modelleren van D-Geo Flow en voor de omgang met de berekende pipelengte. Naar aanleiding van het KvK voorlanden onderzoek, en de nieuwbouw van D-Geo Flow in de periode (2021-2023) en ervaringen met gebruik wordt de Factsheet D-Geo Flow mogelijk ge-update. De actuele versie kan worden opgevraagd bij de Helpdesk water en de HWBP TM community. Vanaf de zomer van 2023 is D-Geo Flow formeel onderdeel van het BOI.

Nog meer verval zou kunnen worden gekeerd indien de pipe wel onder de GCL zou groeien. Dit kan in principe in D-Geo Flow gemodelleerd worden. D-Geo Flow neemt de stroming door de deklaag wel mee. Er zijn echter onzekerheden met betrekking op pipegroei onder semi-doorlatende lagen die daarvoor uitgezocht zouden moeten worden.

5.2.2 Detaillering

De GCL dient in verband met de kans op beschadigingen en afname van het waterremmend vermogen op een diepte van minimaal 1,0 m + de bouwvoor te worden aangelegd. Dat wil zeggen 1,3 m bij grasland en 1,5 m bij akkerland.

De hydraulische weerstand van de GCL dient minimaal 10 dagen (vergelijkbaar met 1 m verdichte zwak zandige kei) te bedragen op het einde van de levensduur.

Aansluiting van het voorland op de buitentaludbekleding dient gerealiseerd te worden door middel van een overlap (zie §5.4 op pagina 60).

In de zone waar de GCL wordt aangebracht is er kans op vernatting als de GCL met tegenschot (afwaterend richting de buitenteen) wordt aangelegd. Afhankelijk van het grondgebruik (landbouw of natuur) is dit ongewenst of juist gewenst. Mogelijke oplossingen tegen vernatting zijn aanleg van de GCL met afschot of toepassing van drainage op de GCL.

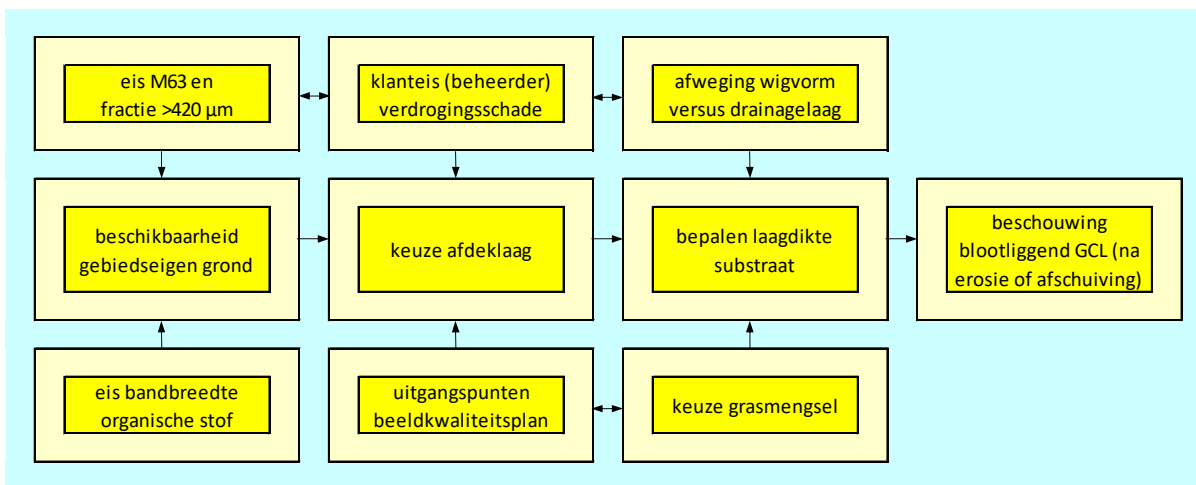
In bijzondere gevallen is beperking van de capillaire opstijging mogelijk. In relatie tot het grondgebruik dient dit beschouwd en afgewogen te worden.

5.3 Plaatsing op kruin en taluds

Om weerstand te kunnen bieden tegen golfklappen en golfoverslag is op veel rivierdijken een bekleding aanwezig van een grasmat op een kleilaag. De grasmat levert de initiële sterkte (erosiebestendigheid) en de “vette kleilaag” levert de reststerkte, na een eventuele beschadiging van de grasmat. Op zeedijken en rivierdijken met een zwaardere belasting zijn vaak steenbekledingen aanwezig, met ook daaronder een “vette kleilaag” voor het leveren van reststerkte.

Als alternatief voor de “vette kleilaag” is toepassing van een GCL mogelijk, waarbij de GCL de erosiebestendigheidsfunctie deels overneemt en de waterdichtheidsfunctie volledig. De GCL wordt aangelegd onder een beschermende afdeklaag van gebiedseigen grond met daarop een grasmat, die ook substraat is voor de grasmat. Net als bij de “vette kleilaag” wordt aan de wortelzone van de grasmat (circa 0,2 m dik) een erosiebestendigheid toegekend en aan de (zandige) afdeklaag een zeer beperkte sterkte. De GCL levert de reststerkte.

Het ontwerpen van de afdeklaag, waar de GCL onderdeel vanuit maakt, geschiedt volgens het stroomschema in Figuur 11.



Figuur 11: stroomschema ontwerp afdeklaag op kruin en taluds van rivierdijken met beperkte belasting.

De eisen aan de afdeklaag zijn in §5.3.1 tot en met §5.3.3 uitgewerkt, voor erosie en preventie van graafschade wordt verwezen naar §5.3.4 respectievelijk §5.3.5 en de eisen voor reststerkte staan vermeld in §5.3.6.

5.3.1 Keuze afdeklaag groene dijk (GEBU, GEKB)

Het doel van de grasbekleding op de taluds van een waterkering met daarin een GCL is primair erosiebestendigheid en waterdichtheid en secundair "aankleding" van de waterkering. Daarbij spelen aspecten een rol als biodiversiteit, beleving en droogteschade. Daarnaast kan een beperkte erosiebestendigheid door afslag bij hoogwater leiden tot hoge herstelkosten. Het is daarom nodig om zowel op de uiterste grenstoestand (grootst mogelijk golfhoogte) als op de bruikbaarheidsgrenstoestand (jaarlijks tot tienjaarlijks voorkomende omstandigheden) te ontwerpen.

Het is de vraag of de vrijkomende grond uit het gebied niet te snel of te sterk uitdroogt en/of te voedselarm is, waardoor een fragmentarische zode ontstaat. Om dat te voorkomen is een grond met een minimaal gehalte fijne delen (lutum en silt en organische stof) gewenst met een bepaalde dikte bij een bepaalde vegetatiesamenstelling. Bij humusarm (fijn) zand bestaat de kans dat de grasmat sterk degradeert (fragmentarische zode) en er afslagranden ontstaan na elk hoogwater.

De vrijkomende of beschikbare grond moet daarom geselecteerd worden op potentiële erosiebestendigheid of reststerkte. Uit ervaring blijkt dat hieraan invulling kan worden gegeven door bijvoorbeeld te kiezen voor grond met meer dan 8% lutum ($< 2 \mu\text{m}$) of fijn zand ($M63 \leq 210 \mu\text{m}$) met meer dan 25% silt (2 tot $63 \mu\text{m}$). Ook door bijvoorbeeld de onderste helft van de afdeklaag extra te verdichten kan erosiebestendigheid worden verkregen. In de bovenste helft is dit in verband met doorwortelbaarheid niet voor de hand liggend. Logischerwijs moet het gebruik van puur zand in de toplaag of afdeklaag (afgezien van een eventuele drainagelaag) voorkomen worden.

Gestreefd moet worden naar een zo groot mogelijke erosiebestendigheid van de afdeklaag. Uit proeven op de Vechtdijk is namelijk gebleken dat een dunne podzollaag verantwoordelijk is voor een onvermoed grote sterkte van een grasmat op zand. Doorwortelbaarheid en verdichting (zie ook §6.2.3 op pagina 66) moeten daarbij in balans zijn.

Om een combinatie van laagdikte en vegetatiesamenstelling te bepalen, dient eerst te worden vastgesteld welke mate van verdroging acceptabel is. En de mate van acceptatie is afhankelijk van de tolerantie van de aanwezige vegetatie tegen verdroging en de omgevingseisen (van beheerder en gebruikers). Beide aspecten leiden tot een benodigd vochtleverend vermogen van de afdeklaag. Op basis van Tabel 18.30 van Locher en De Bakker (bron: ref 11) is in Tabel 10 een vertaling naar een matrix gemaakt om dit vermogen te bepalen.

Tabel 10: benodigd vochtleverend vermogen (mm), vrij naar Locher en de Bakker.

acceptatie vegetatietype	beperkte verdroging toegestaan	regelmatige verdroging acceptabel	geen eisen aan verdroging
grasmat van cultuurgrassen	> 200 mm	n.v.t.	n.v.t.
soortenrijke grasmat	175 mm	125 mm	n.v.t.
droogtebestendige grasmat	n.v.t.	100 mm	< 50 mm
ruigte	n.v.t.	n.v.t.	< 50 mm

Waarin:

n.v.t. = combinatie van verdroging en acceptatie is niet logisch voor betreffende vegetatietype

Beperkte verdroging is in Tabel 10 gedefinieerd als een kans op verdroging van 1 à 2 keer per 10 jaar, regelmatige verdroging als een kans van 2 à 5 keer per 10 jaar.

Met het benodigd vochtleverend vermogen kan voor verschillende grondsoorten een laagdikte worden bepaald. Op basis van Tabel 18.34 van Locher en De Bakker (bron: ref 11) is in Tabel 11 een vertaling naar een matrix gemaakt om dit vermogen te bepalen.

Tabel 11: volumefractie beschikbaar hangwater per grondsoort, vrij naar Locher en de Bakker.

grondsoort	“vette klei” (±30% lutum)	lichte zavel (>10% lutum)	lemig zand (> 25% silt)	humeus fijn zand (5% +/- 3% o.s.)	humusarm fijn zand (1,5% +/- 0,5% o.s.)
fractie (-)	0,15	0,20	0,175	0,15	0,10

Waarin:

Lutum = fractie kleiner dan 2 µm

Silt = fractie tussen 2 en 63 µm

o.s. = organische stof

Onder “vette klei” wordt de klei verstaan die als (erosie bestendige) bekledingslaag wordt toegepast, dus erosie categorie 1 en 2 klei (volgens [ref 17]), waarvan het lutumgehalte volgens ervaringscijfers in de meeste gevallen tussen 25% en 35% zit. Vooral bij categorie 1 klei zijn hogere lutumgehaltenes ook mogelijk. De “vette klei” kan gezien worden als stevige klei en lichte zavel kan worden gezien als schrale klei volgens de definitie in het rapport “Update inzichten in gebruik van klei voor ontwerp en uitvoering van dijkversterking” [ref 18]. Dit geldt ook voor het lemige (fijne) zand bij een gangbare verhouding van lutum en silt (lutum ≈ silt / 3).

De dikte van de afdeklaag kan vervolgens bepaald worden met de formule:

$$\text{minimaal dikte afdeklaag (mm)} = \frac{\text{benodigd vochtleverend vermogen (mm)}}{\text{volumefractie beschikbaar hangwater (-)}}$$

Vergelijking 1: minimale dikte afdeklaag.

Door te variëren met de dikte is het mogelijk te kiezen voor een schralere afdeklaag met sterkere droogtekaracteristieken. In dat geval zal frequenter een jaar optreden waarbij het verwelkingspunt voor de vegetatie wordt bereikt. Op de schrale afdeklaag ontstaat een vegetatietype met een lagere biomassa en specifieke droogteresistente gras- en plantensoorten.

De laagdikte stelt eisen aan de aanwezige hoeveelheid fijne delen en organische stof en vis-versa, maar stelt ook eisen aan de zandgrofheid van grondlagen die geclassificeerd worden als zand met minder dan 25% silt. De M63 waarde mag niet hoger zijn dan 210 µm (bovengrens van matig fijn zand) en de totale fractie uiterst grof zand (> 420 µm) en grind (> 2 mm) mag niet meer bedragen dan 0,1. Het organische stofgehalte moet liggen tussen 2% en 8%, tenzij het beheer en onderhoud zeer specifiek is afgestemd op een organisch stofgehalte van maximaal 16%.

Een eventuele drainagelaag van uitsluitend grof materiaal heeft geen vocht leverend vermogen. Deze kan derhalve niet tot de dikte van de afdeklaag gerekend worden bij bepaling van de verdrogingsgevoeligheid.

5.3.2 Keuze grasmengsel (GEBU, GEKB)

Bij het samenstellen van het inzaaimengsel moeten soorten worden gekozen die passen bij de verwachte frequentie van verdroging. Aangezien dit van veel factoren afhankelijk is en dus om maatwerk vraagt per geval, is inschakelen van een deskundige daarbij noodzakelijk. Voor afdeklaagen van lichte klei en zware zavel (lutumgehalte tussen 35% en 18%) in combinatie met een beperkte acceptatie van verdroging zijn er diverse geschikte mengsels op de markt, waarvan D1 (beweiding) en D2 (hooilandbeheer) de meest bekende voorbeelden zijn en GBG11, BG5 en BTK1100 de minder bekende.

Op basis van een vegetatieanalyse van honderden dijkvakken zijn nieuwe mengsels ontwikkeld, die geschikt zijn voor verschillende bodemtypen en beheervormen. Het grassenmengsels is gebaseerd op D1 (65%) met toevoeging van 6 andere, veel op dijken voorkomende, grassoorten (totaal 35%). Door de D1 soorten ontstaat al snel een voldoende gesloten grasbekleding. De toevoeging van extra soorten zorgt voor een versnelling richting definitieve samenstelling van de grasbekleding, die (bij maaibeheer) op de meeste (niet al te schrale) locaties zal bestaan uit een vorm van glanshaverhooiland. Aan het mengsel kunnen door de beheerder in eigen beheer gewonnen soorten (zoals Veldsalie, Ruige weegbree of Grasklokje) worden toegevoegd. Voor meer informatie wordt verwezen naar www.handreikinggrasbekleding.nl.

Voor de beeldvorming zijn enkele karakteristieke droogteresistente plantenassociaties voor waterkeringen weergegeven in Tabel 12. Bijkomend voordeel van toevoeging van deze kruiden aan de inzaaimengsels is een toename van de biodiversiteit. Hierbij wordt opgemerkt dat grassen een dicht wortelnet maken dat de grond goed vasthoudt. De erosieparameters in WBI2017 zijn hierop gebaseerd, maar van vegetaties waarbij kruiden dominant zijn is dit niet bekend. Het mengsel moet dus vooral een grasmengsel zijn met toevoeging van kruiden en niet andersom.

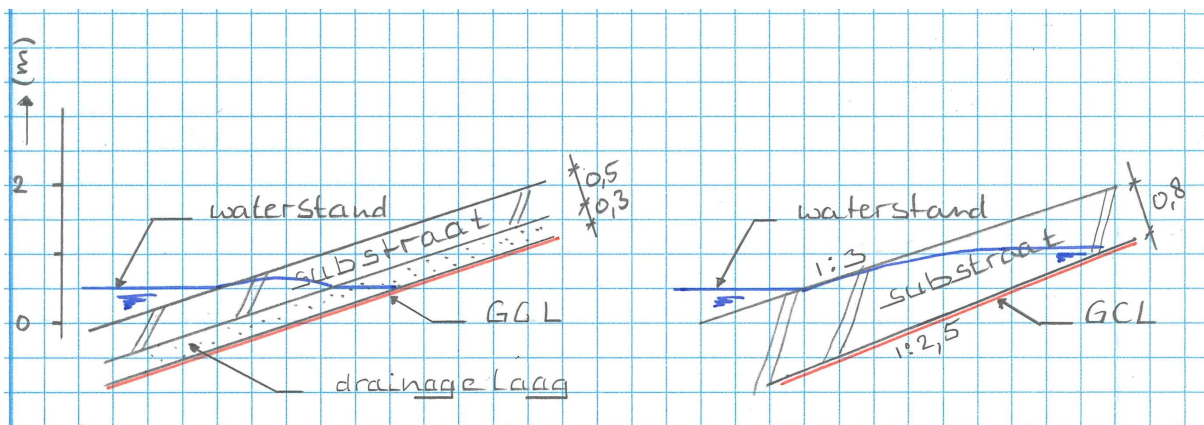
Tabel 12: plantenassociaties op schrale dijken.

plantenassociatie	naam	standplaats
14Bc1	Zacht vetkruid & Grote tijm	kalkrijk, droog
14Bc2	Sikkelhaver & Zachte haver	kalkrijk
16Bc1-a	Kamgras & Gewone veldbies	zuur, beweid
16Bb1-c	Glanshaver & Gewone veldbies	zuur, gemaaid
16Bb1	Schapengras & Kleine tijm	zuur, droog

5.3.3 Keuze drainagelaag (GABU, GABI)

In de afdekgrond van het buitentalud, maar ook van het binnentalud bij overslag, kan water accumuleren. Dit kan bij vallend water tot instabiliteit leiden. Het is mogelijk dit te voorkomen met een drainagelaag tussen de GCL en de toplaag (ofwel substraat ofwel vegetatielaag). Nadeel van een dergelijke laag is dat dit in droge periodes uitdroging van de grasmat versterkt en bij grote golven invloed kan hebben op het afdrukken van de toplaag. Daarom geniet het de voorkeur om de bekledingslaag stabiel te ontwerpen volgens de voorschriften uit het WBI voor GABU en GABI (zie §5.3.8 op pagina 58).

Het toepassen van een drainagelaag is in Duitsland gemeengoed, maar daar zijn er geen eisen aan de grasmat. In Nederland worden in ieder geval eisen gesteld aan de grasmat betreffende erosiebestendigheid en meestal ook eisen vanuit beeldkwaliteit (bijvoorbeeld groene en/of bloemrijke dijk) en beheerkosten (beperkte herstelkosten vanwege erosie bij lichte golfklappen).



Figuur 12: bekleding van uniforme dikte met drainagelaag (links) en wigvorm (rechts).

Om afschuiven te voorkomen kan gekozen worden voor een doorlatende laag, die de waterdruk in de toplaag reduceert. In dat geval is bij de teen elke circa 50 m een afvoer nodig, zodat de drainagelaag het water ook "kwijt" kan. Uitgaande van een afdeklaag van 0,8 m en een goed doorlatende laag van uiterst grof zand ($M63 \geq 420 \mu\text{m}$, silt < 5% en organische stof < 1,5%) van minimaal 0,3 m dik, is in dat geval de toplaag 0,5 m dik. De toplaag mag ook dikker gekozen worden zolang de drainagelaag minimaal 0,3 m dik blijft. Afhankelijk van de lokale omstandigheden (waterstandsbewegingen) dient de drainagelaag dikker te worden gekozen. Een berekening vergelijkbaar met die voor opdrukken van steenzetting is daartoe benodigd.

Een alternatief voor de drainagelaag is het plaatsen van een zandmatras of een geocomposiet drainagemat op de GCL.

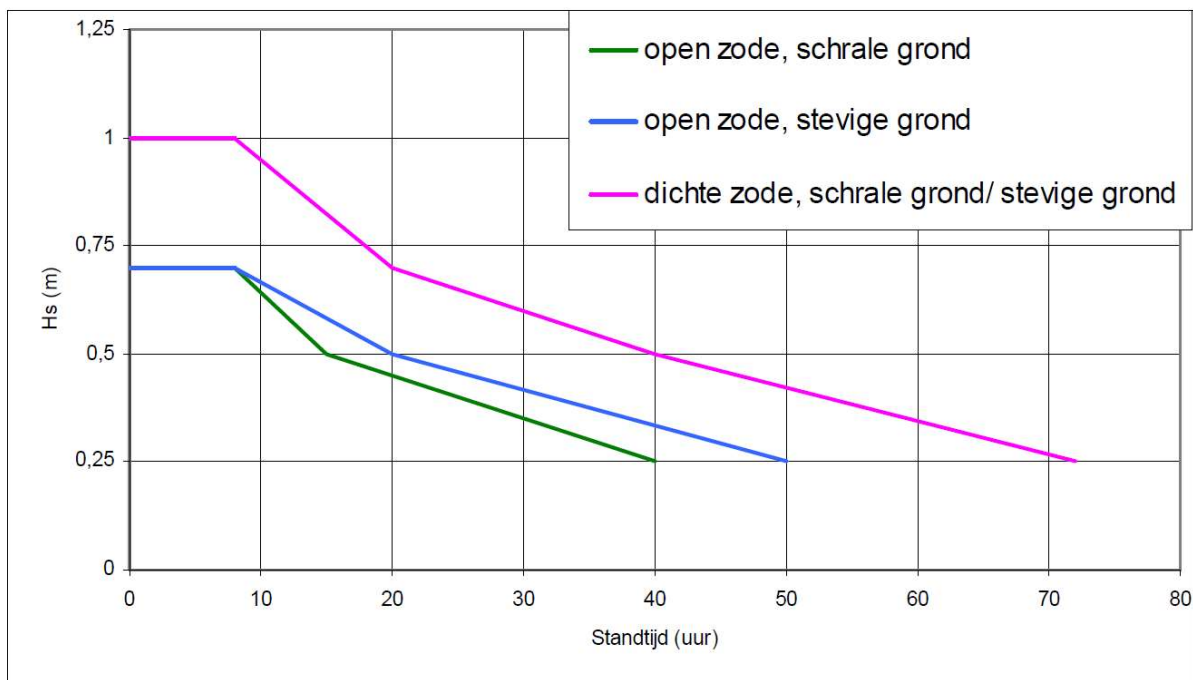
In alle gevallen dient de stabiliteit van geotextielen onderling en de daarop aanwezige laag substraat met berekening aangetoond te worden.

5.3.4 Erosiebestendigheid (GEBU, GEKB)

Grootschalige erosie van de afdeklaag kan ontstaan door overbelasting van de grasmat (geaccepteerd als dit boven norm is), of doordat het beheer en onderhoud niet op orde is en noodmaatregelen falen. De kans op het ontstaan van deze omstandigheden is minimaal, omdat:

- Het beheer afgestemd is op de grondsoort in de afdeklaag en het beheer erop gericht is om een gesloten grasmat te verkrijgen (dit zal vaker wel lukken dan niet);
- De belastingen op rivierdijken vaak klein zijn (in vergelijking met zee en meren);
- Drijfvuil op dijkwaluds tijdens hoogwaterperioden wordt verwijderd, om kosten voor herstel van afslagranden te voorkomen.

Reststerkte wordt uitgedrukt in standtijd. De reststerkte van de toplaag en afdeklaag is de tijd die het duurt om deze lagen over de volledige dikte te laten eroderen ofwel de tijd dat deze lagen weerstand bieden aan de belastingen. Deze is afhankelijk van de zodekwaliteit en grondeigenschappen. Bijvoorbeeld bij een open grasmat (ontstaan door bijvoorbeeld meerdere droge jaren achtereen) en een golfhoogte (H_s) groter dan 0,7 m, kan na enige tijd erosie ontstaan.



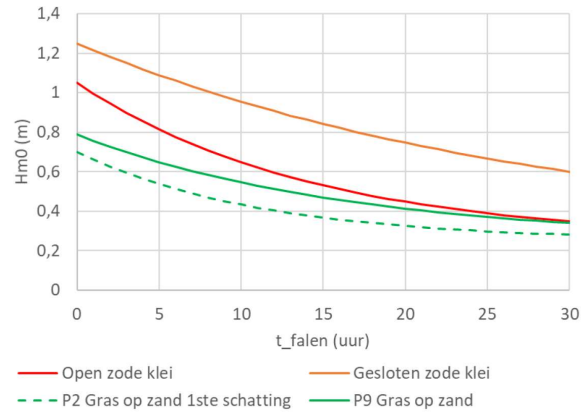
Figuur 13: standtijd toplaag per significante golfhoogten, zodekwaliteit en grondsoort (bron: ref 19).

De resultaten van de proeven op de grasmat op zand van de Vechtdijken nabij Zwolle wijzen erop dat de grasmat over het algemeen sterker is dan verwacht. Overslag lijkt tot debieten van meer dan 10 l/m/s prima te verdedigen.

Bij de golfklapproeven op een gesloten grasmat is een onverwachte sterkte gemeten, waarbij sterkte van een inspoelingslaag (podzollaag) en slemp bepalend lijken te zijn.

De standtijd bij een golfhoogte (Hm0) van circa 0,5 m is een halve dag en bedraagt bij 0,38 m een hele dag.

Bij een golfhoogte van $Hm0 < 0,25$ m is de sterkte van een open of gesloten grasmat niet meer relevant volgens de Schematiseringshandleiding grasbekledingen, omdat de standtijd veel langer is dan de belastingduur.



Figuur 14: standtijdlijnen (bron: Eindadvies beoordeling gras op zandbekledingen, Deltares januari 2022).

Als deze reststerkte (ofwel standtijd) korter is dan de belastingduur (storm en hoog water) dan kan de GCL bloot komen te liggen en moet er aanspraak worden gemaakt op de reststerkte van de GCL (zie §5.3.6).

5.3.5 Voorkomen graafschade aan de GCL

Graafschade kan ontstaan door menselijk handelen (bijvoorbeeld bij het leggen van kabels of leidingen en aanbrengen van bouwwerken) of door grotere woeldieren (zoals dassen en beverratten). Muizen en mollen graven minder diep en zullen normaliter de GCL op 1 m -mv niet beschadigen.

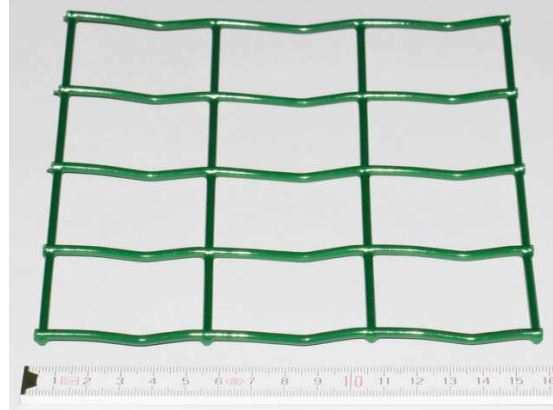
Graafschade is te voorkomen door zorgvuldig beheer van de waterkering middels vergunningverlening en een voldoende hoge schouwfrequentie gekoppeld aan herstelmaatregelen. Wanneer dit om een bepaalde reden (zoals ligging in een natuurgebied of op een afgelegen industrieterrein) niet tot een voldoende veilige situatie leidt, kan graafschade aan de GCL voorkomen worden met een laag van grindhoudend zand (Figuur 15) voor kleine woeldieren (bijvoorbeeld muizen en mollen) of met "bevergaas" (zie Figuur 16) voor grotere woeldieren.

Bevergaas is zondermeer bestand tegen woeldieren alsook tegen handmatig graafwerk. Gaas of grindhoudend zand is niet bestand tegen machinaal graafwerk, maar de signaalwerking wordt voldoende geacht om grote graafschades te voorkomen.

Grindhoudend zand heeft tegen bevers geen effect blijkt uit ervaringen in Duitsland. Een bestorting met stenen sortering 5-40 kg wordt weggegraven. Zowel bevers als muskusratten graven de ingang van het hol onder de waterlijn, waardoor voor schaarlijk een extra bescherming nodig is met een korte damwand of zwaardere bestorting (vanaf sortering 10-60 kg). Toepassing van steenslag heeft, omdat het ook als drainagelaag werkt, als nadeel dat de grasmat droogtegevoeliger kan worden. Het voordeel is dat de afdeklaag minder gevoelig wordt voor afschuiving (ook ten opzichte van een drainagelaag van grindhoudend zand) en de dikte geoptimaliseerd kan worden.



Figuur 15: aanbrengen grindhoudend grof zand (Kinzig dijken 2001).



Figuur 16: voorbeeld bevergaas (ofwel Biber Gitter).

5.3.6 Blootliggend GCL

Uitgangspunt voor de GCL en het behoud van de afdichtingsfunctie is dat tijdens de levensduur de GCL bedekt blijft met een stabiele afdeklaag. Een GCL-product is in de basis niet ontworpen om over langere periode blootgesteld te worden aan directe hydraulische krachten (stroming/golven). Belangrijk hierbij is dat hydraulische belastingen zeer dynamisch kunnen zijn en ook kunnen leiden tot combinatie met andere mechanismen (lokaal afschuiven deklaag).

Als de reststerkte korter is dan de belastingduur (storm en hoog water) dan kan het GCL bloot komen te liggen en moet er aanspraak worden gemaakt op de reststerkte van het GCL. Let op dat de locatie van de erosie op het talud opschuift met het opkomende water met mogelijk ook de toenemende golfhoogte. Ook kan de erosielocatie boven de waterlijn zich over een groter gebied uitstrekken door instabiliteit van de afdeklaag op een hoger niveau door ondermijning of het steiler worden van het talud.

Het blootliggen van de GCL op zich is geen probleem, omdat de minimale sterkte-eisen een voldoende grote garantie geven op niet scheuren door golfklappen. Golfaanval proeven in een golfgoot bevestigen dit in ieder geval voor een zwaarder type GCL (BZ 13-B, zie §3.1.2 op pagina 32). Andere faalmechanismen kunnen wel optreden. Het is voor veel situaties mogelijk om in het ontwerp en uitvoering hiermee rekening te houden. De volgende subparagrafen beschrijven de mogelijk optredende faalmechanismen en de bijbehorende maatregelen.

5.3.6.1 Opzwellen GCL

Bepaalde lichte typen GCL's kunnen door blootliggen kapot zwellen. Mede om die reden zijn er (met zand) verzwaarde typen in de handel bijvoorbeeld de BZ 13-B (Figuur 21). Bij blootliggen gelden de volgende richtlijnen voor de sterkte van niet verzwaarde typen:

- Bij herstel van de afdekking binnen een dag is de sterkte ongewijzigd ten opzichte van de oorspronkelijke situatie;
- Bij herstel na één droog-nat cyclus (orde grootte een week) is de sterkte in beperkte mate aangetast;
- Bij herstel na meerdere droog-nat cycli (orde grootte maanden) is de sterkte in hoge mate aangetast en moet tot vervanging over worden gegaan.

5.3.6.2 Oplichten en opklappen GCL op buitentalud

Oplichten of opklappen (golfklapzone en oploopzone) kan optreden als de stroming en/of golven onder een blootliggend GCL kunnen komen. De plaatsing van GCL's is in de taludrichting altijd verticaal. De overlappen moeten dan "bovenstroom op benedenstrooms" gelegd worden, zie Figuur 17 (positieve overlap). Uit een stroomgootonderzoek is gebleken dat de kritieke stroomsnelheid voor een "stroom happende" overlap in de orde van 0,3 – 0,7 m/s is, afhankelijk van het gewicht en stijfheid van de GCL (type) en het watergehalte [ref 23]. Dergelijke stroomsnelheden kunnen niet worden uitgesloten in het winterbed van de rivier en daarom is aanleg volgens Figuur 17 (zie pagina 61) verplicht.

Benedenstrooms van obstakels, bijvoorbeeld taludtrappen of steigers, kunnen bij grote stroomsnelheden turbulenties ontstaan die trek- of liftkrachten uitoefenen op een GCL. In die situaties wordt aanbevolen de overlappen te krammen of de GCL aan het niet-waterkerend object (NWO) te bevestigen.

Scheef invallende golven tegen de stroomrichting in zouden ook bij positieve overlappen nog steeds onder het blootliggende GCL kunnen aangrijpen. De volgende situaties kunnen onderscheiden worden (Hs = golfhoogte en u = stroomsnelheid):

- $H_s < 0,2$ m : geen aanvullende maatregelen. De golven zijn te klein om de GCL's te kunnen oplichten;
- $0,2$ m $\leq H_s < 0,5$ m en $u < 1$ m/s : Kies voor een verzaard GCL bijvoorbeeld de BZ 13-B (Figuur 21);
- $0,2$ m $\leq H_s < 0,5$ m en $u > 1$ m/s : geen aanvullende maatregelen, want de stroming drukt de GCL als het ware aan. De golven zijn te klein in combinatie met de stroming om de GCL's te kunnen liften.
- Overige situaties : fixeer de overlappen met krammen of ankers.

NOOT: De in deze subparagraaf genoemde waarden en maatregelen berusten op expert judgement en behoeven nader onderzoek en onderbouwing (zie ook ENW 22-05) als er gerede kans is dat de toplaag bezwijkt en tot op het GCL kan eroderen en het GCL door relatief grote golven (met name tegen de stroomrichting in) aangevallen kan worden.

5.3.6.3 Oplichten door drukverschillen op buitentalud

Oplichten van een blootliggend GCL door drukverschillen kan optreden door statische overdruk, wanneer de freatische lijn in de dijk hoger is dan de stil water lijn. Specifiek kan dit mechanisme als dynamische overdruk optreden bij golfwerking wanneer de freatische lijn hoger ligt dan de stil water lijn minus de halve golfhoogte. De GCL wordt bij deze mechanismen omhoog gedrukt en controle op deze mechanismen moet dan ook plaats vinden. Voor het hele talud tot aan de hoogte van de freatische lijn en voor de gehele hoogwater periode (tijdens de opkomende en dalende waterstand) dient de analyse te worden uitgevoerd. Daarbij kan gebruik gemaakt worden van de methode gepresenteerd in §4.1.3.2 op pagina 37.

Ook de overlap kan opengedrukt worden en uitstromend water kan hier tot uitspoeling leiden van materiaal uit de dijk kern. Statische overdrukken op de overlap moeten te allen tijde worden voorkomen, omdat dit leidt tot ongewenste krachten op de GCL en migratie van kernmateriaal. Als alleen dynamische overdrukken kunnen optreden dan moet de overlap verankerd of gekramd worden ter voorkoming van migratie en uitspoeling van kernmateriaal.

5.3.6.4 Buitentalud (instabiliteit dijk kern)

Instabiliteit van de dijk kern onder golfbelasting kan optreden als de GCL bloot ligt en direct op zand is toegepast. De ondergrond moet daarom enige cohesie hebben en dit wordt bereikt door toepassing van een minimaal 0,75 m dikke laag zandige klei (> 8% lutum) of zandige leem ($M_{63} < 210 \mu\text{m}$ en silt > 25%) onder de GCL. Beiden verdicht tot 100% van de proctordichtheid aan te tonen met een éénpuntsproef. Het restrisico van het losliggen van de GCL, bij toepassing van 0,75 m cohesieve grond onder de GCL, is dat de dijk kern onder de GCL gaat vervormen onder invloed van de golfklappen. Daardoor kan er een extra trekspanning in de GCL komen met scheurvorming als gevolg. Deze gebeurtenis wordt gezien als calamiteit, die beheerst kan worden met noodmaatregelen. Hierop hoeft dus niet ontworpen te worden.

5.3.6.5 Erosie dijk kern onder GCL op binnentalud

Bij overschrijden van het kritieke overslagdebiet van de aangebrachte afdeklaag op het binnentalud kan ook hier de GCL bloot komen te liggen. De belasting is verticale uitstroming. De standaard GCL overlap van

0,3 m fabrieksmatig aangebracht tot 0,5 m handmatig in het veld aangebracht is afdoende om uitspoeling van kernmateriaal te voorkomen.

5.3.7 Vaststellen freatische lijn

In een conventioneel dijkontwerp wordt rekening gehouden met de belastingcombinaties verzadigde waterkering en verhoogde stijghoogte tijdens hoogwater (STBI, GABI en STMI) en verzadigde waterkering na val van hoogwater (STBU en GABU). De freatische lijn volgt uit het technisch rapport waterspanningen bij dijken (TRW) of uit grondwaterstromingsberekeningen en uit de te verwachten overslag.

5.3.7.1 Door GCL lagere freatische lijn

Bij een waterkering met een goed werkend GCL (waterdichtheidsfunctie) op een ondergrond van komklei afzettingen, zal de verzadiging van de dijk kern minder groot zijn. Het freatisch vlak kan dan lager worden geschematiseerd (bijvoorbeeld freatische lijn 1 m lager), waardoor er een aanzienlijk kleiner risico is op macro- en microstabiliteit. Hoeveel lager dit exact is, volgt uit de richtlijnen in het TRW en/ of grondwaterstromingsberekeningen.

5.3.7.2 GCL en lokaal hoge freatische lijn

Wanneer er echter sprake is van lekkage van de GCL op het bovenste deel van het buitentalud of op de (buiten)kruin, kan er sprake zijn van een onverwacht hoge freatische lijn (bijvoorbeeld 1 m hoger). Ook in het geval van een relatief goed doorlatende deklaag van bijvoorbeeld kleiig zand is dit mogelijk door kwel vanuit de ondergrond. Het scenario "hoge freatische lijn door falen GCL" dient bij het berekenen van macrostabiliteit binnen- en buitenwaarts in beschouwing te worden genomen. De kans op een significante stijging van het freatisch vlak moet hiervoor worden geschat. Daarbij dient ook het opdrukken van de bekledingslaag (door verhoogde waterdruk onder de GCL) in beschouwing te worden genomen (zie §5.3.8).

5.3.7.3 Invloed drainage

Aanwezigheid van een goed functionerende drainage bij de binnentoe houdt de freatische lijn lager (bijvoorbeeld 0,5 m). Dit mag als gunstig bijeffect meegenomen worden in de schematisatie voor STBU van het scenario "hoge freatische lijn door falen GCL".

Bij de beschouwing van STBI is het effect van de drainage anders en hoort dit in de basisschematisatie te zitten. Een niet werkende drainage dient als ongunstig bijeffect meegenomen te worden in de schematisatie voor STBI van het scenario "hoge freatische lijn door niet werkende drainage".

5.3.8 Stabiliteit bekledingslaag (GABU, GABI en STMI)

Bij een bepaalde combinatie van waterstand en bodemopbouw, is het mogelijk dat er sprake is van een hoge freatische lijn in de waterkering. Als gevolg daarvan kan een wateroverdruk in de kern ontstaan, die op de bekledingslaag een belasting geeft. Dit kan zowel het buitentalud als het binnentalud zijn. Ook kan er sprake zijn van een verzadigde afdeklaag, die minder weerstand tegen afschuiven heeft.

5.3.8.1 Invloed GCL op berekeningsmethodiek

Per faalmechanisme is vastgesteld hoe de rekenprincipes uit de Schematiseringshandleiding Grasbekleding worden beïnvloed door de GCL en daarmee de stabiliteit van de bekledingslaag bepaalt. Deze berekeningen zijn als voorbeeld uitgewerkt in de rekensheet bekledingen met GCL (zie Bijlage C). De sheet heeft het volgende toepassingsbereik:

- Dijken in het rivierengebied met doorlatende dijk kern. Golfklap en golfloop zijn niet opgenomen in de rekensheet;
- Met en zonder significant overslagdebiet (STMI versus GABI), voor GABU wordt dit onderscheid niet gemaakt;
- Voor rekenuitkomsten met een SF >1,0 en <1,5 wordt aanbevolen om controleberekeningen uit te voeren voor een representatieve doorsnede met een geavanceerd geotechnisch rekenmodel, zoals D-Stability en/of Plaxis. Hiermee wordt het lokale toepassingsbereik van de rekensheet vastgesteld.

Er zijn twee aspecten die de berekeningen doen afwijken van de schematiseringshandleiding Grasbekledingen: 1) onder de conventionele bekledingslaag van gras op klei is een GCL aangebracht en 2) er wordt gerekend met een in dikte toenemende bekledingslaag richting de binnenteen (vanwege de kans op opdrukken).

Ad 1

De GCL heeft effect op het volgende:

- Indringing vanuit de dijkern in de afdeklaag is niet mogelijk omdat verondersteld wordt dat de GCL nagenoeg waterdicht is;
- Omdat de GCL minder ruw is dan grond wordt er een reductie toegepast van 0,9 op de karakteristieke waarde van de hoek van inwendige wrijving ($\delta = 0,9 * \phi$ of conform productblad van leverancier) op het glijvlak direct boven of onder de GCL;
- Vanwege beperkte aanhechting van de grond op de GCL wordt er met een onzekerheidsfactor (op basis van ervaring) voor cohesie gerekend (factor $\gamma_{c;GCL} = 1,5$) in de afdeklaag op de GCL;
- Voor de GCL moet de maximaal waargenomen trekkracht worden beperkt tot een representatieve waarde van 4 kN/m. De werkelijke treksterkte van GCL's is op grond van materiaaleigenschappen veel hoger, maar deze treksterkte is nodig voor rekbeperking en installatiedoeleinden. Indien uit berekeningen blijkt dat de trekkrachten de bovenstaande waarde overschrijden, moeten aanvullende maatregelen worden genomen door een grip-laag aan te brengen boven op de GCL. Deze grip-laag kan bestaan uit een geogrid, die de trekkrachten overneemt en leidt naar een verankeringsseuf op de kruin van de dijk. Een geogrid boven de GCL zorgt ervoor dat de onderliggende afdichting wordt ontlast van trekkrachten. De aanpak voor het ontwerpen van deze griplaag is vergelijkbaar met de ontwerpaanpak voor stortplaatsen met folieconstructies op een steile helling.
- Een GCL moet worden ontworpen als afdichting zonder trekkrachten en spanningsvrije installatie. Geactiveerde trekkrachten zullen een negatieve invloed hebben op de prestaties van de waterdoorlatendheid en de ontwerplevensduur van het geocomposiet. Door specifieke omstandigheden met steilere hellingen, slechtere grondeigenschappen of waterdrukken kunnen trekkrachten worden waargenomen bij ontwerpberekeningen met bijvoorbeeld Eindig-Element-Model software (EEM).

Ad 2

De in dikte toenemende bekledingslaag heeft effect op het volgende:

- De vereenvoudigde schematisering van de bekleding uit de SH Grasbekledingen is losgelaten. In deze formules worden het aandrijvende gewicht en de weerstandbiedende krachten geschematiseerd met een afhankelijkheid van het verval, constante bekledingsdikte en taludhelling. De rekensheet gaat uit van twee taludhellingen, namelijk onder de bekledingslaag en het binnentalud. Dit leidt ertoe dat in de rekensheet wordt uitgegaan van werkelijke oppervlaktes in het dwarsprofiel om de berekeningen uit te kunnen voeren.

5.3.8.2 Invloed drainage binnenteen

Het is mogelijk om de hoge freatische lijn te voorkomen middels een drainage bij de binnenteen. En wanneer deze aantoonbaar goed functioneert, is er geen kans op microstabiliteit (STMI). Drainage vergt onderhoud en daarom geniet het de voorkeur om de bekledingslaag, zonder drainage stabiel te ontwerpen.

Afschuiven van de afdeklaag over de GCL dient ook bij toepassing van een drainage beschouwd te worden.

5.3.9 Zettingen

Zettingen kunnen leiden tot rek in geotextielen, die daar op zich goed tegen kunnen. De bentonietvulling zal echter meer doorlatend worden naarmate de rek toeneemt. Daarom mag de halve breukrek niet worden overschreden. Aandachtspunt vormen de locaties waar lokaal verschilzettingen worden verwacht.

5.3.10 Constructief falen (GABU en GABI)

Een GCL moet worden ontworpen als barrière zonder (noemenswaardige) trekkrachten en spanningsvrije installatie. Geactiveerde trekkrachten zullen een negatieve invloed hebben op de waterdoorlatendheidsprestaties en de ontwerplevensduur van het geocomposiet. Bij een juist ontwerp en rekening houdend met de onder §5.3.8 genoemde aandachtspunten zal structureel falen niet optreden.

Er kan ook sprake zijn van een overschrijding van de sterkte, na initiatie van een geotechnisch bezwijkmechanisme. Structureel falen kan dan alleen optreden door onbedoelde calamiteiten, zoals het wegspoelen van de deklaag (falen grasbekleding, geotechnisch afschuiven toplaag) of onbedoelde waterdrukken die hoger zijn dan in het ontwerp is ingeschat. In die gevallen zou de GCL onbedoeld blootgesteld kunnen worden, waarbij aanspraak wordt gemaakt op de rest-treksterkte van de afdichting. Deze situatie zou de duurzaamheid en de integriteit van het GCL-afdichtingssysteem kunnen aantasten. Indien onbedoelde blootstelling wordt waargenomen, is het raadzaam een deskundige op het gebied van GCL's in te schakelen om de duurzaamheid van het materiaal grondig te inspecteren. Met een dergelijke beoordeling kan worden vastgesteld dat na een calamiteit de GCL nog steeds intact is en kan blijven bestaan, gerepareerd moet worden of vervangen. Deze tweede orde falen is relevant wanneer het ongemerkt falen betreft en hoeft alleen als zodanig beoordeeld te worden.

5.3.11 Aanlegdiepte

5.3.11.1 Vorst-dooi, zout en droogte inwerking

Op de kruin dient de GCL tot een geringe diepte onder het hydraulisch belastingniveau (HBN) te worden aangebracht om een slecht doorlatende aansluiting te kunnen vormen met de erosiebestendige en slecht doorlatende kruinverharding. Alleen zo kan erosie van de kruin met overloop als gevolg worden uitgesloten. Uitgaande van een kruinverharding van circa 0,3 m dik bestaat er daardoor een kans op vorst-dooi inwerking, want pas bij een diepte van circa 0,8 m is er in Nederland sprake van een vorstvrije diepte. Ook is er een kans op sterke uitdroging of zout, waardoor het zwelvermogen afneemt. Een achteruitgang van het waterremmend vermogen dient in het ontwerp te worden verdisconteerd. Een beschouwing van de ligging van de freatische lijn bij hoogwater met een aangetast GCL in relatie tot de stabiliteit is minimaal nodig.

Naar vorst-dooi inwerking is onderzoek gedaan, waaruit naar voren komt dat de zwel- en doorlatendheidseigenschappen van de GCL verminderen na meerdere cycli. De afname van zwel capaciteit en toename van doorlatendheid is echter beperkt.

De situatie van zeer sterke uitdroging is de meest kritische situatie voor de prestatie van het GCL. Derhalve wordt in BRAD16 een dekking van 1,0 m aanbevolen om uitdroging te voorkomen. Het is echter onbekend of 1,0 m dekking, bij steeds vaker voorkomende droge zomers, voldoende is op een dijkruin ruim boven de grondwaterstand. Bovendien vormt een dekking van 1,0 m op de kruin een praktisch probleem in relatie tot een erosiebestendige aansluiting vlak onder HBN.

5.3.11.2 Dekking en aansluiting op kruinverharding

De GCL op circa 1,0 m diep aanleggen onder de volledige wegconstructie (verharding, puin en zand) geeft kans op een slecht erosiebestendige en te doorlatende aansluiting, tenzij de wegconstructie in zijn geheel boven HBN is gelegd. De voorkeur gaat uit naar een beperking in de dekking op de kruin in combinatie met de aanleg van de GCL op of boven WBN.

5.4 Aansluitingen

De ervaring leert dat op gebrekkige aansluitingen vaak beschadigingen optreden aan waterkeringen tijdens hoogwater, die in potentie kunnen leiden tot een doorbraak. De gebrekkige aansluitingen vinden hun oorsprong in fouten tijdens de uitvoering maar ook in het ontwerp.

5.4.1 Overgang GCL's

Op de aansluiting van de éne op de andere GCL, moet dezelfde lage waarde van de doorlatendheid worden gehaald aan te tonen met laboratoriumproeven. Van belang is dat er een goede hechting ontstaat in de

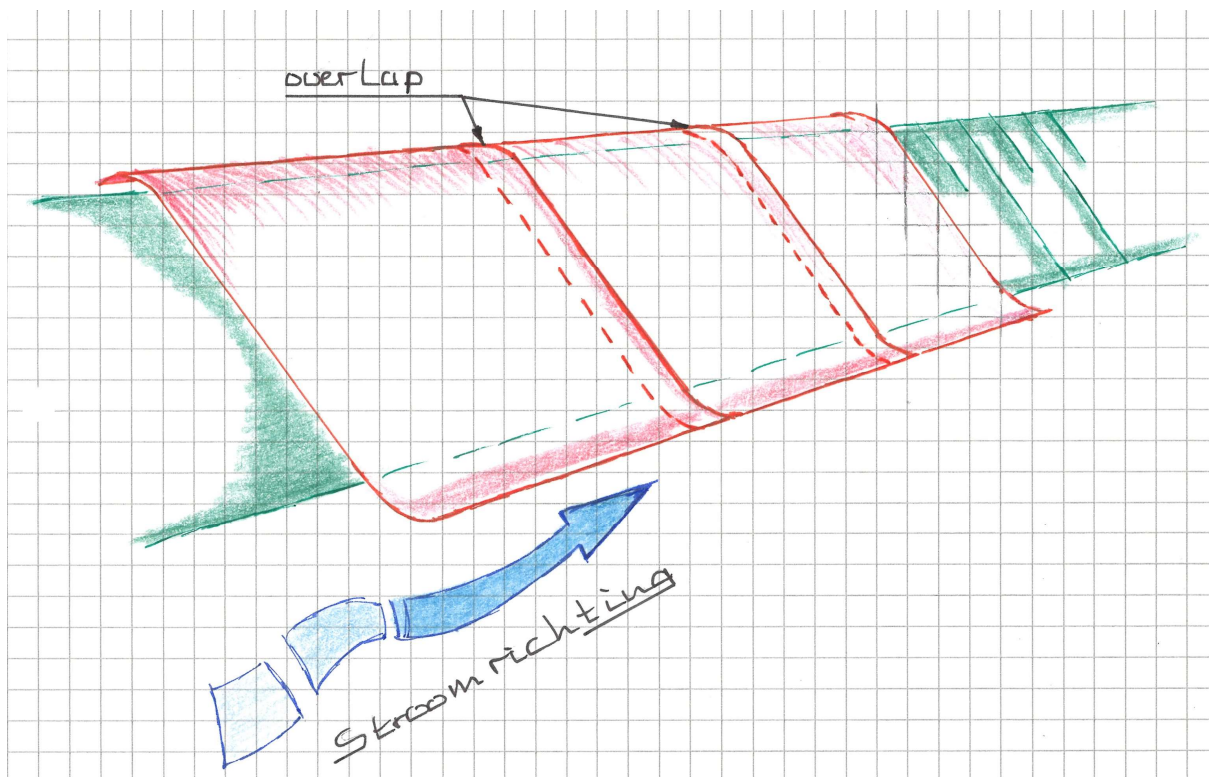
overlap met een orde grootte van 0,3 m (fabrieksmatig geïmpregneerd) tot 0,5 m (in het veld aangebracht hechtmiddel).

Het heeft de voorkeur de rand van de GCL te impregneren in de fabriek, met hetzelfde bentonietpoeder dat ook tussen de geotextielen wordt toegepast. Hiermee wordt een zelfklevende en tegen elkaar zwellende overgang gerealiseerd. Zeer belangrijk is dat de banen schoon op elkaar komen te liggen. Hiertoe zijn de randstroken van de bentonietrollen soms voorzien van een beschermende folie, die bij het leggen wordt verwijderd vlak voordat de banen op elkaar worden gelegd. Bij het aanbrengen is het zeer belangrijk dat de bentonietmatten goed op elkaar aansluiten. Hierbij mogen er geen visuele openingen zijn op de overgangen tussen de banen, voordat de afdekgrond wordt aangebracht.

Het aanbrengen van een hechtmiddel (bijvoorbeeld bentonietpasta) tijdens het leggen, brengt onzekerheid met zich mee, doordat de omstandigheden buiten minder goed beheersbaar zijn.

Een overlap van 1,0 m is nodig bij een aansluiting van GCL op klei of aansluiting zonder hechtmiddel (bijvoorbeeld doorzetten van zelfde GCL vanuit voorland op talud). Dit zijn in de Duitse praktijk gehanteerde waarden.

Om de kans op omklappen van de GCL door langsstroming te minimaliseren, dient een positieve overlap te worden aangebracht ten opzichte van de stromingsrichting (zie Figuur 17).



Figuur 17: positieve overlap.

Uit een stroomgootonderzoek is gebleken dat de kritieke stroomsnelheid voor een “stroom happende” overlap in de orde van 0,3 – 0,7 m/s is, afhankelijk van het gewicht en stijfheid van de GCL (type) en het watergehalte [ref 23]. Dergelijke snelheden kunnen niet worden uitgesloten in het winterbed van de rivier en daarom is aanleg volgens Figuur 17 verplicht.

In de Duitse praktijk wordt bij kritische overlopen, waar uitspoeling een risico is, ook wel een extra GCL, van een ander en lichter type onder de overlopen gelegd. Dit voorkomt uitspoeling direct bij de overlap en geeft de gewenste extra zekerheid.

5.4.2 Verankering en inklemming

Bovenin op de kruin is een verankering vereist in de vorm van een inklemming in de grond. Verschillende configuraties zijn mogelijk. In de meest eenvoudige configuratie waarbij de GCL strak wordt getrokken (zie foto op voorzijde) is de minimum inklemmingslengte geen zorgpunt. Op de kruin kan de GCL vlak worden gelegd onder de onderhoudsstrook op de kruin of de afdeklaag, zoals veelvuldig toegepast in de Duitse praktijk.

Onderaan in de buitenteen is een inklemming nodig om een “ondoorlatende” overgang te krijgen met de klei-deklaag of de kleilaag van het voorland (dit kan ook verticaal, zie foto Bijlage E), of een overlap (van minimaal 1 m) met een GCL in het voorland. Bij (verticale) inkassing in het bestaande dijklichaam of deklaag, moet bij aanvullen gewaakt worden voor het ontstaan van ongewenste trekspanningen in de GCL.

Aan de boven- en benedenstroomse beëindiging van de GCL in dwarsrichting op de dijk, moet een overgang gemaakt worden waarbij de GCL in de aangrenzende kleilaag in een kleikist wordt aangebracht.

Er geldt een praktische maat voor de minimum inklemmingslengte van 2,0 m onder de kruinverharding en in het kielspit bij de buitenteen en onder de boven- en benedenstroomse randen.



Figuur 18: voorbeeld van een eenvoudige verankering op de kruin.

De GCL's worden in verticale banen van onder naar boven gelegd, zodat er geen horizontale overgangen op het talud aanwezig zijn. De top van het GCL ligt boven de ontwerpwaterstand plus een projectspecifieke marge voor onder andere zetting en klink en uitvoeringstoleranties.

5.4.3 Overgangen en aansluitingen

Benedenstrooms van obstakels, bijvoorbeeld taludtrappen of steigers, kunnen bij grote stroomsnelheden turbulenties ontstaan die trek- of liftkrachten uitoefenen op de GCL. In die situaties wordt aanbevolen de overlappen te krammen (zie voorbeelden in Bijlage E).

Aansluiting op kunstwerken en NWO's kunnen bijvoorbeeld met een kleikist worden gerealiseerd. De GCL wordt dan ingeklemd in de klei die aansluit op kunstwerk of NWO. Een andere mogelijkheid is de GCL bevestigen (lijmen of klemmen) op een betonnen of gemetselde wand. Daarbij moet rekening worden gehouden met eventuele verschillen in deformatie tussen het starre object en het aansluitend grondlichaam.

5.4.4 Kabels en leidingen

Het is raadzaam om rekening te houden met het leggen van kabels en leidingen in bepaalde zones (bijvoorbeeld de binnenkruin) en daar de GCL dieper aan te leggen. Hiermee wordt beschadiging voorkomen en is er in de praktijk een veel minder grote belemmering voor het (ver)leggen van kabels of leidingen.

5.5 Ontwerplevensduur en uitbreidbaarheid

Ontwerplevensduur

Van de moderne GCL's kan een levensduur worden aangetoond van 100 jaar en het is aan de ontwerper/beheerder welke levensduur hij eist (bijvoorbeeld ter beperking van de vervangingsbehoefte). De bentonietmatten zullen niet gedurende de levensduur degenereren (uit elkaar vallen) als wordt voldaan aan de eisen in Bijlage D.

Uitbreidbaarheid

GCL's zijn uitbreidbaar, bijvoorbeeld als de dijk kruin wordt verhoogd of hydraulische weerstand in het voorland uitgebreid moet worden. De werkwijze is globaal als volgt:

- Vrijgraven van de GCL op de plaats waar uitbreiding nodig;
- Rand van de GCL is schoonmaken, zodat deze vrij is van grondresten
- Aanbrengen van bentonietpasta op een circa 0,5 m brede "plakrand";
- Plaatsing van het nieuwe stuk GCL met 0,5 m overlap.

Voor verdere uitvoeringsinstructies bij uitbreiding wordt verwezen naar hoofdstuk 6 op pagina 64.

6 UITVOERING

De aannemer is verantwoordelijk voor de uitvoering, dat wil zeggen dat de dijk met GCL gerealiseerd wordt conform het ontwerp. Afhankelijk van de contractvorm is de opdrachtnemer of de opdrachtgever verantwoordelijk voor het ontwerp. Het is verstandig om vanuit het ontwerp, ook met het oog op de toekomstige beoordeling en het beheer, kritieke punten en aandachtspunten voor de uitvoering mee te geven. Enkele specifieke punten worden in de het navolgende aangestipt.

Om risico's te beheersen moet er een uitvoeringsprotocol geschreven worden waarin verificaties staan voorgeschreven. In dit uitvoeringsprotocol dient ingegaan te worden op aandachtspunten beschreven in dit hoofdstuk.

Deze handreiking is de basis en daarnaast kunnen de BRAD15 en 16 geraadpleegd worden, die in Duitsland door de BAW zijn opgesteld. Hierin zijn uitvoeringsinstructies en eisen opgenomen, die als informatief gelden voor de toepassing van GCL's. Er bestaan instructies voor onder meer het maken van de overlappen, afdekking en reparaties. Tevens bestaan er vanuit leveranciers gedetailleerde installatie-handleidingen.

6.1 Relatie faalmechanismen en uitvoering

Voor de beschrijving van gebeurtenissen wordt verwezen naar Tabel 8.

Tabel 13: overzicht faalmechanismen en uitvoering.

locatie GCL	mechanisme	# gebeurtenis	aanbeveling uitvoering
voorland	STPH	n.v.t.	zie §6.2.2
buitentalud	STBU	U9 (woeldieren)	zie §6.4.1 en §6.4.2
	GEBU	U10 (substraat), U3 (overlap)	zie §6.2.3, §6.4.1 en §6.4.2
	GABU	U4 (stabiliteit bekleding/wigvorm)	zie §6.4.1 en §6.4.2
kruin en binnentalud	GEKB	U10 (substraat), U3 (overlap), U5 (hoogte), U2 + U7 (inklemming)	zie §6.2.3, §6.4.1 en §6.4.2
binnentalud	STBI	U5 (hoogte), U9 (woeldieren)	zie §6.4.1 en §6.4.2
	STMI	U11 + U12 (drainage)	zie §6.4.1 en §6.4.2
	GABI	U4 (stabiliteit bekleding/wigvorm)	zie §6.4.1 en §6.4.2
buitentalud en binnentalud	ongemerkt falen	U1 (vlakheid), U8 (sterkte), U6 (afdeklaag), U2 + U7 (inklemming), U13 (vervorming)	zie §6.2.3, §6.4.1 en §6.4.2

Ongemerkt falen behelst de situatie waarbij bijvoorbeeld door een niet opgemerkte externe oorzaak of onvoorzien degradatie proces een defect aan de GCL is opgetreden.

6.2 Uitvoering in de droge

6.2.1 Afwerkeisen onderlaag

Een GCL dient geïnstalleerd te worden op geprofileerde onderlaag, waarbij abrupte overgangen niet zijn toegestaan (> 25 mm). De ondergrond moet vrij moet zijn van scherpe delen als puinresten, keien, uitstekende wortels, houtresten, et cetera. De ondergrond dient draagkrachtig te zijn (ook voor het te gebruiken materieel), waarbij er geen significante spoorvorming mag optreden. De ondergrond dient droog te zijn (vrij van water, geen plasmvorming) en bij taluds mag er dus geen sprake zijn van uittredend grondwater.

Het afwalsen is niet noodzakelijk, omdat in de praktijk de ondergrond voldoende vlak kan worden “getrokken”. Holle ruimtes onder of boven de GCL zijn niet toegestaan, omdat de GCL kapot kan zwellen door het ontbreken van tegendruk.

6.2.2 Positionering GCL

Voor aanvang van het werk dient er een legplanktekening beschikbaar te zijn. Hierdoor is de controle van de bouw voor alle partijen (aannemer en opdrachtgever) goed te toetsen. Het legplan vormt samen met de controles in de uitvoering en de kwaliteitscontrolerapportage de waarborg voor een juiste positionering.

In Figuur 19 is een voorbeeld van een geschikte wijze van afrollen gegeven.

De bocht om gaan kan bijvoorbeeld door middel van het aanbrengen van vouwen in de GCL of het overlappend en met hechting (zie §5.4.1) aanbrengen van stroken.



Figuur 19: uitrollen van GCL in voorland (foto: Wiel aan de Boom).



Figuur 20: de bocht om met GCL in voorland (foto: Wiel aan de Boom).

Het aanbrengen in droge omstandigheden is van groot belang vanwege het risico op het (ongewild) zwellen van de bentonietmatten zonder afdekking. Bentonietmatten die zijn gelegd, dienen dezelfde dag altijd afgedekt te worden met een laag afdekgrond van minimaal 0,3 m alvorens de bentonietmat hydrateert tot > 50%. De totale afdekking boven op de mat dient aangebracht te worden binnen 2 weken. De afdeklaag dient gelijkmatig te worden aangebracht met rupskraan of bulldozer, waarbij het belangrijk is dat de grond wordt aangebracht in de richting van de afdekkende overlap. Een dergelijk werkwijze is belangrijk ter voorkoming dat overlappen bij het aanbrengen met grond worden opengedruwd, waardoor er lekkages zouden kunnen ontstaan.

Op een gelegd product mag niet gereden worden en eventueel hierop lopen of andere activiteiten dienen ook zoveel als mogelijk vermeden te worden. Het aanbrengen van minimaal 0,3 m grondafdekking geeft de mogelijkheid voor belasting met een voertuig met een breed rupsonderstel die de krachten goed kan spreiden (bulldozer, graafmachine). Desalniettemin dient goed bekeken te worden dat berijden geen effect heeft op de GCL. Een kritische manoeuvre kan zijn het schranken van rupsvoertuigen, wat diepere spoorvorming kan veroorzaken. Aanbeveling is dan ook te werken met een afdekking van minimaal 0,5 meter. Bij een totale laagdikte van 0,8 m is een wielbelasting toegestaan door middel van vrachtwagens.

Bij lichte regenval op een vlak profiel zonder afdekking zal 2,5 l/m² zorgen voor 50% hydratatie in 24 uur. Indien onverhoopt tijdens de uitvoering sprake is van regenval dienen bloot liggende banen te worden afgedekt.

6.2.3 Verwerken afdekgrond

Om doorworteling van grassen en kruiden te kunnen garanderen, mag de conusweerstand in het substraat niet hoger zijn dan 1,5 MPa in de eerste 0,1 m en daaronder niet hoger dan 2,5 MPa (ervaringscijfers van dijkbeheerders en gras deskundigen). Dit kan worden vastgesteld met handsonderingen tijdens de uitvoering.

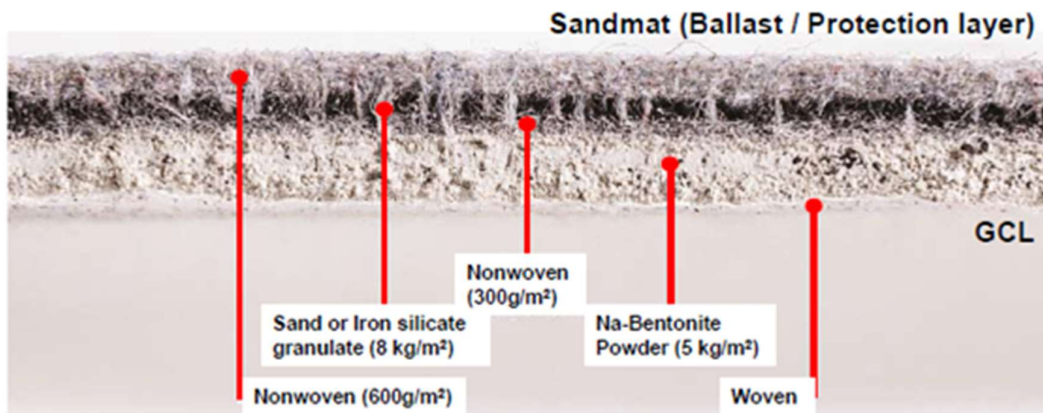
Bij geschikte grond is bemesting niet nodig, maar bij grootschalig grondverzet komt er ook vaak grond vrij waarvan de voedingstoestand niet bekend of twijfelachtig is. In dat geval is een bemestingsadvies van een deskundige onmisbaar.

In grond die lang (meerdere weken tot maanden) in een depot aanwezig is geweest, ontstaat een zuurstofarm milieu. Hierdoor neemt de hoeveelheid bodemleven af en is sprake van “dode grond”, waarop een grasmat niet wil aanslaan. Het is raadzaam om in de bovenste laag substraat alleen “verse” grond toe te passen.

6.3 Installeren in den natte

De GCL wordt geleverd met een zeer beperkte hydratatie (10% tot 15%). In den natte zal dit binnen een paar uur gestegen zijn tot 50%. Om het risico op zwellen en squeezing te beheersen dienen speciale verzwaarde (bijvoorbeeld de BZ 13 B van Naue, zie Figuur 21) GCL types toegepast te worden, die daardoor geschikt zijn voor plaatsing onder water. De banen met geïmpregneerde randen worden overlappend over elkaar gelegd, zodat deze onder water tegen elkaar aan zwellen tot een doorlopende afdichting. Bij installatie onder water kan de overlap niet worden vervaardigd met losse bentoniet.

Door het verzwaren van de mat met extra vlies en zandlaag, heeft de mat ook een grotere robuustheid. Hierdoor is het mogelijk om direct op de GCL aan te vullen met grotere gradaties, als bijvoorbeeld een breuksteen sortering 5-40 kg.



Figuur 21: gedetailleerde weergave doorsnede type BZ 13-B bentonietmat (totaal 14 kg/m²).

6.4 Kwaliteitscontrole

6.4.1 Tijdens uitvoering

De werkwijze voor het aanbrengen van de GCL dient aantoonbaar gecontroleerd te zijn. Daarom dient op de volgende momenten, gedurende de uitvoering, een verificatie plaats te vinden (niet elke controle is specifiek voor GCL's):

- Tijdens de levering op het werk dient het certificaat van de leverancier in ontvangst te worden genomen en dient gecontroleerd te worden of certificaat en geleverd product met elkaar in overeenstemming zijn, alsmede overeenkomen met het ontwerp.
- Vóór het afdekken van de GCL dient nagegaan te worden of (vanwege gewijzigde inzichten alsnog) een woelwierbescherming nodig is door dit onderwerp te adresseren in de bouwvergadering en vast te leggen in het verslag;
- Alvorens de GCL wordt geplaatst dient nagegaan te worden of de verdichting van de dijk kern, geometrie en vlakteligging conform ontwerp is. Dit dient aangetoond te worden met opgemeten dwarsprofielen en verdichtingsproeven;
- Na het aanbrengen van de kruinverharding dient met ongeroerde monsters en laboratoriumproeven geverifieerd te worden of dikte, sterkte en waterdichtheid voldoen aan het ontwerp;
- Na het aanbrengen van de afdeklaag op de taluds dient nagegaan te worden of de geometrie conform ontwerp is. Dit dient aangetoond te worden met opgemeten dwarsprofielen;
- Vóór inzaaien van de afdeklaag op de taluds dient nagegaan te worden of de voedingstoestand conform ontwerp is. Dit dient aangetoond te worden met laboratoriumanalyses.

De uitvoeringsmethode dient zodanig te zijn dat de GCL schadevrij wordt geïnstalleerd. Na installatie dient inspectie plaats te vinden van overlappen, eventuele verbindingen, eventuele gebreken of installatiebeschadigingen. Foutief geïnstalleerde delen moeten worden gemarkeerd en gerepareerd. Reparaties moeten worden geïnspecteerd en goedgekeurd door een deskundige. Na inspectie en vastlegging dat een baan of meerdere banen zijn geïnspecteerd en goedgekeurd, kan de vereiste dikte grondaanvulling plaatsvinden. Aangezien aanleg, inspectie en afdekking hiermee systematisch op 1 dag uitgevoerd moeten worden, dient dit goed georganiseerd te worden ter voorkoming van stagnatie tijdens de uitvoering.

6.4.2 Kwaliteitscontrole rapportage

De volgende aspecten dienen in de kwaliteitscontrole rapportage vastgelegd te worden:

- Certificaten van de leveranties;
- Bouwverslagen waarin de uitvoeringsmethode van de GCL en eventuele woelddierbescherming aan de orde is gekomen;
- Bouwverslagen waarin de weersomstandigheden en/of aanleg in den natte in relatie tot squeezing aan de orde zijn gekomen;
- Vergelijking van de revisieprofielen (opgemeten direct voor plaatsing GCL en na afwerken afdeklaag) met het ontwerp, zodat aantoonbaar is dat de afdeklaag minimaal 0,8 m dik is en de minimale aanleghoogte van de waterkering aanwezig is;
- Een fotorapportage van de uitvoering, met hierin visueel vastgelegd dat de overlappen conform specificaties, installatiehandleiding en het ontwerp zijn aangebracht;
- Een fotorapportage van het realiseren van de inklemming, zodat visueel vastgesteld kan worden dat er in het kielspit bij de buitenteen en onder de verharding op de kruin er 1,0 m GCL als overlengte voor inklemming is aangebracht;
- Een fotorapportage van het realiseren van de eventuele drainage aan de binnenteen en aanbrengen van de GCL op het binnentalud, zodat visueel vastgesteld kan worden dat er een drainage aanwezig is en de GCL conform het ontwerp is aangebracht (al dan niet tot in de binnenteen);
- Certificaten en controles van de aangebrachte kruinverharding en afdeklaag.

7 BEOORDELING

Na realisatie van een met deze handreiking ontworpen waterkering met GCL, zal periodiek een veiligheidsbeoordeling uitgevoerd moeten worden. Beoordelen is een activiteit waarin ook ervaringen van dijkbeheerders een plaats hebben. Maar bij innovaties is er dikwijls een gebrek aan ervaring, waardoor er altijd een onbekend risico blijft bestaan (zowel gedrag bij hoogwater als uitvoeringskennis). Toepassing van GCL's is op zich geen innovatie en dus spelen er weinig onbekende risico's. De innovatie en dus onbekendheid zit vooral in de toepassing van de GCL met zandige afdekgrond (voorzien van een grasmat) als bekleding en de invloed daarvan op de erosiebestendigheid. Een andere innovatie betreft de toepassing van de GCL over een grote breedte als pipingmaatregel (kwelweg > dijkbasis). De beoordeling van de bekledingssporen STPH, GEBU, GABU, GEKB en GABI is daarom uitgeschreven, alsmede een nieuw spoor "ongemerkt falen GCL". De andere faalsporen sluiten aan op het WBI2017.

7.1 Relatie faalmechanismen en beoordelingsmethode

De beoordeling volgt dezelfde schematiseringskeuzes, die in §4.1 op pagina 35 zijn gemaakt, waardoor in veel gevallen naar bestaande WBI2017 voorschriften wordt verwezen. Voor enkele belastinggevallen en bezwijkmechanismen bestaat nog geen beoordelingsvoorschrift en daarvoor is een meer uitgebreid voorschrift opgesteld (zie Tabel 14). Voor de beschrijving van gebeurtenissen wordt verwezen naar Tabel 8 op pagina 42.

Tabel 14: overzicht faalmechanismen beoordeling.

locatie GCL	mechanisme	# gebeurtenis	beoordelingsvoorschrift
voorland	STPH	n.v.t. (niet wezenlijk anders dan bij het ingraven van een laag klei en daarom zijn er geen gebeurtenissen gedefinieerd)	schematiseringshandleiding piping, in combinatie met toelichting in §7.2.5
buitentalud	STBU	O13 + U9 + B6 (woelddieren), O15 en O16 (instabiliteit)	schematiseringshandleiding macrostabiliteit, in combinatie met toelichting in §7.2.1
	GEBU	O3 + U10 + B1 (substraat), O5 + U3 (overlap), B10 (schade)	zie §7.2.2
	GABU	O6 (drainagelaag), O7 + U4 (stabiliteit bekleding/wigvorm), O8 (wandwrijving)	zie §7.2.3
kruin en binnentalud	GEKB	O3 + U10 + B1 (substraat), O5 + U3 (overlap), O9 + U5 (hoogte), O11 + U2 + U7 (inklemming)	schematiseringshandleiding grasbekleding schematiseringshandleiding hoogte in combinatie met toelichting in §7.2.2
binnentalud	STBI	O9 + U5 (hoogte), O13 + U9 + B6 (woelddieren), O15 en O16 (instabiliteit)	schematiseringshandleiding macrostabiliteit en KPR factsheet werkwijze macrostabiliteit i.c.m. golfoverslag en toelichting in §7.2.1
	STMI	O1 + U11 + U12 + B9, O14 (drainage), B8 (schade)	schematiseringshandleiding microstabiliteit, in combinatie met toelichting in §7.2.4
	GABI	O6 (drainagelaag), O7 + U4 (stabiliteit bekleding/wigvorm), O8 (wandwrijving)	zie §7.2.3
buitentalud en binnentalud	ongemerkt falen	O2 + U1 (vlakheid), O4 + U8 (sterkte), O5 + U3 (overlap), O10 + U6 + B3 (afdeklaag), O11 + U2 + U7 (inklemming), O12, U13, B2, B4 (vervorming), B5, B7 (schade)	zie §7.2.6

Ongemerkt falen behelst de situatie waarbij bijvoorbeeld door een niet opgemerkte externe oorzaak of onvoorzien degradatie proces een defect aan de GCL is opgetreden.

7.2 Beoordelingsmethode

Het WBI2017 voorziet in berekeningsmethoden voor de standaard versterkingsmethoden van waterkeringen. Voor een waterkering met GCL gelden een aantal bijzondere situaties die in het volgende beschreven worden. Voor die situatie dient een Toets op Maat (ToM) uitgevoerd te worden.

7.2.1 STBU / STBI

In de beoordeling van macrostabiliteit buitenwaarts, die verder volgens de reguliere beoordelingsmethodiek verloopt, dient expliciet aandacht te zijn voor de ligging van de freatische lijn in de dijk kern (zie §5.3.7 op pagina 58). De volgende situaties dienen in ogenschouw te worden genomen:

- Bij een intacte GCL op buitentalud is de water-indringing in de dijk kern minder dan bij een gestructureerde laag grond op het buitentalud, waardoor uitdroging kan optreden. Voor zanddijken is dit niet relevant maar voor bijvoorbeeld boezemkade van veen verdient dit aspect nadrukkelijk aandacht;
- Bij een intacte GCL over de gehele dijk en goed werkende binnentoe drainage zal de freatische lijn lager (bijvoorbeeld 1 m lager) liggen, dan bij een conventionele kleibekleding;
- Is infiltratie via het buitentalud en/of de kruin mogelijk of functioneert de binnentoe drainage niet, dan ligt de freatische lijn hoger (bijvoorbeeld 0,5 m);
- Bij een intacte GCL op (het grootste deel van) het binnentalud infiltreert er geen water in de dijk. Hierdoor is voor de situatie met overslag een andere ToM (dan volgens de KPR factsheet, bron: ref 6) voor macrostabiliteit nodig;
- Bij kwel van onderaf of infiltratie via een "lekkende" kruinbekleding kan de waterstand in de dijk kern stijgen. Het samenvallen van deze situatie met vallend buitenwater dient voor de bekleding op het buitentalud altijd te worden beschouwd met een stabiliteitsberekening.

7.2.2 GEBU / GEKB

Door toepassing van gebiedseigen zandige grond, is er een grotere kans op verdroging en dat de kwaliteit van de grasmat achteruitgaat. Daarom dient in de beoordeling (met voorafgaande inspectie) plaats te vinden op de volgende punten:

- Is de grasmat fragmentarisch? Zo ja, dan de beoordeling voortzetten met geërodeerd veronderstelde afdeklaag op die locatie op het talud;
- Is het onderhoud(sbeleid) van de grasmat in balans met de aanwezige voedingstoestand en soortensamenstelling (verschralingsbeleid kan bijvoorbeeld onbedoeld leiden tot open plekken). Het beheerdersoordeel moet in deze leidend zijn en kan ondersteund worden met een bemestingsadvies;
- Zijn er voldoende droogteresistente doelsoorten in de omgeving aanwezig om als zaadbank te fungeren of moet hierin bijgestuurd worden?

Er is momenteel geen μ en σ voor gras op zand in het bovenrivierengebied, maar de proeven bij WDOD die in 2020/2021 zijn uitgevoerd, zouden dat wel op kunnen leveren. Voor het benedenrivierengebied, waar de belastingduur korter is, zijn er alleen voor een gesloten zode waarden voor μ en σ (zie Tabel 15).

Tabel 15: μ en σ waarden voor een gesloten zode op zand in benedenrivierengebied (bron: ref 22).

Hm0 (m)	0,5	1	2
μ (l/s/m)	19	9,5	9,1
σ (l/s/m)	13	3,5	1,9

Uit het ontwerp (zie §5.4 op pagina 60) en de kwaliteitscontrole rapportage (zie §6.4.2 op pagina 68) dient de inklemming, hoogteligging en overlap van de GCL te blijken. Bij twijfel dienen proefsleuven gegraven te worden, waarin metingen worden gedaan. Beoordeling vindt plaats op de volgende punten:

- Inklemmingslengte bij de buitenkruin en de buitenteen voldoende?
- Top GCL boven signaleringswaterstand + zetting en klink?
- Positieve overlap en afschot aanwezig?
- Breedte overlap en hechting tussen verschillende banen voldoende?
- Detaillering bij inkassing volgens voorschrift in §5.4.2 op pagina 62?

7.2.3 GABU / GABI

De kleibekleding kan afschuiven door een verhoogde waterdruk van binnenuit of verzadiging van de afdeklaag, die beiden leiden tot een afname van schuifsterkte. Hiervoor bestaat geen regulier beoordelingsspoor. Daarom dient een ToM uitgevoerd te worden volgens §4.1.3.2 (pagina 37), §5.3.3 (pagina 53) en §5.3.8 (pagina 58).

Daarnaast kan tijdens het dal van een golf de buitenwaterstand tijdelijk lager zijn dan de waterstand in de kern. Het beoordelingsvoorschrift in deze handreiking voorziet in de situaties dat niet op basis van een eenvoudige reguliere toets ($q < 0,1$ l/s/m, binnentalud flauwer dan 1:4 en/of golfhoogte $H_{m0} <$ dikte bekleding) wordt voldaan. Wanneer de bekleding (afdeklaag en GCL) niet voldoet op basis van de eenvoudige methode of op basis van de een gedetailleerde methode (zie [ref 1], Vgl. 12.1), dient bij de ToM in acht te worden genomen dat de schuifweerstand afneemt door de beperkte wandwrijving (tussen GCL en onderliggende grondlaag, zie §4.1.3.2 op pagina 37).

7.2.4 STMI

Wanneer de overslag over de waterkering klein is, kan afschuiving van de binnentaludbekleding (GABI) niet plaats vinden en wordt microstabiliteit (STMI) bepalend. De beoordelingsmethode is niet anders dan voor een conventionele waterkering, behoudens de volgende punten:

- Beoordeling van microstabiliteit (STMI) van een kwellend zandtalud met een ToM uitvoeren. De hoogte van het sijpeloppervlak kan daarbij niet met vuistregels uit bijvoorbeeld het Technisch Rapport Waterspanningen worden bepaald. Er is een berekening nodig met een einde elementen grondwaterstromingsmodel om de invloed van de GCL juist vast te stellen. Is de grasmat fragmentarisch in de onderste helft van het binnentalud? Zo ja, dan de heeft de zode geen sterkte. Is de grasmat open of gesloten, dan kan er 5 kPa schijnbare cohesie (c') of schuifsterkte (su) worden toegekend aan de zode laag (0,25 m dik);
- Is de GCL doorgetrokken tot aan de binnenteen? Zo ja, dan opdrukveiligheid bekleding beoordelen volgens belastinggeval "Verhoogde druk" van GABI.

7.2.5 STPH

Bij toepassing van GCL's in het voorland kan qua berekeningsmethode teruggevallen worden op de reguliere beoordelingsmethode voor piping. De controle op kwelweglengte is niet anders dan bij een kleilaag in het voorland. Beoordeling vindt plaats op de volgende punten:

- Is de hydraulische weerstand van de toegepaste GCL kleiner dan 10 dagen (net zoals die van 1,0 m stevige klei afgedekte met een laag teelaarde van 0,3 m tot 0,5 m)?
- Is de diepteligging voldoende groot gelet op het grondgebruik (bijvoorbeeld akkerbouw, natuur of productiebos) en voldoet deze aan de minimumwaarde van 0,8 m?
- Ligt de GCL voldoende diep (minimaal 0,5 m) onder de eventueel aanwezige sloten met het oog op onderhoud van de sloot (baggeren)?
- Is de aansluiting op de buitenteen ontworpen en aangelegd conform §5.4 (op pagina 60) en conform §6.4.2 (op pagina 68).

Bij toepassing van een GCL is het mogelijk om meer dan tweemaal de dijkbasis als totale kwelweg in rekening te stellen (zie §4.1.3 op pagina 37).

7.2.6 Ongemerkt falen

Er zijn in principe twee negatieve gebeurtenissen mogelijk die ongemerkt falen in de hand werken, te weten:

1. De GCL is niet kapot, maar door constructiefouten of veroudering is het positieve effect minder dan in de berekening van het betreffende faalmechanisme is meegenomen;
2. De GCL is kapot door een externe oorzaak (graafschade, flora, fauna) of schade (maar nog geen falen) door één van de (faal)mechanismen.

Op beide mogelijke gebeurtenissen dient beoordeling plaats te vinden aan de hand van alle denkbare onderliggende gebeurtenissen. In de gebeurtenissenboom is dit uitgewerkt. Er zijn oorzaken op het vlak van vervormingen in relatie tot sterkte, de minimale afdeklaag in relatie tot beschadiging alsmede de overlap en inklemming in relatie tot waterdichtheid en ten slotte squeeze. Op al deze punten (zie hierna) is beoordeling via ToM noodzakelijk.

Ongelijke vervormingen in de dwarsdoorsnede en de lengterichting beoordelen:

- Via de reguliere kruinhoogte toetsing een vergelijking maken met een oudere hoogtemeting. Indien de kruinhoogtedaling kleiner is dan 2 mm/jaar mag ongelijke zetting worden verwaarloosd.
- Indien de kruinhoogtedaling groter is dan 2 mm/jaar is het detailniveau van de AHN onvoldoende voor een ToM. In dat geval dient een meer nauwkeurige meting plaats te vinden, waarna de trekspanningen in de GCL's worden beoordeeld. Ook wanneer er verschilzettingen (> 0,1 m over 2,5 m) worden verwacht (bijvoorbeeld bij slootdemping) dient een meer nauwkeurig meting plaats te vinden.
- In geval van een volledig nieuwe waterkering zal de kruin harder zakken dan de teen van de waterkering en mag afname van spanning in de GCL verwacht worden. Controle van trekspanning is dan niet nodig.

Overschrijden toelaatbare trekspanning beoordelen:

- Controle van marge in opgetreden rek en toelaatbare rek op basis van een prognose van de vervorming (zettingberekening) in dwarsdoorsnede, het aanwezige type GCL conform het leveringscertificaat en het uitgangspunt dat bij installatie er een verwaarloosbare rek is opgetreden om de GCL “netjes” in het werk te leggen. De GCL wordt namelijk uitgerold over een vlakke ondergrond. De spanning die in de GCL komt door aanvulling van het kielspit is alleen om plooiën bij aanbrengen van de afdeklaag te voorkomen.

De dikte afdeklaag beoordelen:

- Met een steekproef dient vastgesteld te worden dat de minimale dikte van de afdeklaag conform het ontwerp is aangebracht alsmede met “wigvorm”. Dit kan door beschikbare revisiemetingen te benutten of handboringen uit te voeren. De handboringen dienen dan zowel in de bovenste 1/3 als in de onderste 1/3 van de hoogte van het talud uitgevoerd te worden om controle op “wigvorm” mogelijk te maken.
- Indien de laagdikte niet conform het ontwerp is, dient voldoende aannemelijk te worden gemaakt dat er door verkeersbelasting geen schade kan en is ontstaan door a) de zwaarte van regulier onderhoudsmaterieel te beoordelen en b) op spoorvorming te inspecteren. On der voldoende aannemelijk wordt verstaan: “Als de GCL 0,8 m diep is ontworpen en het is uiteindelijk 0,7 m geworden dan is er geen substantiële kans op schade. Als 0,8 m de bedoeling was en het is 0,3 m geworden, dan is het voldoende aannemelijk te beschrijven dat de GCL na enige spoorvorming stuk is.”.

Overlap en inklemming beoordelen:

- In de kwaliteitscontrole rapportage en/of revisiemetingen dient nagegaan te worden of, in het kielspit bij de buitenteen en onder de verharding op de kruin, er 1,0 m GCL als overlengte voor inklemming is aangebracht;
- In de kwaliteitscontrole rapportage dient nagegaan te worden of er 0,5 m GCL van hechtmiddel is voorzien en als overlap ook is aangebracht.

Squeezing tijdens de uitvoering:

- In de kwaliteitscontrole rapportage dient nagegaan te worden of er op dit aspect is gecontroleerd tijdens de uitvoering.
- Indien niet aannemelijk is dat de nodige zorgvuldigheid tijdens de uitvoering is betracht of er sprake is van een omissie in de kwaliteitscontrole rapportage, dient een berekening te worden gemaakt uitgaande van een 10% open GCL. Daarmee wordt bedoeld 1 m² per 10 m² modelleren met de doorlatendheid van meest doorlatende aangrenzende bodemlaag (bijvoorbeeld zand in de dijkkern).

De samenstelling van de afdeklaag werkt geen ongemerkt falen in de hand en is dus niet relevant om te bepalen voor dit mechanisme. Geconstateerde schade ter plaatse van erosie of afschuivingen (gebeurtenis B2) of door woel dieren (gebeurtenis B7) niet herstellen, leidt eveneens niet tot ongemerkt falen. Er is dan meer sprake van “falen door schuld”. In het herstelplan dient aandacht te zijn voor:

- Scheuren van de GCL bij door afschuiving geïnduceerde spanningen;
- Verlies van verankeringslengte door uittrekken tijdens afschuiving.

7.3 Beheer

7.3.1 Beheerplan

Indien een GCL wordt toegepast dient een beheerplan (en inspectieplan) opgesteld te worden met de beschrijving van de beheercyclus vanaf aanleg tot einde levensduur, dus ook keuringen in relatie tot de wettelijke beoordeling. Het beheerplan vormt het instrument voor de voortdurende controle en terugkoppeling naar de gestelde functies. Hierdoor wordt het beheerproces transparant en (bij)stuurbaar.

7.3.2 Periodieke keuring

De wijze waarop een keuring bijvoorbeeld 6 of 12 jaar na aanleg plaats moet vinden, dient in het beheerplan te worden vastgelegd. De keuring heeft als vertrekpunt de aanleggegevens. Bij oplevering is het daarom belangrijk dat informatie over het ontwerp en de uitvoering wordt overgedragen. Tijdens de ontwerpfase worden de randvoorwaarden en programma van eisen vastgesteld.

De periodieke (wettelijke) beoordeling voor het ontwerpgedeelte kent de volgende deelvragen, die beantwoord moeten kunnen worden met het dossier dat wordt overgedragen:

- Zijn de (hydraulische en andere) belastingen binnen de beoordelingshorizon kleiner of gelijk aan de gehanteerde ontwerpwaarden?
- Is de GCL ontworpen volgens de vigerende ontwerprichtlijn of een eerdere versie die op alle relevante punten gelijkwaardig of strenger was?
- Zijn er nieuwe inzichten (al dan niet geland in een ontwerprichtlijn) waardoor GCL anders behandeld zou moeten worden dan ten tijde van het ontwerp?

De basis van de wettelijke beoordeling bestaat uit:

- Controle op beschadiging. GCL's kunnen na installatie beschadigd worden door mechanische beschadiging (dieploegen, doorgraven of doorboren) of biologische invloeden (vraatschade door knaagdieren).
- Controle van de grasmatten. In het ontwerp is uitgegaan van een bepaalde grasmattenkwaliteit, maar door weer- en klimaatinvloeden kan deze kwaliteit achteruitgaan in de tijd of niet behaald worden ondanks uitvoering van voorgeschreven beheer.
- Verificatie van de beheervorm. Wanneer de grasmattenkwaliteit niet is zoals benodigd, dient nagegaan te worden of de beheervorm juist is.

Het beheerplan dient derhalve te voorzien in een controle en inspectie regime alsmede de wijze van gegevensregistratie, opdat de wettelijke beoordeling gericht en doelmatig kan worden uitgevoerd.

7.3.3 Inspectie frequentie

De intensiteit van de inspecties van de bekleding voor de wettelijke beoordeling dient vastgesteld te worden in overleg met de afdeling beheer en onderhoud. Vastleggen van de frequentie vindt plaats in het beheerplan. Een redelijke intensiteit lijkt hierbij twee keer per jaar, echter afhankelijk van de eisen vanuit het waterschap kan dit ook intensiever worden gedaan of juist extensiever. Na elke hoogwaterperiode moet worden geschouwd of er schade is ontstaan aan de bekleding. Indien er schade wordt geconstateerd dient deze adequaat hersteld te worden.

Tijdens de uitvoering moet worden nagegaan of de GCL correct is aangebracht, conform de vigerende ontwerprijrichtlijn of een andere versie die op alle relevant punten gelijkwaardig of strenger is. Indien de uitvoering niet goed is gegaan dan dient tijdens de uitvoering herstel plaats te vinden.

Wanneer er geen informatie meer aanwezig is en gegevens over welk GCL aanwezig is, dan kan dit met een steekproef worden vastgesteld. Een klein stuk GCL (ter grootte van een A4tje) eruit snijden en laten testen in een daarvoor geschikt laboratorium volstaat. Monsters kunnen getest worden door een (onafhankelijk) laboratorium met specialistische kennis.

7.3.4 Nut en noodzaak monitoring

Monitoring van waterspanning en doorlatendheid is niet noodzakelijk want er wordt een GCL met minimumspecificaties onder hoge kwaliteitsborgingseisen toegepast. De doorlatendheid is dus met een zekerheid grenzende waarschijnlijkheid laag en het meten van de stijghoogte (bijvoorbeeld in de dijk kern) is dan vooral meten aan de doorlatendheid van andere grondlagen in en onder de waterkering en dat staat los van toepassing van de GCL.

7.3.5 Sturing op grasmattenkwaliteit

Nog meer dan normaal (bij een grasmatten op "vette kleilaag") zit er een relatie tussen trends in ontwikkeling van de grasmatten en de juiste beheervorm. Want de grasmatten/zode is gevoeliger voor schade door erosie met een navenant grotere kans op hoge herstelkosten. Ook is er samenhang met de toename in kans op ongemerkt falen van de GCL door blootliggen. De inspectie van de grasmatten van een waterkering met GCL dient zich daarom niet te beperken tot het constateren van onregelmatigheden en ad hoc herstel daarvan. Maar de inspectie dient ook uitgevoerd te worden op vegetatie samenstelling, bodemleven en zodekwaliteit.

Het is onbekend wat de invloed is van een GCL op bodemleven. In droge periodes zoeken bijvoorbeeld wormen dieper gelegen vochtige bodemlagen op en de GCL kan daarvoor een barrière vormen. Daarom dienen inspectie resultaten "naast elkaar" te worden gezet zodat trends in de ontwikkeling van grasmatten en zode zichtbaar worden en waarop het beheer kan worden afgestemd.

7.3.6 Vergunnen van grondonderzoek

Grondonderzoek op een waterkering gebeurt veelal met sonderingen of boringen. Bij dit soort onderzoek kan een aanwezige bentonietmat worden beschadigd. De zweleigenschappen van het bentonietpoeder maken dat een gat in de GCL met een doorsnede van 2 cm binnen 24 uur volledig is dichtgezwollen. Het

uitvoeren van sonderingen en gutsboringen zonder reparatiemaatregelen is daardoor mogelijk. Voorwaarde daarbij is afdichting van het sondeergat of gutsgat met zwelkleistaven minimaal tot 0,5 m boven en onder de GCL.

Met een edelmanboor kan alleen bij zeer grote fysieke inspanning de GCL kapot “gedraaid” worden. De kans op grote beschadiging of veelvuldige beschadiging is hiermee zo goed als uitgesloten. In de praktijk gaat er voldoende signaalwerking uit van de sterkte van de GCL, om een medewerker van een grondonderzoeksbureau te attenderen op de aanwezigheid van een speciale afdichtende laag, die aanpassing van de werkwijze vraagt (bijvoorbeeld voorgraven of overstappen naar gutsboringen).

Het uitvoeren van mechanische boringen dient standaard met voorgraven en reparatie achteraf te worden uitgevoerd. Grotere schade kan relatief eenvoudig gerepareerd worden. Hiervoor bestaan uitvoeringsinstructies van de leverancier.

8 ONDERHOUD

Onderhoud is een zaak voor de dijkbeheerder, maar heeft ook een relatie met het ontwerp en de uitvoering. De website van Stowa (<https://handreikinggrasbekleding.nl/>) biedt een uitgebreid overzicht van alles wat komt kijken bij onderhoud van de grasmat. Enkele specifieke punten worden in het navolgende aangestipt.

8.1 Relatie faalmechanismen en onderhoud

Voor de beschrijving van gebeurtenissen wordt verwezen naar Tabel 8. Normale aandachtspunten in het beheer zoals: de keur handhaven middels vergunningsverlening en monitoring van flora en fauna zijn niet opgenomen in Tabel 16.

Tabel 16: overzicht faalmechanismen onderhoud.

locatie GCL	mechanisme	# gebeurtenis	bijzondere aandachtspunten
voorland	STPH	B5 (schade)	n.v.t.
buitentalud	STBU	B6 (woeldieren)	n.v.t.
	GEBU	B1 (substraat), B10 (schade)	drijfvuil verwijderen tijdens hoogwater
	GABU	n.v.t.	n.v.t.
kruin en binnentalud	GEKB	B1 (substraat)	n.v.t.
binnentalud	STBI	B6 (woeldieren)	n.v.t.
	STMI	B9 (drainage), B8 (schade)	n.v.t.
	GABI	n.v.t.	n.v.t.
buitentalud en binnentalud	ongemerkt falen	B3 (afdeklaag) B2, B4 (vervorming), B5, B7 (schade)	herstellen spoorvorming, zwaar materieel niet inzetten

Reparatie van een stuk GCL is goed mogelijk, door na vrij graven een nieuw stuk GCL met 0,5 m overlap voorzien van hechtmiddel aan te brengen op bestaand onbeschadigd GCL.

8.2 Dagelijks onderhoud

De GCL zelf heeft geen onderhoud nodig, maar de (grasmat op de) afdeklaag wel. Juist bij toepassing van een GCL in combinatie met gebiedseigen zandige grond, zal deze grasmat zich anders ontwikkelen dan op waterkeringen met een “vette klei” als bekleding.

8.2.1 Grasmat

Normaal dijkbeheer met twee keer maaien en afvoeren is bij een afdeklaag van zavel (>10% lutum) gewenst om een reguliere vegetatiesamenstelling voor waterkeringen te behouden. De grasmat moet verder geïnspecteerd worden op graverijen en houtig opschot (vanwege het risico op doorworteling van de GLC). Extensiever beheer met één keer maaien en afvoeren is meestal mogelijk bij een schralere afdeklaag (<10% lutum). Zonder dit onderhoud verruigt de bekleding. Bij een voedselrijke afdeklaag (≥8% organische stof) is zeer specifiek beheer (bijvoorbeeld eerste maaironde afgestemd op de temperatuur in het voorjaar) met meerdere keren per jaar maaien en afvoeren nodig. Zonder dit onderhoud is er een kans op woekeren van stokstof minnende soorten (zoals brandnetel en fluitenkruid), die geen erosiebestendige zode vormen.

Het kost tijd en inspanning om het gewenste en geëigende vegetatietype te ontwikkelen en in stand te houden. Een geschikt zaadmengsel is sowieso een randvoorwaarde, maar bij een schrale toplaag is een droogte resistent zaadmengsel nodig. Ongeacht het zaadmengsel zal bij een afdeklaag van leem- en humusarm, fijn zand vrijwel altijd een fragmentarische zode tot ontwikkeling komen. De keuze van de afdeklaag in het ontwerp mag derhalve niet te lichtzinnig worden gemaakt.

Het beheer richt zich op verschraling met weinig kans op dominante soorten en op termijn één keer per jaar maaien en afvoeren in augustus. Kortweg wordt dit een goed ontwikkelingsbeheer genoemd.

8.2.2 Bomen

In het algemeen is het van belang om bomengroei te voorkomen op en nabij waterkeringen, vanwege de kans op windworp, schaduwwerking en ontstaan van holle ruimte door afstervende wortels. In de GCL zullen de wortelgaten van een enkele boom weer dicht zwellen en zijn de effecten van windworp en schaduwwerking niet wezenlijk anders. De GCL is namelijk (deze handreiking volgende) toegepast op een diepte waar minder zwaar gestel wortels aanwezig zullen zijn. Aandachtspunt (in het ontwerp bij bepalen van de aanlegdiepte) is een GCL in het voorland waar natuurontwikkeling is of wordt gestimuleerd en waar wortels van meerdere grote bomen gezamenlijk de functionaliteit van GCL's op langere termijn mogelijk kunnen verminderen.

8.3 Onderhoud tijdens hoogwater

Door wind- en stromingsinvloeden kan er ophoping van drijfvuil ontstaan tijdens hoogwater op en rond de maximale waterstand. En dit drijfvuil schuurt over de grasbekleding van de waterkering, waardoor de zode beschadigd kan raken (Zie Figuur 22).

Bij een gesloten zode op een erosiebestendige kleilaag (categorie 1) kan dit reeds leiden tot flinke schade en daarom is extra alertheid geboden wanneer een zandige of schrale afdeklaag op een GCL is toegepast. Deze afdeklaag is erosie gevoeliger en de grasmat kan door een voorafgaande droogte verzwakt zijn.

Drijfvuil dient derhalve altijd verwijderd te worden.



Figuur 22: drijvuilschade bij Olburgen 1995 (foto: WRIJ).

8.4 Herstellen van schade

Bij het budgetteren van de herstellkosten dient rekening gehouden te worden met het volgende:

- De beperkte kosten van gebiedseigen grond in verhouding tot klei (dit is ten faveure van GCL's);
- De extra te verwachten hoeveelheid erosie van gebiedseigen grond ($>> 2,0 \text{ m}^3/\text{m}^1$) bij golfklappen in combinatie met drijfvuil in vergelijking met categorie 1 klei ($< 1,5 \text{ m}^3/\text{m}^1$), die minder snel zal eroderen/wegslipen (dit is juist niet ten faveure van toepassingen met GCL's);
- De extra beheerkosten om de grasmat weer op sterkte te krijgen op een zandige of schrale afdeklaag, die bij een voedselrijke klei alleen regulier beheer nodig heeft (dit is juist niet ten faveure van toepassingen met GCL's).

Gelet op de kans op kostbaar herstel van schades, moet vooral ingezet worden op het voorkomen van schades. Wanneer onverhoopt toch schade ontstaat geldt het volgende handelingsperspectief.

Herstellen van een stuk GCL na bijvoorbeeld windworp of graafschade is goed mogelijk, door een nieuw stuk GCL met 0,5 m overlap voorzien van bentoniet (als hechtmiddel) aan te brengen op bestaand onbeschadigd en schoongemaakt GCL.

Indien bij een calamiteit het herstel van de afdeklaag binnen 1 dag na het ontstaan van de ontgroning plaats vindt, is de sterkte van de GCL niet achteruit gegaan. Pas bij herstel na een week tot een maand en dus na één respectievelijk meerder nat-droog cycli ontstaat beperkte respectievelijk sterke achteruitgang in sterkte. Schade tijdens een hoogwatersituatie kan met dezelfde noodmaatregelen worden behandeld als erosie van een conventionele kleilaag.

Mocht schade zijn opgetreden dan moet deze voor permanent herstel worden uitgevoerd conform de hiertoe opgestelde instructies van de producent.

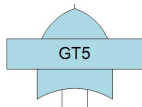
9 REFERENTIELIJST

- ref 1. Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017. Bijlage III Sterkte en veiligheid, Ministerie van Infrastructuur en milieu, januari 2017
- ref 2. Schematiseringshandleiding macrostabiliteit WBI 2017, versie 3.0, 28 november 2019
- ref 3. Schematiseringshandleiding piping WBI 2017, 2 januari 2017
- ref 4. Schematiseringshandleiding grasbekleding, WBI 2017, 28 mei 2021, Definitief
- ref 5. Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing, WBI 2017, 28 november 2019
- ref 6. KPR factsheet werkwijze macrostabiliteit i.c.m. golfoverslag OI2014v4, De Visser en Jongejan, 08-03-2018, versie 2
- ref 7. Erkenntnisse aus Aufgrabungen von Deichdichtungen aus geotextielen
Tohndichtungsbahnen nach mehrjährigen Liegezeiten, Dr. Ing. Michael Heibam,
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
- ref 8. Brandenburgische Richtlinie für die Anwendung Geosynthetischer Tondichtungsbahnen im
Deichbau, Landesamt für Umwelt, Ausgabe 2016 (BRAD16)
- ref 9. Kansenscan: Innoveren met NAUE Geo Clay Liners in dijken, versie: 1.0 (definitief),
Infram Hydren 09-04-2018, Projectnummer: 17I330
- ref 10. Bepaling geotechnische parameters, publicatie 2003-7, CUR 2003
- ref 11. Bodemkunde van Nederland, Deel 1, W.P. Locher en H. de Bakker 1991
- ref 12. CUR 243 Durability of Geotextiles, 2012
- ref 13. Di Emidio, G. 2010, Hydraulic and Chemico-Osmotic Performance of Polymer Treated
Clays. PhD thesis
- ref 14. De Camillis, M. 2017, Experimental and Numerical Study of Wet and Dry Cycles on an
Innovative Polymer Treated Clay for Geosynthetic Clay Liners. PhD thesis. Ghent University
- ref 15. Bouazza A, Gates WP Abuel-Naga H. 2006. Factors impacting liquid and gas flow through
geosynthetic clay liners. Geosynthetics – Recent Developments. Commemorating Two
Decades of Geosynthetics in India. Indian International Geosynthetics Society, New Delhi.
Chapter 9, pp. 119-1
- ref 16. POVM Grondverbeteringen, Een publicatie van de POV Macrostabiliteit, september 2018
- ref 17. Vier quick wins grond en klei, Optimalisaties voor dijkversterkingen, RWS 17 april 2018
- ref 18. Update inzichten in gebruik van klei voor ontwerp en uitvoering van dijkversterking,
Deltares 2017, document 1220633-000, versie 2.0
- ref 19. Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het
beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde, RWS 25-10-2012, definitief
- ref 20. Comparative life cycle assessment (LCA) clay geosynthetic barriers (GBR-C / GCL) versus
compacted clay liners and other sealing systems used in river dykes, canals, storm water
retention ponds and landfills. August 2011. Dipl. Geol. Dr. rer. nat. Thomas Egloffstein et al.
3rd International symposium on Geosynthetic Clay Liners, Würzburg, Germany 15/16 Sept
2010.
- ref 21. Factsheet D-Geo Flow Voor op maat pipinganalyses, Deltares 23 november 2020,
kenmerk 11205758-037-GEO-0001
- ref 22. Onderbouwing kansverdelingen kritisch overslagdebiet ten behoeve van het OI2014v4
(Deltares & van Hoven, A. & van der Meer, J.M., 2017)
- ref 23. Untersuchung der Lagestabilität von geosynthetischen Bentofix®-Dichtungsbahnen unter
Strömungsbelastung, Bericht nr. 750, Franzius Intitut, Oktober 2016
- ref 24. Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic
Reinforcements – EBGeo, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), 2011
- ref 25. Untersuchung der stabilität der Tondichtungsbahn bentofix BZ13-B bei belastung mit
unregelmäßigen Wellen, Forschungszentrum Küste, Matthias Kudella, August 2009

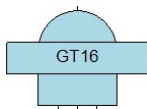
BIJLAGE A GEBEURTENISSENBOOM GCL “GESNOEID”

Tabel 17: legenda gebeurtenissenboom.

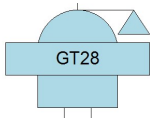
Legenda gebeurtenissenboom



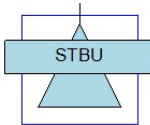
OF-poort: één van de onderliggende gebeurtenissen dient op te treden



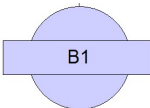
EN-poort: alle onderliggende gebeurtenissen dienen op te treden



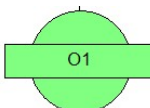
Het driehoekje geeft aan dat deze tak op meerdere plekken in de boom voorkomt.



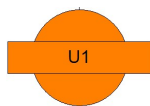
Geeft aan dat de boom verder gaat op een volgende pagina



Event (beheer): Geeft een gebeurtenis aan die te maken heeft met het beheer

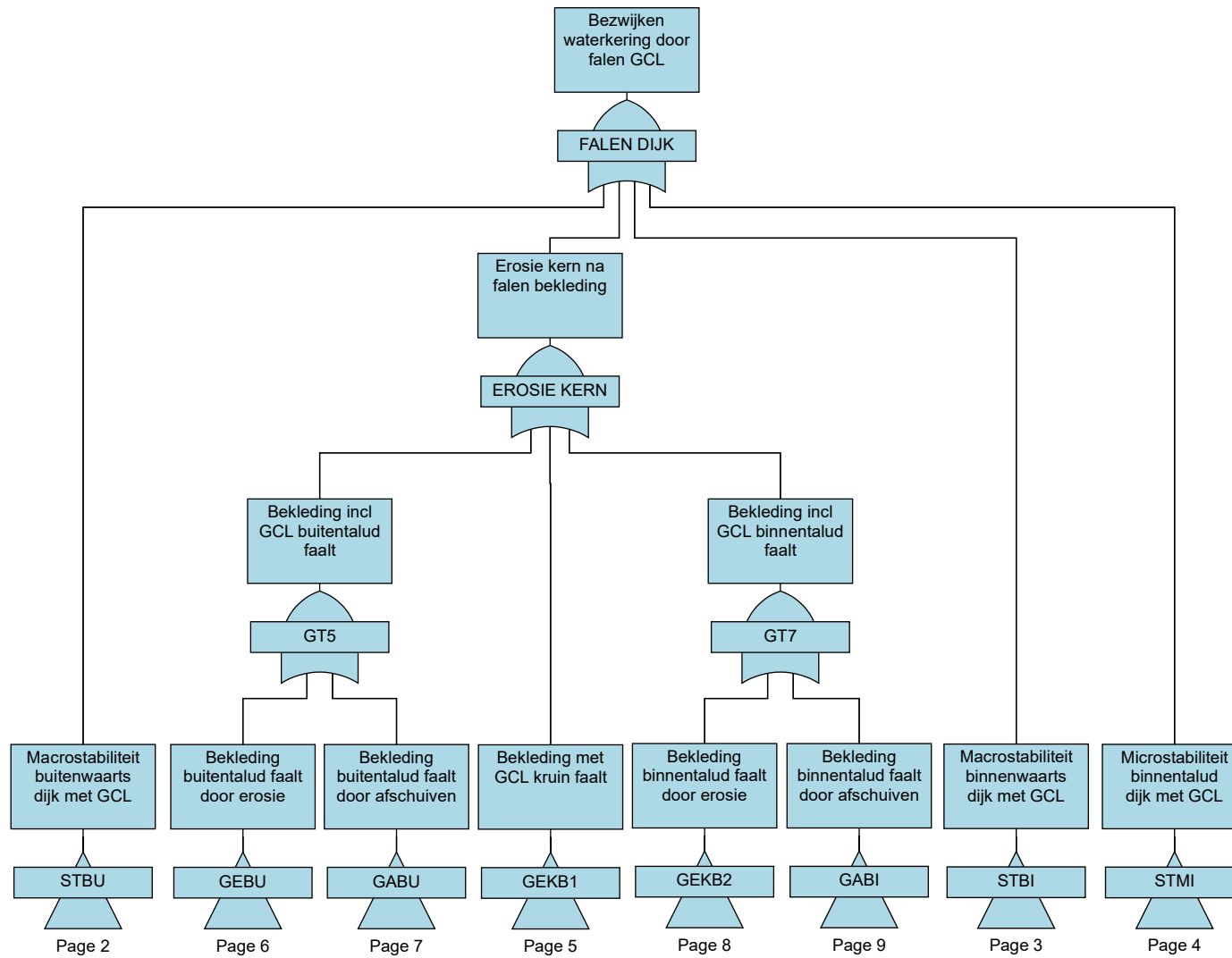


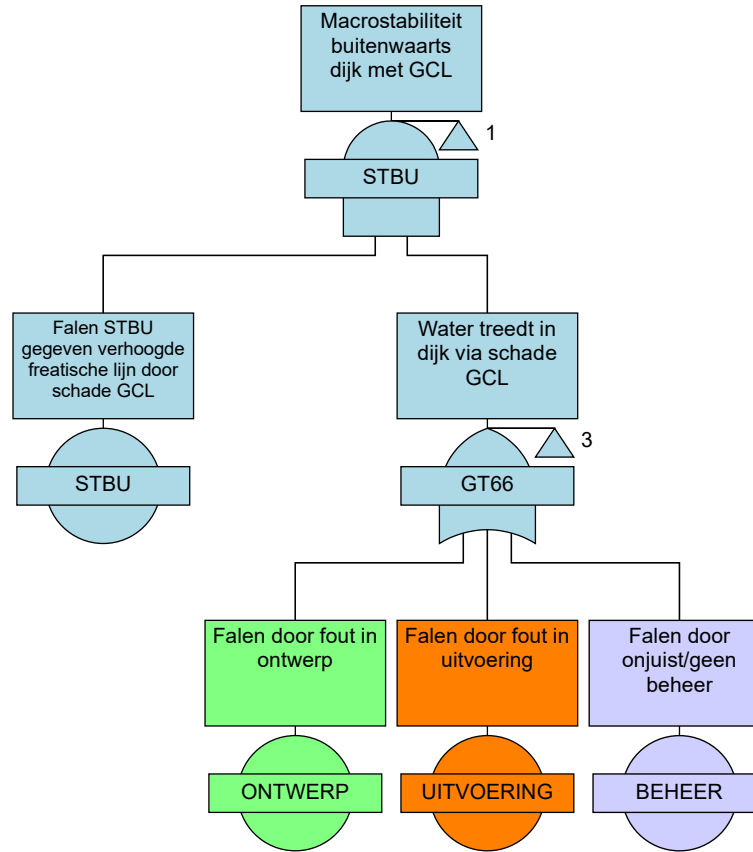
Event (ontwerp): Geeft een gebeurtenis aan die te maken heeft met het ontwerp



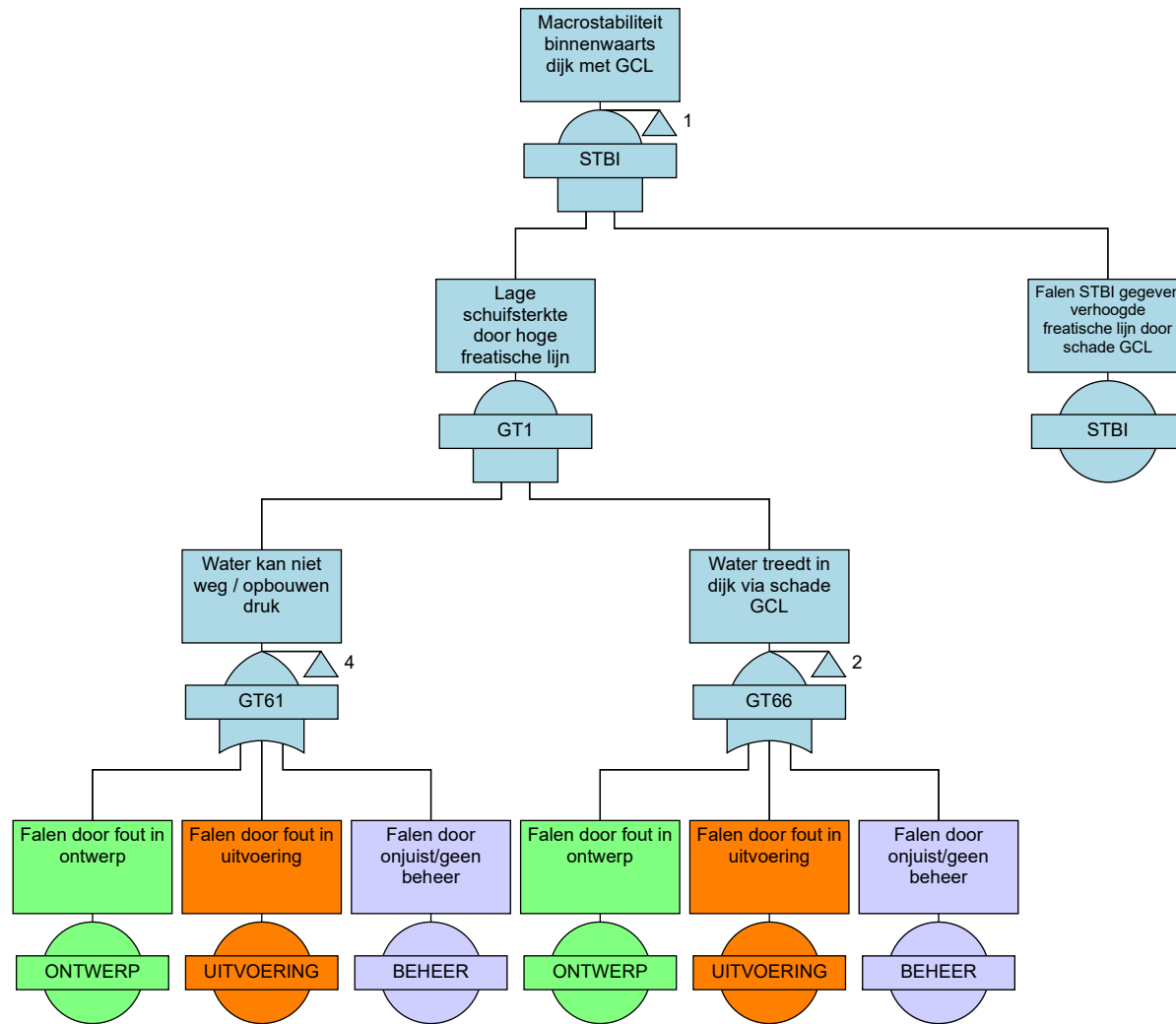
Event (uitvoering): Geeft een gebeurtenis aan die te maken heeft met de uitvoering of aanleg

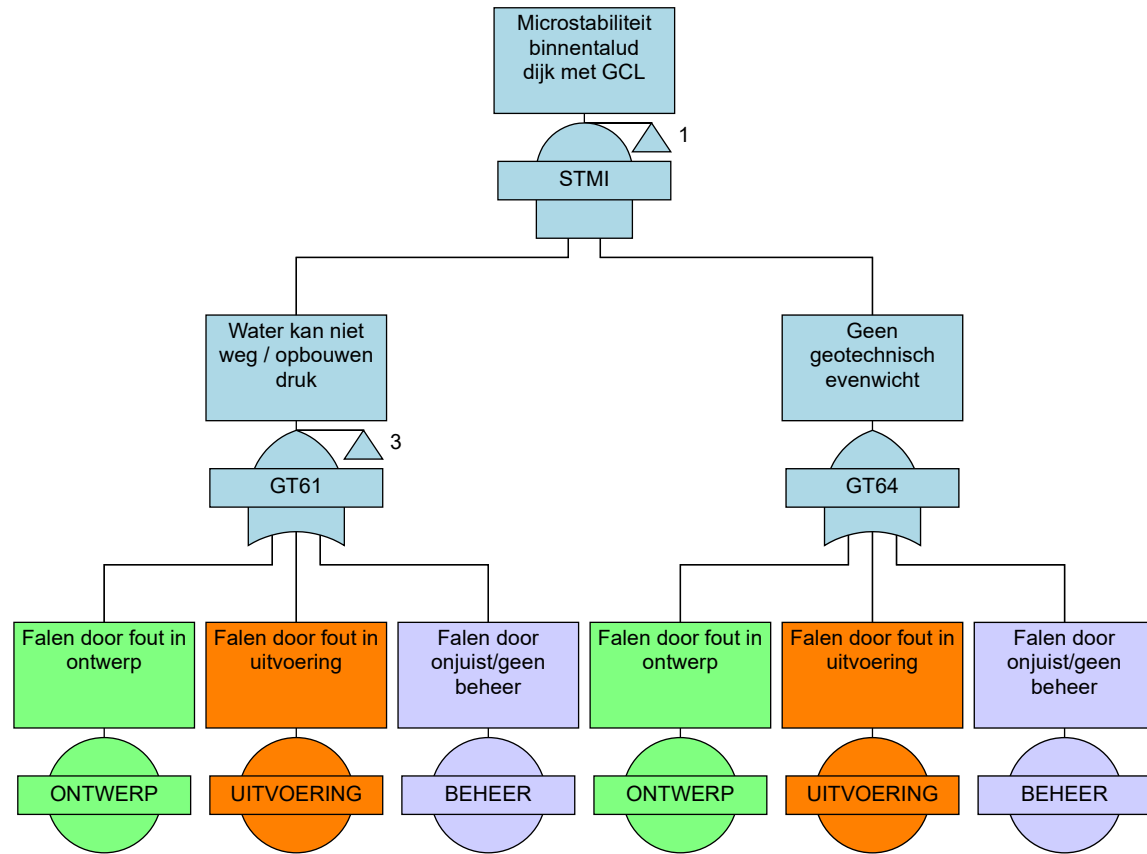
Faalstructuur GCL - Gesnoeide versie



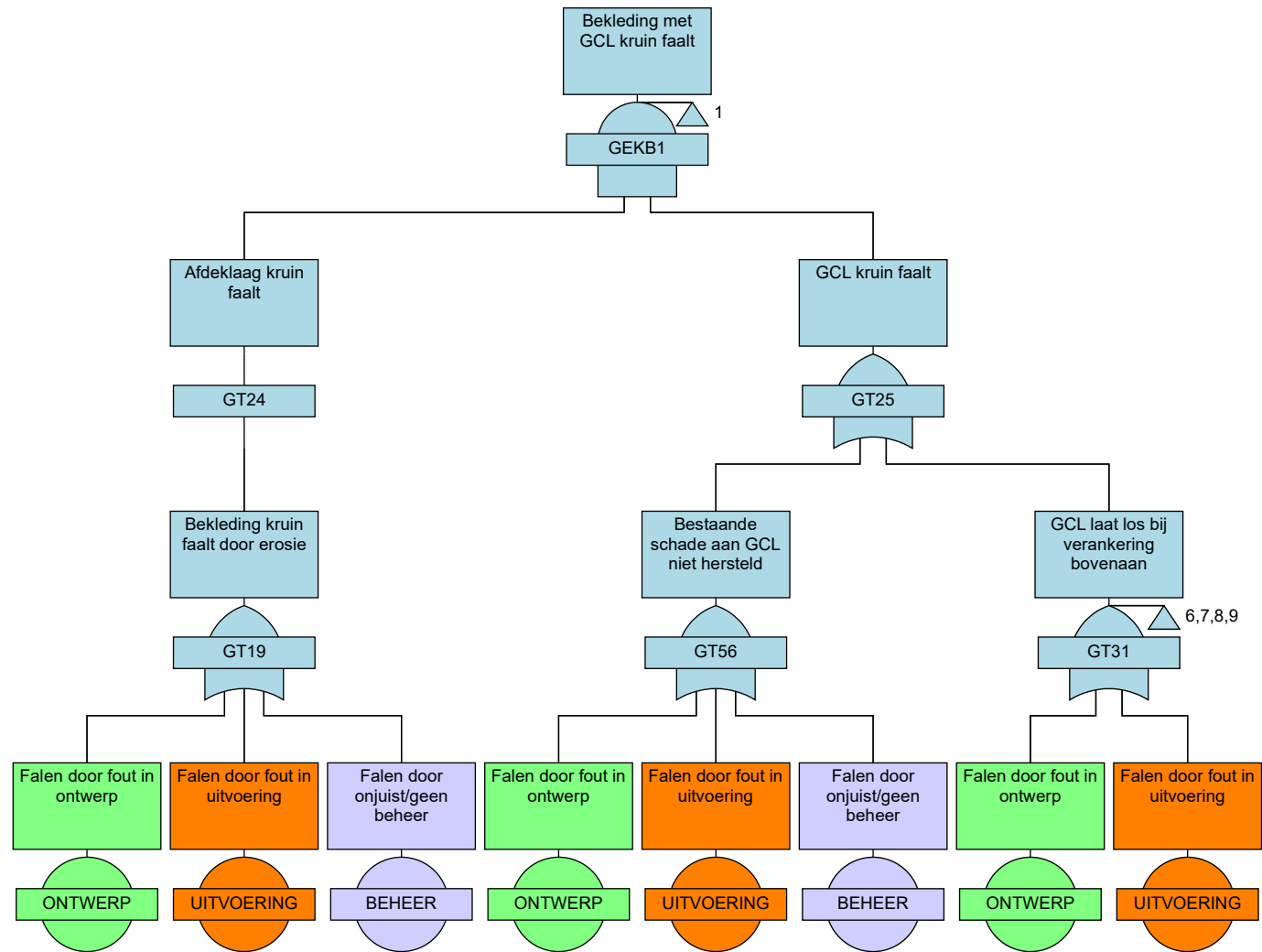


Faalstructuur GCL - Gesnoeide versie

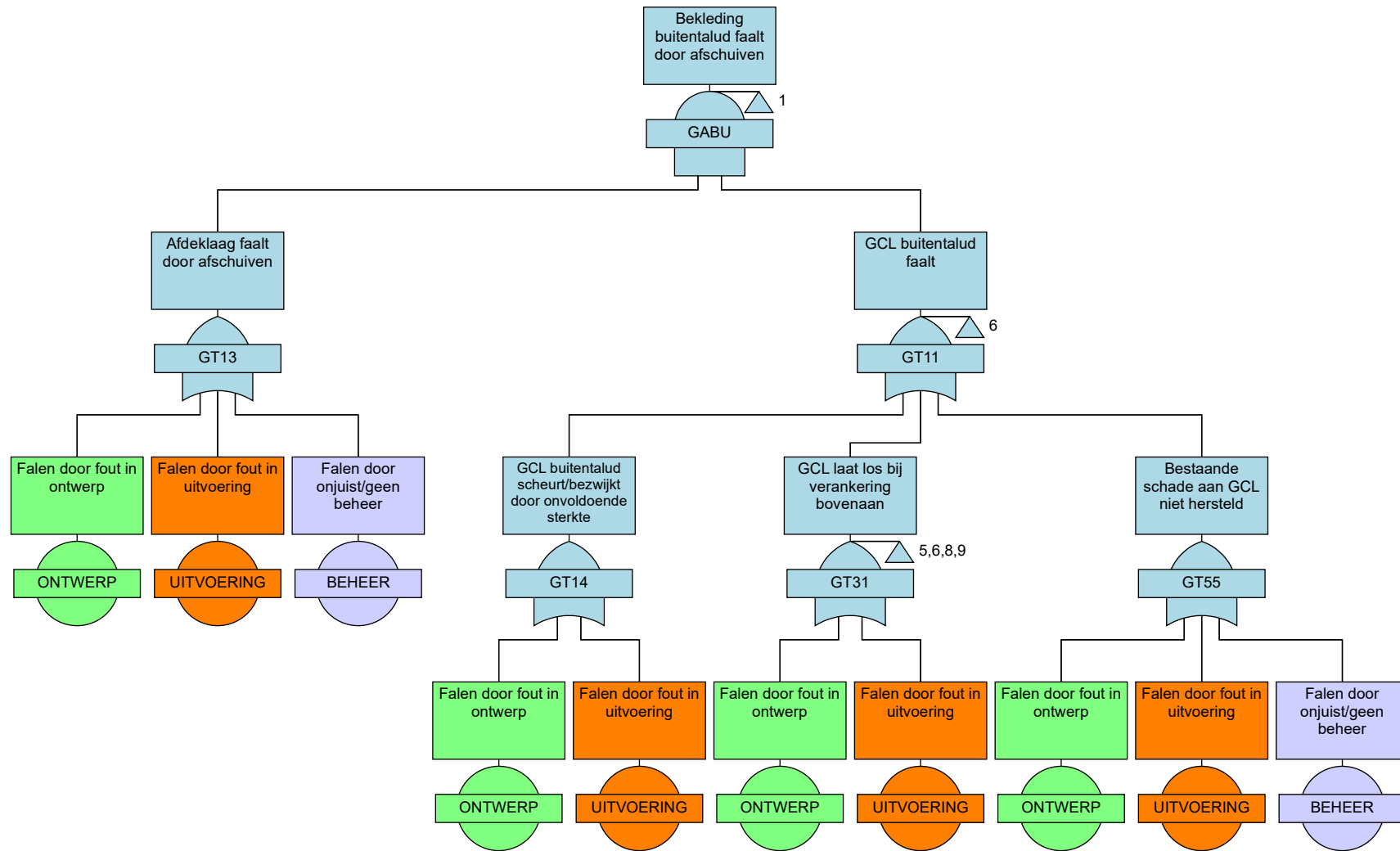




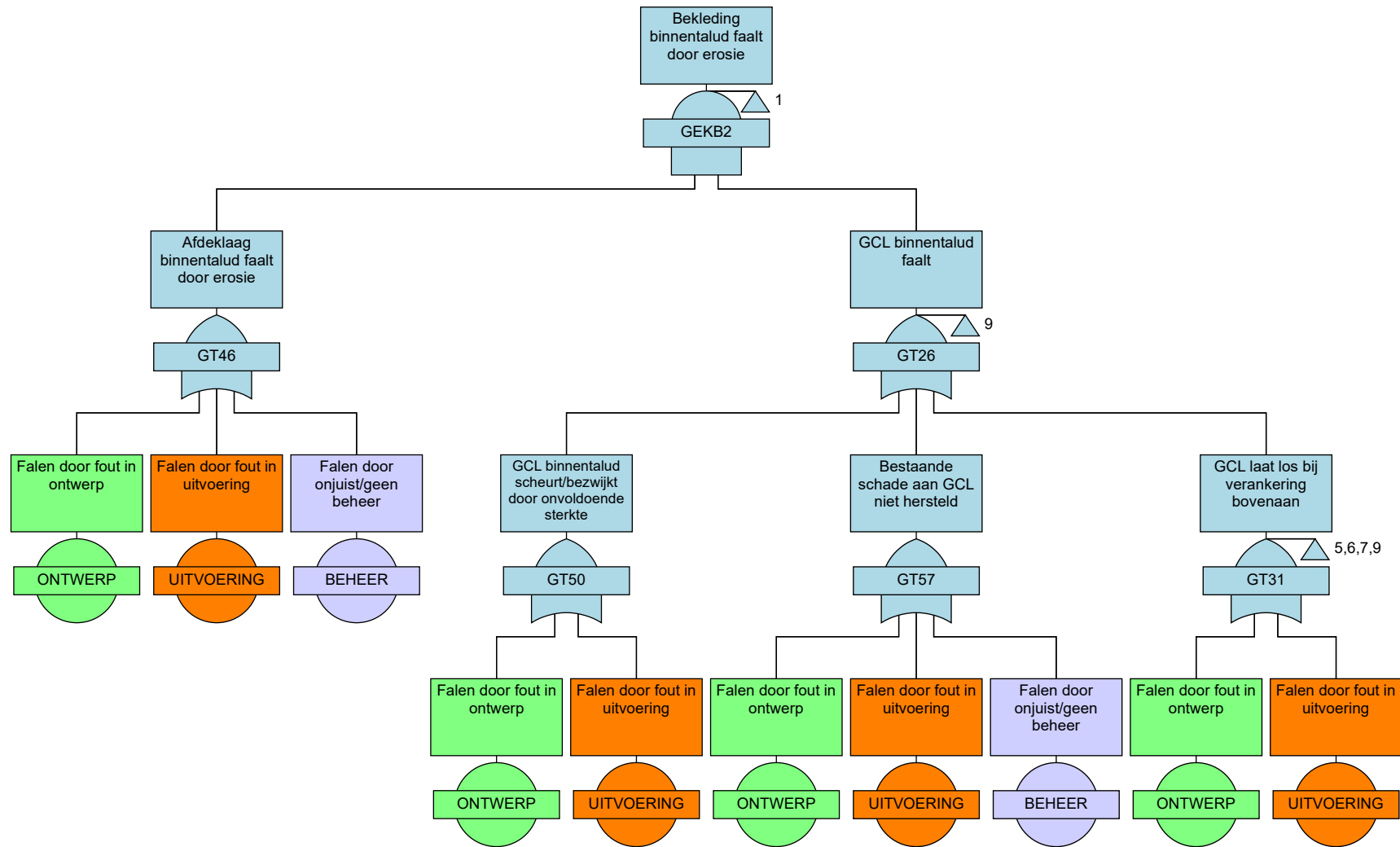
Faalstructuur GCL - Gesnoeide versie



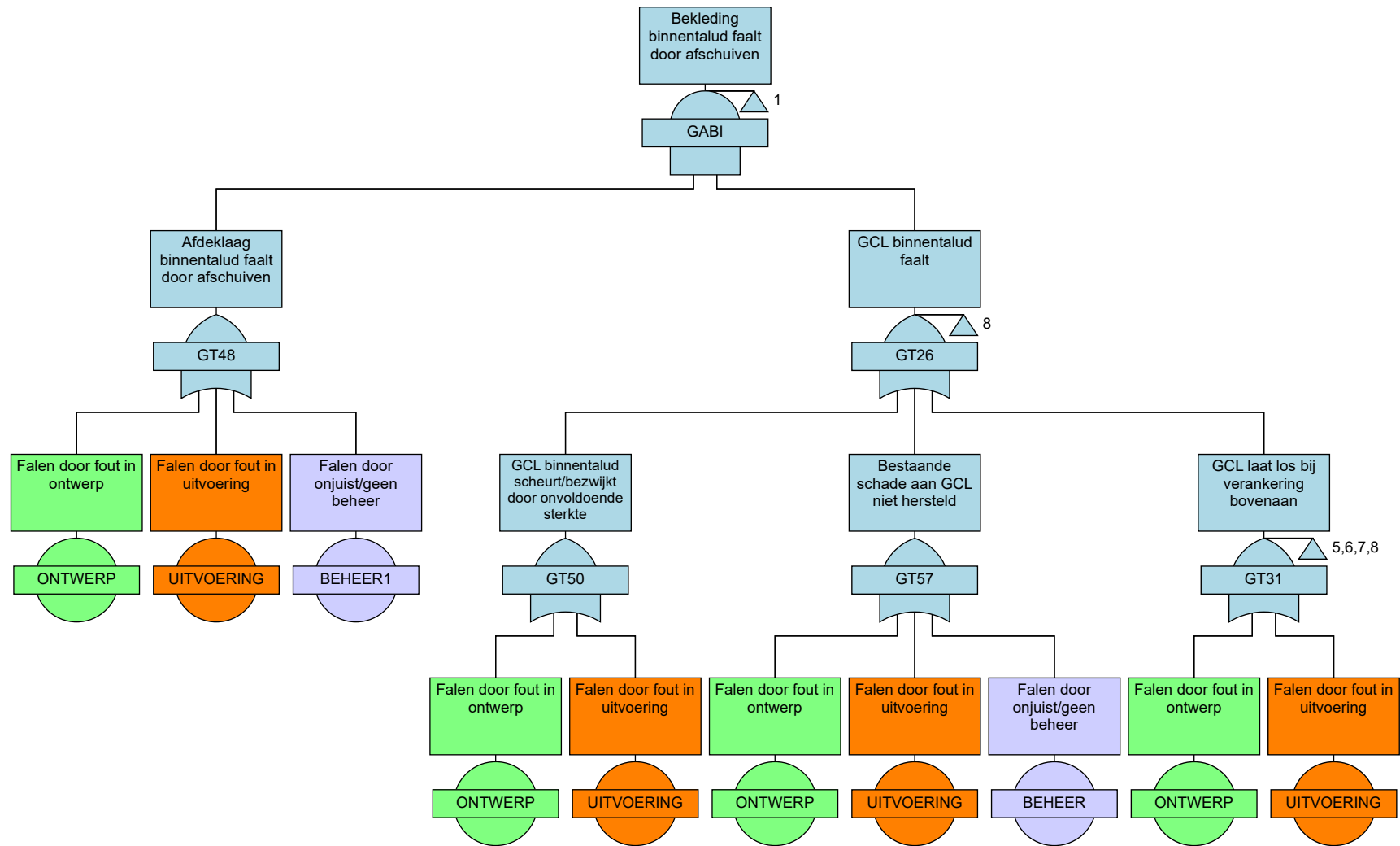
Faalstructuur GCL - Gesnoeide versie



Faalstructuur GCL - Gesnoeide versie



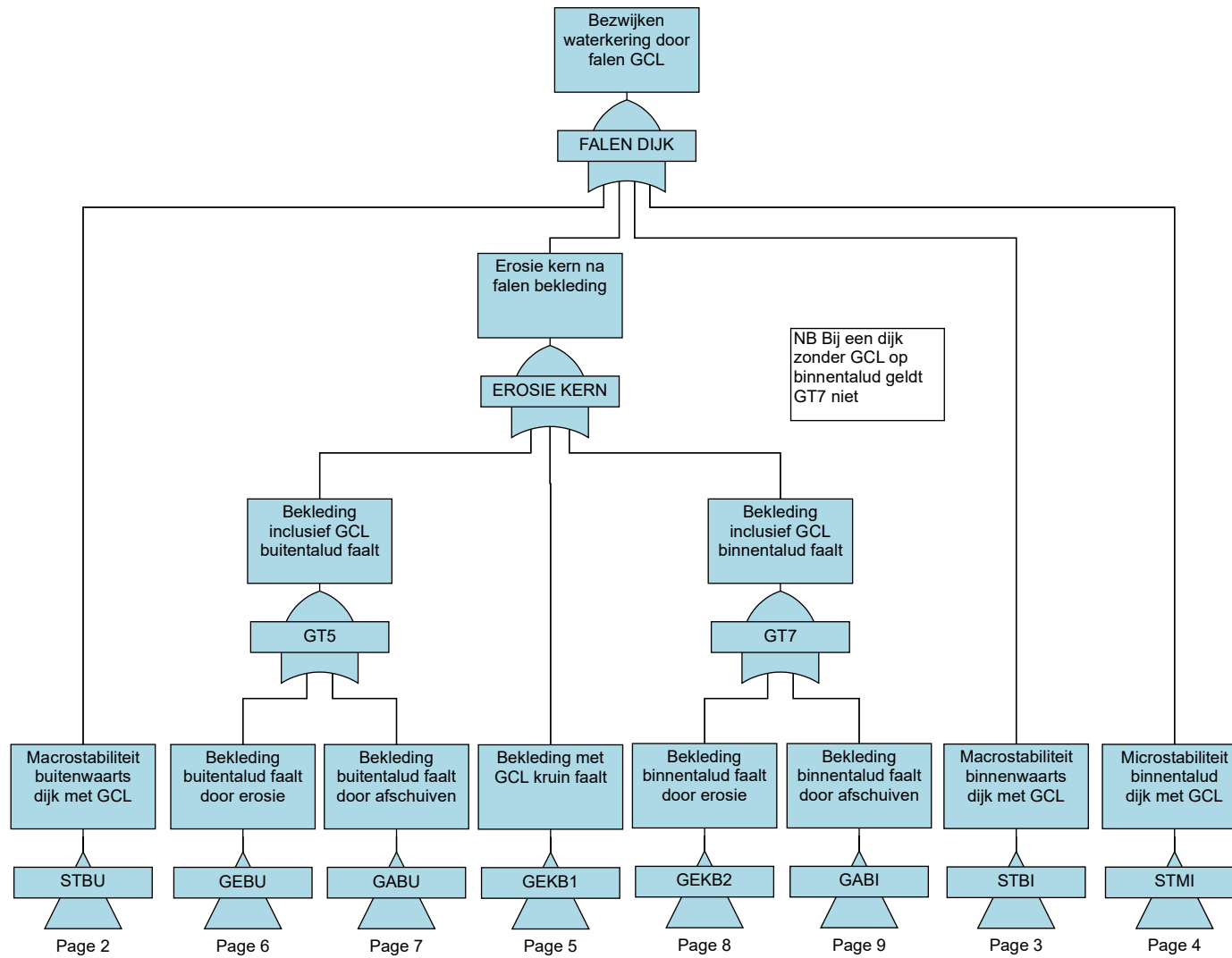
Faalstructuur GCL - Gesnoeide versie



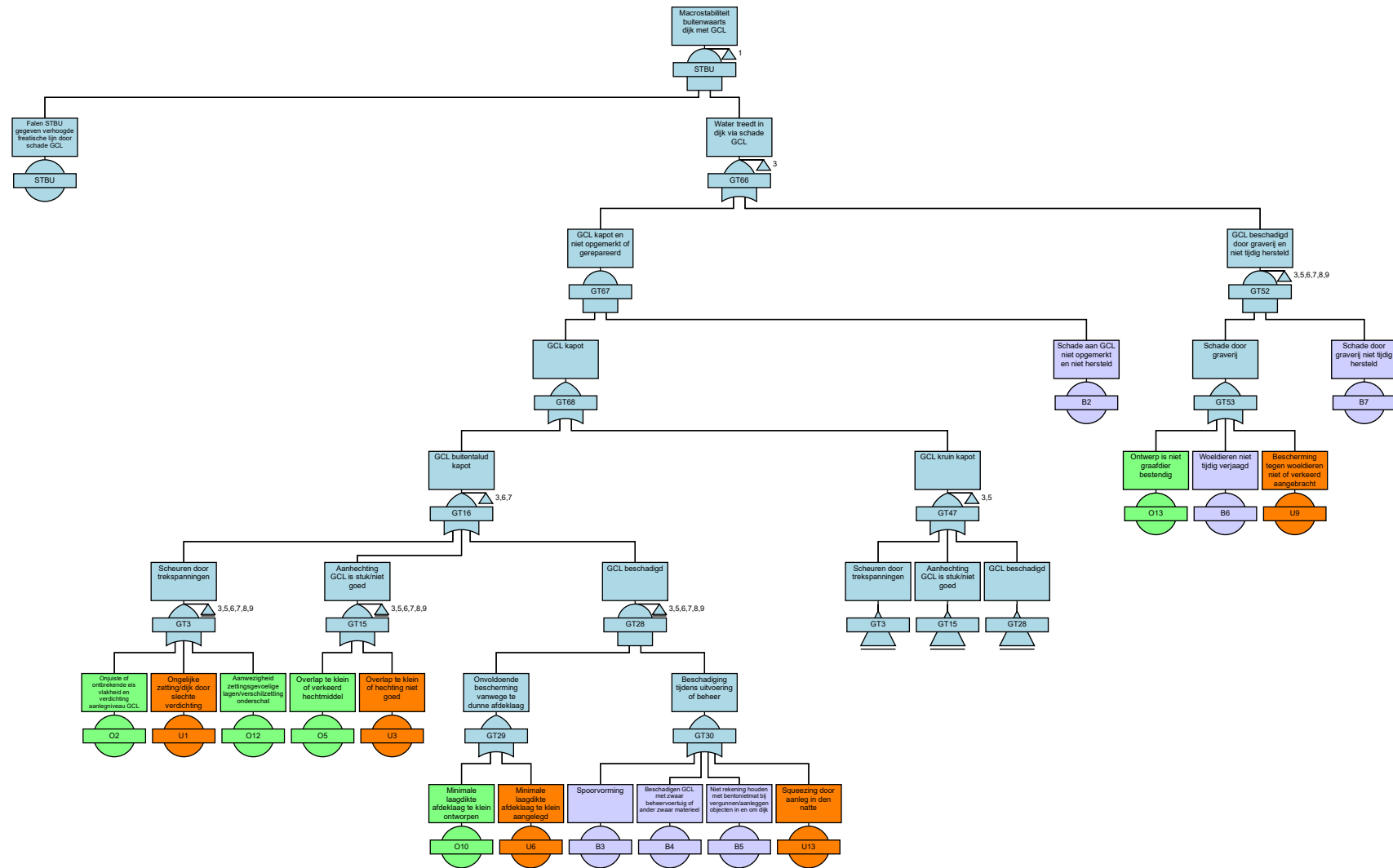
BIJLAGE B VOLLEDIGE GEBEURTENISSENBOOM GCL

Voor verklaring der symbolen in den boom wordt verwezen naar voorgaande Bijlage A.

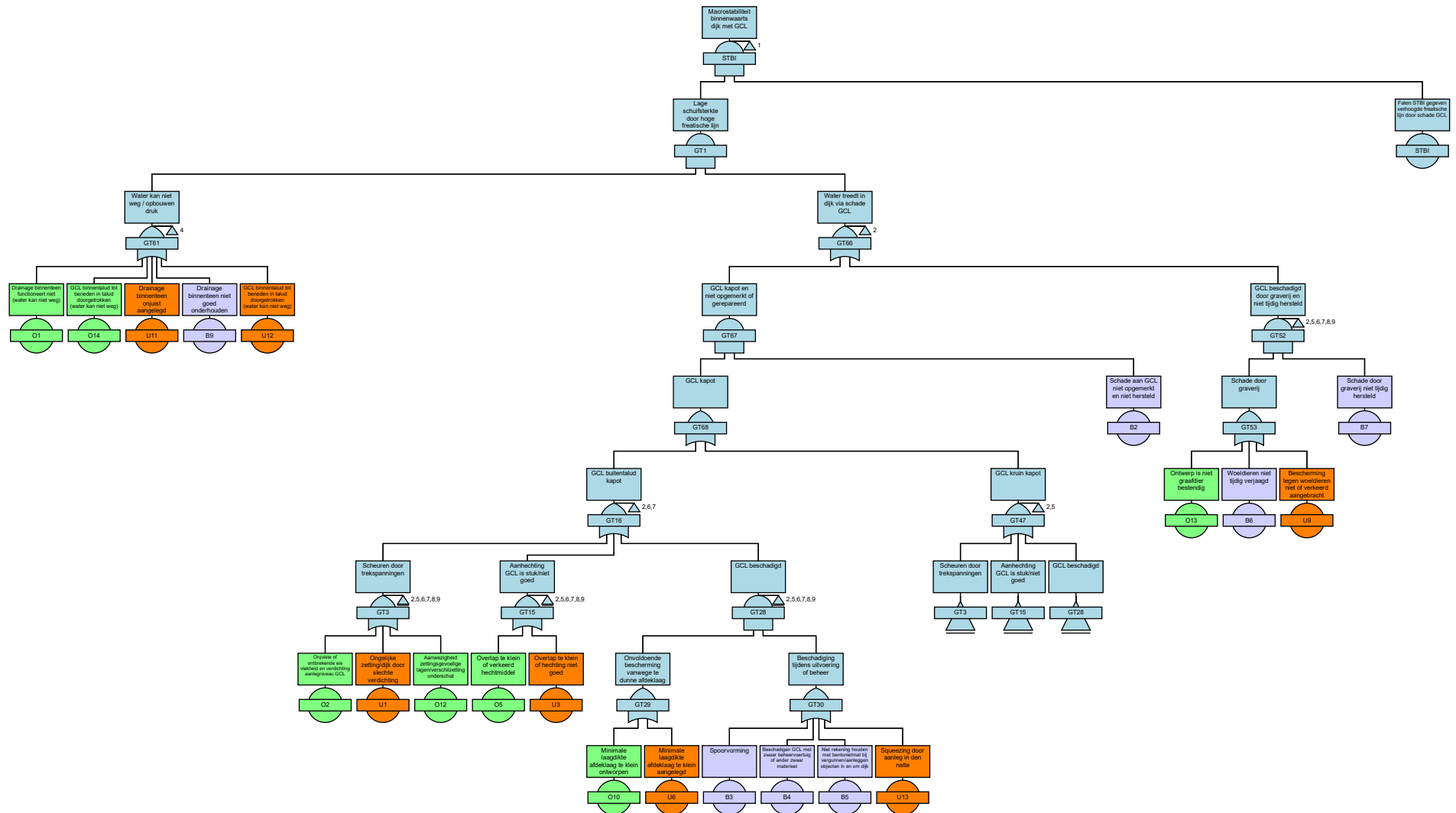
Faalstructuur GCL



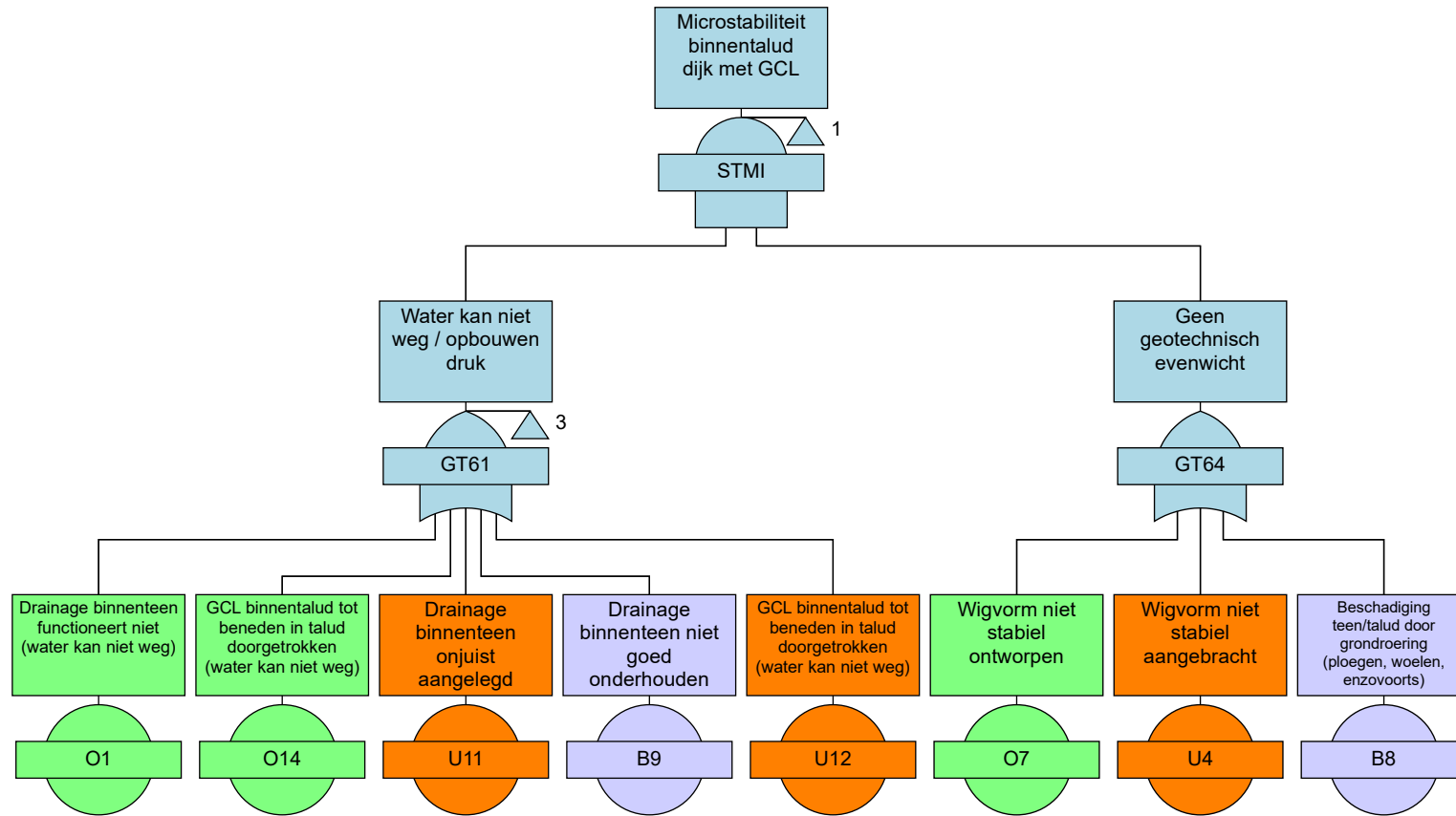
Faalstructuur GCL



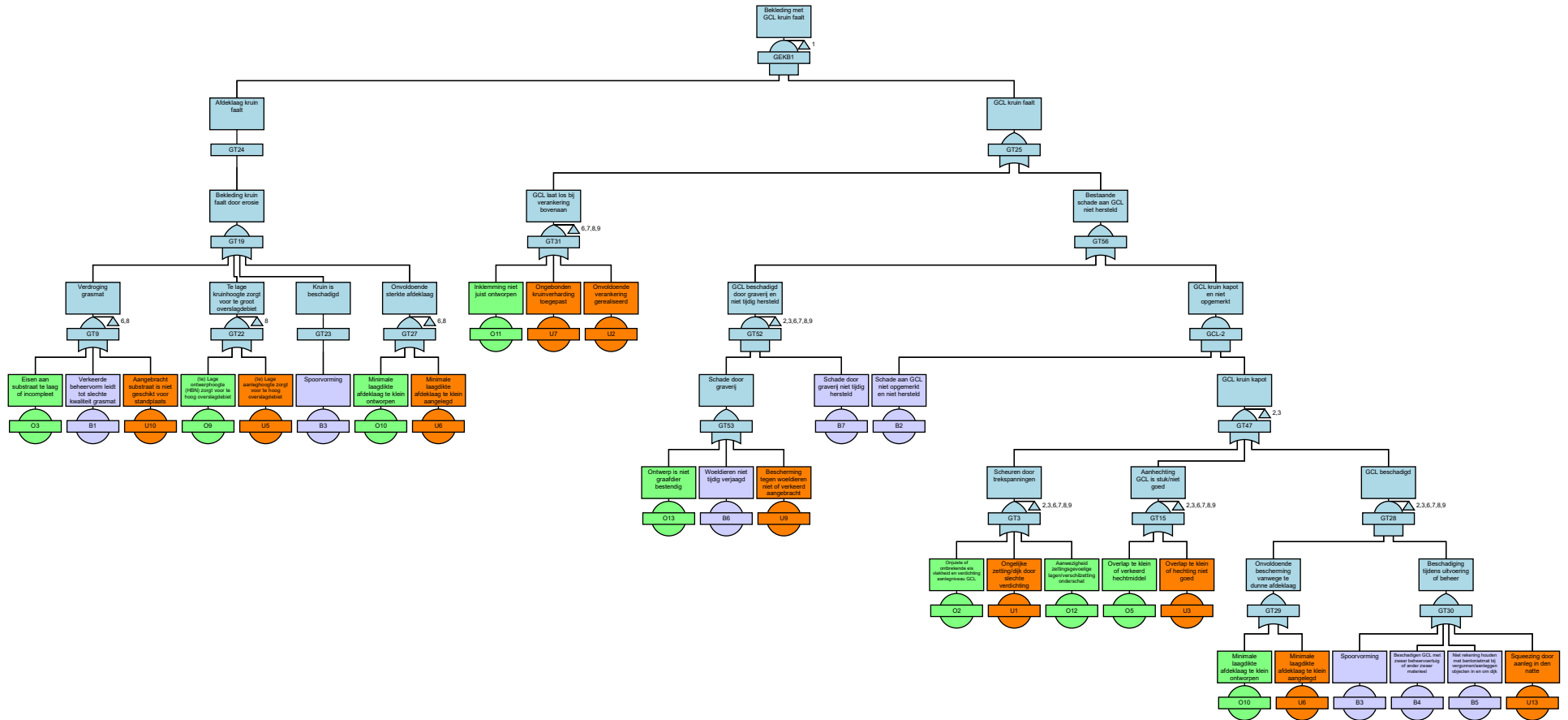
Faalstructuur GCL



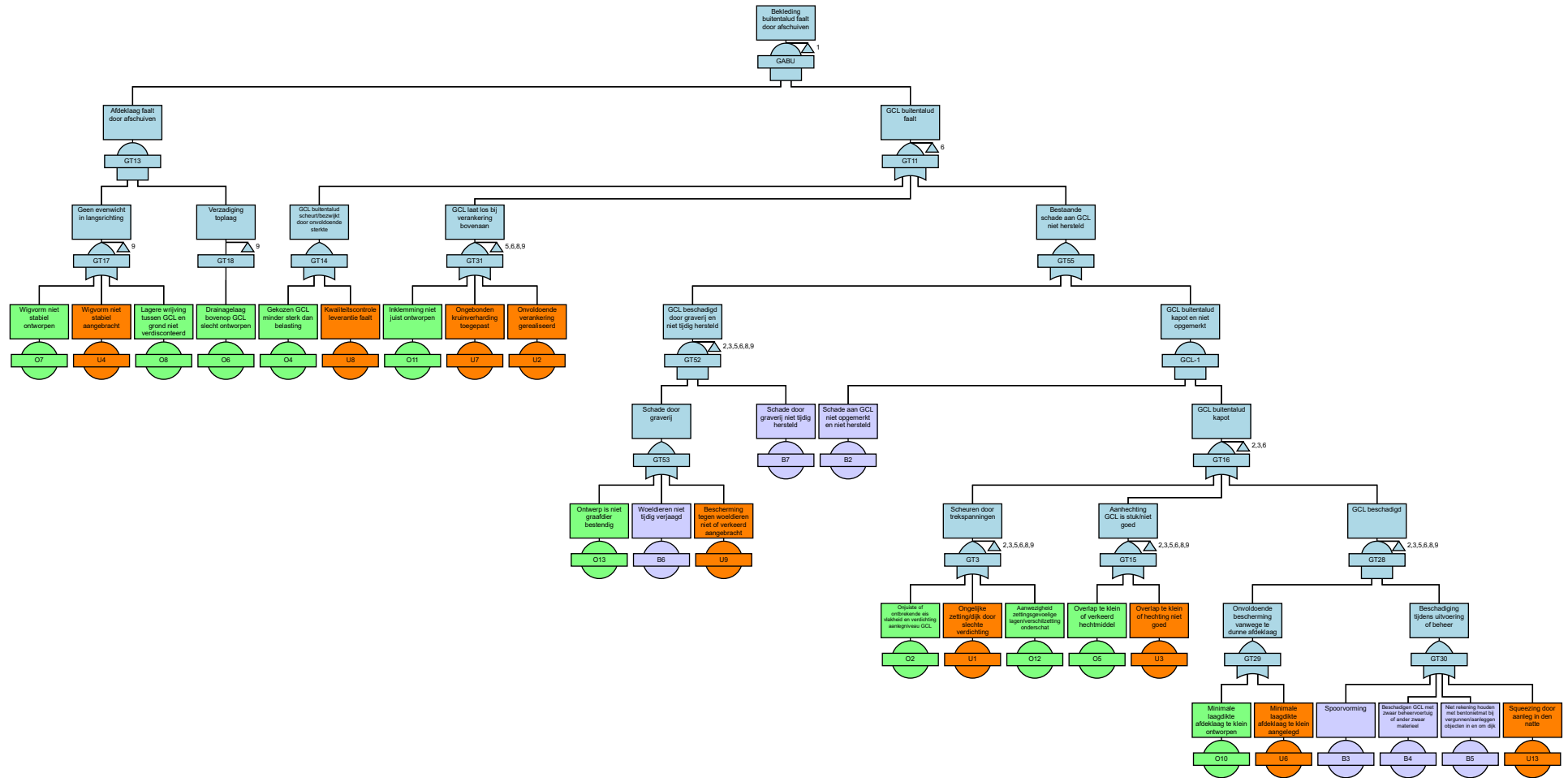
Faalstructuur GCL



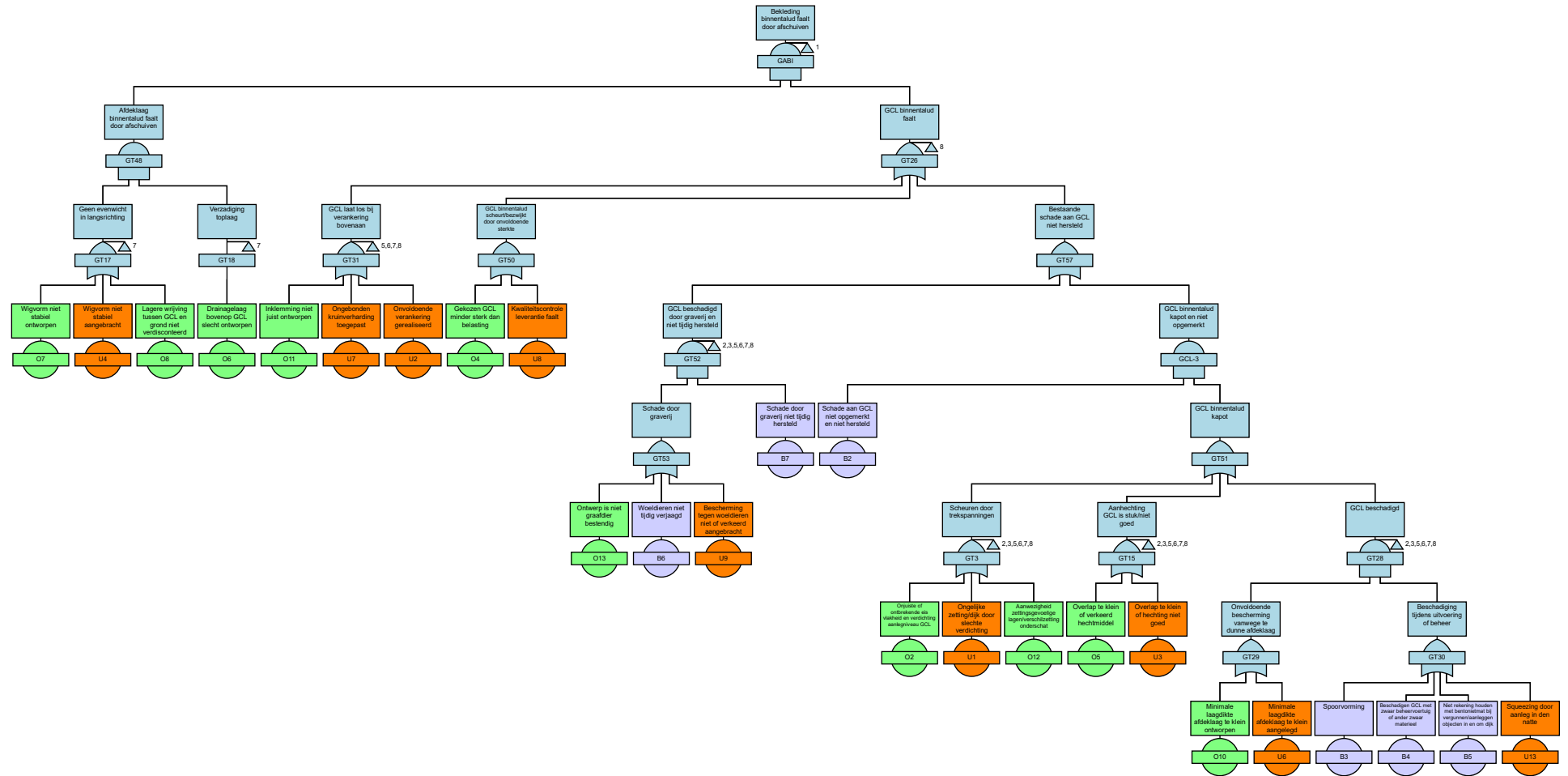
Faalstructuur GCL



Faalstructuur GCL



Faalstructuur GCL



BIJLAGE C STABILITEIT BEKLEDINGSLAAG

Bij deze bijlage hoort een Excel rekensheet.

Uitgewerkte faalmechanismen

In de rekensheet zijn de volgende faalmechanismen uitgewerkt:

1. Opdrukken van de bekledingslaag binnenwaarts en buitenwaarts;
2. Afschuiven van de bekledingslaag binnenwaarts en buitenwaarts inclusief GCL (het glijvlak is tussen de dijkkern en GCL);
3. Afschuiven van de afdeklaag binnenwaarts en buitenwaarts over de GCL (met het glijvlak tussen de GCL en de afdeklaag). Hiervoor zijn twee varianten uitgewerkt:
 - a. De tegenwerkende krachten worden opgenomen door het kielspit;
 - b. Reactiekracht geschematiseerd volgens de Schematiseringshandleiding Grasbekledingen.

Voor de derde optie is tevens een los rekentabblad uitgewerkt waarin verkeersbelasting bij dagelijkse omstandigheden kan worden berekend.

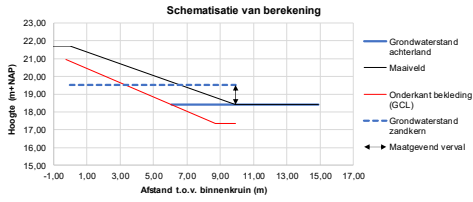
Schematisering van de doorsnede

In Tabel 18 wordt het invoerpaneel getoond van de rekensheet van GABI / STMI. Voor GABU en rekenen met verkeersbelasting is het invoerpaneel vergelijkbaar. Ten opzichte van de SH Grasbekledingen zijn de volgende invoerparameters toegevoegd:

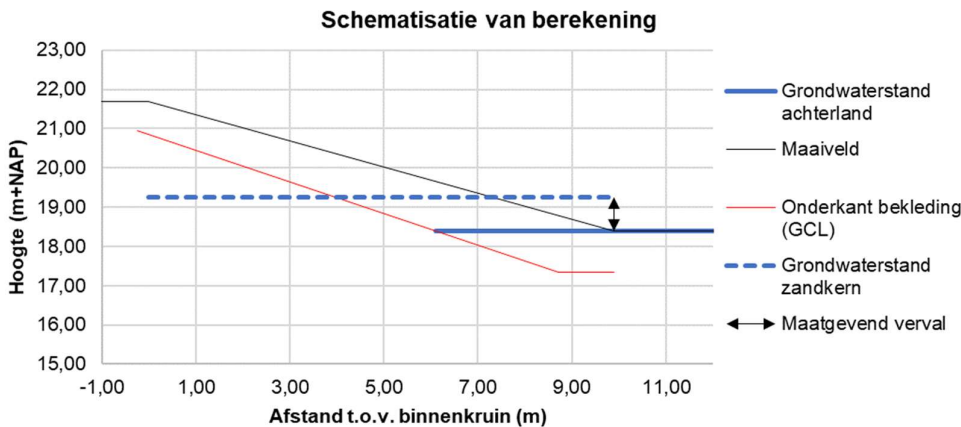
- Overslagdebiet in het ontwerp: op basis hiervan wordt onderscheid gemaakt tussen berekeningen volgens STMI en GABI. Dit resulteert in afwijkende waarden voor volumegewichten en waterspanningen. Het gehanteerde criterium is 0,1 l/m/s bij normwaterstand.
- Taludhelling onder de bekleding en maximale diepte van de bekledingslaag in de teen. Hiermee kan het asymmetrische profiel van de bekledingslaag worden geschematiseerd.
- Onzekerheidsfactor voor cohesie langs de GCL. Deze factor is toegepast omdat het gladde oppervlak van de GCL de cohesie negatief beïnvloedt.
- Reductiefactor van 0,9 op de karakteristieke waarde van de hoek van inwendige wrijving voor bepalen wandwrijving. Deze factor wordt door de leverancier vastgesteld in laboratoria en is in principe bekend voor alle typen geotextiel. De factor wordt toegepast, omdat het gladde oppervlak van de GCL de hoek van inwendige wrijving negatief beïnvloedt. Voor een folie, dat tamelijk glad is, geldt een lagere waarde en voor een grid, dat een sterke interactie met de grond heeft, mag een hoge waarde worden gekozen. Door deze reductiewaarde op de karakteristieke hoek van inwendige wrijving én de materiaalfactor op de tangens van de hoek van inwendige wrijving toe te passen wordt de rekenwaarde van de wandwrijvingshoek (δ) bepaald.
- De rekenwaarde van de maximale treksterkte van de GCL (dus na reductie van de sterkte met afminderingsfactoren) kan worden ingevoerd. Deze waarde wordt toegepast als trekkracht, maar is door de zeer lage maximaal toelaatbare representatieve treksterkte van 4 kN/m niet doorslaggevend voor het ontwerp. Dit is voor de volledigheid wel meegenomen in de rekensheet zodat niet ten onrechte teveel treksterkte wordt meegenomen in het ontwerp. De rekensheet geeft een waarschuwing als een hogere waarde voor de trekkracht is ingevoerd.
- De rekenwaarde van de verankering van het GCL in de kruin kan handmatig worden ingevoerd. Hiermee kan extra trekkracht worden meegenomen.
- Er kan verkeersbelasting worden gebruikt in de berekeningen.

Tabel 18: invoerpaneel van de rekensheet.

Groen = invoerparameters			
Parameters	Symbool	Waarde	Eenheid
Overstagsdebiet van het ontwerp	q	0,1	l/m/s
Ontwerpsituatie binnendijks	-	STMI	-
Kruinhoogte	-	21,70	m+NAP
Maaiveldhoogte	-	18,40	m+NAP
Taludhelling oppervak (tan(α))	-	0,33	-
Taludhelling onder bekleding (tan(α))	-	0,40	-
Deklaagdikte bovenzijde (haaks op talud)	-	0,80	m
Deklaagdikte onderzijde (haaks op maaiveld)	-	1,05	m
Freaticch niveau zandkern	-	19,50	m+NAP
Stijghoogte onder bekleding ter plaatse van de binnenteen	-	18,40	m+NAP
Volumiekegewicht bekleding verzadigd	$\gamma_{\text{verzadigd}}$	20,20	kN/m ³
Volumiekegewicht bekleding veldvochtig	$\gamma_{\text{veldvochtig}}$	19,70	kN/m ³
Zwaarteversnelling	g	9,81	m/s ²
Kar. hoek van inwendige wrijving kernmateriaal	Φ_{ker}	30,00	°
Kar. hoek van inwendige wrijving bekleding	Φ_{bek}	25,00	°
Kar. cohesie bekleding	c_{bek}	2000	Pa
Materiaalfactor tangens phi (volgens §4.1.3.2 van de OBOR)	$\gamma_{\text{tan phi}}$	1,10	-
Materiaalfactor c (volgens §4.1.3.2 van de OBOR)	$\gamma_{\text{m.c}}$	1,25	-
Onzekerheidsfactor cohesie langs GCL	$\gamma_{\text{c.GCL}}$	1,50	-
Modelfactor opdrukken (volgens Schematiseringshandleiding Grasbekledingen)	$\gamma_{\text{opdrukken}}$	1,10	-
Schadefactor opdrukken (volgens Schematiseringshandleiding Grasbekledingen)	$\gamma_{\text{schadefactor}}$	1,10	-
Modelfactor afschuiven (witte vlek OBOR, vooralsnog 1,1)	$\gamma_{\text{afschuiven}}$	1,10	-
Schadefactor afschuiven (witte vlek OBOR, vooralsnog 1,1)	$\gamma_{\text{schadefactor}}$	1,10	-
Reductiefactor hoek van inwendige wrijving door GCL	δ	0,9	-
Rekenwaarde maximale trekkracht GCL	$F_{\text{max trek}}$	4000	N
Freaticch niveau achterland (is gelijk aan maaiveld)	-	18,40	m+NAP
Volumieke massa bekleding verzadigd	$\rho_{\text{B,N}}$	2059	kg/m ³
Volumieke massa bekleding veldvochtig	$\rho_{\text{B,d}}$	2008	kg/m ³
Volumieke massa water	ρ_{w}	1000	kg/m ³
Rekenwaarde deklaagdikte	d	1,05	m
Rek. wandwrijvingshoek kernmateriaal (delta = 0,9)	$\Phi_{\text{d.GCL}}$	24,85	°
Rek. wandwrijvingshoek bekleding (delta = 0,9)	$\Phi_{\text{d.GCL}}$	20,63	°
Rek. hoek van inwendige wrijving bekleding	Φ_{B}	22,97	°
Rek. cohesie bekleding	c_{B}	1600	Pa
Rek. cohesie bekleding langs GCL	c_{d}	1067	Pa
Hoek passieve gronddruk (ten behoeve van F3 in kielsplit)	α	90	°
Hoek maaiveld (ten behoeve van F3 in kielsplit)	β	0	°
Delta hoek van inwendige wrijving volgens Muller-Breslau (ten behoeve van F3 in kielsplit)	$\delta_{\text{Muller-Breslau}}$	-22,97	°



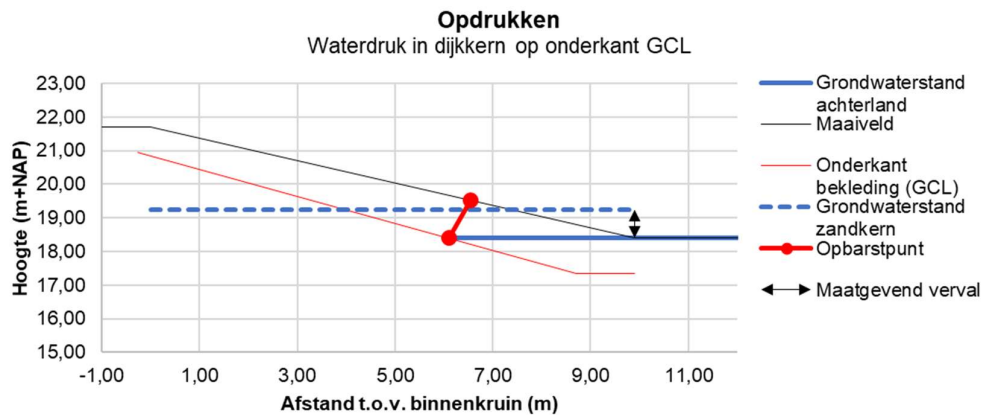
In de rekensheet wordt naast het invoerpaneel de schematisatie van de doorsnede getoond (Figuur 23). Hiermee kan visueel worden gecontroleerd of de geometrie en waterstand correct is ingevoerd.



Figuur 23: voorbeeld van invoer voor de berekeningen.

Berekening 1: opdrukken

De eerste controle die dient te worden uitgevoerd is of door een verhoogde freatische lijn in de dijk kern opdrukken van de bekledingslaag kan optreden. Hierbij wordt de rekenmethode gehanteerd zoals voorgeschreven in de SH Grasbekledingen. De gekozen freatische lijn in de dijk kern heeft een sterke afhankelijkheid van de drainerende werking richting het achterland. Wederom kan visueel worden gecontroleerd of in de berekening de correcte invoerwaarden worden gehanteerd (zie voorbeeld in Figuur 24).

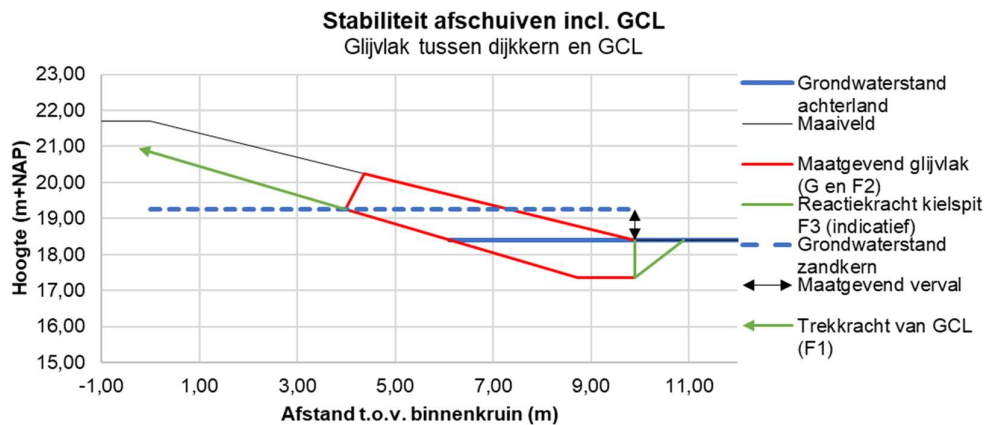


Figuur 24: schematisering van de berekening voor opbarsten.

Berekening 2: afschuiven bekledingslaag (glijvlak tussen dijk kern en GCL)

Deze berekening gaat uit van een glijvlak tussen de dijk kern en de GCL. Hier heeft het freatische niveau in de dijk kern invloed op het resultaat omdat er waterspanningen optreden onder het schuifvlak. De rekenmethodiek is gebaseerd op stabiliteit afschuiven binnentalud uit de SH Grasbekledingen, waarbij de grens van het schuifvlak wordt gekozen ter plaatse van het freatische niveau in de dijk kern. In de rekensheet wordt naast de berekeningen een doorsnede getoond met een schematisatie van de invoerwaarden (zie voorbeeld in Figuur 25). Op de volgende punten wordt in de berekening afgeweken ten opzichte van de SH Grasbekleding (bron: ref 4).

- F1 wordt meegenomen in de berekening omdat GCL trekkracht kan opnemen, met een maximale waarde van 4 kN/m (representatieve waarde).
- Ter bepaling van F2 wordt gerekend met een wandwrijvingshoek in plaats van hoek van inwendige wrijving ($\delta = 0,9 * \phi$ of conform productblad van leverancier) en een met factor 1,5 gereduceerde cohesie vanwege beperkte aanhechting van de grond op de GCL.
- Het glijvlak loopt door tot onder de bekledingslaag in de teen. Daarom wordt F3 meegenomen door de passieve gronddruk te berekenen. Hiervoor geldt niet de reductiefactor van 0,9 omdat het glijvlak niet over de GCL gaat.
- Bij STMI wordt gerekend met een veldvochtig volumegewicht van de kleding, bij GABI wordt gerekend met verzadigd volumegewicht.
- Het is mogelijk dat het ontwerp in de binnenteen een dünnere deklaag dikte heeft dan wordt meegenomen in de schematisering. Dit resulteert in een overschatting van G en F2. Voor de reactiekracht in het kielspit (F3) wordt wel de werkelijke verticale dikte gehanteerd (zie Figuur 25).

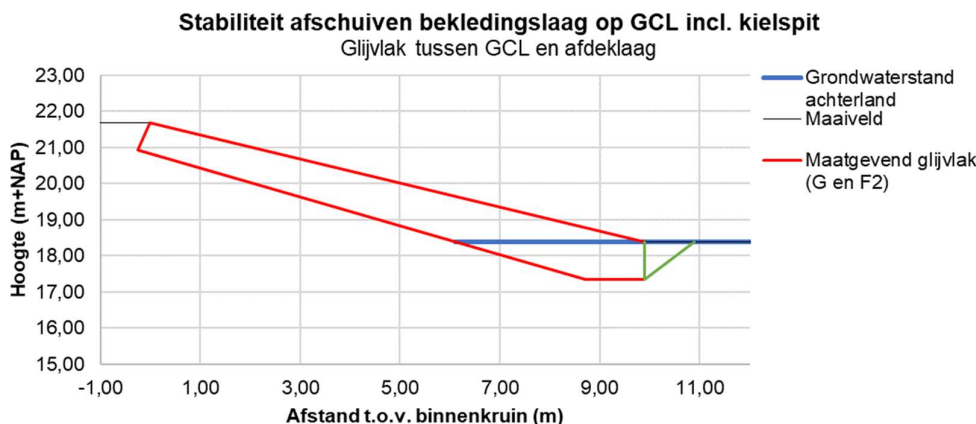


Figuur 25: schematisering van de berekening stabiliteit afschuiven inclusief GCL.

Berekening 3a: afschuiven over de GCL (glijvlak tussen GCL en afdeklaag) en F3 inclusief kielspit

Deze berekening gaat uit van een glijvlak tussen de GCL en de afdeklaag op de GCL. In de rekensheet wordt naast de berekeningen een doorsnede getoond met een schematisatie van de invoerwaarden (Figuur 26). De berekening wijkt af van de SH Grasbekledingen op de volgende punten.

- Het freatisch niveau in de dijkkern heeft geen invloed op de stabiliteit, omdat verondersteld wordt dat de GCL ondoorlatend is.
- Ter bepaling van F2 wordt gerekend met een wandwrijvingshoek in plaats van hoek van inwendige wrijving ($\delta = 0,9 * \phi$ of conform productblad van leverancier) en een met factor 1,5 gereduceerde cohesie vanwege beperkte aanhechting van de grond op de GCL.
- Het glijvlak loopt door tot onder de bekledingslaag in de teen. Daarom wordt F3 meegenomen door de passieve gronddruk te berekenen. Hiervoor geldt niet de reductiefactor van 0,9 omdat het glijvlak niet over de GCL gaat.
- Het is mogelijk dat het ontwerp in de binnenteen een dünnere deklaag dikte heeft dan wordt meegenomen in de schematisering. Dit resulteert in een overschatting van G en F2. Voor de reactiekracht in het kielspit (F3) wordt wel de werkelijke verticale dikte gehanteerd (Figuur 26)
- Bij STMI wordt gerekend met een veldvochtig volumegewicht van de kleding (grondspanning = korrelspanning), bij GABI wordt gerekend met verzadigde grond (grondspanning – waterspanning = korrelspanning).

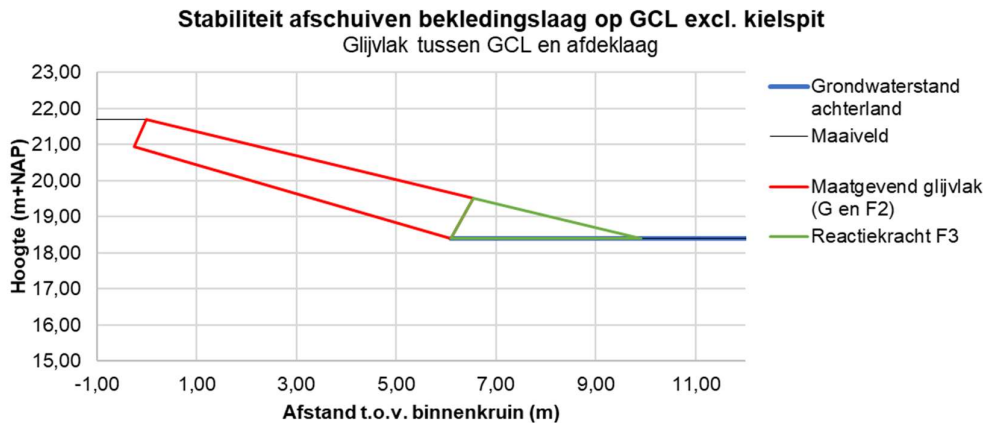


Figuur 26: schematisering berekening stabiliteit bekledingslaag op de GCL inclusief kielspit.

Berekening 3b: afschuiven over de GCL (glijvlak tussen GCL en afdeklaag) en F3 volgens SH

Deze berekening gaat uit van een glijvlak tussen de GCL en de afdeklaag op de GCL. In de rekensheet wordt naast de berekeningen een doorsnede getoond met een schematisatie van de invoerwaarden (Figuur 27). Anders dan bij berekening 3a wordt de reactiekracht geschematiseerd volgens de SH Grasbekledingen. Berekening met de laagst berekende stabiliteit is maatgevend. De berekening wijkt af van de SH Grasbekledingen op de volgende punten.

- Het freatisch niveau in de dijk kern heeft geen invloed op de stabiliteit, omdat verondersteld wordt dat de GCL ondoorlatend is.
- Ter bepaling van F2 wordt gerekend met een wandwrijvingshoek in plaats van hoek van inwendige wrijving ($\delta = 0,9 * \phi$ of conform productblad van leverancier) en een met factor 1,5 gereduceerde cohesie vanwege beperkte aanhechting van de grond op de GCL.
- Bij STMI wordt gerekend met een veldvochtig volumegewicht van de kleding (grondspanning = korrelspanning), bij GABI wordt gerekend met verzadigde grond (grondspanning – waterspanning = korrelspanning).



Figuur 27: schematisering berekening afschuiven bekledingslaag op de GCL exclusief kielspit.

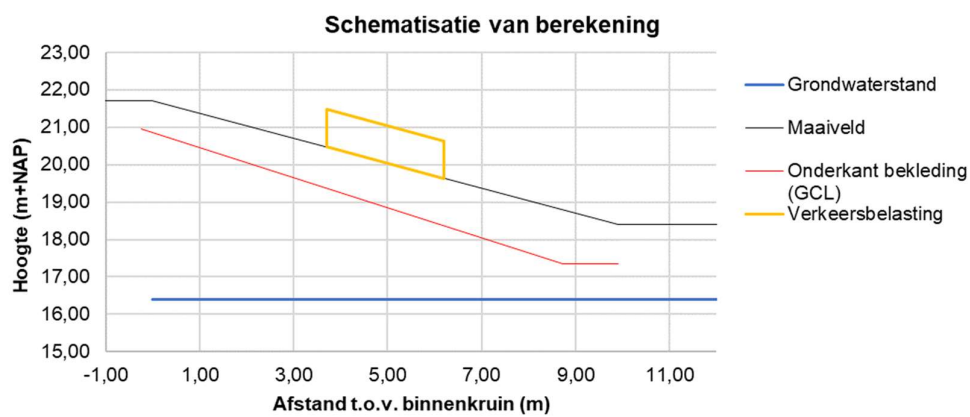
Afschuiven bekledingslaag buitentalud

In de rekensheet is een separaat tabblad opgenomen voor de berekeningen van de bekleding aan de buitenzijde. De werking van de berekeningen is gelijk aan de hierboven genoemde berekeningen. Het verschil zit in de waarden die de ontwerper dient te hanteren. Ter verduidelijking zijn de figuren gespiegeld opgenomen in de sheet.

Afschuiven bekledingslaag met verkeersbelasting

In de rekensheet is een separaat tabblad opgenomen voor de berekeningen van de bekleding inclusief verkeersbelasting. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt tussen binnentalud of buitentalud omdat het uitgangspunt is dat er geen verhoogd freatisch niveau in de zandkern aanwezig is. Hierdoor wordt alleen het afschuiven van de afdeklaag over het GCL in beschouwing genomen. De berekening wijkt af van de SH Grasbekledingen op de volgende punten.

- De verkeersbelasting kan handmatig worden opgegeven.
- Wordt uitgegaan van een aanpassingspercentage van 100%.
- Er kan worden gerekend zonder materiaalfactoren omdat het geen uiterste grenstoestand maar een bruikbaarheidsstoestand betreft.
- Er kan worden gekozen tussen een freatisch niveau op maaiveld of een freatisch niveau beneden de bekledingslaag (zie voorbeeld in Figuur 28). Bij het laatste wordt gerekend zonder waterspanningen.



Figuur 28: schematisatie afschuiven bekledingslaag op de GCL inclusief verkeersbelasting waarbij het freatisch niveau onder de bekledingslaag aanwezig is.

BIJLAGE D MINIMUMSPECIFICATIES GCL

In Tabel 19 is een interpretatie van de minimumeisen volgens BRAD16 opgenomen, waaraan de ervaringen uit de Nederlandse en Duitse adviespraktijk zijn toegevoegd. De eisen 11 en 15 uit BRAD16 zijn niet overgenomen, want dit betreffen eisen omtrent geotechnische stabiliteit en duurzaamheid, die in hoofdstuk 5 aan de orde komen.

De norm waarin wordt verwezen in Tabel 19 (de Duitse norm waarin anno 2022 de eis voor de eigenschap nader wordt beschreven) is informatief. Eventuele nieuwe versies of vervangingen van Duitse normen worden niet actueel gehouden in deze handreiking en dienen door de ontwerper zelf te worden opgevraagd en geraadpleegd.

De eisen zijn bewust in het Engels, zodat een taalbarrière voor leveranciers uit het buitenland wordt voorkomen.

Tabel 19: minimumeisen GCL.

No.	property	standard	requirement
1	amount of bentonite at 15% water content	DIN EN 14196	≥ 4,500 g/m ² natural or activated sodium bentonite
1a	Bentonite particle size		Powder bentonite or granular bentonite 97% < 1mm
2	montmorillonite content	VDG P 96	≥ 300 mg/g Methylene blue value ²
3	Permeability coefficient	DIN EN 16416	≤ 5×10 ⁻¹¹ m/s
3a	Overlap permittivity (Confining stress 15 kN/m ² and constant water head of 30 cm)	BQS 5-5 „Oberflächenabdichtungskomponenten aus geosynthetischen Tondichtungsbahnen“ vom 12.06.2018 und die EAG-GTD „Empfehlungen zur Anwendung geosynthetischer Tondichtungsbahnen von 2002.	The system permittivity ³ (GCL product and overlaps) should have a permittivity ≤ 6×10 ⁻⁹ l/s
4	Bentonite swell index	ASTM D5890	24 ml
5	Puncture resistance GCL ⁴	DIN EN ISO 12236	≥ 3,5 kN
6	Cover- and carrier geotextile ⁵	DIN EN ISO 9864	Cover ⁶ : nonwoven (GTX-N) ≥ 300 g/m ² Carrier geotextile composite: woven (GTX-W) ≥ 100 g/m ² and non-woven (GTX-N) ≥ 220 g/m ²
7	Tensile strength of total GCL	DIN EN ISO 10319	≥ 15 / 15 kN/m (MD/CMD)

² Corresponds to about 70% Montmorillonite.

³ The system permittivity is determined as the results of the permeability tests of the GCL.

⁴ To be demonstrated on the GCL, not on the individual top and bottom layer.

⁵ The cover is the visible geotextile as installed in the field, the carrier geotextiel is the lower one.

⁶ For the cover nonwoven 300 gr/m² is required because that's the requirement of BRAD16.

No.	property	standard	requirement
8	Peel strength ⁷	DIN EN ISO 13426-2, ASTM D 6496	≥ 100 N/10cm
9a		BQS 5-5	Slope angle 1 : 3 or flatter ≥ 15 kN/m ²
9b	internal long-term shear strength ^{8 9}	BQS 5-5	Slope angle 1 : 2,5 up to 1:3: ≥ 18 kN/m ²
9c		comparable with BQS	Slope angle steeper than 1:2,5: demonstrate internal long-term shear strength based on BQS
10	Erosion resistance	RPW	loss of bentonite ≤ 5 % of Nr. 1 at test runtime of 96 h
11	Durability (in terms of lifespan) of geotextile components as described under No. 6	DIN EN 13253 Annex B	Predicted to be durable for 100 years in natural soils with 4 ≤ pH ≤ 9 and soil temperatures ≤ 25 °C

The system permittivity is determined as the results of the permeability tests of the GCL:

- GCL without overlap
- GCL with 30 cm longitudinal overlap
- CGL with 30 cm transverse overlap
- T-joint (longitudinal + transverse overlap = 30 x 30 cm).

The system permeability is calculated from the individual results in proportion to their realistic area shares. Using the example of a 40 m long and 5 m wide GCL panel, these would be an area percentage of: GCL = 93,3%, longitudinal overlap = 6%, cross overlap 0,67%, T-joint 0,045%.

⁷ Peak value.

⁸ In analogy to LAGA suitability procedure for GTD. Result of a long-term shear creep test with ≥ 10,000 h verification in accordance with "Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 5-5 Oberflächenabdichtungs-komponenten aus geosynthetischen Tondichtungsbahnen vom 07.05.2014, Abschnitt 3.2" of LAGA.

⁹ If no investigations of the long-term shear strength are available yet, a bond strength of 100 N/10 cm according to line 9

BIJLAGE E FOTOBIJLAGE



Figuur 29: verbetering Oederdijk 2018 (foto Kees Dorst).

De dijk in Beesel is grotendeels opgetrokken uit gebiedseigen zandige klei, aangevoerd van het dorp Heel dat circa 20 km stroomopwaarts ligt.



Figuur 30: aanvoer van gebiedseigen grond per schip, vanuit Heel naar Beesel (foto: Wiel aan den Boom).



Figuur 31: verwerken gebiedseigen grond en GCL op dijk bij Beesel (foto: Wiel aan den Boom).

Een recent project waar op de kruin van de waterkering een stabilisatie is uitgevoerd is de Oostdijk van de hoogwatergeul tussen Veessen en Wapenveld. Met een gestabiliseerde verhardingslaag kan inklemming van het GCL op de kruin worden bewerkstelligd.



*Figuur 32: mengwoeler voor stabilisatie van de toplaag op de kruin.
(foto: Rimmer Koopmans)*



*Figuur 33: stabilisatie toeslagstof (links) en gemengde grondlaag (rechts).
(foto: Rimmer Koopmans)*

De navolgende foto's tonen voorbeelden van verschillende soorten krammen. Bron: Evaluatieoefening met noodmaatregelen bij Living Lab Hedwige Prosper Polder 30 en 31 maart 2021, Wiki Noodmaatregelen.



*Figuur 34: verschillende soorten spelden (Y-pins) en haarspelden (U-pins) van betonstaal en "zachtstaal".
(foto: Ulrich Förster)*



*Figuur 35: Schroefpennen met ring (van links naar rechts Wormi, Gripple, Peggypeg).
(foto: Ulrich Förster)*

COLOFON

DIJKEN MET GCL (BENTONIETMAT)
HANDREIKING VOOR TOEPASSING VAN GCL IN VOORLANDEN EN OP TALUDS VAN PRIMAIRE EN
REGIONALE WATERKERINGEN (GROENE VERSIE)

KLANT
POV-DGG

AUTEUR
Rimmer Koopmans

PROJECTNUMMER
PROG.29.25.R.IO.01

ONZE REFERENTIE
groene versie

DATUM
22 mei 2023

STATUS
Definitief

GECONTROLEERD DOOR

VRIJGEGEVEN DOOR

klankbordgroep leden
n.v.t.

Kees Dorst
innovatiemanager Waterschap Limburg

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 264
6800 AG Arnhem
Nederland
+31 (0)88 4261 261

www.arcadis.com