

JAARGANG 28 NUMMER 2 JUNI 2024

# Geotechniek

ONAFHANKELIJK VAKBLAD  
VOOR GEBRUIKERS VAN  
GEOKUNSTSTOFFEN



**INNOVATIEVE TOEPASSING  
BENTONIETMATTEN BIJ WATERKERINGEN  
DIJKVERSTERKING BEESEL LIMBURG**



**Rijk Gerritsen**  
Naue Nederland



**Jan-Willem Bardeel**  
ABT



**Kees Dorst**  
Waterschap Limburg /  
Dorst Waterbouw Consult



**Jan Meerkerk**  
Combinatie dijkversterking  
Beesel (Mourik en FL)

# INNOVATIEVE TOEPASSING BENTONIETMATTEN BIJ WATERKERINGEN DIJKVERSTERKING BEESEL LIMBURG

## Inleiding

Om aan de wettelijke hoogwaterveiligheidsnorm te kunnen voldoen zijn de dijken langs de Maas bij Beesel in Limburg op verschillende plaatsen verhoogd en versterkt. Als innovatie binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) is de waterkering bij Beesel over twee dijksecties voorzien van bentonietmatten, een maatregel die gelijkwaardig is aan de traditionele kleibe-

kleding. De uitvoering hiervan betreft een primeur in Nederland. Een groot voordeel van deze methodiek is dat er optimaal gebruik gemaakt kon worden van gebiedseigen grond. Voor het implementeren van de oplossing is kennis en ervaring ingebracht vanuit waterbouwkundige projecten in Duitsland, waar de techniek van bentonietmatten op waterkeringen al meer dan 20 jaar wordt toegepast. Met een zeer grondige

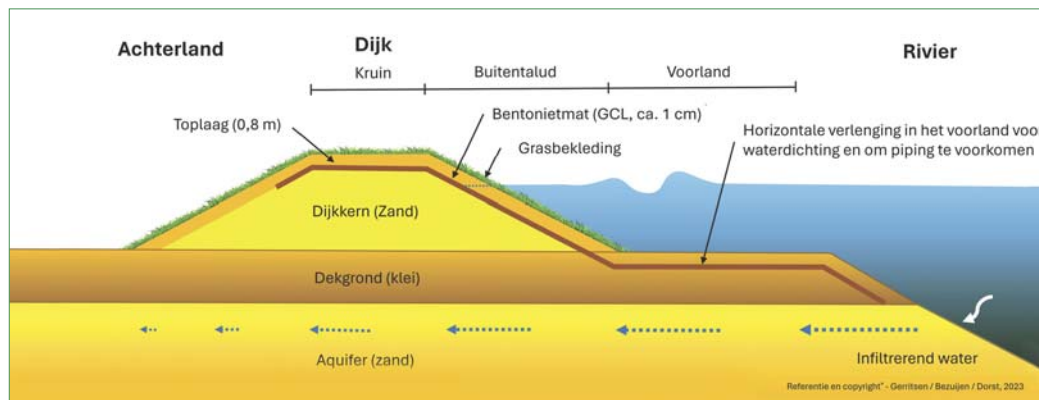
ontwikkelingsfase vanaf 2015 is deze techniek nu ook in Nederland geïntroduceerd. In 2019 zijn bentonietmatten voor het eerst in Nederland bij een dijkversterking in Neer toegepast in het voorland als anti-piping maatregel. In 2022 zijn bentonietmatten toegepast op het buitentalud, de kruin en een deel van het binnentalud van de dijk in Beesel (zie figuur 1). Dit project is uitgevoerd door de Combinatie Dijkversterking Heel & Beesel (Mourik en FL).



**Figuur 1** – Uitvoering bentonietmatten dijkversterking Beesel op het buitentalud en kruin van de dijk en afwerking met een leeflaag van grond.

## POV Dijkversterking met Gebiedseigen Grond

Sneller, goedkoper en duurzamer de waterkeringen versterken met gebiedseigen grond: dat is de doelstelling van de Projectoverstijgende Verkenning Dijkversterking met Gebiedseigen Grond (POV DGG). Deze verkenning is een initiatief van het HWBP en streeft een optimale samenstelling en vorm van een waterkering na, met een maximaal gebruik van lokaal beschikbare grond. Dit wordt ook wel ‘grondgestuurd ontwerpen’ genoemd. Eén van de innovaties uit de POV DGG is het toepassen van bentonietmatten (Geo Clay Liner of kortweg GCL) bij dijken [Bardeel, 2022]. Bij dijkversterkingen is normaliter een grote hoeveelheid hoogwaardige klei nodig om de dijk af te dichten en erosiebestendig te maken. Goede kwaliteit dijkklei wordt echter steeds schaarser en is vaak binnen redelijke afstand van de projectlocatie niet voorhanden. Er zijn dijkversterkingen bekend, waarbij de dijkklei vanuit België over een afstand van meer dan 200 km is aangevoerd. Het transport van grote hoeveelheden grond over grote afstanden leidt tot een hoge CO<sub>2</sub>-uitstoot en hoge bouwkosten. In veel projecten kan de bentonietmat in combinatie met een afdeklaag van gebiedseigen grond de volledige kleibekleding vervangen, waardoor de aanvoer van die klei niet nodig is. Dit scheelt aanzienlijk in de transportintensiteit: één vrachtwagen kan ongeveer 4000 m<sup>2</sup> aan bentonietmatten transporteren, wat overeen komt met 250 vrachtwagens klei. Dit werkt ook gunstig op de verkeersveiligheid en overlast voor de omgeving. De toepassing van bentonietmatten is dan ook een versterkingsmaatregel die de mogelijkheden voor het toepassen van gebiedseigen grond vergroot.



**Figuur 2** – Schematische doorsnede toepassing bentonietmat als waterafdichting op buitentalud en kruin van de dijk ter vervanging van een traditionele kleibekleding of ter verlenging van de kwelweglengte in het voorland om piping te voorkomen.

## SAMENVATTING

Als innovatie binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) is de waterkering bij Beesel over twee dijksecties voorzien van een hoogwaardige bentonietmat. De uitvoering met bentonietmatten is een primeur in Nederland. De bentonietmatten zijn over een totale dijk lengte van 530 meter toegepast op het buitentalud, de kruin en een deel van het binnentalud van de dijk. Een uitgebreide handreiking voor toepassing van bentonietmatten bij dijken is in het

kader van de dijkversterking bij Beesel toegepast, geverifieerd en aangevuld. Dit artikel beschrijft de overwegingen voor bentonietmatten binnen het afwegingskader 'Duurzame dijken'. Verder gaat het artikel uitgebreid in op de ontwerpaspecten bij het project in Beesel, de uitvoering, en het beheer- en onderhoud. Tenslotte gaat het artikel in op monitoring van de grasbekleding.

### Wat zijn bentonietmatten

Bentonietmatten zijn een meerlaags geocomposiet met in de kernzone zeer opzwellbaar natuurlijk kleimineraal (bentoniet), zie figuur 3. De geotextiel onder- en bovenlaag bepalen de technische sterkte-eigenschappen en robuustheid van de bentonietmat. De kern met  $\geq 4500$  g/m<sup>2</sup> hoogwaardig natriumbentoniet bepaalt de lange-termijn afdichtingseigenschappen. Alle componenten van de bentonietmat zijn robuust met elkaar verbonden door middel van de naaldpriktechniek (needle-punch), zie figuur 4. Bentoniet heeft van nature een lage inwendige wrijvingshoek van circa 8 graden, maar door de needle-punch techniek worden de lagen stevig met elkaar verbonden en wordt de inwendige wrijvingshoek vergroot. Hiermee worden de bentonietmatten geschikt voor inbouw op een talud. De verbinding van de boven- en onderlaag wordt in een laboratorium getest met behulp van zogenaamde pelproeven (zie figuur 5). Deze dient een sterkte te hebben van  $\geq 100$  N/10 cm conform de handreiking [Koopmans, Dorst & Zuijlen, 2023]. Voor de afschuifsterkte bij bentonietmatten is het voor de toepassing bij dijken belangrijk niet alleen te kijken naar de interne afschuifweerstand, maar ook naar de schuifsterktes op de onder- dan wel bovenzijde in combinatie met de grondomstandigheden. Deze schuifsterktes worden bepaald met behulp van zogenaamde 'direct shear' testen.

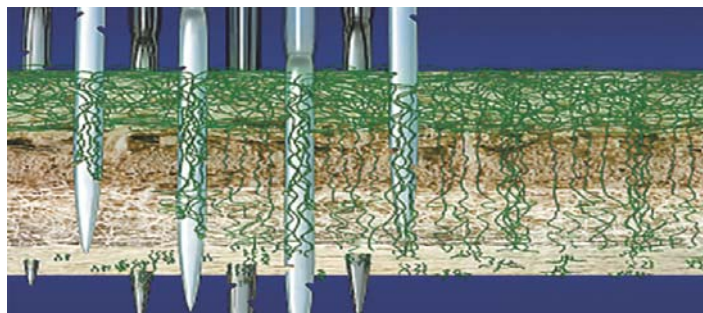
Bentonietmatten worden geproduceerd en in droge vorm (ca. 10% watergehalte in het bento-

niet) aangeleverd op een projectlocatie. Het afdichtende effect van de bentonietmat ontstaat door waterabsorptie na installatie. Bij het hydrateren van de bentoniet wordt een moleculaire verbinding aangegaan met de zogenaamde bentonietplaatjes, waarbij de mat homogeen dicht zwelt. Het zwellvermogen van de bentoniet wordt getest met de zogenaamde 'swell index test', waarbij twee gram droog bentoniet binnen één

dag minimaal dient op te zwellen tot 24 ml (zie figuur 6). Voor zwelling van de mat bij inbouw is het belangrijk dat de mat voldoende homogene belasting heeft met gronddruk om overmatige zwel tegen te gaan. Bij toepassing van bentonietmatten is de absoluut minimale afdekking 0,3 m, echter bij dijken wordt een grondafdekking geadviseerd van 0,80 tot 1,20 meter (zie beheer- en onderhoud).



**Figuur 3** – Detail bentonietmat als meerlaags geocomposiet met in de kernzone zeer opzwellbaar natuurlijk kleimineraal (bentoniet).



**Figuur 4** – Alle componenten van de bentonietmat worden robuust met elkaar verbonden door middel van naaldprik techniek (needle-punch).

### De twee functies van een kleilaag of bentonietmat: afdichting en erosiebestendigheid

Voor afdichting of waterremming is een bentonietmat een goede vervanger van een traditionele kleilaag. Met een dikte van circa één cm wordt minimaal dezelfde permittiviteit gehaald over de functionele levensduur. De permittiviteit is gedefinieerd als doorlatendheid x dikte [1/s]. De levensduur van de bentonietmat zit in dezelfde range als de ontwerp levensduur van dijken met minimaal 50 jaar. De bentonietmat heeft zelfhelende eigenschappen, waarbij (kleine) beschadigingen zullen dicht zwellen.

De bentonietmat is opgebouwd met een duurzame geotextiele onder- en bovenlaag, stevig met elkaar verbonden. Bij inbouw in dijken zal een bentonietmat in normale omstandigheden altijd afgedekt zijn met een grondlaag

en grasmat. Ingebouwd is de bentonietmat zeer erosiebestendig. In een calamiteitensituatie met het falen van de grasmat en het wegspoelen van de toplaag zou een bentonietmat theoretisch vrij kunnen komen te liggen. Het is dan belangrijk dat de bentonietmat zodanig sterk is dat hij in zo'n situatie heel blijft. Overlappen worden altijd met de stroomrichting mee gelegd en vormen een goede afdekking bij stromend water. De golfwerking op de overlappen is nog een kennisleemte. Grootschalig onderzoek hiernaar gaat binnenkort starten in het GWK+ te Hannover. In afwachting van de onderzoeksresultaten kan op dit moment nog geen erosiebestendigheid of reststerkte worden toegekend aan de bentonietmatten. Daarom is voor nu de kwaliteit van de afdekkende gebiedseigen grond samen met de (verwachte) kwaliteit van het gras bepalend voor de erosiebestendigheid. In projecten met relatief lage golfbelasting kan met de afdeklaag en gras voldoende erosiebestendigheid worden verkregen.



**Figuur 5 –** Laboratoriumtest verbinding van de geotextiel boven- en onderlaag met zogenaamde pelproeven in trek-apparatuur.



**Figuur 6 –** Laboratoriumtest zwelvermogenbentoniet met de ‘swell index test’, waarbij 2 gram droog bentoniet binnen 1 dag minimaal dient op te zwellen tot 24 ml.

Bentonietmatten zijn ontwikkeld in de jaren ‘80, zodat er meer dan 40 jaar ervaring is met het ontwerp, de eigenschappen en toepassingen. In de waterbouw en bij dijken is er reeds meer dan 20 jaar ervaring. Een belangrijk deel van alle ervaring is opgedaan in Duitsland met honderden civiele en milieukundige projecten. Hierbij zitten ook toepassingen op dijken, zoals bij de Lippe, Kinzig en Elbe. De toepassing van hoogwaardige bentonietmatten op dijken betreft in Duitsland een volwaardige en geaccepteerde bouwtechniek, waarbij de richtlijnen zijn vastgelegd in [Brad, 2016]. Voor de toepassing in dijken heeft Naue de bentonietmat Bentofix® B4000 ontwikkeld. Deze bentonietmat is ook bij de dijkversterking in Beesel toegepast. De bentonietmat onderscheidt zich in het gebruik van gecertificeerde grondstoffen voor de geotextielen, hoogwaardige eigenschappen van de geotextiel boven- en onderlaag (robuustheid), hoge afschuifsterktes en de kwaliteit van het bentoniet.

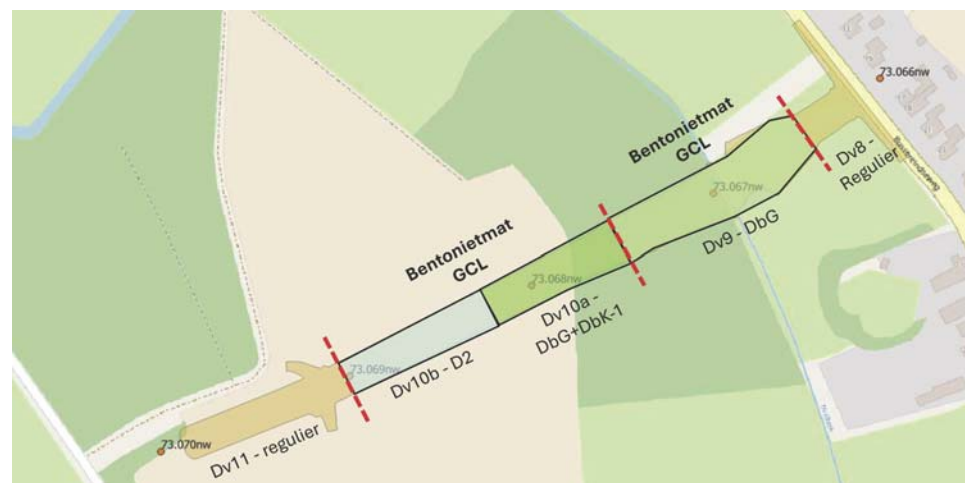


**Figuur 8 –** Publicatie dijken met GCL (bentonietmat) – Handreiking voor toepassing van GCL in voorlanden en op taluds van primaire en regionale waterkeringen.

### Afwegingskader bentonietmatten bij duurzame dijken

Het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) staat voor de opgave om veilige dijken te realiseren binnen de afgesproken kaders van geld en tijd. Hiernaast hebben alle alliantiepartners zich gecommitteerd aan ambities op het gebied van energie, klimaat en circulariteit. Deze ambities zijn gebaseerd op afspraken vanuit diverse akkoorden, zoals het Klimaatakkoord, het Nationaal Grondstoffenakkoord en de Green Deal Duurzaam GW 2.0. Uit deze afspraken volgt dat dijkversterkingen in 2030 zo veel mogelijk circulair en klimaatneutraal moeten zijn. Om termen met betrekking tot duurzaamheid naar alle betrokkenen eenduidig te maken is vanuit het HWBP de duurzaamheidsroos ontwikkeld (zie figuur 7). Centraal staat dat dijken op sobere en doelmatige wijze waterveilig worden gemaakt. Hieromheen zijn drie hoofdsectoren gedefinieerd

**Figuur 7 –** Duurzaamheidsroos Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) met hierin de bijdrage van bentonietmatten (oranje stippen) in 6 van de 12 kwadranten.



**Figuur 9 –** Bovenaanzicht dijkversterking Beesel met nummering dijkvakken, locaties met bentonietmat en overzicht grasmengsels voor monitoring ontwikkeling grasbekleding.

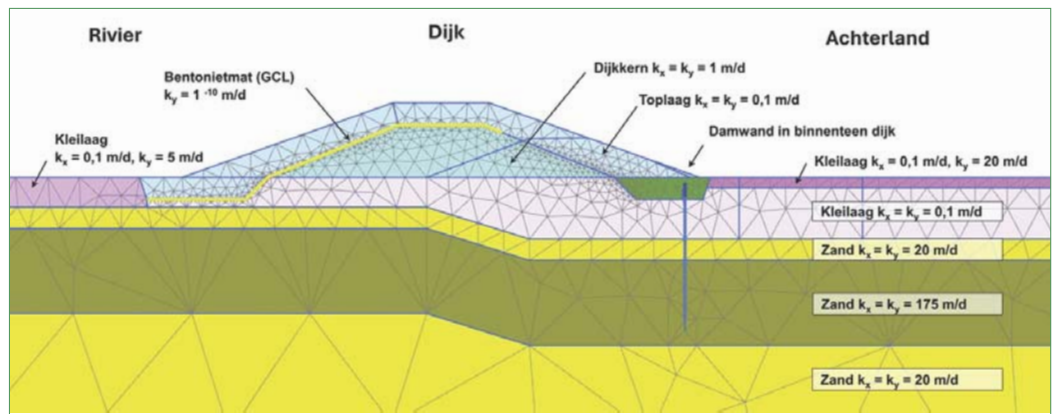
met Energie & Klimaat, Circulariteit en Ruimtelijke Kwaliteit [HWBP, 2022]. Innovaties voor dijkversterkingen spelen binnen het HWBP-programma een belangrijke rol. De toepassing van bentonietmatten past hier volledig in en heeft bij realisatie van duurzame dijken de volgende eigenschappen en voordelen ten opzicht van een traditionele kleibekleding:

1. Klimaatbestendigheid: zeer goede weerstand tegen uitdroging. Dit is van toenemend belang gelet op de steeds drogere en hetere periodes.
2. Stimulans voor toepassing van gebiedseigen grond. Substantiële vermindering grondtransport en vermindering gebruik van primaire bouwmaterialen (zand, klei).
3. Vermindering CO<sub>2</sub>-emissies als bijdrage naar realisatie. De productie en levering van bentonietmatten kan daarbij worden vergeleken met de (grootschalige) winning en transport van traditionele klei. De vermindering van CO<sub>2</sub>-emissie is van toenemend belang voor de realisatie van klimaatneutrale dijkversterkingsprojecten.
4. Bij toepassing in het voorland als anti-pipingmaatregel: snelle realisatie, minder diep te ontgraven.
5. Ook onder water te installeren met een speciaal type bentonietmat met zand-inlage (tricomposiet). In dat geval geen bemaling nodig.
6. Aanlevering kant-en-klaar product. Homogene producteigenschappen met continue geborgde kwaliteit op basis van intensieve productie-kwaliteitscontroles.
7. Technisch hoogwaardig geo-bouw materiaal met lange aantoonbare technische en functionele levensduur tot 100 jaar.
8. Van belang voor beheer- en onderhoud: onderhoudsarme of -vrije toepassing. Mocht er door onvoorziene omstandigheden schade ontstaan, dan is deze te repareren.
9. Hoge installatiesnelheid met 1500m<sup>2</sup>/dag, leidend tot kortere realisatietijd bij dijkversterkingsprojecten. Sneller aan te brengen dan een traditionele kleibekleding met laagsgewijze verdichting.
10. Kosteneffectief: substantieel lagere bouwkosten in vergelijking kleiafdichting (factor 2 tot 3 verlaging in bouwkosten afdichtingslaag is mogelijk).

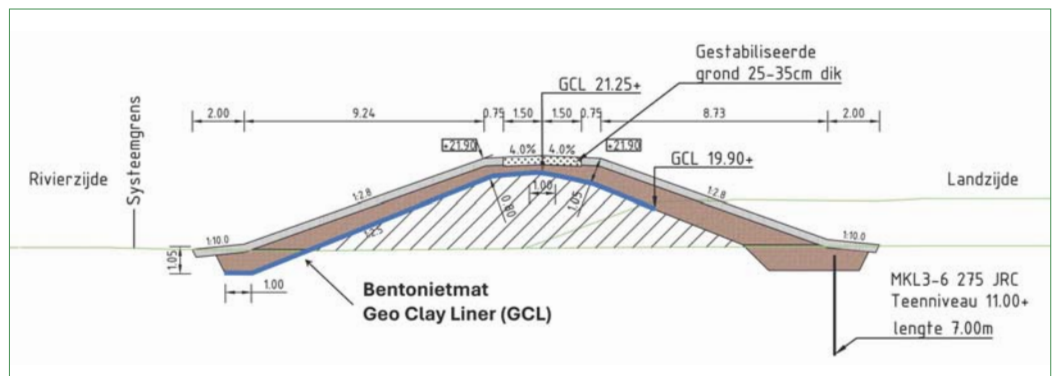
Als de bovenstaande eigenschappen worden vertaald naar de duurzaamheidsroos, draagt de toepassing van bentonietmatten bij aan 6 van de 12 kwadranten, gevisualiseerd met de oranje stippen in figuur 7.

### Handreiking bentonietmatten bij dijken

Om de toepassing van dijkbekleding met bentonietmatten in Nederland mogelijk te maken, heeft een technische werkgroep van experts een



**Figuur 10** – Overzicht van schematisatie van de dijk in PLAXIS met bentonietmatten in de stromingsberekeningen die zijn uitgevoerd om de geohydrologische situatie bij maatgevende omstandigheden te bepalen, inclusief de gebruikte doorlatendheidsfactoren (k-waarde in m/dag).



**Figuur 11** – Typierend dwarsprofiel dijkversterking Beesel, met positie van de bentonietmat in gestreepte blauwe lijn op het buitendijks talud, kruin en gedeelte binnendijks.

uitgebreide handreiking opgesteld op initiatief van Waterschap Limburg en in samenwerking met Arcadis [Koopmans, Dorst, & Zuijlen, 2023]. Deze handreiking omvat het ontwerp, uitvoering, beoordeling, beheer & onderhoud van bentonietmatten zowel in het voorland als op taluds van primaire en regionale waterkeringen (zie figuur 8). Ook zijn toepassings-, specificatie- en testcriteria vastgesteld. De handreiking is gebaseerd op kennis en ervaring die is opgedaan met het ontwerpen en toepassen van bentonietmatten in de Duitse dijkbouw en is uitgebreid naar de Nederlandse ontwerp- en beoordelingspraktijk. De richtlijn is in het kader van de dijkversterking bij Beesel toegepast, geverifieerd en aangevuld.

### Ontwerp dijkversterking Beesel

Voor de dijkversterking in Beesel is een ontwerp opgesteld voor de toepassing van bentonietmatten op het buitentalud, de kruin en een deel van het binnentalud van de dijk in de volgende dijkvakken (zie figuur 9):

- Beesel dijkvak 4 en dijkvak 5-1, lengte 280 m<sup>1</sup>;
- Beesel achterdeurdijk dijkvak 9 en 10, lengte 250 m<sup>1</sup>.

Door ingenieursbureau ABT is een gedetailleerd uitvoeringsontwerp (UO) gemaakt, inclusief

stabiliteits- en stromingsberekeningen. Voor de berekeningen is het eindige-elementenprogramma PLAXIS gebruikt (zie figuur 10).

In eerste instantie was het de bedoeling om de bentonietmatten niet alleen op het buitentalud en de kruin, maar ook op het gehele binnentalud toe te passen, als gunstige maatregel tegen infiltratie bij overslag naar de kern van de dijk. Grondwaterstromingsberekeningen met PLAXIS toonden echter aan dat de druk in de kern nabij de binnenteen op kon lopen door kwelwater uit de ondergrond bij maatgevende omstandigheden. De hoge freatische waterstand in de kern heeft een negatieve invloed op de stabiliteit van de bekleding op het binnentalud en zou (theoretisch) kunnen leiden tot te hoge trekkrachten in de bentonietmatten. In de handreiking dijken met GCL (bentonietmatten) is voor het ontwerpen van de stabiliteit van de bekledingslaag van de dijk een rekensheet ontwikkeld. Ten tijde van het opstellen van het ontwerp van dijkversterking Beesel was hiervan een eerste versie beschikbaar. In deze versie was de treksterkte in de bentonietmat gemaximeerd en met de hoge freatische waterstand in de kern van de dijk werd dit maximum overschreden. Op basis van aanvullende stabiliteitsberekeningen die zijn uitgevoerd met PLAXIS is geconstateerd

dat de treksterkte in de bentonietmatten ruim binnen de marge lag, ook bij het optreden van beperkte vervormingen van het binnentalud. Uiteindelijk is ervoor gekozen om de bentonietmatten toe te passen op alleen de bovenste helft van het binnentalud. Hierdoor ontstaat er een ontlastconstructie aan de binnenzijde waarmee het risico op het te hoog oplopen van de freatische waterstand in de dijk kern door kwelwater uit de ondergrond is geëlimineerd. De analyses hebben laten zien dat het toepassen van de bentonietmatten op het buitentalud, de kruin en het bovenste gedeelte van het binnentalud leidt tot een zelfde geo-hydrologische situatie als bij de dijkvakken waar een kleibekleding met erosiebestendigheidsklasse 1 op het buitentalud is aangebracht.

Een ander belangrijk ontwerpaspect uit het UO was de dikte van de afdeklaag ter plaatse van de kruin. Vanuit de Duitse ontwerp praktijk waren meerdere aspecten bekend waarmee rekening gehouden diende te worden bij het ontwerp van deze dikte, zoals minimale dikte voor zwellen, weersinvloeden, verkeersbelastingen, stroming en golfaanval en opdrukken en afschuiven door wateroverspanningen. Deze aspecten stellen soms tegengestelde eisen. In het UO zijn de verschillende aspecten inzichtelijk gemaakt en is de invloed van elk aspect op het ontwerp bepaald met behulp van gevoeligheidsberekeningen. In Beesel waren de minimale aanleghoogte van de bentonietmat (boven de maatgevende rivierwaterstand bij hoogwater inclusief zetting/klink gedurende de hele levensduur) en de maximale aanleghoogte van de kruin van de dijk bepalende factoren. Hierdoor was er op de kruin slechts een beperkte dikte beschikbaar voor de afdeklaag en het onderhoudspad. De toepassing van grond-

stabilisatie met GeoCrete bood hier een oplossing. Deze techniek leidt ook tot optimaal gebruik van lokale grond door de aanwezige grond te mengen met een stabilisator. Hierbij ontstaat een stabiele, harde en erosiebestendige laag bovenop de kruin. Het verzwaarde onderhoudspad zorgt daarmee voor voldoende gewicht en afdichting van de bentonietmatten in de kruin van de dijk, ondanks de beperkte dikte waarin de stabilisatie is aangebracht (25-35 cm).

Een ander specifiek aandachtspunt in het UO was de aansluiting van de bentonietmatten op andere objecten. In het ontwerp zijn kunstwerken (inlaatconstructies) en andere objecten (zoals dijktrappen) opgenomen waar de bentonietmatten op aangesloten zijn. Bij de kunstwerken zijn de bentonietmatten verticaal tegen het beton opgezet en vervolgens vastgezet met RVS-strips (zie figuur 13). Tussen het beton en de bentonietmatten is een laag bentoniet aangebracht als waterdichte aansluiting. Onder de dijktrappen is een minimale afdeklaag gehanteerd tussen de bentonietmatten en de onderkant trap van 0,30 m. De breedte van de bentonietmatten die zijn toegepast bij Beesel (5,0 m) is groter dan de breedte van de dijktrappen (1,4 m breed en 2,0 m inclusief fundering). In het legplan is het leggen van de matten zo uitgekiend dat de bentonietmat onder de dijktrap geen overlap heeft waardoor er geen naden aanwezig zijn op locaties met een verhoogd risico op optredende langsstroming.

Omdat de bentonietmatten tot halverwege het binnentalud zijn aangebracht is een controleberekening uitgevoerd naar het opdrukken door luchtinsluiting onder de matten. Met de gaswet kan eenvoudig bepaald worden of de freatische grondwaterstand zo hoog boven de onderkant

van de matten kan komen dat de hierdoor opgebouwde luchtdruk de bekleding kan opliften en overmatige druk kan aflaten.

## Uitvoering

De bentonietmatten zijn in twee dijkvakken bij Beesel toegepast op het buitentalud met een helling van 1:2,5 en op de ca. 4,5 m brede kruin van de dijk (zie figuur 11). De hoogte van de dijken loopt uiteen van 2 tot 4 meter, afhankelijk van de locatie. In totaal is er 13.500 m<sup>2</sup> aan bentonietmatten aangeleverd en geïnstalleerd. De bentonietmatten zijn op rollen aangeleverd en met een evenaar op locatie aangebracht (zie figuur 12a en b). De overlappen tussen de banen zijn vooraf in de fabriek gemarkeerd en met bentoniet geïmpregneerd om de overlappingszones af te dichten. Dit heeft als voordeel dat tussen de banen niet separaat bentonietpoeder of -pasta aangebracht hoeft te worden. Als realistische installatiesnelheid is een productie gehaald van circa 1500 m<sup>2</sup>/dag. Dit komt bij 15 m<sup>1</sup> bentonietmat in het dwarsprofiel overeen met 100 meter dijk per dag, inclusief afdekking met grond. Het materieel bestond uit een kraan voor de profilering van de dijk en een kraan met evenaar voor het installeren van de bentonietmatten. Voor het afdekken van de bentonietmat met een leeflaag zijn een shovel en bulldozer gebruikt. Belangrijk is dat aangebrachte bentonietmatten zoveel als mogelijk dezelfde dag worden afgedekt met de afdeklaag. Dit is noodzakelijk voor de tegendruk bij het hydrateren en opzwellen van de bentonietmatten, zeker in het geval van nattere omstandigheden met een vochtige ondergrond. Om deze reden is het niet wenselijk om de bentonietmatten aan te brengen in zeer natte omstandigheden, bijvoorbeeld bij continue regenval.



**Figuur 12a en b** – Aanbrengen bentonietmatten op de dijk en uitrollen hiervan met behulp van een evenaar.



**Figuur 13** – Detail klemconstructie bentonietmat met metalen strips, uitgevoerd bij betonnen inlaatwerken in de dijk.

Vanuit de voorfase was voorzien om de bentonietmatten aan te brengen met één baan op het binnentalud, één baan op het buitentalud en een overlap tussen beide van minimaal 1,0 meter op de kruin. Belangrijk hierbij was om de overlap aan te brengen van de rivierzijde naar de binnendijkse kant, zodat hoogwater niet onder de aansluiting op de kruin kan lopen. Bij evaluatie van de uitvoering kwam naar voren dat bij gebruik van een kraan met een lange giek het goed mogelijk is om de bentonietmatten in één beweging over het gehele dijkprofiel te trekken. Deze werkwijze voorkomt dan de overlap op de kruin. Dit bespaart bovendien oppervlakte bentonietmat in het dijkprofiel en maakt de uitvoering eenvoudiger en sneller.

Als speciale situatie waren meerdere inlaatconstructies met duikers door het dijkprofiel en pomp- en inspectieputten in de kruin voorzien. Hierop zijn de bentonietmatten met behulp van specifieke klemconstructies waterdicht aangesloten (zie figuur 13).

### Maatregel dierlijke graverij

Het gebied rondom de Huilbeek in Beesel is leefgebied van de bever en de das. Op de oever van de beek is steenbestorting aangebracht om graverij te ontmoedigen. De waterkering is aanvullend preventief beschermd tegen graafschade door op specifieke locaties een beschermend raster (zogenaamd bevergaas) aan te brengen op het talud. Alvorens het gaas aan te brengen is eerst een afdeklaag van grond aangebracht met een dikte van 0,4 meter bovenop de bentonietmat (zie figuur 14). Na het aanbrengen van het gaas is het talud verder afgewerkt met een afdeklaag met een totale verlopende dikte van 0,8 naar 1,2 meter.

### Monitoring grasbekleding

De bentonietmat vormt een nagenoeg waterdoorlatende laag. In natte periodes (regen, hoogwater) zal de afdeklaag op de bentonietmat mogelijk veel water vasthouden. In droge perio-



**Figuur 14** – Afdekken bentonietmatten met grondlaag en aanbrengen van bevergaas als maatregel tegen dierlijke graverij dijkvak Beesel.



**Figuur 15** – Proefsleuf en opgraven bentonietmatten bij de Elbe dijk Wittenberge vanuit BAW Duitsland.



**Figuur 16a en b** – Detail monstername gehydrateerde bentonietmat bij de Elbe dijk Wittenberge met analyse van mechanisch en fysische veranderingen vanuit BAW Duitsland.

des vormt de mat mogelijk een blokkade voor de capillaire opstijging waardoor de afdeklaag juist uitdroogt. Beide situaties kunnen derhalve een effect hebben op de vegetatieontwikkeling, mede afhankelijk van de eigenschappen van de afdeklaag.

Om dit in beeld te brengen is vanaf het voorjaar van 2024 een vierjarig monitoringsprogramma gestart. Er zijn diverse referentie- en proefvakken aangelegd met twee verschillende afdekklagen (meer kleiig en meer zandig) en met drie verschillende gras- en kruidenmengsels (zie figuur 9). De vakken hebben een gemiddelde lengte van 70 m. De volgende mengsels zijn aangebracht verspreid over de referentie- en proefvakken:

- D2 (standaard grasmengsel voor dijken)
- Dijken basis Gras (DbG)
- DbG + Dijken basis Kruiden 1 (DbK-1: DbG: 90% en DbK: 10%)
- DbG + Dijken basis Kruiden 2 (DbK-2: DbG: 70% en DbK: 30%)

In de referentie- en proefvakken zijn vochtsensoren in de afdeklaag aangebracht. De monitoring van de vegetatie (ontwikkeling en wortel-

groei) wordt tweemaal in beeld gebracht waarbij relaties worden gelegd met de opgetreden omstandigheden en de vochtmetingen. Na vier jaar zijn ook graszode trekproeven voorzien, om ook de sterkte van de vegetatie te meten. Hiermee kunnen vergelijkingen worden gemaakt in de ontwikkeling van de graszode met onderliggende bentonietmatten ten opzichte van een naastgelegen dijkvak met traditionele kleibekleding (referentievakken).

### Beheer- en onderhoudsaspecten

Na aanleg zijn bentonietmatten onderhoudsvrij. Bentonietmatten in poedervorm hydrateren na bevochtiging binnen enkele dagen, waarbij zich een homogene en duurzame afdichting vormt. In de dijkbouw is dit belangrijk aangezien sommige dijkversterkingen vlak voor het hoogwaterseizoen worden opgeleverd. De bentonietmat borgt dan als afdichting op korte termijn de volledige waterveiligheid.

Bij dijken wordt een grondafdekking van 0,80 tot 1,20 meter op de bentonietmat geadviseerd, mede omdat er in de eindsituatie op de dijk ook gereden gaat worden in het kader van beheer en

onderhoud, met bijvoorbeeld maaimaterieel (zware trekkers). Tevens verdient het aanbeveling om bentonietmatten te installeren onder de vorstgrens (0,6-0,8 m) ter voorkoming van vries- en dooi-effecten, die de levensduur zouden kunnen beïnvloeden.

Bentonietmatten zijn hoogwaardige bouwstoffen waarvan een technische levensduur van 100 jaar door middel van gecertificeerde laboratoriumproeven vooraf kan worden aangetoond. Ze vallen niet uit elkaar en degenereren niet tot micro-plastics. Bij einde levensduur is een constructie met bentonietmatten verwijderbaar, aan te passen of uit te breiden mocht dit noodzakelijk zijn.

In Duitsland zijn vanuit de BAW (Bundesanstalt für Wasserbau) in dijken met bentonietmatten bij de Lippe, Kinzig en Elbe monitoringsleuven gemaakt en zijn monsters uit 4 tot 12 jaar oude matten beproefd (zie figuur 15 en 16). Uit dit onderzoek is naar voren gekomen dat er geen significante mechanisch-fysische veranderingen of veroudering optrad. De waterdoorlatendheid van de monsters bleek onveranderd laag, tussen 2,5 en 8,0 x 10<sup>-11</sup> m/s. De resultaten van de

verschillende testreeksen hebben daarbij aangetoond dat de bentonietmatten na meerdere jaren geen noemenswaardig kwaliteitsverlies ondergaan, mits de mat zorgvuldig is aangebracht en de dijk goed is beheerd (met name in relatie tot bomengroei).

### Conclusie

De dijkversterking in Beesel betreft een uniek project, waarbij bentonietmatten voor de eerste keer in Nederland zijn toegepast op het buitentalud alsook de kruin van de waterkering. De toepassing van bentonietmatten kan in veel projecten het gebruik van gebiedseigen grond stimuleren, het aantal transportbewegingen substantieel verminderen en de CO<sub>2</sub>-uitstoot verlagen en is kostenefficiënt in vergelijking met een traditionele kleibekleding. De innovatieve toepassing van bentonietmatten biedt hiermee kansen voor andere dijkversterkingsprojecten.

### Literatuur

- Bardoel, J.W., 2022, Dijkversterking Beesel Waterschap Limburg, Pilot bentonietmatten: innovatief en duurzaam, pag. 4-6, Civiele Techniek, special Waterbouw.
- BRAD 16, 2016, Brandenburgische Richtlinie

für die Anwendung Geosynthetischer Tondichtungsbahnen im Deichbau, Landesamt für Umwelt.

- Gerritsen, R.H., Bezuijen, A., Dorst C., 2019, Klimaatverandering en weersextremen: toepassing van geokunststoffen bij waterkeringen en kustverdediging, deel 1 (pag 46 – 51), deel 2 (pag 48 - 53), Geokunst.
- Gerritsen, R.H., Bezuijen, A., Dorst, C., 2023, Climate change and extreme weather conditions: Applications of geosynthetics securing flood defenses and coastal protection, pag. 291-303, Geosynthetics: Leading the Way to a Resilient Planet, Proceedings 12 ICG – Biondi et al (eds), 2023, ISBN 978-1-003-38688-9.
- HWBP (Hoogwaterbeschermingsprogramma), Waterschap Rivierenland, 2022, Handreiking Bouwstenen Duurzame Dijken.
- Koopmans, R., Dorst, C., Zuijlen, van J., 2023, Dijken met GCL (bentonietmat), Handreiking voor toepassing van GCL in voorlanden en op taluds van primaire en regionale waterkeringen (groene versie), POV-DGG Dijkversterking met gebiedseigen grond.
- Maubeuge, von, K., Gerritsen, R.H., Ehrenberg, H., 2022, Geosynthetics: responsible and sustainable solutions to reduce environmental impact, pag. 49-56, Geokunst. ●