Deltares

Duurzaamheidsafweging Innovaties

Vervolg: aanscherpen en operationaliseren criteria

Duurzaamheidsafweging Innovaties
Vervolg: aanscherpen en operationaliseren criteria

Auteur(s)
Yida Tao
Jesse Moeys

Duurzaamheidsafweging Innovaties
Vervolg: aanscherpen en operationaliseren criteria

Opdrachtgever	Programmabureau HWBP
Contactpersoon	Heike Gaasbeek
Referenties	
Trefwoorden	Dijken, innovaties, duurzaamheid, criteria, afweegkader

Documentgegevens	
Versie	2.0
Datum	04-12-2025
Projectnummer	11211576-003
Document ID	11211576-003-GEO-00013
Pagina's	31
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)		
	Yida Tao (Deltares) Jesse Moeys (HWBP)	

Samenvatting

Het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) is opgericht om voor 2050 veilige dijken in Nederland te realiseren. Gezien de lange doorlooptijd van het programma worden innovaties veelvoudig ontwikkeld en toegepast om het versterkingsproces te versnellen en de kosten te beperken. Het HWBP heeft de doelstelling om duurzaamheid en ruimtelijke kwaliteit geborgd te hebben binnen innovatie- en dijkversterkingsprojecten. Het huidige innovatieproces bevat echter geen verplichting en handvatten om duurzaamheid integraal mee te nemen. In het voorgaande project (Deltares en HWBP, 2024) is er een lijst met generieke duurzaamheidscriteria voor innovaties opgesteld. Deze criteria vormen de basis voor een duurzaamheidsafwegingskader. Dit vervolgproject richt zich op de stappen die nodig zijn voor toekomstig gebruik van een duurzaamheidskader.

Doel van dit rapport is om bewustzijn te creëren voor de verschillende aspecten die spelen rondom duurzaamheid, die breder reiken dan alleen de Milieukosten Index (MKI). In dit rapport is verkend met welke criteria het HWBP duurzaamheid concreet kan meenemen bij:

- Afweging van innovaties/maatregelen voor projecten.
- Afweging van innovaties om te ontwikkelen.
- Afweging voor de doorontwikkeling van innovaties.

In het rapport zijn deze criteria getest op een selectie van pipingmaatregelen. Hieruit komen aanbevelingen voor HWBP (en DIV) voor de doorontwikkeling van de criteria naar beslisinformatie.

De verbetering van de duurzaamheidscriteria richting een duurzaamheidsafwegingskader is als volgt doorgevoerd. In de onderstaande tabel staat een overzicht van de criteria. De grootste veranderingen hebben plaatsgevonden voor de aspecten toekomstwaarde en materiaalgebruik. Het aspect toekomstwaarde gaat vooral over de maatregel bij einde levensduur, in tegenstelling tot materiaalgebruik wat nu gedefinieerd is als de herkomst van het gebruikte materiaal.

Tabel 1.1 Overzicht duurzaamheidscriteria.

Generieke duurzaamheidscriteria (Deltares, 2024)	Duurzaamheidscriteria voor afweegkader	Duurzaamheidscriteria voor (door)ontwikkeling/verbetering van innovaties
1. Reduceren opgave. 2. MKI en emissies. 3. Materiaalgebruik. 4. Toekomstwaarde. 5. Uitbreidbaarheid. 6. Ecologische structuur en biodiversiteit.	1. Toekomstwaarde. 2. Ecologische structuur en biodiversiteit. 3. Materiaalgebruik. 4. MKI en emissies.	1. Toekomstwaarde. 2. Ecologische structuur en biodiversiteit. 3. Uitbreidbaarheid 4. Materiaalgebruik. 5. MKI en emissies.

De doorontwikkeling van de criteria naar beslisinformatie is bij de test op een selectie van pipingmaatregelen uitgewerkt in de vorm van een mogelijke scoringssystematiek per criterium. Voor de (door)ontwikkeling/verbetering van innovaties is een lijst met voorbeeldvragen opgesteld.

Simultaan aan het aanscherpen van de criteria en het uitwerken van e scoringsmatrix, zijn deze criteria toegepast op zeven piping maatregelen, die gekozen zijn samen met DIV piping. Aan de hand van een eerste toepassing is een werksessie georganiseerd. Verder zijn er bij

de uitwerking nog een aantal leveranciers gesproken. Hieruit wordt duidelijk dat sommige innovaties beter scoren op bepaalde duurzaamheidsaspecten dan anderen.

Concluderend geven deze verbeterde duurzaamheidscriteria een meer uitgesplitst en concreet kader waaraan innovaties getoetst kunnen worden en kunnen ze aanleiding geven tot het verbeteren van een bepaald aspect. Er is veel potentie voor toekomstige ontwikkelingen voor verbetering met betrekking tot duurzaamheidscriteria. Voorbeelden van toekomstige ontwikkelingen die in verband staan met deze duurzaamheidscriteria zijn:

- Duurzame (emissieloze) uitvoeringsmethode en productiemethode zand (MKI en emissies) voor grofzandbarrière (GZB).
- Duurzame (natuurlijke) materiaal als bijmenging (materiaalgebruik) voor soilmix heaveschermen.

Summary

The Dutch Flood Protection Programme (HWBP) was established to ensure that levees meet the required safety standards in 2050. Given the program's long lead time, innovations are being developed to accelerate reinforcement and reduce costs. The HWBP aims to ensure sustainability and spatial quality within innovation and dike reinforcement projects. However, the current innovation process does not include any obligations or guidelines for integrating sustainability. A previous project by Deltares and HWBP (2024) project developed a generic list of sustainability criteria for innovations, which now forms the foundation for a sustainability assessment framework. This follow-up project refines these criteria and addresses recommendations for their future application.

This report refines the sustainability criteria for innovations and introduces a scoring matrix for each. The criteria serve two purposes: 1) as a sustainability assessment framework, and 2) as aspects for improvement in the (further) development of innovations. The definitions of the sustainability criteria have been further refined and the scoring system for the assessment framework has been developed. The most significant updates concern the criteria future value and material use. In addition, sample questions have been drawn up for the (further) development/improvement of innovations. The table below provides an overview of the criteria.

Tabel 1.2 Overview sustainability criteria.

Generic sustainability criteria (Deltares and HWBP, 2024)	Sustainability criteria for assessment framework	Sustainability criteria for (further) developments of innovations
1. Scope reduction. 2. ECI and emissions. 3. Material use. 4. Future value. 5. Expandability. 6. Ecological structure and biodiversity.	1. Future value. 2. Ecological structure and biodiversity. 3. Material use. 4. ECI and emissions.	1. Future value. 2. Ecological structure and biodiversity. 3. Expandability 4. Material use. 5. ECI and emissions.

Simultaneously with tightening the criteria and developing the scoring matrix, these criteria were applied to seven piping measures, which were selected together with DIV piping. A working session was organized based on an initial application. In addition, several suppliers were consulted during the development process. This made it clear that some innovations score better on certain sustainability aspects than others.

In conclusion, these improved sustainability criteria provide a more detailed and concrete framework against which innovations can be assessed and can lead to improvements in a particular aspect. There is great potential for future developments for improvement regarding sustainability criteria. Examples of future developments related to these sustainability criteria are:

- Sustainable (emission-free) implementation method and production method for sand (MKI and emissions) for the coarse sand barrier (GZB).
- Sustainable (natural) material as an admixture (material use) for soil mix heave screens.

Inhoud

	Samenvatting	**4**
	Summary	**6**
1	**Inleiding**	**9**
1.1	Aanleiding	9
1.2	Doel	9
1.3	Leeswijzer	9
2	**Aanpak**	**10**
2.1	Overzicht werkzaamheden	10
2.2	Samenvatting project (2024)	10
2.2.1	Zes duurzaamheidscriteria	10
2.2.2	Scoringssystematiek	11
2.3	Voorbeeldproject: zeven piping maatregelen	12
2.4	Uitgangspunten milieukostenindicator (MKI)	12
2.4.1	Maatregel als product uit DuboCalc	13
2.4.2	Maatregel als samengesteld product uit DuboCalc	14
2.4.3	Maatregel als samengesteld product uit NMD database	15
2.4.4	Overige maatregelen (niet in DuboCalc)	16
3	**Resultaten**	**17**
3.1	Aanscherping criteria en scoringsmethodiek n.a.v. werksessie	17
3.2	Criteria afweegkader inclusief scoringssystematiek	17
3.2.1	Toekomstwaarde	17
3.2.2	Ecologische structuur en biodiversiteit	19
3.2.3	Materiaalgebruik	19
3.2.4	MKI en emissies	21
3.3	Verbeteringsaspecten duurzaamheid voor innovaties	22
3.4	Scoren van piping maatregelen, per maatregel	23
3.4.1	Pipingberm	23
3.4.2	Stalen heavescherm	24
3.4.3	Kunststof heavescherm (en als variant: kunststof filterscherm)	25
3.4.4	Soilmix heavescherm	26
3.4.5	Grofzandbarrière (GZB)	27
3.4.6	Verticaal zanddicht geotextiel (VZG)	28
3.4.7	Grindkoffer	28
3.5	Overzicht scores van piping maatregelen	29
4	**Conclusie**	**30**
4.1	Conclusie	30
4.2	Discussie	30

4.3 Aanbevelingen 30

Referenties **31**

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) is ontstaan om voor 2050 veilige dijken te realiseren in Nederland. Gezien de lange doorlooptijd van het programma worden innovaties veelvoudig ontwikkeld en toegepast om het versterkingsproces te versnellen en de kosten te beperken. Het HWBP heeft de doelstelling om duurzaamheid en ruimtelijke kwaliteit geborgd te hebben binnen innovatie- en dijkversterkingsprojecten.

In de huidige motivering van aanvullende innovatievoorstellen staat de impact centraal, samen met de relatie met de versterkingsopgave van het HWBP en het doel en beoogd resultaat voor het HWBP. Deze impact kan betrekking hebben op één of meer aspecten, zoals op financiële winst, op tijd/planning, kwaliteit/duurzaamheid en/of stabiliteit (HWBP, 16 april 2024). Voor het thema duurzaamheid betekent dit dat dit thema soms niet wordt meegenomen in de motivering, of dat een motivering zich beperkt tot enkele specifieke duurzaamheidsaspecten. Dit betekent dat binnen de huidige motivering voor ontwikkeling van innovaties, duurzaamheid niet altijd expliciet en volledig wordt meegenomen en/of geborgd.

Het team Duurzaamheid en Ruimtelijke Kwaliteit van het HWBP heeft gevraagd om een aanscherping van de afwegingscriteria met betrekking tot duurzaamheid voor innovaties. In het voorgaande project (Deltares en HWBP, 2024) zijn er zes criteria opgesteld. In dit project staat centraal hoe je deze gebruikt in een afweging, is aan de hand van zeven piping innovaties de criteria geoperationaliseerd en is tot slot een aanscherping gekomen in criteria voor het verbeteren van innovaties.

1.2 Doel

Doel van dit rapport was om bewustzijn te creëren voor de verschillende aspecten die spelen rondom duurzaamheid, wat breder is dan MKI.

Met dit rapport is verkend met welke criteria duurzaamheid door het HWBP concreet kan worden meegenomen bij:
- Afweging van innovaties/maatregelen voor projecten.
- Afweging van innovaties om te ontwikkelen.
- Afweging voor de doorontwikkeling van innovaties.

In het rapport zijn deze criteria getest op een selectie van pipingmaatregelen. Hieruit komen aanbevelingen voor HWBP (en DIV) voor de doorontwikkeling van de criteria naar beslisinformatie.

1.3 Leeswijzer

In het volgende hoofdstuk staat de aanpak centraal. Dit bevat een stappenplan, de resultaten van het voorgaande project, de lijst aan piping maatregelen en de uitgangspunten voor de berekening van de milieukostenindicator (MKI). Het daaropvolgende hoofdstuk bevat de resultaten. Hier wordt eerst kwalitatief ingegaan op de aanscherping van de criteria. Daarna wordt de scoringssystematiek per criterium besproken, gevolgd door de scores per piping maatregel. Het laatste hoofdstuk bevat de conclusie, discussie en aanbevelingen.

2 Aanpak

2.1 Overzicht werkzaamheden

Zoals in de inleiding is benoemd, is dit project een vervolg op *Duurzaamheidafweging Innovaties* (Deltares en HWBP, 2024). Hieronder wordt een overzicht gegeven van de stappen die gevolgd zijn. Hierin zijn stappen, waarachter (2024) staat, het resultaat van het voorgaande project, en stappen waarachter (2025) staat van het huidig project:

1. Inventarisatie van bestaande kennis en documenten (2024).
2. Werksessie en discussie duurzaamheidscriteria (2024).
3. Verslaglegging (2024).
4. Aanscherpen en operationaliseren van elk criterium (2025).
5. Toepassing van duurzaamheidscriteria op voorbeeldproject (2025).
6. Werksessie en discussie aanscherping en operationalisatie (2025).
7. Interview leveranciers (2025).
    - Van Oord – soilmix.
    - Antea/Van Oord – GZB.
    - Mourik - Prolock filterscherm.
8. Verslaglegging (2025).

2.2 Samenvatting project (2024)

De resultaten van *Duurzaamheidafweging Innovaties* (Deltares en HWBP, 2024) zijn hieronder integraal overgenomen. Dit afweegkader bevat zes duurzaamheidscriteria, met toelichting en een suggestie van het toetsingssysteem. In het huidige project worden deze criteria en scoringssystematiek aangescherpt. Dit komt in hoofdstuk 3 aan bod.

2.2.1 Zes duurzaamheidscriteria

1 - Reduceren opgave

Dit criterium past bij het eerste circulaire ontwerpprincipe preventie en staat stil bij de vraag of een maatregel of innovatie alleen wordt toegepast, daar waar het echt nodig is. Een rekeninnovatie scoort bijvoorbeeld positief op dit onderdeel, omdat dit helpt om de maatregel of de scope te verkleinen.

2 - MKI en emissies

Optimalisaties van de MKI-waarde van een innovatie vallen onder dit criterium. Hier wordt o.a. gekeken naar transportkosten, bewerking, levensduur en CO_2-uitstoot. Dit draagt bij aan minimale grondstof en energieverbruik in de aanleg en gebruiksfase van een project. DuboCalc wordt veelal gebruikt voor het berekenen hiervan. Het is een al veelgebruikt binnen de dijkenwereld om duurzaamheid te kwantificeren en sluit vooral aan op de thema’s emissie, grondstof en energieverbruik en klimaatneutraliteit.

3 - Materiaalgebruik

Materiaalgebruik kijkt naar welke materialen gebruikt worden en waar deze vandaan komen. Het gebruik van lokale, bio-based en secundaire grondstoffen scoren hier positief op. Een voorbeeld hiervan is het gebruik van gebiedseigen grond. Het gebruik van primaire grondstoffen, schaarse grondstoffen of grondstoffen die slecht zijn voor het milieu scoren negatief. Dit criterium overlapt deels met het criterium MKI en emissies, maar is hier als apart criterium genoemd vanwege de circulariteitsdoelen van de verschillende overheden. Ook vallen hier verontreiniging van micro-plastics en uitloging onder, die niet in de MKI zitten.

4 - Toekomstwaarde
Dit criterium beoordeelt of (aspecten van) de innovatie herbruikbaar is en wat de toekomstwaarde ervan is. Er wordt gekeken naar hergebruik van materialen van de innovatie en de mate van recyclebaarheid en de mogelijkheden tot levensduurverlenging. Voorbeelden van levensduurverlenging zijn reparaties, voorkomen van vroegtijdige veroudering, monitoring en preventief onderhoud.
Kunststof damwanden scoren hier bijvoorbeeld negatief op wanneer ze na de levensduur achterblijven in de bodem en dan niet meer gerecycled worden.

5 - Uitbreidbaarheid
Uitbreidbaarheid kijkt of de innovatie na de oorspronkelijke levenscyclus verder uitgebreid kan worden. Innovaties kunnen ook een bijdrage leveren aan uitbreidbaarheid, dit is van toepassing op bijvoorbeeld proces- of rekeninnovaties. Negatieve scores zijn voor innovaties waarbij verlenging of verzwaring niet mogelijk is na de levensduur, zoals een soilmix heavescherm. Een voorbeeld van een maatregel die positief scoort, is een grondberm, omdat deze gemakkelijk verlengd/verzwaard kan worden.

6 - Ecologische structuur en biodiversiteit
Dit criterium beoordeelt het effect van de innovatie op ecologische structuur en biodiversiteit. Natuurversterkende innovaties hebben bij dit criterium een positieve score. Onder dit criterium valt ook bodemkwaliteit en waterdoorlatendheid, omdat een niet waterdoorlatende maatregel ongunstig werkt voor de uitwisseling van nutriënten. Een harde maatregel zoals een ondoorlatend heavescherm heeft significante impact op bodemleven en grondwaterstromen, waardoor het meestal minder zal scoren op dit criterium. Oplossingen die de waterdoorlatendheid niet of minder belemmeren scoren hier hoger op. Ook maatregelen zoals een soortenrijke vegetatie als bekleding of een flauw talud rondom rivier- en slootoevers waardoor er meer ruimte en variatie in habitats ontstaat draagt bij aan een positieve score op biodiversiteit.

2.2.2 Scoringssystematiek

Scoren per duurzaamheidscriterium
Het beoordelen van duurzaamheidscriteria kan plaatsvinden met een + en - scoringssysteem. Hierbij worden de criteria zorgvuldig geëvalueerd en kwalitatief gescoord, waarbij voor elk criterium een korte motivatie wordt gegeven. Innovaties krijgen een score van ++, +, 0, - of –. Een score van ++ geeft een zeer positieve impact aan, terwijl – een zeer negatieve impact weergeeft.

Alternatieve scoringsmethoden en wegingsfactoren
Naast het + en - scoringssysteem zijn er alternatieve methoden beschikbaar. Als kwantitatieve gegevens beschikbaar zijn, kan de vergelijking kwantitatief uitgevoerd worden. Daarnaast kan een kwalitatieve evaluatie worden gemaakt met behulp van kleuren, waarbij geel een neutrale impact aangeeft, groen een positieve impact en rood een negatieve impact. In het project *Sterke Lekdijk* (HDSR, 2024) werd een alternatief scoringssysteem toegepast voor ecologie en biodiversiteit. Hier kregen scores een numerieke waarde: 5 voor een zeer positieve impact, 3 voor een neutrale impact en 1 voor een negatieve impact. Optioneel kunnen wegingsfactoren worden toegepast om het relatieve belang van criteria te bepalen. Deze factoren maken het mogelijk om specifieke duurzaamheidsaspecten, zoals circulariteit of ecologische structuren, zwaarder te laten wegen. De wegingsfactoren hangen af van de doelstellingen van het project en de prioriteiten van de belanghebbenden.

Uitwerking scores afhankelijk van doel
Het scoren van duurzaamheidscriteria resulteert in een trade-off matrix. De specifieke uitwerking hiervan is afhankelijk van het doel. Zoals beschreven in paragraaf 1.1, richten de

doelen zich voornamelijk op het landelijke of programmatische niveau. De duurzaamheidscriteria zijn niet beperkt tot het programmatische niveau, maar kunnen ook worden ingezet op projectniveau. De manier van uitwerking is daarbij afhankelijk van de projectdoelen en de specifieke context. Bij het borgen van duurzaamheidsdoelen kunnen scores worden bepaald ten opzichte van een referentiesituatie, zoals landelijke kengetallen of de huidige situatie. Bij het vergelijken van innovaties kunnen deze onderling worden gescoord, of kan een vergelijking worden gemaakt tussen groepen innovaties. Denk hierbij aan productfamilies binnen piping-innovaties, zoals drainage-, heavescherm-, filter- en belasting remmende technieken.

2.3 Voorbeeldproject: zeven piping maatregelen

Als voorbeeldproject voor duurzaamheidsafwegingscriteria is er gekozen om zeven algemene piping maatregelen nader hiervoor uit te werken. De lijst van deze zeven maatregelen is in overleg met DIV piping en het HWBP Team Duurzaamheid en Ruimtelijke Kwaliteit opgesteld. De onderstaande tabel bevat een lijst van de maatregelen en de geschatte dimensies ervan. Een beschrijving per maatregel wordt gegeven in Hoofdstuk 3 bij de desbetreffende maatregel.

Tabel 2.1 Piping maatregelen en dimensies.

# maatregel	Naam maatregel	Dimensie
1	Pipingberm	25 m breed bij 1 m hoog[1]
2	Stalen heavescherm	10 m diep[2]
3	Kunststof heavescherm	10 m diep
3*	Kunststof filterscherm	10 m diep
4	Soilmix heavescherm	10 m diep
5	Grofzandbarrière (GZB)	1,5 m breed bij 1,5 m hoog
6	Verticaal zanddicht geotextiel (VZG)	10 m diep
7	Grindkoffer	5 m breed, 1,5m diep, bestaande uit 0,5m grind en 1m fijn breuksteen.

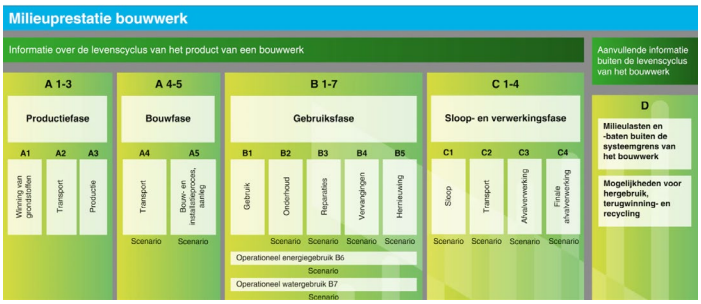
Het kunststof filterscherm is als variant meegenomen van het kunststof heavescherm. Het verschil is de werking van het scherm: het filterscherm is een filtertechniek waarbij de groei van de pipe wordt voorkomen en bij een heavescherm wordt verticale heave achter het scherm voorkomen. Er wordt aangenomen dat het materiaal en dimensies hetzelfde zijn. Deze maatregelen hebben dezelfde scores, behalve op het criterium ecologie vanwege hun water(on)doorlatende eigenschappen.

2.4 Uitgangspunten milieukostenindicator (MKI)

De milieukostenindicator (MKI) is een methode waarmee de duurzaamheidsimpact, uitgedrukt in euro's, in beeld kan worden gebracht. De milieu impact wordt per fase uit de levenscyclusanalyse (LCA) van een product bepaald voor een aantal schadelijke milieueffecten. Voor beoordeling strategie A1 bevatten dit 11 categorieën. Deze milieueffecten kunnen naast een uitdrukking in MKI (euro's) ook een uitdrukking krijgen in ton CO2-equivalenten. In de onderstaande figuur staan de LCA-fases weergegeven.

[1] Een gebruikelijke maat voor de bermhoogte is 1 m (WIKI noodmaatregelen, s.d.)

[2] De meeste heaveschermen hebben een inbeddingsdiepte van 3 tot 6 meter in het zand (HWBP-DIV Gebruikersplatform Piping, 2025)



Figuur 2.1 Fases in een LCA (Flux Partners, s.d.)

2.4.1 Maatregel als product uit DuboCalc

Voor het bepalen van de milieukostenindicator (MKI) is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van de objecten bibliotheek uit DuboCalc. DuboCalc is een gevalideerd rekeninstrument om de milieubelasting te berekenen. De achtergronddataset wordt geactualiseerd door Stichting Nationale Milieudatabase (NMD). Er is uitgegaan van categorie 3 data. Categorie 3 data is een generieke categorie van de NMD, op basis van gemiddelden en expert inschattingen, inclusief een toeslag van 30% op de gemiddelde verwachte MKI waarde.

Voor het bepalen van de MKI is uitgegaan van de objecten bibliotheek uit DuboCalc. In de objectenbibliotheek zijn enkele aannames vastgelegd, bijvoorbeeld over transportafstanden, aandeel primair/secundair materiaal en wat er gebeurt bij einde levensduur. Dit laatste staat ook wel bekend als afvalscenario, het aandeel stort/hergebruik/afvalverbranding/niet-teruggewonnen, en baten. Deze aannames kunnen anders zijn dan de toepassing in werkelijkheid.

De NMD, en daarbij ook DuboCalc, wordt met enige regelmaat geüpdatet. In de onderstaande tabel staat de versie gerapporteerd die geraadpleegd is voor dit rapport. Voor het bepalen van de MKI van de maatregelen stalen heavescherm, kunststof heavescherm, grofzandbarrière en verticaal zanddicht geotextiel is gebruik gemaakt van deze input.

Tabel 2.2 Uitgangspunten DuboCalc.

Software/Dataset	Versie
DuboCalc	Versie 6.0.9
Nationale Milieudatabase	Versie 28 maart 2025

Tabel 2.3 Uitgangspunten MKI voor stalen, kunststof heavescherm, GZB en VZG.

#	Naam maatregel	Naam in DuboCalc	Omschrijving element	MKI totaal inclusief cat. 3 toeslag
2	Stalen heavescherm	Stalen kwelscherm	Vul bij hoeveelheid de m2 stalen kwelscherm in. De berekening is gebaseerd op een damwand AZ24700.	34,28
3	Kunststof heavescherm	Kunststof kwelscherm	Vul bij hoeveelheid de m2 kwelscherm (gerecycled kunststof) in.	5,87
5	Grofzandbarrière (GZB)	Grof zand barrière (GZB)	Het aanbrengen van een GZB. Vul de hoeveelheid m3 GZB in. De barrière wordt aan de bovenkant afgedicht met een toplaag van bentoniet. Er is aangenomen dat de barrière 0,25m onder het oppervlak wordt aangebracht. Per meter barrière is dan 0,250 m3 bentoniet nodig bij een barrière van 1m breed. Dit is een worst-case aanname.	13,50
6	Verticaal zanddicht geotextiel (VZG)	Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG)	Het aanbrengen van een VZG. Vul bij hoeveelheid de m2 VZG in.	0,88

Tabel 2.4 MKI per fase voor stalen, kunststof heavescherm, GZB en VZG.

#	Productie	Bouw		Gebruik	Sloop en verwerking					MKI excl cat 3 toeslag
	A1-A3	**A4**	**A5**	B	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**	**totaal**
2	14,21	0,18	1,08	0	0,48	0,03	0,00	0,02	13,48	29,48
3	1,97	0,02	1,95	0	0,04	0,00	0,60	0,08	-0,19	4,48
5	6,21	1,39	2,78	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,38
6	0,22	0,10	0,35	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,68

Tot slot worden hierbij enkele aandachtspunten weergegeven met betrekking tot einde levensduur, afvalscenario en baten (C3, C4, D) (Nationale Milieudatabase, 2023):

- Voor het stalen damwanden in kust- en oeverwerken is het gebruikelijk dat de damwanden na eindelevensduur niet meer worden verwijderd. Doordat er in de database aangenomen is dat de damwand in de grond blijft zitten, komen er lasten in LCA-fase D bij.
- Voor het kunststof heavescherm wordt aangenomen dat de bovenste 20% wordt verwijderd, hiervan wordt 10% gestort en 90% verbrand. 80% blijft zitten en wordt ook als gestort beschouwd. De gewonnen energie uit verbranding wordt als baten in LCA-fase D meegenomen. Dit is positiever dan de huidige situatie, nu blijven kunststof heaveschermen volledig in de grond zitten.
- Voor de GZB wordt aangenomen dat het in principe blijft zitten.
- Voor de VZG wordt verondersteld dat het niet meer heel kan worden ontgraven. Er wordt aangenomen dat 100% blijft zitten, dit wordt als stort gemodelleerd.

2.4.2 Maatregel als samengesteld product uit DuboCalc

Voor het bepalen van de MKI van de maatregel pipingberm is ook gebruik gemaakt van DuboCalc. Dit betreft een samengesteld product.

Tabel 2.5 Uitgangspunten MKI voor pipingberm (totaal = 3,84 euro per m3).

#	Naam maatregel	Naam Dubocalc	Omschrijving element	MKI totaal inclusief cat. 3 toeslag
1a	Pipingberm	Leveren van gronden (per as) - Transport met vrachtwagen, EURO 5, diesel	Het ontgraven en het transport van 1 m3 grond over een transportafstand van 18 km. Standaard is transport met een vrachtwagen (euro 5, diesel). Incl. het 2x verwerken van de grond met een graafmachine (in-en uitladen), hiervan is 1 inbegrepen in ophoogmateriaal.	0,33
1b	Pipingberm	Leveren van gronden (per as) - Ophoogmateriaal, grond		2,09
1c	Pipingberm	Leveren van gronden (per as) - Graafmachine, cat. IV, diesel		0,05
1d	Pipingberm	Aanbrengen van gronden (per as) - Graafmachine, cat. IV, diesel	Vul bij hoeveelheid de hoeveelheid m3 grond in die wordt aangebracht in het project. Deze hoeveelheid grond wordt vanaf een projectdepot geladen in een dumper, naar de plaats van verwerking gebracht per dumper (transportafstand 3 km; uitgangspunt 1/24 uur per m3 grond) en verwerkt binnen het project. Standaard is het transport met een dumper (diesel). Optioneel kan een Euro 5 of 6 vrachtwagen ingezet worden. (transportafstand 3 km; soortelijk gewicht grond 1,625 ton per m3)	0,05
1e	Pipingberm	Aanbrengen van gronden (per as) - Dumper diesel		1,27
1f	Pipingberm	Aanbrengen van gronden (per as) - Graafmachine, cat. IV, diesel		0,05

Tabel 2.6 MKI per fase voor grondberm.

#	Productie	Bouw		Gebruik	Sloop en verwerking					MKI excl cat 3 toeslag
	A1-A3	**A4**	**A5**	B	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**	**totaal**
1a	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25
1b	0,00	1,31	0,18	0,00	0,08	0,03	0,00	0,01	0,00	1,61
1c	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
1d	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
1e	0,00	0,00	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98
1f	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05

Aandachtspunten:

- Voor grondverzet is de MKI-waarde zeer afhankelijk van 1) de transportkilometer voor de vrachtwagen en dumper en 2) het aandeel emissieloos materiaal. In DuboCalc wordt uitgegaan van diesel.

2.4.3 Maatregel als samengesteld product uit NMD database

Voor het bepalen van de MKI van de maatregel grindkoffer was er geen object beschikbaar in de objectenbibliotheek in DuboCalc. Daarom is er direct gebruik gemaakt van de NMD. Dit betreft een samengesteld product.

Tabel 2.7 Uitgangspunten NMD filtermateriaal.

Software/Dataset	Versie
Nationale Milieudatabase	Versie 26 februari 2025
Milieuprofiel	MKI A1

Tabel 2.8 Uitgangspunten MKI voor grind en fijne breuksteen.

# maatregel	Naam maatregel	Naam Dubocalc	Omschrijving element	MKI totaal inclusief cat. 3 toeslag
7a	Grindkoffer	Grind	Het uitgangspunt is het aanbrengen van grind (…) Het grind is uitgewerkt per 1 m3.	3,532
7b	Grindkoffer	Filter/materiaal, fijne breuksteen/waterbouwsteen	Betreft een filterlaag t.b.v. oeverbescherming bestaande uit breuksteen/waterbouwsteen. Eenheid: m3	4,931

Tabel 2.9 MKI per fase voor grind en fijne breuksteen.

#	Productie	Bouw		Gebruik	Sloop en verwerking					MKI excl cat 3 toeslag
	A1-A3	**A4**	**A5**	B	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**	**totaal**
7a	2,19	0,42	0,11	0	0	0	0	0	0	2,72
7b	1,16	2,10	0,47	0	0,07	0	0	0	0	3,79

2.4.4 Overige maatregelen (niet in DuboCalc)

De soilmix heavescherm heeft (nog) geen productblad in de NMD, en is niet opgenomen in de productenbibliotheek in DuboCalc. Derhalve is getracht via projecten de MKI-waarde te achterhalen.

Voor de soilmixwand bij Lopik is de MKI bepaald. Deze is 34,1 euro per strekkende meter voor een wand met een diepte van 15 meter en een dikte van 0,5 m. Het zwaartepunt van de MKI freestechniek ligt bij het cement (CEM IIIB) (Analyserapport maakbaarheidsproeven soilmixwand (Mixed in Place trench), (nog niet gepubliceerd)).

Daarnaast is de voor de soilmix heavescherm als oplossing voor het dijktraject tussen Gorinchem en Waardenburg de MKI bepaald. De MKI is hier bepaald per functionele eenheid van 1 m2 en ook een wanddikte van 0,5 m. Ook hier ligt het zwaartepunt van de MKI bij het cement (CEMIIIA best case, CEMI worst case). De MKI voor worst case is 6,12; best case 2,47 euro per m2 (NIBE, 2022).

Opgemerkt moet worden dat bij deze waardes specifiek zijn en niet generiek. Om deze waardes te vergelijken met de waardes van de andere maatregelen (van categorie 3), moet er 30% toeslag bij opgeteld worden. Dit is in de vergelijking tussen de MKI waardes ook gedaan.

De MKI voor een vierkante meter damwand van 0,5 m dik inclusief 30% toeslag is ingeschat op 3,0 euro/m2 op basis van de waarde van de soilmix wand bij Lopik.

3 Resultaten

3.1 Aanscherping criteria en scoringsmethodiek n.a.v. werksessie

Naar aanleiding van de discussie in de werksessie, is er besloten om onderscheid te maken in de criteria. Het onderscheid wordt gemaakt afhankelijk van het doel:

- Duurzaamheidscriteria voor het gebruik in een afweegkader.
- Duurzaamheidscriteria voor het (door)ontwikkelen of verbeteren van innovaties.

De reden voor deze splitsing is dat bij het afwegen tussen maatregelen, locatie specifieke eigenschappen doorslaggevend zijn voor de mogelijkheid tot uitbreiding. Uitbreidbaarheid houdt het verlengen of verzwaren van een maatregel in, waarbij benodigd ruimtebeslag en bestaande belendingen bepalend zijn.

Voor de doorontwikkeling van innovaties, wordt gekeken naar de mate waarop een maatregel verbeterd kan worden per criterium. Voor dit doel gaat het bij uitbreidbaarheid om in hoeverre gemakkelijk(er) een maatregel verlengd/verzwaard kan worden. Het verschil tussen deze toepassingen van eigenschappen, met name voor het criterium uitbreidbaarheid, heeft ertoe geleid voor de keuze voor een splitsing in de criteria.

Verder is het criterium ‘reduceren opgave’ vervallen. Als uitkomst van de werksessie is besloten dat het reduceren van de opgave niet onder deze duurzaamheidscriteria valt omdat het een ontwerpstap is die je altijd moet doen. Vandaar dat deze niet meegenomen zal worden in het vervolg.

Tabel 3.1 Overzicht duurzaamheidscriteria.

Generieke duurzaamheidscriteria (2024)	Duurzaamheidscriteria voor afweegkader	Duurzaamheidscriteria voor (door)ontwikkeling/verbetering van innovaties
1. Reduceren opgave. 2. MKI en emissies. 3. Materiaalgebruik. 4. Toekomstwaarde. 5. Uitbreidbaarheid. 6. Ecologische structuur en biodiversiteit.	1. Toekomstwaarde. 2. Ecologische structuur en biodiversiteit. 3. Materiaalgebruik. 4. MKI en emissies.	1. Toekomstwaarde. 2. Ecologische structuur en biodiversiteit. 3. Uitbreidbaarheid 4. Materiaalgebruik. 5. MKI en emissies.

Tot slot is de scoringsmethodiek uitgewerkt. In de werksessie is besloten om een kwalitatieve scoringsmatrix per criterium uit te werken, waarbij +2 staat voor een positieve score en -2 voor een negatieve score.

3.2 Criteria afweegkader inclusief scoringssystematiek

3.2.1 Toekomstwaarde

Het criterium toekomstwaarde van de innovatie is een beoordeling over de maatregel in de fase bij het einde van de ontwerplevensduur. Het criterium toekomstwaarde wordt hierbij onderverdeeld in drie subcategorieën.

1. Verwijderbaarheid. Als 90% van het materiaal goed te verwijderen is, scoort het goed op verwijderbaarheid. Dit geldt voor stalen damwanden en oplossingen aan het maaiveld (berm, grindkoffer, GZB). Kunststof damwanden, soilmix en VZG worden beschouwd als niet goed verwijderbaar.

2. Herbruikbaarheid. Als het materiaal goed verwijderbaar is en ook hoogwaardig meermalig herbruikbaar is scoort het hier hoog op. Dit levert de hoogste toekomstwaarde, zie Tabel 3.2. Oplossingen in grond scoren hier goed op. Staal is goed te recyclen en scoort daarmee licht positief. Hergebruik na verwijdering is mogelijk mits het profiel aan de vereisten voldoet maar is tot zover bekend niet toegepast binnen dijkversterkingsprojecten. Voor oplossingen zoals de GZB en grindkoffer wordt ervanuit gegaan dat de grondstromen bij verwijdering gemengd raken, waardoor het lastiger te hergebruiken is.
3. Restwaarde. Als het materiaal niet verwijderbaar is, wordt er gekeken naar restwaarde. Als het een negatieve impact heeft op het milieu waar het in blijft zitten scoort het negatief. Hier vallen bijvoorbeeld ook verontreiniging van micro-plastics en uitloging onder, die niet in de MKI zitten.

Tabel 3.2 Scoringsmatrix toekomstwaarde: verwijderbaarheid, recyclebaarheid, restwaarde.

Score		Toekomstwaarde: verwijderbaarheid, recyclebaarheid, restwaarde
2	Positief	verwijderbaar, goed herbruikbaar
1	Licht positief	verwijderbaar, gedeeltelijk herbruikbaar en overig is recyclebaar
0	Neutraal	verwijderbaar, maar materiaal gaat naar energiewinning/stort niet verwijderbaar, geen schadelijke restwaarde
-1	Licht negatief	niet verwijderbaar, licht negatieve restwaarde
-2	Negatief	niet verwijderbaar, negatieve restwaarde (bijvoorbeeld micro-plastics en uitloging)

In Tabel 3.3 worden de scores per pipingmaatregel weergegeven. Een pipingberm scoort positief (2) op het criterium toekomstwaarde, omdat het gebruikte materiaal, grond, goed te verwijderen en goed recyclebaar/herbruikbaar is. Staal is goed te verwijderen en recyclen (GWW bouw, 2025) en scoort daarmee licht positief (1). Hergebruik na verwijdering is mogelijk mits het profiel aan de vereisten voldoet maar is tot zover bekend niet toegepast binnen dijkversterkingsprojecten. Kunststof heave/filterschermen zijn niet eenvoudig te verwijderen, ze kunnen afbreken (Rietveld, 2023). Het materiaal kan wel hergebruikt worden als het eenmaal verwijderd is. De restwaarde is negatief, aangezien er niet natuurlijk materiaal achterblijft in de ondergrond (-2). De soilmix scherm wordt in de praktijk niet verwijderd. Met inspanning is de soilmix wand te verwijderen tot 3 meter onder maaiveld en kan vervolgens laagwaardig hergebruikt worden, bijvoorbeeld als wegfundering. Wanneer het blijft zitten, is er geen negatieve restwaarde (0). Een GZB bevat materiaal wat volledig herbruikbaar is, maar verwacht wordt dat het in de praktijk in de grond blijft zitten. De kleilaag kan direct hergebruikt worden. Het zand is bewerkt en heeft naar alle waarschijnlijkheid nog 80% van de originele werking aan het eind van de levensduur. Het zand kan wel hergebruikt worden, maar niet direct voor een nieuwe dijkversterking (1). Een VZG is moeilijk te verwijderen en blijft in de praktijk in de grond zitten. De restwaarde is negatief aangezien er niet-natuurlijk materiaal in de ondergrond blijft zitten (-2). Tot slot is een grondkoffer verwijderbaar, maar blijft in de praktijk in de grond zitten. Het materiaal bij verwijdering zou opnieuw toegepast worden, maar er is wel een tussenstap voor nodig omdat het waarschijnlijk vermengd raakt (1).

Tabel 3.3 Scores toekomstwaarde.

Criterium	Berm	Staal	Kunststof	Soilmix	GZB	VZG	Grindkoffer
Toekomstwaarde	2	1	-2	0	1	-2	1

3.2.2 Ecologische structuur en biodiversiteit

Het criterium ecologische structuur en biodiversiteit beoordeelt het effect van de innovatie op ecologische structuur en biodiversiteit. In Tabel 3.4 is de scoringsmatrix op dit criterium weergegeven. Natuurversterkende innovaties hebben bij dit criterium een positieve score. Onder dit criterium valt ook bodemkwaliteit en waterdoorlatendheid, omdat een niet waterdoorlatende maatregel ongunstig werkt voor de uitwisseling van nutriënten. Een harde maatregel zoals een heavescherm heeft significante impact op bodemleven en grondwaterstromen, waardoor het minder scoort op dit criterium. Oplossingen die de waterdoorlatendheid niet belemmeren scoren hier hoger op. Ook maatregelen zoals een soortenrijke vegetatie als bekleding of een flauw talud rondom rivier- en slootoevers waardoor er meer ruimte en variatie in habitats ontstaat draagt bij aan een positieve score op biodiversiteit.

Tabel 3.4 Scoringsmatrix ecologische structuur en biodiversiteit.

Score		Ecologische structuur en biodiversiteit
2	Positief	Positief effect op ecologie, natuurversterkende maatregel.
1	Licht positief	Kansen voor ecologische verbetering.
0	Neutraal	Neutraal effect op ecologie
-1	Licht negatief	Licht negatief effect. Uitgewerkt voor piping maatregelen: er is een blokkade voor het bodemleven maar geen blokkade voor de grondwaterstroming.
-2	Negatief	Negatief effect. Uitgewerkt voor piping maatregelen: er ontstaat een ondoordringbare blokkade voor het bodemleven. De grondwaterstroming wordt verstoord waardoor er geen uitwisseling van nutriënten kan plaatsvinden.

In Tabel 3.5 worden de scores per pipingmaatregel weergegeven. Een pipingberm scoort neutraal (0) op het criterium ecologische structuur en biodiversiteit, net als de GZB en de grondkoffer omdat er geen blokkade voor het bodemleven en grondwaterstroming. De ondoorlatende maatregelen, namelijk de heaveschermen, scoren negatief (-2), vanwege de blokkade voor bodemleven en grondwaterstroming. Licht negatieve scores (-1) zijn toegekend aan het kunststof filterscherm en de VZG omdat ze wel waterdoorlatend zijn maar tegelijkertijd een blokkade vormen voor het bodemleven.

Tabel 3.5 Scores ecologische structuur en biodiversiteit.

Criterium	Berm	Staal	Kunststof heavescherm (ondoorlatend)	Kunststof filterscherm (doorlatend)	Soilmix	GZB	VZG	Grind-koffer
Ecologie	0	-2	-2	-1	-2	0	-1	0

3.2.3 Materiaalgebruik

Het criterium materiaalgebruik gaat over de herkomst van het gebruik van materialen. Het gebruik van lokale, bio-based en secundaire grondstoffen scoren hier positief op. Een voorbeeld hiervan is het gebruik van gebiedseigen grond. Het gebruik van primaire grondstoffen en schaarse grondstoffen scoort negatief ten opzichte van schone gerecyclede materialen. Dit criterium overlapt deels met het criterium MKI en emissies, maar is hier als apart criterium genoemd vanwege de circulariteitsdoelen van de verschillende overheden.

Voor het uitwerken van de scoringsmatrix is gebruik gemaakt van de Leidraad Meten van circulariteit, (Platform CB'23, 2022). Hierin worden inputstromen geclassificeerd. Voor dijkversterkingsprojecten en innovaties is een doorvertaling gemaakt naar de onderscheidende categorieën.

In de scoringsmatrix (Tabel 3.6) wordt expliciet verschil gemaakt tussen primaire en secundaire grondstoffen. Uit de leidraad Meten van circulariteit zijn ook de definities overgenomen:

- Primaire grondstoffen zijn grondstoffen die voor de eerste keer worden gebruikt; secundaire grondstoffen zijn afkomstig uit eerder gebruik of uit reststromen van een ander productsysteem en vervangen daarmee primaire grondstoffen.
- Hernieuwbaar: natuurlijk aangevuld op menselijke tijdschaal. De grondstof wordt niet uitgeput.
- Duurzaam geproduceerd: drager van een (inter)nationaal erkend keurmerk voor duurzame productie of er kan op een andere manier inzichtelijk worden gemaakt dat de grondstof op duurzame manier gewonnen, geteeld of beheerd wordt.

Figuur 3.1 Classificeringen binnen inputdimensie 1 (inputstroom, onderscheid tussen primair en secundair materiaal) (Platform CB'23, 2022).

Er kan verder onderscheid gemaakt worden tussen schaars en niet-schaars materiaal. Onder niet-schaars materiaal worden materialen uit natuurlijke bronnen bedoeld, zoals zand, klei en grond. Schaarse materialen zijn niet-natuurlijk uit bronnen van fossiele brandstoffen. Hieronder worden staal en plastic onder geschaard.

Tabel 3.6 Scoringsmatrix materiaalgebruik.

Score		Materiaalgebruik
2	Positief	Secundair materiaal uit hergebruik (opnieuw gebruikt in dezelfde functie)
1	Licht positief	Primair, hernieuwbaar, duurzaam geproduceerd (biobased) Secundair materiaal uit hergebruik (opnieuw gebruikt als materiaal/grondstof) (>70% secundair)
0	Neutraal	Primair, hernieuwbaar, niet duurzaam geproduceerd Mix van primair en secundair materiaal (<70% secundair)
-1	Licht negatief	Primair materiaal, niet hernieuwbaar, niet-schaarse grondstof (natuurlijke bronnen)
-2	Negatief	Primair materiaal, niet hernieuwbaar, schaarse grondstof (niet-natuurlijk materiaal)

In Tabel 3.7 worden de scores per pipingmaatregel weergegeven. Een pipingberm scoort positief (2) op het criterium materiaalgebruik wanneer er volledig van secundaire (gebiedseigen) grond gebruik wordt gemaakt. Bij het gebruik van nieuwe damwanden met primair materiaal scoren stalen damwanden negatief. Echter kunnen er ook hergebruikte of damwanden gemaakt van recycled staal toegepast worden. Gemiddeld genomen bestaat

momenteel ongeveer 50% van het inputmateriaal in het staalproces uit schroot (SWZ Consulting, 2022). Er is daarom een neutrale score (0) toegekend. Kunststof heaveschermen zijn gemaakt van gerecyclede raamkozijnen. Al het materiaal is secundair maar moet wel bewerkt worden. Er is daarom een licht positieve score (1) toegekend. De soilmix wand heeft ook een licht positieve score (1), omdat er 10% primaire materialen worden gebruikt, namelijk cement en kalk, gemengd met 90% plaatselijke grond. De GZB wordt momenteel geproduceerd met primaire materialen. Deze materialen zijn wel hernieuwbaar en niet schaars (-1). Voor de VZG geldt dat materiaal uit primaire bronnen met kunstmatige oorsprong komt (-2). Bij een grindkoffer komt het materiaal uit primaire bronnen met natuurlijke oorsprong bij het gebruik van granulair filter i.p.v. geotextiel en scoort daarmee licht negatief (-1).

Tabel 3.7 Scores materiaalgebruik.

Criterium	Berm	Staal	Kunststof	Soilmix	GZB	VZG	Grindkoffer
Materiaalgebruik met primair materiaal	-1	-2	nvt	-2	-1	-2	-1
Materiaalgebruik met secundair materiaal	2	1/2	1	2	nvt	Nvt	nvt
% inschatting praktijk secundair	100%	50%	100%	90%	nvt	Nvt	nvt
Materiaalgebruik	2	0	1	1	-1	-2	-1

3.2.4 MKI en emissies

Dit criterium bevat het optimaliseren van emissies en de waarde van de milieukostenindicator (MKI). Dit draagt bij aan het minimaliseren van grondstoffen en energieverbruik in de aanleg, gebruiksfase en sloopfase van een project. DuboCalc wordt veelal gebruikt voor het berekenen hiervan. Het is een al veelgebruikt binnen de dijkenwereld om duurzaamheid te kwantificeren en sluit vooral aan op de thema's emissie, grondstof en energieverbruik en klimaatneutraliteit.

Het is belangrijk om hierin met dezelfde type categorie data te rekenen en ook te bekijken wat de verwachte emissies zijn bij realisatie. Hierbij kan gekeken worden naar de emissies in de bouwfase (A4 en A5) en de potentie tot elektrificeren van het materieel. In Tabel 3.8 is een indeling gemaakt voor de piping maatregelen per strekkende meter dijkversterking.

Tabel 3.8 Scoringsmatrix MKI en emissies.

Score		MKI en emissies
2	Positief	MKI-waarde onder de 25 euro per strekkende meter
1	Licht positief	MKI-waarde tussen 25 en 50 euro per strekkende meter
0	Neutraal	MKI-waarde tussen 50 en 75 euro per strekkende meter
-1	Licht negatief	MKI-waarde tussen 75 en 100 euro per strekkende meter
-2	Negatief	MKI-waarde hoger dan 100 euro per strekkende meter

In Tabel 3.9 worden de scores per pipingmaatregel weergegeven, voor de huidige situatie. Voor het bepalen van de MKI is uitgegaan van de objecten bibliotheek uit DuboCalc, die enkele aannames bevat. Deze aannames kunnen anders zijn dan de toepassing in de werkelijkheid. Een pipingberm scoort licht negatief (-1) op het criterium MKI en emissies, omdat de MKI waarde tussen de 75 en 100 euro per meter ligt volgens DuboCalc wanneer er gebruik wordt gemaakt van regulier materieel op fossiele brandstoffen. Indien er gebruik wordt gemaakt door gebiedseigen grond en emissieloos materieel zakt de MKI-waarde aanzienlijk en kan er een hogere score worden toegekend. Het VZG scoort het meest positief

(2) op dit criterium. Een licht positieve score (1) wordt toegekend aan de soilmix, GZB en grindkoffer. Kunststof heave en filterschermen scoren neutraal. Tot slot scoort een stalen heavescherm negatief (-2). In de toekomst kunnen MKI waardes verbeteren door het inzet van duurzamer materieel met minder emissies en/of sneller kunnen werken. Ook meer hergebruik/recycling in de afvalscenario's bij einde levensduur dragen bij aan een lagere MKI in de toekomst.

Tabel 3.9 Scores MKI en emissies.

	Berm	Staal	Kunststof	Soilmix	GZB	VZG	Grindkoffer
MKI euro/m	96[3]	342,8	58,7	30	30,4[4]	8,8	33,49 [3]
Score MKI (huidig)	-1	-2	0	1	1	2	1

3.3 Verbeteringsaspecten duurzaamheid voor innovaties

De duurzaamheidsaspecten voor het afwegingskader hoeven niet alleen gebruikt te worden door projecten zelf. De producenten van de innovaties kunnen de score per criteria gebruiken om nieuwe doorontwikkelingen of verbeteringen door te voeren. Door als producent de innovatie door te ontwikkelen op het gebied van duurzaamheid ontstaat de mogelijkheid dat de innovatie meer zal worden toegepast door toekomstige projecten. Hieronder staan enkele voorbeeldvragen die innovaties gesteld kan worden:

- Hoe scoort de innovatie op de subcategorieën: verwijderbaarheid, herbruikbaarheid en restwaarde. Hoe kan dit verbeterd worden, bijvoorbeeld door aanpassingen te maken waarbij de innovatie beter verwijderd kan worden bij einde levensduur of de negatieve effecten (negatieve restwaarde) te beperken bij einde levensduur?
- Zijn er aanpassingen mogelijk waardoor er meer kansen voor positief effect op ecologie mogelijk is?
- Zijn er aanpassingen mogelijk waarbij de negatieve effecten op ecologie gemitigeerd kunnen worden?
- In hoeverre zijn er mogelijkheden om meer gebruik te maken van secundair, hernieuwbaar of materiaal uit natuurlijke bronnen?
- In hoeverre is het mogelijk om de MKI-waarde te optimaliseren?

Naast deze criteria kan er ook gekeken worden naar uitbreidbaarheid. Uitbreidbaarheid is een ontwerpcriterium voor een project, maar innovaties kunnen doorontwikkeld worden op dit gebied, zodat ze langer toepasbaar zijn. Een voorbeeld vraag die gesteld kan worden is:

- Zijn er verbeteringen aan de innovatie mogelijk waarbij het gemakkelijk wordt om de innovatie in de toekomst te vergroten, verzwaren of verlengen?

[3] In de DuboCalc waarde voor grondverzet wordt van dieselverbruik uitgegaan voor vrachtwagens, dumpers en graafmachines. Wanneer er geëlektrificeerd materieel wordt ingezet, zal het aandeel emissies in LCA fase A4 en A5 significant dalen. Dit geldt voor de maatregelen berm en grindkoffer.

[4] In de DuboCalc waarde voor GZB is van een algemeen zandprofiel uitgegaan. In realiteit wordt het zand gezeefd en vuurgedroogd, waardoor de verwachte MKI waarde hoger ligt.

3.4 Scoren van piping maatregelen, per maatregel

3.4.1 Pipingberm

De pipingberm is een klassieke maatregel die wordt toegepast, wanneer de sterkte tegen piping onvoldoende is. Deze grondberm verlengt de kwelweg, wat wil zeggen de afstand tussen het begin van de pipe (de zandmeevoerende wel) en het einde (rivierbodem) verder uit elkaar komt te liggen en dus de faalkans van piping kleiner wordt. Pipingbermen worden doorgaans van grond aangelegd, soms wordt ook de piping berm van grind of klei aangelegd. Een pipingberm van gebied eigengrond heeft een circulair karakter; echter is er ruimte voor nodig.

Figuur 3.2 Pipingberm in aanleg (Wiki noodmaatregelen, 2014).

Tabel 3.10 Scores duurzaamheidscriteria en toelichting voor pipingberm.

Criterium	Score	Toelichting
Toekomstwaarde	2	Grond is goed te verwijderen en goed recyclebaar/herbruikbaar
Ecologie	0	Neutraal effect
Materiaalgebruik	2	Aanname is dat materiaal uit secundaire bronnen komt (gebiedseigen grond). Voor een pipingberm maakt vooral het gewicht en de dimensie uit. Het zou ook aangelegd kunnen worden van primaire grond of grind. Bij het gebruik van primaire materialen zou de score licht negatief (-1) zijn.
MKI*	-1	Scoort tussen de 75 en 100 euro per meter volgens DuboCalc. Indien er gebruik wordt gemaakt door gebiedseigen grond en emissieloos materieel zakt de MKI-waarde aanzienlijk en kan er een hogere score worden toegekend.

Tabel 3.11 MKI waarde per strekkende meter dijk voor pipingberm.

Maatregel	MKI per hoeveelheid	Hoeveelheid per strekkende meter dijk	MKI per strekkende meter dijk
Pipingberm	3,84 euro per m3	25 m2 / m	96 euro / m

3.4.2 Stalen heavescherm

Een stalen heavescherm is een maatregel die wordt toegepast in dijkversterkingen tegen piping. De stalen wanden worden tot 15 meter diepte in de grond getrild of gedrukt. De schermen voorkomen doorspoeling van water en sediment van buitendijks naar binnendijks. Daarnaast voegt het ook toe aan de stabiliteit van de dijk. Stalen heaveschermen hebben een levensduur van ongeveer 100 jaar, waarbij ze soms nog langer kunnen blijven zitten. Een ander voordeel van een stalen heavescherm is de besparing aan ruimte.

Figuur 3.3 Stalen heavescherm (Waterschap Scheldestromen, 2023).

Tabel 3.12 Scores duurzaamheidscriteria en toelichting voor stalen heaveschermen.

Criterium	Score	Toelichting
Toekomstwaarde	1	Staal is goed te verwijderen en recyclen (GWW bouw, 2025) en scoort daarmee licht positief. Hergebruik na verwijdering is mogelijk mits het profiel aan de vereisten voldoet maar is tot zover bekend niet toegepast binnen dijkversterkingsprojecten.
Ecologie	-2	Scoort negatief, vanwege blokkade voor bodemleven en grondwaterstroming.
Materiaalgebruik	0	Bij het gebruik van nieuwe damwanden met primair materiaal scoren stalen damwanden negatief. Echter kunnen er ook hergebruikte of damwanden gemaakt van recycled staal toegepast worden. Gemiddeld genomen bestaat momenteel ongeveer 50% van het inputmateriaal in het staalproces uit schroot (SWZ Consulting, 2022). Er is daarom een neutrale score toegekend. (0)
MKI*	-2	De MKI-waarde is ruim boven de 100 euro per meter. [3]

Tabel 3.13 MKI waarde per strekkende meter dijk voor stalen heaveschermen.

Maatregel	MKI per hoeveelheid	Hoeveelheid per strekkende meter dijk	MKI per strekkende meter dijk
Stalen heavescherm	34,28 euro per m2	10 m / m	342,8 euro / m

3.4.3 Kunststof heavescherm (en als variant: kunststof filterscherm)

Een kunststof heavescherm tegen piping is een verticale barrière die in de ondergrond wordt aangebracht om het verschijnsel van piping (het wegspoelen van zand door waterstromen onder een dijk of dam) te voorkomen. Het scherm wordt diep in de grond aangebracht, vaak aan de teen van een waterkering. Het scherm voorkomt dat de pipe verder groeit onder het scherm door.

Figuur 3.4 Kunststof heavescherm in uitvoering tussen Wolferen en Sprok (Ploegam, 2020).

Een kunststof filterscherm is een andere techniek om piping tegen te gaan. In deze techniek bevat het scherm een filter, wat doorstroom van grondwater mogelijk maakt maar het filter houdt het zand tegen. Daarmee voorkomt het de doorstroom van grondwater met zanddeeltjes en dat het verschijnsel van piping kan optreden.

Tabel 3.14 Scores duurzaamheidscriteria en toelichting voor kunststof heaveschermen.

Criterium	Score	Toelichting
Toekomstwaarde	-2	Niet eenvoudig te verwijderen, ze kunnen afbreken (Rietveld, 2023). Het materiaal kan wel hergebruikt worden als het eenmaal verwijderd is. De restwaarde is negatief, aangezien er niet natuurlijk materiaal achterblijft in de ondergrond.
Ecologie	-2 (-1 voor filter)	De ecologische structuur wordt aangetast door het scherm (-2). Er bestaan ook kunststof heaveschermen met filters. Het filter voorkomt dat zanddeeltjes mee wordt getrokken met grondwater door de ondergrond. Dit voorkomt het piping faalmechanisme. Het grondwater kan wel door het filter stromen, om geen grote verschillen in grondwaterstanden te creëren. Aangezien er wel filter gaten aanwezig zijn wordt de grondwaterstand niet beïnvloedt. Deze variant zou een –1 score volgens de systematiek.
Materiaalgebruik	1	De heaveschermen zijn gemaakt van gerecyclede raamkozijnen. Al het materiaal is secundair maar moet wel bewerkt worden.
MKI*	0	De MKI-waarde is tussen de 50 en 75 euro per meter.

Tabel 3.15 MKI waarde per strekkende meter dijk voor kunststof.

Maatregel	MKI per hoeveelheid	Hoeveelheid per strekkende meter dijk	MKI per strekkende meter dijk
Kunststof heavescherm	5,87 euro per m2	10 m / m	58,7 euro / m

Ontwikkelingen:

De innovatie van kunststof heaveschermen is bedacht omdat het duurzamer (lagere MKI waarde) en goedkoper zou zijn dan stalen heaveschermen. Na gesprek met een producent blijkt dat er momenteel weinig tot geen ontwikkelingen bezig zijn. De enige ontwikkeling waarnaar gekeken wordt is de inzet van emissieloos materieel. Kunststof heaveschermen

zijn niet uitbreidbaar. Wel is de verwachting dat de heaveschermen langer dan 100 jaar mee kunnen. Bij kunststof filterschermen kunnen de filters wel vervangen worden als dit nodig is.

3.4.4 Soilmix heavescherm

Een soilmix heavescherm bestaat uit een mengsel van grond en cement wat samen een waterremmende of waterkerende wand creëert. Het cement wordt doormiddel van een freesmachine in de grond gemengd, waarbij de aanwezige grond dus volledig hergebruikt wordt. Deze techniek wordt veel toegepast bij dijkversterkingen in gebieden met slappe klei- of veenlagen en heeft als voordeel dat er weinig grond hoeft te worden afgevoerd en de uitvoering relatief weinig overlast veroorzaakt.

Figuur 3.5 Foto van uitgegraven soilmix wand (HWBP, s.d.).

Tabel 3.16 Scores duurzaamheidscriteria en toelichting voor soilmix heavescherm.

Criterium	Score	Toelichting
Toekomstwaarde	0	In de praktijk wordt de soilmix scherm niet verwijderd. Met inspanning is de soilmix wand te verwijderen tot 3 meter onder maaiveld en kan vervolgens laagwaardig hergebruikt worden, bijvoorbeeld als wegfundering. Wanneer het blijft zitten, is er geen negatieve restwaarde.
Ecologie	-2	De ecologische structuur wordt aangetast.
Materiaalgebruik	1	Er wordt cement en kalk gebruikt, beide primair. Dit is ongeveer 10% van de soilmix wand. De overige 90% bestaat uit de plaatselijke grond.
MKI*	1	De MKI-waarde is tussen de 25 en 50 euro per meter.

Tabel 3.17 MKI waarde per strekkende meter dijk voor soilmix.

Maatregel	MKI per hoeveelheid	Hoeveelheid per strekkende meter dijk	MKI per strekkende meter dijk
Soilmix heavescherm	3,0 euro per m2	10 m / m	30 euro / m

Ontwikkelingen

Na het gesprek met een producent zitten de ontwikkelingen binnen het soilmix scherm vooral in het toevoegen van cement in additief. Dit is reeds van 250 kg naar 100 kg per m3 teruggebracht. De voorziene ontwikkelingen is om dit cementgehalte verder terug te brengen en/of te vervangen door natuurlijke materialen zoals bijvoorbeeld bentoniet. Elektrificeren van de grondfrees wordt niet voorzien, op dit moment is het een elektrische machine met dieselaggregaat.

3.4.5 Grofzandbarrière (GZB)

Een grofzandbarrière is een innovatie bedoeld om piping tegen te gaan. De barrière bestaat uit grotere zandkorrels die de weerstand tegen erosie vergroten. De grofzandbarrière is het meest effectief als het contrast tussen de grootte van de korrels van de grofzandbarrière en de rest van het zand op zijn grootst is. Boven op de grofzandbarrière wordt een kleilaag toegevoegd, omdat het anders enkel als filter zou fungeren. De aanleg ervan neemt weinig ruimte in beslag en de maatregel bestaat enkel uit natuurlijke materialen. Momenteel wordt het zand wel speciaal geproduceerd, aangezien alle zanddeeltjes dezelfde grootte en vorm moeten hebben. Dit proces wordt momenteel uitgevoerd door zand vuur te drogen en te filteren. Het kost ongeveer 16 kuub gas om een kuub zand vuur te drogen.

Figuur 3.6 GZB in uitvoering bij Gameren (Martens en Van Oord, s.d.).

Tabel 3.18.Scores duurzaamheidscriteria en toelichting voor GZB.

Criterium	Score	Toelichting
Toekomstwaarde	1	Het materiaal is volledig herbruikbaar. De kleilaag kan direct hergebruikt worden. Het zand is bewerkt en heeft naar alle waarschijnlijkheid nog 80% van de originele werking aan het eind van de levensduur. Het zand kan wel hergebruikt worden, maar niet direct voor een nieuwe dijkversterking.
Ecologie	0	De ecologische structuur wordt niet aangetast.
Materiaalgebruik	-1	Momenteel wordt de GZB geproduceerd met primaire materialen. Deze materialen zijn wel hernieuwbaar en niet schaars.
MKI*	1	De MKI-waarde is tussen de 25 en 50 euro per meter.

Tabel 3.19 MKI waarde per strekkende meter dijk voor GZB.

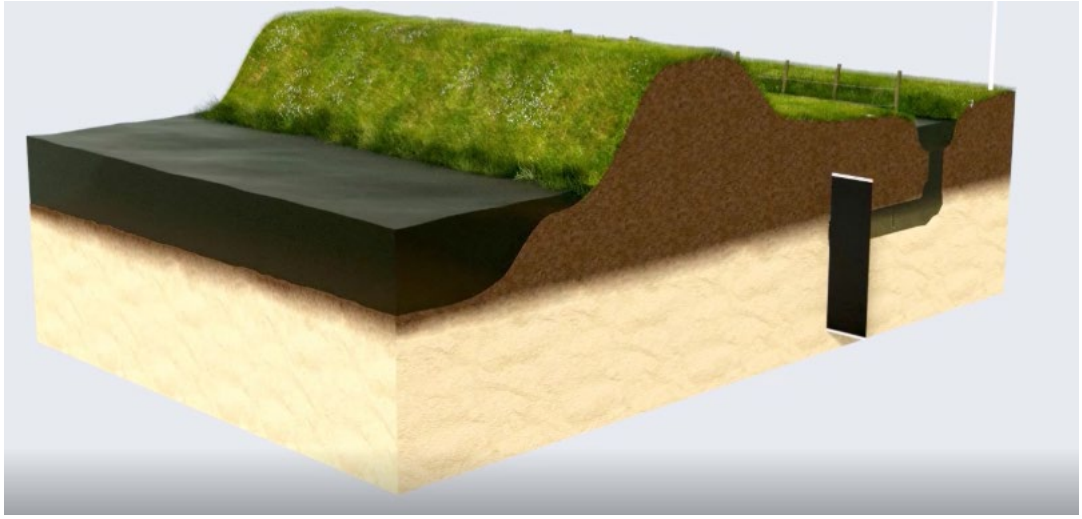
Maatregel	MKI per hoeveelheid	Hoeveelheid per strekkende meter dijk	MKI per strekkende meter dijk	Opmerking
GZB	13,50 euro per m3	2,25 m2 / m	30,4 euro / m	Voor het milieuprofiel van zand wordt uitgegaan van het algemene profiel van zand. Het proces van vuurdrogen is hier dus niet in meegenomen.

Ontwikkelingen:

In gesprek met een producent kwam naar voren dat er momenteel twee doorontwikkelingen op de planning staan. Enerzijds de inzet van nieuwe snellere methode (sleuftechniek) tijdens de aanleg, en anderzijds wordt er gekeken naar een natuurlijk zand alternatief ten opzichte van de huidige methode waar zand vuurgedroogd wordt om de juist vorm en eigenschappen te krijgen.

3.4.6 Verticaal zanddicht geotextiel (VZG)

Een verticaal zanddicht geotextiel is een maatregel die wordt toegepast om horizontaal zandtransport (piping) onder de waterkering te stoppen. Dit geotextiel bevindt zich ter plaatse van de overgang van de deklaag op de onderliggende zandlaag. Het laat water door, maar houdt de zandkorrels tegen. Het geotextiel wordt verticaal ingebracht, bijvoorbeeld met een kettinggraver. Daarna wordt aan weerszijden de zanden of gronden weer aangevuld.



Figuur 3.7 Artist impression van een VZG (Piping Control, s.d.).

Tabel 3.20 Scores duurzaamheidscriteria en toelichting voor VZG.

Criterium	Score	Toelichting
Toekomstwaarde	-2	Moeilijk te verwijderen en blijft in de praktijk in de grond zitten. De restwaarde is negatief aangezien er niet-natuurlijk materiaal in de ondergrond blijft zitten.
Ecologie	-1	Licht negatief; weinig effect verwacht op grondwaterstroming, maar het vormt wel een fysieke barrière voor het bodemleven
Materiaalgebruik	-2	Materiaal komt uit primaire bronnen met kunstmatige oorsprong en risico op micro-plastics
MKI*	2	De MKI-waarde is onder de 25 euro per meter.

Tabel 3.21 MKI waarde per strekkende meter dijk voor VZG.

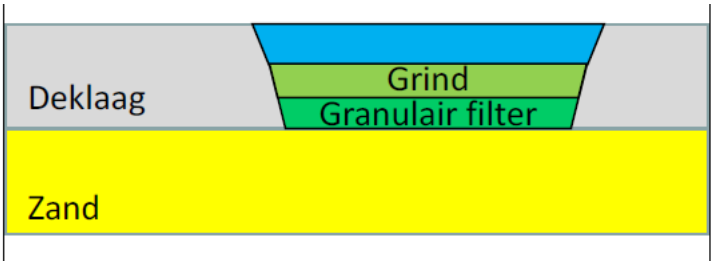
Maatregel	MKI per hoeveelheid	Hoeveelheid per strekkende meter dijk	MKI per strekkende meter dijk
VZG	0,88 euro per m2	10 m / m	8,8 euro / m

3.4.7 Grindkoffer

Een grindkoffer is een drainerende maatregel om piping tegen te gaan. Wanneer door hoogwater de waterdruk in de zandlaag onder de dijk stijgt, zal er water naar de grindkoffer stromen. Hierdoor worden de waterdrukken onder de dijk lager dan zonder de drainerende maatregel. De grindkoffer houdt de mogelijk meestromende gronddeeltjes tegen en laat enkel water door.

Er bestaan verschillende typen grindkoffers, die verschillen op bijvoorbeeld het type filter (geotextiel of granulair filter), manier van afvoeren van afgevangen water (drains of oppervlaktewater) en bescherming aan de bovenzijde. In dit rapport kiezen we een van de standaarduitvoeringen van de grindkoffer met een granulair filter. We gaan hiervan uit van

een sloot van 5 meter breed, met daaronder 0,5 m grind en 1 m fijn breuksteen als aanname voor de MKI berekening.



Figuur 3.8 Schematische dwarsdoorsnede grindkoffer (De Innovatieversneller, 2023).

Tabel 3.22 Scores duurzaamheidscriteria en toelichting voor grindkoffer.

Criterium	Score	Toelichting
Toekomstwaarde	1	Blijft in de praktijk in de grond zitten maar is verwijderbaar. Het materiaal bij verwijdering zou opnieuw toegepast worden, maar er is wel een tussenstap voor nodig omdat het waarschijnlijk vermengd raakt.
Ecologie	0	Neutraal; enig effect verwacht op grondwaterstroming met kans op vernatting, maar is met voldoende afvoer goed te regelen, geen fysieke barrière voor het bodemleven.
Materiaalgebruik	-1	Materiaal komt uit primaire bronnen met natuurlijke oorsprong bij het gebruik van granulair filter i.p.v. geotextiel
MKI*	1	De MKI-waarde is tussen de 25 en 50 euro per meter

Tabel 3.23 MKI waarde per strekkende meter dijk voor grindkoffer.

Maatregel	MKI per hoeveelheid	Hoeveelheid per strekkende meter dijk	MKI per strekkende meter dijk
Grindkoffer	3,532 euro per m3 grind 4,931 euro per m3 fijne breuksteen	5*0,5 m grind / m 5*1 m breuksteen / m	33,49 euro / m

3.5 Overzicht scores van piping maatregelen

Concluderend is dit het overzicht van scores van piping maatregelen.

Tabel 3.24 Overzicht scores duurzaamheidsafwegingskader voor pipingmaatregelen.

Criterium	Berm	Stalen heave-scherm	Kunststof heave-scherm	Kunststof filter-scherm	Soilmix heave-scherm	GZB	VZG	Grind-koffer
Toekomst waarde	2	1	-2	-2	0	1	-2	1
Ecologie	0	-2	-2	-1	-2	0	-1	0
Materiaal-gebruik	2	0	1	1	1	-1	-2	-1
MKI (huidig)	-1	-2	0	0	1	1	2	1

4 Conclusie

4.1 Conclusie

Doel van dit rapport was om bewustzijn te creëren voor de verschillende aspecten die spelen rondom duurzaamheid, wat breder is dan MKI. In dit rapport zijn duurzaamheidscriteria voor innovaties verbeterd en is er een scoringsmatrix uitgewerkt per criterium. De criteria zijn uitgewerkt voor twee doelen: 1) als afwegingskader duurzaamheid en 2) als verbeteringsaspecten bij (door)ontwikkeling van innovaties. Voor het afwegingskader zijn de scores uitgewerkt, waarbij de scores lopen van positief (2) naar negatief (-2).

In het rapport zijn deze criteria getest op een selectie van pipingmaatregelen. Hieruit komen aanbevelingen voor HWBP (en DIV) voor de doorontwikkeling van de criteria naar beslisinformatie.

Concluderend geven deze verbeterde duurzaamheidscriteria een meer uitgesplitst en concreet kader waaraan innovaties getoetst kunnen worden en kunnen ze aanleiding geven tot het verbeteren van een bepaald aspect. Er is veel potentie voor toekomstige ontwikkelingen voor verbetering met betrekking tot duurzaamheidscriteria. Voorbeelden van toekomstige ontwikkelingen die gelinkt zijn aan deze duurzaamheidscriteria zijn:

- Duurzame uitvoeringsmethode en productiemethode zand (MKI en emissies) voor GZB.
- Duurzame (natuurlijke) materiaal als bijmenging (materiaalgebruik) voor soilmix heaveschermen.

4.2 Discussie

Gedurende het onderzoek is gebleken dat de pipingmaatregelen veelal afhankelijk zijn van locatie specifieke situaties. Als voorbeeld: een berm is een maatregel die veel ruimte in beslag neemt, en zal in veel situaties dus niet een reële optie zijn ondanks dat het op duurzaamheid goed zou scoren.

In de huidige MKI-berekeningen gebaseerd op de standaardwaarden uit DuboCalc wordt uitgegaan van conventioneel materieel. Wanneer een afweging gemaakt wordt voor een project wat in de toekomst (~10 jaar) wordt uitgevoerd, dient ook gerekend te worden met het verwachte aandeel emissieloos van het materieel. Op dit moment wordt verwacht dat voor de middellange termijn van ~10 jaar elektrische graafmachines en wiellaadschop beschikbaar zijn en worden ingezet. Voor diepdrainagemachines (GZB) of grondfrees (soilmix, VZG) is dit nog niet bekend. Een reductie van de lasten in LCA-fase A5 (bouwproces) van in de MKI-waarde zou meegenomen kunnen worden bij de afweging.

4.3 Aanbevelingen

Ter aanbeveling voor toekomstige ontwikkelingen kan er gekeken worden naar een breder pallet aan innovaties aangezien er in dit onderzoek enkel is gekeken naar pipingmaatregelen. Daarnaast is het van belang om met meer producenten in gesprek aan te gaan om de laatste ontwikkelingen en uitdagingen te achterhalen.

Om te evalueren of en hoe dit afwegingskader impact kan hebben op projectkeuzes is het nodig om een voorbeeldproject te gebruiken. Doormiddel hiervan kan gekeken worden naar de relatie tussen locatie specifieke situaties en het afwegingskader. Ter aanvulling is het ook van belang om te onderzoeken of elk criterium dezelfde wegingsfactor heeft, of dat hier onderling verschil in is.

Referenties

((nog niet gepubliceerd)). *Analyserapport maakbaarheidsproeven soilmixwand (Mixed in Place trench).*

De Innovatieversneller. (2023). *Publicatie Filtertechnieken. Versie 1.0.*

Deltares. (2024). *Duurzaamheidsafweging Innovaties, 11210375-004-GEO-0001.*

Deltares en HWBP. (2024). *Duurzaamheidsafweging Innovaties. 11210375-004-GEO-0001.*

Flux Partners. (s.d.). *Levenscyclus analyse (LCA)*. Opgehaald van https://flux.partners/kennisbank/duurzaamheid/levenscyclus-analyse-lca/

GWW bouw. (2025, 3 1). *Waterwerken*. Opgehaald van Duurzame dijkversterkingsprojecten: https://gww-bouw.nl/waterwerken/duurzame-dijkversterkingsprojecten/#:~:text=De%20dijkversterkingen%20hebben%20vaak%20een,hergebruikt%20worden%20in%20andere%20projecten.

HDSR. (2024). *Duurzaamheidskader Sterke Lekdijk. DM nummer 1998793.*

HWBP. (s.d.). Opgehaald van Soilmix heaveschermen: https://www.hwbp.nl/innoveren/innovatieprojecten/soilmix-heaveschermen

HWBP-DIV Gebruikersplatform Piping. (2025, 04 11). *Heaveschermen*. Opgehaald van https://publicwiki.deltares.nl/spaces/HWBPPiping/pages/210371316/Heaveschermen#:~:text=Er%20zijn%20geen%20vuistregels%20beschikbaar,afhankelijk%20van%20de%20locatiespecifieke%20omstandigheden.

Martens en Van Oord. (s.d.). Opgehaald van Wereldprimeur in Gameren: toepassing grofzandbarrière voor sterkere dijk: https://www.mvogroep.nl/nl/service/nieuws/wereldprimeur-in-gameren-toepassing-grofzandbarriere-voor-sterkere-dijk2/

Nationale Milieudatabase. (2023). *LCA Rapportage categorie 3 data, Nationale Milieudatabase, Hoofdstuk 52 Kust- en oeverwerken, versie 9.* Opgehaald van https://milieudatabase.nl/nl/rapporten-tool/report/64/

Nationale milieudatabase. (2025, 5 25). Opgehaald van Categorie 3 Milieuverklaring Hergebruikte stalen damwand, AZ24700: https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_39301/

NIBE. (2022). *LCA vergelijking Damwand en Soilmix.*

Piping Control. (s.d.). Opgehaald van Piping, een belangrijk faalmechanisme bij dijken: https://pipingcontrol.nl/nl/content/piping-een-belangrijk-faalmechanisme-bij-dijken

Platform CB'23. (2022). *Leidraad Meten van circulariteit. Meetmethode voor een circulaire bouw. Versie 3.0.*

Ploegam. (2020). Opgehaald van Proef met kunststof damwanden: https://www.ploegam.nl/nieuws/proef-met-kunststof-damwanden

Rietveld, I. (2023). *Kunststof heavescherm, een duurzaam alternatief voor een stalen heavescherm?*

SWZ Consulting. (2022). *Ketenanalyse Stalen damwand.*

Waterschap Scheldestromen. (2023). *Scheldestromen*. Opgehaald van Dijkversterking Hansweert Ontwerp: https://scheldestromen.nl/onze-taken/sterke-dijken-en-duinen/dijkversterking-hansweert/documentatie-media/ontwerp

Wiki noodmaatregelen. (2014). Opgehaald van Bestand pipingberm.png: https://v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/index.php?title=Bestand:Pipingberm.png&filetimestamp=20141211081159&

WIKI noodmaatregelen. (s.d.). *Pipingberm aanbrengen*. Opgehaald van https://v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/index.php/Pipingberm_aanbrengen

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl