

RAPPORT

**LCA en LCC berekening
oeverbescherming HLD**

Klant: RWS

Referentie: BG7363TPRP1906031953

Status: Concept/P02.01

Datum: Friday, 24 January 2020

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 no.35
3818 EX AMERSFOORT
Transport & Planning
Trade register number: 56515154

+31 88 348 20 00 **T**
+31 33 463 36 52 **F**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document: LCA en LCC berekening oeverbescherming HLD

Ondertitel: LCA LCC HLD
Referentie: BG7363TPRP1906031953
Status: P02.01/Concept
Datum: Friday, 24 January 2020

Projectnaam:
Projectnummer: BG7363
Auteur(s): Bas Mentink, Gerard File, Jorrit Zuidema

Opgesteld door: Jorrit Zuidema, Gerard File, Bas
Mentink

Gecontroleerd door: Bas Mentink

Datum/Initialen: 14-11-2019 / BM

Goedgekeurd door:

Datum/Initialen:

Classificatie

Projectgerelateerd



Disclaimer

No part of these specifications/printed matter may be reproduced and/or published by print, photocopy, microfilm or by any other means, without the prior written permission of HaskoningDHV Nederland B.V.; nor may they be used, without such permission, for any purposes other than that for which they were produced. HaskoningDHV Nederland B.V. accepts no responsibility or liability for these specifications/printed matter to any party other than the persons by whom it was commissioned and as concluded under that Appointment. The integrated QHSE management system of HaskoningDHV Nederland B.V. has been certified in accordance with ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 and OHSAS 18001:2007.

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Aanpak	2
2.1	Stappen	2
2.2	Profielen	3
2.3	Aannames	5
2.3.1	Invoerwaarden en hoeveelheden	5
2.3.2	Materiaalkeuzen standaard uitvoering en MKI-waarden	6
2.3.3	Beheer en onderhoud damwandconstructie	7
2.4	Herberekening	8
3	Resultaten LCA	10
3.1	Uitkomsten	10
3.2	Zwaartepunten profiel A	13
3.3	Gevoeligheidsanalyse	14
3.3.1	Taludoever	14
3.3.2	Verticale oeverbescherming	14
3.3.3	Hybride	15
3.4	Overige gevoeligheden	16
3.4.1	Levensduur damwanden	16
3.4.2	Gewicht stortsteen	17
4	Invloed van materiaalsoort op MKI-waarde	18
4.1	Taludoever	18
4.2	Verticale oeverbescherming	18
4.3	Hybride	19
4.4	MKI-waarden per materiaalsoort per principe-oplossing	20
5	Resultaten LCC	22
5.1	Uitkomst	22
5.1.1	Deterministische berekening	22
5.1.2	Probabilistische berekening	23
5.2	Zwaartepunten profiel B	23
5.3	Gevoeligheden profiel B	24
5.3.1	Taludoever	24
5.3.2	Verticale oeverbescherming	26
5.3.3	Hybride	27

6	Conclusie	28
7	Aanbevelingen	29

Bijlagen

Bijlage 1: LCA-berekening HLD (Excel bestand)

Bijlage 2: Deterministische LCC-berekening HLD

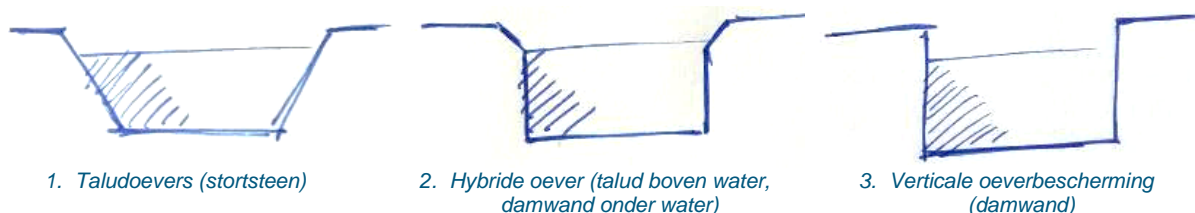
Bijlage 3: Probabilistische LCC-berekeningen HLD

1 Inleiding

Voor de renovatie van een grote hoeveelheid oeverbescherming langs de Hoofdvaarweg Lemmer-Delfzijl (HLD) moeten in 2019 keuzes gemaakt worden in principe-oplossingen. De principe-oplossingen die voorliggen zijn:

1. Taludoevers (stortsteen);
2. Hybride oever (talud boven water, damwand onder water);
3. Verticale oeverbescherming (damwand).

Voor een grote renovatie van oeverbescherming langs de Hoofdvaarweg Lemmer-Delfzijl (HLD) moeten in 2019 keuzes gemaakt worden in principe-oplossingen. De principe-oplossingen die voorliggen zijn:



In dit rapport is een vergelijking gemaakt van MKI-scores en LCC van de principe-oplossingen. De berekening is gemaakt op drie exemplarische profielen van de HLD:

- A. Smal
- B. Gemiddeld
- C. Breed

Tevens zijn gevoeligheden in de berekeningen gekwantificeerd van o.a.:

- Variërende (technische) levensduren van materialen.
- Variërende dimensionering, o.a. afhankelijk van het profiel en de bodem (lengte damwanden).
- Verschillende materialen (staal, hout, gerecyceld kunststof en beton).

Opmerking: herberekening

Gedurende de eerste fase van dit onderzoek is een significante fout geconstateerd bij het DuboCalc-item 'Breuksteen waterbouw'. Deze fout heeft significante gevolgen voor de resultaten. In de tweede fase van dit onderzoek is dit item breuksteen aangepast en zijn de resultaten. In paragraaf 3.4 is de reden voor de herberekening toegelicht.

2 Aanpak

2.1 Stappen

Stap 1 - Modellen maken van principe-oplossingen in een standaard uitvoering

Wij hebben een model **per strekkende meter** oeverbescherming gemaakt voor de drie principe-oplossingen in een standaard uitvoering:

1. Taludoevers;
2. Hybride oever;
3. Verticale oeverbescherming.

Het model van de standaard uitvoering betreft een schetsmatige tekening en hoeveelheden materiaal- en materieelgebruik. De hoeveelheden zijn afkomstig uit drie aangeleverde doorsneden, die tezamen de variatie van de HLD representeren (zie Figuur 1 t/m

Profiel C – groot profiel

Profiel C is het breedste profiel en heeft een breedte van ca. 87 meter. Kenmerkend aan profiel C is de ruime afstand tussen de vaarweg en de oever. Een talud met een helling van zowel 1:3 als 1:2,5 passen in zijn geheel tussen de vaarweg en de oever. De waterkerende hoogte van profiel C is daarmee slechts 1,5 meter. Voor een dergelijke korte lengte is in de praktijk geen ingreep nodig. Echter is ten behoeve van de vergelijking van principe-oplossingen de damwand wel gemodelleerd in de LCA-berekeningen en berekend op basis van verhoudingen met profiel A en B in de LCC-berekening. Zie verder paragraaf 5.1.1, p.22

Figuur 3 op navolgende pagina's). In dit rapport worden deze doorsneden aangeduid als **profielen A, B en C**:

- Profiel A: smalle doorsnede;
- Profiel B: gemiddelde doorsnede;
- Profiel C: brede doorsnede.

In deze stap is voortgeborduurd op de resultaten uit het rapport *Circulaire objecten* (februari 2019). De gegevens voor de modellen zijn aangeleverd door RWS, projectteam HLD.

Stap 2 - MKI- en LCC-zwaartepunten analyseren van standaard uitvoeringen

Wij hebben de MKI-score en LCC op basis van beschikbare milieu- en kostengegevens berekend met DuboCalc versie 5.1 en ons LCC-model. Daarbij is inzichtelijk gemaakt welke onderdelen het meeste bijdragen aan de milieu-impact en kosten.

Stap 3 - Gevoeligheden analyseren d.m.v. alternatieve uitvoeringen

Wij hebben de gevoeligheden van de MKI-score en LCC in beeld gebracht door de uitvoering van de principe-oplossing te variëren aan de hand van door RWS aangeleverde onder-, gemiddelde en bovenwaarden (par. 2.3.1). Deze waarden representeren de mogelijke spreiding in verschillende situaties.

Vanwege verschillen in de MKI- en LCC-berekening heeft dit twee verschillende uitkomsten opgeleverd:

- Voor de MKI-berekening zijn de varianten doorgerekend met onder-, gemiddelde en bovenwaarden.
- De LCC is **probabilistisch** doorgerekend, waarbij alle combinaties van onder- en bovenwaarden en percentages onzekerheden zijn doorgerekend.

Stap 4 – Verzamelen MKI-waarden van materiaalsoorten

Voor de nadere verdieping van de materiaalsoort van de principe-oplossingen, met meer specifieke marktconforme uitgangspunten, zijn milieugegevens bij producenten verzameld. De materialen zijn in

samenspraak met RWS bepaald, te weten: hout, beton en gerecycled kunststof. Hierbij zijn wij afhankelijk van de medewerking van producenten en maken wij bij gebrek aan producentengegevens inschattingen op basis van publiek beschikbare gegevens.

Stap 5 - Gevoeligheden analyseren d.m.v. alternatieve materiaalsoorten

Wij herhalen stap 3 om voor alternatieve materiaalsoorten per principe-oplossing gevoeligheden van de MKI-score te analyseren en presenteren.

2.2 Profielen

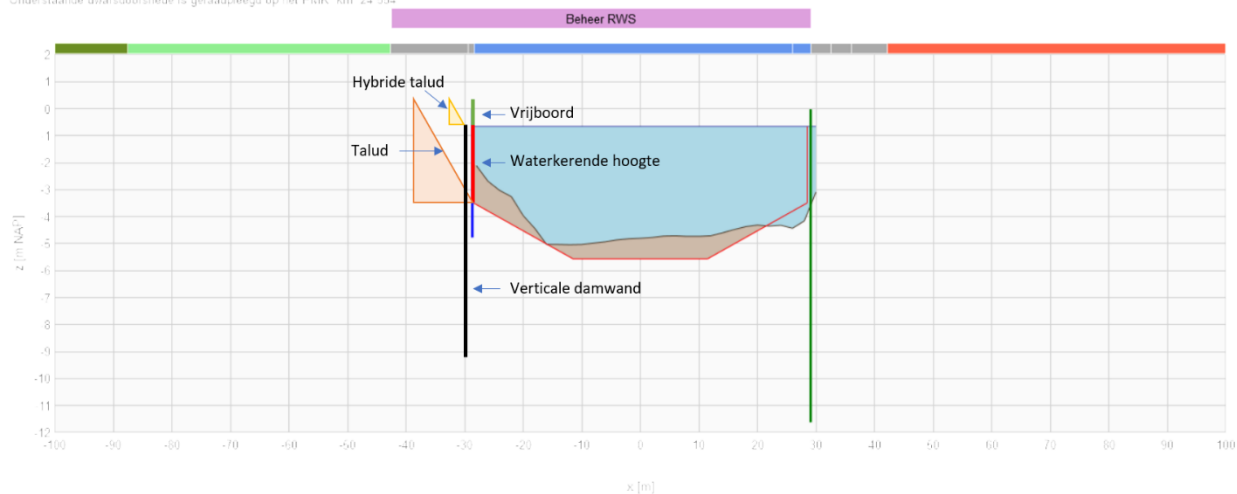
In overleg met RWS zijn de berekeningen gemaakt voor de linkerzijde van de profielen, omdat deze zijde het meest kenmerkende onderscheid tussen de profielen heeft. De werkzaamheden en processen die de varianten uniek maken zijn meegenomen in de studie. Generieke werkzaamheden, zoals het uitdiepen van de vaarweg, worden buiten beschouwing gelaten.

Profiel A – smal profiel

Profiel A is het smalste profiel en heeft een breedte van ca. 56 meter. Kenmerkend voor profiel A is dat aan de linkerzijde op dit moment een damwand geplaatst is. Daarnaast grenst de vaarweg van 3 meter diep aan de oeverzijde direct aan de oever.

Figuur 1: Schematische weergave en dimensionering Profiel A (smal).

Onderstaande dwarsdoorsnede is geraadpleegd op het PMK, km: 24.554

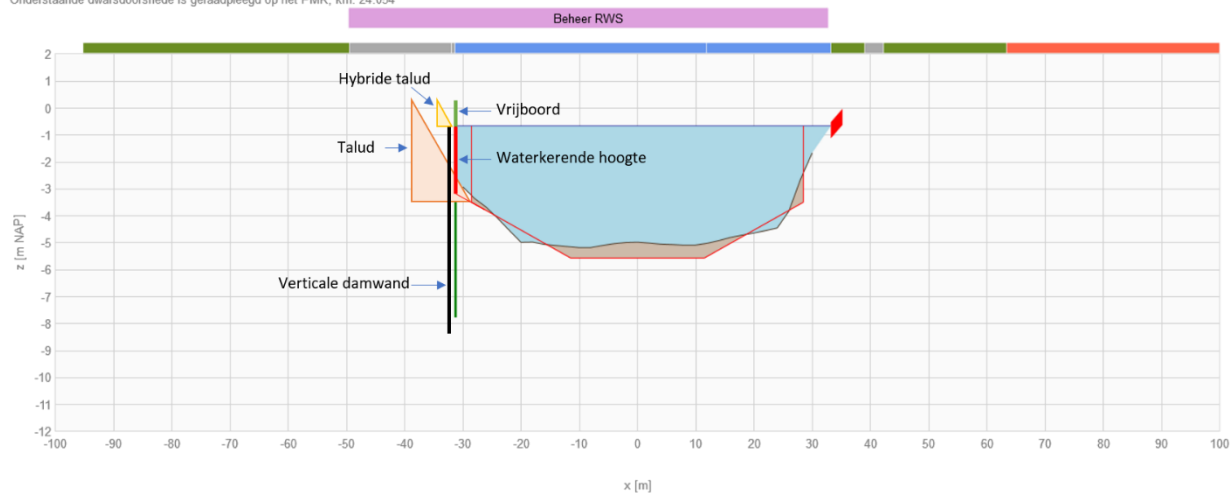


Profiel B – gemiddeld profiel

Profiel B is het gemiddelde profiel en heeft een breedte van ca. 62 meter. Kenmerkend voor profiel B is dat de huidige damwand niet direct grenst aan de hoofdvaarweg. Dit heeft onder meer impact op de waterkerende hoogte, deze is in profiel B namelijk 2,5 meter.

Figuur 2: Schematische weergave en dimensionering Profiel B (gemiddeld).

Onderstaande dwarsdoorsnede is geraadpleegd op het PMK, km: 24.054

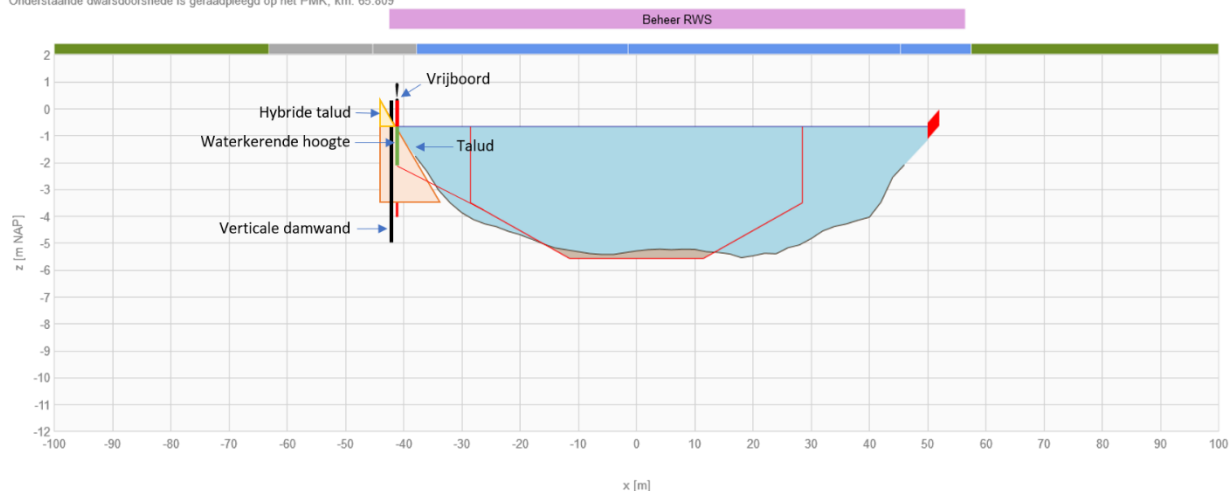


Profiel C – groot profiel

Profiel C is het breedste profiel en heeft een breedte van ca. 87 meter. Kenmerkend aan profiel C is de ruime afstand tussen de vaarweg en de oever. Een talud met een helling van zowel 1:3 als 1:2,5 passen in zijn geheel tussen de vaarweg en de oever. De waterkerende hoogte van profiel C is daarmee slechts 1,5 meter. Voor een dergelijke korte lengte is in de praktijk geen ingreep nodig. Echter is ten behoeve van de vergelijking van principe-oplossingen de damwand wel gemodelleerd in de LCA-berekeningen en berekend op basis van verhoudingen met profiel A en B in de LCC-berekening. Zie verder paragraaf 5.1.1, p.22

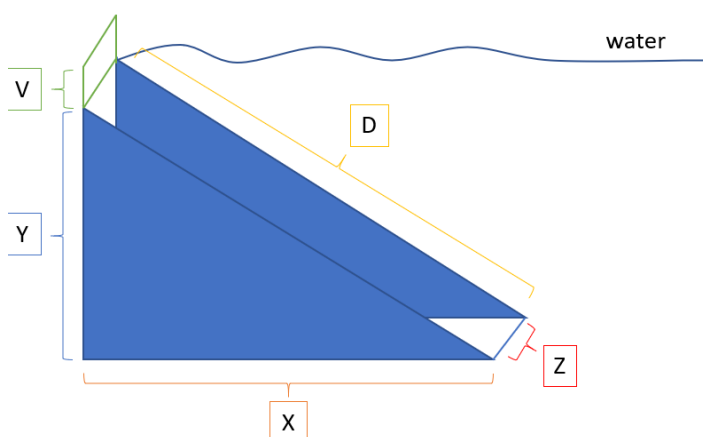
Figuur 3: Schematische weergave en dimensionering Profiel C (breed).

Onderstaande dwarsdoorsnede is geraadpleegd op het PMK, km: 65.809



Uit de profielen A, B en C zijn vervolgens hoeveelheden materialen bepaald. Figuur 4 toont hoe deze hoeveelheden zijn bepaald.

Figuur 4: Schematische weergave maatvoering dimensies.



Y = waterkerende hoogte; schematische weergave of aangeleverd door rws (Y = afmeten)

X = breedte; '1:4' – '1:3' – '1:3,5' (X = Y * '2,5' – '3' of '2,75')

V = maatvoering vrijboord; '0,5' – '0,75' of '1,0' meter (V = onder, gemiddeld of bovengrens)

Z = functionele eenheid; 1 strekkende meter (Z = functionele eenheid)

D = diagonaal talud (D = WORTEL(Y²+X²))

$$m3 = Y * X * Z / 2$$

$$m2 = D * Z$$

$$m1 \text{ damwand} = (Y+V) * 3$$

2.3 Aannames

2.3.1 Invoerwaarden en hoeveelheden

Onder-, gemiddelde- en bovenwaarden

In deze studie worden voor het onderzoeken van gevoeligheden (stap 3 in de aanpak) drie sets aan invoerwaarden onderzocht. De dimensies worden bepaald door de onder-, gemiddelde- en boven waarde van parameter. De varianten worden doorgerekend per set. Dit betekent dat onderwaarden uitsluitend met onderwaarden gecombineerd worden. De invoerwaarden zijn aangeleverd door RWS of met behulp van expertkennis van Royal HaskoningDHV ingevuld.

Tabel 1: Overzicht aannames per set invoerwaarden.

Aanname	Onderwaarden	Gemiddeld	Bovenwaarden
Levensduur oeverbeschoeiing (tot volgende renovatie)	50	75	100
Vrijboord	0,5 m	0,75 m	1 m
Helling talud	1:3	1:2,75	1:2,5
Extra doeklengte	2 m	2,5 m	3 m
Stortsteen onderwater ¹	1.000 kg/m ²	1.000 kg/m ²	1.000 kg/m ²
Stortsteen bovenwater	1.000 kg/m ²	1.000 kg/m ²	1.000 kg/m ²
Hoeveelheid bijstort stortsteen (in % t.o.v. aanleg)	10% per 10 jaar = 40%	10% per 10 jaar = 70%	10% per 10 jaar = 90%
Gewicht damwanden ²	136,7 kg/m	146,9 kg/m	146,9 kg/m
Levensduur stalen damwanden ³	100 jaar	100 jaar	100 jaar

Afmetingen en gewicht damwanden

De afmetingen en gewichten per m² van de damwanden zijn bepaald op basis van:

- de kerende hoogte, afkomstig uit de schematische weergaven van de drie profielen
- onverankerde toepassing (besparing ankers, maar langere damwandlengte)
- de '1:3 vuistregel' voor de lengte van de damwand bij onverankerde toepassing (lengte = 3 x kerende hoogte)
- de damwandprofielen van ArcelorMittal (**Tabel 2**).

Tabel 2: Aannames damwanden.

Kerende hoogte	Damwand	Max lengte	kg/m ²
2,5 - 3,5m	AZ24	10,5	136,7
3,5 - 4,5m	AZ36	13,5	146,9
4,5 - 5,5m	AZ36	16,5	169,5

¹ In overleg met RHDHV waterbouwkundige experts is het stortsteengewicht bepaald op 1000 kg/m². De hoeveelheid stortsteen onder water valt hierdoor aanzienlijk hoger uit dan aanvankelijk door RWS opgegeven (400-600 kg/m²). Naar aanleiding van ervaringen met uitvoeringen in lagere gewichten waar vervroegd moest worden bijgestort is deze hoeveelheid verhoogd.

² Zie Tabel 2 voor gehanteerde damwandprofielen en gewichten. Het gewicht voor set 'gemiddeld' en 'bovenwaarden' is gelijk, omdat de kerende hoogte beide in de range 3,5 – 4,5 meter vallen.

³ De damwand wordt conform gangbare termijnen voor damwandontwerpen in zoet water ontworpen voor een levensduur van 100 jaar. Preventief wordt de damwand voor dit doel met overdikte gedimensioneerd. De benodigde overdikte is 2 mm voor 100 jaar (zoetwater, zie CUR 166 Damwandconstructies). Deze extra dikte is meegenomen in keuze van het damwandprofiel (Tabel 2). Vanwege de preventieve strategie is verder bij het ontwerp gekozen wordt voor warmgewalste profielen, omdat dit minder corrosiegevoelig is dan koudgewalst.

Overzicht hoeveelheden gemiddelde waarden

Ten behoeve van uw begrip van de gemaakte berekeningen zijn in Tabel 3 de hoeveelheden van de belangrijkste materialen opgenomen die resulteren uit de gemiddelde invoerwaarden.

Tabel 3: Resulterende hoeveelheden materialen uit gemiddelde invoerwaarden.

Variant	Grond	Damwand lengte	Damwand staal	Doek	Stortsteen	Stortsteen onderhoud	Wiepen
<i>Eenheid:</i>	m ³	m	Kg	m ²	Kg	Kg	m ²
Profiel A hybride	0,8	9,0	1322	4,7	2195	1536	-
Profiel A talud	19,3	-	-	13,5	10973	7681	11,0
Profiel A verticaal	-	11,3	1653				-
Profiel B hybride	0,9	7,5	1102	4,9	2372	1660	-
Profiel B talud	14,5	-	-	12,0	9510	6657	9,5
Profiel B verticaal	-	9,8	1432				-
Profiel C hybride	0	4,5	661	4,9	2372	1660	-
Profiel C talud	0	-	-	9,1	6584	4681	6,6
Profiel C verticaal	-	6,8	992				-

2.3.2 Materiaalkeuzen standaard uitvoering en MKI-waarden

De volgende materiaalkeuzes met bijbehorende MKI-waarden zijn gehanteerd voor de MKI-berekeningen. Alle waarden zijn afkomstig uit DuboCalc, bibliotheekversie 5.01.14052018, behalve 'Breuksteen (aangepast)'. Dit item is in de loop van dit onderzoek aangepast in verband met een significante fout. Ter illustratie is het item 'Breuksteen (waterbouw)' ook opgenomen in Tabel 4, te zien is dat tussen de aangepaste versie en het DuboCalc-item een factor 3 verschil zit.

Tabel 4: MKI-waarden toegepast in de LCA.

DuboCalc item	Hvh	Ehd	Data-cat. ⁴	Levens-duur (in jaren)	Transport-afstand	MKI over 50 jaar	MKI over 75 jaar	MKI over 100 jaar
Breuksteen (waterbouw)	1	ton	3	999	15	€ 17,67	€ 17,67	€ 17,67
Breuksteen (aangepast)	1	ton	3*	999	15	€ 5,96	€ 5,96	€ 5,96
Hergebruikt steen	1	ton	3	999	100	€ 1,65	€ 1,65	€ 1,65
Kraagstuk van rijshout	1	m ²	3	25	100	€ 0,43	€ 0,65	€ 0,86
Polypropyleenvlies gewapend	1	m ²	3	50	50	€ 0,65	€ 0,97	€ 1,30
Grond (per schip) - vrijkomend	1	m ³	3	999	75	€ 0,49	€ 0,49	€ 0,49
Azobé Damwand, standaard dikte 50 mm	1	m ²	2	30	50 ⁵	€ 0,32	€ 0,48	€ 0,64
Stalen Damwand	1	ton	3	50	50	€ 107,29	€ 160,94	€ 214,58

*Aangepast op basis van DuboCalc categorie 3 item; Breuksteen (waterbouw).

Toelichtingen:

- In deze studie is voor stortsteen het DuboCalc-item 'Breuksteen (aangepast)' gebruikt. Met betrekking tot de MKI-impact van materiaalkeuze wordt deze vergeleken met het DuboCalc-item 'Hergebruikt steen'.

⁴ Data-categorie 3 betreft ongeverifieerde data. Volgens de SBK Bepalingsmethode wordt hier een MKI toeslag van 30% op gerekend.

⁵ In DuboCalc is de transportafstand van Azobé damwanden niet zichtbaar. Aangenomen is dat de transportafstand vergelijkbaar is met stalen damwanden. Dit betreft niet de transportafstand van de houtkap naar de fabriek c.q. productielocatie, maar van de fabriek naar het werk.

- Het kraagstuk van rijshout wordt alleen gebruikt in de talud variant voor het geotextiel-doeke wat onder water ligt. Voor dit materiaal is het DuboCalc-item: 'Polypropyleenvlies gewapend' is gebruikt.
- De MKI van de te ontgraven grond bij zowel de talud als hybride variant wordt berekend aan de hand van het DuboCalc-item 'Grond (per schip) vrijkomend'.
- De referentieberekeningen van de damwand en hybride gaan uit van een stalen variant. Met betrekking tot de MKI-impact van materiaalkeuze wordt de 'Stalen damwand' ingeruild voor de 'Azobé damwand' van hout. In hoofdstuk 4 worden de verschillende type materiaalsoorten verder onderzocht.

2.3.3 Beheer en onderhoud damwandconstructie

De onderhoudsstrategie is gericht op functiebehoud:

- Geen hinder voor scheepvaart of doorstroming als gevolg van falen;
- Geen onveilige situaties voor mens of omgeving;
- Geen aantasting van de geleidende werking (voor scheepvaart in het kanaal);
- Geen aantasting van de eventueel waterveiligheid (overstroming), en
- Bij voorkeur gericht op minimale LCC-kosten.

Dit betekent correctief onderhoud voordat de functie ernstig wordt aangetast, rekening houdend met het gebruik van het kanaal c.q. de kantvoorziening en de toestand van de damwand. De inspectie-intervallen moeten hierop worden ingericht. De afkeuringsgrenzen bepalen het moment van ingrijpen. De aard van de ingreep wordt mede op economische grondslagen genomen (de maatschappelijke baten moeten hoger zijn dan de herstelkosten en de gevolgschades. Vooralsnog worden hier aannames voor gedaan.

De aannames is verder dat de functie gedurende de levensduur niet wijzigt. Dit betekent bijvoorbeeld geen maaiveldophoging of ander boven belastingen, kanaalverdieping of -verbredingen. De kosten voor aanvaringen worden niet meegerekend. Deze worden verondersteld te worden verhaald op de veroorzaker of de verzekering.

Tabel 5: Uitgangspunten Beheer en Onderhoud

Onderwerp	Uitgangspunt	Toelichting	Prijs
Bijstort en profileren talud	1x 10 jaar	10% bijstort elke 10 jaar	
Schouw (globaal visueel)	1x per jaar	Aanname: inspecteur doet 300m per uur	0,5 €/m1
Inspectie (loding, diktemeting)	1x per 4 jaar	Aanname: inspecteur doet 100m per uur (steekproeven op damwand + lodingen met schip)	4 €/m
Herstel verzakkingen achter de damwanden (na uitspoeling agv lekkende sloten of corrosiegaten)	1x per 10 jaar (met start jaar +20)	Aanname vanaf jaar 20-50: elke 10 jaar 5% v.d. lengte 1m ³ /m1 a 30 euro; jaar 50-75 elke 5 jaar 10%; jaar 75-100 elke 3 jaar 15%	130 €/m1
Herstel gaten in de damwand door injectie en/of oplassen van staal		Aanname vanaf jaar 20-50: elke 10jaar 5% v.d. lengte groutinjectie 0,2m ³ /m1 à 500 euro; jaar 50-75 elke 5 jaar 10%; jaar 75-100 elke 3 jaar 15%	
Herstel aanvaringen	Buiten beschouwing	-	-
Herstel uitschuring (schoef/stroming) door het lokaal herstellen van de bodem (aanvulling)	1x per 10 jaar	5% van de lengte 2m ³ /m1 *25	€ 50/m1
Herstel ankers (vervanging mits toegepast)	N.v.t.	-	-
Herstel wrijfgordingen (vervanging, mits toegepast)	N.v.t.	-	-



Toepassen van coating (m.b.v. droogzet kuip)	N.v.t.	-	-
--	--------	---	---

2.4 Herberekening

Een herberekening is noodzakelijk wanneer veranderingen of verbeteringen hebben plaatsgevonden in de methodologie, emissiefactoren of data die een significante impact hebben op de uitkomst. Het DuboCalc-item 'Breuksteen (waterbouw)' bevat een significante fout en daarom zijn de analyses opnieuw uitgevoerd en gerapporteerd. In deze paragraaf volgt een korte toelichting waarom de herberekening noodzakelijk was.

Onderstaande Figuur 5 is een print screen uit DuboCalc die laat zien dat 98,5% van de MKI-waarde voor rekening komt van 'Breuksteen (gemiddeld)'. Dit betreft alle milieu-impact van de winning tot en met het transport naar de leverancier (distributeur) in Nederland (LCA-modules A1 t/m A3). De overige 1,5% bestaat uit het transport vanaf de leverancier in Nederland naar het werk (standaard: 15 km, module A4) en het materieelgebruik (A5). Deze twee overige modules zijn daarmee significant.

Figuur 5: Bijdragen van materialen en processen aan de MKI-waarde van het DuboCalc item Breuksteen.

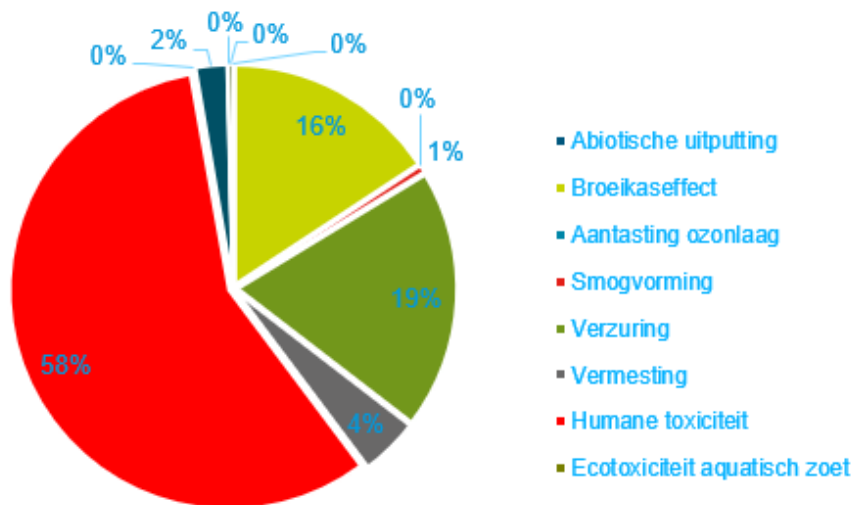
	Type	Naam	Hoeveelheid	Eenheid	Fase	MKI	CO2	Bijdrage %
∨		Breuksteen (gemiddeld)	0,9999999	ton	Bouw (A1-A5)	12,92	39,87	98,50
∨		Transport bulk (over water)	1	tonkm	Bouw (A1-A5)	0,09	0,05	0,66
∨		Werkvlet 360-590 kW	0,00357000	h	EindeLevensduur (C1-C4)	0,05	0,50	0,40
∨		Graafmachine (gemiddeld)	0,00357000	h	Bouw (A1-A5)	0,03	0,16	0,22
∨		Graafmachine (gemiddeld)	0,00357000	h	EindeLevensduur (C1-C4)	0,03	0,16	0,22
∨		Ponton (gemiddeld)	0,00357000	h	EindeLevensduur (C1-C4)	0	0	0
∨		Ponton (gemiddeld)	0,00357000	h	Bouw (A1-A5)	0	0	0

Toelichting:

- "Breuksteen" betreft LCA modules A1-A3 (producent) en maakt 98,5% uit van de MKI-waarde
- "Transport bulk" betreft LCA module A4 en maakt 0,66% uit van de MKI-waarde
- "Graafmachine" en "Ponton" in fase "Bouw" betreffen LCA module A5

Opvallend is dat bijdrage van 'Breuksteen (gemiddeld)' maar liefst 98,5% is. Dit is voor ons reden geweest om de het item 'Breuksteen (gemiddeld)' te analyseren. Uit deze analyse blijkt dat de humane toxiciteit dominant is in de productie van Breuksteen. In Figuur 6 is inzichtelijk gemaakt wat de bijdrage van verschillende milieueffecten is aan de productie van 'Breuksteen (gemiddeld)'. Opvallend is de zware bijdrage van 58% van humane toxiciteit. Dit milieueffect betreft menselijke blootstelling aan schadelijke stoffen, zoals giftige stoffen en fijnstof. Het is met de beschikbare gegevens niet mogelijk inzicht te krijgen op welke afzonderlijke processen in de productie van breuksteen dit type emissies veroorzaken. Het is daarmee aannemelijk dat de fout zich bevindt in het milieueffect van humane toxiciteit.

Figuur 6: Percentuele bijdragen van verschillende milieueffecten aan de MKI-waarde van de productie van 'Breuksteen (gemiddeld)'.



Om zeker te zijn dat het om een fout gaat is RWS gevraagd of zij deze analyse herkennen. RWS GPO geeft aan dat de fout in de MKI-waarde komt door een factor 1000 in de stof emissies. Deze fout is in de NMD al in 2016 gecorrigeerd, maar is blijkbaar nog niet zichtbaar in DuboCalc. Op basis van inschrijvingen, kennis bij brancheorganisaties en een leverancier ligt naar verwachting van RWS de minimale MKI-waarde rond de €3,50. Het gemiddelde ligt daarmee zeer waarschijnlijk hoger.

Aangepaste MKI-waarde breuksteen

RWS geeft aan dat in het DuboCalc-item: 'Breuksteen (waterbouw)' een significante fout bevat. De MKI-waarde van breuksteen is daarom aangepast. Hierbij is de A1-A3 MKI-waarden van 'Breuksteen (gemiddeld)' aangepast op basis van het ecoinvent-proces: 1 ton 0171-fab&Breuksteen, waterbouwsteen (NVLB: A1) (of project BAM database NMD - SBK versie 3.0 (ecoinvent3.4) DEC18). De overige processen in het DuboCalc-item blijven ongewijzigd. Dit resulteert in een aangepaste waarde van **MKI€ 5,96**.

Om tot een eerlijk vergelijk te komen zijn alle analyses opnieuw uitgevoerd en gerapporteerd. Uitsluitend in paragraaf 4.1 is een vergelijk gemaakt tussen MKI-waarden uit DuboCalc en de aangepaste MKI-waarde voor Breuksteen. **Let op: de DuboCalc MKI-waarde bevat een significante fout en wordt daarom niet op andere plaatsen in de rapportage gebruikt.**

3 Resultaten LCA

De levenscyclusanalyse wordt berekend aan de hand van MKI-waarden per ton of andere eenheid uit DuboCalc. DuboCalc is een methode om de milieueffecten van een grond-, weg-, en waterbouw werk te bepalen. De MKI is een single score eenheid voor alle effecten van het materiaal- en energieverbruik van wieg tot graf, ofwel van winning tot aan de sloop- en hergebruikfase. Als resultaat worden de effecten uitgedrukt in euro's, de MKI. Hierbij geldt: hoe lager de MKI-waarden, hoe duurzamer een product. In de berekening worden daarbij *alle* relevante milieueffecten gedurende de totale levensloop meegenomen.

De methode is gebaseerd op de rekenmethodiek van Levenscyclusanalyse (LCA) gespecificeerd in de SBK Bepalingsmethode Milieuprestatie Gebouwen en GWW-werken, versie 2 (2014 inclusief wijzigingsblad)⁶. Door elf milieueffecten⁷ om te rekenen naar schaduw prijzen is het vergelijk van functionele eenheden mogelijk. De functionele eenheid in deze studie is een strekkende meter oeverbeschoeiing. De hoeveelheden die aan deze functionele eenheid toebehoren zijn bepaald aan de hand van aannames met betrekking tot profielen, varianten en dimensies, zoals in hoofdstuk 2 beschreven.

De resultaten van de LCA worden eerst beschreven per profiel (§3.1). In paragraaf 3.2 volgen de zwaartepunt- en gevoeligheidsanalyses om de invloed van afzonderlijke materialen te bepalen. In paragraaf 3.3 wordt ook de gevoeligheidsanalyse van levensduur damwanden en gewicht stortsteen geanalyseerd. In hoofdstuk 4 wordt vervolgens de invloed van verschillende (duurzame) materiaalsoorten op de MKI-waarden inzichtelijk gemaakt.

3.1 Uitkomsten

De uitkomsten van de profielen zijn geanalyseerd aan de hand van tabellen (Tabellen 6 en 7) en grafieken (Figuur 7 en 8). De middelste lijn (met een x) geeft de MKI-waarde weer op basis van de gemiddelde waarden. De bovenkant van de box representeert de bovengrens waarden en de onderkant van de box de ondergrens waarden.

Voor alle profielen scoort de taludoever het beste. Opvallend is dat de onderwaarde van de damwand hoger is dan de gemiddelde waarde van de taludoplossing. Dus alleen in het geval de dimensionering van de taludoevers uitkomt op de bovenwaarden is het mogelijk dat de verticale oplossing beter scoort. De kans hierop is klein, omdat een groot aantal dimensies, zoals vrijboord en waterkerende hoogte, voor beide ontwerpen gelijk zal zijn. Belangrijke aannames hierbij zijn dat er in de verschillende invoerwaarden geen variatie in gewicht stortsteen is meegenomen. Verder zijn verschillende (duurzamere) materialen hierin nog niet meegenomen, deze volgen in hoofdstuk 4.

De MKI-waarden van de hybride oplossingen liggen het dichtst bij de verticale oplossing. Dit komt omdat de hybride variant een relatief klein talud heeft van 0,5 tot 1 meter hoog. De grootste impact bij de hybride zit dan ook in de damwand, die afgezien van de lengte gelijk is aan die van de verticale oplossing.

De hoogte van de vrijboord is verder bepalend voor de impact van de damwand, omdat 0,5 meter extra kerende hoogte een 1,5 meter langere damwand oplevert op basis van de '1:3' vuistregel (1 meter extra kerende hoogte betekent 3 meter extra damwandlengte, onverankerd).

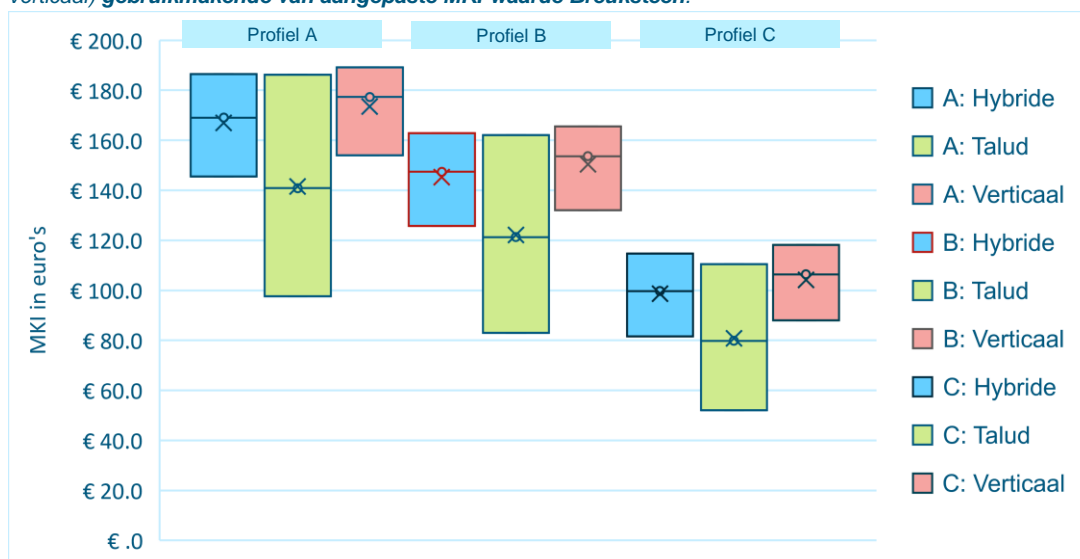
⁶ Sinds 1 januari 2019 is versie 3 de vigerende versie. De gegevens in DuboCalc en de gegevens verkregen uit de markt zijn echter nog berekend op basis van versie 2. Let op dat significante verschillen in MKI-waarden kunnen optreden als gevolg van deze versieupdate.

⁷ **Milieueffecten:** Uitputting abiotisch grondstoffen (exclusief fossiele energiedragers) – ADP, Uitputting fossiele energiedragers – ADP, Klimaatverandering – GWP 100 j., Aantasting ozonlaag – ODP, Fotochemische oxidantvorming – POCP, Verzuring – AP, Vermesting – EP, Humane toxiciteit – http, Zoetwater aquatische ecotoxiciteit – FAETP, Mariene aquatische ecotoxiciteit – MAETP, Terrestrische ecotoxiciteit – TETP.

Tabel 6: MKI-waarden voor onder-, gemiddelde en bovenwaarden per profiel en oplossing (aangepaste MKI-waarde Breuksteen).

Profielen	Boven	Gemiddeld	Onder
A: Hybride	€ 186	€ 169	€ 146
A: Talud	€ 186	€ 141	€ 98
A: Verticaal	€ 189	€ 177	€ 154
B: Hybride	€ 163	€ 147	€ 126
B: Talud	€ 162	€ 121	€ 83
B: Verticaal	€ 165	€ 154	€ 132
C: Hybride	€ 115	€ 100	€ 82
C: Talud	€ 111	€ 80	€ 52
C: Verticaal	€ 118	€ 106	€ 88

Figuur 7: Spreiding van MKI-waarden voor onder-, gemiddelde en bovenwaarden per profiel (A,B,C) en oplossing (hybride, talud, verticaal) gebruikmakende van aangepaste MKI-waarde Breuksteen.



De MKI-waarden van profiel C zijn het laagst. Door de grotere breedte en flauwe taludverloop hoeft er voor de taludoever geen grond ontgraven te worden. Wel moet er geotextieldoek, zinkstuk en stortsteen geplaatst worden. Ook de verticale oplossing en hybride scores lager. Omdat de oever ruim naast de vaarweg ligt, is de waterkerende hoogte vastgesteld op 1,5 meter in plaats van 2,5 of 3 meter, respectievelijk in varianten B en A.

De MKI-waarden voor profiel A zijn het hoogst. Dit komt met name doordat de oever van profiel A het minst en/of het steilst oploopt en daarmee de waterkerende hoogte een halve meter hoger ligt dan bij profiel B. Dit resulteert in een hogere damwand en/of een hoger talud.

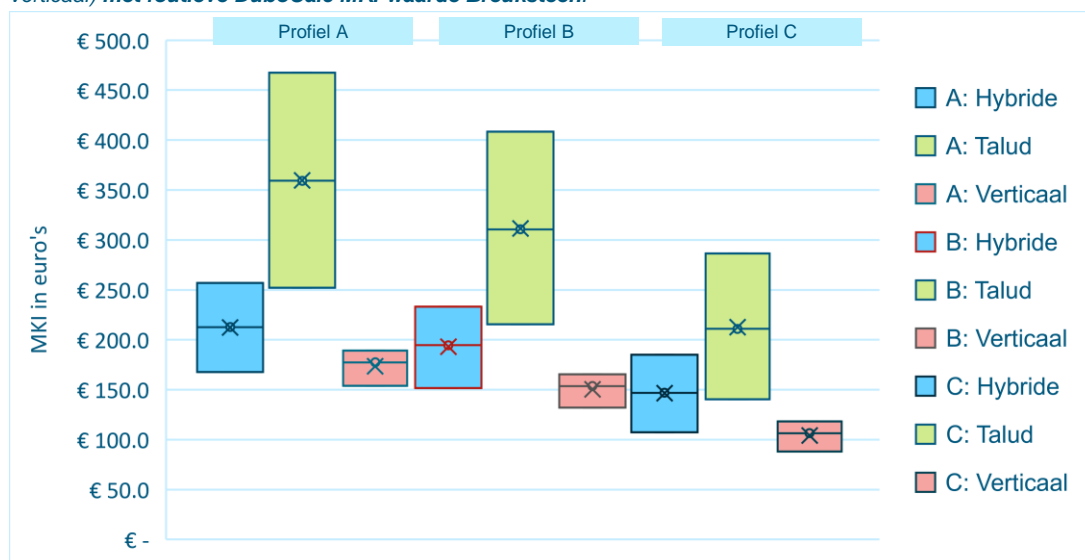
Omgekeerde resultaten met MKI-waarde voor breuksteen uit DuboCalc

In paragraaf 2.4 'Herberekening' is de foutieve MKI-waarde van Breuksteen toegelicht. Deze fout is significant, blijktens de aanvankelijk opgeleverde resultaten welke zijn samengevat in navolgende Tabel 7 en Figuur 8. Deze resultaten geven een omgekeerde uitkomst voor wat betreft de MKI-waarden. De verticale oplossing scoort met gemiddeld **MKI€ 177** het beste. Het talud scoort gemiddeld het slechtst (**MKI€ 359**), gevolgd door de hybride variant (**MKI€ 212**).

Tabel 7: MKI-waarden voor onder-, gemiddelde en bovenwaarden per profiel en oplossing (met foutieve DuboCalc MKI-waarde Breuksteen).

Profielen	Boven	Gemiddeld	Onder
A: Hybride	€ 257	€ 213	€ 168
A: Talud	€ 468	€ 359	€ 252
A: Verticaal	€ 189	€ 177	€ 154
B: Hybride	€ 233	€ 195	€ 152
B: Talud	€ 408	€ 311	€ 215
B: Verticaal	€ 165	€ 154	€ 132
C: Hybride	€ 185	€ 147	€ 107
C: Talud	€ 286	€ 211	€ 140
C: Verticaal	€ 118	€ 106	€ 88

Figuur 8: Spreiding van MKI-waarden voor onder-, gemiddelde en bovenwaarden per profiel (A,B,C) en oplossing (hybride, talud, verticaal) met foutieve DuboCalc MKI-waarde Breuksteen.



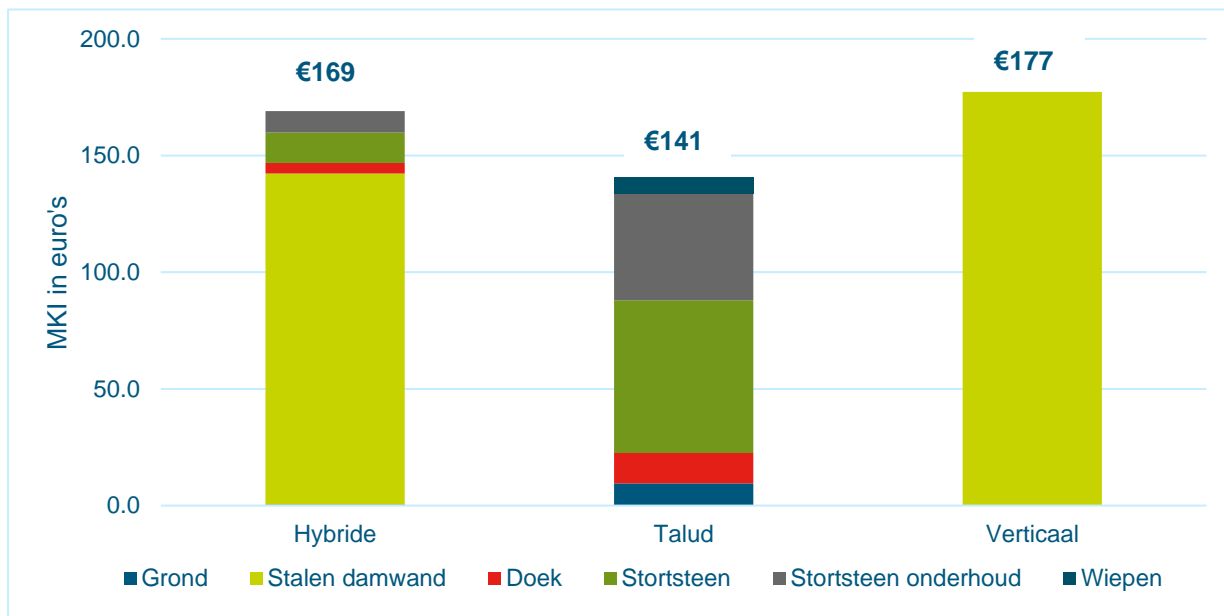
3.2 Zwaartepunten profiel A

In deze paragraaf wordt inzicht gegeven in het aandeel van verschillende componenten aan de totale MKI-waarde van een variant. Dit is gedaan voor de gemiddelde invoerwaarden, omdat de verhoudingen voor de onder-, gemiddelde en bovenwaarden in grote mate overeenkomen.

De impact van de damwand wordt in z'n geheel bepaald door de stalen damwand, omdat er geen andere objecten zijn meegenomen in de berekening. De impact van de hybride variant wordt met name door de stalen damwand bepaald (84%). Het (hybride) talud boven water heeft een kleinere impact van gezamenlijk 16%. Van deze 16 procent wordt 82% bepaald door het toegepaste stortsteen.

Voor de taludoever veroorzaakt het stortsteen veruit de grootste impact (79%). Door de uitsplitsing van stortsteen in 'Stortsteen' (aanleg) en 'Stortsteen onderhoud' wordt ook zichtbaar dat het onderhoudsinterval (10% per 10 jaar) een belangrijke bijdrage levert, vooral bij de taludoever.

Figuur 9: Zwaartepuntanalyse per principe-oplossing voor profiel A bij gemiddelde invoerwaarden. De belangrijkste onderdelen van de MKI-waarden worden zichtbaar.



Voor Profiel B en C zijn de resultaten vergelijkbaar en leiden niet tot significant andere conclusies. De resultaten en grafieken zijn opgenomen in Bijlage 1.

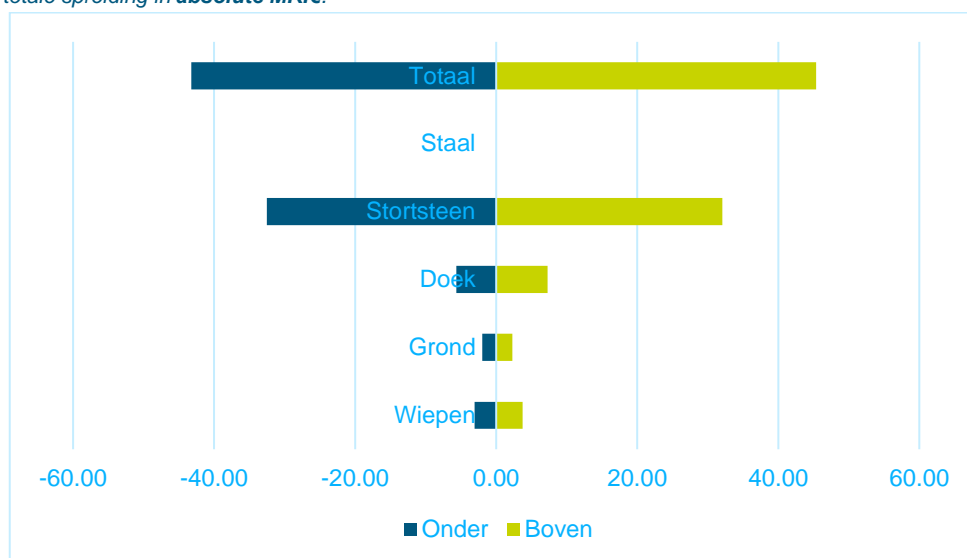
3.3 Gevoeligheidsanalyse

De gevoeligheidsanalyse is per oplossing van profiel A uitgevoerd. De gevoeligheid in beeld gebracht met behulp van tornadodiagrammen. In deze diagrammen is de toe- of afname van de MKI weergegeven ten opzichte van de gemiddelde invoerwaarden.

3.3.1 Taludoever

De spreiding van de taludoplossing is aan weerszijden beide 30%. Net als bij de zwaartepuntanalyse wordt ook uit Figuur 10 duidelijk dat stortsteen (inclusief onderhoud) het object is met de grootste impact op de milieuscore van de taludoever.

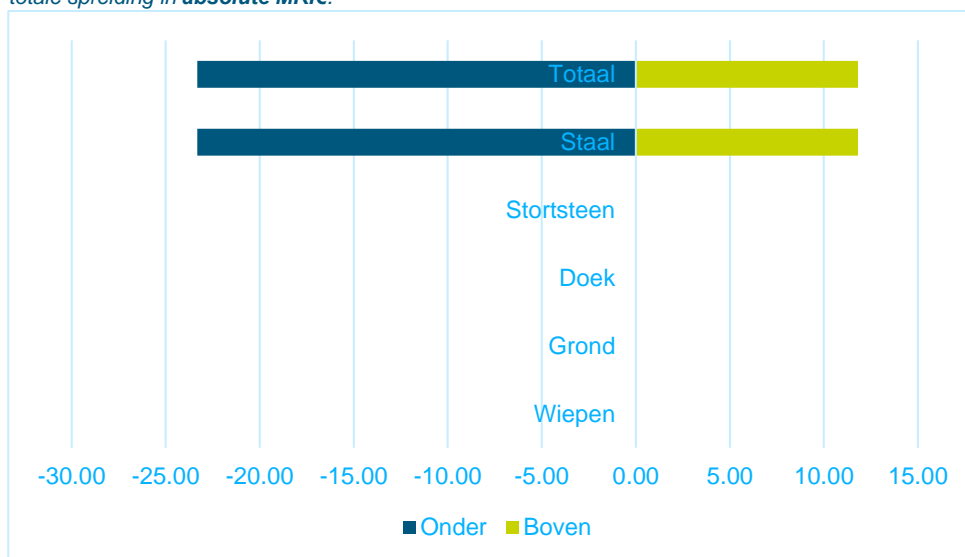
Figuur 10: Gevoeligheidsanalyse van verschillende onderdelen van taludoplossing op profiel A. Spreiding in ten opzichte van de totale spreiding in **absolute MKI€**.



3.3.2 Verticale oeverbescherming

De damwand bestaat slechts uit één object en dat is de stalen damwand. De spreiding van de damwand is groter voor de onderwaarde dan de bovenwaarde. Dit wordt hoofdzakelijk veroorzaakt doordat het gewicht per m² damwand voor de gemiddelde en bovenwaarde gelijk is (zie Tabel 1, p.5). De kerende hoogten voor de gemiddelde en bovenwaarde vallen namelijk in dezelfde range.

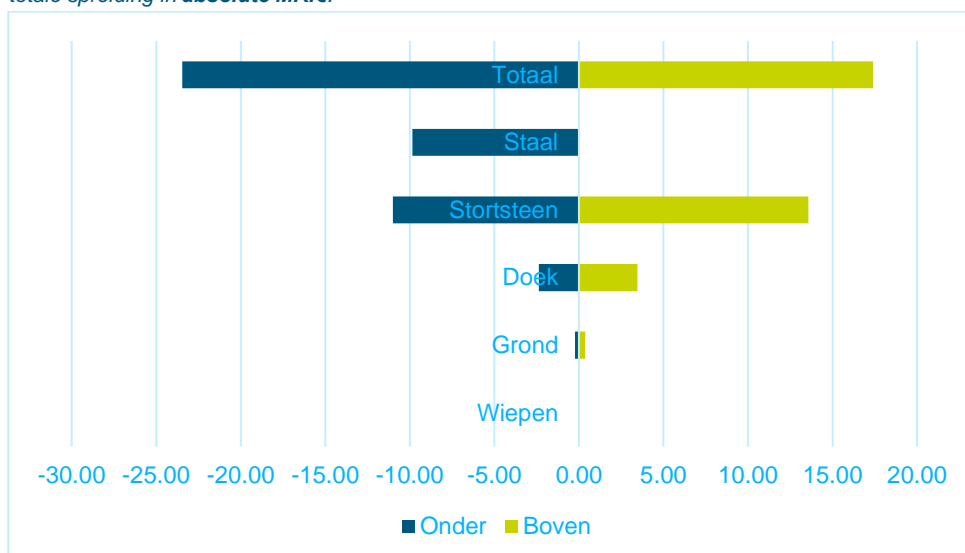
Figuur 11: Gevoeligheidsanalyse van verschillende onderdelen van verticale oplossing op profiel A. Spreiding in ten opzichte van de totale spreiding in **absolute MKI€**.



3.3.3 Hybride

De spreiding voor de hybride oplossing is vrijwel gelijk op de boven- en onderwaarden. De spreiding wordt met name bepaald door de objecten staal en stortsteen. De stalen damwand heeft een grotere spreiding bij de onderwaarde doordat het gewicht per m² damwand voor de gemiddelde en bovenwaarde gelijk is (zie ook Verticale oeverbescherming). Het verschil in spreiding tussen onder- en bovenwaarde wordt voor stortsteen niet bepaald door de variatie in gewicht (alleen 1.000 kg/ m²), maar door de afmetingen (zie Tabel 1, pagina 5).

Figuur 12: Gevoeligheidsanalyse van verschillende onderdelen van hybride oplossing op profiel A. Spreiding in ten opzichte van de totale spreiding in **absolute MKI€**.



Voor Profiel B en C zijn de resultaten vergelijkbaar en leiden niet tot significant andere conclusies. De resultaten en grafieken zijn opgenomen in Bijlage 1.

3.4 Overige gevoeligheden

Uit de zwaartepuntenanalyse komt naar voren dat de damwanden en het stortsteen bepalend zijn voor de uitkomsten van de MKI-berekening. Voor aanvullend inzicht zijn in deze paragraaf de volgende variaties doorgerekend:

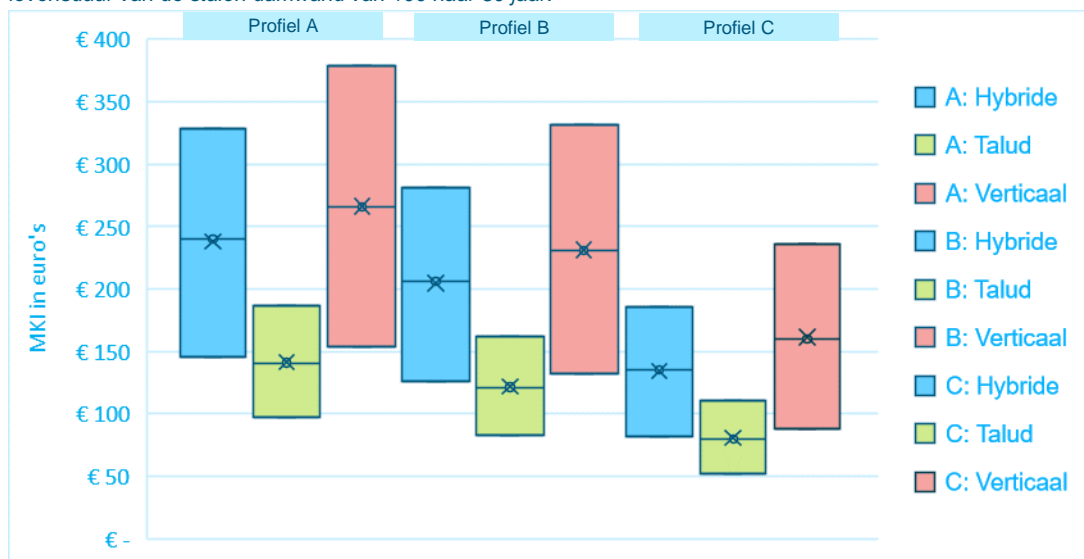
- Levensduur van damwanden van 100 jaar naar 50 jaar, waardoor er extra vervangingen plaatsvinden
- Gewicht stortsteen per m² van 1.000 kg/m² naar 400-600 kg/m² (onder- en bovenwaarde)

De variaties in materiaalsoorten worden staan in hoofdstuk vijf gerapporteerd.

3.4.1 Levensduur damwanden

Voor de levensduur van stalen damwanden in zoet water is 100 jaar gehanteerd conform CUR 166 Damwandconstructies. In de situatie dat de levensduur van dezelfde damwand op 50 jaar uitvalt, moet er over de ontwerplevensduur van 100 jaar een extra vervanging plaatsvinden. Over een ontwerplevensduur van 75 jaar (gemiddelde invoerwaarden) is, conform de MKI-rekenregels van de SBK Bepalingsmethode, gerekend met een halve extra vervanging. In navolgende Figuur 13 is zichtbaar dat de extra vervangingen de totale MKI-waarden van zowel de verticale als de hybride oplossingen doen oprekken. De taludoever oplossing wordt voor de gemiddelden en bovenwaarden nog gunstiger.

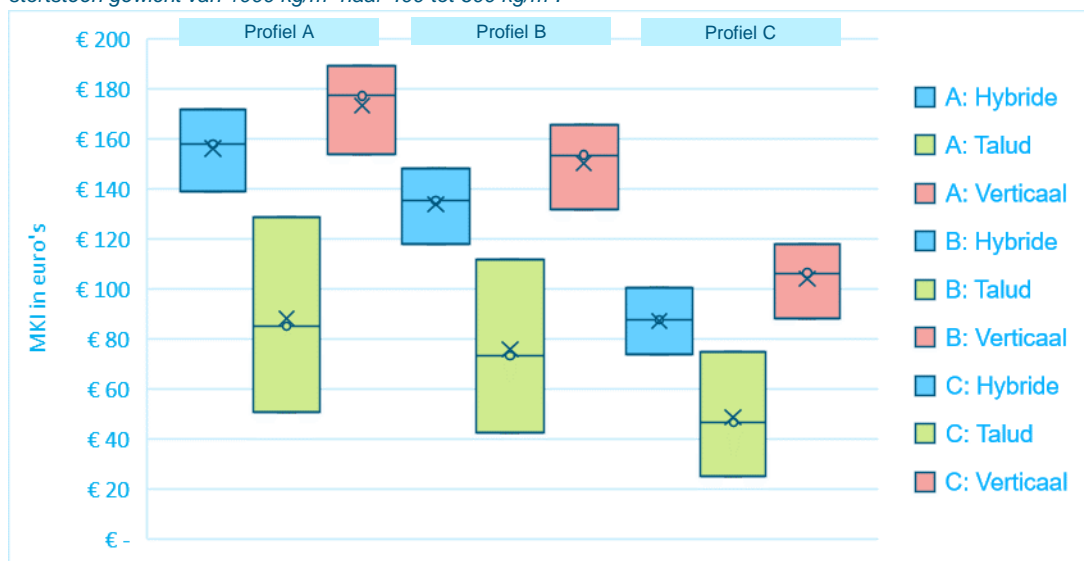
Figuur 13: Spreiding van MKI-waarden voor onder-, gemiddelde en bovenwaarden per profiel en per oplossing bij een aangepaste levensduur van de stalen damwand van 100 naar 50 jaar.



3.4.2 Gewicht stortsteen

Voor het stortsteengewicht per m² is een robuuste aanname van 1.000 kg/m² gehanteerd (zie par. 3.3.1). In Figuur 14 is de impact zichtbaar in de situatie dat het gewicht per m² toch verlaagd kan worden naar 400 tot 600 kg/m². Deze hoeveelheden zijn gebaseerd op informatie van RWS. Het effect van deze kleinere hoeveelheid stortsteen op de totale MKI-waarden is groot. De taludoever is met deze kleinere hoeveelheid namelijk de meest gunstige principe-oplossing bij alle invoerwaarden..

Figuur 14: Spreiding van MKI-waarden voor onder-, gemiddelde en bovenwaarden per profiel en oplossing bij een aangepast stortsteen gewicht van 1000 kg/m² naar 400 tot 600 kg/m².



4 Invloed van materiaalsoort op MKI-waarde

Bij de MKI-berekening is in eerste instantie uitgegaan van conventionele DuboCalc-items. De keuzes en aannames voor het materiaalgebruik kunnen echter een grote impact op de uitkomsten hebben. In dit hoofdstuk zijn meerdere alternatieve (duurzame) materialen geanalyseerd op basis van **profiel A met gemiddeld invoerwaarden**.

Per principe-oplossingen wordt de beschikbaarheid⁸ van alternatieve materiaalsoorten onderzocht en de toepasbaarheid van deze varianten geanalyseerd. De gevoeligheid van de materiaalsoorten wordt per principe-oplossing gerapporteerd.

4.1 Taludoever

De principe-oplossing taludoever bestaat uit de volgende facetten; grondverzet, doek, wiepen, stortsteen en het onderhoud aan het stortsteen (10% per 10 jaar). In hoofdstuk 4 staat vermeld dat stortsteen de grootste impact (79%) heeft in de principe-oplossing van de taludoever. Daarnaast heeft de analyse in paragraaf 3.3.3 al aangetoond dat met hergebruikt stortsteen de MKI met een factor 3 te reduceren is.

Tijdens deze studie is gepoogd aan leveranciersdata ten behoeve van stortsteen te komen. Dit heeft helaas niet tot het gewenste resultaat geleid. Environmental Product Declarations en LCA's van stortsteen volgens de SBK-bepalingmethode blijken niet beschikbaar te zijn. Er is onder andere contact gezocht met De Beijer BV, de grootste stortsteenleverancier in Nederland, echter zij beschikten niet over MKI-waarden. Ook RWS heeft geen beschikking over publiekelijk toegankelijke MKI-waarden van stortsteen.

De gevoeligheidsanalyse op basis van verschillende materiaalsoorten voor de taludoever is niet verder gespecificeerd.

4.2 Verticale oeverbescherming

De principe-oplossing verticale oeverbescherming bestaat enkel uit een damwand. In deze paragraaf worden verschillende materiaalsoorten onderzocht, te weten: staal, hout, gerecycled kunststof en beton. Hierbij wordt zowel gekeken naar de toepasbaarheid van deze varianten als de effecten op de MKI-waarden.

Stalen damwand

Het materiaal staal is reeds als referentie gehanteerd in het voorgaande hoofdstuk. We hebben onderzocht welke MKI-waarden in de markt worden gehanteerd. Hiervoor zijn de MRPI-bladen van ArcelorMittal voor Hot-rolled Sheet Piles (versie 23/11/16) en EcoSheetPiles (versie 28/06/18) genomen. Op basis van de gegeven informatie is echter geen MKI-waarde vast te stellen, omdat niet alle milieueffectcategorieën die nodig zijn voor een MKI-berekening gedeclareerd zijn. De 4 milieueffecten voor toxiciteit ontbreken en de uitputting van fossiele energiedragers is gedeclareerd in MJ in plaats van kg Sb-eq.

Houten damwand

In DuboCalc staan naast de azobé damwand nog twee houten damwandvarianten, te weten: okan en angelim vermelho. Om de gevoeligheid tussen de verschillende houtvarianten te onderzoeken worden alle drie de houtvarianten meegenomen in de gevoeligheidsanalyse.

De toepassing van hout op profiel A is **in de praktijk onrealistisch** gezien de benodigde lengte (onverankerend) van 10,5 tot 12,0 meter. Deze maximale lengte die in de praktijk uitgevoerd wordt in hout is

⁸ Deze studie poogt de gevoeligheden van de verschillende materiaalsoorten te onderzoeken. Hierbij zijn verschillende varianten gespecificeerd op basis van marktinformatie.

10 meter⁹. Bij profiel B en C zijn er meer mogelijkheden voor toepassing van hout (berekende benodigde lengtes zijn respectievelijk: 9-10,5m en 6-7,5m, zie ook Tabel 3, p.6). De uitkomsten voor profiel A representeren ondanks de beperkingen in de lengte wel de impact voor profiel B en C.

Betonnen damwand

Tijdens de studie is de MKI-waarde van Betonfabriek Nigtevecht gebruikt voor de betonnen damwand. Het beton is gemaakt met de betonkwaliteit C45/55 op basis van een CO₂-arm mengsel, dat bekend is als 'groen beton'. De samenstelling hiervan bestaat uit een secundaire grondstof op basis van gerecycled betongranulaat, dat zand en grind deels vervangt met als bindmiddel gemalen hoogovenslak en een minimum aan portlandklinker. De levensduur van de betonnen damwand is 100 jaar.

Ook de toepassing van beton op profiel A is **in de praktijk onrealistisch** gezien de benodigde lengte van 10,5 tot 12,0 meter bij gemiddelde invoerwaarden. Op dit moment is 7 meter de maximum leverbare lengte. Nigtevecht heeft op korte termijn plannen de lengte uit te breiden naar 8 meter, maar dit is nog onvoldoende voor de benodigde lengtes bij profiel A. Net als bij de houten varianten bieden de uitkomsten wel inzichten die gebruikt kunnen worden bij profielen met kleinere damwandlengtes.

Gerecyceld kunststof damwand

DuboCalc beschikt over een aantal categorie 1 items¹⁰ voor kunststof damwanden. Hiervan is slechts één item geschikt voor profiel A, te weten: *ProLock Omega gerecycled pvc-damwand, 3,5m scherm, 6m paal Cloeziana, gording*. De Prolock Omega bestaat uit een hybride systeem van gerecyceld kunststof (pvc) schermen in combinatie met houtenpalen. ProLock stelt dat het hybride systeem ruim twee keer zo lang mee gaat als traditionele oeverbeschermingsystemen, waarmee het een levensduur heeft van 60 jaar.

De maximale kerende hoogte is maximaal 3,5 meter. Deze hoogte is alleen toereikend voor profiel A met een vrijboord van 0,5 meter. Bij hogere vrijboorden wordt de 3,5 meter overschreden. In profiel B en C zijn er meer mogelijkheden voor toepassing. Daarnaast moet onderzocht worden of de opgegeven paallengte van 6 meter constructief voldoende is voor de situaties aan de HLD.

Bij profiel A is (onverankerd) een damwandlengte nodig van 10,5 tot 12 meter, aangezien Prolock deze niet kan leveren zijn we doorverwezen naar Sheet Piling Solutions B.V. (SPS). De pvc-damwanden van SPS kunnen wel met de benodigde lengte geleverd worden, echter ontbreekt een MKI-berekening van het product. Op basis van de gekregen informatie is geen MKI-waarde vast te stellen, omdat niet alle milieueffectcategorieën die nodig zijn voor een MKI-berekening gedeclareerd zijn en het om een cradle-to-gate LCA gaat.

4.3 Hybride

Aangezien de hybride principe-oplossing een combinatie van een taludoever en de verticale oeverbescherming is, is de informatie gedeeld in paragrafen 4.1 en 4.2 ook van toepassing op de hybride principe-oplossing. Aangezien de lengte van de damwanden bij profiel A op 9 meter is vastgesteld zijn de houtvarianten en het Prolock systeem in combinatie met een talud in de **praktijk wel realistisch**. De maximale lengte voor de houtvarianten is 10 meter waarmee het voldoet aan de gewenste lengte van 9 meter. De lengte van het Prolock systeem is 9,5 meter en voldoet daarmee ook de gewenste lengte. Alléén de betonnen damwand is ook voor de hybride oplossing in de **praktijk niet realistisch**.

Voor de hybride principe-oplossing zijn de volgende materiaalsoorten onderzocht:

- Houten damwand met stortsteen;

⁹ <https://www.vanswaay.nl/files/Afbeeldingen/productblad-h2h.pdf>

¹⁰ Categorie 1 betekent dat de data afkomstig is van individuele producenten en voldoet aan de eisen van de SBK.

- Betonnen damwand met stortsteen;
- Gerecyceld kunststof damwand met stortsteen.

4.4 MKI-waarden per materiaalsoort per principe-oplossing

De volgende materiaalkeuzes met bijbehorende MKI-waarden zijn gehanteerd voor de MKI-berekeningen. In Tabel 8 is een overzicht van MKI-waarden per vierkante meter weergegeven.

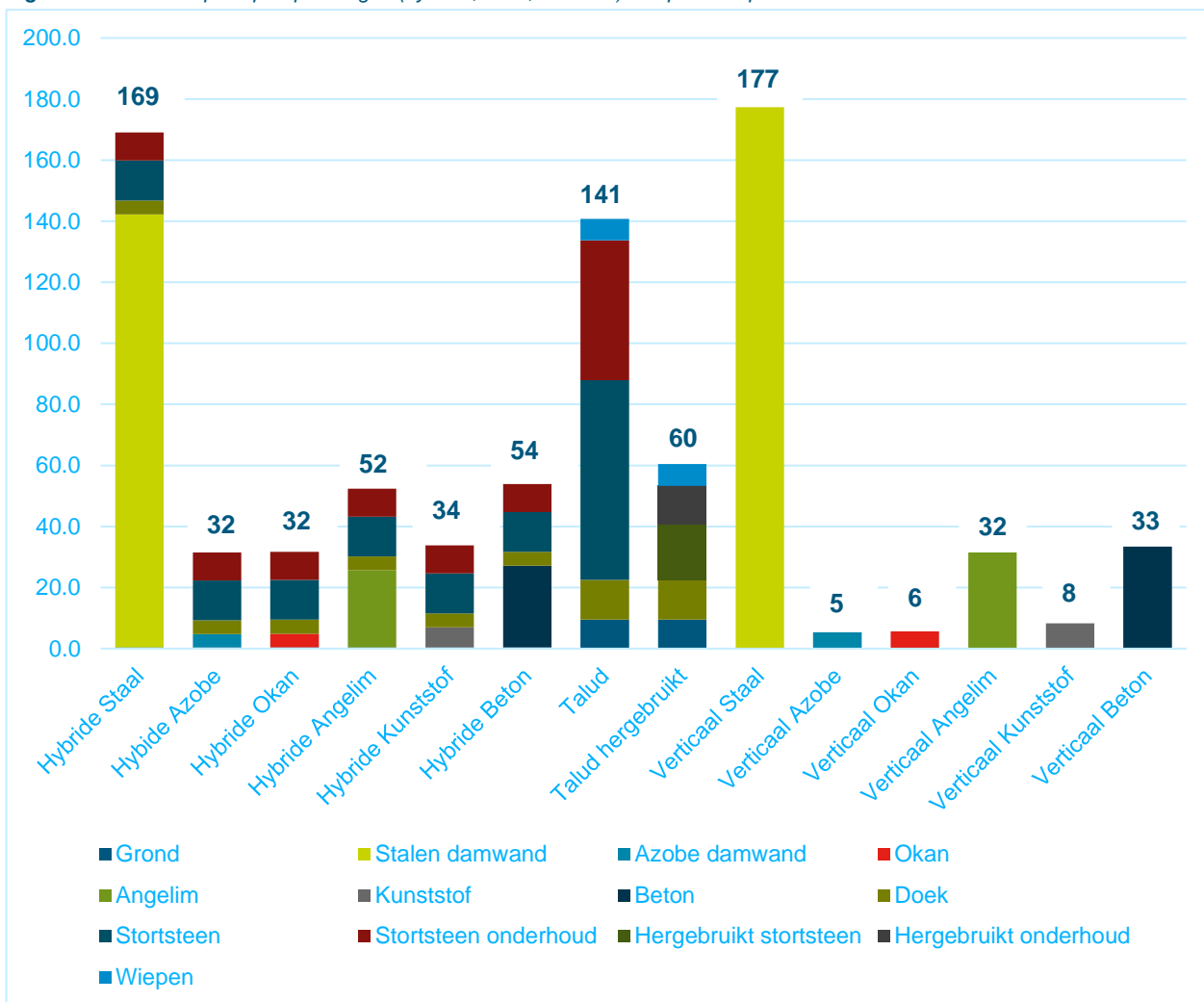
Tabel 8: Overzicht MKI-waarden van verschillende damwandmaterialen .

Materiaalsoort	Hoeveelheid	Eenheid	Levensduur (in jaren)	50	75	100
Staal *	1	m ²	100	€ 14,67	€ 15,76	€ 15,76
Azobé	1	m ²	30	€ 0,32	€ 0,48	€ 0,63
Angelim vermelho	1	m ²	30	€ 1,87	€ 2,80	€ 3,73
Okan	1	m ²	30	€ 0,33	€ 0,50	€ 0,67
ProLock Omega gerecyceld PVC	1	m ²	60	€ 1,76	€ 2,20	€ 2,93
Beton	1	m ²	100	€ 2,97	€ 2,97	€ 2,97

*Stalen damwand is per m² op basis van gewichten vermeld in paragraaf 3.3.

De MKI-waarden uit **Tabel 8** zijn toegepast op de linkerzijde van profiel A met gemiddelde invoerwaarden. De analyse met verschillende materiaalsoorten voor de resulteert in MKI-waarden per strekkende meter weergegeven in Figuur 15.

Figuur 15: Overzicht principe-oplossingen (hybride, talud, verticaal) van profiel A per materiaalsoort.



In **Figuur 155** is te zien dat van alle principe-oplossingen met verschillende materiaalsoorten **de verticale oplossing in azobé** het beste scoort met een MKI-waarde van € 5,40. De slechtste variant is tevens de verticale oplossing in staal, berekend met gegevens uit DuboCalc (niet de markt). Met een MKI-waarde van € 177 is dit een factor 32 verschil.

Tevens is opvallend dat de verticale oplossing met alle materiaalsoorten behalve staal uit DuboCalc beter scoort dan het talud met hergebruikt stortsteen. Dit demonstreert het belang van de materiaalsoort op het meest milieuvriendelijkste alternatief.

Verder is de impact van de toepassing van hergebruikt in plaats van nieuw stortsteen ook opvallend. Hergebruik reduceert de MKI van een taludoever met factor 2,4.

Wel moet in acht genomen worden dat niet de materiaalsoorten hout, beton en kunststof vanwege de vereiste lengte niet altijd toepasbaar zijn op het profiel van HLD. Deze resultaten laten daarom slechts het theoretische potentieel zien van het gebruik van duurzame materialen. In de praktijk is het situatie afhankelijk welke varianten daadwerkelijk toepasbaar zijn, bijvoorbeeld door middel van het gebruik van verankering in plaats van onverankerde damwanden, zoals in deze studie is berekend.

5 Resultaten LCC

5.1 Uitkomst

De LCC-berekening is opgebouwd volgens de SSK-methodiek. De bedragen zijn contant gemaakt met een discontovoet van 3%. De bedragen zijn exclusief bijkomende kosten, zoals de aankoop van gronden, het verleggen van kabels en leidingen, etc.

5.1.1 Deterministische berekening

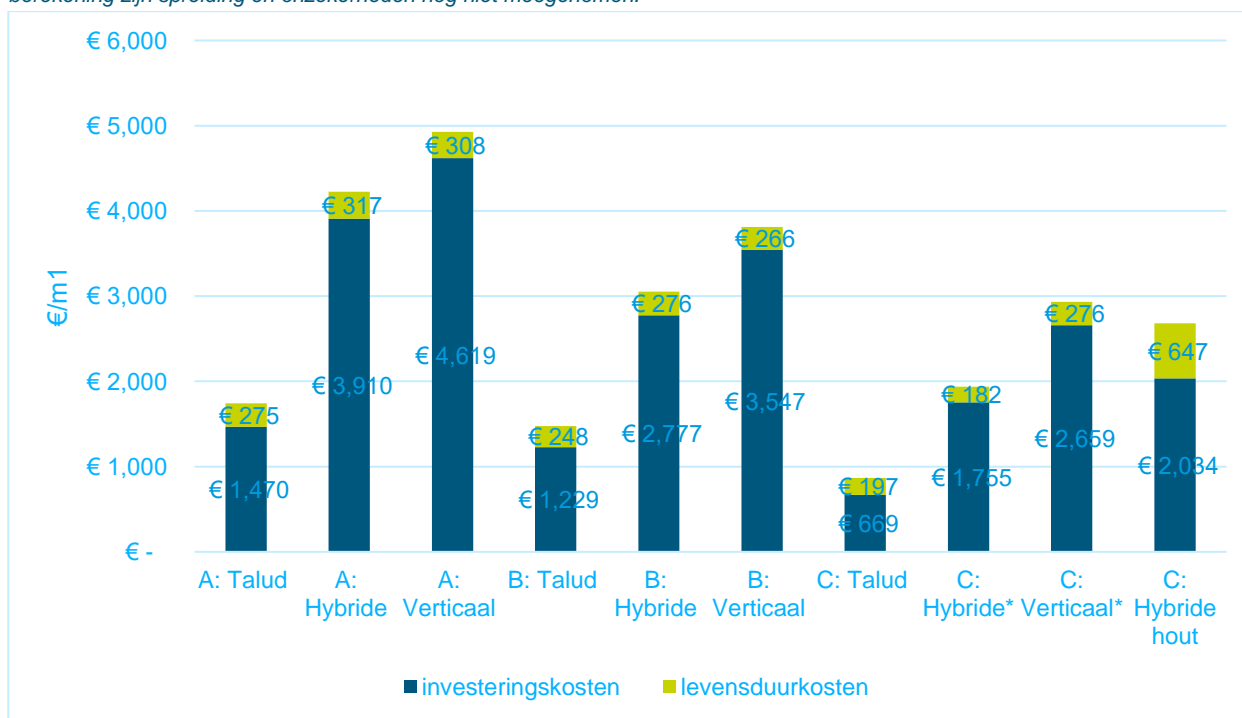
In Figuur 16 zijn de investerings- en levensduurkosten weergegeven per strekkende meter. Deze kosten zijn berekend zonder scheefte en BTW en op basis van de gemiddelde invoerwaarden. De aankoop van gronden is niet meegenomen, omdat de benodigde gronden voor het talud binnen gronden in beheer van RWS vallen (zie profielen A t/m C in par. 0).

Voor alle profielen is de taludoplossing de voordeligste oplossing. De verschillen bedragen respectievelijk een factor 2,5 tot 3 ten opzichte van de hybride en de verticale oplossing. De investeringskosten zijn in alle gevallen veruit de grootste kosten (83 tot 93%).

Tevens is naar aanleiding van de MKI-zwaartepunten en gevoeligheden (paragraaf 4.2 en 4.3) de LCC berekend van de hybride oplossing van profiel C in Azobé. De uitvoering in hout is duurder, niet alleen vanwege hogere levensduurkosten (kortere levensduur), maar ook vanwege hogere investeringskosten (€675 versus €554, zie Bijlage 2. p.19 en 22).

Gevoeligheden in de hoeveelheid stortsteen en de hoeveelheid stalen damwand (mede als gevolg van de levensduur) zijn meegenomen in de volgende paragraaf.

Figuur 16: Deterministische berekening van investerings- en levensduurkosten per profiel en oplossing. In de deterministische berekening zijn spreiding en onzekerheden nog niet meegenomen.



*De verticale en hybride oplossingen van profiel C zijn voor de LCC niet gemodelleerd, maar uitgerekend op basis van verhoudingen met profiel A en B. Dit is gedaan, omdat deze oplossingen voor profiel C als onrealistisch worden beschouwd. Zie paragraaf 2.2, p.3.

5.1.2 Probabilistische berekening

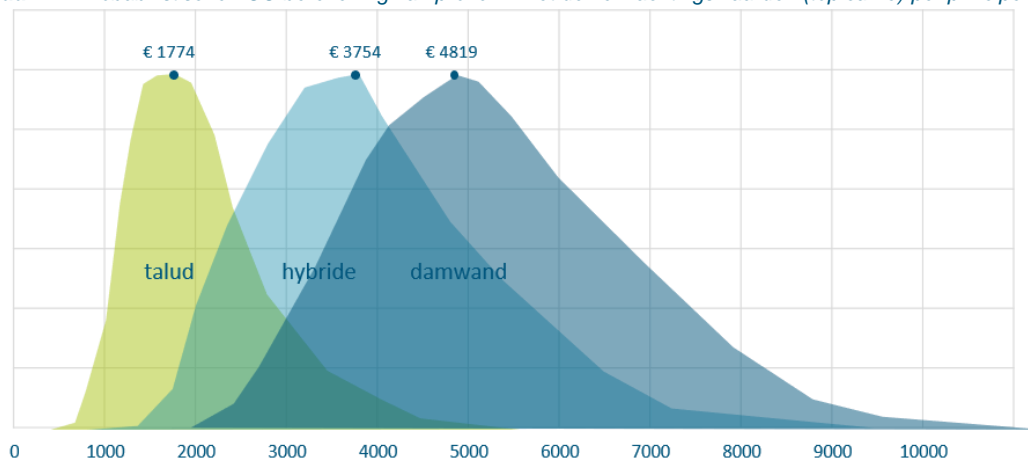
Op basis van exact dezelfde invoerwaarden zijn voor de varianten van profiel B de ramingen voor de talud-, hybride en damwandoplossing probabilistisch doorgerekend op basis van ingeschatte onzekerheden. Om technische redenen¹¹ wordt in de probabilistische uitkomst wel gerekend inclusief scheefte en BTW, in tegenstelling tot de deterministische berekening.

In Figuur 17 zijn de investeringskosten voor deze drie profielen weergegeven (inclusief scheefte en BTW). Om de bedragen te kunnen vergelijken met de cijfers uit de deterministische berekening moet er een opslagfactor voor scheefte en BTW in acht worden genomen. Deze bedraagt 44% voor de de talud-variant en 36% voor de hybride en de verticale oplossing is 36%.

Opvallend is dat de talud-oplossing aanmerkelijk goedkoper is. De overlap met de andere twee oplossingen is klein. De hybride en de damwandoplossing zijn voor een groot deel vergelijkbaar vanwege de damwanden en kennen daarom een en grote overlap.

De verwachtingswaarden (de toppen van de curves) zijn tevens weergegeven. Doorgaans worden er keuzes gemaakt op basis van deze waarden.

Figuur 17: Probabilistische LCC-berekening van profiel B met de verwachtingswaarden (top curve) per principe-oplossing.



De verwachting is dat de andere profielen A en C hetzelfde beeld opleveren qua spreiding van kosten. De toppen van de grafieken zullen lager (profiel C) dan wel hoger (profiel A) liggen, gelijkend op de verschillen in de deterministische berekening.

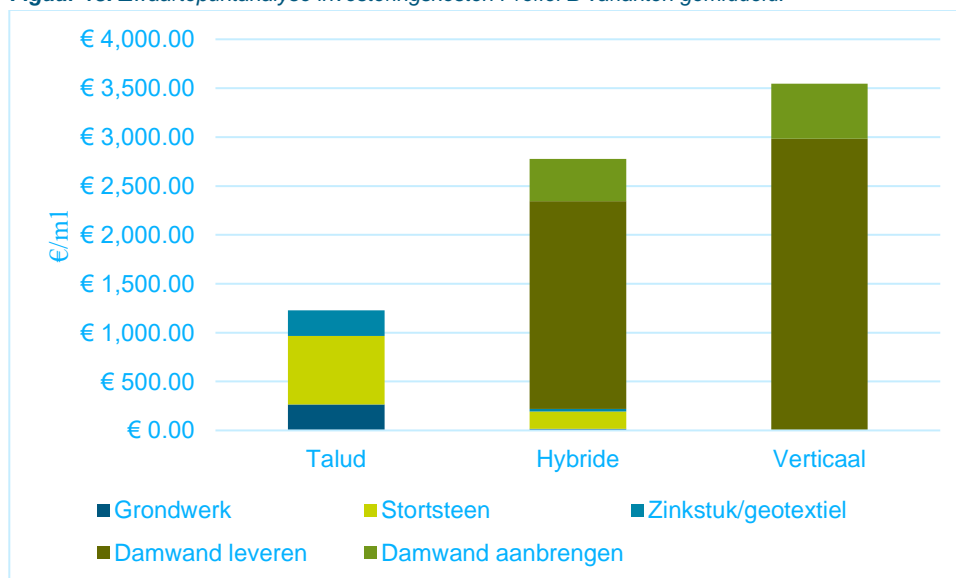
5.2 Zwaartepunten profiel B

In Figuur 18 zijn de zwaartepunten weergegeven van de LCC-berekening van profiel B met gemiddelde invoerwaarden. De zwaartepunten zijn bepaald op basis van de directe kosten en met een opslagfactor vermenigvuldigd om de investeringskosten te verkrijgen. De levensduurkosten zijn niet in deze grafiek meegenomen, maar dit levert geen significant verschil op (zie ook de kleine bijdrage in Figuur 16).

¹¹ Het LCC-rekenmodel rekent standaard met scheefte en BTW. Deze standaard is niet aanpasbaar.

De LCC van de verticale en hybride oplossing worden bepaald door het leveren van de damwanden met respectievelijk 84% en 76 van de totale LCC. De belangrijkste kostenpost van de taludoever is het stortsteen met 57%.

Figuur 18: Zwaartepuntanalyse investeringskosten Profiel B varianten gemiddeld.



5.3 Gevoeligheden profiel B

In deze paragraaf zijn de gevoeligheden van hoeveelheden en kosten per onderdeel inzichtelijk gemaakt voor profiel B in tornadodiagrammen. In de grafieken is de code FM gerelateerd aan de hoeveelheid van de component en FN aan de prijs. De getallen zijn variatiecoëfficiënten uit de LCC-methodiek. Zie Bijlage 3 voor de aannames in de spreiding van de hoeveelheden en de prijzen.

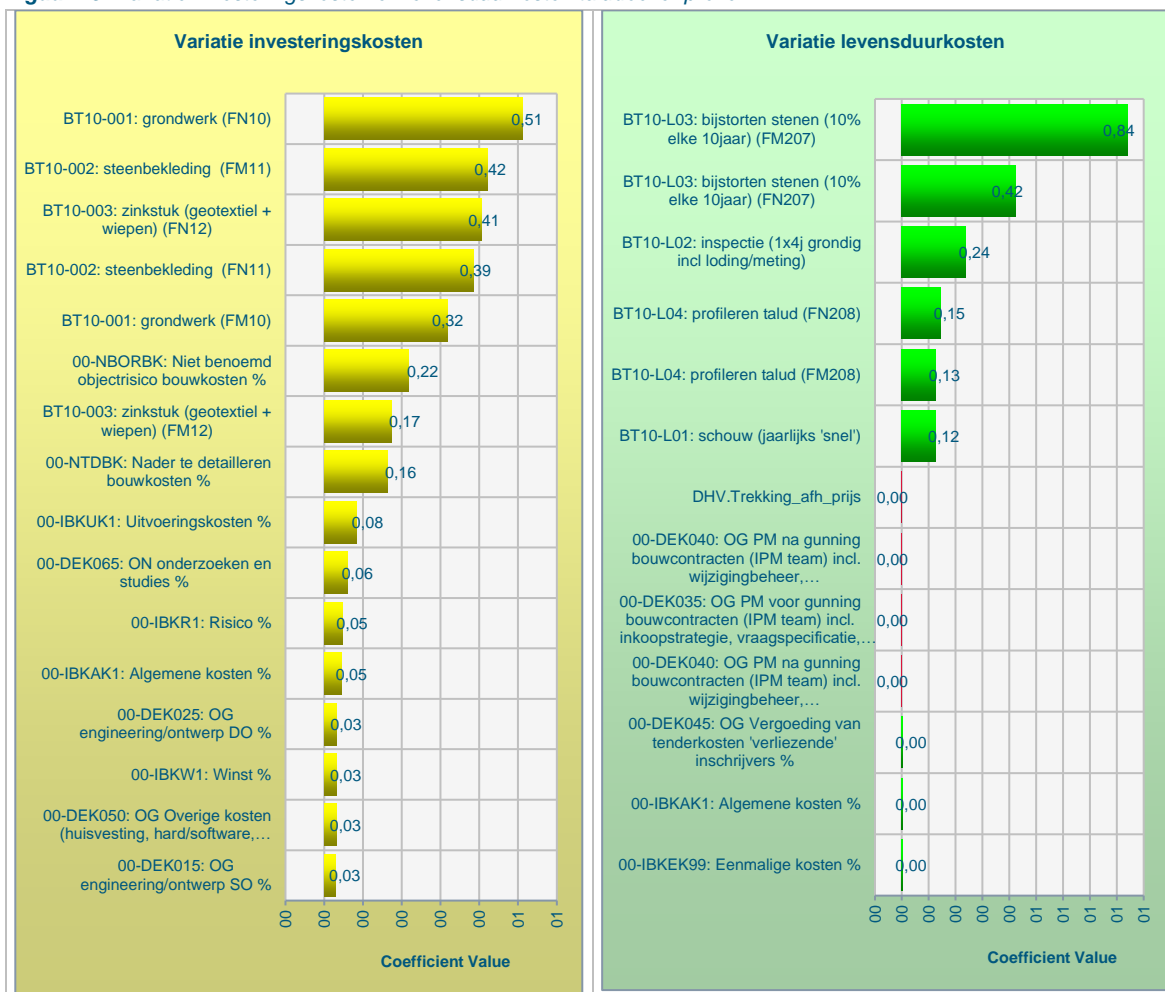
5.3.1 Taludoever

De grootste variatie komt voort uit de investeringskosten van het grondwerk. Deze variatie is ook de grootste variatie op de totale kosten, omdat de investeringskosten veruit het grootste aandeel vormen (zie par. 5.1.1).

Andere belangrijke variaties zijn:

- De prijs en de hoeveelheid stortsteen
- De prijs van het zinkstuk
- De hoeveelheid bijstort van stortstenen

Figuur 19: Variatie investeringskosten en levensduurkosten taludoever profiel B.

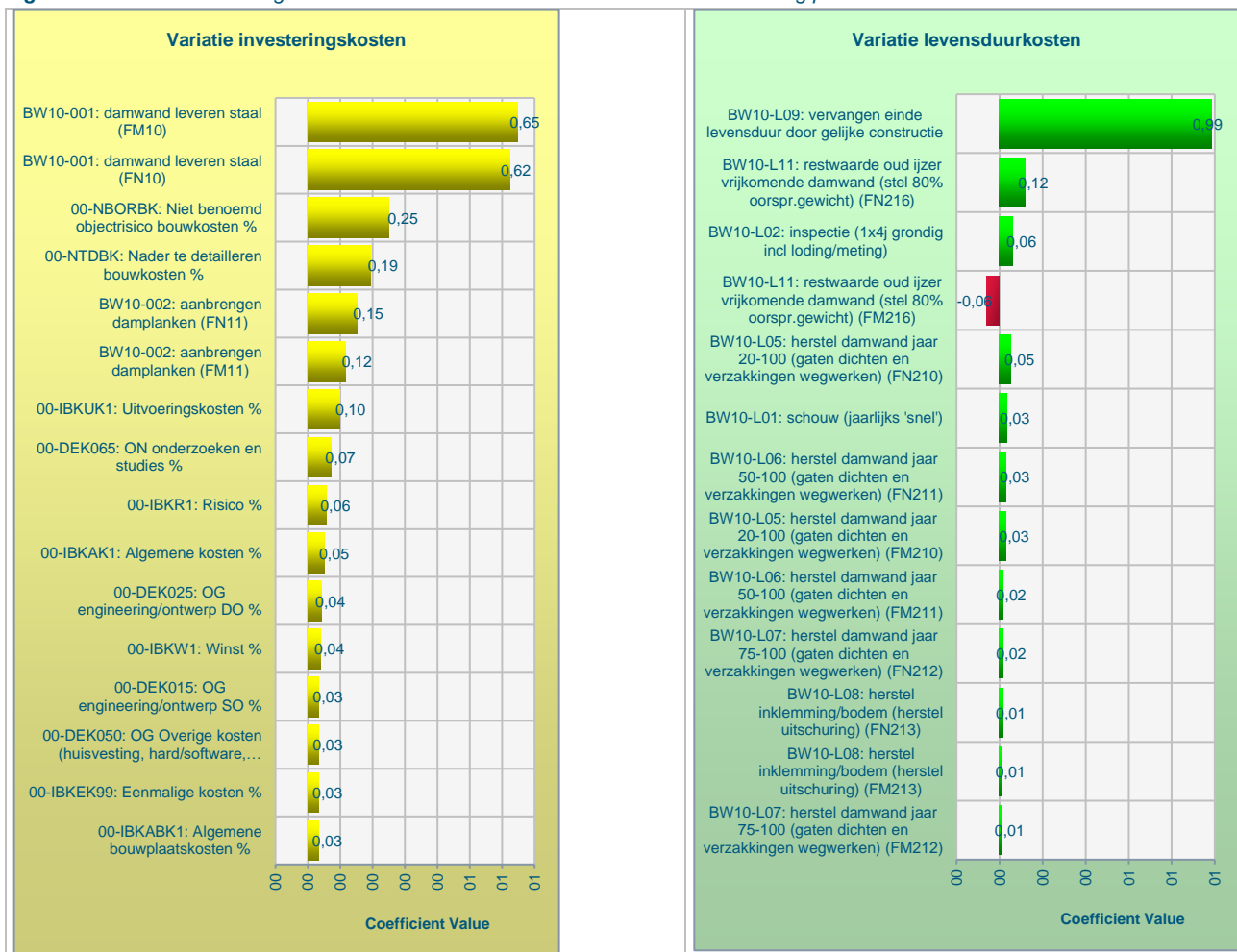


5.3.2 Verticale oeverbescherming

De grootste variatie komt voort uit de investeringskosten van de damwand, zowel de hoeveelheid als de prijs.

De andere belangrijke variaties is de vervanging van de damwandconstructie bij einde levensduur.

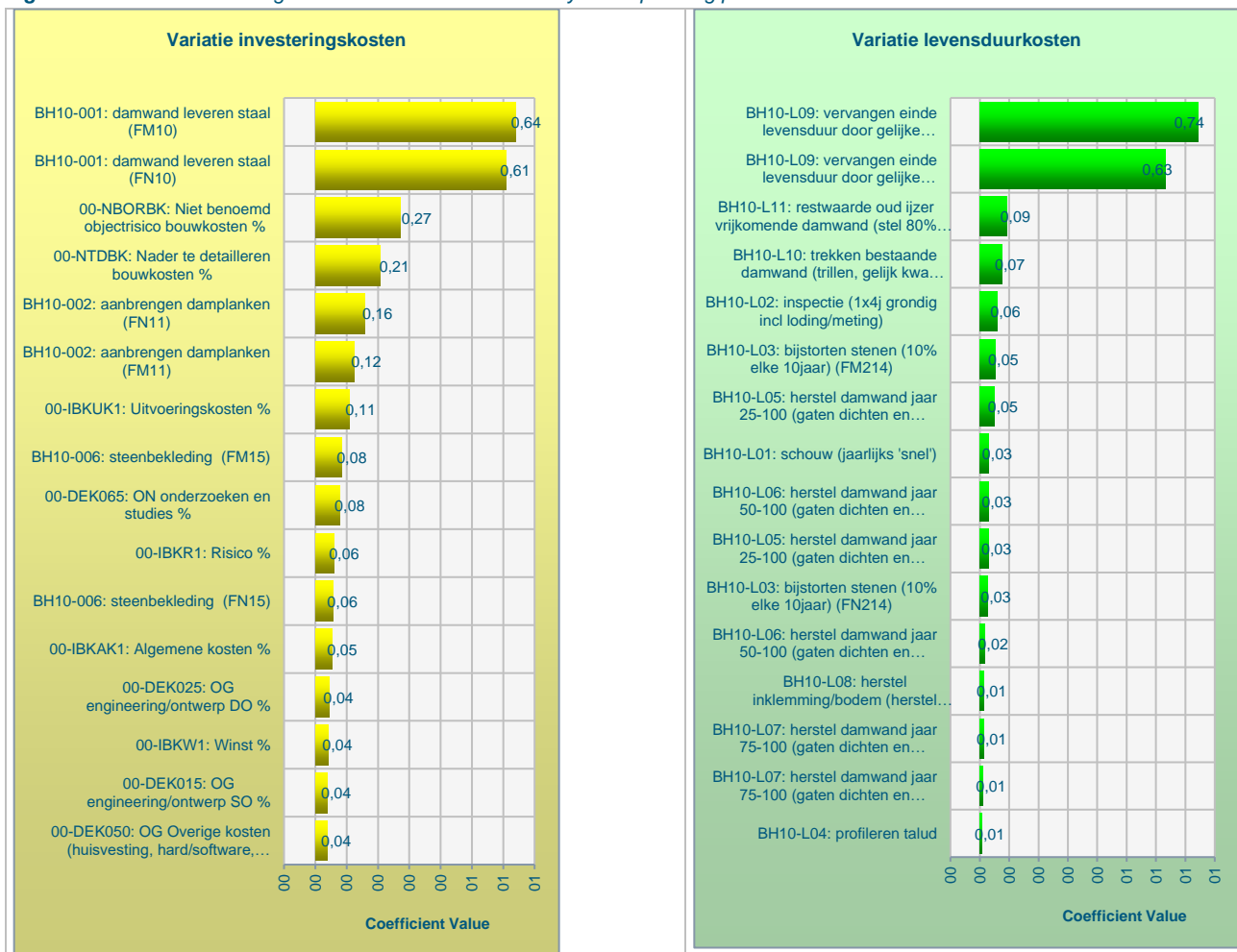
Figuur 20: Variatie investeringskosten en levensduurkosten verticale oeverbescherming profiel B



5.3.3 Hybride

Gelijk aan de verticale oplossing komt de grootste variatie voort uit de investeringskosten van de damwand, zowel de hoeveelheid als de prijs. Eveneens is een andere belangrijke variaties is de vervanging van de damwandconstructie aan de einde levensduur. De hoeveelheid en prijs van het stortsteen vertegenwoordigt weinig variatie, vanwege de beperkte hoeveelheid in het profiel.

Figuur 21: Variatie investeringskosten en levensduurkosten hybride oplossing profiel B



6 Conclusie

Toepassing standaard materialen: taludoever heeft laagste MKI en LCC

De MKI- en LCC-berekeningen laten overeenkomende uitkomsten zien: de taludoever heeft met de toepassing van standaard materialen (stalen damwanden en nieuw stortsteen) de laagste LCC en ook de laagste MKI-waarde.

De MKI-waarde van de stalen damwand is gelijk (bovenwaarden) tot 1,7 keer hoger (onderwaarden) dan de taludoever, afhankelijk van het profiel A, B of C en ingevoerde onder- of bovenwaarden. Het verschil met de hybride is net iets kleiner door het kleine talud boven water (gelijk tot 1,6 keer). De LCC van de taludoever is 2,1 tot 3,4 keer goedkoper.

Prijs en MKI van damwanden stortsteen zijn bepalend

De dominante materialen zijn voor de MKI en LCC gelijk: het stortsteen en de damwanden. Andere belangrijke variatie op de MKI-waarde komt voort uit de levensduur van de damwanden (50%, Figuur 13), de hoeveelheid stortsteen (40%, Figuur 14) en lengte (en gewicht) van de damwanden (15%, onderwaarde gedeeld door gemiddelde,

Figuur 11).

Voor de LCC is de hoeveelheid en de prijs van het leveren van de damwand de meest gevoelige factor voor de verschillen tussen de principe-oplossingen, gevolgd door het grondwerk en het stortsteen.

Aanzienlijke reductie duurzame materialen, maar in de praktijk beperkt toepasbaar

Bij toepassing van hergebruikt stortsteen wordt de MKI gereduceerd met factor 2. Bij de toepassing van Azobé in plaats van staal loopt de MKI-reductie op tot factor 33. Ook het gebruik van andere duurzame materiaalsoorten laten een grote reductie in de MKI-waarden zien. Echter, alle berekende duurzame materialen voor damwanden (hout, kunststof, beton) zijn niet toepasbaar langs (grote delen van) de HLD vanwege de vereiste lengte.

Opmerking: MKI omvat een beperkt aantal duurzaamheidsthema's

De MKI- en LCC-uitkomsten kunnen door RWS gebruikt worden om (per locatie) een integrale afweging te maken. De afweging met criteria zoals ruimtelijke inpassing en natuurwaarde dienen door RWS zelf gemaakt te worden. Ook op het onderdeel duurzaamheid is het van belang dat RWS andere milieuwwaarden meeweegt in een integrale (duurzaamheids-) afweging, zoals natuur en biodiversiteit in het geval van een natuurvriendelijke oever. De MKI-score maakt namelijk alleen milieu-impact als gevolg van emissies en energie- en grondstofgebruik inzichtelijk.

7 Aanbevelingen

Het onderzoek en de berekening van de MKI en LCC in dit rapport heeft geleid tot de volgende aanbevelingen.

1. Scherp belangrijke aannames aan

De principe-oplossing met de laagste MKI-waarde of LCC hangt sterk af van bepaalde invoerwaarden. Scherp de aannames op deze invoerwaarden aan met gegevens van producenten voor een meer gefundeerde beslissing:

- De MKI-waarde per ton van damwanden in verschillende materialen en stortsteen
- De hoeveelheid stortsteen (aanleg en bijstort)

2. Plan van aanpak voor de inkoop van duurzame varianten

Het type materiaal is zeer dominant voor de laagste MKI-waarde (zie **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**, p.**Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.**). Onderzoek alternatieven voor duurzame materialen. Het moet echter wel haalbaar zijn om deze meest duurzame variant te realiseren. Hoewel de LCC van een houten damwand al inzichtelijk is gemaakt (op profiel C), moeten zaken onderzocht worden zoals de verkrijgbaarheid van (innovatieve) producten, technische specificaties, en mogelijke (ongewenste) belemmeringen binnen standaarden voordat een definitieve keuze wordt gemaakt.

3. Onderzoek mogelijkheden voor toepassing duurzame materialen voor langere lengtes

Gerecycled kunststof, hout en beton hebben de potentie de MKI-waarde van damwanden te verlagen. Echter zijn er beperkingen ten aanzien van de maximaal toepasbare lengtes. Onderzoek mogelijkheden om deze duurzamere materialen op langere lengtes toe te passen.

4. Ontwerp met zo min mogelijk materiaal

Naast of na de MKI-waarde en prijs van het materiaal is de toegepaste hoeveelheid materiaal ook belangrijk in de uiteindelijke milieu-impact en kosten. Ten aanzien van de MKI-waarde is in dit onderzoek de meeste variatie gevonden bij de toegepaste hoeveelheid stortsteen (hoogte talud en gewicht per m²), gevolgd door de hoeveelheid (lengte en dikte) damwand. Voor de kosten is de hoeveelheid damwand het belangrijkste, gerelateerd aan de prijs van staal.

5. Pak MKI- en LCC-berekeningen stapsgewijs aan i.p.v. uitgebreid inzichtelijk maken van gevoeligheden

Deze studie heeft uitgebreid inzicht in zwaartepunten en gevoeligheden van de drie principe-oplossingen opgeleverd. Het blijkt dat de verschillen tussen verschillende profielen en afmetingen (onder- en bovenwaarden) beperkt is. Slechts in enkele gevallen verandert de meest gunstige principe-oplossing. Wij bevelen daarom aan om met één profiel en gemiddelde invoerwaarden te starten en alleen zwaartepunten te variëren om te onderzoeken of dit de uitkomst van de meest gunstige principe-oplossing beïnvloedt.