

Rotterdam Circulair – duurzame parkbruggen

Monitoring van circulaire aanpak ontwikkeling en
beheer van vaste (park)bruggen

Versie 1.2 Definitief

Voor *extern* gebruik



Van:

L..E. de Visser, W.D. Schutte

Datum:

18 augustus 2025

Cluster

Stadsontwikkeling

Inhoudsopgave

1	Managementsamenvatting	3
2	Inleiding	4
2.1	Duurzame beleidsdoelstellingen Rotterdam	4
2.2	Scope rapport	5
3	MKI-berekeningen	6
3.1	Methodiek	6
3.2	Sturing op basis van de MKI	8
3.3	MKI-onderzoeken parkbruggen	9
3.4	Milieu-impact Beton	11
3.4.1	Funderingspalen	11
3.4.2	Betonmortels en sterkteklassen	12
3.4.3	Product category rules	12
3.4.4	Geopolymeerbrug	13
3.5	Milieu-impact Staal	14
3.5.1	Stalen profielen	14
3.6	Milieu-impact Composiet	16
3.7	Milieu-impact Hout	20
4	Aandachtspunten MKI-systematiek	22
5	Handelingsperspectieven duurzame bruggen	25
5.1	Duurzaamheid in civiele projecten	26
5.2	Circulair principe "Minder"	26
5.3	Circulair principe "Beter"	27
5.4	Circulair principe "Langer"	28
5.5	Circulair principe "Opnieuw"	28
5.6	Volgordelijkheid	29
6	Gebruik van de MKI	30
Bijlage A	– Planning wetstraject sturende MKI	31
Bijlage B	– Vergelijk MKI-waardes alle rapporten	32
Bijlage C	– R-ladder	33
Bijlage D	– Bouwwaardemodel	33

1 Managementsamenvatting

Rotterdam heeft ambitieuze doelstellingen op het gebied van duurzaamheid. Circulair werken wordt daarin beschouwd als middel om duurzaam te bouwen. Om dit doel te bereiken moet er in alle werkzaamheden invulling aan worden gegeven. (zie par. 2.1). Van de bestaande renovatie- en vervangingsopgave (RenV) van de fietsvoetgangersbruggen resteert nog een kleine honderdtal bruggen. Deze RenV-opgave wordt zo duurzaam mogelijk vormgegeven. Het in Nederland breedst geaccepteerde middel om duurzaamheid in de GWW te beoordelen is de Milieu Kosten Indicator (MKI). Daarom is een MKI-analyse gedaan om meer kennis op te doen over materialen en diverse standaard-ontwerpen met de laagste milieu-impact. De studie is uitgevoerd door Eco-monitor in opdracht van Rotterdam Circulair. De uitkomsten bleken verrassend en zijn daarom vervolgens vergeleken met eerdere MKI-studies binnen en buiten Rotterdam. Diverse onderzoeken in Rotterdam sinds 2012 op basis van de MKI geven over de jaren heen een sterk wisselend beeld van wat echt duurzaam is. Naar aanleiding daarvan zijn conclusies getrokken over het instrument MKI en is dit rapport opgesteld. De conclusie is dat de MKI nog niet voldoende betrouwbaar is om alleen op basis daarvan keuzes te maken met betrekking tot de uitvoering van (gemeentelijk) duurzaamheidsbeleid. De MKI moet niet als solitaire parameter worden toegepast om invulling te geven aan integraal duurzaamheidsbeleid. De MKI moet in balans worden gebracht met andere meer kwalitatieve argumenten over de duurzaamheid. De realiteit rondom duurzaam bouwen is te complex om te vatten in één enkele indicator. Ook criteria als losmaakbaarheid of herbruikbaarheid, die ook in Het Nieuwe Normaal Infra als relevante afwegingscriteria worden beschouwd, dienen in projecten te worden afgewogen, naast MKI. Daarbij moet worden onderkend dat duurzaamheid moet worden afgewogen tegenover criteria als levenscycluskosten, betrouwbaarheid en veiligheid van civiele constructies.

Binnen de gemeente is de afdeling Rotterdam Circulair verantwoordelijk voor het verankeren van een duurzame circulaire werkwijze. Merk op dat er een verschil bestaat tussen 'duurzaam' en 'circulair'. Waar duurzaamheid zich richt op het werken binnen planetaire grenzen geeft circulair een handelingsperspectief gericht op reductie van het gebruik van primaire (abiotische) grondstoffen. Het richt zich op het beperken van materiaal-, en energiegebruik door de bestaande materiaalinventaris in de wereld te benutten in plaats van nieuwe grondstoffen te ontginnen. De gedachte is dat circulair bouwen neerkomt op duurzaam bouwen. Rotterdam Circulair hanteert vier basisprincipes (in volgorde):

1 Minder – 2 Beter – 3 Langer – 4 Opnieuw

Deze vier principes vormen een goede basis om de duurzaamheid van projecten te beoordelen. Projecten en werken kunnen aan de hand van deze principes integraal kwalitatief worden beoordeeld al dan niet met behulp van een numerieke onderbouwing. De MKI kan worden benut in een signaalfunctie om mogelijke punten van optimalisatie in een werk/project aan te wijzen en daarop te acteren. Daarnaast dienen andere, meer kwalitatieve criteria gebaseerd op de circulaire principes minder-beter-langer-opnieuw te worden meegewogen.

2 Inleiding

2.1 Duurzame beleidsdoelstellingen Rotterdam

Gemeente Rotterdam streeft naar een groenere en gezondere stad. Daarbij staan het duurzaam omgaan met grondstoffen en het beperken van broeikasemissies centraal. Grondstoffen worden namelijk steeds schaarser en het omgaan met materialen kan in veel gevallen efficiënter worden ingericht. Het beperken van primair grondstofgebruik draagt bij aan het beperken van de klimaatverandering. Dit bespaart op termijn ook (financiële) kosten. De duurzaamheidsambities staan omschreven in het Klimaat Actieplan Rotterdam (KAR) en het "Programma Circulair, Samen in actie voor een circulaire stad" met de volgende doelstellingen:

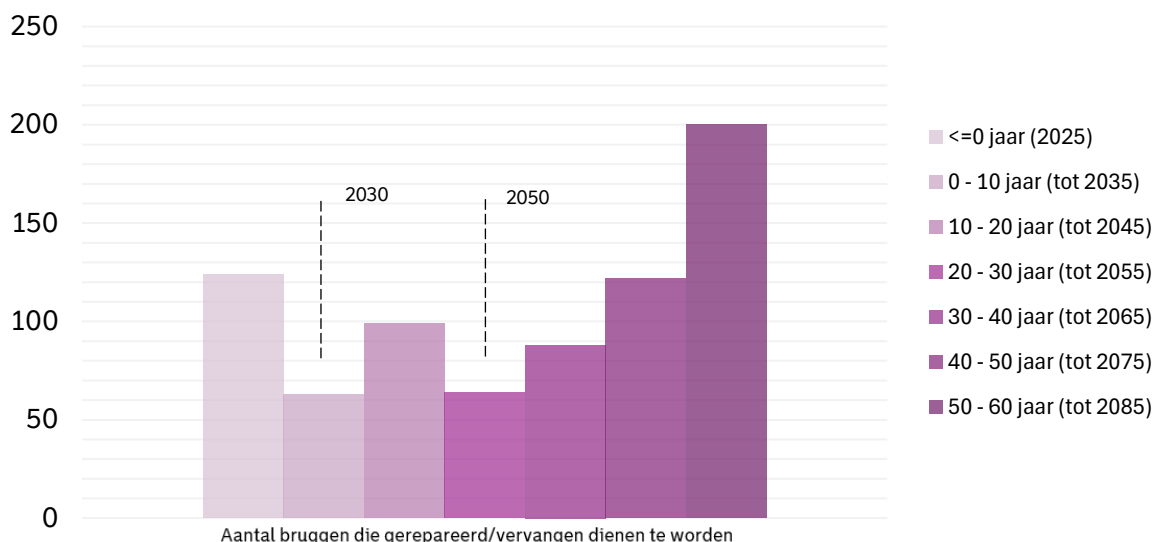
- Gebruik van primaire, abiotische grondstoffen (mineralen, metalen en fossiele grondstoffen)
 - o In 2030 50% gereduceerd t.o.v. 1991
 - o In 2050 Rotterdam volledig circulair
- CO₂-uitstoot
 - o In 2030 55% gereduceerd t.o.v. 1991
 - o In 2050 Rotterdam volledig klimaatneutraal

Gemeente Rotterdam is al geruime tijd bezig met het analyseren van mogelijkheden om de fiets- en voetgangersbruggen te verduurzamen. Omdat de voortgang en genomen stappen niet breed bekend was, is de behoefte ontstaan om deze systematisch te documenteren. Om te onderbouwen dat de voorgenomen reducties ook worden gehaald is het wenselijk om de voorgenoemde milieu-impact te kwantificeren. In Nederland wordt gebruik gemaakt van de Milieukosten Indicator (MKI) om milieueffecten te kwantificeren. De MKI is een generieke indicator die een scala van milieueffecten weergeeft, samengevoegd tot één getal met de eenheid [€].

In voorliggende rapportage wordt beschouwd wat er in de afgelopen jaren is gedaan om fietsvoetgangersbruggen te verduurzamen. In hoofdstuk drie worden de resultaten van de MKI-berekeningen gepresenteerd. Ook wordt teruggekeken naar onderzoeken uit het verleden en hoe de resultaten daarvan zich verhouden tot het nieuwste onderzoek (2025) door Eco-Monitor. In hoofdstuk vier wordt beschouwd welke aandachtspunten er zijn bij het gebruik van de MKI. Hoofdstuk vijf bevat handelingsperspectieven die worden gekoppeld aan de drie hoofdthema's van Rotterdam Circulair. Hoofdstuk zes behandelt hoe de MKI het beste kan worden toegepast behoeve van de verduurzaming van het Rotterdamse bruggenareaal.

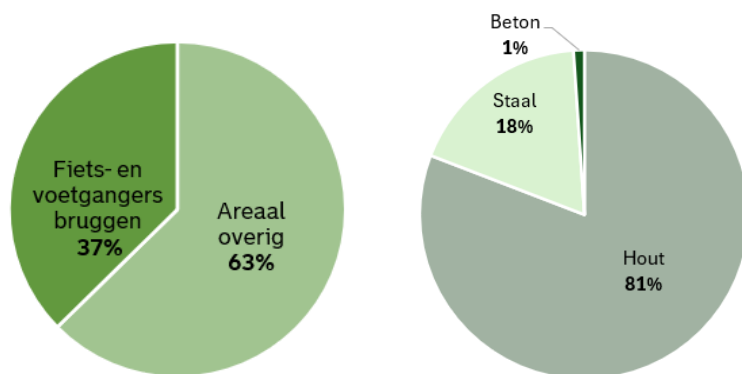
2.2 Scope rapport

Gemeente Rotterdam kent een groot aantal bruggen: het bestaande areaal omvat 1.189 vaste bruggen. Wanneer deze het einde van hun levensduur naderen dienen ze gerenoveerd of vervangen te worden. De komende decennia is er sprake van een flinke renovatie- en vervangingsopgave (RenV-opgave), zie figuur 1. Cluster Stadsbeheer is verantwoordelijk het beheren en behouden van deze assets.



Figuur 1: RenV-opgave bruggen voor de komende 60 jaar. Een indicatie is gegeven van de jaartallen 2030 (gebruik van primaire grondstoffen met 50% gereduceerd) en 2050 (Rotterdam volledig circulair). Bron: OBSERV, 2025.

Van deze 1.189 bruggen, zijn 709 bruggen bestemd voor fiets- en voetgangers (figuur 2). Het grote aantal vaste fiets-, voetgangersbruggen biedt veel potentie om duurzame impact te maken. Daarnaast zijn fiets- en voetgangersbruggen relatief smal en hebben deze constructies een laag risicoprofiel, wat ruimte biedt voor het toepassen van duurzame innovaties. Cluster Stadsontwikkeling is verantwoordelijk voor het ontwerpen van de bruggen. Rotterdam is sinds 2010 bezig met de RenV-opgave voor vaste fiets-, voetgangersbruggen. Op basis van de theoretische einde levensduur van deze bruggen omvat het huidige restant van RenV-opgave 94 bruggen. Hiervan bestaat 81% uit houten bruggen.

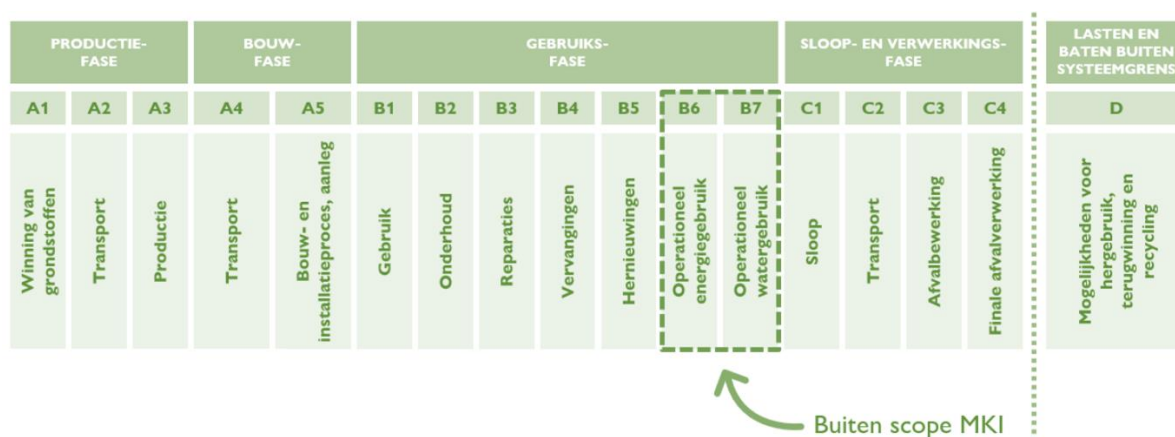


Figuur 2: Ruim één derde van het areaal bruggen bestaat uit fiets- en voetgangersbruggen (l). Merendeel van de resterende RenV-opgave bestaat uit houten bruggen(r).

3 MKI-berekeningen

3.1 Methodiek

Om de duurzaamheid van materialen in een werk of een ontwerp weer te kunnen geven, kan een milieukostenindicator (MKI) berekend worden. De MKI-score geeft inzicht in de milieubelasting van het materiaal- en energiegebruik dat nodig is om het werk/ontwerp te realiseren en laten functioneren. Daarbij kunnen verschillende levensfasen in acht worden genomen. Alle modules van de levenscyclus zijn weergegeven in figuur 3.



Figuur 3: Levensfasen en bijbehorende modules die in een LCA kunnen worden beschouwd.

De MKI omvat 11 verschillende milieu-impactcategorieën:

- Uitputting abiotische grondstoffen (mineralen, metalen)
- Uitputting fossiele energiedragers (aardolie, aardgas, steenkool)
- Klimaatverandering (uitstoot in CO₂-equivalenten)
- Aantasting ozonlaag
- Fotochemische oxidantvorming (smog)
- Verzuring
- Vermesting
- Humane toxiciteit
- Zoetwater aquatische eco-toxiciteit
- Mariene aquatische eco-toxiciteit
- Terrestrische eco-toxiciteit

De bepaling van de MKI is gebaseerd op de methodiek van de levenscyclusanalyse (LCA) volgens ISO 14040-44, EN15804 en de Bepalingsmethode Milieuprestatie Gebouwen en Bouwwerken. De MKI drukt milieuschade uit in euro's [€]. Hoe hoger de MKI, hoe groter de milieuschade van een werk of ontwerp. Een lagere MKI betekent dus een milieuvriendelijker werk of ontwerp.

De MKI is gebaseerd op specifieke uitgangspunten in de LCA van een product. Deze zijn vastgelegd in milieuverklaringen (Environmental Product Declaration, EPD). Voor de milieuverklaringen in de Nationale Milieudatabase (NMD) wordt de LCA-achtergrond database [Ecoinvent](#) gebruikt.

Bij het berekenen van de MKI (bijvoorbeeld in Dubocalc software) wordt de hoeveelheid materiaal en/of materieel geïnventariseerd en gesommeerd. De NMD geeft aan dat identieke berekeningen zeer verschillende resultaten kunnen opleveren wanneer ze gebaseerd zijn op verschillende achtergrondatabases. Dat is de reden dat de Bepalingsmethode alleen Ecoinvent hanteert. Ecoinvent wordt in Europa beschouwd als de meest complete en transparante database voor het opstellen van een LCA.

De vigerende versie van de database (Ecoinvent v3) werd uitgebracht in 2013. Sindsdien wordt de database jaarlijks geüpdatet met geactualiseerde gegevens (tabel 1). De NMD maakt voorsnog gebruik van Ecoinvent versie 3.6¹. Merk op dat een MKI-waarde het resultaat (=output) is van gehanteerde uitgangspunten in onderliggende LCA's (=input). Deze data is continu in ontwikkeling en verandert in de loop van de tijd. Dit geldt ook voor nieuwe materialen en technieken, daar is vaak geen complete of accurate data voor beschikbaar.

Tabel 1: Versiebeheer Ecoinvent database, met releasejaar en belangrijkste kenmerken en wijzigingen. De versies (linkerkolom) bevatten een hyperlink naar de Ecoinvent website met meer achtergrondinformatie.

Versie	Jaar	Belangrijkste kenmerken
3.0(1)	2013	Introductie van nieuw datamodel en systeemmodellen (<i>allocation at point of substitution, cut-off, consequential</i>).
3.1	2014	Voornamelijk verbeteringen in de consistentie en nauwkeurigheid van datasets. Er zijn updates en/of nieuwe producten toegepast voor o.a. Building Materials, Energy en Metals.
3.2	2015	Uitgebreide update van de elektriciteitssector, geografische opsplitsingen (UN-Europe > specifiekere regio's) en correcties in impactbeoordelingsmethoden (IPCC 2007 en 2013). Er zijn updates en/of nieuwe producten toegepast voor o.a. bouwmaterialen en daarbinnen specifiek voor "clinker, cement en concrete".
3.3	2016	Verbeteringen van de geografische dekking (m.n. Zwitserse markten), aanpassingen in impactbeoordelingen van watergebruik verbeteringen in metaalextracties. In ecoinvent versie 3.3 is het product "cement, unspecified" verbeterd. Daarvoor werden verschillende cementsoorten samengevoegd; nu worden de cementtypen apart gekoppeld aan de generieke cementmarkt.
3.4	2017	Elektriciteitsmarkten geüpdatet met nieuwe data, ook zijn de aardgasvoorzieningsketens in Europa verbeterd. Daarnaast zijn nieuwe chemische producten toegevoegd, impactbeoordelingsmethoden aangepast, en recyclingprocessen van PE- en PET-verpakkingsmaterialen geoptimaliseerd.
3.5	2018	Een volledige update van de aluminiumketen met nieuwe regionale data en elektriciteitsmixen, herziening van chemische stoffen zoals epoxyhars, inclusief nieuwe marktstructuren en namen, en aanpassingen in prijzen en toewijzingen die invloed hebben op bouwmaterialen.
3.6	2019	Datasets voor beton, cement en clinker zijn grondig herzien, met geactualiseerde inputs, energiemix en allocatiemethoden. Namen en classificaties van diverse cementtypes zijn gestandaardiseerd. Ook zijn datasets voor toeslagmaterialen zoals zand, grind en slakken (zoals GGBS) aangepast of toegevoegd. Verder zijn marktstructuren en materiaalstromen van bouwmaterialen verfijnd.
3.7(1)	2020	Diverse datasets geüpdatet en toegevoegd, waaronder isolatiematerialen, houtproducten en beton. De regionale dekking van markten is verbeterd, vooral voor hout, wat invloed heeft op transportemissies. Ook zijn elektriciteitsmixen en

¹ 3.6 voor weegset A1, 3.9.1 voor weegset A2

		metaalketens geactualiseerd, wat effect heeft op veel bouwmaterialen. Daarnaast is de koolstofbalans van hout- en papierketens aangescherpt.
<u>3.8</u>	2021	Introduceert een nieuw systeemmodel voor EPD's (<i>allocation, cut-off, EN15804</i>). Bouwgerelateerde updates omvatten verbeterde betondata en uitgebreide correcties in houtketens (zoals CLT en gelamineerd hout). Ook zijn impactmethodes (bijv. CO ₂ -balans) en productomschrijvingen geüpdatet voor betere toepasbaarheid in de bouw.
<u>3.9</u>	2022	Diverse methodes voor milieu-impactbeoordeling zijn toegevoegd of geüpdatet, waaronder IPCC 2021 en Ecological Scarcity 2021. Veel verouderde methodes zijn verwijderd of als 'superseded' gemarkeerd. De energie-inhoud (HHV/LHV) van olie en gas is aangepast, wat invloed heeft op emissieberekeningen. Ook zijn er verbeteringen in de consistentie en naamgeving van categorieën en indicatoren. Tot slot is een nieuwe dataset toegevoegd voor waterstofproductie via stoomreforming.
<u>3.9.1</u>	2023	Bevat vooral correcties op versie 3.9: karakteriseringsfactoren (voor o.a. GWP en toxiciteit) zijn geüpdatet, onzekerheden zijn verbeterd en metadata aangevuld. De release richt zich op datakwaliteit, niet op uitbreiding.
<u>3.10</u>	Eind 2023	Bevat veel uitbreidingen: nieuwe datasets voor olie, gas, chemicaliën en afvalverwerking, plus updates aan elektriciteitsmixen. Voor de bouw zijn cement- en bouwmaterialaadata verbeterd (o.a. Zwitserland, Tunesië). Ook zijn LCIA-methoden geüpdatet en HS-codes toegevoegd voor betere classificatie.
<u>3.10.1</u>	2024	Kleine update die vooral correcties doorvoert in de productie van steenkoolproducten voor de industrie en aanpassingen maakt in de elektriciteitsproductiegegevens van Brazilië.
<u>3.11</u>	Eind 2024	Introduceert vooral verbeterde data over biogene koolstofstromen en fossiele brandstoffen, met bijgewerkte aardgas- en steenkoolgegevens. Voor de bouw zijn er nieuwe datasets voor mechanische en chemische recycling van kunststoffen in Europa en China, plus uitgebreidere regionale afvalverwerking in Europese landen. Ook zijn LCIA-methoden geüpdatet voor nauwkeuriger milieu-impactberekeningen.

3.2 Sturing op basis van de MKI

Het reduceren van MKI-scores is geen directe doelstelling van de gemeente. Maar op nationaal niveau wordt de MKI-methodiek steeds breder uitgerold. In [een kamerbrief \(31 mei 2024\)](#) heeft demissionair minister Harbers de volgende stap in de implementatie van het Nationaal Programma Circulaire Economie toegelicht, gericht op het verduurzamen van infraprojecten. Dit omvat zowel het stellen van milieuprestatie-eisen voor beton, staal en asfalt als het verplicht gebruiken van de MKI als gunningscriterium in (grote) GWW projecten. Dit is naar aanleiding van signalen uit de markt. Er is een [beleidsadvies](#)² geschreven op basis van verdiepende onderzoeken. Momenteel werkt het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat aan een wetsvoorstel (Zie bijlage A). Overigens is Nederland het enige land binnen de EU dat werkt met MKI. In andere landen wordt deze indicator niet of nauwelijks gebruikt, maar wordt met deelindicatoren gewerkt in doelen en monitoringssystemen zoals CO₂ en aandeel primaire grondstoffen.

² opgesteld door Copper8 i.s.m. Witteveen+Bos en Flux Partners

Hoewel versnelling richting een circulaire economie noodzakelijk is, en er in algemene zin aangenomen kan worden dat circulair bouwen en CO₂-reductie leiden tot lagere MKI-scores, brengt de verplichting van dit instrument ook risico's en aandachtspunten met zich mee. Zoals eerder genoemd is Gemeente Rotterdam al geruime tijd bezig met het analyseren van mogelijkheden om fiets- en voetgangersbruggen te verduurzamen. De MKI heeft daarbij als meetinstrument een grote rol gespeeld. In de volgende paragrafen wordt dieper ingegaan op de MKI-onderzoeken die zijn uitgevoerd voor parkbruggen in de loop van tijd en wordt er ingezoomd op veelgebruikte materialen.

3.3 MKI-onderzoeken parkbruggen

Het eerste onderzoek dat de gemeente heeft gedaan naar de MKI van parkbruggen is uitgevoerd in 2012. Kort daarop, in 2013, is er een onderzoek gedaan voor Rotterdam in de vorm van een masterscriptie. In datzelfde jaar is door BECO een breder onderzoek opgezet met vertegenwoordiging van de branches beton, hout en staal. Dit was niet in opdracht van de gemeente. Het laatste onderzoek vanuit de gemeente is door Eco Monitor uitgevoerd in 2025. Het aantal onderzoeken naar de milieukosten van parkbruggen komt daarmee op vier, zie tabel 2.

Wanneer	Wie	Database	Brugafmetingen
2012	IBR (Léon Dijk, Roland v Rooyen	Dubocalc (Nationale Milieudatabase, ecoinvent database)	12.2 x 2.2m ²
2013	TU-Delft (master scriptie)	Idemat database	12 x 2m ²
2013	BECO	Nationale Milieudatabase, ecoinvent database	14 x 3m ²
2025	Eco Monitor	Nationale Milieudatabase, ecoinvent database	20 x 2.5m ²

Tabel 2: Overzicht onderzoeken naar duurzame parkbruggen

Uit de recentere onderzoeken kwamen inzichten naar voren die verschilden van eerdere bevindingen. Dit zette eerder gemaakte besluiten in een ander daglicht. Om uniformiteit te waarborgen, zijn de vier onderzoeken met elkaar vergeleken om mogelijke overeenkomsten te identificeren en belangrijke ontwikkelingen te duiden. Waar mogelijk, is op basis van deze vergelijking een vertaling gemaakt naar handelsperspectieven.

In elk onderzoek zijn in grote lijnen dezelfde constructieconcepten onderzocht op basis van materiaalinventarisaties door ing. WD Schutte. De inventarisaties zijn gebaseerd op gerealiseerde bruggen in de Rotterdamse buitenruimte. De constructieconcepten zijn:

- Betonnen plaatbrug (CEM III B & geopolymeerbeton)
- Brug van hogesterktebeton (plaat of dragende leuningbrug)
- Stalen liggerbrug met dek (hout of composiet)
- Stalen brug (vakwerk, dragende leuning)
- Houten liggerbrug tropisch hardhout
- Houten liggerbrug gemodificeerd zachthout
- Composietbrug sandwichconstructie
- Composietbrug pultrusieliggers

Niet bij elke studie zijn alle concepten geanalyseerd. In hoofdzaak zijn in ieder onderzoek wel de volgende materialen geanalyseerd: beton, hout, staal en composiet. Bijlage B toont een overzicht van de verschillende rapporten naast elkaar. Er vallen een aantal zaken op:

- Totaalwaardes
De absolute MKI-waardes van bruggen van hetzelfde materiaal verschillen significant tussen de verschillende onderzoeken. In sommige gevallen is er sprake van een orde grootte verschil. Deze verschillen kunnen niet geheel worden verklaard door de gehanteerde materiaalhoeveelheden.
- Verschillende concepten, verschillende prestaties
Tussen de verschillende onderzoeken verschilt ook welk constructieconcept (materiaal) de laagste MKI-waarde en dus de laagste milieu-impact heeft verschilt per onderzoek. Ook in dit geval kunnen de verschillen niet geheel worden verklaard door de gehanteerde materiaalhoeveelheden.
- Constructieonderdelen
Voor zover beschikbaar uit de data is de totale milieu-impact opgedeeld in constructie-elementen. Het lijkt aannemelijk dat, ondanks de verschillende totaalwaardes van de MKI de verhoudingen tussen de verschillende constructieonderdelen, zoals dekken, landhoofden, funderingen, etc. verhoudingsgewijs overeenkomen. De uitkomsten van de verschillende onderzoeken ontkrachten deze veronderstelling.

In het meest recente rapport van Eco Monitor is te zien dat de onderbouw van de paalfundering een significant grotere bijdrage levert aan de MKI, dan voorheen is berekend. Dit is te verklaren door het gebruik van een andere productkaart. Waarom het verschil tussen de producten zo groot is, en waarom bepaalde LCA-uitgangspunten gehanteerd zijn, is echter moeilijk te beoordelen. Dat leidt tot de vraag: met welke uitgangspunten reken je, en waarom? Als deze kennis er niet is, of niet gemakkelijk te raadplegen valt, maakt dit de MKI waarde en de toepassing ervan door verschillende partijen, kwetsbaarder.

Er zijn dus op alle vlakken significante verschillen tussen de verschillende onderzoeken. In onderstaande paragrafen wordt er per materiaal – beton, staal, composiet, hout – dieper ingegaan op de verschillen.

3.4 Milieu-impact Beton

Een van de zaken die opvalt is het verschil in de milieukosten van beton tussen het BECO³ rapport en het Eco Monitor rapport. Er is een vergelijking gemaakt tussen de hoeveelheid beton en het wapeningsstaal in de twee rapporten, exclusief het beton in de paalfunderingen. Merk in ieder geval op dat de gehanteerde levensduur van de brug in het BECO rapport 50 jaar is en in het Eco Monitor rapport 60 jaar. Onderhoud is in beide onderzoeken niet meegenomen.

Tabel 3: Hoeveelheden beton BECO vs. Eco-monitor

	Beton	Wapeningsstaal
BECO	23m ³	3926kg
Eco Monitor	36m ³	5397kg

Voor de fundering geldt het volgende:

Tabel 4: Hoeveelheden paalfundering BECO vs. Eco-monitor

	Gewapend beton	Staal	Type paal
BECO	6m ³	453kg (wapening + voorspanning)	Prefab betonpaal
Eco Monitor	4,9m ³	785kg (buispaal) 140kg (wapening)	Stalen buispaal

De betonnen BECO-brug heeft een MKI-score van ca. €700. De betonnen Eco Monitor-brug heeft een MKI-score van ca. €3.108. Wanneer wordt gecorrigeerd voor de grotere omvang van de brug uit het Eco Monitor rapport, waardoor er ruim 1.5x zo veel beton toegepast wordt, is de MKI-score van deze brug nog steeds vele malen hoger dan de BECO-brug. Hoe kan dit verklaard worden?

3.4.1 Funderingspalen

Bij de Eco Monitor-brug is meer dan de helft van de milieu-impact te verklaren door de ingeheide funderingspalen (stalen buispaal) (€2.094). Dit terwijl er in het BECO rapport is gerekend met prefab heipalen. Het verschil in milieukosten tussen een stalen buispaal en een prefab heipaal is significant: op moment van schrijven is de MKI, tot en met de aanleg en met een levensduur van 60 jaar, van 1m stalen buispaal (Ø 323.9mm) €45.38 en van de prefab paal €5.85 (400x400mm)⁴.

In de praktijk wordt in de stedelijke omgeving vaak gewerkt met inwendig geheide stalen buispalen, gevuld met beton. De reden daarvoor is dat het transporteren en aanleggen van buispalen efficiënter verloopt en minder geluids- en trillingsoverlast veroorzaakt dan prefab betonpalen. Er wordt in paragraaf 3.5 verder ingegaan op de uitgangspunten voor het staal in de stalen buispaal.

³ Merk op dat in het BECO-rapport wordt verklaard dat de analyse niet in DuboCalc is uitgevoerd, omdat het programma onvoldoende relevante data bevatte. Er is getracht om voornamelijk te rekenen met data uit de Nationale Milieudatabase of MRPI-bladen. Maar ook andere bronnen werden voor deze analyse gebruikt.

⁴ Bij een levensduur van 60 jaar, NMD / DuboCalc

3.4.2 Betonmortels en sterkteklassen

Het verschil in de funderingspalen verklaart een groot deel van het verschil in MKI, maar nog niet alles. Kijkende naar het gebruik van beton in de BECO-brug, gaat men voor het dek uit van voorgespannen VIP-, en TRA-liggers met een sterkteklasse van C53/65 en een druklaag met een sterkteklasse van C28/35. Bij de Eco Monitor-brug wordt voor de landhoofden uitgegaan van beton met sterkteklasse C12/15 en voor het dek sterkteklasse C30/37.

Over het algemeen kan worden gesteld dat hoge sterktes beton per m³ een hoger milieuprofiel hebben dan lagere sterktes beton. Op het moment van schrijven is de MKI van 1 m³ betonmortel, tot en met de aanleg (A1 t/m A5) en met een levensduur van 60 jaar, voor verschillende sterkteklassen:

- Betonmortel voor GWW C1215CEM III 2311 kgm³ compleet €13.09
- Betonmortel voor GWW C2025 CEM III 2365 kgm³ compleet €15.40
- Betonmortel voor GWW C3037 CEM III 2386 kgm³ compleet €16.47
- Betonmortel voor GWW C3545 CEM III 2391 kgm³ compleet €18.56
- Betonmortel voor GWW C4555 CEM III 2387 kgm³ compleet €22.20
- Betonmortel voor GWW C7085 CEM IIIA €34.86

De BECO-brug gebruikt betonmortels met hogere sterktes. De Eco-Monitor brug bevat lagere sterktes beton maar wél meer kubieke meters.

Tabel 5: Op basis van levensduur 60 jaar, vergelijking in het heden

Betonmortels m.u.v. fundering (mei 2025)		m3 beton MKI excl toeslag totaal		MKI A1-A5
BECO	Betonmortel voor GWW C4555 CEM III 2387 kgm ³ compleet	10.12 €	265. €	225. Liggers (let op: in rapport BECO, sterkteklasse C53/65)
	Betonmortel voor GWW C3037 CEM III 2386 kgm ³ compleet	9.09 €	186. €	150. Druklaag (let op: in rapport BECO, sterkteklasse C28/35)
		19 €	451. €	374.
Eco Monitor	Betonmortel voor GWW C1215CEM III 2311 kgm ³ compleet	19.68 €	336. €	258. Landhoofden werkvloer
	Betonmortel voor GWW C3037 CEM III 2386 kgm ³ compleet	16.3 €	334. €	268. Brugdek
		36 €	669. €	526.

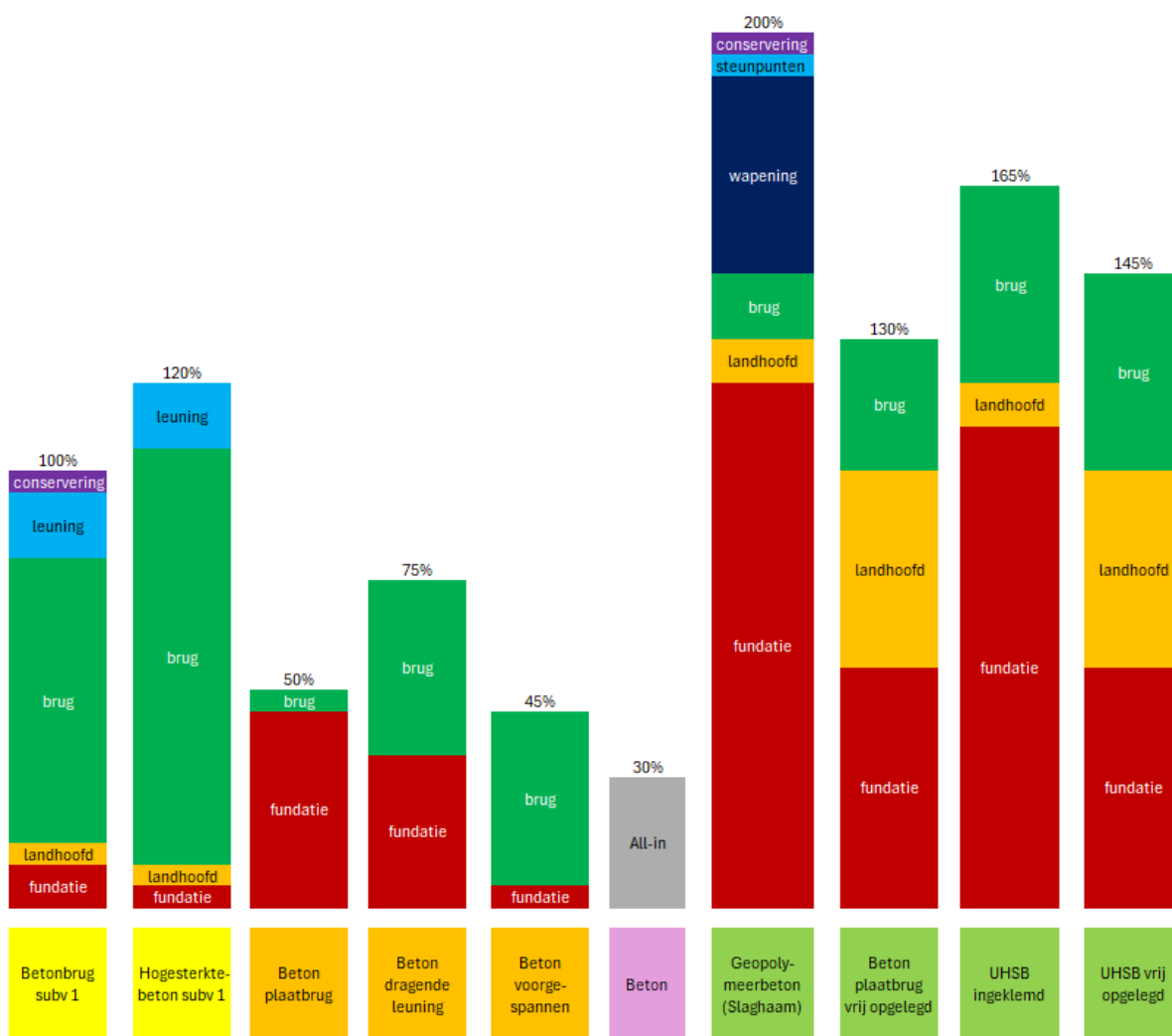
Dat maakt het verschil tussen beide rapporten moeilijker te duiden. Naar verwachting verklaart dit een klein deel van het verschil in MKI. Naast het verschil in sterkteklassen, kan de MKI worden beïnvloed door de aannames in cementtypes (I, II, III en A, B, C) en in mindere mate de hoeveelheid hergebruikt granulaat. Bovendien zijn er in 2015 en 2016 updates geweest in de Ecoinvent database met betrekking tot cement, klinker en beton.

3.4.3 Product category rules

Sinds de komst van de Product Category Rules voor cement en grondstoffen voor cementproductie (NL-PCR) in 2023, wordt aan CEMIII mengsels (hoogoven-/portlandcementmengsel met een deel hoogovenslak) een hogere MKI toegeschreven dan in eerdere onderzoeken. Voorheen vertegenwoordigden de hoogovenslakken geen milieulast wanneer het werd toegepast in beton, omdat de slakken werden beschouwd als afvalstroom van de productie van staal. Nu wordt aan de hoogovenslakken op basis van de economische waarde een milieulast toegekend. Dit heeft een dubbel effect. De MKI van staal wordt lager omdat de slakken niet langer als afvalproduct van staalproductie worden gezien en tegelijkertijd neemt de MKI van beton o.b.v. hoogovencement toe.

3.4.4 Geopolymeerbrug

Uit het Eco Monitor rapport blijkt ook dat de geopolymeer brug (Slaghaam) minder goed uit de verf komt dan de andere brugvarianten. Het overgrote deel (60%) van de MKI score wordt verklaard door de funderingspalen (stalen buispaal). Omdat dit een constructief project betrof met een innovatief materiaal, waarvan het nog onzeker is hoe dit materiaal zich over langere termijn gedraagt, is juist de fundering extra zwaar uitgevoerd. Per m³ betonmortel in het dek is er dus milieuwinst geboekt door de toepassing van geopolymeerbeton in plaats van beton met cement. Maar wanneer de gehele brug in ogenschouw wordt genomen, wordt deze winst tenietgedaan door de extra steunpunten. Dit effect is onvermijdbaar bij innovatie. Optimalisatie volgt naar aanleiding van het opbouwen van kennis en ervaring.



Figuur 4: Vergelijk onderzoeken betonbruggen. Let op: Het oranje onderzoek 'Ontwerpen duurzame bruggen' uit 2013 maakte gebruik van een afwijkende database (Idemat)

Rapport 1-1_parkbruggen duurzaam_v2_Binder 2012	50 jaar + afdanking
Ontwerpen duurzame bruggen 2013	75 jaar + afdanking
BECO 2013	50 jaar + afdanking
Fiets en Voetgangersbruggen Eco-monitor 2025	60 jaar + afdanking

3.5 Milieu-impact Staal

Voor stalen bruggen geldt dat de totaalwaardes van de MKI-berekeningen over de verschillende rapporten onderling significante verschillen vertonen. De gehanteerde hoeveelheden staal uit de verschillende rapporten zijn onderling vergeleken om te bepalen of daarmee de verschillen in MKI kunnen worden verklaard.

	Staal	Brugafmetingen
IBR liggerbrug	3269kg	12,2x2,5m ²
IBR vakwerkbrug	7159kg	12,2x2,5m ²
TU-Delft liggerbrug	7644kg	12x2,5m ²
BECO liggerbrug	5600kg	14x3m ²
Eco Monitor liggerbrug	3387kg	21,2x2m ²

Tabel 6: hoeveelheden Staal in alle vier onderzoeken

Wanneer de brug van Eco Monitor niet meegerekend wordt, is het verschil tussen de grootste en de laagste hoeveelheid een factor $7644/3269 = 2,3$ [-] Het rapport van TU-Delft gaat uit van vuistregels om tot een geparametriseerd ontwerp te komen en kan aldus te conservatief zijn wegens de getrapte benadering in de vuistregels. De hoeveelheid in het Eco-Monitor rapport is te verklaren door het feit dat het daar gehanteerde ontwerp uitgaat van korte overspanningen en daarmee bijzonder lichte profielen. Verder blijkt dat vakwerken niet optimaal zijn voor een relatief korte brug - het vereist veel staal.

3.5.1 Stalen profielen

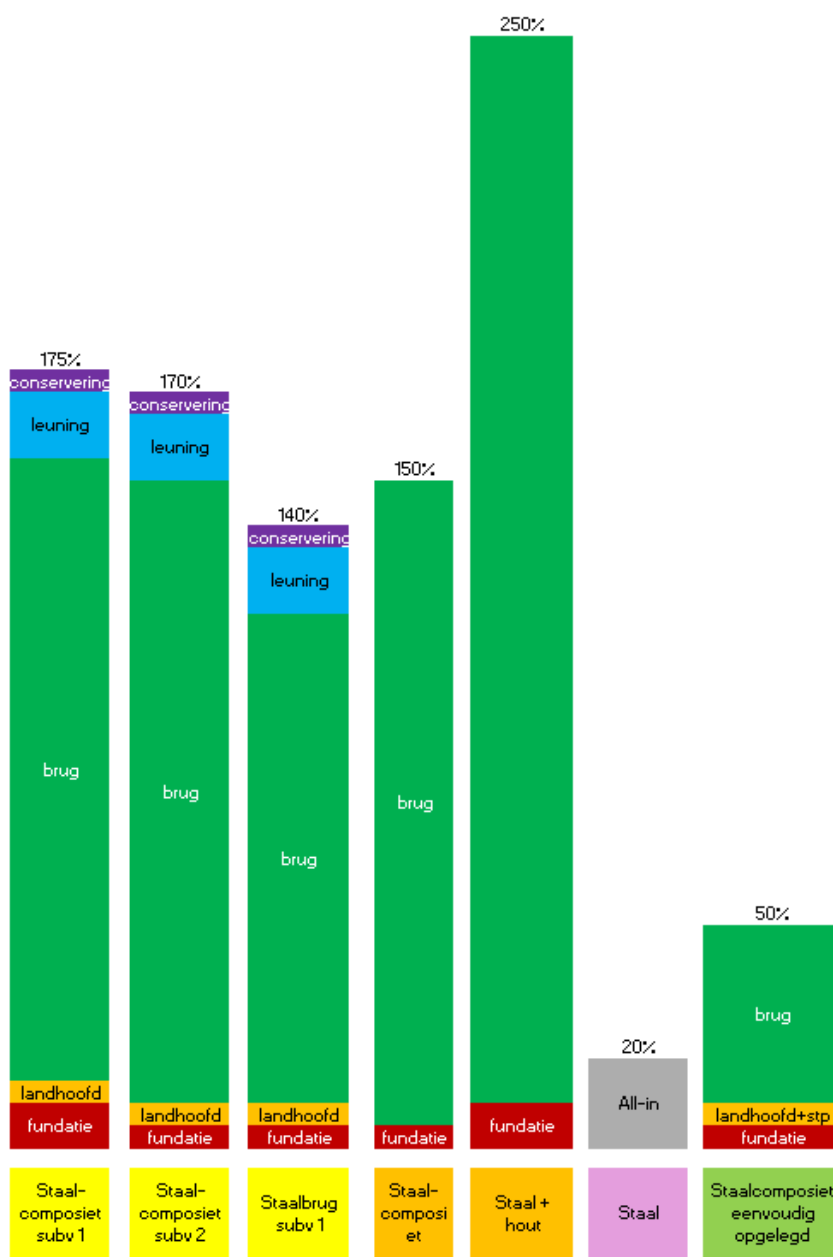
De geconstateerde verschillen in staalhoeveelheden zijn op zichzelf niet in staat de verschillen in MKI uitkomsten te verklaren. Het verschil in uitkomsten moet daarom worden gezocht in de achterliggende database.

In de NMD zijn voor verschillende toepassingen en kwaliteiten van staal uiteenlopende milieuverklaringen beschikbaar. Het milieuprofiel van het staal dat wordt gebruikt in stalen buispalen, verschilt aanzienlijk van dat van het staal in balken en liggers. Een voorbeeld hiervan is het aandeel secundair (gerecycled) staal: voor staalprofielen wordt uitgegaan van 95% secundair staal, terwijl voor stalen buispalen slechts 14% wordt aangenomen. Deze aannames leiden tot significante verschillen in de MKI. Volgens een rapport van aannemersbedrijf Gebr. De Koning⁵ is dit terug te leiden tot verschillende aannames over de productie van het staal, al dan niet terecht.

Het is mogelijk dat deze verhoudingen van secundair/primair staal in milieuverklaringen aan veranderingen onderhevig zijn geweest. Verder is de milieu-impact van de staalslakken die worden gebruikt in beton verwijderd van de milieu-impact van het staal en toegevoegd aan die van beton met hoogovencement. Dat verlaagt verder de impact van staal.

Voor wat betreft de uitschieter van staal + hout geldt dat gegeven de referentieperiode van het onderzoek (75 jaar) er gerekend is met het 2x vervangen van het houten dek.

⁵ [Microsoft Word - 2024_08_19 ketenanalyse stalen buispalen versie def](#) (hst 8)

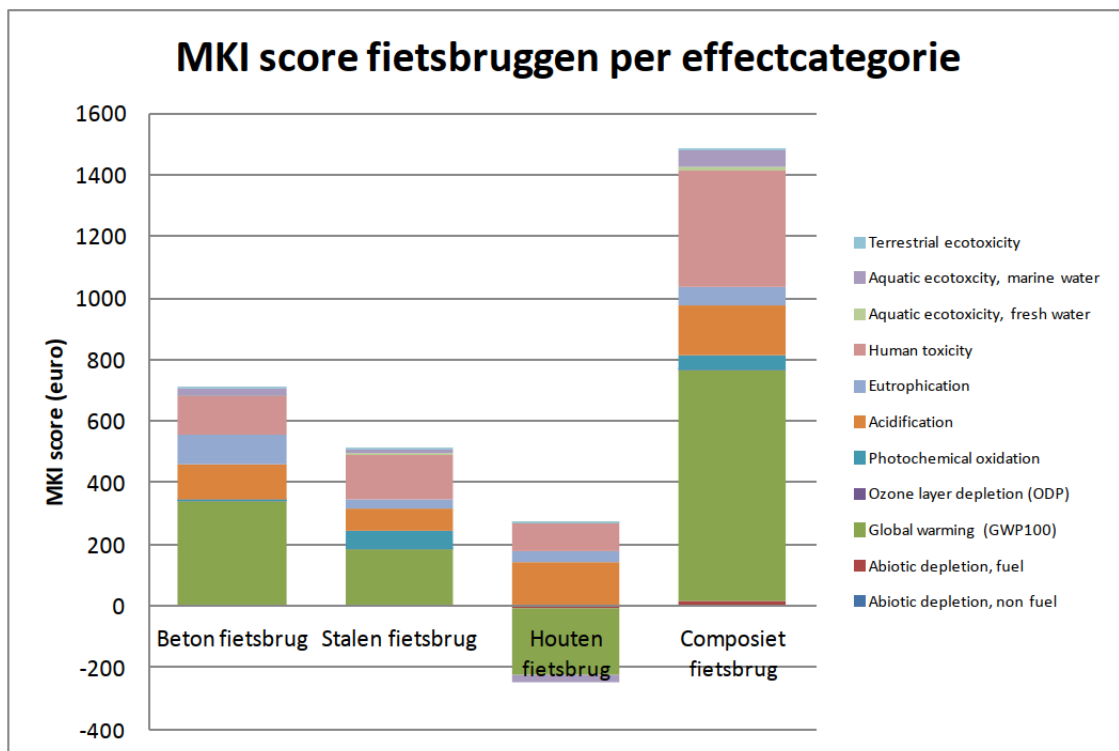


Figuur 5: Vergelijk onderzoeken stalen bruggen. *Let op: Het oranje onderzoek 'Ontwerpen duurzame bruggen' uit 2013 maakte gebruik van een afwijkende database (Idemat)*

Rapport 1-1_parkbruggen duruzaam_v2_Binder 2012	50 jaar + afdanking
Ontwerpen duurzame bruggen 2013	75 jaar + afdanking
BECO 2013	50 jaar + afdanking
Fiets en Voetgangersbruggen Eco-monitor 2025	60 jaar + afdanking

3.6 Milieu-impact Composiet

De MKI van composiet is onderwerp van controverse. Toen in 2009 een LCA-studie is gedaan naar CO₂-uitstoot van composiet, in opdracht van het bedrijf Fibercore-Europe, stond het materiaal bekend als milieuvriendelijk. Onderzoeken van Rotterdam uit 2012/2013 tonen voor composiet een gemiddelde score op basis van milieukosten. In 2013 is door BECO een breder onderzoek opgezet met vertegenwoordiging van de branches beton, hout en staal. Daaruit kwam een ander beeld voort dat in hoge mate heeft bijgedragen aan de beeldvorming rondom composiet in het kader van duurzaamheid. Composiet scoort daar significant slechter dan de andere materialen.



Figuur 6: Uitkomsten BECO onderzoek

Wat in figuur 6 opvalt is dat naast het feit dat toxiciteit van composiet zwaar is aangerekend, ook de CO₂(eq)-uitstoot hoger is dan andere materialen. Ook hier is sprake van een trendbreuk t.o.v. meerdere eerdere rapporten. De verklaring kan niet worden gevonden in de gehanteerde materiaalhoeveelheden.

Tijdens het opstellen van het rapport door Eco-Monitor in 2025 bleek het probleem te bestaan dat de NMD geen geschikte data heeft voor composietbruggen. Daarom is contact gezocht met composiet verwerkende bedrijven. Het bedrijf Composite Structures heeft een LCA van hun brugconcept ter beschikking gesteld. Het betreft hier een sandwich constructie op basis van polyesterhars, glasvezels en PUR schuim. Figuur 8 toont een zeer lage MKI voor een regulier gefundeerde composietbrug, dat wil zeggen zonder palen of alternatief met houten palen. Ingeklemd composiet gaat uit van stalen buispalen. Daarmee staat een beeld dat gelijkwaardig is aan die van andere concepten met een buispalenfundering.

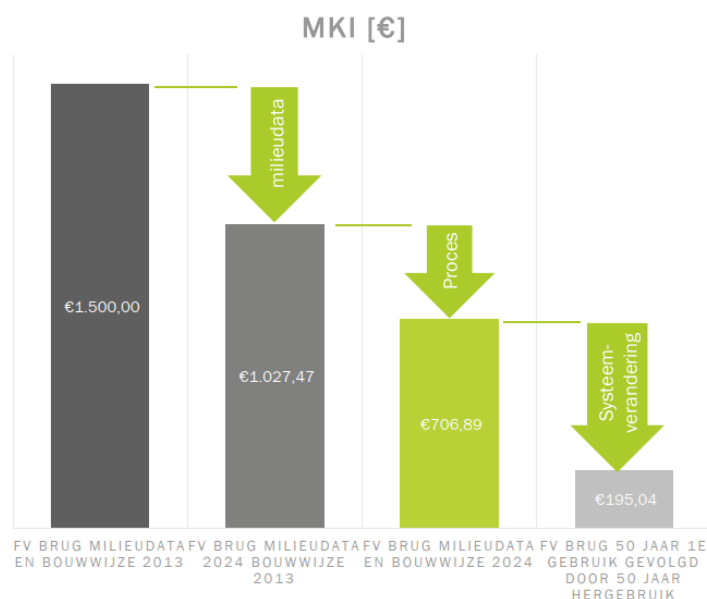
De getoonde grafieken betreffen de fases A1 t/m D, omdat de overige onderzoeken dezelfde scope hanteren. Als alleen fases A1 t/m A5 in ogenschouw worden genomen dan ontstaat een ander beeld. Met een score van 167% ten opzichte van andere materialen scoort composiet vergelijkbaar met betonbruggen.

Fase D is van belang voor composiet. Er wordt algemeen vanuit gegaan dat een composietbrug na zijn eerste economische levensduur kan worden hergebruikt. Dat levert in fase D een significante MKI-winst op. Dat is echter wel potentiële winst die op korte termijn nog niet bijdraagt aan de klimaatdoelstellingen. Andere rapporten gaan uit van storten of verbranding.

<i>Composiet vrij opgelegd</i>	A1 t/m A5	A t/m D
MKI	€3946,-	€730,-
CO2	21 ton	4 ton
Primaire grondstoffen	13 ton	13 ton
Secundaire grondstoffen	1 ton	1 ton
Aandeel secundair van totaal	5,6%	5,6%

Tabel 7: Composiet met of zonder einde leven scenario (fase D)

Verduurzaming van composietbruggen kan op verschillende manier worden benaderd. Ook hier is geen data van beschikbaar in de NMD. Het Rotterdamse composietbedrijf Fibercore-Europe heeft onderzoek gedaan naar de duurzaamheidspotentie van circulair composiet en biobased composiet. Fibercore heeft daarbij voortgeborduurd op het BECO-onderzoek (2013). In figuur 7 de meest linkse grafiek geeft de MKI weer cf. BECO (2013). Gesteld wordt dat met betere data over grondstoffen de waarde met 30% kan worden gereduceerd. In het geval van Fibercore is overgestapt van PUR schuim naar gerecycled PET plastic (PET schuim) als kernmateriaal voor de sandwichconstructie. Dat zou nog eens €300,- reductie betekenen voor fase A1 t/m A5. Het hergebruik in fase D is hier afbeeld als het uiterst rechtse staafdiagram. Uitgaande van de data van Fibercore zou een reductie in A1 t/m A5 mogelijk zijn van 53% ten opzichte van de waarde in het Eco Monitor rapport.



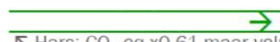
Figuur 7: Mogelijke impact maatregelen verduurzaming composiet

Biobased composiet

Biobased in composiet betekent dat één of meerdere van de drie hoofdbestanddelen van een composietbrug (gedeeltelijk) biobased zijn. De meeste aandacht gaat uit naar de vezels en de hars. In 2024 is door Fibercore een brug gemaakt met een harssysteem dat voor 46% biobased is en voor 12% uit gerecycled PET-plastic. Volgens opgave van Fibercore geeft het toepassen van de biobased hars geen MKI-winst. De CO₂-emissies zijn wel 39% lager vergeleken met niet-biobased composiet. Dit zou voor de BECO brug neerkomen op een aanvullende 20% CO₂-besparing ten opzichte van de standaard van vandaag de dag, waarin nog gebruik wordt gemaakt van een petrochemisch harssysteem.

Hiernaast weergegeven is een uitsnede uit de documentatie van Fibercore. Biologische vezels hebben significant lagere mechanische eigenschappen t.o.v. glasvezels. Dat vertaalt zich bij gelijke overspanning en belasting in meer materiaal in de constructie. Dat zou leiden tot hogere CO₂-emissies. Deze opgave gaat er vanuit dat de biobased brug net zo'n lange levensduur heeft als de traditionele variant. Dat is niet zeker te stellen, omdat de biobased brug gevoeliger is voor omgevingsinvloeden dan de traditionele variant.

Scenario met biohars en biovezels: forse verschuivingen t.o.v. regulier scenario door gebruik van de natuurlijke vezels :

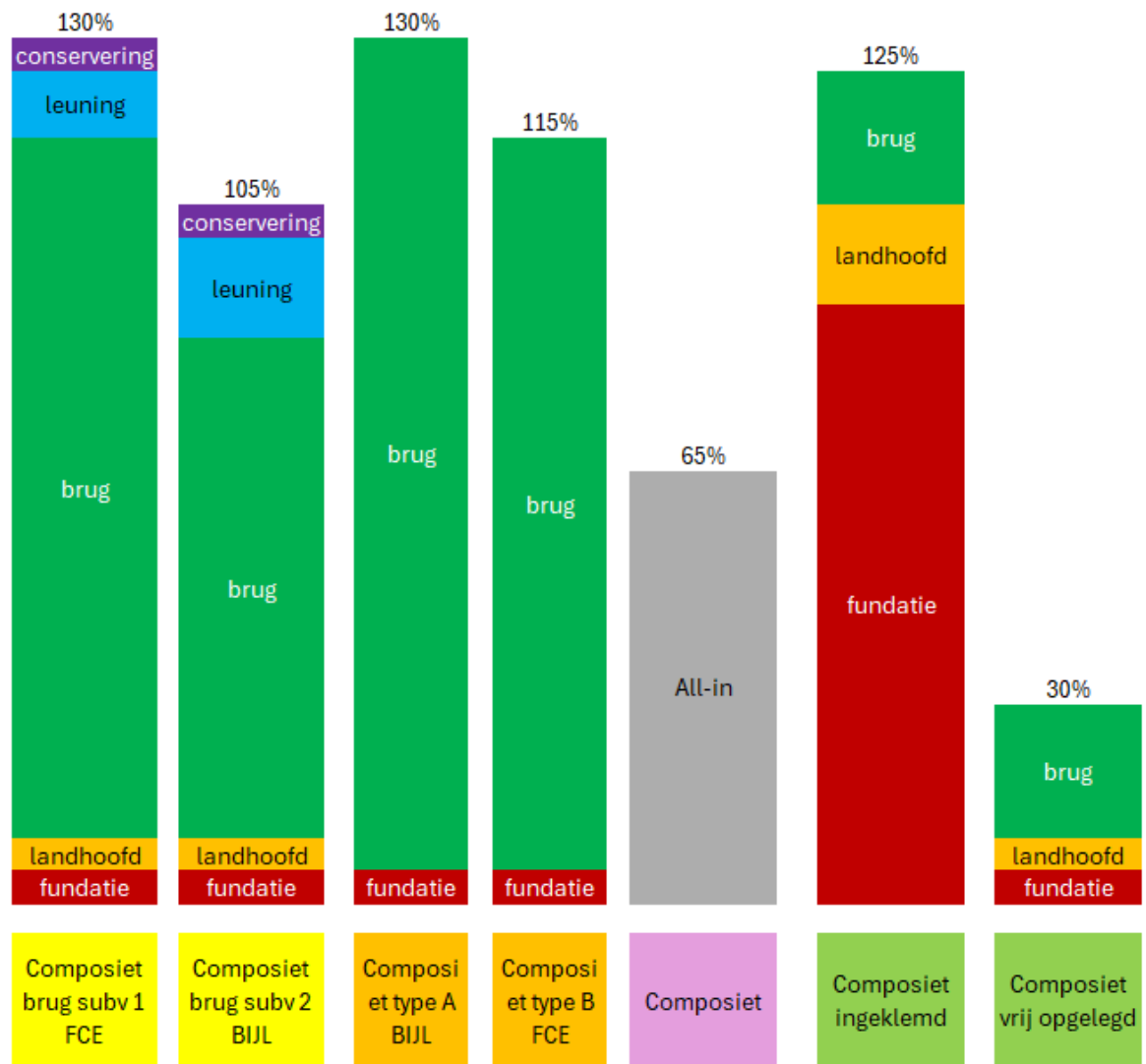
- 
- ↖ Hars: CO₂-eq x0,61 maar volume x4 = x0,61 x4 = x2,44
 - ↖ Vezels: volume x4 maar wel biogeen
 - ↖ Afvalverwerking: uiteindelijk evenredig meer afval
 - ↖ Slijtlaag: ongewijzigd
 - ↖ PET-schuim: bouwhoogte, en dus volume x2

Wijzigingen zijn schattingen op basis van de ervaringen van de Smart Circular Bridge **Floriade-Almere**.

Totaal: een hogere carbon footprint!

Merk op dat door de gehanteerde allocatie niet iedere impact-per-item schaalbaar is met de massa van de brug.

In algemene zin wordt gesteld dat de toepassing van biobased composiet de potentie heeft om de milieu-impact van composietbruggen te verlagen. Winst is vooral zichtbaar in CO₂-uitstoot en circulariteit. Afhankelijk van welke onderdelen biobased worden uitgevoerd bepaalt de geometrie van de constructie in meer of mindere mate in hoeverre biobased composiet kan worden toegepast.



Figuur 8: Vergelijk onderzoeken composietbruggen. *Let op: Het oranje onderzoek 'Ontwerpen duurzame bruggen' uit 2013 maakte gebruik van een afwijkende database (Idemat)*

Rapport 1-1_parkbruggen duurzaam_v2_Binder	2012	50 jaar + afdanking
Ontwerpen duurzame bruggen	2013	75 jaar + afdanking
BECO	2013	50 jaar + afdanking
Fiets en Voetgangersbruggen Eco-monitor	2025	60 jaar + afdanking

3.7 Milieu-impact Hout

De analyse van hout door de jaren heen laat evengoed als de andere materialen een wisselend beeld zien. Wederom geldt dat uitgangspunten achter de LCA bepalend zijn voor de uitkomsten.

Hoeveelheid Azobé	
IBR 2012	6400kg per brug
TU-Delft 2012	Niet teruggerekend
BECO 2013	12700kg
Eco Monitor 2025	8050kg

Tabel 8: Hoeveelheden hout in de verschillende onderzoeken

De verschillen in hoeveelheid hout alleen kunnen niet de significante verschillen in totale MKI verklaren.

Het hout is in vrijwel alle gevallen Azobé, een veelvuldig gebruikte houtsoort met goede mechanische eigenschappen en zeer bestand tegen houtrot. Niettemin wordt voor de levensduur uitgegaan van 25 jaar, behalve in het Eco Monitor rapport. Daar wordt uitgegaan van 30 jaar. Het verschil met andere rapporten is als volgt:

Aantal keer houten brug gerekend	
IBR 2012	2x
TU-Delft 2012	3x
BECO 2013	2x
Eco Monitor 2025	2,3x

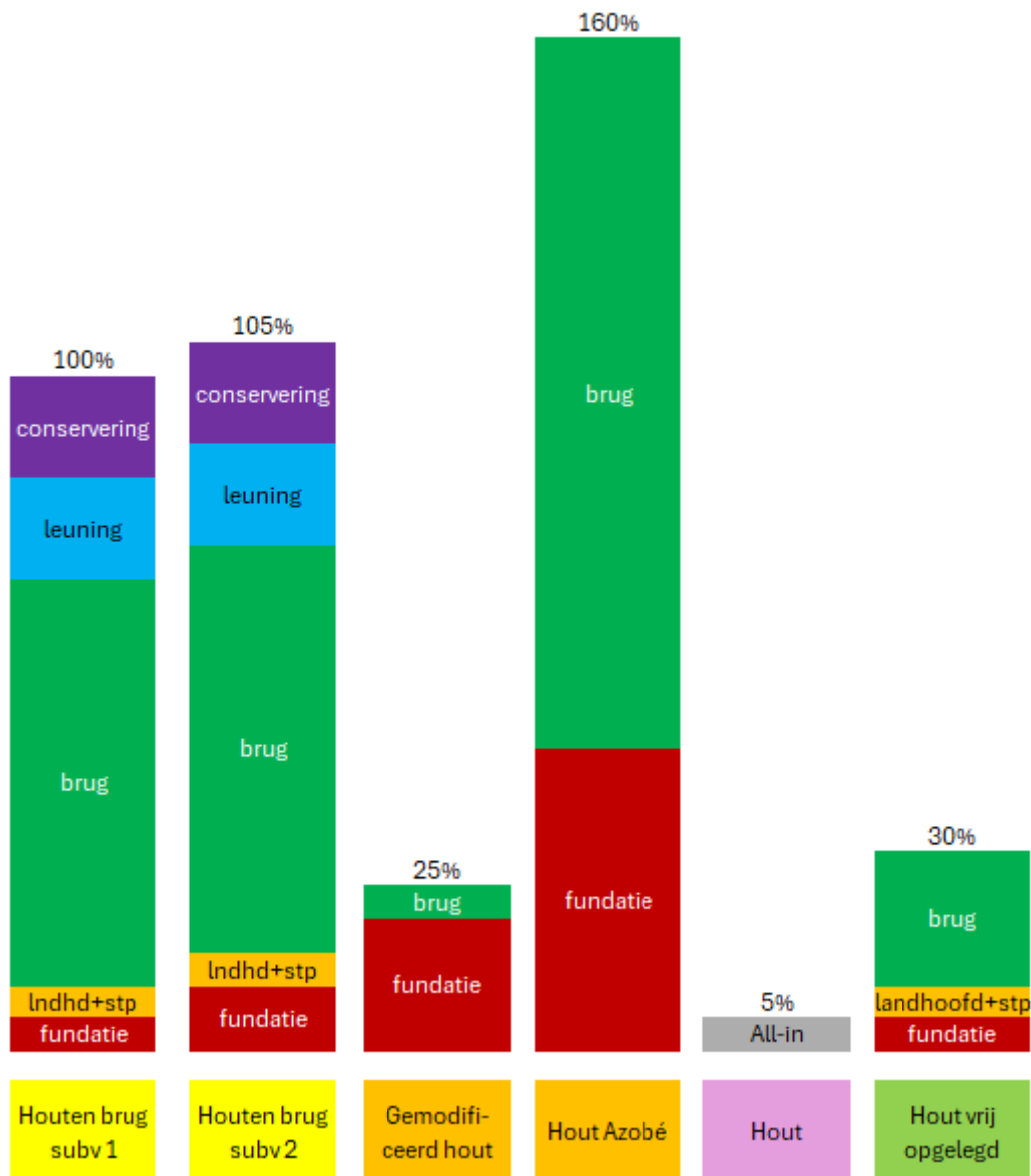
Tabel 9: Aantal keer dat de levensduur van een houten brug is gerekend in de verschillende onderzoeken

De verschillen in hoeveelheden in tabel 9 is niet afdoende om de significante verschillen in totale MKI te verklaren.

Bij het opstellen van het BECO-rapport kon niet worden uitgegaan van de NMD, omdat er nog geen data beschikbaar was voor tropisch hardhout. Om deze reden heeft Centrum Hout Beco gevraagd een inventarisatie te maken van de keten van Afrikaans tropisch hardhout en met name Azobé hout. Mogelijk ligt hierin een verklaring opgesloten.

Alleen in het rapport van de TU-Delft (2012) is onderzocht wat de impact van is van het gebruik van gemodificeerd Europees zacht hout. In het onderzoek is aangenomen dat er 15% meer hout nodig is ten opzichte van een ontwerp in tropisch hardhout vanwege de lagere mechanische eigenschappen. Het verschil in MKI is groot. Zo groot dat nader onderzoek gewenst is om te bevestigen of dit gerapporteerde verschil in MKI realistisch is.

Een groot voordeel van houtbouw is dat het voor een langere tijd CO₂ vastlegt dat tijdens de groei van de bomen is opgenomen. In de huidige methodiek is deze biogene opslag in hout (en andere biobased materialen) nog onvoldoende geborgd. Merk op dat het opgeslagen CO₂ weer vrijkomt op het moment dat hout wordt verbrand.



Figuur 9: Vergelijk onderzoeken houten bruggen

Rapport 1-1_parkbruggen durzaam_v2_Binder	2012	50 jaar + afdanking
Ontwerpen duurzame bruggen	2013	75 jaar + afdanking
BECO	2013	50 jaar + afdanking
Fiets en Voetgangersbruggen Eco-monitor	2025	60 jaar + afdanking

4 Aandachtspunten MKI-systematiek

Het milieu en het leefklimaat liggen onder zware druk. De noodzaak om te verduurzamen is hoog. De transitie naar een duurzamere samenleving treft alle onderdelen van de maatschappij en dus ook de gebouwde omgeving. De overgang naar een andere manier kan werken kan grote economische gevolgen hebben voor zowel gevestigde als opkomende industrieën. De impact kan zo groot zijn dat het ook politieke implicaties heeft. Daarom is er behoefte aan een zuivere en eenduidige manier om de milieueffecten van verschillende manieren van werken te kwantificeren. De Milieu Kosten Indicator (MKI) wordt in Nederland als de meest voor de hand liggende methode gezien. Het omvat alle relevante milieueffecten, samengevat in één getal. De MKI baseert zich op EPD's, welke weer gebaseerd zijn op de LCA-methodiek. Om de MKI op projectniveau te bepalen kan een bouwwerkberekening worden gemaakt (bijv. in de tool DuboCalc).

De methodiek van het opstellen van een LCA is genormeerd en kan als eenduidig kan worden beschouwd. Er zijn echter een aantal factoren die moeilijk beheersbaar zijn en die een significant effect kunnen hebben op de uitkomsten van de LCA en daarmee de MKI-waarde:

- Kwaliteit van de data achter de LCA (actueel, compleet, etc.)
- Allocaties van milieueffecten (op basis van economische en/of fysieke eigenschappen)
- Weegsets
- Beschouwde levensfasen
- Beschouwde referentieperiode
- End-of-life scenario's
- Expertise opstellers

In zijn algemeenheid geldt dat wat je in een model stopt (de kwaliteit van de data), bepalend is voor de uitkomst. Rotterdam heeft sinds 2011 verschillende rapporten laten opstellen naar de MKI van parkbruggen. Daaruit komt een beeld naar voren van sterk wisselende uitkomsten tussen de verschillende onderzoeken. Hoewel er verschillen zijn in de gehanteerde materiaal-hoeveelheden kunnen deze alleen niet de grote verschillen verklaren. Deze zijn toe te schrijven aan de gehanteerde database en de daarin beschikbare informatie en aan de gehanteerde einde-leven scenario's. Het is in veel gevallen niet mogelijk om terug te kijken naar wat de beschikbare informatie was ten tijde van het opstellen van de oude rapporten. Ook komt milieuwinst van circulair bouwen niet altijd tot uiting in de bepaling van de MKI.

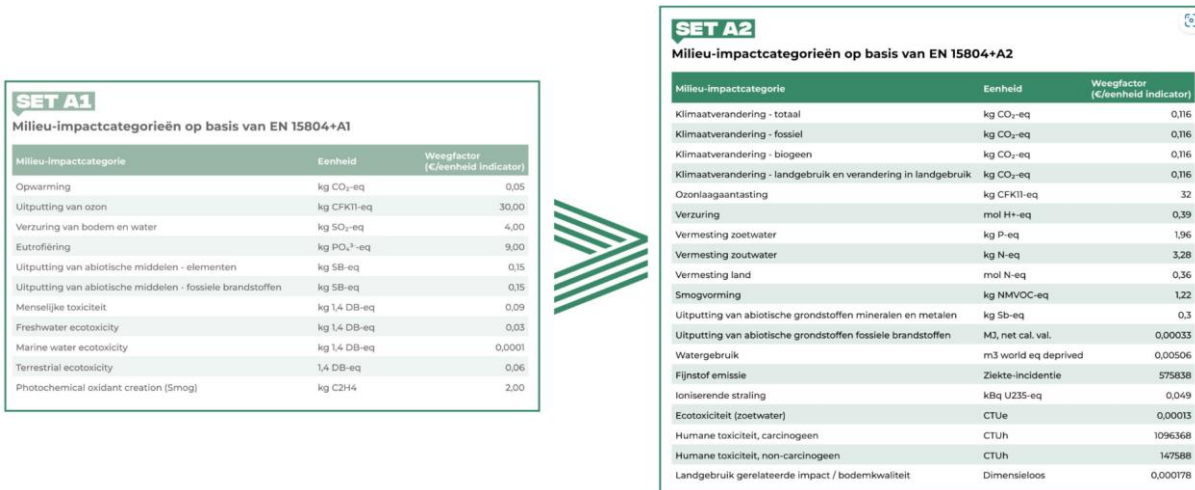
Interessant voorbeeld is de MKI van de paalfunderingen in het Eco-Monitor rapport. De NMD, waar het rapport op is gebaseerd, heeft kentallen voor constructief beton en voor constructiestaal. Voor wat betreft het staal geldt dat het constructiestaal dat voor de stalen brug is beschouwd volgens het in de NMD opgenomen EPD voor 95% uit secundair staal bestaat. Voor de stalen buispalen is een ander EPD beschikbaar dat er vanuit gaat dat het staal voor 16% uit secundair materiaal bestaat. Daarmee kan (ten dele) worden verklaard waarom de impact van de fundering zo hoog is ten opzichte van de rest van de bruggen in dit rapport. Maar het betreft hier dezelfde staalkwaliteit als waar de brugdekken van worden gemaakt. Deze discrepantie zou kunnen komen doordat verschillende experts de twee EPD's

hebben opgesteld en gevalideerd. Daarbij zijn al dan niet terecht verschillende uitgangspunten gehanteerd voor de staalproductie.

De twee EPD's met deze verschillende uitgangspunten kunnen tegelijk naast elkaar bestaan in de database. Dit leidt tot zorgen over kwaliteitscontrole op de aangeboden data.

De MKI is blijkbaar zeer gevoelig. De LCA-systematiek is op zichzelf al gevoelig voor de voorgenoemde punten. Diepgaande expertise en nauwkeurige categorie 1 data zijn noodzakelijk om tot een realistische LCA te komen. Om tot de MKI te komen is zijn nog twee bewerkingen nodig, te weten (1) de weegset van de milieueffecten om tot één universele waarde te komen en (2) het opstellen van de bouwwerkberekening waarin iedere opsteller zijn/haar eigen keuze maakt voor de best passende productkaarten. Daarin hebben verschillende scenario's van de constructie ook effect in op de MKI-score. Een en ander maakt dat de bewijslast voor middelgrote en kleine projecten significant is. Een globale bepaling van de MKI-score geeft niet een voldoende realistisch beeld van de integrale duurzaamheid.

In 2026 zal een wijziging van de Bepalingsmethode in werking treden, waarbij Ecoinvent 3.9.1. vereist zal worden voor het aanleveren van 'set A2' data. De nieuwe weegset A2 zal uitgebreid worden naar 19 milieu-impactcategorieën, ten opzichte van de 11 huidige milieu-impactcategorieën (figuur 10). Nieuwe categorieën zoals watergebruik, fijnstof, ioniserende straling en landgebruik worden geïntroduceerd. Weegset A2 zal daarnaast hogere milieulasten toekennen aan CO₂-emissies (Global Warming Potential, GWP). Wat gunstiger zal zijn, is dat CO₂- (biogene) opslag zal worden meegerekend en dat toxiciteit (bijvoorbeeld van metalen zoals aluminium of koper) minder zwaar zal meewegen. Al met al zullen de milieukosten van producten significant stijgen. Er wordt verwacht dat de MKI van weegset A2, 1.5 tot 2 keer hoger zal worden dan eenzelfde MKI die is gebaseerd op weegset A1. Het rapport van Eco-Monitor is gebaseerd op weegset A1. Ook weegset A2 heeft aandachtspunten die al worden onderkend. Zo wordt de opslag van CO₂ in biogeen materiaal beloond in de eerste fasen van de levenscyclus, waardoor biogeen materiaal beter zal scoren. Maar als fase D wordt meegerekend met als uitgangspunt verbranding of stort, zal de winst van de aanlegfase worden opgeofferd, omdat het CO₂ dan weer vrij zal komen. Dit uitgangspunt is niet in lijn met de beoogde circulaire economie van 2050.



Figuur 10: Verschillen tussen weegsets A1 en A2

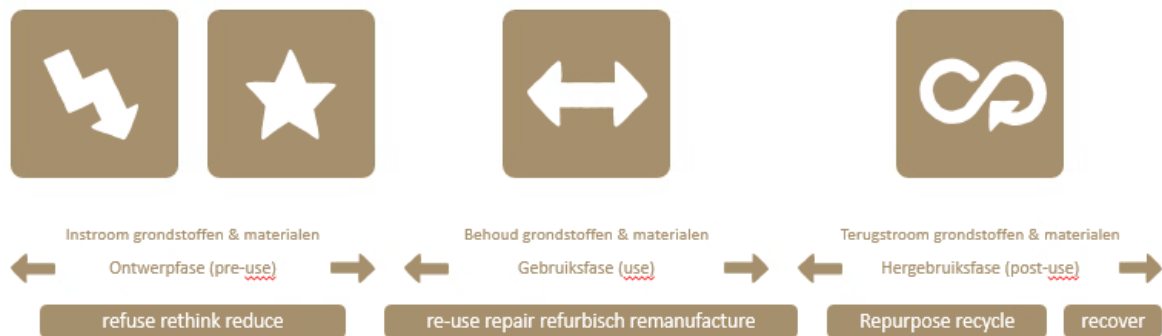
Gezien bovenstaande aandachtspunten bestaat er momenteel veel discussie over de termijn waarop opdrachtgevers duurzaamheid willen nastreven of belonen. Er is namelijk een duidelijk verschil tussen duurzaamheid op de korte en de lange termijn, wat onder andere zichtbaar is in de waardering van composietmaterialen en biobased of biogene materialen. Daarnaast is er discussie over de vraag of biogene CO₂-uitstoot wel of niet mag worden afgetrokken van de totale CO₂-emissie van een project. Terwijl sommige benaderingen biogene CO₂ als klimaatneutraal beschouwen en dat als zodoende willen waarderen, wijzen anderen op de onzekerheden rondom hergroei, tijdshorizon en landgebruik, waardoor de klimaateffecten van biogene materialen genuanceerder liggen.

Stadsbeheer en Stadsontwikkeling worden geacht uitvoering te geven aan de beleidsdoelstellingen van het college van B&W. Als de MKI als maatgevend criterium wordt gebruikt is het zeer wel mogelijk dat binnen enkele jaren de consensus is dat er verkeerde keuzes zijn gemaakt, dat er bijvoorbeeld is ingezet op een verkeerde ontwikkeling. Het is zorgwekkend dat in de afgelopen 14 jaar nog geen consensus is gebouwd over de MKI van conventionele materialen beton, staal en hout, laat staan nieuwe materialen zoals onder meer vezelversterkte kunststoffen en diverse nieuwe biobased materialen. Er is geen reden om aan te nemen dat de ontwikkelingen inmiddels voorbij zijn. Deze cyclus van constant hernieuwde inzichten maakt de MKI volatiel, onderhevig aan constante significante wisselingen.

Hoewel de MKI waardevol kan zijn als signaalfunctie—bijvoorbeeld om inzicht te geven in waar de milieubelasting binnen een ontwerp ligt—is het instrument onvoldoende geschikt om op *zichzelf* oplossingen met elkaar te vergelijken en daar besluiten op te baseren. De MKI is afhankelijk van aannames en context, waardoor vergelijkingen tussen fundamenteel verschillende ontwerpen (zoals bij de parkbruggen) misleidend kunnen zijn. De MKI kan richting geven aan waar verdere analyse nodig is, maar mag niet worden verward met een absolute maatstaf voor duurzaamheid.

5 Handelingsperspectieven duurzame bruggen

Rotterdam Circulair heeft op basis van de R-ladder (zie bijlage C) vier principes gedefinieerd om circulair te bouwen. Zoals genoemd in de inleiding zijn dit **Minder, Beter, Langer en Opnieuw**. De principes zijn universele waarheden die altijd relevant zijn. Het uitgangspunt hierbij is dat circulair bouwen leidt tot duurzaam bouwen.



Figuur 11: Principe Rotterdam circulair naast de R-ladder

Het Bouwwaardemodel (zie bijlage D) is een denkmodel ter ondersteuning van de overgang naar een circulaire bouwconomie. Het model, dat vijf niveaus bestrijkt, van systeem- en gebruiksniveau tot materialen- en grondstoffenniveau, is gericht op het behoud en de creatie van waarde gedurende de gehele levenscyclus van bouwwerken. Het biedt inzicht in samenwerking tussen verschillende actoren in de bouw tijdens de fasen van waardecreatie, zoals nieuwbouw, gebruiksfase en hergebruiksfase, bijvoorbeeld de sloop van een bouwwerk. De vier circulaire principes zijn ook terug te vinden in het Bouwwaardemodel. **Minder** en **Beter** bevinden zich primair aan de linkerkant (waardecreatie), waar keuzes worden gemaakt voor minder materiaal en betere materialen. Aan de rechterkant bevindt zich het principe **Langer** (waardebehoud), met als doel de levensduur van bouwwerken te verlengen. Het principe **Opnieuw** verbindt beide zijden met elkaar.

In de volgende paragrafen wordt per principe in algemene termen uitgelegd hoe in ontwerp en beheer invulling kan worden gegeven aan de vier circulaire principes.

5.1 Duurzaamheid in civiele projecten

Infrastructuur, waar civiele kunstwerken deel van uitmaken heeft een notoir lage tolerantie tegen verlies van beschikbaarheid. Het uitvallen van een verbinding heeft significante overlast, economische schade en ook milieuschade tot gevolg. Hoe belangrijker de constructie, des te groter zijn de gevolgen. Civiele kunstwerken dienen dus nagenoeg altijd beschikbaar te zijn tijdens de beoogde levensduur. Ook zijn civiele kunstwerken bijzonder duur. Ook buitensporig onderhoud leidt tot hoge kosten en veel overlast. De welvaart van een land kan worden afmeten aan de aanwezige infrastructuur en de staat van de infrastructuur. Deze twee aspecten; beschikbaarheid en kosten vormen samen een belangrijk kader waarbinnen duurzaamheid moet worden gevonden. De onderstaande principes dienen ook altijd te worden toegepast binnen dit kader. Hoe zwaar het kader precies weegt en welke ruimte er binnen het kader is om duurzaam te bouwen volgt uit afstemming tussen de ingenieur en de opdrachtgever.

5.2 Circulair principe “Minder”

Dit circulaire principe richt zich op het minimaliseren van de hoeveelheid materiaal en energie die in bouwprojecten worden gebruikt. Hoeveelheden materiaal zijn te beperken door:

- Niet (ver)bouwen wat niet nodig is
- De juiste functie en vorm
- Materiaal optimaal inzetten
- Lichtgewicht bouwen
- Ontwerpen met een lange levensduur
- Ontwerp en onderhoud optimaliseren voor een zo lang mogelijke levensduur
- Demontabel ontwerpen
- Adaptief ontwerpen
- Inzet materieel in tijdsduur/type/soort

Per project kunnen de mogelijkheden tot het minderen van materiaal en energie verschillen. Per project dient dan ook een afweging te worden gemaakt welke opties geschikt zijn.

Het kan voorkomen dat **Minder** op gespannen voet staat met **Beter**. Interessante casus zijn de twee houten viaducten in Sneek. Over het algemeen is de consensus dat Europees geteeld constructiehout zeer beperkte milieu-impact vertegenwoordigt. Daarmee bouwen is in principe wenselijk. Het viaduct Krúsak is gebouwd in 2008 met Europees geacetyleerd hout. Wat opvalt is dat om een viaduct voor zwaar wegverkeer te kunnen maken er bijzonder veel hout is gebruikt. Ook waren er nieuwe constructietechnieken nodig, zoals het voorspannen van de houten liggers. Een andere materiaalkeuze had geresulteerd in minder materiaalgebruik. Verder is het zo dat na 17 jaar dienst de brug in zijn geheel is verwijderd (er is een tijdelijke brug geplaatst) om te worden gerenoveerd. Hier zijn significante hinder en kosten mee gemoeid. De vraag is in dit geval of er sprake is van een optimale materiaalkeuze. Een optimale materiaalkeuze balanceert de verschillende belangen (waaronder duurzaamheid) met elkaar.



Figuur 12: Viaduct Krúsak te Sneek

5.3 Circulair principe "Beter"

Beter materiaal betreft materialen die gegeven bepaalde mechanische eigenschappen een lagere milieu-impact hebben dan conventionele materialen. Dat kan op verschillende manieren. Een bouw materiaal:

- Is (deels) gebaseerd op hernieuwbare (biologische) grondstoffen
- Is (deels) secundair materiaal
- Bestaat uit alternatieve primaire grondstoffen met lagere milieu-impact

Merk op dat biobased materialen en recyclaten relatief lage mechanische eigenschappen kunnen vertonen, hetgeen tot aanpassingen in het brugontwerp leidt. Voorbeelden van **Beter** zijn alternatieve betonsoorten voor dragende constructies (Brug Slaghaam) en biobased composiet (vlonderbruggen Heemtuin).



Fig 13: Brug Slaghaam



Fig 14: Vlonderbrug Heemtuin

5.4 Circulair principe "Langer"

Gericht en tijdig beheer van de constructie kan de levensduur significant verlengen. Premature afschrijving door gebrekkig onderhoud staat gelijk aan kapitaalvernietiging en veroorzaakt extra milieubelasting door groot onderhoud, renovatie of vervanging dat voorkomen had kunnen worden.

In de projecten kan daarmee rekening worden gehouden door:

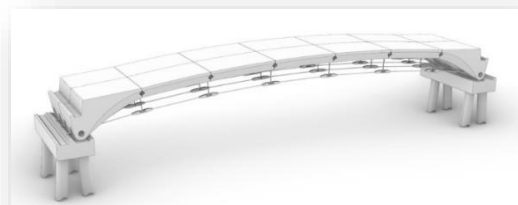
- De (on)mogelijkheden van de beheerorganisatie in ogenschouw te nemen bij het ontwerp
- Duurzaamheid in beschouwing bij detaillering ontwerp (vb: houtbouw)
- Onderhoud eenvoudig te maken door goede toegang en korte handelingen te faciliteren
- De constructie goed inspecteerbaar te maken.
- Inzetten op non-destructieve inspectiemethodes
- Constructie-elementen losmaakbaar ontwerpen zodat een slecht onderdeel niet tot af afschrijven van de gehele constructie leidt.
- Constructie aanpassen waar mogelijk, al dan niet met gebruik making van innovatieve lichtgewicht technieken.

Door modulaire bouw en standaardisering toe te passen kunnen onderdelen beter gerepareerd en hergebruikt worden.

5.5 Circulair principe "Opnieuw"

Het principe van **Opnieuw** verwijst naar het opnieuw gebruiken en zo hoogwaardig mogelijk recycleren van materialen. In plaats van materialen na gebruik weg te gooien, moet worden ingezet op oogsten, herstellen en hergebruiken of recycleren. Dit vereist een goed systeem van materiaalbeheer en hergebruiks- en recyclinginfrastructuur, evenals bewustzijn bij alle belanghebbenden om deze benadering te omarmen. Om materialen goed opnieuw te kunnen gebruiken, moeten onderdelen te scheiden zijn in zuivere stromen. Daarnaast moet het helder zijn van welk materiaal onderdelen gemaakt zijn om ze in de juiste recyclestroom onder te brengen. Uiteraard moet er ook een toepassing gevonden worden voor het gerecyclede materiaal zodra het geoogst is. De volgende handelingsperspectieven gelden:

- Lichtgewicht en/of demontabel bouwen vereenvoudigen hergebruik van materialen met een lange levensduur (zoals composiet)
- Inzetten op beoordeling vrijkomende constructie-elementen met oog op hergebruik
- Constructies en/of onderdelen herstellen en opnieuw gebruiken waar mogelijk
- Materialen paspoort introduceren bij nieuw op te leveren constructies
- Materiaalketens schoon houden met oog op hoogwaardige materiaalrecycling
- Procesinnovatie d.m.v. clustering van brugvervangingen



Figuur 15: Render modulaire boogbrug

De modulaire boogbrug van ENS-engineers is een goed voorbeeld van het ontwerp zo opstellen dat hergebruik mogelijk is. Diverse betonblokken worden droog gestapeld waarmee een modulaire brug wordt gecreëerd die in lengte en breedte aanpasbaar is. Bij einde levensduur of einde gebruik kan de brug worden gedemonteerd en kunnen de blokken opnieuw elders worden ingezet. Doordat deze brug geen wapening nodig heeft kan gemakkelijk alternatief beton worden gebruikt en gaat de brug in potentie bijzonder lang mee, omdat er geen betonrot kan optreden. Zo scoort de brug ook goed op **Beter** en **Langer**.

Los van bovenstaande handelingsperspectieven valt of staat het opnieuw gebruiken van constructies of onderdelen met een goed systeem van opslag en het matchen van vraag en aanbod. Vooralsnog is er binnen de gemeente geen goed systeem aanwezig dat deze functie kan vervullen.

In tegenstelling tot de MKI kan circulariteit eenvoudig worden gestimuleerd (en gecontroleerd) door een percentage hergebruik als eis op te nemen in aanbestedingsstukken. Dit kan de vorm aan nemen van een percentage van de materiaalkosten, een massa-percentage of iets anders. De optimale keuze verschilt per project.

5.6 Volgordelijkheid

De vier principe kunnen met elkaar op gespannen voet staan. Er is dan ook sprake van een volgordelijkheid in het systeem. In aansluiting op de R-ladder moet eerst worden geprobeerd zoveel mogelijk materiaal, en -energiegebruik zoveel mogelijk te voorkomen. Voor zover er toch werkzaamheden moeten worden gedaan moet het gebruikte materiaal en/of het materieel beter zijn voor het milieu (en het klimaat). Wanneer een project eenmaal is gerealiseerd is het van het hoogste belang om de constructie zo lang mogelijk in stand te houden. Bij het einde technische of functionele levensduur geldt dat de constructie zoveel mogelijk moet worden hergebruikt.

De volgorde van belang bij duurzaamheidsafwegingen is dus:

1. Minder
2. Beter
3. Langer
4. Opnieuw

6 Gebruik van de MKI

De MKI-score komt voort uit de LCA-systematiek. LCA-analyses kunnen naast MKI ook worden gebruikt om allerlei andere milieueffecten te berekenen. Zoals eerder onderbouwd is de LCA bijzonder gevoelig voor wijzigingen in uitgangspunten, database, levensduurscenario's, etc. Bovendien is het lastig om voordelen zoals de losmaakbaarheid, aanpasbaarheid en dergelijken te verdisconteren in de LCA.

De MKI alleen mag geen dominante parameter zijn in het beoordelen van de duurzaamheid van een project, constructie of bouwactiviteit.

De MKI-score moet naast een kwalitatieve beschouwing worden gebruikt in een integrale duurzaamheidsbeschouwing. Deze kan gebaseerd en gewaardeerd worden op basis van:

1. De vier principes van Rotterdam: 'beter', 'minder', 'langer' en 'opnieuw' (zie hst. 5)
2. De R-ladder (zie bijlage C)
3. Het Bouwwaardemodel (zie bijlage D)

De integrale duurzaamheidsbeschouwing dient aan expert opinie te worden onderworpen om tot een uitspraak te komen over de duurzaamheid van het project.

De MKI-score kan in deze drie opties worden gebruikt om te bepalen waar de zwaartepunten van de beoogde oplossing zitten qua milieu-impact en waar mogelijk nog optimalisaties kunnen worden doorgevoerd. In dat geval heeft de MKI een signaalfunctie. Een hoge MKI-waarde van een onderdeel geeft aanleiding tot een nadere beschouwing. Daarbij wordt opgemerkt dat hoe kleiner de scope is hoe nauwkeuriger de resultaten zijn.

Bij het gebruik van de MKI dient de opdrachtgever duidelijk voor te schrijven:

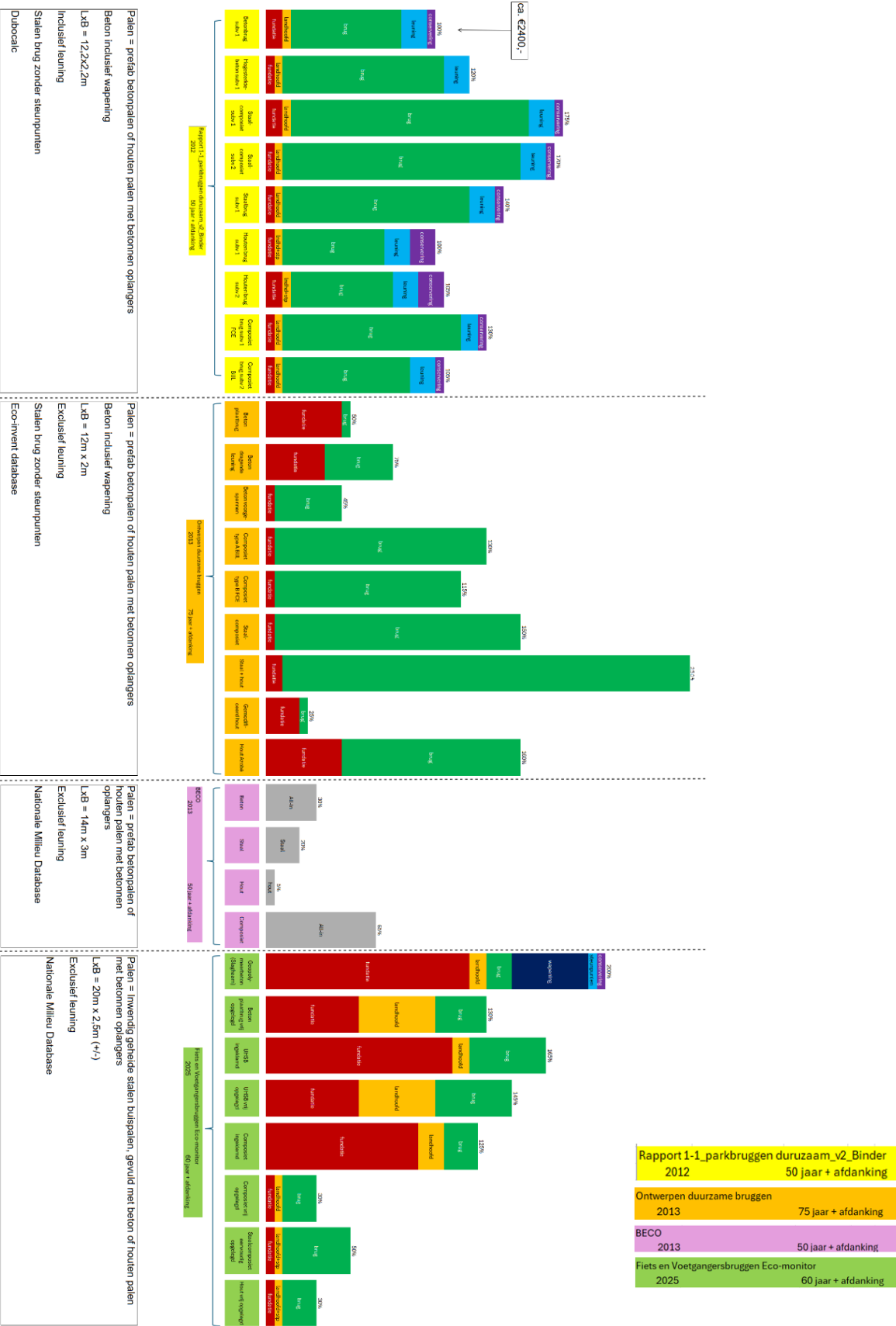
- De database en versie
- De scope
 - o Hoe kleiner de scope hoe kleiner de impact van diverse onzekerheden en uitgangspunten zijn en hoe nauwkeuriger de uitkomst. Dat staat echter op gespannen voet met de notie dat een project LCA de voorkeur verdient boven een product LCA
 - De meeste duurzaamheidswinst is te halen door het ontwerp van de constructie (inclusief een gegarandeerde levensduur) binnen scope van de LCA te houden. Dat betekent soms dat een aanbidding met een hogere MKI/ton of MKI/m³ aan de voorkant toch de voorkeur verdient, terwijl er sprake mogelijk ook sprake kan zijn van een slankere constructie (minder materiaal) en/of een langere levensduur. Een langere technische levensduur en een gunstig milieuprofiel gaan meestal goed samen.
- De beschouwen levensduur
- Het einde levensduurscenario

Bijlage A – Planning wetstraject sturende MKI

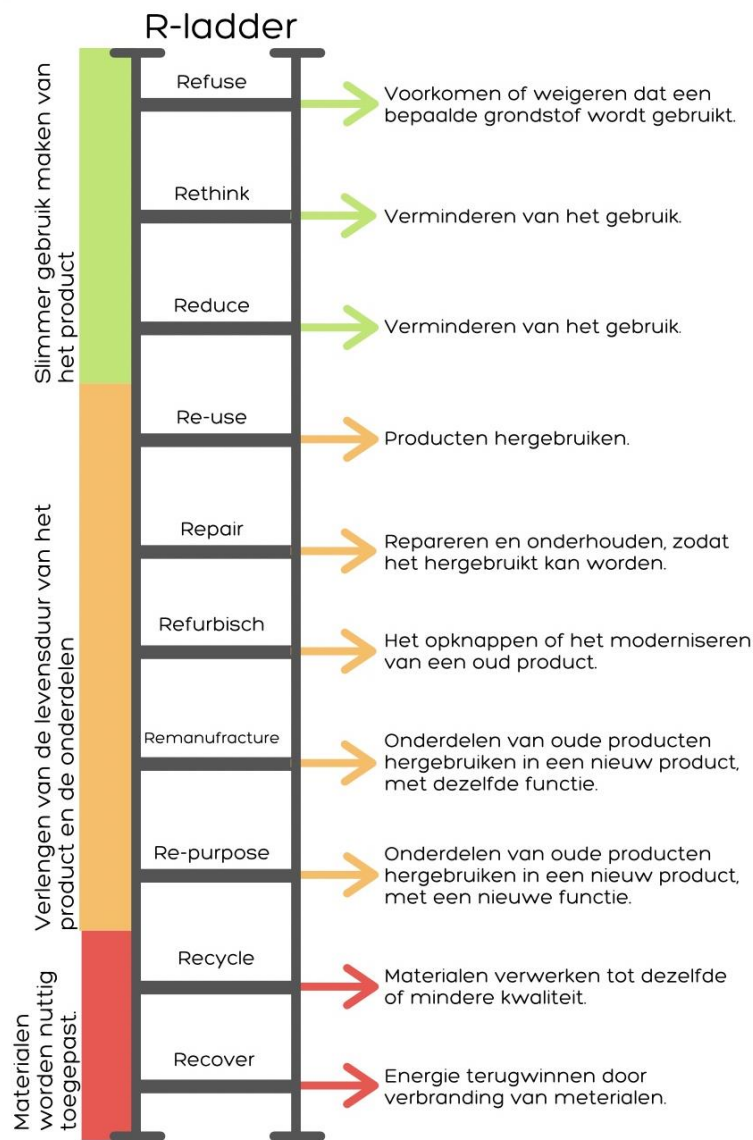
Maanden	2025												2026												2027																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8																
Voorbereiding Wetstraject	Verdere uitwerking wetsvoorstel (in 2024 begonnen)												Verdere uitwerking AMVB en MR																																			
1																																																
1	Formeel wetgevingstraject												Toetsen + Internet- consultatie (3-4 mnd)				Ambtelijke voor- portalen (10 wk)				Raad van State (3-4 mnd)				Tweede Kamer (4-6 mnd)				Eerste Kamer (2-4 mnd)				Bekendmaking + Inwerkingtreding (1 mnd)															
1	Prestatie-eisen voor beton staal en asfalt												Oprichten commissies				Opstellen prestatie-eisen - Bekendmaking bij A - Ingangsdatum A+2 jaar				A																											
2	Expertisecentrum												Oprichting en vullen met eerste relevante informatie												Verdere uitrol																							
3	Borgen randvoorwaarden																																															

Planning van het voorbereiden en toetsen van het wetsvoorstel voor een sturende MKI, Waarschijnlijk wordt de sturende MKI in 2027 wettelijk verplicht.

Bijlage B – Vergelijk MKI-waardes alle rapporten



Bijlage C – R-ladder



Bijlage D – Bouwwaardemodel

