

## KETENANALYSE

# CO2-ontwerptool voor circulaire brugdekken

Ketenanalyse voor de CO2 Prestatieladder

Status: S0/P01.01

Datum: 19-4-2022



**HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.**

Laan 1914 no.35  
3818 EX Amersfoort  
Mobility & Infrastructure  
Trade register number: 56515154

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

Titel document: CO2-ontwerptool voor circulaire brugdekken

Sub titel: Ketenanalyse voor de CO2 Prestatieladder  
Referentie: BC1049-MI-RP-220420-1131  
Status: P01.01/S0  
Datum: 19-4-2022  
Auteur(s): Jasper Roosendaal

Opgesteld door: Jasper Roosendaal  
(Royal HaskoningDHV)

Gecontroleerd door: Marianne Blom  
(Antea Group)

Datum: **XX-XX-XXXX**

Classificatie

Open

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Methode</b>	<b>2</b>
2.1	Functionele eenheid en scope	2
2.2	Ketenomschrijving en systeemgrenzen	3
2.3	Ketenpartners	4
2.4	Dataverzameling, validatie en methode CO <sub>2</sub> -emissieberekening	5
2.5	Casus: Circulaire brug uit hergebruikt staal	5
<b>3</b>	<b>Levenscyclusinventarisatie (LCI)</b>	<b>6</b>
3.1	Algemene uitgangspunten ontwerp: stalen brugdek	6
3.2	Productiefase A1-A3	6
3.3	Bouwfase A4-A5	7
3.4	Gebruiksfase B1-B5	7
3.5	Sloop- en verwerkingsfase C1-C4	7
3.6	Volgende productiesysteem D	8
<b>4</b>	<b>Levenscyclusanalyse (LCA)</b>	<b>9</b>
4.1	Resultaten	9
<b>5</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>10</b>
5.1	Conclusies	10
5.2	Aanbevelingen en reductiemaatregelen	10
<b>6</b>	<b>Referenties</b>	<b>11</b>
<b>7</b>	<b>Appendix A</b>	<b>11</b>

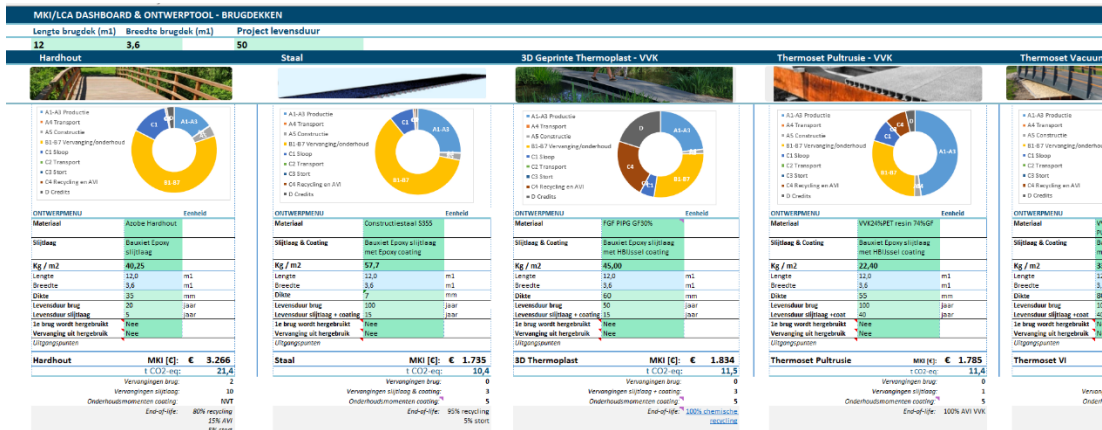
# 1 Inleiding

## Nut en noodzaak

In de komende decennia staan Rijksoverheid en Nederlandse gemeenten voor een miljardenopgave als het gaat om de renovatie en vervanging van bruggen, kleinere bruggen vertegenwoordigen het merendeel van deze vervangingsopgave. Het is van groot belang dat deze vervangingsopgave gepaard gaat met zo min mogelijk CO<sub>2</sub>-emissies. Om die reden heeft Royal HaskoningDHV (RHDHV) een innovatieve oplossing bedacht in de vorm van een slimme CO<sub>2</sub>-ontwerptool voor brugdekken voor het maken van duurzame keuzes in de ontwerpfase van bruggen. De CO<sub>2</sub>-ontwerptool maakt gebruik van parametrisch opgestelde ketenanalyses waarmee duurzame en circulaire brugdekken ontworpen kunnen worden voor fietsers en voetgangers. Resultaten van de ontwerptool worden uitgedrukt in totale CO<sub>2</sub>-uitstoot en Milieukosten Indicator (MKI) en zijn rechtstreeks gekoppeld aan het dashboard van de tool.

## Parametrisch ontwerpen

Via de invoerinterface kunnen ontwerpers diverse keuzes maken met betrekking tot de omvang en maten van het brugdek, de benodigde prestaties in termen van levensduur van het brugdek en de mate waarin circulaire economie wordt toegepast. Circulaire keuzes hebben betrekking op de toepassing van hergebruik bij het inkopen van brugdekken en voor hergebruik bij einde levensduur. In het ontwerpproces wordt ook gekeken naar de inzet van materialen uit recycling of die goed recyclebaar zijn bij einde-leven. Figuur 1 laat een screenshot zien van de CO<sub>2</sub>-ontwerptool.



Figuur 1. Screenshot CO<sub>2</sub>-ontwerptool Circulaire Brugdekken

De vijf startontwerpen, op basis waarvan ontwerpers keuzes kunnen maken, zijn:

1. Houten brugdek;
2. Stalen brugdek;
3. Kunststof brugdek van 3D-geprint, gerecycled polyesterverzel versterkt met glasvezel;
4. Kunststof brugdek van polyesterverzel versterkt met glasvezel (pultrusiemethode)
5. Kunststof brugdek van polyesterverzel versterkt met glasvezel (vacuüminjectie methode)

## Inzicht en CO<sub>2</sub>-reductie

Met behulp van de CO<sub>2</sub>-ontwerptool kan RHDHV haar klanten op projectniveau bedienen met behulpzame inzichten voor het meest duurzame en circulaire brugontwerp met de laagste CO<sub>2</sub>-uitstoot. Ook kan de CO<sub>2</sub>-ontwerptool zelfstandig ingezet worden door private en publieke partijen om zo CO<sub>2</sub>-zuinig te ontwerpen. De CO<sub>2</sub>-ontwerptool dient bovendien als Proof-of-Concept en is modulair opgezet zodat geschaald kan worden naar andere relevante ketens en objecten.

### Standaardisatie en rekenmethoden

De ketenanalyses die ten grondslag liggen aan de CO<sub>2</sub>-ontwerptool zijn opgesteld conform de eisen en richtlijnen uit de Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken versie 1.0 (juli 2020) van de stichting Nationale Milieu Database (NMD). De Bepalingsmethode is gebaseerd op de ISO14040-44 standaard en de NEN-EN 15804:2012 + A1 (2013) + A2 (2019). Deze rapportage is vervolgens opgesteld volgens de richtlijnen van de Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard van het Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) zodat deze compatibel is met de CO<sub>2</sub>-Prestatieladder. De CO<sub>2</sub>-ontwerptool voor brugdekken is ontwikkeld door het Sustainability team van Royal HaskoningDHV op basis van een samenwerking tussen de business lines Mobility & Infrastructure en Industry & Buildings.

### Certificering RHDHV CO<sub>2</sub>-Prestatieladder

Om de certificering op niveau 5 van de CO<sub>2</sub>-Prestatieladder te behouden dient RHDHV aan alle eisen van de ladder (niveau 1 t/m 5) te voldoen en specifiek de eisen van de branchegerichte toelichting voor ingenieursbureaus. Om aan eis 4.A.1, 4.A.3 en 4.B.1 te voldoen moet RHDHV twee ketenanalyses van haar meest materiële indirecte (scope 3) activiteiten uitvoeren. Middels een ketenanalyse van de CO<sub>2</sub>-ontwerptool voor circulaire brugdekken kan RHDHV aantonen hoeveel CO<sub>2</sub>-reductie mogelijk is wanneer voor duurzame en circulaire ontwerpen gekozen wordt in het adviesstadium waar de ingenieurs van RHDHV een relevante rol spelen.

## 2 Methode

In dit hoofdstuk wordt beschreven op welke manier de CO<sub>2</sub>-uitstoot in de levenscyclus van de brugdekken is bepaald. Hierbij zijn de volgende stappen doorlopen:

1. Functionele eenheid en scope
2. Ketenbeschrijving en systeemgrenzen
3. Ketenpartners
4. Dataverzameling, validatie en methode CO<sub>2</sub>-emissie berekeningen
5. Casus: **Circulaire brug uit hergebruikt staal**

### 2.1 Functionele eenheid en scope

De functionele eenheid is een eenduidige referentie-eenheid waarin de CO<sub>2</sub>-emissie wordt uitgedrukt. In deze studie is gekozen voor een functionele eenheid *per stuk* (per brugdek) met een projectlevensduur van 50 jaar. Voor het uitwerken van de basisvarianten is uitgegaan van een brugdek met een lengte van 12 meter (m1) en een breedte van 3,6 m1.

De gekozen functionele eenheid maakt het mogelijk om de verschillende brugdekontwerpen als geheel te vergelijken, rekening houdende met de specifieke bewerkingen en vervangingen per project. De duurzaamheid van deze elementen moeten afzonderlijk overwogen worden.

De CO<sub>2</sub>-emissies gerelateerd aan het materiaal- en energiegebruik van de volgende objecten en activiteiten zijn meegenomen:

- Materiaal- en energieproductie brugdek, slijtlaag en coating
- Transport brugdek inclusief slijtlaag en/of coating naar bouwplaats
- Installatie brugdek
- Gebruik en onderhoud brugdek (inclusief complete vervangingen)
- Gebruik en onderhoud slijtlaag (inclusief complete vervangingen)
- Ontmanteling brugdek en verwijderen slijtlaag
- Transport verwerking materialen bij einde leven.
- Stort, recycling en/of verbranding van materialen
- Baten en/of lasten van stort, recycling en hergebruik en verbranding van materialen.

Buiten de scope vallen de andere onderdelen van de brug zoals funderingspalen en leuningwerk. Er is bewust gekozen dit buiten beschouwing te laten in verband met de parametrische schaling<sup>1</sup> van de ontwerptool. Funderingspalen en leuningwerk zijn bovendien zeer afhankelijk van de locatie en omgevingsfactoren waar een brug geplaatst moet worden.

## 2.2 Ketenomschrijving en systeemgrenzen

De levenscyclus van de brugdekken bestaan uit de volgende fasen<sup>2</sup>:

- **Productiefase:** Winning van grondstoffen, transport en productie (A1-A3);
- **Bouwfase:** Transport naar bouwplaats (A4) en bouw- en installatie (A5);
- **Gebruiksfase:** Gebruik, onderhoud, reparaties, vervangingen en verbouwingen (B1-B5)
- **Sloop- en verwerkingsfase:** Sloop (ontmanteling), transport, afvalverwerking en stort (C1-C4)
- **Volgende productiesysteem:** Baten/lasten van hergebruik, terugwinning en recycling

In figuur 2 zijn de systeemgrenzen weergegeven voor deze analyse. Er is gekozen om de levensfasen aan te houden met alle levenscyclusfasen die onderdeel uitmaken van een volledige levenscyclus, omdat hiermee het effect van circulaire maatregelen zoals hergebruik beter te meten is. Circulaire maatregelen hebben voornamelijk betrekking op fase A1-A3 en C1-C4 + D.

Productiefase			Bouwfase		Gebruiksfase					Sloop- en verwerkingsfase				Volgende productiesysteem
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	D
Winning van grondstoffen	Transport	Productie	Transport	Bouw- en installatie	Gebruik	Onderhoud	Reparatie	Vervangingen	Verbouwingen	Sloop (Ontmanteling)	Transport	Afvalverwerking	Finaleafvalverwerking	Mogelijkheden voor hergebruik, terugwinning en recycling
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Figuur 2. Systeemgrenzen (X: Module meegenomen in ketenanalyse)

### Productiefase A1-A3

De grondstof- en productiefasen bevatten CO<sub>2</sub>-emissies gerelateerd aan grondstofwinning en productie van de diverse typen brugdekken maar ook voor de slijtlagen en coatings behorende bij de verschillende varianten. Ook zijn emissies van transportbewegingen tijdens de productiefase meegenomen.

### Bouwfase A4-A5

In de bouwfase zit het transport van de materialen en objecten naar de bouwplaats inbegrepen alsmede de inzet van het benodigde materieel om de brug op locatie te installeren. Dit betreft met name de inzet van een hijskraan. De energie voor montage met handgereedschap valt buiten de systeemgrens.

<sup>1</sup> Parametrisch schalen zorgt ervoor dat wanneer andere afmetingen worden ingevuld voor brugdekken dat de LCA resultaten automatisch meebewegen.

<sup>2</sup> Fasen conform de NEN-EN 15804:2012 + A1 (2013) + A2 (2019), 'de Bepalingsmethode NMD'

### Gebruiksphase B1-B5

De gebruiksfase heeft betrekking op het onderhouden en de vervangingen die plaats vinden, zoals vervanging van de slijtlaag en onderhoud van de coating. Afhankelijk van het verschil tussen levensduur project en levensduur brug kan het voorkomen dat een brugdek in zijn volledigheid vervangen moet worden.

### Sloop-en verwerkingsfase C1-C4

Deze fase heeft betrekking op de ontmanteling van de brug, transport van de materialen naar de afval/recyclinglocatie en finale afvalverwerking (verbranding of verwerking tot her te gebruiken grondstof).

### Volgende productiesysteem D

Deze fase heeft betrekking op de baten en lasten van de sloop- en verwerkingsfase. Denk aan baten (credits) voor energierugwinning bij de verbranding van hout, uitsparing van volledig nieuwematerialen bij recycling. Door de volledige levenscyclus van een brugdek in kaart te brengen kan het effecten van hergebruik op CO<sub>2</sub>-uitstoot goed beschouwd worden.

Hergebruik van een brugdek zal lijden tot een impactbesparing (CO<sub>2</sub> =0) in de productiefase (A1-A3) en mogelijk extra emissies opleveren in de sloopfase. Dit komt door extra handelingen voor ontmanteling en mogelijk langduriger inzet van materieel. Anderzijds worden handelingen voor sloop, zoals breken, vermeden. De uitstoot van C1-C4 is daarmee afhankelijk van het specifieke project en van de gekozen variant.

Gebruikers van de tool hebben twee keuzes wanneer het aankomt op hergebruik, namelijk:

1. de keuze om gebruik te maken van circulair inkopen (beïnvloed de impact van het eerste brugdek)
2. de keuze om bij einde-leven het brugdek te ontmantelen voor circulair hergebruik (beïnvloed de impact van alle vervangingen).

## 2.3 Ketenpartners

Om tot een zo laag mogelijke CO<sub>2</sub>-emissie over de levenscyclus van brugdekken te realiseren is het belangrijk om inzicht te hebben in de belangrijkste ketenpartners en hen te betrekken bij het streven naar CO<sub>2</sub>-arme producten en processen. Ook voor het identificeren en realiseren van reductiemaatregelen is samenwerking met deze partijen van belang. De ketenpartners voor het project zijn:

- Opdrachtgevers
- Leveranciers van grondstoffen en materialen;
- Transporteurs, bouwbedrijven en aannemers;
- Architecten en engineers.

*Figuur 3. Ketenanalyse, dataverzameling en ketenpartners*



## 2.4 Dataverzameling, validatie en methode CO<sub>2</sub>-emissieberekening

Voor het berekenen van de CO<sub>2</sub>-emissies over de levenscyclus van de brugdekken zijn de volgende stappen doorlopen: **1)** Levenscyclusinventarisatie (LCI); **2)** Levenscyclusanalyse (LCA); en **3)** CO<sub>2</sub>-ontwerptool.

### 1. Levenscyclusinventarisatie (LCI)

De identificatie van de benodigde processen uit de NMD-processendatabase en kwantificatie van hoeveelheden materiaal- en energiegebruik zijn verkregen door een nauwe samenwerking tussen de engineers en brugexperts van RHDHV en LCA-experts uit het Sustainability team. Hoeveelheden zijn gebaseerd op primaire data van bestaande brugdekken en toegepaste LCA-ervaring en kennis m.b.t. de GWW-sector.

### 2. Levenscyclusanalyse (LCA)

De LCA-experts van RHDHV hebben de CO<sub>2</sub>-emissieberekening uitgevoerd en parametrisch opgesteld zodat invoer in de ontwerp-interface gekoppeld staat met de LCI. De hoeveelheden zijn variabel en rekenen automatisch door met het juiste proces uit de NMD-processendatabase. De daadwerkelijke berekeningen uitgevoerd in de ketenanalyse houden de volgende basisformule aan:

$$\rightarrow \text{Hoeveelheid materiaal/energie} \times \text{emissiefactor (NMD-proces)} = \text{CO}_2\text{-uitstoot}$$

Zorgvuldigheid is besteed aan het selecteren van de meest representatieve processen en daarmee emissiefactoren per proceseenheid.

### 3. CO<sub>2</sub>-ontwerptool

Ten slotte is de LCI dynamisch opgesteld en via formules gekoppeld aan het invoer dashboard van de CO<sub>2</sub>-ontwerptool. De LCA en CO<sub>2</sub>-emissieberekening verlopen daarmee automatisch waarmee een parametrische ketenanalyse tot stand komt.

## 2.5 Casus: Circulaire brug uit hergebruikt staal

De resultaten van de CO<sub>2</sub>-ontwerptool zijn gebaseerd zijn op de invoerwaarden per variant en staan daarom niet vast. Binnen het kader van de CO<sub>2</sub>-prestatieladder is daarom gekozen om een theoretische ontwerp-casus uit te werken zodat op concrete wijze inzicht gegeven kan worden op de werking van de tool, de kwaliteit en compleetheid van de achterliggende ketenanalyses en het effect van circulaire ontwerpkeuzes op de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot.

De casus die wordt uitgewerkt is een circulaire voetgangersbrug gemaakt van hergebruikt staal. In deze casus wordt een nieuwe stalen brugdek vergeleken met een stalen brugdek die 1-op-1 afkomstig is uit circulair hergebruik. Het circulair potentieel van bouwen met staal is hoog. In tegenstelling tot veel andere materialen kan staal in de opeenvolgende levenscycli vaak worden hergebruikt of gerecycled zonder kwaliteitsverlies en zonder materiaalverlies. De circulair ontworpen brug in Ulft is een mooi praktijkvoorbeeld van een brug waar circulair staal is toegepast: [Nieuwe hoge brug in Ulft circulair](#).

Figuur 4: Circulaire brug in Ulft





### 3 Levenscyclusinventarisatie (LCI)

Voor de ketenanalyse van het stalen brugdek in de CO<sub>2</sub>-ontwerptool is uitgegaan van gemiddelde productienormen, productsamenstellingen, materiaalgebruik, ontwerp- en praktijkkennis van deskundigen van RHDHV. De ketenanalyse kan beschouwd worden als een categorie 3 LCA binnen de richtlijnen van de Bepalingsmethode (NEN-EN 15084), versie 1.0 (NMD, juli 2020).

#### 3.1 Algemene uitgangspunten ontwerp: stalen brugdek

- Voor het ontwerp van het stalen brugdek wordt uitgegaan van een brugdek van 12 m1 lang, 3,6 m1 breed en 7 mm dik;
- Voor het gewicht en materiaal van het stalen brugdek wordt uitgegaan van 57,7 kg warmgewalst constructiestaal per m2 brugdek. Het totale gewicht van het stalen brugdek bedraagt daarmee 2493 kg constructiestaal.
- De levensduur van het stalen brugdek is 100 jaar, De levensduur van het project in de casus bedraagt 50 jaar, er treden dus geen tussentijdse vervangingen op van het brugdek;
- Het brugdek is voorzien van een bauxiet-epoxy slijtlaag en een epoxy coating. De slijtlaag en de coating worden elke 15 jaar compleet vervangen.
- De epoxycoating wordt elke 10 jaar 0,33 mm bijgewerkt.
- Over de gehele levenscyclus wordt forfaitair 3% verlies van materialen gerekend voor prefab producten.

#### 3.2 Productiefase A1-A3

- Voor de productie van het stalen brugdek wordt uitgegaan van 2493 kg warmgewalst constructiestaal op basis van de afmetingen en het gewicht per m2. Het constructiestaal type betreft S355 en is opgebouwd uit 4,2% primair staal en 95,8% secundair staal (afgeleid uit het NMD-proces voor warmgewalst constructiestaal).
- Het brugdek is voorzien van bauxiet-epoxyslijtlaag en een epoxycoating. Voor de slijtlaag wordt uitgegaan van een dikte van 1 mm bauxiet korrel (2550 kg / m3) en 2 mm vloeibaar epoxyhars (1100 kg / m3); Per m2 brug is aanvullend een laag epoxycoating nodig met een gemiddelde dikte van 1 mm. Omgerekend is voor de totale oppervlakte van het brugdek 105 kg bauxiet, 95 kg epoxyhars en 80 kg epoxycoating benodigd.

Tabel 1: Productiefase

Fase	Proces/materiaal	Hoeveelheid	Eenheid
Productiefase: A1-A3	Constructiestaal	2493	kg
Productiefase: A1-A3	Bauxietkorrels	105	kg
Productiefase: A1-A3	Epoxyhars	95	kg
Productiefase: A1-A3	Epoxycoating	80	kg

#### Uitgangspunten Circulaire brug

Voor het stalen brugdek dat 1-op-1 uit hergebruik komt wordt netto 0 kg constructiestaal gerekend in A1-A3. Het materiaalgebruik voor de slijtlaag en coating blijft gelijk aan het nieuwe stalen brugdek. Wel wordt extra transport gerekend voor de afstand tussen de oude en nieuwe locatie waar het brugdek ingezet wordt. Hiervoor wordt uitgegaan van 150 kilometer extra transport met een Euro 5 vrachtwagen, 32 ton capaciteit. Deze transport beweging wordt gemodelleerd in fase A2 transport tijdens de productiefase. Demontage van het brugdek vereist geen extra handelingen voor 1-op-1 hergebruik anders dan lineaire demontage.

### 3.3 Bouwfase A4-A5

- Voor het transport naar de bouwplaats wordt uitgegaan van 150 kilometer transport (forfaitaire waarde NMD) met een Euro 5 Vrachtwagen, 32 ton capaciteit. Vermenigvuldigd met het te transporteren gewicht komt dit uit op 416 tonkilometer (tkm).
- Voor het monteren van de brug wordt uitgegaan van een hydraulische telekraan met een vermogen van 263 kWh (diesel) en een inzet van 4 uur.

Tabel 2. Bouwfase

Fase	Proces/materiaal	Hoeveelheid	Eenheid
Bouwfase: A4-A5	Transport naar bouwplaats: Vrachtwagen > 32 ton	416	tkm
Bouwfase: A4-A5	Hydraulische telekraan, 263 kWh	4	uur

### 3.4 Gebruiksphase B1-B5

- Elke 15 jaar wordt de slijtlaag volledig vervangen. Over een projectlevensduur van 50 jaar zijn dus 3 tussentijdse vervangingen nodig, na 15 jaar, na 30 jaar en na 45 jaar.
- Elke 10 jaar wordt de epoxycoating 0,33 mm bijgewerkt, na 50 jaar is er sprake geweest van 4 onderhoudsmomenten waarbij 33% wordt bijgewerkt. Op jaar 50 wordt geen onderhoud gepleegd aangezien de brug uit het werk komt.
- Per vervanging wordt één volledige cyclus aan emissies gerekend voor A1-A5, C1-C4 en D voor de desbetreffende materialen.

Tabel 3. Gebruiksphase

Fase	Proces/materiaal	Hoeveelheid	Eenheid
Gebruiksphase: B1-B5	Vervanging slijtlaag	3	Keer
Gebruiksphase: B1-B5	Onderhoud coating	5	Keer

### 3.5 Sloop- en verwerkingsfase C1-C4

- Voor demontage wordt gelijkmatig uitgegaan van 4 uur materieel inzet van een hydraulische telekraan met een vermogen van 263 kWh (diesel).
- Voor het verwijderen van de slijtlaag en epoxycoating wordt uitgegaan van hogedruk stralen met grit, per m<sup>2</sup>, in totaal 43,2 m<sup>2</sup>. Per m<sup>2</sup> hogedrukstralen wordt 20 kg grit gebruikt.
- Voor het transport naar afvalverwerking en recycling wordt uitgegaan van 50 kilometer transport (forfaitaire waarde NMD) met een Euro 5 Vrachtwagen, 32 ton capaciteit. Vermenigvuldigd met het te transporteren gewicht komt dit uit op 139 tonkilometer (tkm).
- De slijtlaag en de coating moet wegens wettelijke verplichtingen 100% gestort worden, dit in verband met mogelijke vervuiling.
- Het stalen brugdek wordt conform forfaitaire afvalscenario's voor staal voor 95% gerecycled, en 5% gestort.

Tabel 4. Sloop- en verwerkingsfase

Fase	Proces/materiaal	Hoeveelheid	Eenheid
Sloop- en verwerkingsfase: C1-C4	Hydraulische telekraan, 263 kWh	4	Uur
Sloop- en verwerkingsfase: C1-C4	Verwijderen slijtlaag en coating	43,2	m <sup>2</sup>
Sloop- en verwerkingsfase: C1-C4	Transport naar afvalverwerking: Vrachtwagen, > 32 ton	139	tkm
Sloop- en verwerkingsfase: C1-C4	Stort Slijtlaag	1144	kg
Sloop- en verwerkingsfase: C1-C4	Stort staal	125	kg
Sloop- en verwerkingsfase: C1-C4	Recycling staal	2368	kg

### 3.6 Volgende productiesysteem D

- Bij het recyclen van het stalenbrugdek worden credits gerekend voor de uitsparing van primair materiaal. Hierbij moet rekening gehouden worden met het reeds aanwezige aandeel secundair staal in het toegepaste constructiestaal. Bij het recyclen van staal wordt uitgegaan van 5% verlies.

Tabel 5. Volgende productiesysteem D

Fase	Proces/materiaal	Hoeveelheid	Eenheid
Volgende productiesysteem D	Credits recycling staal	94	kg

#### Uitgangspunten Circulaire brug

Bij einde-leven wordt niet nogmaals uitgegaan van circulair hergebruik. Er van uitgaande dat het reeds hergebruikte brugdek al één volledige levenscyclus heeft doorlopen van 5 jaar in het vorige leven maakt dat de brug op papier 100 jaar ingezet is bij einde leven van de huidige cyclus en dus een traditioneel einde-leven doorloopt gelijk aan de uitgangspunten van 3.5 en 3.6.



## 4 Levenscyclusanalyse (LCA)

De hoeveelheden materiaal- en materieelinzet, zoals geïnventariseerd per levenscyclusfase in de LCI zijn gekoppeld aan processen uit de NMD 3.4 processendatabase. Voor het benaderen van de NMD-processendatabase is gebruik gemaakt van LCA-software Simapro (versie 9.2.1, ontwikkeld door Pré-consultants). NMD3.4 processen voor categorie 3 data zijn voornamelijk opgesteld op basis van data uit de Ecoinvent 3.6 database. Ecoinvent processen zijn doorgerekend exclusief lange termijn emissies (>100 jaar), inclusief infrastructuurprocessen en kapitaalgoederen.

Voor elk van de geselecteerde NMD-processen zijn de milieueffecten per functionele eenheid geëxporteerd naar Excel. Via Excel is de dynamische LCI invoer gekoppeld aan de milieueffecten om zodoende een parametrische ketenanalyse mogelijk te maken. De totale CO<sub>2</sub>-emissies worden automatisch doorgerekend per levenscyclusfasen en in totaal voor alle levenscyclusfasen per brugdek.

CO<sub>2</sub>-emissies worden berekend in CO<sub>2</sub>-equivalenten, rekening houdende met alle broeikasgassen genoemd in het Kyoto-protocol, gestandaardiseerd volgens de rekenmethode IPCC 2021 Global Warming Potential 100 jaar.

### 4.1 Resultaten

Tabel 6 en figuur 5 geven een overzicht van de CO<sub>2</sub>-emissies per levenscyclusfase en in totaal voor beide brugdekken.

De totale CO<sub>2</sub>-uitstoot per brugdek ontwerp is als volgt:

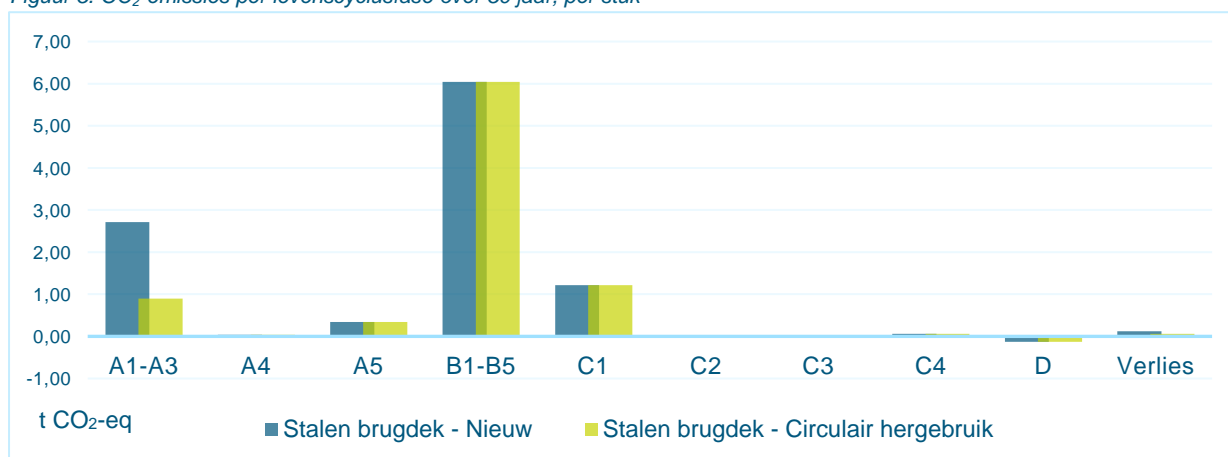
1. **Stalen brugdek – Nieuw:** **10,42** ton CO<sub>2</sub> per stuk na 50 jaar;
2. **Stalen brugdek – Uit circulair hergebruik** **8,54** ton CO<sub>2</sub> per stuk na 50 jaar.

Tabel 6. CO<sub>2</sub>-emissies per levenscyclusfase en totaal over 50 jaar, per stuk

CO <sub>2</sub> -emissieberekening	Eenheid	A1-A3	A4	A5	B1-B5	C1	C2	C3	C4	D	Verlies	Totaal
Stalen brugdek - Nieuw	ton CO <sub>2</sub> -eq	2,71	0,04	0,34	6,04	1,21	0,01	0,01	0,06	-0,13	0,12	<b>10,42</b>
Stalen brugdek - Uit circulair hergebruik	ton CO <sub>2</sub> -eq	0,90	0,04	0,34	6,04	1,21	0,01	0,01	0,06	-0,13	0,06	<b>8,54</b>

\* De gekozen processen en de emissiefactoren per processeenheid worden gedeeld in Appendix A.

Figuur 5. CO<sub>2</sub>-emissies per levenscyclusfase over 50 jaar, per stuk



## 5 Conclusies en aanbevelingen

### 5.1 Conclusies

Op basis van de resultaten van de theoretische casus kan men het volgende concluderen:

- Het toepassen van circulair hergebruik in de ontwerpfase levert voor deze casus **een CO<sub>2</sub>-besparing op van 67% in de productiefase (A1-A3)**.
- Het toepassen van circulair hergebruik levert op voor deze casus een **CO<sub>2</sub>-besparing op van 18% op de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot**.
- De meeste CO<sub>2</sub>-uitstoot komt echter van de gebruiksfase. Het 3x vervangen van de slijtlaag inclusief 5 onderhoudsbeurten van de coating staat goed voor **58% van de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot bij een nieuwe brug en 70% van de totale CO<sub>2</sub> uitstoot van de brug uit hergebruik** over een periode van 50 jaar.
- In vergelijking dragen de transportfase en afvalverwerkingsfase nauwelijks bij aan de totale CO<sub>2</sub>-emissies over een levensduur van 50 jaar.
- De CO<sub>2</sub>-ontwerptool kan waardevolle inzichten opleveren voor het duurzaam en circulair ontwerpen van brugdekken doordat deze het effect van duurzame en circulaire maatregelen op de totale milieu-impact eenvoudig en snel laat zien.

#### **Verduurzamen slijtlaag van essentieel belang voor een duurzame vervangingsopgave van bruggen**

Uit de conclusies van deze ketenanalyse wordt al snel duidelijk dat het toepassen van circulair hergebruik in de ontwerpfase van grote invloed kan zijn op de totale CO<sub>2</sub>-emissies en een besparing van bijna 70% kan opleveren.

Echter, het niet rekening houden met duurzame en circulaire ontwerpkeuzes voor de slijt- en coatingslaag kan het CO<sub>2</sub>-besparende effect van circulair hergebruik op de totale uitstoot van het brugdek significant verminderen. Het in beschouwing nemen van duurzame, circulaire alternatieven voor de slijt- en coatingslaag is daarmee van essentieel belang voor een CO<sub>2</sub>-vriendelijke vervangingsopgave van kleine bruggen in Nederland.

Voor de CO<sub>2</sub>-ontwerptool brugdekken is het duidelijk dat duurzame ontwerpkeuzes toegevoegd moeten worden voor de slijt- en coatlaag.

### 5.2 Aanbevelingen en reductiemaatregelen

De volgende aanbevelingen kunnen gemaakt worden voor het verfijnen van de ketenanalyse en de CO<sub>2</sub>-ontwerptool:

- Toevoegen van de emissies van compressoren voor het aanbrengen van slijtlaag en coatlaag, momenteel buiten beschouwing gelaten;
- Het onderzoeken van innovatieve materialen en ontwerpkeuzes van slijtingslagen en coatlagen en deze toevoegen aan de CO<sub>2</sub>-ontwerptool.
- Het toetsen van de uitgangspunten voor levensduren van de slijtlaag en coatingslaag bij slijtlaag en coatlaag experts bij desbetreffende deskundigen en experts en vervolgens een gevoeligheidsanalyse uitvoeren op de bandbreedte CO<sub>2</sub>-emissies afhankelijk van de variatie in uitgangspunten
- Naast het toepassen van circulaire reductiemaatregelen kan ook nog gekeken worden naar verduurzaming van productie, transport en materieelinzet door gebruik te maken van elektrische machines en groene stroom. Deze opties zouden toegevoegd moeten worden aan de tool.

## 6 Referenties

- LCA & GWW deskundigen:
  - Jasper Roosendaal, Sustainability, Mobility & Infrastructure, Royal HaskoningDHV Amersfoort
  - Iris Pronk, Sustainability, Mobility & Infrastructure, Royal HaskoningDHV Amersfoort
- Engineering deskundigen brugdekken en lead innovatie CO<sub>2</sub>-Ontwerptool:
  - Liesbeth Tromp, Infrastructure, Mobility & Infrastructure, Royal HaskoningDHV Rotterdam
  - Bart Jan van der Gaag, Infrastructure, Mobility & Infrastructure, Royal HaskoningDHV Rotterdam
- Simapro 9.2.1, Pré Consultants m.g.v. NMD 3.4 processendatabase met Ecoinvent 3.6

## 7 Appendix A – Gebruikte NMD processen & emissiefactoren

Materiaal / activiteit	Eenheid	kgCO <sub>2</sub> */eenheid	Bron	Referentie
Constructiestaal	kg	0,739	NMD3.4, Ecoinvent 3.6	0316-fab&Staal, warmgewalst, constructieprofielen {GLO} (4,2% primair, 95,8% secundair)
Bauxietkorrels	kg	0,027	NMD3.4, Ecoinvent 3.6	0380-fab&Bauxiet (o.b.v. Bauxite {GLO}) market for bauxite   Cut-off, U)
Epoxyhars	kg	4,959	NMD3.4, Ecoinvent 3.6	0461-fab&Epoxyhars, vloeibaar (o.b.v. Epoxy resin, liquid {RER}) market for epoxy resin, liquid   Cut-off, U)
Transport	tkm	0,085	NMD3.4, Ecoinvent 3.6	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Hijskraan	uur	85,804	NMD3.4, Ecoinvent 3.6	0121-pro&Kraan hydr.tele. band, per uur (o.b.v. 263 kWh Diesel, burned in building machine {GLO}) market for   Cut-off, U)
Verwijderen slijtlaag	m <sup>2</sup>	20,132	NMD3.4, Ecoinvent 3.6	XXXX-pro&Verwijderen slijtlaag, per m <sup>2</sup> , hogedruk stralen met grit (o.b.v. diesel compressor met zuig wagen), per m <sup>2</sup>
Stort slijtlaag	kg	<0,01	NMD3.4, Ecoinvent 3.6	0247-sto&Stort inert afval (o.b.v. Inert waste, for final disposal {RoW}) treatment of inert waste, inert material landfill   Cut-off, U) fijn-/grofkeramisch, grind, kalkzandsteen, schelpen, zand
Stort staal	kg	<0,01	NMD3.4, Ecoinvent 3.6	0253-sto&Stort staal (o.b.v. Scrap steel {Europe without Switzerland}) treatment of scrap steel, inert material landfill   Cut-off,
Recycling staal	kg	0,024	NMD3.4, Ecoinvent 3.6	0315-reC&Sorteren en persen oud ijzer (o.b.v. Iron scrap, sorted, pressed {RER}) sorting and pressing of iron scrap   Cut-off, U)
Credits recycling staal	kg	-1,329	NMD3.4, Ecoinvent 3.6	0282-reD&Module D, staal, per kg NETTO geleverd ongelegeerd schroot (World Steel methode obv Steel, low-alloyed {RER&RoW}) steel production, electric, low-alloyed   Cut-off, U - Steel, unalloyed {RER&RoW}) steel production, converter, unalloyed   Cut-off, U)

\* CO<sub>2</sub>-equivalent