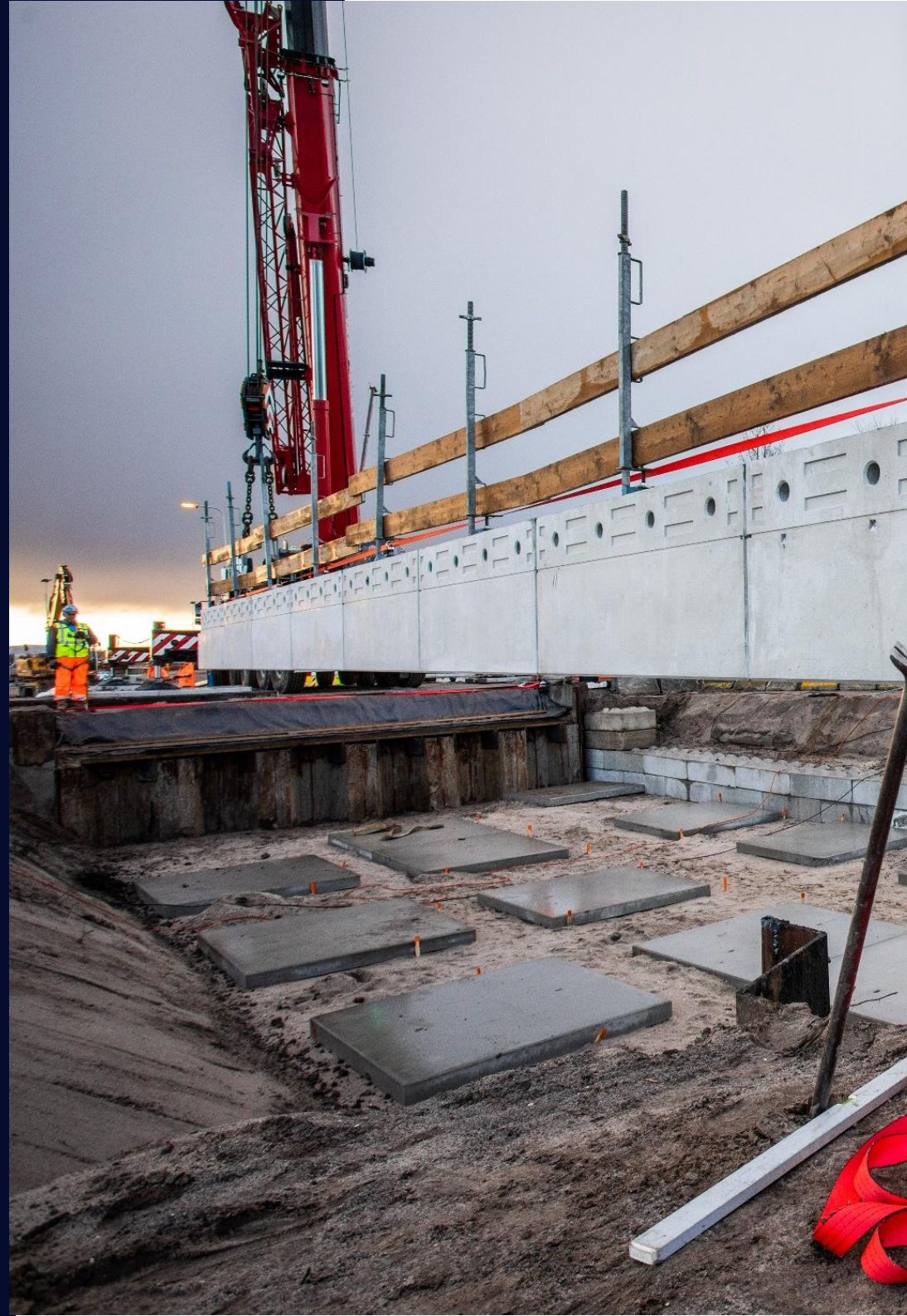


Circulair viaduct

Een LCA onderzoek naar de milieu-impact en ontwikkelmogelijkheden van het circulaire viaduct

experts in
sustainability
nibe



Project 148.0001 LCA studie Circulair viaduct

Opdrachtgever: Rijkswaterstaat
Dhr. Rob Valk



Opdrachtnemer: NIBE Research bv
Bussummergrindweg
1B
1406 NZ Bussum
(T) 035-6948233
(E) info@nibe.org
(W) www.nibe.org

experts in
sustainability
nibe

Document: 085.0005.19.11.004
Datum: 19 oktober 2019

Projectleden: Gert Jan van Beijnum
Olga van der Velde
Mantijn van Leeuwen

VERANTWOORDING

NIBE heeft dit rapport in opdracht van Rijkswaterstaat geschreven. Met het rapport willen we aan de hand van een LCA studie de potentie en ontwikkelmogelijkheden van het circulaire viaduct belichten.

INHOUD

BEGRIPPENLIJST.....	4	Material Circularity Indicator (MCI)	25
SAMENVATTING	5	7 Totaal scenario.....	26
1 INLEIDING	7	100 jaar als beschouwingsperiode.....	27
2 Onderzoeksmethode.....	8	CONCLUSIE.....	28
Uitgangspunten van de LCA studie	8	Reflectie	30
Opbouw van de studie en rapportage	9	VERWIJZINGEN.....	31
3 Milieu-impact	11		
Analyse van de productiefasen (module A1-A5).....	11		
Analyse van het basis scenario.....	11		
Parameters voor herplaatsen circulair viaduct	13		
Analyse op basis van CO ₂ footprint	14		
4 Gevoeligheidsanalyses	16		
Beschouwingsperiode 100 jaar	16		
Invloed van module D	17		
Invloed van de energietransitie.....	18		
5 Verbetermogelijkheden	20		
Geopolymeren.....	20		
Optimaliseren wapening, beton en dimensies.....	21		
Basaltwapening	22		
6 Circulariteit.....	23		
Material Flow analysis (MFA).....	23		

BEGRIPPENLIJST

Bepalingsmethode. In de bepalingmethode staat hoe we in Nederland de levenscyclusanalyse uitvoeren voor bouwmaterialen en -producten en welke milieueffecten we uitrekenen.

Circulair Viaduct. Viaduct met modulair brugdek ontwikkeld door een consortium van publieke en private partijen, waarvan een prototype gerealiseerd is door Van Hattum en Blankevoort, Consolis Spanbeton en Rijkswaterstaat. Doordat het brugdek demontabel en aanpasbaar is kan het meerdere keren worden ingezet.

DuboCalc. Door Rijkswaterstaat ontwikkelde software om de milieuprestatie van een GWW-werk uit te rekenen.

EPD – Environmental Product Declaration. Een presenteerbare en beknopte weergave van een LCA met resultaten zoals de milieueffecten en MKI.

GWW – Grond-, Weg- en Waterbouw. Afkorting die wordt gebruikt om civiele werken als wegen, bruggen, dijken en kanalen aan te duiden.

kg CO₂-eq. De eenheid waarin klimaatimpact wordt uitgedrukt: kilogram CO₂-equivalenten. Dankzij deze eenheid kan het effect van verschillende broeikasgassen in één getal worden uitgedrukt. Zo is het effect van 1 kg methaan gelijk aan 25 kg CO₂-eq.

Klimaatimpact. Het milieueffect van broeikasgassen, uitgedrukt in CO₂-eq.

LCA – Levenscyclusanalyse. In een LCA worden de milieueffecten van alle

processen en grondstoffen die nodig zijn om een product toe te passen uitgerekend, gedurende de levensduur van het product. De levensduur wordt omschreven door levensfasen, aangeduid met de nummering A1 t/m D. A1-A3 betreft de productiefase, C1-4 de sloop- en afvalfase en D de terugwinningsfase.

MCI – Material Circularity Indicator. Een door de Ellen MacArthur Foundation ontwikkelde indicator, die de mate van circulariteit van een product weergeeft.

MFA – Material Flow Analysis. Aanduiding voor de analyse van de grondstofstromen van een product of proces op recycling, hergebruik, hernieuwbaarheid en schaarste. Met als doel de mate van circulariteit van het product of proces te bepalen.

Milieueffect. Een verandering in het milieu als gevolg van een activiteit. Er zijn meerdere milieueffecten, zoals: klimaatimpact, verzuring en toxiciteit. Elk beschrijft een ander effect met een eigen eenheid.

MKI – Milieukostenindicator. Met een levenscyclusanalyse worden de milieueffecten van een materiaal, product of bouwwerk uitgerekend. Deze milieueffecten (meerdere getallen met verschillende eenheden) zijn om te rekenen tot één integraal getal: de milieukosten, in euro's.

NMD – Nationale MilieuDatabase. Database die wordt gebruikt voor het berekenen van de milieuprestatie van gebouwen en/of bouwproducten. De database bevat een groot aantal profielen van materialen en producten die vaak in de bouw voorkomen met de bijbehorende milieueffecten en schaduwkosten.

Platform CB'23. Een op initiatief van Rijkswaterstaat, Rijsvastgoedbedrijf, NEN en Bouwcampus gevormd platform voor overleg tussen partijen uit de bouwsector om tot harmonisatie te komen.

SAMENVATTING

In opdracht van Rijkswaterstaat heeft het NIBE onderzoek gedaan naar het circulaire viaduct. Het circulaire viaduct met modulair brugdek is ontwikkeld door een consortium van publieke en private partijen, waarvan een prototype gerealiseerd is door Van Hattum en Blankevoort, Consolis Spanbeton en Rijkswaterstaat. Doordat het brugdek demontabel en aanpasbaar is kan het meerdere keren worden ingezet. Het demontabele brugdek van het circulaire viaduct wordt in deze studie vergeleken met een standaard (referentie) brugdek van een viaduct van beton, uitgevoerd met prefab liggers.

In dit onderzoek stonden drie onderzoeksvragen centraal:

1. Hoe scoort het huidig ontwerp van dit circulair viaduct-concept (brugdek) qua circulariteit en qua milieu-impact in vergelijking met een regulier ontwerp?
2. Wat zijn de verbetermogelijkheden van dit circulair viaduct-concept qua circulariteit en milieu-impact en hoe scoort een geoptimaliseerd ontwerp van dit circulair viaduct-concept naar verwachting?
3. Hoe en wanneer levert dit circulair viaduct-concept winst op qua milieu-impact en circulariteit?

Voor dit onderzoek is een milieugerichte levenscyclusanalyse (LCA) uitgevoerd en een Material Flow analyse (MFA), waarbij voor de laatste de uitgangspunten van het platform CB'23 zijn gehanteerd.

De LCA studie heeft laten zien dat het circulaire viaduct in productie een 33% hogere milieu-impact heeft en 47% meer primaire grondstoffen nodig heeft voor de productie. Het circulaire viaduct (brugdek) is in zijn geheel 48% zwaarder dan het referentie viaduct. Het modulair uitvoeren van het ontwerp voor dezelfde functionaliteit heeft dus een behoorlijk hoger materiaalverbruik en initiële milieulast tot gevolg.

Deze hogere milieulast en grondstofverbruik moet het circulaire viaduct dus terugverdienen tijdens zijn functionele levensduur. Dit is heel goed mogelijk, want een viaduct in Nederland wordt na een zekere periode weer gesloopt. Dit is niet altijd vanwege het bereiken van de technische levensduur, maar vaak door veranderende omstandigheden. Een regulier viaduct bereikt dan dus de functionele levensduur. Het circulaire viaduct kan op dat moment echter eenvoudig gedemonteerd worden en (eventueel op een ander locatie) weer worden opgebouwd, mogelijk in een nieuwe configuratie (lengte of breedte), met voor deze volgende toepassing een veel kleinere milieulast dan een nieuw viaduct bouwen.

De studie heeft laten zien dat de gemiddelde functionele levensduur voor een viaduct in Nederland een belangrijke factor is in de afweging of een circulair viaduct milieutechnisch de betere keuze is. Hiervoor hebben we het break-even moment (omslagpunt) als begrip geïntroduceerd. Hoe langer viaducten gemiddeld in functie blijven, hoe moeilijker het circulaire viaduct zijn hogere milieulast bij productie kan terugverdienen. Het break-even moment is de functionele levensduur van het viaduct waarbij het circulaire viaduct zijn milieukosten net niet meer terug kan verdienen (over een gekozen beschouwingsperiode).

Er is in de studie gekozen voor een basis scenario, waarin we een beschouwingsperiode van 200 jaar hanteren en een functionele levensduur voor een viaduct van 80 jaar. In dit basis scenario heeft de referentie viaduct een totale milieu-impact (MKI) van €11.237 en het circulaire viaduct €8.661. Tot een break-even moment (functionele levensduur regulier viaduct) van 124 jaar (extreem lang) zou het circulaire viaduct de milieutechnisch beste keus zijn in dit basis scenario.

Qua circulariteit laat de MFA zien dat bij 2 gebruikscycli (1 vervanging) het circulaire viaduct over de hele levensduur 22% besparing op primaire grondstoffen zal realiseren. Bij 3 gebruikscycli (basis scenario) loopt dit op tot 42%.

Vervolgens zijn er 2 ontwikkelingen in de studie meegenomen: de **energietransitie** en technische **verbetermogelijkheden** (innovaties). Er is een model gebouwd dat de impact van de energietransitie (omslag van fossiele energiedragers naar duurzame energiedragers als zon, wind, geothermie en waterkracht) op alle gebruikte grondstoffen en processen kan beschrijven. Hiermee wordt de impact van de energietransitie op de LCA studie gemodelleerd en opgenomen in het LCA model. De impact van de energietransitie is heel groot.

Wanneer de energietransitie zich volledig zal voltrekken (alle fossiele brandstoffen worden vervangen door duurzame alternatieven) dan zal het break-even punt verschuiven van 124 jaar naar 74 jaar. Dit betekent dat er minstens 2 vervangingen nodig zullen zijn voordat het circulaire viaduct zijn initiële hogere milieu-impact heeft terugverdiend. Nu is dat over een technische levensduur van 200 jaar nog steeds te verwachten. Maar de onzekerheid neemt wel toe en een afweging voor welke omstandigheden dit een goede keus zal zijn lijkt nodig.

Met betrekking tot verbetermogelijkheden is een korte studie verricht naar innovaties die bij de opdrachtgever of NIBE bekend waren bij start van de studie, die in 3-5 jaar commercieel verkrijgbaar zouden zijn en een significante milieuwinst zouden opleveren. Uit deze studie zijn drie innovaties gekozen om verder uit te werken en in de studie op te nemen: geopolymeren, basaltwapening en optimaliseren van het circulair viaduct qua dimensies, wapening en betonmengsel. Verdere studie hierop heeft geresulteerd in 2 daadwerkelijke scenario's die met een LCA zijn uitgewerkt: een geoptimaliseerd betonmengsel op basis van een CEM III B en gebruik van basaltwapening.

Om tenslotte te onderzoeken wanneer zo'n doorontwikkeld circulaire viaduct nu een milieutechnische goede keus is, is er een totaal scenario opgebouwd. In dit totaal scenario wordt de energietransitie meegenomen (met de aanname dat deze zich volledig voltrokken heeft in het jaar 2100),

alsmede de 2 verbetermogelijkheden (toegepast op zowel het referentie als circulaire viaduct). De uitkomst van de analyse laat zien dat tot een break-even moment van 104 jaar (over 200 jaar beschouwingsperiode) het circulaire viaduct zich kan terugverdienen. Dat is dus nog steeds zeer aannemelijk dat het circulaire viaduct zich zal terugverdienen, als het inderdaad 200 jaar mee zal gaan en zijn functie als viaduct meermaals kan blijven vervullen. 200 jaar is een extreem lange periode om een beschouwing over te doen, dus er is ook voor gekozen om een analyse te doen over een beschouwingsperiode van 100 jaar, waarbij het circulaire viaduct na deze beschouwingsperiode ook zijn functie verliest (afvalstatus bereikt). Dit kan als een worst case scenario worden beschouwd naar ons gevoel.

Wanneer we dit totaal scenario berekenen op een beschouwingsperiode van 100 jaar, dan blijkt dat het viaduct 61 jaar of korter dezelfde functie moet behouden, om zich terug te verdienen. Dit ligt ongeveer in het midden van de range tussen de reeds gesloopte betonnen viaducten van Rijkswaterstaat (46 jaar) en de gemiddeld statistische verwachte functionele levensduur (momenteel 80 jaar) van een viaduct. Dit geeft aan dat het toepassen van het circulaire viaduct een zorgvuldige afweging waard is. De kans dat het zich zal "terugverdienen" is zeker aanwezig, maar het moet binnen zijn totale levensduur wel minstens 1 keer tot vervanging komen, anders zijn de hogere initiële milieulasten 'voor niets' geweest.

1 INLEIDING

In opdracht van Rijkswaterstaat heeft het NIBE een LCA studie uitgevoerd naar het circulaire viaduct. Dit eerste circulaire viaduct van Nederland is door samenwerkingspartners VanHattum en Blankevoort, Consolis Spanbeton en Rijkswaterstaat nabij Kampen gebouwd. Zij werkten daarbij op een gelijkwaardige manier samen en delen de kennis met andere geïnteresseerden en binnen een open leeromgeving.

Dit viaduct (waarvan ze bij dit prototype op het dek focussen) is circulair, omdat de betonnen elementen waar het uit bestaat op een andere locatie volledig en ongeschonden opnieuw bruikbaar zijn, zodat er geen afval is. Daarbij zijn de afmetingen van het viaduct in lengte en breedte aanpasbaar. Het is het eerste betonnen viaduct in Nederland dat zo is gebouwd.

Het gebouwde prototype van het circulair viaduct bestaat uit 40 betonnen elementen die met voorspanning aan elkaar worden gespannen tot vijf liggers. Deze vormen samen een brugdek van 20 bij 7,5 meter. Het concept is dus demontabel en geschikt voor verschillende afmetingen (verschillende breedtes, en overspanningen van 15 tot 22,5 meter).

Om volledig circulair bouwen mogelijk te maken, werken de partijen op een andere manier samen dan ze gewend zijn: niet in een traditionele opdrachtnemer-opdrachtgever-relatie met een duidelijk gedefinieerd resultaat, maar als gelijkwaardige partners (met een gedeeld belang). Ze leveren met het circulaire viaduct ook input aan een open leeromgeving waarbinnen ze hun kennis delen met iedereen die bij wil en kan dragen, om zo de transitie naar een circulaire economie te versnellen!

De drie samenwerkingspartners hebben zich naast de monitoring van het prototype gericht op de evaluatie en doorontwikkeling. Doel hierin is, met het gerealiseerde prototype Circulair Viaduct als basis, alle kansen te benutten om dit verder te brengen als voorbeeld van een circulair concept door ten minste:

1. Alle leerervaringen en resultaten op te halen en breed beschikbaar te maken
2. Ontwikkelvragen te benoemen en waar mogelijk te beantwoorden
3. Herbestemming van het huidige prototype mogelijk te maken
4. Een integraal advies te formuleren voor de toekomst van dit concept t.b.v. opdrachtgevers en marktpartijen

Een deel van de ontwikkelvragen (spoor 2 uit bovenstaande doelstelling) begeeft zich rondom het thema circulariteit en materiaal, en heeft specifiekere betrekking op de circulariteit en milieu-impact van het viaduct-concept van het gebouwde prototype. Daarnaast zijn er ontwikkelvragen over de verbetermogelijkheden (betreffende circulariteit en milieu-impact) voor dit viaduct-concept. Doel van deze studie is het beantwoorden van deze beide groepen ontwikkelvragen.

In deze studie zullen we de volgende onderzoeksvragen beantwoorden:

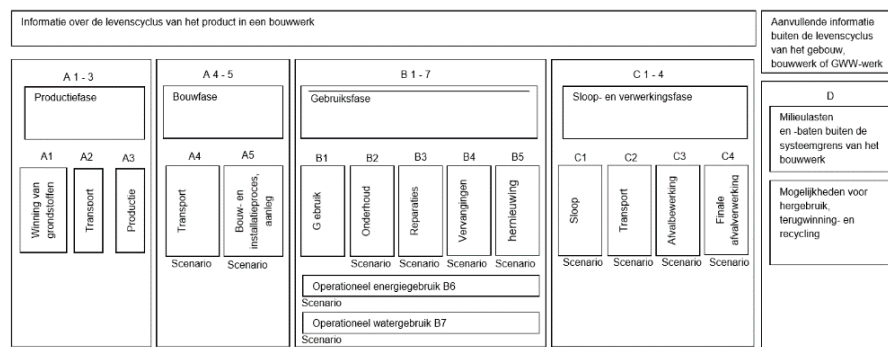
1. Hoe scoort het huidig ontwerp van dit circulair viaduct-concept (brugdek) qua circulariteit en qua milieu-impact in vergelijking met een regulier ontwerp?
2. Wat zijn de verbetermogelijkheden van dit circulair viaduct-concept qua circulariteit en milieu-impact en hoe scoort een geoptimaliseerd ontwerp van dit circulair viaduct-concept naar verwachting?
3. Hoe en wanneer levert dit circulair viaduct-concept winst op qua milieu-impact en circulariteit?

2 Onderzoeksmethode

De onderzoeksmethode, die is gebruikt om de onderzoeksvragen te beantwoorden, is de milieugerichte levenscyclusanalyse (LCA). Deze voeren we in deze studie uit in lijn met de Bepalingsmethode Gebouwen en GWW-werken (1).

In een LCA studie worden alle onttrekkingen aan natuurlijke hulpbronnen en alle emissies naar lucht, bodem en water gemodelleerd en het effect van deze ingrepen op het milieu wordt berekend aan de hand van een set van milieumodellen. Voor een verdere toelichting op deze onderzoeksmethode verwijzen we de lezer naar de Bepalingsmethode (1).

De LCA wordt modulair opgebouwd, dat wil zeggen dat elke levenscyclusfase een eigen module in de LCA methode kent. In dit verslag zal zeer regelmatig naar deze modules worden verwezen. De modules zijn weergegeven in Figuur 1 om de lezer te helpen dit te interpreteren.



Figuur 1. Schematische weergave van de modules in een LCA volgens de bepalingmethode (1).

Uitgangspunten van de LCA studie

In deze vergelijkende LCA studie wordt het circulaire viaduct (CIVI) vergeleken met een referentie viaduct (standaard viaduct, STVI). De scope van deze vergelijking is enkel het brugdek. Alle overige componenten van beide viaducten zijn niet meegenomen in dit vergelijk.

Methodologische uitgangspunten van de studie zijn:

- Bepalingsmethode versie 3.0 (1)
- Berekeningen voor de betondelen zijn uitgevoerd in de NIBE EPD tool, database v2.83, gebaseerd op EcoInvent 3.4
- Berekeningen voor de scenario's zijn uitgevoerd in Excel
- Bouwplaats processen zijn overgenomen uit DuboCalc versie 5.1

Voor zowel het circulaire als referentie viaduct is de materialisatie aangeleverd door Spanbeton en Rijkswaterstaat. Tabel 1 geeft een overzicht van de totale hoeveelheden beton, wapeningsstaal, voorspanstaal en overige materialen (hulpstoffen voor betonproductie).

Tabel 1. Overzicht van de materialisatie van beide ontwerpen in kg.

Gewichten (kg)	STVI	CIVI
Beton	181.830	266.552
Voorspanstaal	9.060	9.108
Wapeningsstaal	12.375	22.540
overige	0	2.217
Totaal	203.265	300.417

Voor het beton zijn alle mengsels in detail aangeleverd, inclusief de leveranciers. Dit is verwerkt in de berekeningen. Deze informatie is bekend bij de opdrachtgever.

De ontwerpdetails zijn overgenomen uit 2 ontwerpnoots van de samenwerkingspartners (2) (3). Uitgangspunten in het ontwerp zijn een balklengte van 22,5 m en voor het referentie viaduct zijn de liggers SKK700 van Spanbeton gebruikt. Deze referentie heeft een vergelijkbaar toepassingsgebied als waarvoor het circulair viaduct beoogd is.

Bij zowel monteren als demonteren van het circulaire viaduct is er risico op uitval en beschadiging. De mate waarin is nu nog onbekend. Voor beide situaties wordt in deze studie de standaard uitval van 3% voor prefab producten uit de bepalingmethode toegepast. Er wordt dan echter zowel 3% uitval bij monteren als ook 3% uitval bij demonteren van de brugdelen toegepast.

Voor de transportafstand bij herplaatsing van het circulaire viaduct is het onzeker wat daar in de toekomst voor nodig zal zijn. We zijn nu uitgegaan van de forfaitaire afstand van aanvoer van prefab producten, 150 kilometer. Dit lijkt veel, maar het is nu niet goed te zeggen wat er in de toekomst nodig zal zijn. Het is aannemelijk dat bij herplaatsing een tijdelijke opslag nodig zal zijn of eventueel inspectie of herstel. Daarvoor zullen de modulaire brugdelen bij toekomstige herplaatsing vast getransporteerd moeten worden.

Opbouw van de studie en rapportage

Allereerst is er een vergelijkende LCA studie gedaan naar beide ontwerpen op basis van wat we in deze studie het basis scenario noemen. Dit is een scenario waarbij we een beschouwingsperiode van 200 jaar hanteren (gelijk aan de technische levensduur van de componenten van het circulaire viaduct) en voor de gebruikslevensduur van het viaduct uitgaan van 80 jaar. De gemiddelde gebruikslevensduur van een betonnen viaduct in Nederland is nog niet goed bekend, maar 80 jaar komt naar voren uit studies van Rijkswaterstaat. Deze vergelijkende LCA studie op het basis scenario wordt behandeld in hoofdstuk 3. Hierbij kijken we zowel naar de milieu-impact op

basis van de Milieukosten Indicator (MKI) als ook op basis van de impact op klimaatverandering (kg CO₂-eq.). Hiervoor is gekozen, omdat beide parameters in de besluitvorming een belangrijke rol spelen.

Nadat we het basis scenario behandeld hebben laten we een gevoeligheidsanalyse zien op een drietal belangrijke parameters. Deze zijn in overleg met de opdrachtgever gekozen en zijn:

- Beschouwingsperiode 100 jaar i.p.v. 200 jaar
- Analyse zonder LCA module D
- Impact van de energietransitie op de LCA resultaten

Een beschouwingsperiode van 100 jaar wordt doorgaans door Rijkswaterstaat gehanteerd in aanbestedingen. Het is dus interessant om te zien wat er met de vergelijkende LCA studie zou gebeuren als we de beschouwingsperiode aanpassen van 200 naar 100 jaar.

Module D wordt in Nederland standaard gehanteerd in LCA studies voor de bouw (volgens de Bepalingmethode (1)). Echter is de in module D gemodelleerde impact omgeven met veel onzekerheid. Zullen de uitsparingen die doorgaans in module D een belangrijke rol spelen wel gerealiseerd worden na de relatief lange levensduren (en dus ver in de toekomst)? Is de milieu-impact van productie, die zeker is en zich op korte termijn zal manifesteren, niet van groter belang? Om te onderzoeken of we tot geheel andere conclusies zouden komen als we module D niet hanteren, is er een scenario gemaakt zonder module D.

Het zal niemand ontgaan zijn dat Nederland zich op maakt voor de energietransitie. Deze zal zich zowel voltrekken op gebied van elektriciteitsopwekking, maar ook op transport en lage en hoge temperatuur warmte productie. Wanneer de energietransitie zich heeft voltrokken zal dat een significante impact hebben op de milieuprestatie van bouwproducten.

Aangezien we verwachten dat de energietransitie zich zal voltrekken ruim binnen de beschouwingsperiode van ons basis scenario is er ook een scenario gemaakt, waarin we de impact van de energietransitie hebben meegenomen.

Al deze drie gevoeligheidsanalyses worden in hoofdstuk 4 gepresenteerd en besproken.

Onderzoeksvraag 2 gaat over verbetermogelijkheden en hun impact. Hiervoor is een studie gedaan naar de verbetermogelijkheden van het circulaire viaduct. Daarbij is ook bij elke verbetermogelijkheid de vraag gesteld of deze ook op het referentie viaduct toe te passen zou zijn. Er is gewerkt van een long list naar een short list van mogelijkheden en er zijn drie mogelijkheden daadwerkelijk uitgezocht en gemodelleerd. Deze worden in hoofdstuk 5 gepresenteerd en besproken.

Onderdeel van zowel onderzoeksvraag 1 en 2 is de impact van het circulaire viaduct op circulariteit. Hiervoor is een aparte studie uitgevoerd, waarbij we gebruikte hebben gemaakt van de uitkomsten van platform CB'23 (4). Platform CB'23 heeft in september 2019 de leidraad "Kernmethode voor het meten van circulariteit in de bouw" versie 1.0 uitgebracht. In onze studie hebben we deze leidraad gevolgd. De methode, resultaten en conclusie worden gepresenteerd in hoofdstuk 6.

Tenslotte rest ons dan onderzoeksvraag 3: Hoe en wanneer levert dit circulair viaduct-concept winst op qua milieu-impact en circulariteit? Hiervoor hebben we een scenario opgebouwd waarin we alle meest waarschijnlijke invloeden hebben mee genomen. Dit betekent dat we uit de verbetermogelijkheden die mogelijkheden hebben meegenomen die tot milieuwinst leiden en binnen een periode van 3-5 te realiseren lijken. Tevens is de invloed van de energietransitie meegenomen en verder de uitgangsunten van het basis scenario aangehouden. Dit totaal-scenario wordt

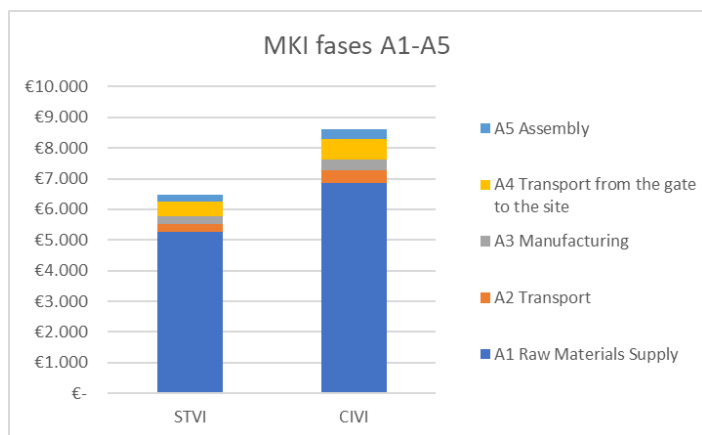
gepresenteerd en besproken in hoofdstuk 7 en geeft antwoord op de derde onderzoeksvraag.

Er is gezocht naar een eenvoudige manier om bij elk scenario weer te geven of het in voordeel van het circulaire viaduct uitpakt of niet. Dit hebben we gevonden in de weergave van het break-even punt (omslagpunt). Dit punt is de gebruiksduur (hoelang gaat het viaduct mee op zijn plek in zijn huidige functie, tot het zou moeten worden aangepast of gesloopt) waarbij over de beschouwingsperiode (100 jaar of 200 jaar) het circulaire viaduct en het referentie viaduct dezelfde milieu-impact hebben. Met een kleur (groen) hebben we vervolgens aangegeven wanneer het circulaire viaduct een lagere milieu-impact heeft of het referentie-viaduct (rood).

3 Milieu-impact

Analyse van de productiefasen (module A1-A5)

Wanneer we enkel de productiefasen A1-A5 beschouwen, krijgen we een duidelijk beeld van de milieu-impact van de productie en plaatsing van het circulaire viaduct (CIVI) in vergelijking met de productie en plaatsing van een, in functie equivalent, referentie viaduct (STVI). Hierbij dient opgemerkt te worden dat het circulaire viaduct ontworpen is voor een technische levensduur van 200 jaar en het referentie viaduct voor 100 jaar.



Figuur 2. Milieu-impact in MKI [euro] voor de productiefase, inclusief transport en plaatsing (A1-A5) voor het circulaire viaduct (CIVI) en het referentie viaduct (STVI).

Figuur 2 laat de milieu-impact zien van beide ontwerpen. Het circulaire viaduct heeft een totale milieu-impact in MKI van € 8.606 en het referentie viaduct € 6.479. Voor de ontwerpen geldt dat de gebruikte betonmengsels elkaar niet veel ontlopen qua milieu-impact, waardoor het verschil in milieu-impact hoofdzakelijk wordt bepaald door de hoeveelheid materiaal in de ontwerpen (weergegeven in Tabel 1).

Wanneer we nog wat specifiekier kijken naar de verschillende deelfasen (Tabel 2), zien we dat de milieu-impact van de gebruikte grondstoffen veruit de grootste bijdrage heeft voor beide ontwerpen (bijna 80%). Dit is gebruikelijk voor betonproducten, waar de grootste milieu-impact afkomstig is uit de productie van de belangrijkste grondstof: cement.

Tabel 2. Overzicht van de milieu-impact van de deelfasen van productie en plaatsing voor zowel het circulaire viaduct (CIVI) als het referentie viaduct (STVI).

VERGELIJK A1-A5	STVI	CIVI
A1 Raw Materials Supply	€ 5.248	€ 6.850
A2 Transport	€ 267	€ 424
A3 Manufacturing	€ 253	€ 348
A4 Transport from the gate to the site	€ 475	€ 670
A5 Assembly	€ 236	€ 315
Total	€ 6.479	€ 8.606

Analyse van het basis scenario

Wanneer we nu beide ontwerpen in functie gaan vergelijken moeten we een beschouwingsperiode kiezen. Rijkswaterstaat hanteert in haar uitvragen van kunstwerken een standaard beschouwingsperiode van 100 jaar. Echter, omdat het circulaire viaduct een technische ontwerplevensduur heeft van 200 jaar, hebben we er in deze studie voor gekozen om 200 jaar als beschouwingsperiode te hanteren voor het basis scenario. Daarnaast hebben we in de gevoeligheidsanalyse gekeken wat er zou gebeuren als we 100 jaar hanteren.

Naast de beschouwingsperiode dient er ook een keus gemaakt te worden voor de verwachte functionele levensduur van het viaduct. Met andere woorden: hoelang verwachten we dat het viaduct op dezelfde plaats in functie zal blijven. Dit hoeft niet perse dezelfde levensduur te zijn als de technische levensduur (hoelang kan het object technisch mee). Uit onderzoek in opdracht van Rijkswaterstaat komt naar voren dat de verwachte

levensduur van betonnen viaducten en bruggen – hoewel afhankelijk van allerlei factoren en met een flinke spreiding – op dit moment op 80 jaar wordt ingeschat. Dat is als uitgangspunt in ons basis scenario toegepast. Hiermee krijgen we dus het volgende basis scenario:

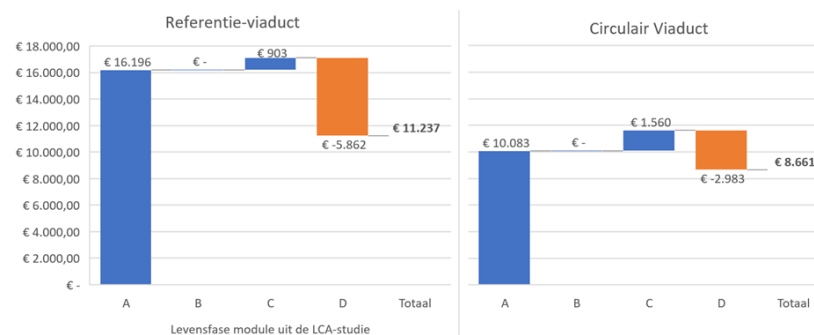
- Beschouwingsperiode 200 jaar
- Functionele levensduur viaduct 80 jaar
- LCA fasen A1-D

Tabel 3. Milieu-impact (MKI in euro) van een referentie viaduct (STVI) en het circulaire viaduct (CIVI) voor het basis scenario (over een beschouwingsperiode van 200 jaar).

VERGELIJK A1-D (200 jaar)	MKI Initieel		Levensduurfactor		MKI Besch. periode	
	STVI	CIVI	STVI	CIVI	STVI	CIVI
Levensduur			80	80	80	80
A1 Raw Materials Supply	€ 5.248	€ 6.850	2,5	1	€ 13.121	€ 6.850
A2 Transport	€ 267	€ 424	2,5	1	€ 667	€ 424
A3 Manufacturing	€ 253	€ 348	2,5	1	€ 633	€ 348
A4 Transport from the gate to the site	€ 475	€ 670	2,5	2,5	€ 1.186	€ 1.674
A5 Assembly	€ 236	€ 315	2,5	2,5	€ 589	€ 788
B1 Use	€ -	€ -	2,5	2,5	€ -	€ -
B2 Maintenance	€ -	€ -	2,5	2,5	€ -	€ -
B3 Replacements	€ -	€ -	2,5	2,5	€ -	€ -
C1 Demolition	€ 169	€ 379	2,5	2,5	€ 424	€ 948
C2 Transport	€ 160	€ 226	2,5	2,5	€ 401	€ 566
C3 Waste processing	€ 29	€ 43	2,5	1	€ 73	€ 43
C4 Final disposal	€ 2	€ 3	2,5	1	€ 5	€ 3
D Reuse/Reovery/Recycling potential	€ -2.345	€ -2.983	2,5	1	€ -5.862	€ -2.983
	€ 4.495	€ 6.275			€ 11.237	€ 8.661

In Tabel 3 zijn de belangrijkste resultaten voor het basis scenario weergegeven. Allereerst de MKI voor beide ontwerpen op basis van een LCA over hun eigen technische levensduur voor alle levensfasen (A1-D). Vervolgens wordt voor beide ontwerpen voor de 200 jaar beschouwingsperiode de vervangingsfactor berekend. Op basis van de functionele levensduur van 80 jaar dient het referentie viaduct 2 maal

vervangen te worden, waarbij de 2^e vervanging (na 160 jaar) nog voor 50% mee telt (breukenmethode). Hetzelfde geldt voor het circulaire viaduct, met 1 belangrijk verschil: de modulaire viaduct delen hoeven niet opnieuw geproduceerd te worden, enkel herplaatst. Dit betekent dat de productiefasen (A1-A3) niet opnieuw toegerekend worden bij vervanging, evenals de afvalverwerking C3/C4 en hergebruik en recycling potentieel (na de levensduur) D. Hierbij wordt in C1 de ontmanteling berekend, inclusief 3% uitval en in C2 transport naar een nieuwe plaatsingslocatie. Voor dit laatste is de forfaitaire transport afstand voor prefab producten van 150 km aangehouden (zie hoofdstuk 2).

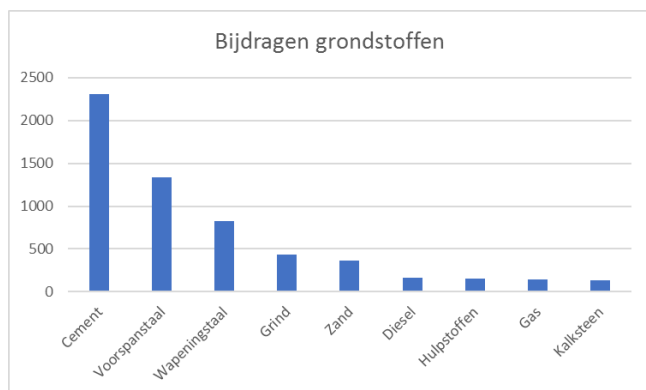


Figuur 3. Milieu-impact (MKI in euro) van een referentie viaduct en het circulaire viaduct, per levensfase (modules) weergegeven voor het basis scenario (over een beschouwingsperiode van 200 jaar).

De resultaten in Tabel 3 laten zien dat bij de gekozen uitgangspunten voor het basis scenario het circulaire viaduct tot een significant lager milieu-impact leidt dan het referentie viaduct. Hetgeen aangeeft dat, als het viaduct 80 jaar zal blijven liggen, het circulaire viaduct zijn initieel hogere milieu-impact in productie weer goed maakt door milieuwinst bij (het voorkomen van) de vervangingen later in de beschouwingsperiode. Hierbij kan de opmerking geplaatst worden dat door de lange levensduren de onzekerheid in deze analyses uiteraard heel groot is. In 200 jaar zal er heel veel veranderen in

onze samenleving en deze analyse is gebaseerd op de situatie zoals we die vandaag de dag kennen.

Een zwaartepunt analyse op de grondstoffen en processen is weergegeven in Figuur 4. Dit laat zien dat, zoals verwacht mag worden, de grootste bijdragen komen van het Cement en het staal (zowel voorspan- als wapeningsstaal).



Figuur 4. Bijdragen van de verschillende grondstoffen en processen (top 9 bijdragen) voor het Circulaire Viaduct (basis scenario).

Het basis scenario gaat uit van 80 jaar levensduur voor het viaduct. Dat lijkt al lang, zeker als er in de maatschappij veel veranderingen zijn. Bij een kortere levensduur van het viaduct dan 80 jaar zal het verschil in milieu-impact alleen maar groter worden in het voordeel van het circulaire viaduct. Alleen bij een levensduur die significant langer is dan 80 jaar bestaat er een break-even punt (omslagpunt) waarbij het circulaire viaduct zijn hogere productie milieukosten niet meer terug kan verdienen. Dit break-even punt kan berekend worden en ligt in dit geval op 124 jaar.



Figuur 5. Bij een gebruikslevensduur van 124 jaar zijn het circulaire viaduct en de referentie gelijk in milieu-impact. Bij alles korter dan dit is het circulaire viaduct de milieutechnische betere keus en daarboven het referentie viaduct.

Naast het break-even punt kunnen we ook de vervangingsfactor bepalen. Dit is het aantal keren dat het viaduct vervanging dient te worden binnen de beschouwingsperiode om het break-even punt te bereiken. In dit geval wordt het break-even punt bereikt als er na de eerste (initiële) plaatsing nog 0,61 vervangingen zullen plaats vinden. Uiteraard bestaan er in de praktijk geen gedeeltelijke vervangingen, maar door gebruik van de breukenmethode rekenen we hier wel mee. Een manier om dit te interpreteren zou kunnen zijn: als we nu vaker circulaire viaducten zouden plaatsen en we zouden in 61% van de gevallen één vervanging hebben, dan is het break-even punt bereikt.

Parameters voor herplaatsen circulair viaduct

In het basis scenario gaan we voor het demonteren en weer opbouwen van het circulaire viaduct uit van 3% uitval bij demonteren en 150 km transport voor aanvoer naar de (nieuwe) bouwlocatie. Beide zijn op dit moment nog onbekend. De 150 kilometer aanvoer naar de (nieuwe) bouwlocatie is gemodelleerd door de vervangingsfactor (2,5) ook over de module A4 toe te passen, hierdoor wordt er bij vervangingen 150 kilometer transport toegerekend. Dit heeft een behoorlijke impact, zoals is te zien in Tabel 3 onder A4. Bij demonteren en herplaatsen wordt er dus 150 kilometer transport meegenomen. Wanneer dit niet nodig zou zijn, bijvoorbeeld als het circulaire viaduct op dezelfde locatie weer wordt opgebouwd en ook niet voor inspectie, onderhoud of tijdelijke opslag naar een ander plek gebracht

hoeft te worden, dan neemt de milieu-impact van het circulaire viaduct over de beschouwingsperiode met bijna 12% af.

Het uitvalpercentage bij demonteren is gekozen op 3%, gelijk aan het uitvalpercentage bij monteren. De reacties van marktpartijen op dit uitvalpercentage zijn heel verschillend. Voor veel prefab producten wordt het als hoog ervaren, maar er lijken geen cijfers beschikbaar over wat het werkelijk zou zijn. Een hoger uitvalpercentage werkt door in verschillende onderdelen van de LCA, zowel in productie, transport, als ook module C. De impact van dit uitvalpercentage is onderzocht en het resultaat is weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4. Invloed van het uitvalpercentage bij demonteren op de totale milieu-impact over de beschouwingsperiode en de resulterende vervangingsfactor.

	MKI totaal		vervangings
	STVI	CVI	factor
0%	11.237	8.292	1,54
3%	11.237	8.661	1,61
10%	11.237	9.520	1,83
20%	11.237	10.748	2,26

Tabel 4 laat zien dat de totale milieu-impact van het circulaire viaduct over de beschouwingsperiode in het basis scenario duidelijk afhankelijk is van het gekozen uitvalpercentage bij demonteren. Als na meer testen zou blijken dat één op de vijf van de prefab blokdelen van het circulaire viaduct beschadigd zou raken en volledig vervangen zou moeten worden, dan neemt de milieu-impact van het circulaire viaduct toe van €8.292 tot €10.748 en zou er 1 vervanging meer nodig zijn in de beschouwingsperiode voor het circulaire viaduct om zich milieutechnisch terug te verdienen.

Het is aan te bevelen om voor zowel uitval bij demonteren als transport bij herplaatsing aanvullend onderzoek te doen. Beide hebben significant invloed

op de totale milieu-impact. De nu gehanteerde inschattingen (3% en 150 kilometer) lijken op het eerste gezicht realistisch.

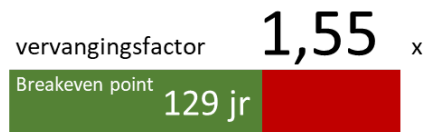
Analyse op basis van CO₂ footprint

De voorgaande analyse is gedaan op basis van de Milieu Kostenindicator (MKI), een integrale gewogen indicator voor milieuprestatie. Een van de milieueffecten uit de MKI is Klimaatverandering, met als eenheid kg CO₂-eq. Dit milieueffect heeft de laatste tijd bijzondere aandacht en heeft in het kabinetsbeleid ook een doelstelling gekregen. Het is daarom interessant om de voorgaande analyse van het basis scenario ook te maken op basis van Klimaatverandering.

Tabel 5. Klimaatverandering potentieel (in kg CO₂-eq) van een referentie viaduct (STVI) en het circulaire viaduct (CIVI) voor het basis scenario.

VERGELIJK A1-D (200 jaar)	CO2 Initieel		Levensduurfactor		CO2 Besch. periode	
	STVI	CIVI	STVI	CIVI	STVI	CIVI
Levensduur			80	80	80	80
A1 Raw Materials Supply	60.622	83.588	2,5	1	151.554	83.588
A2 Transport	2.268	3.602	2,5	1	5.671	3.602
A3 Manufacturing	3.554	4.986	2,5	1	8.885	4.986
A4 Transport from the gate to the site	4.015	5.665	2,5	2,5	10.038	14.161
A5 Assembly	2.486	3.446	2,5	2,5	6.215	8.614
B1 Use	0	0	2,5	2,5	0	0
B2 Maintenance	0	0	2,5	2,5	0	0
B3 Replacements	0	0	2,5	2,5	0	0
C1 Demolition	1.280	1.751	2,5	2,5	3.200	4.377
C2 Transport	1.357	1.915	2,5	2,5	3.394	4.789
C3 Waste processing	287	424	2,5	1	718	424
C4 Final disposal	15	23	2,5	1	39	23
D Reuse/Reovery/Recycling potential	-18.146	-23.090	2,5	1	-45.365	-23.090
	57.739	82.310			144.348	101.475

Het resultaat is weergegeven in Tabel 5. Als we hierop wederom de analyse doen van het break-even punt in jaren komen we tot 129 jaar, vrijwel identiek aan het break-even punt bij de analyse op basis van MKI (124 jaar, zie Figuur 5). Omdat het circulaire viaduct en het referentie viaduct qua materialisatie vrijwel identiek zijn is de verhouding tussen MKI en CO₂-eq voor beide ontwerpen ook vrijwel gelijk.



Figuur 6. Bij een gebruikslevensduur van 129 jaar zijn het circulaire viaduct en de referentie gelijk in CO₂ emissie. Bij alles korter dan dit is het circulaire viaduct de milieutechnische betere keus en daarboven het referentie viaduct.

In de verdere studie zijn de vergelijkingen op basis van de Milieukosten Indicator (MKI) gemaakt. Bij de opdrachtgever is een Excel spreadsheet beschikbaar, waarmee alle scenario's opgebouwd kunnen worden. Dat spreadsheet geeft voor het gekozen scenario zowel MKI, CO₂ als ook de circulariteitsindicator MCI weer (zie hoofdstuk 6).

4 Gevoeligheidsanalyses

Op het basis scenario is een gevoeligheidsanalyse gedaan op de volgende punten:

- Beschouwingsperiode 100 jaar i.p.v. 200 jaar
- Analyse zonder module D
- Impact van de energietransitie op de LCA resultaten

Beschouwingsperiode 100 jaar

Het basis scenario gaat uit van een beschouwingsperiode van 200 jaar. Rijkswaterstaat hanteert echter in haar uitvragen voor kunstwerken normaliter een beschouwingsperiode van 100 jaar. Wat gebeurt er met de analyse als we de periode veranderen van 200 in 100 jaar?

Tabel 6. Milieutechnisch vergelijk tussen referentie viaduct (STVI) en het circulaire viaduct (CIVI) bij een beschouwingsperiode van 100 jaar en geen hergebruik bij einde beschouwingsperiode.

VERGELIJK A1-D (100 jaar)	MKI Initieel		Levensduurfactor		MKI Besch. periode	
	STVI	CIVI	STVI	CIVI	STVI	CIVI
Levensduur			80	80	80	80
A1 Raw Materials Supply	€ 5.248	€ 6.850	1,25	1	€ 6.560	€ 6.850
A2 Transport	€ 267	€ 424	1,25	1	€ 333	€ 424
A3 Manufacturing	€ 253	€ 348	1,25	1	€ 317	€ 348
A4 Transport from the gate to the site	€ 475	€ 670	1,25	1,25	€ 593	€ 837
A5 Assembly	€ 236	€ 315	1,25	1,25	€ 295	€ 394
B1 Use	€ -	€ -	1,25	1,25	€ -	€ -
B2 Maintenance	€ -	€ -	1,25	1,25	€ -	€ -
B3 Replacements	€ -	€ -	1,25	1,25	€ -	€ -
C1 Demolition	€ 169	€ 379	1,25	1,25	€ 212	€ 474
C2 Transport	€ 160	€ 226	1,25	1,25	€ 201	€ 283
C3 Waste processing	€ 29	€ 43	1,25	1	€ 36	€ 43
C4 Final disposal	€ 2	€ 3	1,25	1	€ 3	€ 3
D Reuse/Recovery/Recycling potential*	€ -2.345	€ -2.983	1,25	1	€ -2.931	€ -2.983
	€ 4.495	€ 6.275			€ 5.619	€ 6.673

Indien we als uitgangspunt nemen dat na de beschouwingsperiode niet bekend is of de modulaire brugdelen nog een functie zullen hebben, moeten we in een worst case benadering ervanuit gaan dat na de beschouwingsperiode beide ontwerpen hun einde levensduur bereiken. In dat geval bouwen we een scenario waarin er voor beide ontwerpen het normale eindelevensduur scenario van beton en staal rest na de beschouwingsperiode. Het resultaat van dit scenario is weergegeven in Tabel 6 en laat zien dat het circulaire viaduct onder deze aanname in die 100 jaar bij een functionele levensduur van 80 jaar niet zijn hogere initiële milieu-impact kan goedmaken. Pas bij een functionele levensduur van 62 jaar of korter zou het circulaire viaduct milieutechnisch de voorkeur genieten.



Figuur 7. Bij een gebruikslevensduur van 62 jaar zijn het circulaire viaduct en de referentie gelijk in milieu-impact. Bij alles korter dan dit is het circulaire viaduct de milieutechnische betere keus en daarboven het referentie viaduct.

Technisch gezien heeft het circulaire viaduct aan het einde van de beschouwingsperiode van 100 jaar echter nog niet het einde van zijn levensduur gehaald. Het zou in principe nog 100 jaar mee kunnen, als de overige omstandigheden dat mogelijk zouden maken. Dit kunnen we in de LCA analyse verwerken door de modulaire viaductdelen aan het einde van de 100 jaar periode 100% hergebruik als eindelevensduur scenario mee te geven, maar met een equivalente kwaliteitsfactor (Q) van 50%. Dit betekent dat in de module D (hergebruik potentieel) een baat wordt opgenomen die gelijk is aan 50% van de initiële milieu-impact van de productie. Dit

reflecteert het verlies aan kwaliteit door 100 jaar gebruik en de rest aan kwaliteit (50%) door het potentieel om nog eens 100 jaar mee te gaan.

Tabel 7. Overzicht van de milieu-impact (MKI in euro) voor zowel het referentie viaduct (STVI) als het circulaire viaduct (CIVI) bij een beschouwingsperiode van 100 jaar en een equivalente kwaliteitsfactor (Q) van 50% voor de modulaire viaductdelen. Overige uitgangspunten gelijk aan het basis scenario.

VERGELIJK A1-D (100 jaar)	MKI Initieel		Levensduurfactor		MKI Besch. periode	
	STVI	QVI	STVI	QVI	STVI	QVI
Levensduur			80	80	80	80
A1 Raw Materials Supply	€ 5.248	€ 6.850	1,25	1	€ 6.560	€ 6.850
A2 Transport	€ 267	€ 424	1,25	1	€ 333	€ 424
A3 Manufacturing	€ 253	€ 348	1,25	1	€ 317	€ 348
A4 Transport from the gate to the site	€ 475	€ 670	1,25	1,25	€ 593	€ 837
A5 Assembly	€ 236	€ 315	1,25	1,25	€ 295	€ 394
B1 Use	€ -	€ -	1,25	1,25	€ -	€ -
B2 Maintenance	€ -	€ -	1,25	1,25	€ -	€ -
B3 Replacements	€ -	€ -	1,25	1,25	€ -	€ -
C1 Demolition	€ 169	€ 379	1,25	1,25	€ 212	€ 474
C2 Transport	€ 160	€ 226	1,25	1,25	€ 201	€ 283
C3 Waste processing	€ 29	€ 43	1,25	1	€ 36	€ 43
C4 Final disposal	€ 2	€ 3	1,25	1	€ 3	€ 3
D Reuse/Recovery/Recycling potential*	€ -2.345	€ -3.697	1,25	1	€ -2.931	€ -3.697
	€ 4.495	€ 5.561			€ 5.619	€ 5.959

Het resultaat is weergegeven in Tabel 7 en laat zien dat ook wanneer we de beschouwingsperiode aanpassen van 200 naar 100 jaar, de functionele levensduur van het viaduct op 80 jaar houden en wel 50% kwaliteitsbehoud toerekenen het circulaire viaduct binnen deze 100 jaar zijn initieel hogere milieu-impact uit productie niet meer goedmaakt (binnen de beschouwingsperiode). Dus uitgevraagd op deze wijze zou het circulaire viaduct niet de milieutechnische voorkeur krijgen. Pas bij een functionele levensduur van 73 jaar of korter zou het circulaire viaduct de voorkeur genieten.



Figuur 8. Bij een gebruikslevensduur van 73 jaar zijn het circulaire viaduct en de referentie gelijk in milieu-impact. Bij alles korter dan dit is het circulaire viaduct de milieutechnische betere keus en daarboven het referentie viaduct.

Invloed van module D

Het recycling en hergebruik potentieel van producten en materialen wordt in een LCA studie doorgaans uitgedrukt een milieubaten in module D. Hierbij is het uitgangspunt de technologie en kennis van vandaag. We doen dus geen voorspelling van technologische ontwikkelingen en wat voor effect die zouden kunnen hebben op recycling en hergebruik. Bij de bepaling van de milieuwinst door hergebruik en recycling kijken we naar het equivalente kwaliteitsniveau van de output stroom en welk product of proces die stroom dan zou kunnen vervangen. De milieulast van de productie van het te vervangen product of proces wordt dan als baat meegenomen in module D.

Rekenkundig is dit misschien een juiste benadering wanneer we zekerheid hebben dat vermeden emissies daadwerkelijk ook vermeden zullen worden in de toekomst. Echter, de emissies uit de productiefase van het huidige product worden hiermee in de toekomst niet goedgemaakt. Eenmaal uitgestoten blijft uitgestoten, ook al vermijden we in de toekomst nieuwe emissies door recycling of hergebruik. Het zou dus ook goed denkbaar zijn dat we vermeden emissies NIET zouden tellen als milieuwinst. Het effect dat dit zou hebben op onze analyse is weergegeven in Tabel 8.

Tabel 8. Milieu-impact (MKI in euro) van een referentie viaduct (STVI) en het circulaire viaduct (CIVI) wanneer module D in de analyse niet wordt meegenomen. Overige uitgangspunten gelijk aan het basis scenario.

VERGELIJK excl module D	MKI Initieel		Levensduurfactor		MKI Besch. periode	
	STVI	QVI	STVI	QVI	STVI	QVI
Levensduur			80	80	80	80
A1 Raw Materials Supply	€ 5.248	€ 6.850	2,5	1	€ 13.121	€ 6.850
A2 Transport	€ 267	€ 424	2,5	1	€ 667	€ 424
A3 Manufacturing	€ 253	€ 348	2,5	1	€ 633	€ 348
A4 Transport from the gate to the site	€ 475	€ 670	2,5	2,5	€ 1.186	€ 1.674
A5 Assembly	€ 236	€ 315	2,5	2,5	€ 589	€ 788
B1 Use	€ -	€ -	2,5	2,5	€ -	€ -
B2 Maintenance	€ -	€ -	2,5	2,5	€ -	€ -
B3 Replacements	€ -	€ -	2,5	2,5	€ -	€ -
C1 Demolition	€ 169	€ 379	2,5	2,5	€ 424	€ 948
C2 Transport	€ 160	€ 226	2,5	2,5	€ 401	€ 566
C3 Waste processing	€ 29	€ 43	2,5	1	€ 73	€ 43
C4 Final disposal	€ 2	€ 3	2,5	1	€ 5	€ 3
	€ 6.840	€ 9.258			€ 17.099	€ 11.643

Wanneer we de resultaten vergelijken met het basis scenario (Tabel 3) dan zien we dat milieu-impact van beide ontwerpen ongeveer evenredig stijgt. Dit is wel logisch, omdat beide ontwerpen qua materiaalgebruik sterk op elkaar lijken.



Figuur 9. Bij een gebruikslevensduur van 137 jaar zijn het circulaire viaduct en de referentie gelijk in milieu-impact. Bij alles korter dan dit is het circulaire viaduct de milieutechnische betere keus en daarboven het referentie viaduct.

Invloed van de energietransitie

Een grote onzekerheid voor de komende decennia is hoe de energietransitie zal verlopen. Uit een eerdere studie door NIBE is reeds bekend dat de invloed van de energietransitie op de milieu-impact van bouwproducten vrij groot kan zijn (1). In een korte analyse op het schetsontwerp van het circulaire en referentie viaduct in 2018 (1) is destijds ingeschat dat bij een volledig voltrekken van de energietransitie de MKI van beide ontwerpen met ca. 70% zou afnemen. Voor het circulaire viaduct, dat een grotere initiële milieu-impact heeft en dat moet “terugverdienen” uit milieuwinst op vervangingen over de levensduur, zou dat dus een belangrijke impact kunnen hebben. De eerdere analyse uit 2018 hebben we in deze studie opnieuw uitgevoerd en dit keer meer in detail.

We gaan ervanuit dat tot 2030 de energietransitie zich zal voltrekken zoals in de Nationale Energie Verkenning (NEV) van ECN (2) wordt aangegeven. In deze periode zijn voorgenomen beleidsmaatregelen nog relatief zeker en liggen voor een groot deel ook vast in wet- en regelgeving of ketenafspraken. Voor 2030 is een milieuprofiel opgesteld voor de opwekking van elektriciteit op basis van de NEV. Dit profiel is voor 2030 in de LCA's van deze studie verwerkt.

Voor de jaren na 2030 is een andere benadering gebruikt. Hierbij is voor alle gebruikte grondstoffen en processen geanalyseerd wat de bijdrage uit fossiele brandstoffen is geweest in de hele levenscyclus. Voor elk proces of grondstof is een inschatting gemaakt wat een adequate vervanging door een fossielvrij alternatief zal zijn. Vervolgens zijn die vervangingen doorgevoerd, waarbij voor de alternatieven ook is meegenomen dat de productie van de middelen voor opwekking hiervan op termijn ook zal verduurzamen (bijvoorbeeld de productie van zonnecellen voor zonnepanelen).

Vervolgens zijn er drie scenario's opgesteld voor het jaar waarin de energietransitie zich volledig zal hebben voltrokken:

1. Snel 2050
2. Gemiddeld 2070
3. Langzaam 2100

Tussen 2030 (op basis van de NEV) en het eindpunt van de energietransitie (op basis van de genoemde analyse) wordt tenslotte een lineaire interpolatie uitgevoerd voor de tussenliggende jaren.

Op deze manier kan de impact van de energie transitie op de LCA resultaten van het circulaire en het referentie viaduct berekend worden. Hier zijn de verschillende scenario's voor te kiezen. Dit is uitgewerkt in een spreadsheet model dat bij Rijkswaterstaat beschikbaar is. Hier zullen we nu 1 scenario behandelen en dat is als de energietransitie langzaam verloopt en in 2100 volledig zal zijn afgerond.

In Tabel 9 zijn de resultaten gepresenteerd voor beide ontwerpen voor het basis scenario, inclusief energietransitie langzaam. We zien dat de milieu-impact van de vervangingen een heel stuk lager is dan in het basis scenario (Tabel 3). Dit heeft tot gevolg dat er nu 2 vervangingen nodig zijn om de initieel hogere milieu-impact van het circulaire viaduct terug te verdienen. Het break-even moment (bij beschouwingsperiode 200 jaar) komt op 74 jaar te liggen, terwijl dit in het basis scenario op 124 jaar lag en het circulaire viaduct zich al bij de eerste vervanging had terugverdiend.

Bij de productie van cement zijn er twee bronnen van CO2 emissies: decarbonatie van kalksteen en verbranding van brandstoffen. Voor de verbranding van brandstoffen wordt in het energietransitie model vervanging door duurzame brandstoffen gemodelleerd. Voor de emissie door

decarbonatie is de aanname gedaan dat die (bij volledig verlopen van de energietransitie) zal worden afgevangen en gebruikt of opgeslagen.

Tabel 9. Milieu-impact (MKI in euro) van een referentie viaduct (STVI) en het circulaire viaduct (CIVI) wanneer de energietransitie (langzaam) in de analyse wordt meegenomen. Overige uitgangspunten gelijk aan het basis scenario.

VERGELIJK A1-D (200 jaar)	MKI Initieel		Levensduurfactor		MKI Besch. periode	
	STVI	CIVI	STVI	CIVI	STVI	CIVI
Volledige vervanging na cyclus?			ja	nee	80	80
A1 Raw Materials Supply	€ 5.248	€ 6.850	2,5	1	€ 7.886	€ 6.850
A2 Transport	€ 267	€ 424	2,5	1	€ 380	€ 424
A3 Manufacturing	€ 253	€ 348	2,5	1	€ 339	€ 348
A4 Transport from the gate to the site	€ 475	€ 670	2,5	2,5	€ 739	€ 1.042
A5 Assembly	€ 236	€ 315	2,5	2,5	€ 343	€ 461
B1 Use	€ -	€ -	2,5	2,5	€ -	€ -
B2 Maintenance	€ -	€ -	2,5	2,5	€ -	€ -
B3 Replacements	€ -	€ -	2,5	2,5	€ -	€ -
C1 Demolition	€ 169	€ 379	2,5	2,5	€ 80	€ 109
C2 Transport	€ 160	€ 226	2,5	2,5	€ 148	€ 209
C3 Waste processing	€ 29	€ 43	2,5	1	€ 15	€ 10
C4 Final disposal	€ 2	€ 3	2,5	1	€ 2	€ 1
D Reuse/Reovery/Recycling potential	€ -2.345	€ -2.983	2,5	1	€ -1.766	€ -892
	€ 4.495	€ 6.275			€ 8.165	€ 8.563



Figuur 10. Break-even punt voor het scenario waarin de energietransitie in 2100 volledig is (scenario langzaam). Bij een gebruiksduur van 74 jaar of korter is de totale milieu-impact van het circulaire viaduct lager dan die van het referentie viaduct.

5 Verbetermogelijkheden

Het circulaire viaduct kent nog maar een korte ontwikkelingsperiode. Het is dus de verwachting dat er nog verbeteringen op het ontwerp en productie mogelijk zullen zijn. Als onderdeel van deze studie is gekeken naar de beschikbare ideeën voor (vooral materiaalkundige) doorontwikkeling. Daaruit is in overleg met de opdrachtgever een longlist van verbeteropties opgesteld, deze is weergegeven in Tabel 10.

Tabel 10. overzicht van overwogen verbeteropties (longlist). Weergegeven zijn de inschattingen en de uiteindelijke top 3, die verder milieutechnisch is uitgewerkt

rank	verbeteroptie	Binnen 3-5 jaar	Milieuwinst
1	Geopolymeren	ja	++
2	Optimaliseren wapening, betonmengsel en dimensies	ja	+
3	Basaltwapening	ja	+
	CSA-B cement	nee	++
	Carbonatie cement (Solidia)	ja	+/-
	Reclaimed cement	nee	++
	Staalvezelbeton	ja	+/-

Deze verbeteropties zijn beoordeeld op basis van de volgende criteria:

1. Is de verbetering realistisch gezien in te voeren binnen een periode van 3-5 jaar?
2. Leidt de verbetering naar verwachting tot milieuwinst en hoeveel ongeveer?

Daarbij is niet gekeken naar kosten. Uit de longlist zijn de drie meest belovende verbeteropties gekozen in overleg met Rijkswaterstaat (aangegeven in Tabel 10. met ranking 1-3). Deze zijn vervolgens verder

uitgewerkt door middel van marktonderzoek en verwerkt in de LCA studie. De uitgewerkte verbeteropties worden in beide ontwerpen (zowel referentie als circulair viaduct) doorgevoerd als dat technisch mogelijk is.

Geopolymeren

Het mogelijk toepassen van geopolymeren (we spreken hier in Nederland doorgaans van alkalisch geactiveerd bindmiddel systemen op basis van vliegashoudend en hoogovenslakken) is genoemd als mogelijke vervolgonwikkeling in de Ontwerpnota circulair viaduct (3). Tevens is er al enige ervaring met het toepassen van geopolymeren in constructieve toepassingen, maar niet veel en niet veel projecten die daarbij ook goed gedocumenteerd zijn. We zijn dus voorzichtig om constructieve toepassing van deze klasse van binders als realistisch binnen 3-5 jaar te kwalificeren voor viaducten.

In nader overleg met betrokken betontechnologen en mede op basis van een artikel in Betoniek (4) zijn we tot de conclusie gekomen dat bij doorontwikkeling op het gebied van bindersystemen in deze toepassing niet zozeer alkalisch geactiveerde systemen waarschijnlijk lijken, als wel gebruik van een bekend cement met een laag klinkergehalte. Daarbij zijn we uitgekomen op toepassing van een CEM III B cement. De verwachte milieuwinst bij gebruik van een CEM III B cement in vergelijking met een geschikt geopolymer systeem voor deze toepassing ontlopen elkaar niet of nauwelijks. In dat geval geeft de producent de voorkeur aan een bindersysteem waar veel ervaring mee is (CEM III B).

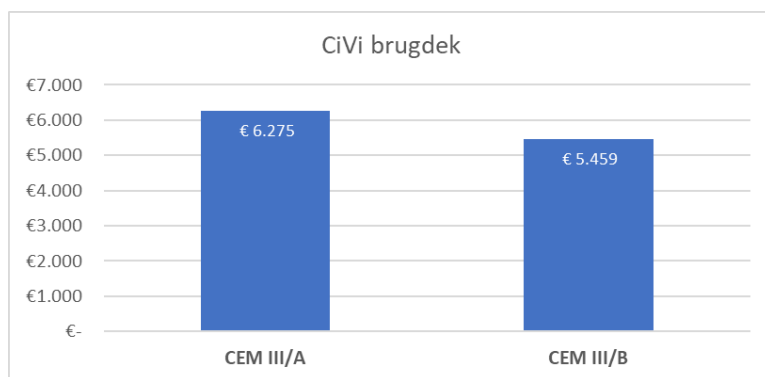
Omschakeling naar een CEM III B cement heeft wel tot gevolg dat de sterkteontwikkeling in de eerste 24-48 uur langzamer op gang zal komen, hetgeen consequenties zal hebben voor de productiviteit van de productielocatie (en daarmee de kostprijs). Maar aangezien kosten geen criterium zijn in deze analyse nemen we deze verbeteroptie mee in de analyse en passen we het toe op het reguliere en circulaire ontwerp.

Voor de toepassing van CEM III B als binder is een nieuw betonmengsel ontworpen door de firma Spanbeton. Op basis van dit mengsel is een milieutechnisch vergelijk gemaakt met het oorspronkelijke mengsel op basis van CEM III A voor het circulaire viaduct. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 11.

Tabel 11. Milieutechnisch vergelijk tussen het ontwikkel mengsel op basis van een CEM III B in vergelijking met het oorspronkelijke betonmengsel van het circulaire viaduct (op basis van een CEM III A).

VERGELIJK C60/75 per m3	CEM III/A	CEM III/B
A1 Raw Materials Supply	€ 19,74	€ 11,49
A2 Transport	€ 2,86	€ 3,12
A3 Manufacturing	€ 3,10	€ 3,10
Total	€ 25,70	€ 17,70

Wanneer we dit mengsel doorrekenen op het gehele brugdek van het circulaire viaduct dan zien we een verbetering (Figuur 11) van 13%.



Figuur 11. Milieu-impact (MKI in euro) voor het brugdek van het circulaire viaduct (initieel module A-D) bij gebruik van het originele betonmengsel (op basis van CEM III A) in vergelijking met gebruik van het doorontwikkelde betonmengsel op basis van CEM III B.

Toepassing van het ontwikkelmengsel op basis van een CEM III B leidt dus tot een aanzienlijke reductie van de milieu-impact en is toepasbaar op beide ontwerpen. Wanneer we dit mengsel op beide ontwerpen doorvoeren en het basis scenario opnieuw bepalen dan zien we dat beide ontwerpen evenredig verbeteren. Aan het vergelijk verandert hiermee niet veel. Het break-even punt komt te liggen op 129 jaar in vergelijking met 124 jaar in het basis scenario. Wel neemt de totale milieu-impact van beide ontwerpen ten opzichte van het basis scenario (Tabel 3) significant af (ordegrootte 10-15%), zoals in Tabel 12 is te zien.

Tabel 12. Milieu-impact (MKI in euro) van een referentie viaduct (STVI) en het circulaire viaduct (CIVI) inclusief doorontwikkeling van het betonmengsel met toepassing van een CEM III B cement. Overige uitgangspunten gelijk aan het basis scenario.

VERGELIJK A1-D (200 jaar)	MKI Initieel		Levensduurfactor		MKI Besch. periode	
	STVI	CIVI	STVI	CIVI	STVI	CIVI
Levensduur			80	80		
A1 Raw Materials Supply	€ 4.676	€ 5.922	2,5	1	€ 11.690	€ 5.922
A2 Transport	€ 324	€ 453	2,5	1	€ 810	€ 453
A3 Manufacturing	€ 341	€ 462	2,5	1	€ 852	€ 462
A4 Transport from the gate to the site	€ 497	€ 689	2,5	2,5	€ 1.242	€ 1.722
A5 Assembly	€ 224	€ 292	2,5	2,5	€ 560	€ 731
B1 Use	€ -	€ -	2,5	2,5	€ -	€ -
B2 Maintenance	€ -	€ -	2,5	2,5	€ -	€ -
B3 Replacements	€ -	€ -	2,5	2,5	€ -	€ -
C1 Demolition	€ 169	€ 355	2,5	2,5	€ 424	€ 889
C2 Transport	€ 168	€ 233	2,5	2,5	€ 420	€ 582
C3 Waste processing	€ 32	€ 44	2,5	1	€ 80	€ 44
C4 Final disposal	€ 2	€ 3	2,5	1	€ 6	€ 3
D Reuse/Recovery/Recycling potentie	€ -2.360	€ -2.994	2,5	1	€ -5.900	€ -2.994
	€ 4.073	€ 5.459			€ 10.183	€ 7.813

Optimaliseren wapening, beton en dimensies

Op verzoek van NIBE heeft de firma Spanbeton onderzocht of het ontwerp voor het circulaire viaduct verder te optimaliseren zou zijn op hoeveelheid wapening, beton en betonmengsel. Het onderzoek naar verbeteren betonmengsel is samengevallen met het onderzoek naar toepassing van geopolymeren, zoals hierboven beschreven. Voor de hoeveelheid beton en wapening is ook onderzoek gedaan en daaruit kwam naar voren dat hier geen

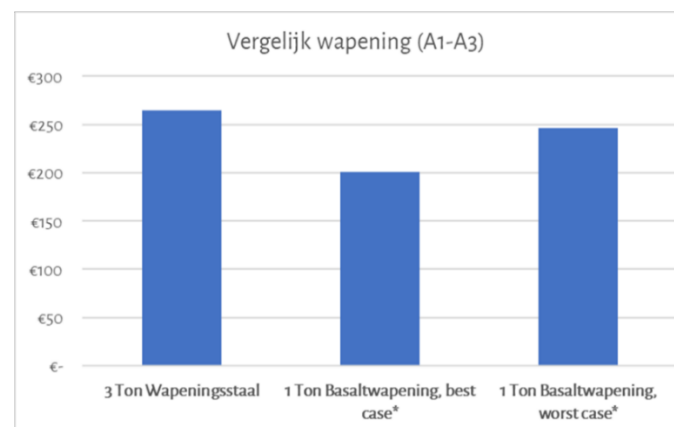
significante verbeteringen te verwachten zijn, zolang de ontwerp levensduur op 200 jaar ligt. Door deze ontwerp levensduur zijn er eisen aan de dekking (van de wapening) en de belasting door verkeer, die een reductie van beton of wapening niet mogelijk maken. Wanneer de levensduur van 200 jaar gereduceerd zou worden, bijvoorbeeld naar 50 jaar dan zou er een besparing te realiseren zijn. Dit hebben we echter geen onderdeel van de studie gemaakt en hebben de ontwerp levensduur van 200 jaar aangehouden.

Basaltwapening

Basaltwapening is sterker en lichter dan staalwapening en lijkt een serieuze optie, die tot milieuwinst zou kunnen leiden. Er zijn gesprekken gevoerd met leveranciers, onderzoeksinstituten en producenten van basaltwapening. Er is op dit moment geen LCA beschikbaar voor basaltwapening en daarom hebben we in overleg met de betrokken partijen een globale inschatting gemaakt, waarbij we de volgende uitgangspunten hebben gekozen:

- Productie van Basaltwapening vezels vindt plaats met gas als energiedrager
- De hoeveelheid energie in productie van de vezels ligt tussen 5,5-9 kWh/kg
- Voor de winning van basalt is een basisprofiel beschikbaar in Ecolnvent (Basalt {GLO} | market for), dit is toegepast
- Van de Basaltvezels worden met composiet staven geëxtrudeerd
- Voor het extrusie proces is het Ecolnvent proces "Injection moulding {RER}" aangehouden
- Voor het composiet is een Epoxy resin aangehouden (Ecolnvent proces Epoxy resin, liquid {GLO} | market for)
- De hoeveelheid Epoxy resin is 30w% op basis van indicatie door de producent

Op basis van deze uitgangspunten is een LCA profiel voor Basaltwapening opgesteld en vervolgens is de staalwapening (en niet de voorspanwapening) vervangen door Basaltwapening in een verhouding van 3 kg staal : 1 kg basalt, zoals door de producent als vuistregel wordt geadviseerd. Deze verhouding kan preciezer worden vastgesteld als een wapeningsberekening wordt doorgevoerd. Dat is in deze studie niet gedaan.



Figuur 12. Vergelijking van de milieu-impact van de productie van basaltwapening in vergelijking met wapeningsstaal.

Figuur 12 laat het resultaat hiervan zien, waarbij we voor het energieverbruik in productie van basaltvezel de onder- en bovengrens beide laten zien. Op het eind van ons onderzoek hebben we van 1 producent de daadwerkelijke productie energie mogen ontvangen en die lag vrijwel precies in het midden van de eerder aangegeven bandbreedte.

Op basis van dit eerste ruwe vergelijk is onze conclusie dat de milieu-impact van de productie van basaltwapening ca. 10% lager ligt dan wapeningsstaal. Door de onzekerheid in de data is dit geen significant verschil. Verder onderzoek en dan met name een complete LCA voor basaltwapening en een wapeningsberekening is nodig om betere conclusies te kunnen trekken.

6 Circulariteit

Voor het analyseren en berekenen van de circulariteit van beide ontwerpen zal in deze studie gewerkt worden met de leidraad “Kernmethode voor het meten van circulariteit in de bouw” van het platform CB’23 (5). De kernmethode is gebaseerd op drie doelen van circulair bouwen (5):

- Beschermen van materiaalvoorraden
- Beschermen van bestaande waarde
- Beschermen van het milieu

Op dit moment is beschermen van bestaande waarde in de methode nog niet uitgewerkt. Voor beschermen van het milieu wordt integraal verwezen naar de bepalingmethode Gebouwen en GWW-werken en het daarop gebaseerde stelsel (alle hiervoor gepresenteerde analyseresultaten uitgedrukt in milieu-impact, MKI). Dit is uitgewerkt in de milieutechnische LCA studie, eerder beschreven in dit rapport. Blijft voor nu het doel “beschermen van materiaalvoorraden” over. Dit doel is in de kernmethode uitgewerkt in drie onderling verband houdende componenten:

- Analyse van de materiaal stromen (Material Flow Analysis (MFA))
- Ontwerpprincipes gericht op adaptiviteit
- Rekenmethode voor losmaakbaarheid

De analyse van de materiaal stromen over de gehele levenscyclus van een product of bouwwerk is internationaal gezien de basis voor vrijwel alle circulariteit indicatoren of methoden. Het is gebaseerd op een beschrijving van zowel de hoeveelheden als ook essentiële eigenschappen van de materiaalstromen. De materiaalstromen, die de kernmethode aanduidt, zijn weergegeven in Bijlage A.

Material Flow analysis (MFA)

Voor beide ontwerpen hebben we een MFA uitgevoerd volgens de kernmethode. Hiervoor is het van belang dat voor alle grondstoffen in kaart wordt gebracht wat de oorsprong van de grondstoffen is en welk deel bestaat uit gerecyclede, hergebruikte of hernieuwbare grondstoffen. In Bijlage B is een overzicht te vinden van de gehanteerde hoeveelheden secundair materiaal in de gebruikte grondstoffen in deze studie. Hiervoor is nu het Nederlands of Europees gemiddelde aangehouden voor de grondstoffen en niet het specifieke aandeel secundair van specifieke leveranciers. In de markt is er tussen leveranciers een aanzienlijke spreiding in aandeel secundair in bepaalde grondstoffen en producten, waardoor deze analyse voor een specifieke situatie een ander resultaat zou kunnen geven. In Bijlage B is aangegeven wat ons bekend is over variaties in het aandeel secundair in de markt.

Naast de analyse van de grondstoffen aan de input zijde van ons product, is het voor de MFA ook van belang te kijken naar de output zijde. Hiervoor hebben we in Nederland in bijlage 5 van de Bepalingmethode (6) een overzicht van de forfaitaire waarden voor afvalscenario’s in Nederland. Deze tabel geeft een overzicht van het percentage recycling, hergebruik, stort en verbranding voor de meest voorkomende materialen. De waarden uit deze bijlage zijn in deze studie toegepast.

Wanneer we de MFA uitvoeren op beide ontwerpen uitvoeren dan krijgen we een overzicht van zowel input als output zijde van de grondstofstromen. Dit overzicht is als Excel resultaat opgenomen in Bijlage C. In het format van CB’23 is het overzicht weergegeven in Tabel 13.

Tabel 13. Overzicht van de CB'23 indicatoren voor beide ontwerpen, naamgeving van de indicatoren is ingekort, volledige naamgeving is te vinden in de leidraad. Analyse over 1 gebruikscyclus, alles in kg.

overzicht indicatoren CB'23		
	Referentie viaduct	Circulair Viaduct
1.1 primair materiaal	169.946	250.260
1.2 secundair materiaal	33.319	50.157
1.2a hergebruik	0	0
1.2b recycling	33.319	50.157
1.3 gevoeligheid uitputting	169.946	250.260
1.3a duurzaam hernieuwbaar	0	0
1.3b niet-hernieuwbaar	169.946	250.260
2.1 hergebruik	1.087	1.093
2.2 recycling	199.650	295.418
3.1 energiewinning	0	0
3.2 stort	2.528	3.906

De resultaten laten zien dat beide ontwerpen qua hoeveelheden wel iets afwijken, maar omdat het in beide ontwerpen over dezelfde grondstoffen gaat is het resultaat van de analyse voor beide ontwerpen vrijwel gelijkwaardig.

Deze MFA is uitgevoerd over beide ontwerpen over hun eigen technische levensduur (200 jaar voor het circulaire viaduct en 100 jaar voor het referentie viaduct) zonder herplaatsingen, dus 1 keer plaatsen en hele technische levensduur functioneren op dit locatie. Wanneer we nu gaan analyseren voor een situatie, waarin herplaatsing van het circulaire viaduct gaat plaatsvinden en voor het referentie viaduct dus sloop en nieuwbouw, gaan er duidelijke verschillen optreden. Hierbij gaan we uit van 3% materiaalverlies bij zowel demontage als montage van het circulaire viaduct, dus een totaal van 6%. Voor het referentie viaduct gaan we uit van sloop en nieuwbouw van het gehele brugdek. We gaan uit van beschouwingsperiode van 200 jaar en gebruikslevensduur van een viaduct van 80 jaar (basis scenario).

Tabel 14. Overzicht van de CB'23 indicatoren voor beide ontwerpen, naamgeving van de indicatoren is ingekort, volledige naamgeving is te vinden in de leidraad. Analyse over 3 gebruikscycli (basis scenario), alles in kg.

overzicht indicatoren CB'23		
	Referentie viaduct	Circulair Viaduct
1.1 primair materiaal	509.839	297.109
1.2 secundair materiaal	99.956	59.546
1.2a hergebruik	0	0
1.2b recycling	99.956	59.546
1.3 gevoeligheid uitputting	509.839	297.109
1.3a duurzaam hernieuwbaar	0	0
1.3b niet-hernieuwbaar	509.839	297.109
	0	0
2.1 hergebruik	3.262	1.298
2.2 recycling	598.950	350.720
	0	0
3.1 energiewinning	0	0
3.2 stort	7.583	4.637

Voor het circulaire viaduct vindt er nu 2 maal herplaatsing plaats (dus totaal van 3 gebruikscycli), waarbij er sprake is van uitval (verlies). We hebben in deze analyse de herplaatsing van de onbeschadigde viaduct delen niet als “einde levensduur met hergebruik” gekwalificeerd, maar als onderdeel van de gebruiksfase van 200 jaar. Hierdoor komt het circulaire viaduct dus niet éénmaal terug in de cijfers voor 2.1 hergebruik. In dit cijfer voor hergebruik zit nu alleen materiaal dat daadwerkelijk als output stroom het systeem verlaat en dan hergebruik als eindelevensduur scenario heeft (voorspanwapening in dit geval). Tabel 14 laat zien dat het circulaire viaduct in het basis scenario, over 3 gebruikscycli (en op basis van de huidige ontwerpen en technologie) 42% minder primaire grondstoffen zou vragen.

Material Circularity Indicator (MCI)

De EllenMacArthur Foundation heeft een indicator ontwikkeld om de circulariteit van een product in 1 indicator weer te geven. Deze indicator heet de Material Circularity Indicator (MCI). De leidraad van CB'23 (5) geeft in paragraaf 5.2.2. de relatie tussen de MCI en de indicatoren, zoals in de leidraad gedefinieerd en vastgesteld. We kunnen de MCI van beide ontwerpen berekenen. Hier zijn 2 benaderingswijzen voor: één is waarbij we uitgaan van 1 gebruikscyclus en in de berekening mee nemen dat het circulaire viaduct een levensduur heeft van 200 jaar en het referentie viaduct 80 jaar. Dit verschil in levensduur kan in de life time extension factor X verwerkt worden. De andere mogelijkheid is dat we alle grondstofstromen over de beschouwingsperiode van 200 jaar berekenen en dan de MCI bepalen op basis van deze hoeveelheden en de life time extension factor op 1 laten. Beide mogelijkheden hebben we verkend.

Met life time extension factor

De life time extension factor is $200/80=2,5$. Voor de levensduur van het referentie viaduct nemen we in dit geval de referentie gebruikslevensduur en niet de technische levensduur. Een referentie viaduct wordt ontworpen voor een technische levensduur van 100 jaar, maar we nemen aan dat het in de praktijk gemiddeld 80 jaar zal functioneren. De vergelijking om de MCI te berekenen, inclusief de levensduur factor is:

$$MCI = 1 - LFI * \left(\frac{0,9}{X}\right)$$

	LFI	X	MCI
Circulaire viaduct	42,3%	2,5	84,8%
Referentie viaduct	42,4%	1	61,8%

Over 200 jaar en life time extension factor van 1

In deze analyse blijkt direct dat de MCI alleen gevoelig is voor de verhouding tussen de verschillende grondstofstromen en niet de absolute hoeveelheid. Dus of de analyse over 1 gebruikscyclus of meerdere wordt gedaan maakt niet uit, als de verhouding tussen de stromen gelijk blijft komt er dezelfde LFI uit en daarmee bij gelijke X ook dezelfde MCI. Dit geeft het volgende vergelijk tussen de beide ontwerpen (over 3 gebruikscycli, zoals weergegeven in Tabel 14):

	LFI	X	MCI
Circulaire viaduct	42,3%	1	61,9%
Referentie viaduct	42,4%	1	61,8%

7 Totaal scenario

Om de derde onderzoeksvraag te beantwoorden: Hoe en wanneer levert dit circulair viaduct-concept winst op qua milieu-impact en circulariteit, hebben we een gecombineerd scenario opgebouwd. Dit scenario gaat uit van:

- Uitgangspunten basis scenario
- Verbeteropties CEM IIIB betonmengsel en basaltwapening zijn toegepast voor beide ontwerpen
- Energietransitie scenario langzaam (in 2100 afgerond)

Het resultaat is weergegeven in Tabel 15.

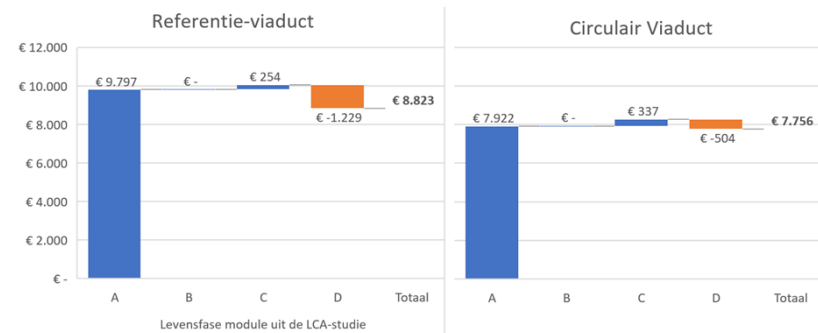
Tabel 15. Milieu-impact (MKI in euro) van een referentie viaduct (STVI) en het circulaire viaduct (CIVI) voor het totaal scenario.

VERGELIJK A1-D (200 jaar)	MKI start		Levensduurfactor		MKI Besch. periode	
	STVI	QVI	STVI	QVI	STVI	QVI
Volledige vervanging na cyclus?			ja	nee	80	80
A1 Raw Materials Supply	€ 4.463	€ 5.534	2,5	1	€ 7.796	€ 5.534
A2 Transport	€ 298	€ 406	2,5	1	€ 409	€ 406
A3 Manufacturing	€ 366	€ 489	2,5	1	€ 514	€ 489
A4 Transport from the gate to the site	€ 477	€ 654	2,5	2,5	€ 731	€ 1.034
A5 Assembly	€ 217	€ 279	2,5	2,5	€ 348	€ 460
B1 Use	€ -	€ -	2,5	2,5	€ -	€ -
B2 Maintenance	€ -	€ -	2,5	2,5	€ -	€ -
B3 Replacements	€ -	€ -	2,5	2,5	€ -	€ -
C1 Demolition	€ 169	€ 232	2,5	2,5	€ 80	€ 109
C2 Transport	€ 165	€ 227	2,5	2,5	€ 145	€ 209
C3 Waste processing	€ 54	€ 84	2,5	1	€ 26	€ 17
C4 Final disposal	€ 5	€ 7	2,5	1	€ 3	€ 2
D Reuse/Recovery/Recycling potential	€ -1.646	€ -1.694	2,5	1	€ -1.229	€ -504
	€ 4.557	€ 6.217			€ 8.823	€ 7.756

In Bijlage D hebben we de gehele berekening opgenomen, inclusief de tussenliggende cycli en de impact van de energietransitie in 2030 (op basis van de Nationale Energieverkenning (6)) en volledige energietransitie.

vervangingsfactor **1,92** x
Breakeven point **104 jr**

Figuur 13. Break-even punt voor het totaal scenario. Bij een gebruiksduur van 104 jaar of korter is de totale milieu-impact van het circulaire viaduct lager dan die van het referentie viaduct.



Figuur 14. Milieu-impact (MKI in euro) van een referentie viaduct en het circulaire viaduct, per levensfase (modules) weergegeven voor het totaal scenario (over een beschouwingsperiode van 200 jaar).

Het totaal scenario laat zien dat het circulaire viaduct in dit scenario 1 vervanging nodig heeft om zichzelf milieutechnisch terug te verdienen. Het laat ook zien dat de milieutechnische verschillen tussen beide scenario's niet heel groot zullen zijn. Waarbij het circulaire viaduct zijn milieu-impact vooral

vroeg in de beschouwingsperiode zal hebben en het referentie viaduct wat meer verspreid.

De energietransitie heeft een grote impact. De milieu-impact van de grondstoffen zal meer dan halveren, transport daalt meer dan 70% en productie zelf ook meer dan 70%.

100 jaar als beschouwingsperiode

Wanneer we dit totaal scenario nu berekenen op een beschouwingsperiode van 100 jaar en dan zonder de equivalent kwaliteitsfactor Q te hanteren (dus na 100 jaar eindigt ook de levensduur van het circulaire viaduct, zonder restlevensduur of rest kwaliteit) dan levert dit een break-even periode op van 61 jaar. Dit zouden we kunnen zien als een worst case scenario.

CONCLUSIE

In deze studie hebben we ons drie onderzoeksvragen gesteld, die we hier zullen beantwoorden. Hierbij hebben we gebruik gemaakt van de standaard LCA methodiek, zoals in de bepalingmethode (1) beschreven. Op een tweetal punten hebben we in deze studie een aanname gedaan, die nog niet in de bepalingmethode is opgenomen:

1. Voor het demonteren van een circulair brugdekdeel is geen forfaitair uitval percentage in de bepalingmethode opgenomen, hier hebben we dezelfde 3% aangenomen die voor prefab producten voor de bouwfase (A5) is opgenomen in de bepalingmethode.
2. Voor het 100% hergebruik scenario van een circulair brugdekdeel bij een beschouwingsperiode van 100 jaar hebben we gebruik gemaakt van een equivalente kwaliteitsfactor van 50% voor de brugdekdelen (100 jaar gebruik gehad en 200 jaar technische levensduur). De equivalente kwaliteitsfactor Q is in de EN 15804:A1 opgenomen, maar de uitwerking hoe deze toe te passen, is in de bepalingmethode nog niet gegeven. Recent is er wel een onderzoek door Stichting Bouwkwiteit gedaan, waar deze functionele equivalentie factor Q ook is besproken door deskundigen.

Hoe scoort het huidige ontwerp van dit circulair viaduct-concept (brugdek) qua circulariteit en qua milieu-impact in vergelijking met een regulier ontwerp?

Uit de analyse van het basis scenario (Tabel 3) blijkt dat het circulaire viaduct in productie een 33% hogere milieu-impact heeft en 47% meer primaire grondstoffen nodig heeft voor de productie. Het circulaire viaduct (brugdek) is in zijn geheel 48% zwaarder dan het referentie viaduct. Het modulair uitvoeren van het ontwerp voor dezelfde functionaliteit heeft dus een behoorlijk hoger materiaalverbruik en initiële milieulast tot gevolg.

Vervolgens wordt het viaduct in functie geplaatst en zal het daar een bepaalde periode zijn functie kunnen vervullen. Er zal een moment komen dat het viaduct niet meer voldoet. Dat kan veroorzaakt worden doordat de technische levensduur is bereikt, maar vaak zal het ook zo zijn dat het door omgevingsfactoren bepaald wordt. De periode dat een viaduct in Nederland gemiddeld zijn functie vervult is (nog) niet goed bekend en enkel statistisch te bepalen. Het is de verwachting van Rijkswaterstaat dat het voor betonnen viaducten en bruggen ergens rond de 80 jaar (met een flinke spreiding) zal liggen, maar de (beperkte subset van) reeds gesloopte viaducten zijn nu nog aanzienlijk eerder gesloopt (gemiddeld na 46 jaar).

Als we het huidige ontwerp van het circulaire viaduct in functie vergelijken met het referentie viaduct voor een beschouwingsperiode van 200 jaar dan zien we dat het zich milieutechnisch terugverdiend bij een vervangingsfactor van 1,6. Dit wil zeggen dat bij 1 keer vervangen het viaduct zich al ruim terugverdiend heeft. Bij een functionele levensduur van 124 jaar of korter is het circulaire viaduct milieutechnische de betere keus. Dit betekent dat rond de 80 jaar levensduur die Rijkswaterstaat realistisch acht het circulaire viaduct altijd de milieutechnische betere keus is.

Qua circulariteit laat de MFA zien dat bij 2 gebruikscycli (1 vervanging) het circulaire viaduct over de hele levensduur 22% besparing op primaire grondstoffen zal realiseren. Bij 3 gebruikscycli (basis scenario) loopt dit op tot 42%.

Uit de gevoeligheidsanalyse komt naar voren dat vooral de energietransitie een grote impact kan hebben. Wanneer de energietransitie zich volledig zal voltrekken (alle fossiele brandstoffen worden vervangen door duurzame alternatieven) dan zal het break-even punt verschuiven van 124 jaar naar 74 jaar. Dit betekent dat er minstens 2 vervangingen nodig zullen zijn voordat het circulaire viaduct zijn initiële hogere milieu-impact heeft terugverdiend. Nu is dat over een technische levensduur van 200 jaar nog steeds te

verwachten. Maar de onzekerheid neemt wel toe en een afweging voor welke omstandigheden dit een goede keus zal zijn, lijkt wel nodig.

Wat zijn de verbetermogelijkheden van dit circulair viaduct-concept qua circulariteit en milieu-impact en hoe scoort een geoptimaliseerd ontwerp van dit circulair viaduct-concept naar verwachting?

Zowel voor het circulaire viaduct als het referentie viaduct bestaan er nog verbetermogelijkheden. Een verkenning naar die mogelijkheden laat zien dat het gebruik van een geoptimaliseerd betonmengsel op basis van een CEM III/B cement het meeste potentieel voor verbetering heeft. Dit mengsel kan worden toegepast op zowel de productie van de bruggedelen voor het circulaire viaduct als op de productie van de prefab liggers uit het referentie viaduct. Gebruik van dit mengsel heeft wel een stijging van de kostprijs tot gevolg, die voor de prefab liggers uit het referentie ontwerp hoger zal zijn dan voor de bruggedelen van het circulaire viaduct.

Wanneer deze verbetermogelijkheid op het basis scenario wordt toegepast dan verbeteren de prestaties van beide ontwerpen. De break-even levensduur gaat van 124 jaar naar 129 jaar en de vervangingsfactor waar beide ontwerpen in evenwicht zijn van 1,6 naar 1,55. De verbetering is dus licht in het voordeel van het circulaire viaduct. Maar de conclusie verandert hier niet significant door.

Een tweede verbetermogelijkheid die waarschijnlijk tot een beperkte milieuwinst zal leiden is het gebruik van basaltwapening in plaats van staalwapening. De besparing van deze mogelijkheid is wel kleiner en door ontbreken van gedetailleerde LCA data ook onzeker. Voor deze verbetermogelijkheid is geen apart scenario doorgerekend. De verbetermogelijkheid is wel meegenomen in het meest realistische scenario.

Hoe en wanneer levert dit circulair viaduct-concept winst op qua milieu-impact en circulariteit?

Om uiteindelijk te kunnen concluderen of het circulaire viaduct nu tot winst zal leiden op gebied van milieu en circulariteit is er een totaal scenario opgebouwd. In dit scenario zijn de 2 verbetermogelijkheden (CEM III/B en basaltwapening) meegenomen, alsmede de invloed van de energietransitie (stand langzaam). Dit scenario laat zien dat het circulaire viaduct zijn initieel hogere milieu-impact en grondstofverbruik terugverdiend als het viaduct minstens 1 keer vervangen of aangepast dient te worden. Gemiddeld genomen bij herhaaldelijk toepassen van dit concept is 92% van de keren één vervanging (hergebruik van het circulaire viaduct) nodig om gemiddeld de initieel hogere milieu-impact terug te verdienen.

Wanneer we dit scenario berekenen op een beschouwingsperiode van 100 jaar, dan betekent dit dat het viaduct 61 jaar of korter zijn functie moet behouden. Dit ligt ongeveer in het midden van de range tussen de reeds gesloopte betonnen viaducten van Rijkswaterstaat (46 jaar) en de gemiddeld statistische verwachte functionele levensduur (80 jaar) van een viaduct. Dit geeft al aan dat het toepassen van het circulaire viaduct een zorgvuldige afweging waard is. De kans dat het zich zal “terugverdienen” is zeker aanwezig, maar het moet in zijn totale functionele levensduur wel minstens 1 keer tot vervanging (hergebruik van het circulaire viaduct) komen, anders zijn de initieel hogere milieulasten sowieso voor niets geweest.

Het voltrekken van de energietransitie maakt het milieutechnisch terugverdienen van het circulaire viaduct dus lastiger, maar zeker niet onmogelijk. De verschillen in milieu-impact tussen het circulaire en referentie viaduct in dit laatste totaal-scenario zijn wel heel klein geworden.

De grootste winst van het circulaire viaduct zou dan wel eens kunnen liggen in het grondstofverbruik en minder in de milieuprestatie. Als de technologie voor toepassing van beton en staal in viaducten niet wezenlijk veranderd, dan lijkt het gebruik van de modulaire bruggedelen tot een aanzienlijke besparing in primaire grondstoffen te leiden.

Reflectie

Het circulaire viaduct is ontwikkeld vanuit de gedachte van een circulaire economie, waarin grondstoffen en producten ontwikkeld worden met het oog op (oneindig) hergebruik en recycling. In een circulaire economie gaan grondstoffen niet meer verloren en behouden producten en materialen zoveel mogelijk hun waarde. De analyse die we nu op het gebruik van het circulaire viaduct gedaan hebben is uitgevoerd met het instrumentarium zoals we dat vandaag de dag kennen om milieugerichte levenscyclusanalyses mee te doen. Dit instrumentarium is ontwikkeld in een tijd dat er vooral sprake was van een lineaire productieketens. Uiteraard zijn we dit nu aan het doorontwikkelen om ook circulaire productieketens te beschrijven en daar lijken we wel in te slagen. Maar missen we in onze analyse wellicht nog componenten, die in een circulaire economie van belang zijn en in een lineaire wellicht minder?

Een parameter die in de huidige systematiek niet expliciet wordt benoemd is waarde en behoud van waarde (wellicht verschil in waarde tussen in- en output stromen). In de circulaire economie is één van de leidende principes ontwerpen op behoud van waarde. Maak en gebruik producten zo, dat ze optimaal herbruikbaar zijn op een zo hoog mogelijk waarde-niveau. Hoe langer een product zijn waarde vasthoudt, hoe beter dat is. In onze analyse wordt voor recycling en hergebruik potentieel rekening gehouden met de milieu-impact van deze processen en het potentieel om door behoud van kwaliteit een milieuwinst te halen (ook een waarde). Dit komt in de analyse

tot uitdrukking in module D, waar een som van lasten en baten voor recycling en hergebruik buiten de eigen systeemgrenzen wordt verrekend. Dit zou dus gezien kunnen worden als een vorm van waarde behoud. Dit zou echter nog een stuk explicieter gemaakt kunnen worden en verdient wellicht een eigen plek in een analyse van circulariteit, waarbij ook nadrukkelijker het verschil tussen hoogwaardig en laagwaardig hergebruik wordt gewaardeerd. In Platform CB'23 wordt aan dit thema volop gewerkt en hopelijk leidt dat tot een verdere verrijking van ons instrumentarium om circulaire producten en processen te leren waarderen.

VERWIJZINGEN

1. **Stichting Bouwkwiteit.** *Belaingsmethode Gebouwen en GWW-werken.* versie 3.0, januari 2019.
2. **Visser, Gert.** *Ontwerpnota Circulair Viaduct, L202801.* sl : VolkerWessels, 2018. CV-DO-RAP-002.
3. **Spanbeton.** *Circulair viaduct kampen.* sl : Spanbeton, april 2019. CQ-1805035-190410 Memo ontwikkelvragen.
4. **e.a., G.J. van Beijnum.** *Toetsen van circulariteit in InnovA58.* sl : NIBE, april 2018. 28.007.18.04. 002/ml.
5. **e.a., Rianne van Beek.** *Nationale Energieverkenning .* sl : Energieonderzoek Centrum Nederland, 2017.
6. *Witte rook: over de CO2 footprint van cement.* **Betoniek.** 29, sl : AENEAS, augustus 2019, Vol. 16.
7. **Platform CB'23.** *Leidraad "Kernmethode voor het meten van circulariteit in de bouw".* Delft : sn, Versie 1.0 – 4 juli 2019.
8. **Leeuwen, M.L.J. van en Beijnum, G.J. van.** *Circulaire Innovaties GWW.* sl : NIBE, 2018.
9. **Beijnum, G.J. van.** *CE/VE verkenning Balgzandbrug.* sl : NIBE, 2018.
10. **Quartel, C.** *circulair viaduct Kampen.* Koudekerk aan den rijn : Spanbeton, 2019. 1805035.
11. **Nendel, S.** *Hochleistungsanwendungen durch den Einsatz von Basaltfasern.* Basalfaser Forum 2014 : sn, 2014.

12. **Vulkan Europe.** *Basaltsteenvezel.* sl : Innovatieve materialen, 2017.

13. —. *Continuous Basalt Fibre distributie & Producten.* [powerpoint presentatie] sl : Vulkan Europe, 2019.

Bijlage A: Indicatoren Leidraad “Meten van circulariteit v 1.0” van platform CB’23

Tabel 1 – Indicatoren van de kernmeetmethode voor de mate van circulariteit in de bouw

Indicator	Omschrijving
I. HOEVEELHEID GEBRUIKT MATERIAAL (INPUT)	
1.1 Hoeveelheid gebruikt primair materiaal	Mate waarin materialen worden gebruikt die geproduceerd zijn uit primaire grondstoffen .
1.2 Hoeveelheid gebruikt secundair materiaal	Mate waarin materiaal wordt gebruikt dat afkomstig is uit eerder gebruik of uit reststromen en primaire materialen vervangt.
1.2a Hoeveelheid secundair materiaal uit hergebruik	Mate waarin hergebruikte onderdelen worden gebruikt.
1.2b Hoeveelheid secundair materiaal uit recycling	Mate waarin gerecycled materiaal wordt gebruikt.
1.3 Hoeveelheid gebruikt materiaal met gevoeligheid voor uitputting	Mate waarin materiaal wordt gebruikt dat gevoelig is voor uitputting.
1.3a Hoeveelheid gebruikt duurzaam geproduceerd hernieuwbaar materiaal	Mate waarin primair materiaal van abiotische of biotische oorsprong wordt gebruikt uit een bron die wordt geteeld, natuurlijk aangevuld of natuurlijk gereinigd, op een menselijke tijdschaal én waarvan de productie-eenheid waaruit het materiaal afkomstig is op duurzame wijze beheerd wordt.

1.3b Hoeveelheid gebruikt niet-hernieuwbaar of niet-duurzaam geproduceerd hernieuwbaar materiaal ⁶	Mate waarin materiaal van abiotische of biotische oorsprong wordt gebruikt dat niet op een menselijke tijdschaal wordt geteeld, natuurlijk aangevuld of natuurlijk gereinigd wordt en/of niet afkomstig is van een productie-eenheid die op duurzame wijze beheerd wordt.
1.3c Hoeveelheid gebruikt schaars materiaal	<i>Wordt later ingevuld</i>
1.3d Hoeveelheid gebruikt algemeen beschikbaar materiaal	<i>Wordt later ingevuld</i>
2. HOEVEELHEID BESCHIKBAAR MATERIAAL VOOR VOLGENDE CYCLUS (OUTPUT)	
2.1 Hoeveelheid materiaal voor hergebruik	Mate waarin hergebruik van de gebruikte (deel)objecten de meest realistische levenseindebehandeling is.
2.2 Hoeveelheid materiaal voor recycling	Mate waarin recycling van het gebruikte materiaal de meest realistische levenseindebehandeling is.
3. HOEVEELHEID VERLOREN MATERIAAL (OUTPUT)	
3.1 Hoeveelheid materiaal naar energiewinning	Mate waarin het verwerken van materiaal in een verbrandingsoven voor energiewinning de meest realistische levenseindebehandeling is.
3.2 Hoeveelheid materiaal naar stort	Mate waarin het afvoeren van materiaal naar de stort de meest realistische levenseindebehandeling is.

Bijlage B. Overzicht van de gebruikte grondstoffen en het aandeel secundaire grondstoffen in deze grondstoffen.

	SMC*	Technisch haalbaar	opmerking
Voorspanstaal	21%	In het algemeen is bekend dat het Hoogoven procedé minder recycled content aan kan en het Electric Arc Furnace proces tot wel 100% kan gaan. De verhouding in de markt tussen deze twee productie technieken voor bepaalde productgroepen is vaak niet bekend.	We nemen aan dat voorspanstaal gemaakt is van low-alloyed staal en dat staat in Ecolnvent op 21% recycled content.
Bouwstaal	50%	In het algemeen is bekend dat het Hoogoven procedé minder recycled content aan kan en het Electric Arc Furnace proces tot wel 100% kan gaan. De verhouding in de markt tussen deze twee productie technieken voor bepaalde productgroepen is vaak niet bekend.	We hebben geen inzicht in prestaties van individuele producenten voor deze productgroep. Voor staalproductie geldt in het algemeen dat er in Europese databases als Ecolnvent wel enige informatie staat, maar het is beperkt en soms ook gedateerd. Individuele staatproducenten maken geen gegevens bekend en bieden nog geen inzicht in hun individuele prestaties..
Betonstaal	70%	100% is haalbaar, maar is meer een vraag van aanbod dan van technisch mogelijk.	Op basis van verklaring van branche verenging als representatief gemiddelde voor de Nederlandse markt. In de praktijk zal het percentage schommelen met het aanbod aan metaal schroot. Er is niet genoeg beschikbaar om de vraag te voldoen. Technisch kan deze kwaliteit staal 100% uit secundair materiaal worden geproduceerd.
CEM I	5%	De EN-197 voor cementen geeft een bandbreedte aan voor het percentage klinker in een CEM I cement van 95-100%	Een CEM I cement moet voor 95% uit klinker bestaan en de overige 5% mag de producent zelf invullen, waarbij de praktijk in dit deel van het product ook de bindtijd regelaar zal opnemen, naast eventuele andere bestanddelen.
CEM IIIA	36%	De EN-197 voor cementen geeft een bandbreedte aan voor het percentage klinker in een CEM IIIA cement van 35-64%	Wij hebben het maximale klinkergehalte aangehouden (64%), de rest zou met secundaire componenten aangevuld kunnen worden, waarbij hoogovenslak zich in elk geval tussen de 36-65% dient te bevinden.

*SMC: Secondary Material Content, het aandeel secundair materiaal in de grondstof. Data uit de NIBE EPD database, NIBE Milieuclassificatie, Ecolnvent 3.4 of de Nationale Milieudatabase voor gemiddelde samenstelling voor Nederlandse of Europese markt (dus geen individuele producten, die soms aanzienlijk beter kunnen presteren.)

Bijlage C. Overzicht van de uitkomst van de MFA analyse van beide ontwerpen

Civi	Amount [kg]	input		output		hergebruik		verbranding		stort		LFI
		SCM		recycling								
CEM III/A 52.5 N (NL)	45.704,25	36,0%	16454	99%	45247	0%	0	0%	0	1%	457	
Gravel 4-32, average NL	98.518,05	0,0%	0	99%	97533	0%	0	0%	0	1%	985	
Industrial sand, average NL	79.763,44	0,0%	0	99%	78966	0%	0	0%	0	1%	798	
Concrete granulate	15.573,30	100,0%	15573	99%	15418	0%	0	0%	0	1%	156	
Steel, Reinforcement [VWN]	22.540,00	70,0%	15778	95%	21413	0%	0	0%	0	5%	1127	
Limestone, milled	14.670,50	0,0%	0	99%	14524	0%	0	0%	0	1%	147	
Water - Tap water	13.656,36	0,0%	0	99%	13520	0%	0	0%	0	1%	137	
Chemicals organic	417,54	0,0%	0	99%	413	0%	0	0%	0	1%	4	
CEM-I 52.5 R (NL)	365,95	95,0%	348	99%	362	0%	0	0%	0	1%	4	
Coal fly ash	91,49	100,0%	91	99%	91	0%	0	0%	0	1%	1	
superplasticisers	7,62	0,0%	0	99%	8	0%	0	0%	0	1%	0	
Voorspanstaal	9.108,00	21,0%	1913	87%	7924	12%	1093	0%	0	1%	91	
	300417		50157		295418		1093		0		3906	42,30%
STVI												
		input		output		hergebruik		verbranding		stort		
Steel, Reinforcement [VWN]	12.375,00	70,0%	8663	95%	11756	0%	0	0%	0	5%	619	
Voorspanstaal	6.600,00	21,0%	1386	87%	5742	12%	792	0%	0	1%	66	
CEM III/A 52.5 N (NL)	33.412,50	36,0%	12029	99%	33078	0%	0	0%	0	1%	334	
Limestone	10.725,00	0,0%	0	99%	10618	0%	0	0%	0	1%	107	
Industrial sand, average NL	54.780,00	0,0%	0	99%	54232	0%	0	0%	0	1%	548	
Gravel 4-32, average NL	72.187,50	0,0%	0	99%	71466	0%	0	0%	0	1%	722	
Concrete granulate	10.725,00	100,0%	10725	99%	10618	0%	0	0%	0	1%	107	
Voorspanstaal	2.460,00	21,0%	517	87%	2140	12%	295	0%	0	1%	25	
	203265		33319		199650		1087		0		2528	42,43%

Bijlage D. Overzicht van de modellering van het totaal-scenario, waarbij alle cycli worden getoond.

Meest realistisch: CEM III/B + Basaltwapening + Energietransitie

Einde energietransitie:	2100	Breakeven point	
Punt vastgesteld beleid	2030	104	96
Huidig jaar	2019	Breakeven point 104 jr	
Cyclus (jr)	80	moment:	
Beschouwingsperiode (jr)	200	% E trans nu ->> 2030	
		% E trans 2030 ->> voltooid	

2019	2019	2099	2099	2179	2179
0%	0%	100%	100%	100%	100%
0%	0%	99%	99%	100%	100%

VERGELIJK A1-D (200 jaar)	MKI start		Levensduurfactor		2030		Einde transitie		MKI moment 0		MKI vervanging 1		MKI vervanging 2		MKI Besch. periode	
	STVI	CIVI	STVI	CIVI	STVI	CIVI	STVI	CIVI	STVI	CIVI	STVI	CIVI	STVI	CIVI	STVI	CIVI
Volledige vervanging na cyclus?			ja	nee											80	80
A1 Raw Materials Supply	€ 4.463	€ 5.534	2,5	1	€ 4.998	€ 5.496	€ 2.195	€ 3.008	€ 4.463	€ 5.534	€ 2.235	€ -	€ 1.098	€ -	€ 7.796	€ 5.534
A2 Transport	€ 298	€ 406	2,5	1	€ 228	€ 384	€ 72	€ 118	€ 298	€ 406	€ 75	€ -	€ 36	€ -	€ 409	€ 406
A3 Manufacturing	€ 356	€ 489	2,5	1	€ 366	€ 482	€ 103	€ 148	€ 356	€ 489	€ 106	€ -	€ 51	€ -	€ 514	€ 489
A4 Transport from the gate to the	€ 477	€ 654	2,5	2,5	€ 434	€ 624	€ 166	€ 250	€ 477	€ 654	€ 170	€ 255	€ 83	€ 125	€ 731	€ 1.034
A5 Assembly	€ 217	€ 279	2,5	2,5	€ 226	€ 272	€ 86	€ 119	€ 217	€ 279	€ 88	€ 121	€ 43	€ 59	€ 348	€ 460
B1 Use	€ -	€ -	2,5	2,5	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
B2 Maintenance	€ -	€ -	2,5	2,5	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
B3 Replacements	€ -	€ -	2,5	2,5	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
C1 Demolition	€ 169	€ 232	2,5	2,5	€ 157	€ 215	€ 31	€ 43	€ 33	€ 45	€ 31	€ 43	€ 16	€ 21	€ 80	€ 109
C2 Transport	€ 165	€ 227	2,5	2,5	€ 150	€ 216	€ 57	€ 83	€ 59	€ 85	€ 57	€ 83	€ 29	€ 41	€ 145	€ 209
C3 Waste processing	€ 54	€ 84	2,5	1	€ 48	€ 80	€ 10	€ 17	€ 11	€ -	€ 10	€ -	€ 5	€ 17	€ 26	€ 17
C4 Final disposal	€ 5	€ 7	2,5	1	€ 4	€ 7	€ 1	€ 2	€ 1	€ -	€ 1	€ -	€ 1	€ 2	€ 3	€ 2
D Reuse/Reovery/Recycling pote	€ -1.646	€ -1.694	2,5	1	€ -1.615	€ -1.676	€ -485	€ -504	€ -501	€ -	€ -485	€ -	€ -243	€ -504	€ -1.229	€ -504
	€ 4.557	€ 6.217			€ 4.998	€ 6.100	€ 2.238	€ 3.283	€ 5.414	€ 7.492	€ 2.290	€ 502	€ 1.119	€ -238	€ 8.823	€ 7.756