

Vergelijkende LCA studie bruggen

Vaststellen van duurzaamheidsscore van bruggen uitgevoerd in staal, beton, composiet en hout

September 2013

Datum: 19 september 2013
Status: Definitief
Projectnummer Beco: 261.173
Referentie: P015610304
Dossiercode: 0156-10-03-56-028

Opdrachtgever:
Leon Wolthers Agentschap NL

Uitvoerders:
Sander Hegger Beco
Diana de Graaf Beco

INHOUD

MANAGEMENT SAMENVATTING	1
MANAGEMENT SUMMARY	7
1 INLEIDING	13
2 DOEL EN AFBAKENING LCA	17
2.1 Doel.....	17
2.2 Functionele eenheid.....	17
2.3 Productomschrijving en referentiestroom.....	17
2.4 Productsysteem en systeemgrenzen.....	19
2.5 Effectcategorieën en milieukeurgetallen.....	20
2.6 Allocatie.....	20
2.7 Vergelijking van de bruggen	20
2.8 Kwaliteitseisen van de data	21
2.9 Kritische review	21
2.10 Communicatie.....	21
3 DATA INVENTARISATIE	22
3.1 Materialen	22
3.2 Fundering en aanbrug	24
3.2.1 Fundering fietsbruggen	24
3.2.2 Fundering verkeersbruggen	25
3.2.3 Opmerkingen fundering	26
3.3 Betonnen bruggen.....	26
3.3.1 Betonnen fietsbrug.....	26
3.3.2 Betonnen verkeersbrug.....	26
3.3.3 Opmerkingen.....	27
3.4 Stalen bruggen.....	27
3.4.1 Stalen fietsbrug	27
3.4.2 Stalen verkeersbrug.....	27
3.4.3 Opmerkingen stalen brug.....	27
3.5 Houten brug.....	28
3.6 Composiet bruggen	28
3.6.1 Fietsbrug composiet	28
3.6.2 Verkeersbrug composiet	29
3.7 Transport naar bouwplaats	29
3.8 Constructie	29
3.9 Einde levensduur	29
3.10 Impact analyse.....	30
4 RESULTATEN FIETSBRUG	31
4.1 Betonnen fietsbrug.....	31
4.2 Stalen fietsbrug.....	32
4.3 Houten fietsbrug.....	33

4.4	Composiet fietsbrug	34
4.5	Vergelijking fietsbruggen	35
5	RESULTATEN VERKEERSBRUGGEN	41
5.1	Betonnen verkeersbrug	41
5.2	Stalen verkeersbrug	43
5.3	Composiet verkeersbrug	44
5.4	Vergelijking verkeersbruggen	45
5.5	Vergelijking slijtlaag en asfalt	50
6	GEVOELIGHEIDANALYSES	52
6.1	Gevoeligheidsanalyse: Materiaal eigen ontwerp composiet	52
6.2	Gevoeligheidsanalyse: Gebruik liggers met CEM I cement	53
6.3	Gevoeligheidsanalyse: Funderingspalen	54
6.4	Gevoeligheidsanalyse: Levensduur	55
6.5	Gevoeligheidsanalyse: Carbonatatie	57
6.6	Gevoeligheidsanalyse: Onderhoud	59
6.7	Gevoeligheidsanalyse: Einde levensduur	61
7	CONCLUSIES	63
7.1	Conclusies duurzaamheidsscores	63
7.2	Conclusies over de projectaanpak, methodiek en communicatie	65
8	AANBEVELINGEN	67
	BRONNEN	69
	BIJLAGE 1: REVIEW LCA DESKUNDIGE	1
	BIJLAGE 2: GEBRUIKTE DATA	6
	BIJLAGE 3: SCHETS VERKEERSBRUG	10

MANAGEMENT SAMENVATTING

Duurzaamheid is een steeds belangrijker onderdeel in de aankoopbeslissing. Dit geldt voor vele sectoren maar zeker voor grond-, weg- en waterbouw. Rijkswaterstaat, ProRail, gemeenten en provincies ontwikkelen criteria voor Duurzaam Inkopen en ondersteunen innovatieve projecten.

Het is daarom ook niet verwonderlijk dat producenten graag aantoonbaar duurzamer willen zijn dan hun concurrenten. Deze discussie is volop losgebarsten naar aanleiding van de publicatie over milieuanalyse van bruggen door FiberCore in 2009. Naar aanleiding hiervan is het idee ontstaan om een nieuwe studie te doen met bruggen van meerdere materialen in samenwerking met alle betrokken sectoren. Agentschap NL ondersteunt dit project vanuit de Meerjarenaafspraken Energie-efficiency (MJA3). Rijkswaterstaat is uitgenodigd als belangrijke opdrachtgever in de GWW-sector en ontwikkelaar van DuboCalc¹.

Doelen

De belangrijkste doelen van het project waren:

- Duurzaamheidsscore vaststellen van bruggen van vier verschillende materialen (staal, beton, composiet, hout) en in verschillende klassen.
- Verschaffen van inzicht in de opbouw van de milieubelasting en het geven van handvatten voor het verbeteren van de brugontwerpen.

Bruggen

De specificaties van de bruggen zijn begin 2012 vastgesteld en weerspiegelen de normen van dat moment. De belangrijkste specificaties zijn hieronder samengevat. Daarnaast zijn afspraken gemaakt over de eisen voor trillingen, stootbelasting, brandbelasting, vermoeiing en over de keuzes voor afwerking wegdek, leuningen, geleiderail, schamprand en fundering.

	Fietsbrug	Verkeersbrug
Lengte	Vrije overspanning 14 meter	24 meter (hart-hart oplegging)
Breedte	(tussen leuningen) 3 meter	12 meter tussen leuningen 12.6 meter totaal
Levensduur	50 jaar	100 jaar
Belasting	Belasting 5kN/m ² + dienstvoertuig volgens Eurocodes en Nederlandse bijlagen	- Verkeerscategorie 2 - Belasting volgens Eurocodes2 - De correctiefactoren: $\alpha_q;1 = 1,15$ en voor ($i > 1$) geldt $\alpha_q;i = 1,40$ - Gevolgklasse 2
Materiaalnormen	Ontwerp conform vigerende materiaalnormen	Ontwerp volgens ROK (versie december 2011) van RWS3

Gebruikte methodiek en data

Voor het bepalen van de milieubelasting is gebruik gemaakt van de SBK-Bepalingsmethode Milieuprestatie Gebouwen en GWW-werken⁴ (kortweg: SBK-Bepalingsmethode). De basis voor deze SBK-Bepalingsmethode is de NEN 8006⁵ en ISO 14040/44. De NEN 8006 is ontwikkeld op productniveau, voor de SBK-Bepalingsmethode zijn op gebouw- en bouwwerkniveau extra afspraken toegevoegd. De resultaten van de berekening wordt uitgedrukt in een éénpuntscore, de MilieuKostenIndicator (MKI). Voor deze MKI-score zijn meerdere milieu-effecten gewogen en bij elkaar opgeteld met behulp van 'schaduwprizenberekening'. Het ISO 14044 protocol voor LCA's geeft aan dan er geen weging plaats mag vinden in vergelijkende openbare LCA studies. Echter, aangezien de MKI score dusdanig belangrijk en

geaccepteerd is in de bouw/GWW branche is toch gekozen om deze score op te nemen in de resultaten. Op dit punt wijkt de studie dus af van ISO 14044.

In eerste instantie was het de bedoeling deze analyse ook uit te voeren in het programma DuboCalc, dat ook gebaseerd is op de SBK-Bepalingsmethode en resultaten uitdrukt in MKI-score. De data in het beschikbare DuboCalc programma was echter niet toereikend om de gevraagde doelen te behalen.

Voor de data is wel zoveel mogelijk gebruik gemaakt van dezelfde bron waar DuboCalc ook gebruik van maakt (of gaat maken): LCA-data op basis van gevalideerde studies uitgevoerd volgens de SBK-Bepalingsmethode die gebruikt wordt in de Nationale Milieudatabase⁶.

Betrokken partijen

De samenwerking van de verschillende branches maakt dit een unieke studie. Van de staal-, beton- en houtbranche zijn de vertegenwoordigers van de brancheverenigingen (resp. Bouwen met Staal, BFBN en VVNH) betrokken en om deze reden representatief voor deze branches. Van de composietbranche is geen vertegenwoordiging vanuit de branchevereniging betrokken. Producent FiberCore neemt als belanghebbende partij namens de composietsector deel aan deze studie.

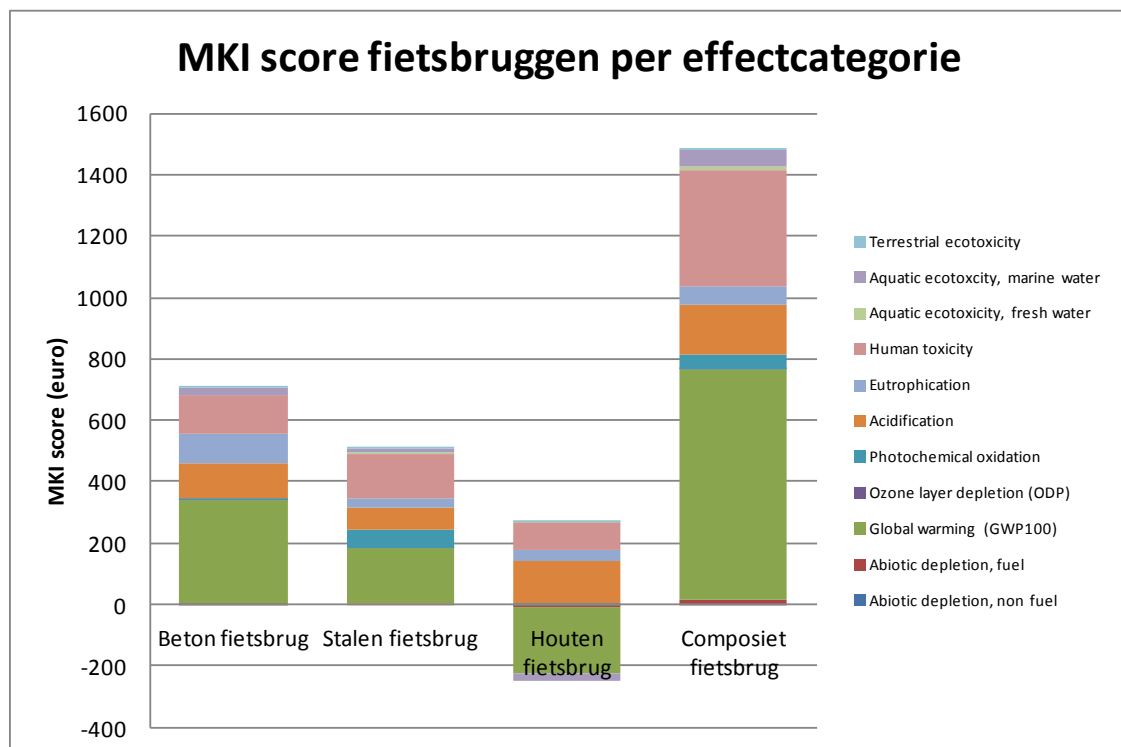
Voor dit project is een begeleidingscommissie geformeerd met vertegenwoordigers vanuit Agentschap NL, Rijkswaterstaat, BAM InfraConsult en NIBE. Het onderzoek is uitgevoerd door Beco. De LCA-studie is gereviewed door IVAM.

Aanpak en verloop project

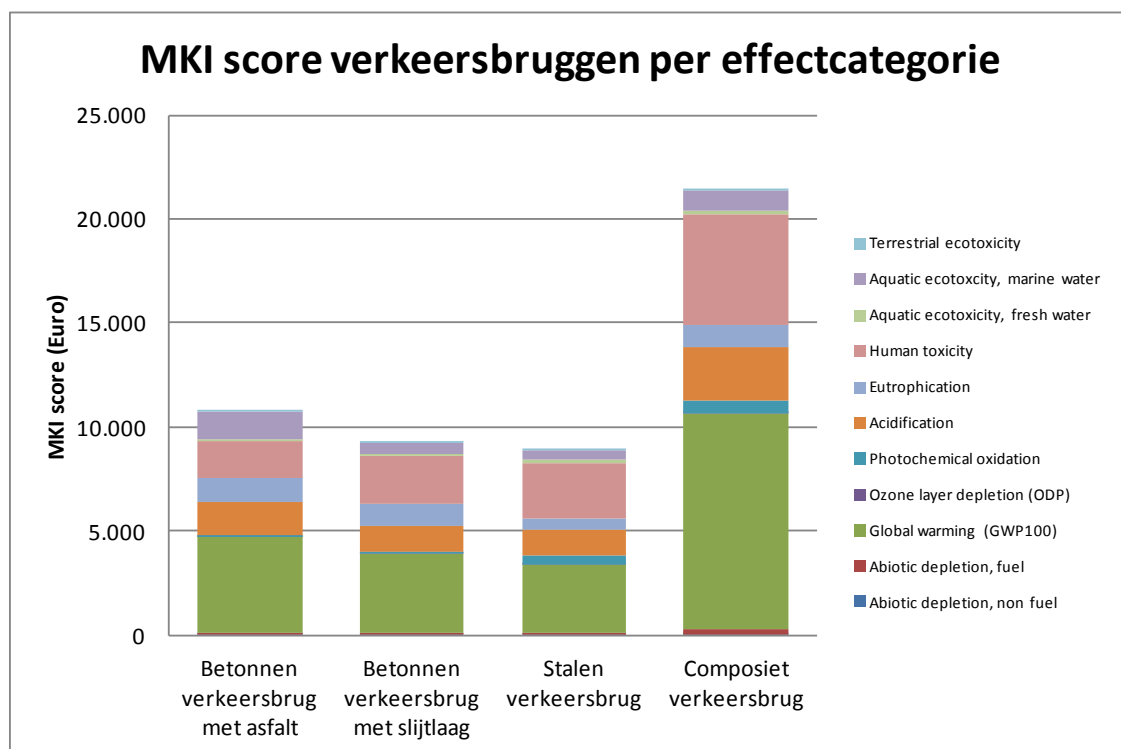
Het project is in september 2011 van start gegaan. Een belangrijke eerste stap in het project was het vaststellen van niet-materiaalgebonden specificaties voor de geselecteerde bruggen. Dit bleek een bron van veel discussies en het duurde dan ook tot mei 2012 voordat er definitief overeenstemming was tussen de verschillende partijen. Vervolgens zijn de diverse sectoren uitgenodigd om brugontwerpen en data aan te leveren. In de maanden erna zijn de analyses per sector gemaakt en voorgelegd aan de sectorvertegenwoordigers voor controle en reactie. In september 2012 zijn de resultaten samengevoegd tot een concept-eindrapport. Op basis van de resultaten heeft de composietsector aangegeven een nadere analyse van de data te willen maken. Ook het NIBE en de andere sectoren kwamen met op- en aanmerkingen voor verbetering van het rapport. Zo zijn er meerdere gevoeligheidsanalyses toegevoegd. In maart 2013 heeft een externe review van het aangepaste rapport plaatsgevonden door IVAM en zij concludeerden dat de studie is uitgevoerd conform de SBK-Bepalingsmethode. In mei 2013 kwam nog een aantal bezwaren en vragen naar boven over het voldoen aan de specificaties van met name de composiet bruggen. Na een extra controle was het eindoordeel van Rijkswaterstaat dat er weliswaar verschillen zitten tussen de bruggen maar dat deze in voldoende mate vergelijkbaar zijn en voldoen aan de gestelde specificaties. In september 2013 is het eindrapport opgeleverd.

Milieu-impact bruggen

In onderstaande grafieken is de duurzaamheidsscore te zien van alle doorgerekende bruggen, uitgedrukt in MKI-score. Bij de resultaten dient opgemerkt te worden dat normen en standaarden zowel in de bouw- en GWW-sector als in LCA-methodiek en LCA-data momentopnamen zijn. Deze geven een beeld van de werkelijkheid maar ontwikkelingen op deze gebieden kunnen tot grote verschillen in milieubelasting leiden. Het is om deze reden belangrijk voor sectoren om zelf regie te voeren over de waarden die in databases staan van hun materialen en (half-)fabricaten.



De milieu-impact uitgedrukt in MKI-score van de **fietsbruggen** verschilt sterk. De houten fietsbrug heeft een erg lage MKI-score. De MKI-scores van de betonnen fietsbrug is iets hoger dan die van de stalen fietsbrug en ongeveer de helft van de MKI score van de composiet brug.



Het beeld van de **verkeersbruggen** is vergelijkbaar met de fietsbruggen: De MKI-score van de stalen en betonnen bruggen zijn vergelijkbaar en de MKI score van de composiet brug is ongeveer het dubbele van deze score.

De conclusies zijn gevoelig voor een aantal zaken zoals ontwerpspecificaties, materiaalgebruik (gebruik van type cement), onderhoudsfrequentie, levensduur en afdanking (composiet in cementoven). Tezamen kunnen deze een behoorlijke invloed hebben op de onderlinge verhouding in MKI-score. De conclusies zijn niet gevoelig gebleken voor het aantal funderingspalen.

Conclusies per soort brug

De productie van de materialen is de meest dominante levensfase in de levenscyclus van de **betonnen bruggen**. Het gebruik van cement met hoogovenslakken (CEMIII) waarmee in deze studie is gerekend, resulteert in een 20% lagere milieu-impact dan toepassing van 'nieuw' cement. (CEMI). De milieu-impact van een brug met slijtlaag is iets lager dan een brug met asfalt wegdek. De milieu-impact per kg van de slijtlaag kan mogelijk verlaagd worden door inzet van andere grondstoffen, waarmee de totale milieu-impact van de betonnen brug wordt verlaagd.

De milieubelasting van de **stalen fietsbrug** is voor een relatief groot deel afhankelijk van de coating. Dit komt doordat het elke 25 jaar (in deze analyse) opnieuw aangebracht moet worden. Ook bij de **stalen verkeersbrug** heeft het aanbrengen van coating een grote impact en daarnaast het aanbrengen en vervangen van de slijtlaag. De reductie van het gebruik van coating - zonder de constructie te schaden - lijkt dus de belangrijkste mogelijkheid om de milieu-impact verlagen.

De milieubelasting van de **houten fietsbrug** wordt voor het grootste deel bepaald door de houtproductie, met name het transport vanuit het bos en de verschepping naar Nederland. Het verbranden van het hout in een verbrandingsinstallatie (AVI) aan het einde van de levensduur, levert energie op en daarmee een flinke positieve milieu-impact. Dit is echter geen aanbeveling om hout zo snel mogelijk te verbranden. Het hout dient duurzaam geproduceerd te zijn om uitputting en aantasting van ecosystemen te voorkomen.

De grootste milieubelasting van de **composiet bruggen** is afkomstig van de productie van de materialen: het glas, de hars en het PUR schuim. De relatief hoge MKI-score van deze materialen wordt in deze studie niet gecompenseerd door een veel lager gewicht. Een ontwerp volgens 'materiaaleigen' specificaties lijkt te leiden tot reductie van het gewicht en daarmee de milieu-impact met ca. 17%. Verbranding in een cementoven in plaats van in een AVI verlaagt de milieu-impact met 18-20%. De milieu-impact per kg kan mogelijk verlaagd worden door inzet van andere grondstoffen.

Algemene conclusies en aanbevelingen

Alle partijen hebben positief en constructief meegewerkt aan het bereiken van het eindresultaat.

In de uitvoering van het project heeft met name het vaststellen van de eisen (functionele en technische specificaties) van de brug veel tijd gekost. Het bleek lastig om specificaties te vinden waar elke partij tevreden mee kon zijn, omdat vrijwel elke specificatie een direct invloed heeft op de uitvoering en daarmee de milieu-impact. Een 'normale' eis voor een brug van het ene materiaal betekent een 'zware' eis voor een brug van het andere materiaal en vice versa.

In het algemeen verdient het daarom aanbeveling om bij het (laten) ontwerpen van bruggen heel kritisch te kijken naar de specificaties. Aandachtspunt is dat het lastig is om naar werkelijk technische 'materiaal-vrije' specificaties te gaan. Indien bruggen van verschillende materialen voor een zelfde toepassing worden vergeleken, verdient het aanbeveling dat men voldoende technische kennis heeft om een vergelijking te maken.

Voor uitvoering van een vergelijkbaar project bevelen we aan om het team LCA-deskundigen te versterken met een onafhankelijk team deskundigen in het technisch vakgebied. Dit team is dan verantwoordelijk voor het opstellen van de (materiaalvrije) specificaties en het toetsen aan de specificaties van de aangeleverde ontwerpen. Bij voorkeur gebeurt dit voordat de LCA studie zelf wordt gestart.

De analyse is uiteindelijk niet direct in DuboCalc uitgevoerd, omdat het programma onvoldoende relevante data bevatte. Dit is dan ook meteen de belangrijkste suggestie voor verbetering van dit programma.

MANAGEMENT SUMMARY

Sustainability plays an increasingly important part in the purchasing decision. This applies to many sectors, but is especially valid for building and infrastructure. Rijkswaterstaat, ProRail, municipalities and provinces develop criteria for sustainable procurement and support innovative projects.

It is therefore not surprising that producers want to have a better sustainability performance than their competitors. This discussion came to a height following the publication in 2009 on an environmental analysis of bridges by Fiber Core, producer of composite bridges. Resulting from this discussion, the idea arose to do a new environmental study on bridges of various materials in cooperation with all relevant sectors. NL Agency supports this project from the Long-Term Agreements on Energy Efficiency (LTA3). Rijkswaterstaat has been invited as an important client in the civil engineering sector and developer of DuboCalc.

Project goals

The main goals of the project were:

- Establish the sustainability score of bridges of four different materials (steel, concrete, composite, wood) and in two different classes;
- Provide insight into the structure of the environmental impact and providing tools for improving the design of the bridges.

Bridges

The specifications of the bridges were established early 2012 and reflect the standards of that time. The main specifications are summarized below. In addition, agreements were made on the requirements for vibration, shock loads, fire load, fatigue and the choices for finishing surfaces, handrails, guide rail, glancing edge and foundation.

	Fietsbrug	Verkeersbrug
Length	Free span 14 meters	24 meters (heart heart imposition)
Width	(between rails) 3 meters	12 meters between handrails 12.6 meters total
Lifetim	50 years	100 years
Load	Load 5kN/m ² + service vehicle according to Eurocodes and Dutch attachments	Transport Category 2 - Load using Eurocodes - The correction factors: α_q ; 1 = 1.15 and ($i > 1$) is α_q , $i = 1.40$ - Consequence Class 2
Material norms	Design in accordance with applicable material standards	Design according ROK (version December 2011) of RWS

Methodology and data used

To determine the environmental impact the “SBK-Bepalingsmethode Milieuprestatie Gebouwen en GWW-werken” (in short *SBK-Bepalingsmethode*) was used. This stands for SBK-Determination Method Environmental Buildings and civil engineering works. The basis for this *SBK-Bepalingsmethode* is the Dutch norm NEN 8006 and ISO 14040/44. The NEN 8006 was developed at the product level, the *SBK-Bepalingsmethode* added additional agreements on building and building level. The results of the calculation is expressed as a onepointscore, the MilieuKostenIndicator (MKI, Environmental Costs Indicator). For this MKI score several environmental effects are weighted and added up using 'shadow

cost pricing'. The ISO 14044 protocol for LCA indicates that no weighting should be used in comparative LCA studies for external publication. Since the MKI score is so important and accepted in the construction / civil engineering industry it was still chosen to include in the results. At this point, however, the study therefore is not according ISO 14044.

Initially, the intention was to perform this analysis in the DuboCalc program, which is also based on the SBK-Bepalingsmethode and results in MKI scores. The data in the available DuboCalc program was however not sufficient to achieve the requested goals.

Wherever possible, data is used from the same source as DuboCalc: LCA data based on validated studies conducted according to the SBK-Bepalingsmethode and/or used in the Nationale Milieudatabase (Dutch National Environmental Database).

Parties involved

The cooperation of all the different sectors makes this a unique study. Of the steel, concrete and wood industry, representatives of industry associations were involved (Bouwen met Staal, BFBN, VVNH). Of the composite industry no representative from an industry association was involved. As an important player in this industry producer Fiber Core participated on behalf of the composite sector.

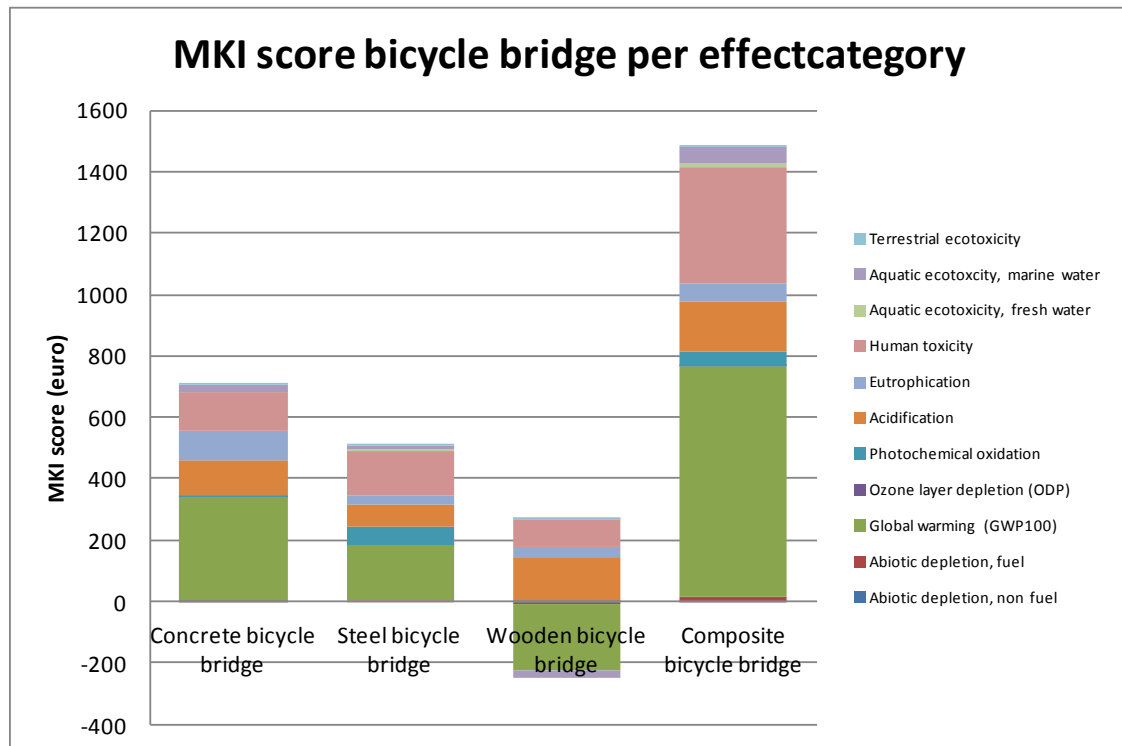
For this project, an advisory committee was formed with representatives from NL Agency, Rijkswaterstaat, BAM Infra Consult and NIBE. The study was conducted by Beco. The LCA study was reviewed by IVAM.

Approach and development project

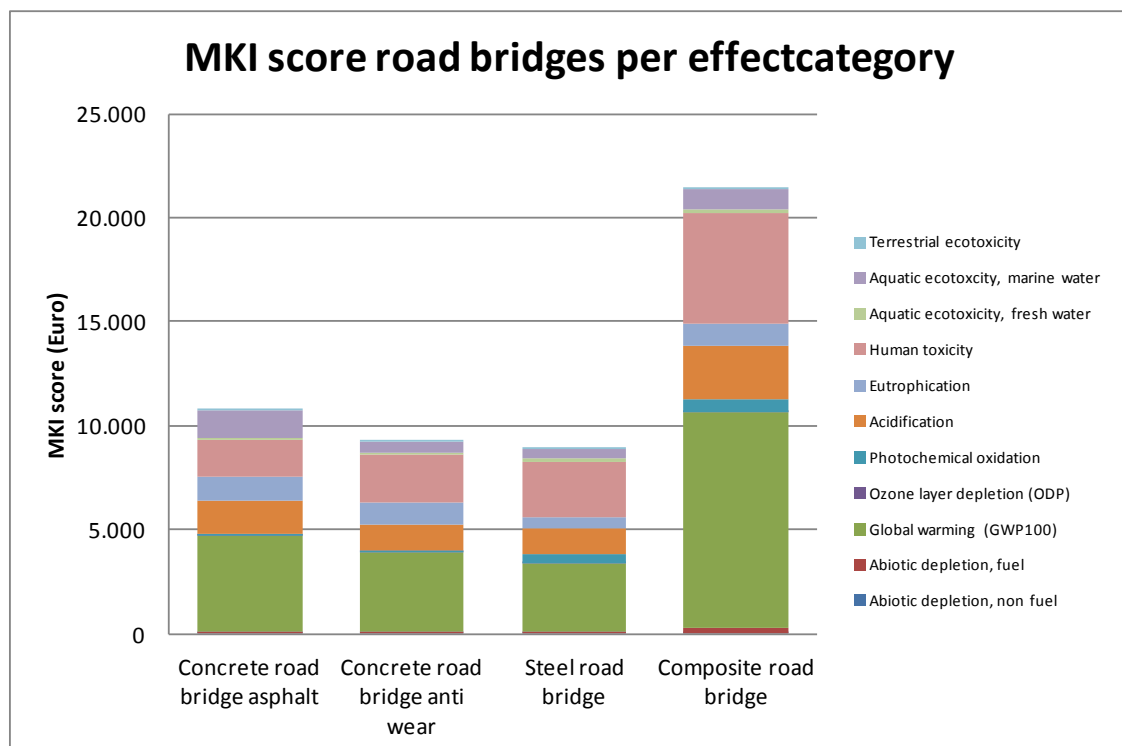
The project was launched in September 2011. An important first step in the project was to establish non-bound material specifications for the selected bridges. This was a source of much discussion and it was therefore up to May 2012 before there was definitive agreement between the parties. Subsequently, the various sectors were invited to deliver bridge designs and data. In the following months, the analyses by sector were presented to the industry representatives for monitoring and response. In September 2012, the results were merged into a draft final report. Based on the results, the composite sector indicated that they want to make further analysis of the data. Also NIBE and other sectors came with comments to improve the report. Thus several sensitivity analyses were added. In March 2013, an external review of the LCA study was made by IVAM concluding that the study was performed following the requirements of the *SBK Bepalingsmethode*. In May 2013 a number of concerns and questions emerged about meeting the specifications of, in particular, the composite bridges. After double-check the final judgment of Rijkswaterstaat was that although there are differences between the bridges, they all are sufficiently similar and meet the specifications. In September 2013 the final report was completed.

Environmental impact bridges

The graphs below show all the results of all bridges, expressed in MKI score. Regarding the results it should be noted that norms and standards reflect the situation in a specific moment in time, both in the construction and civil engineering sector in LCA methodology and LCA data. The results give an accurate image of the reality but developments in these areas can lead to considerable differences in environmental impact. It is for this reason important that sectors should directly orchestrate the values in databases of their materials and (semi-) finished products.



The environmental impact expressed in MKI score of the bicycle bridges varies greatly. The wooden bike bridge has a very low MKI score. The MKI scores of concrete bicycle bridge is slightly higher than that of the steel cycle bridge and about half of the MKI score of the composite bridge.



The results of the road bridges are largely similar to the bicycle bridges: The MKI score of the steel and concrete bridges are similar and the MKI score of the composite bridge is about double this score.

The conclusions are sensitive to a number of issues such as design specifications, materials (cement type used), frequency of maintenance, service life and disposal (in composite cement kiln). Together, these have a significant impact on the relationship in MKI score. The conclusions have not been found sensitive to the number of foundation piles.

Conclusions by bridge type

The production of the materials is the most dominant phases in the life cycle of **concrete bridges**. The use of cement with slag (CEMIII) which is included in this study, results in a 20% lower environmental impact than using 'new' cement (CEMI). The environmental impact of a bridge with an anti wear surface is slightly lower than a bridge with asphalt surface. The environmental impact per kg of the anti wear surface can be lowered through the use of other materials, lowering the total environmental impact of the concrete bridge.

The environmental impact of the **steel cycle bridge** is mainly caused by the coating. This is because it needs to be reapplied every 25 years. Also in the **steel road bridge**, the application of coating has a large impact as well the application and replacement of the anti wear layer. The reduction of the use of coating - without damaging the structure - seems to be the most important possibility to decrease the environmental impact.

The environmental impact of the **wooden bicycle bridge** is largely determined by the timber, in particular the transport from the forest and shipment to the Netherlands. The burning of the wood in an incinerator (AVI) at the end of life, provides energy and thus a significant positive environmental impact. This is not a recommendation to burn as much timber as possible. The timber must be sustainably produced to prevent depletion and degradation of ecosystems.

The biggest environmental impact of **composite bridges** comes from the production of materials: glass, resin and polyurethane foam. The relatively high MKI score of these materials per kg in this study is not offset by a much lower weight. A design according to 'material specific' specifications seems to lead to a reduction in the weight and thus the environmental impact by approximately 17%. Combustion in a cement kiln instead of in a waste incineration could reduce the environmental impact by 18-20%. The environmental impact per kg can be lowered through the use of other materials.

General conclusions

All parties have positively and constructively contributed to achieving the end result. The execution of this project, and in particular the formulation of functional and technical specifications of the bridges, took much more time than anticipated. It proved difficult to find common ground as almost every specification had a direct impact on the performance and thus the environmental impact. A 'normal' requirement for a bridge from one material means a 'heavy' requirement for a bridge from the other material and vice versa.

In general, therefore, it is recommended that when designing bridges one should look very critical at the specifications. Attention has to be paid to the difficulty of developing genuine 'material free' specifications. If bridges of different materials are compared for the same application, it is recommended that the technical team has sufficient knowledge to make an adequate comparison.

For execution of similar projects we recommend to strengthen the team of LCA experts with an independent team of experts in the technical field. This team is responsible for the preparation of (material free) specifications and testing the specifications of the submitted designs. Preferably this is done before the LCA study itself starts.

The analysis was not performed with the DuboCalc program because the program did not contain sufficient relevant data. This is then immediately the main suggestion for the improvement of this program.

1 INLEIDING

Duurzaamheid is een steeds belangrijker onderdeel in de aankoopbeslissing. Dit geldt voor vele sectoren maar zeker voor grond-, weg- en waterbouw. Rijkswaterstaat, ProRail, gemeenten en provincies ontwikkelen criteria voor Duurzaam Inkopen en ondersteunen innovatieve projecten. Het is daarom ook niet verwonderlijk dat producenten graag aantoonbaar duurzamer willen zijn dan hun concurrenten. Maar wat is duurzaam en kun je producten eigenlijk wel goed vergelijken?

Aanleiding voor deze studie

De discussie over vergelijking van materialen is volop losgebarsten naar aanleiding van een milieuanalyse van een composiet brug van FiberCore die is uitgevoerd door Beco in 2009. De studie werd ondersteund door Agentschap NL, de Federatie NRK en DSM. In deze studie werd een vergelijking gemaakt van de composiet brug met een stalen brug en een betonnen brug. Het rapport van de studie is niet verspreid, maar er is wel een artikel gepubliceerd ('De toekomst is aan de brug van kunststof composiet', Product, juli 2009) dat FiberCore gebruikt in haar externe communicatie. Vanuit met name de betonsector en staalsector is gereageerd op de studie met bezwaren op de uitgangspunten en de wijze van communicatie. Een van de belangrijkste bezwaren was dat de betonsector en de staalsector niet zijn betrokken voor het aanleveren van brugontwerp en milieudata. In navolging van deze studie zijn daarom de diverse belanghebbenden in overleg gegaan op initiatief van Agentschap NL. Hierbij is in 2010 het idee ontstaan om een nieuwe studie te doen met bruggen van meerdere materialen. Hierbij is later ook de houtsector aangehaakt. Agentschap NL ondersteunt dit project vanuit de Meerjarenaafspraken Energie-efficiency (MJA3). Rijkswaterstaat is uitgenodigd als belangrijke opdrachtgever in de GWW-sector en ontwikkelaar van DuboCalc⁷, een milieurekentool.

Doel en resultaat

De doelen van het project zijn als volgt verwoord:

- Eerste doel van dit project is om de duurzaamheidsscore vast te stellen van bruggen in verschillende klassen en van vier verschillende materialen (staal, beton, composiet, hout). Bij start van het project werd uitgegaan 3 verschillende klassen bruggen, dit zijn er uiteindelijk twee geworden: een fietsbrug en een verkeersbrug.
- Tweede doel van het project is het testen van de DuboCalc methodiek voor deze toepassing.
- Derde doel is het verschaffen van inzicht in de opbouw van de milieubelasting waarbij de sterke en minder sterke kanten van de verschillende ontwerpen worden onderzocht en het geven van handvatten voor het verbeteren van de ontwerpen.

Het resultaat van dit project bestaat uit antwoorden op de volgende vragen:

- Wat is een transparante projectaanpak die door alle betrokken partijen wordt ondersteund?
- Wat zijn de sterke en minder sterke kanten van de brugontwerpen en materialen met betrekking tot de milieudruk?
- Welk milieuprobleem is de oorzaak van deze milieudruk?
- Wat is de uitkomst van de DuboCalc analyse van de verschillende bruggen?
- Welke verbetervoorstellen komen naar voren per sector voor een betere duurzaamheidsscore?
- Welke mogelijke kanttekeningen of opmerkingen kunnen bij deze studie worden geplaatst?
- Wat zijn de ervaringen met DuboCalc en zijn er ook suggesties voor verbetering?
- Op welke wijze kunnen de resultaten van deze studie worden gepubliceerd?

DuboCalc en LCA

Voor het bepalen van de duurzaamheid van GWW-projecten, heeft Rijkswaterstaat het rekenprogramma DuboCalc ontwikkeld. Rijkswaterstaat gebruikt deze tool in het aanbestedingstraject om de duurzaamheid van verschillende ontwerpen met elkaar te vergelijken. Uitgangspunt voor het project was om de bruggen door te rekenen met behulp van dit programma. De berekening die DuboCalc gebruikt is gebaseerd op de levenscyclusanalyse (LCA)-methodiek en wordt uitgedrukt in een éénpuntscore, de MilieuKostenIndicator (zie ook hieronder). Het uitvoeren van een analyse met DuboCalc is als het uitvoeren van een LCA waarbij veel keuzes al zijn vastgelegd. Dit leidt tot een grote reproduceerbaarheid van de resultaten, maar een lage flexibiliteit. Dit laatste punt leidt ertoe dat het weinig inzicht geeft in de resultaten. Om deze reden wordt naast het uitvoeren van een analyse met DuboCalc ook een analyse uitgevoerd met de LCA methodiek. Bij uitvoering van het project bleek dat de beschikbare DuboCalc versie (2.0) ontoereikend was om de bruggen door te rekenen, met name door het ontbreken van relevante materialen. Het milieuprofiel van de bruggen is daarom bepaald met behulp van de meer algemene levenscyclus analyse (LCA) methodiek volgens ISO 14040⁸ en ISO14044⁹. Voor het uitdrukken van de resultaten is gebruik gemaakt van dezelfde methode als DuboCalc en deze wordt in de volgende paragraaf beschreven. Ook voor de data is zo veel als mogelijk gebruik gemaakt van dezelfde bron waar DuboCalc ook gebruik van maakt (of gaat maken): MRPI-data¹⁰ die gebruikt wordt in de Nationale Milieudatabase¹¹.

Schaduw prijzen en MilieuKostenIndicator

Het gebruiken van verschillende indicatoren geeft een breed beeld van de milieubelasting maar het geeft ook erg veel resultaten waardoor het spreekwoordelijke 'door de bomen het bos niet meer kunnen zien' kan gaan gelden. Een mogelijkheid is om al deze indicatoren samen te nemen en te comprimeren tot één getal door ze onderling te wegen. Dit kan op verschillende manieren gedaan worden. De manier die in DuboCalc wordt gebruikt is de schaduw prijzen berekening. CE Delft¹² heeft deze schaduw prijzen ontwikkeld en zij geven de volgende uitleg van schaduw prijzen: *Schaduw prijzen zijn kunstmatige prijzen voor goederen of productiefactoren die niet op markten worden verhandeld. Het milieu is daar een voorbeeld van. Om toch het milieu op te nemen in economische analysetools wordt gebruik gemaakt van zogeheten schaduw prijzen. Schaduw prijzen geven dan de maatschappelijke waarde weer die aan een goed, in dit geval milieukwaliteit, wordt gegeven*¹³. Met behulp van de schaduw prijzen van de verschillende milieu aspecten worden de milieukosten van een product berekend. Deze worden weergegeven in de MilieuKosten Indicator (MKI). Het gebruik van de MKI-score draagt bij aan het inzicht in de resultaten. Zie paragraaf 2.5 voor een nadere toelichting.

Een nadeel van het gebruik van weging is dat het onherroepelijk subjectieve elementen bevat. De resultaten en conclusies zijn dus afhankelijk van de mening van degene die de weging heeft uitgevoerd. Het ISO 14044 protocol voor LCA's geeft aan dan er geen weging plaats moet vinden in vergelijkende openbare LCA studies. Aangezien de MKI score dusdanig belangrijk en geaccepteerd is in de bouw/GWW branche is toch gekozen om deze score op te nemen in de resultaten. Op dit punt wijkt de studie dus af van ISO 14044.

De resultaten van de studie zullen naast de MKI-score ook worden uitgedrukt in energie-inhoud (MJ), omdat het project wordt ondersteund vanuit de MeerJarenAfspraken Energieefficiëntie (MJA3).

SBK-Bepalingsmethode Milieuprestatie Gebouwen en GWW-werken

Zoals aangegeven is de LCA uitgevoerd volgens de ISO normen voor de LCA (14040/44). Deze normen zijn breed te interpreteren en om deze reden is voor de GWW- en bouwsector in Nederland een methode ontwikkeld die in meer detail aangeeft hoe een LCA studie van producten in deze sectoren uitgevoerd zou

moeten worden. De actuele versie van deze norm is de SBK-Bepalingsmethode Milieuprestatie Gebouwen en GWW-werken¹⁴ (kortweg: SBK-Bepalingsmethode). De basis voor deze SBK-Bepalingsmethode is de NEN 8006¹⁵ en ISO 14040/44. De NEN 8006 is ontwikkeld op productniveau, voor de SBK-Bepalingsmethode zijn op gebouw- en bouwwerkniveau extra afspraken toegevoegd. DuboCalc maakt ook gebruik van data die is uitgerekend met behulp van de SBK-Bepalingsmethode. De SBK-Bepalingsmethode is als uitgangspunt gebruikt bij het uitvoeren van de huidige studie.

Betrokken partijen

De samenwerking van al deze verschillende branches maakt dit een unieke studie. In onderstaande tabel zijn de betrokken personen en organisaties per branche weergegeven.

Contactpersoon	Organisatie	Branche
Bauke Hoekstra Bonnema	Tata Steel	Staal
Jan-Pieter den Hollander	Bouwen met Staal	Staal
Simon de Jong	FiberCore	Composiet
Jan Peeters	FiberCore	Composiet
Martijn van Gent	Span Beton	Beton
Henk Schuur	BFBN	Beton
Eric de Munck	Koninklijke VVNH	Hout
Peter Zanen	Koninklijke Wijma	Hout

Van de staal-, beton- en houtbranche zijn de vertegenwoordigers van de brancheverenigingen betrokken en om deze reden representatief voor deze branches. Van de composietbranche is geen vertegenwoordiging vanuit de branchevereniging (VKCN) betrokken, als belanghebbende partij is FiberCore betrokken. FiberCore is in de branche een relatief groot bedrijf maar vanwege het ontbreken van de branchevereniging kan het niet als representatief worden gezien voor de gehele branche. Dit moet in beschouwing worden genomen bij de conclusies.

Voor dit project is ook begeleidingscommissie geformeerd. In onderstaande tabel zijn de commissieleden en hun specifieke rol weergegeven.

Contactpersoon	Organisatie	Rol
Leon Wolthers	Agentschap NL	Opdrachtgever
Frans Withagen*	BAM Infraconsult	Bruggen deskundige
Rick Scholtes	NIBE	LCA deskundige
Michiel Haas	NIBE	LCA-deskundige
Ane de Boer	Rijkswaterstaat	Bruggen deskundige
Gerwin Schweitzer	Rijkswaterstaat	Deskundige gebruik DuboCalc
Sander Hegger	Beco	Uitvoerder LCA
Diana de Graaf	Beco	Projectleider uitvoering LCA

*medio 2012 uit commissie in verband met pensioen

Het eindrapport is gereviewed door een onafhankelijke LCA deskundige, Harry van Ewijk (IVAM).

Aanpak en verloop project

Het project is in september 2011 van start gegaan. Een belangrijke eerste stap in het project was het vaststellen van niet-materiaalgebonden specificaties voor de geselecteerde bruggen. Dit bleek een bron van veel discussies en het duurde dan ook tot mei 2012 voordat er definitief overeenstemming was tussen de verschillende partijen. Vervolgens zijn de diverse sectoren uitgenodigd om brugontwerpen en data aan te leveren. In de maanden erna zijn de analyses per sector gemaakt en voorgelegd aan de sectorvertegenwoordigers voor controle en reactie. In september 2012 zijn de resultaten samengevoegd tot een concept-eindrapport. Op basis van de resultaten heeft de composietsector aangegeven een nadere analyse van de data te willen maken. Ook het NIBE en de andere sectoren kwamen met op- en aanmerkingen voor verbetering van het rapport. Zo zijn er meerdere gevoeligheidsanalyses toegevoegd. In maart 2013 heeft een review van het aangepaste rapport plaatsgevonden door IVAM (Harry van Ewijk). Deze review is opgenomen in bijlage 1 van dit rapport. Naar aanleiding van de opmerkingen van de reviewer is het rapport aangepast en heeft de reviewer vervolgens het rapport goedgekeurd. Deze versie is in mei 2013 voorgelegd aan de betrokken partijen. Hier kwam nog een aantal bezwaren en vragen naar boven over het voldoen aan de specificaties van met name de composiet bruggen. De begeleidingscommissie (in de persoon van Ane de Boer) heeft vervolgens het aangepaste ontwerp van FiberCore op eventuele herziening t.a.v. functionaliteit i.p.v. normen beoordeeld en de relevantie van de opmerkingen van FiberCore op het eindrapport en op andere ontwerpen. Het eindoordeel was dat er verschillen zitten tussen de bruggen maar dat deze in voldoende mate vergelijkbaar zijn en voldoen aan de gestelde specificaties.

Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt het doel en de afbakening van de studie nader besproken. In hoofdstuk 3 wordt een overzicht gegeven van de verzamelde data inclusief onderbouwing. Hoofdstuk 4 bevat de resultaten voor de fietsbruggen, hoofdstuk 5 voor de verkeersbruggen. In hoofdstuk 6 zijn de resultaten van meerdere gevoeligheidsanalyses opgenomen. In hoofdstuk 7 worden de conclusies weergegeven en in hoofdstuk 8 worden aanbevelingen gedaan.

2 DOEL EN AFBAKENING LCA

2.1 Doel

Het doel van het project is inzicht verschaffen in de milieuprofielen van bruggen van verschillende materialen en hiermee handvaten te bieden voor het ontwerpen van meer duurzame bruggen. De doelgroep van de studie zijn met name constructeurs van bruggen en partijen die aanbestedingen voor bruggen voorbereiden. De studie is een vergelijking van verschillende bruggen, maar de resultaten van de studie worden niet integraal publiek gemaakt. In overleg met de betrokkenen zal een selectie gemaakt worden van de resultaten en conclusies die openbaar gemaakt kunnen worden.

2.2 Functionele eenheid

In deze studie worden de milieuprofielen van twee verschillende bruggen vergeleken die voldoen aan de eisen in paragraaf 2.3. De fietsbruggen zijn vergeleken met een toepassingsduur van 50 jaar en de verkeersbruggen zijn vergeleken met een toepassingsduur van 100 jaar. Dit wordt de functionele eenheid genoemd op basis waarvan de vergelijking plaatsvindt. De specifieke eisen van de bruggen worden in de volgende paragraaf besproken.

2.3 Productomschrijving en referentiestroom

In de studie worden twee typen bruggen vergeleken: een verkeersbrug in het secundaire wegennet en een fietsbrug. De functionele eisen van de bruggen zijn de volgende:

	Fietsbrug	Verkeersbrug
Lengte	Vrije overspanning 14 meter	24 meter (hart-hart oplegging)
Breedte	(tussen leuningen) 3 meter	12 meter tussen leuningen 12.6 meter totaal
Belasting	Belasting 5 kN/m^2 + dienstvoertuig volgens Eurocodes en Nederlandse bijlagen	- Verkeerscategorie 2 - Belasting volgens Eurocodes ¹⁶ - De correctiefactoren: $\alpha_q;1 = 1,15$ en voor $(i > 1)$ geldt $\alpha_q;i = 1,40$ - Gevolgklasse 2
Materiaalnormen	Ontwerp conform vigerende materiaalnormen	Ontwerp volgens ROK (versie december 2011) van RWS ¹⁷
Trillingen	Voldoen aan de comfort criteria voor voetgangers (NEN 1990:2002; A2.4.3.2)	
Stootbelasting	Geen doorvaart (hoogte ca. 1 m boven water), dus er hoeft geen rekening te worden gehouden met stootbelasting	Aanvaar of aanrij belasting tegen de zijkant (2000 kN) en/of onderkant (600 kN) van de bruggen
Brandbelasting	Geen eisen	Geen (aanvullende) eisen
Vermoeiing	Geen eisen	500.000 vrachtwagens/ jaar

	Fietsbrug	Verkeersbrug
Afwerking wegdek	Geen onderdeel van de analyse	Afwerking zoals toegepast in de praktijk (slijtlaag en/of asfalt), wordt meegenomen in de analyse
Levensduur	50 jaar	100 jaar
Leuningen / geleiderail	Wel leuningen, geen geleiderail	Geen leuningen en geen geleiderail Wel moet op de brug een leuning en geleiderail geplaatst kunnen worden
Schamprand	Geen	Wel in belasting meenemen, maar geen onderdeel van analyse
Fundering	Fundering zoals toegepast in praktijk voor specifieke brug op draagkrachtige zandlaag op 12m beneden maaiveld met daarboven klei/veen tot maaiveld.	

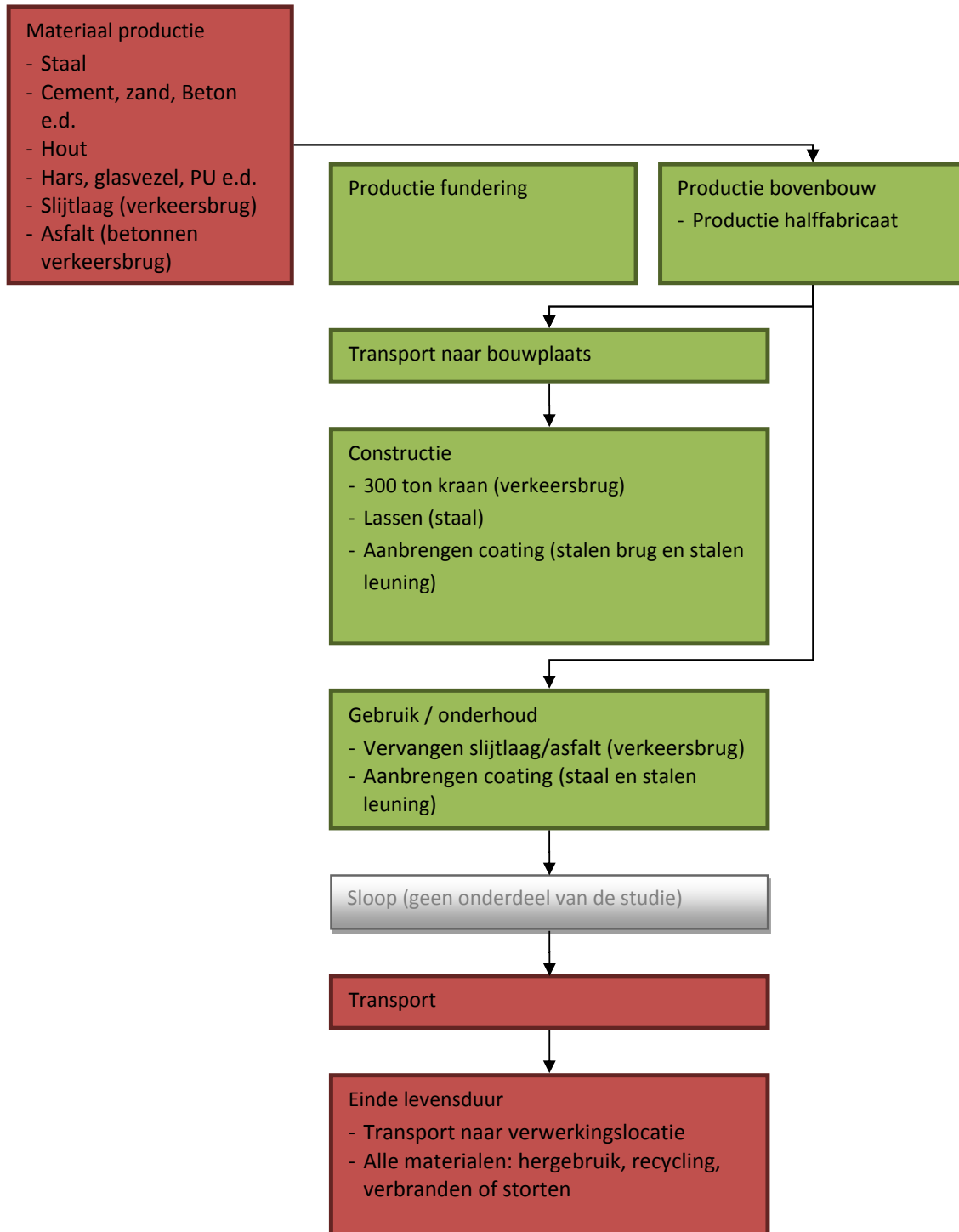
Een schets van de specificatie van de verkeersbrug is te vinden in bijlage 1.

Elk materiaal heeft bepaalde eigenschappen die niet bij elke brug goed tot zijn recht komen. Een zwaar materiaal komt beter tot zijn recht bij bruggen met hoge belastingen en omgekeerd. Om deze reden is het bepalen van de specificaties van een brug van grote invloed op de uitkomsten van een vergelijking tussen verschillende materialen. Deze discussie heeft plaatsgevonden binnen de begeleidingscommissie op 7 februari en 24 april 2012, waarna in mei 2012 de bovenstaande specificaties definitief zijn vastgesteld. Discussiepunten waren onder andere de verkeerscategorie van de weg, de materiaalnormen en de stootbelasting. In de huidige specificaties zijn we voor de verkeersbrug uitgegaan van een N-weg die via de brug over een snelweg gaat.

Van de fietsbrug zijn vier verschillende bruggen geanalyseerd, elke branche heeft één brug aangeleverd. Van de verkeersbrug zijn ook vier bruggen doorgerekend van composiet, staal en beton, waarbij de beton branche twee ontwerpen aanleverde: één gebaseerd op een rijdek van asfalt en één gebaseerd op een slijtlaag.

2.4 Productstelsel en systeemgrenzen

De bepaling van de systeemgrenzen van de systemen is gebaseerd op de SBK-Bepalingsmethode. De afbakening is schematisch weergegeven volgens het volgende schema:



2.5 Effectcategorieën en milieukengetallen

De methodiek die gebruikt wordt voor het bepalen van de milieu impact is de methodiek die voorgescreven wordt in de SBK-Bepalingsmethode. Het milieuprofiel bestaat uit elf effectcategorieën:

Effectcategorie	Equivalentiefactor	MKI-weegfactor
uitputting van abiotische grondstoffen, ex. Fossiele energiedragers	kg antimoon	0,16
uitputting van fossiele energiedragers	kg antimoon	0,16
klimaatverandering	kg CO ₂	0,05
ozonlaagaantasting	kg CFK-11	30
fotochemische oxidant vorming (smog)	kg ethyleen	2
verzuring	kg SO ₂	4
vermesting	kg PO ₄ ³⁻	9
humaan-toxicologische effecten	kg 1,4-dichloorbenzeen	0,09
ecotoxicologische effecten, aquatisch (zoetwater)	kg 1,4-dichloorbenzeen	0,03
ecotoxicologische effecten, aquatisch (zoutwater)	kg 1,4-dichloorbenzeen	0,0001
ecotoxicologische effecten, terrestrisch	kg 1,4-dichloorbenzeen	0,06

De berekening van de effectcategorieën is gebaseerd op de veel gebruikte methodiek in LCA studies: CML impact analyse methodiek (CML-IA)¹⁸ en aangepast naar de SBK-Bepalingsmethode. Voor meer informatie zie het rapport van de SBK-Bepalingsmethode. Zoals eerder vermeld is ook de energie-inhoud van de bruggen doorgerekend. De gebruikte weegfactoren zijn overgenomen uit de SBK-Bepalingsmethode.

2.6 Allocatie

De allocatie zoals voorgeschreven in de SBK-Bepalingsmethode zal gevolgd worden. De SBK-Bepalingsmethode hanteert de volgende volgorde van allocatie:

1. Allocatie gebaseerd op fysische grootheden (bijv. massa, energie-inhoud)
2. Allocatie gebaseerd op andere grootheden (bijv. economische allocatie)

Dit betekent dat allocatie op fysieke grootheden de voorkeur heeft en als dat geen representatief beeld geeft, dan wordt gealloceerd op basis van een andere grootheid.

2.7 Vergelijking van de bruggen

Een uitgangspunt van de analyse is dat de bruggen die vergeleken worden technisch en functioneel gezien ook vergelijkbaar zijn. Dit wordt gewaarborgd door vooraf de eisen aan de bruggen te definiëren en door achteraf de verschillende constructies door een onafhankelijk expert te laten vergelijken. De bruggen worden ook vergeleken op gebruikte allocaties en datakwaliteit.

2.8 Kwaliteitseisen van de data

De constructieve opbouw van de bruggen is aangeleverd door de verschillende deelnemende branches. Op basis van deze gegevens zijn de bruggen gemodelleerd. De bron van de data met betrekking tot materiaal- en componentproductie is met name de Nationale Milieudatabase of MRPI bladen. Beide bronnen zijn gebaseerd op de SBK-Bepalingsmethode. Mocht data ontbreken in deze database dan wordt de Ecoinvent 2.2¹⁹ database gebruikt. Als andere bronnen worden gebruikt, worden deze apart besproken in het rapport.

2.9 Kritische review

Tijdens het project is ondersteuning van LCA deskundige Rick Scholtes geweest en het over het eindresultaat van de studie heeft een kritische review plaats gevonden door Harry van Ewijk van IVAM, een onafhankelijke LCA deskundige.

2.10 Communicatie

De inhoud van de studie is vertrouwelijk. Dit betreft met name de resultaten van de analyses van de bruggen. Door geen van de partijen zal dan ook gecommuniceerd worden over de resultaten of conclusies van de studie zonder toestemming van alle deelnemende partijen. Uitgangspunt van de studie is wel dat er extern gecommuniceerd zal worden aangezien de studie met publiek geld mogelijk is gemaakt. Deze communicatie zal pas plaatsvinden als alle partijen goedkeuring hebben gegeven aan de tekst die openbaar gemaakt zal worden.

3 DATA INVENTARISATIE

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de verzamelde data voor deze studie. In paragraaf 3.1 wordt eerst ingegaan op de data van de materialen. In paragraaf 3.2 worden de uitgangspunten voor de funderingen toegelicht. In paragraaf 3.3, 3.4, 3.5 en 3.6 zijn de hoeveelheden toegepast materiaal voor achtereenvolgens de bruggen van beton, staal, hout en composiet toegelicht. In bijlage 2 is een overzicht gegeven van de gebruikte achtergronddata.

3.1 Materialen

In deze paragraaf lichten we toe waar de data over materialen vandaan komt en hoe we deze hebben geïnterpreteerd.

Betonmortel C20/28

MRPI data van betonmortel C20/28 is afkomstig van het MRPI blad²⁰ van de VOB van betonmortel. Hierbij is C30/37, XC1, S3, 0% betongranulaat voor gebruikt. Dit is de nieuwe aanduiding voor de betonsterkte C20/28. Hierbij dient aangemerkt te worden dat de VOB aangaf dat dit type betonmortel met name wordt gebruikt in de bouwsector. Het is niet direct geschikt voor gebruik in bruggen omdat het nog bestand moet worden gemaakt voor dooizouten. Het is wel de beste benadering van beton die beschikbaar is. Het is niet de verwachting dat dit veel invloed zal hebben op de resultaten. Eventuele uitloging van stoffen uit het beton is niet opgenomen in de studie.

Betonmortel C53/65

De betonsamenstelling van het voorgespannen beton is afkomstig van het bedrijf Spanbeton en is confidentieel. Alleen de resultaten van de analyse zijn in de rapportage opgenomen. De data voor de gebruikte CEMIII cement is afkomstig van het MRPI blad²¹ van Cement&beton²². Het beton bevat als toeslag materiaal naast zand en grind ook betongranulaat. De hoeveelheid betongranulaat is confidentieel, maar door de lage milieubelasting van zand, grind en granulaat heeft dit percentage weinig invloed op de resultaten. De uitgangspunten van de SBK-Bepalingsmethode zijn toegepast voor het opstellen van het milieuprofiel van dit beton. Eventuele uitloging van stoffen uit het beton is niet opgenomen in de studie.

Betongranulaat

De milieubelasting van het betongranulaat moet verdeeld worden over het aanbieden van het beton en het gebruik van het granulaat in een volgende levenscyclus. De producten die uit het breekproces komen zijn: betontoeslag, menggranulaat, asfaltgranulaat, brekerzand en zeefzand. In de Nationale Milieudatabase is 65% van het sorteer- en breekproces gealloceerd aan de betontoeslag. Het wassen is wel volledig aan het granulaat gealloceerd. Het verlies tijdens het breken is 4 %, dit wordt gestort. Gemiddeld wordt 24,6% niet gealloceerd aan de producten, dit wordt gealloceerd aan het betonpuin dat de verwerker binnen gaat. Dit komt overeen met indicatieve cijfers van de BRBS²³. Zij geven aan dat het ongeveer 2 euro kost om betonpuin aan te bieden en vervolgens 6 euro oplevert voor de verwerker. Het prijsverschil is 8 euro, dus 2/8 van het proces wordt toegerekend aan het aanbieden van het puin en 6/8 wordt toegerekend aan de producten. Het transport van 50 km is volledig aan het betonpuin toegerekend.

Staal

De productie en verwerking van het staal voor constructieve doeleinden is gebaseerd op het MRPI blad²⁴ van zwaar constructie staal uitgegeven door Bouwen met Staal.

Hout

In de Nationale Milieudatabase is momenteel nog geen data beschikbaar voor tropisch hardhout dat gebruikt kan worden in de GWW sector. Om deze reden heeft Centrum Hout Beco gevraagd een inventarisatie te maken van de keten van Afrikaans tropisch hardhout en met name Azobé hout. De gebruikte data van dit hout is afkomstig van Wijma, Meerdink en Groot Lemmer. Wijma is een producent van Afrikaans loofhout en heeft eigen concessies in Kameroen en Gabon. Zij beheren de gehele keten, van het kappen van de bomen tot en met het bewerken het hout tot gehele constructieonderdelen. Meerdink en Groot Lemmer hebben geen eigen concessies maar kopen dit hout in van andere partijen. Vervolgens verwerken zij dit hout, o.a. tot houten brugdelen.

Azobé hout is afkomstig uit met name Kameroen en Gabon. Het gebruikte hout heeft een FSC keurmerk²⁵, een bewijs van duurzame bosbouw. De bomen worden omgezaagd, getransporteerd naar de zagerij en verwerkt tot planken. Transportafstand naar de zagerij is 150 km, transportafstand naar de haven is 300 km voor Kameroen en 600 km voor Gabon, gemiddeld 450 km. Dit is geen gewogen gemiddelde aangezien er geen data aanwezig is over het aandeel van elk land in het totale volume. Dit wordt per vrachtwagen uitgevoerd. Planken worden getransporteerd naar Nederland. Sommige producenten kopen rond hout in en zagen dit in Nederland. Dit hout wordt vervolgens 169 km getransporteerd naar de fabrikant van brugonderdelen. De allocatie van processen aan de verschillende producten en bijproducten is gedaan met behulp van economische waarde. Bij het zagen in Afrika is uitgegaan van de waarde van het gezaagde hout bij de haven in plaats van bij de zagerij. De waarden van de bijproducten zijn afkomstig van Wijma, de waarde van de gezaagde planken is afkomstig van een onderzoek naar de keten van Azobé hout²⁶.

Het energiegebruik voor het zagen, schaven en het boren van gaten is afkomstig van de verschillende genoemde bedrijven.

Composiet

Composiet is in de toepassing van de brug een sandwichmateriaal vervaardigd uit hars, glasvezel, polyurethaan schuim en additieven zoals een verharder, versneller, vertrager en ander toebehoren (slangen, folies). SGS Intron heeft in 2011 een MRPI studie uitgevoerd van een composietbrug²⁷. De basisgegevens van deze studie zijn door SGS Intron aan Beco geleverd voor het samenstellen van de twee bruggen in deze studie. De toxiciteit van de productie van het glasvezel bleek opvallend hoog te zijn. Bij nader onderzoek bleek dit afkomstig te zijn van het Ecoinvent proces van de productie van glasvezel dat als basis was gebruikt. Dat Ecoinvent proces was in deze studie aangepast met behulp van specifieke energiedata van de glasvezel leverancier van FiberCore. De toxiciteit van het Ecoinvent proces bleek gebaseerd op de vergunning van de producent en niet de werkelijke emissie van de betreffende toxische stoffen. Om deze reden is voor het milieuprofiel van glasvezel gebruik gemaakt van een recente studie van de glasvezelproducenten in Europa, Glass Fibre Europe²⁸. De door PWC uitgevoerde studie vermeldde geen toxiciteitgegevens in het rapport. Om deze reden is de dataset hiervan direct door PWC geleverd aan Beco zodat de toxiciteit ook doorgerekend kon worden en de impact analyse methode gebruikt kan worden zoals deze is voorgeschreven in de SBK-Bepalingsmethode. De overige materialen en transporten zijn afkomstig van de Intron MRPI studie van de composietbrug.

Asfalt

Voor de betonnen brug is uitgegaan van 12 cm STAB-asfalt over de gehele brug. De data van het asfalt is afkomstig van DuboCalc 2.0^a. Deze database bevat geen informatie over abiotische uitputting, ozonlaagaantasting en toxiciteit in zeewater. De eerste twee effectcategorieën zijn ingevuld met behulp van een MRPI studie van LEAB asfalt²⁹. Dit is het enige beschikbare MRPI blad van asfalt dat beschikbaar was tijdens de studie. De toxiciteit in zeewater (*marine ecotoxicity*) is bepaald met behulp van Ecoinvent gebruikmakend van een samenstelling van asfalt van steenslag 57%, zand 30%, vulstof 7,5% en bitumen 5,5%³⁰. De levensduur is gesteld op 15 jaar op basis van een publicatie van VBW Asfalt, Richtlijnen dunne asfaltlagen³¹. In deze studie wordt een levensduur van 15-20 jaar gegeven voor SMA asfalt en 10-15 jaar voor DAB. Door Rijkswaterstaat (Ane de Boer) is aangegeven dat zij in de regel uitgaan van een kortere levensduur. Voor deze studie is echter de richtlijn van VBW Asfalt aangehouden.

Slijtlaag

De data van de slijtlaag is afkomstig van de MRPI studie van de composietbrug. Het is gebaseerd op 3 kg / m² epoxy hars en 14 kg / m² Porphyry. De levensduur is 25 jaar. De verkeersbruggen zonder asfalt hebben een slijtlaag.

3.2 Fundering en aanbrug

De ontwerpen van de funderingen van de aangeleverde bruggen verschilden onderling sterk. In sommige gevallen was ook de functionaliteit niet vergelijkbaar. De fundering van de bruggen zou alleen maar afhankelijk moeten zijn van de horizontale en verticale krachten tijdens gebruik en niet van het gemaakte ontwerp. Om deze reden zijn de dimensies van de funderingsbalken en de palen en het aantal palen soms gewijzigd ten opzichte van het aangeleverde ontwerp. Dit wordt in de onderstaande paragraaf nader toegelicht.

Aan de start van de studie is gesteld dat de aanbruggen onafhankelijk zijn van het materiaaltype van de brug zelf.

3.2.1 Fundering fietsbruggen

Bij de fundering van de betonnen en stalen fietsbruggen is uitgegaan uit van een funderingsbalk per landhoofd van 600mm bij 1000 mm over de gehele breedte van de brug. De keerwand per landhoofd is gesteld op 250 mm bij 630 mm over de gehele breedte van de brug. De landhoofden zelf hebben een inhoud van 3,8 m³ per twee stuks. De betonpalen hebben een totale inhoud van 6 m³. De composiet fietsbrug heeft een afwijkende fundering met stalen palen en liggers. De fundering van de houten brug is niet gewijzigd ten opzichte van het aangeleverde ontwerp.

^a Gebruikte DubaCalc proces: Asfalt (STAB) 0% PR

	Type	Betonnen brug	Stalen brug	Composiet brug	Houten brug
Funderingsbalken	Beton C28/35	3,79 m ³	3,79 m ³	-	1,04 m ³
	Wapeningstaal	0,634 ton	0,634 ton	-	0,071 ton
Prefab beton palen	Beton C 45/55	6 m ³	6 m ³	-	2,71 m ³
	Wapeningstaal en voorspanstaal	0,453 ton	0,453 ton	-	0,205 ton
Stalen palen en UNP ligger	Staal	-	-	0,574 ton	-

3.2.2 Fundering verkeersbruggen

Na overleg met Frans Withagen van BAM Infraconsult zijn de funderingen van alle verkeersbruggen hetzelfde gemaakt. Het gaat uit van een funderingsbalk per landhoofd van 700 mm bij 1500 mm over de gehele breedte van de brug. Een keerwand per landhoofd van 250 mm bij 900 mm over de gehele breedte van de brug. De betonpalen hebben een afmeting van 300 mm bij 300 mm met een lengte van 13,5 m. Deze lengte is gebaseerd op de volgende redenatie: Uitgaande van een draagkrachtige laag op 12 m onder maaiveld, en de regel van Koppejan³² dat de paal punt kracht nog wordt beïnvloed door grond boven de paalpunt tot 8 keer de diameter van de paalpunt, zou de paalpunt $8 \times 0,3 \text{ m} = 2,4 \text{ m}$ de zandlaag in moeten. Rekening houdende met een bovenkant paal op 1 m onder maaiveld (met voldoende ruimte om de kop van de paal te snellen en de wapening op te nemen in de betonsloof), is de benodigde paal lengte $12 + 2,4 \text{ m} - 1 \text{ m} = 13,4 \text{ m}$. De paallengte is gesteld op 13,5 m. Voor alle bruggen is uitgegaan van 10 palen per landhoofd, 20 totaal. In 6.3 is de gevoeligheidsanalyse opgenomen die laat zien dat de resultaten relatief weinig afhankelijk zijn van het aantal gebruikte palen.

	Type	Betonnen brug	Stalen brug	Composiet brug
Funderingsbalken	Beton C28/35	28,08 m ³	28,08 m ³	28,08 m ³
	Wapeningstaal	6,18 ton	6,18 ton	6,18 ton
Prefab beton palen	Beton C 45/55	24,3 m ³	24,3m ³	24,3m ³
	Wapeningstaal en voorspanstaal	2,23 ton	2,23 ton	2,23 ton

3.2.3 Opmerkingen fundering

Prefab beton palen

De gebruikte betonmortel voor de fundering heeft volgens het ontwerp van Spanbeton een sterkte van C45/55. Als benadering voor het milieuprofiel van deze betonmortel is het milieuprofiel van de betonmortelmix C53/65 van Spanbeton gebruikt.

Voor de samenstelling van de prefab palen voor de houten fietsbrug is uitgegaan van de samenstelling van de prefab palen van de betonnen brug. Het betonvolume is opgegeven door Wijma. De gebruikte hoeveelheid wapeningstaal en voorspanstaal is geëxtrapoleerd vanuit de hoeveelheid staal in de prefab palen van de betonnen brug.

Het energiegebruik van de productie van het voorgespannen beton is afkomstig van een MRPI studie van betonproducten die momenteel wordt uitgevoerd. De BFBN heeft al wel het gemiddelde energiegebruik opgegeven³³.

3.3 Betonnen bruggen

Op basis van het aangeleverde ontwerp en aanvullende gegevens zijn de hoeveelheden gebruikt materiaal vastgesteld voor de betonnen bruggen.

3.3.1 Betonnen fietsbrug

Bovenbouw

	Type	Hoeveelheid	Opmerkingen
VIP en TRA liggers	Beton C53/65	10,12 m ³	-
	Wapeningstaal	0,425 ton	-
	Voorspanstaal	1,126 ton	-
Druklaag	Beton C28/35	9,09 m ³	-
	Wapeningstaal	1,741 ton	-

Er is vanuit gegaan dat het beton van de druklaag over een afstand van 50 km met vrachttransport naar de bouwlocatie wordt vervoerd, vol heen en leeg terug.

3.3.2 Betonnen verkeersbrug

Bovenbouw

	Type	Hoeveelheid (brug met slijtlaag)	Hoeveelheid (brug met asfalt)	Opmerkingen
SKK liggers	Beton C53/65	121,66 m ³	125,53 m ³	Zie 3.2.3
	Wapeningstaal	16,3 ton	16,3	Zie 3.2.3
	Voorspanstaal	12,323 ton	12,323	Zie 3.2.3
Voeg tussen liggers	Beton C28/35	19,55 m ³	19,55	-
	Wapeningstaal	0,99 ton	0,99	-

3.3.3 Opmerkingen

VIP, TRA en SKK liggers

Het energiegebruik van de productie van het voorgespannen beton is afkomstig van een MRPI studie van betonproducten die momenteel wordt uitgevoerd. De BFBN heeft al wel het gemiddelde energiegebruik opgegeven.

Voorspanstaal en wapeningstaal

Voor de productie en verwerking van het voorspan- en wapeningstaal is de MRPI data²⁴ van zwaar constructiestaal gebruikt die is uitgegeven door Bouwen met Staal. Hoewel de bewerkingsprocessen anders zijn dan bij dit constructiestaal is deze data gebruikt als beste benadering.

3.4 Stalen bruggen

Op basis van het aangeleverde ontwerp en aanvullende gegevens zijn de hoeveelheden gebruikt materiaal vastgesteld voor de stalen bruggen.

3.4.1 Stalen fietsbrug

Bovenbouw

	Hoeveelheid	Opmerkingen
Staal	5,6079 ton	-
Coating	0,55 kg/m ²	Zie 3.4.3
Oppervlakte	226,87 m ²	-
Laslengte	22,1 m	Zie 3.4.3

3.4.2 Stalen verkeersbrug

Bovenbouw

	Hoeveelheid	Opmerkingen
Bovenbouw	86,3 ton	-
Coating	0,55 kg/m ²	Zie 3.4.3
Oppervlakte	824,2 m ² (berekend)	Zie 3.4.3
Laslengte	102,4 m	Zie 3.4.3

3.4.3 Opmerkingen stalen brug

Coating

Het staal moet gelakt worden voor de conservering. De hoeveelheid te gebruiken lak is aangeleverd door Bouwen met Staal. Het milieuprofiel van 1 kg natte lak is aangeleverd door Bouwen met Staal en afkomstig van de uitgevoerde MRPI studie van zwaar constructiestaal²⁴. De opgegeven lakdikte is 0,35 mm. De dichtheid van de lak is ongeveer 1375 kg/m³. Met deze gegevens kan uitgerekend worden dat de hoeveelheid lak 0,48 kg/m² bedraagt. De lak gaat 25 jaar mee en halverwege deze grote onderhoudsbeurt wordt een kleine onderhoudsbeurt gegeven waarbij 2% van de coating wordt vervangen²⁴. De fietsbrug moet tijdens gebruik met deze levensduur één maal opnieuw gecoat worden en twee maal een kleine

onderhoudsbeurt ondergaan. De verkeersbrug moet tijdens gebruik drie maal opnieuw gecoat worden en vier maal een kleine onderhoudsbeurt ondergaan.

Oppervlakte

De oppervlakte van de fietsbrug is doorgerekend door de constructeur. Het oppervlakte van de verkeersbrug is niet aangeleverd, deze is berekend met behulp van de bepaalde oppervlaktes van de stalen onderdelen. Op deze manier is de oppervlakte bepaald op: 824 m².

Lassen

Het milieuprofiel van het lassen is afkomstig uit de Ecoinvent 2.2 database, hierbij is uitgegaan van booglassen. De laslengte van de verkeersbrug is opgegeven, van de fietsbrug niet. Voor het bereken van de laslengte is een zelfde verhouding gebruikt als bij het oppervlakte van de verkeersbrug ten opzichte van de fietsbrug. De verhouding bij het oppervlakte is 3,6: 1, dus er is vanuit gegaan dat de laslengte van de fietsbrug ook 3,6 maal kleiner is dan de laslengte van de verkeersbrug.

3.5 Houten brug

Op basis van het aangeleverde ontwerp en aanvullende gegevens zijn de hoeveelheden gebruikt materiaal vastgesteld voor de houten brug.

	Type	Hoeveelheid	Opmerkingen
Houten brugdelen	Azobé	10,198 m ³ (12,747 ton)	
Bevestigingsmiddelen	Staal	0,047 ton	

Bevestigingsmiddelen

Er is 47 kg staal aanwezig in deze brug. Dit is laag ten opzichte van het gewicht van de brug en het is niet de verwachting dat het staal veel invloed zal hebben op de resultaten. Het milieuprofiel van het staal is overgenomen van de MRPI data²⁴ van zwaar constructiestaal zoals aangeleverd door Bouwen met Staal.

3.6 Composiet bruggen

Op basis van het aangeleverde ontwerp en aanvullende gegevens zijn de hoeveelheden gebruikt materiaal vastgesteld voor de composiet bruggen. De aangeleverde bruggen zijn uitgevoerd op basis van glasvezel composiet.

3.6.1 Fietsbrug composiet

Bovenbouw

	Hoeveelheid	Opmerkingen
Hars	1,480 ton	
Glasvezel	2,435 ton	
PU-Schuimkern	0,781 ton	
Verharder	0,032 ton	
Versneller	0,012 ton	
Vertrager	0,009 ton	
Stalen leuning	0,980 ton	

De productie van de leuning van de fietsbrug van composiet is gebaseerd op het MRPI blad³⁴ van licht constructie staal uitgegeven door Bouwen met Staal.

3.6.2 Verkeersbrug composiet

Bovenbouw

	Hoeveelheid	Opmerkingen
Hars	14,895 ton	
Glasvezel	28,745 ton	
PU-Schuimkern	12,648 ton	
Verharder	0,335 ton	
Versneller	0,127 ton	
Vertrager	0,089 ton	

3.7 Transport naar bouwplaats

Voor de transportafstanden naar de bouwplaats van de onderdelen en materialen is gebruik gemaakt van de forfaitaire afstanden in de SBK-Bepalingsmethode.

3.8 Constructie

In de constructiefase van de brug wordt gebruik gemaakt van een mobiele kraan. Voor de betonnen brug is opgegeven dat de gebruikte kraan een 300 ton kraan is en dat deze één dag gebruikt wordt. Voor de bruggen is aangenomen dat deze 8 uur gebruikt wordt. Voor het bepalen van het brandstofgebruik is gebruik gemaakt van de specificaties van een dergelijke kraan (HC--278H II)³⁵. Deze kraan gebruikt twee motoren en hebben een verbruik van 37,66 liter diesel per uur op half vermogen. Dit is een benadering aangezien het niet bekend is hoeveel een dergelijke kraan precies verbruikt. Dit komt overeen met 1,35 GJ per uur van het Ecoinvent proces Diesel, burned in building machine/GLO U.

3.9 Einde levensduur

Voor de transportafstanden vanaf de sloopplaats naar de eindbestemming van het sloopafval is gebruik gemaakt van de forfaitaire afstanden in de SBK-Bepalingsmethode.

Einde levensduur hout

De forfaitaire afval scenario's in de NEN8006 geven aan dat 90% van het hout na de einde levensduur wordt verbrand in een AVI met energierugwinning en 10% wordt gestort. De netto stookwaarde van Azobé hout is 18,35 MJ/kg. De SBK-Bepalingsmethode geeft aan dat bij verbranding in een AVI uitgegaan mag worden van een rendement van 22% voor elektriciteit opwekking en 7% voor warmte opwekking. Deze waarden zijn gebruikt en de milieubelasting van de zo vermeden elektriciteit- en warmteproductie is afgetrokken van de totale milieubelasting.

Einde levensduur staal

De bron van het milieuprofiel van de verwerking van het staal na gebruik is het MRPI blad van zwaar constructiestaal. In dit profiel is uitgegaan van 51% recycling en 49% hergebruik zoals voorgeschreven is in NEN8006.

Einde levensduur beton

NEN8006 geeft aan dat 99% van het beton wordt gerecycled en 1% wordt gestort. De berekening van het milieuprofiel van het recyclen van beton is al beschreven in paragraaf 3.1 onder het kopje betongranulaat. De milieubelasting van het storten van beton is afkomstig van Ecoinvent. Hierbij is gerekend met een afkap van de milieubelasting bij 100 jaar, de lange termijn emissies zijn niet meegenomen in de milieubelasting.

Einde levensduur composiet

Het scenario van de einde levensduur van de MRPI studie van de composiet brug is gebruikt, zie tabel.

	AVI	Storten	Recycling
Glasvezel	70%	5%	25%
Hars en overige chemicaliën	70%	5%	25%
PU-schuim	70%	5%	25%

Tabel 1 Scenario einde levensduur van het composiet

De recycling van de materialen omvat alleen het malen. Bij de verbranding van de chemicaliën en PU-schuim is uitgegaan van energierterugwinning. Deze impact van de vermeden energieproductie is afgetrokken van de milieubelasting van de verbranding. Verbranding in een AVI is mogelijk volgens een studie die uitgevoerd is door KEMA³⁶. Dit rapport geeft ook aan dat composiet thermisch gerecycled kan worden in een cementoven. Deze mogelijkheid is in een gevoeligheidsanalyse (6.7) verder uitgewerkt.

3.10 Impact analyse

De inventarisatie zoals hiervoor besproken is doorgerekend met behulp van de impact analyse methodiek per effectcategorie. Er zijn niet voor alle emissies en gebruikte grondstoffen die onderdeel zijn van de levenscycli karakterisatiefactoren. De emissies en grondstoffen zonder karakterisatiefactor zijn in een lijst opgenomen en nader geanalyseerd. Er is geen reden om aan te nemen dat het ontbreken van deze stoffen invloed heeft op de resultaten en conclusies. De lijst is als apart Excel bestand, genaamd 'Substances niet in methodiek.xlsx', opgenomen in het projectdossier.

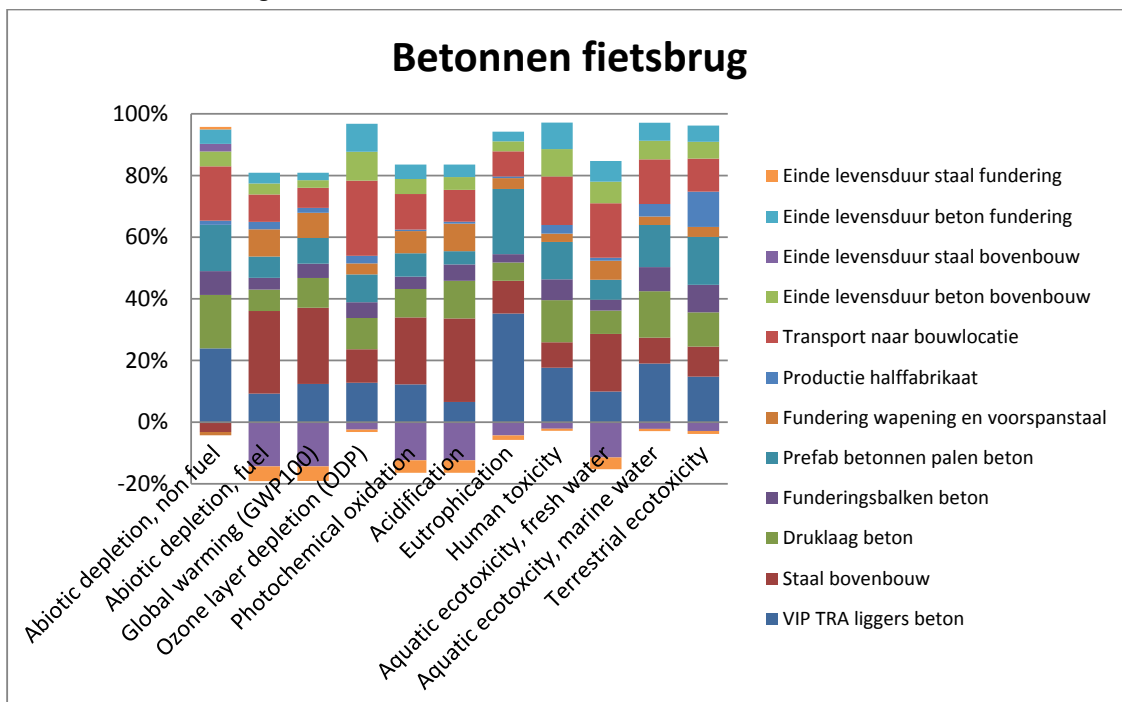
4 RESULTATEN FIETSBRUG

In dit hoofdstuk worden de resultaten weergegeven van de analyses van de fietsbruggen.

Eerst worden de resultaten weergegeven per brug, uitgesplitst naar de verschillende milieu-impacts. In paragraaf 4.5 worden de fietsbruggen vergeleken per effectcategorie en op basis van de MKI-score en primaire energie.

4.1 Betonnen fietsbrug

Figuur 1 geeft het milieuprofiel van een betonnen fietsbrug weer onderverdeeld per levensfase, bovenbouw en fundering.

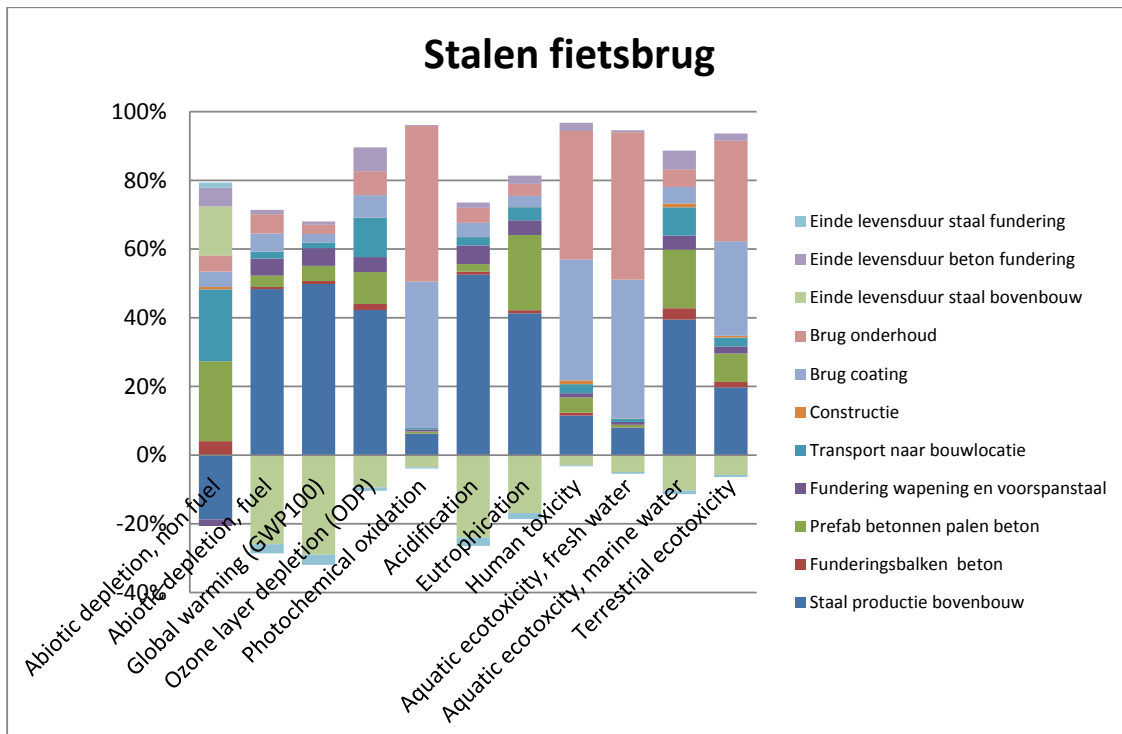


Figuur 1 Het milieuprofiel van een betonnen fietsbrug

De productie van de materialen is de meest dominante levensfase in de levenscyclus van de betonnen brug. De negatieve waarden zijn het resultaat van het hergebruik en recycling van het staal.

4.2 Stalen fietsbrug

Figuur 2 geeft het milieuprofiel van een stalen fietsbrug weer.

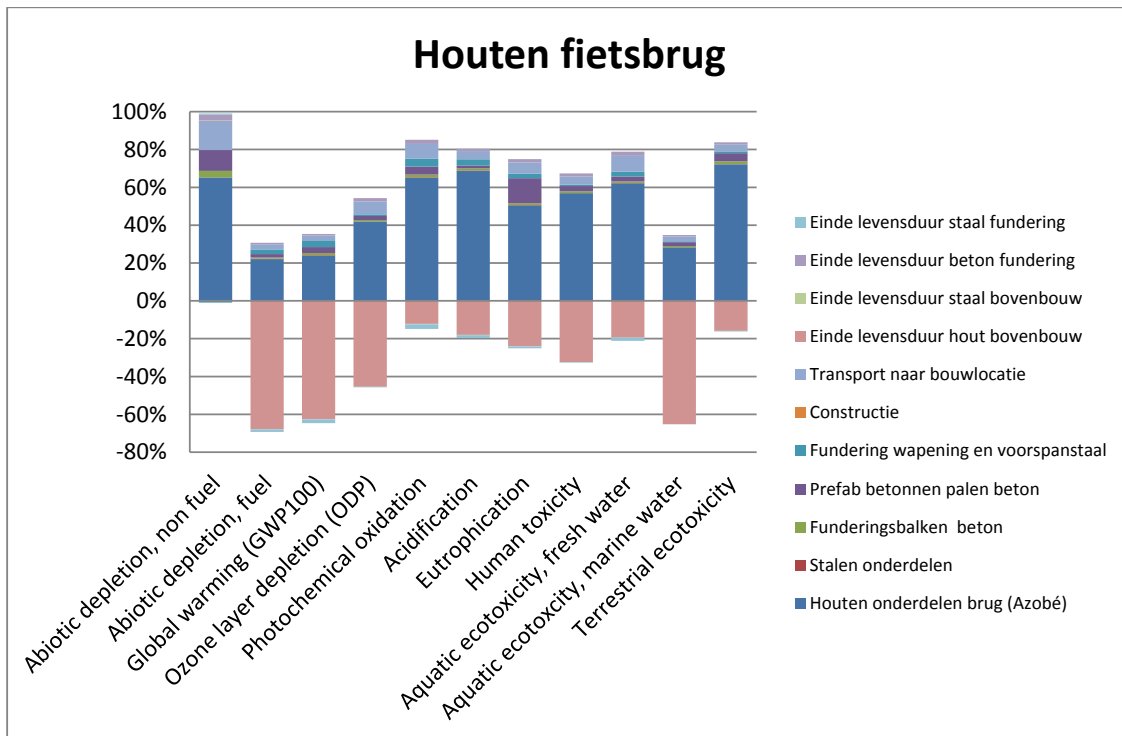


Figuur 2 Het milieuprofiel van een stalen fietsbrug.

De milieubelasting van een stalen brug is voor een relatief groot deel afhankelijk van de coating en de milieubelasting is dus ook sterk afhankelijk van de gekozen onderhoudsfrequentie. De coating heeft een relatief hoge impact op *photochemical oxidation* (smog) en *fresh water* en *human toxicity*. Om de invloed van de gebruikte onderhoudsfrequentie te onderzoeken is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd hierover, zie paragraaf 6.6. De onzekerheid van de laslengte is vrij groot doordat dit geëxtrapoleerd is vanuit de laslengte van de verkeersbrug. De invloed van het lassen is dusdanig laag dat het niet de verwachting is dat deze onzekerheid invloed heeft op de uiteindelijke conclusies.

4.3 Houten fietsbrug

Figuur 3 geeft het milieuprofiel van een houten fietsbrug weer.



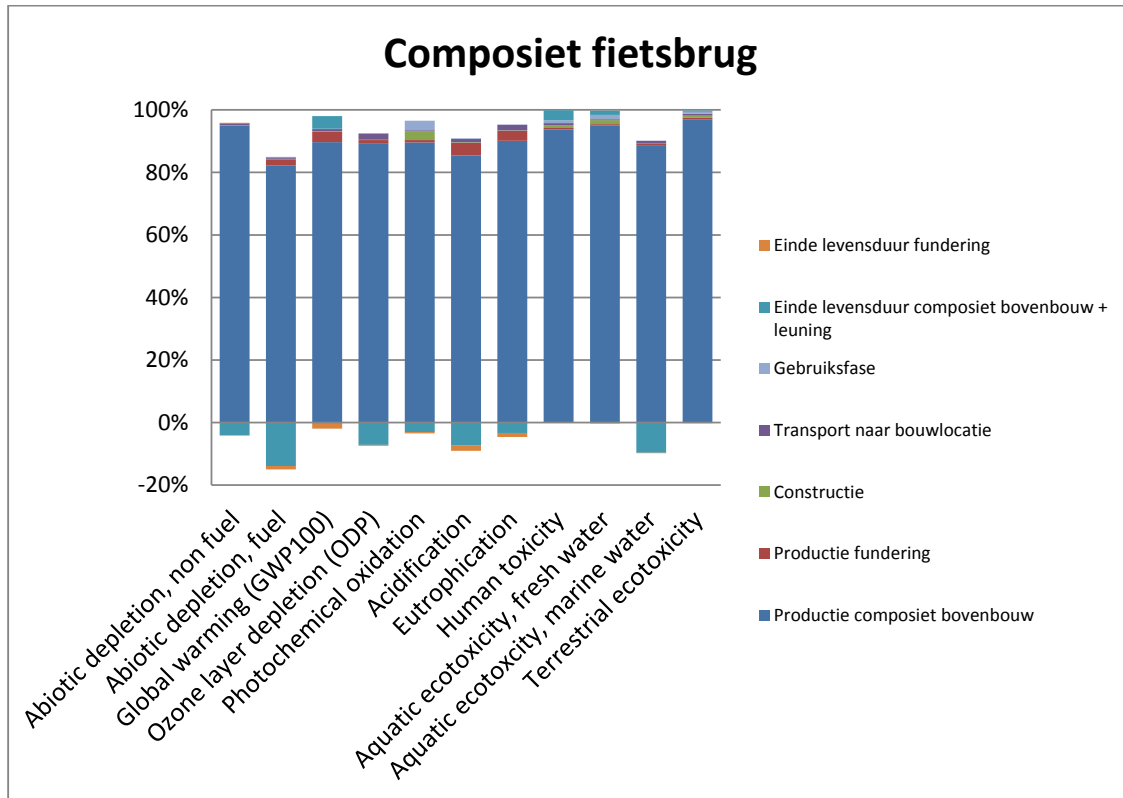
Figuur 3 Milieuprofiel van de houten fietsbrug

De houten fietsbrug laat een grote negatieve emissie zien bij de meeste effectcategorieën. De reden hiervan is de energie die opgewekt wordt bij het verbranden van het hout in een AVI bij de afdanking. Dit voordeel is gebaseerd op de huidige gemiddelde energiemix welke grotendeels op fossiele energie is gebaseerd. Bij het verduurzamen van de Nederlandse energiemix neemt het voordeel van het verbranden van hout af, het vermijdt minder milieubelastend geproduceerde energie. De efficiëntie van AVI's neemt toe in de loop van de jaren. Bij een verdere toename stijgt het voordeel dat behaald wordt met het op deze manier verbranden van hout.

De houtproductie heeft ook een relatief grote bijdrage bij de meeste effectcategorieën. Een groot deel hiervan is afkomstig van het transport vanuit het bos en de verscheping naar Nederland.

4.4 Composiet fietsbrug

Figuur 4 geeft het milieuprofiel van de geanalyseerde composiet fietsbrug. Deze fietsbrug voldoet aan de gestelde eisen aan de brug. In paragraaf 6.1 is een composiet fietsbrug geanalyseerd waarbij het ontwerp beter is afgestemd op de eigenschappen van composiet.

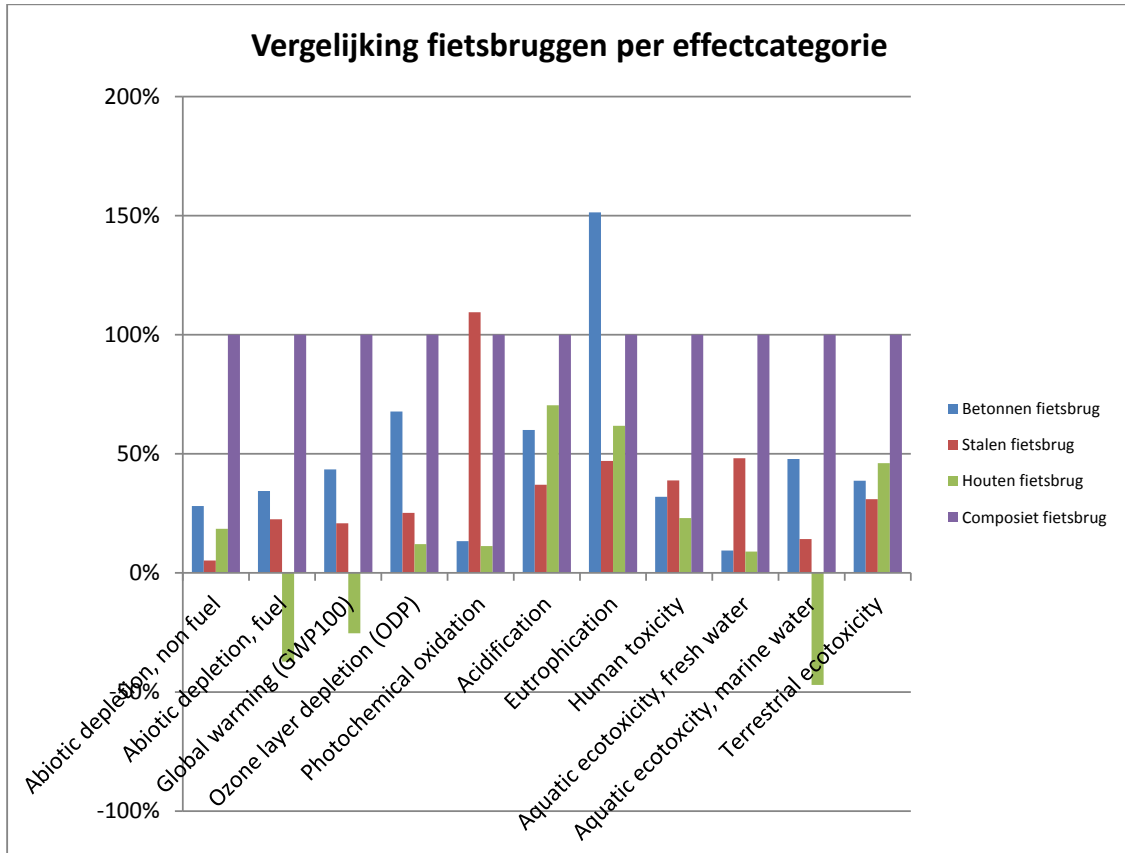


Figuur 4 Milieuprofiel van een composiet fietsbrug

De grootste milieubelasting van de fietsbrug van composiet is duidelijk van de productie van de materialen: het glas, de hars en het PUR schuim. De andere levensfasen zijn van minder belang.

4.5 Vergelijking fietsbruggen

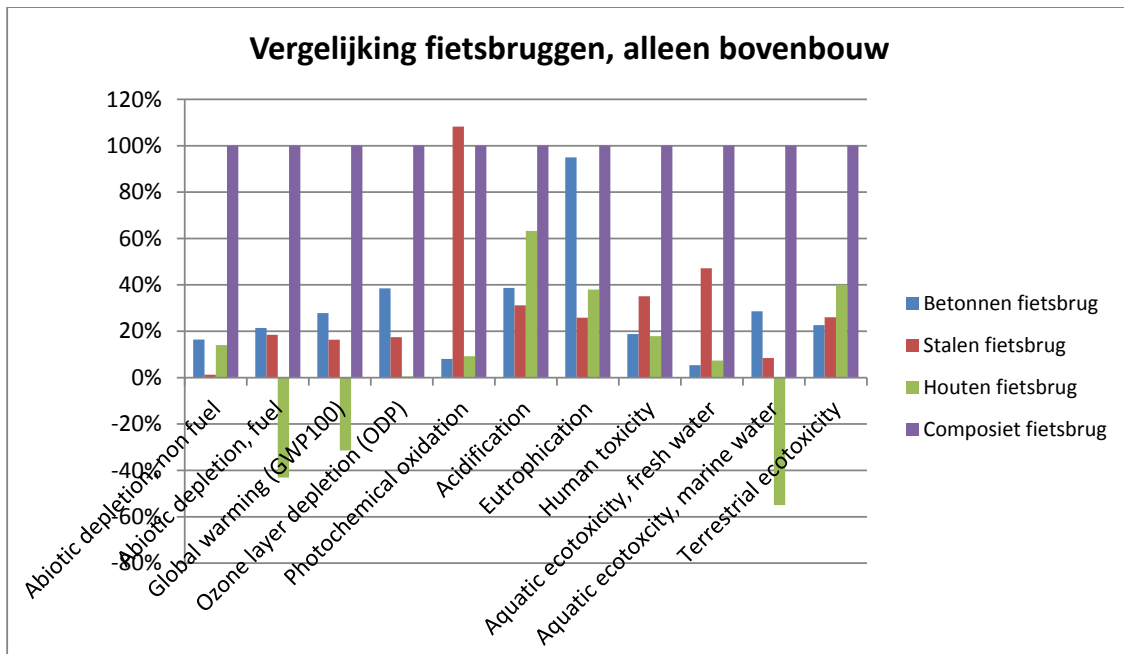
In Figuur 5 geeft een vergelijking van de resultaten van de verschillende bruggen per individuele effectcategorie, waarbij de composietbrug als referentie dient.



Figuur 5 Vergelijking van de verschillende fietsbruggen per effectcategorie. De scores van de composietbrug zijn op 100% gesteld.

De bovenstaande figuur laat zien dat de composietbrug vooral hoog scoort op de effectcategorieën abiotische uitputting, broeikaseffect en de toxiciteits categorieën. De uitzonderingen zijn photochemical oxidation (zomer smog) en eutrophication (vermesting).

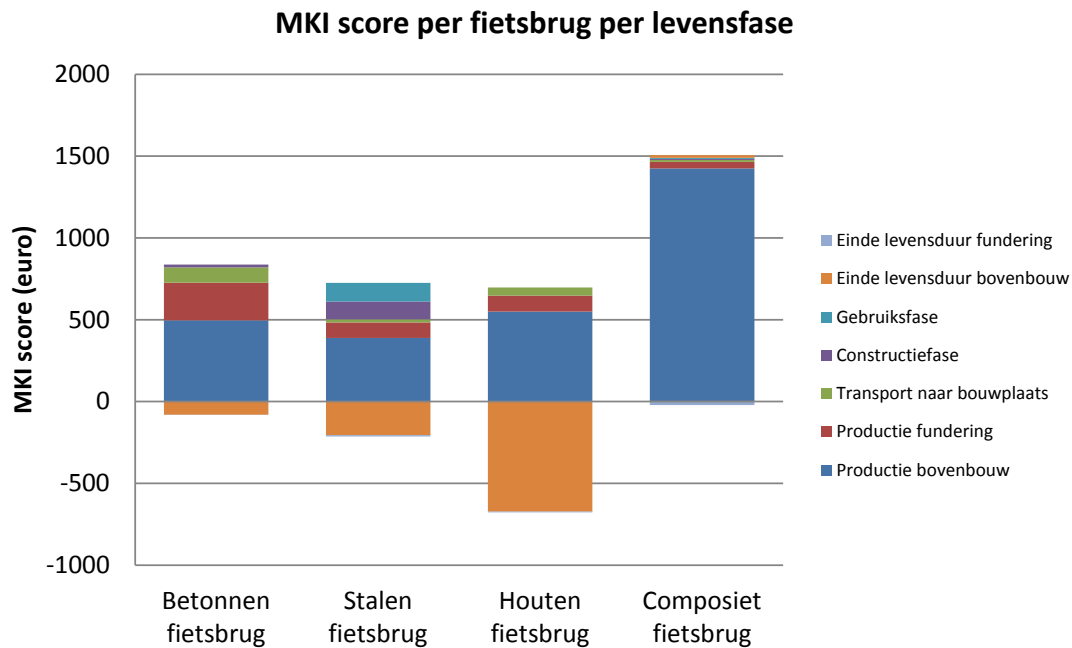
In Figuur 6 zijn de bruggen vergeleken zonder de fundering en met alleen de bovenbouw.



Figuur 6 Vergelijking van alleen de bovenbouw van de verschillende fietsbruggen per effectcategorie. De scores van de composietbrug zijn op 100% gesteld.

Figuur 6 laat een vergelijkbaar beeld zien als de resultaten met zowel bovenbouw als fundering, met uitzondering van de eutrophication (vermesting) die voor de betonnen brug relatief meer afneemt dan voor de composiet brug als de fundering niet in beschouwing wordt genomen.

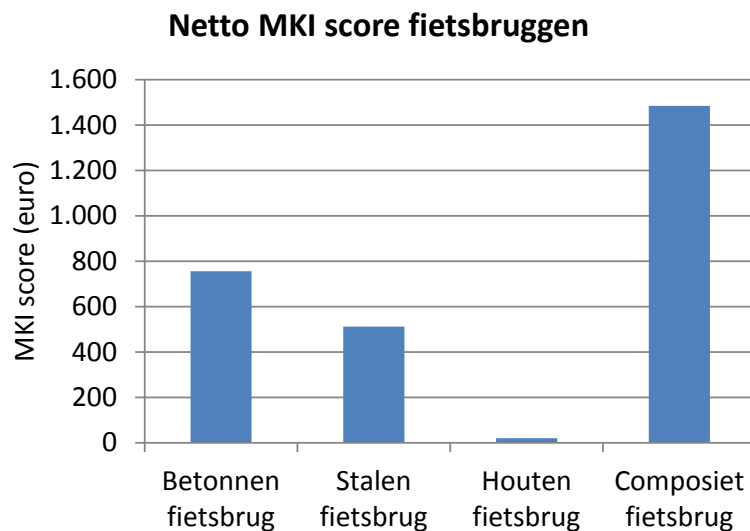
Figuur 7, Figuur 8 en Figuur 9 geven een vergelijking van de verschillende fietsbruggen op basis van de MKI score. Hierbij moet de kanttekening in ogenschouw worden genomen die in de inleiding gemaakt is over het gebruik van een gewogen score zoals de MKI score, het dient slechts voor het vergroten van het inzicht in de resultaten en valt buiten het kader van de LCA norm ISO 14040/44.



Figuur 7 Vergelijking van de verschillende fietsbruggen

De vergelijking laat zien dat de productie van de bovenbouw dominant is voor de meeste bruggen, met uitzondering van de houten brug waarbij de grote negatieve impact van het verbranden van het hout in een AVI ook dominant is.

De vergelijking laat zowel negatieve als positieve scores zien. Dit maakt het lastiger om een vergelijking te maken in de netto scores. Deze vergelijking is weergegeven in Figuur 8.



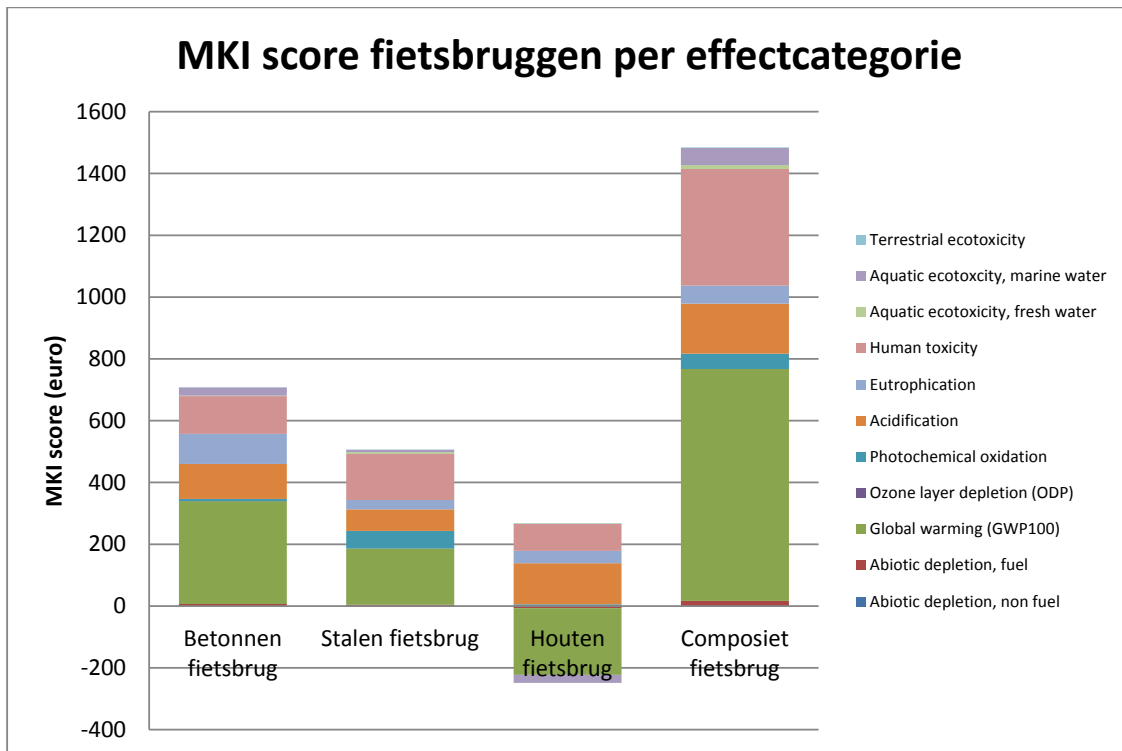
Figuur 8 Vergelijking tussen de netto MKI scores van de verschillende bruggen.

Deze figuur laat zien dat de houten brug een erg lage score heeft in vergelijking met de andere bruggen. Er dient echter op gelet te worden dat hout wordt betrokken uit aantoonbaar duurzaam beheerde bossen

(voor Nederland conform de eisen voor duurzaam inkopen van hout (TPAC³⁷)). In dat geval compenseren hutoogst en natuurlijke bijgroei elkaar en wordt uitputting en aantasting van ecosystemen voorkomen.

De composiet fietsbrug heeft een relatief hoge MKI score. Dit ligt aan de relatief hoge impact per kilo materiaal die in deze constructie niet wordt gecompenseerd door een veel lager gewicht. NB opvallend is dat de composietbrug niet veel lichter is dan de andere bruggen.

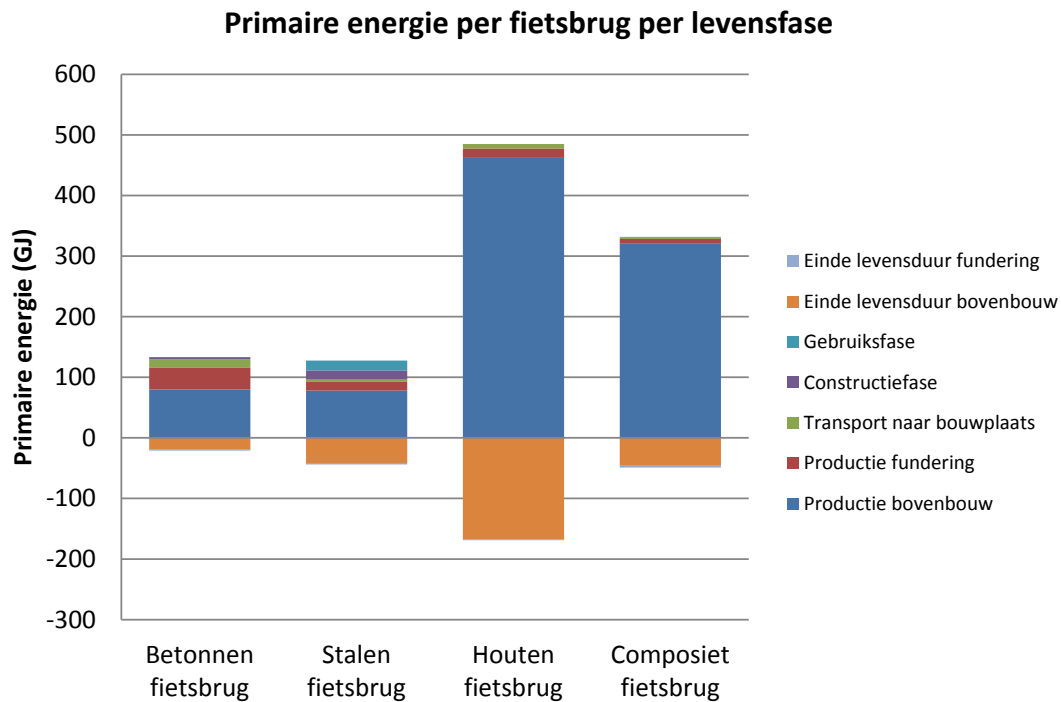
Figuur 9 geeft de opbouw van de MKI-score weer van de verschillende fietsbruggen naar effectcategorie.



Figuur 9 MKI-score van de verschillende fietsbruggen weergegeven per effectcategorie

De figuur laat zien dat niet alle effectcategorieën evenveel invloed hebben op deze MKI scores. Klimaatverandering, verzuring, vermesting en humane toxiciteit hebben de meeste invloed op de MKI-scores van de verschillende bruggen.

Figuur 10 geeft een vergelijking van de primaire energie-inhoud van de verschillende bruggen onderverdeeld naar de verschillende levensfasen.



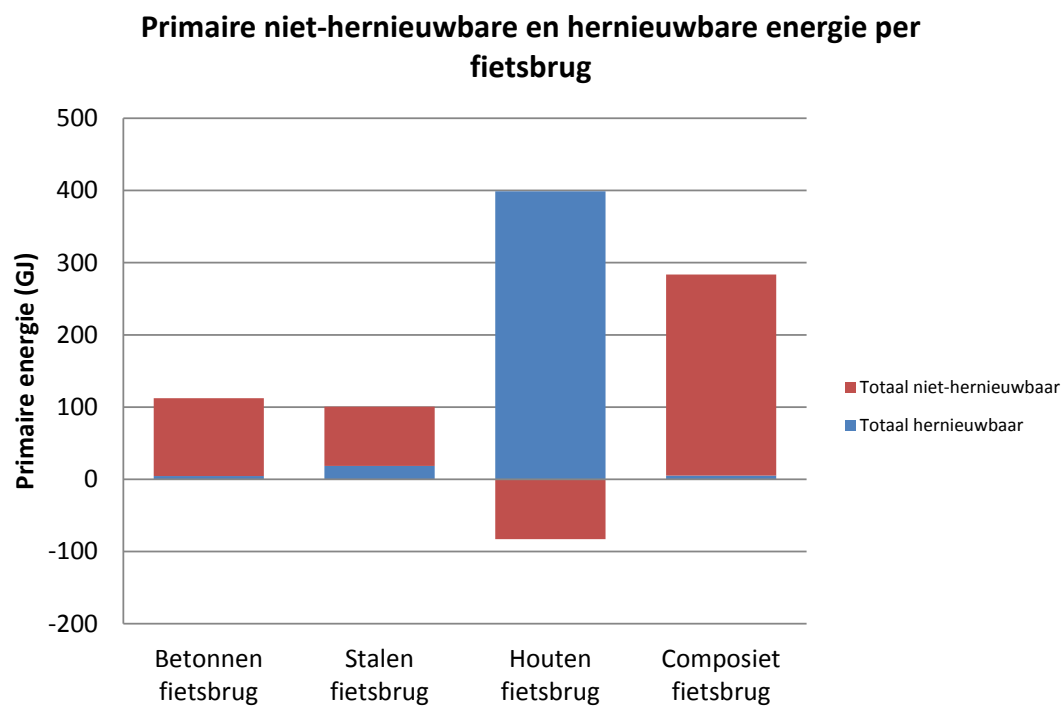
Figuur 10 vergelijking tussen de primaire energie-inhoud van de verschillende fietsbruggen

	Totale primaire energie-inhoud (GJ)
Betonnen brug	112
Stalen brug	101
Houten brug	316
Composietbrug	284

Tabel 2 Totaal energiegebruik van de verschillende fietsbruggen

Hoewel de MKI score van de houten brug erg laag is laat de figuur hierboven zien dat de energie-inhoud van deze brug wel relatief hoog is, dit komt door de verbrandingsenergie van het hout. De verbrandingsenergie van met name beton en staal is laag en dit is terug te zien in een relatief lage score op de primaire energie-inhoud.

In Figuur 11 is een onderscheid gemaakt in hernieuwbare en niet-hernieuwbare energie. Onder hernieuwbare energie vallen: Biomassa, waterkracht, zonne-energie en windenergie. Onder niet-hernieuwbare energie worden de volgende energiebronnen gerekend: fossiele brandstoffen en nucleaire energie.



Figuur 11 vergelijking tussen het primair energiegebruik verdeeld in hernieuwbare en niet-hernieuwbare energie van de verschillende fietsbruggen

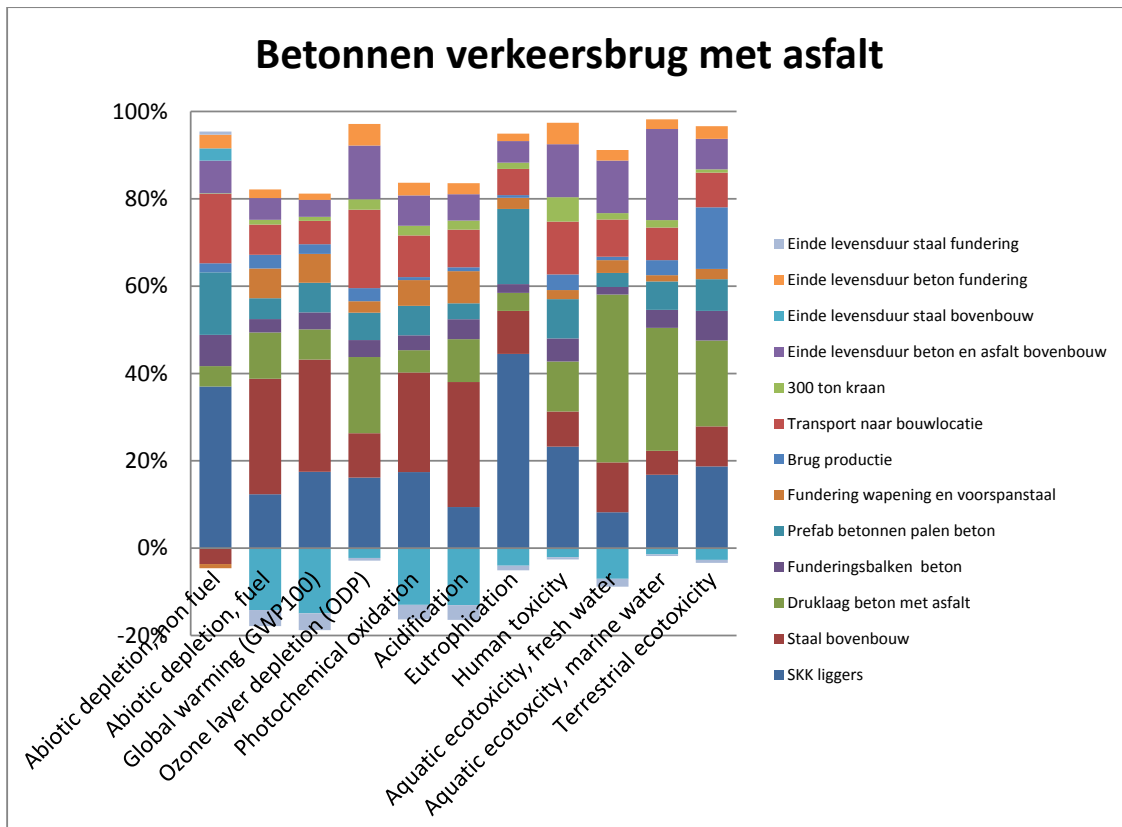
Figuur 11 laat zien de meeste energie in de levenscycli van de bruggen afkomstig is van niet-hernieuwbare grondstoffen, met uitzondering van de houtenbrug.

5 RESULTATEN VERKEERSBRUGGEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten weergegeven van de analyses van de verkeersbruggen. Eerst worden de resultaten weergegeven per brug, uitgesplitst naar de verschillende milieu-impacts. In paragraaf 5.4 worden de verkeersbruggen vergeleken, op basis van de verschillende effectcategorieën, MKI-score en primaire energie.

5.1 Betonnen verkeersbrug

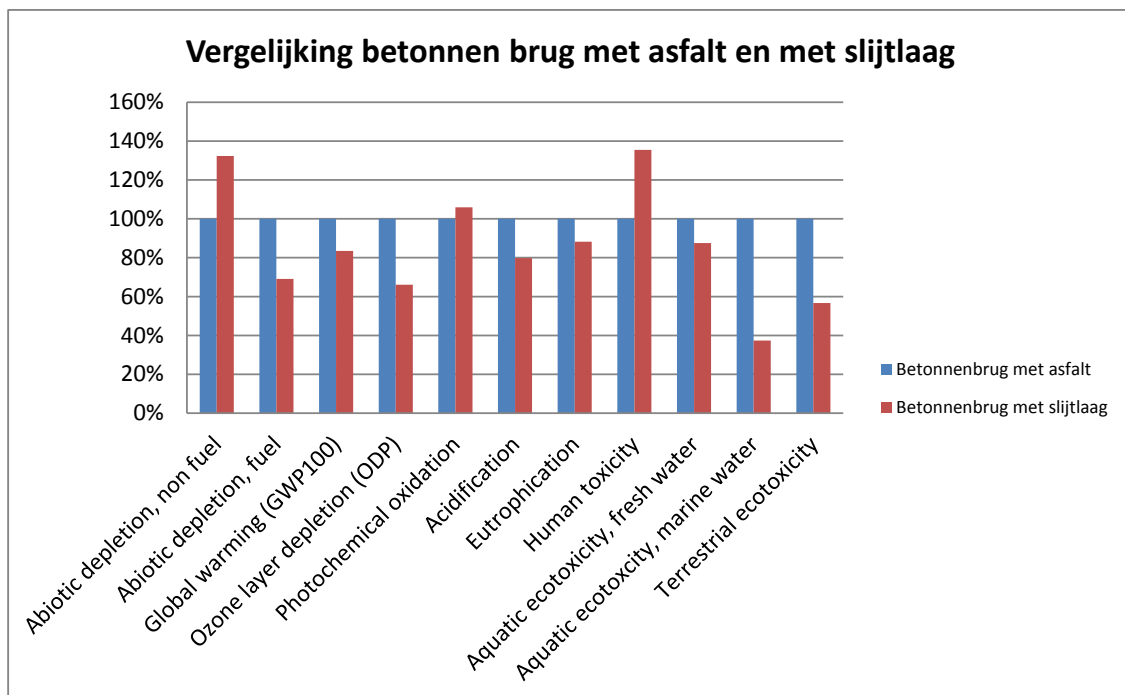
Het milieuprofiel van een betonnen verkeersbrug met asfalt is weergegeven in Figuur 12.



Figuur 12 Het milieuprofiel van een betonnen verkeersbrug

De bovenstaande figuur laat zien dat naast de productie van de bovenbouw en fundering ook de productie van het asfalt (onderdeel gebruiksfase) een behoorlijke impact heeft op verschillende milieu-aspecten, met name fresh water en marine ecotoxicity.

Figuur 13 laat een vergelijking zien tussen een betonnen brug als deze met asfalt wordt uitgevoerd en als deze met alleen een slijtlaag wordt uitgevoerd. De constructie van de betonnen brug met asfalt is ook iets zwaarder uitgevoerd dan de brug met de lichtere slijtlaag, zie 3.3.2.

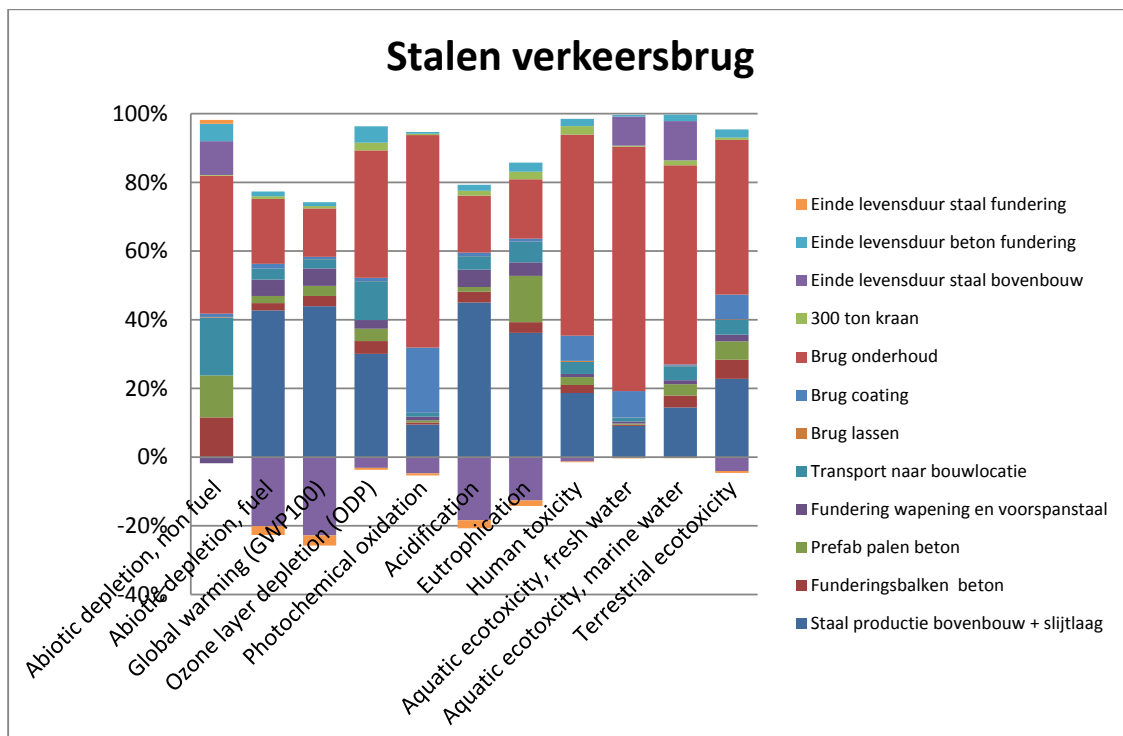


Figuur 13 Vergelijking in milieuprofiel tussen de betonnen verkeersbrug met asfalt en met een slijtlaag.

De vergelijking laat zien dat bij sommige effectcategorieën de brug met asfalt beter scoort en bij andere de brug met de slijtlaag.

5.2 Stalen verkeersbrug

Figuur 14 Laat het milieuprofiel zien van de stalen verkeersbrug.

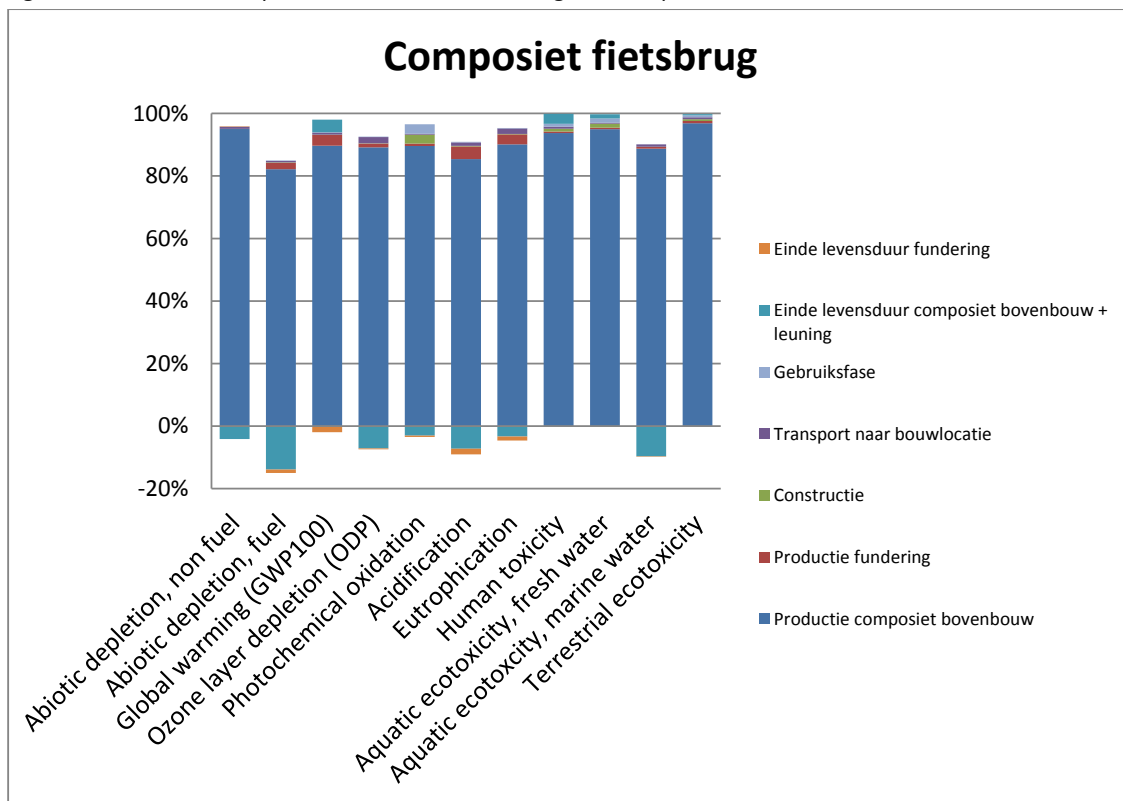


Figuur 14 Milieuprofiel van de levenscyclus van een stalen verkeersbrug.

De figuur laat zien dat naast de productie van de bovenbouw, het coaten van de brug en het brugonderhoud een groot aandeel hebben in de milieubelasting. Het brugonderhoud omvat zowel het coaten als het vervangen van de slijtlaag.

5.3 Composiet verkeersbrug

Figuur 15 laat het milieuprofiel van een verkeersbrug van composiet zien.

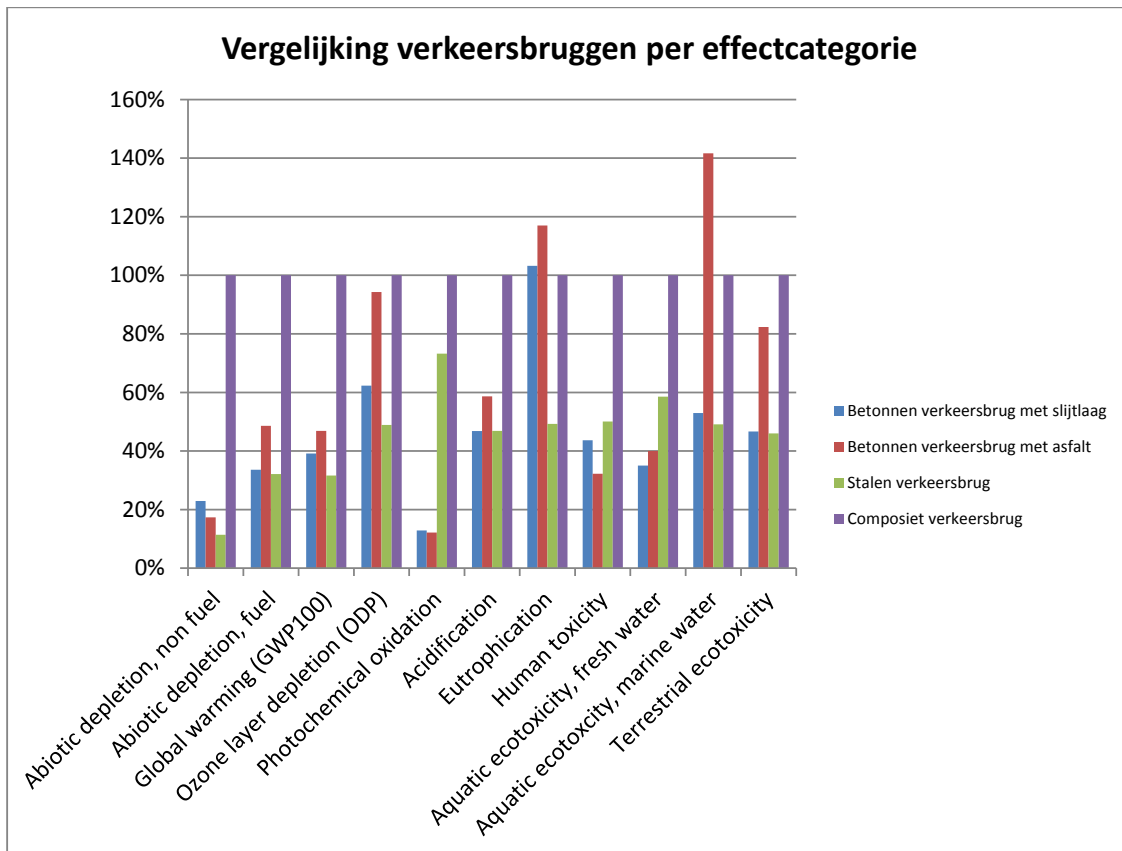


Figuur 15 Milieuprofiel van de verkeersbrug van composiet

De bovenstaande figuur laat zien dat de productie van de bovenbouw dominant is in het milieuprofiel en dat de gebruiksfase, als gevolg van het vervangen van de slijtlaag, ook relatief van belang is voor de effectcategorie fresh water ecotoxicity.

5.4 Vergelijking verkeersbruggen

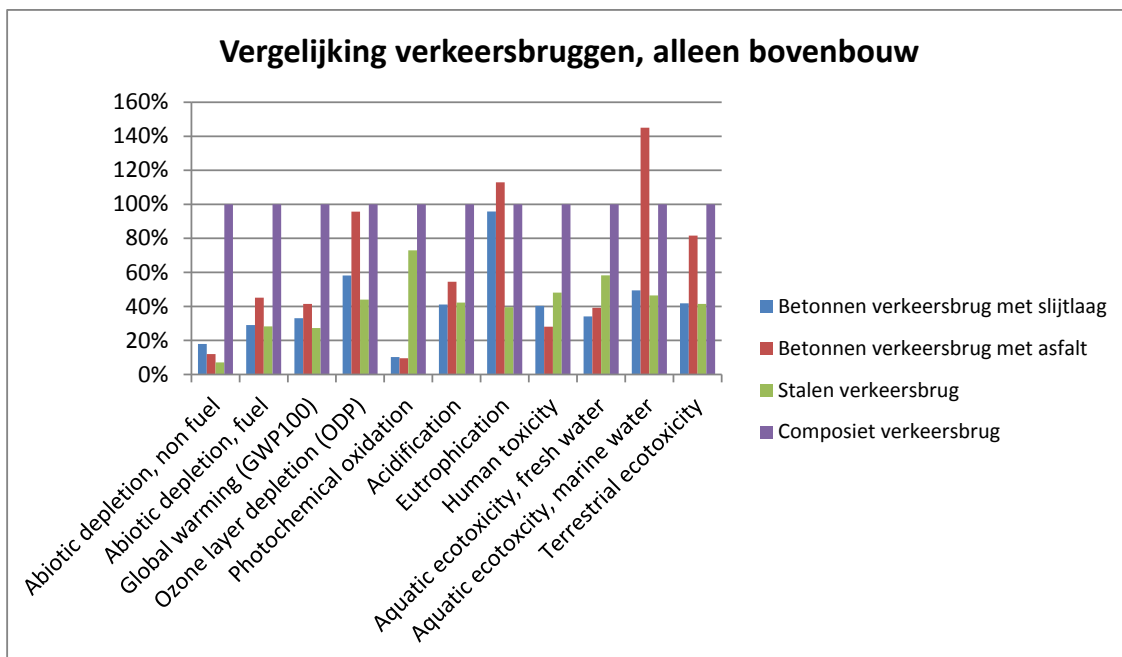
De onderzochte verkeersbruggen zijn per effectcategorie vergeleken in Figuur 16, waarbij de composiet verkeersbrug als referentie dient.



Figuur 16 Vergelijking van de verschillende bruggen per effectcategorie. De composietbrug is op 100% gesteld bij elke effectcategorie.

De bovenstaande figuur laat zien dat de composietbrug het hoogste scoort op meerdere effectcategorieën, met uitzondering van *eutrophication* (vermesting) en *aquatic ecotoxicity*, marine water (zout water toxiciteit), waar de betonnen bruggen hoger scoren. De betonnen bruggen scoren met name laag op *photochemical oxidation* (zomer smog).

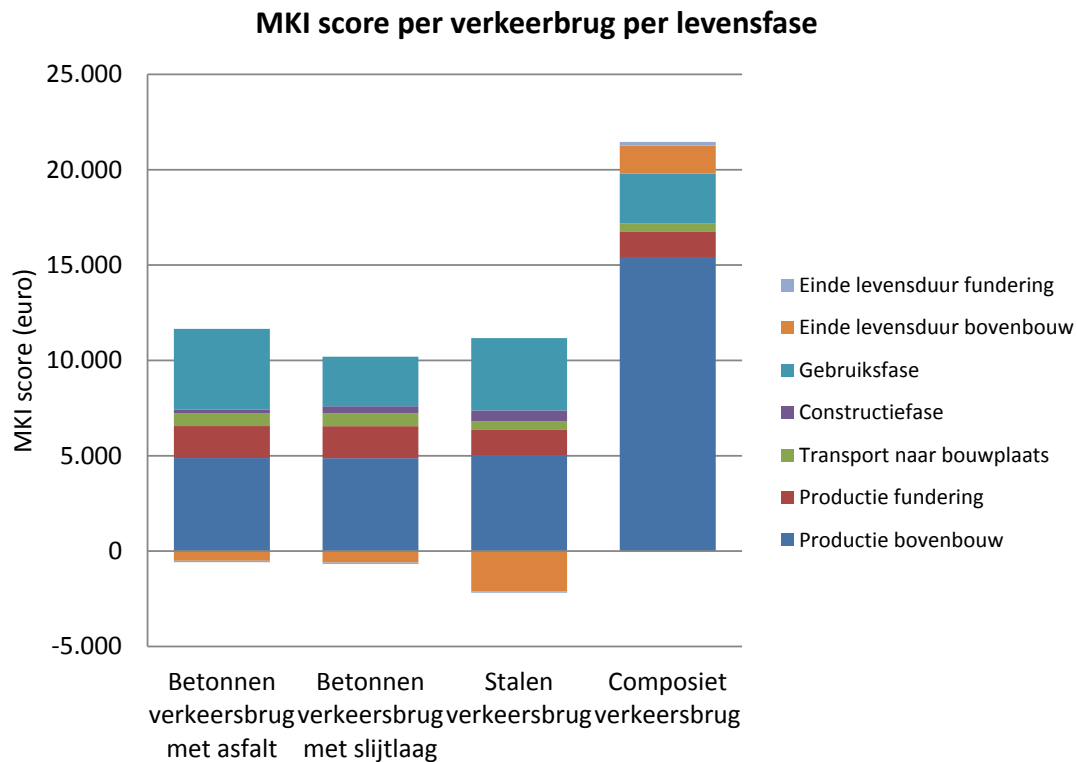
In Figuur 17 zijn de bruggen zonder fundering en alleen de bovenbouw vergeleken.



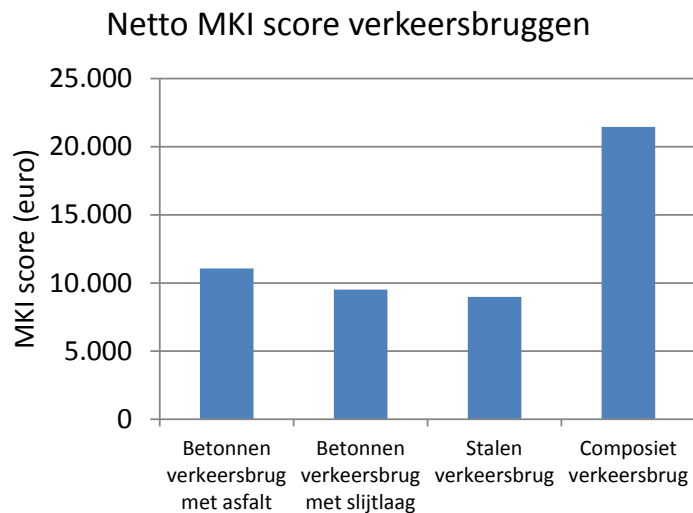
Figuur 17 Vergelijking van alleen de bovenbouw van de verschillende verkeersbruggen per effectcategorie. De scores van de composietbrug zijn op 100% gesteld.

De resultaten van Figuur 17 laten een vergelijkbaar beeld zien als de resultaten met fundering.

Figuur 18 en Figuur 19 laten de MKI scores van de verschillende onderzochte verkeersbruggen zien. Hierbij moet dezelfde kanttekening worden gemaakt als in de inleiding en in het hoofdstuk over de fietsbruggen over het gebruik van een gewogen score. Deze dient slechts voor het vergroten van het inzicht in de resultaten en valt buiten het kader van de LCA norm ISO 14040/44.



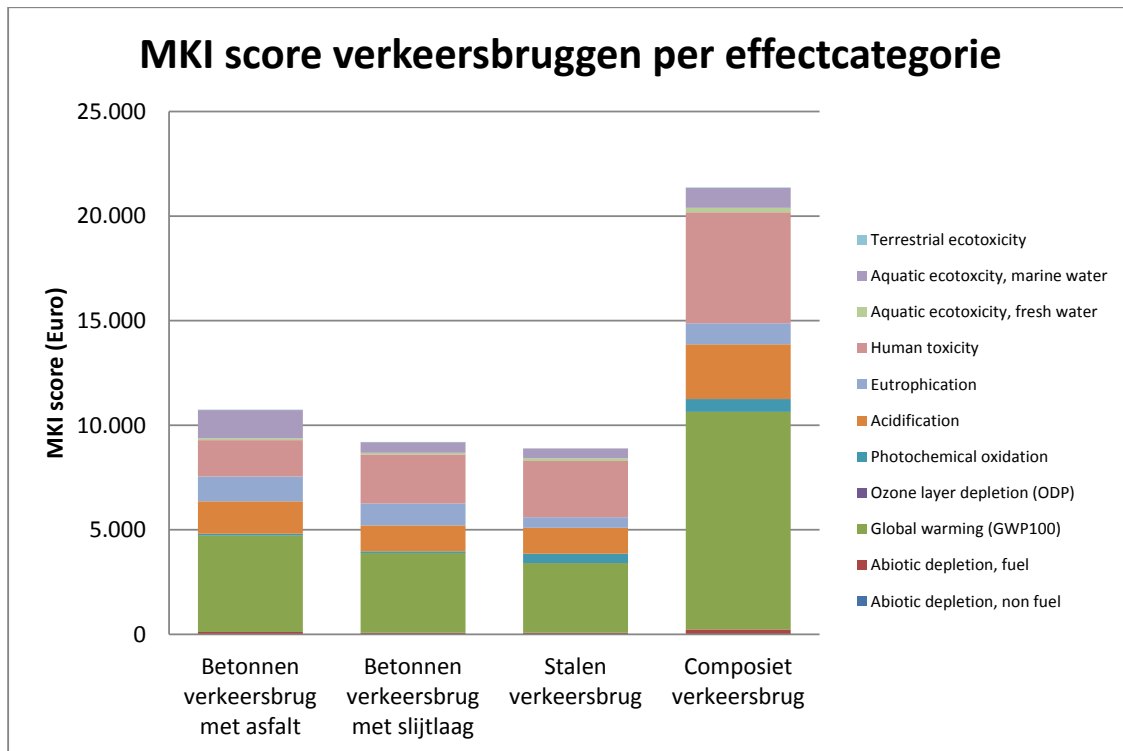
Figuur 18 Vergelijking van de MKI scores van de verschillende onderzochte verkeersbruggen.



Figuur 19 Vergelijking van de netto MKI scores van de verschillende onderzochte verkeersbruggen.

De bovenstaande twee figuren laten een hoge MKI score zien van de composiet brug in vergelijking met de andere bruggen. De MKI score van een ton composiet is veel hoger dan de andere materialen. De composietbrug zou dus veel lichter moeten zijn dan de andere bruggen om een voordeel in milieubelasting te krijgen. De verkeersbrug van composiet is echter vergelijkbaar in gewicht met de stalen brug en een factor zes lichter dan de betonnen brug.

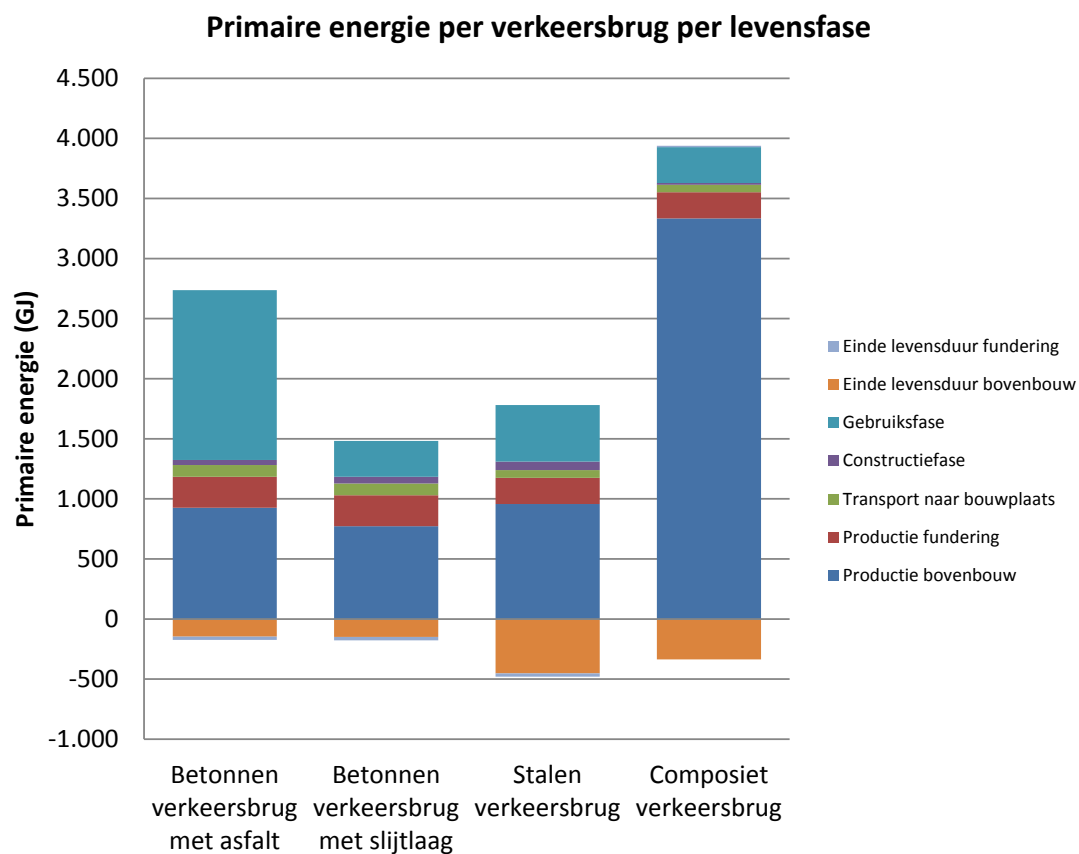
Figuur 20 geeft de opbouw van de MKI score weer van de verschillende bruggen.



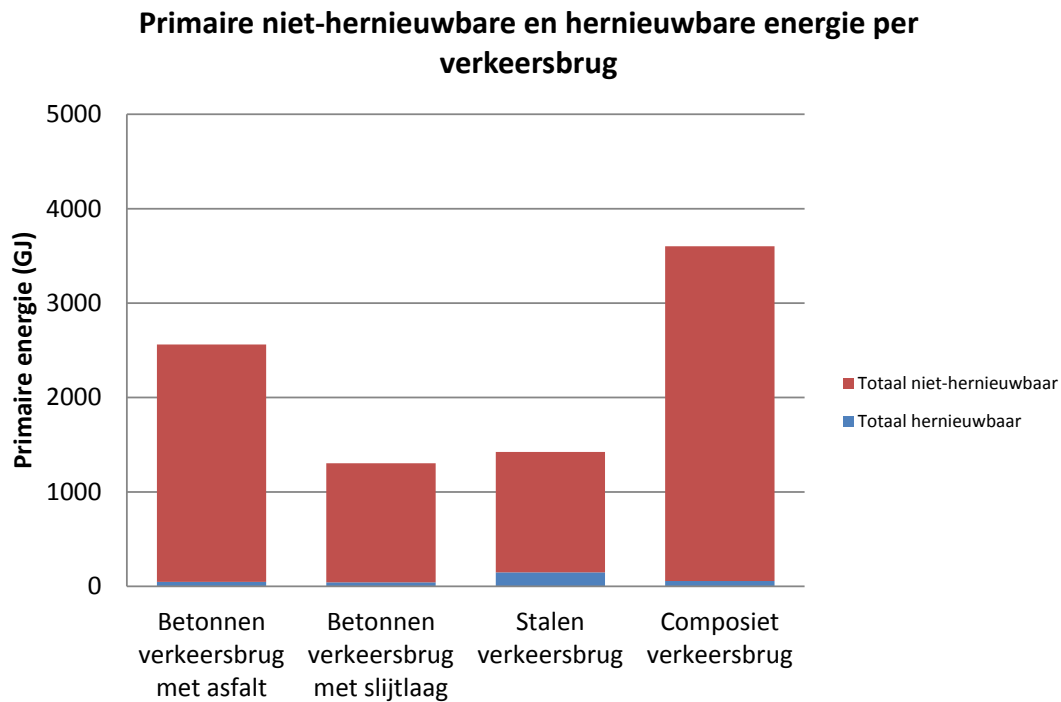
Figuur 20 Weergave van de opbouw van de MKI scores van de verschillende verkeersbruggen.

De figuur laat een zelfde beeld als bij de fietsbruggen: de composiet brug scoort met name hoog op *global warming*.

De resultaten zijn ook weergegeven in primaire energie, die is geen onderdeel van de MKI-score, zie Figuur 21 en Figuur 22.



Figuur 21 Vergelijking tussen de verschillende verkeersbruggen in primaire energie.

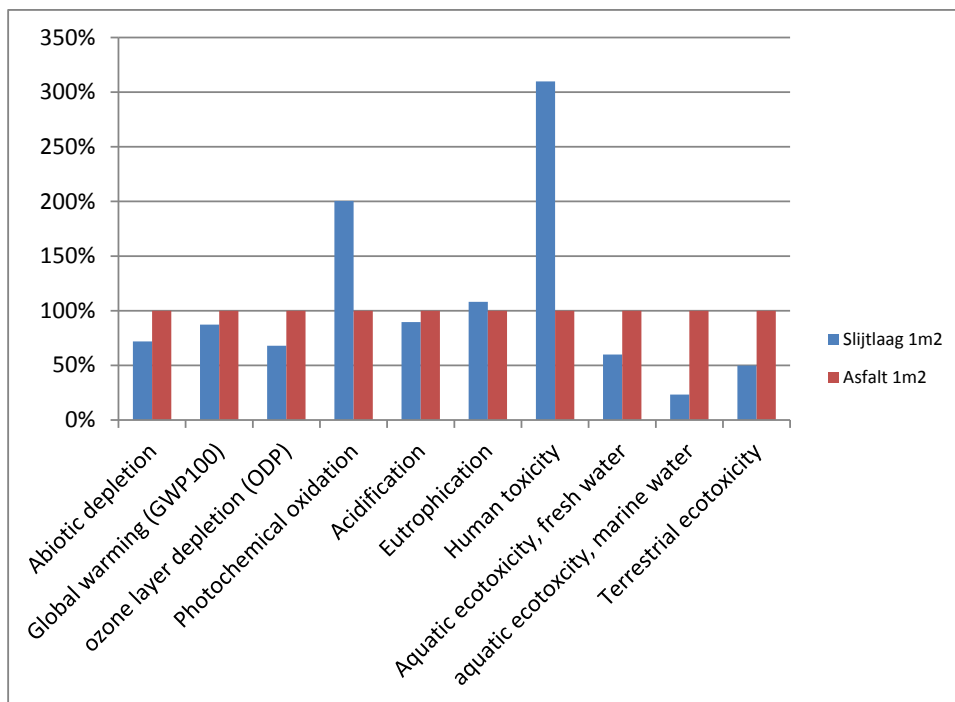


Figuur 22 Vergelijking van de verschillende verkeersbruggen onderverdeeld in hernieuwbare en niet-hernieuwbare energie.

Het meest opvallende aan de bovenstaande twee figuren is dat de betonnen brug met asfalt een veel hoger energiegebruik heeft dan de betonnen brug zonder asfalt. Het asfalt heeft een hoog energiegebruik. Dit is toe te schrijven aan het bitumen dat een materiaal is met een grote energie-inhoud.

5.5 Vergelijking slijtlaag en asfalt

De betonnen brug is zowel vergeleken met en zonder asfalt. In de situatie zonder asfalt is er uitgegaan van een slijtlaag. Het valt op dat de brug met asfalt een niet veel hogere MKI score heeft dan met de slijtlaag, terwijl de gewichten per m^2 wel erg verschillen: 17 kg/m^2 voor de slijtlaag en 276 kg/m^2 voor het asfalt. Door dit gewichtverschil is de brug met asfalt ook zwaarder geconstrueerd. Figuur 23 laat een vergelijking zien tussen de milieuprofielen $1m^2$ asfalt en $1m^2$ slijtlaag.



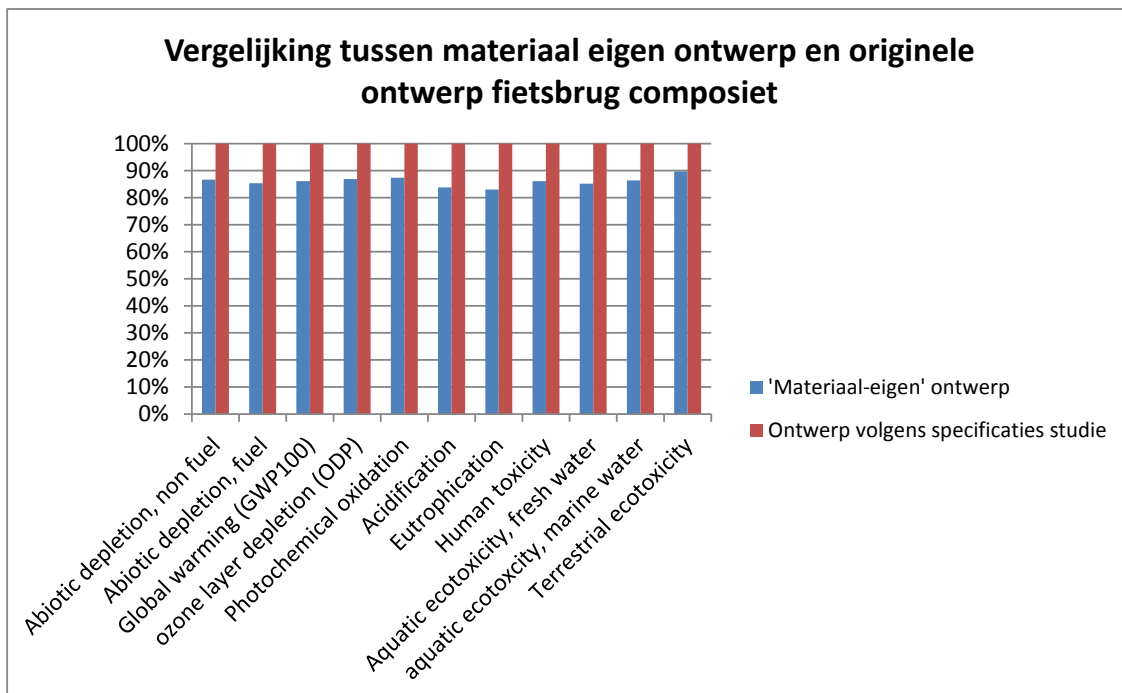
Figuur 23 Vergelijking tussen het milieuprofiel van 1 m² slijtlaag en 1 m² asfalt

In de bovenstaande figuur valt op dat de slijtlaag bij sommige effectcategorieën slechter scoort dan asfalt; *photochemical oxidation* (zomer smog), *eutrophication* (vermesting) en *human toxicity*. Dit is opvallend. Hierbij moet wel worden aangemerkt dat asfalt veel zwaarder is en dus een sterkere brug nodig is en het asfalt vaker vervangen moet worden.

6 GEVOELIGHEIDANALYSES

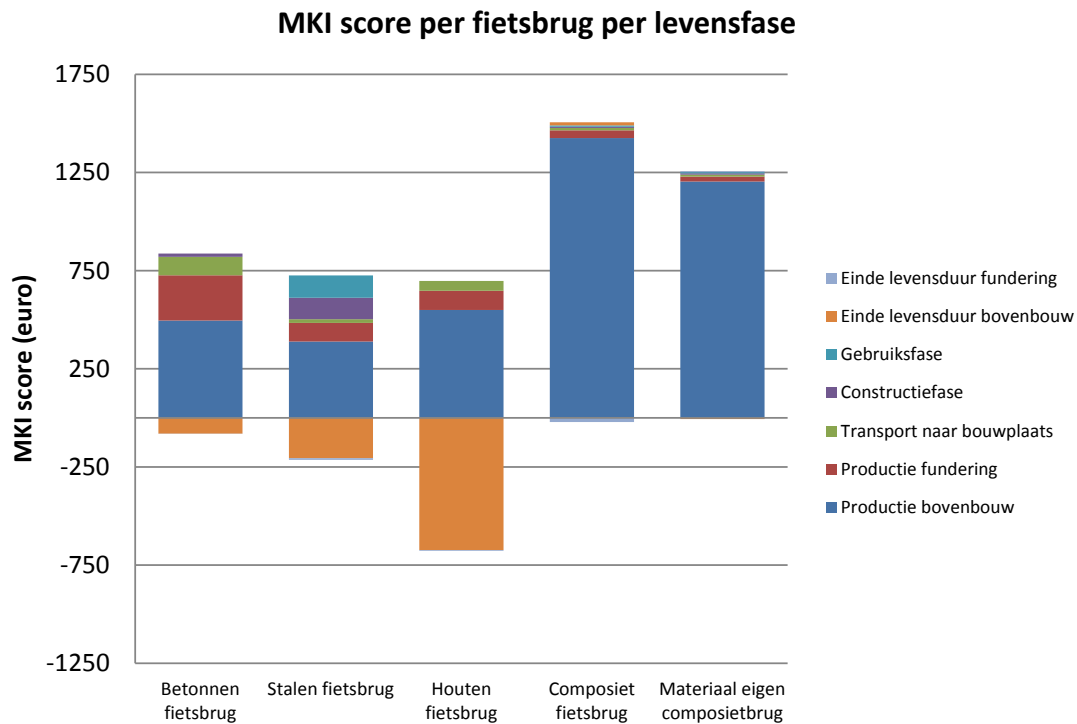
6.1 Gevoeligheidsanalyse: Materiaal eigen ontwerp composiet

FiberCore gaf aan dat de specificaties van de bruggen niet optimaal zijn voor composietbruggen. Het toepassen van de laatste inzichten in de combinaties belasting – flexibiliteitscriteria, waartoe sinds de invoering van de Eurocode de mogelijkheid toe bestaat zou gunstiger zijn voor de fietsbrug van composiet. Bovendien is een fundatie op polystyreen schuimblokken voorgesteld door FiberCore. Het ontwerp geeft bij de trilling van 1 persoon/m² een versnelling die kleiner is dan 0,7 m/s². Een dergelijk ontwerp is reeds toegepast in een bestaande brug. De brug heeft een maximaal toelaatbare statische deflectie van 1/150 van de vrije overspanning. Dit resulteert in een brug met een 16% lager gewicht.



Figuur 24 Vergelijking tussen twee ontwerpen van de composieten fietsbrug. De rode balken geven de impact van de brug die geconstrueerd is volgens de specificaties die vastgesteld zijn voor deze studie. De blauwe balken geven de impact voor het ontwerp dat meer past bij de specificaties van composiet.

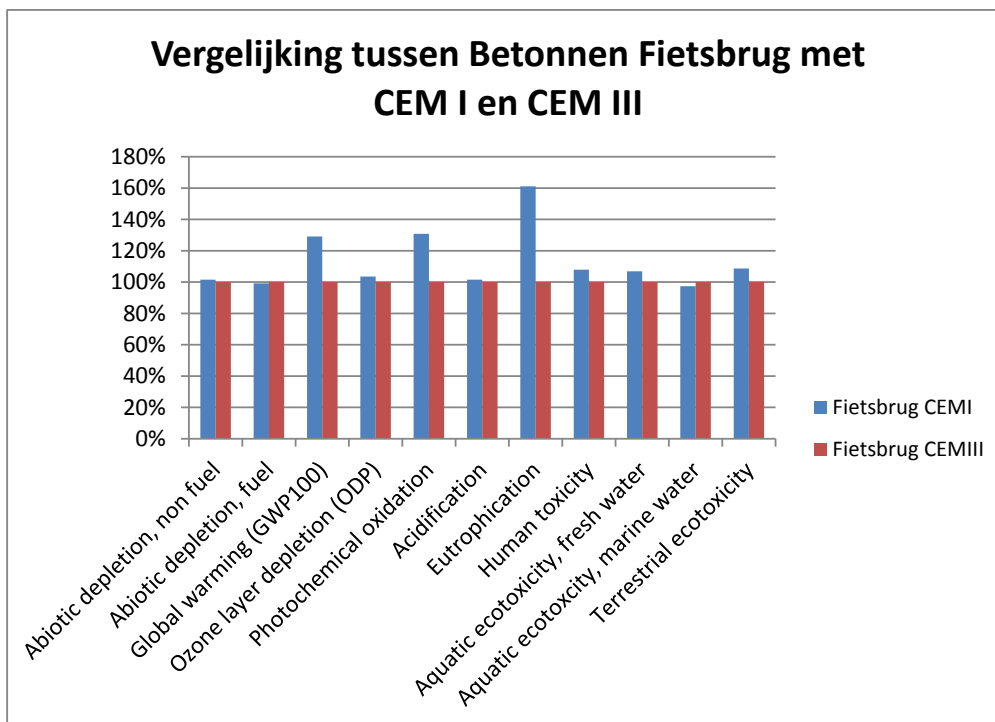
Een vergelijking van de verschillende bruggen inclusief de aangepaste composietbrug is weergegeven in Figuur 25. Het aangepaste ontwerp geeft een verlaging van 10% - 20% per effectcategorie als gevolg van het lagere gewicht. De MKI-score van het 'materiaal-eigen' ontwerp is 17% lager dan het originele ontwerp.



Figuur 25 Vergelijking van de MKI score van de fietsbruggen inclusief de composietbrug gebaseerd op specificaties die meer geschikt zijn voor een composietbrug.

6.2 Gevoeligheidsanalyse: Gebruik liggers met CEM I cement

Spanbeton heeft de gegevens van de geanalyseerde betonnen bruggen aangeleverd. Spanbeton maakt alleen gebruik van CEMIII cement, dat gebaseerd is op hoogovenslakken. Een gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd om de gevoeligheid van het gebruikte cement op de resultaten en conclusies te bepalen. Gekeken is naar het effect van toepassing van cement op basis van *virgin* (nieuw gewonnen) grondstof. Figuur 26 geeft een vergelijking tussen de reeds geanalyseerde fietsbrug met voorgespannen betonbalken op basis van CEMIII en op basis van CEMI. In dit geval is de hoeveelheid CEMIII één op één vervangen door CEMI. Dit zal in werkelijkheid niet gebeuren en zal het betonmengsel wat aangepast worden om optimaal aan de sterkte eisen te kunnen voldoen. De verwachting is dat de verschillen niet dusdanig groot zijn dat deze aanname niet gedaan kan worden voor deze gevoeligheidsanalyse.

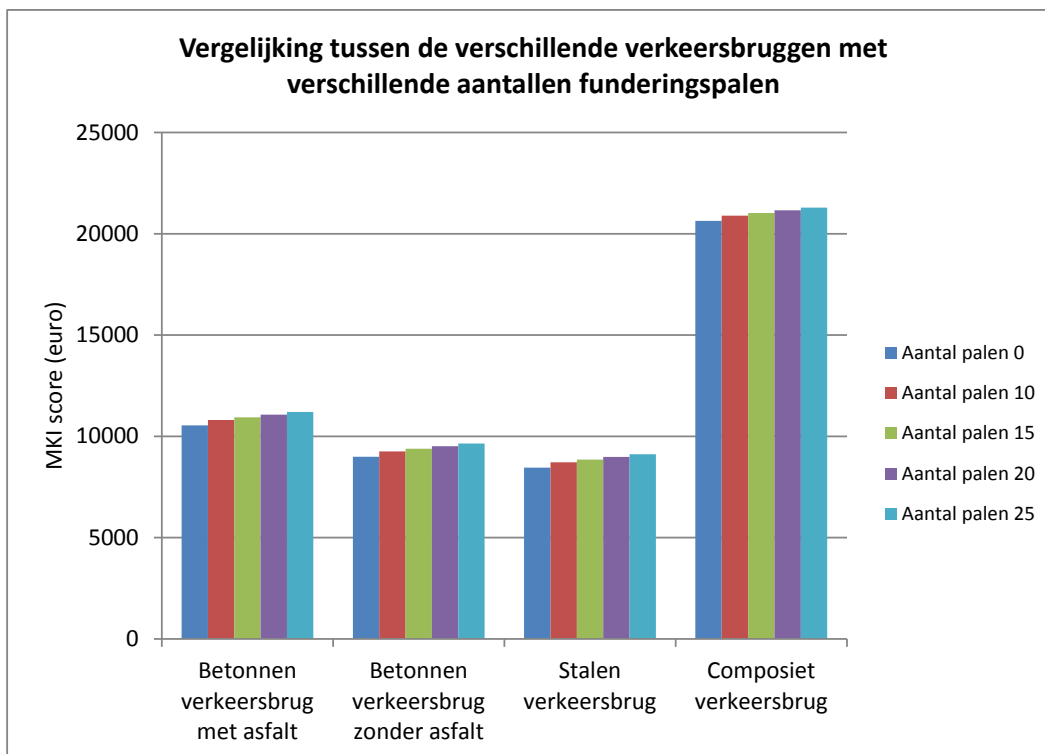


Figuur 26 Vergelijking van de impact van de betonnen fietsbrug op basis van CEM I en CEM III. De fietsbrug met CEM III is op 100% gesteld.

De vergelijking laat zien dat de brug op basis van CEM I cement hoger scoort op de meeste categorieën en met name op *global warming* (klimaatverandering), *photochemical oxidation* (zomer smog) en *eutrophication* (vermesting). De MKI score van de fietsbrug op basis van CEM I cement is 23% hoger dan op basis van CEM III. De resultaten met de verkeersbrug zijn vrijwel identiek (22% verschil in MKI score). De resultaten zijn behoorlijk gevoelig voor de keuze van cement.

6.3 Gevoeligheidsanalyse: Funderingspalen

In de studie is er regelmatig discussie geweest over de fundering. Sommige partijen gaven aan te verwachten dat het aannemelijk zou zijn dat er een groter verschil zou zijn tussen het aantal benodigde funderingspalen voor de verkeersbrug dan de 20 palen zoals gebruikt in de huidige resultaten. Om deze reden is een analyse gedaan van de gevoeligheid van de gebruikte hoeveelheid funderingspalen op de resultaten en conclusies. In Figuur 27 is de MKI score weergegeven voor de verkeersbruggen zonder palen en met 10 tot 25 palen.

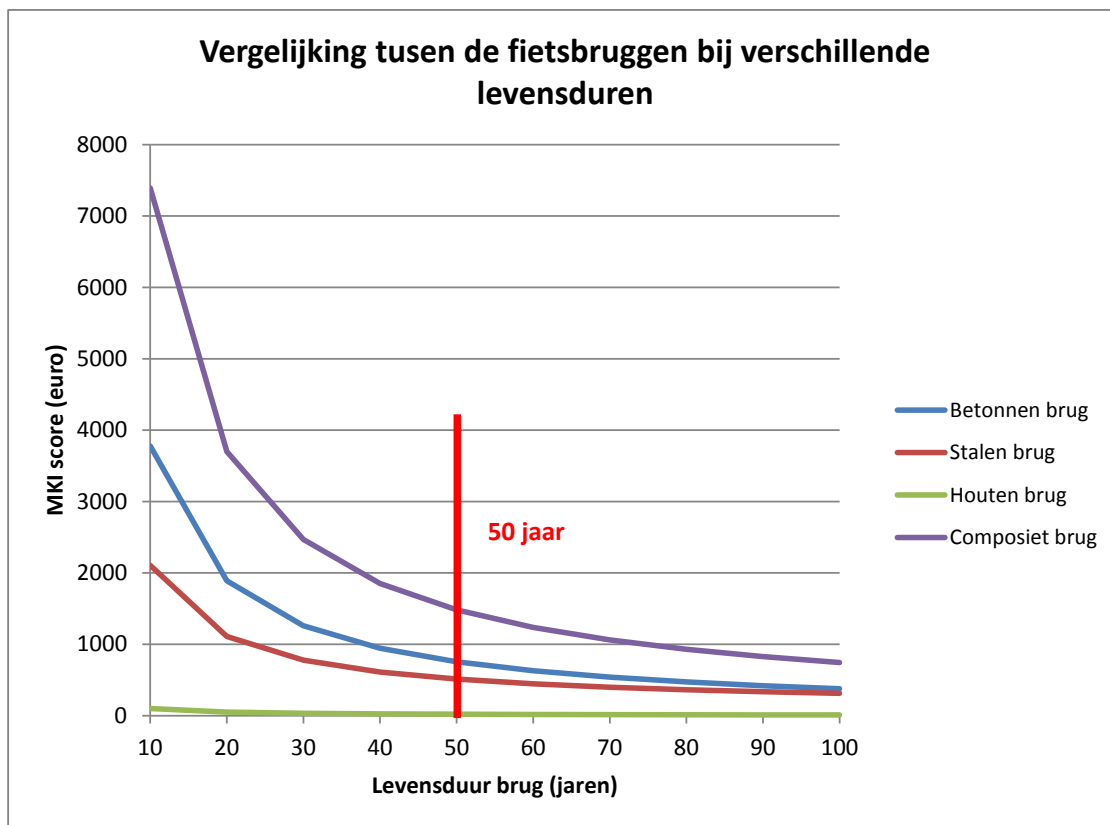


Figuur 27 Vergelijking van de verschillende verkeersbruggen met verschillende aantallen funderingspalen.

De bovenstaande figuur laat zien dat de resultaten relatief weinig afhankelijk zijn van het aantal gebruikte palen. De MKI score van de brug zonder funderingspalen is maximaal 7% lager dan de brug met 25 palen. Het is om deze reden niet aannemelijk dat het aantal palen grote invloed zal hebben op de conclusies.

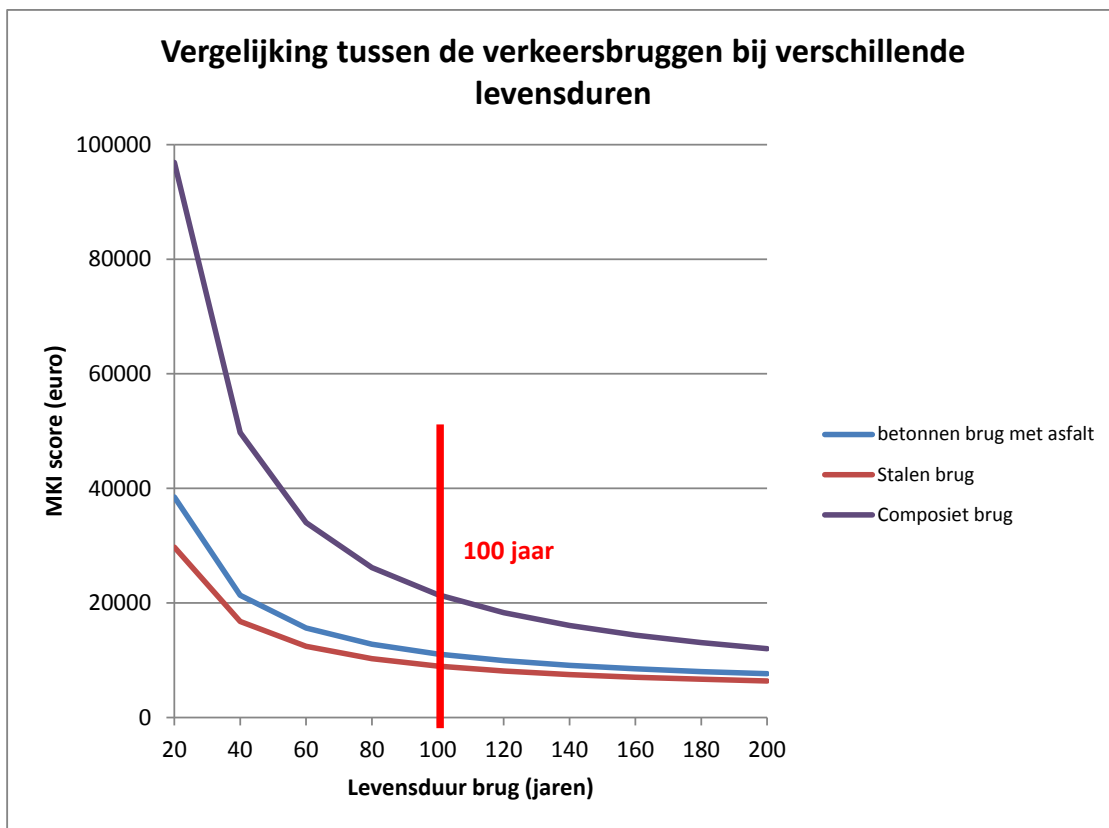
6.4 Gevoeligheidsanalyse: Levensduur

In deze studie is uitgegaan van een levensduur van 50 jaar voor alle fietsbruggen en 100 jaar voor alle verkeersbruggen. Deze zijn gelijk aan de tijd van de functionele eenheid. De levensduur is van veel factoren afhankelijk waaronder de lokale omstandigheden. Om de gevoeligheid te onderzoeken van de keuze van de levensduur op de resultaten en conclusies is de MKI score voor de verschillende verkeersbruggen uitgezet tegen de levensduur. Hierbij is de functionele eenheid en de daarmee samenhangende tijdsduur waarin de functie vervuld moet worden gelijkgehouden. In het geval van een levensduur van 10 jaar zijn dus de productie van 5 bruggen nodig voor het vervullen van de functionele eenheid. De onderhoudsfrequentie is gelijk gehouden. De resultaten voor de fietsbrug zijn weergegeven in Figuur 28 en voor de verkeersbrug in Figuur 29.



Figuur 28 Vergelijking tussen de fietsbruggen bij verschillende levensduur. De functionele eenheid en de daarmee samenhangende tijdsperiode is gelijk gehouden: 50 jaar.

Uit deze figuur is op te maken wat het effect is van de werkelijke levensduur van de fietsbrug op de milieu-impact. Volgens deze figuur komt bijvoorbeeld de milieu-impact van een composiet brug met een levensduur van 50 jaar overeen met de impact van twee betonnen bruggen die ieder 25 jaar meegaan. De houten brug heeft in alle gevallen de laagste milieu-impact, zelfs met een hele korte levensduur.

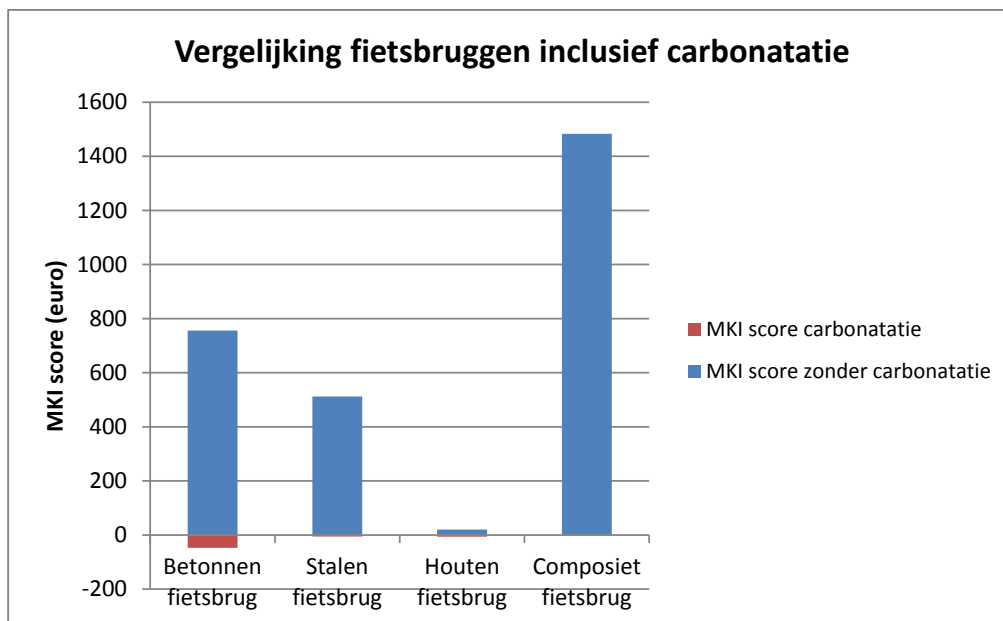


Figuur 29 Vergelijking tussen de verkeersbruggen bij verschillende levensduur. De functionele eenheid en de daarmee samenhangende tijdsperiode is gelijkgehouden: 100 jaar.

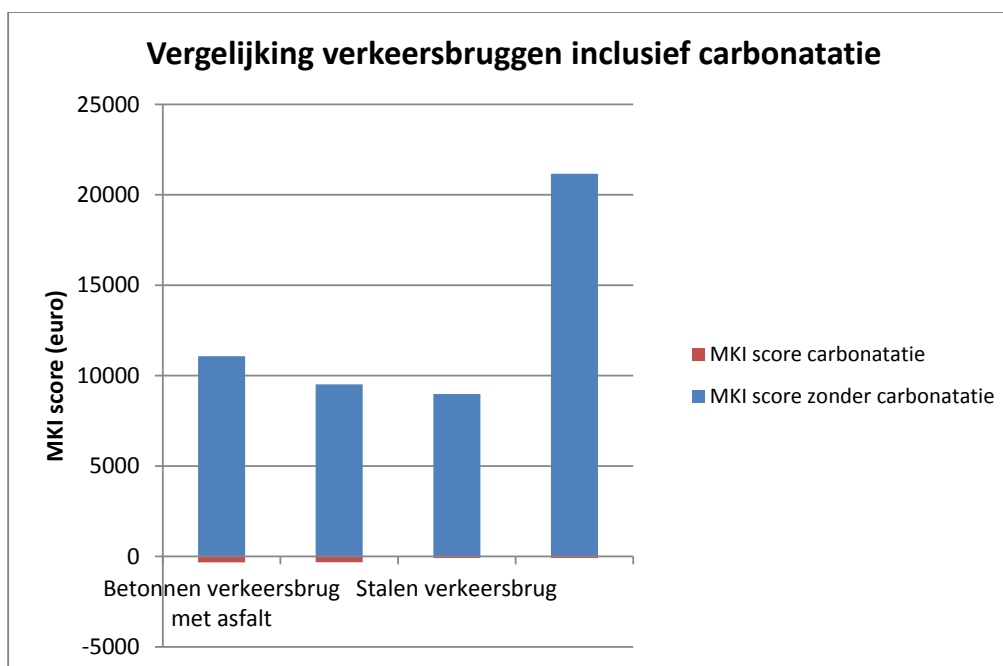
Uit deze figuur is op te maken wat het effect is van de werkelijke levensduur van de verkeersbrug op de milieu-impact. Volgens deze figuur komt bijvoorbeeld de milieu-impact van een composiet brug met een levensduur van 100 jaar overeen met de impact van 2,5 betonnen bruggen die ieder ca. 40 jaar meegaan.

6.5 Gevoeligheidsanalyse: Carbonatatie

Beton heeft de chemische eigenschap om CO_2 op te nemen, dit heet carbonatatie. De mate waarin dat gebeurt is sterk afhankelijk van de omstandigheden. Een artikel over dit onderwerp van F. Collins³⁸ wordt geconcludeerd dat het niet opnemen van dit proces leidt tot een overschatting van 13-48% van de CO_2 -emissie. Het 'Nordic Innovation Centre' heeft een studie³⁹ uitgevoerd naar deze CO_2 -opname en kwamen uit op een gemiddelde opname van 25% van de CO_2 -uitstoot tijdens productie. Het is niet gebruikelijk dit proces standaard mee te nemen in een levenscyclus analyse, onder andere omdat de omstandigheden veel invloed hebben op de mate waarin dit gebeurt. De gevoeligheid van deze aanname is onderzocht in deze analyse. In Figuur 30 en Figuur 31 zijn de resultaten van de bruggen vergeleken waarbij carbonatatie is meegenomen in de analyse. Er is uitgegaan van 25% carbonatatie.



Figuur 30 Vergelijking van de fietsbruggen inclusief het voordeel van carbonatatie.

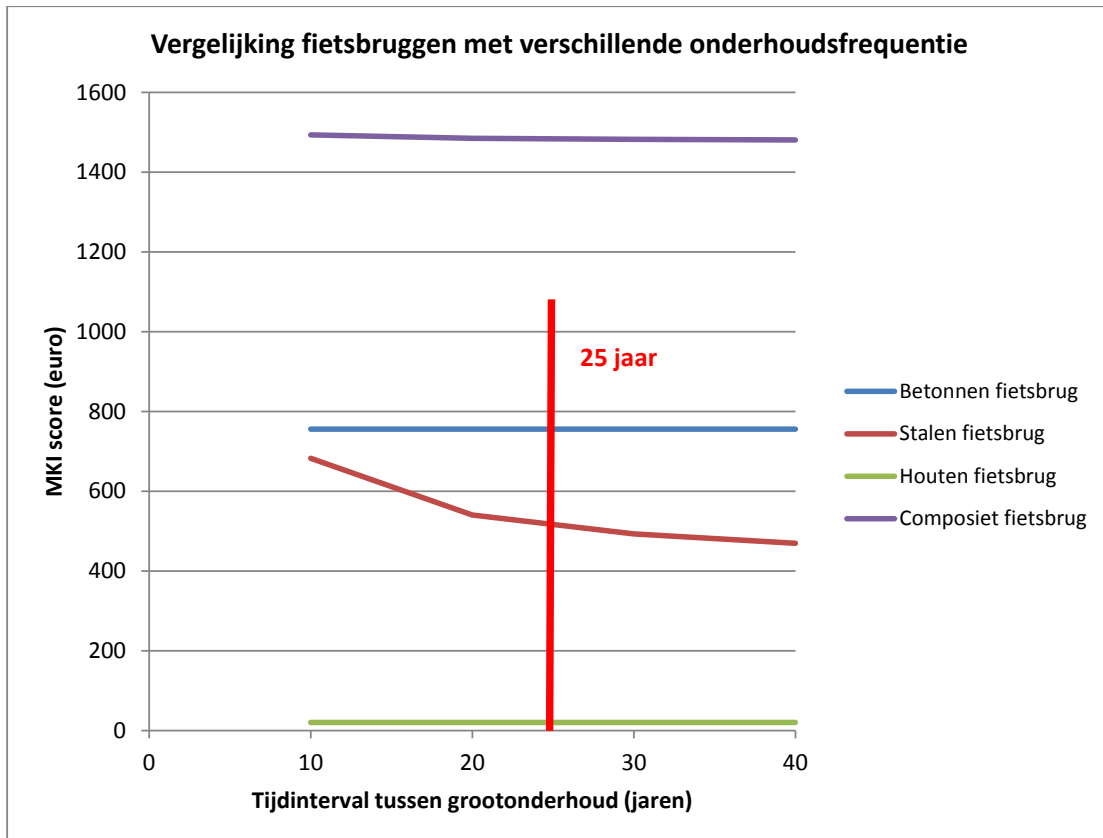


Figuur 31 Vergelijking van de verkeersbruggen inclusief het voordeel van carbonatatie

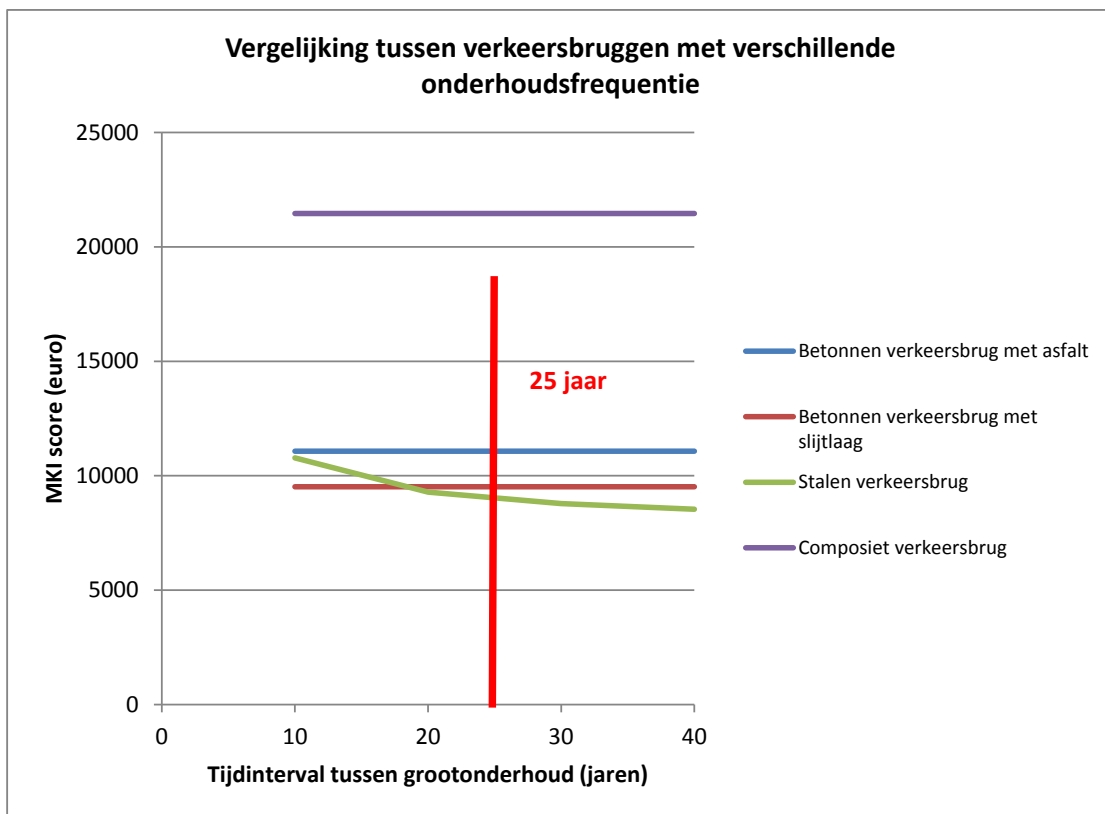
Carbonatatie heeft een CO₂-voordeel van 15% op de betonnen fietsbrug. Dit resulteert in een voordeel van 7% in de gehele MKI score voor deze brug. Het effect op de niet betonnen bruggen is uiteraard kleiner. De bovenstaande figuren laten zien dat de keuze van het niet opnemen van carbonatatie een gering effect heeft op de conclusies van de studie.

6.6 Gevoeligheidsanalyse: Onderhoud

Het onderhoud is, net als de levensduur, afhankelijk van veel factoren, waaronder lokale omstandigheden, onderhoudsschema's van beheerders en de gebruikte coating. In deze gevoeligheidsanalyse is de invloed die de levensduur van de coating heeft op de resultaten en conclusies onderzocht. In de huidige analyse is uitgegaan dat er iedere 25 jaar een groot onderhoud plaatsvindt waarbij de gehele coating van het staal wordt vervangen en een klein onderhoud plaats vindt na 12,5 jaar, waarbij 2% van de coating wordt vervangen. In deze gevoeligheidsanalyse is een groot onderhoud elke 10, 20, 30 en 40 berekend met halverwege een klein onderhoud. Deze analyse is weergegeven in Figuur 32 en Figuur 33.



Figuur 32 Vergelijking verschillende fietsbruggen met verschillende tijdsinterval voor het groot onderhoud waarbij de coating van het staal wordt vervangen (stalen brug en stalen leuning van composiet brug).



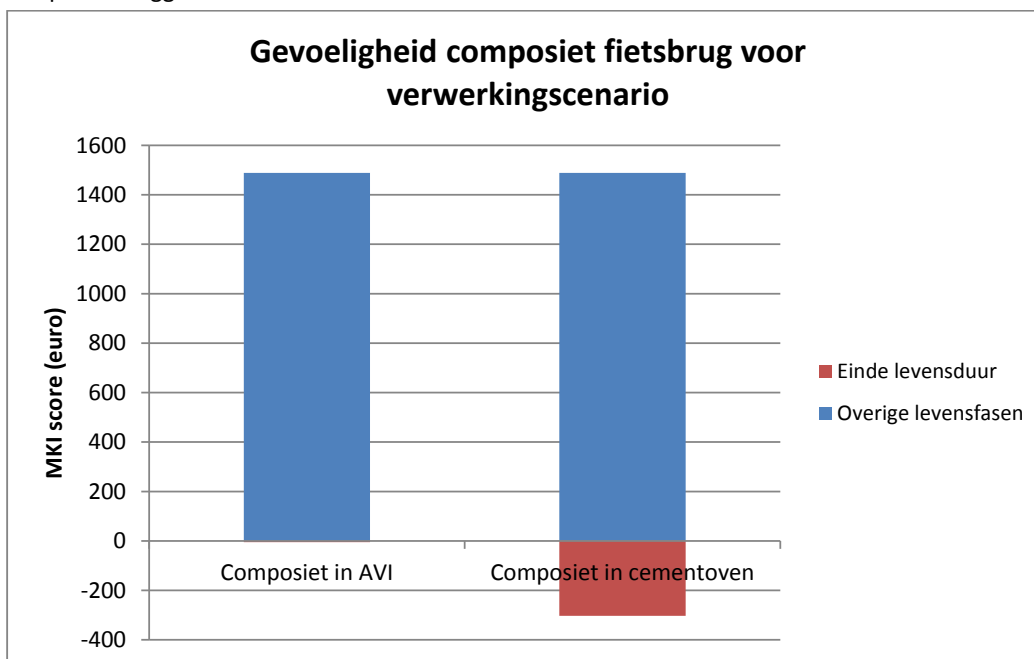
Figuur 33 Vergelijking verschillende verkeersbruggen met verschillende tijdsinterval voor het groot onderhoud waarbij de coating van het staal wordt vervangen (stalen brug en stalen leuning van composiet brug).

De figuren laten zien dat de onderhoudsfrequentie invloed heeft op de resultaten van de stalen brug. De MKI score van een stalen fietsbrug met een onderhoudsfrequentie van 40 jaar is 25% lager dan dezelfde fietsbrug met een onderhoudsfrequentie van 10 jaar. De afhankelijkheid van de onderhoudsfrequentie van de fietsbrug van composiet is te verwaarlozen. Dit komt doordat het oppervlakte van de brug dat gecoat moet worden, alleen de leuning, minimaal is.

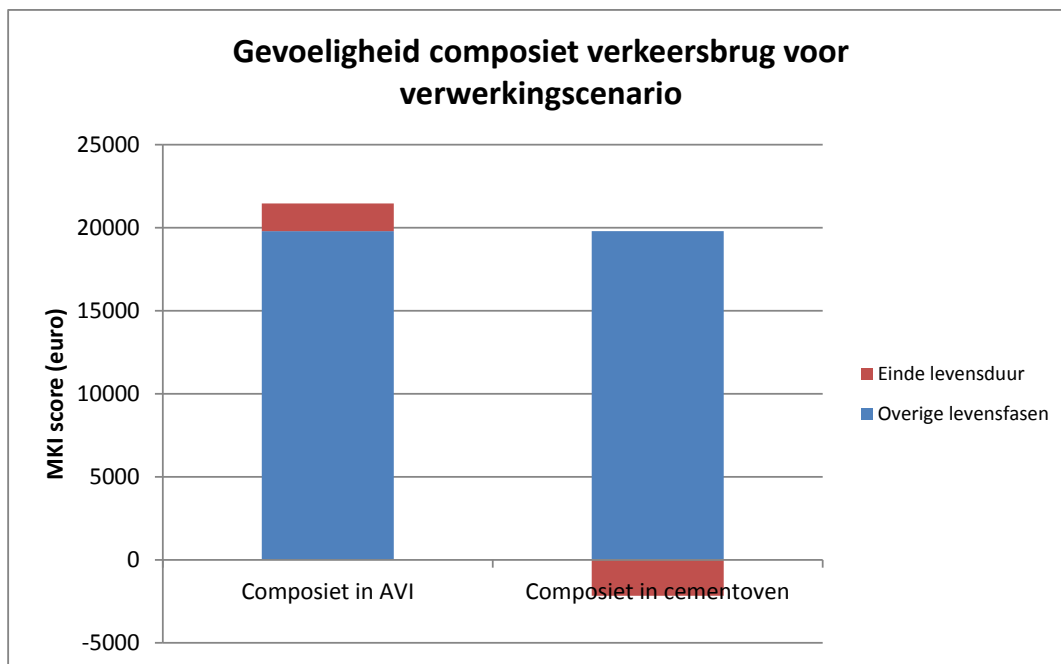
De onderhoudsfrequentie kan invloed hebben op de vergelijking tussen de bruggen, hier is rekening mee gehouden bij het schrijven van de conclusies.

6.7 Gevoeligheidsanalyse: Einde levensduur

De afvalfase van een brug die in deze tijd wordt gebouwd wordt pas over vele jaren afgedankt. Het gebruik van composiet en met name voor composiet gebruik in bruggen wordt nog niet lang gedaan en er zijn dus nog weinig gegevens over het einde van de levensduur ervan. In de MRPI studie van de composiet brug is ervan uitgegaan dat 70% van wordt verbrand in een AVI. De European Composites Industry Association (EuCIA) geeft aan dat composiet materialen ook goed in een cementoven verwerkt kunnen worden⁴⁰. De kunststoffen worden verbrand en het glasvezel vervangt zand. Een cementoven heeft een hoger rendement dan een AVI. In deze analyse is uitgegaan dat het gebruik van composiet in een cementoven het verbranden van kolen vermijdt. De hoeveelheid die vermeden wordt is gelijk aan de energieinhoud van kolen ten opzichte van de verbrandingsenergie van composiet. In Figuur 34 en Figuur 35 is een vergelijking gemaakt tussen de composietbruggen die in een AVI worden verwerkt en de composietbruggen die in een cementoven worden verwerkt.



Figuur 34 Gevoeligheid van de composiet fietsbrug voor het verwerkingsscenario, verwerking van composiet in een AVI ten opzichte van verwerking in een cementoven



Figuur 35 Gevoeligheid van de composiet verkeersbrug voor het verwerkingsscenario, verwerking van composiet in een AVI ten opzichte van verwerking in een cementoven

De vergelijking laat zien dat het verwerken van composiet in een cementoven een behoorlijke reductie van de MKI score laat zien: 20% voor de fietsbrug en 18% voor de verkeersbrug. Het verwerkingsscenario voor de composietbruggen heeft dus een behoorlijke invloed op de resultaten en conclusies. Dat deze route werkelijk toegepast wordt in Nederland is nog niet bewezen, maar is wel aan te bevelen.

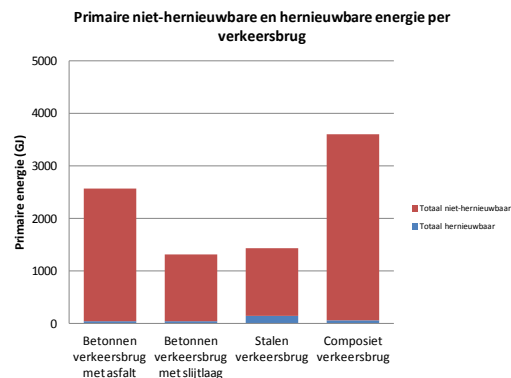
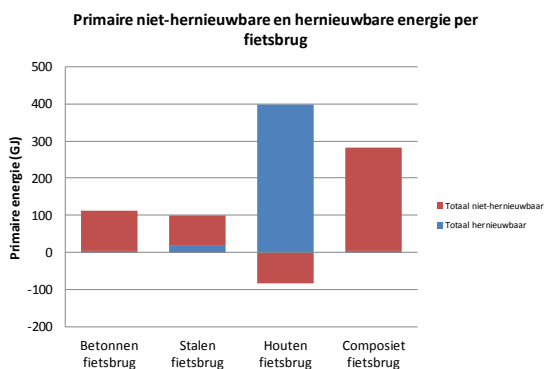
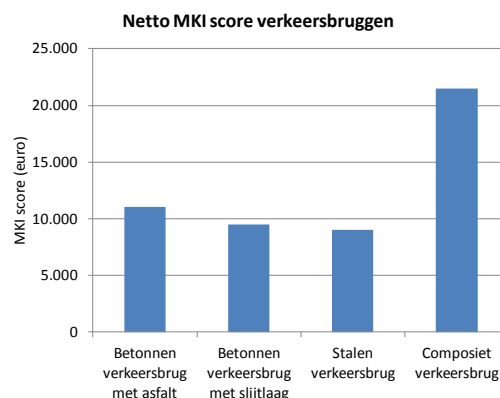
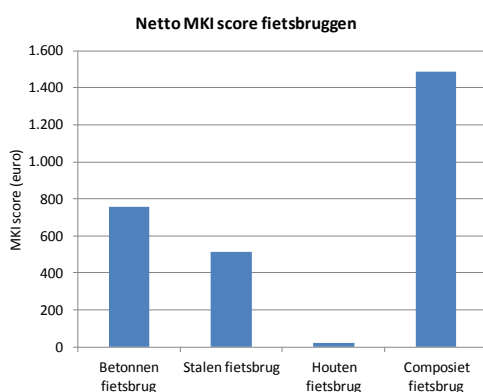
7 CONCLUSIES

In deze studie is de milieu-impact van bruggen van verschillende materialen geanalyseerd. In dit hoofdstuk gaan we in op de conclusies en aanbevelingen. Bij aanvang van het project is een aantal vragen opgesteld waarop deze studie antwoord diende te geven. Deze komen hieronder terug in de kaders.

7.1 Conclusies duurzaamheidsscores

- Wat is de uitkomst van de DuboCalc analyse van de verschillende bruggen?
- Wat zijn de sterke en minder sterke kanten van de brugontwerpen en materialen met betrekking tot de milieudruk?
- Welk milieuprobleem is de oorzaak van deze milieudruk?

Het eerste doel van dit project was om de duurzaamheidsscore vast te stellen van bruggen in verschillende klassen en van vier verschillende materialen (staal, beton, composiet, hout). Tijdens het project is een bepaald dat het berekenen van de MKI-score met het programma DuboCalc niet goed uitgevoerd kon worden, in plaats daarvan is een LCA-analyse uitgevoerd met behulp van de data die is bepaald met behulp van de SBK-Bepalingsmethode, dit is de data zoals DuboCalc het ook gebruikt. In onderstaande grafieken is de duurzaamheidsscore te zien van alle doorgerekende bruggen, uitgedrukt in MKI-score. Daaronder staan de resultaten van de energie-inhoud uitgedrukt in GJ.



In 2009 is ook een studie uitgevoerd van composiet bruggen in vergelijking met andere bruggen. De resultaten van deze twee studies kunnen niet vergeleken worden met elkaar omdat er veel verschillen zijn in de opzet van de studies. De huidige studie is gebaseerd op de SBK-Bepalingsmethode, dit was niet het geval in de studie van 2009. De verschillen zitten in de gebruikte achtergronddata (milieubelasting van de verschillende materialen), aannames (levensduur, onderhoud) en brugontwerpen. Zo is bijvoorbeeld in de studie van 2009 uitgegaan van verschil in levensduur van de diverse bruggen, in deze studie is uitgegaan van de gelijke levensduur van de bruggen.

Onderlinge vergelijking bruggen

- De milieu-impact uitgedrukt in MKI-score van de **fietsbruggen** verschilt sterk. De houten fietsbrug heeft een erg lage MKI-score. De MKI-scores van de stalen en betonnen fietsbrug zijn vergelijkbaar en ongeveer de helft van de MKI score van de composiet brug.
- De impact van de fietsbruggen uitgedrukt in energie-inhoud (MJ) geeft een ander beeld, met name als gevolg van het hoge hernieuwbare energiegebruik van de houten brug.
- De vergelijking laat zien dat de productie van de bovenbouw dominant is voor de meeste **fietsbruggen**, met uitzondering van de houten brug waarbij ook de grote negatieve score van het verbranden van het hout in een AVI dominant is.
- Het beeld van de **verkeersbruggen** is vergelijkbaar met de fietsbruggen: De MKI-score van de stalen en betonnen bruggen zijn vergelijkbaar en de MKI score van de composiet brug is ongeveer het dubbele van deze score.
- De conclusies zijn gevoelig voor een aantal zaken zoals ontwerpspecificaties, materiaalgebruik (gebruik van type cement), onderhoudsfrequentie, levensduur en afdanking (composiet in cementen). Tezamen kunnen deze een behoorlijke invloed hebben op de onderlinge verhouding in MKI-score.

Betonnen bruggen

- De productie van de materialen is de meest dominante levensfase in de levenscyclus van de **betonnen fietsbrug**.
- Het verschil tussen de twee **betonnen verkeersbruggen** met asfalt en met een slijtlaag is afhankelijk van het milieu-issue, maar de verschillen zijn kleiner dan vooraf verwacht. Asfalt is meer 15 maal zwaarder per m² dan een slijtlaag, maar het zijn relatief 'simpele' materialen: zand, kiezels en bitumen. Een slijtlaag bestaat uit meer hoogwaardige materialen, dit geeft een hogere milieubelasting per kg.
- Het gebruik van CEMIII in plaats van CEMI gebaseerd beton heeft een groot voordeel voor de gehele brug. Bruggen gebaseerd op CEMI beton hebben een significant (22-23%) hogere MKI-score.
- Het effect van carbonatatie heeft een gunstig effect op de MKI-score, maar heeft geen doorslaggevend effect op de vergelijking tussen de bruggen.

Stalen bruggen

- De milieubelasting van de **stalen fietsbrug** is voor een relatief groot deel afhankelijk van de coating. Dit komt doordat het elke 25 jaar (in deze analyse) opnieuw aangebracht moet worden.
- De figuur laat zien dat bij de **stalen verkeersbrug** naast de productie van de bovenbouw, de constructiefase en gebruiksfasen een groot aandeel hebben in de milieubelasting. Dit is met name het gevolg van het aanbrengen van de coating en de slijtlaag in de constructiefase en het vervangen ervan in de gebruiksfase.

Houten brug

- De **houten fietsbrug** laat een grote negatieve emissie zien bij de meeste effectcategorieën. De reden hiervan is de energie die opgewekt wordt bij het verbranden van het hout in een AVI bij de afdanking. Zoals eerder aangegeven neemt het voordeel af bij een duurzamer energiemix en toe bij een verhoging van de efficiëntie van het genereren van energie van een AVI. De houtproductie heeft een relatief grote bijdrage bij de meeste effectcategorieën. Een groot deel hiervan is afkomstig van het transport vanuit het bos en de verscheping naar Nederland.

Composiet bruggen

- De grootste milieubelasting van de **composiet fietsbrug** is duidelijk van de productie van de materialen: het glas, de hars en het PUR schuim. De andere levensfasen zijn van minder belang.
- De relatief hoge MKI-score van **beide composiet bruggen** komt voort uit de relatief hoge impact van het materiaal zelf, dat niet wordt gecompenseerd door een veel lager gewicht. Het is niet duidelijk waarom de composiet brug geen veel lager gewicht heeft zoals verwacht. Het gebruik van specificaties die volgens de producent beter passen bij de materiaaleigenschappen van composiet levert een brug met een lager gewicht, voor de fietsbrug was dit 16%. Dit levert wel een significante reductie van de MKI-score, 17%.
- Het afdanken van de brug in een cementoven levert een veel hoger rendement dan in een AVI en verlaagt de MKI-score van de fietsbrug en composiet brug met respectievelijk 20% en 18%.
- De ervaringen met betrekking tot de levensduur en afdanking van composiet bruggen zijn beperkt omdat het materiaal nog niet heel lang wordt toegepast. Door de producent aangegeven verwachtingen over een langere levensduur en/of mogelijkheden voor hoogwaardiger recycling konden daarom niet worden meegenomen in deze studie.

7.2 Conclusies over de projectaanpak, methodiek en communicatie

- Wat is een transparante projectaanpak die door alle betrokken partijen wordt ondersteund?
- Welke mogelijke kanttekeningen of opmerkingen kunnen bij deze studie worden geplaatst?
- Wat zijn de ervaringen met DuboCalc en zijn er ook suggesties voor verbetering?
- Op welke wijze kunnen de resultaten van deze studie worden gepubliceerd?

- In de uitvoering van het project heeft met name het vaststellen van de eisen (functionele en technische specificaties) van de brug veel tijd gekost. Het bleek lastig om specificaties te vinden waar elke partij tevreden mee kon zijn, omdat vrijwel elke specificatie een direct invloed heeft op de uitvoering en daarmee de milieu-impact. Een 'normale' eis voor een brug van het ene materiaal betekent een 'zware' eis voor een brug van het andere materiaal, en vice versa. In de begeleidingscommissie was technische deskundigheid aanwezig maar een zwaardere invulling met name in het begin van het traject had wellicht het proces kunnen versnellen. Het verschil in ervaring met de diverse materialen, ook van de betrokken deskundigen, maakte het opstellen van de specificaties moeilijk.
- Voor de betonnen en stalen bruggen waren al wel richtlijnen voor specificaties voor handen ten tijde van de studie maar voor de composiet bruggen waren deze nog in ontwikkeling.
- De milieudata van staal en beton was bij de aanvang van het project beschikbaar, de milieudata van hout en composiet is deels tijdens de studie ontwikkeld. Dit verklaart mede de lange loop-

duur van het traject. Het lijkt tevens een weerslag van de uiteenlopende ervaring die een sector heeft met de uitvoering van LCA's van hun belangrijkste materialen.

- Tijdens het project ontstond discussie over de keuzes en uitgangspunten van de SBK-Bepalingsmethode, onder meer over het afvalscenario van composiet materiaal. De evaluatie van deze methode maakte echter geen deel uit van deze studie.
- Helaas hebben we de analyse niet direct in DuboCalc kunnen uitvoeren, omdat het programma onvoldoende relevante data bevatte. Dit is dan ook meteen de belangrijkste suggestie voor verbetering.
- De belangrijkste kanttekening bij de studie is dan toch dat bruggen van verschillende materialen niet zomaar vergeleken kunnen worden, omstandigheden en specificaties hebben grote invloed. De resultaten van deze studie kunnen dan ook niet zomaar naar elke andere situatie worden vertaald. Dit dient meegenomen te worden in de publicatie van de resultaten.

8 AANBEVELINGEN

8.1 Aanbevelingen duurzaamheidsscores bruggen

- Welke verbetervoorstellen komen naar voren per sector voor een betere duurzaamheidsscore?

- In het algemeen verdient het aanbeveling om bij het (laten) ontwerpen van bruggen heel kritisch te kijken naar de specificaties. Aandachtspunt is dat het lastig is om naar werkelijk technische ‘materiaalvrije’ specificaties te gaan. Bij het ontwerpen zou wellicht elke keer de specifieke eigenschappen en mogelijkheden van een materiaal voorop moeten staan.
- Voor de sectoren verdient het aanbeveling om actief te werken aan een gedegen en actuele milieugegevens van de meest toegepaste materialen in hun sector. Dit geldt uiteraard met name voor de sectoren waar dit nog in de kinderschoenen staat.

Betonnen bruggen

- Het toepassen van CEMIII cement biedt aanzienlijk milieuvoordeel ten opzichte van het toepassen van CEMI cement. Het verdient dus aanbeveling om CEMI waar mogelijk te vervangen door CEMIII.
- De milieu-impact van de slijtlaag is relatief groot (dit geldt trouwens ook voor toepassing van de slijtlaag op de andere bruggen). Het verdient aanbeveling om te bekijken of de slijtlaag ook met andere materialen met een lagere milieu-impact kan worden gerealiseerd.

Stalen bruggen

- Het verdient aanbeveling om het coaten alleen uit te voeren als dat ook werkelijk nodig is en zo mogelijk de frequentie ervan te verlagen. Dit moet natuurlijk niet ten koste gaan van de staat van de constructie.
- Het lijkt erop dat het ontwerp op gewicht is geoptimaliseerd. Het verdient dus aanbeveling om dit breed toe te passen in de sector.

Houten brug

- De erg lage score van hout als gevolg van de verbranding van het hout in een AVI moet niet opgevat worden als een stimulans om niet zuinig met het materiaal om te springen en het snel te verbranden. In dat geval compenseren houtoogst en natuurlijke bijgroei elkaar en wordt uitputting en aantasting van ecosystemen voorkomen. Het gebruiken van bruikbare planken aan het einde van de levensduur van een houten brug dient gestimuleerd en uitgebreid te worden.

Composiet bruggen

- Het verdient aanbeveling om nader te bekijken of het gewicht van de bruggen naar beneden kan worden gebracht.
- De relatief hoge impact van het materiaal per kg is een ander aandachtspunt. De inzet van andere materialen met een lagere milieu-impact zou hier een oplossing kunnen zijn, zoals biobased of recycled materialen.
- Een hoger percentage hoogwaardige recycling, als ook hoogwaardige thermische recycling, van composieten aan het einde van de levensduur zou de impact verder verlagen.

8.2 Aanbevelingen projectaanpak

Voor uitvoering van een vergelijkbaar project bevelen we aan om de door ons gehanteerde projectaanpak op een aantal punten te wijzigen:

- Indien een vergelijkende LCA wordt uitgevoerd van producten of constructies van verschillende materialen voor een zelfde toepassing, verdient het aanbeveling om het team LCA-deskundigen te versterken met een onafhankelijk team deskundigen in het technisch vakgebied. Dit team is dan verantwoordelijk voor het opstellen van de (materiaalvrije) specificaties en het toetsen aan de specificaties van de aangeleverde ontwerpen.
- We bevelen aan om als een van de eerste stappen in een vergelijkende studie door het onafhankelijke team van vakdeskundigen de specificaties op te laten stellen en deze vervolgens voor te leggen aan betrokken sectoren, producenten en/of leveranciers. Na een commentaarronde maakt het team vakdeskundigen de specificaties definitief. Door zo de regie te leggen bij de vakdeskundigen, wordt de directe discussie tussen concurrerende partijen voorkomen maar wordt wel gelegenheid gegeven voor inspraak en inbreng relevante informatie.
- Als volgende stap in een vergelijkende studie bevelen we aan om eerst de ontwerpen te laten toetsen aan de specificaties, en dan pas het LCA-traject in gang te zetten. Dit voorkomt zoveel mogelijk dat na de uitvoering van LCA de aangeleverde ontwerpen/ producten aangepast moeten worden en de LCA deels opnieuw moet worden uitgevoerd.

BRONNEN

1

http://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/duurzaam/duurzaam_inkopen/duurzaamheid_bij_contracten_en_aanbestedingen/dubocalc/

² <http://www.nen.nl/NEN-Shop/Vakgebieden/Bouw/Eurocodes.htm>

³ Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken ROK 1.2; RTD 1001:2013; Versie : 1.2; 1 januari 2013

⁴ SBK-Bepalingsmethode en GWW-werken Milieuprestatie Gebouwen, SBK dd. 01.11.2011

⁵ NEN 8006:2004 nl Milieugegevens van bouwmaterialen, bouwproducten en bouwelementen voor opname in een milieuverklaring - Bepalingsmethode volgens de levenscyclusanalyse methode (LCA)

⁶ <https://www.milieudatabase.nl/>

7

http://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/duurzaam/duurzaam_inkopen/duurzaamheid_bij_contracten_en_aanbestedingen/dubocalc/

⁸ ISO 14040:2006 Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework

⁹ ISO 14044:2006 Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines

¹⁰ <http://www.mrpi.nl/>

¹¹ <https://www.milieudatabase.nl/>

¹² <http://www.ce.nl/>

¹³ Uit: Handboek Schaduwprijzen, Waardering en weging van emissies en milieueffecten, CE Delft, Publicatienummer: 10.7788.25a NL

¹⁴ SBK-Bepalingsmethode en GWW-werken Milieuprestatie Gebouwen, SBK dd. 01.11.2011

¹⁵ NEN 8006:2004 nl Milieugegevens van bouwmaterialen, bouwproducten en bouwelementen voor opname in een milieuverklaring - Bepalingsmethode volgens de levenscyclusanalyse methode (LCA)

¹⁶ <http://www.nen.nl/NEN-Shop/Vakgebieden/Bouw/Eurocodes.htm>

¹⁷ Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken ROK 1.2; RTD 1001:2013; Versie : 1.2; 1 januari 2013

¹⁸ <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>

¹⁹ <http://www.ecoinvent.ch/>

²⁰ MRPI blad: Betonmortel MRPI-code 20.2.00025.004 DATUM AFGIFTE 21 augustus 2012

²¹ MRPI blad: CEM III-NL; MRPI-code: 20.2.00023.004; DATUM AFGIFTE 14 juli 2011

²² www.cementenbeton.nl

²³ <http://www.brbs.nl/>

²⁴ MRPI Heavy Construction products, referentie: 9.2.00011.004, January 8, 2013, Bouwen met Staal

²⁵ <http://www.fsc.nl/>

²⁶ Smith, Wynet; Mapping Access to Benefits in Cameroon using Commodity Chain Analysis: A Case Study of the Azobé Timber Chain; Department of Geography, University of Cambridge, UK

²⁷ MRPI Glasvezelversterkte kunststof brug, referentie: 30.1.00012.004, 28 november 2011, FiberCore

²⁸ Life cycle assessment of CFGF – continuous filament glass fibre products Feb 2012; GlassFibre Europe; PWC

<http://www.glassfibreeurope.eu/sustainability/life-cycle-assessment/>

²⁹ MRPI LEAB, referentie: 30.1.00011.003, 17 november 2009, BAM infra

³⁰ Zie <http://www.wegenbouw.be/pdf/wegeninasfalt.pdf>

³¹ VBW Asfalt, Richtlijnen dunne asfaltlagen, april 2004

³² Van Mierlo & Koppejan, 1952

³³ Email correspondentie tussen dhr. Schuur en dhr. Hegger

³⁴ MRPI Light Construction products, referentie: 9.2.00012.004, January 8, 2013, Bouwen met Staal

³⁵ <http://www.linkbelt.com/lit/pdf/hc/278hii/hc278t.pdf>

³⁶ MJA Composieten Recycling, ref: 55106189-TOS/NET 10-5245, KEMA, Agentschap NL, NRK

³⁷ <http://www.tpac.smk.nl/32/home.html>

³⁸ F. Collins, Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint, The International Journal of Life Cycle Assessment, 2010-07-01

³⁹ The CO2 Balance of Concrete in a Life Cycle Perspective; Knut O. Kjellsen, Maria Guimaraes and Åsa Nilsson; 19 December 2005; ISBN: 87-7756-758-7

⁴⁰ MJA Composieten Recycling B.A.F. in 't Groen; Arnhem; 7 december 2010; 55106189-TOS/NET 10-5245

BIJLAGE 1: REVIEW LCA DESKUNDIGE

Harry van Ewijk heeft als LCA deskundige het rapport gereviewed en hierover enkele opmerkingen gemaakt. Hieronder volgt een weergave van de opmerkingen en de reactie van de uitvoerders van de LCA.

Naam reviewer: Harry van Ewijk, IVAM UvA bv

Review Document: Rapport LCA DuboCalc studie bruggen, definitieve draft – maart 2013, vierde draft, BECO, 14 maart 2013

Opdrachtgever: Agentschap NL, Leon Wolthers

Datum: 4 april, 2013

Nr.	Paragraaf nr, blz nr, fig nr	Opmerking	Reactie opstellers rapport
1.	Algemeen	De rapportage beschrijft voor de doelgroep helder de aanleiding, de doelstellingen en de resultaten. Voor een review volgens de richtlijnen van ISO 14044 is de rapportage op een aantal onderdelen te beperkt.	
2.	Algemeen	Er is nagenoeg geen zicht op welke data nu precies zijn gebruikt en bijvoorbeeld op hoe de inventarisatie al dan niet aansluit op de karakterisatie. Dat valt dan ook buiten deze review.	Betere verantwoording data is toegevoegd
3.	Algemeen	De review vraag werd gesteld aan het eind van het proces aan één individuele reviewer, hetgeen volgens ISO14044 bij een vergelijkende LCA niet de voorkeur heeft. Daar staat tegenover dat (de) relevante actoren wel gedurende het proces betrokken waren en dat er daarbij ook LCA-expertise aanwezig was, naast die van de uitvoerder. Het doel van de gevraagde review is dan ook een toetsing achteraf van de vergelijkende LCA door een onafhankelijke buitenstander om draagvlak te verkrijgen.	ok
4.	Algemeen	ISO wordt één keer genoemd ("Het ISO protocol voor LCA's"). Suggestie: noem eenmaal ISO 14040/44 en geef de relatie tussen DuboCalc, SBK-Bepalingsmethode, NEN8006 (evt EN 15804) en ISO14040/44. Dat is net niet helemaal helder onder kopje SBK-Bepalingsmethode (blz 5).	Uitleg toegevoegd
5.	Voorblad	"Rapport LCA DuboCalc studie bruggen" loopt niet lekker en dekt de lading maar deels. Suggestie "Vergelijkende LCA studie bruggen" in ondertitel aangevuld met de alternatieve materialisaties beton, staal, hout en composiet. DuboCalc blijkt slechts een beperkte rol te hebben: de rol van de MKI score (die binnen DuboCalc wordt gebruikt) is wel prominent.	Titel aangepast
6.	Voorblad	Waarom in plaats van "Betrokkenen" niet Opdrachtgever Agentschap NL en Uitvoerders (of opdrachtnemers) Beco? Er waren immers veel meer partijen betrokken.	Aangepast
7.	H1, blz 3	(boven Doel en resultaat) "deze sector" → suggestie GWW-sector	Aangepast
8.	H1	Suggestie: in Hoofdstuk 1 de looptijd van het project opnemen.	Toegevoegd

Nr.	Paragraaf nr, blz nr, fig nr	Opmerking	Reactie opstellers rapport
9.	H1, blz 4	(Betrokken partijen) Graag een opmerking toevoegen over in hoeverre de organisaties representatief zijn voor de branche. NB 2 van de 3 op het voorblad genoemde betrokken zijn niet genoemd.	Toegevoegd
10.	H1, blz 5	2 ^e alinea: het volledige profiel mag (volgens ISO norm) wel degelijk openbaar worden gemaakt. Nu staat er alleen dat de resultaten uitgedrukt in MKI niet openbaar mogen worden gemaakt.	De MKI score kan gezien worden als een gewogen score en wegen mag niet in een vergelijkende studie.
11.	H1, blz 5	De referentie naar de SBK-Bepalingsmethode (eindnoot 2) is niet de actuele (maart 2010 in plaats van november 2011). Refereer aan NEN 8006 zonder “:2004” omdat ook “A1:2007” er dan onder valt.	Referentie is aangepast
12.	2.1 Doel	“In overleg met de betrokken zal een selectie gemaakt worden van de resultaten en conclusies die openbaar gemaakt kunnen worden.” Wat betekent dit: als er één betrokken partij tegen is, gebeurt het dan niet?	Dan worden de betreffende delen van het rapport niet gepubliceerd
13.	2.2 FE	“In deze studie worden de milieuprofielen van de bruggen vergeleken op het gebruik ervan tijdens de gevraagde levensduur.” Wat betekent “op het gebruik ervan”?	Aangepast
14.	2.3	7 februari wordt genoemd. Is dat 2012 of 2013?	Jaartal toegevoegd
15.	2.9 / H9	Maak duidelijk onderscheid tussen de interne (? Rick Scholtes, Nibe) en externe review (Harry van Ewijk, IVAM).	Aangepast
16.	2.10	Zie ook 2.1. “Deze communicatie zal pas plaatsvinden als alle partijen goedkeuring hebben gegeven aan de tekst die openbaar gemaakt zal worden.” Vraag: gaat hier wel wat uitkomen?	Dit was een voorwaarde van de deelnemende partijen aan de start van de studie.
17.	3.1 betonmortel C53/65	“Het beton is gebaseerd op een deel betongranulaat.” is vaag. Wordt bedoeld dat betongranulaat wordt ingezet als gedeeltelijke grindvervanger?	Verduidelijkt
18.	3.1 Hout	De middeling van transportafstand zagerij – haven is geen gewogen middeling of er wordt impliciet verondersteld dat er evenveel uit Kameroen als Gabon komt. Graag opmerking toevoegen.	Toegevoegd
19.	3.1 Composiet	“SGS Intron heeft recent een MRPI studie uitgevoerd van een composietbrug.” Referentie ontbreekt.	Referentie toegevoegd
20.	3.1 Asfalt	“De eerste twee zijn opgevuld met behulp van een MRPI studie van LEAB asfalt.” Motivatie voor keuze LEAB ontbreekt.	
21.	3.2	Heeft de keuze van het brugmateriaal, naast invloed op de fundering, invloed op de aanbruggen?	Toegevoegd

Nr.	Paragraaf nr, blz nr, fig nr	Opmerking	Reactie opstellers rapport
22.	3.2.3	“het milieuprofiel van de betonmortelmix C53/65 van Spanbeton” Eerder is aangegeven dat data van Spanbeton confidentieel is. Een opmerking over het al dan niet ‘in lijn zijn’ met de SBK-Bepalingsmethode is gewenst.	Toegevoegd, zie 3.1
23.	3.2.3 en elders	$1\text{m}^3 \rightarrow 1\text{ m}^3$	Aangepast
24.	3.4.2	“Oppervlakte 824,2 m ² (niet opgegeven)” Is “berekend” niet duidelijker dan “niet opgegeven”?	Aangepast
25.	3.4.3	“de uitgevoerde MRPI studie ¹² .” De referentie is vaag voor een MRPI studie.	[Jan Pieter gemaild]
26.	3.9 hout	Suggestie <u>toevoeging</u> : “Deze waarden zijn gebruikt en de milieupact van de zo vermeden elektriciteits- en warmteproductie is afgetrokken van de totale milieubelasting.”	Toegevoegd
27.	3.9 beton	Is bij storten gerekend met een tijdshorizon voor emissies van 100 jaar of oneindig?	Toegevoegd
28.	3.9 composiet	Is er iets bekend over de acceptatie van glasvezelcomposiet door AVI's? (achtergrond vraag: het zou een stoorstof in het verbrandingsproces zijn)	Zou mogelijk moeten zijn volgens rapport KEMA.
29.	Fig. 1	“verwerking” wordt verderop (bijvoorbeeld in figuur 6) “Eindelevensduur” genoemd. Dat is helderder.	Aangepast
30.	4.3	Bij de toelichting is de kanttekening / uitwijding gewenst dat de huidige gemiddelde energieopwekkingsmix (veel fossiel) wordt uitgespaard. Daarbij horen 2 tegengestelde tendensen: 1. Met het ‘vergroenen’ van de energieproductie daalt het voordeel van houtverbranding in een AVI. 2. Met het stijgen van het rendement van de AVI's neemt het voordeel toe.	Toegevoegd
31.	4.4	“In paragraaf 6.1 is een composiet fietsbrug is geanalyseerd die is gebaseerd op eisen die meer specifiek op composiet zijn afgestemd.” Bedoeld wordt waarschijnlijk dat het ontwerp beter is afgestemd op de eigenschappen van composiet.	Aangepast
32.	4.5	“De bovenstaande figuur laat zien dat de composietbrug hoog scoort” → de hoogste milieupact heeft	Aangepast
33.	4.5	“Figuur 6 geeft” → “Figuren 6, 7 en 8 geven”	Toegevoegd
34.	4.5, blz 23	onderaan invoegen “en valt buiten het kader van de LCA norm ISO 14040/44”.	Toegevoegd
35.	Fig. 7	Het ontbreken van (Y=) “0” bij de X-as is verwarrend.	Aangepast
36.	blz 25	“In dat geval compenseren houtoogst en natuurlijke bijgroei elkaar en wordt uitputting voorkomen.” Suggestie: opmerking over aantasting ecosystemen (die dan ook wordt beperkt)?	Toegevoegd

Nr.	Paragraaf nr, blz nr, fig nr	Opmerking	Reactie opstellers rapport
37.	boven fig. 8	"Figuur 8 geeft de opbouw van de MKI-score weer van de verschillende fietsbruggen <u>naar effectcategorie</u> ."	Toegevoegd
38.	blz 26	"De verbrandingsenergie van met name beton en hout is laag" hout → staal	Aangepast
39.	H5	"In paragraaf 5.4 worden de fietsbruggen vergeleken, op basis van de verschillende effectcategorieën, MKI-score en primaire energie." fietsbruggen → verkeersbruggen	Aangepast
40.	Fig. 11	Verkeerde plaatje: fietsbrug in plaats van verkeersbrug.	Aangepast
41.	blz 28	(onderaan) "De constructie van de betonnen brug met asfalt is ook iets zwaarder uitgevoerd dan de brug met de lichtere slijtlaag." Suggestie: verwijzen naar specificatie?	Toegevoegd
42.	Fig. 12	"met en zonder asfalt" Kan in plaats daarvan niet beter "met asfalt en met slijtlaag" worden gehanteerd?	Aangepast
43.	Fig. 13	Zie opmerking Fig. 1.	Aangepast
44.	Fig. 14	Legenda: "Eindele <u>ve</u> nsduur fundering"	Aangepast
45.	5.4 onderaan	Herhalen dat weging buiten LCA norm valt.	Toegevoegd
46.	Fig. 18	zonder asfalt → met slijtlaag	Aangepast
47.	Fig. 19	Twee van de vier alternatieftitels zijn zichtbaar	Aangepast
48.	Fig. 20	Idem	Aangepast
49.	6.4	"De levensduur van een brug is niet van te voren vast te stellen en is in deze studie 50 jaar voor de fietsbrug en 100 jaar voor de verkeersbrug." is een rare zin. Introduceer een aangenomen levensduur (liefst onderbouwd) of "en is in deze studie op 50 jaar gesteld".	Aangepast
50.	6.4	<u>Suggestie</u> : "Hierbij is de functionele eenheid en de daarmee samenhangende tijdsduur <u>waarin de functie vervuld moet worden</u> gelijkgehouden."	Toegevoegd
51.	Fig. 26 en 27	Geef de standaard levensduur (waarmee elders is gerekend) duidelijk aan in de figuren, bijvoorbeeld met een verticale lijn: 50 jaar bij de fietsbrug en 100 jaar bij de verkeersbrug.	Toegevoegd
52.	6.5 en elders	Carboniseren betekent het toevoegen van koolzuurgas. Bedoeld wordt carbonatatie.	Aangepast
53.	6.6	De analyse van de resultaten en conclusie ontbreken.	Toegevoegd
54.	6.7	"Een cementoven heeft een hoger rendement dan een AVI. In deze analyse is uitgegaan van 75% ¹³ en dat deze verbranding het gebruik van steenkool vermijdt." Is het rendement in deze toepassing van belang? Gaat het niet om substitutie op basis van calorische waarde? Hoe is hier gerekend?	Rendement berekend op basis van verbrandingswaarden.

Nr.	Paragraaf nr, blz nr, fig nr	Opmerking	Reactie opstellers rapport
55.	7.1	DuboCalc is sinds H1/inleiding niet meer genoemd. Ook na de eerste punt in het kader onder 7.1 wordt DuboCalc niet meer genoemd.	Verklaring toegevoegd
56.	blz 49, 1 ^e pt	“De MKI-scores van de stalen en betonnen fietsbrug is <u>zijn</u> vergelijkbaar ...”	Aangepast
57.	blz 49	Bij de houten brug de nuancering over de vermeden huidige energiemix herhalen. Zie opmerking bij 4.3.	Toegevoegd
58.	7.2	“De belangrijkste kanttekening bij de studie is dan toch dat bruggen van verschillende materialen toch niet zomaar vergeleken kunnen worden, ...” (en een punt aan het einde van de alinea)	Aangepast
59.	H8	Suggestie: toevoegen aanbeveling om binnen het project vergaarde / gebruikte data aan te bieden aan de Nationale Milieudatabase	
60.	H9	Onderscheid LCA0-deskundige en deze review.	Aangepast

BIJLAGE 2: GEBRUIKTE DATA**FUNDERING**

Onderdeel	Materiaal	Bron data
Funderingsbalken	Beton mortel C30/37	MRPI VOB code 20.2.00025.004, type: C 30/37 XC1 S3
	Wapeningstaal	MRPI Bouwen met staal, 9.2.00011.004, zwaar constructiestaal, levensfasen: productie en constructie
Prefab beton palen	Beton C 45/55	Aanname: beton is vergelijkbaar met betonsamenstelling als Spanbeton
	Wapeningstaal en voorspanstaal	MRPI Bouwen met staal, 9.2.00011.004, zwaar constructiestaal, levensfasen: productie en constructie
Stalen palen en UNP ligger		MRPI Bouwen met staal, 9.2.00011.004, zwaar constructiestaal, levensfasen: productie en constructie

PRODUCTIE BOVENBOUW**Betonnen brug**

	Type	Opmerkingen
VIP en TRA liggers en SKK liggers	Beton C53/65	Samenstelling gebaseerd op gegevens Spanbeton, zie onder.
	Wapeningstaal	MRPI Bouwen met staal, 9.2.00011.004, zwaar constructiestaal, levensfasen: productie en constructie
	Voorspanstaal	MRPI Bouwen met staal, 9.2.00011.004, zwaar constructiestaal, levensfasen: productie en constructie
	Elektriciteit	Ecoinvent 2.2; Electricity, low voltage, at grid/NL U
	Aardgas	Ecoinvent 2.2; Natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW/RER U
Druklaag	Beton C30/37	MRPI VOB code 20.2.00025.004, type: C 30/37 XC1 S3
	Wapeningstaal	MRPI Bouwen met staal, 9.2.00011.004, zwaar constructiestaal, levensfasen: productie en constructie

Beton C53/65

Materiaal	Bron data
CEM III	MRPI Cement & Beton Centrum, CEM III-NL, ref: 20.2.00023.004
Kalksteenmeel	Ecoinvent 2.2; Limestone, milled, loose, at plant/ CH U
Grof zand	Ecoinvent 2.2; Sand, at mine/ CH U
Betonpuin	1026 Betongranulaten / betonpuin; allocatie 6/8 aan gebruik van betonpuin, zie H3.
Smals	Ecoinvent 2.2; Gravel, round, at mine/ CH U
Superplastificeerder	Ecoinvent 2.2; Polycarboxylates, 40% active substance, at plant/RER U
Transport	Transportafstanden voor de grondstoffen zijn afkomstig van het document: "Scope III Ketenanalyse SPANWAND® Productie & Aanbrengen" versie 3.1 mei 2010.

Stalen brug

Onderdeel	Materiaal	Bron data
Liggers, dragers en dekplaat	Zwaar constructiestaal	MRPI Bouwen met staal, 9.2.00011.004, zwaar constructiestaal, levensfasen: productie en constructie

Houten brug

Onderdeel	Materiaal	Bron data
Azobe hout	Omzagen boom	Power sawing, with catalytic converter/RER U
	Transport naar zagerij	Transport, lorry >32t, EURO4/RER U aangepast met behulp van beladingsgraad en diesel verbruik van Wijma.
	Energie zagen in Afrika	Ecoinvent 2.2 electricity, low voltage, production NL, at grid/kWh/NL; aangepast naar energiemix van Kameroen (23% olie, 7% gas en 70% waterkracht) zoals opgegeven door IEA
	Vrachtwagen van en naar haven	Ecoinvent 2.2, Transport, lorry >16t, fleet average/RER U
	Schip naar NL	Ecoinvent 2.2, Transport, transoceanic freight ship/OCE U
	Elektriciteit	Ecoinvent 2.2; Electricity, low voltage, at grid/NL U
	Aardgas	Ecoinvent 2.2; Natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW/RER U

Composietbrug

Onderdeel	Materiaal	Bron data
Composiet	Glasvezel	Life cycle assessment of CFGF – Continuous filament glass fibre products; February 2012; GlassFibreEurope; LCI afkomstig van PWC aangeboden aan DSM en vervolgens aan Beco.
	Overige materialen	DUBOCALC COMPOSITET BRUG MRPI® dossier; SGS; 2011; LCI direct geleverd aan Beco.
Leuning	Staal	MRPI blad Bouwen met Staal; Lichte constructie producten; ref: 9.2.00012.004; 8 januari 2013; levensfasen: productie en constructie

Overig

Onderdeel	Bron data
Slijtlaag	DUBOCALC COMPOSITET BRUG MRPI® dossier; SGS; 2011; LCI direct geleverd aan Beco.
Asfalt	- DuboCalc 2.0 (Asfalt (STAB) 0% PR) - MRPI LEAB, referentie: 30.1.00011.003, 17 november 2009, BAM infra - Ecoinvent 2.2 (Bitumen, at refinery/RER U; Gravel, crushed, at mine/CH U; Sand, at mine/CH S)

TRANSPORT NAAR BOUWPLAATS

Onderdeel	Bron data
Vrachtwagen	Ecoinvent 2.2 (transport, lorry >16t, fleet average/tkm/RER)

CONSTRUCTIE

Onderdeel	Bron data
Mobiele kraan	Ecoinvent 2.2 (Diesel, burned in building machine/MJ/GLO)
Lassen	Ecoinvent 2.2; Welding, arc, steel/RER S
Coating	MRPI Bouwen met staal, 9.2.00011.004, zwaar constructiestaal, Spray painting

EINDELEVENSDUUR

Materiaal	Bron data
Composiet	DUBOCALC COMPOSITET BRUG MRPI® dossier; SGS; 2011; LCI direct geleverd aan Beco.
Hout	Ecoinvent 2.2 (disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration/kg/CH; electricity mix/kWh/NL; heat, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW/MJ/RER; disposal, wood untreated, 20% water, to sanitary landfill/kg/CH)

Constructie Staal	MRPI blad Bouwen met Staal; Lichte constructie producten; ref: 9.2.00012.004; 8 januari 2013; levensfasen: productie en constructie
Leuning	MRPI blad Bouwen met Staal; Lichte constructie producten; ref: 9.2.00012.004; 8 januari 2013; levensfasen: einde levensduur
beton	1026 Betongranulaten / betonpuin; allocatie 2/8 aan gebruik van betonpuin, zie H3.
Asfalt	MRPI LEAB, referentie: 30.1.00011.003, 17 november 2009, BAM infra
Slijtlaag	DUBOCALC COMPOSIT BRUG MRPI® dossier; SGS; 2011; LCI direct geleverd aan Beco.
Cementoven	Verbranden composiet in cementoven vermijdt het Ecoinvent proces: Hard coal, burned in industrial furnace 1-10MW/RER U en Sand, at mine/CH U

BIJLAGE 3: SCHETS VERKEERSBRUG

 bam infra BAM Infraconsult bv	project	pagina	
		proj.nr	BECO
		datum	27-4-2012
		opsteller	F. A. J. 't Hagen

Brug in provinciale weg

- belasting volgens de Eurocode Verkeerscategorie 2
- ontwerp conform vigerende materiaal normen
- geen eisen betreffende brandbelasting
- levensduur 100 jaar