

Eindrapport fase 1 - Haalbaarheidsonderzoek

SBIR Circulaire Viaducten

16 maart 2021

Bridges of Laminated Timber BOLT



ARUP

heijmans

SCHAFFITZEL
Bauen mit Holz und Ideen

1. Managementsamenvatting

Doelstellingen van het haalbaarheidsproject zijn het aantonen van de technische en praktische haalbaarheid van de innovatie, het duurzaamheidsvoordeel en het uitwerken van een bedrijfseconomisch sluitend verdienmodel voor toekomstige schaalvergroting. [Projectvoorstel Hoofdstuk 5, pagina 11]

De probleemstelling: Kunnen we aantonen dat het BoLT-ontwerp (viaduct met overspanning van 25m bestaande uit houten dekdelen op houten liggers) technisch haalbaar is, CO₂-reductie oplevert en een sluitende business case oplevert binnen de bestaande (of aangepaste) ontwerpnormen? [Projectvoorstel S5.1, pagina 11]

1.1 Impact

Voor de impact hebben we het formulier MKI SBIR CIVI ingevuld volgens de richtlijnen. We hebben een betonnen referentieproject KW3A in de A27 (Bilthoven) gebruikt en voor de vergelijking het betonnen dek vervangen door een houten dek volgens ons BoLT-ontwerp.

Resultaten: De resultaten zijn zoals gedacht overtuigend positief. De MKI van BoLT was in eerste instantie €8.000,- hoger dan KW3A. Dit model ging echter uit van 85% verbranding aan het einde van de levensduur. We hebben als alternatief een cascaderings-model doorgerekend (in technische deel en economische deel tonen we aan dat cascadering reëel is), waardoor we een beter beeld kregen van de milieuprestaties van hout. We hebben een aantal maatregelen doorgerekend om de MKI van hout beter te laten zien, zoals het niet meerekenen van de forfaitaire MKI-waarde aan het einde van de levensduur. Bij het representatieve modellen voor BoLT slaat het eerste beeld dan ook volledig om, met een MKI besparing van €30.388,-.

ADP-berekeningen krijgen naar ons gevoel een te zwaar gewicht door er specifieke focus op te leggen. Daarvoor is er onvoldoende gevoel bij de achtergrond en betrouwbaarheid van de data.

Conclusie: De positieve resultaten van BoLT geven ons vertrouwen dat met de juiste kennis, bouwen met hout een oplossingsrichting is die voor circulaire viaducten veel potentie heeft. Door te bouwen met lichte hernieuwbare materialen is het concept naast nieuwbouw- ook geschikt voor renovatieprojecten. Door deze brede inzetbaarheid leent BoLT zich ook voor opschaling met de bijbehorende opschaling van de positieve milieu- en circulariteitsimpact.

1.2 Technische haalbaarheid

Voor de technische haalbaarheid hebben we op basis van de RWS eisen, ROK, Eurocode en onze eigen eisen een ontwerp gemaakt dat we geanalyseerd en uitgewerkt hebben. De uitkomsten hebben we in een uitgebreid Haalbaarheidsrapport vastgelegd.

Resultaten: Het BoLT-ontwerp is technisch haalbaar volgens alle gestelde eisen (ROK, Eurocode en eigen eisen). We hebben oplossingen gevonden voor de bescherming tegen vocht en een uitgebreid onderzoek gedaan naar de levensduur van hout met bevestiging dat 100 jaar mogelijk is. Daarnaast hebben we op een aantal andere deelonderwerpen oplossingen gevonden (voegen, opleggingen, hemelwaterafvoer).

Conclusie: We hebben aangetoond dat een viaduct met houten bovenbouw haalbaar is en aan alle eisen van de Basisspecificatie vaste bruggen, ROK en Eurocode voldoet. Een aantal details verdient nog uitwerking, maar we hebben een oplossing die aantoont dat de benodigde technologie werkt onder relevante omstandigheden (TRL5).

1.3 Economisch Perspectief

Voor het economisch perspectief hebben we de kosten van het betonnen referentieontwerp KW3A afgezet tegen de kosten van het BoLT-ontwerp en een eerste geoptimaliseerde versie. Deze kosten hebben we als netto contante waarde uitgewerkt en vergeleken. In een verdere uitwerking hebben we de spreiding van de restwaarde van het BoLT-ontwerp aangegeven. De businessmodellen uit de Open Leeromgeving hebben we in relatie met BoLT beschouwd. Als laatste hebben we onze ideeën over hergebruik van het BoLT-ontwerp besproken.

Resultaten: De kostenvergelijkingen waren zoals verwacht: het BoLT-ontwerp is qua aanleg 34% duurder dan betonbovenbouw. Na optimalisatie in houtafmetingen is deze nog 25% duurder. De rol van de restwaarde heeft grote invloed op de totale kostenbeschouwing over 100 jaar. Door een NCW-berekening te maken en te modelleren met de restwaarde als variabele stelden we vast dat bij een 100 jarige levensduur de restwaarde van het toegepaste hout minstens 45% moet zijn om een lagere NCW te hebben dan beton. Wanneer we rekenen met een restwaarde van hout van 80%, dan is het BoLT-ontwerp Netto Contant 20%

lager dan de betonbrug. Door het lagere gewicht van de bovenbouw kan bij nieuwbouw de onderbouw ook economischer worden gerealiseerd.

Conclusie: Op dit moment heeft een één op één kostenvergelijking tussen beton en hout niet veel zin. Meer ervaring met houten viaducten en open source informatie delen leiden tot optimalisaties in de keten en beter inzicht in de restwaarde. Hierdoor wordt hergebruik financieel ook steeds interessanter. De benodigde ervaring met houten viaducten komt alleen door een actieve aanbestedingshouding van opdrachtgevers in het uitvragen van circulaire oplossingen.

Algemene conclusies

Technisch is de haalbaarheid vastgesteld en qua impact scoort het BoLT-ontwerp erg goed. Qua economisch perspectief is het BoLT-ontwerp NettoContant goedkoper dan een betonviaduct. Cruciaal hierbij is om vast te stellen wat de werkelijke restwaarde van het hout bij ontmanteling van het kunstwerk. Gezien de grote vraag naar hout is de verwachting dat deze in ieder geval groter is dan 45% waardoor er een goede businesscase ontstaat.

1.4 Vervolgfase (Fase 2)

Aandachtspunten die in fase 2 worden uitgewerkt:

- technisch: detailleringvragen uit Fase 1, testen in Fase 2A en (monitoring) prototype Fase 2B.
- economisch: mogelijkheden verkennen met RWS om prototype in te zetten als langjarig testobject.
- impact: nadere uitwerking van milieufactoren om een beter beeld te krijgen van de impact.
- organisatorisch: evaluatie van Scrum, werkmethode bepalen met Schaffitzel.

2. Uitvoering van het haalbaarheidsonderzoek

2.1 Doelstelling en probleemstelling

De doelstellingen van het haalbaarheidsproject zijn het aantonen van de technische en praktische haalbaarheid van de innovatie, het duurzaamheidsvoordeel en het uitwerken van een bedrijfseconomisch sluitend verdienmodel voor toekomstige schaalvergroting. [Hoofdstuk 5 pagina 11, Projectvoorstel]
De probleemstelling: Kunnen we aantonen dat een viaduct met een houten dek op houten liggers technisch haalbaar is, CO₂-reductie oplevert en een sluitende business case oplevert binnen de bestaande (of aangepaste) ontwerpnormen? [Projectvoorstel §5.1, pagina 11]

De doelstellingen en de probleemstelling van het haalbaarheidsonderzoek zijn volledig behaald en beantwoord. We hebben een haalbare technische oplossing, onderbouwd in een technisch haalbaarheidsrapport, een MKI-analyse en een beschouwing op economisch perspectief.

2.2 Projectorganisatie

Binnen de projectorganisatie lag de inzet van Arup op het technische ontwerp en deed Heijmans de impact-berekeningen en het economische perspectief. Wederzijdse reviews zorgden voor een uitwisseling van kennis en informatie en een integrale aanpak.

Voor de keuze van een houtleverancier hebben we een overzicht gemaakt van houtleveranciers in Europa. Na een preselectie hebben we vier bedrijven op gesprek uitgenodigd. De criteria voor selectie waren ervaring met bruggen, contact met de directie, fabricage van GLT (glulam) en ervaring in Nederland. Zo zijn we bij Schaffitzel Holzindustrie GmbH [www.schaffitzel.de] gekomen, die met Miebach IB als consultant tot het consortium is toegetreden.

Benodigde expertise en taakverdeling

We waren vanaf het begin gericht op een zo compact mogelijk team. De strategie was om als Arup en Heijmans zelf een eerste idee te krijgen over het ontwerp en pas daarna derden in te schakelen. De afspraak was dat we elkaars werk zouden reviewen en waar nodig anderen in de moederbedrijven zouden inschakelen. Dat is een goede methode geweest om in dit corona-thuiswerkjaar toch nog een teamgevoel te creëren en tot resultaten te komen. Het kernteam constructief, hout, asfalt en waterdicht membraan werd in de loop van de tijd uitgebreid met architecten (Arup Milaan), MKI deskundige en twee externe reviewers. Wim de Groot van SHR (Stichting Hout Research) heeft een review gedaan op het technische ontwerp en Mantijn van Leeuwen van NIBE heeft de MKI-berekeningen gereviewd. De review-opmerkingen zijn verwerkt in de rapporten.

EXPERTISE	ARUP	HEIJMANS	SCHAFFITZEL
Projectmanager	Paul van Horn	Mark van de Hoef	
Ontwerpleider	Edwin Thie	Johan Bolwijn	
Constructief	Tessa de Kruijff Laetitia Koning Kevin Frederik Laura Dings	Bas van den Berk	
Hout	Rob Verhaegh Andrew Lawrence Ishan Abeysekara Jorn de Jong		Dominik Niewerth (Miebach) Jörg Schaffitzel
Asfalt		Gerbert van Bochove Joost van Pelt Nico Veer	
Waterdicht membraan		Johan Bolwijn	
Testplan	Paul van Horn	Albert Reitsema Rianne Luimes (TU/E) Hans Lamers (TU/E)	
Kosten		Mark van de Hoef	Dominik Niewerth (Miebach) Jörg Schaffitzel
Econometrie		Albert Reitsema	
MKI		Adrie van der Burgt	

Reviews	Wim de Groot (SHR) Dimitri Tuinstra	Mantijn van Leeuwen (NIBE)	
Architecten	Filippo Cefis Matteo Codignola		
Scrum methodiek		Anna Claus Vincent de Waal	
Hergebruik hout in woningbouw		Dennis Kuijt Roy Crielaard	
Revitontwerp		Ruud van Bakel	
IP jurist	Ian Rogers		
Innovatie manager		Maarten van Santvoort	
Stuurgroep	John Walraven	David van Dasler Wouter Koudijs	Jörg Schaffitzel

Tabel 1 Organisatie BoLT

Wijze van samenwerking en kennisuitwisseling

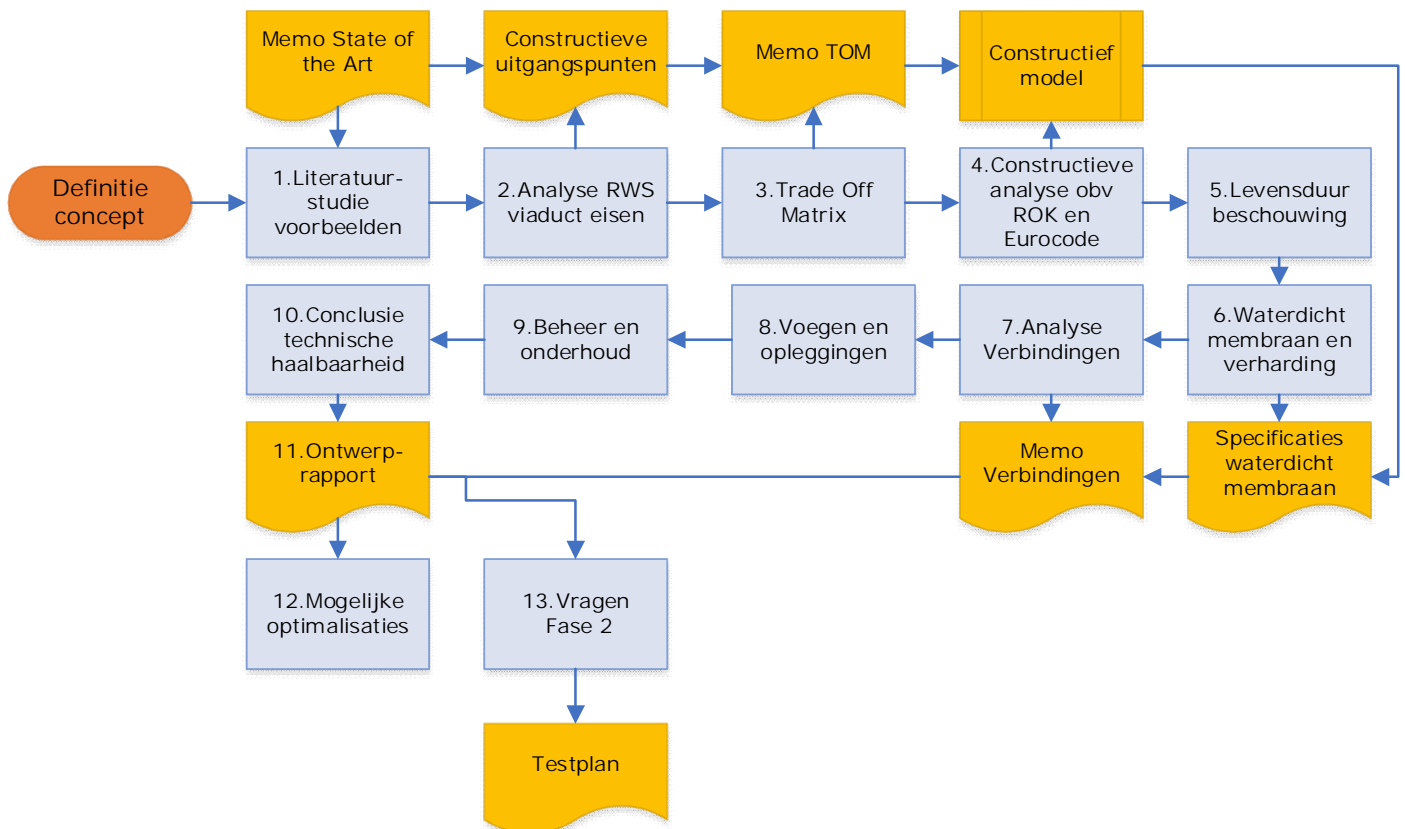
Voor de uitvoering van het haalbaarheidsonderzoek hebben we de Scrum methodiek gebruikt. Deze systematische aanpak, geleid door een Scrum-master van Heijmans, leverde in korte tijd veel antwoorden op de onderzoeksvragen. Conform de Scrum-guide hebben wij het werk opgeknipt in deelproducten: User Stories. Alle onderzoeksvragen zijn gekoppeld aan één actiehouders. De voortgang en status wordt middels een speciale applicatie 'Azure DevOps' bijgehouden. In driewekelijkse sprintreviews werden de uitkomsten gedeeld met het team. Deze actieve en interactieve werkmethode heeft zeker bijgedragen aan een gecontroleerd proces om de nodige activiteiten met betrekking tot het behalen van resultaten te behalen

2.3 Activiteiten Fase 1

Voor de vergelijking tussen een betonnen viaduct en het BoLT-ontwerp hebben we een viaduct van Heijmans als referentie gebruikt: KW3a in de A27. De onderbouw is in beide gevallen gelijk gehouden. De liggerlengte is verkleind naar 25,6 meter omwille van de vergelijkbaarheid. Deze referentie met twee overspanningen is zowel voor de impact als voor het economisch perspectief gebruikt. Het technische ontwerp is gebaseerd op een hoofdlijger-overspanning van 25 meter.

Technische haalbaarheid

We zijn gestart met een bureaustudie naar houten viaducten en bruggen. Aansluitend een analyse van de RWS-eisen, SBIR-eisen en onze eigen uitgangspunten om te bepalen welke we nader moesten onderzoeken. Op basis van deze eisen-analyse is een Trade-off Matrix gemaakt van geschikte bovenbouw-opties en de voorkeursvariant bepaald. Deze voorkeursvariant hebben we uitgewerkt om de afmetingen binnen de gestelde eisen te bepalen. We hebben een parametrisch model gebruikt om de mogelijkheden te verkennen. Met het model hebben we de statische en dynamische analyses uitgevoerd conform de Eurocode en ROK. Verder hebben we een gevoeligheidsanalyse gedaan voor de liggers, de principe-details geanalyseerd, en de afwerking van het brugdek uitgewerkt en een haalbaarheidsrapport geschreven.



Figuur 1: Stroomschema stappenplan

Impact

Voor de impact op circulariteit hebben we de hoeveelheden van het referentie-ontwerp (KW3A in de A27) gebruikt en de MKI-waarde op de voorgeschreven manier bepaald. Dit hebben we vergeleken met de MKI waarde van hetzelfde viaduct maar dan met een houten bovenbouw. Dit is de variant BoLT. Mits drooggehouden kan hout een aantal gebruikscycli mee. We hebben daarom ook een tweede MKI berekening gemaakt waarbij deze cascadering expliciet hebben meegewogen, een expliciete invulling van Module D (hergebruik en recycling). Deze berekening hebben we BoLT-cascadering genoemd. De impact is daarmee meer in lijn met de werkelijkheid gebracht.

Economisch perspectief

De begroting van het referentie-ontwerp gebruikten we om een kostenvergelijking te maken met ons BoLT-ontwerp. Ook hier hebben we alleen de bovenbouwkosten gevarieerd. We hebben een LCC analyse gedaan van het referentievaduct en het BoLT-ontwerp. Een analyse van de 4 businessmodellen van de Open Leeromgeving bracht ons op de centrale rol van de restwaarde van viaducten. Met behulp van een netto contante waarde berekening hebben we een reeks van restwaardes bepaald voor het betonnen referentie model en twee varianten BoLT (standaard en geoptimaliseerd). Voor het hergebruik hebben we re-use (tweede gebruik in bestaande functie); re-purpose (gebruik in nieuwe functie) en recycle (gebruik als grondstof) beschouwd.

2.5 Gebruiksrecht op resultaten

Arup, Heijmans en Schaffitzel zijn overeengekomen om het technisch ontwerp met alle bijlagen en het MKI rapport als open source documenten vrij te geven na afloop van Fase 2B: een vrij gebruiksrecht voor eenieder [§5.5.1].

3. Inhoudelijke bevindingen

3.1 Impact

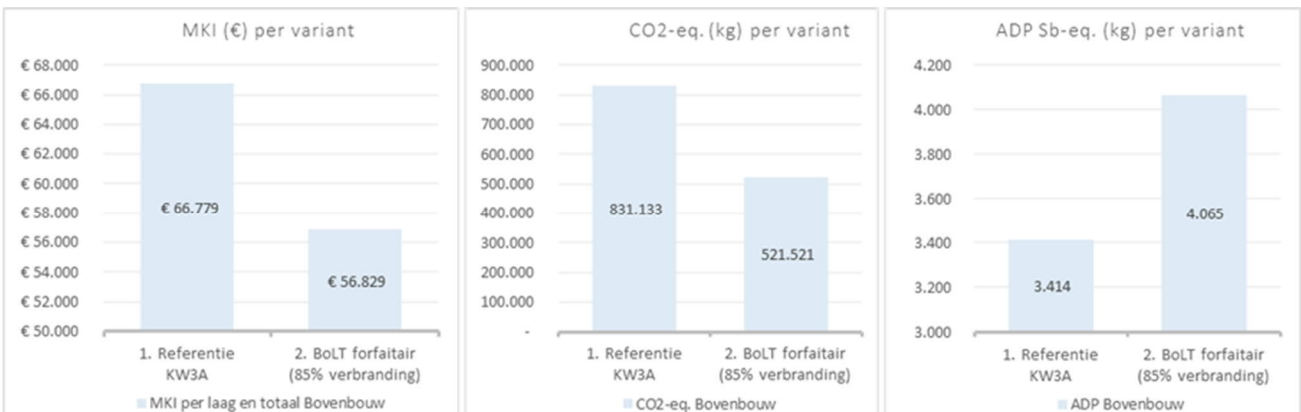
Milieu impact en circulariteit SBIR CIVI

De milieu impact en circulariteit van referentieviaduct KW3A en het BoLT-ontwerp zijn aan de hand van de Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken van juli 2020 bepaald. De kwantitatieve beoordeling rapporteert over de MKI (€), de onderliggende CO₂-eq(kg) en ADP(kg Sb-eq.). De format milieu-impact en circulariteit is bij indiening van dit eindrapport meegeleverd.

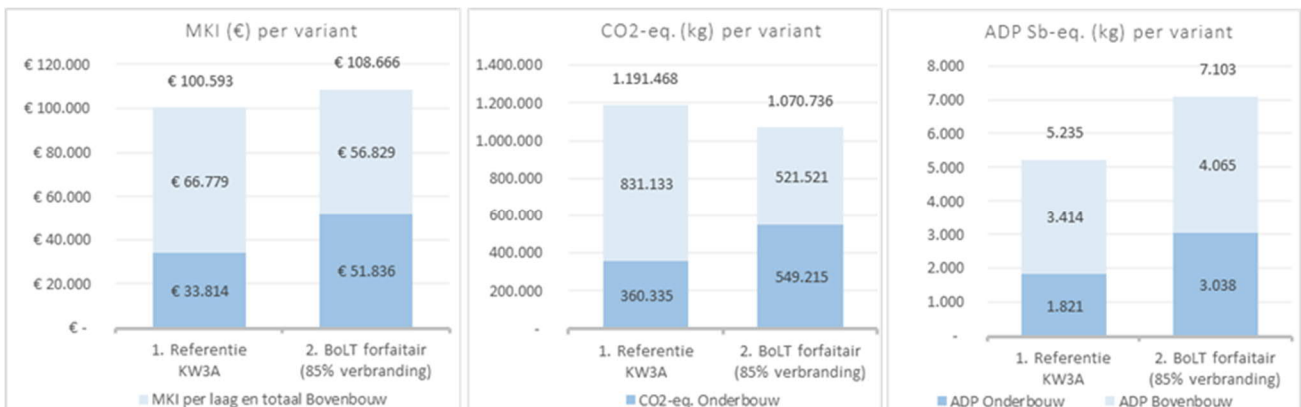
We hebben zoveel mogelijk gewerkt met forfaitaire data uit DuboCalc v5.1.1. Bij afwijking van DuboCalc is dat aangegeven in de kolom 'Bron LCA'. Deze bronbestanden zijn beschikbaar indien gewenst. Bij de basisvergelijking kwamen de beperkingen van de bestaande meetmethodes duidelijk naar voren. Als alternatief hebben we een aantal meer representatieve modellen opgebouwd. Door nadere analyses, gereviseerd door Mantijn van Leeuwen van NIBE, zijn we tot beter verklaarbare cijfers gekomen voor ons BoLT-ontwerp.

ADP maken we alleen voor de basisvergelijking inzichtelijk. Na een korte diepere analyse blijken deze getallen lastig te duiden. Het aandeel ADP in de totale milieu-impact van hout, staal en beton ligt vrijwel altijd onder de 1%. Bij CO₂ ligt dit eerder rond de 40-50%. De ADP wordt vooral beïnvloed door metalen in de keten en in dit geval ook grondstoffen voor de gebruikte lijm voor het hout. Voor CLT is dit ongeveer 2% van het totale gewicht van de BoLT-oplossing, maar door het apart op te nemen lijkt het buitenproportioneel groot.

Basisvergelijking MKI, CO₂, ADP



Figuur 2 Milieu-impact bovenbouwvergelijking (bij emissieloze realisatie (A4-A5))



Figuur 3 Milieu-impact volledig viaductvergelijking

Analyse

1. De meest conservatieve basisvergelijking laat voor sec de bovenbouw van BoLT al een positief beeld zien voor MKI (-14,9%) en CO₂ (-37,3%). ADP laat echter een verhoging zien (+19,1%). Figuur 2 toont de milieu-impactvergelijking van de bovenbouw bij emissieloze of -arme realisatie (elektrisch of HVO-biodiesel).
2. De MKI toename bij de onderbouw (figuur 3) van BoLT (+€18.022,-, +53,3%), is toe te schrijven aan de extra hoeveelheden zand (+8.000m³) voor ophoging van de taluds door de hogere dek-constructie van BoLT. Voor CO₂ is dit in een verhoging van 188.880 kg (+52.4%).
3. Bij de houten elementen wordt gerekend met het forfaitaire afvalscenario van hout 'schoon', waarbij 85% van het hout na bereiken van de ontwerplevensduur wordt verbrand.

Representatieve vergelijking MKI en circulariteit

Aanvullende circulariteitsindicatoren

Naast ADP geven we aanvullend inzicht in de circulariteit van BoLT middels onderstaande indicatoren:

- Materiaal-Circulariteits-Indicator (MCI): verhoudingsgetal (%); (bepaald conform formule leidraad meten van circulariteit 2.0 Platform CB'23)
- Totale hoeveelheid primair materiaal (niet hernieuwbaar) (kg en %);
- Totale hoeveelheid hernieuwbaar materiaal (kg en %).

Hiermee laten we de bijdrage van BoLT aan het behalen van de Rijksoverheidsdoelstellingen zien:

- 50% minder gebruik van primaire grondstoffen in 2030;
- 100% hernieuwbare en gerecyclede materialen in 2050.

De resultaten van deze indicatoren zijn opgenomen in tabel 4.

Hergebruik en Cascadering als standaard

Modulariteit en losmaakbaarheid zijn meegenomen in het BoLT-ontwerpproces. Het doel is om de hernieuwbare materialen zo hoogwaardig mogelijk te kunnen hergebruiken en om vervolgens optimaal te kunnen cascaderen. Figuur 4 toont het voor BoLT gehanteerde cascaderingsprincipe. Hieruit is de kwaliteitsfactor (K-factor) bepaald. De constructieve GLT-ligger en het CLT dek kunnen minstens drie keer in dragende constructieve functies worden hergebruikt. Per cyclus gaat er dus conservatief ingeschat 1/3e van de kwaliteit verloren (K-factor van 0,67).

Het forfaitaire einde levensduurscenario met 85% verbranding is alles behalve circulair. Conform bepalingsmethode is gekeken naar welke milieuprofielen er bij het BoLT einde levensduurscenario uitgespaard worden:

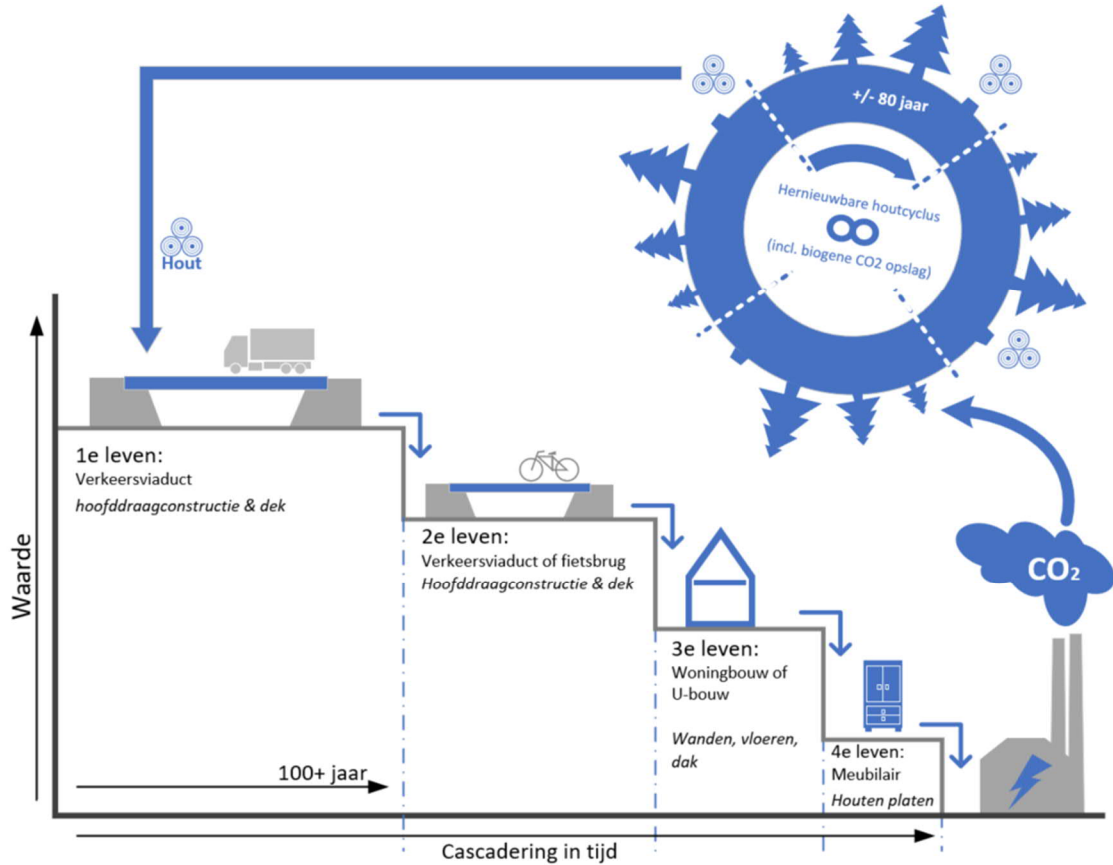
- o Verbranding: vermeden energieproductie AVI (o.b.v. hernieuwbare grondstoffen, 18% elektrisch en 31% thermisch, per MJ LHV);
- o Recycling: uitsparing 'Wood Chips' (NMD/EcoInvent 3.5 (2018): dry, measured as dry mass (EU));
- o Hergebruik: uitsparing nieuw te produceren houten constructiedeel (A1-A3).

De gehanteerde formule voor de herberekening van module D:

$$\text{materiaalhoeveelheid (kg)} * \text{milieulast uit te besparen profiel (MKI of CO}_2\text{)} * \text{uitsparingspercentage (\%)} * \text{K-factor}$$

Module D	Laten zitten	Stort	Verbranding (AVI)	Recycling	Hergebruik	MKI (€) Module D GLT	MKI (€) Module D CLT	CO ₂ (kg) Module D GLT	CO ₂ (kg) Module D CLT
Hout, 'schoon' o.a. balken en planken (forfaitaire)	0%	5%	80%	10%	5%	-8,36	-7,96	-23,25	-18,90
BoLT Module D	0%	0%	10%	10%	80%	-16,15	-12,91	-110,39	-117,12

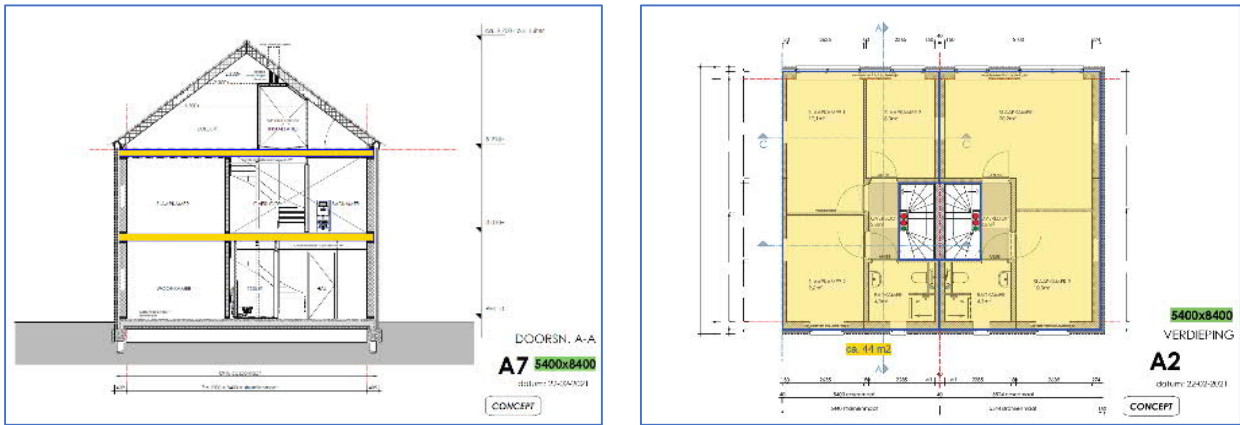
Tabel 2 Realistische einde levensduurscenario BoLT



Figuur 4 Cascaderen principe uitgangspunt BoLT

Element	Levensduur	Tweede leven	Hoeveelheid	% hergebruik
Liggers 25,6 m x 1,4m x 1m	100 jaar	Primair in te zetten als ligger voor nieuwe viaducten of bruggen/viaducten met lagere verkeersbelasting. Secundair te verzagen en in te zetten als dakspanten voor grote overspanningen (zwembaden, sporthallen, maneges, bedrijfshallen)	34 liggers *25,6*1,4*1 = 1219 m3 (62% van de totale hoeveelheid hout in het werk)	99-100% exclusief zaagverliezen, afhankelijk van hergebruik.
Dek platen 16,5m x 3,0m x0,32m	100 jaar	Verwijderen toplaag van 20 mm aan de bovenkant (inschatting van verontreiniging door bitumen, testplan Fase 2) en alle andere kanten 1mm verwijderen. Inzet na verzagen als verdiepingsvloer (180mm) voor Heijmans houtskeletbouw eengezinswoning. Totaal 8,7m3 [zie figuur5] of als wanden voor Heijmans One tiny house (CLT platen van 81 mm) ,totaal 11,8 m3 per stuk	34 dekplaten *16,5 *3,0 *0,32m = 555 m3 (29% van de hoeveelheid hout in het werk) Aantal dekplaten: 51,2 / 3= 17	93% hergebruik, 7% verlies door verwijderen buitenste laag van 20 mm aan bovenzijde, exclusief zaagverliezen
Dwarsdragers 16,5m x 0,26m x 0,4m	100 jaar	Verwijderen buitenste 1mm en gebruik als kolom in houtskeletbouw.	34 dekplaten: 17*34*3*0,26*0,4 = 180m3 dwarsdragers (9% van de hoeveelheid hout in het werk)	99%, exclusief zaagverliezen
Randelementen 100m x 1m x 0,1m	20-60 jaar	Afhankelijk van gebruikt materiaal. Accoya hout als sloophout en grondstof, HPL achten we niet herbruikbaar.	10m3 (0,5% van de hoeveelheid hout in het werk)	Variabel 0-100%

Tabel 3 Cascaderingsmogelijkheden BoLT-componenten



Figuur 5 Voorbeeld houten vloerontwerp Heijmans

Biogene CO₂-opslag

GLT-leverancier Schaffitzel gebruikt vooral vurenhout (Picea Abies) uit Tsjechië. Het bos van herkomst ligt dichtbij de Oostenrijkse grens. Van het bos naar de zagerij in Oostenrijk gaat het transport voor 80% per spoor en voor 20% per vrachtwagen. Schaffitzel koopt het hout van de zagerij en krijgt het hout geschild (ontdaan van de bast) geleverd per vrachtwagen. Overige bronnen van hout zijn Oostenrijk (15%) en Duitsland (5%). De verliezen van boom tot bewerking tot GLT zijn ongeveer 35%. Dit komt door verwijderen bast (5-10%), verzagen (10-15%), verwijderen slechte delen (5-10%), schaafverliezen (5-10%). De houtresten worden verzameld en gebruikt voor energieopwekking voor de zagerij van Schaffitzel.

Het vurenhout legt tijdens de groei 622 kg/m³ biogene CO₂ vast. Met 1.954 m³ hout, wordt door BoLT 1.215.249 kg biogene CO₂ vastgelegd. Ervan uitgaand dat in de levenscyclus van het hout ook ergens onvoorziene biogene CO₂ vrijkomt wordt dit gehalveerd. 607.624 kg biogene CO₂-vastlegging vermenigvuldigd met een schaduwprijs van €0,05 MKI per kg CO₂ is omgerekend €30.381,-MKI.

Met ingang van vanaf 1 januari 2021 rekent Nederland net als Europa ook met -1/+1 methode voor biogene CO₂. De uitkomst is nog steeds gelijk, vanwege de balans tussen vastlegging in module A en vrijkomen in module C. Het impactverschil is dus uiteindelijk nul. Het effect van tijdelijke opslag wordt nog steeds niet meegenomen, zowel niet in NL als ook niet op Europees niveau.

In figuur 5 t/m 7 is voor BoLT inzichtelijk gemaakt wat de biogene CO₂-opname doet over de levenscyclus. Dit verloop staat haaks op de directe uitstoot van de conventionele bouwmaterialen als beton en staal, waarbij er geen vastlegging plaatsvindt en de impact stukken hoger uitkomt.

Bij deze -1/+1 methode wordt het uitgangspunt gehanteerd dat de CO₂ aan het eind van de optimale cascadering weer vrij komt bij verbranding. Dit is wat ons betreft geen waarschijnlijk scenario. Het is erg goed denkbaar dat als deze biogene CO₂ na lang cascaderen weer vrijkomt bij een verbrandingsinstallatie, dat deze dan zal worden afgevangen.

Een mondiaal toenemende vraag naar duurzaam hout, zal uiteindelijk leiden tot aanplant van meer bossen. Op macroniveau zal dit uiteindelijk leiden tot een CO₂-reductie in de atmosfeer en bijdragen aan het behalen van de klimaatdoelen.

Resultaten per model

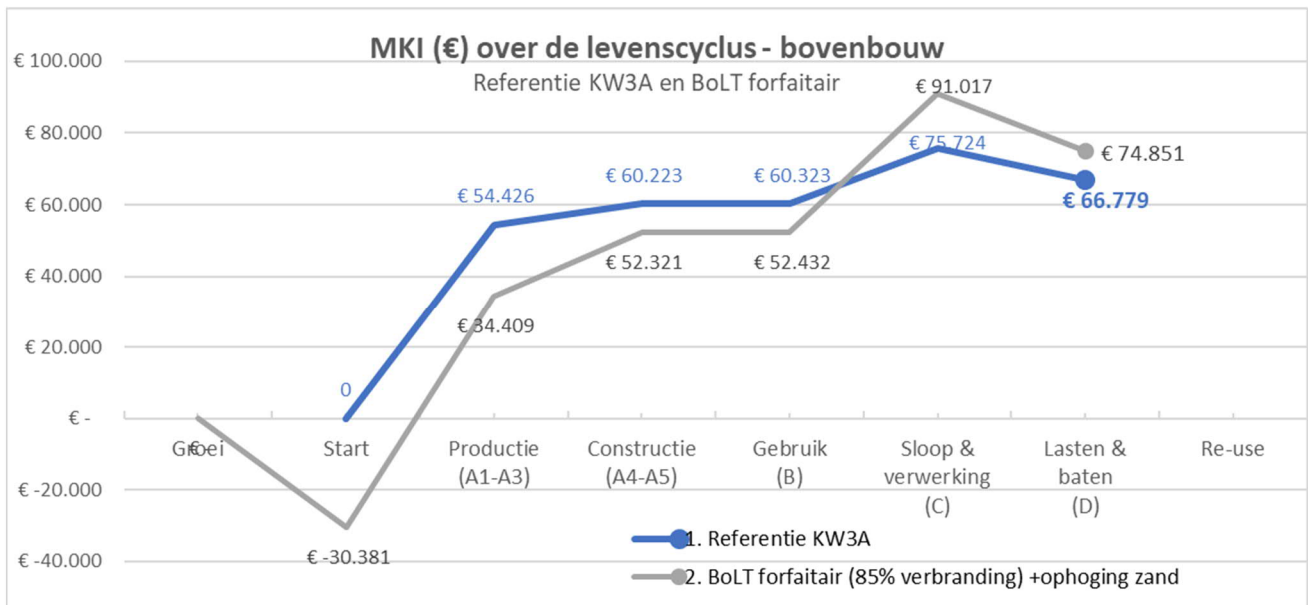
Met de uitgangspunten hebben we naast model 1. Referentie KW3A en 2. BoLT forfaitair (85% verbranding) uit paragraaf 3.1, nog twee modellen doorgerekend. In model 3 is voor BoLT module D herberekend volgens het BoLT-scenario in tabel 2. Model 4 is vergelijkbaar met model 3 met daarbij inzichtelijk gemaakt wat gebeurd als de biogene CO₂ niet vrijkomt door optimaal cascaderen.

	Format milieu-impact					Aanvullende Circulariteitsparameters (excl. zand)							
		MKI per laag en totaal	bovenbouw incl. zand ophoging	CO2-eq.	bovenbouw incl. zand ophoging	ADP Sb.-eq.	MCI (%)	Primair, niet hernieuwbaar (kg)	Aandeel primair	hernieuwbaar of secundair (kg)	Aandeel hernieuwbaar of secundair	Materialen totaal (kg)	Totale materiaal-reductie
1. Referentie KW3A	Onderbouw	€ 33.814	0	360.335	0	1.821	56%	2.303.517	0%	83.825	4%	2.387.342	0%
	Bovenbouw	€ 66.779	€ 66.779	831.133	831.133	3.414	57%	2.933.452	0%	188.386	6%	3.121.838	0%
	Totaal	€ 100.593		1.191.468		5.235	56%	5.236.969	0%	272.211	5%	5.509.180	0%
2. BoLT forfaitair (85% verbranding)	Onderbouw	€ 51.836	€ 18.022	549.215	188.880	3.038	56%	2.303.517	0%	83.825	4%	2.387.342	0%
	Bovenbouw	€ 56.829	€ 74.851	521.521	710.401	4.065	59%	294.444	90%	877.157	75%	1.171.601	62%
	Totaal	€ 108.666		1.070.736		7.103	57%	2.597.961	50%	960.982	27%	3.558.943	35%
3. BoLT - Module D (hergebruik 80%)	Onderbouw	€ 51.836	€ 18.022	549.215	188.880		56%	2.303.517	0%	83.825	4%	2.387.342	0%
	Bovenbouw	€ 48.750	€ 66.772	344.880	533.760		85%	289.065	90%	877.157	75%	1.166.222	63%
	Totaal	€ 100.586		894.095			65%	2.592.582	50%	960.982	27%	3.553.564	35%
4. BoLT Module D + cascaderen (Niet vrijkomen biogeen CO2)	Onderbouw	€ 51.836	€ 18.022	549.215	188.880		56%	2.303.517	0%	83.825	4%	2.387.342	0%
	Bovenbouw	€ 18.369	€ 36.391	-196.607	-7.727		85%	289.065	90%	877.157	75%	1.166.222	63%
	Totaal	€ 70.205		352.608			65%	2.592.582	50%	960.982	27%	3.553.564	35%

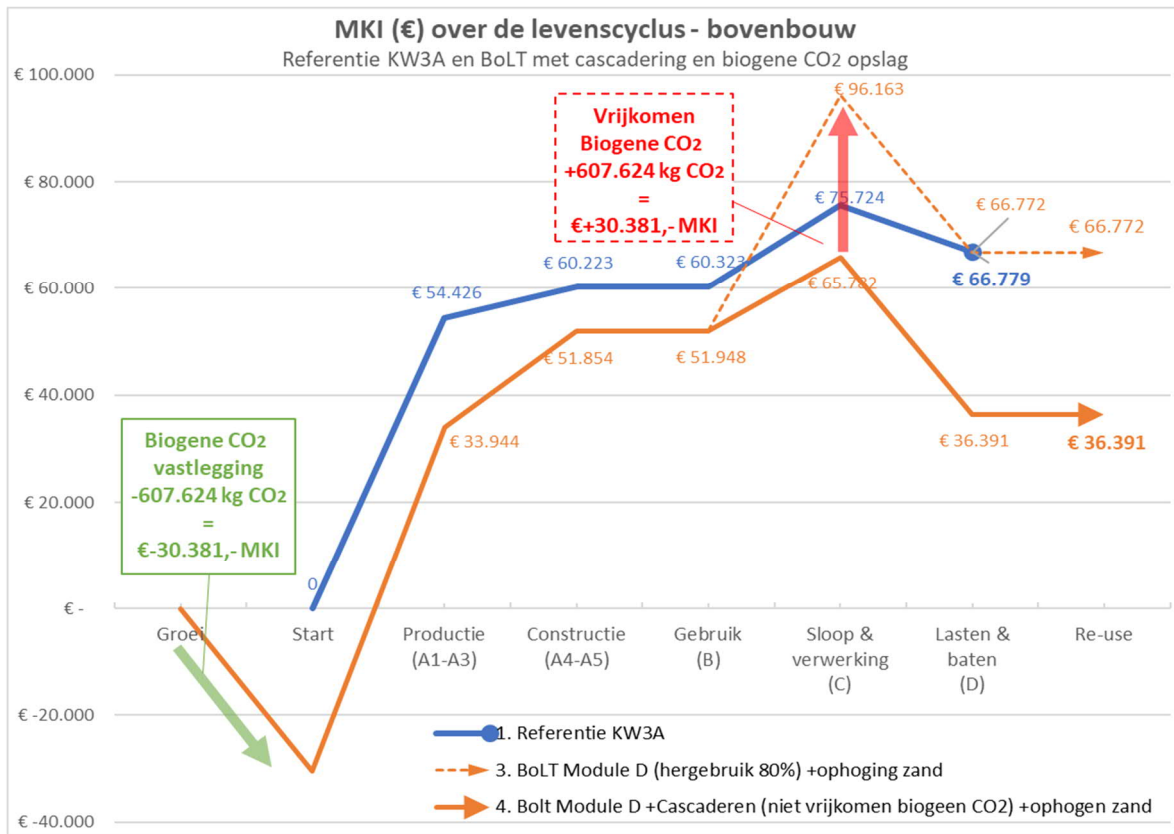
Tabel 4 Overzicht resultaten milieu-impact en circulariteitsindicatoren per model.

Model 3 heeft met €48.750,- MKI een reductie van 27% ten opzichte van de Model 1 Referentie KW3A (€66.779,- MKI). Model 4 is voor BoLT het meest representatief en resulteert in een MKI van €18.369,-, een reductie van 72%.

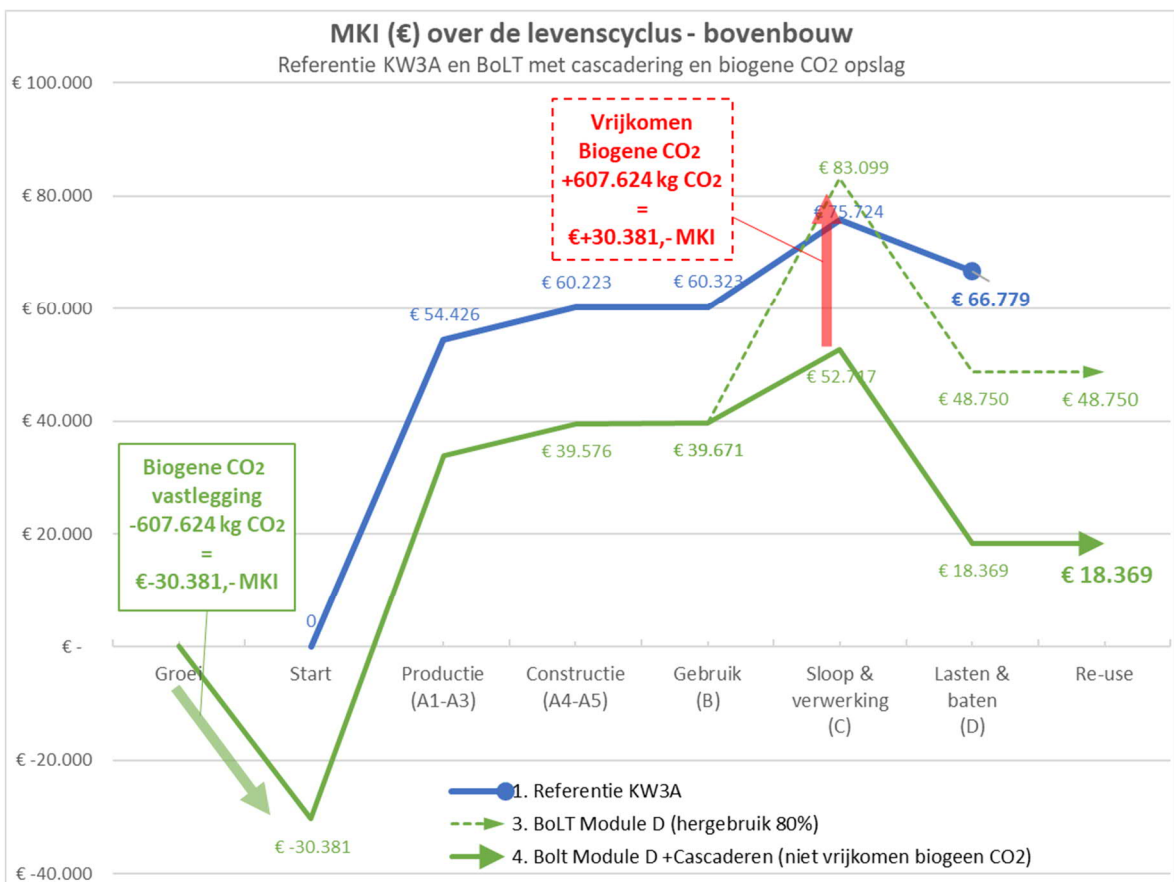
De waarden in de gekleurde cellen uit tabel 4 corresponderen met de eindwaardes (module D) van de gekleurde curves in figuur 5 t/m 7. Deze grafieken geven inzicht in de MKI per levenscyclus fase.



Figuur 5 MKI over de levenscyclus KW3A en BoLT



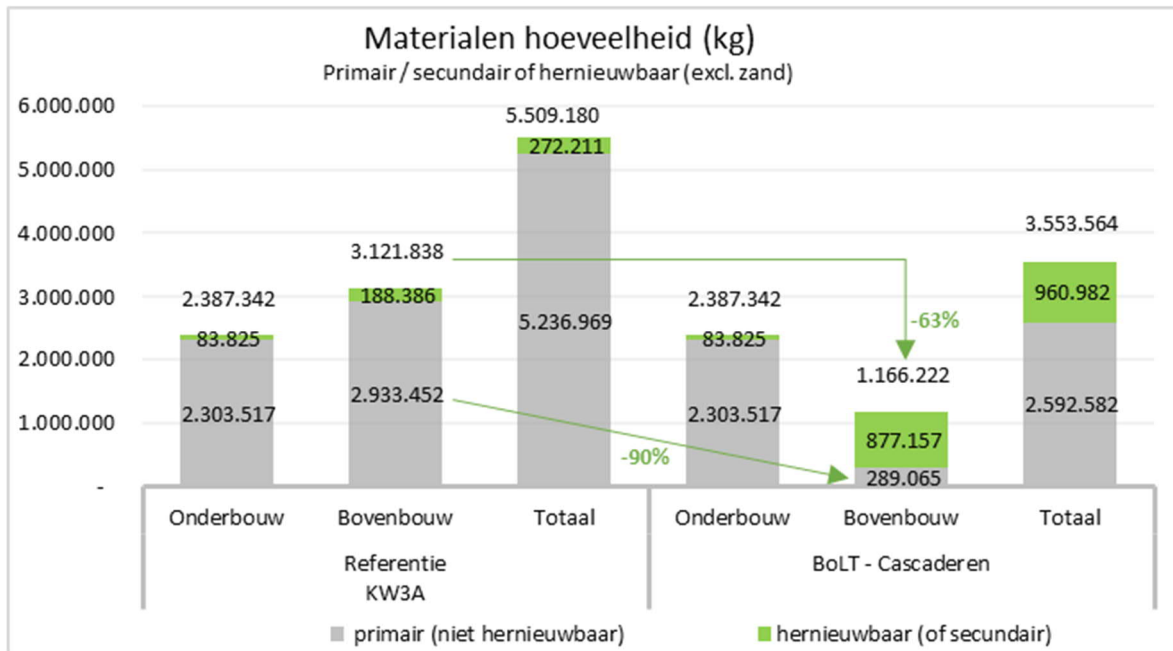
Figuur 6 MKI over de levenscyclus KW3A en BoLT



Figuur 7 MKI over de levenscyclus KW3A en BoLT

Circulariteit

Bij de circulariteitsgetallen zijn de hoeveelheden extra zand voor ophoging buiten beschouwing gelaten, omdat het materiaal lastig te duiden is als primair, secundair, hernieuwbaar of hergebruikt. Daarnaast gaat het vaak snel over grote hoeveelheden, wat het beeld van andere bouwmaterialen overschaduwt. De impact van het transport van dit zand wordt reeds meegenomen bij milieu-impact uitgedrukt in de MKI, CO2 en ADP berekening.

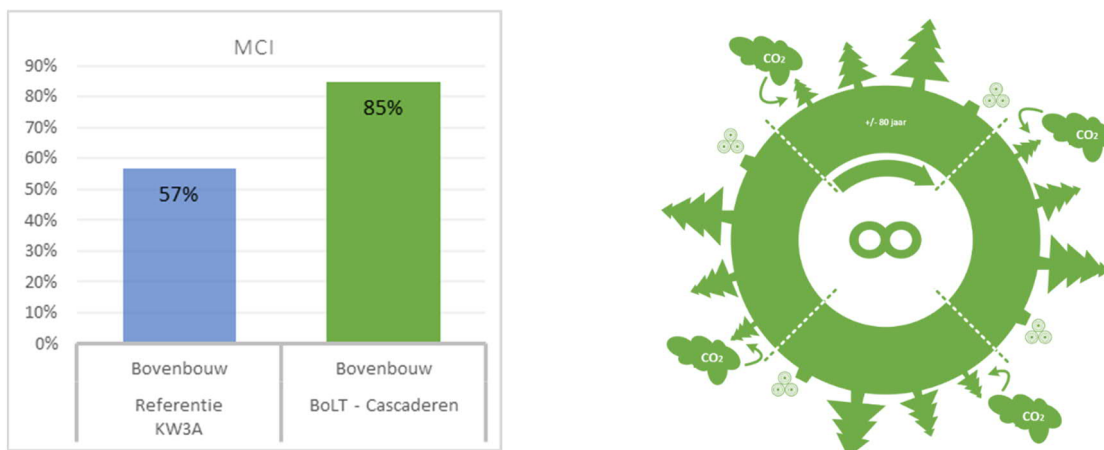


Figuur 8 Materiaalhoeveelheden (kg)

De totale materiaalreductie bovenbouw BoLT ten opzichte van KW3A is 63% en reductie van gebruik van primaire (niet hernieuwbare) materialen is 90,1% (figuur 8). Hiermee kunnen we de circulariteitsdoelstelling van de Rijksoverheid van 50% besparing in 2030 ruimschoots behalen (zie paragraaf 1.2).

Het aandeel niet primair (en/of hernieuwbaar!) van het totale materiaal KW3A bovenbouw is 6,0%, bestaand uit het 30% recycling in betonstaal en 50% recycling in het asfalt onderlaagmengsel. Bij BoLT is het aandeel niet primair (en/of hernieuwbaar) 75,2%. Hiermee maakt BoLT een grote sprong richting de circulaire doelstelling van de Rijksoverheid om in 2050 100% hernieuwbare en gerecyclede materialen toe te passen.

De Materiaal-Circulariteits-Indicator van BoLT voor model 4 komt uit op 85%, een verhoging van 28%.



Figuur 9 Materiaal-Circulariteits-Indicator Referentie en BoLT

Gebruikte parameters en gegevens

Voor de EPD waarden van het gebruikte CLT maken we gebruik van de door Derix verstrekte Environmental Product Declaration (EPD) X-LAM (Cross Laminated Timber), End of validity: 11-06-2024.

Voor GLT zijn waardes uit de NIBE-tool aangehouden uit profiel "1 m3 Glued laminated timber, for outdoor use {RER} | production | Cut-off, U (of project Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - unit)".

De waardes voor zowel MKI, CO2 als ADP van beide profielen komen relatief met elkaar overeen (tabel 5).

Milieu-impact per m3	MKI (€)	CO2-eq.	ADP Sb.-eq.
CLT (Derix)	€20,27	168,0	1,17
GLT (NIBE-tool)	€25,9	221,9	1,7

Tabel 5 Milieu-impactprofiel CLT/GLT.

De waarden en uitgangspunten voor de berekeningen van de MKI BoLT en de MKI BoLT-cascadering hebben we laten reviewen door NIBE als onafhankelijke expert. Daarnaast hebben we de MKI over de levenscyclus ook met NIBE doorgenomen.

Conclusie

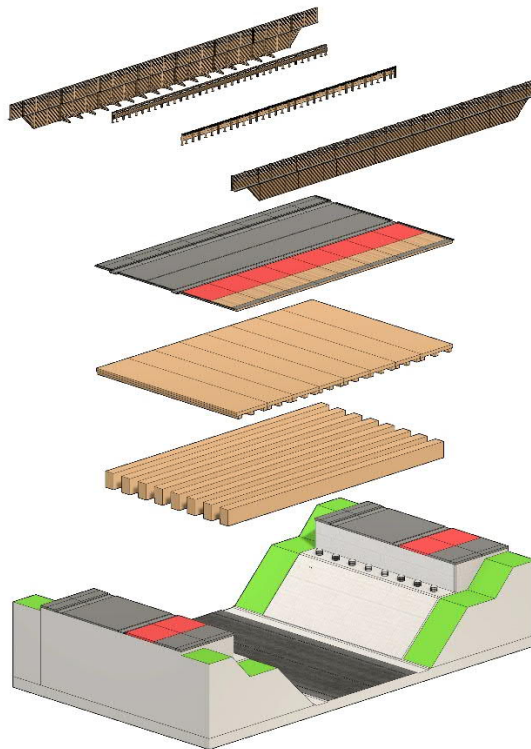
De BoLT oplossing laat conform onze verwachtingen erg positieve resultaten zien in vergelijking met KW3A. Zowel op MKI (-72%), als op CO2 en circulariteit. Alleen bij ADP zien we een stijgende impact, deze blijft echter lastig te duiden door gebrek aan inzicht.

De hoge circulariteitspotentie van BoLT is inzichtelijk gemaakt met aanvullende indicatoren als de MCI en de scoring aan de nationale circulariteitsdoelstellingen. Beide hebben we laten toetsen door ter zake kundige derden. Door toepassing van hernieuwbare materialen faciliteert BoLT biogene CO2-vastlegging. Door het circulair ontwerp faciliteert het toekomstig hoogwaardig hergebruik en cascadering resulterend in waardebehoud en een significant verschil op milieu-impact en circulariteit. Wij tonen hiermee aan dat het bouwen met hout circulariteit dichterbij brengt.

3.2 Haalbaarheid

Bridges of Laminated Timber.

Het BoLT-ontwerp, gebruik van losmaakbaar kruislaaghout en gelamineerd hout in een verkeersviaduct was bij begin van het SBIR traject niet meer dan een concept. Elk van de onderdelen had zich al bewezen, maar alles bij elkaar brengen in een ontwerp dat voldoet aan de richtlijnen (ROK en Eurocode) was niet vanzelfsprekend. Voor ons is het concept nu op TRL5 (de voor het prototype benodigde technologieën werken onder relevante omstandigheden). Naast de kosten leek ook de ontwerplevensduur van 100 jaar een uitdaging. We bespreken in dit hoofdstuk de maatregelen om deze levensduur te halen.



Figuur 10 BoLT-principe

Door ons alleen te richten op de bovenbouw konden we in de beschikbare tijd de juiste diepgang bereiken. Om ook voor de onderbouw een circulair alternatief uit te werken zou te veel tijd kosten. Dat is een mogelijke vervolgstap.

Ons concept is niet een volledig houten viaduct, maar een volledig houten bovenbouw op een conventionele onderbouw (figuur 10). Het concept is geschikt voor renovatie-opgaven en nieuwbouw. Zowel bij renovatie als bij nieuwbouw is het geringere gewicht van hout in vergelijking met beton een voordeel in transport, montage en onderbouw (bij renovatie behoud van onderbouw, bij nieuwbouw een lichtere onderbouw). We hebben nog geen keuze gemaakt voor de materialen voor de geleiderails en leuning. Deze bestaan voor bepaalde wegklassen wel in hout maar worden wel in combinatie het staal toegepast. In fase 2 gaan we verder op in. Het heeft geen invloed op de haalbaarheid het BoLT-ontwerp.

Literatuurstudie

Ons eerste doel was te inventariseren of er bruggen te vinden waren met vergelijkbare karakteristieken, dat wil zeggen bruggen met een volledig houten bovenbouw. Bestuderen van dergelijke bruggen zou ons op weg helpen om een eerste onderbouwing van de haalbaarheid te krijgen.

We hebben een aantal voorbeelden gevonden, waarvan de brug in Mistissini, Quebec Canada het meest sprekende voorbeeld is. Een verkeersbrug met houten GLT-liggers en GLT dek op een betonnen onderbouw. Dichter bij huis is de verkeersbrug in Schwarzach/Hengersberg, Duitsland een voorbeeld met een houten bovenbouw constructie, een CLT dek op GLT-liggers. Deze studie maakt duidelijk dat onze uitgangspunten van een verkeersbrug met volledig houten bovenbouw en een levensduur van 100 jaar mogelijk is.

Rijkswaterstaat basisspecificatie

Elk ontwerp begint met een eisenanalyse. Naast onze eigen eisen voor het BoLT-ontwerp (gebruik CLT en GLT, losmaakbaar/modulair, overspanning 25 meter) hebben we de 43 eisen in de basisspecificatie vaste bruggen beschouwd [RWS Basisspecificaties vaste bruggen, conceptversie 4.0.3, 2 maart 2017]. In §4.1.1 van ons Haalbaarheidsrapport gaan we in op deze 43 eisen. Het BoLT-ontwerp voldoet aan veel van de eisen zonder verder onderzoek; voor een aantal was nader onderzoek nodig. Deze eisen (tabel 6) vormen de scope van ons haalbaarheidsonderzoek. De verificatie van deze eisen staat in §4.2 - §4.8 van ons Haalbaarheidsrapport. Hieronder bespreken we de eisen en de uitkomsten van de verificatie. Meer informatie is te vinden in het Haalbaarheidsrapport.

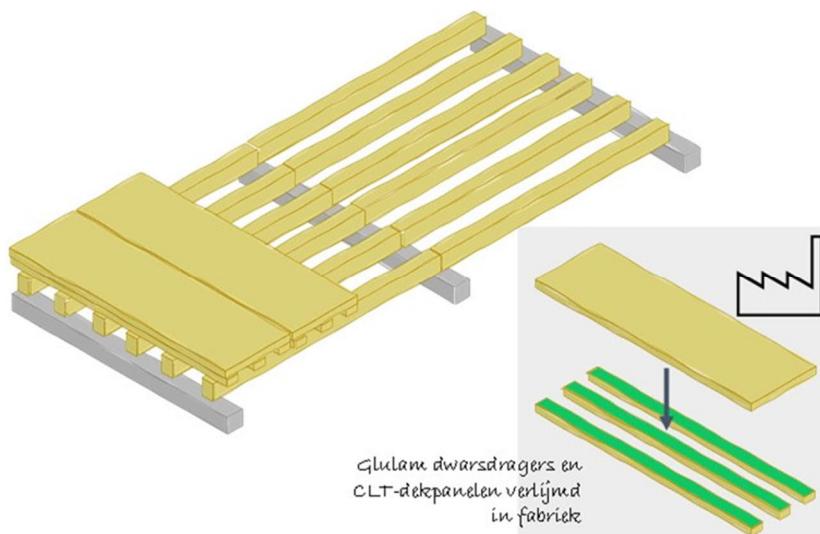
Eis	Omschrijving	Verwijzing Haalbaarheidsrapport
VB_eis003	Dragen belastingen	§ 4.2 Hoofddraagconstructie/verbindingen
VB_eis004	Betrouwbaarheid profiel van vrije ruimte	§ 4.2 Hoofddraagconstructie/verbindingen
VB_eis005	Betrouwbaarheid constructief	§ 4.2 Hoofddraagconstructie/verbindingen
VB_eis006	Technische levensduur vaste brug	§ 4.3 Levensduur
VB_eis007	Technische levensduur componenten	§ 4.4 Waterdicht membraan/verhardingen § 4.5 Opleggingen
VB_eis016	Afvoeren hemelwater	§ 4.7 HWA
VB_eis020	Geluidemissie voegovergangen	§ 4.6 Voegen/naden
VB_eis021	Voorkoming aantastingsmechanismen	§ 4.3 Levensduur
VB_eis023	Esthetisch Programma van Eisen	§ 4.8 Vormgeving
VB_eis026	Sloopbaarheid	§ 4.2 Hoofddraagconstructie/verbindingen
VB_eis035	Asfalt op kunstwerken	§ 4.4 Waterdicht membraan/verharding
VB_eis040	Ontwerp conform ROK	§ 4.2 Hoofddraagconstructie/verbindingen

Tabel 6 Eisen nader onderzoek

Optiestudie, keuze matrix

Er zijn negen varianten de revue gepasseerd voor de uiteindelijke eenvoudig lijkende keuze van onze voorkeursvariant: een bovenbouw met GLT liggers van 25 meter lang, 1,4 meter hoog en 1 meter breed (figuur 11). De hart-op-hart afstand van de liggers is 2 meter om inspectie mogelijk te maken. De dekelementen worden dwars op de hoofdliggers aangebracht voor de stijfheid in dwarsrichting. Door dit gestapelde systeem is de hoogte van het ontwerp vrij groot, met nadelen als de extra benodigde hoogte van de toeritten. Maar dit systeem zorgt wel voor het aantoonbaar voldoen aan 100 jaar levensduur conform de vernieuwde eurocode voor houten bruggen (prEN1995-2).

De varianten zijn gerapporteerd in Haalbaarheidsrapport §2.4 Optiestudie. Ze zijn beoordeeld aan de criteria TRL-niveau, sterkte, vervorming, levensduur, uitvoerbaarheid, kosten, opbrengsten, circulariteit en hinder. Hieruit volgde de voorkeursvariant. De sterke punten van dit ontwerp zijn: eenvoudig in systeem (krachtswerking helder, weinig kritieke verbindingen, eenvoudig montage), maximale waarborging van minimaal 100jr levensduur (hoofdligger: bescherming door waterdicht membraan en overstek dekelementen, ventilatie voor droging, inspectie mogelijk) en vervangbare dekelementen voor hergebruik.



Figuur 11 Voorkeursoptie BoLT-ontwerp

Constructieve analyse

De constructieve analyse van het concept was gericht op aantoonbaar voldoen aan de maatgevende eisen in de ROK en de Eurocode (constructieve veiligheid en doorbuiging). De ROK heeft (nog) geen aanvullende eisen op de Eurocode 5 voor houtconstructies. De gebruikte producten in het BoLT-ontwerp, zoals CLT en GLT, passen binnen het toepassingsgebied van de huidige normen met prestatie-eisen voor kruislaags verlijmdde platen EN16351 en voor verlijmdde liggers EN14080 voor gebouwen en bruggen. Er is bewust niet gekozen voor het gebruik van verlijmdde koker-liggers, aangezien deze buiten het toepassingsgebied van laatstgenoemde norm vallen en de haalbaarheid hiervan nog niet is aan te tonen.

De analyse richtte zich op het vaststellen van de afmetingen van de voorkeursvariant. Zowel de MKI berekening als het Economisch perspectief waren afhankelijk van deze maten voor de hoeveelheden en kosten.

De hoofddraagconstructie en de verbindingen zijn op essentiële punten getoetst aan de ROK-voorschriften en de Eurocode 5. Dit betekent dat er eerst een parametrisch constructief model is gemaakt [Rhino met plug in Grasshopper en EEM-Karamba] voor het hele systeem. Met dit model zijn de berekeningen uitgevoerd om te bepalen welke maten voor elk van de onderdelen nodig zijn om te voldoen aan de voorschriften. Daarna is gekeken naar de krachtsafdracht in de verschillende verbindingen. Zaken als de materiaaleigenschappen, eigen gewicht van de constructie (inclusief rustende belastingen), verkeersbelasting, temperatuurbelasting, belasting- en combinatiefactoren zijn meegenomen. De rapportage over deze berekeningen staat in §4.2 en de verschillende bijlagen van het Haalbaarheidsrapport [Appendix D Berekening voorkeursoptie D1 Uitgangspunten, D2 Globaal rekenmodel, D3 Toetsing doorsnedes hoofddraagconstructie, D4 toetsing verbindingen, D5 oplegreacties; Appendix E Gevoeligheidsstudie afmetingen langliggers; Appendix F Afmetingen variant 1a, 2 en 3; Appendix G Handberekeningen voegen, equivalente materiaaleigenschappen dek; toetsing verbindingen].

In het hoofddraagsysteem dragen de hoofdliggers de overspanning zonder composietwerking met CLT dekelementen, omdat we in deze fase nog niet met zekerheid kunnen aantonen dat de naden tussen de dekelementen altijd goed aanliggen en de verbinding met de hoofdliggers voldoende stijf is. De verbindingen en de CLT dekelementen zijn wel getoetst op composiet werking, zodat eventuele composiet werking opneembaar is. Dit aspect wordt verder getest in het prototype en we verwachten dat composiet werking mogelijk is zodat we de afmetingen kunnen optimaliseren.

In de onderstaande tabel 7 zijn de elementen van het concept weergegeven en de toets die is gedaan op conformiteit met de ROK en Eurocode. Niet alle toetsen zijn relevant voor elk element.

Element	Vervorming	Normaal- / buigspanning	Afschuiving	Torsie
Langliggers	Voldoet	voldoet	Voldoet	Voldoet
Dwarsliggers		Voldoet	Voldoet	
Dek		Voldoet	Voldoet	
Asfalt		Voldoet		
Dek-dek verbinding		Voldoet	Voldoet	
Langligger-dwarsliggerverbinding		Voldoet	Voldoet	

Tabel 7 Maatgevende elementen

De conclusie is dat binnen de berekende afmetingen het ontwerp voldoet aan de eisen van de ROK en de Eurocode. Er is een aantal details te ontwerpen, te analyseren en te toetsen, maar deze hebben geen invloed op het resultaat. We hebben aangetoond dat we een prototype kunnen bouwen met de gewenste afmetingen dat voldoet aan de ROK en de Eurocode. En dat er nog ruimte is voor optimalisaties. [ROK 1.4 Richtlijn Ontwerp Kunstwerken, 1-4-2017] [Eurocode EN 1990; EN1991-2; EN1995-2]

Levensduur beschouwing

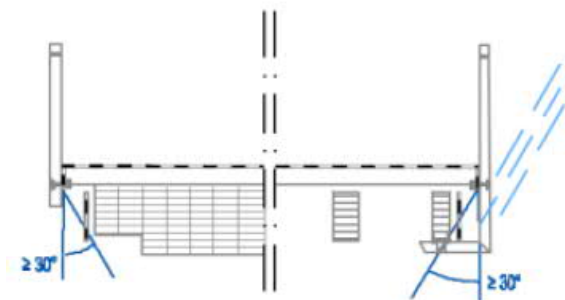
De belangrijkste bedreiging van hout is vocht. Bij een vochtgehalte boven 28% treedt schimmelgroei op en vermindering van de levensduur van hout. De Eurocode eist dat het vochtgehalte in het hout niet meer dan vier maanden per jaar boven de 20% komt. Voor een lange levensduur van hout is dan ook bescherming tegen vocht nodig, zowel neerslag als luchtvochtigheid.

De voornorm prEN1995-2 (in ontwikkeling) stelt dat bij navolgen van de duurzaamheidsregels uit die norm, beschutte houten bruggen een theoretische levensduur van 100 jaar hebben. Ons concept volgt deze regels: alle niet vervangbare dragende delen zijn beschermd, stilstaand water op de brug is voorkomen, de zijkant is beschermd tegen regeninslag, de elementen zijn geventileerd en inspecteerbaar.

De losmaakbaarheid van de dekelementen dient om in onverwachte situaties de elementen te wisselen en het hoofddraagsysteem te beschermen.

Hoofdliggers

Het dek en een waterdicht membraan beschermen de hoofdliggers en zorgen ervoor dat er geen regen van boven op de liggers kan vallen. De randelementen beschermen tegen zijwaartse regeninslag. Hiertoe steken de randelementen zover door beneden het dek dat regeninslag onder een hoek van minimaal 30 graden de hoofdliggers niet kan bevochtigen (figuur 12).



Figuur 12 Bescherming tegen regeninslag conform prEN1995-2

Een tweede maatregel is de ventilatie rondom de hoofdliggers en de ventilatie tussen dek en hoofdligger die gevormd wordt door de dwarsdragers. Als er toch water door het dek heenkomt, is er geen direct oppervlaktecontact met de hoofdliggers. De luchtstroom tussen dek en hoofdligger werkt als bescherming, want de hoofdligger kan makkelijk drogen. Door de afstand tussen de hoofdliggers en met de dwarsdragers is de bovenkant van de hoofdliggers inspecteerbaar.

De uiteinden van de hoofdliggers, dek en dwarsdragers hebben extra aandacht nodig omdat deze kant (de kopse kant) het kwetsbaarst is. We brengen daar een speciale coating aan, afgeschermd met een metalen beschermkap met ventilatie-openingen en we passen waterdichte voegen toe. Deze details zijn door Schaffitzel al toegepast in de brug Schwarzach/Hengersberg. We werken deze details in Fase 2 verder uit voor BoLT.

Door deze beschermingsmechanismen voldoen wij aan de nieuwe versie van de EN1995-2 (nog uit te brengen) en is 100 jaar levensduur voor de hoofdliggers zeker haalbaar.

Dek

Een waterdicht membraan en een dubbellaags asfaltverharding beschermen het dek. Het membraan loopt door tot over de randen van het dek, onder de schampkant door. Ter hoogte van de schampkant en de HWA-goot ligt een halve meter brede strook met een extra waterdicht membraan dat over de schampkant loopt. Dit detail is kritiek omdat er een risico is van wateraccumulatie in de HWA goot en er doorvoeren zitten naar het dek (bevestiging geleiderails en leuning). We gebruiken hier de detaillering die door Schaffitzel in Schwarzach/Hengersberg, Duitsland is toegepast, maar we willen deze ook zelf testen op het prototype. Het dek heeft in de vorm van asfalt, waterdicht membraan en aanvullend membraan op deze kritieke plek bij de HWA goot een dubbele verdediging. De levensduur van het dek is hiermee 100 jaar. Er is een kans dat het waterdichte bescherming gaat lekken. De dekelementen zijn daarom losmaakbaar verbonden, zodat ze bij lokaal falen eenvoudig kunnen worden vervangen. In fase 2 testen wij het membraan uitgebreid. De dwarsdragers beschouwen we voor de levensduur als onderdeel van het dek.

Randelementen

De houten randelementen spelen een rol in de bescherming van de brug tegen regeninslag. Deze elementen worden nat door regen en opspattend water vanaf het dek van het viaduct. Daarom is het de overweging waard om op deze locatie een duurzamer alternatief toe te passen zoals Accoya (geacetyleerd hout) of HPL (high pressure laminate). Beide zijn beter bestand tegen de inwerking van de elementen dan CLT of GLT. Accoya is duur maar vanwege de relatief kleine hoeveelheden is het de overweging waard. HPL is een bekende gevelbekleding die bestaat uit papierpulp en fenolhars met een toplaag van melaminehars.

Er is ook de mogelijkheid om de randelementen separaat te vervangen. Afhankelijk van soort kan naaldhout buiten tot wel 65 jaar mee. [Vlaams Instituut voor Bio-Ecologisch bouwen VIBE, Hout zonder chemische verduurzaming, 2007]. Haalbaarheidsrapport §4.3.1.

Randelementen spelen een rol in de esthetische kwaliteiten van een viaduct. Het zijn in het oog springende elementen en geven het object karakter. Goed gekozen randelementen geven de constructie slankheid. De Arup-architecten in Milaan hebben een aantal mogelijke randelementen ontworpen voor ons viaduct. Figuur 13 en 14 geven hiervan een impressie.



Figuur 14 Artist impression BoLT



Figuur 13 Mogelijke randafwerkingen

Brandweerstand

Een belangrijk ontwerpaspect bij het gebruik van hout is de brandweerstand. De Eurocode geeft geen specifieke voorschriften voor brand bij het ontwerp van viaducten. Massief hout is niet erg ontvlambaar en heeft een constante inbrandingsnelheid van ca. 0,7mm/minuut. Voor een 30 minuten brandwerendheid

moet er 28 mm extra materiaal in de liggers en/of het dek worden meegenomen ter compensatie (21 mm inbranding en 7 mm pyrolise zone). Een voordeel van hout ten opzichte van staal is dat het bij brand geen verlies in materiaal sterkte heeft. Na een 30 minuten brand is met bovenstaande compensatie de constructie nog steeds constructief veilig en direct weer te gebruiken. In Fase 2 doen we een nadere analyse hiervan. Haalbaarheidsrapport §4.3.2.

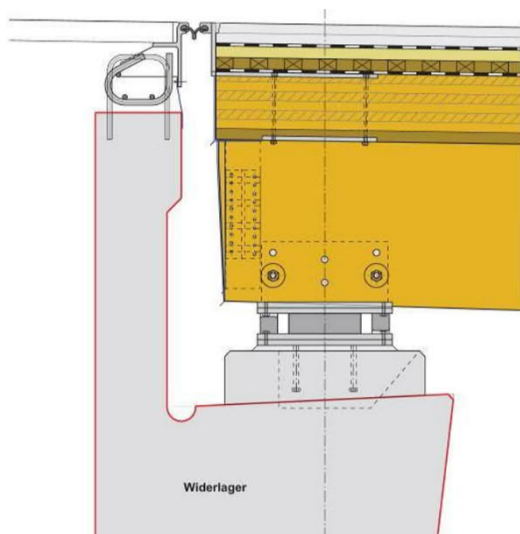
Waterdicht membraan en verharding

Het waterdichte membraan is essentieel in de bescherming van het dek tegen vocht. Deze membranen worden veel toegepast op betonnen viaducten en stalen bruggen en over hechting hierop is al veel bekend. De ervaringen met aanbrengen op hout en het hechtingsresultaat zijn beperkt. Bij de voorbeelden van houten bruggen zijn bitumineuze membranen met asfalt overlaging toegepast. We gaan ook uit van het aanbrengen van een bitumineus membraan, hetzij gespoten, hetzij gebrand op een primerlaag voor verbeterde hechting. Daar bovenop een tweelaags BrugFlex (2x40mm) asfaltmengsel. De flexibiliteit van dit mengsel past goed bij het verwachte flexibele gedrag van het houten dek. De elementen voor een waterdichte oplossing hebben we beschikbaar, het ontbreekt nog aan verificatie van de werking op een houten ondergrond en bij de naden van de dekelementen. Zowel in de laboratoriumtesten in Fase 2A als het prototype in Fase 2B gaan we dit testen. Onze oplossing moet voldoen aan de eisen van Rijkswaterstaat RTD1009 versie 2016. Haalbaarheidsrapport §4.5

We hebben oplossingen die we nog willen testen in het laboratorium en op het prototype. Deze oplossingen hebben zich op andere houten bruggen bewezen zodat de technische haalbaarheid is geborgd. Wij willen nog aanvullende materiaaltesten uitvoeren voor epoxy-membranen.

Voegen en opleggingen

De Informationsdienst Holz – Musterzeichnungen fuer Holzbruecken laat zien dat elastomerische opleggingen toepasbaar zijn bij houten liggers. Een aandachtspunt is de beperkte contactdruk loodrecht op de vezels van de hoofdligger. Dit is te beheersen met de afmetingen van het oplegblok en de dikte van de tussenplaten. Een type C oplegging (figuur 15) met verbinding aan de boven- en onderbouw is noodzakelijk om te voorkomen dat de bovenbouw niet aan de 'wandel' gaat bij de lage oplegdrukken. In Fase 2 werken we dit detail verder uit. Onze oplossing moet voldoen aan de eisen van Rijkswaterstaat RTD1012. Haalbaarheidsrapport §4.6



Figuur 15 Principeoplossing elastomere oplegging bij houten brug

Voor de analyse van het gedrag van de hoofdliggers bij de voegen hebben we de verwachte vervormingen door verkeer, vochtgehalte en temperatuur bekeken. De horizontale beweging is minder dan die van een betonnen viaduct, mede door de gunstigere thermische eigenschappen van hout (het zet minder uit). Verticaal is het gedrag ongunstiger: onder invloed van vochtgehalte kan een theoretische vervorming van 20 mm optreden. In de praktijk lijkt deze vervorming beperkter. De verandering van het vochtgehalte gebeurt alleen aan de buitenzijde van de hoofdliggers. De kern van de ligger blijft constant en verhindert vormverandering. Het is een aspect dat we in Fase 2 gaan monitoren.

Het belangrijkste ontwerpaspect van de voeg-oplossing is de waterdichtheid. We maken gebruik van de standaard waterdichte enkelvoudige voegoplossingen conform de RTD1007. Op dit kritieke onderdeel van de constructie, de kopse kant van de hoofdliggers is waterdichtheid essentieel. We werken dit detail verder uit in Fase 2.

Voor wat betreft opleggingen voldoen we aan eis VB_eis007 [Haalbaarheidsrapport §4.5]. We willen nog een meting doen, maar met een standaard enkelvoudige voeg met een rubberprofiel in stalen klauwen voldoen we aan eis VB_eis007 en VB_eis020 en de Rijkswaterstaat RTD1007-02 [Haalbaarheidsrapport §4.6]

Hemelwaterafvoer

Het BoLT-ontwerp gaat uit van een dwarsverkanting van 2.5% voor een goede afstroming naar de goot aan weerszijden van het rijdek. De langshelling van 0,5%-1,0% en de gootbreedte van 0,3m is voldoende om de neerslagintensiteit van 235 l/s/ha af te voeren conform RTD1008. Het detail van de goot en het membraan testen we in fase 2. Met deze ontwerputgangspunten voldoen we aan VB_eis016 en RTD1008 [Haalbaarheidsrapport §4.7]

Beheer en onderhoud

Hoewel we niet in gesprek zijn gegaan met de beheerders van RWS hebben we de onderhoudbaarheid wel goed beschouwd. Door de eenvoud van de constructie is de onderhoudbaarheid ten minste net zo goed als die van conventionele oplossingen. In fase 2 gaan we deze gezamenlijke beschouwing van onderhoudbaarheid en inspecteerbaarheid toetsen met beheerders. Uit de gesprekken met Schaffitzel/Miebach kwam naar voren dat het conserveren van de constructie niet nodig is mits deze goed tegen vocht wordt beschermd. Het conserveren van het hout zou regulier opnieuw moeten worden herhaald wat de onderhoudbaarheid niet ten goede komt.

Door de eenvoud van de constructie en de losmaakbare verbindingen is de montage- en demontagemethode eenvoudig. De beschrijving van de volgorde van montage en demontage is nog vrij algemeen. Met meer details van de verbindingen tussen dwarsliggers en hoofdliggers kunnen we de procedure preciezer beschrijven. Dit is onderdeel van het werk in Fase2.

Conclusie Technische haalbaarheid

De conclusie over de technische haalbaarheid van het BoLT-ontwerp is positief. We hebben aangetoond dat een viaduct met houten bovenbouw haalbaar is en aan de eisen van de Basisspecificatie vaste bruggen, ROK en Eurocode voldoet. Een aantal details verdient nog uitwerking, maar dat is in dit stadium van een innovatie op TRL5 acceptabel. We hebben aangetoond dat het BoLT-ontwerp onder alle relevante omstandigheden Technisch haalbaar is en een levensduur van 100 jaar heeft voor het hoofd draagsysteem. Een aantal secundaire elementen moeten we nog in detail uitwerken.

Ons Ontwerp-/Haalbaarheidsrapport is vanaf het indienen van dit rapport opvraagbaar.

Mogelijke optimalisaties

Zoals genoemd zien we mogelijkheden om de hoofdafmetingen nog te optimaliseren/reduceren. Concrete uitwerking hiervan gebeurt in Fase 2, wanneer we met Rijkswaterstaat het ontwerp verder vervolmaken.

Vervolgstappen voor fase 2a

Zie Test- en validatieplan.

3.3 Economisch perspectief

Rijkswaterstaat is dit SBIR-traject gestart om het aanbod te stimuleren. Arup, Heijmans en Schaffitzel hebben hard gewerkt om het BoLT-ontwerp verder uit te werken. In dit deel bespreken we de economische vooruitzichten van het concept. We volgen de klassieke economische elementen: aanbod, vraag en prijs. We staan stil bij de businessmodellen uit het eindrapport Open Leeromgeving themalijn Business en Valuecase – Circular infrastructure business models (2019) en de essentiële rol die restwaarde daarin speelt. We sluiten af met de conclusie over het economisch perspectief van de BoLT-ontwerp en onze aanbevelingen voor het vervolg.

Vraag

Er moet een vraag zijn waar het BoLT-ontwerp in voorziet. Het economische perspectief van een circulair concept als BoLT ligt in de verhouding tussen de initiële kosten, de LCC en de restwaarde. Het is essentieel dat de duurzame meerwaarde een dominante waardering krijgt in uitvragen. Door de schaalvergroting zal sneller het optimale ontwerp worden gevonden. Door bij nieuwbouw met lichtere onderbouwconstructies te werken zullen de aanlegkosten dichter bij elkaar komen te liggen.

Aanbod

De investering om het BoLT-ontwerp verder te ontwikkelen moet over meerdere exemplaren worden terugverdiend. Zonder vraag vanuit Rijkswaterstaat komt het aanbod niet tot ontwikkeling. Rijkswaterstaat heeft hierin als toonaangevende opdrachtgever in de Nederlandse infrastructuur een sleutelrol. Naast het ondersteunen van de SBIR is er een programma nodig dat op langere termijn terugverdienmogelijkheden organiseert voor verdere investeringen in circulaire oplossingen.

Prijs

Zoals genoemd gebruiken we KW3a als prijsreferentie. Het originele betonontwerp hebben we qua liggerlengte 6,5m ingekort om een 1:1 vergelijking mogelijk te maken. Er is met de oorspronkelijke kosten een prijs per vierkante meter bepaald. Aansluitend is de prijs uit 2016 geïndexeerd naar 2021. Uitgangspunt voor de kosten is een dek van 2x25,6x34 meter (=1740m²). De onderbouw en afbouw (leuningen etc.) is voor beide bovenbouwconstructies identiek gehouden zodat het verschil van sec het dek inzichtelijk wordt.

In tabel 8 laten we de prijsverschillen per m² dek zien. Dit zijn de grootste kostenelementen, een gedetailleerd werkblad is beschikbaar.

BRUGONDERDEEL	BETONNEN BOVENBOUW		HOUTEN BOVENBOUW		HOUTEN BOVENBOUW OPTI	
	prijs per onderdeel	prijs/m ²	prijs per onderdeel	prijs/m ²	prijs per onderdeel	prijs/m ²
prijs onderbouw (fundering / onderbouw)	€ 483.705,00	€ 278	€ 483.705,00	€ 278	€ 483.602,50	€ 278
prijs bovenbouw (alleen dek, randelementen)	€ 1.698.900,00	€ 976	€ 2.463.000,00	€ 1.416	€ 2.225.400,00	€ 1.279
prijs membraan	€ 22.803,00	€ 13	€ 104.400,00	€ 60	€ 104.400,00	€ 60
prijs asfalverharding	€ 38.696,00	€ 22	€ 46.988,00	€ 27	€ 46.988,00	€ 27
prijs afbouw / wegmeubilair / etc	€ 460.640,00	€ 265	€ 531.660,00	€ 306	€ 511.080,00	€ 294
TOTAAL	€ 2.704.744,00	€ 1.554	€ 3.629.753,00	€ 2.086	€ 3.371.470,50	€ 1.938
			hout duurder tov beton	34%	hout duurder tov beton	25%

LIFE CYCLE COSTS (100 jaar)	BETONNEN BOVENBOUW		HOUTEN BOVENBOUW		HOUTEN BOVENBOUW	
	prijs per onderdeel	prijs/m ²	prijs per onderdeel	prijs/m ²	prijs per onderdeel	prijs/m ²
Vervangen deklaag asfalt 1x per 15 jaar	€ 103.650,00	€ 25,00	€ 69.100,00	€ 25,00	€ 69.100,00	€ 25,00
Vervangen deklaag/onderlaag/membraan 1x per 30 jaar	€ 310.950,00	€ 75,00	€ 165.840,00	€ 60,00	€ 165.840,00	€ 60,00
Vervangen deklaag Brugflex 40mm 1x per 20 jaar			€ 243.600,00	€ 70,00	€ 243.600,00	€ 70,00
Vervangen deklaag/onderlaag (2x BFLX) 1x per 40 jaar						
Vervangen waterdicht membraan 1x per 40 jaar						
TOTAAL	€ 414.600,00	€ 238	€ 478.540,00	€ 275	€ 478.540,00	€ 275
			hout duurder tov beton	15%	hout duurder tov beton	15%

CAPEX en OPEX (100 jaar)	BETONNEN BOVENBOUW		HOUTEN BOVENBOUW		HOUTEN BOVENBOUW	
	prijs per onderdeel	prijs/m ²	prijs per onderdeel	prijs/m ²	prijs per onderdeel	prijs/m ²
TOTAAL	€ 3.119.344,00	€ 1.793	€ 4.108.293,00	€ 2.361	€ 3.850.010,50	€ 2.213
			hout duurder tov beton	32%	hout duurder tov beton	23%

Tabel 8 Kostenvergelijking Bovenbouw KW3A: Beton - Hout - Hout opti

De totale kosten per vierkante meter zijn 34% hoger voor het houten dek. De houten 'Opti' variant betreft de houten bovenbouw maar dan met 300mm geoptimaliseerde dekdikte. Voorzichtige beschouwingen laten zien dat dit mogelijk is. Dit heeft een gunstig effect op de benodigde toeritophoging bij de houten bovenbouw.

LCC-kosten

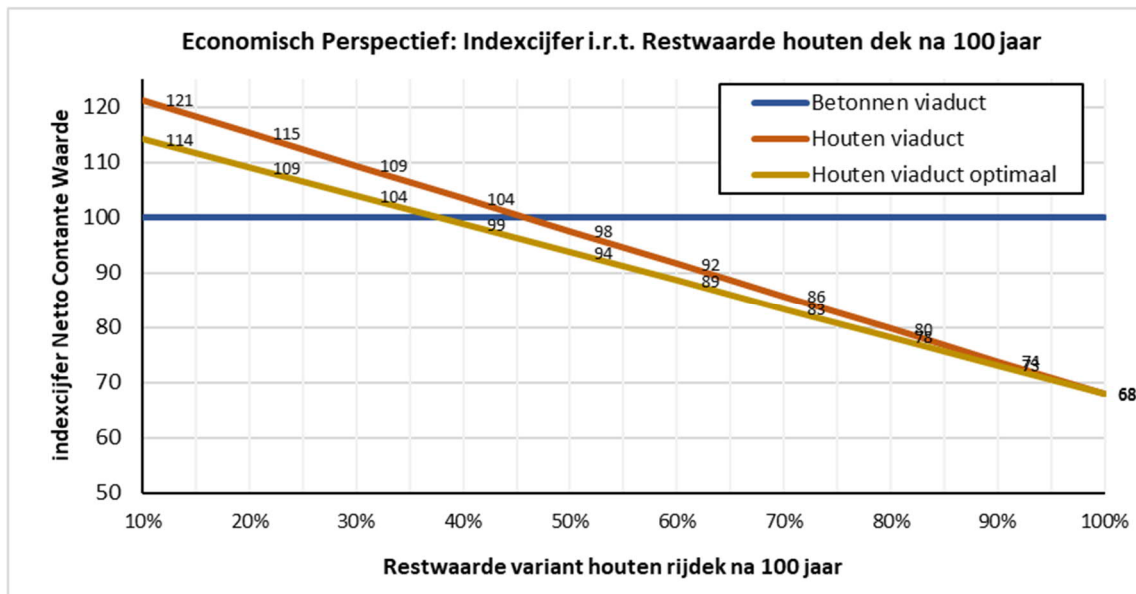
Voor de LCC-kosten hebben we ons alleen gericht op verschillen in kosten voor de instandhouding van het dek. Op het houten brugdek is een ander asfaltmengsel gekozen dan op het reguliere betondek namelijk tweelaags Brugflex (2x40mm). Verder is het van belang dat er geen ander onderhoud is voorzien aan het houten dek en de liggers. Mits deze elementen droog blijven is het BoLT-ontwerp hetzelfde in onderhoud als betonnen viaducten.

De LCC-kosten van het houten dek worden voor een groot deel bepaald door de vervanging van het waterdichte membraan. We rekenen met een vervanging eens per 40 jaar, dezelfde frequentie als de onderlaag. Volgens de asfaltexperts bij Heijmans is dit een realistische aanname.

Restwaarde

De restwaarde van het houten viaduct is de grote onbekende in het economische perspectief. In goede staat heeft hout een positieve restwaarde. Om de spreiding in restwaarde te bepalen tussen de BoLT en BoLT-opti variant ten opzichte van beton hebben we een Netto Contante Waarde bepaling gedaan. De toekomstige uitgaven worden naar het heden verrekend aan de hand van een discontovoet. In dit geval de RWS standaard discontovoet van 2,25%.

Door het restwaarde percentage te variëren in ons NCW rekenmodel hebben we voor elke NCW van BoLT en BoLT-opti bepaald hoe die zich verhoudt tot de NCW van beton. In figuur 15 is te zien dat bij een restwaarde van meer dan 45% respectievelijk 40% (snijpunten met blauwe lijn) de NCW van BoLT en BoLT-opti de NCW van beide lager is dan beton. Deze ondergrens voor de restwaarde lijkt conservatief en dat sterkt het vertrouwen in de potentie van de business case van het BoLT-ontwerp.



Figuur 15 Indexcijfer restwaarde BoLT en BoLT-opti

Businessmodellen

De businessmodellen uit de eindrapportage Open Leeromgeving zijn vier steeds integralere visies op assetmanagement (tabel 9). De essentie is inzicht in risico's en restwaarde. Arup, Heijmans en Schaffitzel zijn ervan overtuigd dat het BoLT-ontwerp een positieve restwaarde heeft na 100 jaar gebruik. Het hout blijft in goede conditie en de vraag naar hout zal sterk toenemen komende jaren.

Na afronding van Fase 2B is er voldoende ervaring met het BoLT-ontwerp om een pilot te bouwen. De pilot zou op basis van LCC-kosten (rekening houden met restwaarde) aanbesteed kunnen worden, met een aparte opdracht voor monitoring en rapportage gedurende een aantal jaren. Als de uitkomsten van deze monitoring als open source beschikbaar komen, groeit het inzicht in risico's en restwaarde van de houten oplossing.

Digital twins van de eerste houten viaducten maken prestaties online inzichtelijk en helpen de restwaarde te bepalen. Elk element van het viaduct krijgt een unieke QR-code waarmee hergebruik al tijdens het functionele leven van het viaduct te plannen is. Transparantie over de resultaten van de monitoring is essentieel. Deze informatie geeft opdrachtgever en de markt inzicht in risico's en kansen. Dit is een opmaat naar andere businessmodellen zoals de pre-agree buy-back (model 2).

Businessmodel	Omschrijving	Relevantie voor BoLT
1. Coordinating client	Klant coördineert een reeks leveranciers in bouw, onderhoud en sloop en hergebruik van viaducten.	Logische eerste stap voor RWS om te komen tot meer ervaring met houten viaducten. Gezamenlijke inspanning om het risicoprofiel van houten viaducten vast te stellen. Materialenpaspoort voor alle onderdelen. Restwaarde bepalen haalbaar, hout in goede staat is een veelzijdig en flexibel materiaal dat op meerdere plekken inzetbaar is.
2. Pre-agreed buy-back	Klant laat een viaduct bouwen en onderhouden dat na gebruik onder voorwaarden wordt teruggenomen door de bouwer.	Door opgebouwde ervaring met een aantal viaducten zijn afspraken mogelijk over een buy-back gebaseerd op conditiemetingen en vooraf overeengekomen restkwaliteit en risicoprofiel.
3. Viaduct as a service	Klant betaalt bedrijf A een gebruiksvergoeding maar wordt nooit eigenaar van het viaduct.	Op dit moment nog niet relevant.
4. All-in consortium	Publiek-privaat consortium met een portfolio aan viaducten.	Als onder 3.

Tabel 9 Businessmodellen Open Leeromgeving

Re-use

De eerste prioriteit in hergebruik is het gebruik van de liggers als liggers in een volgend viaduct. Ongeveer 60% van het materiaal zit in de hoofdliggers. Een ander gebruik is als ligger met minder grote belasting, zoals een fiets/voetgangersbrug. Re-use voegt nogmaals 100 jaar toe aan de levensduur van de liggers. Ook het dek is, mits goed drooggehouden, herbruikbaar in een volgend viaduct. Het waterdichte membraan en de asfaltlaag gaan wel verloren.

Re-purpose

Hergebruik buiten het oorspronkelijke gebruik is het verzagen van de liggers tot spanten of gordingen in dakconstructies voor grote overspanningen (sporthallen, zwembaden, maneges en fabriekshallen). Hergebruik van het dek is mogelijk in de woningbouw. Heijmans is op dit moment bezig om in houtskeletbouw eengezinswoningen te ontwerpen. In deze woningen zitten verdiepingsvloeren van 180 mm dik. Zelfs met zaagverliezen en mogelijke verwijdering van de bovenste centimeters vanwege indringing van bitumen zitten er genoeg dekelementen in één viaduct om 60 woningen (555m³*93% hergebruik / 8,7 m³ per woning) van vloeren te voorzien. Het eindbeeld is om een woning volledig op basis van het beschikbare materiaal van een viaduct te bouwen.

Dit scenario voegt ca 80 jaar toe aan de levensduur van de liggers en dekelementen.

Recycle

Als laatste is het hout te gebruiken als verzaagde planken en balken of als input voor afgeleide houtproducten zoals spaanplaat en MDF. Dit voegt tientallen jaren toe aan de levensduur als onderdeel van een meubel.

Conclusie

Het economisch perspectief van het BoLT-ontwerp is afhankelijk van de vraag van overheidsopdrachtgevers naar circulaire oplossingen. Om het concept verder te ontwikkelen is een dominante waardering van circulariteit als gunningscriterium nodig: alleen daarmee is het mogelijk een verdere ontwikkeling te financieren. Daarbij moet een combinatie van de LCC-waarde en de restwaarde de doorslag geven. Dat het BoLT-ontwerp een restwaarde houdt na einde levensduur staat vast.

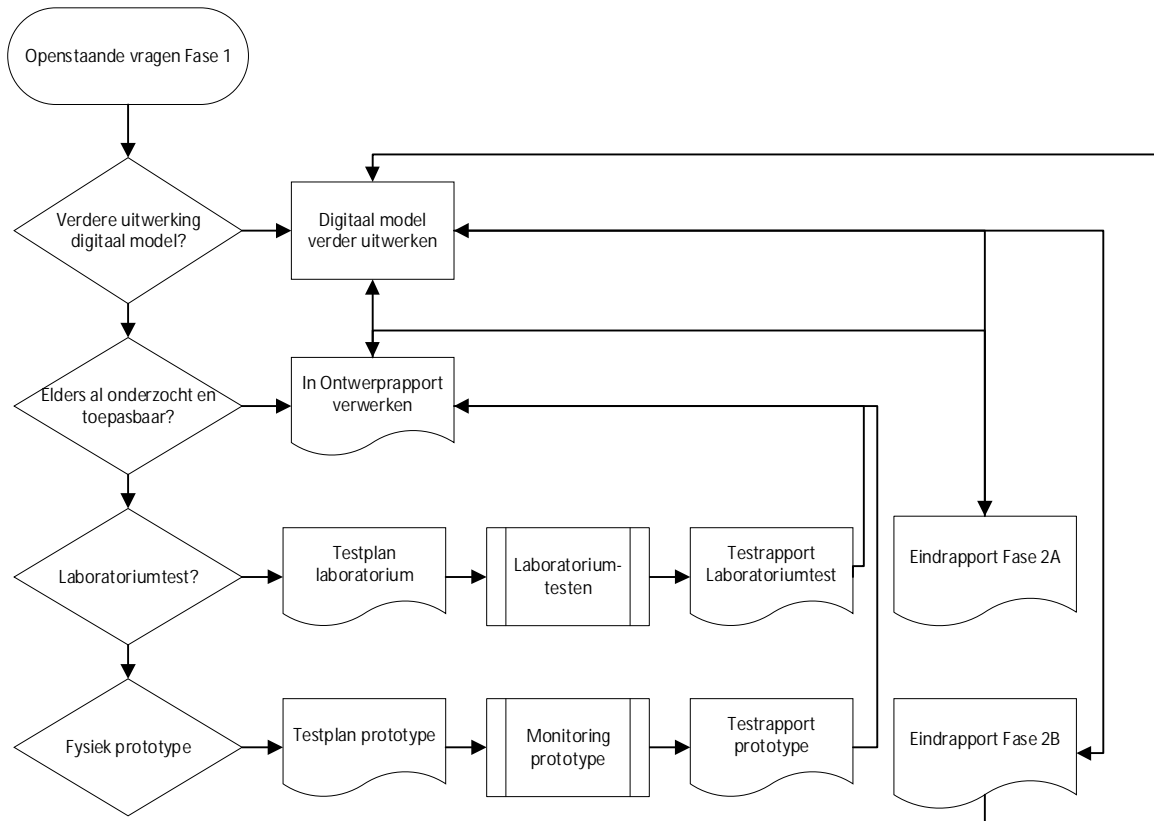
3.4 Uitwerking van het IE-recht en gebruiksrecht

We stellen het volledige ontwerp- en MKI-rapport na afloop van Fase 2B als open source document beschikbaar: een vrij gebruiksrecht voor eenieder [SBIR oproep § 5.5.1].

4. Voorstel voor fase 2

Test- en validatieplan

Ons test en validatieplan (figuur 16) is gebaseerd op detailvragen uit Fase 1. Een deel van deze vragen kan digitaal worden afgehandeld. Een ander deel is mogelijk al onderzocht en toepasbaar op ons concept. Deze twee categorieën beantwoorden we met prioriteit in Fase 2A en verwerken we in een bijgewerkte versie van ons Haalbaarheidsrapport.



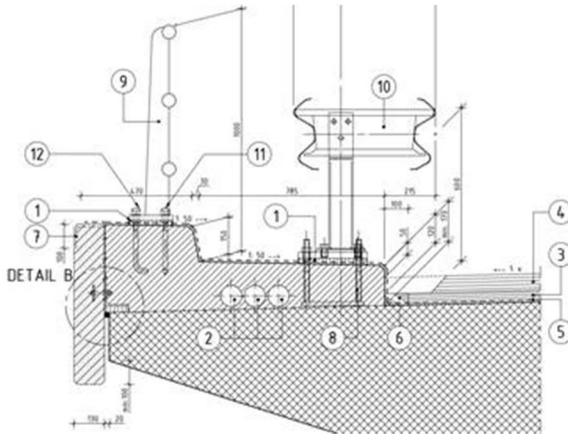
Figuur 15 Test- en validatieplan

Er zijn ook vragen die we niet digitaal kunnen afhandelen en die niet al elders zijn onderzocht. Een deel is met laboratoriumtests op geschaalde elementen te beantwoorden. Een andere categorie bestaat uit de testen die alleen met een fysiek prototype kunnen uitvoeren.

Nadere uitwerking en studie.

1. Berekeningen en mogelijke ontwerpaanpassingen die zijn gerapporteerd onder 3.2, 4.2.4, 4.3.4 in het Haalbaarheidsrapport versie 1. We bestuderen de noodzaak van dwarsverbanden tussen de hoofdliggers om een aantal belastinggevallen te kunnen valideren zoals
 - a. aanrijdbelasting,
 - b. belasting door rem- en aanzet van verkeer.
 We doen een model analyse van het effect van de belastingen op het bestaande digitale model, maken ontwerpaanpassingen indien nodig en passen het Haalbaarheidsrapport aan.
2. We maken een nadere beschouwing van de belasting bij brand.
3. We doen een nader onderzoek naar een mogelijke verbinding tussen dwarsdragers en hoofdliggers, stellen een Trade-Off matrix op en maken een testprotocol voor de beste optie. We bestuderen de stijfheid en de losmaakbaarheid, de twee kritieke elementen van deze verbinding.
4. We voeren een aantal aanvullende toetsen uit op ons digitale model:
 - a. toets van de elementen op drukspanning ten gevolge van combinatie lokaal en globaal

- gedrag,
- b. vervorming van de dekelementen door verkeersbelasting,
 - c. toets stalen bevestigingsbeugels (indien deze optie wordt gekozen),
 - d. toetsing van het gedrag bij trillingen.
5. We maken een analyse van de inspecteerbaarheid en meer algemeen het beheer en onderhoud zoals gerapporteerd in 4.1.1. en 4.10. We bespreken dit met beheerders van RWS.
 6. We kiezen een waterdicht membraan zo vroeg mogelijk in Fase 2A. De detaillering van dit membraan en de hechting aan het houten dek onderzoeken we in het laboratorium.
 7. We maken een nadere detaillering van het raakvlak van waterdicht membraan, HWA goot en de schampkant. Dit raakvlak onderzoeken we in het laboratorium. Het getoonde detail (figuur 17) komt uit de RTD1010.



Figuur 17 Detail schampkant en randdetail

Fase 2A Laboratoriumproeven

We maken in ons testplan onderscheid tussen de testen in Fase 2A (laboratoriumtesten) en Fase 2B (prototype).

In het laboratorium doen we testen die op een beperkt proefstuk van het materiaal een betrouwbaar beeld geven van het totale viaduct. In Fase 2A richten we ons op de testen die we digitaal en in het laboratorium kunnen uitvoeren. We hebben principe afspraken met het laboratorium van de TU Eindhoven. Een aantal van deze testen hebben we geïdentificeerd. Een uitgebreid testprotocol per test werken we verder uit na gunning van Fase 2.

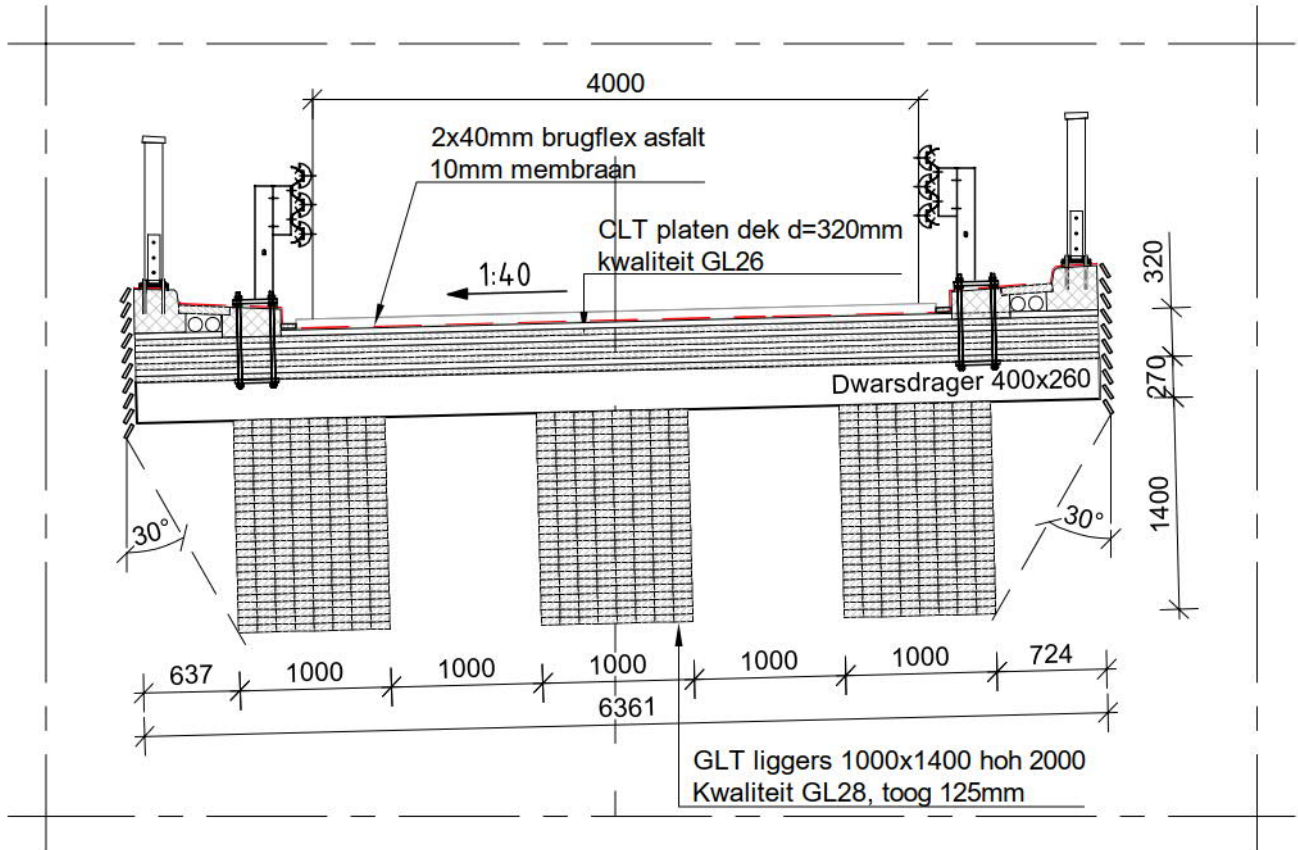
We hebben voor het volgende pakket een budget opgenomen in onze begroting. Uitgangspunt is dat we elke individuele test meerdere keren uitvoeren om uit te sluiten dat afwijkende resultaten het eindresultaat te veel beïnvloeden.

- Test van de hechting van het gekozen membraan aan het houten dek en het gedrag bij verwijderen.
- Voor hergebruik houden we rekening met het verwijderen van een deel van de top van de dekelementen om bitumenverontreiniging te verwijderen. Dit gaan we in het laboratorium en op het fysieke prototype onderzoeken.
- Onderzoek naar de correcte werking en levensduur van het gekozen waterdichte membraan. Vooral ter plekke van de naden van de dekelementen zit een risico vanwege de plaatselijke vervormingen en bewegingen van de elementen. Dit onderzoek zal zowel in het laboratorium als op het prototype worden uitgevoerd voor een zo compleet mogelijk beeld.
- Testen van de stijfheid van een verbinding tussen dwarsdrager en hoofdligger in het laboratorium na cyclische (over-)belasting. Ook een test na het losmaken en opnieuw aanbrengen van de verbinding tussen dwarsdrager en hoofdligger.

Fase 2B Fysiek Prototype

Wij bouwen voor Fase 2B een volledig functioneel houten viaduct met een overspanning van 25 meter en een breedte van ca 6,5m (figuur 18). Het constructieve systeem van het prototype is identiek aan ons voorgestelde ontwerp en productiemodel. Met dit prototype tonen we de operationele haalbaarheid van het

ontwerp aan.



Figuur 18 Concept doorsnede prototype

In het dek en de liggers van het prototype brengen we op relevante plekken vochtsensoren aan en sensoren die rek kunnen meten. Voor de liggers doen we statische en dynamische testen met bekend gewicht en kalibreren we het digitale model. Een alternatieve meetmethode is het gebruik van camera's, door Heijmans al eerder toegepast op het spoor.

We plaatsen vochtsensoren in de buitenste delen en in de kern van de liggers om het vochtgehalte gedurende een jaar te monitoren. We vergelijken deze uitkomsten met de luchtvochtigheid ter plekke die we ook opmeten. Door deze metingen aan elkaar te koppelen kunnen we een aantal zaken bepalen:

- De correlatie tussen de luchtvochtigheid in de winter en het vochtgehalte op verschillende plekken in de ligger.
- De correlatie tussen het vochtgehalte en de vervorming van de liggers.
- De werking van het waterdichte membraan en de elasticiteit daarvan in relatie tot grotere doorbuiging van het houten dek.
- Rond de schampkant en de HWA-goot brengen we vochtsensoren aan in het dek om de effectiviteit van het waterdichte membraan te meten en de effectiviteit van de gekozen detaillering. Daarmee testen we ook de gekozen bevestiging van leuning en geleiderails. Dit deel van de constructie heeft vanwege de doorvoeren van bevestigingen en de functie van afwatering een hoger risico.

Risico's en kansen Fase 2

	Kansen	Risico's
Technische haalbaarheid	Integreren van testdata in het ontwerp verhoogt inzicht in gedrag van het ontwerp. Daardoor ontstaan kansen voor optimalisaties, slanker maken van de liggers en verminderen materiaalhoeveelheid. Zowel na Fase 2A als na Fase 2B werken we ons Haalbaarheidsrapport bij.	Voor technische haalbaarheid zijn er nog een aantal details nader te beschouwen, er zijn geen fatale kwesties. Het grootste risico blijft de effectiviteit van de bescherming tegen vocht en effectief optreden bij lekkages.
Impact	Optimalisaties in het ontwerp maken het mogelijk om de MKI-waarde te verbeteren; een slanker ontwerp geeft minder hoge taluds	Het voornaamste risico is de huidige methode van MKI-berekening van hout. Buiten beschouwing laten van CO ₂ -opslag in hout levert een vertekend beeld van de werkelijkheid op dat negatief uitpakt voor de toepassing van hout.
Economisch perspectief	Dé kans in Fase 2B is het tonen van een werkend prototype dat reële belastingen kan dragen gedurende een langere tijd. Wij zien een uitgelezen mogelijkheid om dit prototype als vliegwiel in te zetten voor verdere vervolmaking van dit concept.	Voor de korte termijn zijn de recente stijgingen van de houtprijs een (tijdelijk) probleem. Voor de langere termijn is een markt voor circulariteit economisch nodig.

Tabel 8 Kansen-/risicotabel

Visie op Fase 2B

Fase 2B start met een GO-NO GO moment tussen het BoLT-consortium en Rijkswaterstaat. Wij hebben ons budget opgebouwd als een budget Fase 2A en 2B. De kosten voor Fase 2A zijn grotendeels ontwikkelingsuren en kosten van testmateriaal en kosten van testfaciliteiten. In Fase 2B is de aankoop van materialen en productie van een prototype voorzien. Daardoor lopen de materiaalkosten in Fase 2B sterk op. Wij hebben er behoefte aan om na afsluiting van Fase 2A met RWS het budget voor Fase 2B te reviewen. Het budget kan alleen uit met een eigen investering van het consortium.

We gaan op zoek naar een Heijmans-project waar we het prototype kunnen inzetten als tijdelijke hulpbrug. Het grote voordeel van gebruik op een werk is het vermijden van experimenten op de openbare weg (veiligheid/hinder). De projectlocatie is een afgesloten omgeving waarbinnen toch nog representatieve verkeersbewegingen worden gemaakt. Als het viaduct bouwverkeer kan dragen, kan het ook de reguliere verkeersbelastingen aan.

We installeren een monitoringssysteem waarin we alle relevante parameters voor het functioneren van het viaduct vastleggen. Het gaat dan om vochtmeters in de liggers en het dek; rekstroken op dek en liggers; camera's en hygrometers.

De uitkomsten van de metingen leggen we vast in een meetrapport dat we verwerken in ons ontwerp en het Haalbaarheidsrapport. De meetdata en het meetrapport leveren we als bijlage in het Haalbaarheidsrapport. Dit is het volledige Haalbaarheidsrapport dat we als open source document beschikbaar stellen na Fase 2.

Essentiele randvoorwaarde in Fase 2B is het doormaken van 4 seizoenen. Hout reageert op de luchtvochtigheid van de omgeving. En die luchtvochtigheid varieert met de seizoenen. Om een volledig beeld van de invloed van de luchtvochtigheid op ons ontwerp te krijgen, moeten we een jaar lang meten.

Na Fase 2B stellen we voor om te zoeken naar een het prototype als volledige circulair viaduct of brug tegen passende betaling aan te bieden aan provinciale en gemeentelijke opdrachtgevers. Deze optie willen we direct na de start van Fase 2A bespreken. De exacte maatvoering van het prototype kan dan nog aanpast worden.

5. Begroting fase 2

	Totaal in €	Totaal uren
Kosten van arbeid	491.600	5170
Verbruikte materialen	452.400	
Machines en apparatuur	165.000	200
Kosten van arbeid van projectpartners	99.400	1050
Kosten derden	64.200	500
Overige kosten	5.500	
Totaal exclusief BTW	1.278.100	6920
Omzetbelasting (laag)		
Omzetbelasting (hoog)	268.400	
Omzetbelasting (0%)		
Totaal inclusief BTW	1.546.500	6920
Gevraagde investering van RWS (inclusief BTW)	1.500.000	

Colofon

Titel	Bridges of Laminated Timber [BoLT]
Deelnemende partijen consortium inclusief contactpersonen	Heijmans Infra BV - Mark van de Hoef Arup - Paul van Horn Schaffitzel Holzindustrie GmbH - Jörg Schaffitzel
Begindatum projectfase 1	22 september 2020
Einddatum projectfase 1	16 maart 2021
Ondertekend door	dhr. B.P. Smolders, directeur Heijmans Infra B.V.