

Het Circulaire Boogviaduct

Het Circulaire Boogviaduct

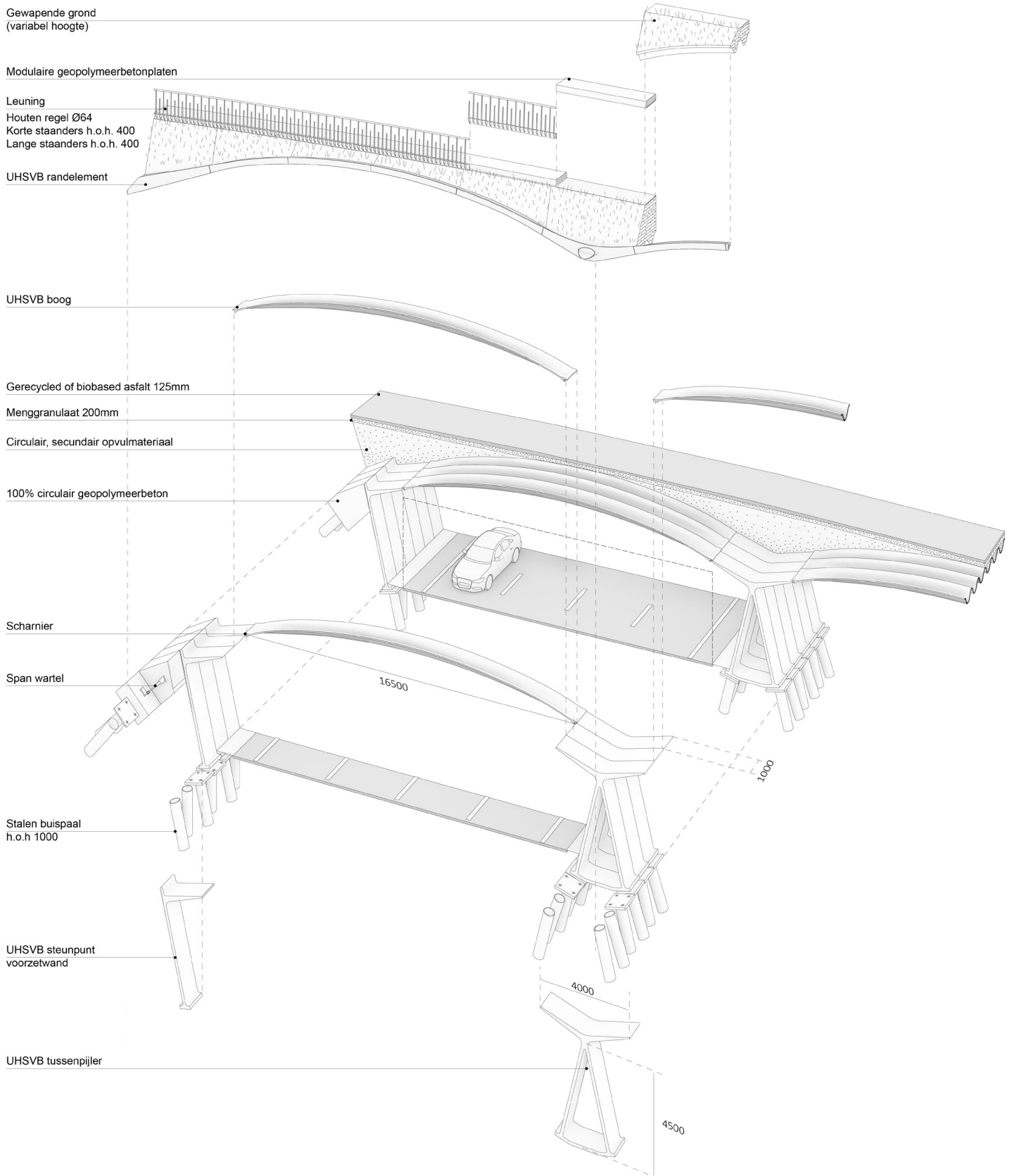
Reduce, Reuse & Recycle door minimaal grondstofgebruik en maximaal hergebruik

Eindrapport Fase 1 Haalbaarheidsonderzoek

Opgesteld door:

Besix Nederland
Ney & Partners NL

16 maart 2021



1 Managementsamenvatting

1.1 Ons concept

De uitputting van natuurlijke grondstoffen neemt een steeds grotere vlucht. Onze maatschappij is gewend geraakt aan de blijvende beschikbaarheid van grondstoffen, onze economie draait er al decennia op. Tegelijkertijd blijft de vraag naar mobiliteit en betrouwbare infrastructuur aanhouden. Hoe slaan we de transitie in naar 50% minder primaire grondstoffen in 2030 en 100% circulariteit in 2050?

Wij willen een grote stap zetten in deze transitie door al vanaf de realisatie van ons viaduct een substantiële materiaalreductie, en dus milieuwinst te boeken. Niemand weet immers hoe lang een viaduct dienst zal doen, nog hoe vaak en onder welke omstandigheden zij zou kunnen worden hergebruikt. Doordat het Circulaire Boogviaduct vanaf dag één een positieve bijdrage levert aan een circulaire samenleving is ieder toekomstig hergebruik extra winst voor het milieu. Het Circulaire Boogviaduct betekent:

- Substantiële materiaalreductie door Ultra Hoge Sterkte Vezelversterkt Beton (UHSVB) toe te passen in dé ultieme buigingsvrije vorm; de drukboog.
- Een modulair, demonteerbaar en herbruikbaar viaduct van UHSVB-elementen met een levensduur tot 200 jaar en herbruikbare funderingspalen.
- Landhoofden van circulair en cementloos geopolymerbeton waar granulaat van oude viaducten als 100% hergebruikte bouwstoffen opnieuw wordt toegepast.

In ons ontwerp hebben we gezocht naar een concept waar zo min mogelijk materiaal zo optimaal mogelijk wordt benut. Optimaal materiaalgebruik vereist een optimale krachtswerking, waarbij buiging zo klein mogelijk is. De oudste nog bestaande bruggen maken gebruik van deze optimale krachtswerking: boogbruggen bewijzen zich zo al eeuwen. Ons Circulaire Boogviaduct is in de basis een moderne versie van een eeuwenoud concept, waarbij nieuwe technieken en materialen een optimaal materiaalgebruik toelaten.

Behalve zeer materiaalefficiënt is ons ontwerp ook demonteerbaar en herbruikbaar met een minimum aan aanpassingen. Ook hiervoor is de keuze voor een boogviaduct logisch. De natuurlijke stroom van drukkrachten in de constructie zorgt ervoor dat afzonderlijke elementen bijna automatisch bij elkaar blijven.

Een voorwaarde om de boogwerking in de bovenbouw te activeren, is dat de onderbouw in staat moet zijn de spatkrachten op te nemen. De efficiëntste wijze om dit te realiseren is door bovenbouw en onderbouw integraal met elkaar te verbinden. Opnieuw introduceren we een meerwaarde: integraalbruggen hebben immers geen oplegtoestellen, nog uitzettingsvoegen die veel onderhoud vereisen en waar vaak problemen ontstaan die een negatieve invloed hebben op de algehele levensduur van de constructie.

Bovenal is het Circulaire Boogviaduct een natuurinclusief en esthetisch aantrekkelijk concept met veel aandacht voor de inpassing in zijn omgeving, zodat het interessant is voor klanten om in de publieke buitenruimte te investeren.

1.2 Doelstelling

In dit haalbaarheidsonderzoek tonen wij met een principeontwerp aan dat het Circulaire Boogviaduct technisch haalbaar is voor een typische overspanning over een snelweg. De geometrie van de bogen en steunpunten optimaliseren en valideren we met EEM (eindige-elementenmethode) berekeningen. De specifieke materiaaleigenschappen van het UHSVB en geopolymerbeton beproeven we om het ontwerp te valideren. Het losmaakbaar scharnier werken we uit en beproeven we in het laboratorium op constructief gedrag. Bovendien borgen we de uitvoerbaarheid van het geheel, zodat het maakbaar blijft in de praktijk. Dit zijn de uitgangspunten om de materiaalreductie en milieu-impact te beschouwen. Daarnaast werken we de betaalbaarheid uit om het concept naar de markt te kunnen brengen.

1.3 Resultaten

Samengevat onder de 3 hoofdcriteria uit de SBIR-oproep zijn de volgende resultaten geboekt:

- **Impact:**

Het Circulaire Boogviaduct bespaart over 200 jaar tot 90% aan cement en tot 95% aan nieuwgedolven grind en zand. Als we de milieu-impact van de bouwstoffen en het hergebruik meenemen, reduceren we tot 52% aan MKI-waarde over 200 jaar. De milieuwinst is afhankelijk van de ontwikkelingen in de toekomst, omdat we elementen hergebruiken, maar zelfs bij de initiële bouw besparen we al op milieu-impact. Onze gevoeligheidsanalyses tonen aan dat het Circulaire Boogviaduct zelfs in een maatschappij in verandering duurzamer is; zelfs als viaducten een langere functionele levensduur hebben en in de toekomst duurzamere productie van conventionele viaducten mogelijk zijn is het Circulaire Boogviaduct duurzamer.

Het Circulaire Boogviaduct komt het best tot zijn recht in zwaardere verkeersklassen voor overspanningen tussen de 15 en 30 meter bij nagenoeg haakse kruisingen. Bij grotere overspanningen wordt het technisch uitdagender, bij kleinere overspanningen is de milieu-impact kleiner en zijn er goedkopere alternatieven beschikbaar. Opscaling is daarom interessant voor circa 2000 viaducten van Rijkswaterstaat, aangevuld met 1500 provinciale kunstwerken.

- **Haalbaarheid:**

De technische haalbaarheid blijkt na uitwerking aantoonbaar op de volgende onderdelen:

- De UHSVB-boogliggers als gegolfd booggewelf blijken constructief haalbaar en materiaalefficiënter dan de oorspronkelijk bedachte sandwich-systeem.
- Het UHSVB is op basis van laboratoriumtests constructief veilig toe te passen binnen de geteste betoneigenschappen.
- De prefab elementen zijn maakbaar met gangbare mal- en storttechnieken uit de huidige prefab industrie.
- De optimale boogvorm valt binnen de marge van 5% extra hoogte t.o.v. conventioneel viaduct.
- De scharnierende verbinding tussen boogligger en landhoofd/pijler is destructief getest met bovenverwachting goede resultaten.
- Het geopolymerbeton opgebouwd uit 100% gerecycleerd betongranulaat blijkt uit de drukproeven haalbaar voor een C30/37-betontoepassing in het landhoofd.
- Een paalfundering uit stalen buispalen is haalbaar en tevens terugwinbaar.

Voor de vervolgfase worden aanvullende onderzoeken uitgevoerd op proefstukken en een prototype van het Circulaire Boogviaduct gebouwd op ware schaal.

- **Economisch perspectief**

Vanuit het oogpunt van economisch perspectief zijn volgende subcategorieën beschouwd:

- Marktstrategie: Wij willen een range van standaard booglengtes ontwikkelen die voor het overgrote deel van de markt toepasbaar zijn. Dit om de investeringskosten voor de productie van de elementen betaalbaar te houden.
- Gebbruiksrecht: Om met het Circulaire Boogviaduct zoveel mogelijk impact en naamsbekendheid te genereren, stellen wij onze kennis na fase 2b als open source beschikbaar, waarbij doorontwikkelingen van derden opnieuw open source moeten gaan en verwijzen naar ons concept ("share alike" en "attribution"). Daarnaast vragen wij Rijkswaterstaat om samen met ons tenminste één viaduct naar marktconforme prijs te realiseren om gemaakte eigen kosten door het consortium en goodwill te dekken.
- Vermarketing product: Met een internationale aannemer, internationaal ingenieursbureau, prefab betonproducent en specialistische kennis van UHSVB en geopolymerbeton in ons consortium zijn wij in staat om de innovatie op te schalen in Nederland en daarbuiten.
- Betaalbaarheid: uit de LCC berekening blijkt het Circulaire Boogviaduct circa 9% hogere initiële bouwkosten te hebben vergeleken met een conventioneel viaduct. Doordat bij de herbouw van het viaduct elementen worden hergebruikt, is over een looptijd van 200 jaar

het Circulaire Boogviaduct juist tot 15% goedkoper. De TCO (Total Cost of Ownership) maakt het Circulaire Boogviaduct dus een aantrekkelijk betaalbaar alternatief op de lange termijn. Uit de gevoeligheidsanalyses blijkt ook bij een langere functionele levensduur van een viaduct dat het Circulaire Boogviaduct de voordeligste keuze is, ook als de bouwstenen slechts eenmalig worden hergebruikt: respectievelijk 13% en 10% voordeliger.

1.4 Conclusies

Het haalbaarheidsonderzoek toont aan dat het Circulaire Boogviaduct een aanzienlijke reductie van de milieu-impact realiseert, al direct bij de eerste bouw, en dat de milieuwinst verder oploopt gedurende de levensduur. Wij hebben aangetoond dat het viaduct technisch geschikt is als snelwegviaduct. De initiële bouwkosten van het Circulaire Boogviaduct zijn iets hoger dan die van een conventioneel viaduct, maar die investering in duurzaamheid betaalt zich over de hele levensduur terug. Alle benodigde kennis van UHSVB, prefab betonproductie, geopolymeerbeton en scharnier/opleggingen is in ons consortium aanwezig, zodat we in staat zijn het Circulaire Boogviaduct door te ontwikkelen en op de markt te brengen. Wij zullen de markt actief informeren over de behaalde resultaten in een open source setting.

1.5 Fase 2

Voor fase 2 gaat het consortium een intensievere samenwerking met Rijkswaterstaat aan, waarbij alle benodigde kennis- en uitvoeringspartners zijn aangehaakt om direct te starten. Hiervoor wordt een tweewekelijks overleg ingepland waar de experts van beide partijen aansluiten om het prototype zowel op technische, economische als milieu-impact aspecten te bespreken. Vanaf de start van fase 2a betrekken we graag de kennispartners van Rijkswaterstaat om het prototype te verbeteren.

Voor het verdere onderzoek is fase 2 opgedeeld in twee deelfasen:

- **Fase 2a: Ontwikkelen en testen van prototypes**

In deze fase worden aanvullende laboratorium proeven uitgevoerd om de toepasbaarheid van zowel het UHSVB als het geopolymeerbeton aan te tonen. Het eindresultaat van deze fase is om succesvol een UHSVB boogligger en 2 landhoofdwallen geproduceerd en getest te hebben. Het geopolymeerbeton wordt getest met gangbare betonproeven (zoals vries-dooi) om het te mogen toepassen in het prototype (zie fase 2b).

- **Fase 2b: Valideren van prototype**

We bouwen een prototype op ware schaal; een Boogviaduct met een overspanning van 20,5m bestaande uit 8 UHSVB-boogliggers en opgebouwd op een fundering en landhoofdconstructie zoals in deze haalbaarheidsstudie voorgesteld. Dit prototype wordt gebouwd op een project van Rijkswaterstaat of BESIX Nederland en wordt in-situ getest met lastwagens. Na validatie van het prototype kan dit kunstwerk naar keuze van Rijkswaterstaat een definitieve locatie toegewezen krijgen, gezien de beschikbare breedte is een eindbestemming als fietsbrug het meest aangewezen.





UHSVB randelement

Modulaire geopolymerbetonplaten

Gewapende grond

Gerecycled of biobased asfalt 125mm

Menggranulaat 200mm

Circulair, secundair opvulmateriaal

UHSVB boog

Dwarsdoorsnede voorbij het hoogste punt

2 Uitvoering van het haalbaarheidsonderzoek

2.1 Doelstelling

Het doel van dit haalbaarheidsonderzoek is met een principeontwerp aantonen dat het Circulaire Boogviaduct technisch haalbaar is voor een typische overspanning over een snelweg, daarbij significante milieu-impact bereikt en tevens betaalbaar is. Vanuit het projectvoorstel (zie document [1]) zijn 6 uitdagingen vertaald naar 6 uitgevoerde werkpakketten:

- **Werkpakket 1:** Doel is het bepalen van de optimale boogvorm en zijn gedrag binnen het totaalconcept van het circulaire viaduct
- **Werkpakket 2:** Doel is het ontwerpen van ongewapende gebogen sandwich betonelementen uit UHSVB
- **Werkpakket 3:** Doel is het ontwerpen van een materiaalefficiënte middenpijler die losmaakbaar is van de fundering
- **Werkpakket 4:** Doel is het ontwikkelen van een onderhoudsvrij scharnierende verbinding tussen brugdek en landhoofd/tussensteunpunt
- **Werkpakket 5:** Doel is het ontwerpen van een landhoofd vertrekkend van de materiaaleigenschappen van geopolymeerbeton met 100% gerecycled granulaat
- **Werkpakket 6:** Circulair perspectief: Uitwerking milieu-impact, marktstrategie en gebruiksrecht.

De doelstellingen van de werkpakketten zijn niet gewijzigd. Wel is in werkpakket 2 het concept van het sandwich-principe verbeterd tot golfelementen, omdat dit makkelijker uitvoerbaar bleek. In paragraaf 2.2 zijn de activiteiten toegelicht.

2.2 Uitvoering onderzoek

2.2.1 Projectorganisatie

Na selectie voor fase 1 van het project SBIR-oproep is door ons consortium gezocht naar partners welke het meest geschikt waren om de doelstelling te behalen. Selectie van nieuwe partners is gebeurd op basis van benodigde expertise en als voorwaarde om mee te werken aan een open source oplossing.

Onderstaand organogram geeft de betrokken partijen weer.

Leden consortium



Samenwerkingspartners



Taakverdeling per partij:

- BESIX Nederland: Gezamenlijk met NEY&Partners verantwoordelijk voor de projectcoördinatie. Daarnaast de uitwerking van de MKI en economisch perspectief.
- NEY&Partners: gezamenlijk met BESIX verantwoordelijk voor de projectcoördinatie. Daarnaast de architectonische vormgeving en het integraal ontwerp en de form finding van de UHSVB-boogliggers.
- Haitsma Beton: Adviserende rol in de maakbaarheid en uitvoerbaarheid van de UHSVB-elementen.
- Franki Grondtechnieken: Adviserende rol in de uitwerking van de herbruikbare paalfundering
- VITO: Adviserende rol in de samenstelling en modellering van het UHSVB en het uitvoeren van testen op UHSVB monsters.
- Université Libre de Bruxelles (ULB): Faciliteren van de laboratoriumproeven op UHSVB-proefstuk en scharnierpunt.
- ResourceFull: Verantwoordelijk voor de samenstelling en beproeven van het geopolymeerbeton.
- Maurer: Adviserende rol in alternatieve uitwerking van een scharnierpunt.

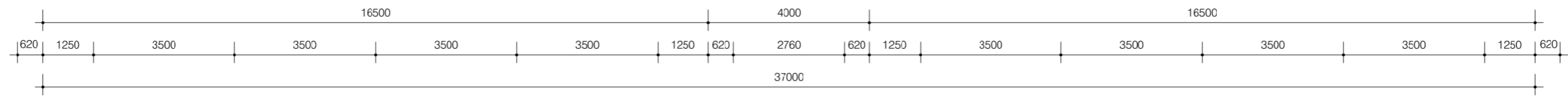
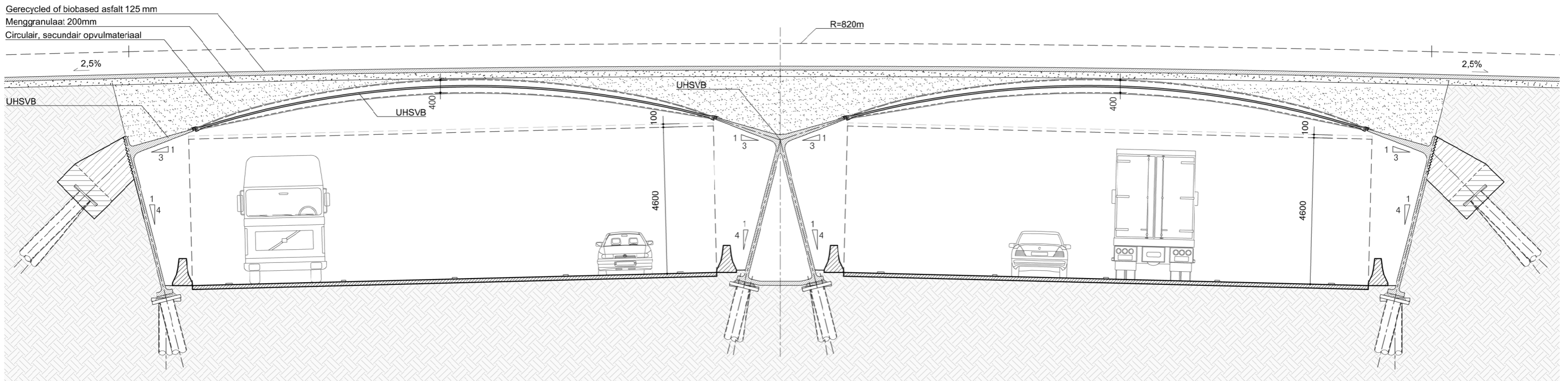
2.2.2 Uitgevoerde activiteiten


Per werkpakket is op hoofdlijnen beschreven welke activiteiten zijn uitgevoerd:

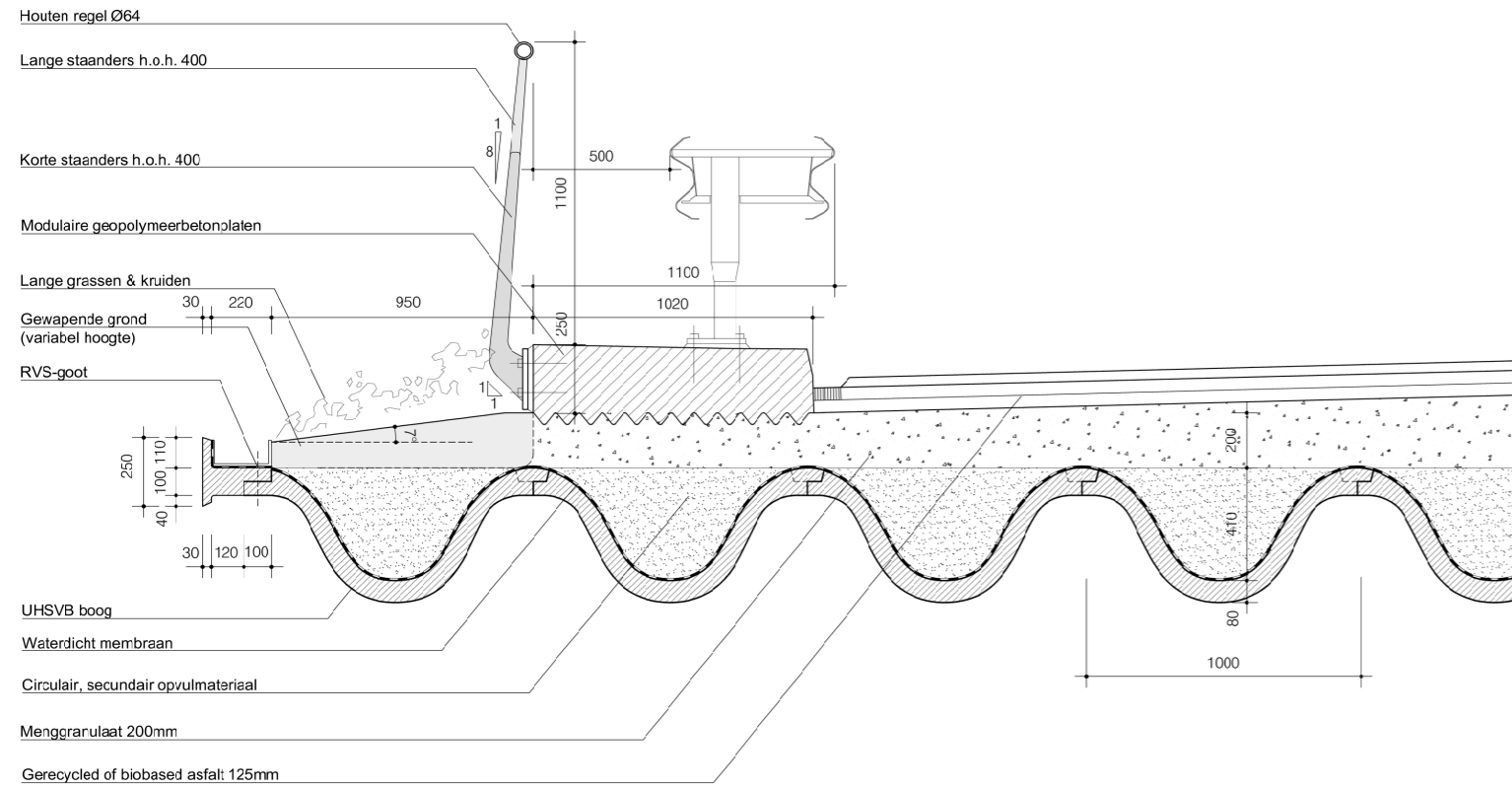
- **Werkpakket 1: Integraliteit Form finding**
 - Het totaalconcept van het Circulaire Boogviaduct is uitgewerkt gebaseerd op de afmetingen van het gekozen referentieproject. Hierbij zijn de UHSVB materiaaleigenschappen optimaal benut om zo weinig mogelijk materiaal zo effectief mogelijk toe te passen.
 - Er is een eindig-elementen model opgesteld van de gehele bovenbouw.
- **Werkpakket 2: UHSVB-boogliggers**
 - Op basis van het eindig-elementen model en de krachtswerking in de UHSVB-boogliggers is naar een optimale vorm voor de boogliggers gezocht. Hierbij is, onder andere omwille van de uitvoering van de boogliggers, gekozen voor een golvende vorm in de boogliggers, en is afgestapt van de sandwichelementen.
 - Tevens is een UHSVB-betonmengsel bepaald en beproefd welke best passend was bij de krachtswerking in de ontworpen UHSVB-boogliggers
- **Werkpakket 3: UHSVB-middenpijler**
 - Op basis van het eindig-elementen model, de krachtswerking en architectonische visie zijn UHSVB-middenpijlers ontworpen
- **Werkpakket 4: Scharnier**
 - Twee principe-details zijn uitgewerkt: een variant in aluminium en een bolscharnier als lijnoplegging.
 - De aluminium variant is beproefd in laboratoriumomstandigheden.
- **Werkpakket 5: Landhoofden**
 - Geopolymeerbeton opgebouwd uit 100% betongranulaat:
 - Er is een geopolymeerbetonsamenstelling bepaald uit 100% betongranulaat welke voldoet aan de vereiste sterkteklasse.
 - Er is een variant van het geopolymeerbeton beschouwd welke niet enkel bestaat uit hoogovenslakken, maar ook gebruik maakt van roestvaststaal slakken.
 - Fundering
 - Op basis van het eindig elementen model is een paalconfiguratie bepaald welke de belastingen kan opnemen uitgaande de geotechnische gegevens van het referentieproject.
 - Daarnaast is een verbinding ontwikkeld welke de paalfundering losmaakbaar maakt van de landhoofden, dit om de buispalen terug te winnen na de levensduur van het Circulair Boogviaduct.
- **Werkpakket 6: MKI + marktbenadering**
 - Milieu-impact: er is een MKI-berekening uitgevoerd van het Circulaire Boogviaduct en vergeleken met het referentieproject, inclusief 2 gevoeligheidsanalyses. Productspecifieke LCA's zijn opgesteld.
 - Marktbenadering: het economisch perspectief is uitgewerkt in een Life Cycle Cost analyse en het toepassen van het gebruiksrecht is verder uitgewerkt.



Schaal  2m
Zijaanzicht

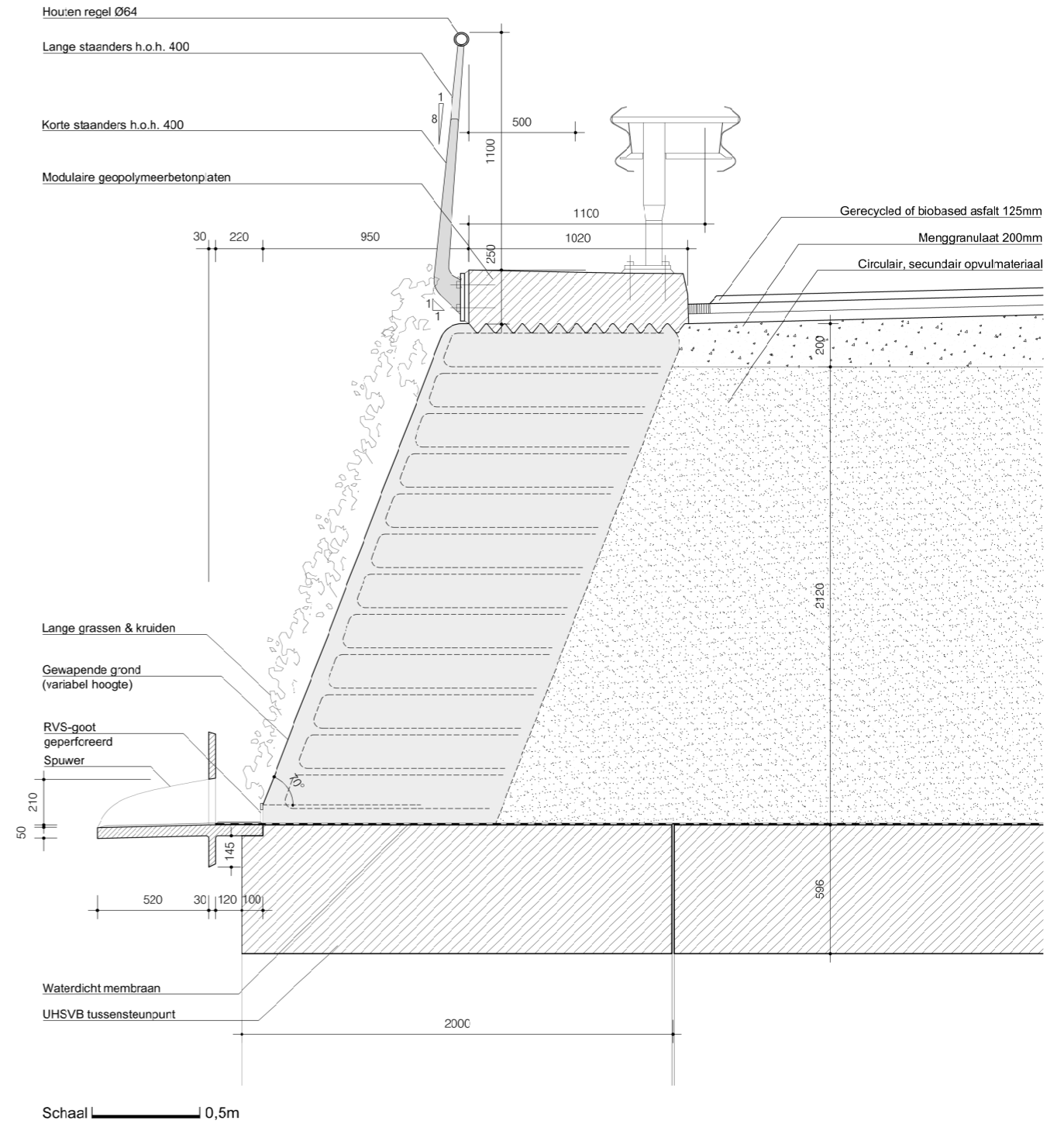
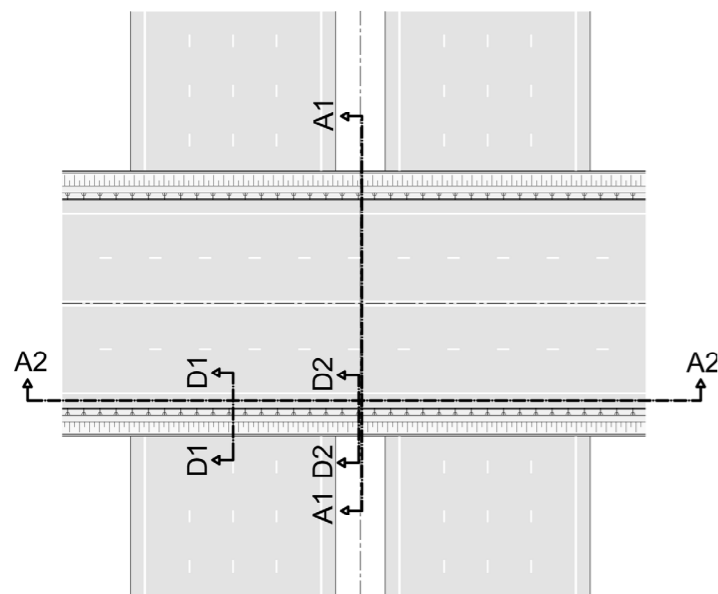


Schaal  2m
Langsdoorsnede



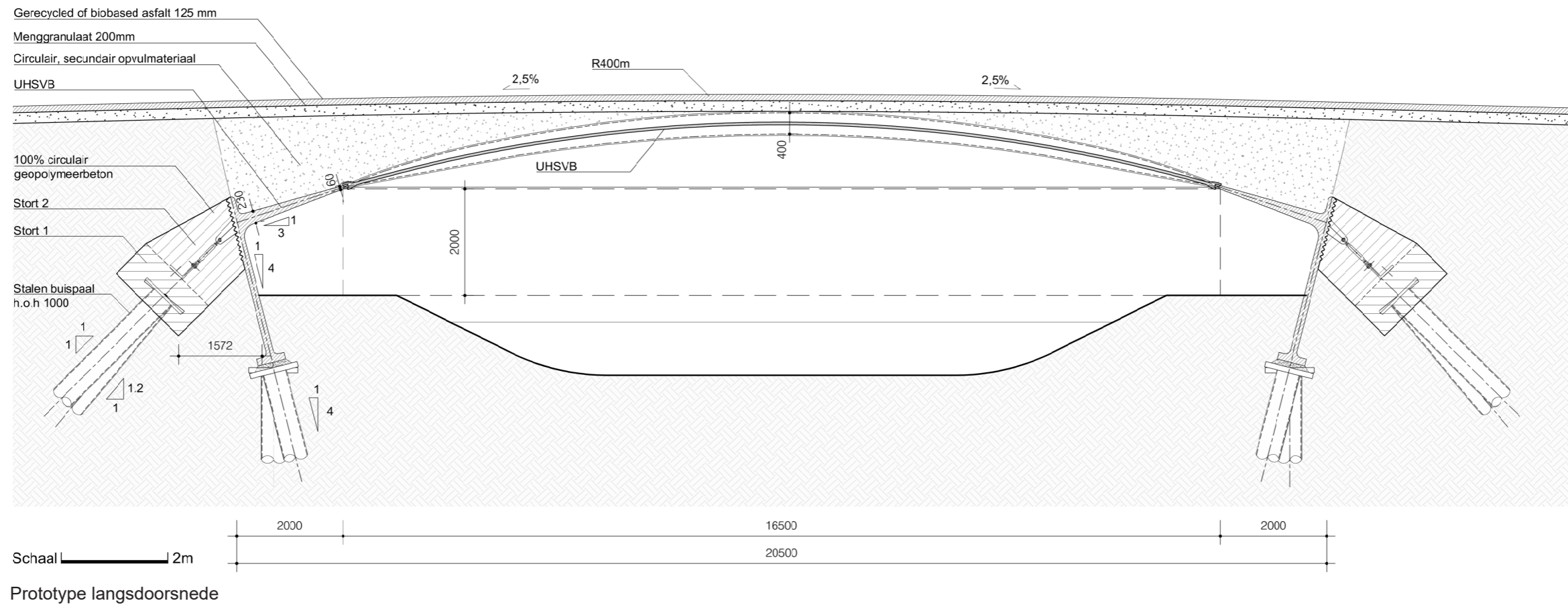
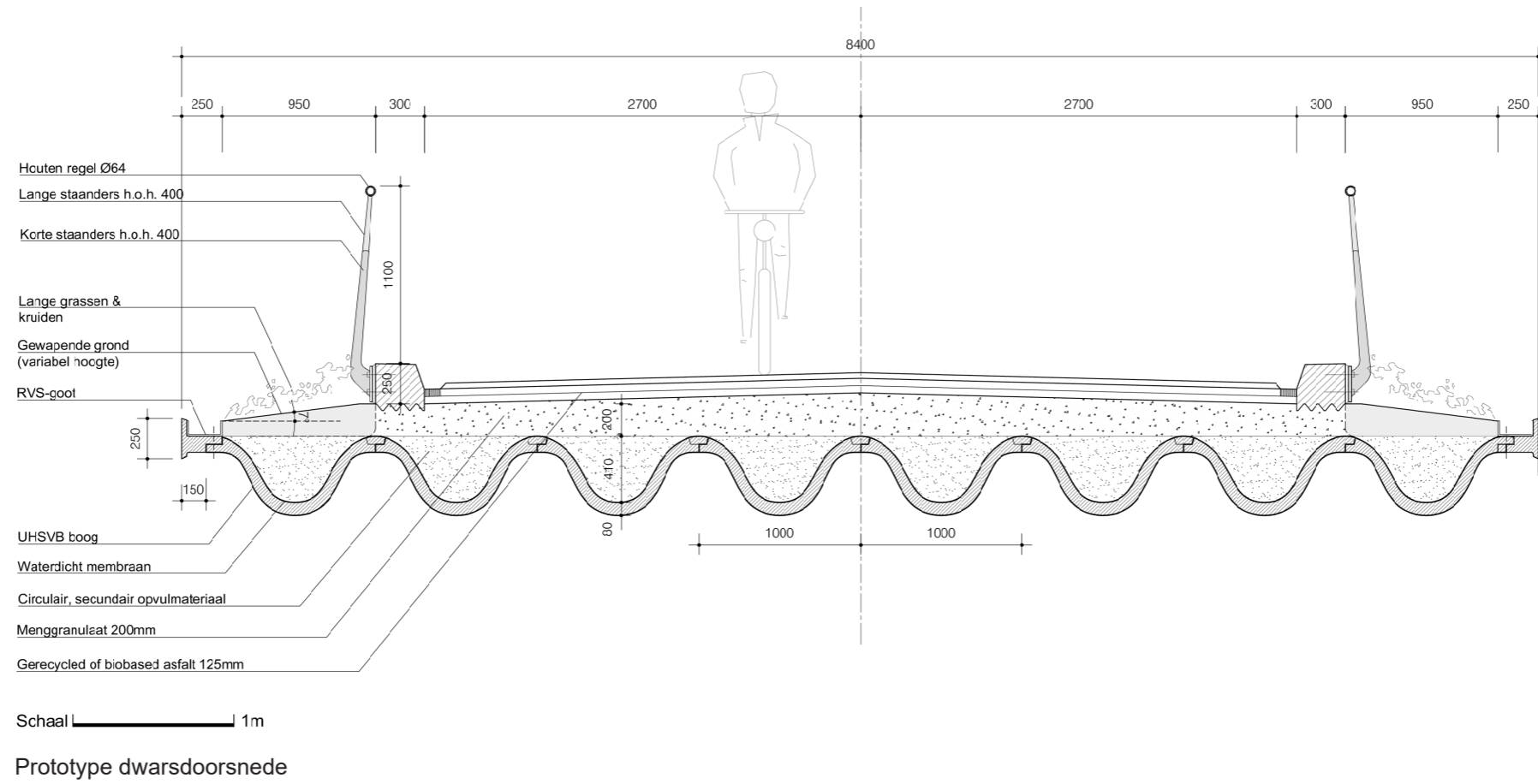
Schaal 0,5m

Randdetail D1



Schaal 0,5m

Randdetail D2



3 Inhoudelijke bevindingen

3.1 Impact

3.1.1 De toepasbaarheid en schaalbaarheid

Het Circulaire Boogviaduct biedt op korte termijn een robuuste duurzame oplossing voor verkeersbruggen in heel Nederland. Technisch is het viaduct haalbaar tot overspanningen van 30m bij de zwaarste verkeersklasse. Bij overspanningen korter dan 15m zijn conventionele viaducten economisch rendabeler en de materiaalbesparing van het Circulaire Boogviaduct beperkter, waardoor de toepasbaarheid van alternatieve duurzame innovaties concurrerend zijn. Het bestaande areaal van de grootste beheerders is geanalyseerd met deze uitgangspunten.

Areaal Rijkswaterstaat

Rijkswaterstaat heeft ruim 5000 kilometer Rijksweg met ruim 3500 viaducten in beheer. Op basis van de verstrekte dataset van het huidige areaal is het Circulaire Boogviaduct geschikt voor naar schatting 2000 bestaande wegviaducten. Het richt zich op:

- Zwaarste belastingklassen: **82%** van alle viaducten in het huidige areaal.
- De boogliggers zijn naar verwachting economisch rendabel tussen de 15 en 30 meter voor een enkele overspanning: **58%** van huidige viaducten betreft overspanningen tussen de 15 en 30m (totale lengte gedeeld door aantal overspanningen).
- Economisch wordt het technisch voordeel van in serie geschakelde bogen nog hoger bij meerdere overspanningen: **80%** heeft meer dan 1 overspanning. Naarmate het aantal overspanningen toeneemt wordt het Circulaire Boogviaduct economisch nog interessanter: 56% heeft zelfs meer dan 2 overspanningen.
- De efficiëntie is het grootst bij haakse kruisingen (100 gon). Het concept is echter toepasbaar voor kruisingen tussen 80 en 120 gon: **73%** van het areaal.

Areaal Provinciaal wegennet

Provincies hebben ongeveer 2500 grotere viaducten en onderdoorgangen in beheer in de 8000 kilometer provinciale wegen. Er zijn geen detailgegevens bekend van deze objecten, maar het Circulaire Boogviaduct is goed toepasbaar omdat de overspanningen veelal groter zijn dan 15m met de zwaarste verkeersbelasting. Afhankelijk van het aandeel nagenoeg haakse kruisingen, is het Circulaire Boogviaduct toepasbaar voor 1000 tot 1500 objecten in beheer bij Provincies.

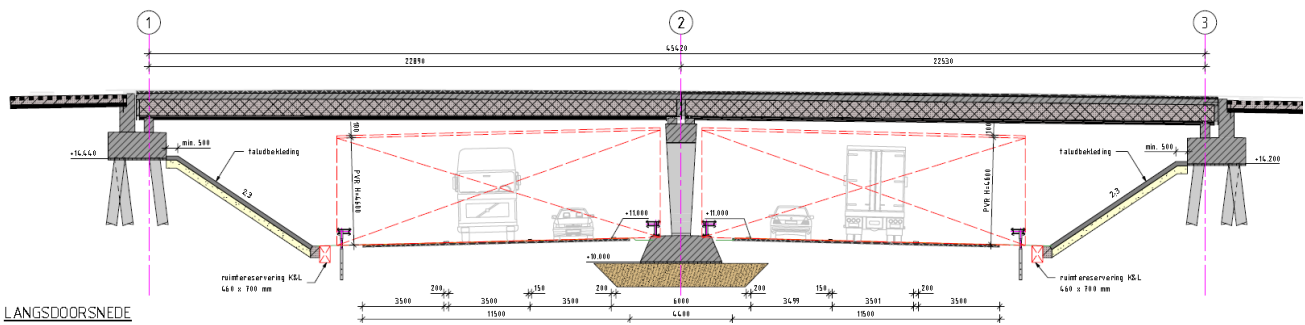
Circulaire Ecoducten

Bovendien leent het Circulaire Boogviaduct zich perfect als ecoduct om fauna (snel)wegen te laten passeren. De komende jaren zullen tientallen ecoducten in Nederland, die zowel Rijkswegen als Provinciale wegen kruisen, als Circulair Ecoduct uitgevoerd kunnen worden.

3.1.2 De mate van milieu-impact en circulariteit

Keuze referentieviaduct

Het referentieviaduct betreft Kunstwerk 21 uit project VIA15. De overspanning over 3 rijstroken plus vluchtstrook (waarvan 1 rijstrook als ruimtereservering voor toekomstige uitbreiding) komt overeen met de gekozen overspanning voor de technische haalbaarheid (zie paragraaf 3.2). Gekozen is voor een dubbele overspanning, omdat 80,2% van de viaducten uit meer dan 1 overspanning bestaat. Bij meer dan 2 overspanningen haalt het Circulaire Boogviaduct meer voordeel uit de serieel geschakelde bogen, waardoor de milieuwinst verder toeneemt. In Figuur 1 is de langsdorsnede weergegeven.



Figuur 1: Dwarsdoorsnede referentieviaduct KW21 van project ViA15

De breedte van KW21 als referentieviaduct is met een effectieve breedte van 28m erg breed en niet representatief. Daarom is gekozen om een effectieve breedte van 19m aan te houden voor de vergelijking. De hoeveelheden van het referentieviaduct zijn daarvoor terugerekend.

Besparing van grondstoffen

De essentie van het Circulaire Boogviaduct is het uitsparen van grondstoffen: de boogvorm uit UHSVB bespaart volume en het geopolymerbeton bespaart cement en nieuwe granulaten. De milieu-impact is in de navolgende paragrafen berekend, maar de besparing van primaire grondstoffen zijn in het kader van circulariteit hierin onderbelicht. In Tabel 1 zijn de bespaarde hoeveelheden samengevat voor de initiële nieuwbouw en over 200 jaar levensduur waarbij een viaduct 3x hergebouwd wordt: het Circulaire Boogviaduct bespaart tot 94% cement, 97% nieuw zand/grind en 63% wapeningsstaal.

Tabel 1: besparing van de meest vervuilende grondstoffen uit het beton

	C60/75 railbalkliggers	C30/37 of C35/45 in situ beton	UHSVB-beton	Geopolymerbeton			
Hoeveelheid cement [kg/m3]	450	350	600	0			
Hoeveelheid nieuw zand/grind [kg/m3]	1800	1800	1250	0			
Hoeveelheid staal [kg/m3]	140	120	234	120			
					Cement (alle typen)	Nieuw betongrind en zand (excl. ophoogzand)	Wapeningsstaal (excl. fundering)
Referentieviaduct	376 m3	638 m3	0	0	392 ton	1824 ton	129 ton
Circulair Boogviaduct	0	0	116 m3	327 m3	69 ton	145 ton	66 ton
Materiaalbesparing bij initiële nieuwbouw					-82%	-92%	-49%
Materiaalbesparing over 200 jaar bij 3x (her)bouw					-94%	-97%	-63%

Life Cycle Analysis

Het Circulaire Boogviaduct reduceert de milieu-impact vanaf dag één door nu te investeren in de toekomst: het ontwerp met UHSVB is geoptimaliseerd zodat minder materiaal nodig is bij de bouw. De UHSVB-elementen zijn gedurende hun langere levensduur te hergebruiken. Daarmee neemt de reductie van de milieu-impact in de tijd toe. De niet-herbruikbare onderdelen werken met een ander principe: deze worden opnieuw gemaakt van hergebruikte betongranulaten geopolymeerbeton. De belangrijkste uitgangspunten voor de LCA zijn:

- Rekenmethodiek
De analyse is uitgevoerd voor het type "Nieuwe Viaducten, remontabele oplossingen" met een projectlevensduur van 200 jaar conform de SBK-bepalingmethode 'Milieuprestatie Bouwwerken'. In de analyse zijn uitsluitend de civiele objecten meegenomen die verschillen tussen het Circulaire Boogviaduct en het referentieviaduct. Infragerelateerde elementen zoals asfalt, geleiderail, verlichting en HWA-afvoer zijn tussen beide varianten gelijkwaardig en daarom niet meegenomen in de berekening.
Er is uitsluitend gebruik gemaakt van categorie 3 DuboCalc items (DuboCalc versie 6.0). Voor het UHSVB, geopolymeerbeton en de stalen buispaalfundering zijn specifieke LCA's opgesteld, omdat er in Dubocalc geen representatieve producten of materialen voorhanden zijn.
- Productspecifieke LCA UHSVB:
UHSVB is afwijkend van beschikbare materialen in DuboCalc door toepassing van staalvezels en bevat meer cement dan regulier beton. De impact van de productie is daarmee afwijkend; transport, verwerking en einde levensfase is hetzelfde als regulier prefab beton. Voor de productie zijn EPD's van de grondstoffen gebruikt uit de Ontwerptool Groen Beton van Betonhuis. Voor de processen is gebruikt gemaakt van het verstrekte "LCA rapport voor betonmortel" van SGS Intron. UHSVB heeft daarmee € 163 MKI/m³ en 1196 kg CO₂-eq./m³. De berekende CO₂-eq./m³ (GWP) is gebenchmarked met een publiek beschikbare LCA voor UHSVB-prefab elementen uit Denemarken: deze LCA betreft 1315 kg CO₂-eq./m³ en valt daarmee in dezelfde orde grootte.
- Productspecifieke LCA Geopolymeerbeton:
Voor geopolymeerbeton is er geen beschikbare data in DuboCalc. Voor de productie zijn EPD's van de grondstoffen gebruikt uit de Ontwerptool Groen Beton van Betonhuis. Voor de processen is gebruikt gemaakt van het verstrekte "LCA rapport voor betonmortel" van SGS Intron. Geopolymeerbeton heeft daarmee € 13,46 MKI/m³ en 118 CO₂-eq./m³.
- Productspecifieke LCA Stalen buispalen:
Voor stalen buispalen is er geen beschikbare data in DuboCalc (alleen met betonmortel). Met de EPD van Tata Steel Europe is de milieu-impact bepaald op € 0,083 MKI/kg en 1,09 CO₂-eq./kg. Voor de processen is gebruikt gemaakt van data uit project A16 Rotterdam-Noord. De berekende MKI is gebenchmarked met de beschikbare DuboCalc data voor constructiestaal: deze LCA betreft circa 0,11 euro MKI/kg inclusief 30% Dubocalc opslagpercentage en valt daarmee in dezelfde orde grootte.
- Modellering hermontage:
De UHSVB elementen en stalen buispalen worden hergebruikt bij een levenscyclus. Daarvoor zijn in DuboCalc geen items voorhanden. Daarom is gekozen om de hermontage als extra element in de LCA op te nemen. Daarvoor worden de modules A4 en A5 gebruikt zoals gebruikt voor het UHSVB en buispalen. Bij de remontage zijn de volgende activiteiten relevant:
 - Demonteren op locatie: vergelijkbaar met module A5
 - Vervoer naar centraal opslagdepot: vergelijkbaar met module A4
 - Opslag in depot (niet geklimatiseerd): verwaarloosbaar.
 - Vervoer van centraal opslagdepot: vergelijkbaar module A4
 - Installeren/monteren op nieuwe locatie: gelijk aan module A5.
 Voor de activiteit 'hermontage' wordt daarom 2x de waarde van de modules A4 en A5 meegenomen.

Levensduur van objecten en elementen

Uit het verstrekte Rapport Sloopoorzaken blijkt 88,9% van de viaducten gesloopt vanwege gewijzigde functie (bv. wegverbreding) en ligt de werkelijke levensduur van viaducten in of over een Rijksweg gemiddeld op 58 jaar. In de LCA is daarom de levensduur van elementen gemaximaliseerd op 58 jaar als deze niet hergebruikt kunnen worden (zoals geopolymeerbeton landhoofden). Om de levenscyclusanalyse zo realistisch mogelijk te maken is de maximale levensduur van elementen vastgesteld op 58 jaar. De UHSVB elementen en funderingspalen worden geremonteerd met een verwachte levensduur van 200 jaar.

Aan het einde van de levensduur zijn deze afgeschreven en niet opnieuw herbruikbaar. Het UHSVB en geopolymeerbeton zijn net als regulier beton geschikt om na scheiding van materialen als hoogwaardig betongranulaat toegepast te worden in de bouw.

Scenario's en resultaten

De milieu-impact is berekend en vergeleken voor een basisscenario en twee scenario's als gevoeligheidsanalyse. De gevoeligheidsanalyses zijn uitgevoerd om te ontdekken welke de aspecten over de gehele levensduur het meest onzeker en impactvol zijn. Geconcludeerd is dat afwijkende hoeveelheden of hogere MKI-waarden van de specifieke LCA's van het UHSVB of geopolymeerbeton relatief klein zijn (enkele procenten verschil) ten opzichte van de aannames voor functionele levensduur en toekomstige duurzame ontwikkelingen. De scenario's zijn:

- **Scenario A "Basisscenario huidige maatschappij"**
Dit basisscenario gaat uit van de maatschappij en industrie hoe deze heden ten dage werkelijkheid is. Met de EPD en LCA data gebaseerd op energiemix die grotendeels bestaat uit fossiele brandstoffen. De functionele levensduur van een viaduct is gesteld op 58 jaar. Na deze functionele levensduur wordt het viaduct gedemonteerd/gesloopt en direct weer opnieuw gebouwd, met dezelfde dimensies en fossiele energiemix.
- **Scenario B "Langere functionele levensduur"**
De functionele levensduur is in dit scenario verlengd tot 80 jaar. Een verlenging van de functionele levensduur is te verwachten omdat er vaker ruimtereserveringen in nieuwgebouwde viaducten zijn opgenomen. Daarnaast is het huidige areaal viaducten veelal na de Tweede Wereldoorlog opgebouwd en veelvuldig uitgebreid. Te verwachten valt dat deze trend afneemt door beperktere ruimte in Nederland.
- **Scenario C "Een duurzame toekomst"**
Een belangrijk principe van het Circulaire Boogviaduct is het beperken van milieu-impact voor toekomstig te produceren elementen (zoals prefab liggers). Er zijn echter zeer ambitieuze beleidsdoelstellingen geformuleerd in Nederland en de rest van Europa, wat het aannemelijk maakt dat de productie na 1 levenscyclus minder milieu-impact heeft dan nu. Denk bijvoorbeeld aan Carbon Capture technologieën voor de productie van cement en staal, of duurzaam transport. Dat geldt zowel voor het referentieviaduct als het Circulaire Boogviaduct. Daarom is in dit scenario gekozen om de impact na 1 levenscyclus te reduceren: De functionele levensduur blijft 58 jaar, maar de milieu-impact voor de opvolgende bouw/montage is met 50% afgenomen.

De resultaten zijn voor de drie milieu-impact indicatoren opgenomen in Tabel 2.

Tabel 2: resultaten van de milieu-impact analyse

	Scenario A "Basisscenario huidige maatschappij"			Scenario B "Langere functionele levensduur"			Scenario C "Een duurzame toekomst"		
	MKI in Euro	Kg CO2-eq.	kg Sb-eq	MKI in Euro	Kg CO2-eq.	kg Sb-eq	MKI in Euro	Kg CO2-eq.	kg Sb-eq
Referentie-viaduct A15	179.992	1.929.536	264.807	131.238	1.407.095	192.791	115.930	1.242.544	170.559
Circulaire Boogviaduct	86.167	788.209	76.057	70.177	661.285	55.142	70.130	661.916	72.743
Vershil	-52%	-59%	-71%	-47%	-53%	-71%	-40%	-45%	-57%

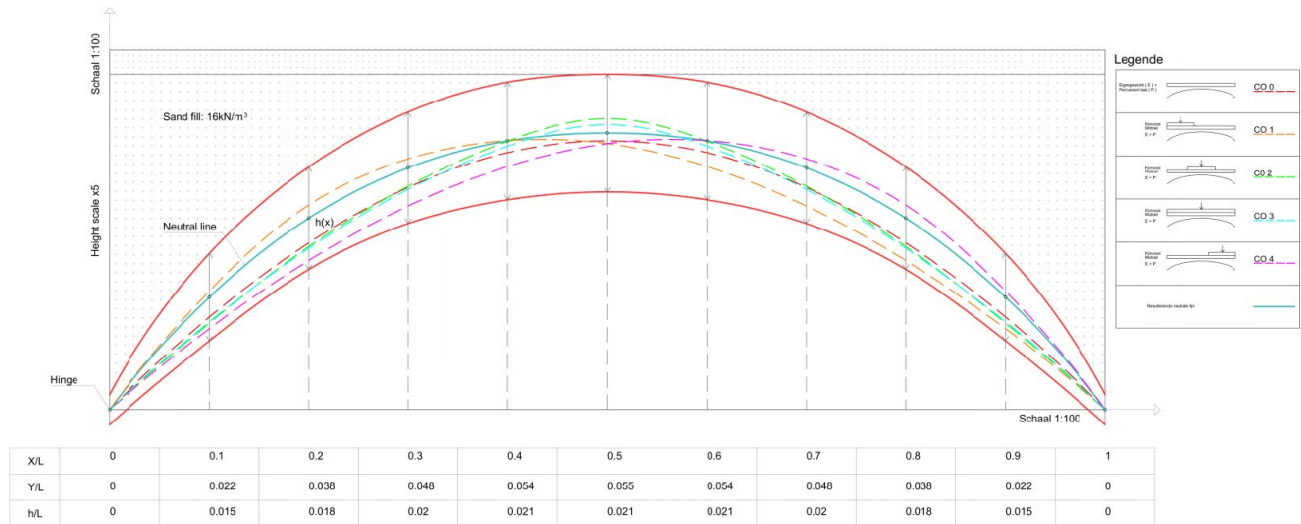
Het Circulaire Boogviaduct reduceert de milieu-impact (in MKI) met 52% ten opzichte van een conventioneel betonnen viaduct. De gevoeligheidsanalyse toont aan dat het verschil in milieu-impact kan teruglopen bij toekomstige verduurzaming van de maatschappij, maar het Circulaire Boogviaduct blijft een significante milieuwinst houden.

3.2 Haalbaarheid

In deze paragraaf wordt nader ingegaan op de technische haalbaarheid van het Circulaire Boogviaduct. In deze paragraaf worden de resultaten per werkpakket beschouwd zoals beschreven in paragraaf 2.1.

3.2.1 Werkpakket 1 – Optimale krachtwerving

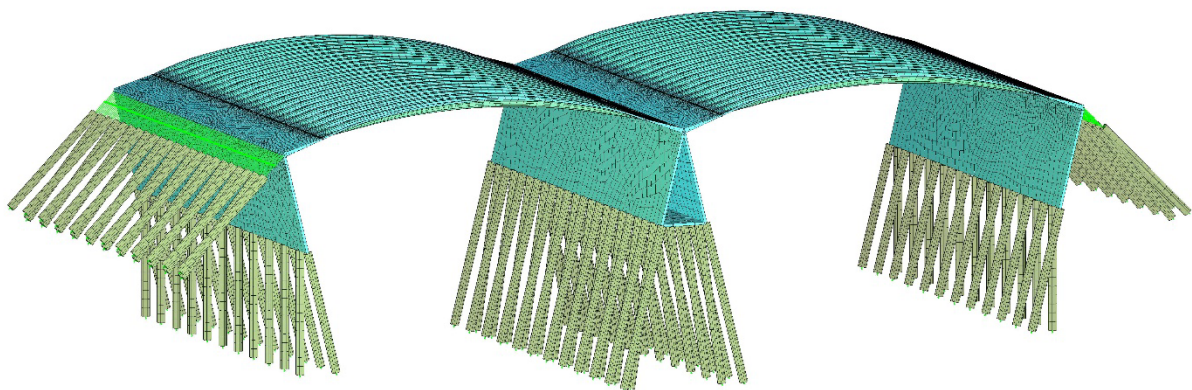
Het vinden van een correcte booggeometrie is cruciaal voor het slagen van het concept. De geometrie van de structuur moet zodanig gekozen worden, dat buiging in langs- en dwarsrichting tot een minimum wordt beperkt. We bepalen de correcte geometrie a.d.h.v. 'formfinding'.



Figuur 2: formfinding van de booggeometrie

Buiging in de structuur reduceren komt neer op het beperken van de variatie van de amplitude van de druklijnen. Er zijn twee scharnieren in elke boog geïntroduceerd en sturen zo de druklijnen steeds door 2 welgekozen punten. Op die manier zijn de druklijnen dichter naar elkaar geduwd, de buiging gereduceerd en dus ook het materiaalgebruik. Hierdoor is er in de boogschalen naast de staalvezels in het UHSVB geen bijkomende wapening nodig gebleken.

In een eerste stap in het ontwerpproces is gezocht naar een optimale geometrie waarin de krachtwerving is gecontroleerd a.d.h.v. theoretische analyses. Het resultaat hiervan is vervolgens gevalideerd in een complete EEM-analyse, zodat reeds in deze fase een correcte inschatting is gemaakt van de haalbaarheid van het concept en een realistisch beeld is gevormd bij de benodigde hoeveelheid materialen.

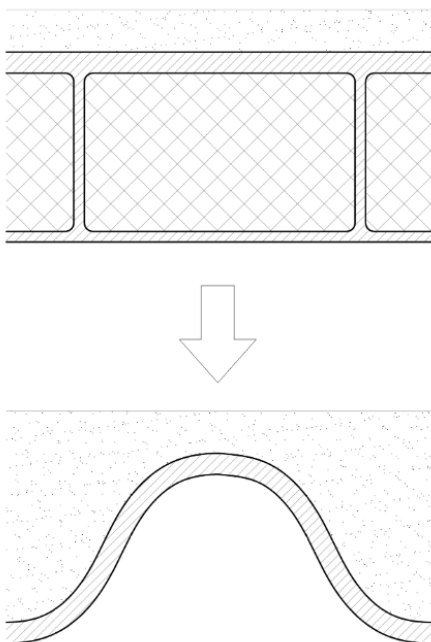


Figuur 3: EEM-analyse van het integrale systeem

Het EEM geeft inzicht in de krachtswerking in de structuur en de interactie met het gedrag van de fundering die voor integraalbruggen typisch relevant is. De resultaten zijn gebruikt voor een eerste analyse van enkele belangrijke constructieve details. Het rekenmodel is bovendien een uiterst geschikte tool om een aantal 'gevoeligheidsanalyses' uit te voeren. Zo is bijvoorbeeld onderzocht hoe gevoelig de structuur is bij zetting van de landhoofden, of de structuur in staat is om krachten te herverdelen wanneer constructiedelen uitvallen en hoe groot spanningsvariaties zijn om een beeld te krijgen bij hoe vermoeiingsgevoelig de constructie is. Meer informatie staat in de technische rapportage [2].

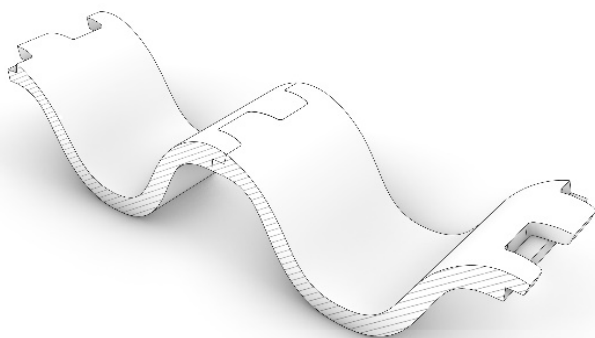
3.2.2 Werkpakket 2 – UHSVB-boogschaal

UHSVB is een ideaal materiaal voor ons concept: Het kan in complexe vormen gegoten worden en is in staat om trekkrachten en zeer hoge drukkrachten op te nemen, zonder toepassing van bijkomende wapening. Om ontwerpparameters te bepalen is gebruik gemaakt van buitenlandse normen en richtlijnen, waaronder de Franse norm NF-P-18-710. Realistische materiaalkarakteristieken zijn bepaald in overleg met specialisten van VITO.



Figuur 4: Overstap van sandwichboogligger naar gegolfd booggewelf

De 16,5 m lange boogelementen van de UHSVB boogschaal worden volledig geoptimaliseerd naar de krachten die ze zullen afdragen. Wij zochten daarom naar oplossingen met een dunne schaal. Aanvankelijk was het 'sandwich-systeem' bedacht om de variatie in excentriciteit van de drukkrachten op te nemen. Dit systeem heeft echter enkele nadelen. De interne holtes bemoeilijken de uitvoering van de elementen. De oplossing is ook niet materiaalefficiënt: er zijn meerdere 'lagen' die elk om praktische redenen een minimale dikte hebben. De bovenste laag wordt belast door lokale wiellasten en heeft een nog grotere dikte nodig. Om deze problemen op te lossen zijn we overgestapt op een enkellaags gegolfd booggewelf. De golven kunnen de excentriciteit in drukkrachten opnemen, hebben geen interne holtes en de schaaldikte die nodig is om lokale wiellasten op te nemen wordt dubbel benut.



Figuur 5: Dwarsdoorsnede over twee geschakelde boogliggers

De boogschaal is samengesteld uit boogliggers met een vaste maat. Elke boogligger ligt vast tussen twee scharnierpunten. De boogligger drukt naar buiten, zoekt een laterale steun en zet zichzelf vast tegen landhoofd en pijler. Onderling worden de boogliggers in elkaar 'gehaakt' met een systeem van 'vingers' die verhinderen dat twee naast elkaar liggende boogliggers t.o.v. elkaar kunnen vervormen.

3.2.3 Werkpakket 3 – UHSVB-middenpijler en -landhoofdwand

Om de boogwerking in de boogchaal te mobiliseren, moet de onderbouw ontworpen worden om spatkrachten op te nemen. De funderingspalen zijn daarom schoor geplaatst. Krachten uit de boogchaalen worden via geprefabriceerde UHSVB-elementen afgeleid naar de funderingspalen. Pijler en landhoofd hebben net als de boogchaalen een vormgeving die is afgeleid uit de krachswerking. Ook in deze elementen is materiaalgebruik geoptimaliseerd.

Het Circulaire Boogviaduct is een integraalbrug waarbij de constructie zoveel mogelijk mechanisch is gekoppeld met funderingspalen. Dit is materiaalefficiënt en laat eenvoudige demontage toe. Enkel bovenaan het landhoofd wordt een in-situ knoop gestort in geopolymeerbeton om lokale drukkrachten beter te spreiden. Het UHSVB wordt met een folie gescheiden van het geopolymeerbeton, zodat dit bij demontage los kan worden gemaakt.

In het concept worden verschillende prefab-elementen aan elkaar geschakeld. Belangrijk is daarom om een stel mogelijkheid te voorzien die voldoende bouwtoeranties kan ondervangen en waarmee nauwkeurige en gecontroleerde plaatsing mogelijk is. We voorzien deze mogelijkheid achteraan de landhoofdwand.

3.2.4 Werkpakket 4 – Scharnierpunt

De scharnieren sturen de krachten door één punt. Zo is de krachswerking bij variaties door externe invloeden beter beheerst. Dit is zeker het geval voor variaties t.g.v. krachten door verkeer op het brugdek, maar ook door bijvoorbeeld zettingen van de steunpunten. Het concept is vergelijkbaar met klassieke vakwerkspanten waar vaak scharnierpunten geïntroduceerd werden, structuren die merkbaar minder zettingsgevoelig blijken.

De introductie van scharnierpunten in de structuur heeft niet alleen constructieve voordelen. Het past ook perfect binnen het modulair concept. Scharnieren die op druk worden belast, dragen krachten eenvoudig via contactdruk over. Complexe en moeilijk te demonteren verbindingdetails ontbreken.

De detaillering is geïnspireerd op een 'rocker-bearing'; twee licht gekromde oppervlakken worden in contact gebracht. Via een lokale contactdruk kunnen zeer hoge krachten worden overgedragen door een klein oppervlak. Het detail stuurt de krachten nagenoeg door één contactlijn waarbij rotaties van boogchaal t.o.v. onderbouw mogelijk blijven. We realiseren zo een zeer eenvoudig, compact en onderhoudsarme scharnier, waarbij optimaal gebruik wordt gemaakt van de hoge druksterkte van UHSVB.

Eerste laboratoriumtesten werden uitgevoerd op een proefstuk van het scharnierdetail op ware grootte, waarmee drukkrachtcapaciteit en rotatiecapaciteit onderzocht zijn. De testresultaten [5] zijn veelbelovend: uit de testen volgt een karakteristieke drukkrachtcapaciteit van 5560kN/m, ruim boven de nodige 1940kN/m.



Figuur 6: Eerste laboratoriumtesten werden uitgevoerd op een proefstuk van het scharnierdetail op ware grootte.

3.2.5 Werkpakket 5.1 – Geopolymeerbeton

Voor deze studie is de haalbaarheid van een betonmengsel op basis van een 100% secundair granulair skelet in combinatie met een binder vrij van portlandcement (= 100% circulair geopolymeerbeton) onderzocht.

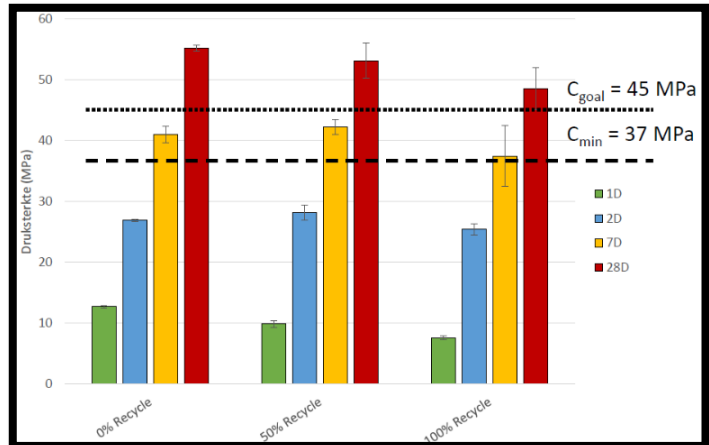
Met de bestaande kennis van onze samenwerkingspartner ResourceFull is op basis van laboratoriumonderzoek een geopolymeerbeton met 100% secundair skelet (gerecycleerd zand en granulaat) bepaald zonder de verwerkbaarheid en de sterkte nadelig te beïnvloeden. De parameters die in deze fase zijn beschouwd, zijn de zetmaat (eis S4 = 160mm – 210mm) en de sterkteklasse (eis C30/37).

In drie iteraties is een geopolymeerbetonmengsel gevonden dat voldoet aan de gestelde eisen:

- De zetmaat voldoet aan de gestelde S4 consistentieklasse, waarbij als aandachtspunt geldt dat de verwerkbaarheid hoofdzakelijk beïnvloed wordt door de toevoeging van gerecycleerde zand. Door toevoeging van extra vloeiverbeteraar en een vloeistabilisator wordt zetmaat S4 behaald.
- De sterkte-klasse vertoont zoals verwacht een dalende trend bij verhoging van het percentage gerecycleerd materiaal, maar voldoet binnen de standaarddeviatie aan de beoogde C30/37 sterkte (zie Figuur 8).



Figuur 7: proefmonsters geopolymeerbeton



Figuur 8: resultaten laboratoriumproeven geopolymeerbeton met 100% gerecycleerde betongranulaten in vergelijking met 0% en 50% gerecycleerd granulaat

Een verwerkbaar geopolymeerbeton met 100% hergebruikt materiaal voor toepassing in het landhoofd is dus haalbaar. Een veelbelovende constantering uit de diverse iteraties zijn de goede eigenschappen (vloeibaarheid en sterkte-ontwikkeling) door het (deels) vervangen van de gerecycleerde zandfracties (breekzand) door slakzand, eveneens een gerecycleerd restproduct. Voor nadere toelichting op de resultaten van het onderzoek van het geopolymeerbeton verwijzen we naar de rapportage van ResourceFull [4].

In fase 2 is nog verder onderzoek nodig naar de duurzaamheidsaspecten van de gevonden geopolymeerbetonmengsel om het mengsel volgens normering toe te passen. Hierin wordt in hoofdstuk 4 van dit rapport nader ingegaan.

3.2.6 Werkpakket 5.2 – Fundering

Voor de fundering van het Circulaire Boogviaduct is een haalbaar ontwerp en uitvoering van herwinbare stalen funderingspalen bekeken samen met onze funderingspartner Franki Grondtechnieken. Op basis van de krachten uit het EE-model en de geotechnische gegevens van het referentieproject is de benodigde paalfundering bepaald (pagina 12). Tabel 3 geeft een overzicht van de paalconfiguratie van in de grond gevormde schroefpalen met verloren casing, niet gevuld met grond en/of beton. Om de palen herbruikbaar te maken voor 200 jaar wordt het corrosieverlies mee verrekend in de wanddikte van de buispalen. De paalconfiguratie is sterk afhankelijk van de grondgesteldheid en zal daarom per viaduct geëngineerd moeten worden.

Tabel 3: paalconfiguratie o.b.v belastingen uit model

Locatie	Lengte paal	Type (diameter)	Belasting
Landhoofd – schoorpalen (1:1)	13,50m1	406/560	1.550kN
Landhoofd – in lijn met UHSVB-wand	13,50m1	324/450	-900kN (trek) 200kN (druk)
Middenpijler	13,50m1	406/560	-700kN (trek) 1.300kN (druk)

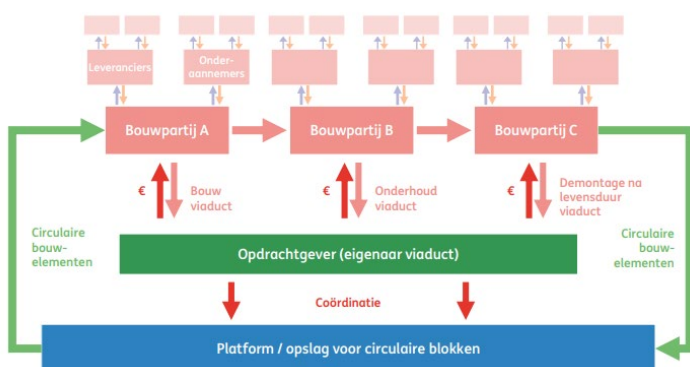
De conclusie van de technische uitwerking als de uitvoerbaarheid van de paalconfiguratie is: op de locatie van het referentieviaduct zijn stalen buispalen haalbaar. Vanwege de relatief goede, zandige ondergrond zal er groutinjectie nodig zijn om op diepte te komen. Ook de trekpalen zullen met grout aangebracht worden om de trekbelasting te halen. Daardoor is herwinbaarheid op deze specifieke locatie alleen

mogelijk door te toepassing van sonic-vibration om de grouterschil los te trillen, of een alternatief injectiemateriaal (polymeren). In een minder zandige ondergrond zoals vaak in Nederland het geval, is het mogelijk de buispalen regulier uit te schroeven voor hergebruik.

3.3 Economisch perspectief

3.3.1 Onze visie op het circulaire businessmodel

Het Circulaire Boogviaduct is één van de vele oplossingen die de volledig circulaire economie in 2050 mogelijk maken. Deze ambitie vereist een fundamentele verandering in de gebruikelijke rollen in de gehele bouwketen. De circulaire economie komt er, alleen h^oe is uiterst onzeker. Zeker is wel dat het niet over één nacht ijs gaat. In huidige situatie zijn de asset owners de (publieke) opdrachtgever en opereert de markt als ontwerper, uitvoerder en onderhoudspartij. Daarom zien wij "de opdrachtgever als regisseur" als het meest haalbare circulaire business model om op korte termijn de meeste impact in de transitie te



maken: Een publieke opdrachtgever koopt integraal het object in. Per project wordt de gewenste scope bepaald; bijvoorbeeld klassiek of uitgebreidere DBMD-contracten (*design-build, maintain & dismantle*). De marktpartijen behouden de diversiteit aan gevraagde services om op in te spelen: alleen de realisatie en onderhoud of volledig geïntegreerd met onderhoudsperiode.

Opdrachtgevers brengen de circulaire impuls laagdrempelig in en kunnen afhankelijk van het eigen duurzaamheidsbeleid, de projectsituatie en marktsituatie de ambities zo hoog

zetten als ze zelf willen. De circulariteitsintenties worden geborgd door contractueel minimale kwaliteitseisen te stellen en te gunnen op TCO (Total Cost of Ownership): een TCO op financiële kosten, maar ook op milieukosten. Dergelijke methoden zijn al volwassen in gebruik. De her te gebruiken circulaire objecten blijven in basis juridisch eigenaar van de publieke opdrachtgever. Die kan besluiten het direct her te gebruiken in zijn areaal, maar de kans is groot dat de timing niet goed uitkomt. Daarom moeten er onafhankelijke platformen actief worden die handelen in de circulaire objecten uit functie; het verzorgt de inkoop, opslag, hercertificering, verkoop, administratie en matcht vraag/aanbod van elementen. Deze platforms zijn private ondernemingen die met verkoop of lease winst maken. Bestaande voorbeelden zijn commerciële groundbanken, zandwinputten. Voor de grootschalige opstart kan een bestaand initiatief zoals bruggenbank.nl worden uitgebreid met opslag en herkeuring van elementen. Bij voorkeur is dit een overheidsgestuurd zelfstandig bestuursorgaan (zbo) zijn die later privatiseert. Behoud van een onafhankelijke keuring op technische kwaliteit, en daarmee restwaarde, is echter cruciaal om dit systeem werkend te houden. Daarom blijft de kwaliteitskeuring bij een zbo, vergelijkbaar met het bestaande Technical Inspection Service (TIS) zoals deze reeds bij civiele bouwwerken bestaat.

Omdat het Circulaire Boogviaduct slechts een deel van de circulaire oplossing is, moet er ruimte zijn voor allerhande innovaties. Concurrentie verbetert het concept en werkt het best als partijen vanuit hun kracht opereren: in dit circulaire verdienmodel is er ruimte voor bestaande partijen om hun deel van het Circulaire Boogviaduct te realiseren. Maar er is ook ruimte voor opdrachtgevers of nieuwe pioniers om het Circulaire Boogviaduct as a service te exploiteren. Zolang wij onze kennis delen, komt de circulaire transitie op gang.

3.3.2 Uitwerking van het IE-recht en gebruiksrecht

In onze visie bereik je alleen samen een significante verduurzaming van de maatschappij in een circulaire economie. Daarom dragen wij actief het gedachtegoed van het Circulaire Boogviaduct verder uit. Het Circulaire Boogviaduct is aan het eind van de SBIR-fase 2b *open source* beschikbaar op een vrij toegankelijk

online platform. Om de transitie naar een circulaire economie te versnellen nemen wij twee stimuleringsmaatregelen om de verdere doorontwikkeling aan te moedigen. Ons motto is 'spread the word':

- De resultaten worden online gepubliceerd onder de publieke open-source licentie CC-BY-SA van Creative Commons¹. Hierdoor mag iedereen de informatie gebruiken en doorontwikkelen, met in achtneming van twee principes: *share alike* en *attribution*. Door *share alike* dienen doorontwikkelingen op het Circulaire Boogviaduct opnieuw wereldkundig gemaakt te worden onder dezelfde open source licentie. Door *attribution* moeten derden onze naam noemen bij gebruik van informatie uit het Circulaire Boogviaduct en aangeven wat ze hebben gewijzigd en doorontwikkeld. Op deze manier loopt het circulaire vuurtje steeds verder en dooft het niet uit.
- Wij lichten regelmatig onze resultaten toe in presentaties aan specialisten en potentiële publieke opdrachtgevers. Ten eerste op het IABSE congress in september 2021 te Gent, waarvoor wij onze paper reeds hebben ingediend. Ten tweede organiseren wij, in samenwerking met RWS, een online seminar aan het einde van fase 2a en 2b om de (tussen)resultaten toe te lichten.
- Om de inpasbaarheid voor toekomstige projecten te verzekeren, houden wij een (online) seminar voor projectteams van opdrachtgevers om rekening te houden met de inpasbaarheid van het Circulaire Boogviaduct. Opdrachtgevers worden bekend met het concept en leren hoe ze aan de voorkant rekening kunnen houden om duurzame innovatie te stimuleren.

Voor de verdere verspreiding van het gedachtegoed in de Rijkswaterstaat organisatie maken we gebruik van het netwerk van het Projectteam SBIR Oproep Circulaire Viaducten, om lezingen te organiseren en projectteams te informeren. Deze samenwerking richten we in als gelijkwaardige partners volgens de principes van het project DOEN²: "maximale klantwaarde" en "eerlijk-geld-voor-eerlijk-werk":

- De maximale klantwaarde bereiken we door het gesprek aan te gaan met geïnteresseerde en sceptische projectteams binnen Rijkswaterstaat voor toepassing van het Circulaire Boogviaduct. Uiteindelijk moet het concept door hen gebruikt worden in (de voorbereiding van) projecten.
- Binnen het 'eerlijk-geld-voor-eerlijk-werk-principe' delen wij elke kwartaal de gemaakte kosten en verbruik van het budget tijdens fase 2. Het is continue inzichtelijk welke kosten nodig zijn om de innovatie uit te werken en te valideren. Wij nemen het risico dat hiervoor meer kosten nodig blijken dan beschikbaar is voor fase 2. Daarom stellen wij als voorwaarde bij de open source dat Rijkswaterstaat aansluitend op fase 2b minimaal 1 opdracht voor het ontwerp en realisatie van een Circulaire Boogviaduct opdraagt aan BESIX/NEY&Partners om tot dan toe gemaakte aanvullende investeringskosten (geraamd op 400.000 euro) en gegenereerde goodwill uit het SBIR-traject te kunnen bekostigen. Een deel van deze kosten kunnen mogelijk ook al door het donorproject worden bekostigd, waarvoor BESIX/NEY&Partners met dit projectteam meedenkt in de mogelijkheden.

De inmiddels opgedane kennis geeft ons voldoende voorsprong voor de toepassing van het concept in eigen projecten om de circulaire transitie een verdere boost te geven.

3.3.3 Een product waar klanten voor willen betalen

Het Circulaire Boogviaduct kan alleen een noemenswaardige bijdrage aan de milieu impact hebben als het maatschappelijk geaccepteerd wordt. Het moet functioneel zijn, esthetisch goed in te passen en de kosten dienen acceptabel te zijn naar de huidige maatschappelijke standaard. Een Circulair Boogviaduct dat relatief duur is zal tot weerstand leiden. Daarnaast speelt de (on)bekendheid van beheerders met de gebruikte materialen en technieken ook een rol. Daarom is ervoor gekozen om beton te kiezen als belangrijkste bouw materiaal als bekend, vertrouwd en onderhoudsarm materiaal.

In de huidige maatschappij zijn onderbouwde investeringsbesluiten nodig om infrastructuur te bouwen of vervangen. Een afweging van de kosten over de gehele levenscyclus is daarbij leidend, zodat in het ontwerp keuzes gemaakt worden die onderhoudskosten of vervangingen in de toekomst voorkomen: optimalisatie van de TCO (Total Cost of Ownership). Met een Life Cycle Costing (LCC) berekening is het Circulaire Boogviaduct vergeleken met het referentieviaduct Kunstwerk 21 uit project VI A15 (zie paragraaf 3.1.2). Het

¹ Meer informatie over dit open source principe is te vinden op: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>

² Meer informatie over het gedachtegoed van DOEN, en onze ervaringen bij de Nijkerkerbrug: <https://projectdoen.nu/projecten-doen/nijkerkerbrug>

Circulaire Boogviaduct bevat elementen die in een circulaire economie hun waarde behouden. Daardoor wijken enkele kostenposten af, die hieronder kort zijn toegelicht.

- **Initiële bouwkosten:** De bouw van het Circulaire Boogviaduct is slechts 9% duurder dan een conventioneel viaduct. De herwinbare buispalenfundering is echter fors duurder dan de kostenefficiënte prefab betonpalen uit het referentieviaduct.
- **Onderhoudskosten:** de onderhoudsplanning van het referentieviaduct bevat uitsluitend inspecties, deformatiemetingen en herzetten van taludbekleding. De onderhoudskosten zijn vergelijkbaar voor beide viaducten. Het Circulaire Boogviaduct heeft extra groenonderhoud en frequenter deformatiemetingen nodig omdat het een innovatie betreft, maar bespaart op het ontbreken van de taludbekleding.
- **Sloop/demontage:** de sloopkosten voor het Circulaire Boogviaduct zijn beperkt, omdat het grotendeels bestaat uit het demonteren van UHSVB-elementen en alleen het geopolymerbeton gesloopt wordt.
- **Opslag en hercertificering:** het Circulaire Boogviaduct kent aanvullende kosten voor de tijdelijke centrale opslag van de UHSVB-elementen en stalen funderingspalen. Aangenomen is dat deze gemiddeld 3 jaar opgeslagen worden en vervolgens herkeurd worden. Daarbij is zelfs aangenomen dat 10% van de UHSVB-elementen en stalen buispalen wordt afgekeurd, bijvoorbeeld bij beschadigingen door aanrijdingen of onzorgvuldig demontage/transport.
- **Herbouw/hermontage:** de herbouwkosten voor het Circulaire Boogviaduct zijn lager, omdat er geen productiekosten zijn voor de hergebruikte UHSVB-elementen en stalen buispalen. Het plaatsen van deze onderdelen en de bouw van de overige objecten brengen alsnog de nodige kosten met zich mee.

Tabel 4: directe kosten per levenscyclusfase (de totale verschillkosten staan in Tabel 5)

Kostenpost	Referentie-viaduct A15	CirculaireBoogviaduct	Procentueel verschil
Initiële bouwkosten	€ 990.000	€ 1.080.000	+9,2%
Onderhoudskosten (voor 58 jaar)	€ 445.000	€ 430.000	-3,3%
Sloop/demontage	€ 135.000	€ 76.000	-44,1%
Centrale opslag en hercertificering van hergebruikte elementen	€ 0	€ 220.000	n.v.t.
Herbouw/hermontage	€ 990.000	€ 505.000	-49,0%

De hogere investeringskosten worden over de looptijd terugbetaald, uit te drukken in de TCO. Daarvoor is de LCC berekend over een periode van 200 jaar voor een drietal scenario's:

- **Scenario A:** de nieuwgebouwde viaducten hebben een functionele levensduur van 58 jaar, voordat deze wordt gesloopt/hergebruikt. De viaducten worden 1x gebouwd, 3x gesloopt/gedemonteerd en ook 3x herbouwd. De kosten voor opslag en hercertificering is 3x meegenomen, bij elke cyclus van demontage.
- **Scenario B:** de nieuwgebouwde viaducten hebben een functionele levensduur van 80 jaar, hetzelfde scenario als beschreven in paragraaf 3.1.2 onder scenario B. De viaducten worden 1x gebouwd, 2x gesloopt/gedemonteerd en ook 2x herbouwd. De kosten voor opslag en hercertificering is 2x meegenomen, bij elke cyclus demontage.
- **Scenario C:** de nieuwgebouwde viaducten hebben een functionele levensduur van 58 jaar, maar er is rekening gehouden met tegenvallende herbruikbaarheid van de UHSVB-elementen en stalen buispalen. De elementen worden daardoor slechts eenmalig hergebruikt, waardoor bij de derde levenscyclus opnieuw de volledige bouwkosten voor allebei de viaducten nodig zijn. De viaducten worden dus 1x gebouwd, 3x gesloopt/gedemonteerd en ook 3x herbouwd. Voor de herbouw van het Circulaire Boogviaduct is eenmalig de volledige initiële bouwkosten gerekend in plaats van de herbouwkosten. De kosten voor opslag en hercertificering is 2x meegenomen, aangezien de UHSVB-elementen en stalen buispalen bij de tweede herbouw volledig vernieuwd worden.

Elk scenario is doorgerekend over de gehele levensduur van 200 jaar en verdisconteerd over de tijd. Voor een reële discontovoet is gebruikt gemaakt van het recente rapport van het Ministerie van Financiën over discontovoeten voor Maatschappelijke Kosten Batenanalyses (MKBA's)³. Het rapport hanteert een langjarige discontovoet van 1,6%. Deze waarde is toepasbaar voor "vaste, verzonken kosten", waar investeringen in publieke fysieke infrastructuur zoals wegen genoemd worden. De toepasbaarheid van een reële discontovoet is voor een periode van 200 jaar zeer onzeker en daarom minder representatief. Het rapport heeft gevoeligheidsanalyses uitgevoerd waaruit blijkt dat de onzekerheden na 75 jaar sterk toenemen en gaat zelf uit van zichtperiodes van maximaal 100 jaar. Daarom zijn de absolute, cumulatieve kosten met elkaar

³ Rapport Werkgroep discontovoet 2020, Ministerie van Financiën, 9 oktober 2020.

vergeleken zonder de kosten in de tijd te verdisconteren (discontovoet van 0%). Tabel 5 bevat de resultaten voor alle scenario's.

Tabel 5: verschil in TCO over 200 jaar

	Cumulatieve netto contante waarde (NCW) met een discontovoet van 1,6% per jaar	Cumulatieve absolute kosten, niet verdisconteerd
Scenario A: 58 jaar functionele levensduur	-5,7%	-15,8%
Scenario B: 80 jaar functionele levensduur	-2,1%	-12,7%
Scenario C: tegenvallende herbruikbaarheid	-3,1%	-9,8%

Het Circulaire Boogviaduct is dus over de lange termijn een significant goedkoper alternatief dan een regulier viaduct (scenario A). Zelfs als viaducten in de toekomst langer hun functie behouden (scenario B) of elementen slecht herbruikbaar zijn (scenario C) blijft het Circulaire Boogviaduct een zeer betaalbaar en concurrerend met bestaande liggerviaducten.

3.3.4 Onze aanpak de innovatie op de markt te brengen

Het Circulaire Boogviaduct biedt op korte termijn een robuuste oplossing voor in potentie 3000 bestaande wegviaducten in Rijks- en Provinciaal bezit. Het commerciële succes borgen we door enerzijds het ontwerpconcept van het Circulaire Boogviaduct kenbaar te maken; het is als open source beschikbaar, we presenteren het binnen ons netwerk, op congressen, tijdens seminars en bij potentiële opdrachtgevers. BESIX/NEY&Partners versnelt de marktpenetratie met het plaatsen van een Circulair Boogviaduct op 1 van onze projecten in fase 2b, waarmee op ware schaal de haalbaarheid toonbaar is.

Tevens dienen de UHSVB-elementen breed verkrijgbaar te zijn voor afnemers. Daarom hebben we met Haitsma Beton een toonaangevende betonproducent als partner gevonden om de UHSVB-elementen in productie te nemen. De opschaling van de productie is mogelijk omdat de UHSVB-elementen grotendeels met bestaande technieken worden vervaardigd. In deze haalbaarheidsstudie is een specifieke overspanning over 3 rijbanen met vluchtstrook uitgewerkt. De UHSVB-elementen voor het landhoofd en de middenpijler kennen een breed toepasbare standaard hoogte. Om de maatvoering passend te maken voor elk project kan met de lengte van de boogliggers worden gevarieerd. De boogliggers zullen in een aantal standaard maten op de markt komen, zodat deze ook uitwisselbaar zijn tussen verschillende projecten. Ons voorstel hierin is om de volgende overspanningen aan te houden:

Tabel 6: overzicht standaard overspanningen van de boogsegmenten

Type	Lengte boogligger	Type onderliggende weg
1	10,0 m1	1 rijbaan + vluchtstrook
2	13,5 m1	2 rijbanen + vluchtstrook
3	16,5 m1	3 rijbanen + vluchtstrook
4	20,0 m1	4 rijbanen + vluchtstrook
5	23,5 m1	5 rijbanen + vluchtstrook

Geometrische inpassing

Hoewel de boogliggers zeer dun zijn, heeft de boogvorm van het Circulaire Boogviaduct iets meer hoogte nodig dan een conventioneel viaduct. Een boog met een hoogte/breedte verhouding van 1:11 heeft circa 200 mm extra hoogte nodig. Het referentievaduct is 5826 mm hoog, waardoor de hoogtetoeename 3,4% betreft. Dat valt binnen de 5% hoogtetoeename dat als doelstelling voor deze haalbaarheidsstudie is genomen. Deze hoogtetoeename wordt opgenomen in de helling naar het viaduct (toegestane helling van 4-5%), maar heeft een minimale impact op de inpassing van de bovenliggende weg. Dit is een aandachtspunt voor opdrachtgevers om in de voorbereiding van toekomstige projecten rekening mee te houden.

4 Voorstel voor fase 2

4.1 Samenwerking

Om fase 2 tot een circulair succes te maken, omarmen we het idee van een co-creatie met Rijkswaterstaat. Om dit te stimuleren, wordt gedurende de gehele fase 2 een 2-wekelijks voortgangsoverleg geïnitieerd. Dit overleg wordt voorgezeten door de projectmanagers van het consortium en Rijkswaterstaat waarbij, afhankelijk van de agendapunten, de benodigde experts van de betrokken partijen en kennispartners aanschuiven op vlak van technische, economische of milieu-technische uitwerking. Dit overleg vormt de basis voor een succesvolle samenwerking daar alle partijen verplicht betrokken worden bij het gehele proces en er steeds ruimte is om elkaar te versterken om tot een eindproduct te kunnen komen dat voor alle partijen bevredigend is.

4.2 Milieu-impact

We updaten de milieu-impactberekening naar het doorontwikkelde ontwerp en laatste inzichten voor de EPD's van de innovatieve materialen.

4.3 Economisch perspectief

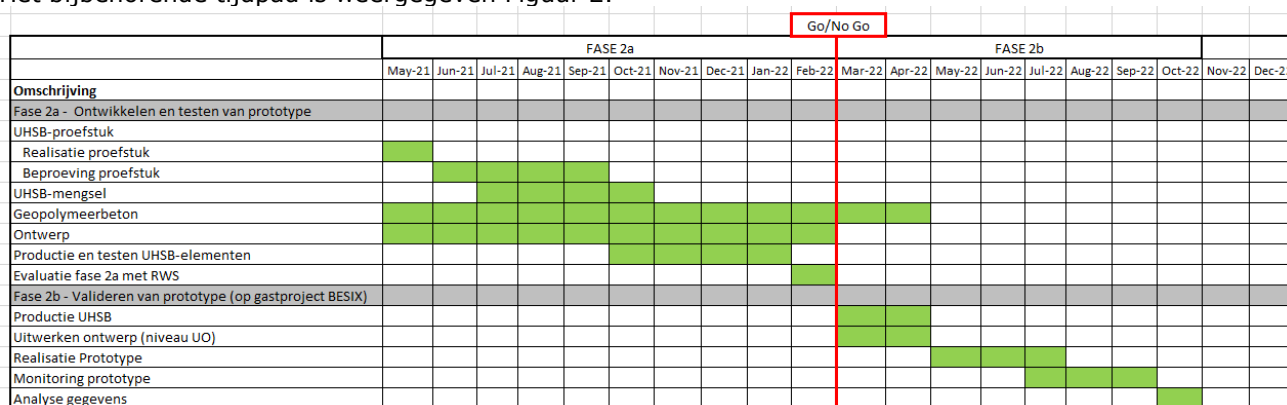
Om het succes van de circulaire economie te versterken, sluiten we aan bij bestaande initiatieven welke de gedachte binnen het Circulaire Boogviaduct versterken. . Onder andere haken we het platform bruggenbank.nl aan om het Circulaire Boogviaduct geschikt te maken.

4.4 Technische haalbaarheid

Voor fase 2 hanteren we de opzet zoals deze in de uitvraag is voorgesteld:

- Fase 2a: ontwikkeling prototype
In deze fase ronden we de nodige laboratoriumproeven af om de exacte materiaaleigenschappen en detaillering te bepalen.
- Fase 2b: validatie prototype
In deze fase realiseren we een prototype op ware schaal. Hierbij wordt gekozen voor de realisatie van een boogviaduct met 1 overspanning ondersteund door twee landhoofden. De breedte van het prototype is 8m (8 individuele boogliggers) en de overspanning is conform het ontwerp uit de haalbaarheidsstudie (liggeroverspanning: 16,50m1).

Het bijbehorende tijdspad is weergegeven Figuur 2.



Figuur 9: indicatief tijdspad fase 2

4.4.1 Fase 2a – Ontwikkeling prototype

In navolging van de resultaten en onderzoeken uit deze haalbaarheidsstudie, worden in fase 2a de volgende beproeving uitgevoerd per werkpakket:

- Werkpakket 1: integraliteit form finding
 - Verder uitdetailleren integraal ontwerp op basis van de resultaten uit de materiaalproeven
- Werkpakket 2: UHSVB-boogliggers

- Beproeven en maakbaarheid van de boogliggers (zie testplan in paragraaf 4.3.2)
- Optimalisaties op basis van testresultaten verwerken
- Werkpakket 3: UHSVB-middenpijler en landhoofdwallen
 - Beproeven en maakbaarheid van de UHSVB-elementen van de onderbouw
 - Optimalisaties op basis van testresultaten verwerken
- Werkpakket 4: scharnierpunt
 - Doorontwikkelen van het scharnierpunt waarbij 2 trajecten worden beschouwd:
 - Verder onderzoek van het scharnierpunt zoals in fase 1 ontwikkeld
 - Een custom-made scharnierpunt ontwikkelen met onze partner Maurer, waarbij reeds een concept is uitgewerkt op basis van een cilindervormig scharnier bekleed met kunststof (zie MSM van Maurer)
 - Optimalisaties op basis van testresultaten verwerken
- Werkpakket 5: geopolymerbeton landhoofden
 - Op basis van de eindresultaten van fase 1, wordt in fase 2 onderzoek gedaan naar de duurzaamheidsaspecten van het circulair geopolymerbeton. Hierbij wordt als eis de milieuklasse XC4, XD3 en XF4 aangehouden.

Analoog als fase 1 wordt door middel van een iteratief proces dit onderzoek uitgevoerd. Een nadere toelichting op het testprogramma van het geopolymerbeton is terug te vinden in document [8].

Voor de uitvoering van fase 2a wordt zowel op laboratoriumschaal als op proefmodellen gewerkt, waar na interpretatie van de resultaten overgegaan kan worden op productie van proefstukken op ware schaal.

Tabel 7 geeft het testplan horende bij fase 2a. Aan de hand van het testplan wordt in samenwerking met Rijkswaterstaat en zijn kennispartners, de validatie van de diverse verificaties vastgesteld.

In het testplan wordt onderscheid gemaakt tussen:

- Laboratoriumtesten:
Op deze schaal wordt specifiek naar het gedrag van het materiaal gekeken en gezocht naar de optimale samenstelling van de materialen voor de toepassing zoals deze nodig is bij het Circulaire Boogviaduct.
- Tests op een proefstuk van het UHSVB:
Gelijktijdig met de optimalisatie van de materiaalsamenstelling, worden proefstukken onder verschillende omstandigheden beproefd en beoordeeld.
- Tests op individuele UHSVB-elementen:
Na het succesvol afronden van de tests op de proefstukken, wordt op ware schaal onderzoek gedaan van de individuele elementen

Tabel 7: testplan fase 2a

Object	Toelichting testmethode	Verificatiemethode	Toelichting verificatiemethode
Laboratoriumproeven			
UHSVB	Krimpproef	Lengtemetingen proefstuk	Metten van de krimp na storten proefstuk. Dit op verschillende tijdstippen na de stort van het proefstuk
	Aantastingsproeven	- Proef voor interne vorst - Afschilferingsproef	- Vorstbestendigheid bepalen - Dooizoutbestandheid bepalen
	Dynamisch belasting	Vermoeiingsproef	Weerstand van UHSVB controleren op vermoeiing
	Statisch belasten	Drukproef	Druksterkte betonmengsel controleren
	Levensduur van UHSVB	<i>Gezien expertise op dit vlak, voorstel om dit in nader overleg met TNO te bepalen</i>	
Scharnier	Verdraaiing van scharnier	- Werking scharnierpunt	Door middel van verdraaiing, in combinatie met drukbelasting van

		- Visuele controle op schade aluminium scharnierpunt	UHSVB-proefmonster over het aluminium scharnierpunt
Geopolymeerbeton	Duurzaamheidsaspecten	<ul style="list-style-type: none"> - Weerstand tegen carbonatatie (na 28 dagen) volgens NBN EN 13295; - Weerstand tegen chloride-indringing (na 28 dagen) volgens NT Build 492; - Vorst-dooiweerstand in aanwezigheid van dooizouten volgens CEN/TS 12390-9 	<ul style="list-style-type: none"> - Invloed carbonatatie en chloride-indringing - Vorstbestendigheid bepalen - Dooizoutbestandheid bepalen
	Krimpmetingen	Lengte metingen proefstukken	Krimpgedrag geopolymeerbeton
Proefstukken			
UHSVB	Storten van proefstuk in vorm van booglijger	Visuele controle proefstuk en stort van proefstuk	<ul style="list-style-type: none"> - Gedrag/vloeibaarheid van betonmengsel bepalen en eventueel betonmengsel aanpassen - Manier van storten (pompen of manueel) bepalen - Vullingsgraad kist bepalen - Vervorming proefstuk bepalen
	Doorzagen proefstuk en bepalen vezeloriëntatie	Visuele controle	<ul style="list-style-type: none"> - De aanname in het ontwerp valideren De stortrichting aan te passen indien vezeloriëntatie nadelig blijkt te zijn
	Proefstukken met variërende nabehandeling storten	Visuele controle	Gedrag van betonmengsel na ontkisten bepalen en bijbehorende nabehandelingmethode bepalen
	Koppelen verschillende proefstukken	<ul style="list-style-type: none"> - Visuele controle - Drukproeven 	<ul style="list-style-type: none"> - Maakbaarheid/montage verschillende elementen bepalen - Krachtsoverdracht tussen vertanding bepalen
	Diverse weersomstandigheden	Visuele controle	Reactie vezels onder natuurlijke omstandigheden, en eventueel vezeltype op aanpassen
Scharnierpunt	Aanbrengen hoekverdraaiing	<ul style="list-style-type: none"> - Visuele controle - Drukmetingen 	Aansluiting en gedrag scharnierpunt
Individuele elementen			
UHSVB	Storten elementen	Visuele controle	Uitvoerbaarheid/vullingsgraad element met gekozen betonmengsel
	Onbelast	Glasvezelkabel op booglijger monteren	Rek in booglijger in onbelaste situatie (invloed temperatuur)
	Statisch en dynamisch belasten	x-y-z-verplaatsing	Vervorming booglijger onder variabele belastingen
	Verplaatsing oplegpunten (landhoofden)	Destructief onderzoek booglijger (tot breuk)	Gedrag booglijger bepalen bij horizontale verplaatsing Maximale horizontale verplaatsing oplegging bepalen

4.4.2 Fase 2b – validatie prototype

In fase 2b wordt het ontwikkeld prototype verder getest onder gebruiksomstandigheden. Hiervoor wordt een Circulair Boogviaduct met nuttige breedte van 5,4m (welke na validatie als fietsbrug kan fungeren) gerealiseerd. Dit viaduct bestaat uit een enkele overspanning van 20,5m1 en is 8m breed (8 USHB-boogliggers) welke getest wordt. Tabel 8 bevat het testplan horende bij fase 2b. In deze testfase wordt gekeken naar het gedrag van het prototype in zijn geheel. De separate onderdelen worden getest a.d.h.v. de beschreven verificatiemethoden.

Net als voor fase 2a wordt a.d.h.v. het testplan in samenwerking met Rijkswaterstaat en zijn kennispartners de validatie van de diverse verificaties vastgesteld.

Na de validatie van het prototype, kan Rijkswaterstaat een definitieve locatie van het prototype bepalen. Kosten horende bij de demontage, transport en montage naar een definitieve locatie zijn niet in beschouwing genomen, en zullen in een nader te bepalen overeenkomst tussen het consortium en Rijkswaterstaat vastgelegd worden.

Indien nodig draagt BESIX één van zijn lopende RWS-projecten, de Via15, aan om het Circulaire Boogviaduct te realiseren en in-situ te testen.

Tabel 8: testplan fase 2b

Object	Toelichting testmethode	Verificatiemethode	Toelichting verificatiemethode
UHSVB-boogligger	Statische belasting	Doorbuigingsmetingen	Monitoring doorbuiging boogliggers (individueel en onderling) onder statische en dynamische belasting
	Dynamische belasting aanbrengen	Rekmetingen op kritische onderdelen	Spanningsvariatie bepalen op kritische punten ter bepaling van mogelijk optreden vermoeiing
Geopolymeerbeton	Statische belasting	x-y-z-verplaatsing	Vervorming (met name horizontale verplaatsing) monitoren
Scharnier	Statische belasting	- Druksensoren - X-y-z-verplaatsing	- Controle drukverdeling op scharnierpunt - Gedrag scharnierpunt onder diverse belastingen
	Dynamische belasting	Visuele controle op schade scharnierpunt/aluminium	Door (visuele) controle van het scharnierpunt (aluminium) te controleren slijtage van scharnierpunt bepalen en eventuele aanpassingen op scharnierpunt doorvoeren.

4.5 Risico's en kansen

Op basis van de resultaten en analyse van de haalbaarheidsstudie zijn in onderstaande tabel de belangrijkste risico's opgesomd:

	Omschrijving	Oorzaak	Gevolg
1	Deformaties/vervormingen in de onderbouw zorgt voor instabiliteit van het viaduct	Het scharnierpunt werkt in 1 richting: Horizontale verplaatsingen van het landhoofd of te veel krimp veranderen de krachtsafdracht	Constructieve veiligheid op lange termijn is in het geding
2	Er ontstaat twijfel over de lange termijn milieu-opbrengst van UHSVB-elementen	De 100+ levensduur krijgt niet de kans zich in praktijk te bewijzen. Langst in gebruik zijnde UHSVB viaduct is 25 jaar oud. UHSVB heeft slecht imago door cement. Kans op schade tijdens gebruik neemt toe door lange levensduur	Klanten zijn huiverig het CiBo af te nemen. Kritiek van concurrerende innovaties/producten. Herstelwerk is nodig; minder duurzaam
3	Toleranties in het totale systeem zijn niet maakbaar voor onderaannemers.	Klassieke bouwmethoden laten meer vrijheid tot toleranties toe, echter zijn deze niet circulair. Door het losmaakbaar en integraal ontwerp wordt per onderdeel zeer hoge tolerantie-eisen gesteld. De boogsegmenten kunnen niet gemonteerd worden (ingrijpen van boogliggerelementen) en paalfundering moet nauwkeurig geplaatst worden	Ontwerp is niet maakbaar: aan te passen ontwerp
4	Vezel oriëntatie bij stort van UHSVB-elementen is niet constant genoeg	Staalvezels worden tijdens de stort in de schaalementen in meerdere richtingen ingestort: geen langswapening om oneffenheden op te vangen	Lokaal onvoldoende buigend moment: constructief risico
5	Opschaling van de innovatie verloopt traag	Opdrachtgevers hebben circulaire viaducten niet hoog genoeg op de agenda in projecten. Onbekendheid met het product: koudwaterfrees. Hogere investeringskosten schrikken af.	Milieu impact is beperkt op Nationaal niveau. Kosten efficiëntie door hogere productievolume blijft uit

Daarnaast biedt de concept-oplossing de volgende kansen:

	Omschrijving
1	Asset owners van provincie en/of gemeente betrekken bij ontwikkeling van het prototype
2	Deels vervangen van de staalvezels in het UHSVB met kunststofvezels
3	Verbetering van de (detail)uitwerking met state-of-the-art expertise van de kennispartners van Rijkswaterstaat
4	Verdere materiaalbesparing in het ontwerp van de UHSVB-elementen

Fase 2 is ingericht om deze risico's te beheersen en kansen te benutten, zodat een acceptabel restrisico overblijft na afronding van fase 2.

5 Begroting fase 2

Daar fase 2 opgedeeld is in 2 deelfasen (fase 2a en fase 2b) met ertussen een "go/no go"-moment, is de begroting van beide fasen eveneens opgesplitst. Bij een eventuele "no go"-beslissing kunnen de investeringskosten voor alle partijen (zowel Rijkswaterstaat als BESIX/NEY&Partners) tot een minimum beperkt blijven.

De inhoud van de voorgestelde werkzaamheden staat beschreven in paragraaf 4.2 en 4.3 van dit rapport. Onderstaande tabel geeft de begroting voor zowel deelfase 2a, deelfase 2b als de totaalkosten voor fase 2.

	FASE 2a		FASE 2b		TOTAAL FASE 2	
	<i>Totaal in €</i>	<i>Totaal uren</i>	<i>Totaal in €</i>	<i>Totaal uren</i>	<i>Totaal in €</i>	<i>Totaal uren</i>
Kosten personeel (projectondersteuning en ontwerp)	€ 144.379,71	3.178	€ 134.399,30	3.248	€ 278.779,02	6.426
Verbruikte materialen		n.v.t*	€ 389.052,99	n.v.t*	€ 389.052,99	n.v.t*
Machines en apparatuur		n.v.t*	€ 57.750,00	n.v.t*	€ 57.750,00	n.v.t*
Kosten van arbeid van projectpartners	€ 427.462,42	n.v.t*		n.v.t*	€ 427.462,42	n.v.t*
Kosten derden		n.v.t*		n.v.t*		n.v.t*
Monitoring	€ 34.650,00	n.v.t*	€ 51.975,00	n.v.t*	€ 86.625,00	n.v.t*
Totaal exclusief BTW	€ 606.492,13		€ 633.177,29		€ 1.239.669,42	
Omzetbelasting (laag)						
Omzetbelasting (hoog)	€ 127.363,35		€ 132.967,23		€ 260.330,58	
Omzetbelasting (0%)						
Totaal inclusief BTW	€ 733.855,48		€ 766.144,52		€ 1.500.000,00	

* deze posten zijn niet in uren uit de drukken

Toelichting van de verschillende posten:

Kosten personeel (projectondersteuning en ontwerp)	Deze post bevat al de uren besteedt door BESIX/NEY&Partners voor de projectondersteuning en ontwerp van het Circulaire Boogviaduct. De werkelijke kosten door BESIX/NEY&Partners zal hoger zijn dan de kosten welke hier zijn opgevoerd. Deze kosten worden in deze fase voor rekening van BESIX/NEY&Partners genomen als eigen investering voor de fase 2. De vermelde uren zijn wel conform de te verwachten uurinzet voor BESIX/NEY&Partners.
Verbruikte materialen	Deze post bevat de directe bouwkosten voor de realisatie van het prototype
Machines en apparatuur	Deze post bevat machine en bouwplaatsmaterieel ten behoeve van de realisatie van het prototype
Kosten van arbeid van projectpartners	Deze post bevat de kosten welke door de diverse projectpartners gemaakt moeten worden voor het verder onderzoek in fase 2a.
Kosten derden	Kosten derden zitten verrekend in de eerder benoemde post "Kosten van arbeid van projectpartners"
Monitoring	Deze post bevat de kosten horende bij de monitoring van de individuele UHSVB-elementen en het prototype.

6 Colofon



- Projecttitel en acroniem
Circulaire Boogviaduct (CiBo)

- Deelnemende partijen aan consortium

- Contactpersoon en uitvoerder
 - BESIX Nederland: Dominique De Pré
 - E-mail : jdepre@besix.com
 - Mob. : 06-50.27.60.16
 - NEY&Partners Nederland: Joris Smits
 - E-mail: js@ney.partners
 - Mob.: 06-10.45.61.84
- Begin en einddatum van het project
 - Haalbaarheidsstudie (fase 1): oktober 2020 – maart 2021
 - Fase 2 (indicatief): april 2021 – november 2022

- Ondertekening door een daarvoor bevoegd persoon

BESIX Nederland A.Heeren  Alexander Heeren <small>Digitally signed by Alexander Heeren Date: 2021.03.16 09:09:23 +01'00'</small>	NEY&Partners Nederland J.Smits  algemeen directeur
---	--

7 Onderliggende documenten

Ter aanvulling op deze eindrapportage, is nadere informatie opvraagbaar in volgende documenten:

- [1] Projectvoorstel Circulaire Boogviaduct
- [2] Technische rapportage integraal ontwerp
- [3] Resultaten UHSVB-onderzoek (rapport VITO)
- [4] Resultaten Geopolymeerbeton met 100% gerecycleerde betongranulaten (rapport ResourceFull)
- [5] Resultaten onderzoek scharnier UHSVB-onderzoek (rapport ULB, engelstalig)
- [6] Spreadsheet Milieu-impact berekening
- [7] Spreadsheet LCC-analyse
- [8] Tekening Prototype fase 2
- [9] Testprocedure geopolymeerbeton
- [10] Risicodossier

BIJLAGE 1 BIJ FORMAT SBIR EINDRAPPORT FASE 1

Om de voortgang en effectiviteit van het instrument SBIR te kunnen monitoren voor de opdrachtgevers zijn de volgende vragen opgesteld. Deze vragen zijn gemakshalve gekoppeld aan het eindrapport en zijn daar een integraal onderdeel van.

SBIR-projectnummer: zaak kenmerk AT/2020/03 – Circulaire viaducten

1. Het directe effect van de SBIR opdracht: zonder deze SBIR was dit project:

- Ongewijzigd uitgevoerd Later uitgevoerd
 Niet gestart Uitgevoerd zonder partners
 Kleiner geweest Uitgevoerd met andere partners

2. Samenwerking en netwerkvorming

2.1 Vul hieronder van elk van uw samenwerkingspartners de gevraagd gegevens in.

Naam samenwerkingspartners	Gevestigd in (Land)	Deze is bekend/nieuw voor de organisatie	Soort bedrijf (MKB <250 werknemers of GRB >250 werknemers)	Soort kennisinstelling (Universiteit, HBO, TNO, MBO, etc.)
Haitsma Beton	X Nederland <input type="checkbox"/>	X Bekend <input type="checkbox"/> Nieuw	X MKB <input type="checkbox"/> GRB	
Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO)	<input type="checkbox"/> Nederland X België	<input type="checkbox"/> Bekend X Nieuw	<input type="checkbox"/> MKB X GRB	Kennisinstelling
ResourceFull	<input type="checkbox"/> Nederland X België	X Bekend <input type="checkbox"/> Nieuw	X MKB <input type="checkbox"/> GRB	
Université libre de Bruxelles (ULB)	<input type="checkbox"/> Nederland X België	X Bekend <input type="checkbox"/> Nieuw	<input type="checkbox"/> MKB X GRB	Universiteit
Franki Grondtechnieken	X Nederland <input type="checkbox"/>	X Bekend <input type="checkbox"/> Nieuw	X MKB <input type="checkbox"/> GRB	
Maurer	X Nederland X Duitsland (hoofdkantoor)	X Bekend <input type="checkbox"/> Nieuw	X MKB <input type="checkbox"/> GRB	

2.2 Verwacht u in de toekomst nog vaker met bij dit project betrokken samenwerkingspartners te gaan samenwerken?

- Ja, met alle bovengenoemde bedrijven en/of kennisinstellingen
 Nee

3. Het instrument SBIR

3.1 Wat vindt u sterke punten van het instrument SBIR

De laagdrempelige methode om partijen een kans te geven, met een eerste inschrijving. Daarin niet meteen tot 1 (of enkele) partijen te selecteren maar juist een breed spectrum te faciliteren met 10 partijen. En de SBIR kijkt niet alleen naar technische haalbaarheid en milieu-impact, maar juist ook naar betaalbaarheid.

3.2 Heeft u suggesties ter verbetering van de SBIR-procedure?

Meer inkadering van de beoogde innovatie is gewenst, om doelmatigheid bij alle gegadigden te vergroten. Zonder enige referentie qua locatie of minimale eisen is de oplossingsrichting te vrij om een doelmatige oplossing voor een (deel van) de bekende infrastructuur te leveren.

Het aantal aandachtspunten per beoordelingscriterium is te groot, daardoor wordt de rapportage onnodig gevuld. Daarnaast zijn bepaalde elementen onderbelicht, zoals esthetisch aspect als gebruik (en daarbij horend reductie) van materialen, nu ligt de focus teveel op enkel MKI.

Bovendien is de beoordeling van het gebruiksrecht/IE zeer dominant, hetgeen duidelijk de intentie uitspreekt maar met soms vele partijen aan boord tot een complexe situatie leidt. Meer inkadering hier kan helpen.

BIJLAGE 2 Berekening milieu-impact en Circulariteit CiBo (MS Excel)