



Eindrapport fase 1 circulair - Haalbaarheidsonderzoek SBIR Circulaire viaducten

15 maart 2021

Variaduct

Het circulaire en onbepaalde viaduct



**Modulair, demontabel
& herbruikbaar**

Gestandaardiseerd met
ontwerpvrijheid

Directe
duurzaamheidswinst

Beperkt overlast
tijdens uitvoering

73% minder materiaal
o.a. geen paalfundatie

Duurzaam
materiaalgebruik

Open source
beschikbaar

Toepasbaar bij
vervangingsopgave

1. Managementsamenvatting

Variaduct

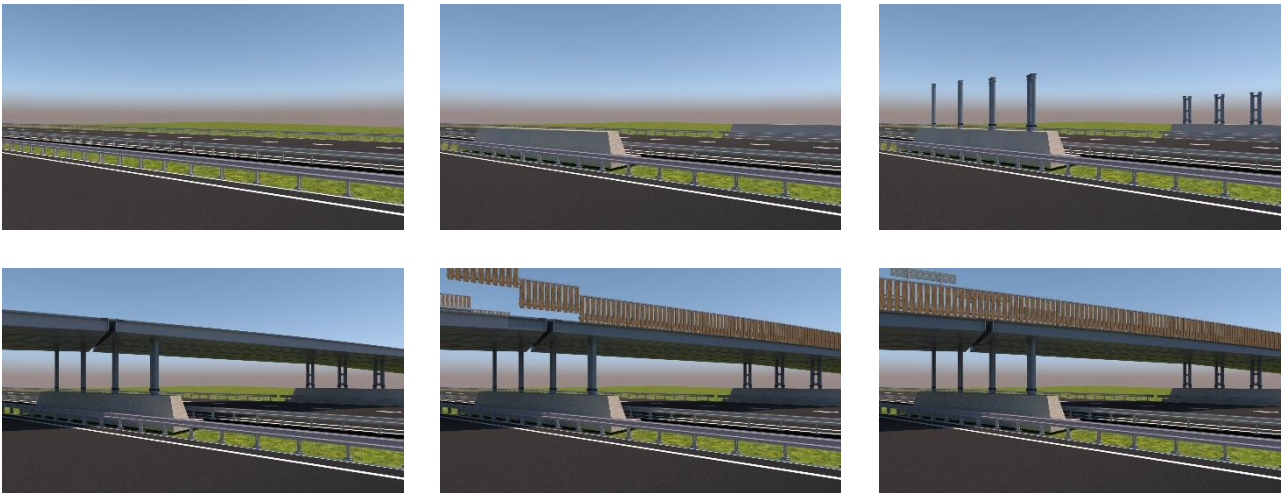
In de voorgaande fase presenteerden wij het onbepaalde viaduct, zie Figuur 1. Dit concept hebben we onder de naam **Variaduct** nader uitgewerkt tot een voorontwerp met de volgende innovatieve en onderscheidende elementen:

- Slanke stalen deksecties; waarmee we een grote gewichtsreductie bereiken.
- Fundering zonder palen; de lichte constructie maakt het mogelijk om paalfundaties in 9 van de 10 gevallen achterwege laten.
- Kolommen met vijzelvoorziening; een efficiënte mitigerende maatregel voor het risico van ongewenste verschilzettingen.
- Onderbouw van prefabbetonelementen; dit maakt de onderbouw volledig modulair en remontabel¹.
- Toepassing hout; waar mogelijk gebruiken we hout en/of andere bio-based materialen.
- Reductie van de constructiehoogte; waardoor materiaal en uitstoot beperkt wordt.

De grootste voordelen op gebied van duurzaamheid van het Variaduct zijn:

- Directe duurzaamheidswinst door minder materiaalgebruik.
- Nog meer duurzaamheidswinst door herbruikbare bouwelementen.
- Volledig open source, met als belangrijk hulpmiddel hierbij de 'Catalogus met specificaties en bouwelementen'.
- Gestandaardiseerd maar met ontwerpvrijheden.
- Toepasbaar in de meeste situaties binnen het areaal van RWS maar ook daarbuiten.

Ons doel is om in 2023 het eerste Variaduct op te leveren en we werken daar vol enthousiasme naar toe!



Figuur 1 - Variaduct met uitvoeringsfasering

Met ons consortium hebben wij de juiste kennis aan boord om het Variaduct tot een succes te maken:

- Arcadis heeft de kennis van circulaire concepten, de technische haalbaarheid en de milieu-impact;
- CT de boer is de specialist op gebied van modulair bouwen en kan het concept in praktijk brengen;
- Rebel maakt van het Variaduct een haalbaar businessmodel.

¹ Remontabel betekent dat het Variaduct demontabel is en daarna weer montabel.

Doelstelling haalbaarheidsonderzoek

Het doel van de haalbaarheidsfase is om het schetsontwerp van het Variaduct verder te ontwikkelen tot een voorontwerp. Het voorontwerp is de basis om in fase 2 een prototype te ontwikkelen.

Ons haalbaarheidsonderzoek is gericht op vijf onderzoeksthema's met elk diverse onderzoeksvragen:

- Thema 1** Berekening van de **milieu-impact** van het Variaduct en de **duurzaamheidswinst** die we behalen in vergelijking met die van een 'traditioneel' referentieontwerp
- Thema 2** De haalbaarheid van "**funderen zonder palen**" en beheersing zettingsgedrag
- Thema 3** Uitvoering van de **middenpijler**
- Thema 4** Vaststellen haalbaarheid van de set aan benodigde **bouwelementen**
- Thema 5** Uitwerking van het **businessmodel** zodat het concept breed wordt toegepast en intrinsieke prikkels bevat voor het sturen op hergebruik

De uitkomsten ons haalbaarheidsonderzoek bevestigen onze ideeën voor een circulair viaduct zoals verwoord in ons projectvoorstel!

Impact (hoofdstuk 3.1)

De milieu-impact van het Variaduct en referentie viaduct is berekend middels een MKI- en CO₂-berekeningen. Hieruit scoort het Variaduct goed met een 50% lagere MKI-waarde en 50% minder CO₂-emissies dan het referentievaduct. Dit wordt voor een groot deel veroorzaakt door een langere levensduur (150 jaar) van het Variaduct. We hebben ook berekend wat de directe milieu-impact is, namelijk een levensduur van 50 jaar. Dit resulteert in een 30% lagere MKI-waarde. Een extra reductie van 10% is berekend indien ook het grondwerk voor de opritten wordt meegenomen.

Maar de impact van ons concept is veel groter dan dat en omvat ook:

- Beperking van verkeershinder door een montageperiode van 54 uur.
- Minder brandstofgebruik voor het kruisende verkeer door de lage constructie gedurende de gehele levensduur van 150 jaar.
- CO₂- en stikstofreductie van minimaal 75 tot 90% tijdens realisatie door inzet van elektrisch materieel, schone brandstof en gebruik van NO_x-filters.
- Vermindering CO₂ en NO_x problematiek doordat de productie in geconditioneerde fabriekshallen plaatsvindt.

Tijdens de haalbaarheidsfase zijn we enthousiast geworden over voordelen van Duplex Stainless Steel. Omdat we ervan overtuigd zijn dat Duplex een duurzame oplossing is, onderzoeken we in fase 2a de LCA.

Technische haalbaarheid (hoofdstuk 3.2)

Fundering zonder palen

Door een grote reductie van het eigen gewicht (73%) (t.o.v. het referentievaduct) is een paalfundering niet noodzakelijk. Uit ons haalbaarheidsonderzoek blijkt dat voor 4 van de 6 standaard grondprofielen een eenvoudige fundering zonder palen haalbaar is. Voor grondprofielen met een slappe toplaag zijn maatregelen nodig, bijvoorbeeld toepassing van voorbelasting of grondverbetering.

Middenpijler

Met een fundering zonder palen kunnen verschilzettingen optreden. Hier hebben wij een oplossing voor gevonden: een geo-meetsysteem dat zettingsgedrag permanent volgt in combinatie met een vijzelvoorziening in de middenpijler. Het geo-meetsysteem bepaalt wanneer correcties moeten plaats vinden. Verschilzettingen worden gecorrigeerd m.b.v. een in de kolom gebouwde vijzelvoorziening. Door de oplegging van de deksecties op de pendelkolom wordt het Variaduct hiermee als geheel aangepast en komt het PVR niet in gevaar.

Bouwelementen

In deze haalbaarheidsstudie werken we 3 modulaire, remontabele en herbruikbare bouwelementen nader uit.

De deksecties

Wij hebben gekozen voor standaard deksecties (27 x 3,1 m) en een voorgeschreven productiemethode zodat de deksecties maakbaar zijn. Daarnaast hebben we een globale constructieve berekening (SCIA) van het

dek gemaakt op basis van de 'best-practice' regels en ROK bepalingen. Hierin is een van de belangrijkste aspecten de vermoeiingsproblematiek, daarom zijn kritische onderdelen zoals dekplaten en verbindingen extra robuust uitgevoerd. Het dek voldoet in de constructieve analyse aan een levensduur van 150 jaar.

De pendelkolommen

Er is voor een pendelkolom gekozen als tussensteunpunt omdat de opliggende deksecties kunnen vervormen door temperatuurverschillen. Voor de kolommen zijn nog veel ontwerpvrigheden binnen de open standaard. Voor de basiscatalogus kiezen we voor staal 'made in history', ronde stalen buizen uit de surplus-voorraden van de olie- en gasindustrie.

De betonnen prefab onderbouw

Traditioneel worden de onderbouw in situ gebouwd. Wij hebben voor de onderbouw een circulaire, modulair en remontabel ontwerp gemaakt, passend bij de afmetingen, belastingen en maakbaarheid. De onderbouw van de landhoofden is ontworpen op gewichtsbesparing en het funderingsvlak en zonder toepassing van stootplaten.

De constructiehoogte

Het Variaduct is uitgewerkt met een zo klein mogelijke ophoging in het tracé. Door een reductie in de constructiehoogte is minder energie nodig voor het passerend verkeer en leidt het tot een lagere milieu-impact en lagere bouwkosten. Een constructiehoogte van 900 mm voldoet aan de eisen van sterkte en doorbuiging.

Economisch perspectief (hoofdstuk 3.3)

De innovatie is erop gericht dat de LLC-analyse van het eerste viaduct direct een gunstig resultaat laat zien. Uit de analyse volgt dat het Variaduct over de gehele levensduur (150 jaar) een besparing van bijna € 40 miljoen heeft ten opzichte van het referentie viaduct.

De LCC-berekeningen laten zien dat een Variaduct intrinsieke economische prikkels draagt voor hergebruik.

De open source benadering van het Variaduct zorgt ervoor dat veel partijen het kunnen gebruiken. Een grotere schaal zorgt voor nog meer hergebruik van de elementen, schaalvoordelen en een hogere restwaarde doordat er meer vraag is. Wij voorzien een onafhankelijke stichting om de open standaard en de BouwElementen Catalogus te beheren.

In diepteinterviews zijn aandachtspunten en kansen van een open standaard geïdentificeerd:

- *Een duidelijk certificeringsprotocol voor hergebruik:* Een goede certificering en acceptatie is nodig om de risico's voor de marktpartij voldoende te beheersen.
- *Gelijkblijvende normen:* zodat elementen ook in de toekomst te gebruiken zijn.
- *Echte standaardisatie van elementen,* zodat schaalvoordelen mogelijk zijn

RWS wordt bij voorkeur de eigenaar van de bouwelementen.

Fase 2 (hoofdstuk 4)

De doelstelling van fase 2 is om onze innovatie te testen en te valideren, waarna het ontwerp uitgewerkt wordt tot catalogus. De volgende werkzaamheden gaan wij uitvoeren in fase 2:

- Fase 2a: Ontwikkelen en testen van het prototype
 - Economisch perspectief: opstellen van een hergebruikprotocol en stakeholderscommitment standaard
 - Definitief Ontwerp opstellen en Catalogus van Bouwelementen vastleggen
 - Milieu impact Variaduct (o.a. Duplexstaal en circulair beton)
 - Testen en Valideren - Virtuele testen / 4D simulatie
- Fase 2b: Valideren van het prototype
 - Testen en valideren - Praktijk testen en demonstratiemodel
 - Zettingen op diverse locaties
 - Testen van verbindingen
 - Oplevering catalogus Variaduct

Met deze open standaard kan RWS vrijwel direct na afronding van fase 2b met onze innovatie de markt gaan uitvragen!

2. Uitvoering van het haalbaarheidsonderzoek

In deze rapportage presenteren wij de belangrijkste resultaten van ons haalbaarheidsonderzoek van het Variaduct, voorheen genaamd het onbepaalde viaduct.

2.1 Doelstelling en probleemstelling haalbaarheidsonderzoek

2.1.1 Doelstelling

Het doel van de haalbaarheidsfase is om het projectvoorstel uit de vorige fase, het schetsontwerp van het Variaduct, verder te ontwikkelen tot een voorontwerp passend binnen de ROK. Het voorontwerp is de basis om in fase 2 een prototype te ontwikkelen.

2.1.2 Probleemstelling

In dit haalbaarheidsonderzoek gaan we in op vijf onderzoeksthema's met daaronder verschillende onderzoeksvragen. Deze komen op hoofdlijnen overeen met het projectvoorstel en geven inzicht in de haalbaarheid van het Variaduct. Gezien het innovatieve karakter van de opgave hebben we tijdens het haalbaarheidsonderzoek nieuwe inzichten opgedaan op basis waarvan we de onderzoeksvragen enigszins hebben bijgesteld (zie 2.2).

De vijf onderzoeksthema's met de bijbehorende onderzoeksvragen zijn:

Thema 1: Berekening van de **milieu-impact** van het Variaduct en de **duurzaamheidswinst** die we behalen in vergelijking met die van een 'traditioneel' referentieontwerp (hoofdstuk 3.1)

- Wat is de impact van het concept?
- Welke duurzaamheidswinst behalen we t.o.v. een 'business as usual' referentievaduct?

Thema 2: De haalbaarheid van **funderen zonder palen** en beheersing zettingsgedrag (hoofdstuk 3.2)

- Wat zijn de grondmechanische randvoorwaarden voor het funderen zonder palen en is het mogelijk om de stootplaten weg te laten?
- In welk deel van de opgave van vervanging en nieuwbouw van viaducten is het kansrijk/haalbaar om zonder paalfundering te bouwen?
- Wat zijn de belangrijkste kenmerken waar de toekomstige locatie aan moet voldoen?

Thema 3: Uitvoering van de **middenpijler** (hoofdstuk 3.2)

- Hoe gaan we om met mogelijke verschilzettingen en hoe corrigeren we dit?

Thema 4: Vaststellen haalbaarheid van de set aan benodigde **bouwelementen** (hoofdstuk 3.2)

- Wat is de haalbaarheid van het ontwerp van de basiselementen (en constructiehoogte)?
- Kunnen deze basiselementen voldoen aan de ROK en andere geldende normen?
- Wat is de meest duurzame of circulaire materiaalkeuze voor elk afzonderlijk onderdeel van het Variaduct tegen aanvaardbare kosten?

Thema 5: Uitwerking van het **businessmodel** zodat het concept breed wordt toegepast en intrinsieke prikkels bevat voor het sturen op hergebruik (hoofdstuk 3.3)

- Hoe ziet de business case van het Variaduct eruit?
- Wat zijn kritische succesfactoren die zorgen voor een breed draagvlak voor de open standaard?
- Welke eigendomssituatie past het best bij de open standaard?
- Hoe kan het best worden gestuurd op maximalisatie van restwaarde/hergebruik?
- Hoe ziet het businessmodel voor de open standaard eruit?

2.2 Verschillen ten opzichte van het projectvoorstel

Ten opzichte van het projectvoorstel hebben we de volgende wijzigingen doorgevoerd in de aanpak van de haalbaarheidsfase:

- In het projectvoorstel gaven wij een geschikte pilotlocatie te zoeken. We hebben diverse ideeën, maar we willen de keuze voor een locatie maken in overleg met RWS in Fase 2a. Wel geven we in deze rapportage inzicht in de belangrijkste kenmerken waaraan de toekomstige locatie moet voldoen.
- Het projectvoorstel bevat een praktijktest van een middenpijler. Een belangrijk doel hiervan is om stakeholders bekend te maken met het concept. De coronasituatie maakt een bezoek aan een praktijklocatie onmogelijk. De praktijktest is dus niet uitgevoerd. Wel is het principe bij een ander project (Ossenmarkt Groningen) in praktijk gebracht en verder uitgewerkt. Tevens is het spectrum van in te zetten vizelmiddelen afgebakend. We stellen voor de praktijktest (i.c.m. een uitgebreide proefopstelling) uit te voeren in fase 2a.
- In het projectvoorstel stelden we voor na te gaan welke bouwelementen ontworpen moeten worden en wat de optimale maatvoering hiervan is. We kiezen ervoor vast te houden aan de basis-bouwelementen van onze innovatie (dekelementen, pendelkolommen, betonnen onderbouw), deze verder uit te werken en de haalbaarheid (kosten en milieu-impact) te toetsen. Uitbreiding van de catalogus aan bouwelementen doen we op basis van voortschrijdend inzicht samen met andere partijen die gebruik gaan maken van de open standaard.
- De onderzoeksvraag 4.c “Wat is de meest duurzame of circulaire materiaalkeuze voor elk afzonderlijk onderdeel van het Variaduct tegen aanvaardbare kosten?” is meegenomen bij het berekenen van de milieu-impact.
- In de MKI-berekening is een uitsplitsing gemaakt naar CO₂-equivalente emissies. Een uitsplitsing naar abiotische grondstoffen is niet weergegeven, omdat de waarden hiervan momenteel niet correct uit DuboCalc 6.0 kunnen worden afgeleid.
- Voor de invulling van het economisch perspectief zijn in ons projectvoorstel verschillende stappen gedefinieerd. Deze hebben wij vertaald naar de hiervoor genoemde concrete onderzoeksvragen.

Voor wat betreft de technische haalbaarheid hebben wij ons gericht op de uitwerking van 8 (innovatieve) technologieën die in samenhang het Variaduct onderbouwen. In onderstaande tabel is terug te vinden hoe deze technologieën zich verhouden tot de 5 onderzoeksthema's en in welk hoofdstuk ze staan.

Tabel 1 - Acht innovatieve technologieën in onze onderzoeksvragen

(Onderzoeks-) thema's	1. Milieu-impact en duurzaamheidswinst	2. Fundering zonder palen en zettingsgedrag	3. Uitvoering middenpijler	4. Haalbaarheid bouwelementen	5. Uitwerking businessmodel
Technologieën					
1.Funderen zonder palen		§ 3.2.1			
2.Modulaire stalen dekconstructie uit secties				§3.2.3	
3.Oplegsysteem met vizelvoorzieningen			§3.2.2	§3.2.3	
4.Onderbouw van prefab betonelementen				§3.2.3	
5.Toepassing van hout als constructiemateriaal	§3.1				
6.Monitoring van gedrag en gebruik Variaduct			§3.2.2		
7.Reduceren van de constructiehoogte				§3.2.3	
8.Bouwen met minimale maatschappelijke kosten					§3.3

2.3 Uitvoering van het haalbaarheidsonderzoek

De organisatie bestaat uit een projectboard met daarin de drie bedrijven. De projectboard stuurt op projectdoelen en zorgt voor afstemming met projectleiders. De samenwerking en taakverdeling is op hoofdlijnen verlopen zoals voorgesteld is in het projectvoorstel. Met als belangrijkste toevoeging dat we in praktijk vooral als één gezamenlijk team aan de verschillende onderzoeksthema's hebben gewerkt.

Arcadis was verantwoordelijk voor de haalbaarheidsonderzoeken t.a.v. de volgende onderwerpen:

- Thema 1: Milieu-impact en duurzaamheidswinst
- Thema 2: Funderen zonder palen en zettingsgedrag
- Thema 4: Vaststellen haalbaarheid bouwelementen

CTdeBoer was verantwoordelijk voor de haalbaarheidsonderzoeken t.a.v. de volgende onderwerpen:

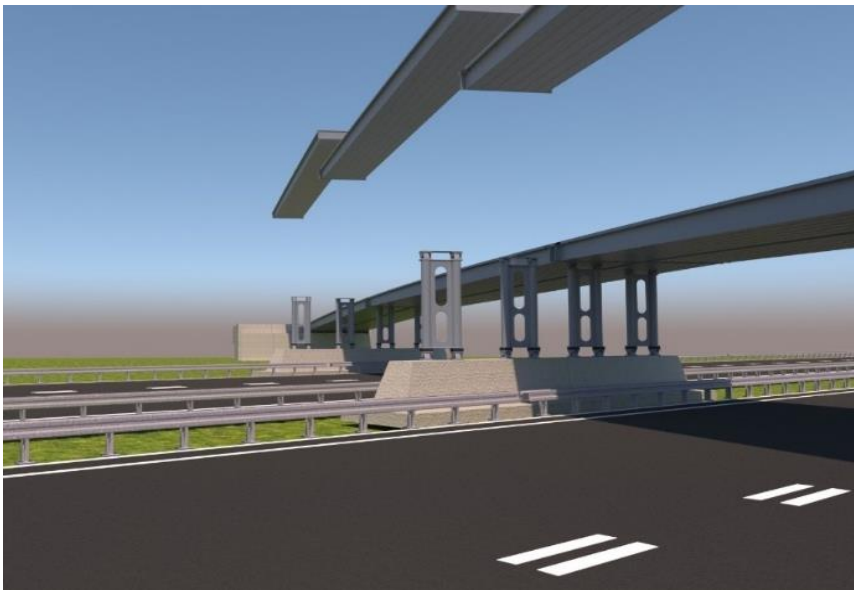
- Thema 3: Praktijkproeven pendelkolom
- Thema 4: Vaststellen haalbaarheid bouwelementen
- Voorbereiding pilotfase viaduct (hoofdstuk 4)

Rebel was verantwoordelijk voor de haalbaarheidsonderzoeken t.a.v. de volgende onderwerpen

- Thema 5: Uitwerken businessmodel

Tijdens het traject was er intensief overleg tussen het projectteam en de board. Naast het teamleden hebben circa 22 mensen samengewerkt aan het Variaduct. Vanaf de start is gekozen voor een open standaard als belangrijke succesfactor van het Variaduct. Dit uitgangspunt heeft nooit ter discussie gestaan en zorgt nu al voor volledige openheid tussen de consortiumpartners. De beoogde combinatie van expertise van de drie partijen wordt ook in praktijk gebracht.

Naast de drie bedrijven is bewust contact gelegd met een brede kring aan bedrijven die in de volgende fasen een rol spelen bij de realisatie. Het gaat om toeleveranciers, aanbieders van elementen en opdrachtgevers (zie Bijlage 1).



Figuur 2 - Het Variaduct

3. Inhoudelijke bevindingen

In dit hoofdstuk beschrijven we de bevindingen van de vijf onderzoeksthema's. In deze rapportage zijn de belangrijkste uitkomsten opgenomen. De volledige analyses zijn opvraagbaar (verwijzing in voetnoten).

3.1 Impact

In deze paragraaf beantwoorden we de vragen van onderzoeksthema 1: Wat is de impact van het concept? Welke duurzaamheidswinst behalen we met het Variaduct ten opzichte van een 'business as usual' referentieviaduct?

3.1.1 Bijdrage aan oplossing voor maatschappelijk probleem

De bouwsector neemt in Nederland een fors deel van het grondstoffenverbruik voor zijn rekening. De komende jaren moeten veel viaducten worden vervangen of gerenoveerd. Met het Variaduct kunnen we snel een belangrijke bijdrage leveren aan het verminderen van de milieubelasting en het primair grondstoffengebruik:

- Het Variaduct bestaat uit lichte remontabele bouwelementen die eenvoudig herbruikbaar zijn.
- We kunnen het Variaduct uitbreiden of onderdelen vervangen met behoud van de bestaande constructie en fundering. Hierdoor hoeft het Variaduct in de toekomst niet gesloopt te worden vóór het einde van de technische levensduur, wat nu vaak het geval is.
- De deksecties hebben een gesloten cellenstructuur, waardoor een relatief lichtgewicht oplossing ontstaat. Hierdoor is in veel gevallen geen (moeilijk herbruikbare) paalfundering nodig, wat materiaalgebruik vermindert. Eventuele zettingsverschillen worden met een beproefde vijzeltechniek gecorrigeerd.
- Het beperkte gewicht van het Variaduct zorgt voor een lage belasting. Dit betekent dat we bij vervanging van kunstwerken gebruik kunnen maken van bestaande funderingen en landhoofden; zo kunnen we een flink deel van bestaande viaducten hergebruiken!
- Alle secundaire elementen zoals de randelementen, geleiderails en delen van de onderbouw worden uitgevoerd in circulaire bouwmaterialen zoals Europees hout.



Figuur 3 - Traditioneel viaduct met paalfundering

Naast de 'embedded' milieu-impact behalen we duurzaamheidswinst door:

- Een veel kortere bouwtijd, 1 i.p.v. 9 maanden, met als gevolg:
 - Minder verkeershinder en voertuigverliesuren en daarmee minder CO₂- en stikstofemissies. Het Variaduct is met 54 uur verkeershinder te assembleren, in tegenstelling tot soms wel 3 maanden voor traditionele viaducten.
 - Een flinke reductie van de emissies ten gevolge van de inzet van materieel; op basis van de bouwtijd is dat een reductie van circa 80%.
- Een constructiehoogte die 10% lager kan dan bij een traditioneel viaduct, wat leidt tot een besparing in het brandstofgebruik. Per voertuig is dit weliswaar een minimale reductie, maar over de levensduur loopt dit flink op. Zoals ook een lagere rolweerstand een zeer grote impact heeft op het brandstofgebruik².
- Een CO₂-en stikstofreductie bij realisatie van het Variaduct van minimaal 75 tot 90% door inzet van elektrisch materieel, schone brandstof (HVO 100), en gebruik van NO_x-filters. Dit doen we al voor het prototype.

² <https://www.tno.nl/nl/tno-insights/artikelen/nieuw-asfalt-bespaart-brandstof-en-vermindert-co2-uitstoot/>

3.1.2 Uitgangspunten milieu-impact en circulariteit

Voor het bepalen van de impact vergelijken we het Variaduct met een 'traditioneel' betonnen referentievaduct.³ Hiervoor hebben we een bestaand ontwerp van een viaduct met een betonconstructie en fundering op palen opgeschaald. Beide viaducten gaan uit van gelijke overspanningen (24-33-24) en breedte van 12.90 m⁴. In Tabel 2 staan de belangrijkste uitgangspunten.

Tabel 2 - Vergelijking ontwerp traditioneel ontwerp en Variaduct

	Traditioneel ontwerp (3-v)	Het Variaduct (3-v)
Recapitulatie massa viaduct:		
- Brugdekken	1.750 ton	540 ton
- Randdetail	160 ton	12 ton
- Leuning	4 ton	11 ton
- Landhoofden	970 ton	270 ton
- Stootplaten	160 ton	n.v.t.
- Pijlersloven	700 ton	105 ton
- Pijleropbouw	160 ton	16 ton
- Slijtlaag	276 ton	166 ton
Totaal (circa)	4.180 ton	1.120 ton
Grondwerk opritten, Helling gem. 3%/ Talud 1:2	33.600 m ³	27.200 m ³
Footprint systeem viaduct Invloed dh = 0,60 m	12.200 m ²	10.700 m ²
Bouwtijd	9 maanden	1 maand
Verkeershinder	3 maanden	54 uur

De milieu-impact (MKI) en circulariteit tonen wij aan in het aangeleverde format (conform SBK bepalingsmethode en DuboCalc 6.0⁵).

In de berekening zijn we uitgegaan van het volgende scenario (zie ook Figuur 4):

- Op tijdstip 0: bouw van viaduct over Rijksweg (2-velder);
- Na 50 jaar:
 - Einde functionele levensduur van het viaduct, vanwege verbreding onderliggende rijksweg (een veel voorkomende reden op basis van 'Rapport Sloopoorzaken kunstwerken (RWS):
 - Aanpassing Variaduct van 2- naar 3-velder,
 - Sloop referentievaduct en bouw nieuw referentievaduct (3-velder);
- Na 75 jaar:
 - Verbreding viaduct van 4- naar 6-baans;
- Na 100 jaar:
 - Vanwege toenemende belasting opnieuw einde functionele levensduur:
 - Verplaatsing van Variaduct naar nieuwe locatie,
 - Sloop referentievaduct en bouw nieuw referentievaduct op andere locatie (met overeenkomende afmetingen verplaatst Variaduct);
- Na 150 jaar: sloop/demontage viaduct en recycling.

³ Referentievaduct: K076, waterlandsebrug, langsdoorsneden en aanzichten, PW6-DO-K076-TEK-0009, v3.0

⁴ Variaduct: Circulaire brug, schematische uitgangspunten, tekening 0001, v0.3

Referentievaduct: K076, waterlandsebrug, langsdoorsneden en aanzichten, PW6-DO-K076-TEK-0009, v3.0

⁵ Afwijkingen van DuboCalc versie 6.0 en de vigerende versie van de NMD zijn aangegeven in het format.



Figuur 4 - Levenscyclus viaduct

We hanteren de volgende uitgangspunten:

- De hoofdelementen zijn in de scope (Variaduct en referentieviaduct) meegenomen, de weginrichting (bebording, belijning), randelementen en lichtmasten zijn achterwege gelaten. Deze zijn niet onderscheidend en van beperkte invloed op de totale MKI-waarde.
- Uitgangspunten voor de materiaalspecificaties, hoeveelheden en levensduur zijn opgenomen en terug te vinden in het ingevulde format⁶.
- Voor de deksecties is constructiestaal met een metalliseersysteem het uitgangspunt. DSS – Duplex Stainless Steel is als variant beschouwd.

3.1.3 Conclusie MKI- en CO₂-berekeningen

De oplossingen van het Variaduct leiden over een periode van 150 jaar tot de volgende resultaten:

- De **MKI-waarde** van het Variaduct is **ruim 50%** lager dan het Referentieviaduct.
- Op gebied van **CO₂-emissies** scoort het Variaduct ook ruim **50 %** lager dan het Referentieviaduct.

Uiteraard telt het tweemaal moeten slopen en opnieuw moeten opbouwen van het referentieviaduct zwaar mee in de berekening. Dat is ook de winst die we voor ogen hebben met het Variaduct: huidige viaducten hebben doorgaans een beperkte functionele levensduur omdat deze niet aanpasbaar of demontabel zijn, terwijl het Variaduct kan worden verlengd, aangepast en verplaatst.

Om een initieel vergelijk van de viaducten te kunnen maken, hebben wij ook de MKI berekend van beide viaducten over de functionele levensduur van 50 jaar, zonder hergebruik van het Variaduct.

- Dankzij de lichte constructie en materiaalbesparing komt de **MKI-waarde** van het Variaduct zonder hergebruik al **ca. 30% lager** uit dan het Referentieviaduct.

⁶ De aangehouden MKI-waarde voor constructiestaal (pendelkolommen en deksecties) komt uit DuboCalc versie 5.1. De MKI-waarde in DuboCalc 6.0 lijkt onjuist (te laag).

Tabel 3 - Vergelijking van MKI-waarde en CO₂-emissies

	Variaduct	Referentievaduct
MKI-waarde gehele levenscyclus van 150 jaar	€ 166.797*	€ 383.110**
CO ₂ -equivalente emissies gehele levenscyclus van 150 jaar	2.091.331 kg	4.642.920 kg
MKI-waarde 50 jaar (fase A1-A5)	€ 57.978	€ 85.061
* Inclusief categorie 3 opslag. De waarde zonder opslag is 127.861		
** Inclusief categorie 3 opslag. De waarde zonder opslag is 305.990		

Tot slot merken we op dat het meenemen van het grondwerk voor de opritten leidt tot een extra reductie van ongeveer **10%** van het Variaduct ten opzichte van het referentievaduct.

3.1.4 Duurzaam materiaalgebruik

Tijdens de haalbaarheidsfase zijn we enthousiast geworden over voordelen van DSS – Duplex Stainless Steel. Duplex heeft geen conservering nodig (het is selfhealing en inert) en heeft een langere levensduur. De MKI-berekening laat echter een waarde zien die ongeveer gelijk is aan die van het referentievaduct. Wel leidt toepassing van duplex tot 25% minder CO₂-emissies t.o.v. het referentievaduct. Omdat we ervan overtuigd zijn dat Duplex een duurzame oplossing is, willen we in fase 2a de LCA nader onderzoeken.

In de berekeningen zijn verschillende elementen achterwege gelaten. Leuningwerk nemen we wel mee en we kiezen hier voor hout. We integreren oplossingen in (Europees) hout, bijvoorbeeld voor de randelementen, in de catalogus.

3.1.6 Vervolgstappen fase 2

De vervolgstappen in fase 2 zijn onder andere:

- Aanpassen van de MKI-berekeningen op basis van het te ontwikkelen Definitief Ontwerp.
- Onderzoek naar de duurzaamheidswinst van Duplex-staal door het opstellen van een LCA.

3.2 Haalbaarheid

In deze paragraaf gaan we in de resultaten van het technische haalbaarheidsonderzoek t.a.v. de onderzoeksthema's fundering zonder palen (thema 2), uitvoering middenpijler (thema 3) en set bouwelementen (thema 4).

3.2.1 Onderzoeksthema 2: Haalbaarheid fundering zonder palen

Doel en onderzoeksvragen

Met onze innovatie kunnen we paalfundaties achterwege laten door het lage gewicht en een gelijkmatige zetting van alle steunpunten. Zo verminderen we de milieu-impact! Door toepassing van een stalen brugdek en holle funderingselementen reduceren we de E.G. belastingen met 73%, zie Tabel 2. De dek-constructie is flexibel, waardoor verschilzettingen van <50 mm geen impact hebben. Als zich grotere zettingen voordoen corrigeren we deze met de ingebouwde vizelvoorzieningen snel en efficiënt. Het statisch systeem is zo opgezet dat de belastingen gelijkmatig verdeeld op het funderingsvlak uitkomen.

Het doel van dit onderzoeksthema is om de geotechnische haalbaarheid van het Variaduct vast te stellen en antwoord te geven op de volgende vragen:

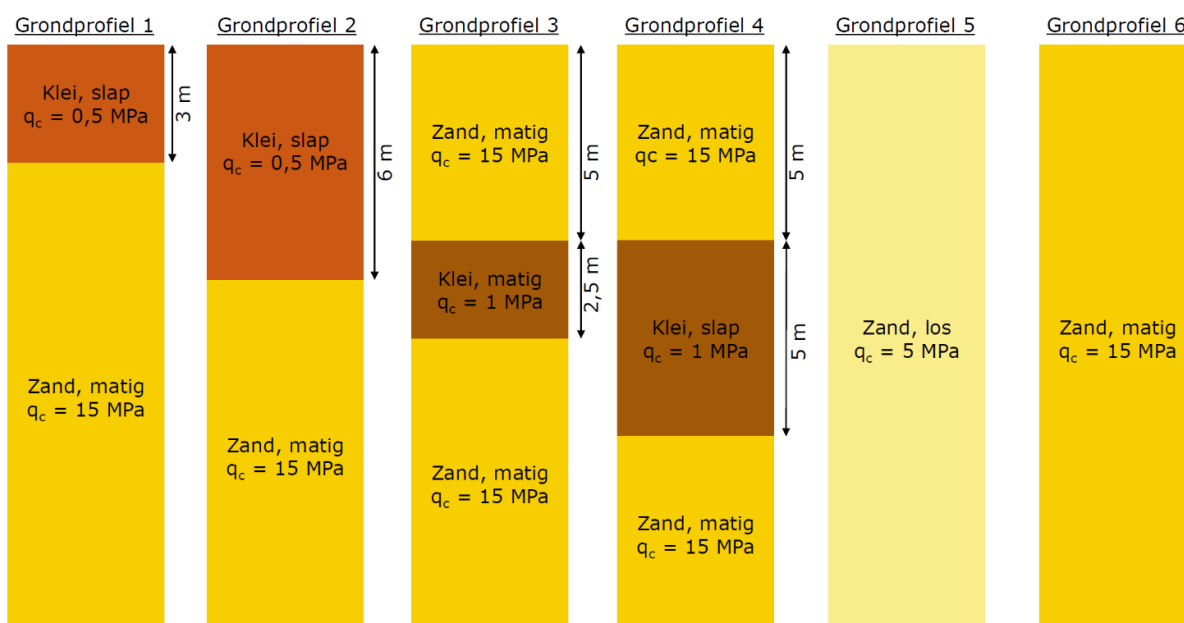
- Wat zijn de grondmechanische randvoorwaarden voor het funderen zonder palen en is het mogelijk om de stootplaten weg te laten?
- In welk deel van de opgave van vervanging en nieuwbouw van viaducten is het kansrijk/ haalbaar om zonder paalfundering te bouwen?
- Wat zijn de belangrijkste kenmerken waar de toekomstige locatie aan moet voldoen?

Aanpak

Om vast te stellen in welke situaties het circulaire viaduct toegepast kan worden zijn 6 gestandaardiseerde grondprofielen met bijbehorende eigenschappen en randvoorwaarden beschouwd (zie Figuur 5). Hiervoor is het geotechnisch ontwerp van het Variaduct getoetst met de programma's D-foundations 19.1 en D-Settlements 18.2 voor de verschillende grondprofielen op:

- Sterkte: draagkracht, afschuiven, kantelen en macrostabiliteit (uiterste grenstoestand UGT)
- Vervorming: restzetting en verschilzetting (bruikbaarheidsgrenstoestand BGT)

De berekeningen zijn uitgevoerd op basis van de NEN-EN 1997-1 en de aanvullende eisen uit de ROK.⁷



Figuur 5 - Gestandaardiseerde grondprofielen

⁷ Arcadis, Rapportage geotechnische beschouwingen Circulair Viaduct

Resultaten

In onderstaande tabellen zijn de resultaten voor de sterkte en vervorming van de 6 grondprofielen weergegeven.

Sterkte: Op basis van de UGT-resultaten bij grondprofiel 3, 4, 5 en 6 kan het Variaduct zonder aanvullende maatregelen worden gerealiseerd, zie Tabel 4. Bij aanwezigheid van een slappe bovenlaag (grondprofiel 1 en 2) van een beperkte dikte (< 6 meter) zijn maatregelen noodzakelijk, bijvoorbeeld een grondverbetering. Indien de dikte van de slappe bovenlaag (profiel 2) te groot wordt voor het toepassen van een grondverbetering is het toepassen van alternatieve maatregelen noodzakelijk, bijvoorbeeld het toepassen van een palenmatras.

Tabel 4 - Resultaten verticaal draagvermogen (sterkte)

Grondprofiel	Verticale draagkracht poerfundering		Verticale draagkracht poerfundering		Verticale draagkracht landhoofd grote overspanning		Verticale draagkracht landhoofd korte overspanning		Toetsing UGT/CAL
	UGT		CAL		UGT		UGT		
	Onge-draineerd	Ge-draineerd	Onge-draineerd	Ge-draineerd	Onge-draineerd	Ge-draineerd	Onge-draineerd	Ge-draineerd	
1	1,90	1,24	3,21	1,71	2,95	1,72	2,51	1,47	Voldoet niet
2	2,08	1,69	3,21	1,83	2,92	1,83	2,49	1,44	Voldoet niet
3	0,77	0,59	n.v.t.	0,85	n.v.t.	0,85	n.v.t.	0,82	Voldoet
4	0,77	0,59	n.v.t.	0,85	n.v.t.	0,85	n.v.t.	0,82	Voldoet
5	n.v.t.	0,86	n.v.t.	0,85	n.v.t.	0,85	n.v.t.	0,93	Voldoet
6	n.v.t.	0,59	n.v.t.	0,85	n.v.t.	0,85	n.v.t.	0,82	Voldoet

Alle grondprofielen voldoen aan de toetsing afschuiven en kantelen ($UC < 1,00$), zie Tabel 5.

Tabel 5 – Resultaten horizontaal draagvermogen: toetsing afschuiven en kantelen (sterkte)

Grondprofiel	Horizontale draagkracht poerfundering UGT	Horizontale draagkracht poerfundering CAL	Horizontale draagkracht landhoofd grote overspanning UGT	Horizontale draagkracht landhoofd korte overspanning UGT
1 t/m 6 (Dezelfde fundering direct onder constructie)	n.v.t	0,99	0,83	0,89

Vervormingen: Uit de vervormingstoets concluderen wij het volgende (Tabel 6)

- Om aan de vervormingseisen te voldoen zijn bij grondprofielen 3, 5 en 6 geen aanvullende maatregelen benodigd.
- Bij grondprofiel 1 en 4 kan ook aan de vervormingseisen voor de restzetting en verschilzetting voldaan worden indien er een voorbelasting wordt toegepast.
- Voor grondprofiel 2 zijn aanvullende maatregelen noodzakelijk om te voldoen aan de vervormingseisen.

Tabel 6 - Verticale zettingen betreft restzettingen vanaf ingebruikname tot 30 jaar levensduur (vervormingen in BGT)

Grond-profiel	Restzetting Poerfundering, zonder maatregelen	Restzetting Landhoofd, zonder maatregelen	Verschilzetting Landhoofd, zonder maatregelen	Restzetting Landhoofd, met toepassing voorbelasting	Verschilzetting Landhoofd, voorbelasting
1	Voldoet niet	Voldoet niet	Voldoet niet	Voldoet	Voldoet
2	Voldoet niet	Voldoet niet	Voldoet niet	Voldoet	Voldoet niet
3	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet
4	Voldoet niet	Voldoet niet	Voldoet niet	Voldoet	Voldoet
5	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet
6	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet

Op basis van onze toets op sterkte en vervorming concluderen we dat bij 4 van 6 grondprofielen het Variaduct eenvoudig (met evt. voorbelasting) kan worden toegepast.

Bij grondprofielen met een lage bedding en stabiliteit (grondprofiel 1 en 2) kan het Variaduct ook met aanvullende maatregelen worden gerealiseerd, zoals:

1. Voorbelasting;
2. Profilering aan onderzijde funderingselement tegen afschuiving;
3. Gewapende grond voor drukverdeling en versterking van de baan of ondergrond;
4. Een palenmatras.

Hierdoor wordt het mogelijk om paalfundaties in **9 van de 10** situaties binnen en buiten het areaal van RWS achterwege te laten.

In fase 2 zoeken we samen met RWS naar testlocatie voor een prototype van het Variaduct. Op basis van de grondmechanische berekeningen zoeken we een locatie met grondprofiel 3, 4, 5 of 6.

Aanvullend onderzoek

Grondmechanische berekeningen geven geen nauwkeurige voorspellingen van de werkelijk optredende zettingen. Daarom doen we in fase 2 op een aantal locaties zettingsproeven. Ook gaan we in fase 2 na of het mogelijk is om de stootplaten weg te laten.

3.2.2 Thema 2 – Uitvoering van de middenpijler

Doel en onderzoeksvraag

Absolute zettingen treden altijd op, maar verschilzettingen tussen het kunstwerk en de aanliggende baan zijn bepalend voor de functionaliteit van het totale systeem. Bij grensoverschrijdende verschilzettingen wordt na-gevijseld om de functionaliteit en veiligheid voor de weggebruiker te waarborgen. Hiervoor is monitoring noodzakelijk. Het doel van dit onderzoeksthema is om meer inzicht te krijgen in de wijze van monitoring en de techniek waarmee verschilzettingen worden gecorrigeerd en antwoord te geven op de vraag:

- Hoe gaan we om met mogelijke verschilzettingen en hoe corrigeren we dit?

Aanpak

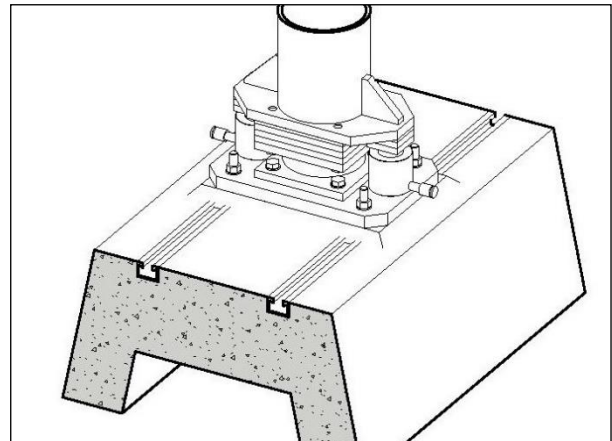
In dit haalbaarheidsonderzoek is de wijze van monitoren en de vijzeltechniek verder uitgewerkt.

Resultaten

Gelijk met de montage van een Variaduct plaatsen we een geo-meetsysteem om het zettingsgedrag online te volgen. Na een nulmeting wordt de informatie in 3D ingeladen in software. Met een permanente meetopstelling worden verschilzettingen daarop periodiek gemeten. Scans, verschilzettingen en trendanalyses zijn hierdoor online in te zien en bepalen wanneer correcties uitgevoerd worden.⁸

Bij de overdracht van een Variaduct naar de beheerder stellen we het Variaduct op de ontworpen hoogte af en wordt het geo-meetsysteem ingeregeld. Op basis van het Profiel van Vrije Ruimte (PVR) bepalen we de interventiewaarde. Als de interventiewaarde benaderd wordt, corrigeren we verschilzettingen. Het meetinterval van het monitoringssysteem is instelbaar om de hoeveelheid data te beperken. Wanneer blijkt dat de zettingen zich stabiliseren verwijderen we het systeem en volstaat een reguliere vierjaarlijkse waterpassing.

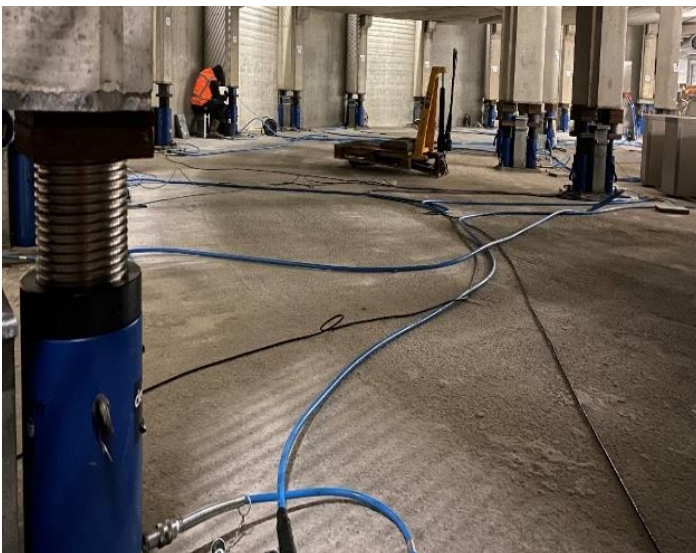
Vershilzettingen corrigeren we met een in de kolom gebouwde vijzelvoorziening en vulplaten, zie Figuur 6. Dit is een *proven technology* en is bijvoorbeeld recent (november 2020) toegepast in de parkeergarage



Figuur 6 - Vijzelopstelling.

Ossenmarkt Groningen (Figuur 7). Bij een verschilzetting wordt de pendelkolom met vulplaten verlengd, waardoor we het Variaduct als geheel ophogen en PVR niet in gevaar komt.

Nast het zettingsgedrag monitoren we met een verkeersteller de verkeersintensiteit. Deze informatie verwerken we in het materialenpaspoort en benutten we o.a. om de herinzetbaarheid van de bouwelementen te vergroten. Zie ook paragraaf 3.3.6.



Figuur 7 - Parkeergarage Ossenmarkt

⁸ Gedetailleerde gegevens van de meetopzet is opvraagbaar.

3.2.3 Thema 3 – Vaststellen haalbaarheid bouwelementen

Doel en onderzoeksvragen

De belangrijkste bouwelementen van het Variaduct zijn de deksecties, de pendelkolommen en de betonnen prefab onderbouw. In dit haalbaarheidsonderzoek werken we ieder van deze elementen verder uit en toetsen deze op haalbaarheid (maakbaar tegen kosten die in verhouding staan tot de gerealiseerde maatschappelijke impact). We toetsen of de bouwelementen en de samengestelde elementen passen binnen de huidige wet- en regelgeving of dat aanvullende validatie nodig is. Naast de hiervoor genoemde losse elementen is ook de constructiehoogte van het viaduct geoptimaliseerd. Onderzoeksvragen zijn:

- Wat is de haalbaarheid van het ontwerp van de basiselementen (en de constructiehoogte)?
- Kunnen deze basiselementen voldoen aan de ROK en andere geldende normen?

Aanpak

In fase 1 hebben we de haalbaarheid van de volgende innovaties getoetst:

1. De deksecties
2. De pendelkolommen
3. De betonnen prefab onderbouw
4. De constructiehoogte

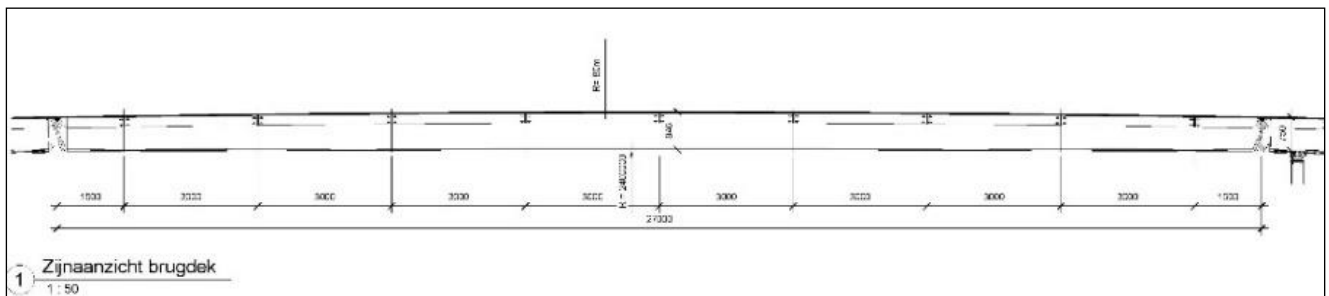
We hebben daarvoor:

- De vier genoemde innovaties uitgewerkt van schetsontwerp tot voorontwerp, waarbij alle raakvlakken en verbindingen volgens IFD (Industrieel, Flexibel en Demontabel Bouwen) zijn ontworpen;
- De staalconstructie gemodelleerd in een 3D-FEM programma van SCIA-engineer;
- De hoofdstaalspanningen getoetst;
- De essentiële verbindingen getoetst op vermoeiing o.b.v. expert judgement;
- De betonnen constructie van de onderbouw niet berekend, maar wel meegenomen in het rekenmodel.

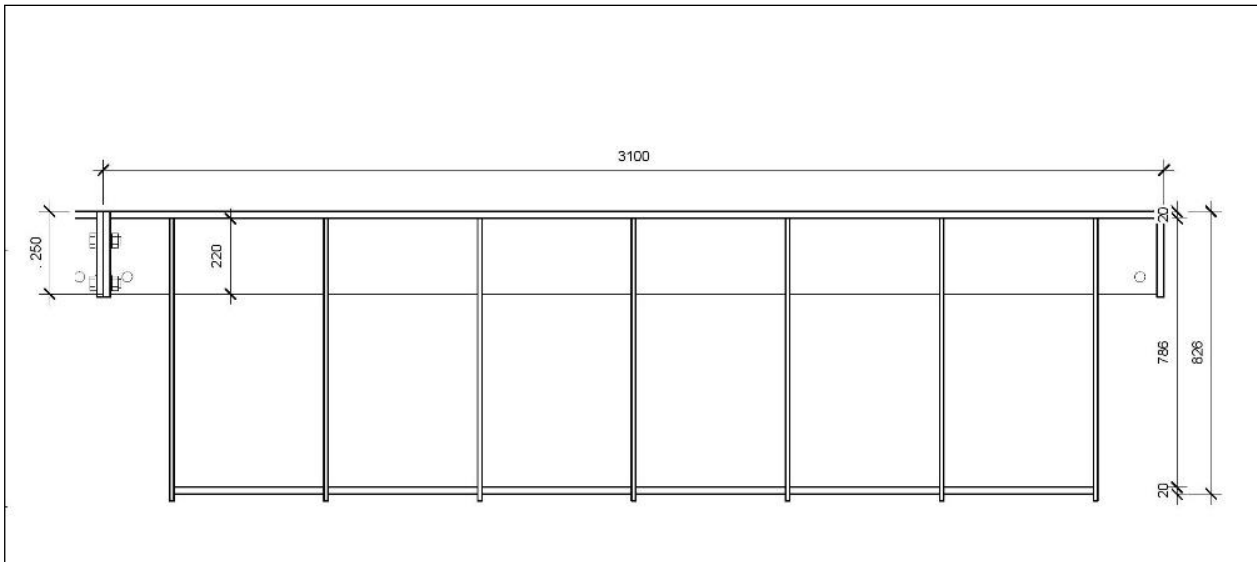
De exacte dimensies (afmetingen) leggen we definitief vast in het DO (fase 2) op basis van de Eurocodes en Richtlijnen van RWS.

Resultaten – 1. Deksecties

We gaan uit van standaard deksecties van 27,00 m lang en 3,10 m breed. Hiermee kunnen we, gebruikmakend van het cantileverprincipe, overspanningen tot 34,00 m realiseren. De breedte is zo gekozen dat de elementen over de weg te vervoeren zijn. De secties zijn onderling koppelbaar, waardoor de totale lengte en breedte onbegrensd zijn. Iedere deksectie bestaat uit een gesloten celstructuur met een vlakke onderzijde, de afmetingen zijn zo te kiezen dat de verbindingen alleen dwarskrachten overdragen.



Figuur 8 - Langsdoorsnede deksectie met $R_v = 800$ m (top-boog)



Figuur 9 - Dwarsdoorsnede

In eerste instantie nemen we in de basiscatalogus twee afrondingsbogen in het systeem op die afhankelijk zijn van snelheid en stopzicht:

- $R_v = 800$ m, geschikt voor korte viaducten
- $R_v = 2400$ m, (nagenoeg recht) voor de langere viaducten

De constructiehoogte van de dekken varieert van 750 mm aan de uiteinden tot 820 mm in het midden.

Onze innovatie is maakbaar en toepasbaar. Vanwege de unieke aard van het ontwerp is de maakbaarheid van de deksecties getoetst⁹. Vanwege de vermoeiings-problematiek worden kritische onderdelen zoals dekplaten en verbindingen extra robuust uitgevoerd. Het ontwerp is in eerste instantie gemaakt in carbonsteel S355. In fase 2 bekijken we de mogelijkheid om de deksecties uit te voeren in Duplex staal (zie Figuur 10) en werken we samen met Outokumpu uit Finland en GPI, een wereldwijde en toonaangevende tankbouwer met een trackrecord in het bouwen van Duplex tanks voor de food en petrochemie.

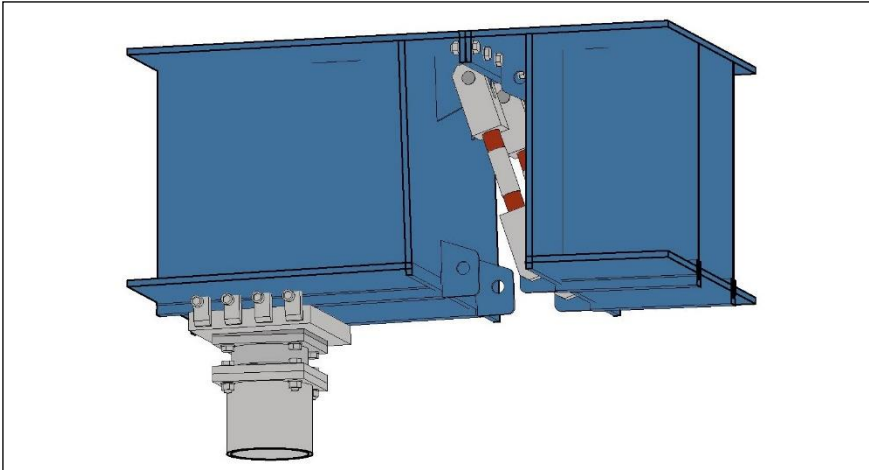


Figuur 10 – Duplex is in opkomst als constructiemateriaal voor bruggen

In de haalbaarheidsfase is met een berekening en gebruik van het FEM-programma van SCIA aangetoond dat de specifieke verbindingsdetaillering in het VO qua sterkte, vermoeiing en vervorming voldoet. De 'best-

⁹ Uitvoering conform NEN-EN 1090-2, executieklasse 3, met 3.1 materiaal-certificaten. Kwaliteitseisen uit de NEN-EN-ISO 3834-2 van toepassing

practice' regels en ROK bepalingen dienden hierbij als uitgangspunt. De belangrijkste verbinding (in langsrichting) tussen de deksecties zijn in detail op vermoeiing beoordeeld voor een levensduur van 100 en 150 jaar.



Figuur 11 - Verbinding deksecties en pendelkolom

Resultaten – 2. De pendelkolommen

Voor de tussensteunpunten kiezen we voor pendelkolommen met onder en boven een scharnierende oplegging. Door deze verbinding kan de opliggende deksectie bij temperatuurverschillen uitzetten en verkorten. Ook zorgen pendelkolommen voor de centrische belasting op de fundering, waardoor we piekspanningen t.g.v. opgelegde vervormingen en differentiële zettingen vermijden. Op één van de landhoofden komen vaste opleggingen op het andere landhoofd schuifopleggingen met blokkering in de y-richting. De vormgeving van de kolommen zelf behoort tot een van de ontwerprijheden binnen de open standaard, maar moet altijd voldoen aan de constructieve veiligheid.

In de basiscatalogus gaan we uit van ronde stalen buizen. Deze materialen ontleen we aan de surplusvoorraden van de gas- en olie-industrie. Oftewel: 'made in history' materialen, waarvan de milieukosten reeds voldaan zijn. De voorraad van deze materialen in Europa is dusdanig dat het ook in een opgeschaalde volume goed te verkrijgen is, zo blijkt uit gesprekken met de leverancier. De staalkwaliteiten van deze 'made in history'-materialen zijn onderzocht en vastgelegd. In fase 2 wordt de pendelkolom als geheel getest.

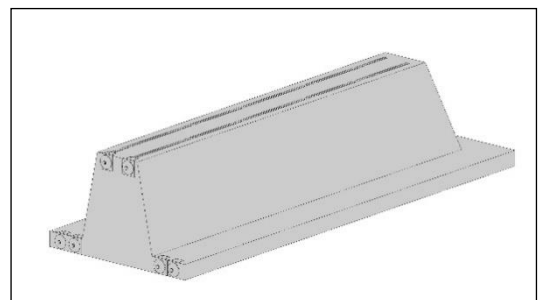
Resultaten – 3. Onderbouw viaduct van prefab betonelementen

De onderbouw van een viaduct vormt het raakvlak met de ondergrond op de betreffende locatie en moet stabiel en robuust zijn, ook voor het opnemen van horizontale belastingen. Traditioneel wordt de onderbouw in situ gebouwd. Voor het Variaduct ontwerpen we een modulaire en (re)montabel innovatie waarvoor geldt:

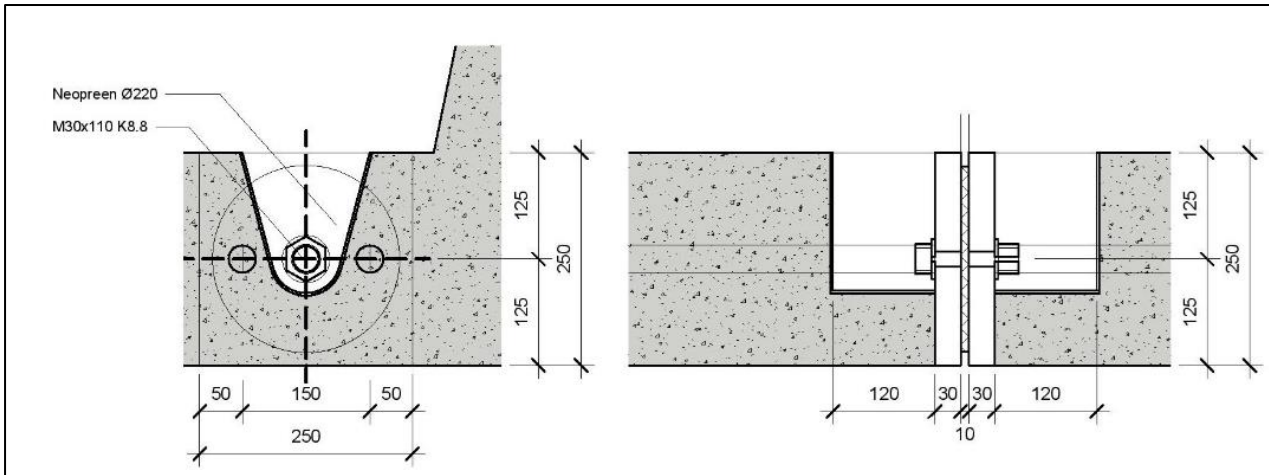
- afmetingen passend bij 'normaal' wegtransport;
- massa per element van maximaal 30 ton;
- mechanisch en remontabel koppelsysteem.

Hierdoor is onze innovatie circulair en industrieel in een gecontroleerde omgeving te bouwen.

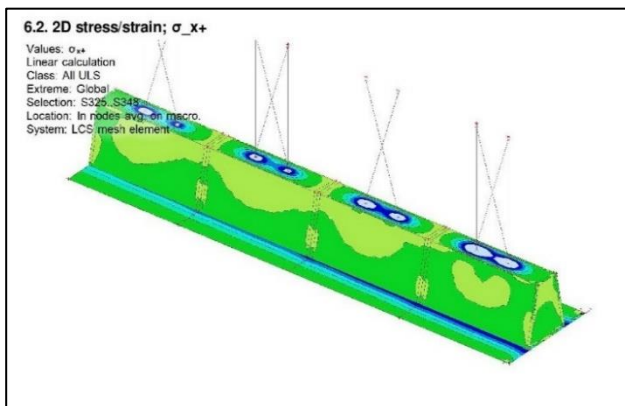
De belangrijkste betonelementen zijn de pijlersloof en de opbouw van het landhoofd. De pijlersloof is van gewapend beton (Figuur 12). De elementen hebben een aanlegbreedte van 2,70 m en een stukgewicht van 25 ton. De elementen zijn onderling koppelbaar met een boutverbinding. Deze verbinding is duurzaam en eenvoudig te demonteren (zie Figuur 15).



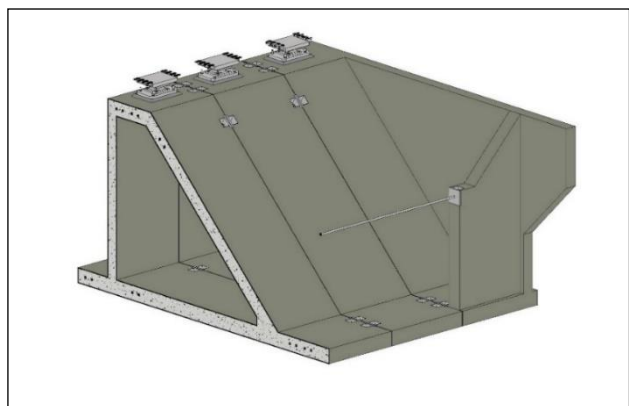
Figuur 12 - Pijlersloof in gewapend beton



Figuur 15 - Boutverbinding voor de koppeling van betonelementen



Figuur 13 - 3D model pijlersloof met betonspanningen



Figuur 14 - Landhoofd

Bij de vormgeving van het landhoofd is gestuurd op gewichtsbesparing op het funderingsvlak en op het verkrijgen van een geleidelijke overgang van oprit naar brugdek zonder toepassing van stootplaten. Het standaard oplegsysteem biedt daarnaast voldoende instelbereik voor scheve kruisingen tot 40 graden. In het basisconcept van het Variaduct gaan we ervan uit dat het dek van het viaduct lang genoeg is om de landhoofden haaks op de lengte as te situeren. Een haaks landhoofd met voegconstructie is uiteraard remontabel en overal toepasbaar en verhoogt daarmee de circulariteit van onze innovatie.

Voorlopig gaan we uit van een betonkwaliteit C60/75. Hiermee is de constructieve veiligheid geborgd met minimaal materiaalgebruik. Een eerste verkenning van een meer circulaire betonsamenstelling voerden we uit met Cirwinn (betonproducent). In fase 2a onderzoeken we of dit meerwaarde biedt op het vlak van duurzaamheid maar met behoud van constructieve eigenschappen.

Resultaten – 4. De constructiehoogte

Een viaduct is een 'bult' in het tracé van de kruisende weg. Door reductie van de constructiehoogte is minder energie benodigd voor het passerende verkeer om over te steken. Hiermee worden brandstofkosten bespaard. Ook leidt een reductie in constructiehoogte van onze innovatie tot een lagere milieu-impact en lagere bouwkosten.

De dek-secties van het Variaduct concept hebben we ingevoerd in het SCIA-model, met als resultaat dat een dek met $L = 27,00$ m en een constructiehoogte van 825 mm voldoet aan de eisen van sterkte en doorbuiging. Veiligheidshalve houden we een constructiehoogte van 900 mm aan.

Bij het Variaduct maken we gebruik van het cantilever-principe: door de dekken van de aanbruggen 3,60 m uit te laten uitsteken t.o.v. de pijlers ontstaat een midden-overspanning van $3,60 + 27,00 + 3,60 = 34,20$ m. Hiermee wordt de ratio H constructie: L overspanning = 1:38. Dit is slank in verhouding tot traditionele liggers. In fase 2 gaan we onderzoeken welke optimalisaties mogelijk zijn.

3.3 Economisch perspectief

Naast technische haalbaarheid is ook het economisch perspectief van het Variaduct van groot belang. De innovatie is erop gericht dat het eerste viaduct direct een gunstig resultaat laat zien op basis van Lifecyclecosting (LCC). De open source-aanpak maakt het voor iedereen mogelijk om aan te sluiten bij onze innovatie. Omdat geldt dat hoe meer partijen gebruik maken van het Variaduct hoe groter de impact is, gaan we in op randvoorwaarden die nodig zijn om 1) veel partijen gebruik te laten maken van de innovatie en 2) echt te sturen op hergebruik van elementen. Daar bovenop komt dat brede toepassing ook bijdraagt aan schaalvoordelen in productie, bouw en (her-)gebruik. Tot slot wordt de restwaarde nog verder vergroot als meer vraag ontstaat.

In dit hoofdstuk geven we antwoord op de vragen uit thema 5:

- Hoe ziet de businesscase van het Variaduct eruit? (3.3.1)
- Wat zijn kritische succesfactoren die zorgen voor een breed draagvlak voor de open standaard? (3.3.2)
- Welke eigendomssituatie past het best bij de open standaard? (3.3.3)
- Hoe kan het best worden gestuurd op maximalisatie van restwaarde/ hergebruik? (3.3.4)
- Hoe ziet het businessmodel voor de open standaard eruit? (3.3.5)

3.3.1 Businesscase Variaduct

Het pilotproject slaagt wanneer ook het economische perspectief wordt aangetoond en de economische prikkels zorgen voor sturing op hergebruik en duurzaamheid. Daarom hebben we tijdens de haalbaarheidsfase een LCC-scenarioanalyse uitgevoerd.

Aanpak

Voor de vergelijking van de Lifecyclekosten van het Variaduct en het referentieviaduct is een Excel-model gebruikt. Het lifecyclescenario is opgesteld in lijn met de MKI-berekening en gaat uit van 150 jaar (zie 3.1.2). Opgenomen kosten in het model zijn geraamd volgens de SSK-methodiek.

Aannames

Om ondanks de onzekerheden een inschatting van het verschil in Lifecyclekosten te maken, werken we met aannames die zoveel mogelijk gebaseerd zijn op expertise in het consortium en bij RWS.¹⁰ De belangrijkste aannames zijn:

- | | |
|---|--|
| • Totale levensduur Variaduct | 150 jaar |
| • Gemiddelde functionele levensduur viaduct | 50 jaar |
| • Discontovoet | 3.50% |
| • Indexatie | 1.50% |
| • SSK factor naar stichtingskosten | Referentie 1,95 / Variaduct 1,50 ¹¹ |
| • Objectoverstijgende risico's | 15% |

¹⁰ Kentallen en aannames staan in "LCC berekening Variaduct – Rebel"

¹¹ Algemene kosten en risico- en faalkosten zijn gereduceerd vanwege gestandaardiseerde concept en zeer korte bouwtijd.

Resultaten LCC-berekening

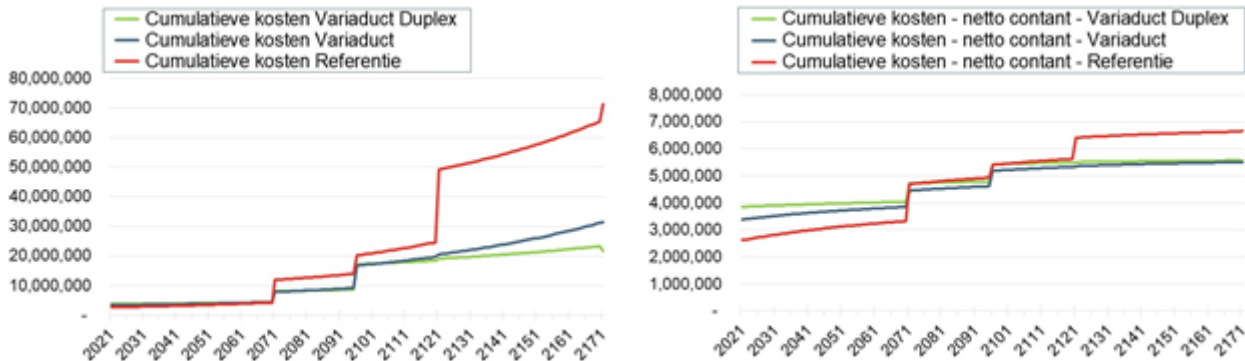
Onderstaande overzichtstabel bevat de kosten over 150 jaar¹².

OVERZICHT LCC KOSTEN TABEL			Kosten			Delta Ref. met Variaduct	
jaar	LCC Base Case - aansluiting MKI	eenheid	A. Referentie	B. Variaduct	C. Var. Duplex	Δ (B-A)	Δ (C-A)
0	Kosten nieuwbouw (2-velder)	EUR	2,624,000	3,392,000	3,852,000	768,000	1,229,000
50	Kosten sloop+nieuwbouw / verlengen	EUR	7,619,000	3,363,000	3,819,000	-4,256,000	-3,800,000
75	Kosten verbreden	EUR	6,081,000	7,519,000	8,538,000	1,438,000	2,457,000
100	Kosten sloop+nieuwbouw / verplaatsen	EUR	24,347,000	665,000	665,000	-23,682,000	-23,682,000
150	Kosten sloop en recycling	EUR	5,339,000	60,000	-1,737,000	-5,279,000	-7,076,000
0-150	Kosten onderhoud	EUR	25,285,000	16,520,000	6,608,000	-8,746,000	-18,657,000
0-150	Kosten totaal	EUR	71,274,000	31,518,000	21,744,000	-39,756,000	-49,530,000
	Kosten totaal NCW (discontovoet 3.5%)	EUR NCW	6,673,000	5,509,000	5,564,000	-1,164,000	-1,109,000
	Kosten totaal NCW (discontovoet 2.0%)	EUR NCW	14,259,000	8,919,000	8,199,000	-5,340,000	-6,060,000
LCC Eenvoudig (3x 50 jaar)							
0-150	Kosten totaal	EUR	51,642,000	19,643,000	11,524,000	-31,998,000	-40,117,000
	Kosten totaal NCW (discontovoet 3.5%)	EUR NCW	7,201,000	6,168,000	6,194,000	-1,032,000	-1,006,000

Figuur 16 - LCC kostenoverzicht

De stichtingskosten voor het Variaduct bedragen €3,39 miljoen. Dat is €0,77 miljoen meer dan de referentie. Over de hele looptijd levert het Variaduct echter een besparing op van bijna 40 miljoen. Een Variaduct van Duplex staal) heeft hogere stichtingskosten van €3,85 miljoen, maar levert over de looptijd een besparing van 50 miljoen op.

Omdat we liever een euro nu hebben dan in toekomst is het vanuit financieel perspectief logisch om de kosten te verdisconteren. Op basis van een disconteringsvoet van 3,5% per jaar is de NCW van het variaduct €1,16 miljoen gunstiger dan de referentie, en de Duplexvariant € 1,11 miljoen. Zie onderstaande grafieken, met links de kosten cumulatief door de tijd, rechts zijn dezelfde kosten netto contant gemaakt met 3,5%.



Figuur 17 - Kostenverloop in tijd (cumulatief)

Waar het rekenen met een discontovoet financieel gezien logisch is, willen we ons met het circulaire viaduct juist richten op de waarde in de toekomst! Wanneer we vanuit dat idee de discontovoet verlagen naar 2%, is het Variaduct al € 5 miljoen (NCW) goedkoper.

Dezelfde LCC-berekeningen maakten we ook voor een eenvoudig scenario waarbij een Variaduct 3x in 150 jaar wordt hergebruikt en de referentie 3x wordt geplaatst. Hier zien we gelijkwaardige resultaten (Figuur 17).

¹² Het rekenmodel is opvraagbaar.

3.3.2 Succesfactoren voor brede toepassing

Op basis van diepte-interviews zijn aandachtspunten en kansen van een open standaard geïdentificeerd. De geïnterviewde partijen zijn Dura Vermeer (manager engineering divisie infrastructuur), Provincie Noord Holland (senior-adviseur vernieuwing infrastructuur), Mercon (manager engineering), RWS (Jan van Asten, Kees Quartel).

Uit de interviews zijn de drie belangrijkste succesfactoren voor een open standaard afgeleid¹³:

1. Een duidelijk certificeringsprotocol voor hergebruik

Om downcycling te voorkomen moet in een certificeringsprotocol worden vastgelegd hoe de bouwelementen gecertificeerd worden en wanneer acceptatie voor hergebruik (door RWS en andere opdrachtgevers) is toegestaan. Uit de LCC blijkt dat een hergebruikt element goedkoper is dan een nieuwe ((de)montagekosten zijn een fractie van de nieuwbouwkosten), waardoor er een financiële prikkel om elementen opnieuw te gebruiken. Maar alleen met goede certificering en acceptatie worden de risico's voor de marktpartij voldoende beheerst. Een materialenpaspoort met data over de looptijd levert een positieve bijdrage aan de kansen voor hergebruik. Aansluitend hierop moet een taxatiewijze bepaald worden voor de bouwelementen. Bij breed gebruik van het Variaduct is het goed mogelijk dat de prijs na verloopt van tijd bepaald wordt door vraag en aanbod.

2. Gelijkblijvende normen

De normen waaraan viaducten moeten voldoen worden steeds scherper. We moeten voorkomen dat bij hergebruik, nieuwe normen gelden waardoor de elementen niet meer toegepast mogen worden. Het principe moet zijn dat als een element voor dezelfde functie wordt hergebruikt, de eisen van de initiële assemblage gelden.

3. Echte standaardisatie van elementen

De markt is geïnteresseerd in een open standaard. Standaardisatie van elementen (functionele eigenschappen, maatvoering, basisbeeldkwaliteit) leidt tot meer hergebruik omdat elementen goed te combineren zijn. Belangrijk hierbij is dat extra eisen van stakeholders voorkomen moet worden. Echte standaardisatie maakt kostenbesparing mogelijk omdat een deel van ontwerp en engineering vervalt én omdat standaardisatie seriematige productie mogelijk maakt.

Er zijn al een aantal standaarden in gebruik/ontwikkeling. Bijvoorbeeld de NTA voor industrieel, flexibel en demontabel vervaardigen van bruggen. De huidige standaarden bieden ruimte voor het Variaduct, maar hergebruik is nog onderbelicht.

De interviews bevestigen dat onze innovatie zowel toepasbaar is in het areaal van RWS als bij andere opdrachtgevers.

3.3.4 Eigendomssituatie

Uit interviews met marktpartijen blijkt dat zij op dit moment geen interesse hebben in een eigenaarschap van elementen voor lange duur. De belangrijkste argumenten hiervoor zijn dat de doorlooptijd tot aan hergebruik lang is, gemiddeld zo'n 46 jaar¹⁴. Bovendien geldt dat deze onzeker is: een viaduct kan ook twee keer zo lang blijven staan. Daarnaast kan over een dergelijke periode niet garandeerd worden dat een marktpartij nog bestaat. Dezelfde bezwaren gelden in zekere zin ook voor een statiegeldsysteem waarbij de marktpartij verplicht is om elementen terug te nemen.

De meest geschikte optie is dat RWS de eigenaar wordt van de bouwelementen. In de opdracht tot demontage van het viaduct kan RWS de overname/ hergebruik van elementen opnemen. De LCC-analyse geeft weer dat het Variaduct de eerste 100 jaar restwaarde heeft. Omdat hergebruik goedkoper is dan nieuwbouw is er ook voor marktpartijen een prikkel voor hergebruik.

¹³ "20210203_Bevindingen interviews", Rebel

¹⁴ IV-Infra bv (2016). RWS Grote Projecten en Onderhoud. Sloopoorzaken bruggen en viaducten in en over rijkswegen.

3.3.5 Sturen op hoogwaardig hergebruik en een hoge restwaarde

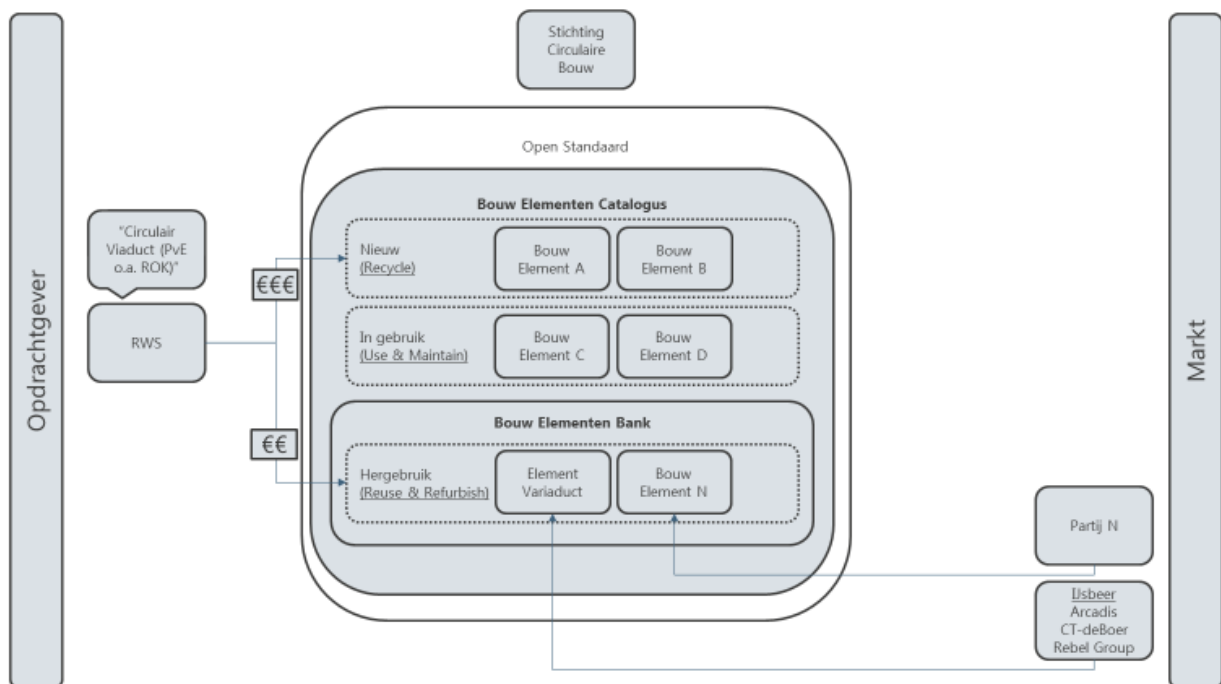
De LCC-scenarioanalyse geeft een hoge restwaarde voor het Variaduct in alle scenario's. Zelfs na 150 jaar resteert een hoogwaardig stalen product, dat mogelijk hergebruikt kan worden voor een viaduct voor lichtgewicht verkeer. De vermeden kosten van nieuwbouw zijn groter dan de schrootopbrengst. Sturen op hoogwaardig hergebruik is daarom interessanter dan maximalisatie van restwaarde van het materiaal.

Door bij de aanbesteding van een Variaduct ook een instandhoudingsplan (met het oog op hergebruik) uit te vragen, kan een hoge restwaarde worden geborgd.

De LCC-berekeningen laten zien dat een Variaduct intrinsieke economische prikkels draagt voor hergebruik.

3.3.6 Concept businessmodel open standaard

Het businessmodel van de open standaard (Figuur 18) start bij een aannemer die de bouwelementen afneemt bij leveranciers op basis van een catalogus (nieuwe elementen) of een (digitale) bouwelementenbank (gebruikte elementen) waar elementen met een materialenpaspoort en certificering beschikbaar zijn. De opdrachtgever kan hierbij RWS zijn, maar uiteraard ook een andere publieke opdrachtgever.



Figuur 18 - Concept businessmodel open standaard

De open standaard staat de toepassing van nieuwe materialen toe en draagt bij aan de ontwikkeling van standaardisatie. Denk daarbij aanvullend aan ontwerpbestanden beschikbaar gesteld kunnen worden.

Wij voorzien een onafhankelijke stichting om de open standaard en de BouwElementen Catalogus te modereren. Uitgangspunt daarbij is de maatschappelijke impact, waarbij de markt continue wordt uitgedaagd om bouwelementen te verbeteren die zij beschikbaar maken in de BouwElementen Catalogus. Binnen dit businessmodel past het niet om innovaties te beschermen. De open source aanpak moet juist concurrentie op kwaliteit versterken.

3.3.7 Intellectueel eigendom en gebruiksrecht

Betreffende het IE recht bieden wij de in de leidraad genoemde bovengrens aan. Het Variaduct is open source. Dat wil zeggen een vrij gebruiksrecht voor eenieder. Rijkswaterstaat kan de innovatie na de SBIR gelijk toepassen in projecten.

3.3.8 Toepasbaarheid en schaalbaarheid

Het Variaduct is een breed toepasbaar, schaalbaar en vrij invulbaar concept omdat:

- Het Variaduct conform de ROK ontworpen wordt en daardoor binnen (en buiten) het areaal van RWS toepasbaar is;
- Op basis van de grondmechanische berekeningen kunnen we het Variaduct in 9 van de 10 situaties zonder paalfundaties realiseren;
- Het Variaduct overspanningen tot 34 meter kan overbruggen en op verschillende manieren de weg kan kruisen waardoor het in zeer veel situaties toepasbaar is;
- De Catalogus biedt ruimte voor ontwerpers en vormgevers om (locatie)specifieke wensen door te voeren;
- De Catalogus van bouwelementen andere marktpartijen de mogelijkheid biedt om eigen innovaties en optimalisaties aan te bieden;
- De open standaard geen aanbieder voorschrijft en opdrachtgevers deze kunnen voorschrijven zonder het *level playing field* te schaden.

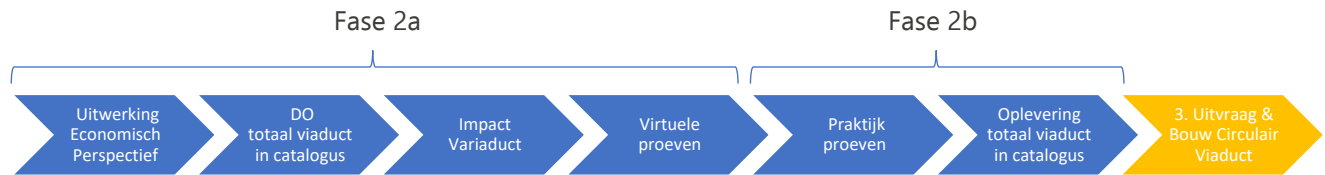
3.3.9 Het juiste consortium

Met dit consortium hebben we de juiste partijen aan boord om in fase 2 onze innovatie verder uit te werken:

- Arcadis is wereldwijd toonaangevend als ontwerp- en consultancyfirma, die in de afgelopen jaren hebben veel kennis en expertise heeft opgedaan op het thema Circulaire Economie. Arcadis zet in deze samenwerking haar kennis in op het gebied van circulaire concepten, de technische haalbaarheid en het geven van inzicht in de milieu-impact.
- CTdeBoer is een specialist op het gebied van verplaatsingstechnieken en modulair bouwen en werkt al jarenlang als zelfstandig bedrijf samen grote aannemers in binnen- en buitenland en is daarbij gericht op samenwerking in de keten. De praktische ervaring van CT de Boer zorgt ervoor dat we onze innovatie snel en succesvol naar een uitvoering in de praktijk kunnen brengen.
- Rebel is een financieel-economisch adviesbureau, met een basis in de infrastructuur, waar we zijn gegroeid van adviseur naar investeerder. Ook heeft Rebel veel ervaring met MKBA's en het uitwerken van nieuwe businessmodellen. Met ons netwerk en ervaring zorgen we ervoor dat het Variaduct een haalbaar businessmodel kent en breed door de sector wordt opgepakt

4. Voorstel voor fase 2

De doelstelling van fase 2 is om onze innovatie te testen en te valideren, waarna het ontwerp uitgewerkt wordt tot catalogus. Validatie vindt plaats door het testen van een prototype in het RWS-areaal. Onze aanpak voor fase 2 bestaat uit de volgende stappen:



De hieronder beschreven aanpak in 4.1 en 4.2 beschrijft in zijn geheel ons test en validatieplan. Met dit proces voor fase 2 zorgen we voor een bewezen haalbare, uitvoerbare, gevalideerde en economisch gunstige innovatie voor RWS. Hieronder beschrijven we stap voor stap ons onderzoek en welke informatiebehoefte daarbij ingevuld wordt. Het technologisch startpunt is de uitkomst van het haalbaarheidsonderzoek zoals beschreven in hoofdstuk 3 (en de onderliggende documenten).

4.1 Fase 2a: Ontwikkelen en testen van het prototype

Kennisontwikkeling over circulaire kunstwerken is erg belangrijk. Voor fase 2a bieden wij daarom (minimaal) twee afstudeer- of stageplekken voor studenten van de onderwijstellingen verbonden aan de SBIR.

4.1.1 Uitwerking economisch perspectief

Voor een toepasbare en schaalbare innovatie is een goed protocol voor hergebruik nodig en willen we meer marktpartijen en opdrachtgevers verbinden aan de open standaard.

Protocol einde functionele levensduur, certificering en acceptatie voor hergebruik

De informatiebehoefte is een uitgewerkt protocol voor hergebruik van het Variaduct. Eerst bekijken we hoe virgin materialen nu worden gecertificeerd. Daarna maken we met stakeholders een (concept)lijst van keuringspunten, inclusief geldende normen/eisen. In het protocol voor certificering en acceptatie wordt opgenomen:

- Certificeringseisen, controle en eventuele renovatie element;
- Certificering en update van het paspoort waarin de kwaliteit voor hergebruik en resterende levensduur zijn opgenomen;
- Controle op dan geldende normen bij verschillende opdrachtgevers met een zo hoog mogelijke waardering van het element tot doel;
- Aanbieding op marktplatform;
- Uitnemen (met schrootwaarde) van elementen die einde technische levensduur zijn en/of geen alternatieve aanwending kennen en/of niet meer passen binnen de Open Standaard.

Het resultaat is een (concept)controleprotocol dat door marktpartijen en opdrachtgevers gebruikt kan worden om hergebruik te bevorderen.

Binden van een brede set aan opdrachtgevers en marktpartijen met LOI (intentieverklaring)

Onze informatiebehoefte is meer zicht op het draagvlak onder marktpartijen en opdrachtgevers voor onze innovatie. Om tot een schaalbare innovatie te komen, vragen we marktpartijen om interesse kenbaar te maken voor de productie van bouwelementen. Ook gaan we bij opdrachtgevers na wat de belangrijkste voorwaarden zijn voor toepassing van het Variaduct. Dit doen we door middel van gesprekken met minimaal 6 marktpartijen en 6 opdrachtgevers. Het commitment willen we vastleggen in intentieverklaringen. We onderzoeken de mogelijkheid om met meerdere opdrachtgevers, bouwers en leveranciers na fase 2b een aantal Variaducten te realiseren, waarvan de onderlinge elementen uitwisselbaar zijn.

4.1.2 Definitief Ontwerp en Catalogus van Bouwelementen

Definitief ontwerp

Wij bieden een haalbare innovatie aan die direct na fase 2b jaar werkelijk toegepast kan worden door RWS. Om daartoe te komen werken we het VO in fase 2a uit tot een DO. Hierbij gaan we de volgende informatiebehoefte verder invullen:

- De vermoeiing van het materiaal, dit wordt ook onderdeel van het onderzoek in fase 2b;
- Optimalisatie van de dekafmetingen;
- Analyse van impact van aanrijdbelastingen op de middenpijler en tegen de onderzijde van het dek;
- Noodzaak tot gebruik van stootplaten;
- Onderzoek naar de toepassing van 'Made in History' staal.

Onderdeel van deze stap is een complete toetsing van het DO om zonodig de dimensies en details verder uit te werken of bij te sturen. Ook aandachtspunten moeten verder worden aangetoond, waaronder:

- Wat er gebeurt bij aanrijding en brand;
- Afvoer van regenwater op het viaduct in het kader van rijveiligheid;
- Onderbouwing van de onderhoudsaspecten.

Met het DO tonen we aan dat de innovatie voldoet aan de ROK en de Eurocodes, en geschikt is voor de bouw van het prototype in Fase 2b.

Catalogus van Bouwelementen

Na het uitwerken van de basiselementen op DO-niveau verwerken we deze inclusief montagehandleiding en monitoringsprotocol in de catalogus¹⁵. Van de basiselementen die nodig zijn om een compleet Variaduct te bouwen komt minstens één voorbeeld in de catalogus.

4.1.3 Impact Variaduct

Ook in fase 2 sturen we op duurzaamheidswinst via de milieu-impact en circulariteit van onze innovatie. We doen in ieder geval onderzoek naar de milieu-impact van Duplex-staal en verschillende circulaire betonsamenstellingen. Op basis van het DO van de elementen, nadere materiaalkeuzes en het productieproces van de bouwelementen passen we de MKI-berekeningen aan. De uitkomsten en inzichten die hieruit volgen nemen we mee in de verdere optimalisatie van het ontwerp.

4.1.4 Testen en Valideren - Virtuele testen

In fase 2a voeren we onze tests uit in een te ontwikkelen virtuele omgeving (3D model). Omdat dit veel sneller en goedkoper is dan fysieke testen kunnen we veel verschillende testen uit voeren. Daarnaast voeren we ook fysieke test uit met ons prototype. Deze fysieke tests vinden vooral in fase 2b plaats, maar zo mogelijk halen we praktijktest naar voren.

We bouwen een VR-omgeving (Digital Twin) waarin het mogelijk is om in meerdere situaties een Variaduct samen te stellen. Hierbij gaat het niet alleen om constructie en verschijningsvorm, maar ook om uitvoeringsaspecten. Onderdeel hiervan is een 4D simulatie van de bouwfaserings- en montagesnelheid.

Met behulp van de virtuele testomgeving doen we tenminste onderzoek in het kader van de volgende informatiebehoefte:

- Combinatiekansen tussen de verschillende onderdelen van het Variaduct. Zijn er bijvoorbeeld productie- of montage-optimalisaties door slim te combineren?
- Montagefasering, waarbij we met een tijdsanimatie de inzet van kranen visualiseren;
- Montage en demontage met planning.

Met de VR omgeving laten we zien dat onze innovatie haalbaar en toepasbaar is. Ook werken we het test- en validatieplan voor de praktijktesten uit.

¹⁵ De catalogus van het VO, ontwikkeld tijdens fase 1, is opvraagbaar.

4.2 Visie op fase 2b: Valideren van het prototype

In fase 2a zijn de bouwelementen door-ontwikkeld tot een DO en virtueel getest. In fase 2b testen en valideren we onze innovatie en ronden we de catalogus af.

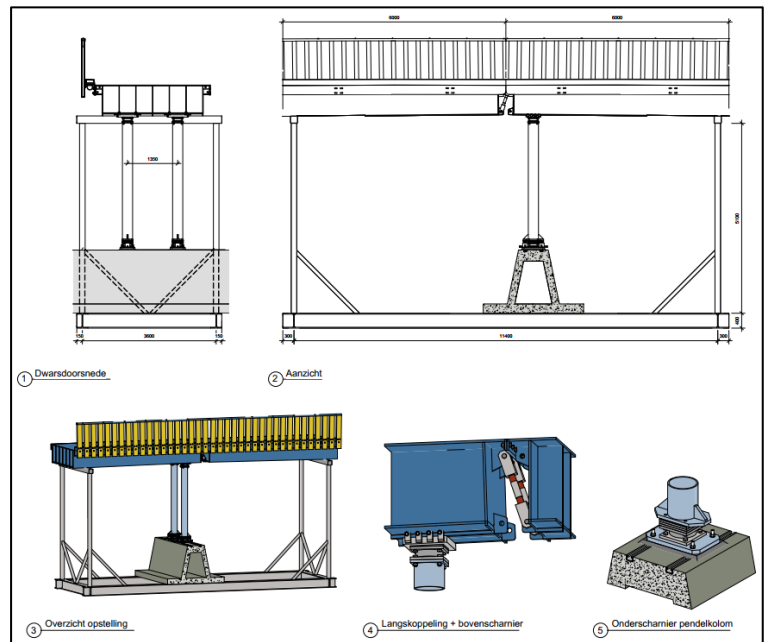
4.2.1 Testen en valideren - Praktijk testen en demonstratiemodel

Praktijktest

In overleg met RWS bepalen we een locatie voor een praktijktest met een Variaduct-light. Deze heeft volwaardige elementen (prefab landhoofden, middenpijler met vizelbare pendelkolommen en de pijlersloof), schaal 1:1. Vanwege het beperkte budget dimensioneren we de deksecties kleiner, namelijk ca. 25 bij 4 m, waarvan er waarschijnlijk 4 nodig zijn voor een concept dat de gewenste informatie levert.

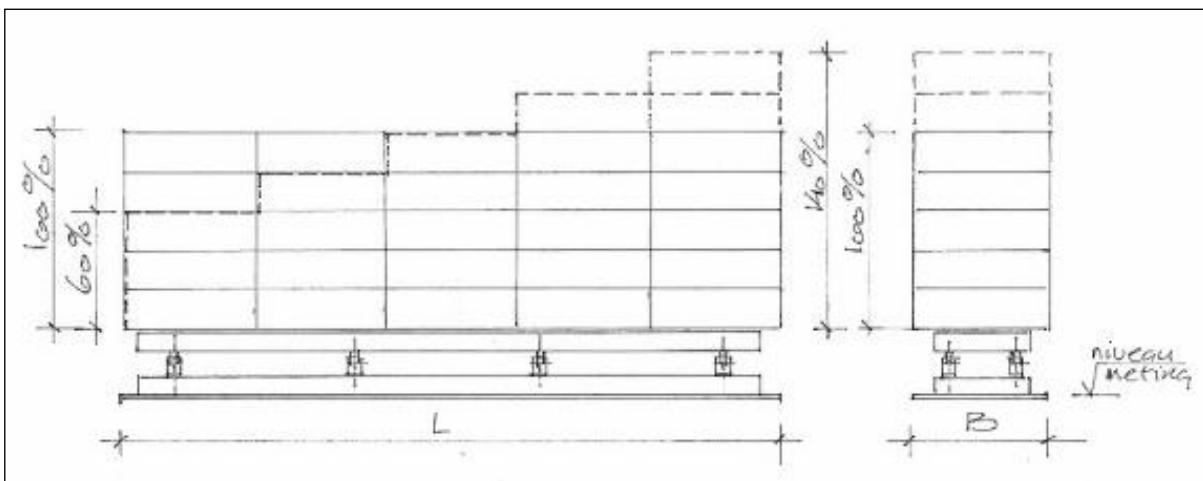
De informatiebehoefte uit deze test is het inspecteren, verifiëren of testen van:

- Uitvoeringsaspecten van de stalen dekken, lasposities, lasdetails en verbindingen;
- Randdetails houten leuning;
- Constructie pendelkolommen;
- Uitvoering hoogtecorrecties;
- Detaillering en verbindingen van de betonnen prefab pijlers;
- Verdraaien van pijler t.o.v. de brugdekken i.v.m. scheve kruisingen;
- Bereikbaarheid/ vervanging van de koppelingen en boutverbindingen;
- Demonstratie Variaduct aan geïnteresseerden;
- Het effect van de houten leuning, uitleg over de instelvariabelen.



Figuur 19 - Objecten Variaduct

Na deze test kunnen we het DO valideren en bieden we een direct toepasbare innovatie aan. Hiermee kunnen wij onze ambitie waarmaken om binnen 3 jaar het eerste Variaduct geplaatst te hebben.



Figuur 20 - Testopstelling met $L \times B = \text{ca } 18 \text{ m}^2$, ballast ca 140 ton

Testopstelling 'funderen zonder palen'

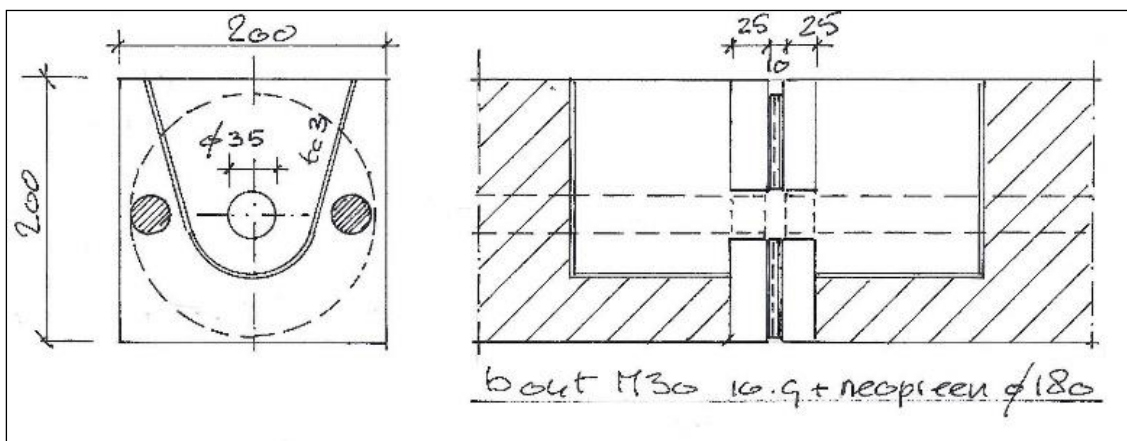
Met deze test onderzoeken we in welke situaties het zettingsrisico van funderen zonder palen voldoende beheersbaar is met de voorzieningen uit onze innovatie. Zo toetsen we de resultaten uit fase 1.

Na een succesvolle eerste proef op het bedrijfsterrein van CTdeBoer in Nieuwegein, zo mogelijk in fase 2a, selecteren we in overleg met RWS in fase 2b minimaal één locatie. We starten een proef met een gelijkmatig verdeelde belasting die we in tweede instantie ombouwen naar een trapeziumvormige belasting. De informatiebehoefte is het krijgen van inzicht in de verschillen tussen de werkelijke zettingen en de voorspelde waarden en het verloop van zettingen in de tijd.

Na deze tests stellen we randvoorwaarden op voor de toepassing van het Variaduct op verschillende ondergronden.

Testopstelling 'verbindingen betonelementen'

De betonnen onderbouw modulair en remontabel is ontworpen. Essentieel hierbij zijn de verbindingen, daarom testen we deze afzonderlijk.



Figuur 21 - Voorbeeld van een mechanische verbinding van betonelementen met M30 8.8 bouten.

Met deze test verkrijgen wij inzicht in de montage en krachtswerking in de verbindingen. Naast deze test zoeken wij samenwerking met kennis- en onderzoeksinstellingen.

4.2.2 Oplevering catalogus Variaduct

Na afloop van de fysieke test ronden we het DO per element af in de catalogus. De catalogus is de basis voor de open standaard, waarbij koppelvlakken beschreven worden maar bijvoorbeeld materialisatie flexibel is voor marktpartijen. Met deze open standaard kan RWS vrijwel direct na afronding van fase 2b met onze innovatie de markt gaan uitvragen!

4.3 Risico's en kansen voor fase 2

Risico	Beheersmaatregelen
Conflicterende eisen in de ROK zorgen ervoor dat het Variaduct verder doorontwikkeld moet worden.	We organiseren binnen één maand na opdrachtverstrekking een gezamenlijke ontwerpessie met RWS over de raakvlakken tussen het Variaduct en de ROK
RWS kan geen haalbaar proefproject aanbieden om de pilot te draaien	Ons consortium draagt 2 alternatieve locaties aan. We maken op het terrein van CTdeBoer in Nieuwegein een testopstelling
Er wordt te laat aandacht besteed aan het praktische vervolg op de SBIR doordat Fase 2 alle aandacht van betrokkenen opeist	Binnen het consortium wordt de haalbare businesscase van het Variaduct parallel aan de SBIR uitgewerkt. Bij de faseovergang van 2a naar 2b bespreken we een mogelijk vervolg met RWS.
De onderlinge elementen sluiten niet goed op elkaar aan door afwijkingen tijdens fabricage en montage	We bepalen in het DO eisen t.a.v. toleranties. Tijdens de productie van de elementen worden proefpassingen gedaan om te borgen dat de elementen onderling goed aansluiten
De markt accepteert de open standaard niet	Het consortium gaat tijdens fase 2a met potentiële gebruikers in gesprek om bredere acceptatie te bewerkstelligen
Vermoeiing is onvoldoende vastgelegd in het materialenpaspoort en belemmert hoogwaardig hergebruik.	We onderzoeken de toepassing van glasvezelmonitoring in deksecties om vermoeiing inzichtelijk te maken.

Kansen	Beheersmaatregelen
Het toepassen van Duplex staal met een langere levensduur, lagere LCC en veel minder onderhoud of hinderlijke conserveringswerkzaamheden	We onderzoeken het gebruik van Duplex in fase 2
Partijen die afvallen in de SBIR gaan met ons samenwerken en zo krijgen we een breder draagvlak en kennis aan boord	We trekken graag met RWS op om verbinding te zoeken met deze partijen
Producenten en leveranciers gaan actief participeren en hiermee komen middelen vrij die de ontwikkeling versnellen en versterken	We zoeken reeds actief naar versterking buiten de huidige samenwerking en heeft de eerste partijen al bereid gevonden
Wij kunnen binnen 3 jaar al een viaduct realiseren binnen RWS-areaal, en dit werkt als kickstart voor de brede uitrol van het concept.	Vanaf de faseovergang van 2a naar 2b stelt het consortium teamleden beschikbaar om studies naar vervolgprojecten te doen
RWS staat toe om dit concept ook buiten RWS toepasbaar te maken, denk aan Gemeentes, Provincies andere landen	Hierover gaan we graag het gesprek met RWS aan
Er ontstaat een cultuuromslag naar veel minder milieubelastende fundaties van bruggen	Hiervoor zoeken we met onze innovatie de publiciteit op en delen we kennis
We stellen gecombineerde stageplekken en afstudeerplekken beschikbaar, waarbij de studenten 50% bij RWS en 50% bij ons consortium werken. Hiermee pakken wij het wij-zij-denken aan voor de toekomst.	We gaan graag met RWS en de betrokken kennisinstututen in gesprek om dit te organiseren
De mogelijkheid tot opschaling van het concept binnen 1 jaar na afloop SBIR	Het consortium werkt aan plannen t.b.v. schaalvergroting en industrieel bouwen
Hoogwaardig hergebruik van componenten buiten de toepassing in het Variaduct, bijvoorbeeld in de utiliteitsbouw	Door toepassing van Duplex komen mogelijkheden naar voren die hoogwaardig hergebruik mogelijk maken, ook na 150 jaar



5. Begroting fase 2

	Totaal in €	Totaal uren
Kosten van arbeid	€714.000,-	7.000
Verbruikte materialen	€100.000,-	
Machines en apparatuur	€25.000,-	
Kosten van arbeid van projectpartners	€214.000,-	3.200
Kosten derden	€73.600,-	500
Overige kosten	€113.000,-	
Totaal exclusief BTW	€1.239.600,-	10.700
Omzetbelasting (laag)		
Omzetbelasting (hoog)	€260.316,-	
Omzetbelasting (0%)		
Totaal inclusief BTW	€1.499.916,-	10.700

6. Colofon

Project: SBIR Circulaire viaducten
Rapportage: Eindrapport fase 1 – Haalbaarheidsonderzoek
Concept: Variaduct – Het circulaire en onbepaalde viaduct
Datum: 15 maart 2021

Consortium:

Contactpersoon:



Beate Vlaanderen



Erik Stoelinga



Jan Willem Warner

Ondertekend door: dhr. A.F. van Vliet

Datum: 15 maart 2021

Hantekening:

