



**RWS INFORMATIE**

Kenmerk: AT/2020/03

Bijlage 4

## Eindrapport fase 1 – Haalbaarheidsonderzoek SBIR Circulaire viaducten

### Gegevens project

- SBIR-projectnummer / projecttitel: Honeycomb
- Contactpersoon en uitvoerder: Wessel van Beerendonk, Studio RAP
- Begin en einddatum van het project: 23 september 2020 – 16 maart 2021



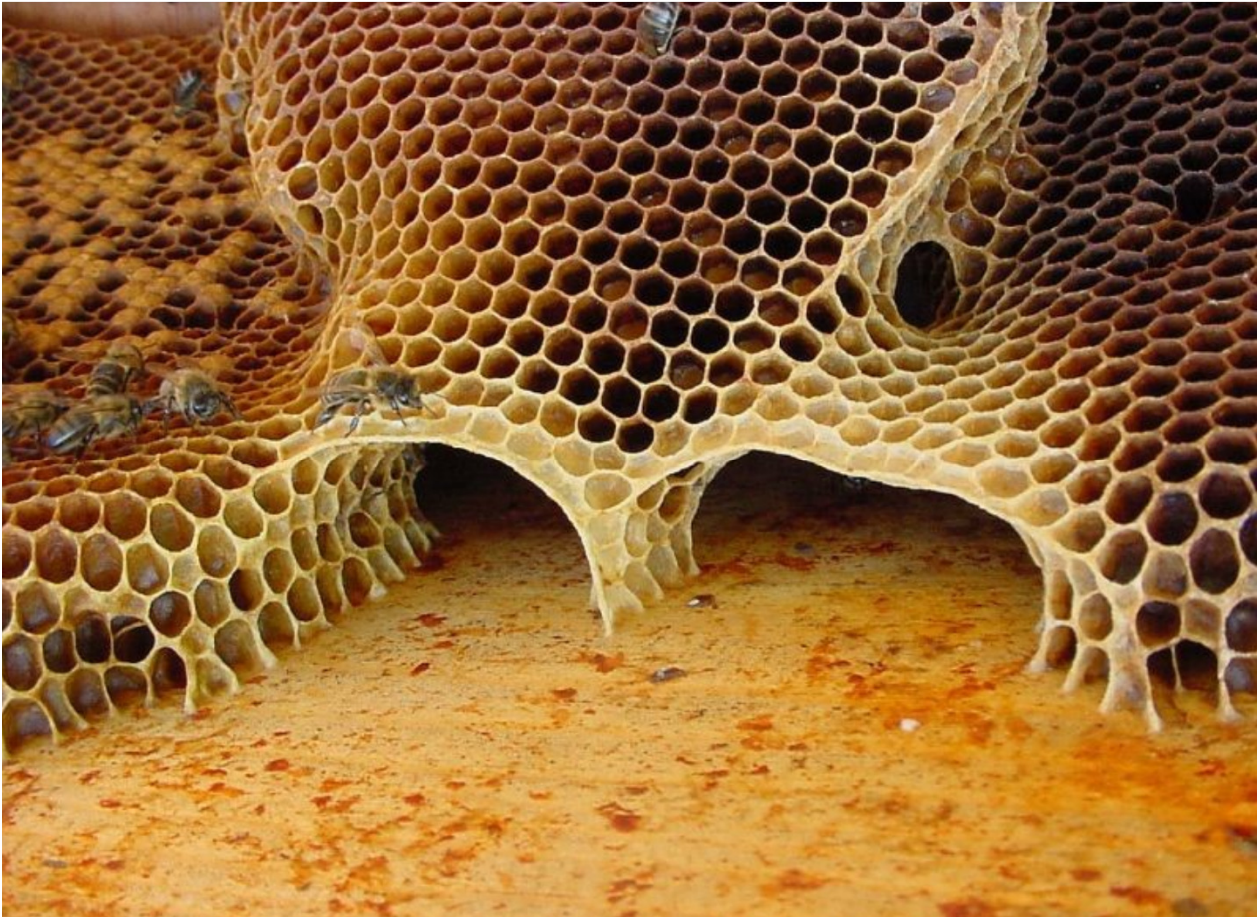
*Figuur 1, visualisatie van circulaire viaduct zoals bedacht tijdens het projectvoorstel.*

# 1. Management samenvatting

## Inleiding

### Honeycomb

Onze projectnaam is geïnspireerd op de honingraatstructuur, een efficiënte lichte ruimtelijke structuur; sterk met een minimum aan materiaal. Ons voorstel voor het circulair viaduct bestaat, evenals de honingraat, uit een efficiënte lichte ruimtelijke structuur van 3d-geprint beton. Met ons voorstel willen we bijdragen aan de transitie naar een duurzame wereld door één van de nieuwe duurzame oplossingen te bieden voor vergaande reductie van primair grondstoffengebruik en CO2.



*Figuur 2, afbeelding van een honingraatstructuur in de vorm van een gewelf.*

### Digital concrete en circulair bouwen

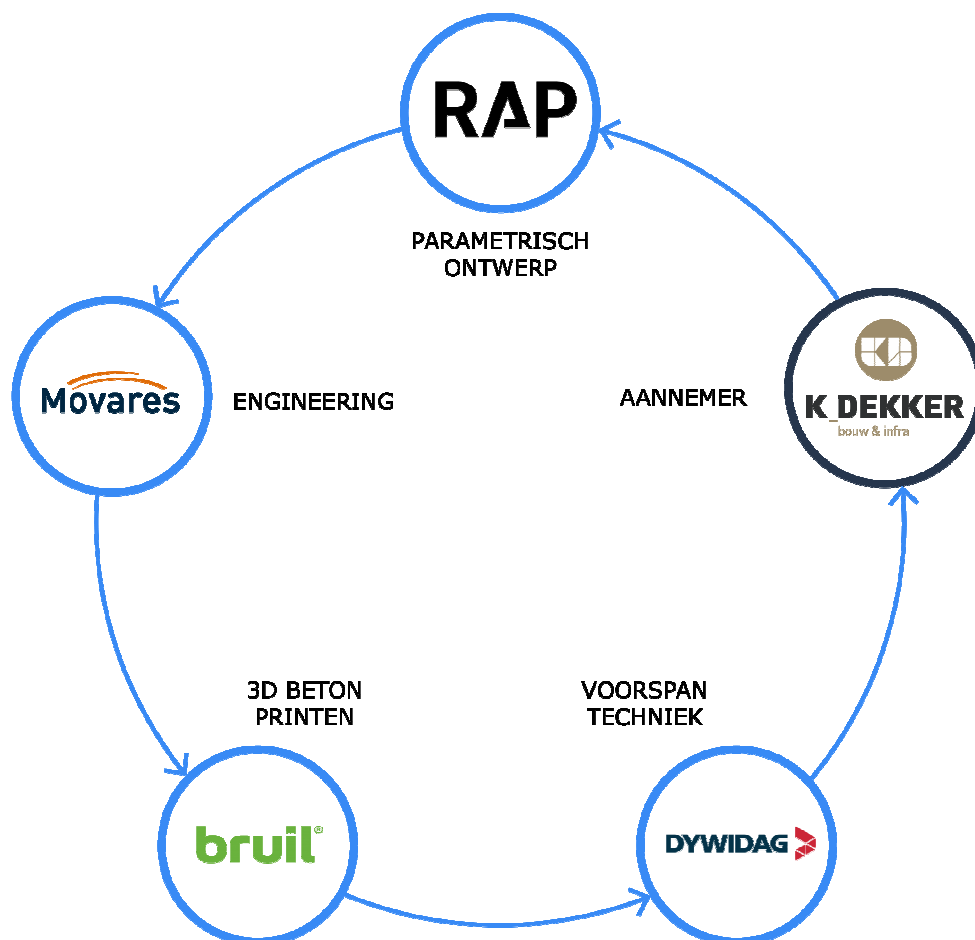
Studio RAP, Bruil, Movares en Dywidag werken inmiddels 5 jaar samen aan de ontwikkeling van 'digital concrete', het 3D-printen van prefab-beton elementen, verder afgekort als 3DCP – 3D concrete printing. We hebben deze nieuwe techniek in een gevelrenovatie grootschalig naar de markt gebracht<sup>1</sup>. We gaan graag de uitdaging aan om de komende jaren 'digital concrete' ook voor zwaar belaste constructies naar de volwassenfase te brengen en zo bij te dragen aan de transitie van de GWW sector naar een circulaire markt.

De combinatie van de volgende ontwikkelingen brengt circulair bouwen daadwerkelijk binnen handbereik (2028 TRL9 voor zwaarbelaste civiele viaducten).

1. *Additive manufacturing (AM)*: materiaal wordt alleen daar geplaatst waar het nodig is en snijverliezen en hulpconstructies als bijvoorbeeld bekistingen worden voorkomen;
2. *Parametrisch en geoptimaliseerd ontwerpen*: dit leidt tot schaalbare ontwerpen en een sterke reductie van materiaalgebruik (tot 60%);
3. *Digitale supply-chain*: ontwerpen, produceren en realiseren vinden plaats in een digitale supply-chain waardoor bouwafval en faalkosten (nu tot 10% van de bouwkosten) grotendeels voorkomen worden;
4. *Toepassen van verbeterde en nieuwe CO2 arme (beton)mengsels*;
5. *Modulair en losmaakbaar ontwerp*: de geprinte blokken worden met behulp van voorspanstechnieken aan elkaar verbonden. Zo kunnen de blokken eenvoudig na gebruik uit elkaar gehaald worden en opnieuw gebruikt.

### Uitgebreide samenwerking

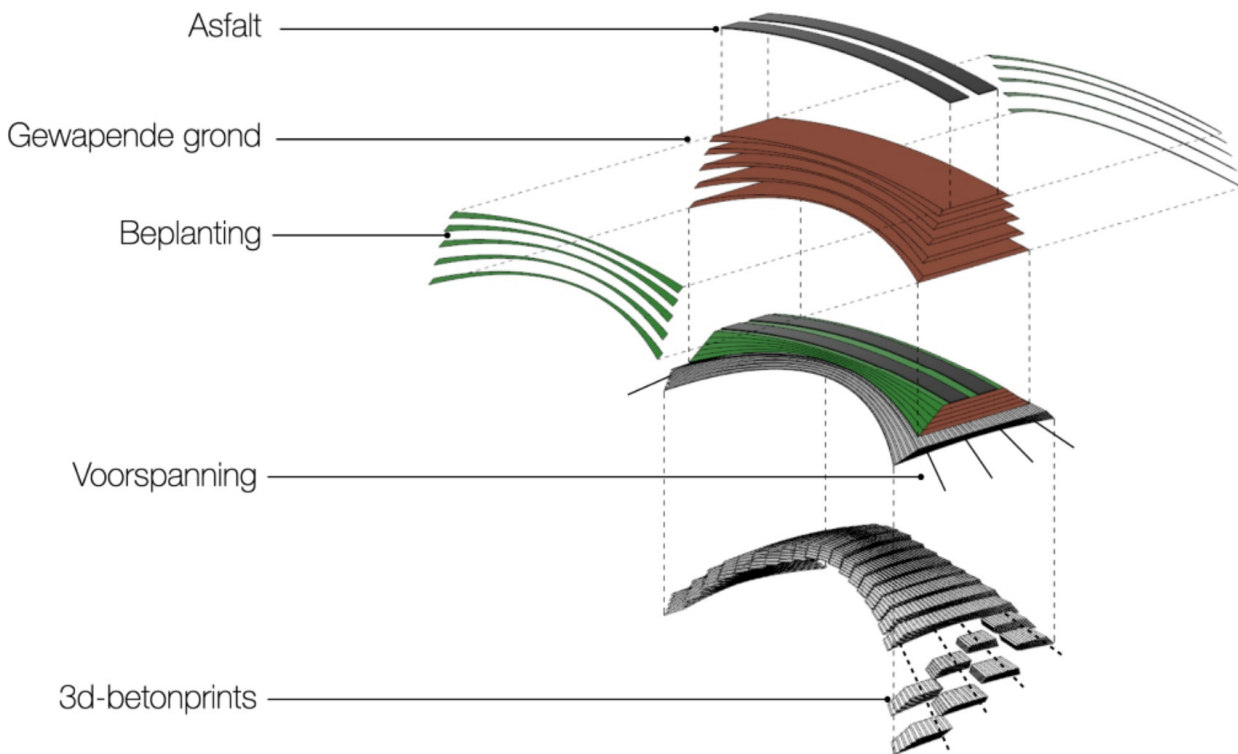
Tijdens het haalbaarheidsonderzoek is door ons een marktconsultatie georganiseerd om onze ideeën op impact, haalbaarheid en economisch perspectief in de markt te toetsen en om ons samenwerkingsverband uit te breiden. Dit heeft ertoe geleid dat K\_Dekker Bouw & Infra bv (KDBV) is aangesloten. We zijn blij met de veelzijdigheid en het nuchtere vakmanschap die door KDBV in onze samenwerking gebracht wordt. Dit geeft nu al een positieve impuls aan het daadwerkelijk uitvoerbaar maken van het plan. Ook zijn we positief verrast door de enthousiaste beoordeling van het concept door de 5 deelnemende aannemers en de bereidheid om in de verdere ontwikkeling betrokken te blijven.



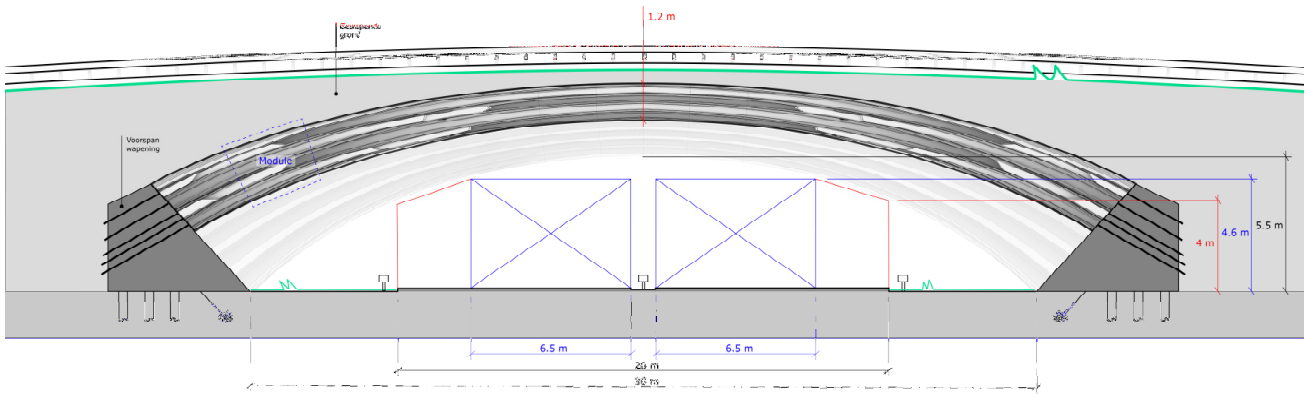
Figuur 3, afbeelding van een honingraatstructuur in de vorm van een gewelf.

## Korte beschrijving viaduct

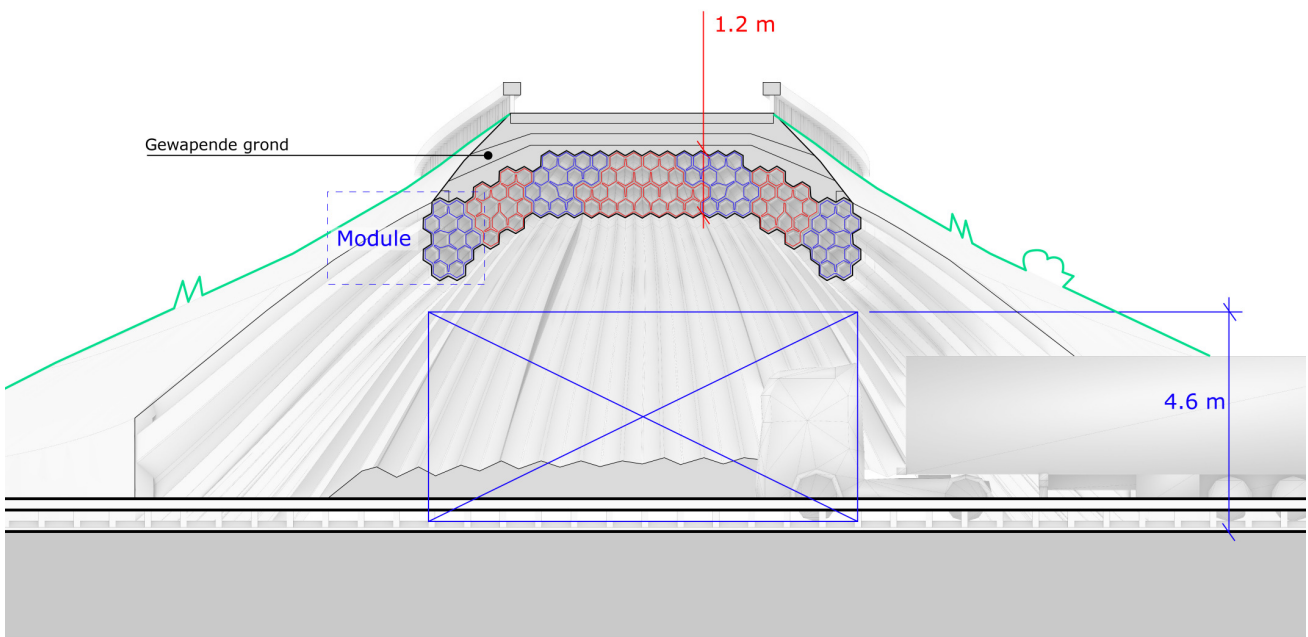
Het circulaire viaduct Honeycomb bestaat uit een 3DCP modulaire boogconstructie met daarop een grondlichaam. De boogconstructie is samengesteld uit blokken met een lichte holle structuur. De blokken worden bij elkaar gehouden door drukspanningen uit de boogwerking, bij extreme belastingen aangevuld met drukspanning uit de voorspankabels. Het grondlichaam op de geprinte boog wordt gestabiliseerd met duurzame geogrids en spreidt de puntlasten vanuit het verkeer. Het grondlichaam als intermediair tussen brugdek en wegdek biedt kansen voor het toevoegen van andere circulaire deeloplossingen als bijvoorbeeld wegdek, (houten)geleiderail en voor een groene landschappelijke inpassing.



Figuur 4, exploded view van het circulaire viaduct Honeycomb.



Figuur 5, langsdoorsnede van het viaduct met afmetingen.



Figuur 6, dwarsdoorsnede van het viaduct met afmetingen.



*Figuur 7. visualisatie van het circulaire viaduct zoals voorgesteld in dit document.*

## Fase 1 Haalbaarheidsonderzoek

### Doelstelling en probleemstelling

De kernvraag die we ons in het haalbaarheidsonderzoek gesteld hebben is of de duurzame techniek van 3DCP toepasbaar is in de wereld van zwaar belaste civiele constructies. De vragen die daar direct bij horen; zo ja, ...

1. Hoe groot is dan de duurzaamheidswinst (impact)?
2. Is het technisch wel haalbaar (technische haalbaarheid)?
3. Zit de markt erop te wachten (economisch perspectief)?

### Resultaten

Op basis van het haalbaarheidsonderzoek concluderen we dat 3DCP toepasbaar is voor viaducten en een substantiële bijdrage kan leveren aan 'het Transitiepad kunstwerken van RWS'. Hieronder worden de resultaten samengevat. In hoofdstuk 3 wordt een onderbouwing van de resultaten gegeven.

#### *Impact*

- Circa 39% van de viaducten van Rijkswaterstaat te vervangen met het honeycomb concept.
- De mki reductie van het toe te passen mengsel ten opzichte van het huidige printmengsel bedraagt op korte termijn fase 2a 60% en zal op langere termijn (2025) 70% bedragen.
- Door het viaduct samen te stellen uit modulaire elementen (ca. 80%) en op maat elementen (ca. 20%) is het concept schaalbaar en zonder meerkosten aanpasbaar aan de lokale situatie.
- Het concept leent zich uitstekend voor het combineren met andere circulaire deeloplossingen.

#### *Technische haalbaarheid*

- Het voorstel van een voorgespannen, gebogen en geprint dek werkt efficiënt en leidt tot een materiaal reductie van 60% ten opzichte van traditionele gewapende dekken.
- Het concept is getoetst aan de vigerende wet- en regelgeving en is veilig en betrouwbaar bevonden. De combinatie van bijzondere belastingen in relatie tot de holle structuur verdient nog aandacht. In de bouwfase kan het concept ook veilig worden gerealiseerd. De ROK (Richtlijn Ontwerp Kunstwerken) sluit op dit moment niet voldoende aan op 3DCP/ 'digital concrete' omdat zij te specifiek geschreven is voor de huidige markt.

#### *Economisch perspectief*

- Tijdens het haalbaarheidsonderzoek is een marktconsultatie georganiseerd. Het enthousiasme was groot. Op basis daarvan is een netwerk met 5 aannemers gevormd om het geprinte viaduct verder te brengen en toe te passen.
- In Nederland wordt het grootste 3D printproject ter wereld tot uitvoering gebracht; 1.400 geprinte bouwelementen voor twee woningcomplexen.
- Volgens rapportage van het Grand View Research Inc. groeit de markt van het betonprinten wereldwijd met 106% per jaar; van 0,3 miljard in 2021 tot 40,6 miljard in 2027. Ruim 13,4 miljard wordt toegekend aan de inframarkt<sup>2</sup>.
- Een open source en open licentiemodel lijkt het beste samenwerkingsmodel om aankomende schaalessprong versneld te realiseren.

## Fase 2 Prototype ontwikkelen, testen, valideren

### Doelstelling

De doelstelling van fase 2 is het circulair viaduct Honeycomb minimaal 1 TRL trede verder te brengen door het viaduct in fase 2a voor een concrete situatie uit te werken tot op DO niveau en vervolgens in fase 2b een prototype te realiseren onder operationele omstandigheden.

### Probleemstelling

Papier is geduldig, maar kunnen we door middel van een zorgvuldig proces van ontwerp, testen, bouwen en monitoren de duurzame belofte van 3DCP in de GWW waarmaken.

### Prototype

Om een prototype te realiseren zien wij 2 mogelijkheden; een volledig viaduct in een matig complexe situatie in een gastproject of een prototype op afgesloten terrein.

### Testen en valideren

Fase 2a en 2b delen we op in meerdere kleine stappen. Vooraf wordt afgesproken aan welke voorwaarden een stap moet voldoen voordat we de volgende processtap nemen. De voorwaarden worden aangetoond met ontwerpverantwoording, testen, monitoring.



*Figuur 8. Nagenoeg alle viaducten zijn uniek in Nederland. Ons concept is voor 80% gestandaardiseerd en voor 20% bestaande uit uniek blokken zo garandeert dit concept een perfecte landschappelijke inpassing.*



## 2. Uitvoering van het haalbaarheidsonderzoek

### Inleiding

In ons samenwerkingsverband zijn we voortvarend aan de slag gegaan met de doelen en vragen die we voor het haalbaarheidsonderzoek formuleerden. De geformuleerde doelen bestaan uit vraagstukken voor het haalbaarheidsonderzoek en voor de langere termijn. Tijdens het haalbaarheidsonderzoek is ons inzicht in de route en de behalen milieuwinst verdiept. We evalueren in dit hoofdstuk hoe koersvast we zijn en of we voldoende vaart maken.

### Doelstelling

#### Doelstelling haalbaarheidsonderzoek

Voor het haalbaarheidsonderzoek hebben we de volgende doelstellingen geformuleerd. Deze doelstellingen zijn gerealiseerd.

- Uitbreiden van het samenwerkingsverband met een uitvoerend aannemer
- (Rekenkundig) valideren van het voorgestelde ontwerp voor een circulair viaduct op de volgende onderwerpen;
  - Voldoet het viaduct aan de huidige wet- en regelgeving voor viaducten?
  - Hoe groot is de werkelijk te behalen milieuwinst (refuse, reduce, redesign, materiaalreductie, mki)?
- Het delen van de uitkomsten van ons haalbaarheidsonderzoek met de wereld om zo de ontwikkeling van 3DCP in de GWW te stimuleren.

#### Langetermijndoelen

Tijdens het haalbaarheidsonderzoek zijn we tot de conclusie gekomen dat gezien de diversiteit in afmetingen, gebruik, complexiteit van viaducten de lange termijn doelen te algemeen geformuleerd zijn en te veel gedacht vanuit de meest complexe situaties. Door te differentiëren in complexiteit en te focussen op de overspanning met de meeste impact (tot 20m) kan hierin versneld worden. Hieronder staan de oorspronkelijke doelen waarbij cursief de aanscherping vermeld staat.

#### Doel 2022 (TRL6)

De productie van een pilotproject (testbaar viaduct) op afgesloten terrein, parametrisch ontworpen, topologisch geoptimaliseerd, 3D geprint met printbeton, voorgespannen met gebogen strengen, bouwmethode getest. Dit hopen we te realiseren in fase 2 van de SBIR uitvraag.  
*Aanscherping; een eenvoudig viaduct (bijvoorbeeld een overspanning tot 10m over een lokale weg, maar wel zwaarbelast) kan onder operationele omstandigheden gerealiseerd worden conform de beschrijving van het doel 2024.*

#### Doel 2024 (TRL7)

De productie van een praktijk-project, voorzien van sensing, parametrisch, topologisch geoptimaliseerd, 3D geprint met printbeton, geoptimaliseerde voorspanning en bouwmethode.  
*Aanscherping; in aansluiting op bovenstaande aanscherping kan een eenvoudig viaduct in 2024 gevalideerd zijn.*

#### Doel 2025 (TRL8)

Viaduct uit 2024 is gevalideerd.

#### Doel 2027 (TRL9)

De seriematige productie van geoptimaliseerde viaducten, voorzien van sensing, schaalbaar naar de lokale situatie, geproduceerd vanuit één parametrisch model, topologisch geoptimaliseerd, 3D geprint met geo-polymeren printbeton (of vergelijkbaar lage CO2 uitstoot), geoptimaliseerde naspanning en bouwmethode, passende regelgeving.

## Uitvoering van het onderzoek

### Projectorganisatie

Onze projectorganisatie is tijdens het haalbaarheidsonderzoek gestart met 4 partijen en uitgebreid tot 5 zodat alle relevante expertise voor het succesvol doorlopen van fase 2a en 2b aanwezig is. De partijen zijn complementair aan elkaar zodat de scope van de inhoudelijke werkzaamheden op een natuurlijke manier verdeeld is en niet tot discussie leidt. In het concept is de expertise van alle partijen essentieel om tot een succesvol project te komen wat zorgt voor een sterke gelijkwaardigheid in het overleg, maar ook voor een inspirerende versterking van het concept waarin het geheel meer is dan de som der delen.

De voortgang was geborgd door een vast 2-wekelijks overlegmoment. Hierin werd de voortgang op de verschillende onderdelen samengebracht en geïntegreerd en de acties voor de komende 2 weken doorgenomen. Het projectmanagement werd verzorgd door de partij waar op dat moment het zwaartepunt van de werkzaamheden lag. Voor de fase van het haalbaarheidsonderzoek was dat Movares.

### Uitgevoerde activiteiten in fase 1

#### *Impact*

- De milieu-impact is gekwantificeerd, waarbij het huidige 3d-printmengsel is gebruikt in de mki-berekening.
- Er is een theoretisch CO2 arm infra-mengsel vastgesteld en in de mki berekening getoetst op impact.
- De database van viaducten van RWS is geanalyseerd op kansrijke situaties voor het concept honeycomb.
- Het circulair viaduct Honeycomb, bestaande uit een geprinte boogconstructie met een grondlichaam, is zodanig doorontwikkeld dat ze drager kan zijn van ander circulaire deeloplossingen.

#### *Technische haalbaarheid*

- Ontwerpend onderzoek; voor het aspect technische haalbaarheid en ontwerp is een traject van ontwerpend onderzoek gevolgd, waarin de volgende aspecten onderzocht zijn:
  - De schaalbaarheid, toepasbaarheid en inpassing in de omgeving zijn onderzocht.
  - Het concept is modulair gemaakt en de vorm van de blokken is onderzocht.
  - De hoofddraagconstructie van het ontwerp is met behulp van formfinding getoetst en geoptimaliseerd.
  - De benodigde voorspanning is indicatief bepaald.
  - Het ontwerp is getoetst op bouwbaarheid en daarop aangepast.
- Wet- en regelgeving; het concept is getoetst aan de vigerende wet- en regelgeving.

#### *Economisch perspectief*

- Er is een marktconsultatie georganiseerd. Naar aanleiding daarvan zijn 5 geïnteresseerde civiel uitvoerend aannemers aangehaakt bij de ontwikkeling van 3DCP
- Het samenwerkingsverband is uitgebreid met uitvoerend aannemer K\_Dekker Bouw& infra BV.
- De consequenties van 'digital concrete' en in het bijzonder voor circulaire businessmodellen zijn doordacht en vertaald in een businessmodel.
- De consequenties van vergaande digitalisering en AM is in verband gebracht met intellectueel eigendom op basis waarvan een voorstel voor IE geformuleerd.

## Taakverdeling

Tijdens het haalbaarheidsonderzoek is de volgende taakverdeling gehanteerd:

|  |                      |
|--|----------------------|
| Technisch ontwerp viaduct                    | Movares, Dywidag     |
| Architectonisch ontwerp viaduct en inpassing | StudioRAP            |
| MKI-berekeningen                             | Movares en Bruil     |
| Ontwerp CO2 arme printmengsels               | Bruil                |
| Digitalisering en modellering                | StudioRAP, Movares   |
| Monitoring en voorspanning                   | Dywidag              |
| Bouwbaarheid                                 | KDBV                 |
| Intellectueel eigendom                       | Allen, trekker Bruil |
| Businessmodellen                             | Allen, trekker Bruil |
| Marktconsultatie                             | Allen, trekker Bruil |
| Projectmanagement                            | Movares              |

## Evaluatie samenwerking en taakverdeling

### *Samenwerking projectteam*

De samenwerking in het projectteam is goed verlopen. Eén van de sleutels daarin is de voortdurende focus op onze gedeelde ambitie en aandacht voor elkaars belangen. De fascinatie voor de kansen van 'digital concrete' voor circulair bouwen is een belangrijke gezamenlijke drijfveer.

De wat losse werkwijze heeft goed gewerkt, maar dient in fase 2 formeler opgezet te worden.

Vanwege het complementair zijn in expertise is de taakverdeling glashelder.

### *Samenwerking externen*

Tijdens het haalbaarheidsonderzoek heeft er een dialoog plaatsgevonden met RWS en een aantal door RWS in het proces ingebrachte experts. Daarnaast hebben we zelf contact gelegd met marktpartijen. Deze input van buiten het projectteam hebben we als zinvol ervaren en willen we in fase 2 intensiveren. Alleen wanneer de transitie gedragen wordt door RWS en de markt kunnen we echt impact gaan maken. Daarnaast gaan we actief met andere partijen samenwerken om de markt van 3DCP volwassen te maken. Hierbij denken we aan kennisinstututen als TU Delft, TU Eindhoven, TNO voor technisch onderzoek, TNO voor het toepassen van learning curves, Blackbears voor het toepassen van Open source. Met een aantal partijen lopen er reeds contacten over 3DCP.

## 3. Inhoudelijke bevindingen

### Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de resultaten van het haalbaarheidsonderzoek. De impact van de innovatie is nader onderzocht en gekwantificeerd. Wat is de daadwerkelijke potentie van ons voorstel om de brede maatschappelijke problemen zoals die zijn gedefinieerd in de uitvraag aan te pakken?

De brede bijdrage van de innovatie aan de transitie bestaat uit de bundeling van de volgende aspecten. (zie ook kopje 'digital concrete' en circulair bouwen.

- Additive manufacturing
- Parametrisch en geoptimaliseerd ontwerp
- Digitale supply-chain
- Toepassen van verbeterde en nieuwe CO2 arme (beton)mengsels
- Modulair en losmaakbaar ontwerp.

## 3.1 Impact

### Bijdrage aan circulariteit binnen de eigen invloedssfeer

Ons samenwerkingsverband is uniek, in die zin dat de gehele bouwketen vertegenwoordigd is met aan de ene kant een innovatieve leverancier van betonmengsels en prefab betonproducten (Bruil) en aan de andere kant een veelzijdig uitvoerend aannemer (KDBV). Daar tussen een jong, dynamisch architectenbureau, koploper in digitalisering en robotisering (StudioRAP), een gerenommeerd ingenieursbureau dat met digitale optimalisatie methoden uiterst materiaalefficiënt kan ontwerpen (Movares) en een internationaal toonaangevende leverancier van innovatieve spansystemen (Dywidag).

Elk van deze bedrijven heeft duurzaamheid hoog in het vaandel staan en heeft dat vertaalt in concrete maatregelen in zijn eigen bedrijfsvoering. Vanuit zijn eigen plek in de keten levert elk van de partijen een specifieke bijdrage die juist in de samenwerking optimaal tot zijn recht komt en geëffectueerd kan worden

- Bruil; CO2 arme mengsels en circulaire bouwproducten
- Studio RAP; Digitalisering, robotisering en file-to factory
- Dywidag; Losmaakbaarheid en monitoring
- Movares; Optimaal ontwerp en materiaal reductie
- KDBV; Veilige en efficiënte uitvoering

### Honeycomb 3DCP, additive manufacturing en circulariteit

3DCP als AM techniek heeft op het gebied van circulariteit meerdere kernkwaliteiten. Deze worden hier benoemd met begrippen vanuit de R-strategie / circulariteitsladder (Kramer), waarbij additive manufacturing vooral op de drie hoogste niveau's scoort. Daarnaast zijn de gebruikte grondstoffen voor 100% herbruikbaar in een tweede levensfase en verder.

- Tot 60% materiaalreductie bij een vergelijkbare product/functie (reduce/redesign);
- Afvalvrij productieproces (geen mallen) (reduce/refuse);
- Modulaire- en maatwerkcomponenten vanuit één productiemethode. (Redesign);
- Kapotte of beschadigde onderdelen zijn snel en goedkoop te vervangen (Refurbish);
- Eenvoudig en energiezuinig herproduceerbaar (remanufacture / recycle).

### Modulair ontwerp

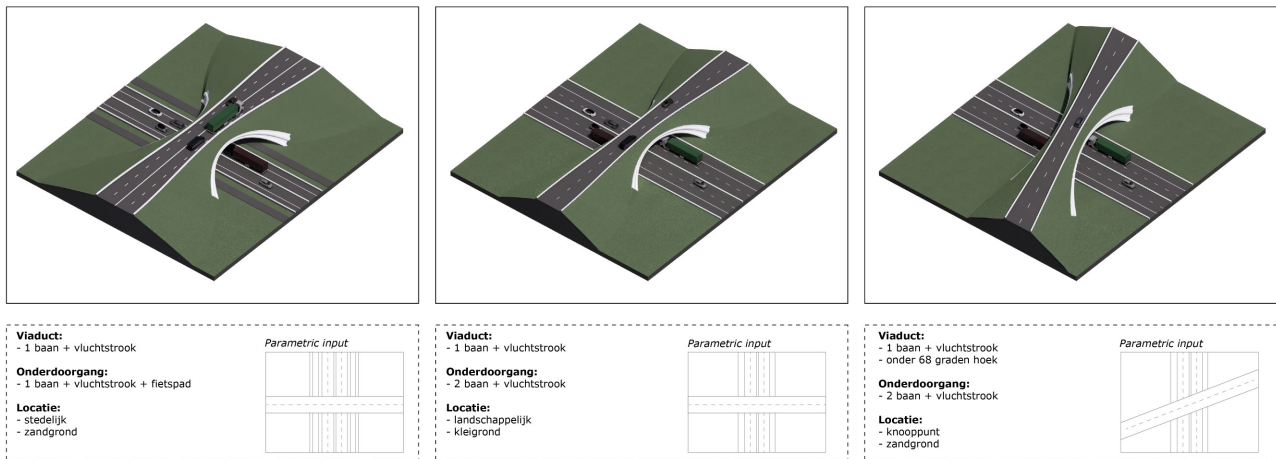
Circulariteit wordt in de bouw – bijna dogmatisch – gekoppeld aan modulariteit. Dus vanuit de traditionele industrie gedacht: gestandaardiseerde, repeterende en uitwisselbare bouwstenen. Additive Manufacturing staat echter bekend om betaalbare vrije vormen, waarmee unieke objecten gemaakt kunnen worden, dus 'sterk in maatwerk'.

### De krachtige combinatie van gestandaardiseerde- en maatwerk bouwblokken

Met additive manufacturing kun je ieder bouwblok zonder meerkosten als unieke vorm produceren, maar dat hoeft niet. Bij de Honeycomb is gekozen voor ca. 80% gestandaardiseerde bouwstenen en ca. 20% unieke bouwstenen. Met deze laatste kan de aansluiting op de omgeving op maat gerealiseerd worden. De standaard blokken zijn sowieso herbruikbaar. De maatwerk bouwstenen (20%) vinden mogelijk ook een herbestemming. Is dit niet het geval, dan worden zij 'slim gebroken' en volledig hergebruikt voor een nieuw geprinte bouwsteen.

### Schaalbaar

De innovatie is door de mogelijkheid van maatwerk inherent schaalbaar. De techniek van additive manufacturing en de parametrische opzet van het viaduct maakt het mogelijk op elke locatie maatwerk te leveren. Dat is een groot voordeel omdat vrijwel alle viaducten unieke afmetingen hebben wat betreft lengte, breedte, kruisingshoek. Zo wordt gebruik gemaakt van de kracht van additive manufacturing waarin maatwerk geleverd wordt zonder dat dit tot extra kosten leidt (mass customization).



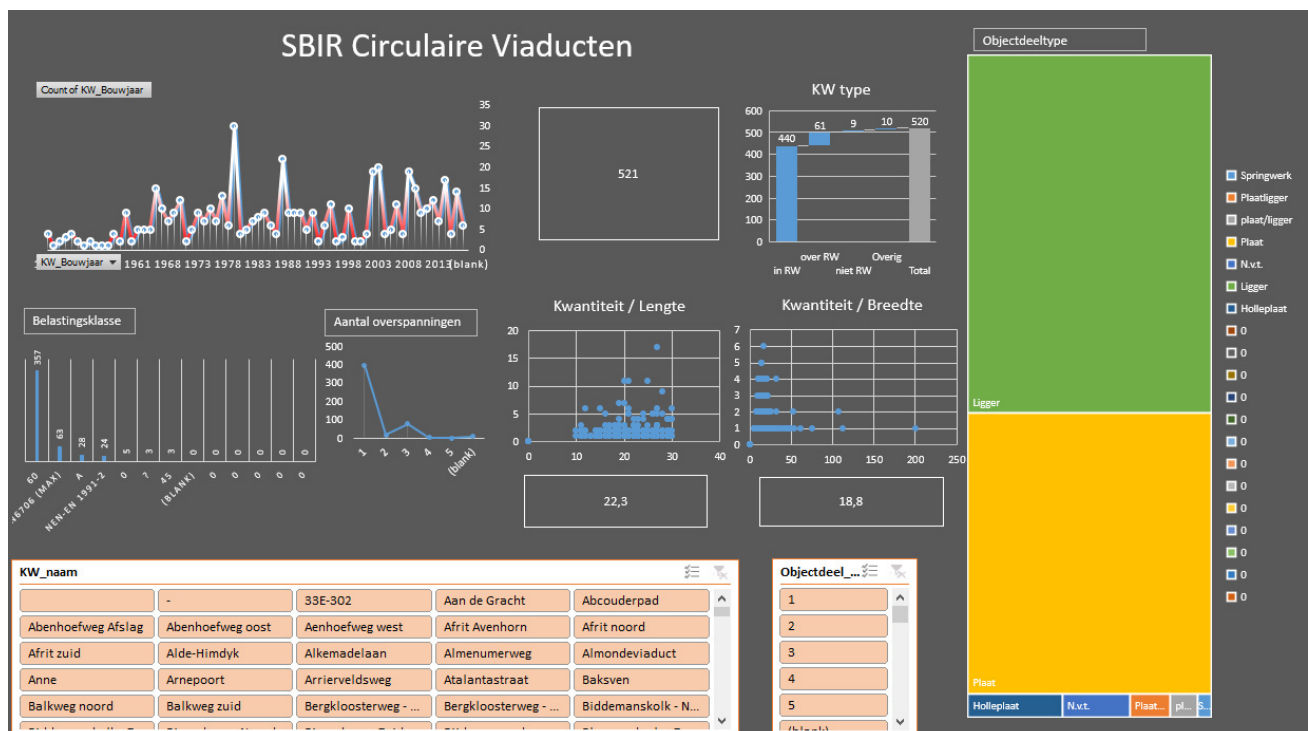
Figuur 9. Nagenoeg alle viaducten zijn uniek in Nederland. Ons concept is voor 80% gestandaardiseerd en voor 20% bestaande uit uniek blokken zo garandeert dit concept een perfecte landschappelijke inpassing.

## Toepasbaarheid

### Toepasbaar

Op basis van de database van de viaducten van Rijkswaterstaat is door ons een analyse uitgevoerd op het aantal mogelijke locaties waar het geprinte viaduct toepasbaar is. In 1390 van de 3586 situaties kan het geprinte viaduct toegepast worden. Dat komt overeen met 39%. We hebben hiervoor het criterium van een overspanning tot 20 meter gehanteerd. Wat betreft de kruisingshoek van het viaduct ligt er geen beperking.

Voor bovengenoemde cijfers hebben wij een grondige analyse gemaakt van het Excel-bestand dat is aangereikt door RWS. Van deze Excel-sheet is door ons een dashboard gemaakt waarmee verschillende facts & figures zijn gedestilleerd, onderstaand een afbeelding van het dashboard.



Figuur 10. Nagenoeg alle viaducten zijn uniek in Nederland. Ons concept is voor 80% gestandaardiseerd en voor 20% bestaande uit uniek blokken zo garandeert dit concept een perfecte landschappelijke inpassing.

## De mate van milieu-impact en circulariteit

De MKI komt in eerste instantie, op basis van de huidige printmortel, hoger uit dan het referentieproject. Dit heeft te maken dat deze mortel niet ontwikkeld is met het oogmerk van viaducten, maar voor architectonisch beton, dus dunne gevelelementen. Hiervoor werken we met CEM I in plaats van CEM III, vanwege de hoge esthetische kwaliteit, reactiviteit en snelle sterkteontwikkeling. Voor de infratoepassingen hebben we deze eigenschappen in mindere mate nodig en is deze mortel dus overgekwalificeerd.

We gaan daarom in Fase 2 een speciale CO<sub>2</sub>-arme printmortel voor de infra ontwikkelen op basis van een CEM III. Hiermee verwachten in 2022 een nieuwe printmortel te kunnen introduceren, met ca. 45% milieuwinst ten opzichte van het huidige CEM I mengsel en ongeveer 10% milieuwinst ten opzichte van het referentie viaduct. Daarnaast wordt in Fase 2 het materiaalgebruik met zo'n 20% geoptimaliseerd. Deze innovaties zorgen in Fase 2 voor een 25% lagere MKI dan het referentieviaduct.

Tegelijkertijd starten we onderzoek naar een alternatief bindmiddel, zoals bijvoorbeeld geopolymeren beton, waarmee we het CEMIII kunnen vervangen. Dit vraagt echter een zorgvuldige afweging tussen de beschikbaarheid van het de grondstoffen en de milieuwinst. Daarnaast zal ook de wet- en regelgeving aangepast moeten worden om cementvrije betonproducten op grote schaal toe te kunnen passen. Deze belangrijke ontwikkeling zal daarom nog meerdere jaren in beslag nemen. Onze doelstelling hierbij is om voor Fase 3 de MKI te verlagen met ca. 35% ten opzichte van Fase 2, wat resulteert in een ruim 40% lagere MKI dan het referentieviaduct.

Tot slot is het mogelijk de printbeton elementen te demonteren en hergebruiken in een volgende levenscyclus. We schatten in dat dit mogelijk is voor minimaal 80% van de elementen en geeft in Fase 2 voor deze elementen zo'n 20% MKI-reductie, wat neerkomt op 16% MKI-reductie bovenop de MKI-reductie die hiervoor voor Fase 2 genoemd is (dus ca. 40% MKI-reductie in Fase 2 ten opzichte van het referentieviaduct).

Al met al helpen al deze stappen het circulaire viaduct stap voor stap haalbaar te maken. De technologie is er, de kwaliteit ook. Nu is het de tijd om met een CO<sub>2</sub>-arm mengsel te werken.

| Type printmortel / ton print  | MKI per ton | MKI in % | Kg CO <sub>2</sub> / ton | CO <sub>2</sub> in % | Abiotische uitputting in Kg Sb / ton (recourses elements + fossil fuel) | Uitputting in % |
|---|-------------|----------|--------------------------|----------------------|---|-----------------|
| Standaard (huidige mengsel op basis van CEM I)                                      | € 41,50     | 100%     | 495,40                   | 100%                 | 2,082436865   | 100%            |
| Mengsel Fase 2, op basis van CEM III (2022), ca. 46% reductie op MKI                | € 19,00     | 46%      | 206,25                   | 42%                  | 1,267757410   | 61%             |
| Mengsel Fase 3, op basis van alternatief bindmiddel (2025), ca. 70% reductie op MKI | € 12,50     | 30%      | 140,00                   | 28%                  | 0,834050928   | 40%             |

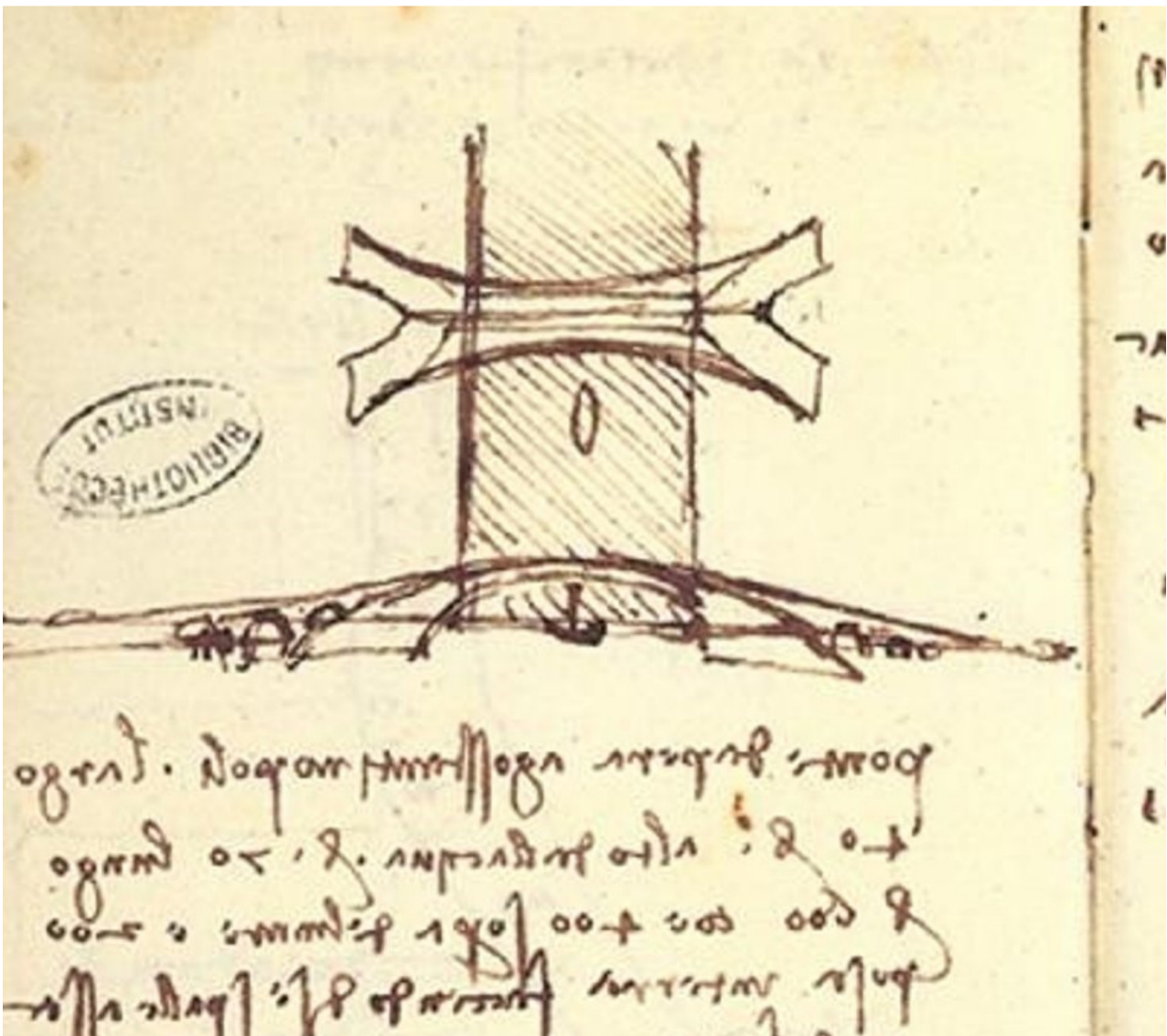
Figuur 11. MKI-berekening is opgenomen in de bijlage.

## 3.2 Haalbaarheid

Onder het kopje technische haalbaarheid volgt een eerste berekening van het geprinte viaduct. Dit geeft inzicht de krachtwerking van de brug en hoe de verschillende onderdelen samenwerken; voorspanning, grond en het geprinte dek. In fase 2a, als we naar een DO toewerken wordt het systeem verder geoptimaliseerd.

### Constructief Concept

Het circulair viaduct is ontworpen met een constructieve gewelfwerking als basis. Gewelfconstructies zijn om hun efficiëntie in het verleden veel toegepast. Toen omdat materiaal nog duur was ten opzichte van arbeid. Bekend zijn de lichtgewicht overspanningen zoals daken en koepels. Maar de techniek werd ook toegepast in zwaarder belaste overspanningen. Voorbeelden daarvan zijn er in de mijn- en tunnelbouw. Leonardo da Vinci maakte al een ontwerp voor een 240 meter lange gewelfbrug over de Gouden Hoorn in Istanbul. Traditioneel worden deze gewelven opgebouwd uit massieve steen. Het eigen gewicht wordt door gewelfwerking op druk afgedragen.

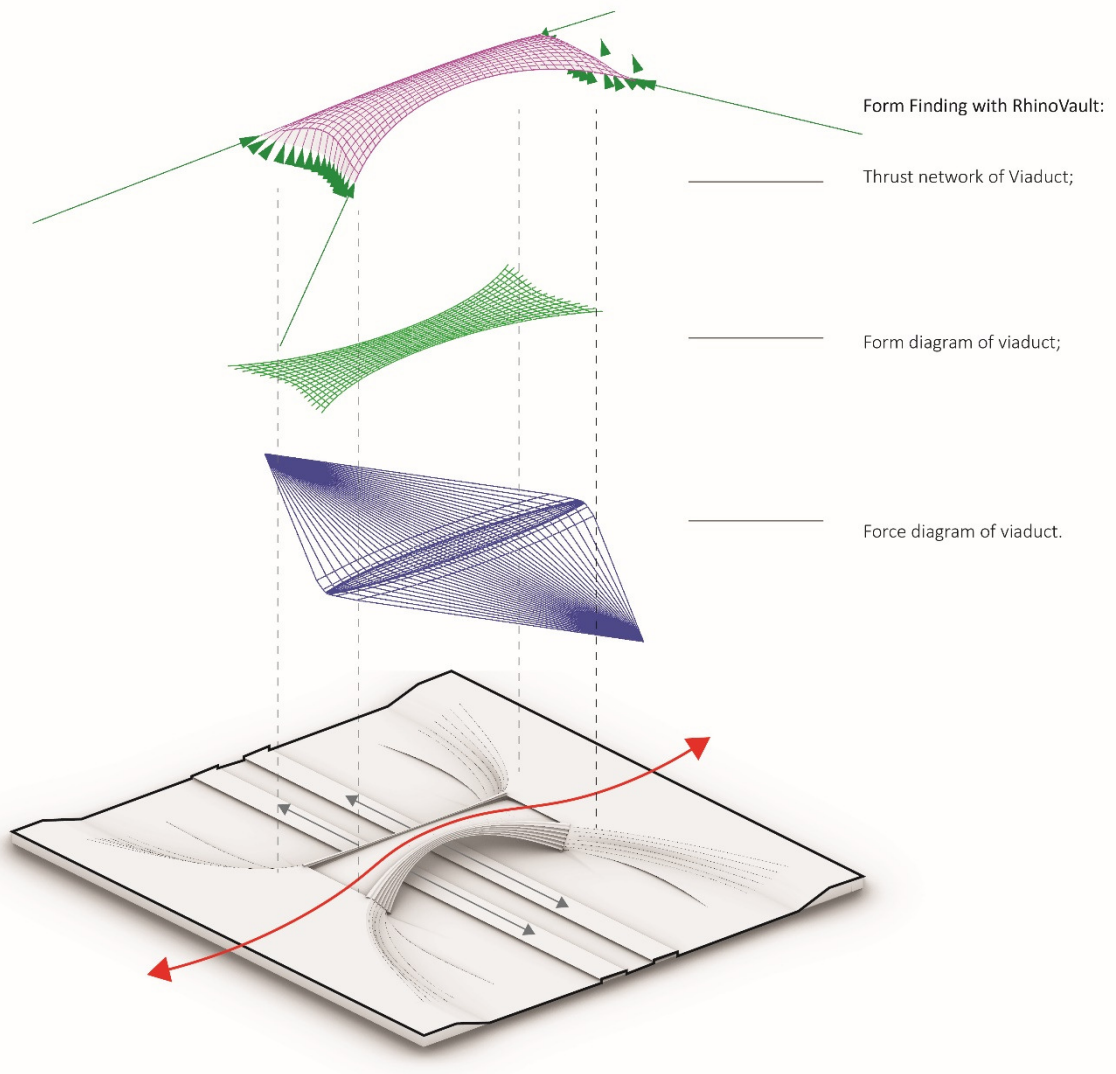


Figuur 12:: Boogbrug met gewelfwerking door Leonardo da Vinci.

Was het in het verleden belangrijk om materiaal te besparen om economische redenen, nu is 'reduce' de een na hoogste trede op de circulariteitsladder. Waar de traditionele gewelven uit massieve stenen bestonden, kunnen we nu met 3DCP holle bouwblokken realiseren.

### Vorm van het gewelf bepalen

In de optimale vorm van het gewelf spelen de belastingen op het gewelf een belangrijke rol. Een methode om de vorm van het gewelf onder deze belastingen te bepalen is de grafostatica. Dit is een grafische methode om iteratief het evenwicht in een gewelf te bepalen. Met software RhinoVault is dit ook gedaan voor het circulair viaduct.

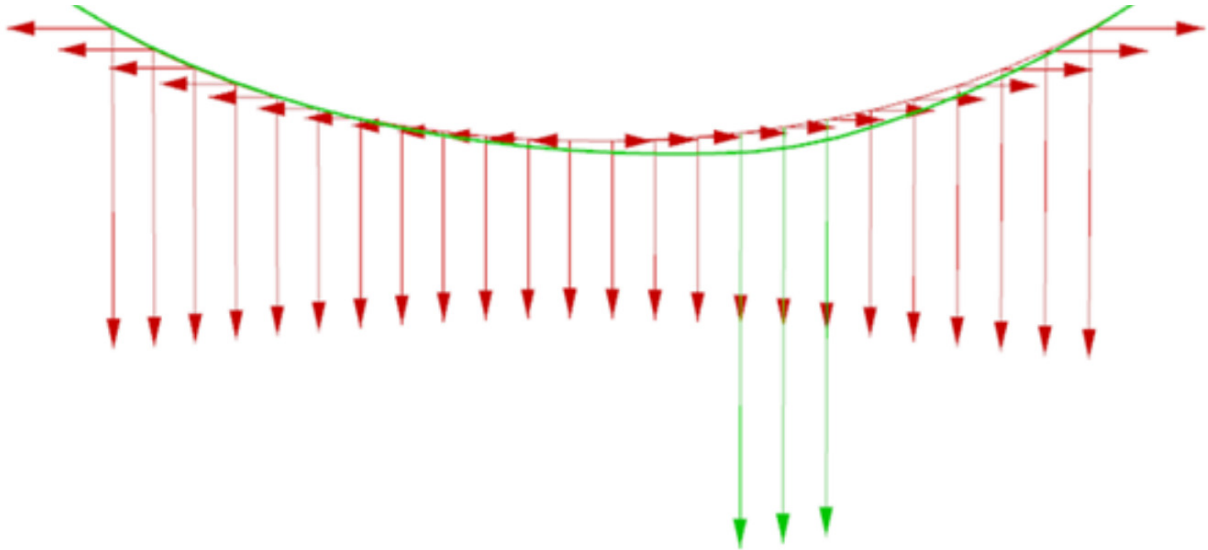


Figuur 13: Form finding met RhinoVault voor het bepalen van gewelfwerking.



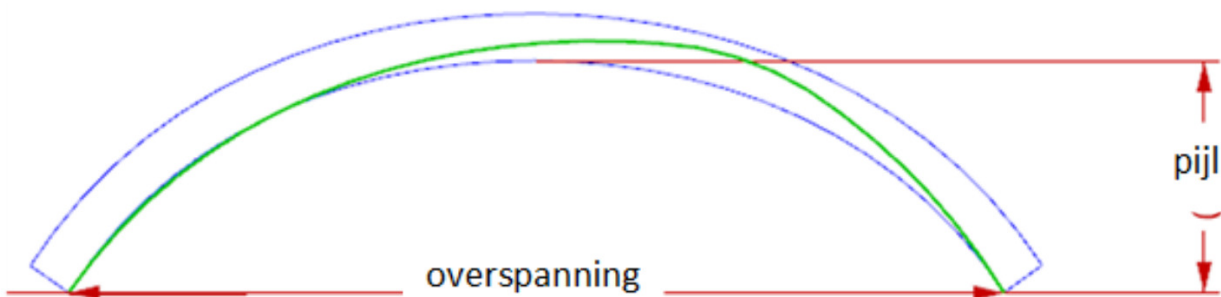
### Balanceren van belasting en vorm

Aan de hand van een tweedimensionaal hanglijnmodel is eenvoudig inzichtelijk te maken hoe de efficiënte vorm van een boog ontstaat. En ook wat de invloed van de belasting daarop is. Stel dat de basis een ketting is die onder invloed van het eigen gewicht doorhangt. Die ketting is met een lijn geschematiseerd waarin gewicht is gehangen op de plaatsen waar de pijlen staan. Een geconcentreerd gewicht (groene pijlen) aan deze ketting is in staat om de ketting uit zijn vorm te trekken. Door gelijkmatig aan de ketting meer gewicht te hangen (rode pijlen) komt de vorm weer deels terug (groene lijn). Draai de vorm die zo ontstaat om en er staat een voor drukkrachten geoptimaliseerde constructie die zeer efficiënt gebruik maakt van het materiaal.



Figuur 14: Hanglijnmodel met de belangrijkste belastingen.

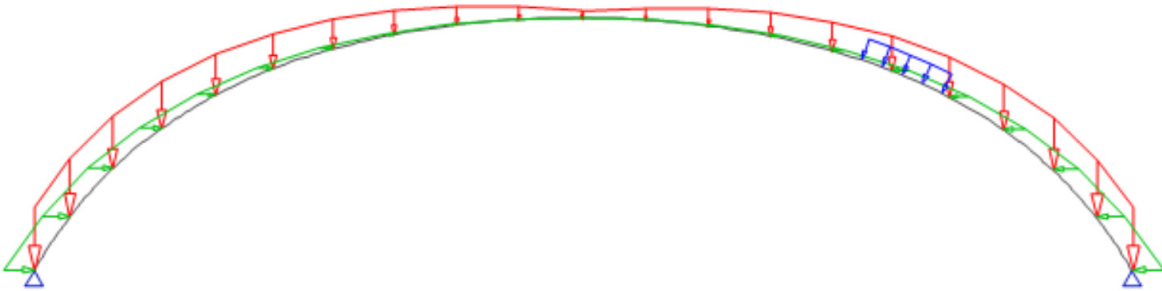
Het geconcentreerde gewicht aan de ketting is in het geval van het viaduct een zware vrachtwagen. Door ervoor te zorgen dat de druklijn (de omgekeerde kettinglijn) van de belastingen (groene lijn) binnen de kern van de doorsnede van de brug blijft (blauw kader), blijft de volledige boog onder druk.



Figuur 15: Omgekeerd is het hanglijnmodel een optimale boog.

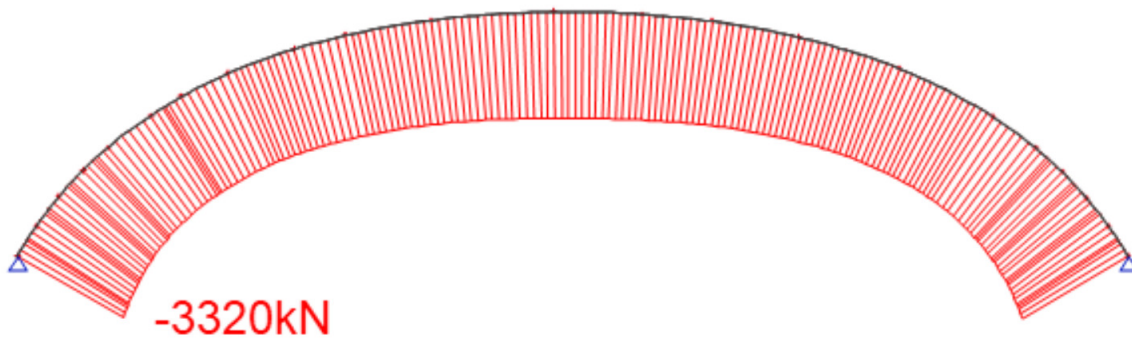
### Berekening van de balans

Zoals uit het hanglijnmodel duidelijk gemaakt is, helpt het extra gewicht om de drukboog binnen de doorsnede te houden. Dit extra gewicht is de gronddekking met alzijdige druk. Aan de hand van een berekening van een 1 meter brede boog wordt duidelijk hoe belasting en vorm in balans zijn. Door de boogvorm uit het hanglijnmodel in een eindige elementenberekening te combineren met de belastingen uit gronddekking (trapeziumvormig verdeeld), verkeer (gelijkmatig verdeeld) en aslasten (geconcentreerd). Daarbij is de geconcentreerde belasting gespreid met als uitgangspunt 1 meter gronddekking.



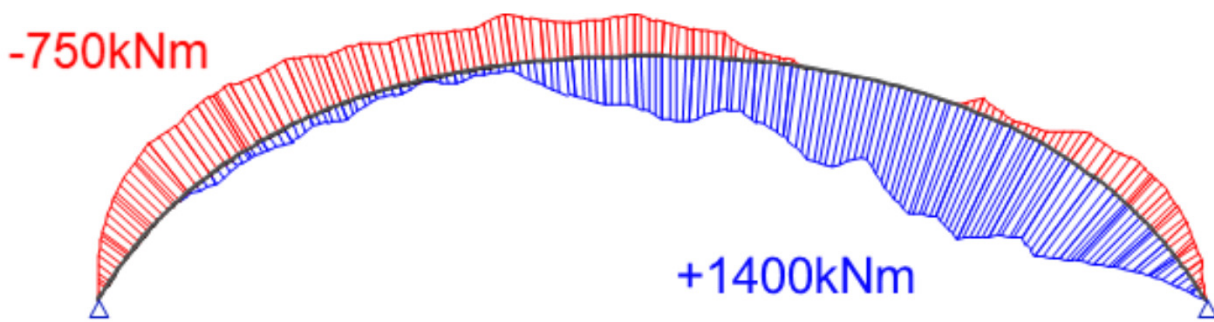
Figuur 16: Belastingen op de boog.

In de boog ontstaat (inclusief belastingfactoren, exclusief de geconcentreerde belasting) een normaalkracht van 3320kN. In een doorsnede van 0,5m<sup>2</sup> beton geeft dat een drukspanning van 6,6N/mm<sup>2</sup>. Momenten zijn nihil vanwege de op deze krachten geoptimaliseerde boogvorm.



Figuur 17: Normaalkracht verdeeld over de boog.

Door de geconcentreerde belasting op verschillende posities op het rechterdeel van de boog te plaatsen wordt het moment ten gevolge van deze belasting bepaald. Bij een maximaal moment van 1400kNm en een weerstandsmoment van 0,21m<sup>3</sup> is de maximale trek- en drukspanning ten gevolge van dit moment in de doorsnede 6,6N/mm<sup>2</sup>.



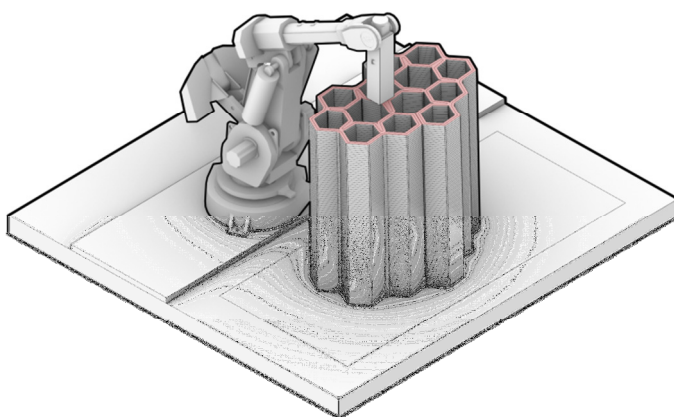
Figuur 18: Omhullende momentenlijn ten gevolge van geconcentreerde belastingen.

De trekspanning wordt volledig gecompenseerd door de drukspanning. De totale drukspanning is  $13,2\text{N/mm}^2$ . De capaciteit van het printbeton is  $45\text{N/mm}^2$ . De drukspanning is daarom ruim opneembaar. De overcapaciteit in het printbeton kan benut worden om de drukspanning in het beton met naspanning te vergroten en op die manier het benodigde weerstandsmoment (en daarmee de benodigde doorsnedehoogte) te verkleinen, om het materiaalgebruik nog verder terug te dringen of om wijziging in de krachtswerking door kruipvervorming van de landhoofden op te nemen. In fase 2a wordt de doorsnede verder geoptimaliseerd.

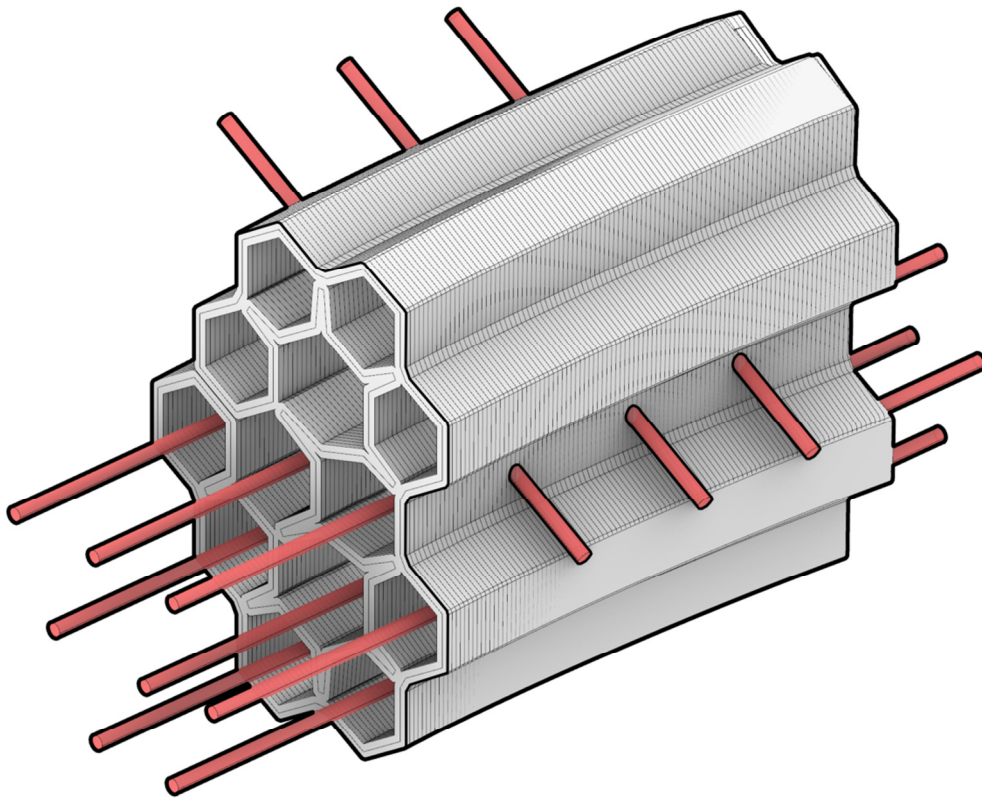
### Bouwblokken koppelen

Om de blokken constructief te koppelen worden deze tegen elkaar gespannen. De naspanning heeft met name een functie in het opbouwen van het viaduct. De koppelingen zelf worden uitgevoerd met rubber, staal of stelmortel in de voeg, net zoals ruggenwervels zijn voorzien van kraakbeen. Met het op deze manieren koppelen van elementen hebben we eerder ervaring opgedaan maar de beste oplossing voor dit project wordt in de volgende fase vastgesteld.

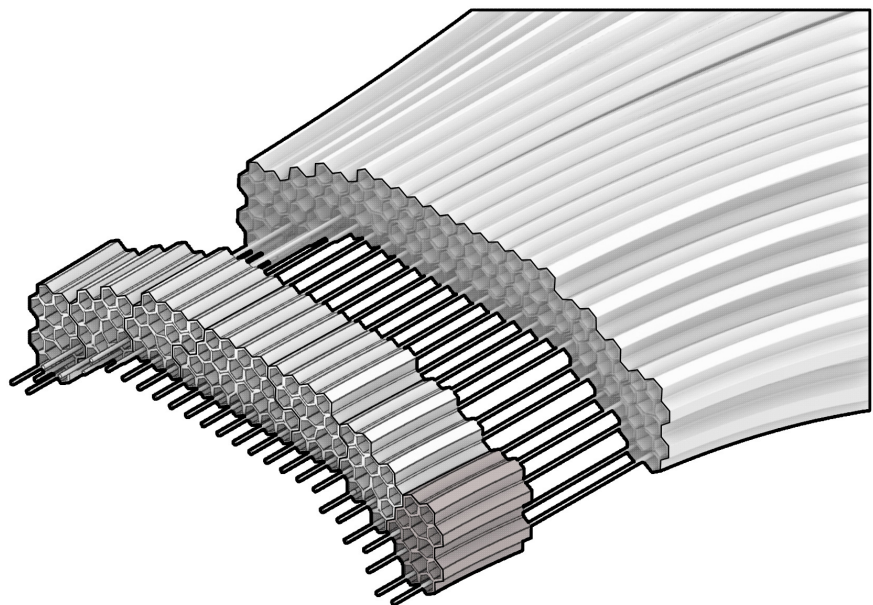
De bouwblokken zelf zijn hol maar wel voorzien van een opvulling met bijvoorbeeld een honingraatstructuur. Deze opvulling koppelt de buiten- en binnenschil en positioneert bijvoorbeeld ook de naspanning zo dat deze optimaal in de doorsnede ligt.



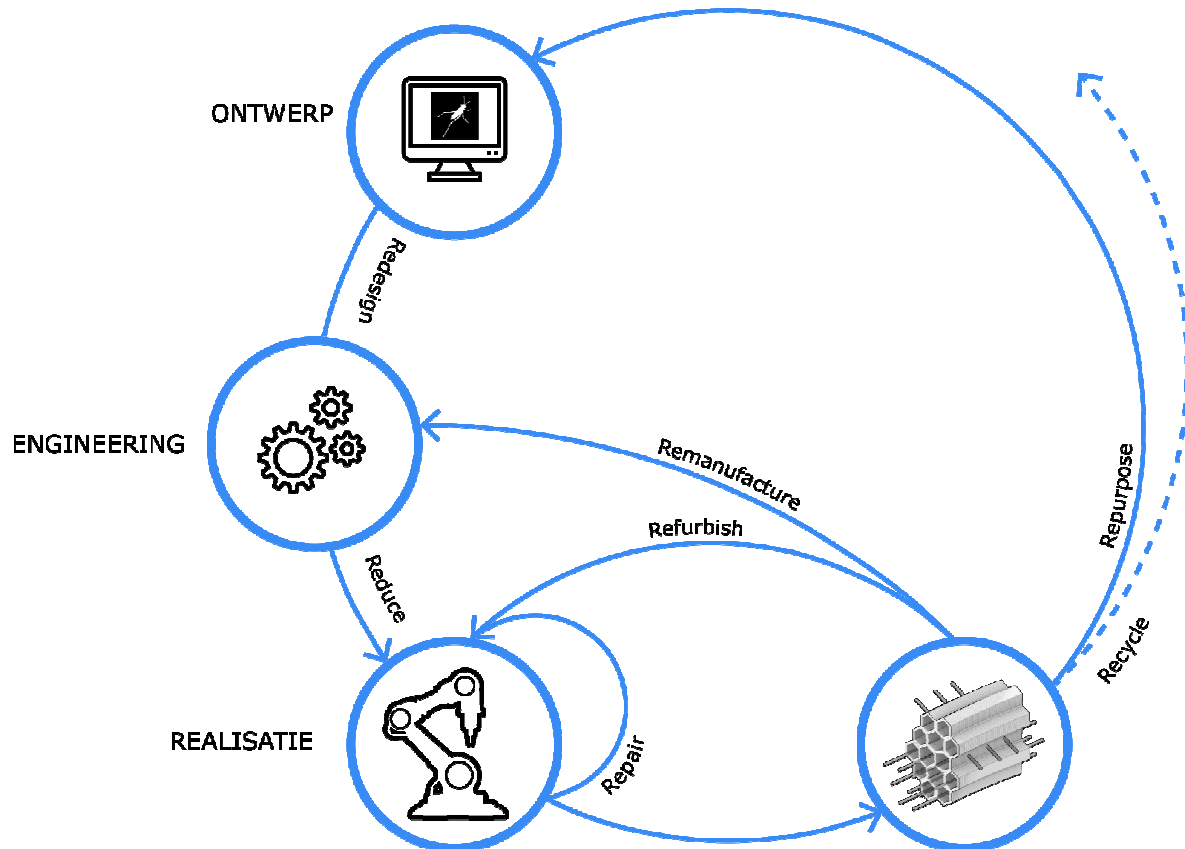
Figuur 19: de bouwblokken worden 3d-geprint in beton als prefabelementen.



*Figuur 20: De bouwblokken hebben een honingraat structuur die tevens de voorspankabels geleiden.*



*Figuur 21: verschillende bouwblokken worden aan elkaar geregen zodat er een boogconstructie ontstaat.*



Figuur 22: Reduce, Redesign, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose, Recycle.

### Spatkracht in de landhoofden

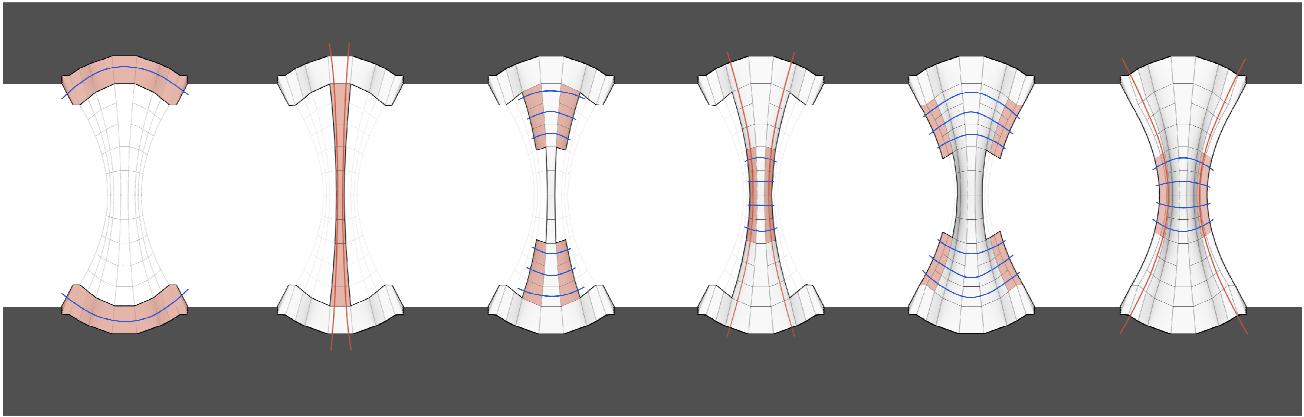
Een boogconstructie levert spatkrachten op de funderingen. Door de brede constructie wordt het gewicht van het volledige talud gemobiliseerd. Dit gewicht is onvoldoende. Bovendien kruipt grond en zijn grote vervormingen in het landhoofd onwenselijk voor de stabiliteit van de gewelfconstructie van het viaduct. De volgende vier systemen zijn eventueel in combinatie een goede aanvulling op het opnemen van de spatkracht met gronddruk:

1. Steunbeer die de boog op een hoger niveau steunt en zo meer grond mobiliseert en de spatkracht omzet naar een moment in de fundering;
2. Trekband onder de weg die beide landhoofden koppelt en zo in evenwicht brengt (eventueel met een gestuurde boring aan te brengen onder een bestaande weg);
3. Schoorpalen die maximaal 1:1 staan en de horizontaalkracht afdragen naar de relatief kruipvrije paalvoet;
4. Trekankers die de horizontaalkracht afdragen naar een grondanker.

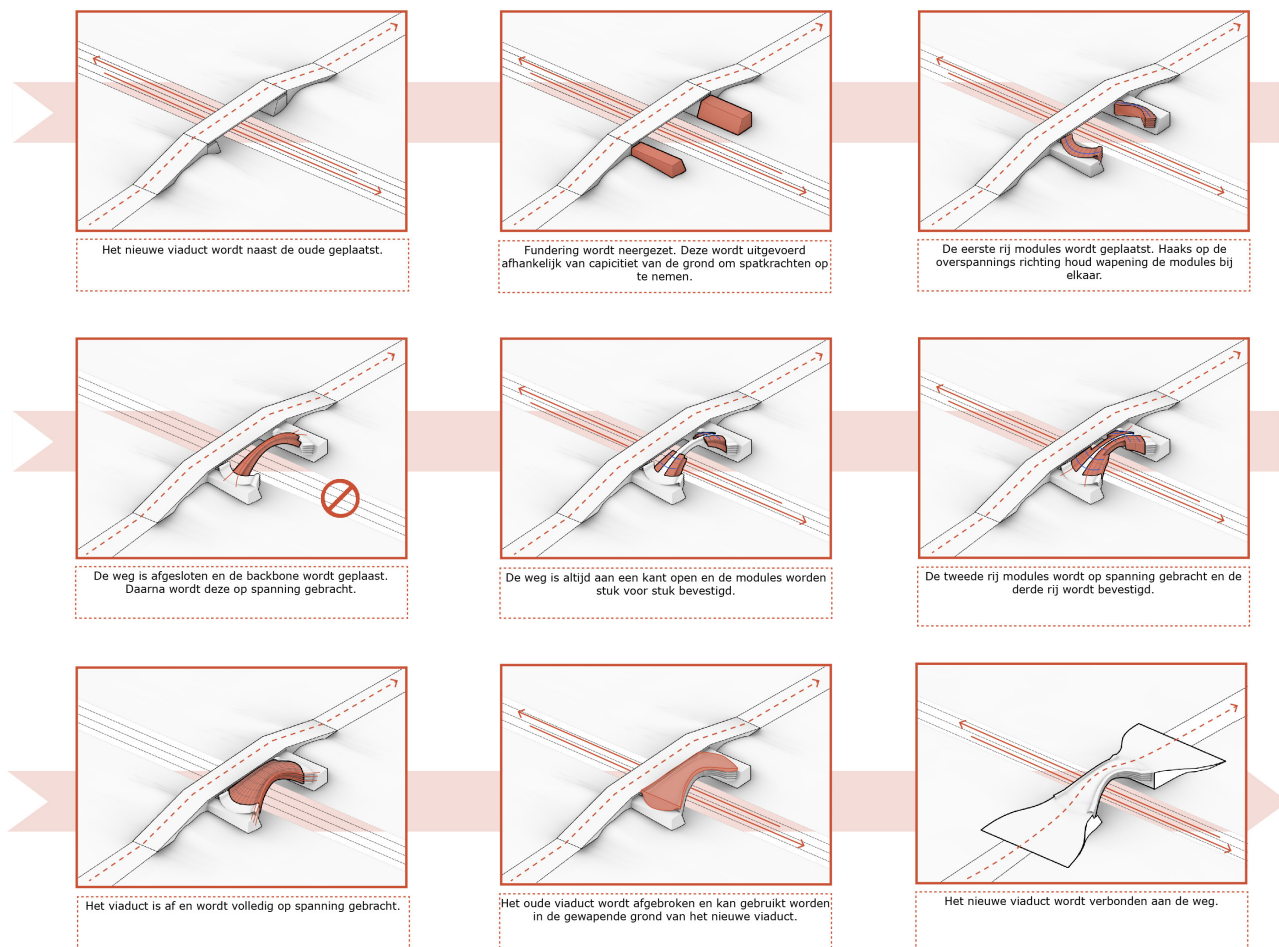
Toepassing van deze systemen en de mate waarin, hangt sterk af van de locatie. Zo is een trekband het meest materiaalefficiënt maar dit vereist wel verdiepte funderingen en kruising van een weg. Een hoge grondwaterstand of de aanwezigheid van kabels en leidingen kunnen dit principe in de weg zitten. Per locatie is daarom een afweging nodig.

## Bouwbaarheid

De landhoofden kunnen naast de snelweg in verkeer worden voorbereid. Daar kunnen ook in een liggende boog de eerst strook elementen aan elkaar gekoppeld en gefixeerd worden met naspanning. Deze boog wordt als ruggenwervel (de zgn. "back-bone") van het viaduct in één keer ingehesen tijdens een nacht- of weekendafsluiting. Daarna kunnen de overige bouwcomponenten als ribben aan deze ruggenwervel uitgebouwd worden met minimale hinder voor het verkeer: hooguit nachtelijke afsluitingen.



Figuur 23: principe montage volgorde van het viaduct.



Figuur 24: principe montage volgorde van het viaduct.

## Regelgeving

Betonprinten is nog zo nieuw dat er nog geen constructieve normen zijn voor de toepassing van het materiaal. De Eurocode biedt de mogelijkheid om constructies met onbekende materialen te realiseren door het gedrag van materiaal en constructie te testen. Dit door 'proeven ondersteund ontwerpen' wordt bij alle constructieve toepassingen van printbeton in de afgelopen jaren met succes toegepast. Intussen wordt er ook gewerkt aan normalisering van de toepassing van printbeton.

Het ontwerp is getoetst aan de richtlijnen van Rijkswaterstaat, de uitgangspunten in de ROK. Daaruit wordt geconcludeerd dat de ROK op diverse punten niet toereikend is voor de toepassing van printbeton in een gewelfconstructie toegepast voor een viaduct. De zeven belangrijkste aandachtspunten die hieruit volgen moeten ten minste in de volgende fase verder onderzocht of afgestemd worden met Rijkswaterstaat.

1. Printbeton wordt door de ROK niet gezien als beton. Dat heeft gevolgen voor het toetsen van de constructie aan regelgeving op het gebied van bijvoorbeeld duurzaamheid en toelaatbare spanningen.
2. Inwendige voorspanning zonder aanhechting in langsrichting is niet toegestaan.
3. Het aantonen van bezwijkstabiliteit voor een boog- en gewelfconstructies is niet voorzien.
4. Toepassen van niet lineaire eindige-elementen-analyse is niet toegestaan.
5. Welke spanning is toelaatbaar ten aanzien van vermoeiing?
6. Er mag geen interactie met grond in rekening gebracht worden ten aanzien van brand.
7. Er zijn geen aanvullende eisen ten aanzien van brand. Mogelijk geldt voor holle betonconstructies dat dit te gunstig is.

## Vervolg

In het haalbaarheidsonderzoek is de basis gelegd voor de technische haalbaarheid. In fase 2a werken we toe naar een DO. Belangrijke aandachtspunten zijn dan;

- Optimaliseren geprint dek, voorspanning en grond
- Krachtsinleiding en afdracht dwarskracht
- Werking van de boog in relatie tot de veerstijfheid van de fundering
- Invloed van groene printmengsel op de constructieve werking van het systeem

### 3.3 Economisch perspectief

#### **Circulair businessmodel Honeycomb:**

In het aangeleverde document Circular Infrastructure Businessmodels worden 4 circulaire businessmodellen beschreven. Na bestudering van die 4 modellen hebben wij geconcludeerd dat we mede door de toegevoegde waarde van Additive Manufacturing (AM) een vijfde businessmodel hieraan moeten toevoegen. Hiertoe worden wij ook uitgenodigd in dit document. Mede door AM ontstaat er een nieuwe marktsituatie waar we geleidelijk naartoe zullen bewegen.

In de nieuwe marktsituatie wijzigen de rollen van de ketenpartners, waarbij de rol van de producerende opdrachtnemer gaat wijzigen naar een dienstverlenende partij. Onderstaand treft u de beschrijving aan van ons vijfde circulaire businessmodel: 'Transitie naar een dienstverlenende markt'.

#### **Transitie naar een dienstverlenende markt**

##### **Beschrijving van het businessmodel**

Anno nu wordt een geprint viaduct geproduceerd met additive manufacturing. Daarbij zetten we in op onze verantwoordelijkheid om het viaduct met zo min mogelijk materiaal voor de eerste levensfase te realiseren. We besparen hiermee tot 60% grondstoffen. Bij einde levensduur wordt het object aanbesteed voor de tweede levensfase met de opdracht het beschikbare materiaal zo hoogwaardig mogelijk te hergebruiken. Hiermee zetten we de transitie in naar:

- Circulair ontwerp en productie anno nu, met maximale reductie van grondstoffen en CO2
- Een dienstverlenende markt in plaats van een producerende markt.

Bij toekomstige vervanging behoort de verplichting het object zo hoogwaardig mogelijk te hergebruiken. Daarbij is de klant (RWS) in de leverancier van componenten en/of grondstoffen en verlenen de marktpartijen de dienst om hiervan weer een viaduct te maken.

##### **Het businessmodel meer in detail**

In dit businessmodel besteedt de klant een infrastructuurproject aan met aannemer A. Leverancier B produceert – d.m.v. additive manufacturing - de circulaire bouwstenen en levert aan aannemer A. Aannemer A gebruikt de bouwstenen om het circulaire object te construeren. Het object wordt verkocht aan de klant en levert het object op inclusief een objectspecifieke 'Handleiding voor hergebruik'.

##### **De 1<sup>e</sup> levensfase van het object**

In deze eerste transitiefase zetten we in op onze verantwoordelijkheid die we nu moeten en kunnen nemen. Dat betreft het reduceren van grondstoffen en CO2 uitstoot bij de totstandkoming van het nieuwe object en het mogelijk maken van maximaal hergebruik in de toekomst.

Door AM is het gebruik van grondstoffen en de inzet en productie van CO2 beperkt tot hetgeen wat op dit moment maximaal haalbaar is. Bij AM is, in tegenstelling tot traditionele productiemethoden, geen malmateriaal nodig. In de toekomst zullen de ontwikkelingen dusdanig zijn dat die reducties alleen nog groter zijn waarbij de activator voor het beton (lees: cement) vervangen zal zijn door een circulair product of product met een lage CO2 impact.

Het ontwerp is zo opgezet dat hergebruik van de bouwstenen op een zo hoogwaardig mogelijke manier realiseerbaar is. De klant krijgt op die manier een remontabel object in eigendom, dat na 50 tot 100 jaar vervangen, uitgebreid of herplaatst kan worden. In de 'handleiding voor hergebruik' staat voor de volgende generaties alles vermeld: de specificaties, de verschillende manieren waarop het object kan worden gedemonteerd en hoe de bouwstenen kunnen worden hergebruikt volgens de geldende inzichten en normen van dat moment. Kortom: van hergebruik van samengestelde componenten tot de receptuur van een gerecycled printmengsel. Feitelijk wordt het materialen paspoort uitgebreid met de 'handleiding voor hergebruik'.

De klant bezit hiermee de waarde van de (circulaire) componenten en/of de grondstoffen. Na einde eerste levensduur kan de klant opnieuw een infrastructuurproject aanbesteden, dat gebouwd kan worden met de vrijgekomen bouwstenen of grondstoffen.



### De volgende levensfasen van het object

Aan het einde van de eerste gebruiksduur (50-100 jaar) besteedt de klant de vervanging, upgradering of uitbreiding van het object opnieuw aan, waarbij alle geschikte marktpartijen kunnen inschrijven. In de aanbesteding voor de tweede of derde levensfase verplicht de klant de marktpartijen om de beschikbare componenten en grondstoffen te hergebruiken. Hiermee kunnen de opvolgende generaties zelf afwegen wat volgens de dan geldende eisen en wensen de meest circulaire én economische oplossing is. In principe leidt het meest hoogwaardige hergebruik (bijvoorbeeld hergebruik van samen te stellen vrijkomende componenten) tot de hoogste kostenbesparing en automatisch tot een concurrentievoordeel (ten opzichte van bijvoorbeeld herproduceren met de beschikbare grondstoffen).

### De dienstverlenende markt

Voor de tweede en verdere levensfasen blijft de klant eigenaar van de circulaire componenten en/of grondstoffen. Hierdoor verandert het verdienmodel van de producenten en partners. De klant betaalt alleen voor de dienstverlening die nodig is om het beschikbare materiaal te hergebruiken. Omdat er geen eigendomsoverdracht plaatsvindt, wordt er over deze materialen zelf geen btw afgedragen of marge verrekend. Zeker met de toekomstige schaarste van grondstoffen, bespaart dat aanzienlijke kosten voor de klant.

### Afweging

Voordelen van dit Businessmodel:

- De klant redeneert vanuit haar bezit en stuurt maximaal op hoogwaardige herbruikbaarheid ervan.
- De klant bespaart in de toekomst kosten door haar grondstofpositie; zij verplicht zichzelf het materiaal bewust in te kopen op herbruikwaarde.
- Toekomstige generaties worden niet geconfronteerd met een 'dwangmatig' bouwblok, wat mogelijk slecht in de dan geldende normen past. Zij kunnen met de 'handleiding voor hergebruik' zelf de meest hoogwaardig oplossing voor hergebruik bedenken, passend bij de dan geldende normen, wensen en eisen.
- Hoogwaardig hergebruik wordt beloond door een betere concurrentiepositie.
- Businessmodel biedt maximale ruimte aan toekomstige (technologische) ontwikkelingen en optimalisaties.

Voordelen van dit businessmodel ten opzichte van de aangereikte businessmodellen:

- Het principe van dit businessmodel is juridisch het meest eenvoudig ten opzichte van businessmodel 1, 2, 3 en 4.
- De klant kan eenvoudig een circulaire uitvraag doen in de markt en is niet gebonden aan één of enkele leveranciers (marktwerking), ten opzichte van businessmodel 2, 3 en 4
- De klant blijft niet met onbruikbare bouwblokken zitten ten opzichte van businessmodel 1

Als je dit businessmodel combineert met de opkomst van de AM technologie, worden de voordelen van dit businessmodel versterkt:

- Met AM kan met minimaal energie- en materiaalgebruik een nieuw of vervangend component worden geproduceerd en teruggeplaatst, van kapotte, afgekeurde of onbruikbare componenten.
- AM maakt het mogelijk een bestaand infrastructuurproject met extra componenten te verlengen, te verbreden en esthetisch of constructief te upgraden.
- Gestandaardiseerde en maatwerkcomponenten kunnen met dezelfde eenvoud geproduceerd worden en versterken elkaar in efficiëntie en herbruikbaarheid.
- Omdat er eenvoudig standaard en maatwerkcomponenten vanuit dezelfde productiemethode gemaakt kunnen worden, is het over-dimensionering van standaard componenten niet nodig.

### Aanpak en strategie om plek in de markt te bezorgen

Bij de start van de ontwikkeling in 2015 hebben wij bewust gekozen voor licht constructieve toepassingen, zoals gevelementen. Dit was de entree markt voor 3D betonprinten. Nu, ruim 5 jaar later, willen we 3D betonprinten stap voor stap geschikt maken voor toepassing in zwaar belaste constructies. Deze stap is niet te maken zonder deze SBIR of vergelijkbare kansen. Dat heeft in belangrijke mate te maken met het groeiend aantal partners in de bouwketen, die producten en processen moeten innoveren om additive manufactured producten beter toepasbaar te maken.

Wij hebben daarom de overtuiging én ervaring dat - naast de ontwikkeling van de printtechnologie - het onderwerp te groot is om individueel door partijen te ontwikkelen. Door de verregaande digitalisering en de iteratieve ontwerpmethodes is de afhankelijkheid van partijen onderling simpelweg te groot. De bouwketen moet haar processen en werkwijze aanpassen om de kwaliteit van deze digitale en materiaalbesparende technologie maximaal te benutten.

Samenwerking tussen de koplopers is daarom de beste manier om deze technologie en het veranderende proces een volwassen status in de markt te bezorgen. In ieder project lopen we tegen dezelfde vraagstukken aan, die door kennisdeling versneld opgelost kunnen worden. Denk hierbij aan detaillering van raakvlakken, aan onbekendheid met de verwerking bij aannemers, zoals hijsen, monteren en onderhouden, het iteratieve samenwerkingsmodel blokkades in de vergunningsverlening

Door schaalvergroting en afspraken over gestandaardiseerde details, wordt het interessant voor de aanpalende bedrijven te investeren in haar dienstverlening of producten. Projecten zoals deze SBIR geven deze bedrijven vertrouwen en een lage instapmogelijkheid, hetgeen nu de volgende cruciale stap is om Additive Manufacturing in de bouw te laten slagen.

### Kwaliteit verdienenmodel

De toepassing van 3DCP stijgt de komende jaren explosief. Ze is zo beloftevol als het gaat om duurzaam en betaalbaar bouwen, dat steeds meer bedrijven en universiteiten zich oriënteren op deze technologie.

Volgens de rapportage Grand View Research Inc. groeit de markt van het betonprinten wereldwijd van 0,3 miljard in 2021 tot 40,6 miljard in 2027! Hiervan wordt 33% toegekend aan de inframarkt. Daarmee wordt de markt een groei van 106% per jaar toegedicht.

De aandacht voor 3DCP groeit explosief op universiteiten. Op de laatste editie van Rilem 'digital concrete' werden bijna 500 wetenschappelijk papers over 3D printen ingediend. Nederland heeft in deze een prominente en leidende rol.

AM bespaart 40-60% materiaal en dus, naast het circulaire voordeel, ook kosten. Wij zijn ons al vanaf minuut één bewust dat als je het ontwerp- en engineeringsproces volgens de huidige standaarden inricht, dit de grootste bedreiging is voor een succesvol verdienenmodel. Daarom hebben wij een digitale supply-chain ontwikkeld en toegepast op project Baskeweg in Den Helder. Hier werken architect, constructeur en producent vanuit één vormmodel. Van ontwerp tot validatie en productie. (File-to-factory). We hebben software ontwikkeld waarmee deze stappen elkaar logisch en iteratief opvolgen, zonder dat er dubbel werk ontstaat. Dit is cruciaal bij complexe meervoudig gekromde 3D elementen. Hierdoor zijn we in staat om de engineeringskosten per product laag te houden.

Het resultaat van deze ontwikkeling is dat we nu al betaalbare projecten kunnen realiseren tegen een eerlijke marge voor de deelnemende partners. Uiteraard wordt er momenteel nog veel meer geld geïnvesteerd, dan er opbrengsten zijn. Schaalvergroting in de markt en doorontwikkeling van de technologie zal de kosten verder verlagen, waarmee de technologie binnen 5-10 jaar zal concurreren met traditionele technieken.

### Zijn wij de juiste partij om op te schalen?

Zoals in de twee vorige paragrafen vermeld, werken de partijen meerjarig samen aan deze ontwikkeling. We hebben 3D-betonprinten voor licht constructieve toepassingen in vijf jaar van TRL1 tot TRL 8 gebracht. Met als resultaat een volledig digitale supply chain, waarmee we 1.400 bouwelementen in de grootste productielocatie van Europa printen.

Nu willen we met dezelfde kerngroep, aangevuld met K\_Dekker Bouw & Infra, deze ontwikkeling ook doorlopen voor de constructief zwaarbelaste constructies. De opgedane kennis en productiecapaciteit is beschikbaar en ervaring in de infrastructurele markt is royaal aanwezig. De lijnen met TU Delft en TU Eindhoven zijn kort.

Door toewijding aan het onderwerp en de complementaire businessmodellen van de partners, verloopt de samenwerking zeer soepel, zonder dat hier uitvoerige contracten aan ten grondslag liggen. Dit onderstreept de intrinsieke motivatie van de partijen. Het zijn stuk voor stuk autoriteiten op hun vakgebied en kennis wordt maximaal gedeeld.

Voor de beschikbare stoel (uitvoering en realisatie), die wij bij aanvang van fase 1 hadden, hebben wij een keuze gemaakt uit vijf aansprekende aannemers, die stuk voor stuk zouden passen. We hebben voor meest complementaire partij gekozen; K\_ Dekker Bouw & infra.

Daarnaast zijn ook Van Hattum Blankevoort, Van Spijker, Hegeman en Schagen bovengemiddeld geïnteresseerd. Wij waren blij verrast door de kwaliteit en enthousiasme die alle partijen voor het initiatief tonen. Wij blijven onze kennis delen met hen, zodat zij ook een geprint viaduct te kunnen realiseren.

### Willen klanten voor het product betalen

De industrialisatie in de bouw heeft de laatste decennia bijgedragen aan de betaalbaarheid, maar heeft de architectuur verarmd. Met 3D printtechnieken zien wij de kans om die vormvrijheid weer betaalbaar te maken.

De besparing van arbeid en de efficiëntie van de technologie, wordt een sterke concurrentiepositie toegedicht. Waar nu de techniek vooral gekozen wordt vanwege het innovatieve karakter, zal dit binnen enkele jaren de prijs en het tekort aan handen in de bouw zijn de belangrijkste koopredenen zijn.

Meerdere woningcorporaties (Eindhoven, Ede, Den Helder) zien de toegevoegde waarde van een aantrekkelijke en herkenbare architectuur tegen een betaalbare prijs. Zo laat Woningstichting Den Helder twee appartementencomplexen volledig upgraden met 3D geprinte elementen. Dit is een goedkopere én een meer circulaire keuze dan het alternatief slopen en nieuwbouw.

Wij willen met dezelfde uitgangspunten in fase 2 aantonen dat we met een 3D geprint brugdek, de Nederlandse viaducten niet alleen circulair, maar vooral mooier en betaalbaar kan maken.

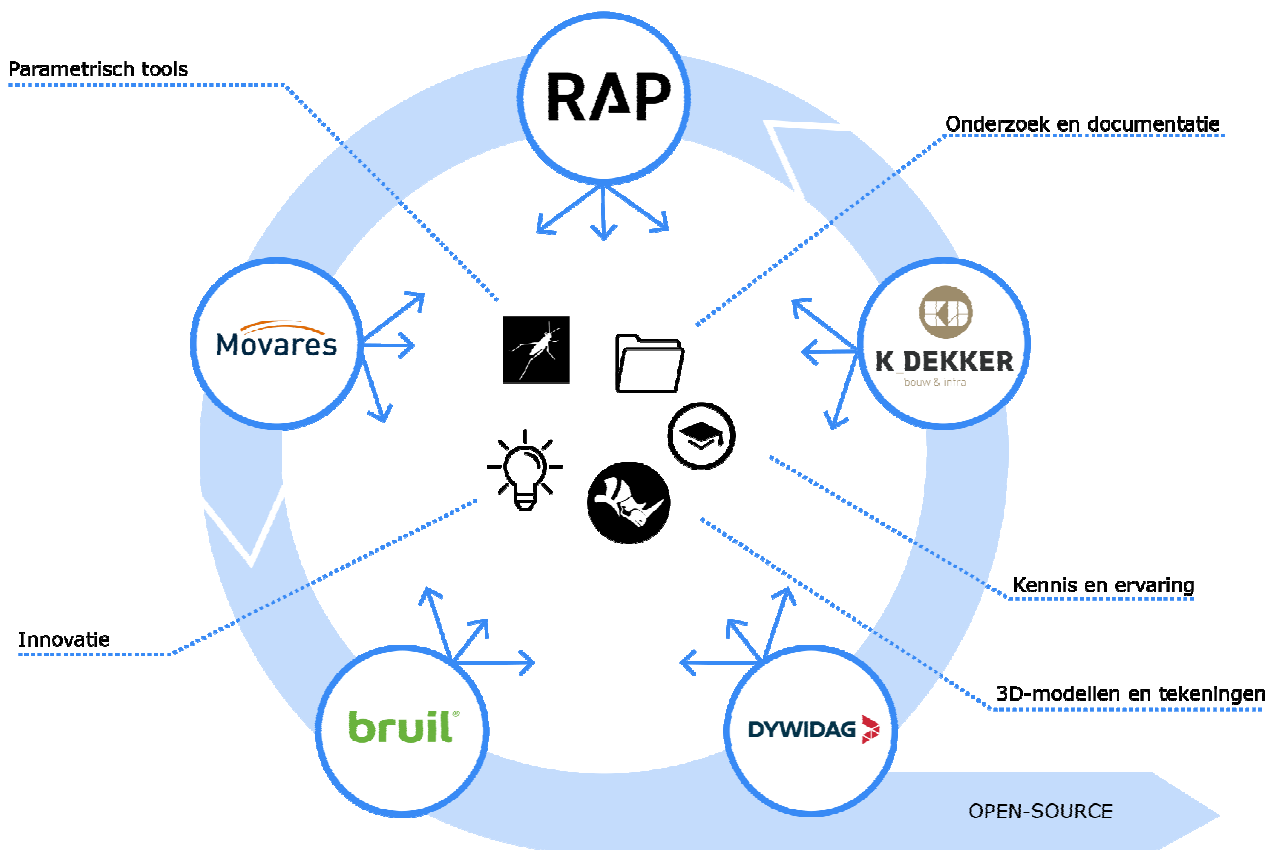
## 3.4 Intellectueel eigendom en gebruiksrecht

### Gebruiksrecht 'open source model en open licentie'

#### Inleiding

De basis van ons voorstel voor gebruiksrecht is dat we zo open mogelijk willen opereren om met Additive manufacturing de transitie naar circulair bouwen te kunnen versnellen. De impact van AM is namelijk significant op de REDUCE; tot 60% materiaalbesparing is haalbaar. Om deze kans op reducering van grondstofgebruik maximaal te benutten, zal er een groeispromg gemaakt moeten worden van AM in de bouwketen.

Wij vinden dat Rijkswaterstaat circulair en in concurrentie moet kunnen aanbesteden. Om dit te bespoedigen willen wij de ontwikkeling van het geprinte viaduct in een open source aanbieden, zodat de ontwikkeling versneld gaat plaatsvinden en marktpartijen elkaar verder gaan uitdagen. Vanuit economisch perspectief zullen de investeringen voor marktpartijen 5x lager zijn en de ontwikkeling zal 2x sneller gaan. De Nederlandse weg- en waterbouw kan hiermee een leidende positie in de wereld innemen als het gaat om materiaalarm ontwerpen en bouwen.



Figuur 25: principe model open-source.

#### Open source model en open licentie samengevat

Onze bouwblokken zijn vrij van gebruiks- of modelrecht; dat betekent geen patent, geen octrooi, geen licentie etc. Wij bieden onze bouwblokken als open source aan waarbij de eigenschappen en circulariteit in de 'Handleiding tot hergebruik' worden vastgelegd.

Kennis wordt wederkerig gedeeld in usergroups. Er is geen deurseleid, maar wel een onderlinge verplichting om opgedane kennis te delen. Hierdoor is het mogelijk de transitie naar circulair werken te versnellen en wordt dubbel werk voorkomen.

## SMART uitwerking

### Specifiek

- Geen modelrecht op de bouwblokken, modellen en details zijn beschikbaar in een bibliotheek
- Geen gebruiksrecht op het bouwsysteem, vrij toepasbaar
- Het Format 'Handleiding tot herbruik' is vrij beschikbaar
- De kennis die wordt gedeeld middels usergroups betreft de specificaties, eisen, vormgevingsaspecten waaraan de bouwblokken moeten voldoen teneinde een veilige constructie te kunnen garanderen en hergebruikt te stimuleren.
- Hergebruik van de bouwcomponenten is niet exclusief voor de ketenpartners van dit project.

### Meetbaar

- Binnen een halfjaar na fase 2b wordt er een rapport opgesteld van de gehanteerde bouwmethodiek, constructieve berekeningen en uitgangswaarden. Hierin worden de kernkwaliteiten en verbeterpunten beschreven. Dit rapport is openbaar na één jaar.
- Consortium richt de usergroup op
- Bereidheid tot kennisdeling van deze uitkomsten en resultaten in minimaal 2 seminars en bijeenkomsten in samenwerking met RWS i

### Realistisch

- Producenten, ontwerpers en constructeurs delen de eindresultaten en worden gestimuleerd om bronbestanden of informatie over productiemethodieken of toegepaste gereedschappen beschikbaar te stellen. Maar zijn dit geenszins verplicht.
- Productieprocessen (zowel in de realisatie als engineering) blijven eigendom van de ontwikkelende partijen en maken geen onderdeel uit van de open source. Dit staan echter de versnelling voor de transitie naar circulair werken niet in de weg. Vergelijking in dit verband kan worden getrokken met de productie van ZOAB.
- Aansprakelijkheid op gebruik van gedeelde informatie zal juridisch getoetst moeten worden

### Tijdgebonden

- Om de initieel investerende partijen de mogelijkheid te bieden de investering terug te verdienen wordt hen een klein tijdvoordeel geboden.
  - Ring 1: Het uitvoerend consortium en RWS; Tot en met afronding einde fase 2.
  - Ring 2: minimaal 4 extra aannemers en betrokken leveranciers: Tot één jaar na afronding fase 2.
  - Ring 3: Alle marktpartijen: Vanaf één jaar na afronding fase 2b.
- Hiermee heeft RWS dus één jaar na afronding van fase 2 direct de mogelijkheid om circulair geprint viaduct aan te besteden onder maximaal 5 aannemers. Daarna kan iedere aannemer aanbesteden met de beschikbaar gestelde kennis.
- Marktpartijen zijn verplicht zijn de opgedane (praktijk)kennis, verbeteringen en aanpassingen aan het concept binnen 0,5 jaar na afronding van het project te delen in de usergroups.

## 4. Visie voor fase 2 prototypeontwikkeling

### Inleiding

Fase 2 heeft als doel de ontwikkeling van een prototype onder operationele omstandigheden. Voordat we de activiteiten van de verschillende fasen beschrijven gaan we eerst in op een aantal voorwaarden voor succes. Deze zien wij als essentieel voor beide fasen. Ons doel is om beide fasen te gebruiken om in ieder geval 1 TRL level te stijgen en zo mogelijk 2. Dat laatste hangt met name af van de beschikbaarheid van een eenvoudig gastproject.

### Voorwaarden voor succes

#### **Samenwerken en nemen van beslissingen**

Voor fase 2 geldt dat door u is aangegeven dat de samenwerking in fase 2 te intensiveren. Wij juichen dat toe omdat draagvlak van het concept binnen RWS door ons als een belangrijke voorwaarde gezien wordt voor de acceptatie van de innovatie in het areaal van RWS en voor de acceptatie van 3DCP in de GWW in het algemeen

Wij zien in ons innovatietraject twee punten waarop in gezamenlijkheid beslissingen genomen moeten worden;

- Het prioriteren van te beantwoorden vragen op basis van de relevantie op dat moment en op basis van gewenst draagvlak.
- Wat is nodig voor acceptatie van de innovatie en go/nogo beslissingen op de overgang van een fase of TRL level.

Om de gewenste keuzes daadwerkelijk te maken plannen we een 2-wekelijks overleg. Hier worden vanuit de verschillende betrokken partijen de mensen verwacht met het mandaat om keuzes te maken en beslissingen te nemen. Dit is een bewezen goede methode waarmee Dywidag ervaring heeft opgedaan in het traject van het circulair viaduct.

#### **Risicoanalyse**

Om in gezamenlijkheid beslissingen te kunnen nemen dient er een gedeeld beeld te zijn van de risico's en openstaande vragen. Op basis daarvan kan de inspanning in een fase gefocust worden. Dit gezamenlijke beeld creëren we door fase 2a te starten met een gezamenlijke risicosessie.

#### **Veiligheid in ontwerp en realisatie**

Een laatste essentiële voorwaarde is dat op alle aspecten van de innovatie veiligheid geborgd dient te zijn. Voor de veiligheid van het ontwerp zal vanwege de nieuwheid van het materiaal gebruik gemaakt worden van Proeven ondersteund ontwerpen volgens de Eurocode. Dit zien wij als noodzakelijk in verband met de nieuwheid van het materiaal en vertaalt zich in uitgebreide materiaaltesten in fase 2a en een monitoringsplan in fase 2b

## Prototype fase 2a

#### **Digitaal en Fysiek**

Fase 2a vullen we in door het geprinte viaduct tot het niveau van Definitief Ontwerp uit te werken. Dit is het niveau waarop gebruikelijk vergunningverlening plaats vindt en daarmee een natuurlijk moment om het draagvlak en acceptatie te toetsen. Dit draagvlak kan meewegen in de go/no go beslissing voor fase 2b.

Het ontwerp wordt parametrisch opgezet volgens de principes van file tot factory. Het ontwerp kan dan eenvoudig gebruikt worden in een gastproject met andere afmetingen of andere eisen aan gebruik.

In het model wordt eveneens de veilige bouwbaarheid getoetst. De wijze van voorspanning speelt hierin een cruciale rol.

Naast het ontwerp worden proeven uitgevoerd. Proeven die met name gericht zijn op de krachtwerving in de onderlinge aansluiting van de geprinte modulaire blokken. Hierbij kan gedacht worden aan lokale krachtsinleiding ten gevolge van voorspanning en onderlinge afdracht van dwarskracht.

De digitale modellen voor de te printen modulaire blokken zijn afkomstig uit het hierboven genoemde model

Ten behoeve van de ontwikkeling van het CO2 arme mengsels wordt het in het haalbaarheidsonderzoek theoretisch ontworpen mengsel getoetst op printbaarheid

Voor het ontwerp kiezen we in overleg een praktijksituatie die representatief is voor de situaties waar het geprinte viaduct toepasbaar is. De overspanning meet maximaal 20m.

### **Objecten**

Het geprinte viaduct dat in fase 2a ontworpen wordt bestaat uit het 2 landhoofden met daartussen het gewelfde geprinte dek en daarop een grondlichaam. Het betreft

## Prototype fase 2b

### **Prototype en gastproject**

Op basis van de bevindingen in fase 2a wordt een prototype onder operationele omstandigheden gerealiseerd op schaal 1 op 1.

Onze voorkeur gaat uit naar een gastproject met een middelmatige complexiteit, passend bij het risicoprofiel van de ontwikkeling op dat moment. Wij denken op dit moment aan

- Overspanning 10m
- Kruising over langzaamverkeerverbinding of lokale weg
- De kruisende weg zwaarbelast

Het voordeel hiervan is dat het project van papier afkomt en in een werkelijke situatie bewezen wordt. Wat betreft ontwerp, maar ook wat betreft de bouwbaarheid en uitvoerbaarheid

### **Operationele omstandigheden**

Onder operationele omstandigheden wordt het prototype getest onder beoogd gebruik. Vanuit dat oogpunt verdient het toepassen van het prototype in een gastproject de voorkeur omdat het daadwerkelijk langdurig gebruik dan geborgd is. Bij een realisatie van het prototype op afgesloten terrein dient het gebruik gesimuleerd te worden.

## Test- en validatieplan

Het test- en validatieplan is van toepassing op zowel Fase 2a als fase 2b

Belangrijk uitgangspunt is dat per stap vooraf expliciet gemaakt wordt waarop getest wordt en wat het criterium is zodat de volgende stap gezet kan worden.

Bij start van fase 2a wordt met RWS, zo nodig aangevuld met externe experts, een risicoanalyse uitgevoerd. Deze risico's worden verwerkt in het test- en validatieplan. In welke stap dient het risico weggenomen te zijn? op welke wijze wordt het risico beheerst? Waar worden in de planning de go/no go momenten ingelast? Op deze manier voorkomen we verrassingen bij verwachte acceptatie van bijvoorbeeld het ontwerp.

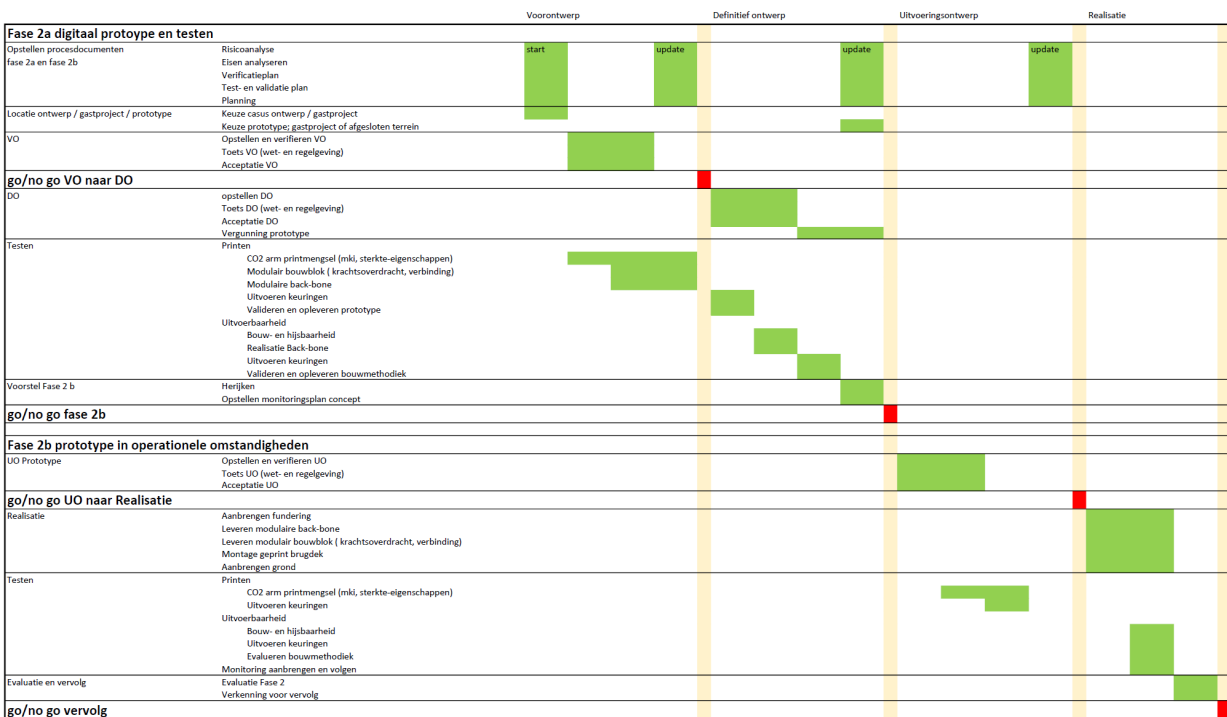
Het toepassen van de bekende Plan-do-check-act principe vormt de basis voor de voortgang op de TRL ladder. Van level naar level maar ook van de stappen in een fase.

## Monitoring

Het prototype in fase 2b wordt voorzien van sensoren om het gedurende de levensduur te kunnen monitoren. Ook op deze manier wordt invulling gegeven aan Proeven ondersteund ontwerpen. De monitoring vindt event-based plaats. Dit betekent dat het gebruik met behulp van camera's vastgelegd wordt. Dit gebruik (event) wordt gekoppeld aan de meetresultaten vanuit het monitoringsprogramma. De volgende componenten en gebeurtenissen worden over de tijd gemonitord. De juiste set wordt in overleg met RWS vastgesteld.

- Camera controle van passerende voertuigen
- Snelheid en richting van passerende voertuigen
- Doorbuiging van de brug
- Verplaatsingen ter plaatse van de oplettingen
- Vervormingen ter plaatse van de naden tussen de modulaire blokken
- Krachten in de voorspanning
- De temperatuur aan de onder- en bovenzijde van het geprinte dek

Test en Validatie plan



Figuur 26. Test en Validatie plan.



## Risico's en kansen

Door ons is een risico-analyse uitgevoerd waarvan de belangrijkste risico's hieronder vermeld staan. Als eerder aangegeven starten we fase 2a met een gezamenlijk risicoanalyse met u als opdrachtgever om vanaf het begin maximaal draagvlak te creëren door de risico's die u vanuit uw verantwoordelijkheid noemt te beheersen.

### Risico's

| Nr | Risico   | Oorzaak  | Gevolg  | Beheersmaatregel  |
|----|--|--|---|---|
| 1  | Digitalisering van de keten, file to factory, ontwikkelt zich niet snel genoeg in de markt   | Gebrek aan kennis / kennisdragers die deze stap kunnen maken.  | De digitalisering wordt het kritieke pad in de ontwikkeling van het concept en de uiteindelijke uitvoering van HoneyComb.         | Tijdig invliegen van kennis / kennisdragers vanuit de ICT   |
| 2  | Door te snelle verbreding via open source van het concept verliezen we grip op de beheerste ontwikkeling van deze innovatie<br><br>Een gezamenlijke ambitie op digitalisering en duurzaamheid is voorwaarde voor voortgang. Bij verbreding in de markt lukt het niet om deze vast te houden. | De markt gaat "aan de loop" met de ontwikkeling, en dan wellicht ook nog zonder het concept goed te begrijpen waardoor uit commerciële overweging elementaire fouten worden gemaakt.   | Het HoneyComb concept wordt door toedoen van anderen naar de spreekwoordelijke ijskast verbannen.                                 | Gefaseerde openstelling van kennis en kunde zodat jezelf altijd (of althans de belangrijkste eerste jaren) aan de lead blijft van de ontwikkeling.  |
| 3  | De bouwbaarheid van het concept staat ter discussie of wordt ter discussie gesteld.  | Diverse oorzaken:<br>Het lukt niet om de betrouwbaarheid in digitale of schaalmodellen aan te tonen.<br>Het prototype gedraagt zich niet zoals voorzien.<br>Het lukt niet om aansluiting te vinden bij de vigerende normen uit het Bouwbesluit | De klant (RWS of andere marktpartijen) geloven niet meer in het concept waardoor toepassing zich beperkt tot het ene proefproject | Door het volgen van het juiste test en validatieplan en dat in gezamenlijkheid vast te stellen.   |
| 4  | De ontwikkeling van duurzame mengsels blijft achter  | Onvoldoende kennis om steeds weer een volgende stap te maken in de ontwikkeling van steeds duurzamere mengsels   | De gewenste / vereiste duurzaamheidsdoelstellingen worden niet gehaald waardoor het concept zijn bestaansrecht gaat verliezen     | Maak gebruik van onze kennisinstellingen (TNO, TU-Delft, etc. maar ook de onontgonnen kennis in de wereld ofwel de open sources.  |
| 5  | Bestaande regelgeving (ROK) werkt als blokkade voor toepassing   | Het concept voldoet simpelweg niet aan aantoonbaar aan vigerende regelgeving   | Bevoegd gezag gaat niet akkoord met het bouwen van HoneyComb viaducten.   | Samen met het instituut RWS gesprekken voeren met bevoegd gezag en aanverwante goedkeurende instanties. Doel, mogelijkheden en onmogelijkheden moeten worden besproken in relatie tot lange termijnvisie van de ontwikkeling. |

## **Kansen**

Wij zien de volgende kansen voor het 3DCP viaduct in het concept Honeycomb

- Door de opzet wordt eenvoudig ruimte geboden aan andere circulaire deeloplossingen als bijvoorbeeld wegdek, vangrail, verlichting.
- Door de techniek van AM en digitalisering kan zonder meerkosten een viaduct in zijn uitstraling en vorm locatiespecifiek gemaakt worden
- Er wordt concreet aan CO<sub>2</sub>-arme mortels en substituten gewerkt, die worden getoetst op betrouwbaarheid, haalbaarheid en betaalbaarheid.
- Een veel grotere groep bedrijven en instellingen gaan kennismaken met AM. Hierdoor neemt het draagvlak en de versnelling toe.
- Materiaalarm ontwerpen (topologisch optimaliseren) krijgt een gezicht en een referentie.
- Voorbeeldfunctie voor de betonindustrie: Het grootste nadeel (CO<sub>2</sub>) van het meest gebruikte en meest betaalbare bouw materiaal wordt zo ver mogelijk gereduceerd, door bewezen technieken te combineren in een valideerbaar project.

## 5. Begroting fase 2

|  | <b>Totaal in €</b> | <b>Totaal uren</b> |
|--|--------------------|--------------------|
| Kosten van arbeid samenwerkingsverband | <b>624.000,-</b>   | 7000               |
| Bruil                                  | 100.000,-          |                    |
| Dekker                                 | 132.000,-          |                    |
| Dywidag                                | 20.000,-           |                    |
| StudioRAP                              | 124.000,-          |                    |
| Movares                                | 248.000,-          |                    |
| Verbruikte materialen                  | <b>385.000,-</b>   |                    |
| Bruil                                  | 325.000,-          |                    |
| Dekker                                 | 20.000,-           |                    |
| Dywidag                                | 40.000,-           |                    |
| Machines en apparatuur                 | <b>104.000,-</b>   |                    |
| Bruil                                  | 3000,-             |                    |
| Dekker                                 | 61.000,-           |                    |
| Dywidag                                | 40.000,-           |                    |
| Kosten van arbeid van projectpartners  | nvt                |                    |
| Kosten derden/ onderaannemers          | <b>126.000,-</b>   |                    |
| Overige kosten                         |                    |                    |
| <b>Totaal exclusief BTW</b>            | 1.239.000,-        |                    |
| Omzetbelasting (laag)                  | 261.000,-          |                    |
| Omzetbelasting (hoog)                  |                    |                    |
| Omzetbelasting (0%)                    |                    |                    |
| <b>Totaal inclusief BTW</b>            | 1.500.000,-        |                    |

Toelichting scope:

- Ten behoeve van hoeveelheden in fase 2b gerekend met ca. 140m2 viaduct.
- In 2b is uitgangspunten dat vanuit gastproject de verhardingen, bijvoorbeeld, asfalt door hoofdaannemer gastproject worden uitgevoerd.
- Kosten derden betreft de kosten van onderaannemers die zowel materiaal leveren als aanbrengen

## 6. Colofon

### **Project Honeycomb**

Consortiumleden: Studio RAP, Movares, Bruil, Dywidag, K Dekker Bouw & Infra

Contactpersoon / uitvoerder

Dhr. W. van Beerendonk

[Wesse@studiorap.nl](mailto:Wesse@studiorap.nl)

06-50 40 72 26

Startdatum Fase 1: 23 september 2020

Einddatum Fase 1: 16 maart 2021

Ondertekend,

d.d. 16 maart 2021

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal tail extending to the right.

W. van Beerendonk

## 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 / projecttitel: Honeycomb

### 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.) |
|----------------------------|---|---|--|--|
| Bruil                      | <input checked="" type="checkbox"/> Nederland<br>▪ .... | <input checked="" type="checkbox"/> Bekend<br>▪ Nieuw | <input checked="" type="checkbox"/> MKB<br>▪ GRB           |  |
| Studio RAP                 | <input checked="" type="checkbox"/> Nederland<br>▪ .... | <input checked="" type="checkbox"/> Bekend<br>▪ Nieuw | <input checked="" type="checkbox"/> MKB<br>▪ GRB           |  |
| Movares                    | <input checked="" type="checkbox"/> Nederland<br>▪ .... | <input checked="" type="checkbox"/> Bekend<br>▪ Nieuw | ▪ MKB<br><input checked="" type="checkbox"/> GRB           |  |
| Dywidag                    | <input checked="" type="checkbox"/> Nederland<br>▪ .... | <input checked="" type="checkbox"/> Bekend<br>▪ Nieuw | ▪ MKB<br><input checked="" type="checkbox"/> GRB           |  |
| K_Dekker                   | <input checked="" type="checkbox"/> Nederland<br>▪ .... | ▪ Bekend<br><input checked="" type="checkbox"/> Nieuw | <input checked="" type="checkbox"/> MKB<br>▪ GRB           |  |

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

- Ja, met bedrijven  en/ of kennisinstellingen
- Nee

### 3. Het instrument SBIR

3.1 Wat vindt u sterke punten van het instrument SBIR

- De overheid als aanjager van innovatie.
- Dat er budget beschikbaar is om de transitie naar écht circulair te maken.
- Ruimte voor de 'out of the box' concepten en open benadering (niet te veel beklemmende aanbestedingsregels).

3.2 Heeft u suggesties ter verbetering van de SBIR procedure?

- Als je deze wijze van aanbesteden vaker toepast of aan meer partijen gunt, zal de transitie naar circulaire versnellen en het draagvlak vergroten. Kortom, graag meer en vaker deze uitvraag!
- Budget ook als toelage op een bestaande uitvraag toepasbaar maken.