

Afstudeerrapport

Onderzoek: Het toepassen van innovatieve materialen, wanneer regelgeving (nog) ontbreekt

Kleiss, K.D. (13115618)

23 oktober2017



Voorwoord

Voor u ligt het afstudeerrapport van het onderzoek 'Het toepassen van innovatieve materialen, wanneer regelgeving (nog) ontbreekt'. Het onderzoek is gedaan voor het afstuderen aan de opleiding Civiele Techniek aan de Haagse Hogeschool en in opdracht van BAM Infraconsult. Van april 2017 tot en met oktober 2017 ben ik werkzaam geweest op de afdeling Materiaaltechnologie van BAM. Het onderzoek is gedaan in samenwerking met de afdeling Structural Design van de TU Eindhoven, Dhr. T. Salet (TU Eindhoven) en de andere partners van het partnerschap van het 3DCP-onderzoek van T. Salet.

Bij dit afstudeerrapport worden een bijlagerapport en een eindproduct geleverd. Het eindproduct bestaat uit een protocol met daarbij een handleiding. Dit protocol is onder andere opgesteld aan de hand van de ervaringen op gedaan bij het meelopen met een pilotproject. Dit pilotproject (van BAM) betreft het ontwerpen en toetsen van de eerste constructieve 3D beton geprinte fietsbrug ter wereld. Daarnaast is het protocol getoetst door middel van het doorlopen met drie innovatieve materialen.

Tijdens mijn afstuderen kon ik met al mijn vragen goed terecht bij mijn begeleiders en collega's van BAM. Zij namen allen de tijd om allerlei verschillende onderwerpen aan mij uit te leggen of met mij te bespreken. Bij deze wil ik mijn begeleiders, J. van den Bos, E. Mangers, P. Holthuisen en N. Vervoort, en mijn andere collega's van team Materiaaltechnologie, bedanken.

Daarnaast wil ik mijn begeleiders vanuit de Haagse Hogeschool en andere betrokkenen bedanken voor hun tijd en hulp. Dit zijn de volgende personen:

- W. Bharos
- J. Kousemaker
- Alle andere collega's van BAM
- T. Salet en de partners van zijn onderzoek naar het 3D printen van beton (3DCP)
- Het laboratorium team van de Technische Universiteit Eindhoven

Kari Kleiss,

Gouda, 23 oktober 2017

Samenvatting

Het is vaak gewenst om innovatieve materialen en technieken toe te passen wegens de voordelen op technische, economische of duurzaamheidsaspecten. Echter bestaat er (nog) geen regelgeving voor hoe met deze innovatieve materialen en technieken constructief veilige constructies gemaakt kunnen worden. Toch kunnen ze toegepast worden doordat in de NEN-EN 1990 (Eurocode 0) staat dat een 'door proeven ondersteund ontwerp' (ofwel "design by testing") ontwikkeld en berekend kan worden. De proeven die uitgevoerd worden dienen als verificatie van de input van de berekeningen om hiermee de veiligheid en de kwaliteit aan te tonen.

Er is belang onder de betrokkenen van een (bouw)project naar een stappenplan wat gebruikt kan worden om het traject van het "design by testing" toe te passen. Doordat dit traject bij (pilot)projecten afwijken van de standaard zijn er veel onzekerheden over de veilige toepassing. Hierdoor ontstaan veel risico's. Een stappenplan, in de vorm van een protocol, is onderzocht aan de hand van een innovatief project. In dit pilotproject wordt het innovatieve materiaal, het 3D geprinte beton (3DCP), als constructief materiaal gebruikt in een fietsbrug. De hoeveelheid stappen, testen en valkuilen die tijdens het proces van dit pilotproject inzichtelijk werden, zijn gebruikt als basis voor het ontwerpen van een protocol.

Gewenst was een protocol te ontwikkelen met een globale opzet zodat deze een brede toepassing heeft. Het kan geraadpleegd worden voor verschillende innovatieve materialen of technieken, toepassingsgebieden, randvoorwaarden en door verschillende partijen. Het opgeleverde protocol bestaat uit een flowchart met een handleiding waar de stappen en het doorlopen van de flowchart omschreven worden. Als voorbeeld van de werking van het protocol, is het doorlopen met het pilotproject van de 3D beton geprinte (3DCP) fietsbrug.

Het protocol kan in twee situaties gebruikt worden. Als eerste kan het voorafgaand aan een project het inzichtelijk krijgen van de benodigde informatie en werkzaamheden die bij het verifiëren van een innovatief materiaal komt kijken. Als tweede kan het tijdens een project gebruikt worden als checklist van de stappen en de verkregen informatie. De gebruiker van het protocol moet voldoende kennis hebben over het betreffende innovatief materiaal en over de toepassing van innovatie in projecten. Om de toepasselijkheid en de werking van het protocol aan te tonen wordt het getest in een drietal case studies.

Bij het doorlopen van het protocol in de case studies, blijkt dat het protocol goed inzicht kan geven over de werkzaamheden, de benodigde informatie en de uit te voeren verificatie proeven ten behoeve van het aantonen van de veiligheid. Het is een goede leidraad voor het inzichtelijk krijgen van het "design by testing" (ECO).

Het algemene protocol dat opgesteld is in dit onderzoek legt een goede basis. Het kan specifiek gemaakt worden voor bepaalde materialen en/of technieken in bepaalde toepassingsgebieden. In meer detail kan dan advies gegeven worden over de mogelijk risico's en de personen die ingeschakeld en op de hoogte gesteld moeten worden.

Inhoudsopgave

Voorwoord	I
Samenvatting	III
Figurenlijst.....	IX
1. Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Probleemstelling	2
1.3 Doelstelling	2
1.4 Methode	2
1.5 Scope.....	3
1.6 Producten.....	4
2. Literatuurstudie.....	5
2.1 Protocol.....	5
2.2 Regelgeving	7
2.3 Beton.....	8
2.3.1 Samenstelling	9
2.3.2 Eigenschappen	10
2.3.3 Groene sterkte	12
2.3.4 Duurzaamheid.....	12
2.4 3D beton printen (3DCP).....	14
3. 3DCP fietsbrug.....	17
3.1 Project Gemert Noord-Om	17
3.2 3DCP fietsbrug	18
3.2.1 Inleiding.....	18
3.2.2 Traject	19
3.2.3 Proeven	25
3.2.4 Verificatieproef	33
3.3 Evaluatie Project fietsbrug.....	37
4. Protocol	39
4.1 Belang.....	39
4.1.1 3DCP project	39
4.1.2 Interviews.....	39
4.1.3 Doel	41
4.2 Vorm.....	42
4.3 Opstellen	44
4.3.1 Versies van protocol.....	45

4.3.2	Eindproduct.....	48
5.	Innovatieve materialen.....	51
5.1	Lijstinnovatieve materialen.....	51
5.2	Protocol toetsen	52
5.2.1	Case Study 1	52
5.2.2.	Case Study 2	54
5.2.3.	Case Study 3	56
6.	Conclusie.....	59
7.	Aanbeveling	61
	Literatuurlijst.....	63
	Bijlagen	67
1.	Werkplan.....	67
2.	Aantekeningen van literatuurstudies	67
3.	Testprogramma 3D beton printen_20170310.....	67
4.	Opzet Proeven 4 en 1-3_20170412	67
5.	Materiaaleigenschappen printmortel_20170821.....	67
6.	Testprogramma proef #2_20170529	67
7.	Rapport Testprogramma brug Gemert_20170614.....	67
8.	Evaluatie 3DCP project Gemert	67
9.	Interviews t.b.v. protocol.....	67
10.	Versies en aantekeningen voor het protocol.....	67
11.	Protocol, met handleiding en voorbeeld	67
12.	Gesprekken en presentaties m.b.t.innovatieve materialen en technieken	67
13.	Lijst met innovatieve materialen en technieken	67
14.	Specificaties van ZHB en UHSB	67

Lijst van afkortingen

Afkorting	Betekening
3DCP	3D beton printen (of variatie hiervan)
TU/e	Technische Universiteit Eindhoven
NEN	Nederlands Normalisatie-instituut
EC	Eurocode, regelgeving (/normen) voor de bouw die gebruikt wordt in Europa
EC0	Eurocode 0: Grondslagen van het constructief ontwerp
EC2	Eurocode 2: Ontwerpen en berekenen van betonconstructies
3DC printer	3D beton printer
Wcfactor/ wcf	Watercementfactor
LDP	Levensduurproeven
LC	Levenscyclus/ Life cycle
ZHB	Zelfhelend beton
UHSB	Ultrahogesterktebeton
Vv	Vezel-versterkt

Figurenlijst

Figuur 2-1: Voorbeeld van een flowchart met iteratief proces. (easability, 2017)	6
Figuur 2-2: Het traject van een standaard (bouw)project (Management, 2017)	6
Figuur 2-3: Overzicht van alle Eurocodes (NEN, 2017).	7
Figuur 2-4: De drie partijen die moeten samenwerken om tot een regelgeving te komen.	8
Figuur 2-5: Illustratie van de compacte structuur van beton.	10
Figuur 2-6: Dekking van het wapeningsstaal in een betonconstructie. (Lexicon, 2017)	11
Figuur 2-7: Slipformpaver kan betonbanden maken doordat de specie een hoge groene sterkte kan hebben. (Van-Huele, 2017)	12
Figuur 2-8: De verschillende milieuklasse, met aanduiding en omschrijving, volgens de NEN-EN-206-1/8005.	13
Figuur 2-9: Een foto van de 3D beton printer aan de slag, in het Lab van de TU/e (Club, 2017).	14
Figuur 2-10: De laagjes printmortel.	15
Figuur 3-1: In de afbeelding is de Noord-Om geschetst op een satellietfoto van Gemert. De drie rotondes zijn goed te zien. (Noord-Brabant, N605 Gemert Noord-Om, 2017)	17
Figuur 3-2: De 3DCP fietsbrug over de Peelse Loop, gemarkeerd met een oranje vierkant. Links: Autocad tekening afkomstig van het Project Gemert Noord-Om. Rechts: GoogleMaps.	18
Figuur 3-3: Tijdlijn van het verloop van het project 3DCP fietsbrug.	19
Figuur 3-4: Globale tijdsindicatie van het traject van het Project 3DCP fietsbrug. De rode lijnen geven de invloeden aan die de activiteiten onderling op elkaar hebben.	21
Figuur 3-5: Een schets van de 3DCP fietsbrug over de Peelse Loop, Gemert. (Laagland, 2017)	22
Figuur 3-6: Ontwerp van de doorsnede van elementen van brug schaal 1:1. (Laagland, 2017).	22
Figuur 3-7: Geleverde zakken 'droog' mengsel voor het maken van de printmortel.	23
Figuur 3-8: De pomp in stand-by.	23
Figuur 3-9: De pomp in gebruik	23
Figuur 3-10: Controleren van de printmortel. Links: voordat het printen van een element start. Rechts: tijdens het printen van de proefstukken van de schaal 1:2 brug.	24
Figuur 3-11: Elementen op schaal 1:1.	24
Figuur 3-12: Detail van de lagen van een schaal 1:1 element.	24
Figuur 3-13: Links: Een geprint element voor de schaalbrug 1:2. Rechts: Detail van de lusvormige doorsnede.	25
Figuur 3-14: Verdeling van proefstukken uit 3D geprinte lagen mortel. (Doomen, 2016)	26
Figuur 3-15: De stappen voor het maken van om proefstukken van het 3DCP voor #4. (Doomen, 2016)	27
Figuur 3-16: De testopstelling van het bepalen van de druksterkte (links) en de treksterkte (rechts) van de printmortel welke gebruikt wordt bij het project 3DCP fietsbrug Gemert. (Doomen, 2016) ..	27
Figuur 3-17: Een proefstuk geprint met wapeningskabel.	28
Figuur 3-18: Geprint contour van een kopstuk.	29
Figuur 3-19: Links: Detail van de voeg. Rechts: De gebruikte Epoxylijm.	30
Figuur 3-20: De testbrug, de voorspanstaven geplaatst.	30
Figuur 3-21: De voor- en naspanzijde met de benodigde instrumenten voor het voorspannen van de schaal 1:2 brug.	31
Figuur 3-22: Het voorspannen van de testbrug.	31
Figuur 3-23: Rechts: versneller, wordt toegevoegd aan de mortel. Links: Proefstuk geprinte met mortel + versneller.	32
Figuur 3-24: De bovenstaande schetsen geven de Dwarskrachtlijn (V-lijn) en Momentenlijn (M-lijn) aan die optreden bij de 3- en 4-puntsbuiging van een ligger op twee steunpunten.	32

Figuur 3-25: Het assembleren van de schaalbrug. Links: Epoxylijm aanbrengen. Rechts: De geassembleerde elementen.	33
Figuur 3-26: Meetsensoren (LVDT's).....	33
Figuur 3-27: De testbrug geplaatst in de testopstelling van de driepuntsbuigproef vanaf twee kanten gezien.	34
Figuur 3-28: De testbrug geplaatst in de testopstelling van de vierpuntsbuigproef vanaf twee kanten gezien.	34
Figuur 3-29: De (rol)oplegging van de testbrug. Links nog niet in gebruik, en rechts wel.	34
Figuur 3-30: Hydraulische pomp.....	35
Figuur 3-31: Met gips afgewerkt waar de q-last aangrijpt.....	35
Figuur 3-32: Locatie van twee meetklokjes voor de verificatie proef van de testbrug.	35
Figuur 3-33: Veiligheidsmaatregel.	35
Figuur 3-34: Uitkomsten van de vierpuntsbuigproef. Het verloop van de brug steeds belasten en ontlasten.	36
Figuur 3-35: Verticale en horizontale scheur in het midden van de testbrug. De rode lijn is in de linker foto naast de scheur getekend.	36
Figuur 3-36: Scheur ongeveer in het midden van de testbrug. Links: Gezien van de zijkant. Rechts: Gezien van onderaf.	36
Figuur 4-1: De samenhang van de vier fasen van een project.....	42
Figuur 4-2: De stappen van een standaardproces van het berekenen van een (beton)constructie.	43
Figuur 4-3: De vijf stappen van elke fase van een pilotproject.....	43
Figuur 4-4: Stroomdiagram van de proeven die noodzakelijk zijn voor het “design by testing” tijdens een pilotproject.....	44
Figuur 4-5: Overzicht van verschillende verificatie proeven die noodzakelijk zijn voor het “design by testing”.....	44
Figuur 4-6: Schema: “Proces van project 3b” (Bijlage 10).	45
Figuur 4-7: “Flowchart v2” (Bijlage 10).	45
Figuur 4-8: Het begrip BBB wat bij elke stap in het proces beantwoord moet worden.....	46
Figuur 4-9: De belangrijkste activiteiten en de volgorde hiervan: “Protocol v2” (Bijlage 10)	47
Figuur 4-10: Flowchart: “Protocol v5” (Bijlage Versies en aantekeningen voor het protocol10).	47
Figuur 4-11: Het protocol in flowchart vorm.....	48
Figuur 5-1: Een selectie van de lijst met nieuwe/innovatieve materialen en technieken.....	51

1. Inleiding

1.1 Aanleiding

Naarmate milieu, duurzaamheid en oplevertijd belangrijker worden voor de uitvoerder, de opdrachtgever en de gebruiker, groeit dan ook de vraag naar bijpassende materialen en technieken. De meest gebruikte materialen in de bouw zijn staal en beton. De technieken om deze materialen te produceren en te gebruiken zijn al jaren gestandaardiseerd. Echter zijn deze belastend voor het milieu, voornamelijk door de hoge CO₂-uitstoot tijdens de productie ervan. De bewustwording over deze uitstoot en de invloed ervan op het milieu neemt toe. Duurzaamheid wordt een belangrijker aspect binnen alle sectoren, waaronder de bouw. Hierdoor wordt er gezocht naar (nieuwe) manieren om de belasting op het milieu te verminderen.

Vele innovatieve materialen en technieken worden bedacht die minder belastend voor het milieu (kunnen) zijn. Echter kunnen deze materialen en technieken niet (onmiddellijk) toegepast worden in praktijk doordat een belangrijk aspect mist: de regelgeving. De materiaaleigenschappen van deze nieuwe materialen verschillen van die van bekende materialen. Hierdoor kan er geen gebruik gemaakt worden van voorschriften als de Eurocodes bij het rekenen aan constructies.

Voorschriften zijn gewenst omdat ze het voordeel hebben dat er voor bepaalde materialen, waarvan de materiaaleigenschappen bekend zijn, rekenregels beschikbaar zijn. Het ontbreken van regelgeving zorgt dus voor onzekerheid bij het ontwerpen, maken en beheren van constructies met nieuwe materialen. Als het nog onbekend is hoe het materiaal zich gedraagt, is er ook geen duidelijkheid over de risico's van het gebruik ervan. Een geschematiseerd systeem is nodig om het makkelijker te maken om een nieuw materiaal toe te passen en hiermee de kosten te beperken. Regelgeving leidt tot eenzelfde, consistente manier van aanpak door verschillende partijen.

Omdat er weinig, dan wel geen, ervaring is met het toepassen van deze nieuwe materialen en technieken, zal een algemene regelgeving nog op zich wachten. Het gebrek aan regelgeving werkt dus vertragend voor het proces naar een duurzame bouw(industrie). Toch willen innovatieve materialen en technieken wel toegepast worden. Tot een regelgeving ontwikkeld is moet ervaring opgedaan worden met het gebruik van innovatieve materialen en technieken. Verschillende partijen moeten het risico willen en durven nemen om in bepaalde innovatieve materialen of technieken te investeren.

In het onderzoek worden innovatieve dan wel nieuwe materialen genoemd. Voor de duidelijkheid wordt besloten om de term “innovatieve materialen” te spreken wanneer ‘innovatieve/nieuwe materialen en/of technieken’ bedoeld worden. Dit wordt gedaan omdat over een innovatief materiaal wordt gesproken, ook wanneer een nieuwe techniek gebruikt wordt bij een bestaand materiaal. Hieronder zijn een aantal voorbeelden genoemd om te illustreren hoe nieuwe materialen worden verkregen:

1. Een geheel nieuw materiaal wordt uitgevonden. *Eg. Met schimmels geïnjecteerd maaisel*
2. Aanpassingen op een huidig materiaal om het een andere werking of karakteristieken te geven. *Eg. Toevoeging van bacteriën aan betonspecie waardoor het zelfhelend kan worden.*
3. Een bestaand materiaal wordt in een ander toepassingsgebied gebruikt. *Eg. Glas als constructief materiaal.*
4. Wanneer een materiaal op een nieuwe manier wordt uitgevoerd. *Eg. Het 3DCP*
5. Verschillende materialen en technieken worden gecombineerd tot iets nieuws. *Eg. Vezel-versterkt en onderwaterbeton gecombineerd tot vezel-versterkt onderwaterbeton.*

1.2 Probleemstelling

BAM wil steeds vaker innovatieve materialen en technieken toepassen. Echter bestaat voor deze materialen en technieken (nog) geen regelgeving. In dit geval is het niet duidelijk hoe een constructie ontworpen en getoetst kan worden op veiligheid, vanwege het ontbreken van inzicht in de mogelijke risico's. Bij het toepassen van een innovatief materiaal, zou een stappenplan gebruikt kunnen worden dat de acties en risico's aangeeft.

1.3 Doelstelling

De doelstelling van het onderzoek is om een stappenplan te ontwerpen voor het proces van het toepassen van innovatieve materialen of technieken in een project overzichtelijk maakt.

Het stappenplan zal worden ontworpen aan de hand van het doorlopen van een project waaraan innovatief materiaal (3DCP) constructief wordt toegepast. Er wordt gekeken welke beslissingen gemaakt worden, welke activiteiten uitgevoerd worden, welke problemen zich voordoen en hoe deze opgelost worden. Deze punten worden geëvalueerd en zullen de vorm en inhoud van het gewenste stappenplan bepalen. Het opgestelde stappenplan zal de vorm krijgen van een protocol dat overzichtelijk is en relatief makkelijk doorlopen kan worden. Het zal niet specifiek zijn voor slechts één bedrijf, maar door meerdere partijen geraadpleegd kunnen worden. Wanneer het protocol gebruikt wordt, zal het voor de lezer duidelijk zijn welke activiteiten ondernomen moeten worden wanneer een innovatief materiaal toegepast wil worden. Hierbij wordt het inzichtelijk welke bijhorende risico's kunnen optreden.

De volgende onderzoeksvraag is voor dit onderzoek opgesteld:

“Hoe kan een innovatief materiaal en/of techniek toegepast worden wanneer regelgeving (nog) ontbreekt?”.

1.4 Methode

In dit onderzoek wordt de nadruk gelegd op het opstellen van een stappenplan dat voor het ontwerpen met en gebruiken nieuwe materialen en technieken gebruikt kan worden en dat garandeert dat het product aan de eisen zal voldoen. Het stappenplan wat ontworpen wordt is in de vorm van een protocol. Dit protocol wordt opgesteld aan de hand van het traject van het 3D printen van beton.

Tijdens het onderzoek worden verschillende deelonderzoeken gedaan en moet er geleerd worden over verschillende onderwerpen. Zo moet er een literatuurstudie worden gedaan om meer kennis te verkrijgen over het te onderzoeken onderwerp. Daarvoor is de literatuurstudie in de volgende onderwerpen opgedeeld:

- De onderdelen van een protocol
- De regelgeving voor het gebruik van innovatieve materialen en technieken (wat staat er in de bestaande voorschriften?)
- Beton(technologie)
- Het proces van 3D beton printen

Er wordt meegekeken bij het project van BAM van het met 3DCP construeren van een fietsbrug om te ondervinden hoeveel stappen, testen en valkuilen er worden ondervonden tijdens het proces om het 3DCP toegepast te krijgen als constructief materiaal. Om aan te tonen dat de fietsbrug zal voldoen aan de constructieve veiligheid worden een aantal proeven gedaan. Hierbij moet onderzocht worden welke proefmethodieken toegepast kunnen worden en moeten beslissingen gemaakt worden welke daadwerkelijk toegepast gaan worden.

Met de ervaring die opgedaan is bij het meekijken met en meedenken aan het 3DCP fietsbrug project wordt gezocht naar een stappenplan (protocol) om innovatieve materialen toe te passen bij (bouw)projecten. Door de versies van het protocol steeds te doorlopen met het materiaal 3DCP, de ervaringen uit het 3DCP fietsbrug project en het bespreken met betrokkenen wordt het ontwerp van het protocol aan gepast. Na het opstellen van het protocol en het geven van een beschrijving bij elke stap, wordt het protocol tweemaal getoetst. De specificaties van twee innovatieve materialen worden onderzocht, een casestudy wordt bedacht en hiermee wordt het protocol doorlopen. De uitkomsten worden gebruikt om het protocol aan te scherpen, worden gebruikt als voorbeeld of worden gegeven als aanbeveling.

De hoofdactiviteiten van dit onderzoek zijn hieronder puntsgewijs weergegeven:

- Literatuurstudie doen; vakkennis eigen maken
- Een algemene beschouwing maken over het ontbreken van een protocol en noodzaak van een protocol
- Lijst opstellen van nieuwe materialen/technieken
- Een beschrijving maken van het uiteindelijke testprogramma en het proces van meedenken en het doorvoeren van (eventuele) veranderingen
- Meekijken met het 3DCP project, waaronder de proeven; een evaluatie maken
- Interviews doen met verschillende betrokkenen voor beter beeld van o.a. knelpunten
- Protocol voor nieuwe materialen en/of technieken opstellen a.d.h.v. 3DCP; met terugkoppeling steeds aanpassen
- Protocol toetsen met twee nieuwe materialen en/of technieken
- Een conclusie en aanbeveling geven

Deze hoofdactiviteiten leveren deelproducten, die in: Producten, opgesteld zijn.

1.5 Scope

Om te kunnen zorgen dat het onderzoek in de toegewezen tijd succesvol is, moeten vooraf duidelijke afspraken gemaakt worden. Uitgaand van de opgegeven tijd, moet er voorkomen worden dat de verkeerde of niet relevante onderwerpen worden onderzocht of behandeld. Door het opstellen van een goede projectgrens kan een planning gemaakt worden waaraan de verschillende onderdelen gebonden zijn.

De vormen van systemen (protocol), de regelgeving, beton en het 3D beton printen worden bestudeerd. Omdat deze onderwerpen breed zijn wordt alleen maar ingegaan op de onderdelen die van toepassing zijn voor het 3DCP fietsbrug project en het opstellen van een protocol voor het toepassen van innovatieve materialen. Er wordt geholpen bij het bedenken en beschrijven van een testprogramma voor het beproeven van de schaal 1:2 brug van het 3DCP fietsbrug project van BAM. Een protocol voor het toepassen van nieuwe materialen en technieken wordt opgesteld. Een aantal personen betrokken bij het 3DCP fietsbrug project en in het vakgebied van het toepassen van innovatieve materialen worden geïnterviewd. Een lijst met een korte omschrijving en overige informatie van innovatieve materialen wordt bijgehouden gedurende het onderzoek. Op twee van deze materialen wordt dieper ingegaan. Deze worden vervolgens gebruikt voor het toetsen van het opgestelde protocol.

Het onderzoek zal blijven bij de opgestelde onderdelen en beperkt tot de tijd die ervoor bepaald is. Er zal een literatuurstudie gedaan worden om meer inzicht te krijgen in de verschillende onderdelen, maar hier moet niet te diep op ingegaan worden. Ook wordt alleen bij de 3D geprinte betonnen fietsbrug, onderdeel van het project Gemert Noord-Om, meegeholpen. Het is belangrijk, dat aan het

einde van het onderzoek het gewenste resultaat behaald is, namelijk: een antwoord op de onderzoeksvraag en een onderzoeksrapport.

1.6 Producten

Aan het einde van het onderzoek wordt een rapport en een protocol met handleiding voor het toepassen van nieuwe materialen (met toelichting) aangeleverd. Om deze twee producten te kunnen aanleveren moeten een aantal deelproducten gemaakt worden. Deze deelproducten komen voort uit de hoofdactiviteiten van het onderzoek en zijn als volgt:

- Literatuurstudie
- Testprogramma t.b.v. test/schaalbrug
- Evaluatie van het 3DCP fietsbrug project
- Protocol opstellen; zowel flowchart(s) als een handleiding
- Interviews met betrokkenen in het vakgebied
- Een lijst van nieuwe (constructie) materialen en technieken
- Verdere informatie van twee nieuwe materialen
- Toetsen van het protocol met twee nieuwe materialen
- Zelfreflectie

2. Literatuurstudie

Dit onderzoek is gericht op het opstellen van een protocol wat gebruikt kan worden wanneer nieuwe materialen en/of technieken toegepast worden. Hiervoor worden de volgende begrippen onderzocht:

- Protocol; een werkmethode dat gebruikt kan worden bij het toepassen van innovatieve materialen
- Regelgeving; geaccepteerde regels voor het toepassen van o.a. (constructie)materialen

Een protocol vormt een werkmethode dat gevolgd zal worden. De regelgeving is van belang omdat deze ontbreekt bij de nieuwe materialen en technieken die gebruikt willen worden.

Om een dergelijk protocol te kunnen opstellen en testen wordt meegelopen met het traject van het 3D printen van beton. Om te begrijpen waarom gekozen is voor het uitvoeren van bepaalde acties en berekeningen moet er verdiept worden in het 3D printen van beton. Echter voordat in de techniek verdiept kan worden, moet eerst onderzoek gedaan worden naar beton. Daarom volgt onderzoek in de volgende twee onderdelen:

- Beton; specificaties die van belang zijn voor het begrijpen van het 3D beton printen
- Het 3D printen van beton; een nieuw materiaal zonder regelgeving die toegepast wordt

De belangrijkste informatie van de bovengenoemde onderdelen is in dit hoofdstuk samengevat. Voor meer informatie over de onderdelen kunnen de bronnen of de aantekeningen in Bijlage 2: 'Aantekeningen van literatuurstudies' geraadpleegd worden.

2.1 Protocol

Om de methode die gebruikt kan worden bij het toepassen van innovatieve materialen of technieken waar (nog) geen regelgeving van is vast te leggen kan een protocol opgesteld worden. Heden is deze niet voor handen terwijl zich wel innovatieve materialen en technieken aandienen.

Vooraf wordt bedacht, met de hulp van een aantal betrokkenen, dat een protocol een geschikt systeem is. Een systeem in de vorm van een protocol kan mogelijk gebruikt worden bij het toepassen van een innovatief materiaal waar (nog) geen regelgeving voor is en hiermee een oplossing te bieden op de probleemstelling (1.2).

Het algemene begrip voor een protocol is "een geheel van vastgelegde regels en afspraken op een bepaald gebied" (Dale v. , 2017). Zo zijn er verschillende soorten protocollen zoals communicatie-, computer- ethische- en verdragsprotocollen (Wikipedia, 2017). Een protocol is een breed begrip voor een vast aantal stappen dat doorlopen kan of moet worden. De reden dat gezocht wordt naar een vast aantal stappen is zodat er (in principe) maar één keer onderzoek gedaan hoeft te worden naar de bruikbaarheid van de opgestelde vaste stappen. Vaste regels die gevolgd kunnen worden maken het niet alleen makkelijker en goedkoper, maar zorgen ook voor een minimumkwaliteit en daardoor voor een bepaalde veiligheid. Hierdoor is het van belang deze stappen globaal te houden zodat het protocol in meerdere situaties van toepassing is.

De vorm, onderdelen en complexiteit van een protocol zijn divers. Daarom wordt er naar een aantal vormen gekeken voor de omvang van dit protocol met betrekking tot het proces van (bouw)projecten. Twee van deze vormen worden hierna besproken.

The diagram illustrates the project management process, organized into two main horizontal sections: **FASEREN** (Phases) and **BESLISSEN** (Decisions).

FASEREN (Phases): This section is represented by a row of seven boxes, each corresponding to a phase of the project:

- Initiatief**
- Definitie**
- Ontwerp**
Structuurontw.
Voorontw.
Definitieontw.
- Uitwerking**
Technisch ontwerp
(bestek)
- Prijs- & Contractvorming**
- Uitvoering**
- Nazorg**

BESLISSEN (Decisions): This section is represented by a row of seven boxes, each corresponding to a decision point. Each box is divided into three horizontal sections:

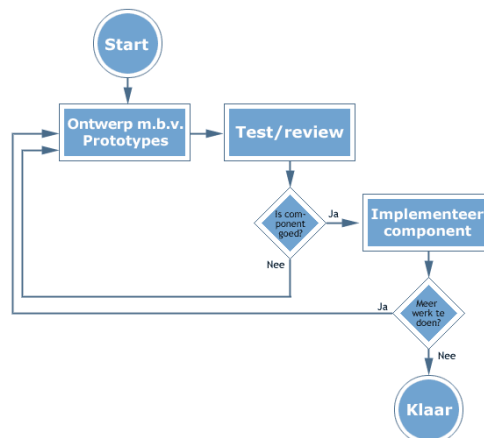
- Top section (GOTIK):** A box containing the letters G, O, T, I, K.
- Middle section (Risico-management):** A box containing the text "Risico-management".
- Bottom section (Project-opdracht):** A box containing the text "Project-opdracht".

The decision points are labeled as follows:

- Project-opdracht**
- Risico-management**
- Project-plan**
- Risico-management**
- Aanbestedingsplan**
- Risico-management**
- Uitvoeringsplan**
- Risico-management**
- Nazorg-plan**

Arrows indicate the flow from the **FASEREN** section to the **BESLISSEN** section, showing the progression of the project through the phases and the corresponding decision points.

Dit is een systeem waar de stappen chronologisch lopen. Een volgende stap wordt, in theorie pas uitgevoerd wanneer de vorige stap afgerond is. Bij elke fase wordt rekening gehouden met dezelfde dingen en worden beslissingen gemaakt op dezelfde manier. Binnen elke van de zeven fasen (in Figuur 2-1) kan echter een ander proces lopen. Zo een proces is te zien in Figuur 2-2.



Te zien is dat elk onderdeel in dit proces kan leiden tot een vervolgstap door het antwoorden van de vraag met 'ja' of 'nee'. Deze vorm is overzichtelijk en geeft meer detail over het te doorlopen traject. Deze figuur heeft de vorm van een flowchart en laat het iteratiefproces zien van een ontwerp. Een iteratief proces is het "stapsgewijs naar een optimum gaan" (Encyclopedie, 2017) waar bepaalde onderdelen van een proces zich steeds herhalen tot een geoptimaliseerd uitkomst behaald wordt. Doormiddel van de uitkomsten van de proeven (testen) wordt het ontwerpplan de prototypes aangescherpt. Door de output van de test te gebruiken als input voor het ontwerp, wat vervolgens weer getest wordt, ontstaat een circulair en iteratief proces.

6

de vorm en inhoud van het protocol. Deze ervaringen worden omschreven in Hoofdstuk 3. De verschillende gedachtes, genomen stappen en onderdelen die leiden tot het eindproduct worden behandeld in Hoofdstuk 4:Protocol.

2.2 Regelgeving

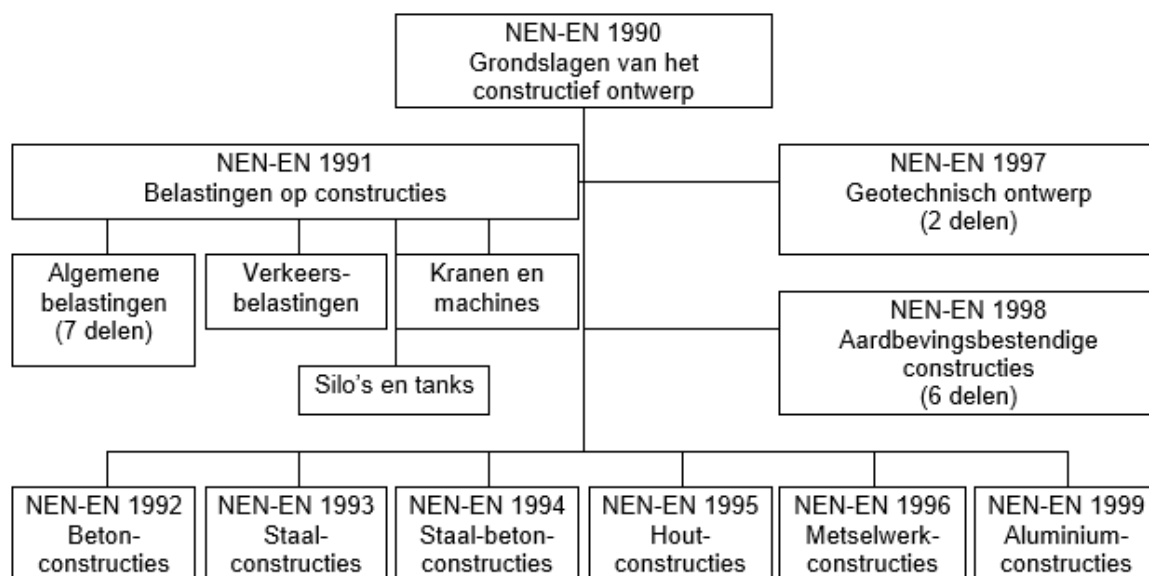
Er bestaan vele vaste, voorgeschreven stappen die dagelijks worden gebruikt. De stappen die verplichten op een bepaalde manier te handelen, wordt gezien als de regelgeving. Wanneer een activiteit volgens de stappen van de regelgeving wordt uitgevoerd, wordt gezegd dat de activiteit voldoet aan de norm.

Een norm wordt omschrijven als “een afspraak tussen belanghebbende partijen over een product, dienst of (bedrijfs)proces” maar het is geen wet. Het is bedoeld als hulpmiddel voor het uitvoeren van processen (methodiek) waardoor een bepaalde kwaliteit gewaarborgd wordt en de veiligheid ervan gegarandeerd kan worden. In principe kan afgeweken worden van de norm, als aan getoond kan worden dat het product nog wel de minimum veiligheid en kwaliteit.

In Nederland worden de normen door het Nederlands Normalisatie-instituut beheerd. Zij zijn ook verantwoordelijk voor het proces voor het onderzoek naar het opstellen nieuwe normen en het goedkeuren ervan. Nederland kent drie soorten voorschriften: de “in Nederland aanvaarde internationale (ISO, IEC), Europese (EN) en nationale normen (NEN)”. (NEN, 2017)

De termen *eisen*, *voorschriften*, *normen* en *regels* worden vaak door elkaar gebruikt omdat meestal op hetzelfde gedoeld wordt: het volgen van een aantal stappen zodat de kwaliteit van het product of actie gewaarborgd kan worden. Zo wordt in het Van Dale een *voorschrift* omschreven als: “Een aanwijzing waaraan gehouden kan worden” (Dale V. , 2017).

Voor alle sectoren bestaan deze eisen, voorschriften, normen en regels. Dit onderzoek zal zich verdiepen in deze regelgeving voor de civiele techniek, voorde bouw en voor beton(constructies). Alle activiteiten en producten binnen de civiele techniek moeten voldoen aan de NEN-EN 1990: “Grondslagen van het constructief ontwerp” ook wel Eurocode 0 (EC0) genoemd. In Figuur 2-3 staat een overzicht van alle Eurocodes. Het laatste nummer van de NEN-EN199# wordt gebruikt als benaming van de Eurocode #. Naast het moeten voldoen aan EC0, moet een constructie nog voldoen aan de Eurocode specifiek voor die constructie.

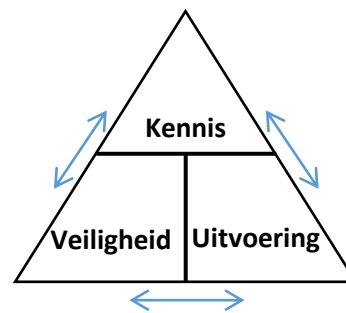


Figuur 2-3: Overzicht van alle Eurocodes (NEN, 2017).

De voorloper van Eurocode 2: Beton Constructies zijn de Voorschriften beton (VB). Deze stelde eisen aan (gewapend) beton met drie normen voor: ontwerp, technologie en uitvoering. Naast de NEN-EN (normen) bestaan er ook de CUR-aanbevelingen. Deze zijn bedoeld als communicatieve documenten en bevatten duidelijke afspraken om misverstanden en fouten te voorkomen om zo een kwalitatief goed bouwwerk op te leveren (CUR, 2017).

Wanneer innovatieve materialen toegepast willen worden, maar van deze nog geen regelgeving bestaat, kan dat op een andere manier gedaan worden. In de NEN-EN 1990 (Eurocode 0) staat in Hoofdstuk 5.2 “Door proeven ondersteund ontwerp” dat “Het (constructieve) ontwerp mag zijn gebaseerd op een combinatie van proeven en berekeningen.” In de Bijlage D “Door proeven ondersteund ontwerp” van de Eurocode 0 staat de informatie over het doen van deze verificatie proeven. In dit onderzoek zal steeds de term “design by testing” gebruikt worden wanneer op het door proeven ondersteund ontwerp gedoeld wordt. Dat wil zeggen dat materiaaleigenschappen van een materiaal, de (constructieve) veiligheid van het ontwerp of een nieuwe rekenmethode aangetoond moeten worden door middel van proeven. Sommige van deze proeven staan voorgeschreven in de norm (waaronder de Eurocodes), andere moeten door algemene kennis van mechanica en materialen bedacht worden. Het doel van de proeven is steeds hetzelfde: om met uitkomsten te komen waar mee gerekend kan worden en de constructieve veiligheid aangetoond kan worden. (CEN, 2011)

Een norm wordt opgesteld wanneer de belanghebbende een gestandaardiseerde, en dus algemeen geaccepteerde, regelgeving van een bepaald product of proces hebben afgesproken. Wanneer dit product of proces aan de hand van die norm uitgevoerd wordt, kan gezegd worden dat het zal voldoen aan bepaalde eisen en minimum veiligheid. De partijen die samenwerken voor het tot stand komen van normen zijn een kennisinstituut (bijv. universiteiten), een veiligheidsinstituut (bv. de overheid) en de uitvoering (e.g. een bedrijf als BAM). De samenhang van de partijen is geïllustreerd in Figuur 2-4.



Figuur 2-4: De drie partijen die moeten samenwerken om tot een regelgeving te komen.

Zoals de NEN voor Nederland bestaat, hebben andere landen ook een nationale vorm en/of toevoeging (Nationale Bijlage) van de algemene norm. Deze kunnen redelijk verschillen met de Nederlandse norm, of het kan een norm zijn die geheel niet bestaat in Nederland. Een voorbeeld hiervan is de norm voor Ultrahogesterktebeton (UHSB). Een norm voor het gebruik van dit innovatieve materiaal in constructies bestaat in onder andere Frankrijk, Japan en Australië (Lukovic, 2017). Deze norm is echter (nog) niet geaccepteerd in Nederland. Wel zijn er aanbevelingen voor het maken van bepaalde constructies in UHSB. Hierover is meer te lezen in hoofdstuk 5.

2.3 Beton

Beton is, na water, het meest gebruikte materiaal ter wereld. Met een jaarlijkse wereldwijde productie van 20 miljard ton (6 miljard m³) is het begrijpelijk dat het ook het meest gebruikte bouw materiaal is. Van deze 20 miljard ton wordt minder dan 1% in Nederland geproduceerd en gebruikt. Het is een materiaal dat al meerdere eeuwen bestaat en gebruikt wordt maar waarvan de laatste 100 jaar pas op moleculaire schaal meer bekend van is. (Centrum, Beton en milieu, 2017)

2.3.1 Samenstelling

Beton wordt gevormd door een samenstelling van verschillende componenten die door middel van een chemisch proces verharden. Beton bestaat uit de volgende componenten, ook wel de hoofdbestanddelen genoemd:

- Water
- Toeslagmateriaal
- Cement
- Hulpstoffen
- Vulstoffen

Water, toeslagmateriaal en cement zijn altijd aanwezig in beton en de hulp- en vulstoffen worden soms toegevoegd aan het beton(specie). De verhoudingen van deze hoofdbestanddelen kunnen worden gevarieerd. Dit kan zorgen voor verschillende betonsoorten met verschillende (materiaal)eigenschappen.

Wanneer de bestanddelen zijn gemengd in de gewenste verhouding, is het een vloeibaar mengsel. Dit mengsel wordt (beton)specie genoemd. Er wordt ook onderscheid gemaakt tussen beton en mortel. Beton heeft toeslagmateriaal met zowel diameters groter dan 4mm als kleiner dan 4mm. Mortel heeft alleen toeslagmateriaal met diameters kleiner dan 4mm. Het onderscheid tussen beton en mortel is belangrijk om te weten voor het 3DCP. In Tabel 2-1 staat een overzicht met de benaming van de materialen in de verschillende fasen en met verschillende groottes toeslagmateriaal.

Tabel 2-1: Benamingen en begrippen (Berg, 1998).

Samenstellende delen	Vloeibaar	Verhard
Cement + water *	Cementlijm of cementpasta	Cementsteen
Cement + water + toeslagmateriaal < 4 mm	Mortelspecie	Mortel
Cement + water + toeslagmateriaal < en > 4 mm	Betonspecie	(Cement)beton

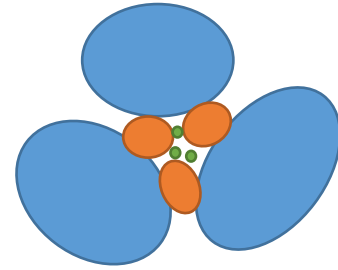
Hydratatie van beton

Het verharden van beton wordt ook wel het hydrateren van beton genoemd. Dit is een chemisch proces wat plaatsvindt en gedurende een tijdsverloop de betonspecie verhardt tot beton. Het water reageert met het cement waardoor bindingen vormen. Op deze manier wordt cementsteen gecreëerd. De cementsteen lijmt het toeslagmateriaal aan elkaar wat leidt tot een massief geheel: Beton. Door deze reactie ontstaat een (steenachtig) reactieproduct dat na de hydratatie niet meer oplost wanneer het in contact is met water. Dit is een reden dat beton waterdicht is en daardoor een breed toepassingsgebied heeft.

Toeslagmateriaal

Toeslagmateriaal is de verzamelnaam voor het materiaal in beton dat aan elkaar gelijmd wordt. Dit materiaal zijn korrels van bijvoorbeeld steen, grind of zand. Dit toeslagmateriaal wordt aan elkaar gelijmd door cementpasta (vloeibaar) dan wel cementsteen (verhard). De structuur van beton is deels afhankelijk van het toeslagmateriaal. Gewenst is dat het beton een zo compact mogelijke structuur heeft. Dit kan bereikt worden door toeslagmateriaal van verschillende korrelgrootte te gebruiken. In Figuur 2-5 is te zien hoe in de ruimte tussen de grootste korrels (blauw) kleinere korrels (oranje) passen, en in die ruimte passen nog kleine korrels (groen).

Tussen de kleinste korrels zitten ruimtes, poriën genoemd, die gevuld kunnen zijn met water of lucht. De hoeveelheid en opbouw van deze poriën wordt de poriestructuur genoemd. De hoeveelheid poriën heeft invloed op de porositeit, de mate van het doorlaten van vocht, van het materiaal. Daar naast hebben de kleine deeltjes een onderlinge aantrekking, een fysische binding genoemd. Hierbij geldt: hoe fijner de deeltjes hoe sterker de aantrekking is.



Figuur 2-5: Illustratie van de compacte structuur van beton.

Cement

Cement dient als het bindmiddel in beton. Het is een hydraulische stof wat betekent dat het na de hydratatie niet oplost in water (BetonLexicon, 2017). Drie voorbeelden van verschillende soorten cement die in Nederland toegepast worden zijn:

- Hoogovencement
- Portlandcement
- Portlandvliegascement

De massaverhouding tussen water en cement in specie wordt de watercementfactor, wcfactor in het kort, genoemd. Een klein verschil van de verhouding geeft een groot verschil in sterkte en kwaliteit van het beton. Een specie met een grotere hoeveelheid water heeft een hogere wcfactor. Als er meer water aanwezig is dan gehydrateerd kan worden met het cement (bijvoorbeeld $0,5 < wcf < 0,65$) blijven de extra watermoleculen aanwezig in het materiaal. Deze zorgen voor (meer) ruimte tussen de korrels. Door deze (extra) ruimte heeft het beton een lagere sterkte. Een beton met een te lage wcfactor heeft minder water om te hydrateren met het cement. Als het te laag ($wcf < 0,35$) is, zal er cement overblijven in het materiaal. Dit cement wordt “niet gehydrateerd cement” genoemd en zal dienen als toeslagmateriaal. Echter is de sterkte van dit niet gehydrateerd cement lager dan dat van het toeslagmateriaal. Hoe hoger de wcfactor is, hoe lager de sterkte van het beton zal zijn. (Berg, 1998)

Hulp- en vulstoffen

Hulpstoffen worden toegevoegd aan de betonspecie om een of meer eigenschappen van de (beton)specie of het verharde beton te beïnvloeden. Voorbeelden van aanpassingen op eigenschappen, te verkrijgen door hulpstoffen, zijn:

- Plastificeerder: beïnvloeding van de verwerkbaarheid van de specie;
- De verhardtijd beïnvloeden: vertragen of versnellen;
- Het verhogen van het luchtgehalte;
- De weerstand tegen fysische invloeden verhogen;
- Kleur geven aan het beton (kleurstoffen).

Vulstoffen worden toegevoegd ter aanvulling van de hoeveelheid fijn materiaal. Zij zorgen voor een (betere) korrelpakking wat de invloed heeft dat sterkte van het beton.

2.3.2 Eigenschappen

Beton is een heterogeen materiaal. Dit betekent dat de samenstelling van het beton op kleine schaal van plaats tot plaats verschilt (ongelijksoortig is) omdat het samengesteld is uit verschillende soorten elementen. De (materiaal)eigenschappen van beton worden bepaald door de eigenschappen van deze verschillende elementen: het toeslagmateriaal, de cementsteen en de hechting tussen de twee. Echter is het wel gewenst dat de hoofdbestanddelen een zo homogeen mogelijke massa vormen.

De materiaaleigenschappen, tijdens de hydratatie of na de uitharding, zijn kenmerken van het materiaal als de samenstelling, de druksterkte, de elasticiteitsmodulus (E-modulus) en het gewicht. Er

bestaan veel verschillende soorten beton omdat de materiaaleigenschappen aangepast kunnen worden door het veranderen van verhoudingen van de hoofdbestanddelen. Als het over de materiaaleigenschappen van beton gaat, moet eerst onderscheid gemaakt worden tussen de verschillende soorten beton die verschillen in een of meerdere materiaaleigenschappen. Omdat er veel verschillende materiaaleigenschappen en combinaties hiervan mogelijk zijn, wordt bij projecten een beton gekozen waarvan de eigenschappen voldoen aan de randvoorwaarden en eisen vanuit dat project.

De materiaaleigenschappen kunnen ook aan de verschillende fasen van beton gesteld worden. Er kunnen meerdere aanpassingen gemaakt worden die invloed hebben op het beton. Dit kan gedaan worden door het veranderen van de verhouding van de hoofdbestanddelen en door de toevoeging van hulp- en vulstoffen. De eisen die gesteld worden aan beton zijn afkomstig van onder andere de opdrachtgever, het ontwerp, het toepassingsgebied, de omgeving en de uitvoeringswijze.

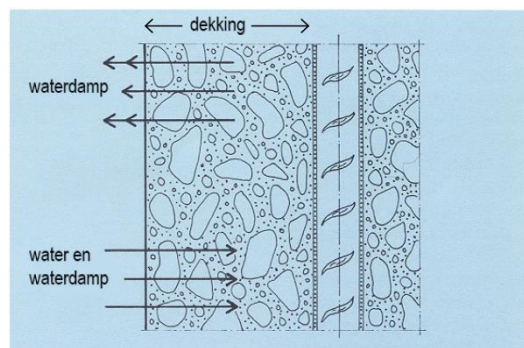
Enkele materiaaleigenschappen zijn altijd vereist van beton. Deze zijn de druksterkte en de duurzaamheid. Echter kan de grootte van beide aangepast worden wat ook resulteert in verschillende betonsoorten. De (druk)sterkteontwikkeling van beton betreft het sterker worden van beton in de loop van tijd. Dit komt doordat het hydratatieproces door gaat. De druksterkte is bepalend voor het draagvermogen van de betonconstructie en heeft invloed op andere mechanische eigenschappen. De mate van de sterkte wordt bepaald door drie onderdelen:

- De sterkteontwikkeling van cementsteen;
- De sterkte van het toeslagmateriaal;
- De aanhechtingsterkte tussen de cementsteen en het toeslagmateriaal.

Tevens zijn de keuze van het toeslagmateriaal en de watercementfactor afhankelijk van de gewenste druksterkte van het beton. Deze materiaaleigenschap wordt (in hoge mate) bepaald door de samenstelling van het beton. Andere materiaaleigenschappen zijn:

- Brandwerendheid
- Volumieke massa (onderscheid in: zwaar-, normaal- en licht beton)
- Permeabiliteit: doorlatendheid
- Porositeit
- Slijtweerstand
- Uiterlijk, waaronder kleur
- Vorstbestandheid

Sommige materiaaleigenschappen zijn echter niet aan te passen maar kunnen wel zorgen voor nadelige effecten. Eén van deze eigenschappen van beton is dat het vrijwel geen treksterkte heeft. Door deze eigenschap is de toepassing van wapening noodzakelijk. Echter kan corrosie van de wapening ontstaan wanneer het in contact komt met water en zuurstof. Corrosie is niet gewenst omdat het de hoeveelheid wapening dat constructief werkt zal verminderen. Om het ontstaan van corrosie te verminderen of uit te stellen moet een minimale afstand zitten tussen het beton oppervlaken de eerste wapeningsstaal. Dit wordt de (wapenings)dekking



Figuur 2-6: Dekking van het wapeningsstaal in een betonconstructie. (Lexicon, 2017)

genoemd en is afhankelijk van het milieu waarin de betonconstructie zich bevindt (zie Figuur 2-8). De dekking van wapening is geïllustreerd in Figuur 2-6.

Twee andere nadelige materiaaleigenschappen zijn krimp en kruip. Beiden zorgen voor het verkorten van het beton wat kan resulteren in scheuren in het beton. Tijdens het uitharden van beton kunnen plastische, uitdrogings- en inwendige krimp ontstaan. Deze verschillende soorten krimp kunnen optreden tijdens de hydratatie van beton doordat het watergehalte in het beton verminderd. Krimp kan geminimaliseerd worden door te zorgen dat het beton water vasthoudt tijdens het uitharden. Deze activiteit wordt nabehandelen genoemd.

Kruip is een blijvende vervorming die ontstaat door een constante belasting op het beton en zal toenemen in de loop van tijd. Om vooraf de hoeveelheid kruip van een constructie te weten, kunnen testen worden uitgevoerd op het materiaal. Hierdoor kan de kruip van de betonsoort bepaald worden zodat er rekening mee gehouden kan worden bij het ontwerp.

2.3.3 Groene sterkte

Groene sterkte is een speciale eigenschap van beton- en mortelspecie die (beton)specie kan hebben na het mengen en verdichten. Door een aantrekkingskracht die ontstaat tussen de watermoleculen onderling en tussen de watermoleculen en een vast oppervlak krijgt de specie een zekere sterkte: de groene sterkte. Door deze sterkte heeft de specie een samenhang waardoor een mal niet noodzakelijk is. De mate van de groene sterkte is afhankelijk van de wcfactor en de fijnheid van (toeslag)materiaal. Zolang de ruimte tussen de korrels toeslagmateriaal niet volledig verzadigd is, kunnen de korrels naar elkaar getrokken worden. Hoe meer bevochtigd oppervlak, hoe hoger de totale aantrekkingskracht is en hoe fijner het materiaal, hoe hoger de groene sterkte. (Berg, 1998)

Een voorbeeld van het gebruik van groene sterkte van (beton)specie in de uitvoering is een Slipformpaver. Dit is een machine die fungeert als glijdend bekisting die rotondebanden en betonbanden in-situ plaatst(soort 'printen'). (Betonfiguratie, 2017)



Figuur 2-7: Slipformpaver kan betonbanden maken doordat de specie een hoge groene sterkte kan hebben. (Van-Huele, 2017)

2.3.4 Duurzaamheid

Wanneer de term duurzaamheid wordt gebruikt, kan bedoeld worden op twee verschillende definities. In het Engels wordt hier wel onderscheid in gemaakt door het gebruik van de termen durability en sustainability. Het eerste begrip doelt op de lengte van de levensduur die een betonconstructie kan hebben (durability). Dit is meestal wat bedoeld wordt wanneer gesproken wordt over de duurzaamheid van beton. Deze levensduur wordt bepaald door de bestandheid van het beton en de wapening tegen chemische en fysisch-chemische invloeden. Er bestaan meerdere aspecten die de levensduur van een betonconstructie kunnen waarborgen. Deze kunnen tijdens verschillende fase (ontwerp-, uitvoerings- en nazorgfase) van een betonconstructie van toepassing zijn. Drie veel gebruikte aspecten zijn:

- *Poriestructuur*: Hoe dichter dit is hoe meer het de indringing van water beperkt;
- *Betondekking*: afhankelijk van de milieuklasse (zie Figuur 2-8), voorgeschreven door EC;
- *Nabehandelen*: Dit goed doen zorgt voor betere kwaliteit beton.

De grootte van het aandeel van de aspecten op de duurzaamheid van het beton wordt bepaald door de duurzaamheidsklasse, ook wel milieuklasse. De milieuklasse maakt onderscheid tussen de

aantastingsmechanisme (van de omgeving) en de omgeving (bv. nat, dooizout) waar de constructie zich in bevindt. De combinatie van deze twee geeft de klasse. Een tabel van de verschillende milieuklasse zoals die in de Eurocode staan is in Figuur 2-8 weergegeven. Bij elke milieuklasse passen andere maatregelen om de kwaliteit van betonconstructies te waarborgen.

► Milieuklassen (op te geven door constructeur)			
NB: De milieuklassen stellen eisen aan de betonsamenstelling. Daardoor kunnen beoogde sterkteklassen worden overschreden.			
Aantastingsmechanisme		Klasse	Omgeving
Geen aantasting	X0 (0 = 'zero risk')	X0	Voor beton zonder wapening of ingesloten metalen behalve bij vorst-dooi of chemische aantasting
	Geen risico op corrosie of aantasting		
Aantasting wapening	XC (C = 'carbonatation') Corrosie ingeleid door carbonatatie	XC1	Droog of blijvend nat
		XC2	Nat, zelden droog
		XC3	Matige vochtigheid
		XC4	Wisselend nat en droog
	XD (D = 'deicing salts') Corrosie ingeleid door chloriden, anders dan afkomstig uit zeewater	XD1	Matige vochtigheid
		XD2	Nat, zelden droog
		XD3 ¹⁾	Wisselend nat en droog
	XS (S = 'seawater') Corrosie ingeleid door chloriden uit zeewater	XS1	Zouthoudende lucht
		XS2 ¹⁾	Blijvend onder zeewater
		XS3 ¹⁾	Getijde-, spat- en stuifzone
Aantasting beton	XF (F = 'frost') Aantasting door vorst/ dooiwisselingen met of zonder dooizouten	XF1	Niet-volledig verzadigd met water, zonder dooizouten
		XF2 ¹⁾	Niet-volledig verzadigd met water, met dooizouten
		XF3	Verzadigd met water, zonder dooizouten
		XF4 ¹⁾	Verzadigd met water, met dooizouten of zeewater
	XA (A = 'aggressive') Chemische aantasting	XA1	Zwak agressief chemisch milieu
		XA2	Matig agressief chemisch milieu
		XA3 ¹⁾	Sterk agressief chemisch milieu

Figuur 2-8: De verschillende milieuklasse, met aanduiding en omschrijving, volgens de NEN-EN-206-1/8005.

Het andere begrip voor duurzaamheid heeft betrekking op de milieuvriendelijk (sustainability) van beton. Dit heeft betrekking op de mate van aantasting op het milieu. Dit kan zijn door de hoeveelheid energie- of materiaalgebruik ervan. Met oog van de milieuvriendelijkheid van beton wordt gekeken naar het verminderen van de hoeveelheid grondstoffen (zowel materialen als voor energiegebruik) of het gebruik van gerecyclede grondstoffen voor een gedeelte van het materiaal (circulaire economie).

CO₂-footprint

De CO₂-uitstoot wordt gebruikt als indicator voor het broeikaseffect, en dus de milieubelasting. Bij het Akkoord van Parijs (Nations, 2017) is besloten om de (jaarlijkse) door de mens veroorzaakte CO₂-uitstoot te verminderen. Doordat bij de productie van beton ongeveer 5% van de wereldwijde CO₂ vrijkomt, probeert men ook in de bouw de CO₂-uitstoot te verlagen. Dit wordt gedaan door de CO₂-footprint (de impact op het milieu) van gebouwen, kunstwerken en (bouw)materialen te verlagen. (Centrum, Beton en milieu, 2017)

Er zijn vele ideeën om de CO₂-uitstoot van beton te verminderen waarbij meerdere ideeën veel potentie lijken te hebben. Omdat er veel beton geproduceerd wordt zal een kleine aanpassing van de CO₂-footprint een grote impact hebben voor de totale reductie van CO₂. Dit is waarschijnlijk een van de redenen dat er de laatste jaren veel nieuwe materialen of aanpassingen op beton zijn bedacht. Een voorbeeld van een aanpassing op beton is het optimaliseren van de korrelpakking. Hierdoor zal minder materiaal noodzakelijk zijn omdat het materiaal sterker is. Ook wordt het materiaal door de optimalisatie van de korrelverpakking minder doordringbaarheid waardoor het een langere levensduur zal hebben. Dit zorgt voor een duurzamer materiaal op zowel sustainability als durability vlak. Een andere manier waardoor materiaal bespaard kan worden is het 3D printen van beton. Bij het 3DCP wordt alleen beton geprint op de locaties waar dat constructief noodzakelijk is.

Beton is vaak, op meerdere vlakken, het interessantste constructiemateriaal. Dit komt voornamelijk doordat het makkelijk te verkrijgen en gebruiken is, het een duurzaam (levensduur) materiaal is en omdat er al jarenlange ervaring van het gebruik ervan is. Echter is beton niet meer altijd de beste oplossing. Om verschillende materialen met elkaar te kunnen vergelijken moet een LCA (Levenscyclusanalyse) worden uitgevoerd. Hierdoor kan het beste materiaal voor een bepaalde toepassing gekozen worden.

2.4 3D beton printen (3DCP)

Voor het drie dimensionaal beton printen wordt de afkorting 3DCP gebruikt wat staat voor *3D concrete printing* (EN). In het rest van het rapport zal steeds 3DCP genoemd worden wanneer 'het 3D printen van beton', 'het 3D geprinte beton' of een variatie hiervan bedoeld wordt.

Het 3D printen van beton is interessant om te gebruiken omdat het meerdere voordelen heeft ten opzichte van de conventionele manier van beton storten. Een aantal van deze voordelen zijn:

- Minder materiaal gebruikt: wordt alleen geplaatst (geprint) op de locaties waar dat constructief nodig is of design technisch gewenst is;
- Het zowel prefab als in-situ kunnen printen van (elementen van) constructies;
- Een geautomatiseerde aansturing: Besparing van tijd en menskracht
- Veel opties mogelijk voor het ontwerpen van een constructie zoals het beton in motieven of ingewikkelde vormen printen en beton verschillende texturen geven;

Om het traject van het project van de 3DCP fietsbrug te kunnen volgen, is eerst de methode onderzocht. Hier worden enkele definities gegeven, de verschillende onderdelen van het 3DCP benoemd en enkele randvoorwaarden van het printen besproken. Bij het 3DCP zijn de volgende onderdelen van belang (behandeld in hoofdstuk 2.3):

- Het begrip duurzaamheid;
- De samenstelling van het beton(mortel);
- De materiaaleigenschappen: groende sterkte, de trek- en druksterkte, krimp en kruip

Het 3DCP wordt uit gelegd aan de hand van de werking van een 3DC printer. De printer die omschreven wordt is de 3DC printer van de TU/e en wordt tevens gebruikt om de 3DCP fietsbrug van BAM te printen. En foto van deze printer op zijn locatie in het lab van de TU/e is in Figuur 2-9te zien. De totstandkoming van de printer is omschreven in hoofdstuk 3.2.1.

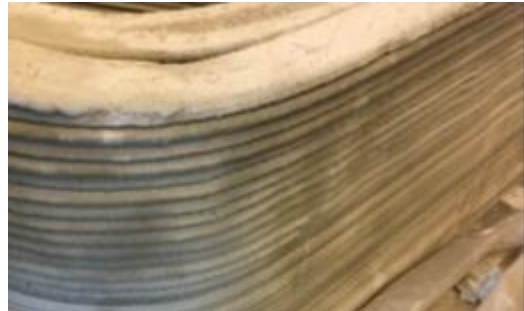


Figuur 2-9: Een foto van de 3D beton printer aan de slag, in het Lab van de TU/e (Club, 2017).

Voor het 3DCP zijn verschillend onderdelen nodig:

- Printerarm en -frame;
- Computer als aansturingssysteem;
- Een pomp en een slang die de pomp met de nozzel verbindt;
- Nozzel (printerkop, deze bepaald de breedte van printlaag);
- Printbed, kan verschillende vormen en groottes aannemen afhankelijk van het element;
- Printmortel, incl. versneller (hulpstof) die de groene sterkte van de mortel kan beïnvloeden;
- Materieel voor het verplaatsen van verharde elementen.

De printerarm en -frame zijn zo gebouwd dat het bereik van de printer 3-dimensionaal is: in de x-, de y-, en de z-richting. Door het 3D bereik zijner vele mogelijkheden voor het ontwerp en door het aansturingssysteem kan het printen een geautomatiseerd systeem zijn. De printmortel wordt automatisch in de pomp met de gewenste verhouding water en versneller gemengd waarna het via de slang naar de nozzel wordt gepompt. De breedte van de printlaag kan afgesteld worden door een combinatie van de breedte van de nozzel en de printsnelheid. Hier moet wel opgelet worden dat het verhogen van de printsnelheid meer wrijving van de printmortel in de slang veroorzaakt. Daardoor zal de temperatuur van het mortel verhogen wat zorgt voor een versnelde uitharding. Het voortijdig uitharden in de slang verlaagt de printbaarheid. De printsnelheid en het ontwerp van de elementen moeten gelinkt worden aan de uithardingstijd van de printmortel. Gewenst is dat de lagen mortel gezamenlijk een homogeen materiaal vormen. Dit betekent dat het een geheel moet zijn 'vanbinnen' en volledig aan elkaar gehecht, zo dat de lagen eventueel alleen zichtbaar zijn aan de 'buitenzijde'. De laagjes van het printmortel zijn duidelijk te zien in Figuur 2-10.



Figuur 2-10: De laagjes printmortel.

Door het gebruik van deze techniek ontstaat een nieuw materiaal. Omdat het niet bekend is hoe het materiaal zich gedraagt, moet het op verschillende onderdelen getest worden. Ook is er weinig tot geen ervaring met het uitvoeren van de techniek. Daardoor zal het personeel opgeleid moeten worden. Dan kan de theoretische kennis op een goede wijze in de praktijk (uitvoering) wordt toegepast. Bij alles wat gedaan wordt moet onthouden worden dat veiligheid van zowel de gebruiker van de constructie als de bouwers ervan voorop staat.

De afgelopen paar jaar is door meerdere partijen onderzoek gedaan naar het 3D printen van beton en het toepassen ervan. Er zijn meerdere artikelen over het 3DCP geschreven in vakbladen (als Cement en Betoniek) en op websites als die van het Cement&BetonCentrum en de Betonvereniging. Ook de TU/e heeft meerdere onderzoeken gedaan. Twee van deze onderzoeken worden gebruikt bij zowel dit afstudeeronderzoek als het 3DCP fietsbrug project. De onderzoeken hebben betrekking op het testen van de materiaaleigenschappen van de printmortel. Deze onderzoeken zijn:

- Literature review: "Printable Concrete" – Jasper van Alphen en Coert Doomen
- Graduation Thesis: "The effect of layered manufacturing on the strength properties of printable concrete" – Coert Doomen

3. 3DCP fietsbrug

BAM zoekt naar een manier om innovatieve materialen en technieken waarvan vaak nog geen geaccepteerde regelgeving voor is, toe te kunnen passen in projecten. Een dergelijke manier, dat kan dienen als leidraad bij het toepassen van deze innovatieve materialen en technieken, wordt opgesteld aan de hand van het meelopen met een pilotproject. Dit pilotproject wordt gevolgd om ervaring op te doen met de toepassing van een (innovatief) constructiemateriaal in een bouwproject. Met deze ervaring kan de vorm en inhoud van het te ontwerpen systeem (protocol) bedacht worden. In dit pilotproject wordt het nieuwe materiaal 3DCP voor het eerst constructief toegepast bij een fietsbrug. De fietsbrug maakt deel uit van een groter project van BAM genaamd Gemert Noord-Om.

Er kan veel geleerd worden door het doorlopen van het traject van dit project en daarbij helpen meedenken aan bepaalde stappen. Hierbij kan de interne communicatie ervaren worden en daarbij kan gezien worden hoe verschillende mogelijkheden, keuzes en stappen worden afgewogen.

In de volgende hoofdstukken wordt eerst een omschrijving gemaakt van het project Gemert Noord-Om en het tot stand komen van het deelproject de 3DCP fietsbrug. Daarna wordt het traject van de 3DCP fietsbrug doorgelopen tot en met het testen van de schaal constructie. Drie onderdelen van het traject worden verder uitgewerkt, namelijk:

- De uitvoering van de proeven (functionele-, uitvoerings- en verificatie proeven)
- Het opstellen van het testprogramma van de verificatie proef
- De evaluatie van het geheel.

3.1 Project Gemert Noord-Om

In 2016 heeft BAM de tender gewonnen voor het project Gemert Noord-Om. Dit project betreft de aanleg van een nieuwe randweg ten noorden van Gemert, Noord-Brabant. Het project bevat een drietal rotondes, een fietsviaduct over de Noord-Om en een fietsbrug over de Peelse Loop. De vraag van de opdrachtgever, Provincie Noord-Brabant, voor de toepassing van innovatieve materialen binnen het project maakt het mogelijk dat de fietsbrug over de Peelse Loop een pilotproject wordt voor het 3DCP. In Figuur 3-1 is een schets (op een satellietkaart) van de Noord-Om te zien. De fietsbrug over de Peelse Loop ten hoogte van de Lieve Vrouwensteeg, is aangegeven door de gele vierkant.



Figuur 3-1: In de afbeelding is de Noord-Om geschetst op een satellietfoto van Gemert. De drie rotondes zijn goed te zien. (Noord-Brabant, N605 Gemert Noord-Om, 2017)

In Figuur 3-2 is beter te zien waar de brug komt te liggen. Links is de Autocad ontwerptekening en rechts is de satellietfoto van de locatie van de fietsbrug te zien. De fietsbrug is gemarkeerd met de oranje vierkanten.



Figuur 3-2: De 3DCP fietsbrug over de Peelse Loop, gemarkeerd met een oranje vierkant. Links: Autocad tekening afkomstig van het Project Gemert Noord-Om. Rechts: GoogleMaps.

3.2 3DCP fietsbrug

Een korte achtergrond van het 3DCP wordt gegeven en het tot stand komen van de keuze, om van de fietsbrug een pilotproject voor het 3DCP te maken, wordt beschreven. Vervolgens wordt het traject van de 3DCP fietsbrug gegeven. Hierbij worden zowel de uitvoerings-, functionele – als de verificatie proef belicht. Voor de verificatie proef wordt (ook) het ontwerpen van het testprogramma omschreven. Aan het einde wordt een evaluatie gemaakt van het traject waaraan meegeholpen is.

3.2.1 Inleiding

De techniek van het 3D printen van kunststoffen wordt al meerdere jaren uitgevoerd en meeste mensen kennen het begrip. Hierdoor kwam de gedachte bij meerdere mensen die werken met beton: waarom niet beton 3D printen? Een van deze personen was Prof. ir. Theo Salet. Hij is werkzaam bij het ingenieursbureau Witteveen + Bos en is Professor Structural Design: Concrete Structures voor de Bachelor en Master Bouwkunde aan de TU/e. Hij interesseerde zich zo in het idee van het 3D printen van beton dat hij besloot het idee door middel van onderzoeken voort te zetten. In 2015 besloot Dhr. T. Salet het 3DCP in de praktijk te gaan toepassen en met de hulp van studenten werd er een 3D-printer gebouwd in het laboratorium van de TU/e. Hierdoor ontstond de mogelijkheid om het printen met beton te testen en om profstukken op verschillende materiaaleigenschappen te testen. (Salet, 2017)

Het budget van de TU/e was voldoende om 50% van dit (lopende) onderzoek te financieren. Om de andere helft van het onderzoek te financieren ging Dhr. T. Salet een partnerschap aan met 10 partijen. Deze partners wilde investeren in en hebben baat bij het meewerken aan zo een innovatief onderzoek. Eén van deze partners is BAM, met Ir. Johan Bolhuis als verantwoordelijke vanuit het bedrijf. (Salet, 2017).

Dhr. J. Bolhuis is als Integraal Ontwerpmanager bij BAM Infraconsult betrokken bij verschillende projecten waaronder bij de tenderfase van het Project Gemert Noord-Om. Hierbij was hij aan de ene kant betrokken bij een onderzoek naar de toepassing van een innovatief materiaal (3DCP, TU/e) en aan de andere kant bij een project waar gevraagd werd om de toepassing van innovatieve materialen. Mede door Dhr. J. Bolhuis werden de twee aan elkaar gekoppeld, waardoor het toepassen van 3DCP als constructief materiaal bij een fietsbrug tot stand kwam (Visserman, 2017). Met de opdrachtgever was vooraf afgesproken dat alles gedaan zou worden om de mogelijkheden van een 3DCP fietsbrug te onderzoeken. Maar als uit de “design by testing” zou blijken dat het niet een werkende toepassing

zou zijn, zou de opdrachtgever het toestaan dat een standaard fietsbrug in een conventioneel materiaal geplaatst zou worden. Op deze onderdelen is geschatte risico van dit pilotproject dusdanig laag dat zowel BAM als de opdrachtgever, de gok wilde wagen. (Bolhuis, 2017)

Wanneer het project succesvol afgerond wordt, zal deze fietsbrug de eerste volledige constructief 3D-geprinte betonnen en voorgespannen fietsbrug ter wereld zijn!

In Figuur 3-3 wordt een tijdlijn van het 3DCP in Nederland gegeven betreffend het 3DCP onderzoek van Prof. ir. T. Salet en de 3DCP fietsbrug. Een dossier van het 3DCP internationaal gezien is opgesteld door VOBn (VOBN, Dossier: 3D-betonprinten, 2017). Hier worden ook andere pilotprojecten en overige prestaties in dit vakgebied genoemd.

2014-2015		- Idee 3DCP, Nederlandse innovatie - 3D beton printer gebouwd op TU/e; o.l.v. Theo Salet
2016	Begin	- Theo Salet zoekt partners voor onderzoek: 10 voor 50% van de totale financiering onderzoek
	Juni	- Project Gemert Noord-Om in tenderfase: vraag naar innovatieve toepassingen (van materialen) - Project Gemert Noord-Om gegund aan BAM: 3DCP fietsbrug in Lieve Vrouwesteeg van start
	Juli - dec	- Haalbaarheidsstudie 3DCP voor fietsbrug - Constructief ontwerp gemaakt door constructeur (Witteveen +Bos)
2017	Jan - feb	- Kick-off project 3DCP fietsbrug met BAM, TU/e (o.l.v. Theo Salet) en enkele partners
	Maart	- Bedenken testprogramma voor constructieve proeven - Proeven en bekijken opties van het printen, de printmortel, de pomp, de nozzel etc.
	April	- Printen elementen van schaal 1:2 brug
	Mei	- Assembleren en voorspannen schaal 1:2 brug. Hiervoor ook proeven doen op uitvoering
	Juni	- Onthulling project 3DCP - Constructief beproeven van schaalbrug
	Juli - Aug	- Evaluatie van constructieve proef op schaalbrug --> GO- NO GO voor definitievebrug - Elementen voor definitieve brug printen
	Sept	- Vervoeren, assembleren en voorspannen elementen van definitieve brug
	Okt	- Opleveren Project 3DCP: 1e volledig constructieve 3D beton geprinte fietsbrug

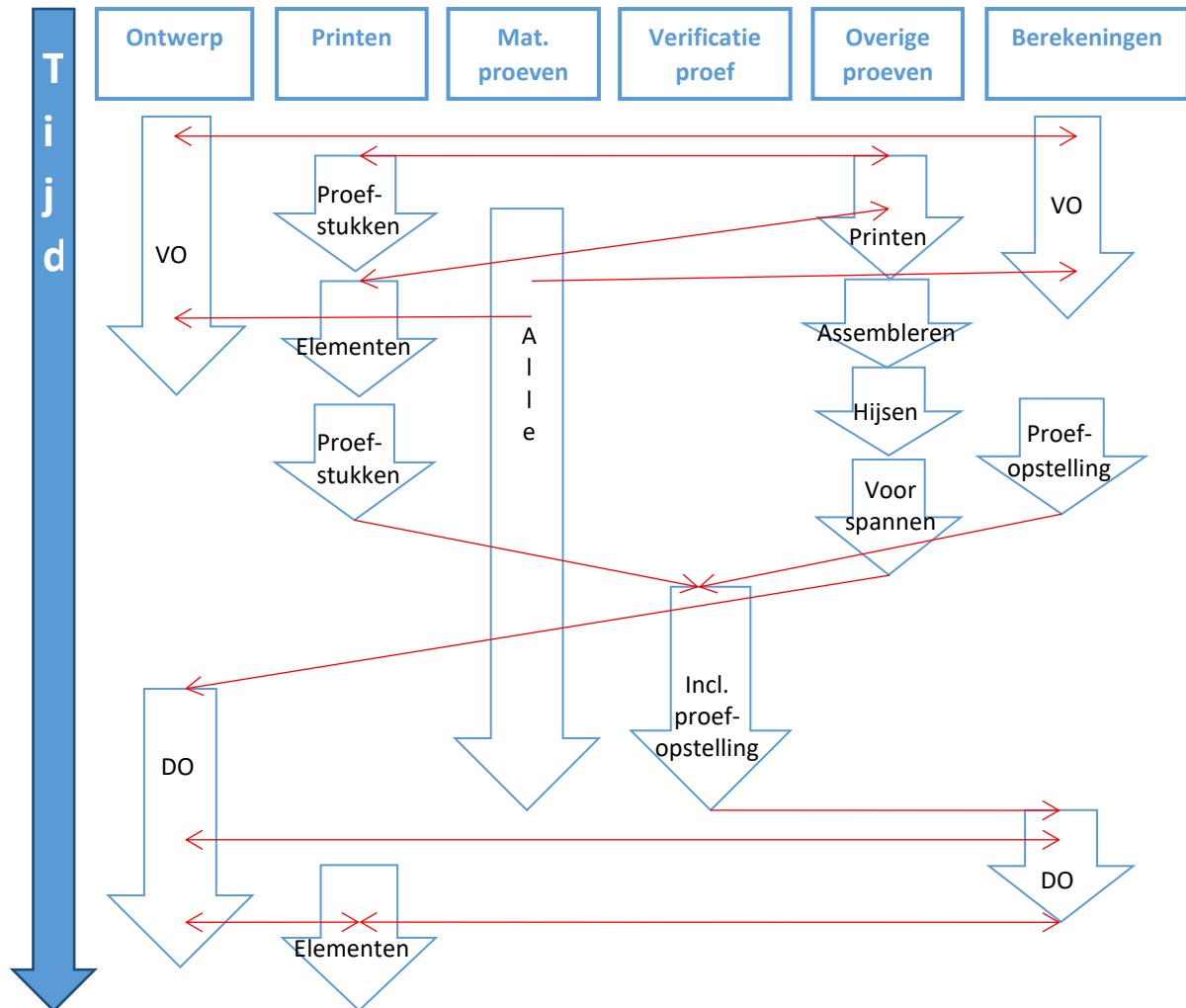
Figuur 3-3: Tijdlijn van het verloop van het project 3DCP fietsbrug.

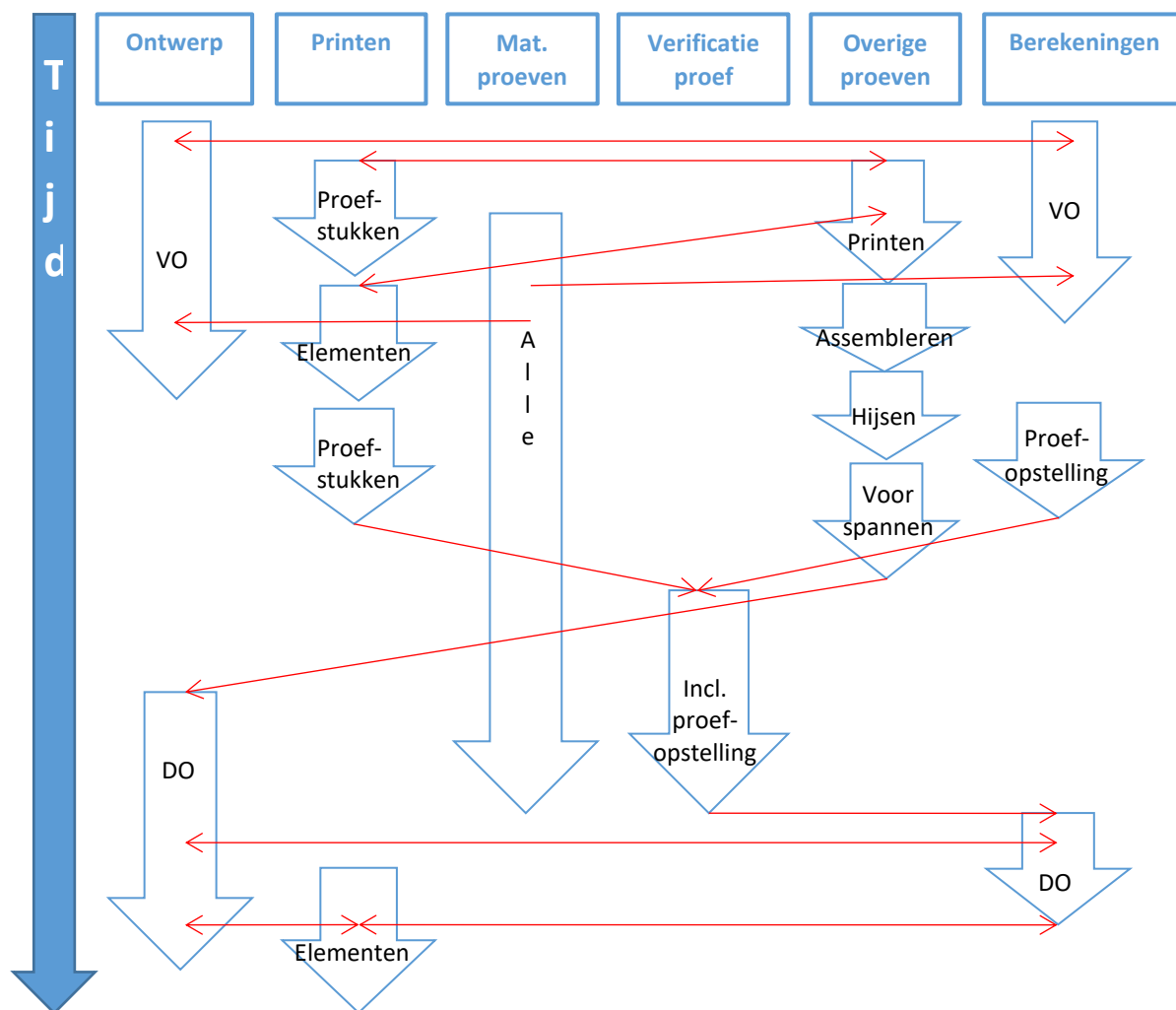
3.2.2 Traject

Alle activiteiten die plaatsvonden en de beslissingen die werden gemaakt hadden allemaal als doel om aan het einde van het traject een 3DCP fietsbrug op te leveren. Het traject dat hierbij doorlopen is, legt de nadruk op de heeft onderdelen die de constructieve veiligheid van het materiaal en het ontwerp aantonen. Het traject kan opgedeeld worden in de volgende onderdelen:

- 1 Het ontwerp, incl. dat van de doorsnede
- 2 Het printen van beton, incl. proeven die hierbij horen
- 3 De proeven met betrekking tot het materiaal
- 4 De proeven met betrekking tot de uitvoering
- 5 De proeven ten behoeve van de verificatie van de berekening, op schaalbrug
- 6 Het maken en opleveren van de definitieve brug

De bovenstaande zes activiteiten liepen allemaal enigszins gelijktijdig en hadden invloed op elkaar en op de keuzes die gemaakt moesten worden. Om het traject van het 3DCP van de fietsbrug overzichtelijker te maken wordt eerst een schets (zie Figuur 3-4) van de het tijdsverloop gegeven. De weer-war van de activiteiten is goed te zien door deze schets. Met VO wordt het ontwerp van de schaal 1:3 dan wel 1:2 brug bedoeld en met DO het ontwerp voor de definitieve brug.



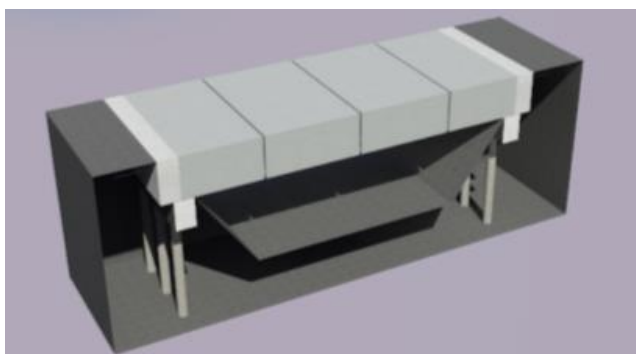


Figuur 3-4: Globale tijdsindicatie van het traject van het Project 3DCP fietsbrug. De rode lijnen geven de invloeden aan die de activiteiten onderling op elkaar hebben.

In Figuur 3-4 is te zien hoe alle verschillende processen zowel parallel lopen als dat ze invloed hebben op elkaar. Hierdoor vormen een aantal van de activiteiten een iteratief proces (zie hoofdstuk 2.1). Er worden bijvoorbeeld met de eigenschappen van het VO-ontwerp berekeningen gemaakt waarvan de uitkomsten teruggekoppeld naar het ontwerp. De rode lijnen schematiseren globaal het circulaire proces van het project. Op deze manier wordt het ontwerp van de brug steeds verder geoptimaliseerd waarvan de keuze van onder andere de afmetingen ondersteund worden door berekeningen. Deze globale tijdsindicatie van het traject van het 3DCP wordt in hoofdstuk 4 vergeleken met die van een standaard project. Het vormt een basis voor het opstellen van een protocol doordat het traject van het pilotproject door de schets goed wordt weergegeven.

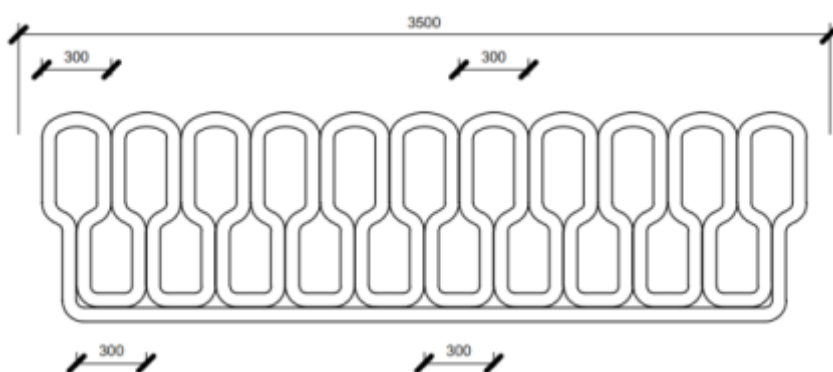
Ontwerp definitieve brug

De fietsbrug zal een overspanning van 8,00 m en een functionele breedte van 3,50 m hebben. De fietsbrug dient te worden ontworpen conform “Eurocode 1 ten behoeve van fiets en/of voetgangers, waarbij rekening moet worden gehouden met een dienstvoertuig. Gevolgklasse 1” (Noord-Brabant, Vraagspecificatie deel 1 - Producteisen, 2016). Ook moet de brug een gelijkmatig verdeelde belasting (q_{fk}) van 5,0 kN/m² (minimum) kunnen verdragen. In de Figuur 3-5 is een schets te zien van de fietsbrug over de Peelse Loop met landhoofden en funderingspalen. Goed te zien is dat de fietsbrug uit verschillende elementen van dezelfde grootte zal bestaan. (Laagland, 2017)



Figuur 3-5: Een schets van de 3DCP fietsbrug over de Peelse Loop, Gemert. (Laagland, 2017)

Het ontwerp van de fietsbrug is gemaakt door de constructeurs van Witteveen + Bos (H. Laagland en M. Dijk). Uitgaand van de mogelijkheden van de printer en met de wens zo min mogelijk materiaal te gebruiken is tot een ontwerp van de doorsnede gekomen. Om het ontwerpen en het berekenen van de doorsnede enigszins te automatiseren is hiervoor een model opgesteld. Het (Excel)model, maakte het mogelijk om een schalingsfactor op te stellen. Deze schalingsfactor is nodig gezien een testbrug op schaal is ontworpen en de uitkomsten van de proeven voor de schaalbrug specifiek zijn. In het model kunnen zowel de doorsnede als de (schaal)brug bestaan uit meerdere elementen theoretisch getoetst worden. De berekeningen werden gemaakt met behulp van de bestaande rekenregels en methodes voor beton in onder andere de Eurocodes. De definitieve brug zal bestaan uit een aantal elementen (eerste idee was zes) met gelijke doorsnede bestaand uit één continu losvorming patroon zoals weergegeven in Figuur 3-6. Een element zal bestaan uit meerdere laagjes van de mortel dat steeds op dezelfde locatie neergelegd wordt door de printerarm van de 3DC printer.



Figuur 3-6: Ontwerp van de doorsnede van elementen van brug schaal 1:1. (Laagland, 2017).

Het aantal elementen is zowel afhankelijk van de printmortel als van de printer. Als de groene sterkte (zie hoofdstuk 2.3.3) van de mortel hoger ligt kunnen meer laagjes printmortel geprint worden. Daardoor kunnen de elementen langer zijn en er zullen minder elementen noodzakelijk zijn. Het doel is een zo min mogelijk aantal elementen te hebben doordat zo min mogelijk gelijmd hoeft te worden

en dus zo min mogelijk voegen ontstaan. Maar de elementen moeten niet te groot worden zodat ze nog wel verplaatsbaar en vervoerbaar zijn (zowel in het lab als op de openbare weg). Een risico bij te grote elementen kan zijn dat er te veel laagjes geprint moeten worden en dat deze niet een homogeen materiaal op leveren. Een risico dat bestaat bij kleine elementen is dat er voegen ontstaan die gelijkmoeten worden. Uitgegaan wordt dat de voegen de zwakste plek zijn van de brug. Ook moeten dan veel elementen secuur afgevlakt worden (zie kop: Printbed). Verder bestaan er risico's bij het lijmen van de voegen als het niet goed lijmen, het niet goed afwerken of elementen verkeerd lijmen. Tevens, hoe meer voegen, des te meer keren dat iets fout kan gaan. Er moet dus een goede verhouding tussen de verschillende eigenschappen gevonden of gekozen worden.

Ontwerp Schaalbrug, 1:3 versus 1:2

Door de eis van de Eurocode om aan 'design by testing' (zie 2.2) te houden moet voor dit project een brug getest moeten worden zoals die uiteindelijk opgeleverd zal worden. Door de grootte van de definitieve brug is daarom gekozen om een brug op schaal te testen. In eerste instantie werd gedacht aan een brug op schaal 1:3 van de definitieve. Deze brug zou $\frac{1}{3}$ van de hoogte, de breedte en de lengte worden. Ook zou de printlaagbreedte $\frac{1}{3}$ moeten worden en er zou een schaal $\frac{1}{3}$ voor de lussen van de doorsnede gevonden moeten worden. Echter bleek het niet haalbaar naar $\frac{1}{3}$ van de printlaagbreedte te schalen. Bij het testen met beton printen op $\frac{1}{3}$ van de printlaagbreedte en op $\frac{1}{3}$ van de elementen ondervond de mortel te veel wrijving waardoor er brokvorming ontstond. Tevens bleek de printerarm niet de vereiste hoeken van de lussenvormige doorsnede van de schaal 1:3 element te kunnen halen. Door deze proeven werd besloten een schaal 1:2 brug te maken en deze te gebruiken als testbrug. Deze testbrug bestaat uit zes elementen met elke een breedte van 1701mm, een hoogte van 433mm en een lengte van 50 printlagen hebben.

De proeven die op de schaalbrug worden uitgevoerd zijn ten behoeve van de verificatie van de berekeningen. Voordat deze verificatie proeven uitgevoerd konden worden moesten er eerste andere proeven gedaan worden en moest een volledig testprogramma worden opgesteld. Deze andere proeven waren zowel materiaalproeven als proeven van de uitvoering van verschillende aspecten. Er waren eerder al materiaalproeven gedaan op dezelfde printmortel als degene gebruikt bij het project. Echter om er zeker te zijn van de gegevens van het materiaal dat gebruikt zou worden bij het project, is besloten opnieuw proeven te doen ten behoeve van de verificatie van de materiaaleigenschappen.

Het 3D printen van beton

Met behulp van foto's van de activiteiten, het materieel en de elementen wordt het proces van de verschillende stappen omschreven. Hierbij wordt gekeken welke beslissingen gemaakt worden, welke problemen zich voordoen en hoe deze opgelost worden. In Figuur 3-7 zijn de geleverde zakken 'droog' mengsel te zien dat gebruikt wordt. In Figuur 3-9 en Figuur 3-8 is de pomp te zien die het 'droge' mengsel mengt met de gewenste hoeveelheid water en versneller (meer over de versneller onder kop: Mortelsamenstelling) om de printmortel te krijgen.



Figuur 3-7: Geleverde zakken 'droog' mengsel voor het maken van de printmortel.

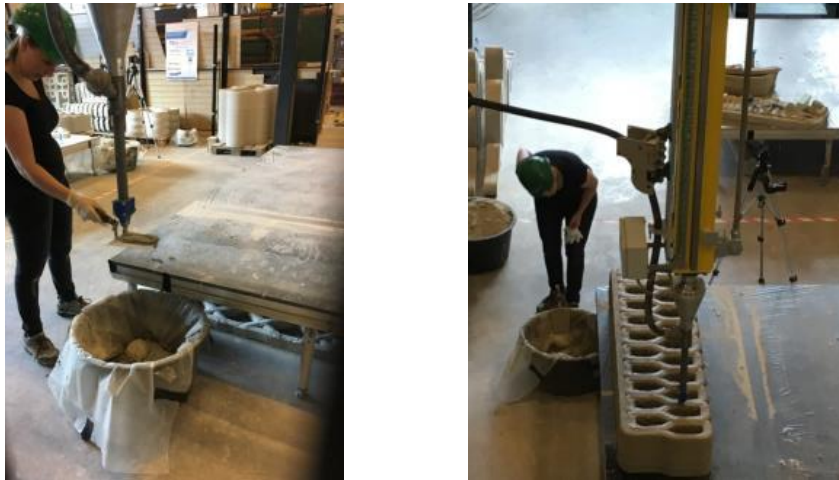


Figuur 3-9: De pomp in stand-by.



Figuur 3-8: De pomp in gebruik

In Figuur 3-10 wordt de structuur van de printmortel gecontroleerd voordat het printen van start gaat. Te zien is dat het regelmatig gecontroleerd wordt. In deze figuren is ook het printbed te zien waar de elementen op geprint worden.



Figuur 3-10: Controleren van de printmortel. Links: voordat het printen van een element start. Rechts: tijdens het printen van de proefstukken van de schaal 1:2 brug.

Printbed

Het printbed moet gekalibreerd worden zodat er zekerheid bestaat dat de zijdes (in de lengte richting van de testbrug, waar de elementen geassembleerd worden) van het element precies recht is. Als de deze zijdes variëren in hoogte of een oneffenheid hebben ontstaat de kans dat het elementen ten hoogte van het 'uitstekende' deel kapot gaat. Dit gebeurt omdat een hoge kracht dan door een klein oppervlakte opgevangen moeten worden. Dit zorgt voor een hoge spanning op die locatie die hoger is dan de capaciteit van het beton. Ook moet het printbed sterk genoeg zijn om het gewicht van de elementen te houden.

Schaal 1:1 elementen

In Figuur 3-12 is een geprint element van de schaal 1:1 brug te zien. De laagjes structuur van dit element is goed te zien in Figuur 3-11. De twee elementen zichtbaar in de figuur zijn gemaakt als onderdeel van de functionele proeven zodat ervaring opgedaan kan worden met het printen. Tevens worden ze gebruikt voor de uitvoeringsproeven van het hijsen, het assembleren en het voorspannen.



Figuur 3-12: Elementen op schaal 1:1.



Figuur 3-11: Detail van de lagen van een schaal 1:1 element.

Schaal 1:2 elementen

Een geprint element, schaal 1:2 en een detail van de doorsnede is te zien in Figuur 3-13. Er zijn zes van deze elementen geprint. Deze worden geassembleerd en voorgespannen om de testbrug te creëren. Vervolgens wordt deze testbrug (schaal 1:2) gebruikt voor de verificatie proef.



Figuur 3-13: Links: Een geprint element voor de schaalbrug 1:2. Rechts: Detail van de lusvormige doorsnede.

Hier zijn maar drie onderdelen van het 3DCP besproken. Voor de andere onderdelen zijn proeven gedaan of maakten die deel uit van meerdere proeven. De soort proeven en deze overige onderdelen worden omschreven in het volgende hoofdstuk (3.2.3: Proeven)

3.2.3 Proeven

De verschillende proeven die uitgevoerd zijn tijdens het traject van de 3DCP fietsbrug zijn de verschillende functionele proeven, uitvoeringsproeven en materiaalproeven. Deze proeven en het opstellen van het testprogramma voor de verificatieproef worden in dit hoofdstuk besproken.

Al deze verschillende proeven zijn nodig omdat voor het materiaal 3DCP geen regelgeving bestaat en daarom moet “design by testing” (hoofdstuk 2.2) toegepast worden. Dit wil zeggen dat elke stap in het ontwerp van de constructie aangetoond moet worden door middel van een test. De test, oftewel proef, die uitgevoerd wordt is specifiek voor het constructiemateriaal en/of voor constructie in dit materiaal. Bij dit project wordt onderscheid gemaakt tussen de proeven betreffende:

- De materiaaleigenschappen;
- Toepassingsproeven (zowel uitvoerings- als functionele)
- De verificatie van de materiaaleigenschappen als input voor constructieve berekening.

Aan het begin van het traject was een eerste testprogramma gemaakt voor het 3D printen van beton. Het volledige testprogramma is te vinden in Bijlage 3: Testprogramma 3D beton printen_20170310. In dit testprogramma werden de volgende proeven uitgevoerd:

1. Beproeven als driepuntbuigproef (dwarskracht);
2. Beproeven als vierpuntsbuigproef (moment);
3. Bepalen van vervorming op verschillende tijdstippen na belasten;
4. Bepalen druk- en treksterkte (standaardproeven);
5. Bepalen krimp en kruip (standaardproeven);
6. Bepalen aanneemelijkheid levensduur (vorstbestandheid en bestandheid tegen uitdrogen);
7. Bepalen ontwikkeling detail mootovergang.

De proeven 1, 2 en 3 zouden elk uitgevoerd worden met de volgende drie variaties van elementen:

- Een ongewapende doorsnede

- Een met staaldraden versterkte doorsnede
- Een met staaldraden versterkte doorsnede onder voorspanning

Dit testprogramma beschrijft dat de proeven 1-3 elk op drie proefstukken uitgevoerd moeten worden. Dit geeft totaal negen proeven die uitgevoerd moeten worden op proefstukken. Echter wordt in dit testprogramma geen proeven omschreven die uitgevoerd worden op een (schaal)constructie. Na overleg met (onder andere) de partners werd besloten dat het uitvoeren van deze hoeveelheid proeven niet mogelijk was in de beschikbare tijd en het beschikbare budget. Er werd besloten om in plaats van de proeven 1-3 uit te voeren, een variatie hierop te maken. Uiteindelijk werd besloten dat een vierpuntsbuigproef op één testbrug uitgevoerd zou worden. De testbrug zou een schaal 1:2 brug zijn, bestaand uit zes elementen, met aan weerszijde een kopstuk. De overweging schaal 1:2 te lezen in kop: Ontwerp Schaalbrug, 1:3 versus 1:2.

Vervolgens moest de keuzen gemaakt worden uit welke variatie van de (hierboven genoemde) elementen de testbrug gemaakt zou worden. De optie van een ongewapende doorsnede werd afgewezen omdat voorspeld werd dat wanneer deze ongewapende elementen geassembleerd zouden worden tot een testbrug, deze niet eens zou kunnen houden. Omdat er onzekerheid bestond over het toepassen de staaldraadwapening (zie Kop: Wapeningskabel) werd besloten hierop eerst meer proeven uit te voeren en niet toe te voegen in de elementen van de testbrug. Daarom werd besloten om de testbrug te maken uit geassembleerde, ongewapende elementen en het geheel onder voorspanning te brengen.

Deze proef zou dienen als verificatie proef van de input van de berekening. Wanneer dit besloten werd kon het ontwerp van de schaal 1:2 en het VO afgerond worden. Tijdens het printen, uitharden, assembleren en voorspannen van de elementen en de testbrug kon het testprogramma ontworpen en besproken worden.

Materiaalproeven

Onder materiaal proeven vallen het bepalen van de druk- en treksterkte (proef #4) en de krimp en kruip (proef #5) Omdat het materiaal voor het 3DCP technisch gezien mortel is, kan een standaard proef gebruikt worden voor het bepalen van proef 5.

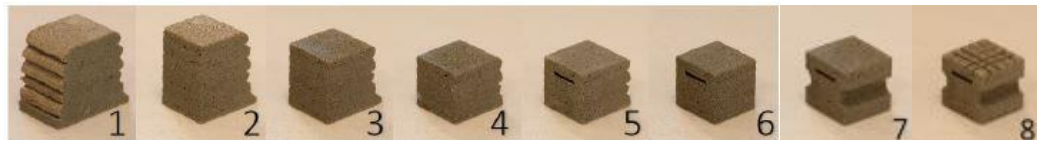
Druk- en treksterkte

Voor de proef moeten andere proefstukken gemaakt worden doordat gewenst is te weten of de lagenstructuur van de geprinte mortel nadelige effecten heeft op de druk- en treksterkte van de mortel waarbij vooral richting II (Doomen, 2016), loodrecht op de printrichting, interessant is om te weten. Uitgaand van het onderzoek van dhr. C. Doomen is een opzet gemaakt voor deze proef, inclusief het maken van de proefstukken. Deze opzet is uiteindelijk niet gebruikt bij het 3DCP project, maar geeft een goed overzicht van deze proef. Het volledige overzicht is in Bijlage 4: Opzet Proeven 4 en 1-3 geplaatst. De proefstukken voor proef # 4 worden gesneden uit een aantal 3D geprinte lagen mortel (Figuur 3-14). Na het uitharden worden de proefstukken gezaagd tot ze een afmeting van 40 mm x 40 mm x 40 mm hebben.



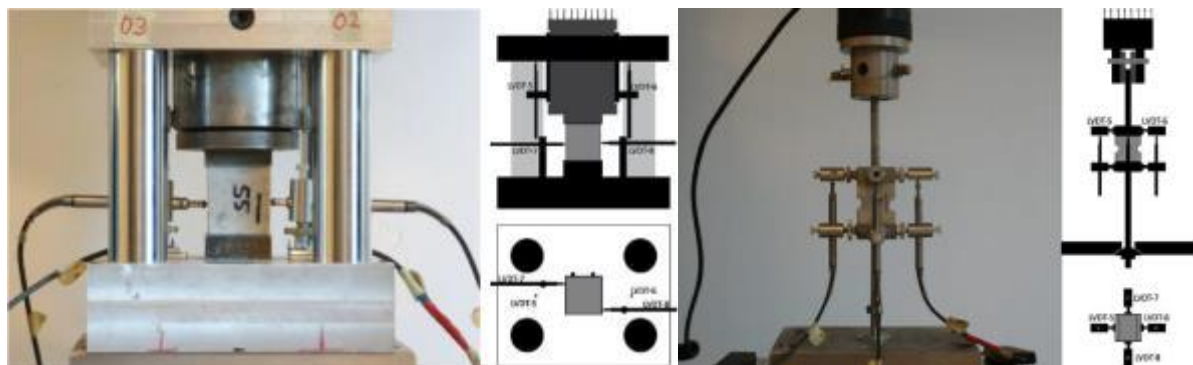
Figuur 3-14: Verdeling van proefstukken uit 3D geprinte lagen mortel. (Doomen, 2016)

In Figuur 3-15 zijn de stappen aangegeven waar steeds één kant van het verharde stuk mortel wordt gesneden op een proefstuk met de gewenste afmetingen te krijgen.



Figuur 3-15: De stappen voor het maken van om proefstukken van het 3DCP voor #4. (Doomen, 2016)

Stap 7 en 8 zijn ontwikkeld voor de treksterkte proef. Bij stap 7 wordt het proefstuk ingesneden zodat de scheur (bezwijken) in het midden van het proefstuk plaatsvindt. Bij stap 8 zijn de boven- en onderzijde van het proefstuk ruw gemaakt zodat het goed te plaatsen is in de testopstelling (zie Figuur 3-16). (Doomen, 2016)



Figuur 3-16: De testopstelling van het bepalen van de druksterkte (links) en de treksterkte (rechts) van de printmortel welke gebruikt wordt bij het project 3DCP fietsbrug Gemert. (Doomen, 2016)

Met de uitkomsten van de materiaalproeven op de proefstukken kan de E-modulus (in kN/m^2) bepaald worden. Hiermee kan er gerekend worden met de sterkte van het materiaal. Het is vooral interessant om te weten wat de uitkomst van de treksterkte is in de richting loodrecht op de geprinte mortel lagen. Hier wil men weten of het materiaal inderdaad homogeen is en het niet een mindere treksterkte heeft op de overgang van twee lagen. De testopstellingen van de druk- en treksterkte proeven op de printmortel zijn te zien in Figuur 3-16.

De waardes uit deze metingen van de elasticiteitsmodulus, de druk- en treksterkte (richting II) zijn in Tabel 3-1 geplaatst. De uitkomsten van de andere richtingen (I en III) zijn ter vergelijking ook gegeven.

Tabel 3-1: De uitkomsten van de druk- en trekproef uitgevoerd op de printmortel wat gebruikt wordt bij de 3DCP fietsbrug Gemert. (Bulck, 2017) en (Doomen, 2016)

Eigenschap	Richting II	Richting I	Richting III
Elasticiteitsmodulus	$\pm 16.000 \text{ MPa}$	$\pm 16.000 \text{ MPa}$	$\pm 16.000 \text{ MPa}$
Druksterkte	21.0 MPa	23.2 MPa	21.5 MPa
Treksterkte	1.32 MPa	1.88 MPa	1.61 MPa

Zoals blijkt uit deze vergelijking van waardes, is richting II de zwakste richting en is daardoor de maatgevende richting.

Krimp en kruip

Bij de 3DCP fietsbrug is het voornamelijk van belang hoe veel het materiaal kruipt ten gevolge van een constante belasting met verloop van tijd. Omdat het 3DCP toeslagmateriaal heeft met kleine diameters kan er voorspeld worden dat er meer kruip zal optreden dan bij standaard beton. Omdat de brug niet op zichzelf kan staan wordt voorspanning aangebracht. Als de fietsbrug kruip vertoont, zal het verkorten waardoor de spanning in de voorspanstrengen af zal nemen (zie Kop: voorspanning).

Deze krimp en kruipproeven worden uitgevoerd op mortelbalkjes die zowel geprint als gestort zijn. De afmetingen van de gestorte proefstukken hebben een afmeting van (b x d x l) 40 x 40 x 160 mm³. De afmetingen van de geprinte proefstukken hebben een afmeting van (b x d x l) 25 x 64 x 160 mm³. De proefstukken van de kruipproef worden in een proefopstelling geplaatst met veren om voorspannen na te bootsen. Per proef zijn vier proefstukken gebruikt. De een overzicht van de uitkomsten, na 90 dagen, staan in Tabel 3-2. De gecorrigeerde kruip is de som van ongecorrigeerde kruip – krimp.

Tabel 3-2: Gemiddelde uitkomsten (na 90 dagen) van de krimp en kruip proeven uitgevoerd op 4 proefstukken. (Bulck, 2017)

Proefstuk	Eenheid	Gestorte proefstukken	Geprinte proefstukken
E-modulus	[MPa]	18.097	17.463
Krimp	[mm/m]	1,743	1,613
Ongecorrigeerde kruip	[mm/m]	2,670	2,9336
Gecorrigeerde kruip	[mm/m]	0,927	1,320

De details van de uitvoering en de uitkomsten van materiaalproeven nummer 4 en 5 zijn geplaatst in Bijlage 5: Materiaaleigenschappen printmortel_201708.

Toepassingsproeven

Gedurende de maanden dat het project van het 3DCP fietsbrug liep, werden er ook uitvoerings- en functionele proeven gedaan. De uitvoeringsproeven betreffen de proeven van het maken van de constructie en de proeven betreffend de logistiek. De functionele proeven worden uitgevoerd om de (ver)werking van het materiaal (3DCP) te testen. Bij het 3DCP fietsbrug project zijn dit:

- Wapeningskabel;
- Contourprinting;
- Hijsen;
- Assembleren;
- Voorspannen.

Bij het 3DCP fietsbrug project is dit:

- Mortelsamenstelling (voor het variëren met o.a. printsnelheid en hoogte)

De verschillende toepassingsproeven worden puntsgewijs besproken waarbij de stappen, overwegingen, testen en valkuilen (als van toepassing) omschreven worden.

Staaldraadwapening

Om er zeker van te zijn dat het beton in de dwarskracht-richting de trekkrachten kan houden en dat het element niet bros breekt, worden de elementen voorzien van wapening. Omdat de doorsnede van de elementen niet gebruikelijk is kan standaardwapening niet worden toegepast. In plaats daarvan wordt gekozen om een staaldraad, vergelijkbaar met de remkabel van een fiets, te gebruiken. In Figuur 3-17 is een stuk van een element te zien waar staaldraad is geplaatst tijdens het 3D printen van beton. Te zien is dat het element in de breedte van de printlaag, te hoogte van de wapeningsdraad, gespleten is. De methode van het



Figuur 3-17: Een proefstuk geprint met wapeningskabel.

plaatsen van de wapeningsdraad na het printen van de specie bleek de specie doormidden te snijden en niet voldoende aanhechting is. Hierna werd getest met deze volgorde van het printen en het plaatsen van de staaldraad. Wanneer eerst de staaldraad geplaatst werd en waarna de laag beton er overheen geprint werd, bleek de aanhecht goed was.

Een ander punt van aandacht rond het plaatsen van de wapeningsdraad is dat het gewenst was om dit een automatisch proces te maken. In eerste instantie werd de wapeningsdraad met de hand geplaatst wat resulteerde in dat een persoon alle lagen het patroon mee moest lopen. Als dit op deze manier gedaan moest worden voor alle elementen, zou dit uitkomen op een afstand van meerdere marathons. Daarom werd getest met het automatiseren van het plaatsen van de staaldraad door middel van een katrolletje. Dit ontwerp hiervan is confidentieel en daarom kan er geen foto van gedeeld worden. Omdat het onderzoek naar het mee printen van de staaldraadwapening liep gedurende het project van de 3DCP fietsbrug, is besloten om de elementen van de schaalbrug zonder wapening te maken.

Contourprinting van kopstukken

Contourprinting is het printen van een bekisting waar vervolgens beton in gestort wordt. Na het uitharden van het beton wordt de bekisting weggehaald waarna een element overblijft met de contouren van de bekisting. Daarom heeft dit geprinte contour in Figuur 3-18 een patroon, zodat het wel duidelijk is dat het met 3DCP gedaan is. Contourprinting wil gebruikt worden voor de kopstukken van de 3DCP fietsbrug. Aan beide uiteinden van de brug worden kopstukken gelijmd zodat de voorspanstrengen bevestigd kunnen worden. Het contourprinten van de kopstukken wil gebruikt worden omdat het storten van de kopstukken de minste risico's heeft. Er is te veel onzekerheid (door te weinig informatie) over wat er gebeurt met het 3DCP wanneer er voorspanstrengen aan bevestigd worden. Helaas is het idee van de kopstukken te contourprinten niet gebruikt bij zowel de testbrug als de definitieve brug.



Figuur 3-18: Geprint contour van een kopstuk.

Hijzen

Het hijsen van de elementen is noodzakelijk omdat de locatie van het printen omringd is door een printkooi (zie Figuur 2-9) en de locatie van het assembleren en voorspannen van de elementen buiten deze printkooi ligt. Bij alle uitvoering rondom dit werk staat veiligheid centraal. De wijze van het verplaatsen van de elementen zorgde voor veel discussie omdat het niet bekend was hoe het materiaal zou reageren wanneer het gehesen zou worden. Er werd gesproken over mogelijkheden als het maken van hijsogen of speciale gleuven voor hijsbanden. Uiteindelijk is bij de schaal 1:2 elementen gehesen met standaard hijsbanden, zonder speciale maatregelen.

Assembleren

De fietsbrug zal bestaan uit een aantal elementen en twee kopstukken die geassembleerd worden. Door het assembleren van deze elementen (moten) ontstaat een voeg (mootovergang). Het bepalen van hoe en waarmee deze elementen geassembleerd worden is proef #7: "Bepalen ontwikkeling detail mootovergang".

Besloten is de betonnen elementen te assembleren met twee-componenten Epoxylijm waarbij een voeg ontstaat van circa 10 mm. De lijm die gebruikt wordt heet Sikadur-31 CF Normaal (zie Figuur 3-19). Ook in deze figuur is de voeg te zien, waar twee uitgeharde elementen met elkaar verbonden met Sikadur. Uit het beproeven van de Sikadur, blijkt dat deze sterker is dan het 3DCP beton dat het met elkaar (Sika, 2006).



Figuur 3-19: Links: Detail van de voeg. Rechts: De gebruikte Epoxylijm.

Voorspannen

Bij het voorspannen van de testbrug wordt afgeweken van de reguliere manier van voorspannen omdat het voorspannen hier ook een ander doel heeft. Een proef op het aanbrengen van de voorspanning is gedaan op twee schaal 1:1 proefstukken. Deze proefstukken zijn eerst geassembleerd (proef #7) waarna ze voorgespannen zijn. Hierdoor is bepaald dat de voorspanstrengen door de openingen in de doorsnede van de elementen kunnen lopen. Besloten wordt dat de voorspanstrengen aan beide zijden worden zij bevestigd worden door het gebruik van kopstukken (zie kop: Contourprinten van kopstukken). De uitleg van de toegepaste voorspanning wordt gedaan aan de hand van het voorspannen van de testbrug (schaal 1:2) en foto's van de onderdelen en werkzaamheden.

In hoofdstuk 3.2.3 Proeven is de keuze voor het maken van proefstukken variant #4 (zonder staal draad wapening met voorspanning) omschreven. Het is noodzakelijk om de brug voor te spannen omdat de brug zichzelf niet sterk genoeg is om zelfs het eigengewicht te houden wanneer de brug op twee steunpunten geplaatst wordt. De voorspanning drukt de brug samen zodat de elementen bij elkaar gedrukt worden zodat geen trekkrachten ontstaan in de brug. In Figuur 3-20 is te zien dat drie voorspanstaven boven zijn geplaatst en zes onder. De negen voorspanstrengen zijn door de sparingen in de kopstukken 'geregen'.



Figuur 3-20: De testbrug, de voorspanstaven geplaatst.

De voorspanning voor de brug wordt zo voorbereid dat er zowel een voor- als een naspanzijde is. Het verschil tussen de voor- en naspanzijde is dat de voorspanning aan de voorspanzijde wordt aangebracht. Door de kracht op de brug zal deze ingedrukt worden en zal de brug gaan verkorten ten gevolge van kruip (zie hoofdstuk 2.3.2). Door het verkorten van de brug zal de spanning in de voorspanstrengen minder worden na verloop van tijd. Echter is een bepaalde kracht in de voorspanning gewenst omdat deze zorgt dat er geen trekspanning in de brug ontstaat wanneer deze belast wordt. Aan de naspanzijde kan na een bepaalde tijd (weken, maanden of jaren) voor de juiste voorspankracht in de voorspanstrengen gezorgd worden.

Bij het voorspannen van de brug zijn een paar instrumenten nodig als hulpmiddel. Zo is bij elke voorspanstreng aan de voorspanzijde (de zijde waar eerst voorgespannen wordt) een voorspanwig nodig. Twee drukdozen worden geplaatst (een boven, een onder) voor het controleren dat de juiste spanning in de voorspanstreng wordt aangebracht. Aan de naspanzijde van de brug worden andere instrumenten op de strengen gemonteerd welke het mogelijk maken om de testbrug na te spannen enige tijd na het voorspannen. Deze foto's van zijn in Figuur 3-21 te zien.



Figuur 3-21: De voor- en naspanzijde met de benodigde instrumenten voor het voorspannen van de schaal 1:2 brug.

De volgorde en de krachten van elke voorgespannen streng zijn van tevoren berekend door de constructeur. Het voorspannen wordt stapsgewijs uitgevoerd zodat geen ongewenste situaties in het beton ontstaan. Een ongewenste situatie is bijvoorbeeld dat de rechterzijde volledig is voorgespannen, doordat gelijk totale spanning in die streng is aangebracht, maar in de linkerzijde nog niets zit. Dit veroorzaakt een krachtverdeling van druk in de rechterzijde en trek in de linkerzijde, die de testbrug niet aan kan. In Figuur 3-22 is te zien hoe een streng met drukdoos voorgespannen wordt. De drukdoos houdt bij hoe veel kracht er in de voorspanstreng zit en dient als controle dat het voorspannen gebeurt zoals dat stapsgewijs is gerekend.



Figuur 3-22: Het voorspannen van de testbrug.

Na het voorspannen wordt de relaxatie (ontspanning) ten gevolge van de voorspanning, gemeten. Tijdens een aantal weken druk de voorspanning de brug zo samen dat het beton gaat kruipen. Hierdoor zal de brug verkorten. Het tot rust laten komen van de testbrug wordt relaxatie genoemd.

Deze voorbereidingen van het verplaatsen, assembleren en voorspannen van de elementen zijn onderdeel van het testprogramma wat in Bijlage 7: Rapport Testprogramma brug Gemert_20170614 geplaatst is.

Mortelsamenstelling

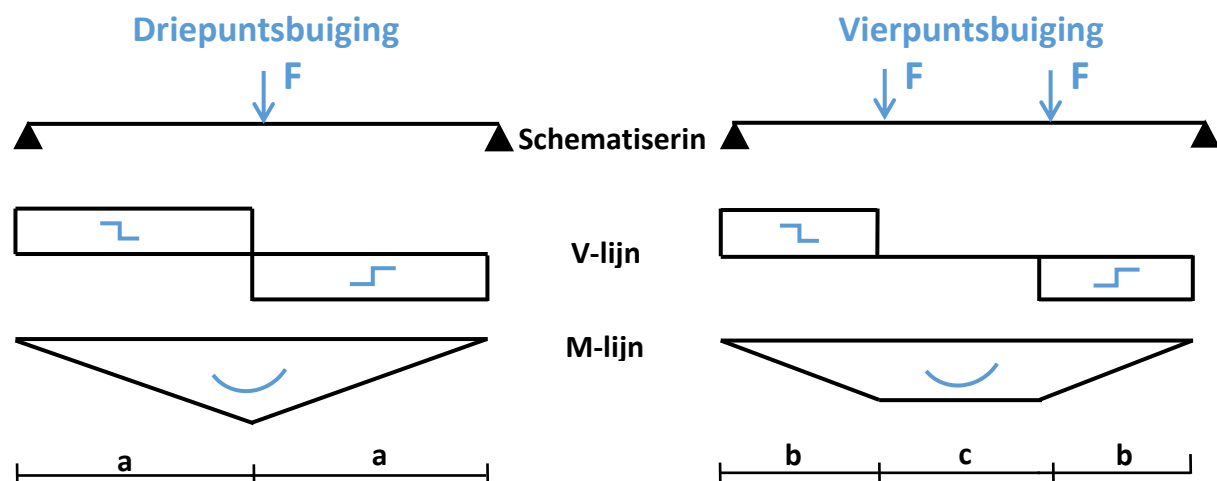
Met de samenstelling van de mortel wordt ietwat gespeeld. Het is belangrijk dat de aanpassingen van de mortel de materiaaleigenschappen als de sterkte niet veranderen. Er wordt besloten een hulpstof, genaamd een versneller (zie Figuur 3-23 links) toe te voegen aan het mortel zodat hoger geprint kan worden (zie Figuur 3-23 rechts). Met langere elementen zijn minder elementen nodig, waardoor minder geassembleerd hoeven te worden. De hoogte is ongeveer vier keer die van de elementen waar geen versneller aan het printmortel is toegevoegd.



Figuur 3-23: Links: versneller; wordt toegevoegd aan de mortel. Rechts: Proefstuk geprinte met mortel + versneller.

Verificatie proef

De verificatie proeven is de vierpuntsbuigproef (proef #2) en wordt uitgevoerd ter verificatie van de input van de berekening. Als er tijd en interesse is in de uitkomsten van een driepuntsbuigproef wil deze misschien ook uitgevoerd worden. De reden dat er een vierpuntsbuigproef gedaan wil worden is dat bij het belasten met twee krachten op een ligger op twee steunpunten 'zuivere buiging' ontstaat. Bij zuivere buiging treedt alleen buiging en geen dwarskracht op in het midden van de ligger. Dit is gewenst omdat dat gemeten kan worden hoe sterk de ligger is op trek aan de onderzijde (en druk van de bovenzijde) van de ligger. Bij bezwijkingsproeven als degene die in dit onderzoek is uitgevoerd, wil de constructeur het buigend moment van de ligger weten op het moment van bezwijken. In Figuur 3-24 zijn de verschillen tussen de drie- en vierpuntsbuigproef geïllustreerd.



Figuur 3-24: De bovenstaande schetsen geven de Dwarskrachtlijn (V-lijn) en Momentenlijn (M-lijn) aan die optreden bij de 3- en 4-puntsbuiging van een ligger op twee steunpunten.

Tijdens dit onderzoek is er voornamelijk geholpen bij het schrijven van het testprogramma van de proeven ter verificatie van de materiaaleigenschappen als input voor de constructieve berekening. Voordat de verificatie proef tot stand kon komen moesten er eerst voorbereidingen plaatsvinden. In het Testprogramma proef #2_20170529 in Bijlage 6 zijn de voorbereidingen, het voorspannen van de testbrug, de testopstelling en het uitvoeren van de verificatieproef omschreven.

3.2.4 Verificatieproef

Dit hoofdstuk betreft het testprogramma, het voorbereiden van de testbrug en het uitvoeren van de verificatieproef. Het officiële testprogramma dat aan de opdrachtgever geleverd is, is samengesteld uit alle geleverde documenten betreffend de verificatieproef door de ondergetekende van dit onderzoek. De belangrijkste informatie uit elk van deze documenten is in een kort rapport samengevat. Dit rapport van het testprogramma is te vinden in Bijlage 7: Rapport Testprogramma brug Gemert_20170614. Alle bijlagen die in dit document genoemd worden zijn de aangeleverde rapporten van onder andere de constructeurs van Witteveen + Bos en de uitkomsten van de materiaalproeven gedaan door de TU/e.

Testprogramma

Het testprogramma van de verificatieproef beschrijft de volgende onderdelen:

- De proeven die onder de verificatieproef vallen; de drie- en vierpuntsbuigproef
- Het klaarmaken van de testbrug: verplaatsen, assembleren, voorspannen
- Het bouwen van de testopstelling
- Het plaatsen van de testbrug in de testopstelling en gereedmaken voor het beproeven: opleggingen, locatie van krachten, afwerken van oppervlak en plaatsen van meetsensoren
- Het uitvoeren van de proef

Met behulp van dhr. Prof. Ir. T. Salet is een testprogramma (Bijlage 6) opgesteld. Elke versie van het testprogramma werd zowel met de partners in de meetings besproken als met de partijen verantwoordelijk voor de opstelling en uitvoering van de proeven. Door het steeds terugkoppelen naar de verschillende partijen is een definitief testprogramma opgesteld waar alle partijen, inclusief de opdrachtgever, het eens mee waren. Naar aanleiding van het testprogramma hebben de constructeurs van Witteveen + Bos een belastingsschema opgesteld welke gehanteerd zou worden tijdens de verificatieproef.

De laboratoriummedewerkers waren verantwoordelijk voor het bouwen van de testopstelling. Helaas werd regelmatig vergeten deze medewerkers op de hoogte te stellen van veranderingen welke gemaakt werden.

Voorbereiden testbrug

De schaal 1:2 brug wordt gemaakt door zes losse elementen en twee kopstukken te assembleren en te voorspannen. Het aanbrengen van de Epoxylijm tussen de elementen is te zien in Figuur 3-25.



Figuur 3-25: Het assembleren van de schaalbrug. Links: Epoxylijm aanbrengen. Rechts: De geassembleerde elementen.



Figuur 3-26: Meetsensoren (LVDT's).

Als controle worden er meetsensoren (LVDT's) geplaatst op het uiteinde van de testbrug om de verkorting en mogelijk torsie, van de testbrug te meten tijdens en na het aanbrengen van de

voorspanning. De locatie van de meetsensoren is aan het uiteinde van de brug, zowel links als rechts en zowel onder als boven. Een voorbeeld van het plaatsen van de meetsensoren van de testbrug is te zien in Figuur 3-26 (locatie: links achter).

Na de drie weken van relaxatie van de testbrug bleek er veel minder kruip plaatsgevonden te hebben dan voorspeld werd. Mogelijke reden hiervoor was omdat de kruip berekend werd op beton van 28 dagen en het beton van de elementen daadwerkelijke minstens 42 dagen was. Hierdoor bleek het niet noodzakelijk om de brug na te spannen.

In de weken van de relaxatieperiode was de testopstelling gebouwd. In Figuur 3-27 en in Figuur 3-28 is de testbrug te zien die geplaatst is in de proefopstelling voor de driepuntsbuigproef respectievelijk de testopstelling van de vierpuntsbuigproef.



Figuur 3-27: De testbrug geplaatst in de testopstelling van de driepuntsbuigproef vanaf twee kanten gezien.



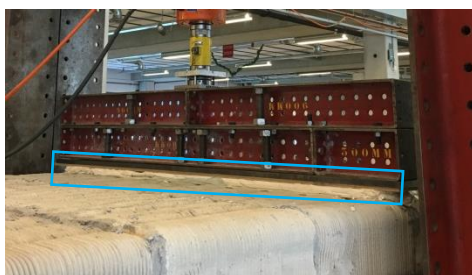
Figuur 3-28: De testbrug geplaatst in de testopstelling van de vierpuntsbuigproef vanaf twee kanten gezien.

Met behulp van foto's wordt duidelijk gemaakt hoe de testopstellen eruitziet en hoe de testbrug daarin is geplaatst. In Figuur 3-29 is de roloplegging van de testbrug te zien.



Figuur 3-29: De (rol)oplegging van de testbrug. Links nog niet in gebruik, en rechts wel.

In Figuur 3-30 is aangegeven met een blauwe vierkant hoe de bovenzijde van de testbrug is afgewerkt met gips waar de belasting aangrijpt. Dit is gedaan om te zorgen dat de gelijkmatig verdeelde belasting daadwerkelijk gelijkmatig verdeeld wordt over de oppervlakte van de brug. Doordat het 3DCP is, is het oppervlakte niet vlak. Elke vijzel levert een drukkracht om de gewenste gelijkmatig verdeelde belasting te krijgen



Figuur 3-30: Met gips afgewerkt waar de q-last aangrijpt.

In Figuur 3-31 is de hydraulische pomp te zien die de vijzel aanstuurt. De pomp zorgt ervoor dat de juiste belasting op de testbrug komt. In Figuur 3-33 is een plaat te zien die achter het uiteinde van de brug geplaatst is. Deze plaat is een veiligheidsmaatregel in de lengte van de brug. Stel de voorspanning raakt los wanneer de brug kapot gedrukt wordt, dan zouden voorspanstrengen in de lengte van de brug geschoten kunnen worden. Aan de andere zijde van de brug is de dezelfde maatregel getroffen.



Figuur 3-31: Hydraulische pomp.



Figuur 3-33: Veiligheidsmaatregel.

Bij deze proef worden meerdere meetsensoren geplaatst om de verschillende vervormingen op verschillende locaties te meten. Foto's van twee van deze locaties zijn in Figuur 3-32 geplaatst. De linkerfoto betreft een meetklokje om de zakking van de oplegging te bepalen. De rechter foto is voor het meten van de zakking in het midden van de testbrug.



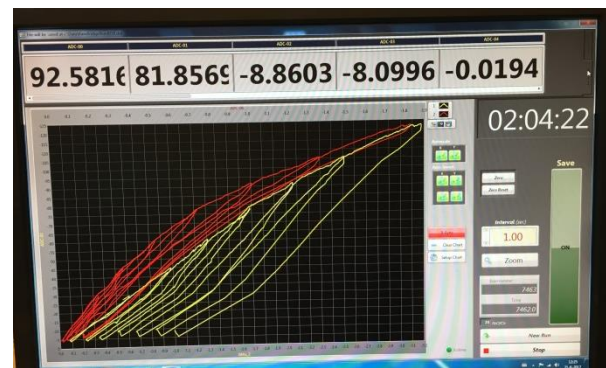
Figuur 3-32: Locatie van twee meetklokjes voor de verificatie proef van de testbrug.

Uitvoering proef

Door een communicatiefout tussen de constructeurs en de medewerkers van het lab was een testopstelling gebouwd bedoeld voor een driepuntsbuigproef. Omdat het ombouwen meerdere uren zou kosten, was besloten deze driepuntsbuigproef uit te voeren en dit te verwerken als een vierpuntsbuigproef waar de afstand tussen de belastingen (de afstand c in de schematisering in Figuur 3-24) minimaal is. Het belasten van de testbrug zal voor beide opstellingen gelijkgaan. De kracht in de strengen wordt met stappen van 25 kN verhoogd. De geplaatste drukdozen voor het meten van de kracht die de vijzel(s) leverde hadden een grootte van 150 kN.

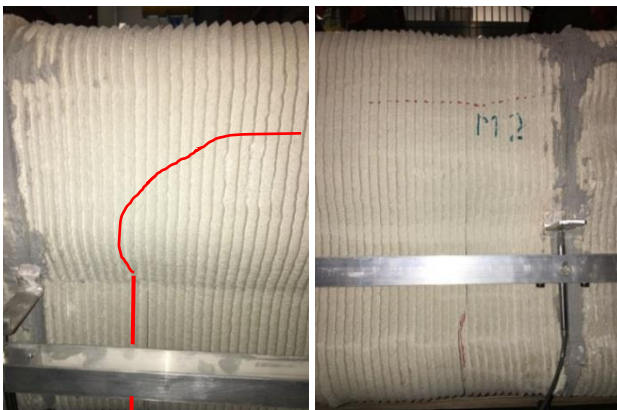
Uitkomsten

Van tevoren is afgesproken dat het bezwijken van de brug wordt gesteld op het moment dat de eerste scheur zichtbaar is. De door de constructeurs voorspelde bezwijkbelasting, zou behaald worden als beide vijzels een drukkracht van 150 kN leverden. De kracht die de vijzels gezamenlijk uitoefenden werd bij gehouden door de drukdozen die tussen elke vijzel en q-lastbalk zaten. Deze drukdozen kunnen een druk aan van 150kN met een marge van 175 kN. In Figuur 3-34 is het verloop te zien van de brug bij het steeds belasten en ontlasten waarbij de belasting steeds met ongeveer 25 kN werd opgevoerd.



Figuur 3-34: Uitkomsten van de vierpuntsbuigproef. Het verloop van de brug steeds belasten en ontlasten.

De uitkomsten die hier worden genoteerd zijn van de locatie van het bezwijken van de brug, en de kracht die hierbij noodzakelijk was. Deze zijn van belang want ze bepalen of de 3DCP brug veilig is. De rest van de uitkomsten zijn door de constructeurs opgenomen en worden teruggekoppeld aan het berekeningsmodel. Uit de verificatieproef van testbrug bleek dat de testbrug voldoende sterk was om de bezwijkbelasting te kunnen houden. In de testbrug ontstonden pas de scheuren in Figuur 3-35 en Figuur 3-36, wanneer de bezwijkbelasting werd overschreden. Dit was bij een drukkracht de vijzels geleverd van 175 kN.



Figuur 3-35: Verticale en horizontale scheur in het midden van de testbrug. De rode lijn is in de linker foto naast de scheur getekend.



Figuur 3-36: Scheur ongeveer in het midden van de testbrug. Links: Gezien van de zijkant. Rechts: Gezien van onderaf.

In eerste instantie was gewenst de brug tot totaal bezwijken kapot drukken. Daarvoor zouden de drukdozen (van 150 kN) vervangen moeten worden door drukdozen die 200 kN drukkracht aan konden. Een andere optie was om de proef geheel zonder drukdozen uit te voeren. In beide gevallen zou de testopstellen uit elkaar gehaald worden om de drukdozen (150 kN) te verwijderen. In overleg met de medewerkers van het lab van de TU/e is besloten de proef tot het totale bezwijken van de testbrug niet uit te voeren. Dit kwam zowel doordat het ombouwen veel tijd zou kosten, zal dat er veel extra risico's zouden zijn bij het kapotdrukken van de testbrug. De extra tijd en risico's wogen niet op tegen de geringe aanvullende informatie die uit de proef gehaald konden worden.

3.3 Evaluatie Project fietsbrug

Na afloop van de verificatieproeven is een evaluatie gemaakt van het doorgelopen traject van de 3DCP fietsbrug. De belangrijkste punten van de evaluatie worden hier kort genoemd. De gehele evaluatie is te vinden in Bijlage 8: Evaluatie 3DCP project Gemert. In de evaluatie in de bijlage wordt bij elk onderdeel eerst een beschrijving gegeven waarna de uitgevoerde werkzaamheden, gemaakte beslissingen en de knelpunten omschreven. Aan het einde van evaluatie wordt geprobeerd om leerpunten te noemen en/of advies te geven voor vervolg(acties).

De evaluatie betreft de onderdelen van het traject van de 3DCP fietsbrug waarbij de ondergetekende van dit onderzoek betrokken bij is geweest. Dit betreft de volgende onderdelen:

- Communicatie tussen betrokken partijen en meetings;
- Ontwerp constructie;
- Logistiek, materiaal, materieel en personeel;
- Proeven en berekening, schaalbrug;
- Planning;
- Kosten;
- Overig: Definitief Printen; Definitief Oplevering; Definitief Nazorg

De onderdelen waar de meeste complicaties ontstonden waren punten communicatie, logistiek, personeel en de kosten. Door een slechte communicatie werden niet alle partijen op de hoogte gesteld van (aanpassingen van) werkzaamheden. Dit leverde problemen met de logistiek en het personeel op. De problemen konden variëren maar zorgde allemaal voor dat er meer tijd en/of geld noodzakelijk was. Deze punten blijven bij andere projecten ook van belang, echter kan goed gebruik gemaakt worden hiervan wanneer het duidelijk is, voor alle partijen, wat de stappen van het project zijn.

Het project van het bouwen van de eerste volledig constructieve 3DCP fietsbrug ter wereld is aan het einde van het project een succes gebleken. Een fietsbrug is opgeleverd die constructief veilig is. Deze brug is in september 2017 opgeleverd.

4. Protocol

Allereerst wordt het belang van een protocol omschreven. Dit wordt gedaan op basis van de ervaringen van het 3DCP fietsbrug project en de kennis uit interview. Door het duidelijk krijgen van het belang is daarmee ook het doel van het protocol bekend geworden. Vervolgens wordt de vorm dat het protocol besproken gebaseerd op de overeenkomsten en verschillen tussen het traject van een standaard en een pilotproject. Als laatste wordt het opstellen van het protocol omschreven. Hierbij wordt het protocol met een handleiding en een voorbeeld als eindproduct opgeleverd.

4.1 Belang

Het belang van een stappenplan, dat gebruikt kan worden bij het testen en verifiëren van de toepassing van innovatieve materialen, werd duidelijk uit activiteiten. Als eerste werd het duidelijk door het meelopen met en ervaring opdoen van het 3DCP fietsbrug project. Als tweede bleek dit ook uit de interviews die gehouden zijn met betrokken personen.

4.1.1 3DCP project

Het traject van het 3DCP fietsbrug project is omschreven in hoofdstuk 3.2. Hier is zichtbaar gemaakt welke personen betrokken waren bij de uitgevoerde activiteiten van een relatief klein project. Een reden dat het project succesvol is afgerond is omdat de personen die de uiteindelijke keuzes moesten maken, ervaren waren op het gebied van (innovatieve) projecten. Hierdoor begrepen zij het principe van het toepassen van het “design by testing” (zie hoofdstuk 2.2) en welke stappen bij dit proces horen. Hierdoor konden zij zich ook snel aanpassen wanneer besloten werd het traject en de methode te veranderen. Echter werd dit soms niet (goed) gecommuniceerd met de andere betrokken personen. Dit resulteerde in het uitvoeren van verkeerde activiteiten of tijdsplanning waardoor vertragingen in het project ontstonden.

Het is gewenst dat alle betrokkenen van een (pilot)project op de hoogte zijn van het globale traject van het project en hun taak daarbij. Een (volgend) project zal baat hebben bij een stappenplan, in de vorm van een protocol, voor het inzichtelijk maken van dit traject.

Naast het inzichtelijk maken van het traject van een pilotproject, is een belangrijker doel van het protocol het aantonen van de veiligheid van een constructie. Doordat de regelgeving over het toepassen en gebruik van een innovatie materiaal nog ontbreekt, moet de veiligheid van elke aanpassing op de standaardmethode aangetoond worden. Dit wordt gedaan doormiddel van het uitvoeren van proeven. Om te weten welke proeven nodig zijn voor het aantonen van deze veiligheid is zowel kennis van de regelgeving als de mechanica nodig. Als vooraf al bedacht kan worden welke proeven nodig zijn om dit aan te tonen, kunnen op tijd de juiste personen op de hoogte gesteld worden, kunnen de activiteiten gepland worden en kunnen de risico's in beeld gebracht worden.

4.1.2 Interviews

Naast deze bevindingen van het meelopen met het 3DCP fietsbrug project, zijn een aantal betrokken personen geïnterviewd. In totaal zijn er acht personen geïnterviewd. Een aantal gegevens, als Naam, Bedrijf, Functie en betrokkenheid staan in Tabel 4-1.

Tabel 4-1: Lijst van geïnterviewde personen.

Naam	Bedrijf	Functie	Betrokkenheid
Theo Salet	TU/e Witteveen + Bos	Hoogleraar Structural Design Seniorpartner	Onderzoeksprogramma TU/e: “3D printing of sustainable concrete structures”
Jeannette van den Bos	BAM Infraconsult	Materiaaltechnoloog	Adviseur materiaal bij project 3DCP
Johan Bolhuis	BAM	Afdelingshoofd, Civiel Ontwerp regio's	Verantwoordelijke van BAM van partnerschap voor onderzoeksprogramma van T. Salet
Jeroen Nuijten	BAM	Adviseur innovatie	Hoofd voor project 3DCP fietsbrug
Jelle Visserman	BAM	Regimanager Zuidoost	In Tenderfase betrokken geweest met Project Gemert Noord-Om. 3DCP fietsbrug als ontwerp aangeboden.
Camiel Janssen	BAM	Werkvoorbereider	Werkvoorbereider en uitvoerder van BAM. Enige toepassingsproeven van de 3DCP fietsbrug uitgevoerd.
Mladena Lukovic	TU Delft	Assistent professor: 'Toepassing innovatieve materialen'	Geeft les in nieuwe materialen, voornamelijk UHSB. Lezing gegeven op BAM.
Freek Bos	TU/e	(Assistent) professor	Overziet de proeven op de TU/e van het project Nyburg Denemarken (waar een 3DCP conferentiezaal wordt gebouwd)

Voor elk interview was een vragenlijst opgesteld die diende om het gesprek een bepaalde richting te geven. Het doel van de interviews was om meer te horen over de persoonlijke ervaring van deze personen met innovatieve materialen en het toepassen hiervan in projecten. Tevens is aan elk persoon gevraagd of zij een protocol als leidraad hierbij zagen als positieve toevoeging.

Belangrijkste punten interview

Uit de interviews bleek dat al deze personen het erover eens waren dat innovatieve materialen en technieken toegepast moeten worden. Bij innovatie hoort het omgaan met onzekerheden. In het geval van het toepassen van innovatieve materialen is de onzekerheid dat het niet vanzelfsprekend is hoe een innovatief materiaal veilig toegepast kan worden. De mening over de manier waarop de onzekerheden duidelijk gemaakt kunnen worden en of een protocol kan dienen als leidraad hierbij verschilt.

De personen die betrokken zijn in de onderzoekswereld van de universiteiten, waar de theoretische onderzoeken gedaan worden, zijn enthousiast over het idee van een globaal stappenplan dat het proces schematiseert en mogelijk standaardiseert. In deze kennisinstituten worden de 'pre kwalificatie proeven' gedaan om de mogelijkheden van innovatieve materialen te bekijken. Een voorbeeld hiervan is het onderzoek van dhr. Prof. Ir. T. Salet naar de mogelijkheden van het 3DCP.

De personen betrokken bij het aantonen van de constructieve veiligheid en bij de uitvoering en supervisie van een mogelijk project zijn hier sceptischer over. Zij zien liever een werkmethode dat specifiek is voor een bepaald materiaal en/of techniek. Een schematisatie van het traject van het project van een specifiek materiaal en/of techniek zal meer voordelen. Door een schematisatie te

hebben van het testen en ontwikkelen van materialen en/of technieken kunnen deze vaker, beter, makkelijker en dus goedkoper toegepast kunnen worden.

Deze laatste groep personen is wat terughoudender omdat zij weten wat allemaal komt kijken bij het geschiktheidsonderzoek. Hierbij worden ‘full scale trials’ (verificatie proeven) uitgevoerd waarmee de veiligheid van een innovatief materiaal in constructie vorm aangetoond wordt. Het aantonen van de veiligheid is noodzakelijk door het ontbreken van regelgeving die normaal de invulling van de veiligheid geeft. Het is belangrijk om de opdrachtgever en de partij die vergunning verstrekt te betrekken bij het opstellen en uitvoeren van deze testen. Aan deze partijen moeten laten zien worden dat het ontwerp in het innovatieve materiaal voldoende veilig is.

Er werd geconstateerd dat het tempo in de bouw hoog ligt en gericht is op de kwantiteit van producten opleveren. Er is geen tijd om eindeloos opties te bekijken en mogelijkheden te testen. De realisatie is nu nodig. Dit betreft ook de toepassen van innovatieve materialen en technieken. Deze moeten ‘gewoon’ een aantal keer toegepast worden zodat alle verschillende betrokken partijen ervaring kunnen opdoen met deze nieuwe manier van handelen. Hierdoor kan met ervaring en uit praktijk gezegd worden of het interessant is bepaalde van deze materialen of technieken in bepaalde situaties toe te passen.

Een belangrijk punt hierbij, dat vaak niet gerealiseerd wordt, is dat in sommige gevallen het toepassen van een innovatief materiaal of techniek niet interessanter is op vlak van duurzaamheid (sustainability en durability), geld of tijd wanneer wordt in vergelijking met reguliere bouwmaterialen en -technieken. Soms blijkt zelfs dat het helemaal niet mogelijk omdat er geen ervaring met het uitvoeren is of omdat de omgeving het toepassen niet toestaat. Daarom is het belangrijk dat deze punten meegenomen worden in het protocol en dat er bij elke verandering in het ontwerp, idee of uitkomsten opnieuw de verschillende onderdelen afgewogen worden.

Omdat er geen regelgeving bestaat van deze nieuwe toepassingen is er inderdaad baat bij een stappenplan wat gebruikt kan worden als hulpmiddel. Doordat er veel variaties in de toepassing(sgebieden), de risico's, de investeringen, de te maken keuzes, de mensen en de kennis is, zal een globaal praktisch zijn. Hierbij kan het wijzen op bepaalde risico's en kan het de noodzaak (volgorde van) stappen duidelijk maken.

De aantekeningen van de interviews staat in Bijlage 9: Interviews t.b.v. protocol. Hier zijn een aantal van de gestelde vragen genoteerd.

4.1.3 Doel

Uit de ervaring en kennis opgedaan bij het meelopen met het 3DCP fietsbrug project en de betrokken personen interview is het belang van een protocol duidelijk geworden. Daarmee is ook het doel van het protocol bekend geworden. Samenvattend, is het doel van het protocol als volgt:

- Het tastbaar maken van het traject van een pilotproject waar “design by testing” toegepast moet worden;
- Het aantonen van de constructieve veiligheid van de toepassing en/of constructie (door middel van verificatie proeven);
- Hiermee de haalbaarheid van het toepassen van het innovatief materiaal bij een project aangeven;
- Risicobeheersing door het aangeven van mogelijke variaties en aandachtspunten.

Het zal duidelijkheid geven aan de verschillende partijen welke stappen noodzakelijk zijn om uit te voeren en welke invloed hebben op elkaar. Door deze duidelijkheid over de stappen die hierbij komen

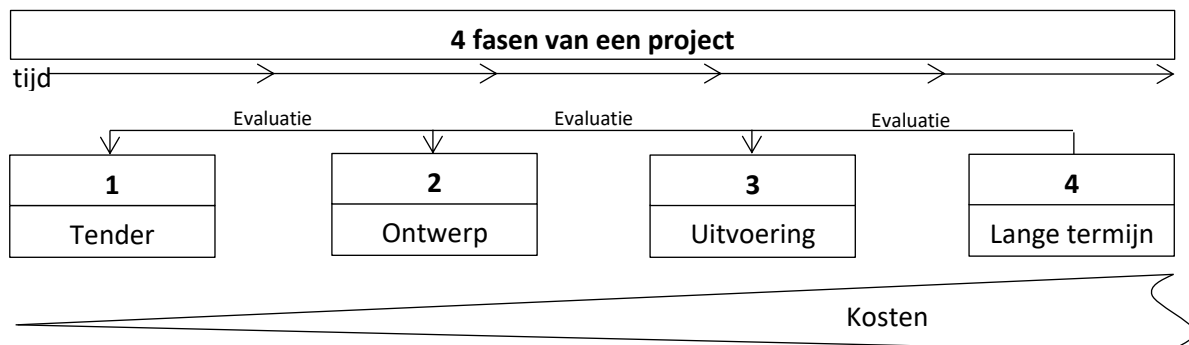
kijken kunnen de risico's in kaart gebracht worden. Het inschatten van risico's is van groot belang zodat men van tevoren weet wat er mis kan gaan en hierop voorbereid te zijn. Risico's die zich voor kunnen doen bij een pilotproject waar een innovatief materiaal wordt toegepast zijn bijvoorbeeld:

- Het gebruik van het gewenste materiaal werkt niet bij dit project en/of toepassingsgebied;
- Ten opzichte van reguliere materialen, is het gebruik niet interessant (bv. duurzaamheid, geld, tijd, gebruik, voordelen);
- Men heeft geen vertrouwen in het materiaal en wil het toepassen in een (pilot)project;
- De communicatie (of een van de andere schakels in de ketting) gaat fout waardoor het project mislukt;
- De proeven van de materiaaleigenschappen en constructieve verificatie komen niet uit, waardoor men niet kan aantonen dat de toepassing van het materiaal veilig is.
- De politiek of het bedrijfsleven werken gebruik van een materiaal tegen (verschillende redenen mogelijk);
- Het materiaal blijkt te moeilijk uitvoerbaar te zijn;
- Er is geen vraag naar het materiaal op de markt.

4.2 Vorm

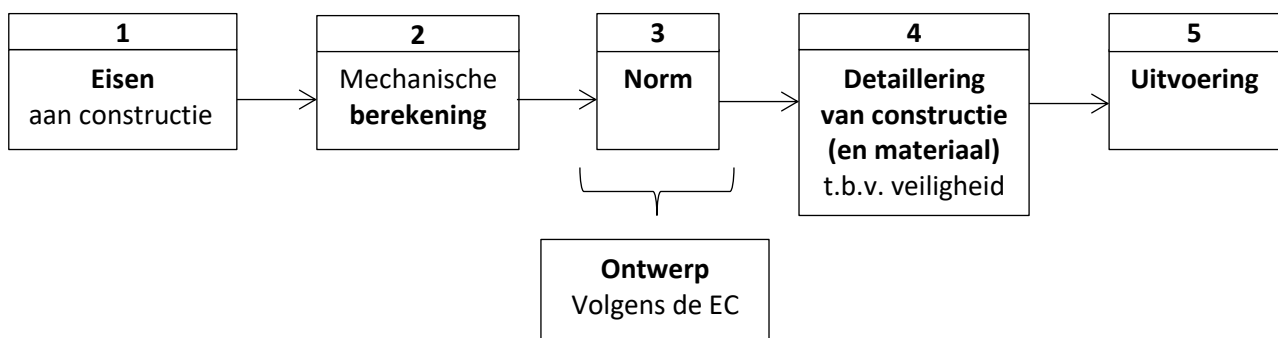
Het is geconstateerd dat er baat is bij het gebruiken van een protocol als leidraad, daarom wordt vervolgens de vorm onderzocht. Daarvoor wordt eerst concreter gekeken naar de overeenkomsten en verschillen tussen standaard projecten en pilotprojecten.

Het proces van een standaard project van het toepassen en berekenen van een (beton)constructie, is op te delen in vier fasen. In Figuur 4-1 zijn de fasen geschematiseerd in verloop van tijd en kosten.



Figuur 4-1: De samenhang van de vier fasen van een project.

Er wordt gezocht naar een manier om de toepassing van een innovatief materiaal in een (pilot)project te toetsen. Het moet globaal genoeg zijn zodat het voor allerlei soorten materialen toepasbaar is en in de verschillende fasen van een project. Een toepassing van een innovatief materiaal kan in elke fase van een project bedacht worden, evenals dat het elke fase van het project toegepast kan worden. In het standaardproces van het berekenen van een constructie gegeven, opgedeeld in vijf stappen (zie Figuur 4-2).



Figuur 4-2: De stappen van een standaardproces van het berekenen van een (beton)constructie.

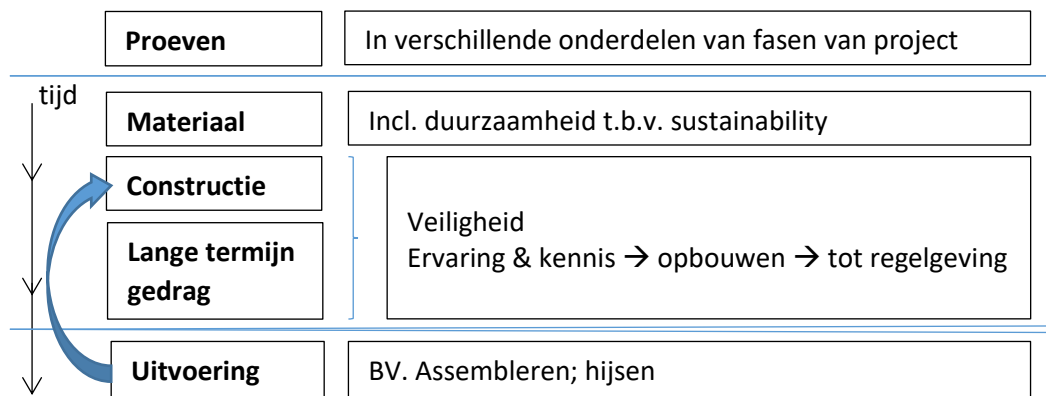
Bij een innovatief materiaal is er nog geen regelgeving ontwikkeld, hierdoor mist stap 3 waar het ontwerp volgens de Eurocode (de norm) gemaakt wordt. Bij deze stap wordt de berekening gekoppeld wordt aan de detaillering van de constructie. In de norm zijn de afspraken vast gelegd voor het berekenen en maken van veilige constructies. De norm schrijft voor hoe de afmetingen van de constructie, het gebruik van het materiaal en de manier van uitvoering bepaald moeten worden. Ook zijn er voorgeschreven proeven, waarvan de methode en uitkomsten de kwaliteit van de materialen en de constructies waarborgen.

Omdat de regelgeving van een innovatief materiaal ontbreekt, moet stap 3 van het proces op een andere manier ingevuld worden. Dit is waar de “design by testing” toegepast wordt om de veiligheid van de constructie aan te tonen. Een voorbeeld van stap 3 van een pilotproject is in Figuur 3-4 weergegeven. Het globale traject, met als doen het “design by testing” kan geschematiseerd worden zodat het bij elk pilotproject en in elke van de vier fase van het project van toepassing is. De “design bij testing” is in een vijftal stappen onderverdeeld, zo dat het in elke fase van deze vier projectfase van toepassing is (zie Figuur 4-3).

Stappen in de fase				
1	2	3	4	5
Ontwerp	Materiaal proeven & input voor berekeningen	Voorspellende berekening	Verificatie van de berekening d.m.v. proeven	Lange termijn (o.a. monitoring)

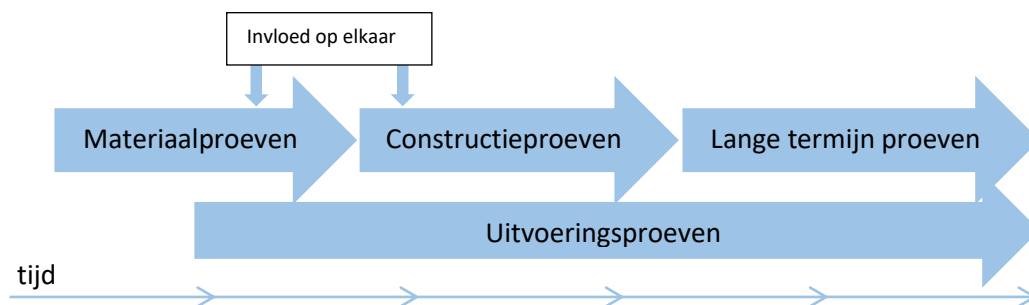
Figuur 4-3: De vijf stappen van elke fase van een pilotproject

Verschillende (verificatie) proeven moeten uitgevoerd worden gedurende het project. Deze proeven kunnen plaatsvinden in de verschillen fasen van een pilotproject. Een overzicht en de samenhang van deze proeven in de loop van tijd met enige uitleg, is geschematiseerd in Figuur 4-5.



Figuur 4-5: Overzicht van verschillende verificatie proeven die noodzakelijk zijn voor het “design by testing”.

Opgemerkt moet worden dat de uitvoeringsproeven invloed hebben op de constructie waardoor de proeven op de constructie (de verificatie proeven) mogelijk aangepast moeten worden. Dit is in het schema duidelijk gemaakt door de pijl. Hierdoor blijkt (ook uit praktijk) dat de proeven gelijktijdig kunnen lopen doordat onderlinge invloed die ze op elkaar hebben. Daarom is er een stroomdiagram gemaakt voor deze proeven in Figuur 4-4, waar de onderlinge verhouding en de tijdsloop ander zijn weergegeven.



Figuur 4-4: Stroomdiagram van de proeven die noodzakelijk zijn voor het “design by testing” tijdens een pilotproject

Deze fase, stappen en verificatie proeven worden gebruikt voor het ontwerpen van en invulling te geven aan het protocol. Ook moet in het protocol het iteratief proces (zie hoofdstuk 2.1 protocol) van het ontwerpen, berekenen en beproeven zichtbaar gemaakt worden.

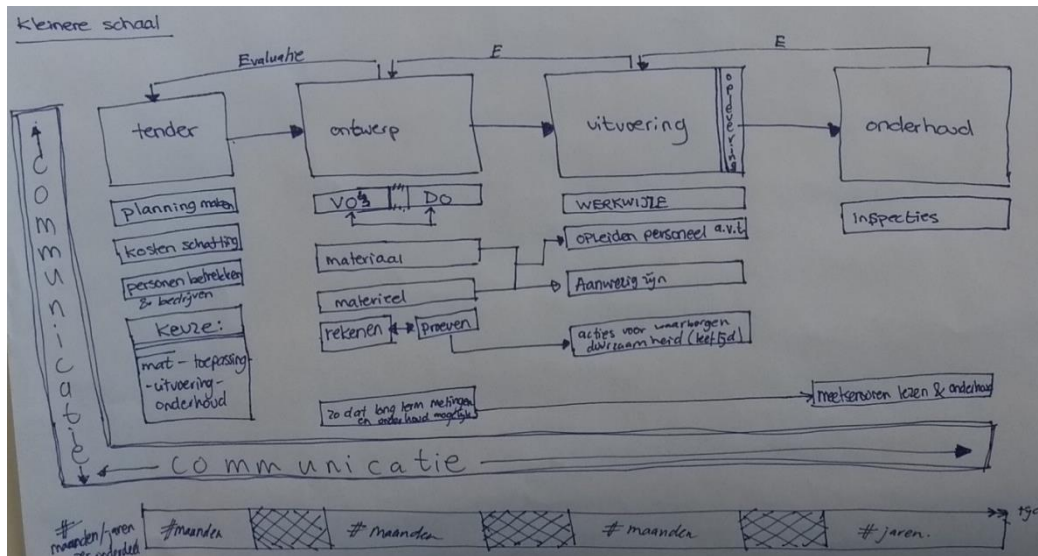
4.3 Opstellen

Het traject van het project van de 3DCP fietsbrug wordt gevolgd om een doorloopbare flowchart te maken met de aandachtspunten en de momenten voor het maken van beslissingen en het uitvoeren van acties. Hierbij worden de momenten van het uitvoeren van proeven benadrukt en wordt een indicatie gegeven van de soort proeven. Het opstellen van het protocol was in zichzelf ook een iteratief proces. Door het steeds kijken naar het opgestelde stappenplan en dit te doorlopen met onder andere de kennis van het 3DCP fietsbrug en het te bespreken met ervaren personen zijn steeds andere versies en vormen ontstaan. Daarbij werden keuzes gemaakt wat handige en minder andere aspecten van de versie van het protocol was. De positieve aspecten werden meegenomen naar de volgende versie en de onnodige elementen werden weg gelaten. Het opstellen en finetunen van het protocol wordt in dit hoofdstuk omschreven.

4.3.1 Versies van protocol

Een aantal van de opgestelde versies worden besproken. Bij elke van deze versies wordt kort besproken wat de voordelen en nadelen zijn en welke informatie (bv. Vorm en tekst) meegenomen is naar de volgende versie. In Bijlage 10: Versies en aantekeningen voor het protocol is het hele overzicht van de versies geplaatst.

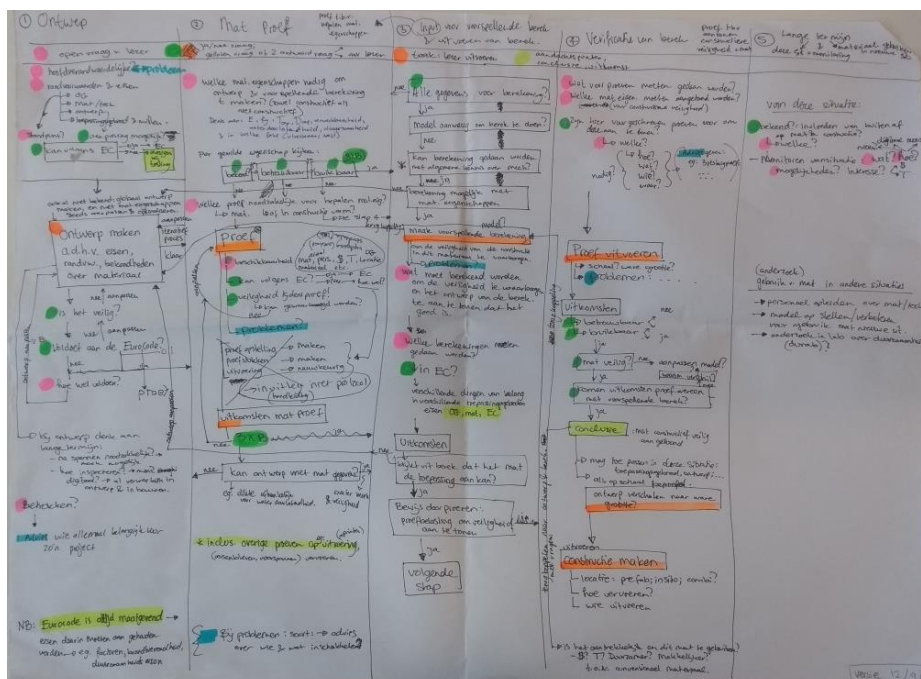
Een van de eerste versies die gemaakt is van het systeem is een "proces van een project" waar de activiteiten per fase van het project zoals dat in Figuur 4-6 geschematiseerd is.



Figuur 4-6: Schema: "Proces van project 3b" (Bijlage 10).

Te zien is dat communicatie zowel binnen elke fase als tussen de fase moet lopen. De vier fasen van het project komen terug in deze versie. Geprobeerd is om onder elke versie de hoofdactiviteiten te plaatsen en de onderlinge invloeden hiervan aan te geven (met pijlen).

Het voordeel van dit schema is dat het overzichtelijk is welke verschillende stappen en activiteiten binnen een project uitgevoerd moeten worden. Echter is de het iteratief proces en de onderlinge



Figuur 4-7: "Flowchart v2" (Bijlage 10).

invloed van de verschillende stappen niet te zien. Om dit wel zichtbaar te maken, is een aantal flowcharts opgesteld zoals degene in Figuur 4-7.

Omdat deze flowchart veel informatie bevat is geprobeerd met kleuren de verschillende onderdelen te groeperen in soorten vragen. Echter is het te volgen proces erg chaotisch en is niet duidelijk waar begonnen moet worden of welke keuzes en overwegingen gemaakt moeten worden. Besloten is dat deze flowchart te gedetailleerd is en dat veel van de stappen en vragen gegroepeerd kunnen worden. In deze flowchart staan alle vragen in de flowchart genoteerd waar voor veel tekst in de flowchart zorgt. Daardoor is besloten een handleiding te schrijven waar wordt omschreven wat elke stap inhoudt, waarvan de bijhorende vragen en acties gegroepeerd zijn. De vragen zijn zo gesteld dat de lezer bepaalde keuzes moet afwegen. De antwoorden op de vragen laten de lezer doorgaan naar een volgende stap met “ja” en teruggaan naar een vorige stap met “nee”.

Opgemerkt werd dat vele vragen betrekking hadden tot drie zelfde afwegingen. Steeds werd de lezer gevraagd of de informatie of uitkomsten van de bepaalde stap of proef bekend, betrouwbaar en bruikbaar waren. Als op een van deze ‘vragen’ het antwoord “nee” was dan zou de lezer verwezen worden naar een vorige stap in het traject van het project. Door de gewichtigheid van deze, korte simpele, maar toch doeltreffende vragen is een begrip bedacht.

Het ‘begrip’ is de BBB (of de 3B’s) wat bij elke stap of actie beantwoord moet worden. Om door te kunnen gaan naar een volgende stap in het traject, moet alles in de huidige stap BBB zijn. Dit bedachte begrip is geïllustreerd in Figuur 4-8.



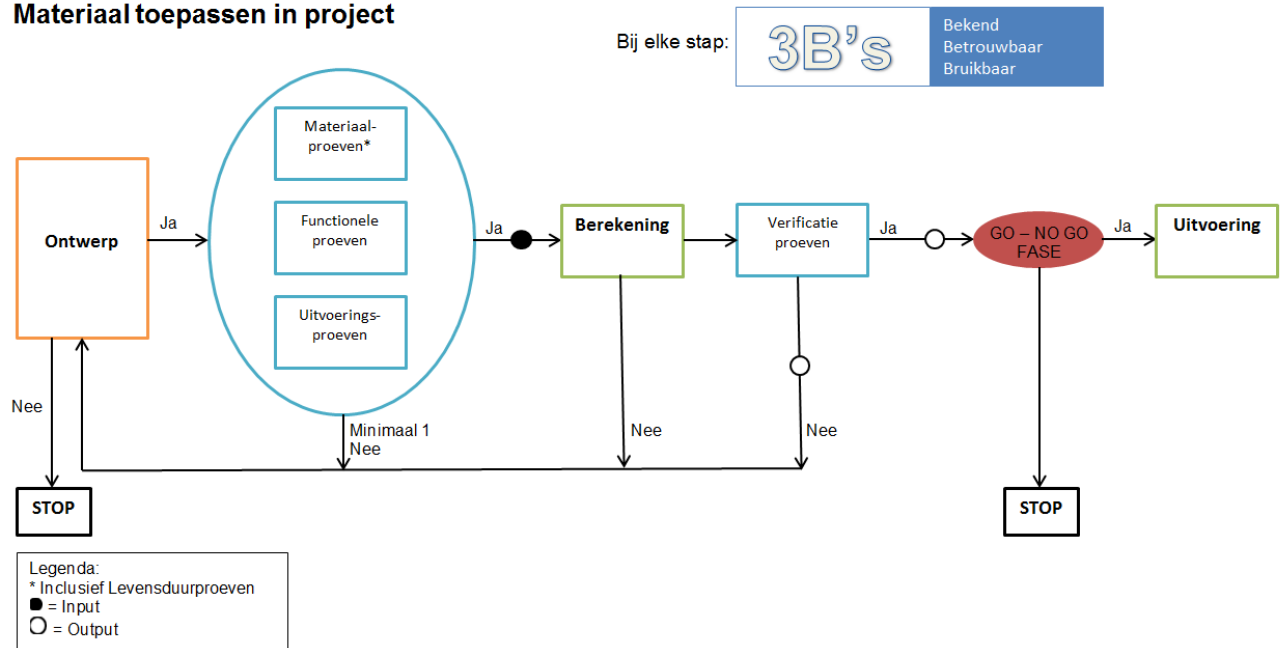
Figuur 4-8: Het begrip BBB wat bij elke stap in het proces beantwoord moet worden.

Omdat de gebruiker van het protocol bij alle acties, uitkomsten en informatie moet bedenken of deze voldoen aan deze BBB-eisen, moeten eisen gesteld worden aan deze persoon. De eis aan de gebruiker is dat die voldoende kennis moet hebben over de volgende onderdelen:

- Verstand van de werking van het materiaal of techniek;
- Kennis over het proces van projecten;
- Bekend zijn met innovatie en de toepassing hiervan.

Na de analyse van “Flowchart v2” is besloten een overzichtelijkere flowchart te ontwerpen. De belangrijkste onderdelen van de fase van een project, het traject het verificatie proeven uitvoeren, het proces en de activiteiten. De keuze van de belangrijkste activiteiten en de onderlinge samenhang is te zien in Figuur 4-9.

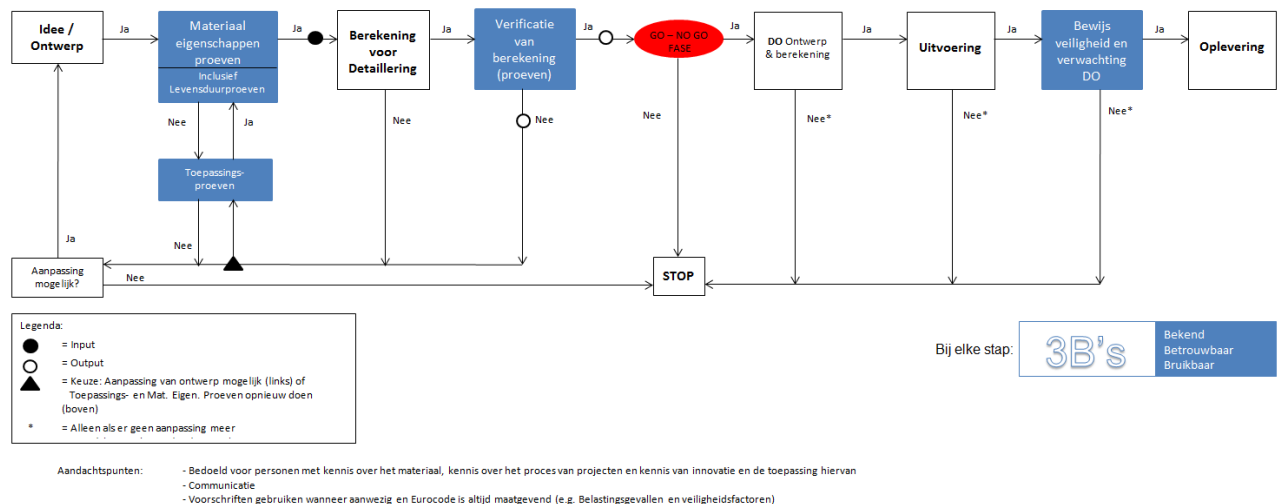
Materiaal toepassen in project



Figuur 4-9: De belangrijkste activiteiten en de volgorde hiervan: "Protocol v2" (Bijlage 10)

De pijlen geven de richting van het proces weer. De 'ja' en 'nee' zijn het antwoord op de BBB van elke stap. Bij het doorlopen van "Protocol v2" werd gerealiseerd dat een uitbreiding ervan noodzakelijk was omdat er stappen missen. Dit leidde tot het protocol in Figuur 4-10: Flowchart: "Protocol v5" (Bijlage Versies en aantekeningen voor het protocol10). Figuur 4-10.

Protocol: Materiaal toepassen in Project



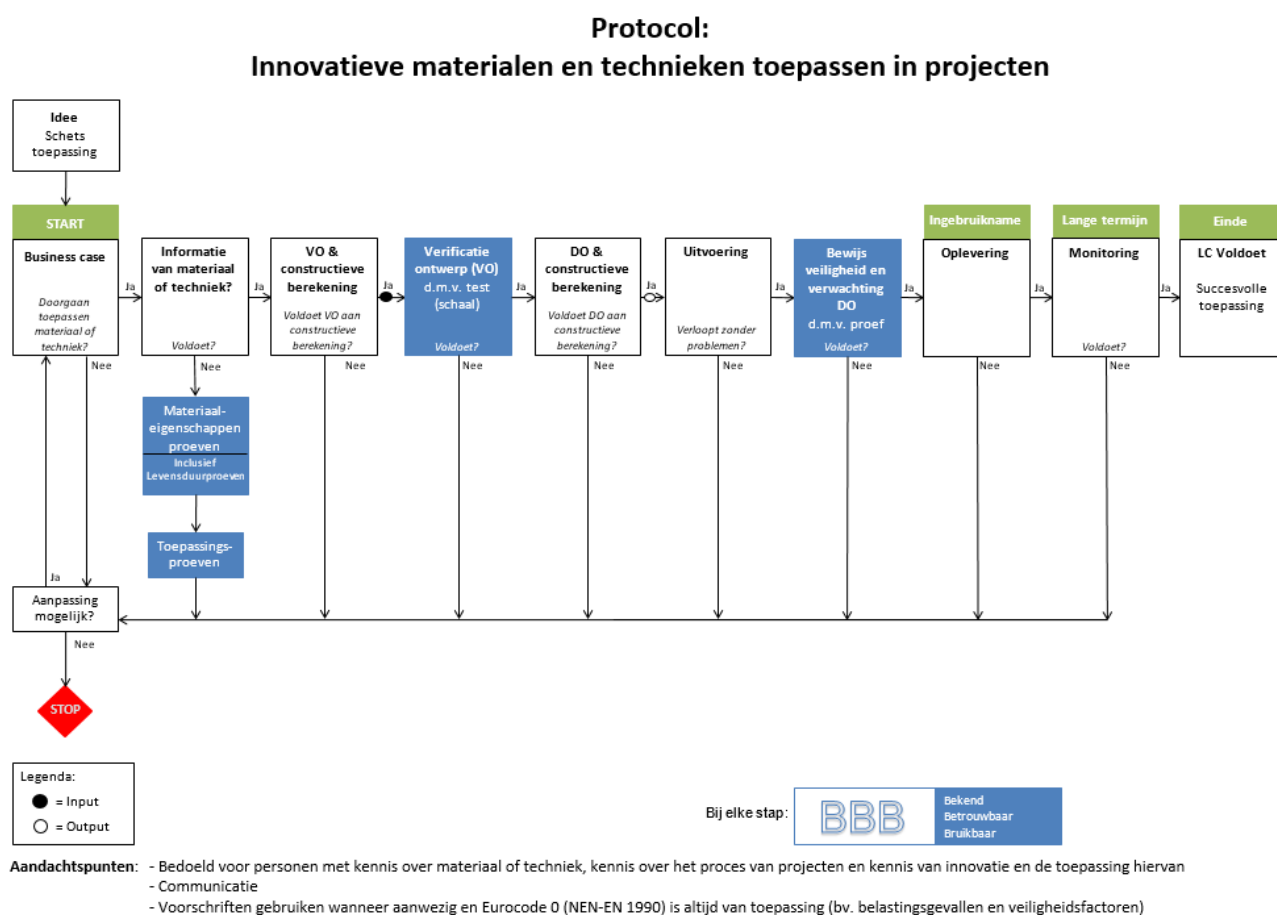
Figuur 4-10: Flowchart: "Protocol v5" (Bijlage Versies en aantekeningen voor het protocol10).

Dit "Protocol v5" laat het proces van een innovatief materiaal beter zien. Sommige stappen zijn blauw gemarkeerd om deze te accentueren. Dit zijn namelijk de proeven die noodzakelijk zijn om bewijs te leveren dat de gemaakte constructie aan het einde voldoende (en aangetoonde) constructieve veiligheid heeft. Door het doorlopen en bespreken met een persoon met verstand van innovatieve projecten, is besloten een aantal van deze stappen op een andere locatie te zetten om daarmee de doorstroming van het protocol accurater te maken. Door deze aanpassingen te verwerken werd

“Protocol v6” (zie Bijlage 10) geleverd. Bij het doorlopen van dit protocol werd gerealiseerd dat de laatste fase van het traject overgeslagen was, het lange termijn. Na de verwerking van de stappen en het uitwerken van de bijpassende vragen, is het definitieve protocol opgesteld.

4.3.2 Eindproduct

De definitieve flowchart van het protocol dat opgesteld is, is in Figuur 4-11 geplaatst. Deze flowchart, samen met een handleiding en een voorbeeld van het doorlopen van de flowchart met een innovatief materiaal, is tevens het protocol dat aan BAM geleverd wordt.



Figuur 4-11: Het protocol in flowchart vorm

Dit format van het protocol in flowchart vorm werkt doordat het als eerste overzichtelijk is en het duidelijk is waar het protocol begint en waar het heen werkt. Elke belangrijke stap heeft een eigen vierkant gekregen waar de werkzaamheden, informatie en uitkomsten betreffend deze stap onder vallen. Niet alleen moet de ‘inhoud’ van deze stap voldoen aan de BBB (zoals onderaan het protocol is gegeven) maar moet het ook voldoen aan de hoofdvraag van de stap. Deze hoofdvraag is in de vierkant van de stap geplaatst. Voor meer informatie over elke stap kan de handleiding geraadpleegd worden. Hierin wordt elke stap omschreven en wordt de hoofdvraag van de stap onderverdeeld in subvragen. Doordat de vragen met of een “ja” of een “nee” beantwoord moeten worden ontstaan er geen complexe situaties waardoor het protocol niet vastloopt.

Bij elke stap wordt een controle uitgevoerd op de kwaliteit van de “inhoud” van de stap. Als deze niet voldoet of niet naar wens is kunnen (lang de “nee” pijl) via de stap “Aanpassing mogelijk?” de mogelijkheden van het project opnieuw onderzocht worden. Na elke keer dat via de stap “Aanpassing mogelijk?” de “ja” pijl wordt gevolgd, komt het protocol terug bij de stap Business Case. Dit laat zien

hoe belangrijk de interesse vanuit het bedrijf is om door te gaan met de investering, ook als hier vaker naar terug verwezen is.

Uit het protocol is in een oogopzicht duidelijk dat er meerdere verificatie stappen in het proces van het “design by testing” plaatsvinden aangezien die geaccentueerd zijn (blauw gekleurd). Verder is te zien dat het idee van het toepassen van een innovatief materiaal buiten het proces van het toepassen valt. Daardoor kan per idee gekeken worden of het een mogelijke toepassing heeft.

Om het gebruik van deze flowchart duidelijker te maken zijn alle stappen van het protocol in een tabel omschreven. Bij elke stap wordt een omschrijving gegeven van de activiteiten die binnen die stap plaatsvinden. Hierbij worden vragen gesteld om de lezer een bepaalde richting uit te laten denken. De vragen kunnen ‘ja’ of ‘nee’ beantwoord worden. Voor elke stap geven de ‘ja’ en ‘nee’ de richting naar de volgende stap aan doormiddel van pijlen (zie Figuur 4-11). Bij elke stap worden tevens voorbeelden gegeven van onder andere situaties, bepaalde acties of aandachtspunten. Als voorbeeld van deze tabel zijn de informatie vier van deze stappen in Tabel 4-2 geplaatst.

Tabel 4-2: Omschrijving van de stappen van protocol.

Omschrijving van stappen van Protocol			
Stap	Omschrijving	Naar volgende stap	Voorbeeld
BBB	Bekend, betrouwbaar, bruikbaar De informatie of uitkomsten uit elke blok moet minstens voldoen aan BBB.	Als het antwoord op de BBB ‘ja’ is, overige vragen beantwoorden. Indien die ook ‘ja’ zijn door de volgende stap.	Informatie van mat/ tech: Bekend? Ja → Betrouwbaar? Ja → Bruikbaar? Nee → volg ‘nee’-pijl van deze stap
START Idee Schets toepassing	Start van het protocol. Idee van een project met innovatief mat/tech nodig. Mogelijk met schets van de toepassing.	Met een idee over de toepassing van het mat/tech.	Vaste afmetingen; Beschikbare ruimte; Toepassingsgebied
Business case	Het model koppelt steeds terug naar deze stap. Veel onderzoek moet gedaan worden van het mogelijke project. Dient als terugkerende ‘Go-No Go’ fase. De verschillende factoren moeten steeds afgewogen.	Als vertrouwen om verder te investeren in het huidige idee van de toepassing en van het mat/tech. Vraag: <i>Doorgaan met toepassen?</i>	Voors en tegens; Project-planning; Mogelijkheid voor het verkrijgen van ontbrekende informatie; Toepassingsmogelijkheden; Interesse in investering van bedrijf?

Het geleverde protocol is een flowchart met daarbij een handleiding waar alle stappen van de flowchart omschreven worden. Ter verduidelijking is het protocol doorlopen met het 3DCP fietsbrug project. Hierbij zijn de stappen van de flowchart, zoals die in het 3DCP project uitgevoerd zij, genummerd. Hierbij zijn de acties, overwegingen, keuzes, specifieke vragen en aandachtspunten bij elke stap in een tabel geplaatst. Het was belangrijk dat het systeem met bijhorende stappen te op zichzelf te doorlopen is en dat de handleiding en het voorbeeld louter dienen als ondersteuning.

De flowchart, de omschrijvingstabel en het 3DCP voorbeeld zijn in Bijlage 11 geplaatst. Naast dat deze onderdelen in de bijlage van dit onderzoeksrapport staan, is het ook aangeleverd als eindproduct. Dit eindproduct is een document van het protocol bestaat uit de flowchart, de tabel als handleiding en het voorbeeld het 3DCP.

Het is niet specifiek bedoeld voor slechts één bedrijf, maar kan door meerdere partijen geraadpleegd worden. Het protocol kan voor de volgende twee situaties gebruikt worden:

1. Voor de start van een project: adviserend over de toepassing van een innovatief materiaal of techniek. Hierbij maakt het protocol inzichtelijk welke informatie nodig is van het materiaal en het project.
2. Tijdens een pilotproject: het protocol dient als checklist van de stappen en de verkregen informatie.

De persoon met het idee van het toepassen van een innovatief materiaal doorlopen om vooraf een idee te krijgen over de volgende zaken:

- De hoeveelheid en specifieke kennis die nodig is van het materiaal of techniek;
- Het circulaire proces van het traject waardoor de kans bestaat dat sommige onderdelen meerdere malen uitgevoerd moeten worden;
- Het belang van de business case;
- De hoeveelheid tijd, geld, personeel, materiaal, materieel wat nodig is (dus vooraf begroot moeten worden);
- De hoeveelheid verificatie van onderdelen dat plaats moet vinden (en dus hoe belangrijk het verifiëren van deze onderdelen is voor het kunnen toepassen).

Na het 'proef' doorlopen van het protocol kan duidelijk zijn of het toepassen van het gewenste materiaal of techniek een mogelijkheid is in de situatie van het idee. Door deze protocol als stappenplan te hebben is het voor de gebruiker duidelijk wat de belangrijke stappen van het proces zijn en wat mogelijk risico's hierbij zijn.

Voor het bewijs van de werking van het protocol, wordt het getoetst met twee andere, innovatieve materialen. Deze twee materialen, samen met een tiental andere materialen en technieken vormen en lijst welke opgesteld is door de ondergetekende. De lijst en informatie hiervan wordt in Hoofdstuk 5 besproken.

5. Innovatieve materialen

Het doel van het onderzoek is het opleveren van een protocol. Dit protocol is bedoel om het traject van het toepassen van innovatieve materialen inzichtelijker te maken. Het protocol dat geleverd wordt is in Bijlage 11 geplaatst. Nu is de vraag, wat gebeurt er als dit opgestelde protocol doorgelopen wordt met andere innovatieve materialen. Wat valt op? Wat loopt niet goed in het proces? Kunnen er dingen aan het protocol aangepast worden door het looplopen met een innovatief materiaal?

5.1 Lijst innovatieve materialen

Gedurende het onderzoek is een lijst met innovatieve materialen en/of technieken bijgehouden. Sommige van deze materialen kwamen ter sprake bij het materiaal technologische overleggen en andere werden voorgesteld door de geïnterviewd personen (zie hoofdstuk 4.1.2) of online gevonden. Een document met aantekeningen met betrekking tot deze innovatieve materialen en technieken is in Bijlage 12 te vinden. Elk materiaal en techniek is in het kort omschreven doormiddel van het geven van onder andere het materiaal, de aanpassing, de werking en welke partijen (mens en bedrijf) ermee betrokken zijn. Alle materialen en technieken op de lijst zijn innovatief waar (nog) geen regelgeving van bestaat.

De lijst is in Excel gemaakt en is bedoel als dynamische lijst. Het kan aangevuld en aangepast worden wanneer er nieuwe ontwikkelingen plaatsvinden binnen het vakgebied. In Figuur 5-1 is een selectie te zien van deze lijst. Hier in zijn een aantal van de materialen en technieken, meteen selectie van de koppen, genoteerd.

Nieuwe/Innovatieve Materialen en Technieken										
#	Benaming	Mat.	Tech.	Aanpassing/ toevoeging	Aan- brengen	Nieuw	Mat.	Wat	Werking	Fase van Traject
1	3D beton printen (3DCP)		x				Beton	Het 3D printen met beton(mortel) (Een al bestaande techniek i.p.v. met kunststof)	Mortelspecie d.m.v. een pomp en printer arm op een printerbed plaatsen op de voorgeprogrammeerde locaties (patronen)	Onderzoek en Uitvoering
3	Biocomposieten					x	Composiet	Combinatie van natuurlijke harsen versterkt met natuurlijke vezels. Eg. vlasvezel (i.p.v. glasvezel) en biobased hars (i.p.v. aardolie gebaseerde hars)	Een licht, sterk en vorm-vrij materiaal met met zeer lage CO2 voetafdruk bestaand uit en na lange gebruiksfase goed verwerkt kan worden. (aanpassing van glasvezel composiet)	Onderzoek en Uitvoering
4	Geopolymeren			x			Beton	Verzamelaan voor alkaligeactiveerde aluminumsilicaten.Portlandcement vervangen met afvalproducten uit de staal- en kolenproductie. Klinkerarme cementen.	De (calciumhoudende) afvalproducten reageren in een alkalisch (hoge pH-waarde) tot een bindmiddel van beton. De toeslagmateriaal blijft hetzelfde. De maximale vervanging van portlandcement is nu 80% en wil met geopolymeren wil naar 100%.	Onderzoek Pilot projecten
6	Mycobase					x	Gras	Gras + schimmel	Sterk, brandwerend, waterwerend materiaal dat ontstaat na het injecteren van schimmels in gras (maaisel) Schimmel = Mycelium	Onderzoek
10	Olifantengras- beton	x		x			Beton	Olifantengras = Miscanthus in beton; lichter van gewicht dan standaard beton; voldoet aan klasse A3	Olifantengras is geluidsabsorberend en neemt tijdens de groei heel veel CO2 op. Miscanthus groeit lokaal en is Miscanthus-beton lokaal recyclebaar	Onderzoek* en Uitvoering
11	Olivijn Beton			x			Beton	Gebouwen gemaakt van beton dat CO2 opnemen uit omgeving. Doel: CO2-neutrale elementen produceren	Beton ontwikkelen dat CO2 opneemt uit de omgeving. Gebruik van Olivijn Olivijn (basisch mineraal) als 'bindmiddel' van CO2 (zuur).	Onderzoek
12	Recycling		x				Alle	Recycling kan op verschillende niveaus; bijvoorbeeld: (1) hele elementen (2) betongranulaat (3) kleinste verbrijzelde stukjes beton (4) onderdelen van elementen	Het materiaal van constructies die gesloopt zijn of worden kan hergebruikt worden in nieuwe constructies. Hier kan rekening mee gehouden worden in het ontwerp (materiaalkeuze)	Onderzoek en Uitvoering
15	(Ultra)Hoogster- kte beton = (U)HSB		x				Beton	Hogere sterkteklassen tot C100/115 lager wcf (0,3 ipv 0,5) lager poriegehalte (1-1,5% ipv 10-12%)	HSB: het optimaliseren van de details van traditioneel beton UHSB: Kleinere diameters van toeslagmateriaal; lager poriegehalte door betere aanvulling van componenten, toevoeging meer hulpstoffen als superplastificeers	Uitvoering
17	Verzel- versterkte Kunststoffen	x				x	Kunststof	Vezelversterkte kunststoffen (ENG= fibre-reinforced polymer)	Is een composiet: een materiaalconstructie, bestaande uit minimaal 2 macroscopisch nog te onderscheiden materialen die samenwerken om zo tot een beter resultaat te komen.	Uitvoering
18	Zelfhelend beton		x	x	x		Beton	Aanbrengen op bestaand beton of meestorten in nieuw beton. Een autonome reparatie systeem voor zowel bestaande als nieuwe betonconstructies	Toevoeging van bacteriën en hun voedingsstoffen in beton specie of reparatiemortel specie. Deze bacteriën gaan kalk produceren wanneer in contact met water (wat gebeurt wanneer beton scheurt en er constant water is)	Uitvoering

Figuur 5-1: Een selectie van de lijst met nieuwe/innovatieve materialen en technieken.

De volledige lijst met nieuwe/innovatieve materialen en technieken is te vinden in Bijlage 13.

5.2 Protocol toetsen

Uit deze lijst zijn twee innovatieve materialen gekozen waarvan de specificaties onderzocht zijn. Met de kennis van deze materialen wordt het protocol in case studies getoetst. De materialen Zelfhelend beton en Ultrahogesterktebeton zijn gekozen om in te verdiepen en om het protocol mee te toetsen.

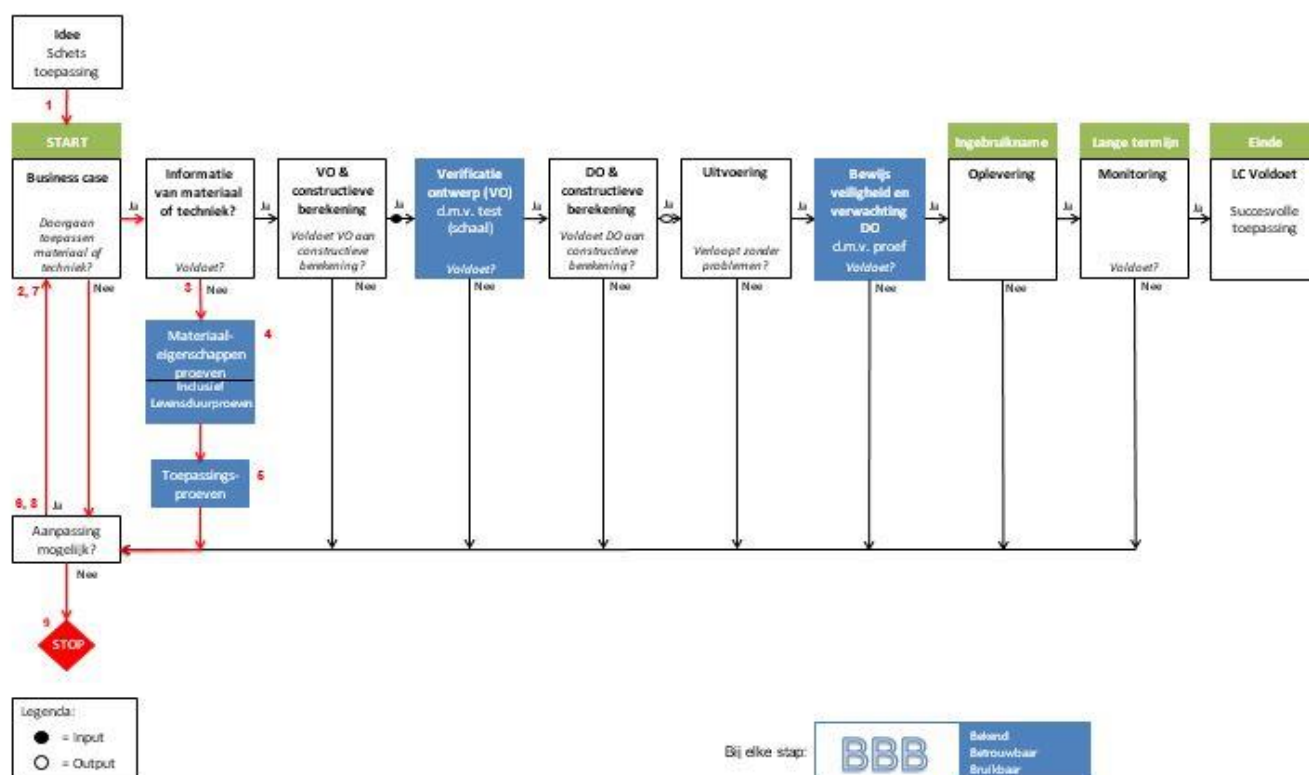
Het onderzoek naar de specificaties van deze twee materialen is in rapportvorm in Bijlage 14 geplaatst. Deze specificaties moeten bij de hand gehouden worden wanneer de onderstaande case studies behandeld worden gezien veel kennis nodig is van het materiaal om het protocol te doorlopen. Voor zelfhelend beton zijn twee case studies gedaan.

Bij elke case study wordt eerst de case study kort omschreven. Hierna is het protocol geplaatst. De stappen die genomen worden zijn genummerd en de pijlen die gebruikt worden zijn rood geaccentueerd. Doordat de pijlen van het proces van deze specifieke case study gemarkeerd zijn, is als het goed is het iteratieve traject te zien dat optreedt. Na het gemarkeerde protocol is een tabel geplaatst waar de stappen doorlopen worden met daarbij extra uitleg.

5.2.1 Case study 1

Bij de eerste case study wordt gekeken naar de mogelijkheden voor het toepassen van zelfhelend reparatie mortel (#2) bij de herstelwerkzaamheden van een viaduct.

Protocol toetsen Doorlopen met: Zelfhelend beton (#2 Liquid Repair System)

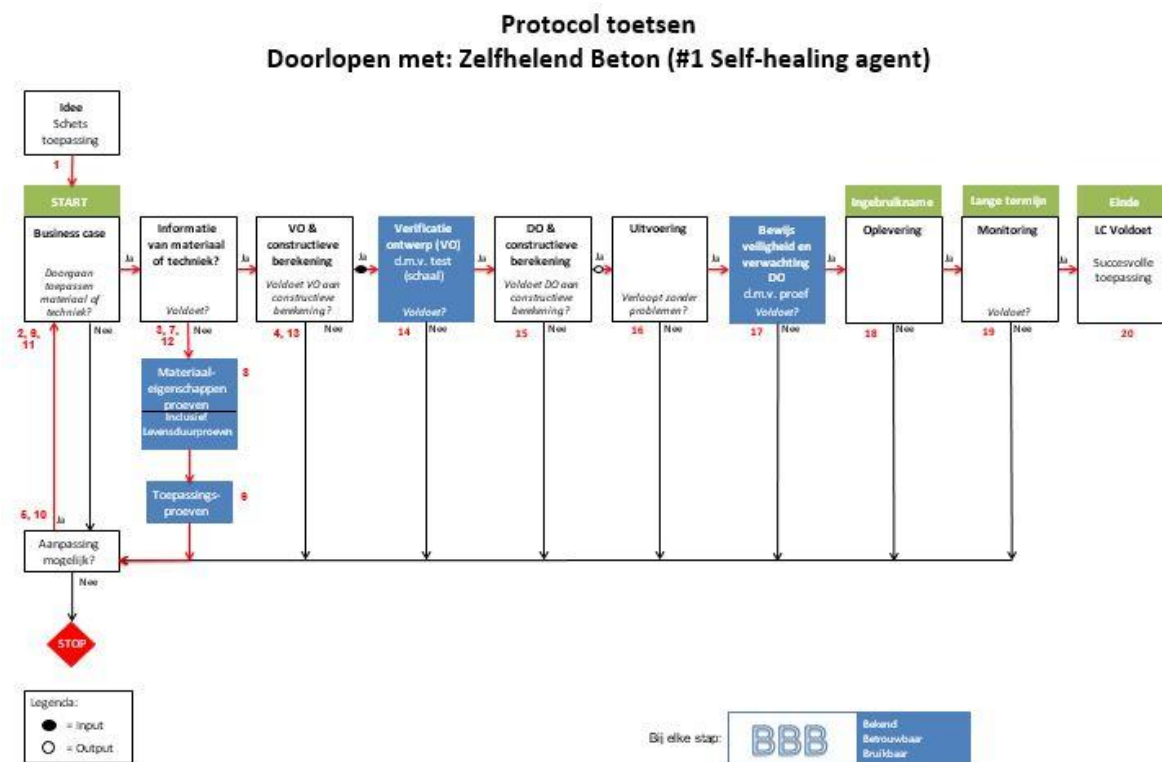


Protocol toetsen Zelfhelend beton (#2 Liquid Repair System ER7)		
<i>Informatie Case Study:</i>		Een viaduct moet hersteld worden: repareren van de gescheurde beton liggers, de lekkende voegen en het asfalt worden
Stap #	Stap Naam	Uitleg van hoe stap doorlopen, waarom, overwegingen, etc.
1	Idee: Schets toepassing	Het zelfheling agent gebruiken om het viaduct, gemaakt van beton te herstellen. Schets:  Asfalt (zwart) Beton (grijs) Ligger (grijs) Kolommen (grijs) Toepassen bij de liggers waar scheuren in zitten. Ja → Stap 2
2	Business case	De locatie van het beton wat hersteld moet worden is een locatie waar constant water is. De bacteriën kunnen werken. Het is een interessante mogelijkheid omdat het sneller en duurzamer is dan de hele ligger vervangen. Ja → Stap 3
3	Informatie van materiaal of techniek	Informatie over materiaaleigenschappen en uitvoering bekend (Basilisk). Maar er is onzekerheid over de toepassing in deze situatie. Nee → Stap 4
4	Materiaal-eigenschap proeven	Materiaaleigenschappen zijn BBB (Basilisk) Toepassing is niet bekend. → (Automatisch naar volgende stap) Stap 5
5	Toepassings-proeven	Functionele proeven: Wat gebeurt er als het reparatie mortel wordt geplaatst en vervolgens asfalt overheen geplaatst wordt? Proef uitvoeren: Met ZHB #2 gerepareerd proefstuk. Dan plaatsen asfalt (temperatuur 180 C). Uit de proef blijkt: dat de bacteriën tot 70C en de sporen tot 100 C kunnen overleven. Na het storten van het asfalt zou het zelfhelende effect niet meer aanwezig zijn in het gerepareerde beton. → Automatisch naar volgende stap → Stap 6
6	Aanpassing mogelijk?	Misschien: Het toevoegen van een extra laag tussen het beton en het asfalt? Ja → Stap 7
7	Business case	Extra laag materiaal heeft twee nadelen: - zal voorkomen dat water bij het beton komt waar het zelfhelende middel is toegepast. De functie van het materiaal wordt daardoor tegen gehouden (op lange termijn); - het is een extra hoogte op het viaduct: geen goede aansluiting met de weg (voor en na het viaduct) → hobbel in de weg (niet gewenst) → Nee → Stap 8
8	Aanpassing mogelijk?	Nee → Stap 9 = STOP
9	Stop	Niet interessant om in dit geval zelfhelend beton (#2) toe te passen omdat niet voldaan wordt aan de randvoorwaarden voor de werking en te veel extra maatregelen moeten worden genomen.

5.2.2. Case study 2

Bij de tweede case study van zelfhelend beton wordt gekeken naar de mogelijkheden van het bouwen van een waterreservoir. Hierbij wordt het zelfherstellingsmiddel voor betonmengsels (#1) toegepast.

De aanpak van deze case study verschilt van de van de andere twee. Hier worden veel scenario's gebruikt waarbij naar de volgende stap gegaan wordt omdat wordt gesteld dat de uitkomsten van die stap BBB zijn.



Protocol toetsen Zelfhelend beton (#1 Self-healing agent)		
<i>Informatie Case Study:</i>		Een waterreservoir wil gebouwd worden met zelfhelend beton. Eis opdrachtgever: mag niet lekken (geen tolerantie voor scheuren)
Stap #	Stap Naam	Uitleg van hoe stap doorlopen, waarom, overwegingen, etc.
1	Idee: Schets toepassing	Waterreservoir van beton, geen tolerantie voor scheuren Ja → Stap 2
2	Business case	Zowel bedrijf als opdrachtgever willen kijken naar de mogelijkheid om het toe te passen. Veel proeven met het materiaal al gedaan door Basilisk en TUD. Tevens al toegepast bij andere projecten. Ja → Stap 3
3	Informatie van materiaal of techniek	Uitkomsten proeven van Basilisk en TUD zijn BBB. En voldoende informatie voor de volgende stap Ja → Stap 4
4	VO & constructieve berekening	Een VO en constructieve berekening kunnen gemaakt worden. Echter wil er dubbelcheck gedaan worden met het zelfhelend beton en of het inderdaad kan voldoen aan de eis van de opdrachtgever: geen tolerantie voor scheuren. Daarom toepassingsproeven herhalen.

		Nee → Stap 5
5	Aanpassing mogelijk?	Ja, proef doen. Ja → Stap 6
6	Business case	Interessant. Een kleine investering in een toepassingsproef. Ja → Stap 7
7	Informatie van materiaal of techniek	Ja voldoende. Maar een dubbelcheck wil gedaan worden. Nee → Stap 8
8	Materiaal-eigenschap proeven	Ja voldoende. Maar een dubbelcheck wil gedaan worden m.b.t. de eis van de OG → Automatisch naar Stap 9
9	Toepassings-proeven	Proef: Controle waterdichtheid door zelfhelendheid. Dit kan kleinschalig uitgevoerd worden op proefstukken waar scheuren inzitten en waar aan een zijde water doorheen geperst wordt. Stel: Uitkomsten proef zijn (zoals voorspel) vergelijkbaar met de uitkomsten van de proeven van Basilisk en TUD. → Extra zekerheid voor bedrijf en opdrachtgever. → Automatisch naar Stap 10
10	Aanpassing mogelijk?	Geen problemen, en DO kan gemaakt worden Ja → Stap 11
11	Business case	Interessant! Ja → Stap 12
12	Informatie van materiaal of techniek	Alles is BBB! Ja → Stap 13
13	VO & constructieve berekening	VO en constructieve berekening kunnen gemaakt worden zoals dat ook gedaan wordt bij standaard betonconstructies (m.b.v. EC). Ja → Stap 14
14	Verificatie ontwerp (VO)	Verificatie van het ontwerp zit in de toepassingsproeven die opnieuw uitgevoerd. Zekerheid over het bouwen van een waterreservoir in ZHB. De Self-healing agent heeft geen invloed op de andere materiaaleigenschappen van beton: zelfde druksterkte en er kan wapening toegepast worden. De bacteriën die zorgen voor de zelfhelende eigenschap kunnen gezien worden als vulstoffen. Ja → Stap 15
15	DO & constructieve berekening	Kunnen gemaakt worden omdat VO voldoet en er zekerheid is dat constructief veilig is. Ja → Stap 16
16	Uitvoering	Waterreservoir wordt op traditionele manier gebouwd (bekisting en storten) omdat de Self-healing agent toegevoegd wordt aan het beton (hulpstof). #STEL: het gaat zoals voorspeld (zonder complicaties): Ja → Stap 17
17	Bewijs veiligheid en verwachting DO	Als de uit #STEL: het gaat zoals voorspeld (zonder complicaties): Ja → Stap 18
18	Oplevering	#STEL: het gaat zoals voorspeld (zonder complicaties): Ja → Stap 19
19	Monitoring	#STEL: het gaat zoals voorspeld (zonder complicaties): Ja → Stap 20
20	LC Voldoet	#STEL: het gaat zoals voorspeld (zonder complicaties) na de berekenende levensduur van de constructie: (De levensduur van deze constructie uit ZHB zal hoogstwaarschijnlijk langer zijn dan die van traditioneel beton doordat het de scheuren zelf herstelt!) Toepassing succesvol en leerzaam voor vervolgprojecten en toepassingen van dit materiaal!

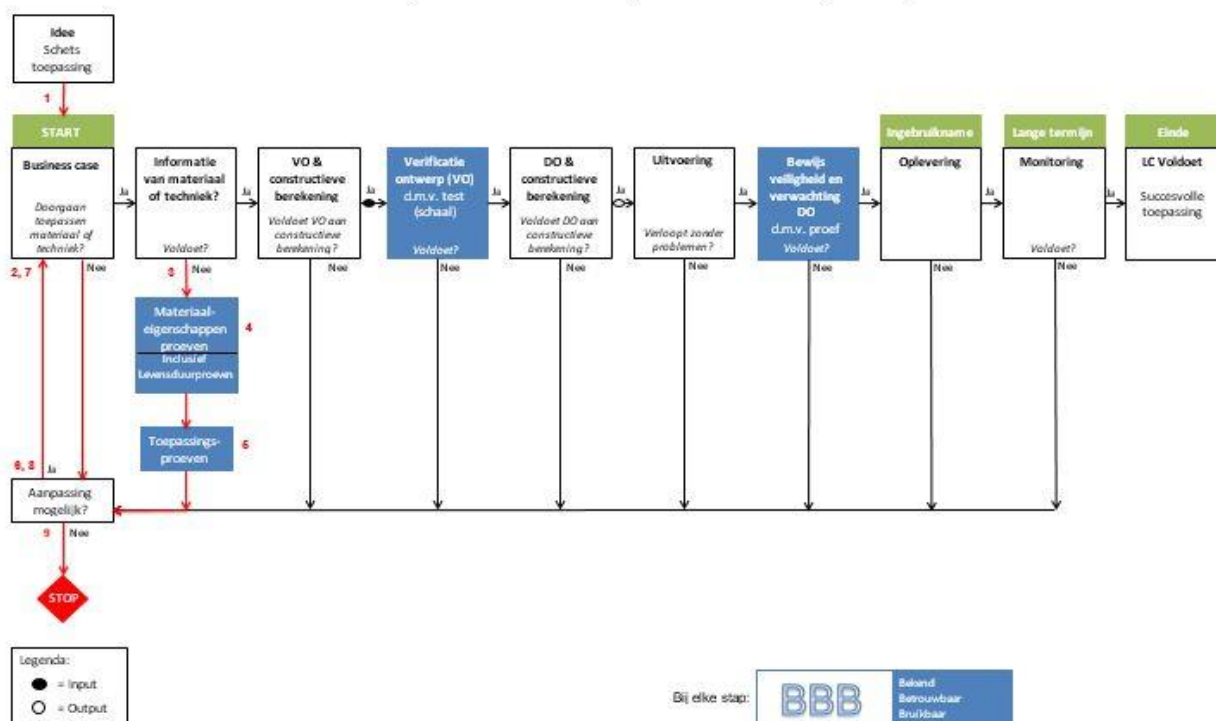
5.2.3. Case study 3

Bij de derde case study wordt gekeken naar de mogelijkheid om sluisdeuren te maken van vezel-versterkt Ultrahogesterktebeton (vv-UHSB).

In 2010 zijn de eerste betonnen sluisdeuren in Hogesterktebeton (HSB) geplaatst. Deze zijn onderdeel van sluis 124 op IJburg in Amsterdam. (CementThema, 2010) Echter bestaan er (nog) geen sluisdeuren (vv-)UHSB.

Ook zijn er onderzoeken gedaan naar het toepassen van dit materiaal in dit toepassingsgebied. Een van deze onderzoeken is: "Ontwerp Sluisdeur in VVUHSB" – Albert Reitsema welke uitgevoerd is in 2012. (InnovatieveMaterialen, 2017) Vijf jaar later is de toepassing van een sluisdeur in vv-UHSB vooralsnog niet uitgevoerd. In onderstaande protocol wordt deze case bekeken en worden de stappen omschreven.

Protocol toetsen Doorlopen met: Ultrahogesterktebeton (UHSB)



Protocol toetsen Ultrahogesterktebeton		
<i>Informatie over Case Study:</i>		Verzel-versterkt Ultrahogesterktebeton (vv-UHSB) gebruiken bij het maken van sluisdeuren.
Stap #	Stap Naam	Uitleg van hoe stap doorlopen, waarom, overwegingen, etc.
1	Idee: Schets toepassing	Sluisdeuren van vv-UHSB (i.p.v. hout of staal) Ja → Stap 2
2	Business case	Uit onderzoek A. Reitsema lijkt het theoretisch mogelijk. Interessant om UHSB te gebruiken door de materiaaleigenschappen: de ultrahoge sterkte en de hogere duurzaamheid (theoretisch gezien) Ja → Stap 3
3	Informatie van materiaal of techniek	Nee, materiaaleigenschap bij toepassingsgebied, toepassingsproeven: hoe moet dat in dit toepassingsgebied: Functionele- en uitvoeringsproeven. Nee → Stap 4
4	Materiaal-eigenschap proeven	Materiaaleigenschappen bekend. Onzekerheid zit in de toepassingsproeven. Automatisch naar Stap 5
5	Toepassingsproeven	Nadenken over toepassingsgebied en wat voor uitvoeringsproeven en functionele proeven hierbij horen. Doe proeven met bijvoorbeeld het maken van een sluisdeur; aanvaarmogelijkheden van boten; hoe de sluisdeuren kunnen rollen of scharnieren. <i>#STEL: Uitkomsten van deze toepassingsproeven hebben veel belovende uitkomsten doordat die wijzen op de mogelijkheid vv-UHSB sluisdeuren te laten rollen, dat bij het aanvaren de sluisdeuren weinig beschadigingen en heel blijven. En dat het gebruik van vv-UHSB interessanter is dan traditionele materialen: wegen voordelen (duurzaamheid) op tegen nadelen (kosten)</i> Automatisch naar Stap 6
6	Aanpassing mogelijk?	Genoeg informatie om een indicatie VO en berekening te maken Ja → Stap 7
7	Business case	#Stel: Geld is onbeperkt en men wil graag een (pilot)project voor vv-UHSB sluisdeuren. Echter door een gebrek aan informatie moeten er meer proeven met daadwerkelijke bruikbare uitkomsten komen. Nee (niet voldoende informatie) → Stap 8
8	Stop	Te weinig BBB-informatie in vooral functionele- en uitvoeringsproeven om nu te kunnen zeggen dat het mogelijk is een sluis te kunnen maken van UHSB. Eerst meer proeven doen op schaal sluisdeuren.

6. Conclusie

In dit onderzoek is gezocht naar een antwoord op de onderzoeksvraag: “Hoe kan een innovatief materiaal en/of techniek toegepast worden wanneer regelgeving (nog) ontbreekt?”. Hiervoor is meegelopen met een (pilot)project. Er is onderzoek gedaan naar de situatie en het belang van regelgeving. Om een completer beeld te geven van dit onderwerp zijn een aantal personen geïnterviewd. Uit de resultaten van het proces van een pilotproject waar een innovatief materiaal toegepast wordt, kunnen de volgende dingen geconcludeerd worden.

Het grote verschil tussen een pilotproject en een standaard project is dat bij een pilotproject de voorgeschreven methode voor het berekenen en uitvoeren ontbreekt. Doordat deze stap ontbreekt moet de veiligheid van het materiaal, de techniek, de uitvoering en de constructie aangetoond worden. Dit wordt gedaan door middel van het uitvoeren van proeven. Uit het gevolve 3DCP fietsbrug project en de interviews kan geconcludeerd worden dat een globaal ‘stappenplan’ hierbij ontbreekt.

Het blijkt dat de volgorde van de verschillende stappen in een project en de onderlinge invloeden op elkaar van belang zijn. Hierbij kwam naar voren dat een protocol in de vorm van een flowchart geschikt is als een globaal stappenplan.

Het doorlopen van het opgestelde protocol met het 3DCP fietsbrug project laat zien welke informatie voorafgaand nodig is en welke acties (in detail) uitgevoerd moeten worden om tot een eindproduct te komen dat aan de gestelde eisen voldoet. Naast het 3DCP-project is protocol ook getoetst aan de hand van twee andere materialen in case studies. Door het doorlopen van het protocol blijkt dat het lastig is om de toepassing van een innovatief materiaal succesvol te maken zonder voldoende kennis van het gekozen materiaal of het project. Het ontbreken van voldoende kennis zorgt voor veel onzekerheid. Het protocol geeft dus voorafgaand aan een project, waar innovatieve materialen toegepast worden, aan wat er mist, waar de risico's liggen en of het rendabel is om een idee uit te werken. Door het volgen van de stappen van het protocol wordt ook duidelijke waar het begin en einde van het traject is. Tevens stuurt het protocol de gedachtegang van de gebruiker een bepaalde kant op waardoor er vragen opkomen waar anders niet aan gedacht zou worden.

Ook zorgt dit protocol dat het toepassen van een innovatief materiaal of techniek overzichtelijker, makkelijker en beter controleerbaar wordt doordat het visueel, gestructureerd en een sluitende werkmethode is. Door het beantwoorden van de hoofd- en bijvragen worden complexe situaties ontweken waardoor het doorlopen van het protocol niet vastloopt. Doordat het eindantwoord bij elke stap ‘ja’ of ‘nee’ moet zijn. Bij het antwoord moet de betreffende ‘ja’ of ‘nee’ pijl gevolgd worden naar de volgende stap. Het begrip ‘BBB’ is bedacht om de inhoud van elke stap te toetsen op of het *bekend*, *betrouwbaar* en *beschikbaar* is.

Dit alles zorgt ervoor dat dit protocol een handige en aangename tool is om naast de Eurocode 0 te gebruiken. Het dient als toetsing en stappenplan voor het toepassen van innovatieve materialen of technieken.

7. Aanbeveling

Voor een innovatief materiaal en/of techniek bestaat geen regelgeving of een andere vorm van globaal te gebruiken advies. Als in praktijk gewenst is zo'n materiaal en/of techniek toe te passen moeten vele acties ondernomen worden. Een globaal protocol, zoals in dit onderzoek ontwikkeld is, kan gebruikt worden om advies te geven over het toepassen van innovatieve materialen en technieken in een project. Mogelijk kan dit protocol gebruikt worden om te beginnen met het ontwikkelen van mogelijke richtlijnen of (CUR)aanbevelingen.

Door het meelopen met het traject van het 3DCP kan uit ervaring gezegd worden dat het duidelijk is dat soms een stappenplan om te volgen ontbreekt. De personen betrokken bij dit pilotproject hebben veel ervaring met het aantonen van de constructieve veiligheid van constructies. Door deze jarenlange ervaring hadden ze een eigen idee ontwikkeld hoe ze het "design by testing" zouden implementeren. Echter was er een verschil tussen de methodes die werden toegepast. Door de verschillende benaderingen in combinatie met gebrek aan communicatie, deden zich af en toe misverstanden voor.

Het opgestelde protocol kan dienen als leidraad om het door NEN-EN 1990 gestelde "design by testing" uit te voeren. Hierdoor is voor alle partijen duidelijkheid welke stappen allemaal uitgevoerd moeten worden wat voor een goede communicatie tussen de verschillende partijen kan zorgen. Tevens kan het een bepaalde kwaliteit stellen aan en een maatstaf implementeren voor het gebruik van nieuwe materialen of technieken: deze moeten onder andere duurzamer of beter zijn dan standaard materialen.

Het algemene protocol dat opgesteld is in dit onderzoek legt een goede basis. Het protocol heeft het gewenste doel behaald, namelijk het adviseren over het toepassen van een innovatief materiaal of techniek en de mogelijke risico's aankaarten. Ondanks hierdoor, kunnen er verdere onderzoeken gedaan worden op het gebied van het specifieker maken. Aanbevolen wordt om vervolgonderzoeken uit te voeren naar de toepassing van bepaalde materialen en/of technieken in een toepassingsgebied. In meer detail kan dan advies gegeven worden over de mogelijk risico's en de personen die ingeschakeld en op de hoogte gesteld moeten worden. Ook kan onderzoek gedaan worden naar het toepassen van het protocol in meer pilotprojecten. Hierdoor kan het protocol aangepast en verfijnd worden.

Het onderzoek naar het opstellen van een protocol is in opdracht gedaan van BAM Infraconsult. BAM is een uitvoerder, wat een van de drie partijen is die moeten samenwerken om tot een aanbeveling of norm te komen. Aanbevolen wordt dat BAM de andere twee partijen, de kennisinstituten en de veiligheidsinstituten, betrek bij vervolg onderzoeken.

Literatuurlijst

- Basilisk. (2017, Juli). *Hoe werkt het?* Opgehaald van Basilisk self healing concrete: <http://www.basiliskconcrete.com/hoe-werkt-het/>
- Basilisk. (2017, Juli). *Producten*. Opgehaald van Basislisk self healing concrete: <http://www.basiliskconcrete.com/producten/>
- Berg, P. v. (1998). *Betontechnologie*. (C. Souwerbren, Red.) 's-Hertogenbosch: Cement en beton.
- Betonfiguratie. (2017, juli). *Duurzame betonnen bestrating*. Opgehaald van www.betonfiguratie.be: <http://www.betonfiguratie.be/producten/slipformpaver>
- Betoniek. (2009, Juni). Hoera, mijn beton klust zelf! *Betoniek, Vakblad voor bouwen met beton*, 10.
- BetonLexicon. (2017, Oktober 16). *Hydraulische stof*. Opgehaald van Beton Lexicon: <http://betonlexicon.nl/H/Hydraulische%20stof/>
- Bolhuis, J. (2017, Mei 12). Innovatief project, 3DCP. (K. Kleiss, Interviewer)
- Bulck, L. v. (2017, augustus 17). *Materiaaleigenschappen printmortel*. Eindhoven.
- Cement. (2017, Juni). *Revolutionair ontwerp ultraslanke hybride trap*. Opgehaald van Cement Kennisplatform over Betonconstructies: <https://www.cementonline.nl/abt-realiseert-ultraslanke-hybride-trap>
- Cement. (2017, Juni). *Ultra-Hogesterktebeton*. Opgehaald van Cement Kennisplatform over Betonconstructies: <https://www.cementonline.nl/ultrahogesterktebeton>
- CementThema. (2010). Sluisdeur in hsb. *Cement*.
- CEN. (2011, December). Eurocode0. *NEN-EN 1990+A1+A1/C2*. CEN Europees Commissie voor Normalisatie.
- Centrum, C. &. (2017, Juli). *Beton en milieu*. Opgehaald van Cement & Beton Centrum: <http://www.cementenbeton.nl/duurzaam-bouwen/beton-en-milieu>
- Centrum, C. &. (2017, Juni). *Hogesterktebeton*. Opgehaald van Cement & Beton Centrum: <http://www.cementenbeton.nl/materiaal/innovaties/hogesterktebeton>
- Centrum, C. &. (2017, Juni). *Uhsb-standaardbrug voor Pijnacker-Nootdorp*. Opgehaald van Cement & Beton Centrum: <http://www.cementenbeton.nl/materiaal/innovaties/ultra-hogesterktebeton/uhsb-standaard-brug-pijnacker>
- Centrum, C. &. (2017, Juni). *Ultra-hogesterktebeton*. Opgehaald van Cement & Beton Centrum: <http://www.cementenbeton.nl/materiaal/innovaties/ultra-hogesterktebeton>
- Club, R. 3. (2017, Juli). *TU Eindhoven neemt 3D-betonprinter in gebruik*. Opgehaald van 3D Printing club: <https://www.3dprintingclub.nl/tu-eindhoven-neemt-3d-betonprinter-in-gebruik/>
- CUR. (2017, Juli). *Wat is een CUR-Aanbeveling*. Opgehaald van Cur-Aanbevelingen: <http://cur-aanbevelingen.nl/Uploads/2011/2/Wat-is-een-CUR-Aanbeveling.pdf>
- Dale, v. (2017, Juli). *Betekenis 'protocol'*. Opgehaald van van Dalen Gratis woordenboek: <http://www.vandale.nl/opzoeken?pattern=protocol&lang=nn>

- Dale, V. (2017, Augustus). *Betekenis 'voorschrift'*. Opgehaald van van Dale:
<http://www.vandale.nl/opzoeken?pattern=voorschrift+&lang=nn>
- Delft, i. (2017, Juni). *UHSB standaardbrug Pijnacker*. Opgehaald van ipv Delft creatieve ingenieurs:
<http://ipvdelft.nl/portfolio-item/uhsb-fietsbrug-pijnacker/>
- Doomen, C. (2016). *The Effect of Layered Manufacturing on the Strength Properties of Printable Concrete*. Eindhoven: TU/e.
- DP6. (2017, Juni). *Catharinabrug*. Opgehaald van Hoogwaardige architectuur voor de gebruiker:
<http://www.dp6.nl/projecten/catharinabrug>
- easability. (2017, Juli). *Iteratief proces*. Opgehaald van De gebruiker as uitgangspunt, succesvolle productontwikkeling als resultaat: <http://www.easability.nl/iteratie.html>
- Encyclopedie, N. (2017, September 26). *Iteratief*. Opgehaald van encyclo.nl:
<http://www.encyclo.nl/begrip/iteratief>
- Henket, M. (2017, Juli). *Beton blijft hot, omdat er zo veel van is*. Opgehaald van Cobouw:
<https://www.cobouw.nl/bouwbreed/nieuws/2014/8/beton-blijft-hot-omdat-er-zo-veel-van-is-101155683>
- Hernandez, M. (2016, September). *Using Self-Healing Concrete for Concrete Repairs on Aging Concrete Structures*. Research and Development Office Science and Technology Program. Denver: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- InnovatieveMaterialen. (2017, September 29). *Ontwerp van een vvUHSB sluisdeur*. Opgehaald van Innovatieve Materialen:
http://www.innovativematerialen.nl/index.php/materialen/beton/vvUHSB_sluisdeur?id=100
- Jasper van Alphen, C. D. (2016). *Literature review: "Printable Concrete"*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- Laagland, i. H. (2017). *Schetsontwerp 3DCP, groeidocument*. Deventer: Witteveen + Bos.
- Lexicon, B. (2017, Juli). *Dekking*. Opgehaald van Beton Lexicon, hét woordenboek voor de betonwereld: <http://betonlexicon.nl/D/Dekking/>
- Lukovic, M. (2017). Toepassen nieuwe materialen. (K. Kleiss, Interviewer)
- Management, R. P. (2017, Juni). *Projectmanagement*. Opgehaald van Ribbius Project Management projectmanagement- en adviesdiensten: http://ribbiuspm.nl/?page_id=19
- Nations, U. (2017, Augustus). *Paris Agreement - Status of Ratification*. Opgehaald van United Nations Framework Convention on Climate Change:
http://unfccc.int/paris_agreement/items/9444.php
- NEN. (2017, Augustus). *NEN, normalisatie en normen*. Opgehaald van NEN:
<https://www.nen.nl/Over-NEN.htm>
- Noord-Brabant, P. (2016). *Vraagspecificatie deel 1 - Producteisen*. Werkdocument, waarin verwerkt de nota's van inlichtingen, Cluster Projecten en Vastgoed.
- Noord-Brabant, P. (2017, April). *N605 Gemert Noord-Om*. Opgehaald van Provincie Noord-Brabant.

- Salet, T. (2017, Mei 9). 3DCP als constructiemateriaal. (K. Kleiss, Interviewer)
- Sika. (2006, Augustus 28). Sikadur-31 CF Normal. *Product Data Sheet*. Welwyn Garden City, Hertordshire, United Kingdom: Sika Limited.
- Snoeck, D. (2017, Juli). *Zelfhelend beton maakt reparaties overboig*. Opgehaald van Vlaamse PhD Cup: <http://www.phdcup.be/nieuws/zelfhelend-beton-maakt-reparaties-overbodig>
- Tektoniek. (2017, juni). *Catharinabrug Leiden*. Opgehaald van Tektoniek kennisnetwerk architectuur in beton: <http://www.tektoniek.nl/evenementen/catharinabrug-leiden>
- Ultrabrug. (2017, Juni). *Bruggen van Ultrahogesterkte beton*. Opgehaald van Ultrabrug: <http://www.ultrabrug.nl/>
- Van-Huele. (2017, juli). *Slipvorm*. Opgehaald van www.van-heule.be: <http://www.van-heule.be/activiteiten/wegenbouw/slipvorm>
- Visserman, J. (2017, Mei 16). Project 3DCP fietsbrug Gemert. (K. Kleiss, Interviewer)
- VOBN. (2017, Oktober 11). *Dossier: 3D-betonprinten*. Opgehaald van VOB: <http://www.vobn-beton.nl/beton-kenniscentrum/kennis-delen/dossiers/3d-betonprinten>
- VOBN. (2017, Juni). *Hoge Sterkte Beton (HSB)*. Opgehaald van VOB: <http://www.vobn-beton.nl/beton-kenniscentrum/beton/soorten-beton/hogesterktebeton>
- Vree, J. d. (2017, juni). *Hogesterktebeton*. Opgehaald van Joost de Vree: <http://www.joostdevree.nl/shtmls/hogesterktebeton.shtml>
- Waarde, F. v. (2017, Juni 26). Zelfhelend beton. (K. Kleiss, Interviewer)
- Wikipedia. (2017, Augustus). *Protocol*. Opgehaald van Wikipedia De vrije encyclopedie: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Protocol>

Bijlagen

1. Werkplan
2. Aantekeningen van literatuurstudies
3. Testprogramma 3D beton printen_20170310
4. Opzet Proeven 4 en 1-3_20170412
5. Materiaaleigenschappen printmortel_20170821
6. Testprogramma proef #2_20170529
7. Rapport Testprogramma brug Gemert_20170614
8. Evaluatie 3DCP project Gemert
9. Interviews t.b.v. protocol
10. Versies en aantekeningen voor het protocol
11. Protocol, met handleiding en voorbeeld
12. Gesprekken en presentaties m.b.t. innovatieve materialen en technieken
13. Lijst met innovatieve materialen en technieken
14. Specificaties van ZHB en UHSB

Protocol

Innovatieve materialen en technieken toepassen in projecten



Opgesteld door Kari Kleiss

23 oktober 2017

Voor BAM Infraconsult

Voorwoord

Beste lezer,

Voor u ligt een protocol voor het toepassen van innovatieve materialen en technieken in projecten. Het is niet specifiek bedoeld voor slechts één bedrijf, maar kan door meerdere partijen geraadpleegd worden. Het protocol kan voor de volgende twee situaties gebruikt worden:

1. Voor de start van een project: adviserend over de toepassing van een innovatief materiaal of techniek. Hierbij maakt het protocol inzichtelijk welke informatie nodig is van het materiaal en het project.
2. Tijdens een pilotproject: het protocol dient als checklist van de stappen en de verkregen informatie.

Wanneer het protocol gebruikt wordt zal het voor u duidelijk zijn welke acties ondernomen moeten worden voor het aantonen van de constructieve veiligheid van het toepassen van een innovatief materiaal of techniek. Hierbij wordt het ook inzichtelijk welke bijhorende risico's kunnen optreden.

Stapsgewijs zal u de tijdlijn van het traject van een project doorlopen. Door op de vragen bij elke stap antwoord te geven kan naar een volgende stap gegaan worden. Soms zal een antwoord terugwijzen naar het begin van het protocol. Hierdoor wordt het circulaire proces, van het iteratief ontwerpen van een constructie, inzichtelijk.

Bij elke stap worden acties ondernomen, wordt er informatie verzameld en worden er keuzes en beslissingen gemaakt. Als bij een stap een probleem gesignaleerd wordt, moet gekeken worden of deze opgelost kan worden en wat voor invloed het heeft op de andere stappen van het proces. Er wordt gekeken welke beslissingen gemaakt worden, welke

activiteiten uitgevoerd worden, welke problemen zich voordoen en hoe deze opgelost worden.

Dit document bestaat uit drie onderdelen:

1. Het protocol (flowchart)
2. Een omschrijven van de stappen van dit protocol (tabel)
3. Een voorbeeld

Door de globale opzet van het protocol kan het voor vele verschillende aspecten zoals materialen, technieken, projecten en toepassingsgebieden gebruikt worden. Duizenden mogelijkheden bestaan binnen deze verschillende aspecten. Daarom is het protocol bedoeld voor personen met kennis van het materiaal of de techniek. De lezer moet ook kennis hebben van het proces van projecten en kennis hebben van innovatie en de toepassing hiervan (in projecten).

Het is zeer belangrijk dat gelet wordt op de communicatie tussen de verschillende betrokkenen en partijen. Hiermee zijn alle partijen op tijd op de hoogte van de ontwikkelingen. Dit voorkomt misverstanden en mogelijke uitloop van het project.

Dit protocol is bedoeld als leidraad waarbij, indien aanwezig, de voorschriften (o.a. NEN-norm, CUR-aanbevelingen) gebruikt moeten worden en Eurocode 0 (NEN-EN1990) altijd van toepassing is.

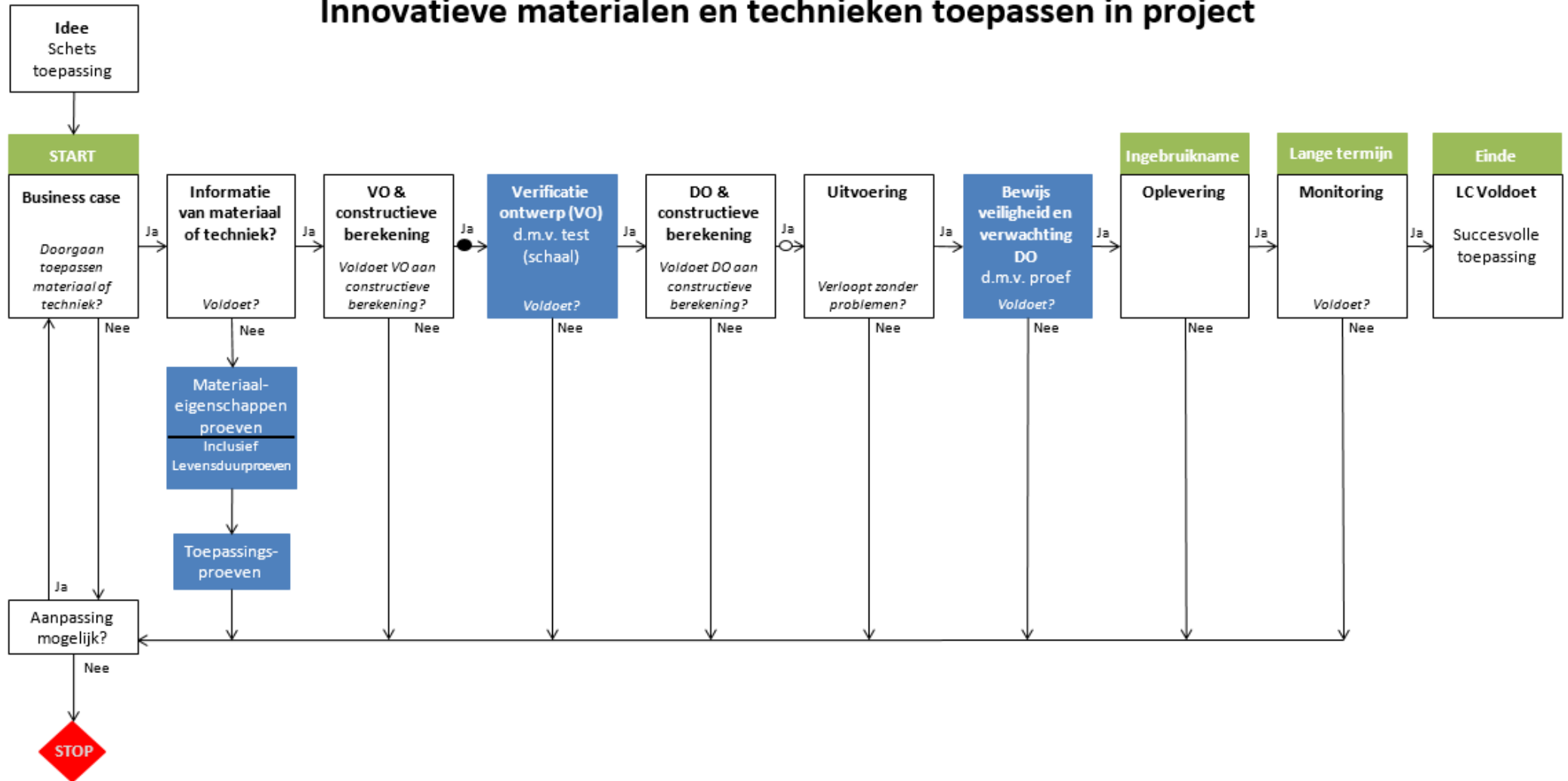
Moge dit u helpen met het toepassen van vele innovatieve materialen en technieken!

Gouda, 23 oktober 2017

Kari D. Kleiss

Protocol

Innovatieve materialen en technieken toepassen in project



Legenda:

- = Input
- = Output

Bij elke stap:

BBB

Bekend
Betrouwbaar
Bruikbaar

- Aandachtspunten:**
- Bedoeld voor personen met kennis over materiaal of techniek, kennis over het proces van projecten en kennis van innovatie en de toepassing hiervan
 - Communicatie
 - Voorschriften gebruiken wanneer aanwezig en Eurocode 0 (NEN-EN 1990) is altijd van toepassing (e.g. Belastingsgevallen en veiligheidsfactoren)

Omschrijving van stappen van Protocol			
Stap	Omschrijving	Naar volgende stap	Voorbeeld
BBB	Bekend, betrouwbaar, bruikbaar De informatie of uitkomsten uit elke blok moet minstens voldoen aan BBB.(Alle blokken behalve ‘Aanpassing mogelijk?’, ‘Stop’ en ‘LC Voldoet’)	Als het antwoord op de BBB ‘ja’ is door met overige vragen beantwoorden. Indien die ook ‘ja’ zijn door de volgende stap.	Stap: Informatie van materiaal of techniek: Bekend? Ja → Betrouwbaar? Ja → Bruikbaar? Nee → volg ‘nee’-pijl van deze stap
START Idee Schets toepassing	Start van het protocol. Hiervoor is een idee van een project met innovatief materiaal of techniek (mat/tech) nodig en mogelijk een schets van de toepassing.	Met een idee over de toepassing van het mat/tech, mogelijk met een schets.	Vaste afmetingen als overspanning van een brug; Beschikbare ruimte voor element; Toepassingsgebied
Business case	Het model koppelt steeds terug naar deze stap. Veel onderzoek moet gedaan worden op alle verschillende vlakken van het mogelijke project. Deze stap dient als terugkerende ‘Go-No Go’ fase omdat de situatie kan veranderen. De verschillende factoren moeten steeds afgewogen worden of het toepassen van het mat/tech aantrekkelijk is.	Als er vertrouwen is om verder te investeren, vanuit bedrijf, (o.a. tijd eb geld) in het huidige idee van de toepassing en van het mat/tech. Vraag: <i>Doorgaan met toepassen?</i>	Voors en tegens; Duurzaamheid en Kosten t.o.v. vergelijkbare mat/tech; Projectplanning; Mogelijkheid voor het verkrijgen van ontbrekende informatie?; Investering interessant voor bedrijf?; Toepassings-mogelijkheden;
Informatie van materiaal of techniek	Betreft de informatie van het mat/tech die noodzakelijk is om een VO & constructieve berekening te maken.	Als met de informatie een VO en berekening gemaakt kunnen worden en er voldoende bekend is over de toepassing. Vraag: <i>Voldoet de informatie?</i>	Materiaaleigenschappen; Kennis over uitvoering; Regelgeving over hoe het mat/tech te gebruiken of hoe de kwaliteit te bepalen.
Materiaal-eigenschappen proeven Inclusief Levensduur-proeven (LDP)	Proeven die gedaan moeten worden om de materiaal-eigenschappen te bepalen of verifiëren. Deze dienen als input voor de VO en de constructieve berekening. N.B.: Sommige van deze proeven lopen over langere tijd, en kunnen dus gelijktijdig lopen met de andere stappen van het protocol.	Alle gewenste materiaaleigenschappen bekend zijn. Deze stap verwijst automatisch naar Toepassingsproeven omdat de materiaal-eigenschappen hierop invloed kunnen hebben. Vraag: <i>Voldoende informatie om de VO en berekening te maken?</i>	Trek- en druksterkte; E-modulus; Buigstijfheid; Kruip. Vorstbestandheid; Sterkte-ontwikkeling in verloop van tijd.
Toepassings-proeven	Er wordt onderscheid gemaakt tussen: 1) Functionele proeven: nodig voor de (ver)werking van het mat/tech; 2) Uitvoeringsproeven: hoe het mat/tech uitgevoerd moeten worden. Ook hoe de constructie gemaakt moeten worden. N.B.: De uitkomsten van de toepassingsproeven kunnen invloed hebben op elkaar en de materiaaleigenschappen.	Als de gewenste uitvoeringsproeven zijn afgerond, gaat deze automatisch door naar Stap: “Aanpassing mogelijk” Vraag: <i>Zijn de proeven uitgevoerd en de uitkomsten BBB?</i>	Verwerkbaarheid; Verplaatsing van onderdelen; Randvoorwaarden materiaal; Proeven om de werking van het materiaal of techniek aan te tonen.
VO &constructieve berekening	Iteratief proces van berekenen en ontwerpen op basis van materiaaleigenschappen en constructie-eisen.	Vraag: <i>Kan een constructief veilig ontwerp en berekening gemaakt worden met het mat/tech in deze toepassing? Is er voldoende informatie? Voldoet VO aan constructieveberekening?</i>	VO van de constructie: Afmetingen; Mechanische berekeningen; Veiligheid.
Verificatie van ontwerp (VO-niveau) d.m.v. test (schaal)	Om de constructieve berekening (de theorie over de veiligheid van de constructie met mat/tech) te testen. Ook om te testen of de constructie veilig is. Voldoende proeven op andere vlakken uitgevoerd?	Alleen als de test BBB is. Anders mag deze aangepast en opnieuw uitgevoerd worden binnen deze stap. Vraag: <i>Voldoet?Zowel de constructieveberekening als het ontwerp.</i>	Drie- of vierpuntsbuigproef (t.b.v. Opneembare dwarskracht en moment);Waterdoorlatendheid testen; Zelfhelendheid testen.
DO &constructieve berekening	DO & constructieve berekening maken, rekening houden met uitkomsten van verificatie van het VO-ontwerpen kennis over verschillende proeven.	Vraag: <i>Voldoet DO aan de constructieve berekening?</i>	Detailering van afmetingen; materiaalkeuze; uitvoeringsplan
Uitvoering	De uitvoering van het DO-ontwerp met gekozen mat/tech. Noodzakelijke methode van uitvoering en uitvoeringsrisico’s bekend door uitvoeringsproeven .	Vraag: <i>Verloopt deuitvoering zonder problemen? Zijn deze oplosbaar binnen de uitvoering? Ja → probeer dat binnen deze stap op te lossen. Opgelost, en geen nadelige effecten op de constructie? (N.B.: Als niet BBB → Nee)</i>	Constructie in delen/moten fabriceren of storten en samenstellen; Constructie aansluiten op omgeving.
Bewijs van veiligheid en verwachting DO	Aantonen dat het op te leveren product voldoet aan de gebruiks-, veiligheids- en toepassingseisen. Mogelijk door het uitvoeren van een proef.	Vraag: <i>Voldoet de definitieve constructie? Aan veiligheid? En gewenste toepassing?</i>	Gebruiksbelasting; Waterdichtheid; Certificaat van werking van materiaal.
Ingebruikname Oplevering	De definitieve constructie wordt opgeleverd om gebruikt te worden.	Vraag: <i>Verloop alles als verspeld? Kan de constructie in gebruik genomen worden? Is alles geregeld voor het monitoren van de lange termijn en het bewaken van de veiligheid? Zijn afspraken gemaakt wat gedaan wordt bij welke schade?</i>	Een viaduct is opgeleverd en wordt in gebruik genomen. Duidelijk is wie de assetowner is, wie de assetmanager is, wie de service provider is en wie de gebruikers zijn. Schade: voegen niet waterdicht.
Lange termijn Monitoring	Het monitoren van de constructie zodat voortijdige schade of het falenesignaleerd kunnen worden.	Vraag: <i>Verloop alles als verspeld? Als voorspelde schade: oplossen binnen deze stap. Ontstaat een schade die niet voorspelt was (als veiligheid en/of materiaaleigenschappen anders) →Nee</i>	Meetklokjes registreren het gedrag van een brug in de loop van tijd. Signaleren digitaal bij het bereiken van de afgesproken grenswaarde. Door gericht assetmanagement wordt de constructie gemonitord.
EINDE LC Voldoet	De LC = Life cycle van de constructie bereikt zonder (voorspelde) problemen. Keuze project tussen: Levensduur van constructie verlengen of slopen en opnieuw bouwen → nieuw project starten	Succesvolle toepassen van het innovatieve mat/tech in dit toepassingsgebied.	De ontworpen levensduur van de constructie is behaald zonder (kritische) problemen. Bewijs van mat/tech toepassen geslaagd!
Aanpassing mogelijk	Als op een van de stappen “nee” is geantwoord op een vraag →Bij vorige stap is er onvoldoende informatie of een onvoldoende uitkomst.Er moet overwogen worden of een aanpassing mogelijk is (zowel van uit constructief als bedrijfsoogpunt).	Als een aanpassing mogelijk is dat het probleem (mogelijk) oplost, terug naar Business Case .Als dit niet mogelijk blijkt, Stopt het traject.	Aanpassingen op ontwerp;Toepassing, Uitvoeren van andere proeven voor het verkrijgen van andere uitkomsten.
STOP	Het traject van het toepassen van het gekozen materiaal of techniek stopt omdat het niet mogelijk blijkt (verschillende redenen mogelijk: Geld; Tijd; Mat/tech geen goede optie). Er zijn ook geen aanpassingen op het ontwerp, de functie of de uitvoering meer mogelijk om de toepassing wél mogelijk te maken.	n.v.t. (Probeer opnieuw en varieer met de opties:Mat/tech; Project, Toepassing, etc.)	Business Case: niet financieel haalbaar; VO & berekening: erkan geen (constructief) veilig ontwerp gemaakt worden. Uitkomsten materiaalproeven: materiaal heeft niet de gewenste eigenschappen voor de toepassing;

VOORBEELD

Protocol doorlopen met 3D Beton Printen (3DCP)



Informatie van project:

Idee bedacht in tenderfase; maakt onderdeel uit van een groter project van BAM. BAM is een van de partners van het 3DCP van T. Salet (Technische Universiteit Eindhoven(TU/e)), meerdere partners doen mee met de 3DCP fietsbrug tot stand brengen. De partners zijn allemaal ervaren in hun vakgebied en hebben ervaring met innovatieve (afwijkend van standaard) projecten. Onder leiding van T. Salet zijn, voorafgaand aan het project meerdere onderzoeken en proeven gedaan op het 3DCP en is een printer gebouwd. Er wordt geprint met mortel (al het toeslagmateriaal diameter <4mm) met een bepaalde 'groene' sterkte. 'Groene' sterkte is een eigenschap van betonspecie. Deze sterkte van het betonspecie heeft zo'n samenhang waardoor een mal (bekisting) niet noodzakelijk is voor plaatsen. Het wordt gebruikt om het materiaal te printen, zoals in de bovenstaande foto's te zien is.

Project BAM: Gemert Noord-Om; 2017

VOORBEELD Protocol doorlopen met 3D Beton Printen (3DCP)			
Stap Nummer	Stap Naam	Uitleg van hoe stap doorlopen, waarom, overwegingen, etc.	Aandachtspunten bij deze stap
1	Idee: Schets toepassing	BAM wil een 3DCP fietsbrug bouwen over de Peelse Loop (watertje Noord-Brabant). Vaste afmetingen bekend. Standpunt opdrachtgever: Innovatieve oplossingen gezocht. BBB – Ja → Stap 2	Is enkel een schetsontwerp van de toepassing.
2	Business case	Informatie over de mogelijkheden van het toepassen van 3DCP, het standpunt van de opdrachtgever, het beschikbare geld, een planning welke past binnen het project. Het project lijkt interessant (en haalbaar). De reden om 3DCP te gebruiken als materiaal is zodat er alleen materiaal geprint wordt waar dat constructief nodig is, bijvoorbeeld een vakwerk. Hierdoor is minder materiaal nodig en is het een duurzamer materiaal. Door de printbaarheid is een bekisting niet nodig. Dit scheelt materiaal, tijd en personeel. BBB – Ja → Doorgaan toepassen materiaal/techniek? – Ja → Stap 3	Houdt genoeg tijd en geld beschikbaar voor mogelijke tegenslagen. Wegen de voordelen op tegen de nadelen en is het gebruik van dit innovatieve materiaal inderdaad interessanter dan wanneer een traditioneel mat/tech toegepast wordt?
3	Informatie van materiaal of techniek (mat/tech)	Er zijn enige proeven (zowel materiaaleigenschappen als functionele) gedaan op de TU/e voorafgaand op het project. Om zeker te zijn van materiaaleigenschappen van het te gebruiken materiaal is besloten deze proeven opnieuw te doen (met toezicht van een BAM-medewerker) voor de verificatie hiervan. Meer functionele proeven worden gedaan. Het schetsontwerp is een brug bestaand uit meerdere gelijkvormige elementen die samengevoegd worden. Er moet ervaring opgedaan worden met het verplaatsen en samenvoegen van deze elementen en de testbrug. Hiernaast worden proeven gedaan waar de elementen verschillende vormen van wapening hebben: (1) geen (2) met staaldraadwapening in de richting van de printlagen en (3) nummer (2) plus voorspanstaal als 'lengtewapening'. BBB &voldoet? – Nee → Stap 4	Bedenken wat voor toepassingsgebied het betreft. Wat voor onderzoeken en proeven zijn al gedaan? Deze onderzoeken en proeven opnieuw doen ter verificatie?
4	Materiaal-eigenschap Proeven (Incl.LDP)	Proeven uitvoeren: Druk- en treksterkte; Krimp & kruip; homogeniteit van het geprinte mortel; Uitdroging; Vorstbestandheid (loopt gedurende hele project, om de voorgaande proef te bevestigen). Worden uitgevoerd ter verificatie van de uitkomsten. BBB? – Ja- Wijst automatisch door naar → Stap 5	Het toepassingsgebied bepaald aan welke (constructieve) eisen en veiligheid de constructie moet voldoen. Omvang van proeven en testopstelling moeten ontworpen en gemaakt worden.
5	Toepassingsproeven	Functionele proeven: Het printen van de mortel: verschillende lagen bovenop elkaar printen, in een aaneengesloten baan → er moet hiervoor dus een 'cyclisch' ontwerp gemaakt worden. Er zijn geen elementen gemaakt: dus nog geen uitvoeringsproeven als verplaatsen en lijmen. Er moet nagedacht worden over de functie en uitvoering van de elementen en de brug zodat hier tijdens het (schets)ontwerp al rekening mee gehouden kan worden.	Omvang van proeven en testopstelling. Functionele en uitvoeringsproeven kunnen invloed hebben op elkaar, de materiaaleigenschappen en het ontwerp. Bijv. Als Hijsogen noodzakelijk zijn voor het verplaatsen van een element, moeten

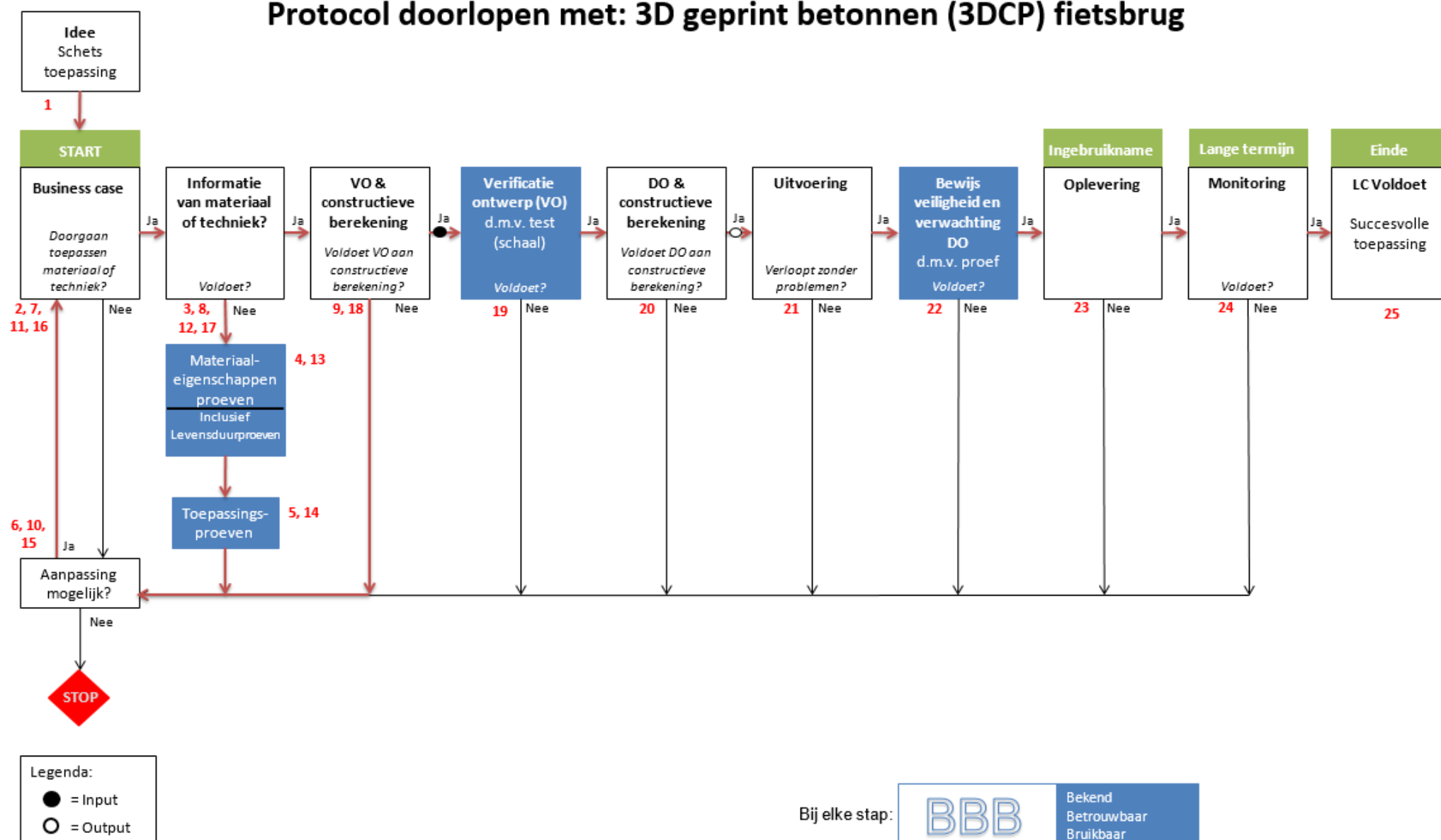
		BBB? Ja , Bepaalde proeven betreffend de printbaarheid gaan door gedurende het project omdat dit onderzoeken zijn van de TU/e (los van BAM) echter kunnen de gegevens wel meegenomen worden in het project. Voldoen de uitkomsten van de proeven? Ja – Automatisch door naar → Stap 6	deze meegenomen worden in het ontwerp.
6	Aanpassing mogelijk?	Uit de proeven blijkt dat een doorsnede noodzakelijk is waar de lagen achtereenvolgend geprint kunnen worden: en cyclische doorsnede moet ontworpen worden. Het ontwerp moet aangepast worden. Is dat mogelijke? → Ja → Stap 7	
7	Business case	Cyclische doorsnede ontwerpen waar beton geprint wordt op locaties dat het constructief nodig is. Keuze maken van mogelijk aantal en afmetingen (ongeveer) van elementen. Dit is een voorzet voor de VO & berekening. Informatie BBB? – Ja Is het nog interessant en haalbaar? Ja (Deze circulatie aan stappen is ingecalculeerd) → Stap 8	
8	Informatie van mat/tech	Voldoende en voldoet? Ja (Er is ook onderzoek gedaan naar de hoeveelheid lagen geprint kunnen worden en de invloed van de lagen op de consistentie van het materiaal. De uitkomsten van de proeven kunnen gebruikt worden voor het maken van het ontwerp en de berekening(en). → Stap 9	En VO kan gemaakt worden aan de hand van de schets en de materiaal-eigenschappen, rekening houdend met de functionele eisen en de uitvoering.
9	VO & constructieve berekening	Materiaaleigenschappen als input voor berekening; Uitkomsten functionele proeven t.b.v. het printen zijn bekend om rekening mee te houden; Schets van het ontwerp is bedacht. Hier VO en constructieve berekening maken van testbrug en definitieve brug. Toepassingsproeven in achterhoofd houden bij ontwerp. Besluit: verificatie proef wordt uitgevoerd schaal; Keuze maken schaal 1:2 of 1:3? → Alles verscalen: printlaagbreedte en de lussen van de doorsnede op schaal. Functionele proeven: Hijzen, assembleren en voorspannen. Besluit: twee proefstukken op schaal 1:1 met een andere wapeningssituatie: (4) alleen voorspanstaal. Nee→Nog niet voldoende informatie dus nog een verificatieproef doen (Uitkomsten van functionele proeven willen worden meegenomen in berekening) → Stap 10	Interessant om een berekeningsmodel te maken? Voor schaal? →Schalingsfactor noodzakelijk. VO voor test (schaal) elementen en/of definitieve afmetingen? Toepassingsproeven kunnen van belang zijn.
10	Aanpassing mogelijk?	Uitvoeringsproeven op schaal 1:1 elementen toevoegen. Functionele proeven m.b.t. groene sterkte. Wat is de invloed op uitvoering & functie van materiaal, op de materiaaleigenschappen en op het ontwerp? Ja (functionele proeven uitvoeren) → Stap 11	
11	Business case	Toepassing is niet veranderd. Er is een VO-ontwerp voor proefstukken 1:1. Nog interessant, dus doorgaan. In afwachting van de uitkomsten van de functionele proeven. Kosten vormen een knelpunt, echter is de impact te overzien. Besloten is om toch door te gaan vanwege innovatieve karakter van het project en 3DCP waarin BAM wil investeren. Dus voor nu voldoende informatie die BBB is → Stap 12	De motivatie is er om de functionele proeven uit te voeren en te wachten op de uitkomsten hiervan.

12	Informatie van mat/tech	Niet genoeg informatie: functionele en uitvoeringsproeven moeten worden uitgevoerd. Nee → Stap 13	
13	Materiaal-eigenschap Proeven (Incl. LDP)	Proeven naar de groene sterkte van het beton: Hoe hoog kan geprint worden? Wat zijn handelbare afmetingen (en gewichten), is het materiaal dan nog homogeen genoeg? Ook invloed op uitvoeringsproeven: grotere elementen zijn zwaarder dus mogelijk aanpassing op hijsen, verplaatsen en printbed. Ja uitkomsten van proeven voldoen → Automatisch door naar → Stap 14	Met hogere groene sterkte kunnen hogere (langere) elementen geprint worden. Maar dit zijn zwaardere elementen. Een sterker printbed is nodig.
14	Toepassingsproeven	Uitvoeringsproeven: - Hijsen van elementen: moeten er voorzieningen gemaakt worden (Bijv. hijsogen, sleuven voor banden) om het hijsen mogelijk/makkelijker te maken? - Assembleren en voorspannen van twee schaal 1:1 elementen. Ervaring opdoen en kijken of het daadwerkelijk mogelijk is elementen samen te voegen. - Voorspanning: Hoe voorspannen, stapsgewijs? De voorspanstrengen lopen door de lege holtes in de doorsnede: dus hoe moeten de voorspanstrengen “vastgemaakt” worden aan de doorsnede. Hoe veel kruip treedt erop in de elementen t.g.v. de voorspanning. Uit de proeven blijkt dat het verplaatsen, assembleren en voorspannen goed te doen is met deze elementen. Nu moeten de uitvoerders opgeleid worden (vertellen wat en hoe het moet gebeuren). Ja, uitkomsten van proeven voldoen Nee → Stap 15	Met de uitkomsten van de proeven kunnen conclusies getrokken: is deze toepassing met dit materiaal mogelijk gezien vanuit de functie en de uitvoering?
15	Aanpassing mogelijk?	Ja uitkomsten kunnen meegenomen worden in ontwerp → Stap 16	
16	Business case	De toepassing verandert niet en nog steeds interessant (voor bedrijf) ook al is het geraamde budget inmiddels overschreven → Stap 17	Het budget is overschreven, echter is besloten om het project toch door te laten gaan.
17	Informatie van mat/tech	Uitkomsten materiaaleigenschappen en toepassingsproeven zijn voldoende en BBB → Benieuwd naar hoe dit zich vertaalt in het VO & de constructieve berekening → Stap 18	
18	VO & constructieve berekening	Uitkomsten van toepassingsproeven: Niet genoeg ruimte in lab voor Schaal 1:1; Printlaagbreedte kan niet terug geschaald worden naar 1:3 → Besluit: Testbrug op schaal 1:2 van 6 elementen. Besluit: Verificatieproef zal een 4-puntsbrugproef zijn: voor het gedrag van het zuivere moment. Berekend worden: Het stapsgewijsvoorspannen van de testbrug en de bezwijkbelasting (constructeur); de testopstelling. Nu beginnen met nadenken over de aansluiting op de weg, de landhoofden, de afwerking (verlichting) en de leuning. Voldoet VO aan constructieve berekening? → Ja → Stap 19	Nadenken over het soort proef dat noodzakelijk is voor de verificatie van de materiaaleigenschappen als input voor de berekening en het ontwerp (van de doorsnede)

19	Verificatie ontwerp (VO)	De testbrug maken: Proefstukken schaal 1:2 printen. Na het uitharden verplaatsen, assembleren en voorspannen (drukdozen gebruiken voor het controleren van het voorspannen). Na het voorspannen testbrug tijd geven voor de relaxatie (voornamelijk kruip t.g.v. voorspanning). Hierbij zijn meetklokjes geplaatst voor het bijhouden van de verplaatsing (ook voor torsie). Testopstelling maken voor een 4-puntsbuigproef: twee steunpunten en twee evenaars die elk een q-last uitoefenen. De brug in de testopstelling plaatsen en klaarmaken voor de proef (plaatsen meetklokjes, afwerken aangrijppunten belasting, veiligheidsmaatregelen). Constructeur berekend de grootte en locatie van de q-lasten en het belastingsschema (stapsgewijs belasting met 25 kN verhogen en steeds ontlasten). Uitkomsten van de proef → brug sterker dan verwacht. BBB? Ja Voldoet? Ja → Stap 20	Bij deze stap moeten de elementen en de testopstelling voor de proeven ook gemaakt worden. Communicatie! De uitvoering moet op de hoogte zijn van de plannen (deze kunnen veranderen).
20	DO & constructieve berekening	DO en berekening gemakkelijk te maken doordat een berekeningsmodel (met schalingsfactor) gemaakt is. Omdat de testbrug sterker dan verwacht is geeft dit extra vertrouwen in het berekeningsmodel. Hier ook landhoofden, leuning etc. ontwerpen en berekenen. Voldoet DO aan constructieve berekening? Ja → Stap 21	Makkelijke stap omdat zelfde is als VO en hiervan is aangetoond dat die voldoet.
21	Uitvoering	Printen van de elementen voor de definitieve brug, deze verplaatsen, assembleren en voorspannen. Definitieve brug naar locatie (Peelse Loop, Gemert) transporteren, plaatsen een aansluiten op fietspad. Leuning plaatsen. Geen problemen - Ja → Stap 22	
22	Bewijs veiligheid en verwachting DO	Proef met gebruiksbelasting op DO wanneer deze op locatie ligt. Voldoet? Ja → Stap 23	De laatste controle (d.m.v. een proef) om zeker te weten dat het geleverde product is (en kan) wat ervan wordt verwacht.
23	Oplevering	Gekozen voor digitale monitoring, maatregelen hiervoor zijn genomen. Ingebruikname van de fietsbrug. Project succesvol! 1 ^e constructieve 3DCP fietsbrug ter wereld! Ja → Stap 24	Nadenken over de monitoring fase. Feestelijke oplevering!
24	Monitoring	Deze stap betreft de huidige status van het project. De brug is opgeleverd en gedurende de levensduur van de constructie wordt deze gemonitord. Dit is van belang voor zowel de gebruikersveiligheid van de fietsbrug, als dat het interessant is voor het onderzoek naar de lange termijn van dit innovatieve materiaal. Nog geen problemen, de monitoring loopt.	
25	LC Voldoet		

Voorbeeld

Protocol doorlopen met: 3D geprint betonnen (3DCP) fietsbrug



Aandachtspunten: - Bedoeld voor personen met kennis over materiaal of techniek, kennis over het proces van projecten en kennis van innovatie en de toepassing hiervan
- Communicatie
- Voorschriften gebruiken wanneer aanwezig en Eurocode 0 (NEN-EN 1990) is altijd van toepassing (e.g. Belastinggevallen en veiligheidsfactoren)

