

‘Steen voor Steen’

naar

‘Circulair Bouwen’

Het principe van circulair bouwen toegepast op het project ‘Bruggen Krommenie’



Auteurs

: J.J. Brehen

: M.J.G. Rasing

Van Hattum en Blankevoort



Regio Noord

Hogeschool



van Arnhem en Nijmegen

Documenteigenschappen

Afstudeerders

Naam : J. (Joram) J. Brehen
Studentnummer : 544287

Naam : M. (Mark) J.G. Rasing
Studentnummer : 550397

Titel : 'Steen voor Steen' naar 'Circulair Bouwen'
Datum : 28 mei 2018
Revisie : 1.0
Documentnummer : BKR-12872-Rapportage

Bedrijf : *Van Hattum en Blankevoort B.V.*
Bedrijfsbegeleider : ing. W. (Wouter) Boekhold

Onderwijsinstelling : *Hogeschool van Arnhem en Nijmegen*
Opleiding : Civiele Techniek
Docentbegeleiders : ir. E. (Ernst) H. Rob
: ir. C. (Casper) van der Giessen

Documentgegevens

Status	Naam	Paraaf	Datum
Opgesteld	J. Brehen en M. Rasing		29-01-2018
Gecontroleerd	J. Brehen en M. Rasing		04-05-2018
Vrijgegeven	J. Brehen en M. Rasing		28-05-2018

Document historie

Revisie	Omschrijving/Belangrijkste wijzigingen	Datum
0.1	Conceptversie	04-05-2018
1.0	Definitieve versie	28-05-2018

Betrokken stakeholders

Van Hattum en Blankevoort



Regio Noord



een **VolkerWessels** onderneming



Hogeschool van Arnhem en Nijmegen

Omslagfoto: Ahlefeldt – Building bridges, 2018

'Steen voor Steen' naar 'Circulair Bouwen'

Voorwoord

Geachte Lezer,

Voor u ligt ons onderzoek 'Bruggen Krommenie' waar wij vanaf februari 2018 tot en met juni 2018 aan gewerkt hebben. Dit onderzoek is geschreven in het kader van ons afstuderen en afronden van de opleiding Civiele Techniek aan de *Hogeschool van Arnhem en Nijmegen*. Middels dit onderzoek willen we u meenemen in de wereld van de circulaire economie en hoe de principes van de circulaire economie toegepast kunnen worden in de bouw. De praktijk in dit onderzoek is door *Van Hattum en Blankevoort B.V.* middels het project 'Bruggen Krommenie' aan ons voorgelegd. Aan ons de uitdaging om op dit project het principe van circulair bouwen toe te passen, omdat *Van Hattum en Blankevoort B.V.* als aannemer een positieve bijdrage wil leveren aan ieders levenskwaliteit en Nederland mooier wil maken.

Het principe van de circulaire economie was, voordat we aan dit onderzoek begonnen, voor ons een onbekend onderwerp. Gedurende het onderzoek zijn wij overtuigd geraakt van de noodzaak van een transitie naar een circulaire economie en dat het circulair bouwen daarbij een belangrijk onderdeel is. Wat, waarom en hoe, lichten we u in deze rapportage toe.

Wij willen graag een aantal mensen bedanken die betrokken zijn geweest bij ons onderzoek. Allereerst gaat onze dank uit naar onze begeleider ing. W. Boekhold van *Van Hattum en Blankevoort B.V.* voor de inspirerende en enthousiasmerende begeleiding. Tevens gaat onze dank uit naar de medewerkers van *Van Hattum en Blankevoort B.V.* voor hun betrokkenheid bij ons onderzoek. Daarnaast gaat naar onze dank uit naar onze begeleiders ir. E.H. Rob en ir. C. van der Giessen van de *Hogeschool van Arnhem en Nijmegen* voor hun deskundige bijdrage aan ons onderzoek. Ten slotte gaat onze dank uit naar familie en vrienden die de tijd hebben genomen om ons onderzoek regelmatig te voorzien van feedback.

Wij wensen u veel leesplezier.

Joram Brehen | Mark Rasing

Diemen, 28 mei 2018

Samenvatting

De provincie Noord-Holland heeft aangegeven het circulair bouwen dan wel legaliseren toe te willen passen binnen het project 'Bruggen Krommenie'. Deze keuze houdt verband met de vertraging die de realisatie van het project heeft opgelopen en met het beleid van de Rijksoverheid. Het project omvat het renoveren van een tweetal beweegbare bruggen gelegen in de N203 over de Nauernasche Vaart. De keuze van de provincie Noord-Holland is een kans voor *Van Hattum en Blankevoort B.V.*, omdat er weinig kennis beschikbaar is over het circulair bouwen van een brug over water. Deze kennis kan *Van Hattum en Blankevoort B.V.* gebruiken om een stap dichterbij de doelstelling te komen om in 2025 de duurzaamste bouwer te worden.

De doelstelling van dit onderzoek is het verzamelen van kennis over het principe van circulair bouwen, zodat het principe van circulair bouwen kan worden toegepast binnen het project 'Bruggen Krommenie'. Om deze doelstelling te realiseren, is een aantal onderzoeksvragen opgesteld. De hoofdvraag luidt als volgt: *"Hoe kan het principe van circulair bouwen worden toegepast in het ontwerp van de onderbouw van het project 'Bruggen Krommenie'?"*

Om de hoofdvraag van dit onderzoek te kunnen beantwoorden is gebruikt gemaakt van verschillende deelvragen, welke naar de hoofdvraag toe zullen werken:

- *Welke begrippen zijn van belang bij circulair bouwen en hoe zijn deze met elkaar verbonden?*
- *Waarom is het in het algemeen belang dat er circulair gebouwd gaat worden?*
- *Hoe kan worden gemeten in welke mate het principe van circulair bouwen wordt toegepast?*
- *Wat zijn de minimale functionele toepisen die gesteld worden aan de onderbouw van het project 'Bruggen Krommenie'?*
- *Welke alternatieven kunnen per object worden gegenereerd op basis van de minimale functionele toepisen?*
- *Hoe scoren de gegenereerde alternatieven t.o.v. de eerder vastgestelde criteria?*

De gebruikte onderzoeksmethode is gebaseerd op toegepast onderzoek, waarbij gekeken is naar een probleem uit de praktijk. Met de informatie die het beantwoorden van de deelvragen heeft opgeleverd, is in de conclusie de hoofdvraag beantwoord. Ook zijn er aanbevelingen uit het onderzoek voortgevloeid die direct toepasbaar zijn in de praktijk.

De conclusie uit het onderzoek is dat het voorkeursalternatief voor het ontwerp van de onderbouw van het project 'Bruggen Krommenie' bestaat uit een fundering van stalen buispalen (FA4), een landhoofd van mega-legoblokken (LA1), stootplaten van staal (SA1), een oplegpijler van stalen HE-profielen (OA2) en een remmingwerk van staal (RA1).

De aanbevelingen die uit het onderzoek zijn voortgevloeid, luiden:

- Pas het voorkeursalternatief toe als ontwerp voor de onderbouw van het project 'Bruggen Krommenie'.
- Maak organisaties, betrokken bij de bouw van (civiele) projecten, bewust van de noodzaak van de transitie naar de circulaire economie.
- Hanteer binnen organisaties, betrokken bij de bouw van (civiele) projecten, dezelfde definities voor circulaire begrippen, zodat miscommunicatie wordt voorkomen.
- Pas de in het onderzoek beschreven meetmethode toe tijdens het meten van in welke mate circulariteit wordt toegepast in een ontwerp, omdat deze meetmethode circulariteit op een verifieerbare wijze meetbaar maakt en binnen elk project toepasbaar is.

Abstract

Due to both delay in the realisation and the policy stated by the Rijksoverheid the Province Noord-Holland is considering to implement circular build and legisating on the project 'Bruggen Krommenie'. The project involved the renovation of a two bridges over the Nauernasche Vaart, situated in the N203. This is an opportunity for VHB, since there is little to no knowledge available on building a circular bridge over water. With this knowledge VHB will get closer to her goal to become the most sustainable builder in the Netherlands by 2025.

The goal of this thesis is to gather knowledge about the principle of circular build, so that the principle of circular build can be implemented on the project 'Bruggen Krommenie'.

With this goal in mind, the question on which this thesis is build has occurred. The main question is *"How can the principle of circular build be implemented in the design of the substructure of the project 'Bruggen Krommenie'?"*

To answer the main question of this thesis multiple sub-questions will be answered, which in turn will answer the main questions. The sub-questions are as follows:

- *Which concepts are of importance with regards to circular building and how do they connect to each other?*
- *Why is it of common interest that circular building is going to be applied?*
- *How can the extent of the application of circular building be measured?*
- *What are the minimal functional top requirements that the substructure must meet?*
- *Which alternatives can be produced per object while adhering to the minimal functional top requirements?*
- *How do the alternatives score relative to the previously established criteria?*

The used research method is based on applied research, where an issue from practice is the object of study. By answering the sub-questions the main question will be answered which will result in conclusions and recommendations. The conclusions and recommendations in this thesis should be partly implementable in practice.

This thesis shows that the preferred alternative for the design of the substructure of the project 'Bruggen Krommenie' consists of a foundation of steel tubular piles (FA4), a land abutment of mega-legoblocks (LA1), an approach slab of steel (SA1), a support pillar of steel HE profiles (OA2) and a fender system of steel (RA1).

- Use the preferred alternative for the design of the substructure of the project 'Bruggen Krommenie'.
- Make organisations, involved at construction of (civil) projects, aware of the need of the transition to the circular economy.
- It is to be recommended that the same definitions for circular concepts are used within organisations, so that miscommunication will be prevented between the different participating organizations involved in building (civil) projects.
- The described measurement method is to be recommended for practical application, because it measures the extent of the application of circularity in a design, because this is a verifiable way.

INHOUD

1	WAAR TE BEGINNEN? - INLEIDING	1
1.1	Aanleiding	2
1.2	Leeswijzer	3
2	HOE EN WAT? - ONDERZOEKSMETHODE	5
2.1	Onderzoeksvragen	6
2.2	Randvoorwaarden en uitgangspunten	6
2.3	Onderzoeksmethode	6
3	CIRCULAIR BOUWEN, WAT IS DAT NU? - BEGRIPPEN EN DEFINITIES	9
3.1	Begrippen rondom duurzaamheidsbeleid	10
3.2	Verbanden tussen begrippen	13
3.3	Door de jaren heen	14
3.4	Resumé	14
4	CIRCULAIR BOUWEN, WAAROM MOET DAT? - NOODZAAK	15
4.1	Transitie naar circulaire economie	16
4.1.1	Voorzieningszekerheid grondstoffen	16
4.1.2	Economische baten	17
4.1.3	Schoner milieu	18
4.2	Resumé	18
5	CIRCULAIR BOUWEN, HOE WORDT DAT GEMETEN? - MEETMETHODE	19
5.1	Meetmethodiek	20
5.2	Referentiealternatief	22
5.3	‘Alternatievencombinaties’	23
5.4	Resumé	24
6	‘BRUGGEN KROMMENIE’, WAT IS ER MINIMAAL NODIG? - SYSTEEMEISEN	25
6.1	Systeem	26
6.2	Object(en)	27
6.2.1	Fundering	27
6.2.2	Landhoofd	27
6.2.3	Oplegpijler	27
6.2.4	Remmingwerk	27
6.3	Resumé	27

7	HOE CIRCULAIR ZIJN DE ALTERNATIEVEN? - BEOORDELINGEN EN RESULTATEN	29
7.1	Alternatieven	30
7.2	Per object	30
7.3	Per 'alternatievencombinatie'	32
7.3.1	TOM – A	32
7.3.2	TOM – B	33
7.3.3	TOM – C	34
7.3.4	Specifieke randvoorwaarden	34
7.4	Resumé	35
8	WAT IS HET RESULTAAT? - CONCLUSIES	37
8.1	Conclusie	38
8.2	Discussie	38
8.2.1	Discussie bij resultaten	38
8.2.2	Discussie bij meetmethodiek	38
9	WAT MOETEN WE DOEN? - AANBEVELINGEN	41
9.1	Algemeen	42
9.2	'Bruggen Krommenie'	42
9.3	Meetmethodiek	42

BIBLIOGRAFIE

Figuren- en tabellenlijst

BIJLAGEN

A – VERKLARENDE WOORDENLIJST
 B – SCHEMA RELATIE BEGRIPPEN
 C – BLANCO TOM
 D – REFERENTIEALTERNATIEVEN
 E – ALTERNATIEVEN
 F – GEOTHERMISCHE ENERGIE
 G – KATHODISCHE BESCHERMING
 H – ONDERBOUWING BEOORDELING
 I – TOM – A
 J – TOM – B
 K – SPECIFIEKE RANDVOORWAARDEN

1

1 WAAR TE BEGINNEN?

INLEIDING

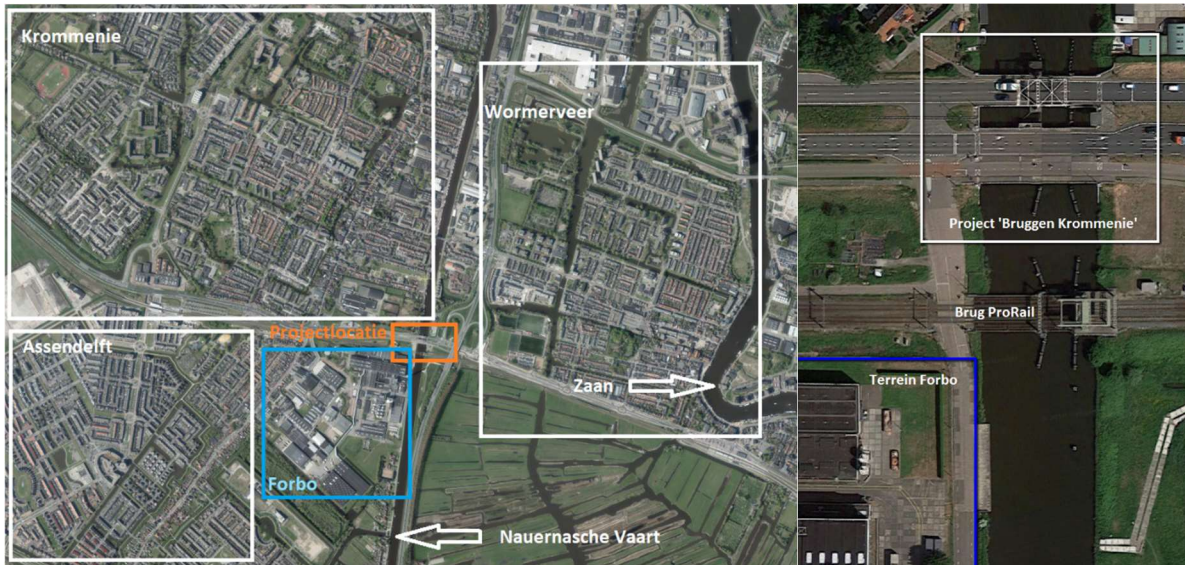
“Eerste gedeelte van een rede, een boekwerk, een verhandeling, dat dient om het onderwerp voorlopig aan te geven en te situeren”

- Van Dale

1.1 Aanleiding

Het onderzoek is verbonden aan het project 'Bruggen Krommenie'. Het project is gesitueerd ten zuidoosten van het dorp Krommenie en ten noorden van de stad Amsterdam. Het project omvat het renoveren van een tweetal beweegbare bruggen gelegen in de N203 over de Nauernasche Vaart.

Het bovenaanzicht van de omgeving en de projectlocatie zijn weergegeven in figuur 1 en figuur 2.



De provincie Noord-Holland heeft dit project in 2015 aanbesteed. Het werk is daarna in 2015 gegund aan de aannemer *Van Hattum en Blankevoort B.V.*, hierna VHB genoemd, in combinatie met de staalbouwer *Hollandia Infra BV*. In dat jaar zou ook worden aangevangen met de realisatiewerkzaamheden, maar tot op heden is nog niet gestart door het ontbreken van de omgevingsvergunning. De gemeente Zaanstad heeft destijds geen omgevingsvergunning afgegeven, omdat de te realiseren brug het niet meer mogelijk maakte om de achter de brug gelegen linoleum fabriek Forbo met CEMT-III klasse schepen te bereiken. De Forbo fabriek is afhankelijk van de aanvoer over water van lijnzaadolie voor de productie en verkoop van linoleum vloerbedekking, bulletinboard en materialen voor (kantoor) meubilair.

In het eerste half jaar van 2018 gaat *Volkerinfra* (ontwerper) voor VHB in combinatie met *Hollandia Infra BV* en met de provincie Noord-Holland naar dit aspect kijken. De planning is om in het voorjaar van 2019 met de realisatiewerkzaamheden te starten.

In 2050 wil de Rijksoverheid een volledig circulaire economie hebben, concreet betekent dit dat in 2050 alle bestaande grondstoffen hergebruikt moeten worden. Vanaf dan is het onttrekken van grondstoffen uit of van de aarde uit den boze en moet in principe worden volstaan met reeds gedolven grondstoffen, al dan niet verwerkt in bouwwerken en/of producten. Deze verandering in het aanspreken van grondstoffen wordt ook wel de transitie van een lineaire economie naar een circulaire economie genoemd.

In verband met de vertraging die de realisatie van het project 'Bruggen Krommenie' heeft opgelopen en met het oog op het beleid van de Rijksoverheid heeft de provincie Noord-Holland aangegeven te willen kijken naar het circulair bouwen dan wel legaliseren van 'Bruggen Krommenie'. Dit is een kans voor VHB, omdat er weinig kennis beschikbaar is over het circulair bouwen van een brug over water. Deze kennis kan VHB gebruiken om een stap dichterbij de doelstelling te komen om in 2025 de duurzaamste bouwer te worden.

1.2 Leeswijzer

Middels deze leeswijzer wordt de opbouw van de rapportage toegelicht en is een korte beschrijving van elk hoofdstuk opgenomen. Om de rapportage leesbaar en begrijpelijk te maken, is een verklarende woordenlijst in 'BIJLAGE A – VERKLARENDE WOORDENLIJST' opgenomen. De vetgedrukte begrippen in de rapportage zijn terug te vinden in de woordenlijst. Om de opbouw van de rapportage toe te lichten, is hieronder een korte beschrijving per hoofdstuk opgenomen.

In hoofdstuk 2 is beschreven hoe het onderzoek uitgevoerd gaat worden. De onderzoeksvragen, randvoorwaarden en uitgangspunten en de onderzoeksmethode worden hier beschreven.

Allereerst is vastgesteld wat verstaan wordt onder de verschillende begrippen die betrekking hebben op circulair bouwen en hoe deze met elkaar verbonden zijn. Door middel van deskresearch en literatuuronderzoek zijn voor de sleutelbegrippen definities vastgesteld die de basis vormen voor dit onderzoek. Voor dit deel van het onderzoek wordt verwezen naar hoofdstuk 3.

Vervolgens is gekeken waarom het in het algemeen belang is dat er circulair gebouwd gaat worden. Als niet kan worden aangetoond waarom circulair bouwen van belang is, ondergraaft dat de noodzaak van dit onderzoek. Voor dit deel van het onderzoek wordt verwezen naar hoofdstuk 4.

Daarna zijn met de opgedane kennis rondom het circulair bouwen criteria vastgesteld waarmee de mate van circulariteit gemeten kan worden. Voor dit deel van het onderzoek wordt verwezen naar hoofdstuk 5.

Het onderzoek richt zich vervolgens op de project specifieke inhoud van 'Bruggen Krommenie'. De eerste stap is het beschouwen welke minimale functionele toepisen er gesteld worden aan de onderbouw van 'Bruggen Krommenie'. Voor dit deel van het onderzoek wordt verwezen naar hoofdstuk 6.

Daaropvolgend zijn circulaire alternatieven gegenereerd die voldoen aan de in hoofdstuk 6 gestelde minimale functionele toepisen, daarna zijn deze circulaire alternatieven in een Trade-Off-Matrix, hierna **TOM** genoemd, verwerkt. De circulaire alternatieven hebben vervolgens een beoordeling gekregen in vergelijking met volgens het gedachtegoed van de lineaire economie ontworpen 'standaard' alternatief. Voor dit deel van het onderzoek wordt verwezen naar hoofdstuk 7.

Daarna zijn de best scorende alternatieven in een andere TOM verwerkt om te bepalen of de alternatieven binnen het ontwerp van onderbouw van het project 'Bruggen Krommenie' passen en welke 'alternatievencombinatie' de hoogste score heeft. Hieruit komen de conclusies en aanbevelingen voort voor het toepassen van het principe van circulair bouwen in het ontwerp. Voor dit deel van het onderzoek wordt tevens verwezen naar hoofdstuk 7.

Tot slot wordt de hoofdvraag: *"Hoe kan het principe van circulair bouwen worden toegepast in het ontwerp van de onderbouw van het project 'Bruggen Krommenie'?"* beantwoord middels voorafgaande hoofdstukken en hieraan worden de conclusies en aanbevelingen verbonden. Voor dit deel van het onderzoek wordt verwezen naar hoofdstuk 8 en hoofdstuk 9.

2

2 HOE EN WAT?

ONDERZOEKSMETHODE

“Dat is interessant, maar niet relevant”

- ir. E.H. Rob

De doelstelling van dit onderzoek is het verzamelen van kennis over het principe van circulair bouwen, zodat het principe van circulair bouwen kan worden toegepast op het project 'Bruggen Krommenie'.

2.1 Onderzoeksvragen

Uit deze doelstelling volgen de onderzoeksvragen. De hoofdvraag luidt als volgt: *"Hoe kan het principe van circulair bouwen worden toegepast in het ontwerp van de onderbouw van het project 'Bruggen Krommenie'?"*

Om de hoofdvraag van dit onderzoek te kunnen beantwoorden wordt gebruik gemaakt van verschillende deelvragen, welke naar de hoofdvraag toe zullen werken:

- *Welke begrippen zijn van belang bij circulair bouwen en hoe zijn deze met elkaar verbonden?*
- *Waarom is het in het algemeen belang dat er circulair gebouwd gaat worden?*
- *Hoe kan worden gemeten in welke mate het principe van circulair bouwen wordt toegepast?*
- *Wat zijn de minimale functionele toepisen die gesteld worden aan de onderbouw van het project 'Bruggen Krommenie'?*
- *Welke alternatieven kunnen per object worden gegenereerd op basis van de minimale functionele toepisen?*
- *Hoe scoren de gegenereerde alternatieven t.o.v. de eerder vastgestelde criteria?*

2.2 Randvoorwaarden en uitgangspunten

Het project 'Brug Kommenie' bestaat, zoals besproken in de inleiding, uit twee beweegbare bruggen. Deze twee bruggen bestaan uit verschillende objecten. Er is voor gekozen om alleen de onderbouw van de nieuw te realiseren brug te beschouwen in dit onderzoek. Enerzijds omdat de bovenbouw reeds geproduceerd is ten gevolge van de geannuleerde uitvoering in 2015. Anderzijds om de scope van dit onderzoek te beperken.

Onder de onderbouw worden uitsluitend de volgende objecten gerekend:

- Fundering;
- Landhoofd(en);
- Stootpla(a)t(en);
- Oplegpijler(s);
- Remmingwerk.

2.3 Onderzoeksmethode

De gebruikte onderzoeksmethode is gebaseerd op literatuuronderzoek en toegepast onderzoek, waarbij gekeken is naar een probleem uit de praktijk.

In hoofdstuk 3 is antwoord gegeven op de deelvraag: *"Welke begrippen zijn van belang bij circulair bouwen en hoe zijn deze met elkaar verbonden?"*. Deze vraag is beantwoord door het uitvoeren van deskresearch in combinatie met interviews. De deskresearch had als doel het definiëren van verschillende begrippen aan de hand van bronnen, zoals de Rijksoverheid, MVO en VHB. De interviews gaven een andere visie op de principes en definities van de begrippen. Op basis van zowel de interviews als de deskresearch zijn de definities van begrippen die van belang zijn voor het onderzoek vastgesteld.

In hoofdstuk 4 is antwoord gegeven op de deelvraag: *"Waarom is het in het algemeen belang dat er circulair gebouwd gaat worden?"*. Deze vraag is tevens beantwoord middels deskresearch. De bronnen die hiervoor zijn gebruikt zijn onder andere afkomstig van de Rijksoverheid, maar ook is literatuur gebruikt met betrekking tot de circulaire economie.

In hoofdstuk 5 is antwoord gegeven op de deelvraag: *“Hoe kan worden gemeten in welke mate het principe van circulair bouwen wordt toegepast?”*. Deze vraag omvat een andere scope van het onderzoek namelijk: het meetbaar maken van de principes van circulair bouwen. Voor het meetbaar maken van in welke mate het principe van circulair bouwen wordt toegepast is een meetmethodiek ontwikkeld waarbij gebruik gemaakt is van de in hoofdstuk 3 vastgestelde begrippen. Vervolgens hebben deze begrippen en de door deskresearch verkregen informatie een aangepaste meetmethodiek opgeleverd. Verder hebben specialisten een deskundige bijdrage geleverd aan het verfijnen van de meetmethodiek.

In hoofdstuk 6 is antwoord gegeven op de deelvraag: *“Wat zijn de minimale functionele toepisen die gesteld worden aan de onderbouw van het project ‘Bruggen Krommenie’?”*. Het antwoord op deze vraag is gebaseerd op kennis, opgedaan tijdens de opleiding Civiele Techniek, om oplossingsvrij te kunnen ontwerpen. Door een specialist te raadplegen zijn de minimale functionele toepisen geverifieerd.

In hoofdstuk 7 is antwoord gegeven op de deelvragen: *“Welke alternatieven kunnen per object worden gegenereerd op basis van de minimale functionele toepisen?”* en *“Hoe scoren de gegenereerde alternatieven t.o.v. de eerder vastgestelde criteria?”*. Bij de eerste vraag zijn alternatieven bedacht op basis van de in hoofdstuk 6 genoemde minimale functioneel top-eis en deskresearch. Bij de tweede vraag zijn de alternatieven beoordeeld middels de in hoofdstuk 5 vastgestelde meetmethodiek en onderbouwd door middel van deskresearch.

Met de informatie die het beantwoorden van de deelvragen heeft opgeleverd, is de hoofdvraag *“Hoe kan het principe van circulair bouwen worden toegepast in het ontwerp van de onderbouw van het project ‘Bruggen Krommenie’?”* beantwoord. Ook zijn er conclusies en aanbevelingen uit het onderzoek voortgevloeid die direct toepasbaar zijn in de praktijk.

3

3 CIRCULAIR BOUWEN, WAT IS DAT NU?

BEGRIPPEN EN DEFINITIES

“The circular economy is key to quality of life, a sustainable world and huge opportunities. It should be part of the DNA of every government, company and organization.”

- prof. dr. J.P. Balkenende

In de bouw wordt intensief samengewerkt, van onderaannemer naar werkvoorbereider, van werkvoorbereider naar projectleider, van projectleider naar opdrachtgever en vice versa. Toch spreken deze groepen meestal niet in dezelfde taal. Zo blijkt uit onderstaande anekdote waarin emeritus-hoogleraar De Ridder zijn commentaar geeft op Paul Waarts, Senior Adviseur bij de provincie Noord-Holland.

““Die Paul Waarts heeft de klok horen luiden, maar weet niet waar de klepel hangt.” Wat Noord-Holland doet noem ik geen Legolisering, zegt De Ridder” (Doodeman, 2017).

Deze quote uit een bericht in de Cobouw maakt twee dingen duidelijk:

- Een begrip kan op verschillende manieren gedefinieerd worden;
- Het is van belang dat alle betrokken bij een en hetzelfde project dezelfde definities hanteren om miscommunicatie te voorkomen.

3.1 Begrippen rondom duurzaamheidsbeleid

Naar aanleiding van de anekdote worden om eenduidigheid te creëren en om een basis te leggen voor dit onderzoek de gehanteerde definities nader toegelicht rondom de beginterm ‘duurzaamheidsbeleid’. De onderstaande begrippen worden nader toegelicht:

- | | |
|--------------------------|-----------------------------|
| • Duurzaamheidsbeleid; | • Biologische kringloop; |
| • Duurzame ontwikkeling; | • Technologische kringloop; |
| • Eco-efficiëntie; | • Circulair bouwen; |
| • Cradle to Cradle; | • Legolisering; |
| • Lineaire economie; | • IFD-bouwen; |
| • Circulaire economie; | • Modulair bouwen. |

Deze begrippen zullen van ‘groot naar klein’ gedefinieerd en uitgewerkt worden.

Door de jaren heen heeft het **duurzaamheidsbeleid** in Nederland verschillende namen gekend. In de jaren 70 is de eerste bewustwording gekomen op het gebied van milieu, dit mede aangewakkerd door het rapport “Grenzen aan de Groei” van de **Club van Rome**.

Het eerste beleid van de Rijksoverheid stamt uit 1972 en had de naam “Urgentienota Milieuhygiëne”. Dit beleid richtte zich vooral op de directe leefomgeving van de burger: wetten, zoals de Wet verontreiniging oppervlaktewater en de Wet inzake luchtverontreiniging, werden in deze tijd van kracht (Stuyt, 1972).

Nu – 46 jaar later – kan men zien wat de impact is geweest van dit beleid. De directe leefomgeving van de burger is verbeterd, doordat er minder luchtverontreiniging wordt veroorzaakt door industrie, de waterkwaliteit sterk verbeterd is en de afvalproblematiek onder controle is. Kortom, de lokale milieuproblemen zijn grotendeels beheersbaar geworden. Wat overblijft zijn hardnekkige globale problemen zoals de klimaatverandering, verlies aan biodiversiteit en de aantasting van de natuurlijke bronnen (Cramer, 2014).

Duurzame ontwikkeling is een containerbegrip voor het proces waarin de 3P’s, *people*, *planet* en *profit* dichter naar elkaar toe groeien. Er ontstaat daardoor een ideaal evenwicht tussen sociale, ecologische en economische belangen (MVO Nederland, z.d.-a).

Het begin van grondstoffebewust beleid was de **eco-efficiëntie**. Het begrip eco-efficiëntie staat zowel voor het creëren van economische waarde als voor het verminderen van de milieueffecten in de gehele productketen en de reductie van het gebruik van grondstoffen (Cramer, 2014).

In 2002 kwamen William McDonough en Michael Braungart met hun boek over het **Cradle-to-Cradle principe**. Dit wordt ook wel 'C2C-principe' genoemd. De 'C2C-aanpak' is het van wieg tot wieg ontwerpen van producten (Braungart, 2002). Dit houdt in dat men zo ontwerpt dat de gebruikte grondstoffen voor dit product weer opnieuw gebruikt kunnen worden door ze op een natuurlijke manier terug te brengen in de kringloop (Webster, 2016). Anders dan het eerdergenoemde begrip eco-efficiëntie wordt in het boek van McDonough en Braungart met opzet gesproken over eco-effectief in plaats van eco-efficiëntie. In hun ogen is de eco-efficiëntie benadering niet radicaal genoeg en meer gericht op het 'minder slecht willen doen' in plaats van het anders goed te doen (Cramer, 2014; Braungart, 2002).

De huidige economie is een **lineaire economie** (Hartman, 2014). In een lineaire economie worden continue nieuwe grondstoffen aan de aarde onttrokken, gebruikt en verspild: 'take-make-waste'. Deze economie wordt ook wel een lineaire wegwerpeconomie genoemd (Planbureau voor de Leefomgeving - PBL, 2016).

In tegenstelling tot de lineaire economie is er de **circulaire economie**. Een circulaire economie is een economie die groei probeert te herdefiniëren met de focus op het toevoegen van positieve effecten voor de maatschappij (PBL, 2018; Rijksoverheid, 2016; Het Groene Brein, z.d.; Schouten, 2017; Webster, 2016; PBL, 2016).

In een circulaire economie worden grondstoffen hergebruikt binnen de twee kringlopen van de circulaire economie, zodat geen nieuwe uitputbare grondstoffen benodigd zijn. Dit zal leiden tot loskoppeling met de economische groei. Door het slim ontwerpen van producten zal in de productie-, gebruiks- en hergebruiksfase geen afval en vervuiling ontstaan. Daarnaast kunnen er door het sluiten van de kringlopen economische, ecologische en sociale waarde worden toegevoegd aan de maatschappij (MVO Nederland, 2018; VolkerWessels, 2018).

De circulaire economie bestaat uit een tweetal kringlopen: **biologische kringloop** en **technologische kringloop**. Deze worden hieronder verder toegelicht.

De biologische kringloop wordt gedefinieerd als een kringloop waarbij producten kunnen terugvloeien in de natuur zonder verder negatieve invloed te hebben op deze kringloop. Voorbeelden hiervan zijn katoen en hout, welke na hun werkzame leven kunnen worden gecomposteerd. Voor het toevoegen van waarde aan de maatschappij met de eerdergenoemde economisch, natuurlijk en sociaal waarde is het noodzakelijk dat men inzichtelijk heeft in welke circulaire cirkel het product zich bevindt. Hieronder wordt toegelicht hoe door middel van het sluiten van een aantal circulaire cirkels extra waarde kan worden gecreëerd.

Het agrarisch afval afkomstig uit het groeiproces van koffiebonen kan worden gebruikt als groeimedium voor het laten groeien van champignons. Het hergebruiken van dit afval is arbeidsintensiever dan de standaardmethode en levert dus meer werkgelegenheid op (sociale waarde). Ook levert het gebruik van agrarisch afval in dit geval een economisch voordeel op (economische waarde), omdat het gratis beschikbaar is. Nadat de champignons geteeld zijn in het groeimedium kan dit groeimedium vervolgens weer gebruikt worden als veevoer. Dit veevoer kan door dieren geconsumeerd worden, die vervolgens weer mest produceren.

Tot slot kan de mest gebruikt worden voor het laten groeien van koffieplanten. Hierdoor is, zoals in de eerste stap, ecologische waarde toegevoegd door het niet gebruiken van kunstmest (Rijksoverheid, 2009). Dit is tevens arbeidsintensiever en gratis beschikbaar, dus in deze stap worden economische en sociale waarde toegevoegd.

Indien de koffieplantage, veehouderij en champignonkwekerij zich binnen één bedrijf bevinden bestaat ook de mogelijkheid dat de CO₂-uitstoot door transport kan worden verminderd, waardoor ecologische en economische waarde kan worden toegevoegd. Daarnaast wordt door het gebruik van mest in plaats van kunstmest in ieder geval geen kunstmatige meststoffen toegevoegd in de gehele cirkel. In figuur 3 staat het voorbeeld grafisch weergegeven (Webster, 2016).



figuur 3: Voorbeeld gesloten cirkel

De technische kringloop bevat alle producten die niet zonder tussenkomst van de mens kunnen terugvloeien in het ecologische systeem zonder dit te verstoren. Voorbeelden hiervan zijn staal en plastics. In een circulaire economie wordt de technische kringloop zo ingericht dat producten hierin hergebruikt kunnen worden op een kwalitatief gelijkwaardig niveau. Daarnaast worden de producten zo geproduceerd dat ze met een minimale belasting op het milieu te hergebruiken zijn (Webster, 2016).

In de circulaire economie wordt gebruik gemaakt van de **9R-methode**. De 9R-methode is ontwikkeld door prof. dr. J. Cramer op basis van de **ladder van Lansink**. De 9R-methode geeft de niveaus van circulariteit aan, waarbij 'refuse' de hoogste waarde heeft en 'recover' de laagste waarde, zie figuur 4. Op de circulariteitsladder heeft een hoge waarde de voorkeur en dient een lage waarde voorkomen te worden (Cramer, 2014).



figuur 4: 9R-methode van 'Refuse' tot 'Recover'

Het **circulair bouwen** en/of circulair ontwerpen is het toepassen van het principe van de circulaire economie in de praktijk. Dit gebeurt door het gebruik van secundaire grondstoffen, herwinbare energie en het bouwen zonder afval te produceren. De gebouwde producten kunnen aan het einde van hun levensduur hergebruikt worden via de biologische of technische kringloop. Daardoor zijn de producten oneindig herbruikbaar en wordt de waarde behouden over de tijd. Het circulair bouwen en/of circulair ontwerpen heeft als doel een positieve bijdrage te leveren aan biodiversiteit en aan de maatschappij (VolkerWessels, 2018).

Legolisering is een principe binnen het circulair bouwen, waarbij bouwwerken niet meer ambachtelijk maar evolutionair gebouwd worden door middel van onderdelen die uit een catalogus kunnen worden geselecteerd. De term legolisering is een breder begrip dan alleen circulair bouwen. Een groot gedeelte van dit begrip wordt gevormd door 'conventionele procesverbetering' waar het draait om het verminderen van de kosten, verkorten van de realisatietijd en maximaliseren van de kwaliteit. Dit valt echter buiten de definitie die in dit onderzoek gebruikt wordt voor legolisering (De Ridder, 2011).

IFD-bouwen kan een onderdeel genoemd worden van legolisering. "IFD staat voor Industrieel, Flexibel, Demontabel. Ofwel werken met gestandaardiseerde bouwstenen die fabrieksmatig zijn geproduceerd, precies in elkaar passen, snel aangebracht kunnen worden én geschikt zijn voor hergebruik" (De Bouwcampus, 2017, p. 1)

"Specifiek voor het standaardiseren van bruggen staat IFD ook voor het definiëren van de Interface, Functie en Dimensie: De Interface is de koppeling of het raakvlak tussen verschillende elementen (lego-nopjes). De Functie geeft aan wat het element doet of de combinatie van de onderdelen. De Dimensie van het element geeft aan welke maatvoering of stramienmaat gehanteerd moet worden." (De Bouwcampus, 2017, p. 1)

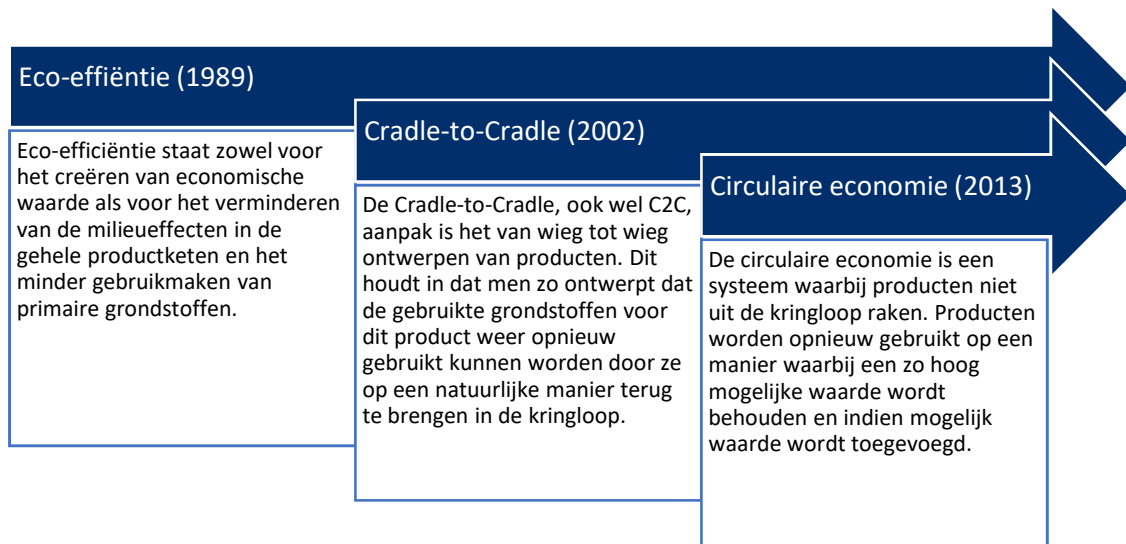
Modulair bouwen kan een onderdeel genoemd worden van IFD-bouwen. Een voorbeeld van modulair bouwen is het bouwen met LEGO. Dit is het zodanig bouwen van een bouwwerk dat het zonder afval te produceren uit elkaar gehaald kan worden. Ook kan het daarna weer ongeschonden in elkaar gezet worden tot een nieuw bouwwerk. Daarnaast houdt modulair bouwen in dat verschillende modules met verschillende functies op elkaar aangesloten kunnen worden, zoals legostenen met verschillende vormen en kleuren (De Bouwcampus, 2017, p. 1).

3.2 Verbanden tussen begrippen

In de voorafgaande tekst zijn de begrippen in en rondom duurzaamheidsbeleid genoemd en is er een definitie van gegeven. Deze begrippen zijn onderling met en in elkaar verweven. In 'BIJLAGE B – SCHEMA RELATIE BEGRIPPEN' is een schema weergegeven hoe de begrippen onderling met elkaar verbonden zijn.

3.3 Door de jaren heen

Het hergebruiken van grondstoffen, wat in de kern de circulaire economie inhoudt, is niet een geheel nieuw principe. Dit principe komt al decennia voor in duurzaamheidsbeleid. De naam die aan dit beleid wordt gegeven is door de jaren heen veranderd, terwijl de definitie gedeeltelijk overeenkomt. In figuur 5 wordt deze verandering door de jaren heen weergegeven.



figuur 5: Circulaire economie als begrip door de jaren heen

3.4 Resumé

In dit hoofdstuk is antwoord gegeven op de vraag: “Welke begrippen zijn van belang bij circulair bouwen en hoe zijn deze met elkaar verbonden?” Daaruit blijkt dat van een ‘circulair’ begrip verschillende definities kunnen zijn. Het is daarom van belang dat, alvorens begonnen wordt met het circulair bouwen van een project, alle betrokkenen dezelfde definities hanteren voor begrippen rondom circulair bouwen.

Het principe van circulair bouwen is het gebruiken van secundaire grondstoffen, herwinbare energie en het bouwen zonder afval te produceren. Daarmee kan door het sluiten van de kringlopen positieve waarde worden toegevoegd aan de maatschappij. Dit principe komt al decennia voor in duurzaamheidsbeleid, maar de naam die aan dit beleid wordt gegeven is door de jaren heen veranderd, terwijl de definitie gedeeltelijk gelijk blijft.

4

4 CIRCULAIR BOUWEN, WAAROM MOET DAT?

NOODZAAK

“Waarom afval produceren, als het toch wordt weggegooid.”

- Loesje

““Iedereen denkt: circulariteit waarom moet dat nou? Je moet kunnen laten zien wat het is, dat prikkelt mensen. Niemand vroeg ooit naar een iPhone, maar toen die er was en iedereen zag wat de iPhone allemaal kon, wilde iedereen hem hebben.”” (Rijksoverheid, z.d.-b). Dat moet ook gebeuren met de circulaire economie en dus tevens met het principe van circulair bouwen.

4.1 Transitie naar circulaire economie

De transitie van een lineaire naar een circulaire economie heeft drie doelen. In dit onderzoek worden de drie doelen als volgt gedefinieerd:

- **Voorzieningszekerheid** grondstoffen;
- Economische baten;
- Schoner milieu.

De drie doelen kunnen afzonderlijk van elkaar gezien worden. Anderzijds kunnen de doelen elkaar gezamenlijk versterken. De drie doelen zijn daardoor verbonden en verweven met elkaar.

Als toelichting hierop zorgt bijvoorbeeld het gebruiken van schonere alternatieven, ten opzichte van het gebruik van **fossiele brandstoffen**, voor een vermindering van de CO₂-uitstoot. Dit levert een positieve bijdrage aan het milieu en kan daarnaast ook economische voordelen opleveren. Daarnaast leidt het zeker stellen van de voorzieningszekerheid van grondstoffen ertoe dat de economie door kan blijven groeien (Rood & Hanemaaijer, 2017).

4.1.1 Voorzieningszekerheid grondstoffen

De lineaire (wegwerp)economie verbruikt in de huidige vorm goedkope primaire **abiotische** grondstoffen (**mineralen, metalen** en fossiele brandstoffen) om ca. 82% (Centraal Bureau Statistiek - CBS, 2017) van de energie op te wekken. Als deze abiotische grondstoffen beperkt beschikbaar zullen worden zal de lineaire economie minder functioneren. Een voorbeeld hiervan is dat in de 20^{ste} eeuw tien van de elf wereldwijde economische crises voorafgegaan werden door een prijsstijging van olie die veroorzaakt werd door beperkte beschikbaarheid ervan (Webster, 2016).

Een ander voorbeeld dat illustreert hoe de prijs van de abiotische grondstoffen verband houdt met het functioneren van de lineaire economie, is het optreden van storingen in het treinverkeer door het ontvreemden van koper uit de bedieningskast(en) en de bovenleiding(en) (Schouten, 2017, p. 29). Dit is een direct gevolg van de stijgende prijs van koper door de afnemende beschikbaarheid, en deze storing leidt tot een (beperkte) afname van de economische groei.

In een ‘ideale’ wereld is de economische groei niet afhankelijk van de beschikbaarheid van goedkope abiotische grondstoffen. Als wordt vastgehouden aan de koppeling tussen de abiotische grondstoffen en de lineaire economie dan krijgen toekomstige generaties te maken met hogere prijzen van primaire abiotische grondstoffen. Verder zullen deze grondstoffen voor toekomstige generaties in toenemende mate ongelijk verdeeld kunnen worden, hetgeen leidt tot grotere verschillen tussen arm en rijk. Dat is precies wat de circulaire economie ondervangt; het loskoppelen van economische groei van de beschikbaarheid van abiotische grondstoffen.

In de praktijk betekent dit dat de economie zoveel mogelijk onafhankelijk moet worden van primaire abiotische grondstoffen. Dit kan door de reeds in de maatschappij verwerkte grondstoffen een langere levensduur te geven, te repareren of te hergebruiken. Daarnaast moet het verbruik van **uitputbare grondstoffen** gestopt worden.

Als de bouwsector een gegarandeerde voorzieningszekerheid van grondstoffen heeft, dan blijft de prijs voor deze grondstoffen stabiel. In de huidige economie worden bepaalde grondstoffen op het moment van de laagste prijs ingekocht.

Een voorbeeld hiervan zijn de enorme fluctuaties in de staalprijs, veroorzaakt door de beperkte voorzieningszekerheid van staal, damwanden bij een zo laag mogelijke staalprijs ingekocht. Dit scheelt bij grotere bouwprojecten enorm in de totaalprijs van het project.

Als de grondstoffen in de loop der jaren schaarser gaan worden, valt te verwachten dat de prijzen van grondstoffen gaan fluctueren en stijgen. Dit kan zowel voor opdrachtnemer als opdrachtgever negatieve gevolgen hebben op de balans. Voor een opdrachtnemer kan het bijvoorbeeld nadelige gevolgen hebben als bij de aanschaf blijkt dat het staal duurder is dan bij de aanbesteding gecalculeerd, anderzijds kan een opdrachtgever te veel betalen voor het materiaal als een opdrachtnemer het materiaal goedkoper kan aanschaffen dan is gecalculeerd.

4.1.2 Economische baten

In tegenstelling tot de lineaire economie biedt de circulaire economie ook nieuwe kansen voor de economie. Uit deze nieuwe kansen ontstaan baten die de hele samenleving ten deel zullen vallen en niet exclusief toebedeeld zullen zijn aan een bepaalde groep. Dit komt doordat de circulaire economie zowel op kleine schaal als op grote schaal kan worden toegepast. Denk aan het beter inschatten van de benodigde hoeveelheid eten voor het avondeten, om afval te voorkomen, tot het verminderen of misschien zelfs niet gebruiken van beton in een sluis.

Arbeid is de grondstof van de circulaire economie. Door het gebruik van arbeid is een groot gedeelte van de economie circulair te maken. Grondstoffen zitten vaak opgesloten in reeds gemaakte producten en dat maakt het arbeidsintensief, en dus duur, om deze grondstoffen uit deze producten te winnen. In de huidige lineaire economie is het vooralsnog goedkoper om simpelweg primaire grondstoffen te gebruiken.

Door in de circulaire economie arbeid in te zetten op het ontsluiten van de ‘opgesloten’ grondstoffen, kan men **secundaire grondstoffen** creëren door middel van arbeid. Door deze nieuwe manier van omgaan met grondstoffen ontstaan nieuwe banen. Hierdoor wordt er sociale waarde toegevoegd aan de maatschappij, wat weer bijdraagt aan een betere samenleving. Deze transitie kan gestimuleerd worden door het verplaatsen van de belasting op arbeid naar een belasting op primaire grondstoffen (Webster, 2016, p. 42).

Bovendien is het in de circulaire economie een kwestie van het sluiten van circulaire cirkels; het hergebruiken van afval naar het originele product. In hoofdstuk 3 waar het begrip biologische kringloop aan bod komt, wordt dit proces verder toegelicht. Afval is tot op heden gratis en hier valt dus een significant voordeel te behalen. Door het verminderen van grondstoffengebruik is er meer winst te behalen. Als men zich zowel in de biologische als technische kringloop strikt houdt aan de 9R-methode, dan kan daarmee overbodig grondstoffenverbruik voorkomen en/of verminderd worden.

De economische baten van het circulair bouwen zijn direct duidelijk. Alles draait om het grondstoffenbeleid. Het niet gebruiken, verminderen of hergebruiken van grondstoffen in reeds gebouwde bouwwerken is de kern van het circulair bouwen.

Al in 1961 zei Jane Jacobs: “Cities are the mines of the future” (Fink et al, 2011). Door in de circulaire economie en tevens in het circulair bouwen gebruik te maken van grondstoffen die al aanwezig zijn in een stad of dorp kunnen de bouwkosten gereduceerd worden. De grondstoffen kunnen afkomstig zijn uit bijvoorbeeld wegen, riolering, gebouwen, bruggen en andere (civiele) bouwwerken.

Doordat secundaire grondstoffen gebruikt worden in plaats van primaire grondstoffen wordt niet alleen de grondstofprijs lager, maar ook worden de transportkosten gemarginaliseerd. Als bijkomend voordeel kan dit een positief effect hebben op de omgeving rondom de bouwplaats. Dit voegt zowel ecologische als sociale waarde toe.

4.1.3 Schoner milieu

Vooralsnog worden in de lineaire economie geen externe kosten meegenomen voor de risico's van het gebruik van primaire abiotische grondstoffen, zoals het bederf van de leefomgeving, uitwassen rondom de winning en opwarming van de aarde. Er wordt dus alleen voor de grondstof betaald. Men betaalt belasting over de aanschaf van grondstoffen maar deze belasting heeft niet als doel het grondstoffen gebruik te verminderen. In een circulaire economie worden deze risico's wel 'belast'.

In een circulaire economie zou ook voor deze schadelijke neveneffecten een prijs betaald moeten worden, mogelijk in de vorm van een expliciete belasting op deze grondstoffen. De hoogte van de belasting hangt dan af van de negatieve effecten op ecologische en sociale waarde van de grondstof.

Een voorbeeld van een negatief effect is CO₂-uitstoot. De bouwsector kan op een aantal manieren flink werken aan het terugbrengen van de CO₂-uitstoot. Wellicht kan de grootste stap gezet worden door het terugdringen van het gebruik van portlandcement, wat als bestanddeel van beton gebruikt wordt. Tijdens het bakken op ca. 1450 graden van de portlandklinkers, waar portlandcement van gemaakt wordt, wordt vijf procent van de mondiale CO₂-uitstoot geproduceerd (Zambrano, et al., 2002; Worrel, Price, Martin, Hendriks, & Meida, 2001).

Daarnaast heeft het gebruik van steden en dorpen als mijnen van grondstoffen niet alleen positieve effecten op de economie, maar ook op het milieu. Doordat er minder grondstoffen getransporteerd hoeven te worden kan de CO₂ uitstoot veroorzaakt door transport teruggedrongen worden. Tevens wordt ook de uitwassing in en rondom het delven van grondstoffen voorkomen.

Naast een algemene verbetering van de leefomgeving in de gehele maatschappij valt door het juist toepassen van de circulaire economie ook het waterverbruik te verminderen. Als men bijvoorbeeld een wasmachine leaset waarbij een vaste all-in prijs per maand betaald wordt aan de producent, zal een producent gestimuleerd worden om zijn apparaat zuinig met water om te laten gaan en tegelijk de levensduur te verlengen.

4.2 Resumé

In dit hoofdstuk is antwoord gegeven op de vraag: *“Waarom is het in het algemeen belang dat er circulair gebouwd gaat worden?”* Daaruit blijkt dat de drie doelen die de transitie beoogt en die in dit hoofdstuk zijn uiteengezet zijn verbonden en verweven met elkaar. Nederland en rest van de wereld hebben veel te winnen bij het invoeren van de circulaire economie en dus tevens het circulair bouwen. Door te bouwen met secundaire grondstoffen kan de economie worden losgekoppeld van de voorzieningszekerheid van deze grondstoffen. Daardoor kunnen de kosten in de bouw worden gereduceerd en kan het milieu verbeterd worden.

Als gevolg van het bouwen met hergebruikte grondstoffen ontstaat de vraag naar meer arbeid. Verder heeft het hergebruiken van grondstoffen een positief effect op het milieu. Daarom is de transitie van een lineaire economie naar een circulaire economie noodzakelijk. Door in de bouwsector te gaan werken volgens het principe van circulair bouwen kan er een grote stap worden gezet naar de circulaire economie en het toevoegen van economische, ecologische en sociale waarde.

5

5 CIRCULAIR BOUWEN, HOE WORDT DAT GEMETEN?

MEETMETHODE

“To measure is to know. If you can’t measure it, you can’t improve it.”

- Lord Kelvin

Voor het meten van in welke mate het principe van circulair bouwen wordt toegepast is gebruik gemaakt van criteria. Deze criteria worden uitgezet in een TOM (Trade-Off-Matrix) tegen de gegenereerde alternatieven. De gegenereerde alternatieven in deze TOM krijgen beoordelingen ten opzichte van het referentiealternatief. Het geheel van beoordelingen op basis van de criteria (de optelsom) levert een tussenscore op.

In de TOM worden uitsluitend circulaire criteria beschouwd. De haalbaarheid, esthetica, hinder, kosten en risico's, zijn geen criteria in deze TOM.

5.1 Meetmethodiek

De gekozen criteria zijn opgedeeld in twee categorieën, de R- en C-categorie. De exacte definities van de criteria zijn omschreven in de 'verklarende woordenlijst en afkortingen' en in 'BIJLAGE A – VERKLARENDE WOORDENLIJST'. Dit onderzoek hanteert een aangepaste 9R-methode, welke beschreven is in hoofdstuk 3. In deze paragraaf worden uitsluitend toelichtingen en wijzigingen ten opzichte van de oorspronkelijke methode besproken.

9R-Methode		8R-Methode	
Criteria		Criteria; R-categorie	Wegingsfactor
R1: Refuse	(weigeren)	R1: Weigeren	1,80
R2: Reduce	(verminderen)	R2: Heroverwegen	1,70
		Criteria; C-categorie	Wegingsfactor
		C1: Ecologische waarde	1,45
		C2: Sociale waarde	1,45
		C3: Economische waarde	1,45
R3: Re-use	(hergebruiken)	R3: Verminderen	1,60
R4: Repair	(repareren)	R4: Hergebruiken	1,50
R5: Refurbish	(renoveren)	R5: Repareren	0,00
R6: Remanufacture	(reviseren)	R6: Renoveren	0,00
		Uitzondering object landhoofd	1,30
R7: Re-purpose	(herbestemmen)	R7: Herbestemmen	1,20
R8: Recycle	(recyclen)	R8: Recyclen	1,10
R9: Recover	(verbranden)		

tabel 1: 9R-methode t.o.v. 8R-methode inclusief wegingsfactor

In tabel 1 staat in de linker kolom de oorspronkelijke 9R-methode en in de rechter kolom de in dit onderzoek gehanteerde 8R-methode bestaand uit de R- en C-categorie. Tevens is in deze tabel de wegingsfactor weergegeven.

De wegingsfactor is per criterium uitgedrukt. De wegingsfactor voor de R-categorie is op basis van circulariteit. Hoe hoger op de circulariteitsladder, des te zwaarder de weging. Dit komt voort uit het beleid van de Rijksoverheid. De wegingsfactor is zo vastgesteld dat verschillen ontstaan die een rangschikking mogelijk maken. De wegingsfactor voor de C-categorie is het gemiddelde van de wegingsfactoren van de R-categorie.

Het criterium **R1 (weigeren)** wordt niet beoordeeld in de TOM, omdat het criterium geen functie heeft op het niveau waarmee in dit onderzoek wordt gekeken naar de alternatieven. Dit criterium is van toepassing als wordt beschouwd of en hoe objecten uit een systeem kunnen worden geweigerd. In dit onderzoek wordt op object niveau gekeken en is het weigeren van objecten daardoor niet mogelijk.

Onder R1 (weigeren) is 'heroverwegen' toegevoegd als **R2 (heroverwegen)**. In deze stap wordt bepaald of een object niet één maar meerdere functies kan hebben voor efficiënter gebruik van de grondstoffen.

Onder het criterium R2 (heroverwegen) valt ook het toevoegen van circulaire waarde. Deze waarde is opgenomen in de C-categorie met de volgende criteria: **C1: ecologische waarde, C2: sociale waarde en C3: economische waarde**. In de circulaire economie is het van belang dat waarde wordt toegevoegd aan de maatschappij. In de 8R-Methode is dit niet voldoende vertegenwoordigd en met die reden zijn deze waarden geïntegreerd in de meetmethodiek.

Voor **R3 (verminderen)** worden materialen beoordeeld op basis van GER-waardes, zodat alle materialen op een gelijkwaardige wijze op energie verbruik vergeleken kunnen worden. GER staat voor Gross Energy Requirement: de som van alle energie die nodig is om een materiaal te produceren. In dit onderzoek wordt uitsluitend het niet-hernieuwbare deel van de GER-waarde vergeleken, omdat dit deel niet teruggewonnen kan worden. De gebruikte GER-waarden staan in tabel 2 (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2018).

Materiaal	Type	Niet-hernieuwbare GER-Waarde in MJ/kg
Beton	(gewapend betonproduct)	1,6
Hout	(tropisch hardhout)	2,0
Kunststof	(gerecycled HDPE)	9,6
Staal	(herwonnen staal)	8,1

tabel 2: GER-waarden

Verder is gekozen om uit de 9R-methode R5 (refurbish) en R6 (remanufacture) samen te voegen tot **R5 (repareren)**, omdat in de praktijk geen grote verschillen te onderscheiden zijn. Daarnaast zijn bij het criterium R5 (repareren) de alternatieven beoordeeld zonder dat hiervoor een onderbouwing op basis van wetenschappelijke bronnen beschikbaar is. Beoordelingen zijn daardoor gebaseerd op aannames en persoonlijke ervaring, om die reden krijgt criterium R5 (repareren) geen weging in de tussenscore. Indien voldoende wetenschappelijke bronnen beschikbaar zijn wordt voor de R5 (repareren) een wegingsfactor van 1,40 gehanteerd.

Bij het criterium **R6 (renoveren)** zijn alleen de beoordelingen van de alternatieven bij het object landhoofd meegenomen in de tussenscore, omdat de alternatieven te vergelijken zijn op hun **modulariteit**. De beoordelingen op R6 (renoveren) bij de objecten: fundering, stootplaat en remmingwerk zijn wel beoordeeld, maar niet meegenomen in de tussenscore. Dit omdat onderbouwing op basis van wetenschappelijke bronnen voor dit criterium ontbreekt. De beoordelingen zijn daardoor gebaseerd op aannames en persoonlijke ervaring.

Ten slotte is **R9 (recover)** verwijderd uit de methode, omdat deze stap niet conform het circulair denken is.

De gegenereerde alternatieven zijn beoordeeld met een '+++'; '++'; '+'; '='; '-'; '--' en '---', daarbij is '+++ de hoogste en '---' de laagste beoordeling. Als de gegenereerde alternatieven gelijkwaardig zijn aan het referentiealternatief wordt een '=' als beoordeling gegeven. Bijvoorbeeld als een alternatief bij R2 (heroverwegen) een beoordeling krijgt van '++' is de score 3,40 en bij R4 (hergebruiken) een beoordeling krijgt van '-' is de score -1,50. De tussenscore wordt dus bepaald door optelsom van de scores uit de beoordelingen van de 8-R'en de 3-C'en.

Door alle criteria te beoordelen met ‘---’ of ‘+++’ ontstaan de laagste en hoogste tussenscore. Voor de objecten fundering, stootplaat, oplegpijler en remmingwerk zijn de hoogste en laagste tussenscore respectievelijk -39,75 en +39,75. Voor het object ‘landhoofd’ is de hoogste en laagste tussenscore respectievelijk -43,65 en +43,65.

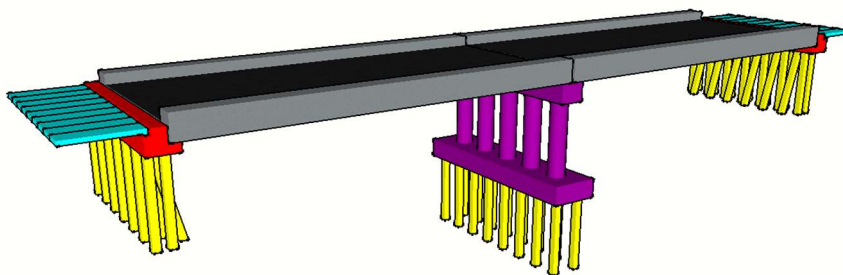
In ‘BIJLAGE C – BLANCO TOM’ is een blanco TOM weergegeven zoals deze gebruikt gaat worden voor het beoordelen van de alternatieven.

5.2 Referentiealternatief

Uit een samenwerking tussen VHB en KWS *Infra bv.*, hierna KWS genoemd, is een ‘standaard’ viaduct gegenereerd (Volkerwessels, 2018). De objecten van dit viaduct worden in dit onderzoek gebruikt als referentiealternatief, zie tabel 3 en figuur 6. De nadere toelichting van de referentiealternatieven staat in ‘BIJLAGE D – REFERENTIEALTERNATIEVEN’.

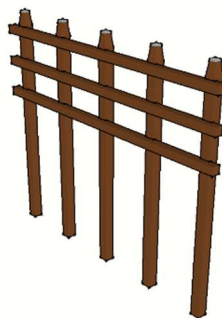
Object	Omschrijving	Kleur in figuur 6
Fundering	gewapend betonnen (primaire grondstoffen) funderingspalen	Geel
Landhoofd	gewapend betonnen (primaire grondstoffen) landhoofd	Rood
Stootplaat	gewapende betonnen (primaire grondstoffen) stootplaten	Lichtblauw
Oplegpijler	gewapend betonnen (primaire grondstoffen) pijler	Paars

tabel 3: Objectomschrijving met visualisatie



figuur 6: Visualisatie 'standaard' viaduct

Het referentiealternatief voor het remmingwerk is niet afkomstig uit het ‘standaard’ viaduct, maar is beschreven door Leusen (2011) in het boek *Duikers en Sluizen*. Deze is in figuur 7 in het bruin weergegeven.



figuur 7: Visualisatie 'standaard' remmingwerk

5.3 'Alternatievencombinaties'

De alternatieven zijn, zoals beschreven in paragraaf 5.1, beoordeeld ten opzichte van het referentiealternatief aan de hand van de 8R-methode. Nadat alle tussenscores van de alternatieven per object zijn bepaald worden alle mogelijke 'alternatievencombinaties' inzichtelijk gemaakt. Een 'alternatievencombinatie' bestaat uit een combinatie van alternatieven waarbij per object één alternatief wordt gekozen. Om te bepalen wat de circulaire score is van de 'alternatievencombinatie' worden de tussenscores van de gekozen alternatieven bij elkaar opgeteld.

De maximale circulaire score van één 'alternatievencombinatie' volgt uit de optelsom van de maximale tussenscores, deze tussenscores zijn beschreven in paragraaf 5.1. De maximale circulaire score van één 'alternatievencombinatie' is 202,65. Door de circulaire score van de 'alternatievencombinatie' te delen door de maximale circulaire score ontstaat een circulair percentage. Daarmee kan worden aangegeven in welke mate het principe van circulair bouwen is toegepast.

Om te bepalen welke 'alternatievencombinatie' de hoogste circulaire score heeft worden deze in de TOM – A gerangschikt van hoog naar laag.

Vanuit het oogpunt van een opdrachtgever zijn bepaalde alternatieven echter niet altijd wenselijk, omdat de randvoorwaarden per project kunnen verschillen. Randvoorwaarden zijn bijvoorbeeld circulariteit, haalbaarheid, materiaalsoort, realisatietijd, esthetica, hinder, kosten en risico's. Om 'alternatievencombinaties' te kunnen selecteren op basis van randvoorwaarden worden deze ingevoerd in een TOM. Binnen een selectie worden 'alternatievencombinaties' gerangschikt van hoog naar laag op de circulaire score.

Voor het maken van een inschatting van de randvoorwaarde haalbaarheid wordt gebruik gemaakt van een drie kleuren categorie: groen, oranje en rood. In de groene categorie vallen de alternatieven die geacht worden haalbaar te zijn. In de oranje categorie vallen de alternatieven die wel mogelijk worden geacht maar waar verdere ontwerpdetailering voor noodzakelijk is. In de rode categorie vallen de alternatieven die constructief niet mogelijk worden geacht of niet toepasbaar zijn op een project.

Om te bepalen welke 'alternatievencombinatie' de hoogste circulaire score heeft toepasbaar voor het project 'Bruggen Krommenie' wordt geselecteerd op basis van randvoorwaarde haalbaarheid. Dit wordt gedaan middels het selecteren op de categorieën groen en oranje, omdat deze categorieën haalbaar worden geacht. Deze randvoorwaarde wordt ingevoerd in een TOM – B.

Om te bepalen welke materiaalsoort de hoogste circulaire score heeft, wordt geselecteerd middels het uitsluiten van alternatieven op basis van een bepaalde materiaalsoort. Daardoor wordt de randvoorwaarde materiaalsoort ingevoerd in de TOM – C.

5.4 Resumé

In dit hoofdstuk is antwoord gegeven op de vraag: *“Hoe kan worden gemeten in welke mate het principe van circulair bouwen wordt toegepast?”* Daaruit blijkt dat de mate van het toepassen van circulair bouwen meetbaar kan worden gemaakt middels een TOM. De in deze TOM gebruikte criteria zijn afgeleid van de 9R-methode. Deze is gebaseerd op uniform beleid van de Rijksoverheid.

In de TOM zijn de alternatieven voor de objecten beoordeeld ten opzichte van het referentiealternatief. Wanneer voor elk object een alternatief wordt gekozen, ontstaat een ‘alternatievencombinatie’. Uit de optelsom van de tussenscores van de alternatieven ontstaat de circulaire score van één ‘alternatievencombinatie’. Om de TOM project-specifiek te maken kan op randvoorwaarden geselecteerd worden. Binnen deze selectie kunnen ‘alternatievencombinaties’ worden gerangschikt op de hoogste circulaire score.

In dit onderzoek worden drie TOM’s uitgewerkt op basis van de voorgaande randvoorwaarden. In TOM – A wordt de hoogste circulaire ‘alternatievencombinatie’ bepaald. In TOM – B wordt de hoogste circulaire ‘alternatievencombinatie’ bepaald met als randvoorwaarde haalbaarheid. In TOM – C wordt de hoogste circulaire ‘alternatievencombinatie’ bepaald met als randvoorwaarden haalbaarheid en materiaalsoort.

6

6 'BRUGGEN KROMMENIE', WAT IS ER MINIMAAL NODIG?

SYSTEEMEISEN

"If it looks like a duck, swims like a duck, and quacks like a duck. Then it is probably a duck."

- Richard Patterson

In dit hoofdstuk worden de minimale functionele topeisen beschreven van het systeem en per object van de onderbouw. Onder minimale functionele topeisen wordt verstaan: eisen die uitsluitend betrekking hebben op de benodigde functie van het object. Als voorbeeld heeft een lamp als minimale functionele top-eis: licht geven

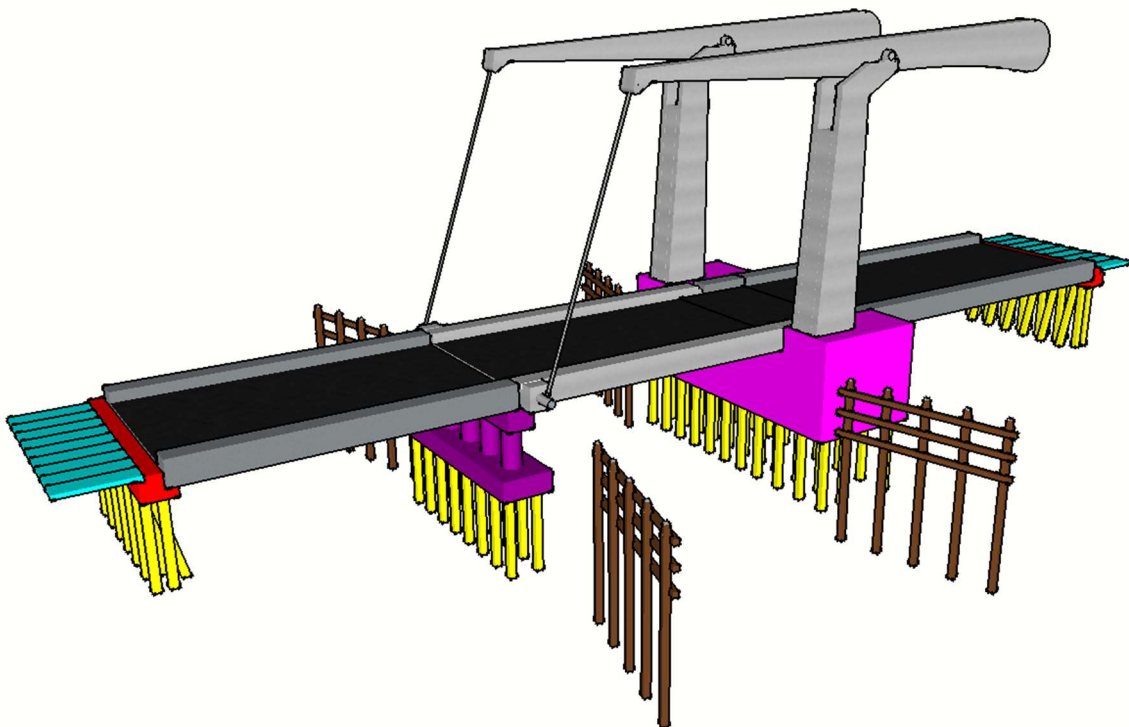
6.1 Systeem

Het project 'Bruggen Krommenie' is gesitueerd in de gemeente Zaanstad. De brug is een systeem, dat bestaat uit verschillende vaste en beweegbare objecten. Dit onderzoek richt zich op de onderbouw van de brug. De bovenbouw bestaat uit twee vaste brugdekken en één beweegbaar brugdek en deze onderdelen wordt niet meegenomen in dit onderzoek. De onderbouw bestaat uit de volgende objecten: fundering, landhoofd(en), stootpla(a)t(en), oplegpijler(s) en het remmingwerk.

Het systeem heeft als minimale functionele top-eis: het scheepvaartverkeer, CEMT III, en het wegverkeer elkaar veilig te laten kruisen, en tegelijkertijd een stabiel systeem te creëren.

In figuur 8 is het systeem en zijn de verschillende objecten van de onderbouw weergegeven:

- Fundering in het geel;
- Landhoofd(en) in het rood;
- Stootpla(a)t(en) in het lichtblauw;
- Oplegpijler(s) in het paars;
- Remmingwerk in het bruin.



figuur 8: Overzicht systeem 'Bruggen Krommenie'

6.2 Object(en)

6.2.1 Fundering

De fundering heeft als minimale functionele top-eis: de verticale en horizontale belastingen afdragen aan de ondergrond. De fundering voorkomt dat door verticale belastingen het systeem gaat zakken als gevolg van zettingen in de ondergrond. Ook worden de horizontale belastingen, zoals bijvoorbeeld rembelasting, aanvaarbelasting en windbelasting, afgedragen aan de ondergrond.

6.2.2 Landhoofd

Het landhoofd heeft als minimale functionele top-eis: de verticale en horizontale belastingen vanuit de bovenbouw afdragen naar de fundering. Verder fungeert het landhoofd als overgangsconstructie van het land naar de brug en vice versa.

6.2.2.1 Stootplaat

De stootplaat heeft als minimale functionele top-eis: het creëren van een overgang van land naar landhoofd oftewel een overgangsconstructie. Dit is nodig in verband met de zettingsverschillen tussen het systeem en de omgeving.

6.2.3 Oplegpijler

De oplegpijler heeft als minimale functionele top-eis: de verticale belastingen, zoals de belastingen afkomstig van het beweegbare tussendek, af te dragen aan de fundering.

6.2.4 Remmingwerk

Het remmingwerk heeft als minimale functionele top-eis: het visueel en fysiek geleiden van de scheepvaart waardoor een aanvaring met het systeem verhinderd wordt.

6.3 Resumé

In dit hoofdstuk is antwoord gegeven op de vraag: *“Wat zijn de minimale functionele topeisen die gesteld worden aan de onderbouw van het project ‘Bruggen Krommenie’?”*. Daaruit blijkt dat onder minimale functionele topeisen wordt verstaan: eisen die uitsluitend betrekking hebben op de functie van het onderdeel. Ook blijkt dat de minimale functionele top-eis voor het project ‘Bruggen Krommenie’ is: het scheepvaartverkeer, CEMT III, en het wegverkeer elkaar veilig te laten kruisen en tegelijkertijd een stabiel systeem te creëren.

7

7 HOE CIRCULAIR ZIJN DE ALTERNATIEVEN?

BEOORDELINGEN EN RESULTATEN

“Iedereen wist dat het niet kon, tot er iemand kwam die dat niet wist.”

- Epictetus

In dit hoofdstuk worden de gegenereerde alternatieven beoordeeld op de circulariteit door middel van de eerder vastgestelde criteria ten opzichte van het referentiealternatief. De referentiealternatieven en de criteria zijn in hoofdstuk 5 nader toegelicht.

7.1 Alternatieven

De te beoordelen alternatieven per object zijn:

Fundering

- FA0: Prefab betonnen paal
- FA1: Stalen damwand
- FA2: Stalen box pile
- FA3: Stalen combiwand
- FA4: Stalen buispaal
- FA5: Houten paal
- FA6: Kunststof damwand
- FA7: Zandpaal

Stootplaat

- SA0: Betonnen stootplaat
- SA1: Stalen stootplaat
- SA2: Kunststof stootplaat
- SA3: Houten stootplaat
- SA4: Houten stootplaat

Remmingwerk

- RA0: Houten remmingwerk
- RA1: Stalen remmingwerk
- RA2: Betonnen remmingwerk
- RA3: Kunststof remmingwerk

Landhoofd

- LA0: Betonnen landhoofd
- LA1: Mega-legoblokken
- LA2: Stalen HE-profielen
- LA3: Betonnen landhoofdblokken
- LA4: Gewapende grond
- LA5: Schanskorven

Oplegpijler

- OA0: Betonnen oplegpijler
- OA1: Mega-legoblokken
- OA2: Stalen HE-profielen
- OA3: Betonnen oplegpijlerblokken
- OA4: Gewapende grond
- OA5: Schanskorven

De nadere toelichting van de alternatieven staat in 'BIJLAGE D – ALTERNATIEVEN'.

7.2 Per object

Voor elk object zijn de alternatieven beoordeeld ten opzichte van het referentiealternatief, zoals nader toegelicht in paragraaf 5.2 Referentiealternatief. De onderbouwing van de beoordelingen bij elk object staat in 'BIJLAGE H – ONDERBOUWING BEOORDELING' verder uitgewerkt.

In tabel 4 zijn de alternatieven voor het object fundering beoordeeld. Uit deze tabel volgt dat alternatief FA4: Stalen buispaal de beste tussenscore heeft.

Fundering	R1: Weigeren	R2: Heroverwegen	C1: Ecologische waarde	C2: Sociale waarde	C3: Economische waarde	R3: Verminderen	R4: Hergebruiken	R5: Repareren	R6: Renoveren	R7: Herbesteden	R8: Recyclen	Totaal	Percentage van het totaal
FA0: Prefab betonnen paal												0,00	0,0%
FA1: Stalen damwand		+	+	=	=	-	+	-	=	=	+	4,15	10,4%
FA2: Stalen box pile		++	+	=	+	-	++	-	=	+	+	8,80	22,1%
FA3: Stalen combiwand		++	+	=	+	-	++	-	=	+	+	10,00	25,2%
FA4: Stalen buispaal		+	+	=	+	-	+++	-	=	++	+	11,00	27,7%
FA5: Houten paal		+	=	=	+	+	=	=	=	=	-	3,65	9,2%
FA6: Kunststof damwand		+	+	=	=	-	+	=	=	=	-	1,95	4,9%
FA7: Zandpaal		+	+	=	=	+	-	=	=	+	+	5,55	14,0%

tabel 4: TOM beoordeling funderingsalternatieven

In tabel 5 zijn de alternatieven voor het object landhoofd beoordeeld. Uit deze tabel volgt dat alternatief LA5: Schanskorven de beste tussenscore heeft.

Landhoofd	R1: Weigeren	R2: Heroverwegen	C1: Ecologische waarde	C2: Sociale waarde	C3: Economische waarde	R3: Verminderen	R4: Hergebruiken	R5: Repareren	R6: Renoveren	R7: Herbesteden	R8: Recyclen	Totaal	Percentage van het totaal
LA0: Betonnen landhoofd												0,00	0,0%
LA1: Mega-legoblokken			=	=	=	=	=	=	++	=	++	8,00	18,3%
LA2: Stalen HE-profielen			-	=	=	=	-	++	-	++	++	5,80	13,3%
LA3: Betonnen landhoofdblokken			=	=	=	=	=	++	=	++	=	5,60	12,8%
LA4: Gewapende grond			=	=	=	=	=	+	+	+	+	7,30	16,7%
LA5: Schanskorven			+	+	=	=	=	++	+	++	++	13,35	30,6%

tabel 5: TOM beoordeling landhoofdalternatieven

In tabel 6 zijn de alternatieven voor het object stootplaat beoordeeld. Uit deze tabel volgt dat alternatief SA1: Stalen stootplaat de beste tussenscore heeft.

Stootplaat	R1: Weigeren	R2: Heroverwegen	C1: Ecologische waarde	C2: Sociale waarde	C3: Economische waarde	R3: Verminderen	R4: Hergebruiken	R5: Repareren	R6: Renoveren	R7: Herbesteden	R8: Recyclen	Totaal	Percentage van het totaal
SA0: Betonnen stootplaat												0,00	0,0%
SA1: Stalen stootplaat			=	=	=	=	-	+	-	-	+	2,20	5,5%
SA2: Kunststof stootplaat			=	=	=	=	-	-	=	+	+	-3,00	-7,5%
SA3: Houten stootplaat			=	=	=	=	=	-	-	-	++	-0,50	-1,3%
SA4: Houten stootplaat			=	=	=	=	+	-	=	=	=	-1,00	-2,5%

tabel 6: TOM beoordeling stootplaatalternatieven

In tabel 7 zijn de alternatieven voor het object oplegpijler beoordeeld. Uit deze tabel volgt dat alternatief OA5: Schanskorven de beste tussenscore heeft.

Oplegpijler	R1: Weigeren	R2: Heroverwegen	C1: Ecologische waarde	C2: Sociale waarde	C3: Economische waarde	R3: Verminderen	R4: Hergebruiken	R5: Repareren	R6: Renoveren	R7: Herbesteden	R8: Recyclen	Totaal	Percentage van het totaal
OA0: Betonnen oplegpijler												0,00	0,0%
OA1: Mega-legoblokken			=	=	=	=	=	++	=	++	++	8,00	20,1%
OA2: Stalen HE-profielen			-	=	=	=	-	++	-	++	++	5,80	14,6%
OA3: Betonnen oplegpijlerblokken			=	=	=	=	=	++	=	++	=	5,60	14,1%
OA4: Gewapende grond			=	=	=	=	=	+	+	+	+	7,30	18,4%
OA5: Schanskorven			+	+	=	=	=	++	+	++	++	13,35	33,6%

tabel 7: TOM beoordeling oplegpijleralternatieven

In tabel 8 zijn de alternatieven voor het object remmingwerk beoordeeld. Uit deze tabel volgt dat alternatief RA1: stalen remmingwerk de beste tussenscore heeft.

Remmingwerk	R1: Weigeren	R2: Heroverwegen	C1: Ecologische waarde	C2: Sociale waarde	C3: Economische waarde	R3: Verminderen	R4: Hergebruiken	R5: Repareren	R6: Renoveren	R7: Herbestemmen	R8: Recyclen	Totaal	Percentage van het totaal
RA0: Houten remmingwerk												0,00	0,0%
RA1: Stalen remmingwerk			+	+	=	+	-	+	-	=	+	4,60	11,6%
RA2: Betonnen remmingwerk			=	=	=	=	+	+	=	=	=	0,90	2,3%
RA3: Kunststof remmingwerk			=	=	=	=	-	=	=	=	+	-2,60	-6,5%

tabel 8: TOM beoordeling remmingwerkalternatieven

7.3 Per 'alternatievencombinatie'

Voor elk object zijn verschillende alternatieven gegenereerd. Als van elk object een alternatief geselecteerd wordt ontstaat een 'alternatievencombinatie'. Als alle mogelijke 'alternatievencombinaties' in een overzicht worden verwerkt zijn er in totaal 5760 verschillende combinaties mogelijk. Van elke combinatie worden de tussenscores van de gecombineerde alternatieven opgeteld tot een circulaire score. Voor de onderbouwingen van de tussenscore van de alternatieven per object wordt verwezen naar de bijlage 'BIJLAGE H – ONDERBOUWING BEOORDELING'. De 'alternatievencombinaties' worden in een TOM verwerkt en kunnen vervolgens geselecteerd worden op randvoorwaarden. In deze paragraaf worden TOM – A, TOM – B en TOM – C uitgewerkt, zoals nader toegelicht in paragraaf 5.3. 'Alternatievencombinaties'.

7.3.1 TOM – A

In tabel 9 is de selectie weergegeven van 'alternatievencombinaties' uit de TOM, waarbij gerangschikt is op basis van de hoogst circulaire score, daarbij is geen aanvullende selectie gemaakt op basis van de randvoorwaarden. In de laatste twee kolommen staan de circulaire score (CS) en het circulaire percentage (CP) weergegeven.

	Fundering	Landhoofd	Stootplaat	Oplegpijler	Remmingwerk	CS	CP
A1	FA4 11,00	LA5 13,35	SA1 2,20	OA5 13,35	RA1 4,60	44,50	22,0%
A2	FA3 10,00	LA5 13,35	SA1 2,20	OA5 13,35	RA1 4,60	43,50	21,5%
A3	FA2 8,80	LA5 13,35	SA1 2,20	OA5 13,35	RA1 4,60	42,30	20,9%
A4	FA4 11,00	LA5 13,35	SA0 0,00	OA5 13,35	RA1 4,60	42,30	20,9%
A5	FA4 11,00	LA5 13,35	SA3 -0,50	OA5 13,35	RA1 4,60	41,80	20,6%

tabel 9: TOM – A: Gerangschikt op hoogst circulaire score

Uit tabel 9 blijkt dat A1 de meest circulaire 'alternatievencombinatie' is met een circulaire score (CS) van 44,50 en een circulair percentage (CP) van 22,0%. Deze combinatie bestaat uit een fundering van stalen buispalen (FA4), een landhoofd van schanskorven (LA5), stootplaten van staal (SA1), een oplegpijler van schanskorven (OA5) en een remmingwerk van staal (RA1).

De combinatie A2 scoort een punt lager dan A1 doordat de fundering is opgebouwd uit een combiwand (FA3). De combinatie A3 scoort 1,20 punt lager dan A1, doordat de fundering is opgebouwd uit stalen box piles (FA2). De combinatie A4 en A5 scoren 2,20 punt lager dan A1, doordat de stootplaat van de combinatie A4 bestaat uit beton (SA0) en de stootplaat van de combinatie A5 bestaat uit hout (SA3).

In 'BIJLAGE I – TOM – A' zijn nog 42 aanvullende 'alternatievencombinaties' weergegeven.

7.3.2 TOM – B

Voor randvoorwaarde haalbaarheid zijn de alternatieven per object in een kleurcategorie verwerkt.

- Groen wil zeggen dat het alternatief haalbaar is;
- Oranje wil zeggen dat het alternatief haalbaar is met verdere ontwerpdetailering;
- Rood wil zeggen dat het alternatief constructief niet mogelijk is.

In tabel 10 staat weergegeven in welke kleurcategorie het alternatief valt.

Objecten	Groen	Oranje	Rood
Fundering	FA0, FA1, FA2, FA3, FA4, FA5 en FA6	n.v.t.	FA7
Landhoofd	LA0, LA2 en LA4	LA1 en LA3	LA5
Stootplaat	SA0, SA1, SA2 en SA4	SA3	n.v.t.
Oplegpijler	OA0 en OA2	OA3	OA1, OA4 en OA5
Remmingwerk	RA0, RA1 en RA3	RA2	n.v.t.

tabel 10: Kleurcategorie per object

In tabel 11 is de selectie weergegeven van ‘alternatievencombinaties’ uit de TOM op basis van randvoorwaarde haalbaarheid, waarbij er geselecteerd is op haalbaarheid en gerangschikt op de hoogste circulaire score (CS). In de laatste twee kolommen staan de circulaire score (CS) en het circulaire percentage (CP) weergegeven.

	Fundering	Landhoofd	Stootplaat	Oplegpijler	Remmingwerk	CS	CP
B1	FA4 11,00	LA1 8,00	SA1 2,20	OA2 5,80	RA1 4,60	31,60	15,6%
B2	FA4 11,00	LA1 8,00	SA1 2,20	OA3 5,60	RA1 4,60	31,40	15,5%
B3	FA4 11,00	LA4 7,30	SA1 2,20	OA2 5,80	RA1 4,60	30,90	15,2%
B4	FA4 11,00	LA4 7,30	SA1 2,20	OA3 5,60	RA1 4,60	30,70	15,1%
B5	FA3 10,00	LA1 8,00	SA1 2,20	OA2 5,80	RA1 4,60	30,60	15,1%

tabel 11: TOM – B: Randvoorwaarde haalbaarheid

Uit tabel 11 blijkt dat B1 de meest circulaire ‘alternatievencombinatie’ is op basis van de gestelde randvoorwaarden met een circulaire score (CS) van 31,60 en een circulair percentage (CP) van 15,6%. Deze combinatie bestaat uit een fundering van stalen buispalen (FA4), een landhoofd van megalegoblokken (LA1), stootplaten van staal (SA1), een oplegpijler van stalen HE-profielen (OA2) en een remmingwerk van staal (RA1).

De combinatie B2 scoort 0,20 punt lager dan B1 doordat de oplegpijler is opgebouwd uit oplegpijlerblokken (OA3). De combinatie B3 scoort 0,70 punt lager dan B1, doordat het landhoofd is opgebouwd uit gewapende grond (LA4). De combinatie B4 scoort 0,90 punt lager dan B1, doordat het landhoofd is opgebouwd uit gewapende grond (LA4) en de oplegpijler is opgebouwd uit oplegpijlerblokken (OA3). De combinatie B5 scoort één punt lager dan B1, doordat de fundering is opgebouwd uit een combiwand (FA3).

In ‘BIJLAGE J – TOM – B’ zijn nog 42 aanvullende ‘alternatievencombinaties’ weergegeven.

7.3.3 TOM – C

In tabel 12 is een selectie weergegeven van ‘alternatievencombinaties’ uit de TOM op basis van randvoorwaarden haalbaarheid en materiaalsoort, waarbij er geselecteerd is op haalbaarheid en gerangschikt op de hoogste circulaire score (CS). Bij de randvoorwaarde haalbaarheid wordt geselecteerd op de groene en oranje categorie. Bij de randvoorwaarde materiaalsoort wordt van elk materiaal de ‘alternatievencombinatie’ weergegeven welke uitsluitend uit één materiaal bestaat en de hoogste circulaire score heeft. De alternatievencombinatie C3 heeft geen kunststof alternatief voor het landhoofd en de oplegpijler, daarom is er van de referentiealternatieven uitgegaan. De ‘alternatievencombinatie’ C1 betreft staal, C2 betreft beton en C3 betreft kunststof. In de laatste twee kolommen staan de circulaire score (CS) en het circulaire percentage (CP) weergegeven.

	Fundering		Landhoofd		Stootplaat		Oplegpijler		Remmingwerk		CS	CP
C1	FA4	11,00	LA2	5,80	SA1	2,20	OA2	5,80	RA1	4,60	29,40	14,5%
C2	FA0	0,00	LA1	8,00	SA0	0,00	OA3	5,60	RA2	0,90	14,50	7,2%
C3	FA6	1,95	LA0	0,00	SA2	-3,00	OA0	0,00	RA3	-2,60	-3,65	-1,8%

tabel 12: TOM – C: Randvoorwaarde haalbaarheid en materiaalsoort

Uit tabel 12 blijkt dat combinatie C1 de meest circulaire score heeft op basis van gestelde randvoorwaarden met een circulaire score (CS) van 29,40 en een circulair percentage (CP) van 14,5%. Deze combinatie bestaat uit een fundering van stalen buispalen (FA4), een landhoofd van HE-profielen (LA1), stootplaten van staal (SA1), een oplegpijler van stalen HE-profielen (OA2) en een remmingwerk van staal (RA1). Daarna volgt combinatie C2 met een circulaire score van 14,50 en een circulaire percentage van 7,2% en combinatie C3 heeft de minst circulaire score van -3,65 en een circulaire percentage van -1,8%.

De negatieve circulaire score van -3,65 en het negatieve circulair percentage van -1,8% voor het materiaal kunststof geven aan dat kunststof een lagere circulaire waarde heeft dan het materiaal toegepast in het referentiealternatief.

De combinatie C2 scoort lager dan C1, omdat staal in tegenstelling tot beton honderd procent te recylen is. De combinatie C3 scoort lager ten opzichte van C1, omdat staal in tegenstelling tot kunststof te recylen is zonder dat de materiaaleigenschappen veranderen.

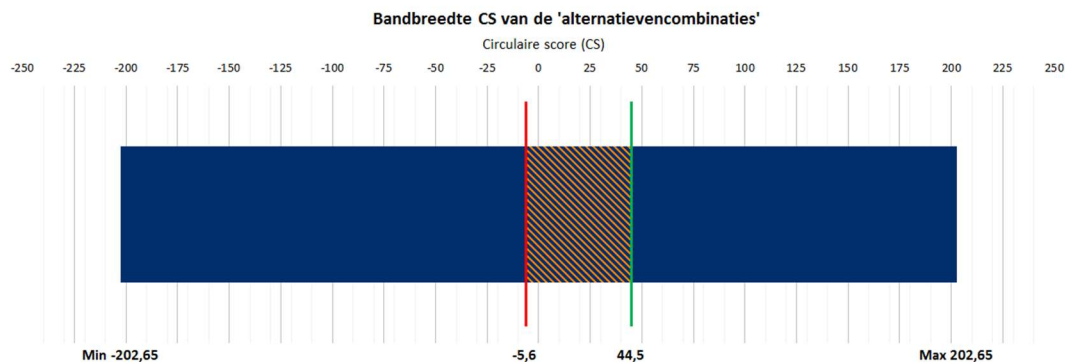
7.3.4 Specifieke randvoorwaarden

In bijlage ‘BIJLAGE K – SPECIFIEKE RANDVOORWAARDEN’ zijn verschillende opdrachtgever specifieke randvoorwaarden geïnterpreteerd en verwerkt middels de TOM.

7.4 Resumé

In dit hoofdstuk is antwoord gegeven op de vraag: “Welke alternatieven kunnen per object worden gegenereerd op basis van de minimale functionele topeisen?” en: “Hoe scoren de gegenereerde alternatieven t.o.v. de eerder vastgestelde criteria?” Uit het antwoord op de eerste vraag blijkt dat het voor het genereren van alternatieven noodzakelijk is dat er oplossingsvrij ontworpen kan worden.

In figuur 9 is weergegeven wat het bereik is van de meetmethodiek. In het gearceerde vlak is de bandbreedte van de circulaire score van de ‘alternatievencombinaties’ weergegeven



figuur 9: Bandbreedte CS van de 'alternatievencombinaties'

Uit figuur 9 blijkt hoe de 'alternatievencombinaties', en daarmee de alternatieven, scoren ten opzichte van de eerder vastgestelde criteria. De rode en de groene lijn geven respectievelijk de minimale circulaire score en de maximale circulaire score aan.

In paragraaf 7.3.3 TOM – C zijn de 'alternatievencombinaties' geselecteerd welke uitsluitend uit één materiaal bestaan. In tabel 13 staat het circulaire percentage (CP) weergegeven van deze 'alternatievencombinaties'.

Materiaalsoort	CP
Staal	14,5%
Beton	7,2%
Kunststof	-1,8%

tabel 13: CP per materiaalsoort

Uit tabel 13 blijkt dat op dit moment staal het meest circulaire materiaal is met een circulair percentage van 14,5%. Na staal is beton het meest circulaire materiaal met een circulair percentage van 7,2%. Ten slotte blijkt dat het materiaal kunststof de laagste circulaire score heeft met een circulair percentage van -1,8%.

8

8 WAT IS HET RESULTAAT?

CONCLUSIES

“I love it when a plan comes together”

- John “Hannibal” Smith (The A-team)

8.1 Conclusie

In dit onderzoek is antwoord gegeven op de vraag: *“Hoe kan het principe van circulair bouwen worden toegepast in het ontwerp van de onderbouw van het project ‘Bruggen Krommenie’?”*

Het principe van circulair bouwen kan in het ontwerp van de onderbouw van het project ‘Bruggen Krommenie’ worden toegepast door de in hoofdstuk 5 beschreven meetmethodiek en het daaruit volgende voorkeursalternatief bestaande uit een fundering van stalen buispalen (FA4), een landhoofd van mega-legoblokken (LA1), stootplaten van staal (SA1), een oplegpijler van stalen HE-profielen (OA2) en een remmingwerk van staal (RA1) toe te passen. Uit het onderzoek is gebleken dat dit voorkeursalternatief een circulair percentage heeft van 15,6%.

8.2 Discussie

Dit onderzoek is een begin voor het ontwikkelen van een meetmethodiek om de mate van circulair bouwen te meten. Door de meetmethodiek toe te passen op het project ‘Bruggen Krommenie’ is bewezen dat de mate van het toepassen van het principe van circulair bouwen hiermee te meten is. Tijdens het onderzoek bleek dat aanvullend onderzoek noodzakelijk is om tot een sluitende methode te komen.

8.2.1 Discussie bij resultaten

Bij de resultaten dient te worden opgemerkt dat het voorkeursalternatief, zoals beschreven in de conclusie, nog niet als ‘alternatievencombinatie’ is toegepast in de praktijk. Dit voorkeursalternatief is in dit onderzoek niet constructief onderbouwd middels berekeningen, maar door de randvoorwaarde haalbaarheid wel toepasbaar, eventueel met nadere ontwerpdetailering, op het project ‘Bruggen Krommenie’. Tijdens deze ontwerpdetailering moet worden gekeken naar de wet- en regelgeving, het zijnde normen en rekenregels om dit voorkeursalternatief te laten voldoen.

Het voorkeursalternatief bestaat uit alternatieven, maar het is niet ondenkbaar dat er voor elk object meer alternatieven bedacht hadden kunnen worden. Na onderzoek is gebleken dat mogelijkheden zijn voor het recyclen van beton, maar dit bevindt zich nog in lab fase. Het is mogelijk dat deze vorm van recyclen in de toekomst zal gaan toenemen. Naar aanleiding van nieuwsberichten bestaat ook de mogelijkheid dat op grotere schaal geothermische warmte zal worden toegepast. Voor de fundering van (civiele) bouwwerken wordt dit nog weinig toegepast en is verdere constructieve onderbouwing noodzakelijk. Beide ontwikkelingen kunnen een rol spelen in het vergroten van het aantal alternatieven per object. Dit onderzoek heeft zich echter beperkt tot een begrenst aantal alternatieven om de scope van dit onderzoek te verkleinen.

Een opdrachtgever kan het resultaat beïnvloeden door randvoorwaarden te stellen, zoals is gebleken uit de bijlage ‘BIJLAGE K – SPECIFIEKE RANDVOORWAARDEN’.

8.2.2 Discussie bij meetmethodiek

Het bereik van de meetmethodiek wordt bepaald door de wegingsfactoren, omdat de maximale circulaire score wordt bepaald door de vermenigvuldiging van deze wegingsfactoren met de maximale beoordeling op de criteria. In dit onderzoek is de maximale circulaire score 202,65. De circulaire score, en daarmee het circulaire percentage, geeft aan in welke mate het principe van circulair bouwen is toegepast voor de ‘alternatievencombinatie’. Het circulaire percentage maakt het mogelijk om projecten met andere wegingsfactoren voor de criteria de mate van de toepassing van het principe van circulair bouwen te vergelijken.

Om het bereik en de bandbreedte van het circulaire percentage nauwkeuriger te onderbouwen kan op basis van een uitgebreide Monte Carlo simulatie en/of gevoeligheidsanalyse naar de wegingsfactoren worden gekeken. Daarbij worden de onderlinge verhoudingen tussen de wegingsfactoren en de grootte van de wegingsfactor per criterium beschouwd. Het is namelijk niet ondenkbaar dat de wegingsfactoren per project of per opdrachtgever kunnen verschillen. In dit kader kan een opdrachtgever bijvoorbeeld stellen binnen welke bandbreedte het circulaire percentage moet vallen.

Het is bijvoorbeeld interessant, maar door tijdsgebrek niet uitgevoerd, om te bepalen wat het gemiddelde circulaire percentage is van een bepaalde materiaalsoort. Aanvullend kan middels een Monte Carlo simulatie en/of gevoeligheidsanalyse worden bepaald in welke mate dit gemiddelde gevoelig is voor het variëren van de wegingsfactoren van de criteria.

Verder is uit dit onderzoek gebleken dat de GER-waardes bij criteria R3 (verminderen) een grote rol vervullen in het bepalen van de circulaire score van een 'alternatievencombinatie'. De criteria R3 heeft na R1 (weigeren) en R2 (heroverwegen) de zwaarste weging en is daardoor bepalend voor de tussenscore uit de meetmethodiek. De informatie over deze GER-waardes is afkomstig van de Rijksoverheid, aangenomen mag dus worden dat de informatie objectief en betrouwbaar is. Desalniettemin is het van belang dat deze GER-waardes verder worden onderbouwd.

Ook zijn de beoordelingen op de criteria R5 (repareren) en R6 (renoveren) in dit onderzoek niet meegenomen in de tussenscore, omdat een onderbouwing op basis van wetenschappelijke bronnen niet beschikbaar is. Als deze criteria verder worden onderbouwd worden de tussenscores van de alternatieven betrouwbaarder.

9

9 WAT MOETEN WE DOEN?

AANBEVELINGEN

“Als een plan niet op een A4'tje past, klopt het niet. Je moet het snel kunnen snappen.”

- Dik Wessels

“Dream big, start small, but most of all, start.”

- Simon Sinek

Op basis van dit onderzoek worden algemene, project specifieke en voor de meetmethodiek aanbevelingen gedaan.

9.1 Algemeen

De algemene aanbevelingen die uit het onderzoek zijn voortgevloeid, luiden:

- Maak organisaties, betrokken bij de bouw van (civiele) projecten, bewust van de noodzaak van de transitie naar de circulaire economie.
- Pas daarom binnen de bouwsector circulaire principes toe, omdat de bouwsector een positieve bijdrage kan leveren aan de transitie naar een circulaire economie.
- Hanteer binnen organisaties, betrokken bij de bouw van (civiele) projecten, dezelfde definities voor circulaire begrippen, zodat miscommunicatie wordt voorkomen.
- Ga terug naar de minimale functionele toepisen van een project, omdat het voor circulair bouwen van belang is dat oplossingsvrij ontworpen kan worden.
- Aanbeveling tot het teruggaan naar de minimale functionele toepisen,
- Doe onderzoek naar:
 - Het verbeteren van de recycle mogelijkheden van beton, omdat als beton beter te recyclen wordt naar de oorspronkelijke grondstoffen dan wordt het een materiaal met een hoger circulair gehalte.
 - De mogelijkheden voor het toepassen van geothermische warmte in funderingen, omdat geothermische warmte net als wind- en zonne-energie een alternatief is voor het gebruik van fossiele brandstoffen als energiebron.

9.2 'Bruggen Krommenie'

De aanbevelingen specifiek voor het project 'Bruggen Krommenie' die uit het onderzoek zijn voortgevloeid, luiden:

- Pas het voorkeursalternatief toe als ontwerp voor de onderbouw van het project 'Bruggen Krommenie'.
 - Doe onderzoek naar het toepassen van:
 - Mega legoblokken als landhoofd;
 - HE-profielen als oplegpijler;
 - Stalen stootplaten als stootplaat;
 - De interfaces van de alternatieven.
- Pas de in het onderzoek beschreven meetmethode toe tijdens het meten van in welke mate circulariteit wordt toegepast voor het ontwerp van de bovenbouw van het project 'Bruggen Krommenie'.

9.3 Meetmethodiek

De aanbevelingen voor de meetmethodiek die uit het onderzoek zijn voortgevloeid, luiden:

- Pas de in het onderzoek beschreven meetmethode toe tijdens het meten van in welke mate circulariteit wordt toegepast in een ontwerp, omdat deze meetmethode circulariteit op een verifieerbare wijze meetbaar maakt en binnen elk project toepasbaar is.
- Beschouw uitsluitend objecten in een alternatievencombinatie die een raakvlak hebben, omdat dit het aantal alternatievencombinaties beperkt.
- Doe onderzoek naar de reparatie- en renovatiemogelijkheden van materialen, zodat beoordelingen op deze criteria kunnen worden meegewogen in de TOM.
- Doe onderzoek naar de wegingsfactoren middels een Monte Carlo simulatie en gevoeligheidsanalyse voor een nauwkeurigere onderbouwing, zodat dit leidt tot een breder draagvlak voor de meetmethodiek bij opdrachtgever en opdrachtnemer.

BIBLIOGRAFIE

Indien bij een tabel, figuur of definitie geen bron vermeld is, is er sprake van eigen werk van J.J. Brehen en M.J.G. Rasing, Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.

Ahlefeldt, F. (sd). *Building bridges*. Kopenhagen, Denenmarken.

ArcelorMittal. (2017, p. 8, p. 35, p. 46). *General Catalogue*. z.p.: Auteur.

Backhausen, U., Cornejo Córdova, C., Dieteren, H., Feenstra, T., Van Heerden, F., Niemeijer, J., . . . Zwanenburg, C. (2014, p. 193). *Geotechniek*. z.p.: Werkgroep Waterbouw KIVI afdeling Hoger Onderwijs Techniek.

Backhausen, U., Cornejo Córdova, C., Dieteren, H., Feenstra, T., Van Heerden, F., Niemeijer, J., . . . Zwanenburg, C. (2014, p. 195). *Geotechniek*. z.p.: Werkgroep Waterbouw KIVI afdeling Hoger Onderwijs Techniek.

Backhausen, U., Cornejo Córdova, C., Dieteren, H., Feenstra, T., Van Heerden, F., Niemeijer, J., . . . Zwanenburg, C. (2014, p. 245). *Geotechniek*. z.p.: Werkgroep Waterbouw KIVI afdeling Hoger Onderwijs Techniek.

Bodem+. (z.d.). *Grondwapening* [Bodemrichtlijn]. Opgeroepen op 13 april 2018, van <https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bouwstoffen-en-afvalstoffen/grondwapening/bouwstoffen-en-afvalstoffen/grondwapening>

Bodem+. (z.d.). *Zandpalen – zanddrains* [Bodemrichtlijn]. Opgeroepen op 25 april 2018 van <https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bouwstoffen-en-afvalstoffen/zandpalen-zanddrains>

Braungart, M. (2002). *Cradle to Cradle*. z.p.: Farrar, Straus and Giroux.

Brinck, T. t. (2016, januari 23). *Tata Steel: "Staal behoudt kwaliteit bij elke recycleslag"*. Opgeroepen op april 4, 2018, van <https://www.duurzaambedrijfsleven.nl/circulaire-economie/12087/tata-steel-staal-behoudt-kwaliteit-bij-elke-recycleslag>

Cement&Betoncentrum. (2017, maart). *Cement uit beton peuteren?* Opgeroepen op april 5, 2018, van <http://www.cementenbeton.nl/c-bc/position-papers/betonrecycling>

Centraal Bureau voor de Statistiek – CBS. (2017, 17 december). *Elektriciteit en warmte; productie en inzet naar energiedrager* [Statline]. Opgeroepen op 3 maart 2018, van <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/80030ned.table?ts=1520510836755>

China Steel Group. (z.d.). *Box Piles*. Opgehaald van <http://www.chinasteel-group.com/box-piles.html>

Cramer, p. d. (2014). *Elementaire Deeltjes 16 - Milieu*. Amsterdam: Amsterdam University Press.

De Bouwcampus. (2017, p. 1). *IFD, bouwen a la Lego - Legoliseren*. Delft: De Bouwcampus.

De Groene paal. (z.d.). *De Groene Paal: Maak van uw fundering uw energiebron*. z.p.: Auteur.

De Jager, J. (1989). *Schanskorven*. z.p.: Koninklijke Wegebouw Stevin bv.

De Jager, J. (1989, p. 4). *Schanskorven*. z.p.: Koninklijke Wegebouw Stevin bv.

De Jager, J. (1989, p. 34-35). *Schanskorven*. z.p.: Koninklijke Wegebouw Stevin bv.

De Jager, J. (1989, p. 35-37). *Schanskorven*. z.p.: Koninklijke Wegebouw Stevin bv.

De Ridder, H. (2011). *LEGOLisering van de bouw*. Amsterdam: Uitgeverij Mauritsgroen.

- De Vree, J. (z.d.). *Drainage*. Opgeroepen op april 20, 2018, van <http://www.joostdevree.nl/shtmls/drainage.shtml>
- De Vree, J. (z.d.). *Damwanden en bouwkuipen*. Opgehaald van <http://www.joostdevree.nl/shtmls/damwanden.shtml>
- Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat. (z.d.). *Zandophoging op geokunststof omhulde zandpalen (GEC)*. z.p.: Auteur.
- Doodeman, M. (2017, december 7). *Hennes de Ridder: 'De bouw is nog steeds een verschrikking'*. Opgeroepen op februari 26, 2018, van [cobouw.nl](https://www.cobouw.nl/bouwbreed/nieuws/2017/12/hennes-de-ridder-de-bouw-nog-steeds-een-verschrikking-101255854): <https://www.cobouw.nl/bouwbreed/nieuws/2017/12/hennes-de-ridder-de-bouw-nog-steeds-een-verschrikking-101255854>
- EFKO betonindustrie. (2017). *Stootplaten*. Opgehaald van <https://efkobeton.nl/infra/stootplaten/>
- Ensie. (z.d.). *Informatie over secundaire grondstoffen*. Opgeroepen op februari 9, 2018, van <https://www.ensie.nl/duurzaam/secundaire-grondstoffen>
- Fink et al, J. (2011). *The Bridge spring 2011*. Washington, DC: National academy of engineering.
- Forbo Flooring B.V. (z.d.). *Informatie over vloeren Forbo*. Opgeroepen op februari 9, 2018, van <https://www.forbo.com/flooring/nl-nl/>
- Forest Stewardship Council (FSC). (z.d.). *Levenscyclusanalyse van enkele tropische houtsoorten ten behoeven van damwanden*. Opgeroepen op april 25, 2018, van <http://www.fsc.nl/nl-nl/fsc-per-sector/opdrachtgevers/materiaalstudie/materiaalstudie-samenvatting>
- Frank, A., Pinter, G., & Lang, R. (2009, p. 8). Prediction of the remaining lifetime of polyethylene pipes after up to 30 years in use. *Elsevier*, 8.
- Geelen, C., Krosse, L., Sterrenburg, P., Bakker, E., & Sijpheer, N. (2003). *Handboek Energiepalen*. Apeldoorn: Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek.
- Giverbo. (z.d.). *Stootplaten*. Opgehaald van <https://www.giverbo.nl/product-sort/4344/stootplaten>
- Google. (z.d.). *N203 bij Krommenie*. Opgehaald van maps.google.com
- Hage, A. (1999). Theorie over de vorming van roest bewezen. *Archimedes*, z.p.
- Hartman, A. (2014, oktober 20). *Economische transitie: van lineair naar circulair*. Opgeroepen op februari 19, 2018, van <http://www.passievoorsystemen.nl/2014/10/economische-transitie-van-lineair-naar-circulair/>
- Het Groene Brein. (z.d.). *Definitie circulaire economie*. Opgeroepen op februari 19, 2018, van <https://kenniskaarten.hetgroenebrein.nl/kenniskaart-circulaire-economie/definitie-circulaire-economie/>
- Infosteel. (z.d.). *Perscentrum, Luxemburg-Kirchberg*. Opgehaald van <http://www.infosteel.be/tools/83-nederlands/projecten/elementen-in-staal/307-perscentrum-luxemburg-kirchberg.html>
- Infrawiki. (2018). *Begrippen*. Opgeroepen op mei 4, 2018, van <http://www.infrawiki.nl/index.php/begrippenlijst/1352-hometekst>

- Kennisconsult. (z.d.). *Begrippen*. Opgeroepen op mei 4, 2018, van <http://www.kennisconsult.nl/begrippen/1405/>
- KNMI. (z.d.). *Warmte uit de diepten van de aarde*. Opgeroepen op april 24, 2018, van <https://www.knmi.nl/producten-en-diensten/verhalen/warmte-uit-de-diepten-van-de-aarde>
- Kok Watersport. (z.d.). *Anode: Zink of aluminium?* Opgeroepen op april 19, 2018, van <https://www.kokwatersport.nl/blog/anode-zink-of-aluminium>
- Kolstein, M., & De Jong, P. (z.d.). *De vermoeidheid van stalen bruggen*. Opgeroepen op april 26, 2018, van <https://www.spoorpro.nl/spoorbouw/2017/08/17/logistieke-monsterklus-aan-moerdijkbrug-ten-einde/>
- Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. (z.d.). *Warmte uit de diepten van de aarde*. Opgeroepen op april 24, 2018, van <https://www.knmi.nl/producten-en-diensten/verhalen/warmte-uit-de-diepten-van-de-aarde>
- Legioblock. (z.d.). *Legioblock*. Opgeroepen op april 4, 2018, van <https://www.legioblock.com/>
- Leusen, B. v. (2011). *Duikers en sluizen*. Groningen: Noordhoff Uitgevers.
- Lievense CSO. (z.d.). *Vernieuwbouw zeekade Grote Hout in Velsen*. Opgehaald van <http://www.lievensecso.com/nl/Projecten/Vernieuwbouw-zeekade-Grote-Hout-in-Velsen>
- Michel Oprey & Beisterveld. (z.d.). *Schanskorf Como Basic maas 3,5 mm*. Opgehaald van <https://mob.nl/outdoor/tuin/schanskorf-como-basic-maas-%C3%B8-3,5-mm.html>
- Milieu centraal. (z.d.). *Aardwarmte en bodemwarmte*. Opgeroepen op april 24, 2018, van <https://www.milieucentraal.nl/klimaat-en-aarde/energiebronnen/aardwarmte-en-bodemwarmte/>
- Ministerie van infrastructuur en Milieu. (2018). *Nederland circulair in 2050 - Rijksbreed programma circulaire economie*. Den Haag: Rijksoverheid.
- MVO Nederland. (2018, februari 19). *Wat is de circulaire economie*. Opgehaald van <https://mvonederland.nl/dossier/wat-de-circulaire-economie-0>
- MVO Nederland. (z.d.). *Informatie over circulaire economie*. Opgeroepen op februari 9, 2018, van <https://mvonederland.nl/dossier/wat-de-circulaire-economie-0>
- MVO Nederland. (z.d.-a). *Begrippenlijst*. Opgeroepen op februari 19, 2018, van <https://mvonederland.nl/wat-mvo/begrippenlijst>
- PBL. (2016, juni 22). *van een lineaire naar een circulaire economie*. Opgeroepen op februari 19, 2018, van <http://www.pbl.nl/infographic/van-een-lineaire-naar-een-circulaire-economie>
- PBL. (2018). *Circulaire economie: wat we willen weten en kunnen meten*. Den Haag: Planbureau voor de leefomgeving.
- Planbureau voor de Leefomgeving - PBL. (2016, juni 22). *Van een lineaire naar een circulaire economie*. Opgeroepen op februari 19, 2018, van <http://www.pbl.nl/infographic/van-een-lineaire-naar-een-circulaire-economie>
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2018, februari). GER-waarden en CO2 lijst. z.p.: Auteur.

- Rijksoverheid. (2009, oktober 22). *Internationale inzet om vervuiling door kunstmest te beperken*. Opgeroepen op april 16, 2018, van <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2009/10/22/internationale-inzet-om-vervuiling-door-kunstmest-te-beperken>
- Rijksoverheid. (2016). *Nederland circulair in 2050*. Den Haag: Rijksoverheid.
- Rijksoverheid. (z.d.-a). *Informatie over circulaire economie*. Opgeroepen op februari 9, 2018-a, van <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/circulaire-economie/alle-grondstoffen-hergebruiken>
- Rijksoverheid. (z.d.-b). *Het transitieteam Circulaire BouwEconomie aan het woord*. Opgeroepen op maart 9, 2018, van <https://www.circulareeconomienederland.nl/nieuws/920665.aspx>
- Rijkswaterstaat. (2017, p. 60). *Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken - Bijlagendocument deel B*. z.p.: RWS GPO.
- Rood, T., & Hanemaaijer, A. (2017). *Waarom een circulaire economie?* Opgeroepen op april 25, 2018, van PBL: <http://themasites.pbl.nl/circulaire-economie/>
- SBRCURnet. (2012). 5.2.2 Corrosie van staal. C166. Opgeroepen op maart 27, 2018
- Schouten, S. (2017). *De Circulaire Economie: waarom productie, consumptie en groei fundamenteel anders moeten*. Amsterdam: Leesmagazijn.
- Schouten, S. (2017, p. 29). *De Circulaire Economie: waarom productie, consumptie en groei fundamenteel anders moeten*. Amsterdam: Leesmagazijn.
- Smienk, E. (2016). Duurzaamheidsaspecten bij funderingen en ondergronds bouwen State-of-the-art. *GEOTECHNIEK*, 10-20.
- Steenkorven. (z.d.). *Grondkering-H.Ido-Ambacht*. Opgehaald van <https://www.steenkorven.nl/wp-content/uploads/2014/03/grondkering-H.Ido-Ambacht-4.jpg>
- Stichting Bouwkwiteit. (2014, p. 24-25). *Bepalingsmethode Milieuprestatie Gebouwen en GWW-werken*. Rijswijk: Auteur.
- Stuyt, L. B. (1972). *Urgentienota milieuhygiëne*. Den Haag: Staatsuitgeverij.
- Tauw. (2018, maart 27). *Houtonpalen Volgermeer Amsterdam*. Opgehaald van <https://www.tauw.nl/projecten/houtonpalen-volgermeer-amsterdam.html?sqr=houton&>
- The CLUB of ROME. (2018). *About us*. Opgeroepen op mei 4, 2018, van <https://www.clubofrome.org/about-us/>
- Universiteit van Amsterdam. (z.d.). *Achtergrondinformatie broeikaseffect & fossielebrandstoffen*. Opgeroepen op mei 4, 2018, van http://www.org.uva.nl/e-klassenpreview/november/BIO-ALG/achtergrondinformatie_broeikaseffect__fossielebrandstoffen.html
- Vaartips. (z.d.). *Hé, dat wist ik niet...* Opgeroepen op april 12, 2018, van <http://www.vaartips.nl/tipr.htm>
- Van Dale. (2018). *Groot woordenboek der Nederlandse Taal*. Opgeroepen op 3 mei 2018 van <https://www.vandale.nl/>

- Van der Heide. (z.d.). *Bescherming op damwanden*. Opgeroepen op maart 27, 2018, van <http://www.vanderheide.nl/kathodischebescherming/bescherming-op-damwanden>
- Van Roekel, A. (2013, juni 25). *Kan aardwarmte opraken?* Opgeroepen op april 24, 2018, van <https://www.nemokennislink.nl/publicaties/kan-aardwarmte-opraken--2/>
- Van Velden, F. (2011, november 8). *Hout als toeslagstof in betonnenpaal*. Opgehaald van http://weekblad.cobouw.nl/digitaleeditie/2011/10/20111108___/1_10/article6.html
- Voets. (z.d.). *Hoog gefundeerde landhoofden*. Opgehaald van <http://www.voetsgewapendeground.nl/opbouwsystemen/hoog-gefundeerde-landhoofden/>
- Volker Staal Funderingen (VSF). (2009, april 13). *Damwandkuip Westerschelde tbv borin 42' gasleiding*. Opgehaald van <https://www.vsf.nl/nl/nieuws/detail/damwandkuip-westerschelde-tbv-boring-42-gasleiding>
- VolkerWessels. (2018, 6 februari). *Standaardisatie Viaduct* [Kennisbank VHB]. Opgeroepen op 3 mei 2018 van Standaardisatie Viaduct (intranet)
- VolkerWessels. (2018, 23 maart). *Circulaire infrastructuur* [Kennisbank VHB]. Opgeroepen op 3 mei 2018 van Circulaire infrastructuur (intranet)
- VolkerWessels. (2018, 11 april). *Kennispagina Duurzaamheid* [Kennisbank VHB]. Opgeroepen op 3 mei 2018 van Kennispagina Duurzaamheid (intranet)
- VolkerWessels. (z.d.). *Informatie over VolkerWessels*. Opgeroepen op februari 9, 2018, van <https://www.volkerwessels.com/>
- VSF. (z.d.). *Horizontale Bodeminjectie*. Opgehaald van <https://www.vsf.nl/nl/funderingen/grondverbetering/horizontale-bodeminjectie>
- VSF. (z.d.). *Stalen buispalen*. Opgehaald van <https://www.vsf.nl/nl/funderingen/palen/stalen-buispalen>
- VSF. (z.d.). *Stalen Damwand*. Opgehaald van <https://www.vsf.nl/nl/funderingen/wanden/stalen-damwand>
- Webster, K. (2016). *The Circular Economy: A Wealth of Flows: 2nd Edition*. Cowes: Ellen MacArthur Foundation Publishing.
- Webster, K. (2016, p. 42). *The Circular Economy: A Wealth of Flows: 2nd edition*. Cowes: Ellen MacArthur Foundation.
- Wit-Blok, I. M. (2007, p. 8-11). Kathodische bescherming dé oplossing? *Maintance Management*.
- Worrel, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. (2001). *Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry*. Palo Alto, VS: Annual Reviews.
- Zambrano, L., Horta, R., Bauer, H., Schmidheiny, T., Pesenti, G., Collomb, B., . . . De Moraes, F. (2002). *The Cement Sustainability initiative*. Genève, Zwitserland: World Business Council for Sustainable Development.

Figuren- en tabellenlijst

Figuurnummer	Omschrijving	Bron
figuur 1	Bovenaanzicht omgeving projectlocatie	Google. (z.d.).
figuur 2	Bovenaanzicht projectlocatie	Google. (z.d.).
figuur 3	Voorbeeld gesloten cirkel	-
figuur 4	9R-methode van 'Refuse' tot 'Recover'	-
figuur 5	Circulaire economie als begrip door de jaren heen	-
figuur 6	Visualisatie 'standaard' viaduct	-
figuur 7	Visualisatie 'standaard' remmingwerk	-
figuur 8	Overzicht systeem 'Bruggen Krommenie'	-
figuur 9	Bandbreedte CS van de 'alternatievencombinaties'	-

Tabelnummer	Omschrijving	Bron
tabel 1	9R-methode t.o.v. 8R-methode inclusief wegingsfactor	-
tabel 2	GER-waarden	(Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2018)
tabel 3	Objectomschrijving met visualisatie	-
tabel 4	TOM beoordeling funderingsalternatieven	-
tabel 5	TOM beoordeling landhoofdalternatieven	-
tabel 5	TOM beoordeling stootplaatalternatieven	-
tabel 7	TOM beoordeling oplegpijleralternatieven	-
tabel 8	TOM beoordeling remmingwerkalternatieven	-
tabel 9	TOM – A: Gerangschikt op hoogst circulaire score	-
tabel 10	Kleurcategorie per object	-
tabel 11	TOM – B: Randvoorwaarde haalbaarheid	-
tabel 12	TOM – C: Randvoorwaarde haalbaarheid en materiaalsoort	-
tabel 13	CP per materiaalsoort	-

Figurenlijst bij 'BIJLAGE D – REFERENTIEALTERNATIEVEN'

Figuurnummer	Omschrijving	Bron
figuur 1	Visualisatie 'standaard' viaduct	-
figuur 2	Fundering oplegpijler	-
figuur 3	Fundering landhoofd	-
figuur 4	Landhoofd	-
figuur 5	Stootplaat	-
figuur 6	Oplegpijler	-
figuur 7	Remmingwerk	-

Figurenlijst bij 'BIJLAGE E – ALTERNATIEVEN'

Figuurnummer	Omschrijving	Bron
figuur 1	Bouwkuip (1)	(Volker Staal Funderingen (VSF), 2009)
figuur 2	Bouwkuip (2)	(VSF, z.d.)
figuur 3	Stalen damwandplanken	(VSF, z.d.)
figuur 4	Kunststof damwanden	(De Vree, z.d.)
figuur 5	Stalen boxpile	(China Steel Group, z.d.)
figuur 6	Stalen combiwand	(Lieveense CSO, z.d.)
figuur 7	Stalen buispalen	(VSF, z.d.)
figuur 8	Houton paal	(Tauw, 2018)
figuur 9	Principe van geotextiel omhulde zandpalen met ophoging	(Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, z.d.)
figuur 10	Mega-legoblokken	(Legioblock, z.d.)
figuur 11	Aanrijdbeveiliging	(Legioblock, z.d.)
figuur 12	Keerwand	(Legioblock, z.d.)
figuur 13	Opslaghal	(Legioblock, z.d.)
figuur 14	Stalen HE-profielen	(Infosteel, z.d.)
figuur 15	Boutverbindingen	(Infosteel, z.d.)
figuur 16	Landhoofdblokken	-
figuur 17	Gewapende grondconstructie	(Voets, z.d.)
figuur 18	Schanskorf	(Michel Oprey & Beisterveld, z.d.)
figuur 19	Gevulde schanskorven	(Steenkorven, z.d.)
figuur 20	Stootplaat (1)	(Giverbo, z.d.)
figuur 21	Stootplaat (2)	(EFKO betonindustrie, 2017)
figuur 22	Remmingwerk voor spoorbrug	-
figuur 23	Remmingwerk	(Vaartips, z.d.)

Figurenlijst bij BIJLAGE F – GEOTHERMISCHE ENERGIE

Figuurnummer	Omschrijving	Bron
figuur 1	Proces bodemwarmte	(Geelen, Krosse, Sterrenburg, Bakker, & Sijpbeer, 2003)
figuur 2	Principe energiepaal	(De Groene paal, z.d.)

Figurenlijst bij BIJLAGE G – KATHODISCHE BESCHERMING

Figuurnummer	Omschrijving	Bron
figuur 1	Opofferingsanode	(Kok Watersport, z.d.)
figuur 2	Kathodische bescherming met opdrukspanning	(Wit-Blok, 2007, p. 8-11)

Tabelenlijst bij BIJLAGE H – ONDERBOUWING BEOORDELING

Tabelnummer	Omschrijving	Bron
tabel 1	TOM – Fundering	-
tabel 2	TOM – Landhoofd	-
tabel 3	TOM – Stootplaat	-
tabel 4	TOM – Oplegpijler	-
tabel 5	TOM – Remmingwerk	-

Tabellenlijst bij BIJLAGE K – SPECIFIEKE RANDVOORWAARDEN

Tabelnummer	Omschrijving	Bron
tabel 1	TOM – D: Beoordeling op haalbaarheid en materiaalsoort	-
tabel 2	TOM – E: Beoordeling op haalbaarheid en esthetica	-
tabel 3	TOM – F: Beoordeling op haalbaarheid en legolisering	-
tabel 4	TOM – G: Beoordeling op haalbaarheid en functies	-

BIJLAGEN

BIJLAGE A – VERKLARENDE WOORDENLIJST

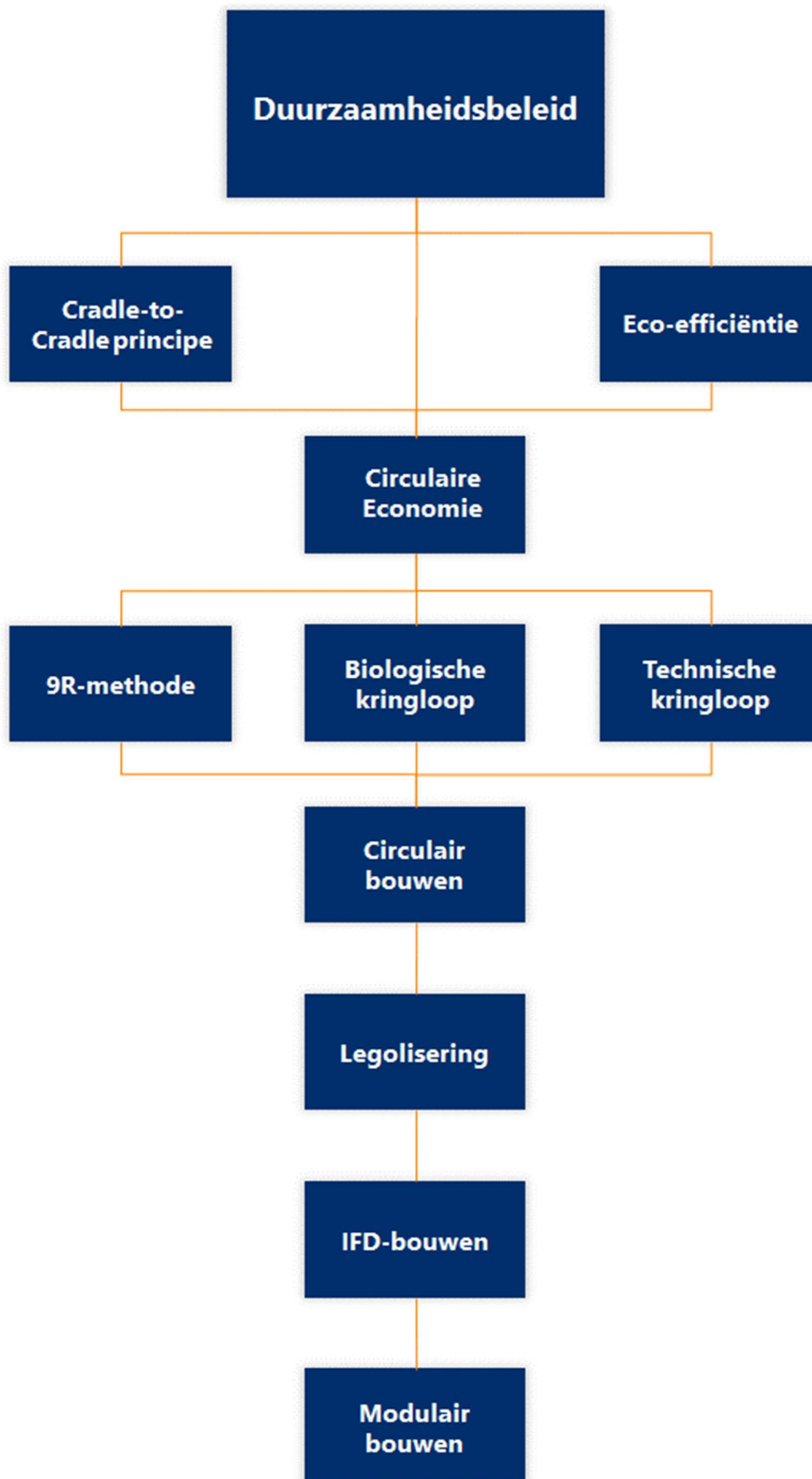
Definitie	Omschrijving
9R-methode	Methode om circulariteit te “meten”. Gebaseerd op de Ladder van Lansink (Cramer, 2014).
Abiotisch	Zonder leven (Van Dale, z.d.)
Algemeen belang	Iets dat alle personen raakt, doordat hun voordeel, hun voorspoed ermee gemoeid is (Van Dale, z.d.).
Biologische kringloop	Kringloop waarbij producten uit de natuur kunnen terugvloeien in de natuur zonder verder negatieve invloed te hebben op deze kringloop.
C1: Ecologische waarde	In welke mate het object ecologische waarde toevoegt. Alle ecologische eigenschappen van een alternatief worden hier beschouwd, zowel negatief als positief. Bijvoorbeeld het compleet maken van een ecologische cirkel (Webster, 2016).
C2: Sociale waarde	In welke mate het object sociale waarde toevoegt. Alle sociale eigenschappen van een alternatief worden hier beschouwd, zowel negatief als positief. Bijvoorbeeld het creëren van werkgelegenheid, veiligheid en een netwerk (Webster, 2016).
C3: Economische waarde	In welke mate het object economische waarde toevoegt. Alle economische eigenschappen van een alternatief worden hier beschouwd, zowel negatief als positief. Bijvoorbeeld het opwekken en verkopen van (duurzame) elektriciteit (Webster, 2016).
Circulair bouwen	Is het toepassen van het principe van de circulaire economie in de praktijk. Dit gebeurt door het gebruiken van secundaire grondstoffen, herwinbare energie en het bouwen zonder afval te produceren. De gebouwde producten kunnen hergebruikt worden via de biologische of technologische kringloop aan het einde van hun levensduur. Daardoor zijn de producten oneindig herbruikbaar en de waarde wordt behouden over de tijd. Het circulair bouwen en/of circulair ontwerpen levert altijd een positieve bijdrage aan biodiversiteit en aan de maatschappij (Webster, 2016).
Circulaire economie	Economie waarin producten en grondstoffen worden hergebruikt binnen de twee kringlopen, zodat geen nieuwe uitputbare grondstoffen benodigd zijn. Door het sluiten van de kringlopen kan economische, ecologische en sociale waarde worden toegevoegd aan de maatschappij.

Club van Rome	De club van Rome is een organisatie van individuen die een gemeenschappelijke zorg delen voor de toekomst van de mensheid en ernaar streven om een verschil te maken (The CLUB of ROME, 2018).
Cradle-to-Cradle principe	Het van wieg tot wieg ontwerpen van producten. Dit houdt in dat men zo ontwerpt dat de gebruikte grondstoffen voor dit product weer opnieuw gebruikt kunnen worden door ze op (een natuurlijke manier) terug te brengen in de kringloop (Braungart, 2002).
Duurzaamheidsbeleid	Beleid met het oog op het verbeteren van de leefomgeving van de burger (Cramer, 2014).
Duurzame ontwikkeling	Is een containerbegrip voor het proces waarin de 3P's, people, planet en profit dichter naar elkaar groeien. Er ontstaat daardoor een ideaal evenwicht tussen sociale, ecologische en economische belangen (MVO Nederland, z.d.-a).
Eco-efficiëntie	Het begrip eco-efficiëntie staat zowel voor het creëren van economische waarde als voor het verminderen van de milieueffecten in de gehele productketen en het minder gebruikmaken van grondstoffen (Cramer, 2014).
Endotherm	Chemische reactie waarbij warmte wordt opgenomen (Van Dale, z.d.).
Fossiele brandstoffen	Fossiele brandstoffen zijn koolwaterstofverbindingen die zijn ontstaan uit resten van plantaardig en dierlijk leven in het geologisch verleden van de aarde. Hieronder vallen aardolie, aardgas, steenkool en bruinkool (Universiteit van Amsterdam, z.d.).
IFD-bouwen	Kringloop waarbij producten kunnen terugvloeien in de natuur zonder verder negatieve invloed te hebben op deze kringloop.
Ladder van Lansink	Voortgekomen uit de motie-Lansink die de Tweede Kamer in 1979 aannam. Vormt tot op heden een belangrijk uitgangspunt voor het afvalstoffenbeleid (en dus ook grondstoffenbeleid) (Cramer, 2014).
Legalisering	Is een principe binnen het circulair bouwen waarbij bouwwerken niet meer ambachtelijk maar evolutionair gebouwd worden met behulp van onderdelen die uit een catalogus kunnen worden geselecteerd.

Lineaire economie	Economie waarin continu nieuwe grondstoffen aan de aarde worden onttrokken, gebruikt en verspild: 'take-make-waste'.
Metalen	Algemene naam voor een groep van elementen die in het algemeen gekenmerkt worden door glans, ondoorzichtigheid en het vermogen om warmte en elektriciteit te geleiden (Van Dale, z.d.).
Mineralen (abiotisch)	Homogeen bestanddeel van de aardkorst, hetzij element (bv. goud), verbinding (bv. kwarts) of een mengsel (veldspaten) (Van Dale, z.d.).
Modulair bouwen	Een voorbeeld van modulair bouwen is het bouwen met lego. Dit is het zodanig bouwen van een bouwwerk dat het zonder afval te produceren uit elkaar gehaald kan worden.
Modulariteit	De mate waarin een systeem of een computerprogramma is opgebouwd uit afzonderlijke eenheden (modules), die elk een eigen functie vervullen. Een modulair systeem of programma kan worden aangepast of uitgebreid met minimale aanpassingen aan het totaal (Kennisconsult, z.d.).
Primaire grondstoffen	Grondstoffen die nog niet eerder toegepast zijn
R1: Weigeren	Het voorkomen van het gebruik van een onderdeel in het object (PBL, 2018).
R2: Heroverwegen	Het object beter benutten waardoor de grondstoffen efficiënter gebruikt worden (grondstoffenefficiency). Dit kan door de functie die het object heeft te intensiveren of door het object meer functies te geven. Een voorbeeld hiervan is een auto die in plaats van een paar uur per dag door één gebruiker gebruikt wordt, 12 uur per dag door meerdere gebruikers gebruikt wordt terwijl de auto als hij stilstaat gebruikt wordt voor de opslag van overtollige elektriciteit (PBL, 2018).
R3: Verminderen	Het verminderen van grondstoffengebruik in het object (PBL, 2018).
R4: Hergebruiken	In hoeverre het object zonder het te behandelen kan worden hergebruikt voor het oorspronkelijke doel (PBL, 2018).

R5: Repareren	In welke mate het object te repareren is, waarbij onder repareren wordt verstaan het object weer laten voldoen aan de normen die oorspronkelijk werden gesteld aan het object. Na de reparatie moet het object de functie hebben die het had voor de reparatie (PBL, 2018).
R6: Renoveren	In hoeverre het object te renoveren is, waarbij onder renoveren wordt verstaan het object opwaarderen zodat het voldoet aan de geldende normen. Na de renovatie moet het object de functie hebben die het had voor de renovatie (PBL, 2018).
R7: Herbestemmen	In hoeverre een object te herbestemmen is voor een ander doel zonder het daarvoor eerst aan te passen (PBL, 2018).
R8: Recyclen	In hoeverre een object te recyclen is, zodat alle oorspronkelijke grondstoffen waar uit het object is opgebouwd 100% van hun waarde behouden (PBL, 2018).
Secundaire grondstoffen	Grondstoffen die eerder elders zijn toegepast.
Technische kringloop	Bevat alle producten die niet zonder tussenkomst van de mens kunnen terugvloeien in de natuur zonder deze te verstoren. Voorbeelden hier van zijn staal en plastic.
TOM	Een Trade-Off-Matrix (TOM) is een overzicht van verschillende keuzes met een daaraan een toegevoegde criterialijst (Infrawiki, 2018).
Uitputbare grondstoffen	Grondstoffen die binnen één tot twee generaties uitgeput kunnen raken.
Voorzieningszekerheid	Zekerheid van de voorziening in een bepaald goed, bijvoorbeeld de voorzieningszekerheid van benzine.

BIJLAGE B – SCHEMA RELATIE BEGRIPPEN

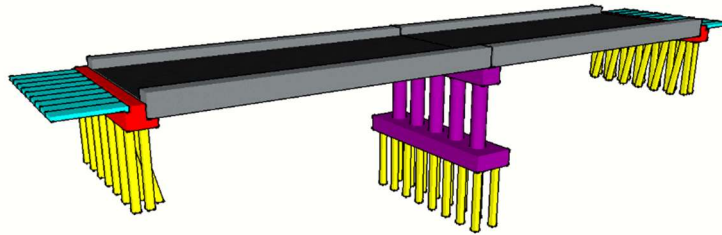


BIJLAGE C – BLANCO TOM

Object	R1: Weigeren	R2: Heroverwegen	C1: Ecologische waarde	C2: Sociale waarde	C3: Economische waarde	R3: Verminderen	R4: Hergebruiken	R5: Repareren	R6: Renoveren	R7: Herbestemmen	R8: Recyclen	Totaal	Percentage van het totaal
Referentiealternatief												0,00	0%
Alternatief 2												0,00	0%
Alternatief 3												0,00	0%
Alternatief 4												0,00	0%
Alternatief 5												0,00	0%
Alternatief 6												0,00	0%
Alternatief 7												0,00	0%
Alternatief 8												0,00	0%

BIJLAGE D – REFERENTIEALTERNATIEVEN

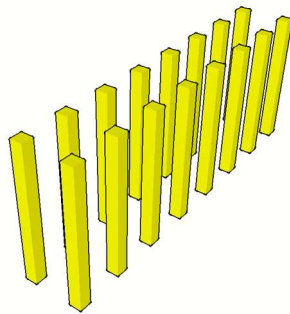
Uit een samenwerking tussen VHB en KWS Infra bv., hierna KWS genoemd, is een 'standaard' viaduct gegenereerd (Volkerwessels, 2018). In figuur 1 is de visualisatie weergegeven van het 'standaard' viaduct, bestaande uit de objecten: fundering, landhoofd, stootplaat en oplegpijler. De verschillende objecten zullen in onderstaande paragrafen nader worden toegelicht.



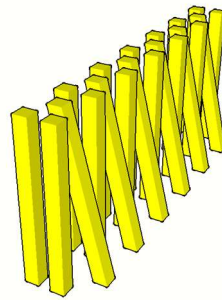
figuur 1: Visualisatie 'standaard' viaduct

Fundering

Het referentiealternatief voor de fundering bestaat uit een x-aantal vierkante prefab betonnen palen. Deze zijn in figuur 2 en 3 in het geel weergegeven.



figuur 2: Fundering oplegpijler

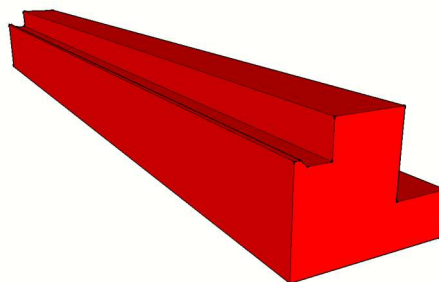


figuur 3: Fundering landhoofd

In de betonnen palen zitten voorspanwapening, hoofdwapening en beugels verwerkt ten behoeve van het opnemen van trekkrachten en voorkoming van scheurvorming. De vierkante prefab betonnen palen kunnen in verschillende schoorstanden staan, om de horizontale belastingen afkomstig uit de bovenbouw te kunnen afdragen. Ook kunnen de vierkante prefab betonnen palen rechtop aangebracht worden. Dit om de verticale belastingen af te kunnen dragen. In figuur 2 is de fundering van de 'standaard' oplegpijler weergegeven en in figuur 3 is de fundering van het 'standaard' landhoofd weergegeven.

Landhoofd

Het referentiealternatief voor het landhoofd bestaat uit een 'betonnen blok'. Deze is in figuur 4 in het rood weergegeven.

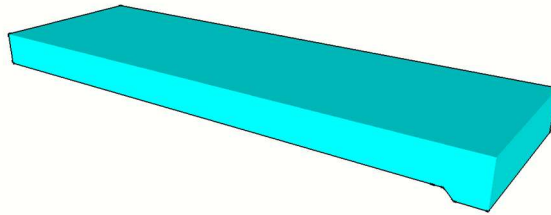


figuur 4: Landhoofd

In het 'betonnen blok' zitten hoofdwapening en beugels verwerkt ten behoeve van het afdragen van horizontale en verticale krachten aan de fundering en ter voorkoming van scheurvorming. Verder bestaat het 'betonnen blok' uit twee steunpunten, één voor de stootplaat en één voor het brugdek. Dit geheel vormt de overgangsconstructie van land naar brug en vice versa.

Stootplaat

Het referentiealternatief voor de stootplaten bestaat uit een 'rechthoekig betonnen blok'. Deze is in figuur 5 in het lichtblauw weergegeven.

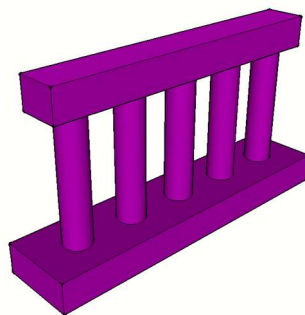


figuur 5: Stootplaat

In het 'rechthoekig betonnen blok' zitten hoofdwapening en beugels verwerkt ten behoeve van het opnemen van trekkrachten en voorkoming van scheurvorming op de stootplaten.

Oplegpijler

Het referentiealternatief voor de oplegpijler bestaat uit drie betonnen onderdelen: poer, kolommen en onderslagbalk. Deze is in figuur 6 in het paars weergegeven.

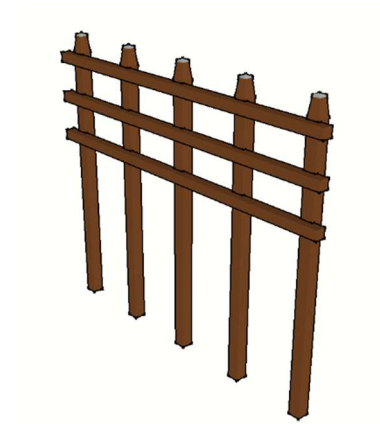


figuur 6: Oplegpijler

In deze onderdelen zitten hoofdwapening en beugels verwerkt ten behoeve van het afdragen van verticale krachten aan de fundering en voorkoming van scheurvorming.

Remmingwerk

Het referentiealternatief voor het remmingwerk bestaat uit houten palen gesitueerd in het water en grond, met daaraan dwarsbalken die het remmingwerk vormen. Deze is in figuur 7 in het bruin weergegeven.



figuur 7: Remmingwerk

Een remmingwerk is opgebouwd uit twee delen: een constructief deel dat zorgt voor de sterkte van het remmingwerk en het deel dat in contact komt met het schip; de wrijfgording. In dit onderzoek wordt uitsluitend het constructief deel beschouwd.

BIJLAGE E – ALTERNATIEVEN

Fundering

Voor de fundering geldt de minimale functionele top-eis dat zowel de verticale als horizontale belastingen worden afgedragen aan de ondergrond. Alle funderingsalternatieven worden aangebracht tot in de laag met de benodigde draagkracht. Deze laag zit bij het project 'Bruggen Krommenie' op ca. - 19,5 meter t.o.v. NAP. Via deze laag worden de verticale en horizontale krachten afkomstig uit de onder- en bovenbouw afgedragen.

Er kunnen twee soorten funderingen onderscheiden worden: funderingen op staal en funderingen op palen. Het funderen op staal is voor dit project lastig toe te passen aangezien de laag met voldoende draagkracht op ca. - 19,5 meter t.o.v. NAP zit. Om op staal te funderen is een grondverbetering nodig van twintig meter. Het funderen op palen is daarentegen wel toe te passen op dit project. Er kunnen verschillende soorten paalfunderingen gegenereerd worden en deze zullen vergeleken worden met het 'standaard' alternatief. Het standaard alternatief voor de paalfundering is een gewapende betonnen prefab paal (FA0).

De fundering kan opgebouwd worden uit damwandplanken, zie figuur 3. Een damwandplank ontleent zijn krachten uit wrijvingsweerstand tussen de damwandplank en de ondergrond en het paalpunt draagvermogen op de draagkrachtigste laag (Backhausen, et al., 2014, p. 245). Damwandplanken worden door middel van een slot in elkaar geschoven. Dit zorgt voor een waterdichte en sterke verbinding tussen damwandplanken. Voor de fundering kan een damwandplank op verschillende manieren ingezet worden. Voorbeelden hiervan zijn een bouwkuip, gekoppelde damwandplanken en op zichzelf staande damwandplanken (Backhausen, et al., 2014, p. 195), zie figuren 1 en 2.



figuur 1: Bouwkuip (1)



figuur 2: Bouwkuip (2)

Damwandplanken kunnen van verschillende materialen gemaakt worden. Voor dit project wordt er gekozen voor een stalen damwandplank (FA1), zie figuur 3, en kunststof damwandplank (FA6), zie figuur 4, als alternatief.



figuur 3: Stalen damwandplanken



figuur 4: Kunststof damwandplanken

Damwandplanken kunnen ook gemaakt worden van beton of hout. Op voorhand worden deze twee alternatieven niet meegenomen in de keuzematrix, omdat betonnen damwandplanken lastig onbeschadigd uit de grond te verwijderen zijn en bij houten damwandplanken vindt er houtrot plaats op de lucht-waterlijn.

Als variant op de fundering opgebouwd uit damwandplanken kan deze ook opgebouwd worden uit box piles (FA2), zie figuur 5. Een box pile bestaat uit twee samengestelde damwandplanken die met de holle kant tegen elkaar aan zijn gelast en daardoor een 'box' vormen. Een box pile ontleent zijn kracht op dezelfde manier als een damwandplank. Een box pile kan echter volgestort worden met bijvoorbeeld beton om deze stijver te maken en kan daardoor meer verticale en horizontale belastingen opnemen.

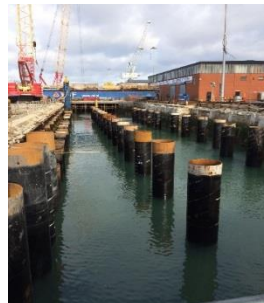


figuur 5: Stalen box pile

Een andere variant op een fundering opgebouwd uit damwandplanken is een combiwand (FA3), zie figuur 6. Een combiwand bestaat uit een combinatie van stalen buispalen met daartussen één, twee of soms drie stalen damwandplanken (Backhausen, et al., 2014, p. 193). Een combiwand kan worden gebruikt als oplossing voor hoge buigende momenten.



figuur 6: Stalen combiwand



figuur 7: Stalen buispalen

Als fundering kan er in tegenstelling tot een combiwand ook alleen gebruikt gemaakt kunnen worden van enkel een stalen buispaal (FA4), zie figuur 7. Een buispaal bestaat uit een ronde koker en kan uit meerdere aaneengelaste elementen bestaan, maar ook uit een aaneengesloten element.

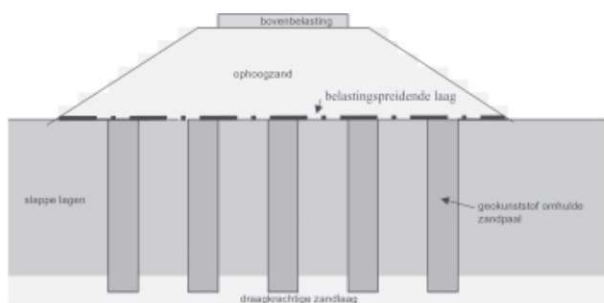
Voor het 'standaard' alternatief: gewapende betonnen prefab paal, zou ook het toeslagmateriaal voor een deel kunnen bestaan uit houtsnippers/houtvezels. Dit wordt ook een houton paal genoemd. In een houton paal (A5) wordt het toeslagmateriaal: zand en grind, voor zo'n 30 tot 90 procent vervangen door resthout. Door het toevoegen van een additief kan het hout 'versteend' worden, hierdoor zijn er druksterkte van 15 tot 25 N/mm², maar ook tot 90 N/mm² mogelijk. In figuur 8 is een houtonpaal geïllustreerd welke staat op de Volgermeerpolder in Amsterdam. (Tauw, 2018; Van Velden, 2011)



figuur 8: Houton paal

Bij de alternatieven, box piles, combiwand, buispaal en houton kan geothermische energie opgewekt worden. Dit wordt in de 'BIJLAGE F – GEOTHERMISCHE ENERGIE' nader uitgelegd.

Een andere variant op een fundering is het toepassen van een zandpaal (FA7), zie figuur 9. Een zandpaal is een verticaal aangebrachte zandkolom met als omhulsel een geotextiel (Bodem+, z.d.). Een zandpaal ontleent zijn kracht aan het geotextiel en het omhulde zand.



figuur 9: Principe van geotextiel omhulde zandpalen met een ophoging

Corrosiepreventie

Er zijn verschillende methoden om stalen funderingen te beschermen tegen corrosie (Van der Heide, z.d.). Voor het beschermen van stalen funderingen zal een voorkeursalternatief ten behoeve van corrosiepreventie worden gekozen, onderstaand worden de varianten toegelicht.

Zonder corrosietoeslag

De standaard variant is zonder corrosietoeslag of andere vormen van corrosiepreventie. De varianten worden vergeleken met deze variant.

Corrosietoeslag

Om damwandplanken gedurende de gehele levensduur constructief te laten voldoen, kan er voor gekozen worden om een corrosietoeslag mee te nemen in het ontwerp. De corrosie in zoet water is 0,012 mm/per jaar per zijde (SBRCURnet, 2012). Bij een levensduur van honderd jaar, is de totale corrosietoeslag dus 2,4 mm.

Coating

Het meerlaags coaten van damwandplanken kan het corrosieproces tot twintig jaar vertragen. Een coatingsysteem bestaat meestal uit één laag primer en twee beschermingslagen (Van der Heide, z.d.).

Kathodische bescherming

Door het toepassen van kathodische bescherming is corrosie van staal te voorkomen. Het ontstaan van corrosie is een scheikundig proces dat begint met de ionisatie van staal, waarbij elektronen vrijkomen (Hage, 1999). Door het potentiaal van het staal te verlagen, kan corrosie voorkomen worden. Dit kan met twee methoden: opofferingsanodes en opdrukspanning (Wit-Blok, 2007, p. 8-11). Voor dit alternatief wordt de methode van opdrukspanning gebruikt. In 'BIJLAGE G – KATHODISCHE BESCHERMING' staat aanvullende informatie over kathodische bescherming.

Landhoofd

Voor het landhoofd geldt de minimale functionele top-eis dat zowel de verticale als horizontale belastingen vanuit het brugdek afgedragen worden aan de fundering. Ook fungeert het landhoofd als overgangsconstructie van het land naar de brug en vice versa. Er kunnen verschillende soorten landhoofden gegenereerd worden en deze zullen vergeleken worden met het 'standaard' alternatief, een gewapende betonnen landhoofd (LA0).

Een landhoofd zou uit mega-legoblokken (LA1), zie figuur 10, opgebouwd kunnen worden. Een mega-legoblok is te verkrijgen in verschillende vormen en afmetingen. Daardoor kunnen mega-legoblokken op verschillende manieren gecombineerd en gebruikt worden, zoals bijvoorbeeld voor een keerwand, opslaghal of aanrijdbeveiliging, zie de figuren 11, 12 en 13. De mega-legoblokken worden onderling verbonden door de noppen aan de bovenzijde en de sparingen aan de onderzijde van het andere blok. Door de blokken in een halfsteens verband neer te leggen wordt één geheel gecreëerd. (Legioblock, z.d.)



figuur 10: Mega-legoblok



figuur 11: Aanrijdbeveiliging



figuur 12: Keerwand



figuur 13: Opslaghal

Een landhoofd zou ook uit stalen HE-profielen (LA2), zie figuur 14, opgebouwd kunnen worden. Een HE-profiel is te verkrijgen in verschillende afmetingen en sterkten. Onderling kunnen de HE-profielen met een las en/of boutverbinding verbonden worden, maar met het oog op circulair bouwen heeft een boutverbinding de voorkeur. Boutverbindingen zijn in figuur 15 weergegeven.

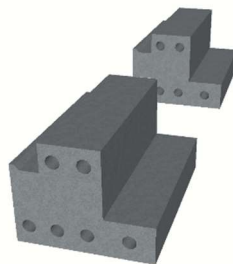


Figuur 14: Stalen HE-profielen



figuur 15: Boutverbindingen

Een landhoofd zou ook uit landhoofdblokken (LA3), zie figuur 16, opgebouwd kunnen worden. Deze landhoofdblokken zijn gebaseerd op het ‘standaard’ landhoofd en zijn ca. één á twee meter breed. Deze landhoofdblokken worden middels stalen trekkabels onderling met elkaar verbonden tot één werkend geheel.



Figuur 16: Landhoofdblokken

Een landhoofd zou ook uit een gewapende grondconstructie (LA4), zie figuur 17, opgebouwd kunnen worden. Deze constructie bestaat uit een stapel van ‘grondmatrassen’. Elk grondmatras bestaat uit een doek dat gevuld is met grond. Door het contactoppervlak tussen de grondmatrassen kunnen verticale en horizontale krachten worden afgedragen.



Figuur 17: Gewapende grondconstructie

Een landhoofd zou ook uit schanskorven (LA5), zie figuur 18, opgebouwd kunnen worden. Een schanskorf bestaat uit een vorm van een metalen rasterwerk dat gevuld is met een zwaar materiaal, bijvoorbeeld stenen of keien, zie figuur 19. In dit alternatief wordt het gebroken betonpuin uit de te slopen 'Bruggen Krommenie' gebruikt als vulling voor de schanskorven. Binnen in de schanskorf zitten dwarsverbindingen welke voorkomen dat het rasterwerk zijn vorm verliest. De schanskorven worden onderling verbonden en in een halfsteensverband aangebracht.



Figuur 18: Schanskorf



figuur 19: Gevulde schanskorven

Stootplaat

Voor de stootplaat, welke onderdeel is van het landhoofd, geldt als minimale functionele top-eis: een overgangsconstructie creëren van het land naar de brug en vice versa. Voor een illustratie van een stootplaat zie de figuren 20 en 21. Er kunnen verschillende soorten stootplaten gegenereerd worden en deze zullen vergeleken worden met het 'standaard' alternatief, een gewapende betonnen stootplaat (SA0).



Figuur 20: Stootplaat (1)



figuur 21: Stootplaat (2)

Een stootplaat kan in verschillende materialen uitgevoerd worden, zoals kunststof (SA1), staal (SA2), hout (SA3) en houton (SA4). Het materiaal houton is in het hoofdstuk fundering van deze bijlage nader toegelicht.

Oplegpijler

De oplegpijler heeft als minimale functionele top-eis: de verticale belastingen, zoals de belastingen afkomstig van het beweegbare tussendek, af te dragen aan de fundering. Het referentiealternatief voor de oplegpijler bestaat uit drie betonnen onderdelen: poer, kolommen en onderslagbalk (OA0). De alternatieven voor de oplegpijler zijn gebaseerd op dezelfde alternatieven als die van het landhoofd, zie landhoofd. De te beschouwen alternatieven voor de oplegpijler zijn:

- Alternatief 1: OA1 Mega-legoblokken
- Alternatief 2: OA2 Stalen HE-profielen
- Alternatief 3: OA3 Betonnen oplegblokken
- Alternatief 4: OA4 Gewapende grond
- Alternatief 5: OA5 Schanskorven

Voor alternatief 3 geldt echter dat deze niet gebaseerd is op het 'standaard' landhoofd, maar op de 'standaard' oplegpijler. De 'standaard' oplegpijler bestaat net zoals het alternatief landhoofdblokken uit blokken van ca. één á twee meter.

Remmingwerk

Het remmingwerk heeft als minimale functionele top-eis: het visueel en fysiek geleiden van de scheepvaart. Daardoor wordt een frontale aanvaring met de brugconstructie verhinderd. In figuur 22 en figuur 23 is een remmingwerk weergegeven.



Figuur 22: Remmingwerk voor spoorbrug



figuur 23: Remmingwerk

Een remmingwerk kan bestaan uit verschillende materialen. Het 'standaard' alternatief voor een remmingwerk is een houten remmingwerk (RA0). In dit onderzoek worden de volgende materialen beschouwd: staal (RA1), beton (RA2) en kunststof (RA3).

BIJLAGE F – GEOTHERMISCHE ENERGIE

Geothermische energie, is net als wind- en zonne-energie, een alternatief voor het gebruik van fossiele brandstoffen als energiebron. Geothermische energie kan onderscheiden worden in twee soorten warmte, namelijk bodemwarmte en aardwarmte.

Bodemwarmte

“Zonlicht verwarmt (vooral in de zomer) de bodem en het bodemwater. Door circulatie van het bodemwater en door verspreiding van warmte door de bodem, kan de zonnewarmte tot enkele honderden meters diep in de aardkorst komen. De warmte in de bodem en in het bodemwater heten beide bodemwarmte” (Milieu centraal, z.d.). “Bij geothermie, ofwel aardwarmte wordt water van grote diepte uit de ondergrond opgepompt. Dit water is erg warm: hoe dieper in de bodem, hoe hoger de druk is en des te warmer het water” (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, z.d.). ““In Nederland is het ongeveer elke 100 meter dieper 3,2 graden warmer. Je begint met een oppervlaktetemperatuur van 10 graden. Dus op 1 kilometer diepte is het 42 graden, op 2 km diepte 74 graden, en zo verder.”” (KNMI, z.d.).

“Het aftappen van bodemwarmte tot 100 meter diep in de aarde gebeurt met zogeheten bodemwarmtewisselaars. Zo'n bodemwarmtewisselaar bestaat uit een gesloten buizensysteem dat tot 100 meter diep de bodem in gaat. Door de buizen wordt een vloeistof gepompt (meestal water met antivries). De vloeistof stroomt door de warmere bodem, warmt daardoor op en stroomt verder door de buizen, weer terug naar het oppervlak. Aan de oppervlakte staan grote warmtepompsystemen die de warmte overnemen van de vloeistof in de bodemwarmtewisselaars, en vervoeren naar nieuwbouwhuizen en de industrie.” (Milieu centraal, z.d.).

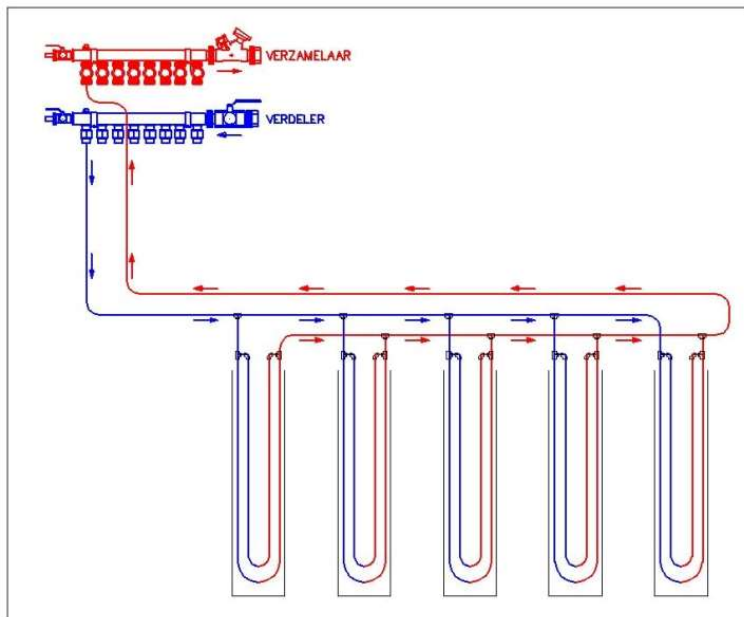
Aardwarmte

“Aardwarmte ontstaat uit een andere bron, namelijk de hete kern van de aarde. De temperatuur in de kern is niet precies bekend, schattingen variëren van 2.000 tot 12.000 graden Celsius. Deze vorm van warmte heet aardwarmte, of geothermische warmte.” (Milieu centraal, z.d.).

“Per uur pompen we hier 185 kubieke meter water van 85 graden Celsius naar boven, om het na afkoeling tot 35 graden weer te injecteren in dezelfde aardlaag, anderhalve kilometer verderop”, vertelt Lankester. “We hebben berekend dat deze bron zo’n dertig jaar meegaat, tot het moment waarop het hete water en het teruggepompte water elkaar zullen raken. We noemen dat de doorbraaktijd. Het warmwaterreservoir is dan slechts één graad afgekoeld. Als we de put vervolgens met rust laten, is deze na een eeuw weer helemaal op temperatuur.” (Van Roekel, 2013).

Toepassing

In de bodemlagen waar de fundering in staat, heerst een constante temperatuur van tien graden. Door de techniek met een warmtewisselaar en/of bodemwarmtewisselaar kan er een vloeistof door de buizen gepompt worden die door de bodemwarmte wordt opgewarmd. De warmte uit de bodem wordt door de warmtewisselaar en/of bodemwarmtewisselaar omgezet naar bruikbare energie. Deze techniek is dus een perfecte combinatie met een fundering. In figuur 1 is dit proces geïllustreerd en in figuur 2 is dit principe toegepast voor een woonhuis (De Groene paal, z.d.)



figuur 1: Proces bodemwarmte



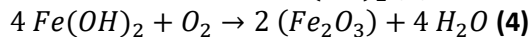
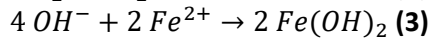
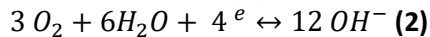
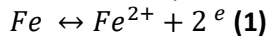
figuur 2: Principe energiepaal

“De prestaties van energiepalen zijn beter naarmate de hoeveelheid warmte die aan de bodem wordt onttrokken (voor verwarming) en toegevoerd (voor koeling) meer in evenwicht is. Wanneer alleen warmte wordt onttrokken zal de temperatuur in de bodem rond de palen in de loop van de jaren dalen en is een steeds lagere medium temperatuur nodig om hetzelfde vermogen aan warmte te onttrekken” (Geelen, Krosse, Sterrenburg, Bakker, & Sijpheer, 2003).

BIJLAGE G – KATHODISCHE BESCHERMING

Roest of corrosie is een chemisch proces waarbij het ijzer met zuurstof reageert tot roest. In dit proces ontstaan ijzerionen (Fe^{2+}) waarbij elektronen vrijkomen **(1)**. Deze elektronen kunnen samen met zuurstof (O_2) en water (H_2O) reageren tot hydroxide ionen (OH^-) **(2)**. Vervolgens kunnen deze hydroxide ionen samen met de ijzerionen reageren tot ijzer(II)hydroxide ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) **(3)**. Deze ijzerhydroxide verbindingen slaan daarna neer en oxideren tot roestbruine ijzeroxides, ook wel roest genoemd **(4)**. In water verloopt dit proces sneller door de overmaat watermoleculen (Hage, 1999).

Bovenstaand proces is hieronder in reactievergelijkingen weergegeven:

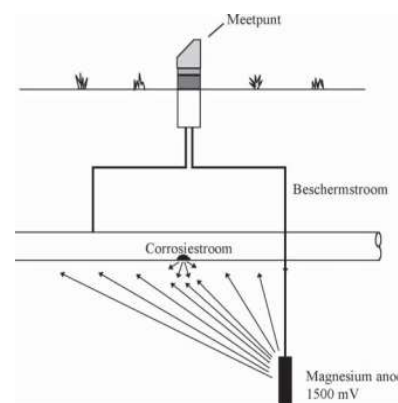


Kathodische bescherming verhindert dit proces door het elektrisch potentiaal van het staal te verlagen, daardoor kan het staal niet oxideren. Het verhinderen van dit proces kan met twee methoden: opofferingsanodes en opdrukspanning. Beide methoden maken gebruik van het bovenstaande principe en kunnen corrosie geheel voorkomen.

Bij het gebruik van opofferingsanodes wordt een onedeler metaal (vaak zink of aluminium) gemonteerd om het staal te beschermen. Zolang voldoende opofferingsmetaal aanwezig is zal deze corroderen in plaats van het staal. Deze methode heeft echter als nadeel dat de anodes na verloop van tijd vervangen dienen te worden, omdat al het opofferingsmetaal dan is gecorrodeerd. Daarnaast zijn de opofferingsmetalen kostbaar en komen de metalen in het milieu terecht. Zie figuur 1 voor een voorbeeld van een opofferingsanode.



figuur 1: Opofferingsanode



figuur 2: Kathodische bescherming met opdrukspanning

Bij het gebruik van opdrukspanning wordt via een anode het potentiaal van het staal verlaagd. Door het verlagen van het potentiaal van het staal gaat de reactie in stap 1 naar links lopen, waardoor corrosie voorkomen wordt. In figuur 2 staat een voorbeeld weergegeven van opdrukspanning bij een leiding (Wit-Blok, 2007, p. 8-11)

BIJLAGE H – ONDERBOUWING BEOORDELING

In dit onderzoek wordt ervan uitgegaan dat alle stalen alternatieven gebruik maken van kathodische bescherming, waardoor de staalafname gemarginaliseerd wordt (zie 'BIJLAGE G – KATHODISCHE BESCHERMING' voor nadere toelichting).

Fundering

In tabel 1 zijn de gegenereerde alternatieven voor de fundering beoordeeld. In de onderstaande tekst wordt de beoordeling van de alternatieven toegelicht.

Fundering	R1: Weigeren	R2: Hero verwegen	C1: Ecologische waarde	C2: Sociale waarde	C3: Economische waarde	R3: Verminderen	R4: Hergebruiken	R5: Repareren	R6: Renoveren	R7: Herbesteden	R8: Recyclen	Totaal	Percentage van het totaal
FA0: Prefab betonnen paal												0,00	0,0%
FA1: Stalen damwand		+	+	=	=	-	+	-	=	=	+	4,15	10,4%
FA2: Stalen box pile		++	+	=	+	-	++	-	=	=	+	8,80	22,1%
FA3: Stalen combiwand		++	+	=	+	-	++	-	=	+	+	10,00	25,2%
FA4: Stalen buispaal		+	+	=	+	-	+++	-	=	++	+	11,00	27,7%
FA5: Houten paal		+	=	=	+	+	=	=	=	=	-	3,65	9,2%
FA6: Kunststof damwand		+	+	=	=	-	+	=	=	=	-	1,95	4,9%
FA7: Zandpaal		+	+	=	=	+	-	=	=	+	+	5,55	14,0%

tabel 1: TOM – Fundering

Bij het criterium **R1** zijn de alternatieven niet beoordeeld.

Bij het criterium **R2** zijn de alternatieven FA2 en FA3 met een dubbele plus beoordeeld, omdat deze zowel grond kunnen keren als geothermische energie uit de ondergrond kunnen halen, zie voor de werking van geothermische energie 'BIJLAGE F – GEOTHERMISCHE ENERGIE'. Deze twee alternatieven voegen dus twee (nieuwe) functies toe ten opzichte van het referentiealternatief. De alternatieven FA1 en FA6 kunnen alleen grond keren en de alternatieven FA4 en FA5 kunnen alleen geothermische energie uit de ondergrond halen. Deze alternatieven hebben dus een enkele functie en hebben daarom een enkele plus als beoordeling. Alternatief FA7 heeft een enkele plus, omdat een zandpaal mogelijkheden biedt tot het draineren van hemelwater (De Vree, z.d.).

Bij het criterium **C1** is het alternatief FA5 gelijkwaardig aan het referentiealternatief, omdat ten opzichte van het referentiealternatief dezelfde hoeveelheid grond wordt verdrongen. De alternatieven FA1, FA2, FA3, FA4 en FA6 zijn met een enkele plus beoordeeld, omdat deze alternatieven minder grond verdringend zijn dan het referentiealternatief en daardoor een minder geroerde bodem achterlaten op het moment dat de alternatieven worden verwijderd. Alternatief FA7 heeft een enkele plus als beoordeling, omdat deze vorm van fundering grondwaterstromen door kan laten. Dit komt doordat het geotextiel niet waterdicht is, maar wel grond dicht.

Bij het criterium **C2** zijn de alternatieven gelijkwaardig aan het referentiealternatief, omdat geen van alle sociale waarde toevoegen aan het systeem.

Bij het criterium **C3** zijn de alternatieven FA2, FA3, FA4 en FA5 met een enkele plus beoordeeld, omdat deze alternatieven energie kunnen opwekken door de geothermische energie en hieruit een economisch voordeel gehaald kan worden. De alternatieven FA1, FA6 en FA7 zijn gelijkwaardig aan het referentiealternatief, omdat ze geen economische waarde toevoegen aan het systeem.

Bij het criterium **R3** zijn de alternatieven FA1, FA2, FA3 en FA4 met een enkele min beoordeeld, omdat de GER-waarde van staal hoger is dan die van het referentiealternatief. Het alternatief FA5 is

beoordeeld met een enkele plus, omdat resthout als toeslagmateriaal wordt gebruikt. Dit voorkomt het gebruik van materialen met een hogere GER-waarde. Het alternatief FA6 heeft een enkele min als beoordeling, omdat kunststof een hogere GER-waarde heeft dan het referentiealternatief en de alternatieven FA5 en FA7. Het alternatief FA7 heeft een enkele plus als beoordeling, omdat de GER-waarde van zand lager ligt dan de GER-waarde van het referentiealternatief (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2018).

Bij het criterium **R4** is het alternatief FA5 gelijkwaardig aan het referentiealternatief. De alternatieven FA1 en FA6 zijn met een enkele plus beoordeeld. Dit is omdat deze alternatieven uit de grond kunnen worden getrokken en op een andere plek hergebruikt kunnen worden als fundering zonder dat ze hiervoor moeten worden aangepast. Het alternatief FA2 krijgt een dubbele plus, omdat een stalen boxpile minder elastisch is dan een damwand, waardoor de boxpile na verwijderen uit de grond beter her te gebruiken is dan een damwand. Tegelijkertijd bestaat bij het aanbrengen van een boxpile wel het risico op torderen. Dit beïnvloedt de mogelijkheid tot hergebruiken, daarom krijgt alternatief FA2 geen drie plussen. Het alternatief FA3 krijgt een dubbele plus, omdat het bestaat uit een combinatie van damwanden en buispalen en omdat de buispalen minder elastisch zijn dan de damwanden zijn zij beter te hergebruiken (ArcelorMittal, 2017, p. 8, p. 35, p. 46). Het alternatief FA4 is met drie plussen beoordeeld, omdat het alternatief, in tegenstelling tot alternatief FA3, volledig uit buispalen bestaat en omdat buispalen niet kunnen torderen en daardoor beter te hergebruiken zijn dan FA2. Het alternatief FA7 heeft een enkele min als beoordeling, omdat voor het verwijderen van een zandpaal veel energie benodigd is. Dit komt doordat het zandpakket in de zandpaal moet worden afgegraven waarna een steunvloeistof in het gat dient te worden aangebracht zodat het geotextiel verwijderd kan worden.

Bij het criterium **R5** zijn de alternatieven FA5, FA6 en FA7 gelijkwaardig aan het referentiealternatief. Het alternatief FA5 bestaat uit hetzelfde materiaal als het referentiealternatief en is daardoor gelijkwaardig op dit criterium. De benodigde energie voor het repareren van de alternatieven FA6 en FA7 wordt gelijk geacht aan het repareren van beton. De alternatieven FA1, FA2, FA3 en FA4 zijn met een enkele min beoordeeld, omdat voor het repareren van staal wordt aangenomen dat meer energie benodigd is dan voor het repareren van beton.

Bij het criterium **R6** wordt aangenomen dat de energiebehoefte voor het renoveren van alle alternatieven gelijkwaardig is. Dit omdat voor alle alternatieven geen eenvoudige methoden beschikbaar zijn op dit moment die het alternatief kunnen aanpassen aan nieuwe normen en wetgeving.

Bij het criterium **R7** zijn de alternatieven FA1, FA2, FA5 en FA6 gelijkwaardig, omdat de alternatieven mogelijk beschadigd raken tijdens het aanbrengen in de bodem. Door deze beschadiging kan het nodig zijn dat het alternatief moet worden aangepast voordat het voor een andere functie gebruikt kan worden. Dit is gelijk aan het referentiealternatief. Het alternatief FA3 is beoordeeld met een enkele plus, omdat het alternatief gedeeltelijk uit buispalen bestaat. Deze zijn eenvoudiger te hergebruiken dan damwanden. Het alternatief FA4 is beoordeeld met een dubbele plus, omdat dit alternatief voor een veelvoud van functies her bestemd kan worden zonder dat het daarvoor moet worden aangepast. Voorbeelden van deze functies zijn: in een stempelraam, in de utiliteitsbouw en remmingwerk (Smienk, 2016). Alternatief FA7 heeft een enkele plus, omdat het geotextiel en het zand waar het alternatief uit opgebouwd is voor allerlei andere functies te gebruiken is.

Bij het criterium **R8** zijn de alternatieven FA1, FA2, FA3, FA4 en FA7 met een enkele plus beoordeeld, omdat deze alternatieven honderd procent te recycleren zijn en na recycling in dezelfde kwaliteit kunnen worden geproduceerd (Brinck, 2016). Het alternatief FA5 is met een enkele min beoordeeld, omdat ten opzichte van het referentiealternatief een extra materiaalsoort gebruikt wordt. (Van Velden, 2011). Daardoor is meer energie benodigd voor het recycleren van alternatief FA5 in tegenstelling tot het referentiealternatief. Het alternatief FA6 is met een enkele min beoordeeld omdat kunststof weliswaar volledig te recycleren is maar dat het aantal recycle slagen van kunststof om technische reden beperkt is (Stichting Bouwkwiteit, 2014, p. 24-25).

Landhoofd

In tabel 2 zijn de gegenereerde alternatieven voor het landhoofd beoordeeld. In de onderstaande tekst wordt de beoordeling van de alternatieven toegelicht.

Landhoofd	R1: Weigeren	R2: Heroverwegen	C1: Ecologische waarde	C2: Sociale waarde	C3: Economische waarde	R3: Verminderen	R4: Hergebruiken	R5: Repareren	R6: Renoveren	R7: Herbesteden	R8: Recyclen	Totaal	Percentage van het totaal
LA0: Betonnen landhoofd												0,00	0,0%
LA1: Mega-legoblokken			=	=	=	=	=	=	=	=	=	8,00	18,3%
LA2: Stalen HE-profielen			-	=	=	=	-	++	-	++	++	5,80	13,3%
LA3: Betonnen landhoofdblokken			=	=	=	=	=	++	=	++	=	5,60	12,8%
LA4: Gewapende grond			=	=	=	=	=	+	+	+	+	7,30	16,7%
LA5: Schanskorven			+	+	=	=	=	++	+	++	++	13,35	30,6%

tabel 2: TOM – Landhoofd

Bij het criterium **R1** zijn de alternatieven niet beoordeeld.

Bij het criterium **R2** is het alternatief LA2 met een enkele min beoordeeld, omdat deze variant ten opzichte van het referentiealternatief een functie mist, namelijk het keren van grond. Hierdoor wordt minder efficiënt gebruik gemaakt van de grondstoffen voor het landhoofd, omdat een extra object nodig is om de grond te keren. Het alternatief LA5 is beoordeeld met een enkele plus, omdat de holtes in de schanskorven mogelijkheden bieden voor het huisvesten van allerlei planten, insecten en dieren (De Jager, 1989, p. 35-37). Dit is dus een extra functie bovenop de voorafgaande functies die het referentiealternatief ook heeft. De alternatieven LA1, LA3 en LA4 hebben niet meer of minder functies dan het referentiealternatief en zijn hierdoor gelijkwaardig aan het referentiealternatief.

Bij het criterium **C1** krijgen de alternatieven LA1, LA2, LA3 en LA4 geen beoordeling, omdat deze alternatieven geen ecologische waarde toevoegen ten opzichte van het referentiealternatief. Het alternatief LA5 heeft een enkele plus, omdat de holtes in de schanskorven mogelijkheden bieden voor het huisvesten van allerlei planten, insecten en dieren (De Jager, Schanskorven, 1989, p. 35-37).

Bij het criterium **C2** zijn de alternatieven gelijkwaardig aan het referentiealternatief, omdat geen van alle sociale waarde toevoegen aan het systeem.

Bij het criterium **C3** zijn de alternatieven gelijkwaardig aan het referentiealternatief, omdat geen van alle economische waarde toevoegen aan het systeem.

Bij het criterium **R3** zijn de alternatieven LA1, LA3, LA4 en LA5 gelijkwaardig aan het referentiealternatief. De alternatieven LA1 en LA3 bestaan uit hetzelfde materiaal als het referentiealternatief. De alternatieven LA4 en LA5 maken gebruik van een materiaal (kunststof en staal) dat een hogere GER-waarde heeft dan het referentiealternatief, maar dit is slechts een klein percentage van het gehele volume. Daarbij heeft het overige materiaal een lagere GER-waarde (hergebruikt betongranulaat en grond) dan het referentiealternatief. Het alternatief LA2 heeft een enkele min, omdat staal een hogere GER-waarde heeft dan het referentiealternatief.

Bij het criterium **R4** zijn de alternatieven LA1, LA2, LA3 en LA5 met een dubbele plus beoordeeld, omdat deze modulair zijn opgebouwd. De alternatieven kunnen uit elkaar worden gehaald en elders worden opgebouwd, zonder het alternatief aan te passen (De Jager, 1989, p. 34-35). Het alternatief LA4 kan ook elders worden gebruikt, echter moet bij dit alternatief eerst de vulling worden verwijderd. Het textiel is namelijk niet geschikt om het grondvolume op te tillen en te verplaatsen. Om deze reden heeft dit alternatief een enkele plus.

Bij het criterium **R5** zijn de alternatieven LA1 en LA3 gelijkwaardig, omdat deze van hetzelfde materiaal zijn gemaakt als het referentiealternatief. Het alternatief LA2 heeft een enkele min als beoordeling, omdat aangenomen wordt dat het repareren van staal een hogere energiebehoefte heeft dan het repareren van beton. De alternatieven LA4 en LA5 krijgen een enkele plus, omdat aangenomen wordt dat deze alternatieven 'low-tech' te repareren zijn. Deze alternatieven zijn namelijk opgebouwd uit eenvoudige materialen en kunnen derhalve ook eenvoudig gerepareerd worden (De Jager, 1989, p. 4; Bodem+, z.d.).

Bij het criterium **R6** hebben de alternatieven LA1, LA2, LA3 en LA5 een dubbele plus, omdat deze alternatieven eenvoudig te renoveren zijn door hun modulariteit. De blokken, korven of balken van deze alternatieven kunnen eenvoudig worden verwijderd en worden vervangen door nieuwe modules. Het alternatief LA4 kan ook gerenoveerd worden. Bij dit alternatief zal echter eerst de vulling worden verwijderd voordat het matras verplaatst kan worden, omdat het omhulsel van het alternatief niet geschikt is om trekkracht als gevolg van hijsen op te vangen. Hierdoor heeft dit alternatief een enkele plus.

Bij het criterium **R7** hebben de alternatieven LA1, LA2 en LA5 een dubbele plus, omdat deze alternatieven eenvoudig in een andere functie kunnen worden hergebruikt zonder dat ze hier uitgebreid voor hoeven worden aangepast (Smienk, 2016). Voorbeelden van deze functies zijn: stempels, gebruik in utiliteitsbouw, scheidingswand voor opslag, afscheiding, geluidsscherm (De Jager, Schanskorven, 1989). Het alternatief LA3 heeft geen beoordeling, omdat deze net als het referentiealternatief lastig een andere functie kan krijgen dan een landhoofd. Het alternatief is immers gevormd in de vorm van een landhoofd en heeft geen generieke vorm zoals bijvoorbeeld een buis, balk of legoblok. Het alternatief LA4 kan hergebruikt worden in een andere functie. Bij dit alternatief zal echter eerst de vulling worden verwijderd voordat het matras verplaatst kan worden, omdat het omhulsel van het alternatief niet geschikt is om trekkracht als gevolg van hijsen op te vangen. Hierdoor heeft dit alternatief een enkele plus als beoordeling.

Bij het criterium **R8** zijn de alternatieven LA1 en LA3 gelijkwaardig, omdat deze alternatieven op dit criterium gelijk zijn aan het referentiealternatief. Het alternatief LA2 heeft een enkele plus, omdat het in tegenstelling tot beton honderd procent te recycleren is (Brinck, 2016; Cement&Betoncentrum, 2017). Alternatief LA4 heeft drie plussen, omdat de grond en de kunststof in het alternatief eenvoudig te recycleren zijn. De grond kan immers op locatie verwerkt worden. Het kunststof dat als omhulsel gebruikt is kan omgesmolten worden tot nieuw geotextiel en is slechts een klein percentage van het totale volume gebruikte grondstoffen. Het alternatief LA5 heeft een dubbele plus, omdat minder energie benodigd is om de schanskorven te recycleren ten opzichte van het alternatief LA2. Het alternatief LA5 maakt weliswaar gebruik van staal maar dit is net als bij alternatief LA4 een klein percentage van het totale volume. Het betongranulaat in de schanskorven kan gerecycled worden maar kan tot op heden slechts gedeeltelijk hergebruikt worden in nieuw beton.

Stootplaat

In tabel 3 zijn de gegenereerde alternatieven voor de stootplaat beoordeeld. In de onderstaande tekst wordt de beoordeling van de alternatieven toegelicht.

Stootplaat	R1: Weigeren	R2: Heroerverwegen	C1: Ecologische waarde	C2: Sociale waarde	C3: Economische waarde	R3: Verminderen	R4: Hergebruiken	R5: Repareren	R6: Renoveren	R7: Herbesteden	R8: Recyclen	Totaal	Percentage van het totaal
SA0: Betonnen stootplaat												0,00	0,0%
SA1: Stalen stootplaat		=	=	=	=	-	+	-	-	+	+	2,20	5,5%
SA2: Kunststof stootplaat		=	=	=	=	-	-	=	+	+	-	-3,00	-7,5%
SA3: Houten stootplaat		=	=	=	=	=	-	-	-	-	++	-0,50	-1,3%
SA4: Houten stootplaat		=	=	=	=	+	-	=	=	=	-	-1,00	-2,5%

tabel 3: TOM – Stootplaat

Bij het criterium **R1** zijn de alternatieven niet beoordeeld.

Bij criterium **R2** zijn de alternatieven gelijkwaardig aan elkaar ten opzichte van het referentiealternatief, omdat geen van de alternatieven een functie aan het object toevoegt.

Op de criteria **C1 t/m C3** zijn de alternatieven gelijkwaardig aan het referentiealternatief, omdat geen van alle waarde toevoegt aan het systeem.

Bij het criterium **R3** zijn de alternatieven SA1 en SA2 beoordeeld met een enkele min, omdat staal en kunststof een hogere GER-waarde hebben dan beton. Het alternatief SA3 is gelijkwaardig aan het referentiealternatief, omdat de GER-waarde van hout gelijk is aan die van het referentiealternatief. Het alternatief SA4 is beoordeeld met een enkele plus, omdat resthout als toeslagmateriaal wordt gebruikt. Dit voorkomt het gebruik van materialen met een hogere GER-waarde (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2018).

Bij het criterium **R4** heeft het alternatief SA1 een enkele plus als beoordeling, omdat dit alternatief de langste levensduur heeft van de vergeleken alternatieven en daardoor het vaakst hergebruikt kan worden in dezelfde functie. De alternatieven SA2, SA3 en SA4 hebben een enkele min als beoordeling, omdat de levensduur van kunststof, hout en houton minder is dan die van het referentiealternatief (Van Velden, 2011; Frank, Pinter, & Lang, 2009, p. 8; Rijkswaterstaat, 2017, p. 60; Forest Stewardship Council (FSC), z.d.).

Bij het criterium **R5** hebben de alternatieven SA1 en SA3 een enkele min als beoordeling, omdat aangenomen wordt dat deze complexer zijn om te repareren en de reparatie meer energie kost. De alternatieven SA2 en SA4 zijn gelijkwaardig aan het referentiealternatief.

Bij het criterium **R6** hebben de alternatieven SA1 en SA3 een enkele min als beoordeling, omdat aangenomen wordt dat deze complexer zijn om te renoveren en de renovatie meer energie kost. Het alternatief SA2 heeft een enkele plus, omdat aangenomen wordt dat dit alternatief eenvoudiger te renoveren is dan het referentiealternatief. Het alternatief SA4 is gelijkwaardig aan het referentiealternatief, omdat de eigenschappen gelijk zijn.

Bij het criterium **R7** zijn alle alternatieven in vorm nagenoeg gelijk, voor het herbestemmen in een andere functie zonder het alternatief aan te passen zijn er op dit gebied dus geen verschillen. Verschillen zijn er echter wel in de materiaaleigenschappen van de alternatieven. Het alternatief SA1 heeft een enkele plus als beoordeling, omdat het een sterk en tegelijk ook relatief licht materiaal is. Het is dus eenvoudig te vervoeren en te gebruiken in allerlei andere functies waarin platen nodig kunnen zijn. Het alternatief SA2 heeft ook een enkele plus als beoordeling, omdat het net als staal licht en sterk is. Kunststof is lichter dan staal maar zal met hetzelfde volume waarschijnlijk minder sterk zijn. Het alternatief SA3 heeft een enkele min als beoordeling. Het alternatief SA3 is zwaar ten opzichte van zijn sterkte, als het vergeleken wordt met SA1 en SA2. Het alternatief SA4 is gelijkwaardig aan het referentiealternatief, omdat het van beton is geproduceerd en daardoor dezelfde herbestemmingsmogelijkheid heeft.

Bij het criterium **R8** heeft alternatief SA1 een enkele plus gekregen ten opzichte van het referentiealternatief, omdat staal honderd procent te recycelen is, in tegenstelling tot beton (Brinck, 2016; Cement&Betoncentrum, 2017). Het alternatief SA2 is met een enkele min beoordeeld, omdat kunststof weliswaar volledig te recycelen is maar het aantal recycle cycli van kunststof om technische redenen beperkt is (Stichting Bouwkwiteit, 2014, p. 24-25). Het alternatief SA3 heeft een beoordeling van twee plussen, omdat hout van alle alternatieven het eenvoudigst te recycelen is. Het kan in de natuur worden geplaatst en zal zonder dat een **endotherm** proces nodig is composteren en vergroeien in een boom. Alternatief SA4 heeft een enkele min, omdat dit materiaal uit een extra materiaal bestaat ten opzichte van het referentiealternatief, waardoor de energiebehoefte voor het recycelen van beton groter is.

Oplegpijler

In tabel 4 zijn de gegenereerde alternatieven voor de oplegpijler beoordeeld, omdat de alternatieven voor de oplegpijler gelijk zijn aan die van het landhoofd wordt voor de onderbouwing van de beoordelingen verwezen naar het landhoofd.

Oplegpijler	R1: Weigeren	R2: Heroverwegen	C1: Ecologische waarde	C2: Sociale waarde	C3: Economische waarde	R3: Verminderen	R4: Hergebruiken	R5: Repareren	R6: Renoveren	R7: Herbestemmen	R8: Recyclen	Totaal	Percentage van het totaal
OA0: Betonnen oplegpijler												0,00	0,0%
OA1: Mega-legoblokken			=	=	=	=	=	=	++	=	++	8,00	20,1%
OA2: Stalen HE-profielen			-	=	=	=	-	++	-	++	+	5,80	14,6%
OA3: Betonnen oplegpijlerblokken			=	=	=	=	=	++	=	++	=	5,60	14,1%
OA4: Gewapende grond			=	=	=	=	=	+	+	+	+	7,30	18,4%
OA5: Schanskorven			+	+	=	=	=	++	+	++	++	13,35	33,6%

tabel 4: TOM – Oplegpijler

Remmingwerk

In tabel 5 zijn de gegenereerde alternatieven voor het remmingwerk beoordeeld. In de onderstaande tekst wordt de beoordeling van de alternatieven toegelicht.

Remmingwerk	R1: Weigeren	R2: Heroverwegen	C1: Ecologische waarde	C2: Sociale waarde	C3: Economische waarde	R3: Verminderen	R4: Hergebruiken	R5: Repareren	R6: Renoveren	R7: Herbesteden	R8: Recyclen	Totaal	Percentage van het totaal
RA0: Houten remmingwerk												0,00	0,0%
RA1: Stalen remmingwerk		+	+	=	+	-	+	-	=	+	-	4,60	11,6%
RA2: Betonnen remmingwerk		=	=	=	=	+	+	=	=	=	=	0,90	2,3%
RA3: Kunststof remmingwerk		=	=	=	=	-	=	=	=	+	-	-2,60	-6,5%

tabel 5: TOM – Remmingwerk

Bij het criterium **R1** zijn de alternatieven niet beoordeeld.

Bij het criterium **R2** heeft alternatief RA1 een enkele plus, omdat met een stalen buispaal geothermische energie kan worden opgewekt. De alternatieven RA2 en RA3 zijn gelijkwaardig aan het referentiealternatief, omdat er geen functies worden toegevoegd.

Bij het criterium **C1** heeft het alternatief RA1 een enkele plus, omdat een stalen buispaal minder grond verdringend is dan een houten paal. De alternatieven RA2 en RA3 zijn gelijkwaardig aan het referentiealternatief.

Bij het criterium **C2** zijn de alternatieven RA1, RA2 en RA3 gelijkwaardig, omdat de alternatieven geen economische waarde toevoegen aan het systeem ten opzichte van het referentiealternatief.

Bij het criterium **C3** is het alternatief RA1 met een enkele plus beoordeeld, omdat dit alternatief energie kan opwekken door middel van geothermische energie en hieruit een economisch voordeel gehaald kan worden. De alternatieven RA2 en RA3 zijn gelijkwaardig aan het referentiealternatief, omdat deze alternatieven geen economische waarde toevoegen aan het systeem.

Bij het criterium **R3** hebben de alternatieven RA1 en RA3 een enkele min, omdat staal en kunststof een hogere GER-waarde hebben dan het referentiealternatief. Het alternatief RA2 heeft een enkele plus als beoordeling, omdat de GER-waarde van beton lager is dan de GER-waarde van het referentiealternatief (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2018).

Bij het criterium **R4** hebben de alternatieven RA1 en RA2 een enkele plus als beoordeling, omdat beton en staal een langere levensduur hebben dan hout. Het alternatief RA3 is gelijkwaardig aan het referentiealternatief, omdat de levensduur van kunststof mogelijk beter is dan hout maar in ieder geval minder dan beton (Frank, Pinter, & Lang, 2009, p. 8).

Bij het criterium **R5** heeft het alternatief RA1 een enkele min, omdat aangenomen wordt dat het repareren van staal meer energie kost dan het repareren van hout. De alternatieven RA2 en RA3 zijn gelijkwaardig aan het referentiealternatief, aangenomen wordt dat beton en kunststof dezelfde energiebehoefte hebben ten behoeve van reparatie als hout.

Bij het criterium **R6** heeft het alternatief RA1 is gelijkwaardig aan het referentiealternatief, omdat de benodigde energie voor het renoveren van staal gelijk wordt geacht aan dat van hout. De alternatieven RA2 en RA3 zijn gelijkwaardig aan het referentiealternatief, aangenomen wordt dat beton en kunststof dezelfde energiebehoefte hebben ten behoeve van renovatie als hout.

Bij het criterium **R7** hebben de alternatieven RA1 en RA3 een enkele plus, omdat staal en kunststof sterker en lichter zijn dan hout. Daardoor is het eenvoudiger om een stalen of kunststoffen remmingwerk te herbestemmen. Alternatief RA2 is gelijkwaardig aan het referentiealternatief, omdat beton weliswaar sterker is dan hout, maar het ook zwaarder is.

Bij het criterium **R8** heeft het alternatief RA1 een enkele min, omdat het recyclen van staal een proces is dat meer energie vraagt dan het recyclen van hout. Hout kan immers op een natuurlijk wijze gerecycled worden, zonder dat daar energie voor nodig is. Het alternatief RA2 heeft een dubbele min, omdat er tot dusver geen mogelijkheden zijn om beton geheel te recyclen (Cement&Betoncentrum, 2017). Het alternatief RA3 is met een dubbele min beoordeeld omdat kunststof weliswaar volledig te recyclen is maar dat het aantal recycle cycli van kunststof om technische reden beperkt is (Stichting Bouwkwiteit, 2014, p. 24-25).

BIJLAGE I – TOM – A

	Fundering		Landhoofd		Stootplaat		Oplegpijler		Remmingwerk		CS	CP
A1	FA4	11,00	LA5	13,35	SA1	2,20	OA5	13,35	RA1	4,60	44,50	22,0%
A2	FA3	10,00	LA5	13,35	SA1	2,20	OA5	13,35	RA1	4,60	43,50	21,5%
A3	FA2	8,80	LA5	13,35	SA1	2,20	OA5	13,35	RA1	4,60	42,30	20,9%
A4	FA4	11,00	LA5	13,35	SA0	0,00	OA5	13,35	RA1	4,60	42,30	20,9%
A5	FA4	11,00	LA5	13,35	SA3	-0,50	OA5	13,35	RA1	4,60	41,80	20,6%
A6	FA3	10,00	LA5	13,35	SA0	0,00	OA5	13,35	RA1	4,60	41,30	20,4%
A7	FA4	11,00	LA5	13,35	SA4	-1,00	OA5	13,35	RA1	4,60	41,30	20,4%
A8	FA3	10,00	LA5	13,35	SA3	-0,50	OA5	13,35	RA1	4,60	40,80	20,1%
A9	FA4	11,00	LA5	13,35	SA1	2,20	OA5	13,35	RA2	0,90	40,80	20,1%
A10	FA3	10,00	LA5	13,35	SA4	-1,00	OA5	13,35	RA1	4,60	40,30	19,9%
A11	FA2	8,80	LA5	13,35	SA0	0,00	OA5	13,35	RA1	4,60	40,10	19,8%
A12	FA4	11,00	LA5	13,35	SA1	2,20	OA5	13,35	RA0	0,00	39,90	19,7%
A13	FA3	10,00	LA5	13,35	SA1	2,20	OA5	13,35	RA2	0,90	39,80	19,6%
A14	FA2	8,80	LA5	13,35	SA3	-0,50	OA5	13,35	RA1	4,60	39,60	19,5%
A15	FA4	11,00	LA5	13,35	SA2	-3,00	OA5	13,35	RA1	4,60	39,30	19,4%
A16	FA4	11,00	LA1	8,00	SA1	2,20	OA5	13,35	RA1	4,60	39,15	19,3%
A17	FA4	11,00	LA5	13,35	SA1	2,20	OA1	8,00	RA1	4,60	39,15	19,3%
A18	FA2	8,80	LA5	13,35	SA4	-1,00	OA5	13,35	RA1	4,60	39,10	19,3%
A19	FA7	5,55	LA5	13,35	SA1	2,20	OA5	13,35	RA1	4,60	39,05	19,3%
A20	FA3	10,00	LA5	13,35	SA1	2,20	OA5	13,35	RA0	0,00	38,90	19,2%
A21	FA2	8,80	LA5	13,35	SA1	2,20	OA5	13,35	RA2	0,90	38,60	19,0%
A22	FA4	11,00	LA5	13,35	SA0	0,00	OA5	13,35	RA2	0,90	38,60	19,0%
A23	FA4	11,00	LA4	7,30	SA1	2,20	OA5	13,35	RA1	4,60	38,45	19,0%
A24	FA4	11,00	LA5	13,35	SA1	2,20	OA4	7,30	RA1	4,60	38,45	19,0%
A25	FA3	10,00	LA5	13,35	SA2	-3,00	OA5	13,35	RA1	4,60	38,30	18,9%
A26	FA3	10,00	LA1	8,00	SA1	2,20	OA5	13,35	RA1	4,60	38,15	18,8%
A27	FA3	10,00	LA5	13,35	SA1	2,20	OA1	8,00	RA1	4,60	38,15	18,8%
A28	FA4	11,00	LA5	13,35	SA3	-0,50	OA5	13,35	RA2	0,90	38,10	18,8%
A29	FA2	8,80	LA5	13,35	SA1	2,20	OA5	13,35	RA0	0,00	37,70	18,6%
A30	FA4	11,00	LA5	13,35	SA0	0,00	OA5	13,35	RA0	0,00	37,70	18,6%
A31	FA1	4,15	LA5	13,35	SA1	2,20	OA5	13,35	RA1	4,60	37,65	18,6%
A32	FA3	10,00	LA5	13,35	SA0	0,00	OA5	13,35	RA2	0,90	37,60	18,6%
A33	FA4	11,00	LA5	13,35	SA4	-1,00	OA5	13,35	RA2	0,90	37,60	18,6%
A34	FA3	10,00	LA5	13,35	SA1	2,20	OA4	7,30	RA1	4,60	37,45	18,5%
A35	FA3	10,00	LA4	7,30	SA1	2,20	OA5	13,35	RA1	4,60	37,45	18,5%
A36	FA4	11,00	LA5	13,35	SA1	2,20	OA5	13,35	RA3	-2,60	37,30	18,4%
A37	FA4	11,00	LA5	13,35	SA3	-0,50	OA5	13,35	RA0	0,00	37,20	18,4%
A38	FA2	8,80	LA5	13,35	SA2	-3,00	OA5	13,35	RA1	4,60	37,10	18,3%
A39	FA3	10,00	LA5	13,35	SA3	-0,50	OA5	13,35	RA2	0,90	37,10	18,3%
A40	FA4	11,00	LA1	8,00	SA0	0,00	OA5	13,35	RA1	4,60	36,95	18,2%
A41	FA4	11,00	LA2	5,80	SA1	2,20	OA5	13,35	RA1	4,60	36,95	18,2%
A42	FA4	11,00	LA5	13,35	SA0	0,00	OA1	8,00	RA1	4,60	36,95	18,2%
A43	FA4	11,00	LA5	13,35	SA1	2,20	OA2	5,80	RA1	4,60	36,95	18,2%
A44	FA2	8,80	LA1	8,00	SA1	2,20	OA5	13,35	RA1	4,60	36,95	18,2%
A45	FA2	8,80	LA5	13,35	SA1	2,20	OA1	8,00	RA1	4,60	36,95	18,2%
A46	FA7	5,55	LA5	13,35	SA0	0,00	OA5	13,35	RA1	4,60	36,85	18,2%
A47	FA4	11,00	LA3	5,60	SA1	2,20	OA5	13,35	RA1	4,60	36,75	18,1%

BIJLAGE J – TOM – B

	Fundering		Landhoofd		Stootplaat		Oplegpijler		Remmingwerk		CS	CP
B1	FA4	11,00	LA1	8,00	SA1	2,20	OA2	5,80	RA1	4,60	31,60	15,6%
B2	FA4	11,00	LA1	8,00	SA1	2,20	OA3	5,60	RA1	4,60	31,40	15,5%
B3	FA4	11,00	LA4	7,30	SA1	2,20	OA2	5,80	RA1	4,60	30,90	15,2%
B4	FA4	11,00	LA4	7,30	SA1	2,20	OA3	5,60	RA1	4,60	30,70	15,1%
B5	FA3	10,00	LA1	8,00	SA1	2,20	OA2	5,80	RA1	4,60	30,60	15,1%
B6	FA3	10,00	LA1	8,00	SA1	2,20	OA3	5,60	RA1	4,60	30,40	15,0%
B7	FA3	10,00	LA4	7,30	SA1	2,20	OA2	5,80	RA1	4,60	29,90	14,8%
B8	FA3	10,00	LA4	7,30	SA1	2,20	OA3	5,60	RA1	4,60	29,70	14,7%
B9	FA2	8,80	LA1	8,00	SA1	2,20	OA2	5,80	RA1	4,60	29,40	14,5%
B10	FA4	11,00	LA1	8,00	SA0	0,00	OA2	5,80	RA1	4,60	29,40	14,5%
B11	FA4	11,00	LA2	5,80	SA1	2,20	OA2	5,80	RA1	4,60	29,40	14,5%
B12	FA4	11,00	LA1	8,00	SA0	0,00	OA3	5,60	RA1	4,60	29,20	14,4%
B13	FA4	11,00	LA2	5,80	SA1	2,20	OA3	5,60	RA1	4,60	29,20	14,4%
B14	FA4	11,00	LA3	5,60	SA1	2,20	OA2	5,80	RA1	4,60	29,20	14,4%
B15	FA2	8,80	LA1	8,00	SA1	2,20	OA3	5,60	RA1	4,60	29,20	14,4%
B16	FA4	11,00	LA3	5,60	SA1	2,20	OA3	5,60	RA1	4,60	29,00	14,3%
B17	FA4	11,00	LA1	8,00	SA3	-0,50	OA2	5,80	RA1	4,60	28,90	14,3%
B18	FA2	8,80	LA4	7,30	SA1	2,20	OA2	5,80	RA1	4,60	28,70	14,2%
B19	FA4	11,00	LA1	8,00	SA3	-0,50	OA3	5,60	RA1	4,60	28,70	14,2%
B20	FA4	11,00	LA4	7,30	SA0	0,00	OA2	5,80	RA1	4,60	28,70	14,2%
B21	FA4	11,00	LA4	7,30	SA0	0,00	OA3	5,60	RA1	4,60	28,50	14,1%
B22	FA2	8,80	LA4	7,30	SA1	2,20	OA3	5,60	RA1	4,60	28,50	14,1%
B23	FA3	10,00	LA1	8,00	SA0	0,00	OA2	5,80	RA1	4,60	28,40	14,0%
B24	FA3	10,00	LA2	5,80	SA1	2,20	OA2	5,80	RA1	4,60	28,40	14,0%
B25	FA4	11,00	LA1	8,00	SA4	-1,00	OA2	5,80	RA1	4,60	28,40	14,0%
B26	FA3	10,00	LA1	8,00	SA0	0,00	OA3	5,60	RA1	4,60	28,20	13,9%
B27	FA3	10,00	LA2	5,80	SA1	2,20	OA3	5,60	RA1	4,60	28,20	13,9%
B28	FA4	11,00	LA1	8,00	SA4	-1,00	OA3	5,60	RA1	4,60	28,20	13,9%
B29	FA4	11,00	LA4	7,30	SA3	-0,50	OA2	5,80	RA1	4,60	28,20	13,9%
B30	FA3	10,00	LA3	5,60	SA1	2,20	OA2	5,80	RA1	4,60	28,20	13,9%
B31	FA3	10,00	LA3	5,60	SA1	2,20	OA3	5,60	RA1	4,60	28,00	13,8%
B32	FA4	11,00	LA4	7,30	SA3	-0,50	OA3	5,60	RA1	4,60	28,00	13,8%
B33	FA3	10,00	LA1	8,00	SA3	-0,50	OA2	5,80	RA1	4,60	27,90	13,8%
B34	FA4	11,00	LA1	8,00	SA1	2,20	OA2	5,80	RA2	0,90	27,90	13,8%
B35	FA3	10,00	LA1	8,00	SA3	-0,50	OA3	5,60	RA1	4,60	27,70	13,7%
B36	FA4	11,00	LA4	7,30	SA4	-1,00	OA2	5,80	RA1	4,60	27,70	13,7%
B37	FA3	10,00	LA4	7,30	SA0	0,00	OA2	5,80	RA1	4,60	27,70	13,7%
B38	FA4	11,00	LA1	8,00	SA1	2,20	OA3	5,60	RA2	0,90	27,70	13,7%
B39	FA3	10,00	LA4	7,30	SA0	0,00	OA3	5,60	RA1	4,60	27,50	13,6%
B40	FA4	11,00	LA4	7,30	SA4	-1,00	OA3	5,60	RA1	4,60	27,50	13,6%
B41	FA3	10,00	LA1	8,00	SA4	-1,00	OA2	5,80	RA1	4,60	27,40	13,5%
B42	FA3	10,00	LA1	8,00	SA4	-1,00	OA3	5,60	RA1	4,60	27,20	13,4%
B43	FA4	11,00	LA2	5,80	SA0	0,00	OA2	5,80	RA1	4,60	27,20	13,4%
B44	FA2	8,80	LA2	5,80	SA1	2,20	OA2	5,80	RA1	4,60	27,20	13,4%
B45	FA4	11,00	LA4	7,30	SA1	2,20	OA2	5,80	RA2	0,90	27,20	13,4%
B46	FA3	10,00	LA4	7,30	SA3	-0,50	OA2	5,80	RA1	4,60	27,20	13,4%
B47	FA2	8,80	LA1	8,00	SA0	0,00	OA2	5,80	RA1	4,60	27,20	13,4%

BIJLAGE K – SPECIFIEKE RANDVOORWAARDEN

Voor het project 'Bruggen Krommenie' worden op basis van randvoorwaarden aanvullende selecties gemaakt. Voor elke selectie geldt dat het toepasbaar moet zijn op het project 'Bruggen Krommenie'. Dit wil zeggen dat de randvoorwaarde haalbaarheid bij elke TOM wordt meegenomen, daardoor worden de alternatieven, FA7: Zandpaal, LA5: Schanskorven, OA1: Mega-legoblokken, OA4: Gewapende grond en OA5: Schanskorven dus niet meegenomen.

De provincie Noord-Holland zou bijvoorbeeld als aanvullende randvoorwaarde kunnen stellen dat:

- In het licht van recente nieuwsberichten (Kolstein & De Jong, z.d.) over de vermoedheid van stalen bruggen het niet wenselijk is om honderd procent stalen alternatieven toe te passen in het ontwerp van de onderbouw van het project 'Bruggen Krommenie'. Voor deze randvoorwaarde zie TOM – D.
- De zichtbare delen van de onderbouw, zoals landhoofd, oplegpijler en remmingwerk, geen roestbruine kleur mogen hebben, omdat dit niet in de architectonische visie past. Het coaten van stalen onderdelen heeft in het algemeen negatieve effecten op het milieu. Voor deze randvoorwaarde zie TOM – E.
- De objecten van de onderbouw ontworpen moeten zijn op basis van het principe van legoliseren, omdat de provincie Noord-Holland een groot aantal bruggen in beheer heeft. Door alle bruggen volgens dit principe te realiseren kunnen hierdoor de objecten eenvoudiger her bestemd, gerepareerd of gerenoveerd worden. Voor deze randvoorwaarde zie TOM – F.
- De objecten fundering en landhoofd gezamenlijk grond moeten kunnen keren, omdat de overspanningslengte van brugdekken gereduceerd moet worden. Voor deze randvoorwaarde zie TOM – G.

TOM – D

In tabel 1 is een selectie weergegeven van 'alternatievencombinaties' uit de TOM op basis van de randvoorwaarden materiaalsoort. Bij de randvoorwaarde materiaalsoort wordt de materiaalsoort staal uitgesloten en tot slot gerangschikt wordt op de hoogste circulaire score (CS).

	Fundering		Landhoofd		Stootplaat		Oplegpijler		Remmingwerk		CS	CP
D1	FA5	3,65	LA1	8,00	SA0	0,00	OA3	5,60	RA2	0,90	18,15	9,0%
D2	FA5	3,65	LA1	8,00	SA3	-0,50	OA3	5,60	RA2	0,90	17,65	8,7%
D3	FA5	3,65	LA4	7,30	SA0	0,00	OA3	5,60	RA2	0,90	17,45	8,6%
D4	FA5	3,65	LA1	8,00	SA0	0,00	OA3	5,60	RA0	0,00	17,25	8,5%
D5	FA5	3,65	LA1	8,00	SA4	-1,00	OA3	5,60	RA2	0,90	17,15	8,5%

tabel 1: TOM – D: Beoordeling op haalbaarheid en materiaalsoort

Uit tabel 1 blijkt dat D1 de meest circulaire 'alternatievencombinatie' is op basis van de gestelde randvoorwaarden met een circulaire score van 19,35. Deze combinatie bestaat uit een fundering van houten palen (FA5), een landhoofd van mega-legoblokken (LA1), stootplaten van beton (SA0), een oplegpijler van oplegpijlerblokken (OA3) en een remmingwerk van beton (RA2).

De combinatie C2 scoort 0,25 punt lager dan C1 doordat de fundering is opgebouwd uit een kunststof damwand (FA6). De combinatie C3 scoort 0,50 punt lager dan C1, doordat de stootplaten bestaan uit hout (SA3). De combinatie C4 scoort 0,70 punt lager dan C1, doordat het landhoofd is opgebouwd uit gewapende grond (LA4). De combinatie C5 scoort 0,75 punt lager dan C1, doordat de fundering is opgebouwd uit een kunststof damwand (FA6).

TOM – E

In tabel 2 is de selectie weergegeven van ‘alternatievencombinaties’ uit de TOM, waarbij geselecteerd is op basis van randvoorwaarde esthetica. In de laatste kolom staat de circulaire score (CS) weergegeven.

	Fundering	Landhoofd	Stootplaat	Oplegpijler	Remmingwerk	CS	CP
E1	FA4	LA1	SA1	OA3	RA2	27,70	13,7%
E2	FA4	LA4	SA1	OA3	RA2	27,00	13,3%
E3	FA4	LA1	SA1	OA3	RA0	26,80	13,2%
E4	FA3	LA1	SA1	OA3	RA2	26,70	13,2%
E5	FA4	LA4	SA1	OA3	RA0	26,10	12,9%

tabel 2: TOM – E: Beoordeling op haalbaarheid en esthetica

Uit tabel 2 blijkt dat E1 de meest circulaire ‘alternatievencombinatie’ is op basis van de gestelde randvoorwaarden met een circulaire score van 27,70. Deze combinatie bestaat uit een fundering van Stalen buispalen (FA4), een landhoofd van mega-legoblokken (LA1), stootplaten van staal (SA1), een oplegpijler van oplegpijlerblokken (OA3) en een remmingwerk van beton (RA2).

De combinatie E2 scoort 0,70 punt lager dan E1 doordat het landhoofd is opgebouwd uit gewapende grond (LA4). De combinatie E3 scoort 0,90 punt lager dan E1, doordat het remmingwerk is opgebouwd uit hout (RA0). De combinatie E4 scoort één punt lager dan E1, doordat de fundering is opgebouwd uit een stalen combiwand (FA3). De combinatie E5 scoort 1,60 punt lager dan E1, doordat het landhoofd is opgebouwd uit gewapende grond (LA4) en het remmingwerk is opgebouwd uit hout (RA0).

TOM – F

In tabel 3 is de selectie weergegeven van ‘alternatievencombinaties’ uit de TOM, waarbij geselecteerd is op basis van de randvoorwaarde legoliserings. In de laatste kolom staat de circulaire score (CS) weergegeven.

	Fundering	Landhoofd	Stootplaat	Oplegpijler	Remmingwerk	CS	CP
F1	FA4	LA1	SA1	OA2	RA1	31,60	15,6%
F2	FA4	LA1	SA1	OA3	RA1	31,40	15,5%
F3	FA4	LA4	SA1	OA2	RA1	30,90	15,2%
F4	FA4	LA4	SA1	OA3	RA1	30,70	15,1%
F5	FA4	LA1	SA0	OA2	RA1	29,40	14,5%

tabel 3: TOM – F: Beoordeling op haalbaarheid en legoliserings

Uit tabel 3 blijkt dat F1 de meest circulaire ‘alternatievencombinatie’ is op basis van de gestelde randvoorwaarden met een circulaire score van 31,60. Deze combinatie bestaat uit een fundering van stalen buispalen (FA4), een landhoofd van mega-legoblokken (LA1), stootplaten van staal (SA1), een oplegpijler van stalen HE-profielen (OA2) en een remmingwerk van staal (RA1).

De combinatie F2 scoort 0,20 punt lager dan F1, doordat de oplegpijler is opgebouwd uit oplegpijlerblokken (OA3). De combinatie F3 scoort 0,70 punt lager dan F1, doordat het landhoofd is opgebouwd uit gewapende grond (LA4). De combinatie F4 scoort 0,90 punt lager dan F1, doordat het landhoofd is opgebouwd uit gewapende grond (LA4) en de oplegpijler is opgebouwd uit oplegpijlerblokken (OA3). De combinatie F5 scoort 1,20 punt lager dan F1, doordat de stootplaat is opgebouwd uit beton (SA0).

In het licht van recente nieuwsberichten (Kolstein & De Jong, z.d.) over de vermoeidheid van stalen bruggen is het mogelijk dat de opdrachtgever wil overwegen om geen honderd procent stalen alternatieven toe te passen in het ontwerp van de onderbouw van het project 'Bruggen Krommenie'. In het kader van deze nieuwsberichten wordt een TOM gegenereerd waar deze randvoorwaarde op materiaalsoort wordt ingevoerd.

TOM – G

In tabel 4 is de selectie weergegeven van 'alternatievencombinaties' uit de TOM, waarbij geselecteerd is op basis van de randvoorwaarde functies. In de laatste kolom staat de circulaire score (CS) weergegeven.

	Fundering		Landhoofd		Stootplaat		Oplegpijler		Remmingwerk		CS	CP
G1	FA4	11,00	LA1	8,00	SA1	2,20	OA2	5,80	RA1	4,60	31,60	15,6%
G2	FA4	11,00	LA1	8,00	SA1	2,20	OA3	5,60	RA1	4,60	31,40	15,5%
G3	FA4	11,00	LA4	7,30	SA1	2,20	OA2	5,80	RA1	4,60	30,90	15,2%
G4	FA4	11,00	LA4	7,30	SA1	2,20	OA3	5,60	RA1	4,60	30,70	15,1%
G5	FA3	10,00	LA1	8,00	SA1	2,20	OA2	5,80	RA1	4,60	30,60	15,1%

tabel 4: TOM – G: Beoordeling op haalbaarheid en functies

Uit tabel 4 blijkt dat G1 de meest circulaire 'alternatievencombinatie' is op basis van de gestelde randvoorwaarden met een circulaire score van 31,60. Deze combinatie bestaat uit een fundering van stalen buispalen (FA4), een landhoofd van mega-legoblokken (LA1), stootplaten van staal (SA1), een oplegpijler van stalen HE-profielen (OA2) en een remmingwerk van staal (RA1).

De combinatie G2 scoort 0,20 punt lager dan G1, doordat de oplegpijler is opgebouwd uit oplegpijlerblokken (OA3). De combinatie G3 scoort 0,70 punt lager dan G1, doordat het landhoofd is opgebouwd uit gewapende grond (LA4). De combinatie G4 scoort 0,90 punt lager dan G1, doordat het landhoofd is opgebouwd uit gewapende grond (LA4) en de oplegpijler is opgebouwd uit oplegpijlerblokken (OA3). De combinatie G5 scoort één punt lager dan G1, doordat de fundering is opgebouwd uit een stalen combiwand (FA3).