

23 Mei
2019



CIRCULAIR BOUWEN

SCRIPTIE – CIRCULAIR BOUWEN - JASPER BOER & JOHAN KEUKENMEESTER

COLOFON

Document: Scriptie

Formulering van de scriptie voor de afstudeerperiode aan de Hogeschool Arnhem Nijmegen (HAN). Het onderwerp betreft onderzoek naar een circulair ontwerp van een spooronderdoorgang.

Document historie	Versie	Datum	Status	Wijzigingen
	0.11	18-05-2019	Concept	
	1.0	23-05-2019	Definitief	

Auteurs +

(studentnr.):

Jasper Boer

Johan Keukenmeester

Adres:

-

-

Telefoon:

-

-

E-mailadres:

-

-



Begeleider: Dhr. Ing. C. van Weert
Adres: Rudigerstraat 10
Postcode: 5408AB Volkel
Telefoon: 06-38 61 46 71
E-mailadres: cvweert@verhoeven-leenders.nl



School: Hogeschool Arnhem Nijmegen
Faciliteit: Built Environment
Opleiding: Civiele techniek
Afstudeerdocenten: M.J. van As Eerste begeleider
R.H. Visscher Tweede begeleider
Adres: Ruitenberglaan 26, 6826 CC Arnhem



VOORWOORD

Als u meer kennis op wilt doen over circulair bouwen, dan is het lezen van dit hoofdrapport aan te bevelen.

We hebben ons in de periode van februari tot en met juni 2019 mogen verdiepen in circulair bouwen. Dit in het kader van ons afstudeerproject voor de studie Civiele Techniek aan de hogeschool van Arnhem en Nijmegen. Het afstudeeronderzoek heeft plaatsgevonden bij ingenieursbureau Verhoeven en Leenders B.V. te Volkel.

Met dit afstudeerproject is antwoord gegeven op de hoofdvraag:

Hoe ontwerp je een circulaire constructie van een spooronderdoorgang?

Tijdens het literatuuronderzoek bleek hoe breed het begrip circulair bouwen is. In het plan van aanpak zijn de onderwerpen toegelicht en afgebakend aan de hand van de MoSCoW-methode. Tijdens het literatuuronderzoek kwam aan het licht dat materialen bepalend zijn voor de circulariteit. Om deze reden is er een materiaalonderzoek uitgevoerd. In het materiaalonderzoek worden vijf constructieve materialen onderzocht.

Gemotiveerd door dit afstudeeronderzoek wil Jasper zich na deze studie verder gaan verdiepen in constructie middels de master Structural Engineering in Amsterdam.

Johan zal zijn carrière als constructeur doorzetten door het volgen van de master Structural Engineering aan de TU Delft.

Het was een voorrecht om af te studeren bij het gerenommeerde ingenieursbureau Verhoeven & Leenders b.v.. Zij hebben op een prettige manier bijgedragen aan onze huidige kennis van circulair bouwen. We konden altijd terecht bij onze collega's voor vragen, men wilde ons graag helpen. Ook zijn we dankbaar voor de plezierige werksfeer. Hiervoor willen we hen graag bedanken. Zonder hun invloed waren wij niet tot dit resultaat gekomen.

Speciale dank aan de mensen die wij mochten interviewen:

Michael Menting	ABT
Jelle Schaper	Afstudeerder ABT
Abdul Eraslan	Afstudeerder ABT
Mark Verbaten	ABT

Michael, Mark, Jelle en Abdul hebben hun kostbare tijd en veel nuttige informatie aan ons gegeven. Ook zijn we dankbaar voor de gezelligheid die zij meebrachten.

Ook noemen we graag de mensen van de open leeromgeving Rijkswaterstaat.

De open leeromgeving was zeer interessant en de bereidheid om onze vragen te beantwoorden was groot.

Een paar personen willen we in het bijzonder bedanken vanwege hun grote bijdrage aan ons afstudeeronderzoek;

Corné van Weert 1e bedrijfsbegeleider

Corné heeft ons continu gesteund gedurende de afstudeerperiode. Wekelijks nam hij ruim de tijd om ons afstudeerproject uitgebreid te bespreken. Ook gaf hij veel ons veel sturing en inhoudelijke ondersteuning.

Leon Leenders 2e bedrijfsbegeleider

Ook Leon stond altijd voor ons klaar door bijvoorbeeld het geven van feedback op producten en het meedenken voor ons afstudeerproject.

Marianne van As 1e schoolbegeleider

Marianne heeft ons veel steun gegeven op het proces en de daaraan gerelateerde documenten van ons afstudeerproject.

Remmelt Visscher 2e schoolbegeleider

Remmelt heeft ons regelmatig inhoudelijk advies gegeven op het werk en gaf veel nuttige feedback bij vergaderingen.

Wij wensen u veel leesplezier.

Jasper Boer & Johan Keukenmeester
Volkel, 17 mei 2019

SAMENVATTING

In Parijs (2015) is het klimaatakkoord getekend. Hieruit volgt dat er drastische maatregelen nodig zijn om de opwarming van de aarde te beperken tot ruim onder 2 graden Celsius. De huidige economie zorgt voor een grote belasting op het milieu. Er wordt veel afval gecreëerd en niet meer gebruikt. Daarom wil de overheid overstappen van een lineaire economie naar een circulaire economie. De rijksoverheid heeft het Rijksbrede programma “Nederland Circulair in 2050” opgezet om deze transitie mogelijk te maken.

Een transitie naar een circulaire economie betekent ook een transitie in de bouw. De bouw is de laatste jaren veel aan het veranderen, denk maar aan de prefab industrie. Daarnaast wordt er ook selectief gesloopt en worden materialen meer gerecycled en hergebruikt. Het begrip ‘circulair bouwen’ is de laatste twee jaar een steeds bekender begrip geworden. Vorig jaar is het eerste circulaire viaduct gerealiseerd door Rijkswaterstaat. Het is nu een mooie mogelijkheid om aan deze transitie mee te doen.

Het doel van dit onderzoek is het ontwerpen (op schetsniveau) van een circulaire spooronderdoorgang. Uit deze doelstelling volgt de hoofdvraag:

Hoe ontwerp je een circulaire constructie van een spooronderdoorgang?

Om de hoofdvraag gestructureerd te beantwoorden, is het eerst belangrijk om de ins en outs te weten van het begrip circulariteit. Er zijn zes deelvragen opgesteld om de hoofdvraag te beantwoorden:

1. *Wat is circulariteit?*
2. *Welke projecten zijn al uitgevoerd in het kader van circulariteit?*
3. *Welke materialen zijn geschikt voor een circulair ontwerp?*
4. *Hoe wordt circulariteit gemeten?*
5. *Wat zijn de uitgangspunten bij een spooronderdoorgang?*
6. *Hoe wordt een circulair ontwerp gemaakt?*

De onderzoeksmethode die is toegepast is een kwalitatief onderzoek. Het onderzoek is verdeeld in drie deelonderzoeken: ***literatuuronderzoek***, ***materiaalonderzoek*** en ***variantenonderzoek***.

Aan de hand van het literatuur- en materiaalonderzoek zijn de ontwerpprincipes vastgesteld. Daarnaast is een eisenstudie gedaan. Hiermee is de variantenstudie uitgevoerd.

Het kunstwerk ter plaatse van het dek is opgedeeld in 4 objecten: dek, wanden, vloer en fundering. Voor elk object zijn er 2 (fundering 1) varianten ontworpen op schets niveau. Bij elke variant is de focus gelegd op een ander onderdeel zodat het ontwerpproces niet werd beperkt door de vele eisen.

In de keuzematrix is de circulariteit van elke variant bepaald en is gemeten hoe goed elke variant aan de eisen voldoet. Ook zijn de varianten met elkaar vergeleken om zo de voor- en nadelen van elke variant duidelijk te maken.

Vervolgstudies kunnen het literatuur- en materiaalonderzoek gebruiken bij het maken van een nieuw circulair ontwerp. De variantenstudie met keuzematrix is een goede bron van ideeën voor het oplossen van problemen voor een circulair kunstwerk.

ABSTRACT

In Paris (2015), the climate agreement was signed. In light of that agreement, there are drastic measures necessary in order to minimise the runaway greenhouse effect and limit the temperature rise to be low under 2 degrees Celsius. The current economy forms a great burden on the environment. A lot of waste is created and gets no longer used. That is why the Dutch government wants to change the linear economy to a circular economy. Therefore, the central government set up a government-wide program to make this transition possible.

The transition to a circular economy means that there also has to be a transition in the building sector. The building sector has already been changing a lot during the last few years, look at the precast industry for example. In addition, the demolition of structures is happening selectively and materials are being recycled and reused more often. The term 'circular building' has been getting more generally familiar over the past two years. Last year, the first circular designed overpass has been realised by the central government. Now is a great time to participate in this trend.

The goal of this research is to design (on sketch level) a circular railway underpass. From this goal follows the main question:

How does one design a circular construction of a railway underpass?

To answer the main question orderly, it is necessary to know the specifics about the concept 'circularity'. Therefore, for this project there were six sub-questions formulated to answer the main question:

1. *What is circularity?*
2. *In the context of circularity, which projects have already been constructed?*
3. *Which materials are suitable for a circular design?*
4. *How is circularity measured?*
5. *What are the requirements for a railway underpass?*
6. *How does one make a circular design?*

The research method that is applied is a qualitative research. The main research is divided in three sub-objects: **Literature review**, **Material research** and **Variants study**.

Based on the literature review and material research, there were the design principles formulated. Next to that, there has been done a requirements study. With these, the variants study is executed.

The structure at the location of the overpass is divided in 4 objects: roof overpass, walls, floor and foundation. For each object there were two variants made on sketch level. With each variant, during the design process, the focus has been put on a different aspect. That way, the design process was not limited by the many demands.

With the selection matrix the circularity of each variant could be measured. Also is measured how well the variants meet the demands, scores from 1 to 5 were given with each demand. The variants were compared and the pros and cons were made clear.

Follow-up studies can use the literature review and material research (in Dutch) to help to design a new circular construction. The selection matrix and variants study can be a good source for solutions that one comes across while designing a circular construction.

Résumé

Suite à l'accord climatique de Paris (2015) des mesures drastiques sont nécessaires pour limiter le réchauffement climatique à deux degrés. L'économie actuelle a une influence majeure sur l'environnement. Beaucoup de déchets sont produits et ne sont plus utilisés. Par conséquent, le gouvernement veut changer d'une économie linéaire à une économie circulaire. Le gouvernement néerlandais a composé le programme 'les Pays-Bas circulaire en 2050' pour rendre cela possible.

Une transition à une économie circulaire signifie une transition dans la construction aussi. La construction a beaucoup changé ces dernières années, pensez à l'industrie du préfabriqué. En outre, il y a des démolitions sélectives et les matériaux sont plus recyclés et réutilisés. Ces deux dernières années le terme 'bâtiment circulaire' est devenu un terme plus en plus connu. Le premier viaduc circulaire est développé par 'Rijkswaterstaat' l'année dernière. Maintenant il y a une excellente possibilité de participer à cette transition.

Le but de cette recherche est de dessiner (au niveau de croquis) un passage souterrain pour rail circulaire.

Basé sur ce but, la question principale est décrite comme :

Comment élaborer-vous une construction circulaire d'un passage souterrain pour rail ?

Pour répondre à la question principale, c'est important de connaître la définition de circularité. Il y a six sous-questions pour répondre la question principale :

1. Qu'est-ce que la circularité ?
2. Quels projets ont déjà été mis en œuvre dans le cadre de circularité ?
3. Quels matériaux sont capables à un design circulaire ?
4. Comment se mesure la circularité ?
5. Quels sont les fondements d'un passage souterrain pour rail ?
6. Comment fait-on un dessin circulaire ?

La méthodologie de recherche est la recherche qualitative. La recherche est divisée en trois sous-projets de recherche : **recherche documentaire, recherche de matériaux et recherche de variantes.**

Les principes de conception ont été établis sur la base de recherches documentaires et matérielles. En outre, une étude des besoins a été faite. Avec cela, l'étude de variante a été réalisée.

L'œuvre située à l'emplacement du pont est divisée en 3 objets : pont, murs et sol. Pour chaque objet, il existe 2 variantes (étage 4) conçues au niveau de l'esquisse. Dans chaque variante, l'accent était mis sur un composant différent, de sorte que le processus de conception n'était pas limité par les nombreuses exigences.

La matrice de sélection a déterminé la circularité de chaque variante et mesuré à quel point chaque variante remplit des exigences. Les variantes ont également été comparées entre elles afin de clarifier les avantages et les inconvénients de chaque variante.

Les études de suivi peuvent utiliser la littérature et l'étude matérielle lors de la création d'un nouveau dessin circulaire. L'étude des variations avec matrice de choix est une bonne source du concept de problèmes pour une structure circulaire.

تم توقيع اتفاقية المناخ في باريس (2015). ويترتب على ذلك ضرورة اتخاذ تدابير صارمة للحد من ظاهرة الاحتباس الحراري إلى أقل بكثير من درجتين مئويتين. الاقتصاد الحالي يضع عبئًا كبيرًا على البيئة. يتم إنشاء الكثير من النفايات ولم تعد تستخدم. ولهذا السبب تريد الحكومة التحول من الاقتصاد الخطي إلى الاقتصاد الدائري. وضعت الحكومة المركزية البرنامج على نطاق الحكومة "The Circular Netherlands" أو ما يسمى "هولندا الدائرية في عام 2050" لجعل هذا الانتقال ممكنًا.

الانتقال إلى الاقتصاد الدائري يعني أيضًا الانتقال في البناء. لقد تغير البناء كثيرًا في السنوات الأخيرة ، فقط فكر في صناعة المباني الجاهزة. بالإضافة إلى ذلك ، هناك أيضًا عمليات هدم انتقائية ويتم إعادة تدوير المواد وإعادة استخدامها. أصبح مصطلح "مبنى دائري" مصطلحًا معروفًا بشكل متزايد في العاملين الماضيين. تم تحقيق الجسر الدائري الأول من قبل Rijkswaterstaat العام الماضي. إنها الآن فرصة رائعة للمشاركة في هذا الانتقال.

الغرض من هذا البحث هو تصميم (على مستوى الرسم) نفق السكك الحديدية الدائرية. السؤال الرئيسي يأتي من هذا الهدف:

كيف يمكنك تصميم البناء الدائري أو السكك الحديدية السفلية؟

للإجابة على السؤال الرئيسي بشكل منظم ، من الضروري معرفة خصائص وعموميات حول مفهوم "التعميم". لذلك ، تم وضع 6 أسئلة فرعية لهذا المشروع للإجابة على السؤال الرئيسي:

1. ما هو دائرية؟
2. ما هي المشاريع التي تم تنفيذها بالفعل في سياق التعميم؟
3. ما هي المواد المناسبة للتصميم الدائري؟
4. كيف يتم قياس التعميم؟
5. ما هي نقاط الانطلاق لنفق السكك الحديدية؟
6. كيف يتم تصميم دائري؟

طريقة البحث التي تم تطبيقها هي البحث النوعي. ينقسم البحث الرئيسي إلى 3 أشياء فرعية: مراجعة الأدب ، بحث المواد ودراسة المتغيرات.

على أساس مراجعة الأدبيات حول البحوث المادية ، تمت صياغة مبادئ التصميم. بجانب ذلك ، كانت هناك دراسة المتطلبات. مع هذه ، يتم تنفيذ دراسة المتغيرات.

ينقسم الهيكل في موقع الجسر إلى 4 أشياء: جسر السقف والجدران والأرضية والأساس. لكل كائن كان هناك اثنان من المتغيرات المصنوعة في مستوى رسم. مع كل متغير ، خلال إجابات التصميم ، تم التركيز على جانب مختلف. وبهذه الطريقة ، لم يكن إجابات التصميم مقيدة بالعديد من المطالب.

باستخدام مصفوفة التحديد ، يمكن قياس التعميم أو كل متغير. يتم أيضًا قياس مدى تلبية المتغيرات للطلبات ، حيث تم تقديم النتائج من 1 إلى 5 مع كل طلب. تمت مقارنة المتغيرات وإجابات وسليبات واضحة.

يمكن أن تستخدم الدراسات اللاحقة مراجعة الأدبيات والأبحاث المادية (باللغة الهولندية) للمساعدة في تصميم مبنى دائري جديد. يمكن أن تكون دراسة اختيار المصفوفات والمتغيرات مصدرًا جيدًا للحلول التي تأتي أثناء تصميم البناء الدائري.

AFKORTINGEN

<i>EVR</i>	Eco-costs/Value Ratio
<i>LCA</i>	Life Cyclus Analyse
<i>MKI</i>	Milieukostenindicator
<i>MoSCoW</i>	Must have / Should have / Could have / Wont have
<i>NMD</i>	Nationale milieudatabase
<i>PvA</i>	Plan van aanpak
<i>RWS</i>	Rijkswaterstaat
<i>V&L</i>	Verhoeven & Leenders B.V.
<i>TOR</i>	Tilburg, Onderdoorgang Rauwbrakenpad

BEGRIPPENLIJST

Atmosfeer

Het gasvormige gedeelte dat een planeet omgeeft, ook dampkring genoemd. In het geval van de aarde bevindt de atmosfeer zich vooral tegen het aardoppervlak omwille van de gravitatie- of zwaartekracht. De atmosfeer wordt o.a. ingedeeld in de troposfeer, stratosfeer, mesosfeer, ionosfeer en exosfeer.¹

Circulair bouwen

Circulair bouwen is het toepassen van de principes van de circulaire economie op een kunstwerk.

Circulaire economie

Grondstoffen worden efficiënt ingezet en hergebruikt, zonder schadelijke emissies naar het milieu. Als er nieuwe grondstoffen nodig zijn, worden deze op duurzame manier gewonnen en wordt verdere aantasting van de sociale en fysieke leefomgeving en de gezondheid voorkomen. Producten en materialen worden zo ontworpen dat ze kunnen worden hergebruikt met zo min mogelijk waardeverlies en zonder schadelijke emissies naar het milieu.²

Ecosysteem

Geheel van planten en dieren in een gebied en hoe ze in verhouding staan tot elkaar en hun omgeving.¹

Emissies

De term emissies wordt gebruikt voor de uitstoot van broeikasgassen, fijnstof en andere schadelijke stoffen. Ook tijdens de bouw, bij het gebruik of de sloop van een bouwdeel is het beperken van deze emissies van belang, bv. formaldehyde in plaatmaterialen en verduurzamingsmiddelen in geïmpregneerd hout.¹

Eindig

Beperkt beschikbaar.

Eindige grondstof

Een grondstof die beperkt beschikbaar is. De grondstof is niet hernieuwbaar.

Eindige materialen

Een materiaal dat beperkt beschikbaar is. Het materiaal is niet hernieuwbaar.

Grondstof

Een materiaal dat gebruikt wordt in een proces om een product te maken.³

Halffabricaat

Een niet-natuurlijke grondstof of halffabricaat is een bewerkte grondstof, die nog verwerkt moet worden tot een product, bijvoorbeeld een broodje goud waar kettinkjes van gemaakt kunnen worden.³

Hernieuwbare grondstof

Een grondstof die kan worden verbruikt en zonder belasting voor het milieu kan worden vernieuwd.

¹ (Encyclo)

² (Rijksoverheid, 2016)

³ (Bos, 2018)

Klimaatverandering

Verandering van het klimaat op de aarde als gevolg van natuurlijke oorzaken of door activiteiten van de mens.

LCA

In LCA wordt de hele levenscyclus van een product of activiteit bekeken. Van de winning van grondstoffen via productie en (her)gebruik tot en met afvalverwerking. De uitkomst van een LCA-studie is een milieuprofiel: een soort scorelijst met milieueffecten. Aan het milieuprofiel is te zien welke milieueffecten de belangrijkste rol spelen in de levenscyclus.⁴

Lineaire economie

Het traditionele economische systeem dat in feite gebaseerd is op het winnen van grondstoffen, die gebruikt worden voor de productie van artikelen, het gebruik daarvan en tenslotte het afdanken en weggooien ervan na gebruik.⁵

Milieu impact

Gevolgen van een activiteit voor het fysieke milieu, gezien vanuit het belang van de bescherming van mensen, dieren, planten, goederen, water, bodem, lucht en de relaties daartussen, evenals de bescherming van esthetische, natuurwetenschappelijke en cultuurhistorische waarden (Wet milieubeheer).⁶

MoSCoW-methode

Met deze methode kun je in kaart brengen wat er moet worden, zou willen worden, zou kunnen worden en niet zullen worden behandeld.

MH – must have

Deze eisen zijn benodigd om tot het eindresultaat te komen, zonder deze eisen is het product niet bruikbaar.

SH – should have

Deze eisen zijn zeer gewenst voor het onderzoek, maar zijn niet vereist voor een bruikbaar product.

CH – could have

Deze eisen zullen alleen worden uitgevoerd als er voldoende tijd is.

WH – won't have

Deze eisen zullen in dit project buiten beschouwing worden gelaten voor een volgende iteratie.⁷

Niet-natuurlijke grondstof

Zie halffabricaat.

⁴ (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, 2010)

⁵ (DFB)

⁶ (Encyclo)

⁷ (van Vliet, 2007)

Primaire grondstof

We spreken van een natuurlijke of primaire grondstof als deze direct uit de natuur komt, zoals bijvoorbeeld zand en hout. Natuurlijke grondstoffen worden weer onderverdeeld in **eindige en hernieuwbare grondstoffen**. Een voorbeeld van een eindige natuurlijke grondstof is gas. Dit raakt een keer op. Een hernieuwbare natuurlijke grondstof raakt niet snel op. Denk hierbij bijvoorbeeld aan hout.⁸

Secundaire grondstof

Secundaire grondstoffen zijn eindproducten, die opnieuw worden gebruikt. Bijvoorbeeld plastic flessen waar diverse nieuwe producten van worden gemaakt.⁸

Toxische (grond)stof

Een giftige (grond)stof.

⁸ (Bos, 2018)

LEESWIJZER

In de leeswijzer staat in het kort wat er in elk hoofdstuk besproken wordt.

Dikgedrukte woorden worden toegelicht in de begrippenlijst, zie vorig hoofdstuk.

In hoofdstuk 2 komt er aan het licht welke doelstellingen het project heeft. Daarnaast zijn de hoofdvraag en de bijbehorende deelvragen omschreven. In de paragraaf methodologie wordt toegelicht welk onderzoek er is toegepast en hoe deze is uitgevoerd.

Hoofdstuk 3 gaat over de huidige (lineaire) economie. Deze heeft een grote impact op het milieu. Er komen namelijk steeds meer broeikasgassen in de lucht terecht. Hierdoor stijgt de temperatuur op aarde. Dit heeft grote gevolgen voor het klimaat. Er wordt naar een verband gezocht tussen de huidige economie en klimaatverandering.

Mogelijke oplossing voor het klimaatprobleem is de circulaire economie. In hoofdstuk 4 wordt de circulaire economie besproken. Tevens wordt de definitie van de circulaire economie vastgelegd met de bijbehorende principes.

In hoofdstuk 5 wordt de koppeling gemaakt tussen het begrip 'circulaire economie' en 'circulair bouwen'. De opbouw van hoofdstuk 5 is vergelijkbaar met die van hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 wordt de definitie voor circulair bouwen vastgelegd. Ook worden de principes van circulair bouwen behandeld.

Uit voorgaande hoofdstukken is gebleken, dat de materiaalkeuze voor een groot deel bepaalt of een ontwerp circulair is of niet. Om deze reden is er een materiaalonderzoek gedaan om de circulariteit van een aantal materialen te onderzoeken. Uit hoofdstuk 6 volgt welke onderzochte materialen circulair zijn.

Om een circulair ontwerp te maken is er een eisen studie gedaan. Dit wordt kort toegelicht in hoofdstuk 7.1. De belangrijkste punten uit het document 'Uitgangspunten-document' en de dwars- en langsdoorsnede van het project zijn hierin leidend. In hoofdstuk 7.2 worden alle varianten uit de variantenstudie toegelicht met een aanzicht van elke variant.

In hoofdstuk 8 wordt de keuzematrix uitgewerkt. Aan de hand van de keuzematrix is bepaald hoe goed de varianten voldoen aan de gestelde eisen en hoe goed deze scoren ten opzicht van elkaar.

Ten slotte volgt in hoofdstuk 9 de conclusie, in hoofdstuk 10 de discussie en in hoofdstuk 11 de aanbeveling.

Na de bibliografie worden de bijlagen gegeven.

De deelvragen zijn volgens de MoSCoW-methode gedetailleerd in sub-onderwerpen. In Bijlage 2 worden deze tabellen gegeven, en is aangegeven waar elk sub-onderwerp in dit onderzoek aan bod is gekomen.

In 'Bijlage 6 - Antwoorden deelvragen' wordt antwoord gegeven op deelvraag 5 en 6. Deelvragen 1, 2 en 4 zijn beantwoord in het literatuuronderzoek. Deelvraag 3 wordt beantwoord in het materiaalonderzoek.

FIGUREN- EN TABELLENLIJST

Figuur 1: Spooronderdoorgang Rauwbrakenpad te Tilburg (Verhoeven & Leenders).....	1
Figuur 2: Visualisering lineaire economie (PBL, 2016).....	3
Figuur 3: Visualisatie circulaire economie (PBL, 2016).....	5
Figuur 4: Biologische (links) en technologische (rechts) kringloop (Ellen MacArthur Foundation)	7
Figuur 5: Materiaaltoets RHDHV	13
Figuur 6: Algemeen overzicht objecten.....	18
Figuur 7: Variant 1 'Blokken' van het dek.....	19
Figuur 8: Variant 2 'Staal' voor het dek	21
Figuur 9: Variant 1 'hoog' voor de wanden	23
Figuur 10: Langsdoorsnede verbinding boog.	24
Figuur 11: Variant 2 'Stukjes' voor de wanden.....	25
Figuur 12: Langs aanzicht.....	26
Figuur 13: 3D aanzicht staal verbinding excl. beton.....	26
Figuur 14: Anker.....	26
Figuur 15: Variant 1 'Nokkies' van de vloer.	28
Figuur 16: Horizontale verbinding dwarsdoorsnede	29
Figuur 17: Horizontale verbinding langsdoorsnede	29
Figuur 18: Variant 2 'Maximaal gewicht' van de vloer.	31
Figuur 19: Zijaanzicht (diepte richting).....	31
Figuur 20: Knoop Vloer, variant 2 Maximaal gewicht.	32
Figuur 21: Variant 1 'Palen' van de fundering.	34
Figuur 22: Detail koppeling funderingspaal – element.....	35
Figuur 23: Krachtenspel funderingspaal met vloerelement	36
Figuur 24: Slimme verbinding – stap 1	36
Figuur 25: Slimme verbinding – stap 2	36
Figuur 26: Slimme verbinding – stap 3	37
Figuur 27: Niet circulair tunnel stuk t.p.v. dek	38
Figuur 28: Grafiek keuzematrix Dek	41
Figuur 29: Grafiek keuzematrix Wand	42
Figuur 30: Grafiek keuzematrix Vloer	43
Figuur 31: Grafiek keuzematrix Fundering	43
Figuur 32: Benodigde gegevens MCI (Ellen MacArthur Foundation)	70
 Tabel 1: Verschillende constructies en de MKI-waarde	 15
Tabel 2: Verschillende constructies en de EVR-waarde	15
Tabel 3: Circulaire Variabele eisen	40
Tabel 4: Functionele Variabele eisen.....	40

INHOUDSOPGAVE



1	<i>Inleiding</i>	1
2	<i>Onderzoek</i>	2
2.1	Doel	2
2.2	Onderzoeksvragen	2
2.3	Methodologie	2
3	<i>Lineaire economie</i>	3
4	<i>Circulaire economie</i>	4
4.1	Definitie	4
4.2	Principes	5
4.3	Kringlopen	6
5	<i>Circulair bouwen</i>	8
5.1	Ontwerpprincipes	8
6	<i>Materialen</i>	9
6.1	Wat is een grondstof?	9
6.2	Welke materialen zijn circulair?	9
6.2.1	Technologische kringloop	10
6.2.2	Biologische kringloop	12
6.3	Materiaaltoets	13
6.4	Milieu-impact	14
6.4.1	Hoe wordt de milieu-impact gemeten?	14
6.4.2	Vergelijken milieu-impact	14
6.5	Conclusie	15
7	<i>Circulair ontwerp</i>	16
7.1	Eisen studie	16
7.1.1	Spooronderdoorgang	16
7.2	Varianten studie	18
7.2.1	Dek	19
7.2.2	Wanden	23
7.2.3	Vloeren	28
7.2.4	Fundering	34
7.2.5	Niet circulair	38

8	<i>Vergelijken varianten</i>	39
8.1	Eisen	39
8.2	Resultaten	41
8.2.1	Dek	41
8.2.2	Wand	42
8.2.3	Vloer	43
8.2.4	Fundering	43
9	<i>Conclusie</i>	44
	Hoe ontwerp je een circulaire constructie van een spooronderdoorgang?	45
10	<i>Discussie</i>	46
11	<i>Aanbeveling</i>	47
12	<i>Bibliografie</i>	49
13	<i>Bijlagen</i>	50
13.1	Bijlage 1 - Materiaaltoets	50
13.2	Bijlage 2 - Wegwijzer	55
13.3	Bijlage 3 - Uitleg Kesselring methode	62
13.4	Bijlage 4 - Bepalen EVR varianten	63
13.5	Bijlage 5 - Voegen en uitbreidbaarheid	64
13.6	Bijlage 6 - Antwoorden deelvragen	68
	1. Wat is circulariteit?	68
	1. Wat is circulariteit? (vervolg materiaalonderzoek)	68
	2. Welke projecten zijn er uitgevoerd in het kader van circulariteit?	69
	3. Hoe wordt circulariteit gemeten?	70
	4. Welke materialen zijn geschikt voor een circulair ontwerp?	71
	5. Wat zijn de uitgangspunten bij een spooronderdoorgang?	72
	6. Hoe wordt een circulair ontwerp gemaakt?	74

Het onderzoek is tot stand gekomen tijdens het sollicitatiegesprek met Corné en Leon van ingenieursbureau Verhoeven en Leenders B.V., hierna V&L genoemd. Tijdens het overleg van mogelijke onderwerpen kwam het onderwerp circulair bouwen naar voren. Het onderwerp circulair bouwen is de laatste paar jaar erg “hot”. Het kabinet heeft in 2016 het Rijksbrede programma ‘Nederland Circulair in 2050’ opgezet. Dit betekent dat Nederland in 2050 volledig circulair moet zijn. Volledig circulair betekent dat er geen grondstoffen onttrokken mogen worden uit de aarde, dus alle bestaande grondstoffen worden hergebruikt. Dit wordt ook wel de transitie van een lineaire naar een circulaire economie genoemd.

Circulair bouwen, wat afgeleid is van circulaire economie, staat nog in de kinderschoenen. Eind 2018 is in opdracht van Rijkswaterstaat de eerste circulaire viaduct uitgevoerd. Rijkswaterstaat gebruikt dit project als een testlocatie voor circulair bouwen. Het project is “open source”, wat wil zeggen dat de opgedane kennis gedeeld wordt met andere partijen.

Er is georiënteerd welk soort civiel kunstwerk nog niet circulair toegepast is. De spooronderdoorgang Rauwbrakenpad te Tilburg (TOR), ontworpen door V&L, kwam in aanmerking. Zodoende is er besloten om een circulair ontwerp te maken voor een spooronderdoorgang. In Figuur 1 is de TOR weergegeven.



Figuur 1: Spooronderdoorgang Rauwbrakenpad te Tilburg (Verhoeven & Leenders)

In dit hoofdstuk wordt besproken hoe het onderzoek is opgezet. Het begint met een doel. Wat is het doel geweest van het onderzoek? Uit de doelstelling is een hoofdvraag geformuleerd. Het uiteindelijke doel van het onderzoek is om de hoofdvraag te beantwoorden. Om de hoofdvraag gestructureerd te beantwoorden zijn er een aantal deelvragen opgesteld. Aan het eind van het hoofdstuk wordt uitgelegd welke methodologie er is toegepast.

2.1 Doel

Het doel van dit onderzoek is het maken van een circulair ontwerp voor een spooronderdoorgang. Als basis wordt het project Rauwbrakenpad te Tilburg gebruikt. Een circulair ontwerp moet universeel en dus op meerdere locaties toepasbaar zijn.

2.2 Onderzoeksvragen

Uit de doelstelling volgt een hoofdvraag. De hoofdvraag luidt als volgt:

Hoe ontwerp je een circulaire constructie van een spooronderdoorgang?

Om de hoofdvraag te beantwoorden zijn er zes deelvragen opgesteld. Deze deelvragen dienen ervoor om gestructureerd tot een antwoord te komen op de hoofdvraag. De deelvragen zijn als volgt:

1. Wat is circulariteit?
2. Welke projecten zijn al uitgevoerd in het kader van circulariteit?
3. Welke materialen zijn geschikt voor een circulair ontwerp?
4. Hoe wordt circulariteit gemeten?
5. Wat zijn de uitgangspunten bij een spooronderdoorgang?
6. Hoe wordt een circulair ontwerp gemaakt?

De deelvragen zijn gespecificeerd in het PvA aan de hand van de **MoSCoW-methode**. Hoe dit werkt is beschreven in hoofdstuk '4.1 Onderzoeksvragen' van het PvA.

2.3 Methodologie

De methodologie, die is toegepast, is een kwalitatief onderzoek. Het onderzoek is opgedeeld in drie onderdelen:

- literatuuronderzoek
- materiaalonderzoek
- variantenonderzoek

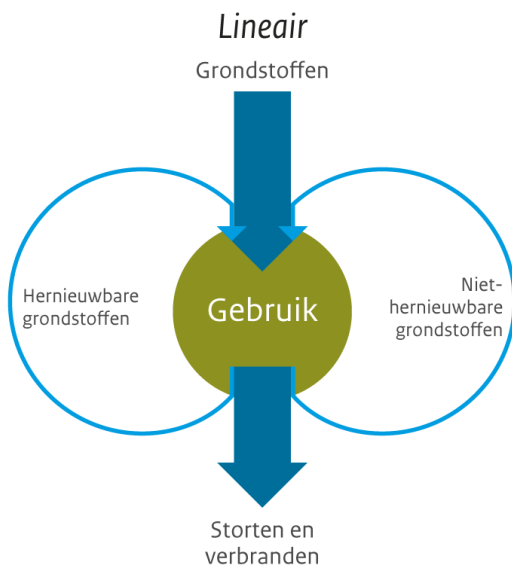
Informatie is verzameld door een literatuur- en materiaalonderzoek uit te voeren. In het literatuuronderzoek is informatie verzameld over deelvraag 1, 2 en 4. In het materiaalonderzoek is informatie gezocht over deelvraag 3. Deelvraag 5 en 6 komen aan bod in het variantenonderzoek.

In het hoofdrapport worden de hoofdlijnen van het literatuur-, materiaal- en variantenonderzoek samengevat.

LINEAIRE ECONOMIE



De huidige economie is een **lineaire economie**. In Figuur 2 is de lineaire economie gevisualiseerd. Grondstoffen worden in grote hoeveelheden gewonnen en verwerkt tot een product. Het product wordt gebruikt en aan het eind van de levensfase weggegooid. Het afval wat dan ontstaat wordt gestort of verbrand. Een klein deel van de producten worden aan het eind van de levensfase hergebruikt of gerecycled.



Figuur 2: Visualisering lineaire economie (PBL, 2016)

Een lineaire economie heeft een grote impact op de beschikbare grondstoffen van de aarde. Het grondstofverbruik van een lineaire economie heeft een grote impact op de beschikbaarheid van grondstoffen. Dit komt doordat grondstoffen in grote hoeveelheden worden gebruikt en aan het eind van de levensfase worden gestort of verbrand. Het verbranden van **toxische grondstoffen** zorgt voor schadelijke **emissies**, die in de **atmosfeer** komen. Emissies zorgen voor **klimaatverandering**. Dit kan het **ecosysteem** overbelasten en uit balans brengen.

Een ander probleem is de groeiende wereldbevolking en de toename van welvaart. Meer mensen, die meer te besteden hebben, kopen meer producten. De materiaalconsumptie neemt toe. De belasting op de grondstoffen van de aarde wordt hierdoor groter, waardoor de belasting op de aarde groter wordt.

CIRCULAIRE ECONOMIE



De problemen van de lineaire economie zijn niet onopgemerkt gebleven. De Rijksoverheid heeft in 2016 het Rijksbrede programma 'Nederland Circulair in 2050' gepresenteerd. Dit is naar aanleiding van het VN-klimaatakkoord dat plaatsvond in Parijs (2015). Het doel van het internationale akkoord is om de opwarming van de aarde te beperken tot ruim onder 2 graden Celsius. Bij het klimaatakkoord waren 186 landen bereid om een bijdrage te leveren aan het nationale klimaatdoel. Deze 186 landen zorgen voor 96,5% uitstoot van de wereld.⁹

Het Rijksbrede programma zorgt voor een transitie van een lineaire naar een **circulaire economie**. Om deze ambitie te halen zijn er twee doelstellingen geformuleerd:

- Het kabinet wil samen met maatschappelijke partners in 2030 een reductie van 50% realiseren op gebruik van primaire grondstoffen.
- In 2050 wil het kabinet met haar maatschappelijke partners grondstoffen efficiënt inzetten en hergebruiken, zonder schadelijke emissies naar het milieu. Nieuwe grondstoffen worden (als dit nodig is) op duurzame wijze gewonnen, zodat aantasting van de sociale en fysieke leefomgeving en gezondheid worden voorkomen.¹⁰

4.1 Definitie

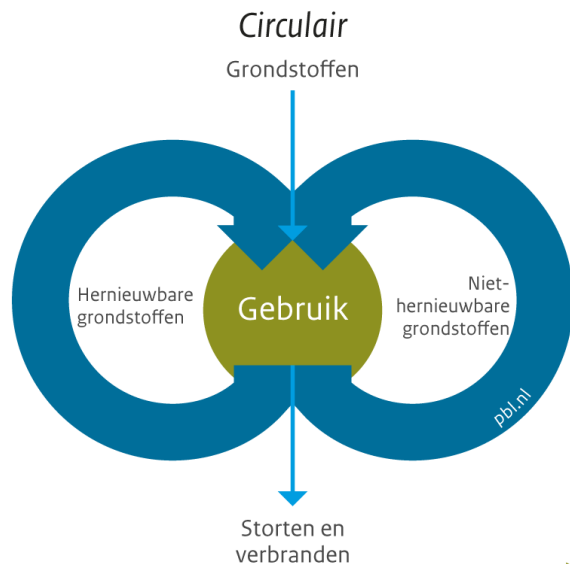
Om te begrijpen hoe deze doelstellingen worden behaald, is het noodzakelijk om de definitie van een circulaire economie goed vast te leggen. In het literatuuronderzoek zijn verschillende definities opgezocht en met elkaar vergeleken. De definitie van de Rijksoverheid¹⁰ bleek het meest geschikt en luidt als volgt:

“Grondstoffen worden efficiënt ingezet en hergebruikt, zonder schadelijke emissies naar het milieu. Als er nieuwe grondstoffen nodig zijn, worden deze op duurzame manier gewonnen en wordt verdere aantasting van de sociale en fysieke leefomgeving en de gezondheid voorkomen. Producten en materialen worden zo ontworpen dat ze kunnen worden hergebruikt met zo min mogelijk waardeverlies en zonder schadelijke emissies naar het milieu.”

Een visualisatie van het begrip 'circulaire economie' ziet er als volgt uit (zie Figuur 3):

⁹ (Rijksoverheid, 2015)

¹⁰ (Rijksoverheid, 2016)



Figuur 3: Visualisatie circulaire economie (PBL, 2016)

In een circulaire economie wordt er dus niet gericht op het gebruik van **primaire grondstoffen**. Bij een circulaire economie gaat het om het hergebruik van producten of grondstoffen. Een nieuw product wordt gecreëerd door gebruik te maken van **secundaire grondstoffen**.

4.2 Principes

Ter ondersteuning van de definitie van een circulaire economie zijn er bijbehorende principes opgesteld. De definities zijn vastgesteld door de principes van verschillende marktpartijen te vergelijken, zie literatuuronderzoek (par 3.3) en samen te vatten tot de volgende principes:

- Grondstoffen efficiënt inzetten;
- Grondstoffen worden duurzaam gewonnen;
- Minder grondstofgebruik door producten en materialen slim te ontwerpen. Belangrijk zijn hergebruik, zo min mogelijk waardeverlies en geen schadelijke emissies naar het milieu. Gesloten kringlopen worden gecreëerd, waarin producten hun waarde zo min mogelijk verliezen;
- Maak gebruik van hernieuwbare energiebronnen.

4.3 Kringlopen

Het systeem van een circulaire economie werkt in kringlopen. Een circulaire economie kan onderverdeeld worden in twee soorten kringlopen: een technische en een biologische kringloop.

Technische kringloop

De definitie van een technische kringloop (ook wel 'techno-cycle' genoemd) luidt¹¹:

"Technische materialen zoals fossiele brandstoffen, kunststoffen en metalen, zijn beperkt beschikbaar en kunnen niet makkelijk opnieuw worden gecreëerd. In de techno-cycle is het van belang dat voorraad van **eindige materialen** goed wordt beheerd. Het 'gebruik' van materialen vervangt de 'consumptie' ervan. Na gebruik worden materialen weer teruggewonnen uit reststromen met een focus op waardebehoud."

Biologische kringloop

De biologische kringloop wordt ook wel bio-cycle genoemd. De definitie luidt¹²:

"Organische materialen zoals katoen, voedsel en water, kunnen door middel van biologische processen worden opgenomen in het ecosysteem en weer opnieuw ontstaan. In de bio-cycle is het van belang om het ecosysteem zo goed mogelijk haar werk te laten doen. Consumptie mag plaatsvinden in deze cycle (voedsel, water, bemesting) zolang de stromen niet besmet raken met toxische stoffen en ecosystemen niet overbelast raken. Dan kunnen hernieuwbare organische grondstoffen opnieuw worden gegenereerd."

Een circulaire economie bestaat uit twee kringlopen. Het grote verschil is dat bij een biologische kringloop de producten zonder probleem de natuur in kunnen vloeien. Er mag dus geen gebruik worden gemaakt van toxische stoffen. Bij een biologische kringloop is waardebehoud en levensduur een stuk minder belangrijk dan bij een technologische kringloop.

Bij een technologische kringloop wordt er gebruik gemaakt van grondstoffen die beperkt beschikbaar zijn en waar ook toxische stoffen in voor kunnen komen. Bij een technologische kringloop is het belangrijk om de waarde van het product zo lang mogelijk hoog te houden. In Figuur 4 zijn beide kringlopen te zien. Aan de linkerzijde staat de biologische kringloop en aan de rechterzijde staat de technologische kringloop.

¹¹ (Het Groene Brein)

¹² (Het Groene Brein)

OUTLINE OF A CIRCULAR ECONOMY

PRINCIPLE

1

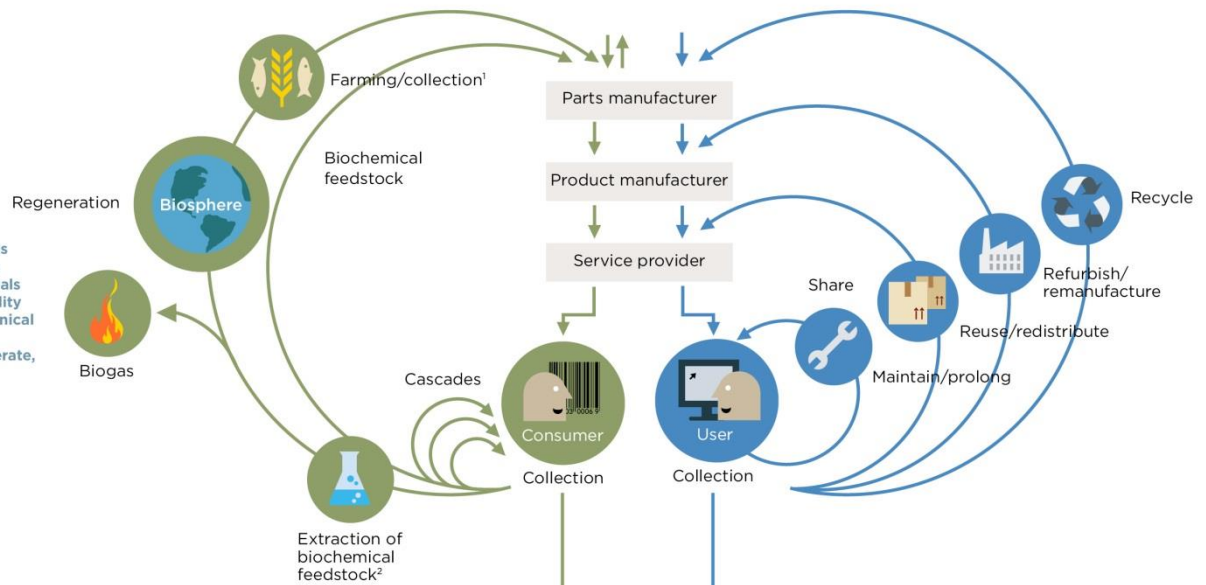
Preserve and enhance natural capital by controlling finite stocks and balancing renewable resource flows
ReSOLVE levers: regenerate, virtualise, exchange



PRINCIPLE

2

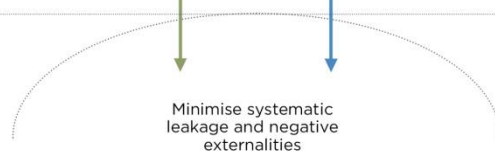
Optimise resource yields by circulating products, components and materials in use at the highest utility at all times in both technical and biological cycles
ReSOLVE levers: regenerate, share, optimise, loop



PRINCIPLE

3

Foster system effectiveness by revealing and designing out negative externalities
All ReSOLVE levers



1. Hunting and fishing
2. Can take both post-harvest and post-consumer waste as an input
Source: Ellen MacArthur Foundation, SUN, and McKinsey Center for Business and Environment; Drawing from Braungart & McDonough, Cradle to Cradle (C2C).

Figuur 4: Biologische (links) en technologische (rechts) kringloop (Ellen MacArthur Foundation)

CIRCULAIR BOUWEN



Circulair bouwen is een begrip gebaseerd op de circulaire economie. Tijdens het literatuuronderzoek is er gezocht naar definities voor het begrip 'circulair bouwen'. Uit het onderzoek bleek dat er nog geen eenduidige definitie is. Daarom is er voor dit project de volgende definitie gesteld:

Circulair bouwen is het toepassen van de principes van de circulaire economie op een kunstwerk.

De principes van een circulaire economie staan uitgewerkt in hoofdstuk 4.2.

5.1 Ontwerpprincipes

De principes van een circulaire economie zijn niet gericht op het maken van een ontwerp. Daarom zijn de principes van een circulaire economie vertaald naar ontwerpprincipes, zie literatuurstudie (par 4.2). Deze principes worden als leidraad gebruikt tijdens het ontwerpen van een circulair bouwwerk. De ontwerpprincipes zijn:

- *Materiaalarm en licht ontwerpen*
Ontwerp voor duurzaam materiaalgebruik
- *Adaptief/flexibel ontwerpen*
Ontwerp toekomstbestendig
- *Modulair en demontabel ontwerpen*
Ontwerp voor meerdere levenscycli
- *Materiaalkeuze en ontwerp optimaliseren op de minste milieubelasting*
Maak duurzaam gebruik van bestaande objecten, materialen, grondstoffen en natuurlijke processen.
Ontwerp voor minimaal grondstof- en energieverbruik in aanleg- en gebruiksfase.
Verleng de levensduur van bestaande objecten.
Voorkomen: niet doen wat niet nodig is.
- *Ontwerp voor optimaal beheer en onderhoud*

Dit zijn de speerpunten voor het maken van een circulair ontwerp. De principes bieden ondersteuning tijdens de ontwerpfase. Keuzes in het ontwerp worden onderbouwd met behulp van de circulaire ontwerpprincipes. Het is belangrijk om over alle vijf de speerpunten na te denken tijdens het ontwerp. Het zal niet altijd mogelijk zijn om alle principes in een ontwerp toe te passen. Een ontwerp waarbij alle ontwerpprincipes toe worden gepast, scoort zeer hoog op circulariteit. Om een circulaire spooronderdoorgang te ontwerpen zullen de bovenstaande ontwerpprincipes als leidraad worden gebruikt om de onderdoorgang te ontwerpen.



Door de transitie van een lineaire naar een circulaire economie verandert het ontwerpproces. Uit de circulaire (ontwerp)principes blijkt dat grondstof-/materiaalgebruik bijdragen aan een hoge score op circulariteit. Tijdens het ontwerpproces van een circulair ontwerp moet er daarom goed worden nagedacht over de materialen die worden toegepast.

6.1 Wat is een grondstof?

Een **grondstof** is een materiaal, dat gebruikt wordt in een proces om een product te maken. Grondstoffen kunnen verdeeld worden in **natuurlijke of primaire grondstoffen, niet-natuurlijke grondstoffen of halffabricaten en secundaire grondstoffen**.¹³

Primaire grondstof

We spreken van een natuurlijke of primaire grondstof als deze direct uit de natuur komt, zoals bijvoorbeeld zand en hout. Natuurlijke grondstoffen worden weer onderverdeeld in **eindige en hernieuwbare grondstoffen**. Een voorbeeld van een eindige natuurlijke grondstof is gas. Dit raakt een keer op. Een hernieuwbare natuurlijke grondstof raakt niet snel op. Denk hierbij bijvoorbeeld aan hout.¹³

Halffabricaat

Een niet-natuurlijke grondstof of halffabricaat is een bewerkte grondstof, die nog verwerkt moet worden tot een product, bijvoorbeeld een broodje goud waar kettinkjes van gemaakt kunnen worden.¹³

Secundaire grondstof

Secundaire grondstoffen zijn eindproducten, die opnieuw worden gebruikt. Bijvoorbeeld plastic flessen waar diverse nieuwe producten van worden gemaakt.¹³

6.2 Welke materialen zijn circulair?

Een circulair ontwerp begint bij circulaire materialen. In het materiaalonderzoek is onderzoek gedaan naar vijf constructieve materialen, namelijk:

- Beton;
- Staal;
- Aluminium;
- Vezelversterkt kunststof;
- Hout.

Er is gekozen voor vijf materialen om de omvang van het materiaalonderzoek beperkt te houden. Er zijn nog meer constructieve materialen zoals baksteen, glas, bamboe, biobased composieten en nog veel meer. De gekozen materialen zijn gefilterd op constructieve eigenschappen en de toepassing als constructief materiaal in een circulaire spooronderdoorgang.

De materiaalkeus bepaalt voor een groot deel of een ontwerp circulair is of niet. Een materiaal kan circuleren in een biologische of technologische kringloop. Er moet eerst bepaald worden wat deze kringlopen precies inhouden, vervolgens in welke kringloop een bepaald materiaal thuishoort.

¹³ (Bos, 2018)

6.2.1 Technologische kringloop

In een technologische kringloop zijn materialen/grondstoffen beperkt beschikbaar en niet hernieuwbaar. Het is daarom belangrijk om te focussen op waardebehoud, hergebruik en recyclebaarheid. Dit zijn meteen de principes voor materialen uit de technologische kringloop.

Voorbeeld

Beton bestaat uit zand, grind, cement en water (en eventuele hulpstoffen). Deze grondstoffen kunnen gewonnen worden, maar niet hernieuwd worden (zoals het bij hout wel kan). Grondstoffen in een technologische kringloop zijn dus eindig. Het is daarom belangrijk om de levensduur van het product beton optimaal te benutten. Dit kan bijvoorbeeld door hergebruik van betonelementen. Aan het eind van de levensduur moet het product recyclebaar zijn. Hoe hoogwaardiger het product gerecycled kan worden, hoe hoger het product scoort op circulariteit.

Hieronder worden de materialen, die behoren tot de technologische kringloop, uit het materiaalonderzoek beoordeeld op de principes van een technologische kringloop. Hieruit zal volgen of het materiaal circulair is of niet.

Beton

Waardebehoud

Beton is een product met een lange levensduur. Betonnen constructies worden in de civiele techniek vaak voor 100 jaar ontworpen. Beton heeft relatief weinig onderhoud nodig. Dit komt doordat het een samenstelling is met een hoge dichtheid. Het probleem bij betonnen constructies is betonrot. Betonrot ontstaat doordat het alkalisch milieu in het beton daalt. Dit gebeurt door het indringen van kooldioxide. Het hoge alkalische milieu daalt tot een niveau waar wapening niet meer wordt beschermd, waardoor het kan gaan corroderen. Als er water bij komt zorgt dit voor een transport van ionen. Hierdoor spreidt de roest zich in de wapening. Een andere vorm van aantasting is 'carbonatie'. Carbonatie gebeurt doordat koolzuur uit de lucht het beton aantast. De pH-waarde van het beton gaat omlaag. Als dit de wapening bereikt, gaat de wapening corroderen.

Hergebruik

Betonelementen zijn goed herbruikbaar. Er moet wel tijdens de ontwerpfase over hergebruik nagedacht zijn. Het gaat dan voornamelijk over de verbindingen tussen elementen. Het is gebruikelijk (en makkelijk) om betonelementen aan elkaar te storten om een vaste verbinding te creëren, die veel kracht op kan nemen. Hergebruik van elementen wordt lastiger als de elementen aan elkaar zijn gestort. De elementen zijn dan niet zonder schade te hergebruiken. Er moeten dus slimme verbindingen ontworpen worden, die demontabel zijn. Hier is de prefab-industrie de laatste jaren veel mee bezig.

Recycling

Een oud kunstwerk wordt gesloopt en gerecycled. Het betongranulaat, dat verkregen wordt uit het recycling proces, wordt gebruikt als fundatiemateriaal onder wegen. Dit is een laagwaardige toepassing. Een nieuw kunstwerk wordt van primair beton gemaakt. Dit komt omdat de vraag naar fundatiemateriaal groot is. Daarnaast zijn ontwerpers en constructeurs nog niet gewend om secundair toeslagmateriaal te gebruiken in een nieuw ontwerp.

Beton is goed te recyclen. In een traditionele breker wordt het beton gebroken tot betongranulaat. De wapening wordt er 'uitgevist' met een magneet. Het betongranulaat wordt toegepast als fundatiemateriaal onder wegen. De wapening kan weer omgesmolten worden tot staal. Dit kan vervolgens voor diverse toepassingen worden gebruikt.

Een innovatieve breker, genaamd SlimBreken, maakt het mogelijk om beton te recyclen naar de oorspronkelijke bouwgrondstoffen. Deze secundaire bouwgrondstoffen kunnen weer worden gebruikt om secundair beton te maken.

Staal

Waardebehoud

De levensduur van stalenconstructies is ruimschoots 100 jaar. Stalenconstructies hebben relatief veel onderhoud nodig. Dit komt omdat staal gevoelig is voor corrosie. Dit wordt tegen gegaan door het staal te coaten of te verven. Het is belangrijk om de coating/verf goed te onderhouden, zodat er geen corrosie optreedt in de staalconstructie.

Hergebruik

Stalenconstructies zijn makkelijk op te bouwen en te demonteren. Dit komt, omdat er vaak gebruik wordt gemaakt van demontabele verbindingen. Dit maakt hergebruik van stalenconstructies goed mogelijk.

Recycling

Staal is goed te recyclen. Het recyclingproces van staal bestaat uit het sorteren van verschillende staalsoorten. De coating wordt verwijderd en het staal dat overblijft wordt omgesmolten. De gerecyclede coating kan worden hergebruikt voor een nieuwe coating. Van het omgesmolten staal kunnen nieuwe staalconstructies gemaakt worden.

Aluminium

Waardebehoud

Aluminium is een relatief zacht metaal. Aluminium heeft een hoge corrosieweerstand, waardoor corrosie nauwelijks voorkomt. Aluminium heeft in de bouw doorgaans een levensduur van 60 jaar. Dit is 40 jaar minder dan een stalenconstructie. Daarentegen heeft aluminium minder onderhoud nodig.

Hergebruik

Aluminium is in dit opzicht vergelijkbaar met staal. Aluminium is net als staal gietbaar, waardoor oneindig veel verschillende objecten maakbaar zijn.

Recycling

Aluminium is volledig recyclebaar. Aluminium is om te smelten en kan daarna in verschillende vormen worden gegoten. Aandachtspunt is dat legeringen niet ongecontroleerd vermengd worden. Hierdoor kunnen de eigenschappen van het gerecycled aluminium veranderen.

Vezelversterkt kunststof

Waardebehoud

Vezelversterkt kunststof is een materiaal met een levensduur van circa 100 jaar. Er zijn veel verschillende soorten vezelversterkt kunststof. Tussen de verschillende soorten kan veel verschil in eigenschappen zitten. Vezelversterkt kunststof staat bekend om haar lange en onderhoudsvrije levensduur.

Hergebruik

Vezelversterkte kunststofconstructies worden (meestal) niet demontabel gebouwd. Dit komt omdat verbindingen van vezelversterkt kunststof lastig te realiseren zijn. Het materiaal kan nauwelijks drukkrachten

opnemen. Daarentegen kan het hoge trekkrachten opvangen. Verbinding van vezelversterkt kunststof zijn niet efficiënt. Dit komt omdat in een verbinding er bijna altijd drukkrachten aanwezig zijn. Omdat vezelversterkt kunststof nauwelijks drukkracht op kan nemen zal de verbinding op druk bezwijken. Het is dus belangrijk om drukkrachten in de verbinding te voorkomen. Een andere oplossing is de verbinding van een ander materiaal maken.

Recycling

Vezelversterkte kunststoffen zijn laagwaardig recyclebaar. Een van de methodes is versnipperen. De kunststof wordt versnipperd tot kleine snippers, die verwerkt kunnen worden in beton of asfalt. Dit is een laagwaardigere toepassingen dan het was. Het hoogwaardig recyclen van vezelversterkt kunststof is (nog) niet mogelijk.

6.2.2 Biologische kringloop

Materialen uit de biologische kringloop circuleren anders dan in een technologische kringloop. De materialen zijn natuurlijk (biobased) en hernieuwbaar. Het is belangrijk dat de materialen niet-toxisch zijn. Toxische materialen vervuilen de biologische kringloop. Toxische stoffen zijn belastend voor de natuur.

Voorbeeld

Een voorbeeld van een biologisch materiaal is hout. Hout groeit met behulp van moeder natuur. De grondstof hout is hernieuwbaar, waardoor er andere principes gelden dan bij een materiaal uit de technologische kringloop. Materialen uit de biologische kringloop mogen niet toxisch zijn. Toxische stoffen zorgen ervoor dat het materiaal niet meer veilig terug kan vloeien in de natuur. De circulariteit van het materiaal gaat hierdoor omlaag.

Hout

Natuurlijk

Hout is een materiaal geproduceerd door de natuur. De tussenkomst van mens is niet nodig om hout te laten groeien. Hout is een natuurlijk materiaal.

Hernieuwbaar

Hout groeit in de natuur zonder de tussenkomst van de mens. Hierdoor is het hernieuwbaar. Er moet wel opgelet worden dat hout niet te snel en teveel wordt gekapt. Als er meer gekapt wordt dan erbij groeit, belast dit het milieu. Om deze reden zijn er keurmerken opgesteld (zoals FSC en PEFC) voor duurzaam bosbeheer.

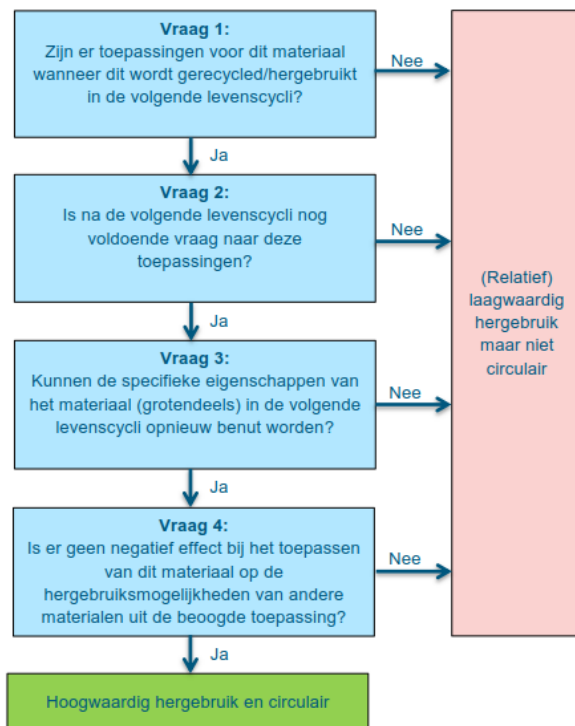
Niet-toxisch

Hout is van zichzelf niet toxisch. Veel hout wordt “verduurzaamd” door het te impregneren. Impregnatie gebeurt door het toevoegen van creosoten olie of wolmanzouten. Dit zijn chemische stoffen, die schadelijk zijn voor het milieu. Een andere vorm van het verduurzamen van hout is verven of lakken. Dit is doorgaans ook schadelijk voor het milieu.

6.3 Materiaaltoets

De materiaaltoets is een andere manier om te toetsen of een materiaal circulair is. Deze toets bestaat uit vier gesloten vragen. Als het antwoord op elke vraag 'ja' is, dan is het materiaal hoogwaardig herbruikbaar en circulair. Als het antwoord op één van de vragen 'nee' is, dan is het materiaal laagwaardig herbruikbaar en niet circulair.

De materiaaltoets is uitgewerkt in 'Bijlage 1 - Materiaaltoets'.



Figuur 5: Materiaaltoets RHDHV

6.4 Milieu-impact

Een circulair ontwerp bestaat uit materialen die natuurlijk (biobased) zijn of uit technologische materialen die hoogwaardig recyclebaar zijn. Maar hoe zit het met de **milieu-impact**? Eén van de doelen van een circulaire economie is namelijk het verlagen van de milieu-impact. Daarom is er tijdens het materiaalonderzoek ook gekeken naar de milieu-impact van de vijf materialen.

6.4.1 Hoe wordt de milieu-impact gemeten?

MKI

De milieu-impact wordt in Nederland doorgaans bepaald met de Milieu Kosten Indicator (MKI). MKI heeft de volgende definitie¹⁴:

“De MKI-waarde staat voor de kosten die gemaakt zouden moeten worden als de negatieve milieu-impact van het product moeten worden vermeden met daarvoor reguliere oplossingen. Hoe lager de MKI-waarde, hoe lager de milieu-impact.”

Met behulp van een rekeninstrument is de MKI-waarde van een bouwwerk te bepalen. Voor GWW-bouwwerken wordt het rekeninstrument DuboCalc gebruikt. DuboCalc is een rekeninstrument ontwikkeld door Rijkswaterstaat. DuboCalc maakt gebruik van gegevens uit de Nationale Milieu Database (NMD). In de NMD staan gegevens verwerkt van een product of materiaal. De gegevens zijn bepaald met een combinatie van levenscyclusanalyses (**LCA's**) gespecificeerd in de SBK Bepalingsmethode Milieuprestatie Gebouwen en Bouwwerken. In een LCA wordt de gehele levenscyclus van een product of materiaal geanalyseerd. DuboCalc berekent alle effecten van het materiaal- en energieverbruik van wieg tot graf.

Eco-costs

Een andere mogelijkheid is de Eco-costs/Value Ratio (EVR). De EVR zijn kosten, die gemaakt moeten worden om de milieuvervuiling en de uitputting van materialen in onze wereld terug te dringen tot een niveau dat in overeenstemming is met het draagvermogen van onze aarde. Hoe de EVR precies in elkaar zit wordt uitgelegd in het document 'Literatuuronderzoek', paragraaf 6.3.5.

6.4.2 Vergelijken milieu-impact

Milieu-impact waarden worden doorgaans gegeven in m³ of kg. De milieu-impact waarden (MKI en EVR) van een materiaal zijn niet zomaar met elkaar te vergelijken. Voor constructieve doeleinden is één kg staal niet te vergelijken met één kg hout. Dit komt omdat bij staal veel minder materiaal nodig is om dezelfde overspanning te halen dan bij hout. Om die reden is er een basis mechanicamodel aangenomen om verschillende constructies uit te rekenen. Per materiaal is het basis mechanicamodel doorgerekend. Uit de berekeningen volgen de afmetingen die nodig zijn voor de ligger. De afmetingen zijn om te rekenen naar de gewenste eenheid (kg of m³). Met deze methode wordt een objectieve vergelijking gemaakt tussen de verschillende materialen. De uitkomsten zijn weergegeven in Tabel 1 en Tabel 2. Hoe lager de waarde, hoe beter dit is voor het milieu.

¹⁴ (Bouw Circulair, 2018)

MKI

Constructie	MKI
Hardhout met FSC-keurmerk	65
Betonligger, voorspanwapening	67
Hybride beton	147
Staal S235	153
Staal- betonligger, staalwapening	192
Betonligger, staalwapening	212
Staal spaceframe	366
Staalvezelversterkt beton	1261
Aluminium 6082-T6*	-
Betonligger, glasvezelwapening*	-

Tabel 1: Verschillende constructies en de MKI-waarde

*Geen gegevens beschikbaar in DuboCalc

EVR

Constructie	EVR
Betonligger, glasvezelwapening	104
Hardhout met FSC-keurmerk	136
Betonligger, voorspanwapening	221
Hybride beton	245
Betonligger, staalwapening	477
Staal S235	559
Staal- betonligger, staalwapening	602
Staalvezelversterkt beton	954
Aluminium 6082-T6	1283
Staal spaceframe	1338

Tabel 2: Verschillende constructies en de EVR-waarde

Vezelversterkt kunststof is niet meegenomen, omdat het materiaal niet circulair is en de berekening te complex.

6.5 Conclusie

Een aandachtspunt van een circulair ontwerp is de materiaalkeus. Het materiaal bepaalt voor een groot deel of het kunstwerk circulair is of niet. Materialen worden opgesplitst in een technologische en biologische kringloop. Materialen in een technologische kringloop zijn eindig. In een technologische kringloop wordt er vooral gericht op waardebehoud, hergebruik en recyclebaarheid. In een biologische kringloop dient het materiaal natuurlijk, hernieuwbaar en niet-toxisch te zijn.

Welke materialen zijn circulair?

De volgende materialen zijn circulair:

- Beton
- Staal
- Aluminium
- Hout

Van het bovenstaande rijtje hebben beton en hout de laagste milieu-impact waarde (in een liggerconstructie).



7.1 Eisen studie

7.1.1 Spooronderdoorgang

Uitgangspunten-document

Er is een technisch document opgesteld waarin de onderwerpen voor dit project worden uitgewerkt. Dit document is het uitgangspunten document.

Hierin worden behandeld; De circulaire ontwerpprincipes, toegepaste software, levensduur, omschrijving constructie-ontwerp, de benodigde dimensies, brandwerendheid, materiaalspecificaties, de belastingen die van toepassing kunnen zijn, vermoeiing en de vervormings- en trilling eisen.

Ontwerp algemeen

In eerste instantie zou er een fietstunnel worden ontworpen, met het project TOR als uitgangspunt. Tijdens het proces is hier toch van afgeweken. Dit, omdat de uitbreidbaarheid van de onderdoorgang erg belangrijk was. Een uitbreiding van een fietstunnel wordt als niet realistisch gezien. Een uitbreiding van een onderdoorgang voor snelverkeer wel. Om deze rede is er verder gegaan met een onderdoorgang voor snelverkeer.

Het project wordt ontworpen met een levensduur van 200 jaar en zowel het spoordek als de onderbouw in gevolgklasse CC3. De gehanteerde belasting factoren worden in het document 'Uitgangspunten-document' uitgewerkt.

Er wordt gekozen om een ontwerp te maken dat altijd op palen gefundeerd dient te worden. Dit ontwerp kan gemakkelijk aangepast worden naar een fundering op staal.

Het principe van een '*PlasticRoad*', (VolkerWessels, 2018) , zal toegepast worden voor de wegconstructie. Deze is opgebouwd uit geprefabriceerde elementen. Zodoende is de wegconstructie demontabel en zijn de onderliggende elementen goed toegankelijk. Meer informatie over dit principe is toegankelijk op de website van VolkerWessels.

Niveau's

Het circulair ontwerp wordt op vier niveaus bekeken: kunstwerk-, object-, element- en materiaalniveau. Voor de materiaalkeuze is een materiaalonderzoek gedaan, zie document 'Materiaalonderzoek'. Er wordt ontworpen op demonteerbaarheid. Ook de afmetingen/gewicht van de elementen voor transport is van belang. Op object niveau dienen de elementen waterdicht verbonden te kunnen worden.

De mogelijke constructieve verbindingen tussen objecten op kunstwerkniveau is behandeld in het document 'Mechanica model'.

Er moet gestreefd worden naar een zo laag mogelijke **EVR** en een zo lang mogelijke levensduur. Op kunstwerk niveau moet het ontwerp voldoen aan de dimensies gegeven in de langs- en dwarsdoorsnede, zie hiervoor tekening 'Doorsneden'.

Verkeerstromen

Voor diverse verkeerstromen zijn de benodigde doorsnedes onderzocht. Dit wordt gedaan in het document 'Uitgangspunten-document' en aan de hand van tekening 'doorsnedes verkeerstromen'. Voor het circulair ontwerp is gekozen voor alleen spoorverkeer over het dek dat uitbreidbaar is van 2 naar 3 sporen. Er geldt snelverkeer voor de onderdoorgang die uitgebreid kan worden van 2 naar 3 rijbanen. De dwars- en langsdoorsnede worden gegeven in tekening 'Doorsnedes'. Hierin staat welke minimale vrije ruimtes nodig zijn in het ontwerp. De verkeerstromen zullen in dit ontwerp haaks kruisen.

Belastingen

De belastingen zijn verdeeld in belastinggevallen, BG-1 t/m BG-16. Deze worden uitgewerkt in het document 'Uitgangspunten-document'. Deze belastinggevallen zijn voor een algemene situatie. Voor een vervolg onderzoek kunnen deze het beste gebruikt worden. Voor dit project zijn de belastinggevallen verder gespecificeerd en samengevat. Dit wordt gedaan in bijlage 3 van het document 'Uitgangspunten-document'. De volgende belastinggevallen worden behandeld:

Blijvende belasting

BG-1 Eigen gewicht, BG-2 Rustende belasting, BG-3 Gronddrukken, BG-4 Grondwaterdruk

Opgelegde belastingen

Spoorbelastingen

Verticaal: BG-5 Spoorverkeersbelasting: BG-5a = SW/2, BG-5b = LM71

BG-6 Belasting op inspectie pad

Horizontaal

BG-7 Remmen en aanzetten

BG-8 Zijdelingse stoot

Belastingen fiets- en voetpaden

Verticaal

BG-9 Gelijkmatic verdeeld

BG-10 Geconcentreerde belasting

Horizontaal

BG-12 Horizontaal fiets- en voetpad

Belastingen snelverkeer

BG-13 Verticaal

BG-14 Horizontaal

BG-15 Windbelasting, BG-16 Temperatuur

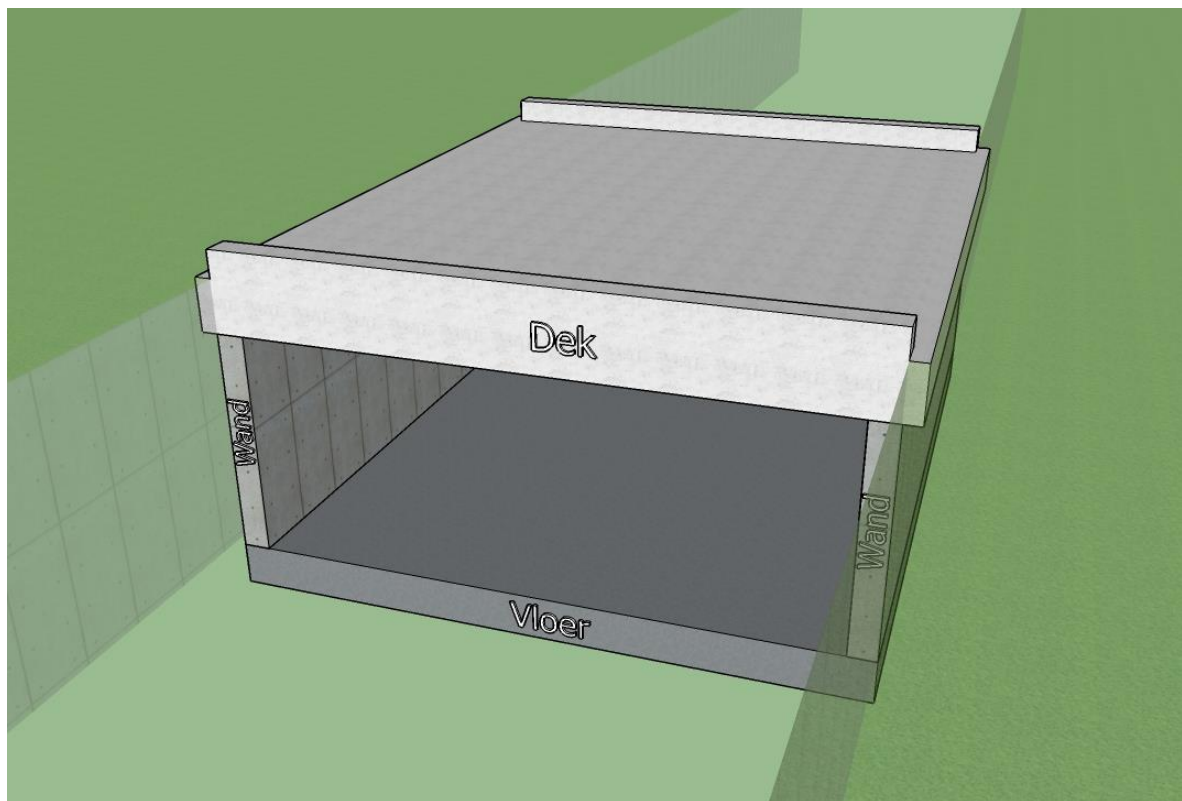
De schuingedrukte belasting gevallen zijn niet meegenomen in de ontwerpberekeningen van de variantenstudie. De onderstreepte zijn wel meegenomen.

Er is bij dit project geen fietspad van toepassing. Ook worden alle horizontale krachten niet meegenomen in de berekeningen. Wel zijn de grootte van deze krachten bepaald in het document 'Uitgangspunten-document', bijlage 3, en is de principe werking van deze belastingen meegenomen in het ontwerp.

7.2 Varianten studie

Het kunstwerk is opgedeeld in 4 **objecten**: dek, wanden, vloer en fundering, zie Figuur 6. Van alle objecten zijn 2 varianten gemaakt, van de fundering 1.

Elke variant is uitgewerkt in een berekeningsrapport. Deze zijn gegeven in het document 'Berekeningsrapportages Varianten'.



Figuur 6: Algemeen overzicht objecten.

Diepgang

Bij het bedenken van een nieuw innovatief ontwerp is het lastig om tijdens het ontwerpproces met alle aspecten en uitdagingen rekening te houden. Daarom is er bij elke variant gefocust op één of meerdere problemen. Het oplossen van de waterdichtheid bij de demontabele knopen is bijvoorbeeld een uitdaging wat niet bij elke variant behandeld zal worden. Ook zal bij de vloer elke variant op een ander onderdeel ontworpen worden.

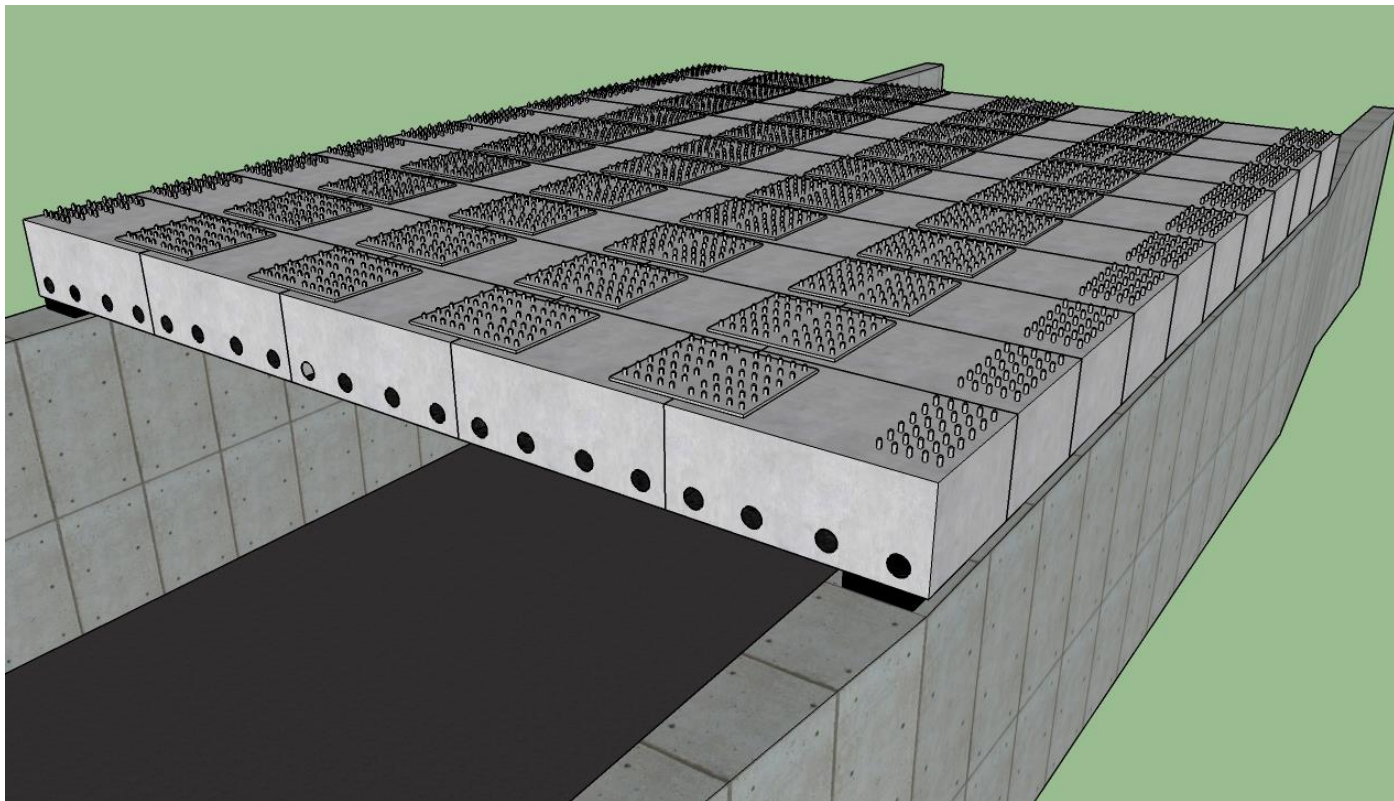
Een variant wordt op schetsniveau uitgewerkt. Bij een aantal worden ook berekeningen uitgevoerd om een beter beeld te krijgen van het betreffende onderdeel. Zo worden de constructieafmetingen op hoofdlijnen gecontroleerd op moment- en dwarskrachtcapaciteit.

7.2.1 Dek

Voor het dek zijn 2 varianten ontworpen. De eerste variant is geïnspireerd door het circulair viaduct van RWS, zie document 'Literatuuronderzoek'. Bij de tweede variant is alleen staal toegepast.

Variant 1 - Blokken

In deze variant voor het object '1. Dek' bestaat het dek in lengte en breedte richting uit losse betonblokken. Hierdoor is deze demontabel en uitbreidbaar.



Figuur 7: Variant 1 'Blokken' van het dek

Materiaal

De betonblokken bevatten traditionele wapening en zijn met staalvezels versterkt, dit wordt ook wel hybride beton genoemd. Voor de verbinding worden stalen ankers en een staalplaat toegepast. De elementen worden in dwarsrichting verbonden met voorspanwapening.

Dimensies

De afmetingen van één betonblok bedragen: $l \times b \times h = 2500 \times 1500 \times 800$ mm. Volgens de langs- en dwarsdoorsnede van het project zijn er 5 elementen nodig voor de overspanningen en 10 elementen voor de breedte van het dek, totaal 50 elementen.

Verbindingen

In de betonblokken worden ankers meegestort die aan de boven- en onderkant uitsteken. Op deze ankers is schroefdraad aanwezig. Een staalplaat wordt op de ankers gebout en geeft de trekkracht over ten gevolge van het moment. De staalplaat kan aan de boven- en onderzijde worden geplaatst zodat er ook een negatief moment opgenomen kan worden. Zo kan er in een nieuw ontwerp, bij hergebruik, ook kolommen worden toegepast en is de variant niet beperkt tot de overspanning in dit ontwerp.

Circulariteit

Uit het **materiaalonderzoek** is gebleken dat staalvezel versterkt beton lastiger te recyclen is dan traditioneel beton. Echter blijkt uit het **materiaalonderzoek** ook dat het beton door de staalvezels robuuster wordt en krijgen de elementen een langere levensduur. Als het voor de juiste constructie wordt toegepast, is staalvezelbeton meer circulair.

Deze variant is te demonteren tot blokken van $l \times b \times h = 2500 \times 1000 \times 800$ mm. Ook is er rekening gehouden met de circulaire ontwerpprincipes zoals levensduur. Echter door te ontwerpen in elementen is er meer constructie materiaal nodig. Het gebruik van meer materiaal heeft meer milieukosten. De staalverbinding heeft meer onderhoud nodig dan het beton (om de 10 jaar coaten), anders reduceert dit de levensduur van het kunst werk significant.

Ten opzichte van het circulaire viaduct van RWS is er meer materiaal toegepast. In een vervolgstudie kan onderzocht worden hoe het materiaalgebruik geoptimaliseerd kan worden bij deze verbinding.

Aandachtspunten

Totaal ontwerp

Zoals deze variant nu is ontworpen, geeft het dek geen steunpunt aan de bovenkant van de wanden. Dit zou wel mogelijk kunnen zijn, aangezien het dek ook aan de bovenzijde te verbinden is. Deze variant kan een negatief moment opnemen. Er zal dan ook een normaalkracht bij komen, wat hier geen probleem is.

Levensduur

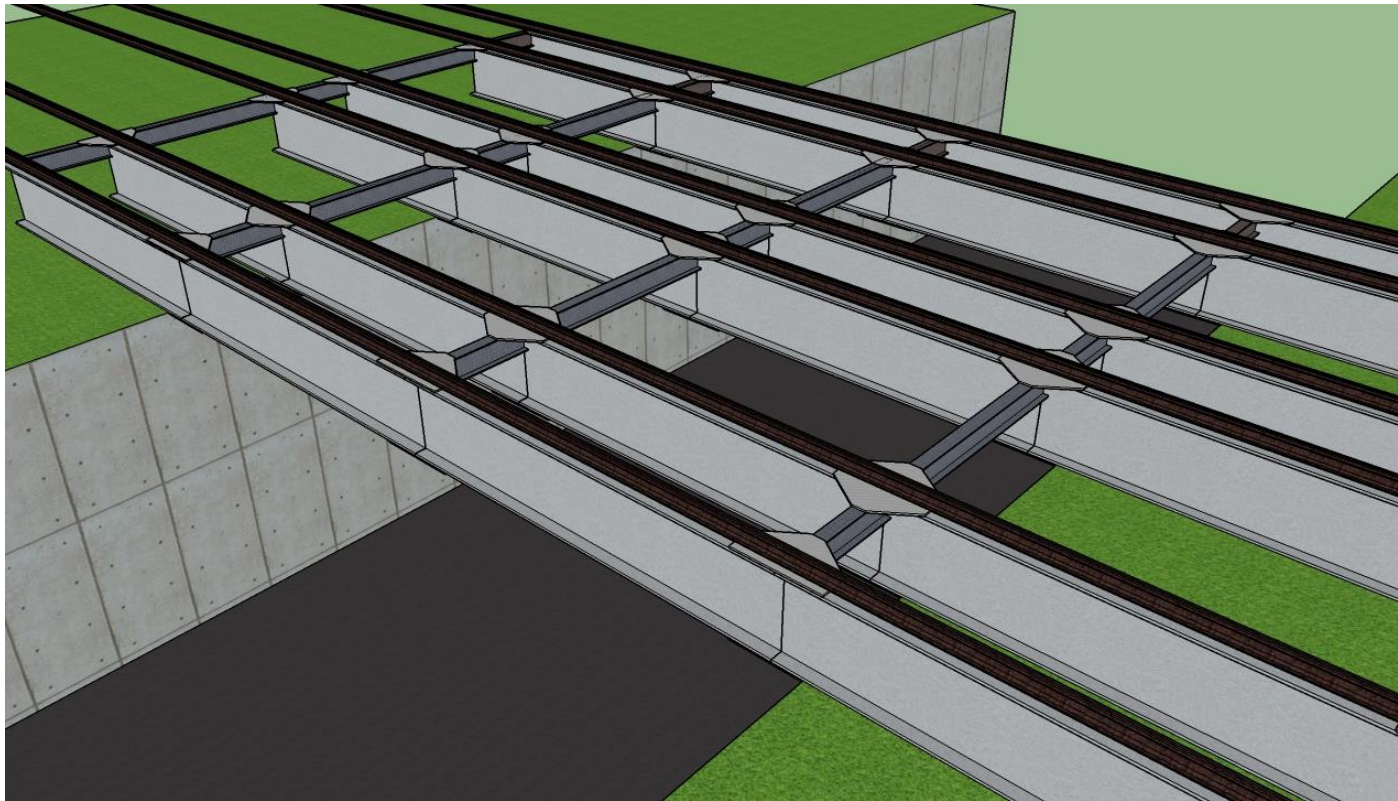
In het materiaalonderzoek is gesteld dat door middel van staalvezel versterkt beton de levensduur toe zal nemen. Dit komt doordat er kleinere scheuren ontstaan, waardoor de constructie beter bestand is tegen vloeistof en slijtage. Dit is alleen voor deze variant toegepast, maar dat zou voor elke variant kunnen. Hoeveel de levensduur zal bedragen kan onderzocht worden in een vervolgstudie.

Optimalisatie

Bij deze variant zijn veel berekeningen gemaakt ten opzichte van de rest van de variantenstudie. Echter is er qua materiaalgebruik niet geoptimaliseerd. Gekeken naar het circulair viaduct van RWS heeft deze variant meer materiaal. In een vervolgstudie kan deze variant, voornamelijk op materiaalgebruik, geoptimaliseerd worden.

Variant 2 - Staal

Deze variant van het dek bestaat geheel uit staal. De spoorstaven worden direct op de staalprofielen bevestigd. Er wordt geen standaard spoorconstructie toegepast zoals een ballastbed. Het dek hoeft niet volledig dicht te zijn, daarom wordt er een stalen frame gemaakt uit HEA en IPE profielen.



Figuur 8: Variant 2 'Staal' voor het dek

Materiaal

Voor deze variant is het principe toegepast om één ligger per spoorstaaf toe te passen. De gehele variant is opgebouwd uit staal.

Dimensies

Deze variant bestaat uit HEA1000 liggers van 5 meter lang waar de spoorstaven op zijn bevestigd. Per spoorstaaf zijn 4 liggers nodig voor de overspanning. Daarnaast wordt voor de (kip)stabiliteit IPE300 liggers toegepast van 1.5 en 3 meter om de HEA's te verbinden. Vanuit het midden van de buitenste liggers worden er diagonale schoorstaven aangebracht in het horizontale vlak. Dit kan door middel van staalplaten. Echter als deze krachten te groot zijn, kunnen dit ook HEA profielen zijn. Deze diagonale verbindingen zullen in de knopen aangrijpen.

Verbindingen

In elke knoop komen de verschillende soorten profielen bij elkaar. Er zijn 4 soorten knopen, afhankelijk van hoeveel HEA's en IPE's op de knoop aansluiten, zie Figuur 8. De platen die voor elke type knoop wordt gebruikt is voor dat type knoop steeds hetzelfde. De boven platen kunnen ook aan de onderkant bevestigd worden zodat de IPE's ook onderin ontworpen kunnen worden.

Circulariteit

De knopen zijn demontabel door het toepassen van boutverbindingen. De liggers zijn maximaal 5 meter lang en kunnen overal toegepast worden. Zodoende zijn de elementen goed te vervoeren en is het ontwerp flexibel inzetbaar. Ook zijn de profielen en knopen gemakkelijk te bereiken doordat het ontwerp een open frame betreft. Onderhoud aan het dek is hierdoor gemakkelijk uit te voeren.

De EVR waardes voor staal zijn per kubieke meter hoger dan voor beton. Echter wordt er minder materiaal toegepast. De EVR waarde van variant 1 bedraagt 32.000 en voor deze variant 16.100. Qua EVR is deze variant dus voordeliger.

Aandachtspunten

Totaal ontwerp

Er is bij deze variant geen rekening gehouden met een normaalkracht in de profielen. Tot zo ver kan deze variant alleen toegepast worden als deze vrij is opgelegd. De wanden dienen onderin ingeklemd te worden, omdat deze geen steunpunt krijgen van het dek.

Levensduur

Het staal dient ca. om de 10 jaar gecoat te worden. De levensduur is voor dit onderzoek gesteld op 200 jaar, zie 'uitgangspunten-document'. Echter is dit niet voor elke variant bepaald. Een vervolgonderzoek kan uitzoeken hoeveel deze staal variant meer of minder voordelig is qua levensduur ten opzichte van een betonnen variant.

Optimalisatie

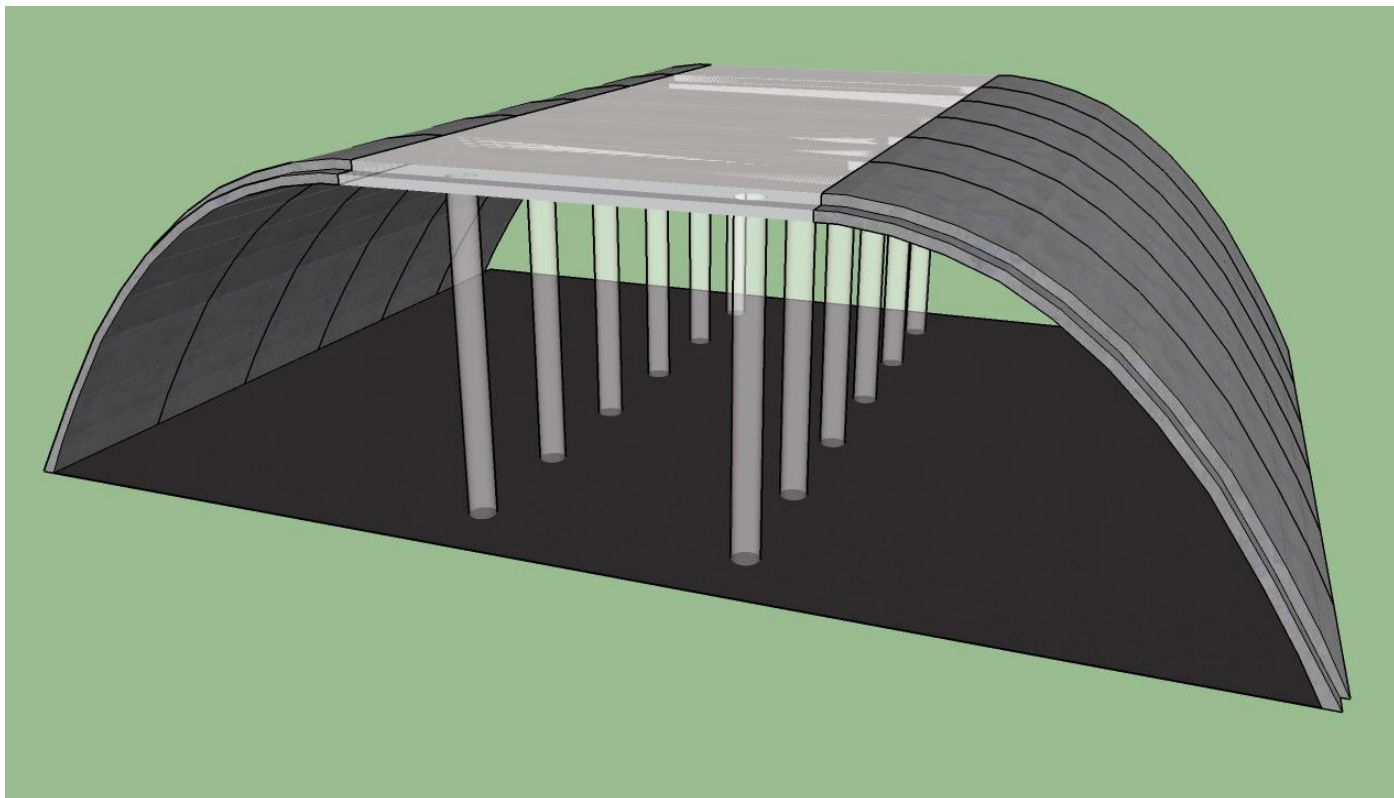
Het toepassen van alleen één profiel per spoorstaaf zal wellicht niet de meest optimale constructie zijn. Een vervolgstudie kan onderzoeken of het toevoegen van elementen voordeliger werkt voor het materiaalgebruik. Ook zullen er dan meer berekeningen gemaakt moeten worden die rekening houden met de trillings- en vervormings eisen.

7.2.2 Wanden

Voor dit object zijn 2 varianten ontworpen. Voor de eerste variant wordt gebruik gemaakt van een drukboog. De tweede variant is een betonwand opgebouwd uit blokken.

Variant 1 – Boog

Het constructief verbinden van elementen is een uitdaging. Daarom is bedacht om een drukboog toe te passen. Er zal in een drukboog alleen druk aanwezig zijn waardoor de constructieve verbinding niet op trek ontworpen hoeft te worden.



Figuur 9: Variant 1 'boog' voor de wanden

Materiaal

Voor deze variant worden de materialen beton (voor de hoofdconstructie) en staal (voor de knopen) toegepast. Ook worden er rubber profielen gebruikt voor de waterdichtheid.

Dimensies

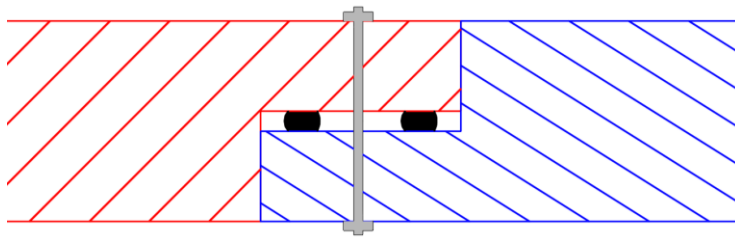
De boog heeft een hoogte van 5 meter en een breedte van 12 meter. Het boog deel bestaat uit twee elementen. Zodoende kan er een horizontaal tussenstuk, zie Figuur 9, toegepast worden om de breedte te kunnen uitbreiden. De hoogte is niet adaptief, aangezien de vorm van de boog niet kan veranderen. Daarom is de hoogte gesteld op de maximale hoogte voor langzaam en snelverkeer

Verbindingen

Een boogdeel bestaat uit één element. Echter zal een element in de diepte richting maximaal 2.5 meter breed zijn (breedte vrachtwagen).

Waterdichtheid

De verbinding kan waterdicht worden ontworpen door middel van een rubberprofiel. Dit rubber dient zodanig geplaatst te zijn dat de verbinding ook constructief goed werkt. Dit wordt gedaan door middel van een hoekvorm, zie Figuur 10.



Figuur 10: Langsdoorsnede verbinding boog.

Circulariteit

Deze variant is beperkt adaptief. De elementen kunnen in de diepte richting demontabel verbonden worden. Ook kunnen de elementen per vrachtwagen vervoerd worden.

Als de boog niet op trek ontworpen zou hoeven te worden, zou dit materiaal besparen. Echter is dat in dit ontwerp niet geheel het geval. Toch kan deze variant zeer voordelig zijn, omdat de overspanning van het dek beperkt kan worden.

Aandachtspunten

Totaal ontwerp

Bij deze variant zal het dek de normaalkrachten uit de boog op moeten kunnen nemen. Deze verbinding is niet moment vast. De verbinding met de vloer is ook niet moment vast. Wel moet de vloer de horizontale kracht uit de oplegging van de drukboog op nemen.

Levensduur

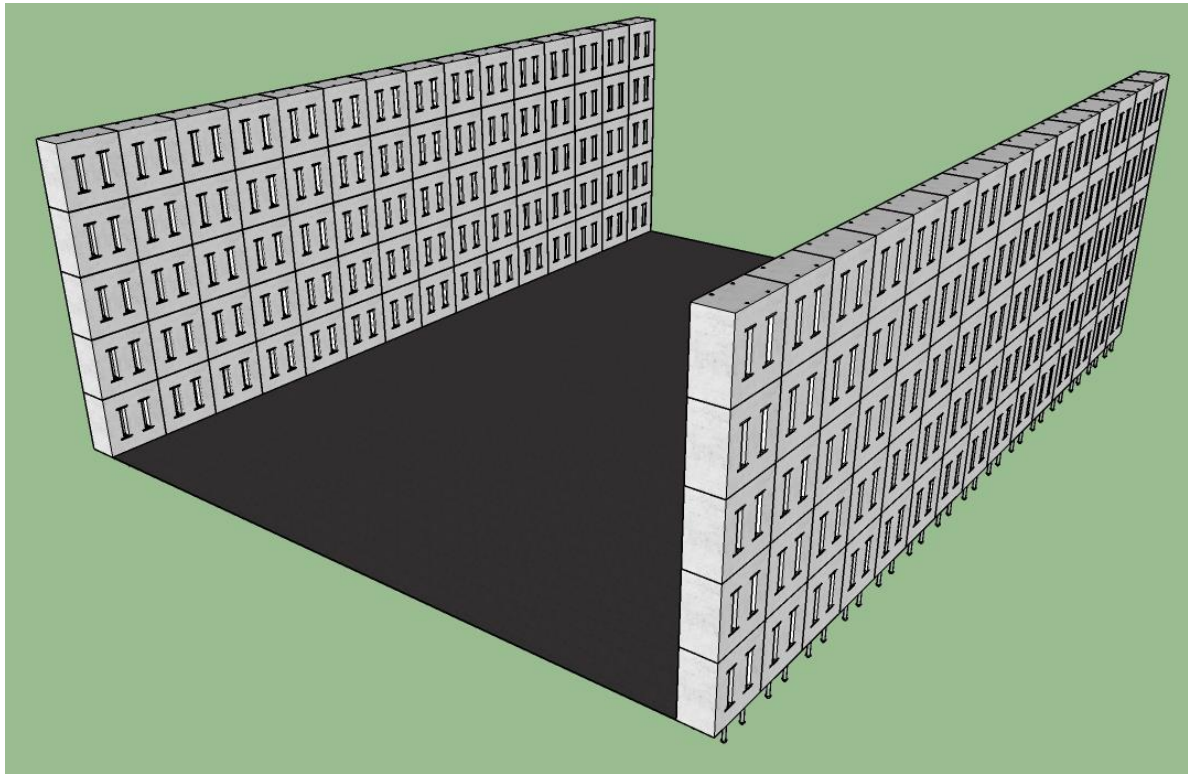
Het element dient ontworpen te worden op een zo lang mogelijke levensduur. De milieu-klasse dient bepaald te worden, daarmee kan het betonmengsel bepaald te worden. Ook is de levensduur afhankelijk van de wapening. De scheurwijdte dient beperkt te worden zodat de wapening niet kan gaan roest. Dit alles zal in een vervolgstudie onderzocht moeten worden. Er dient een exactere manier bedacht te worden om de levensduur van een element te bepalen.

Optimalisatie

In dit ontwerp is de constructie niet geoptimaliseerd. Er treedt geen perfecte drukboog op. Er dient onderzocht te worden hoe de boog vormgegeven kan worden, zodat er altijd een drukboog optreedt. De belastingen treden niet altijd op, en er zijn veel horizontale krachten aanwezig. Een vervolg onderzoek kan uitzoeken welke effecten dit heeft op de drukboog.

Variant 2 – Stukjes

Bij deze variant is de mogelijkheid onderzocht om het ontwerp verticaal uit te kunnen breiden door de wand uit losse elementen op te bouwen.



Figuur 11: Variant 2 'Stukjes' voor de wanden

Materiaal

Voor deze variant is gewapend beton toegepast voor de elementen. Voor de verbindingsonderdelen wordt staal gebruikt. Deze worden op trek belast.

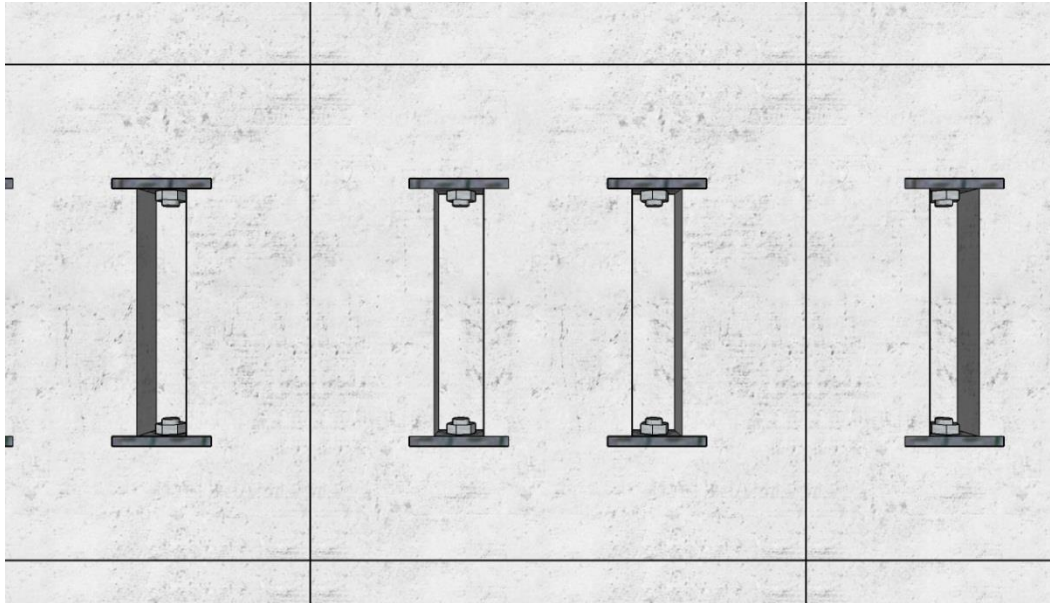
Dimensies

Een element is 1 meter hoog en breed en 0.5 meter dik. Eén wand bestaat uit 5 elementen in de hoogte en 15 elementen in de diepte, totaal 75 elementen per wand. De hoogte van één element is beperkt zodat de wand zeer adaptief is. De benodigde hoogte bij een nieuwe functie kan nauwkeuriger afgestemd worden, omdat de wand per meter uit te breiden is.

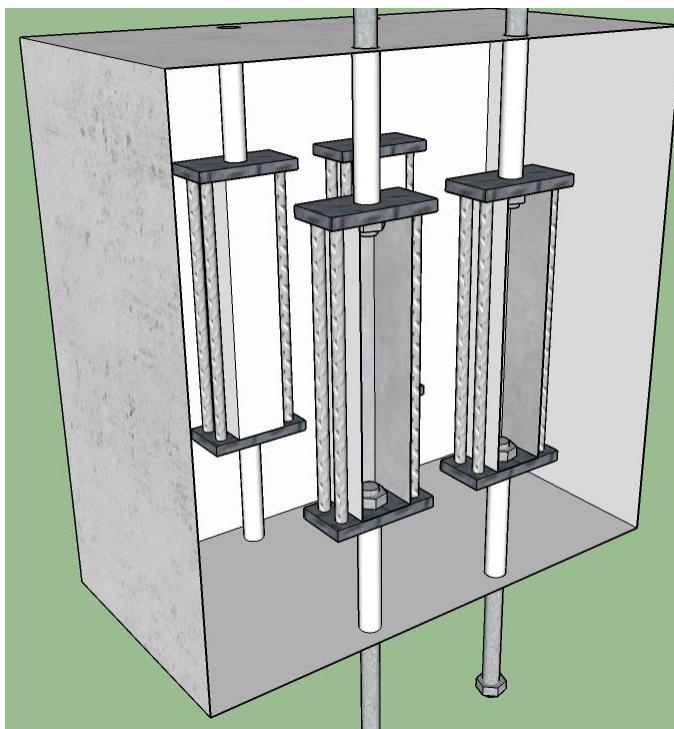
Verbindingen

Voor de knoop is een demontabele verbinding ontworpen. Dit is een los anker, zie Figuur 14, die door middel van inhammen in het betonelement geplaatst kan worden en kan worden vast gebout, zie Figuur 12. Mee gestort in het element zijn per knoop twee staalplaten die verbonden zijn doormiddel van vier stalen staven, zie Figuur 13. Tussen deze staven is ruimte voor de inham. Het anker wordt strak gebout tussen de staalplaten van twee elementen.

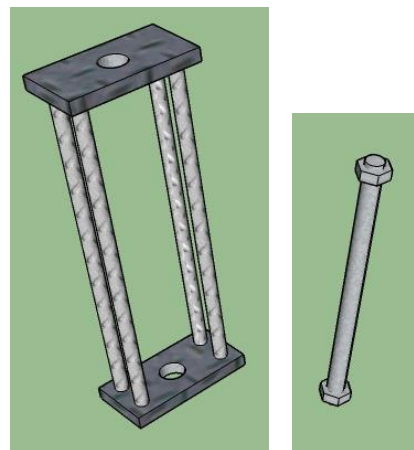
Voor de stabiliteit in diepte richting kan er voorspanwapening toegepast worden.



Figuur 12: Langs aanzicht



Figuur 13: 3D aanzicht staal verbinding excl. beton



Figuur 14: Anker

Circulariteit

Deze variant is zeer adaptief. Alle elementen zijn ontworpen op de maximale optredende krachten. De elementen kunnen dus flexibel ingezet worden. De wand kan aan beide zijde trek opnemen, zodat er ook een negatief moment op kan treden. Zodoende kan de wand in de hoogte worden uitgebreid door middel van horizontale grond ankers.

Aandachtspunten

Totaal ontwerp

De wand kan zowel onder, als boven momentvast verbonden worden aan de vloer en het dek.

Levensduur

In het berekeningsrapport staat omschreven dat de waterkering aan de buitenzijde aanwezig moet zijn om te voorkomen dat de stalen ankers in het water staan. Ook de inham in het beton dient afgesloten te worden van het water. Er kan onderzocht worden hoe vochtig de locatie van de ankers daadwerkelijk zouden zijn en welk effect dit heeft op de levensduur. De treinbelasting kan variëren, deze belasting wordt door de wand doorgegeven. Vermoeiing kan dus ook invloed hebben op de levensduur van de ankers.

Optimalisatie

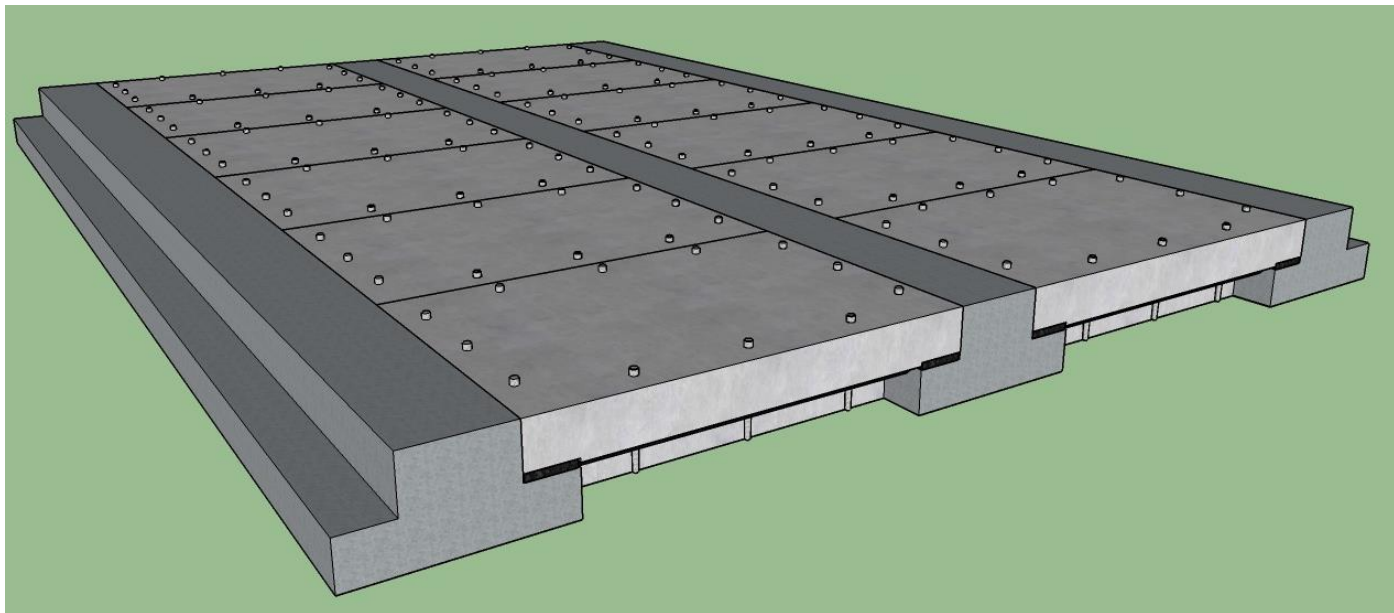
Deze variant is erg flexibel en op een kleine schaal uit te breiden, wat positief is voor de circulariteit. Echter geeft dit wel veel voegen, wat de kans op lekkage groter maakt. Een vervolgstudie kan onderzoeken welk effect het toepassen van grotere elementen heeft op de circulariteit. Bij hergebruik, hoeveel meter dient het object uitgebreid te worden bij diverse toepassingen. Als er minder voegen aanwezig zijn, hoe sterk is het effect dan op de waterdichtheid?

7.2.3 Vloeren

Voor de vloer zijn 2 varianten ontworpen, variant 1 'Nokken' en variant 2 'Maximaal gewicht'.

Variant 1 – Nokken

De nokken variant is een vloer ontworpen om zowel in langs- als dwarsrichting uitbreidbaar te zijn. Het ontwerp is opgebouwd uit drie gestorte langsliggers met daar tussen prefab dwarsliggers. De fundering van de vloer wordt onder de langsliggers geplaatst.



Figuur 15: Variant 1 'Nokkies' van de vloer.

Materiaal

De elementen zijn opgebouwd uit beton met stalen wapening. De ankers zijn van staal. Voor het afdichten van de voegen worden rubberprofielen gebruikt.

Waterdichtheid

De elementen worden met elkaar gekoppeld middels verankering. Tussen de elementen is een rubberstrip aanwezig. Als de elementen aan elkaar worden gekoppeld wordt de rubberstrip dicht gedrukt, waardoor het geheel waterdicht wordt.

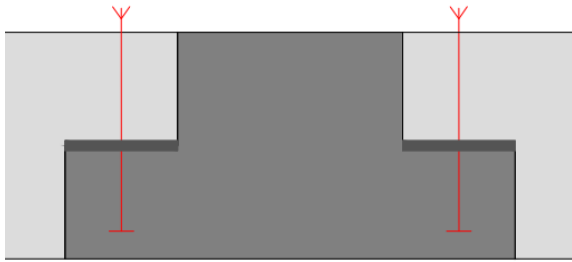
Dimensies

De dimensies zijn gebaseerd op aannames, uitbreidbaarheid en transporteerbaarheid. De dikte van de elementen is aangehouden op 0,80 meter. Dit is gebaseerd op de spooronderdoorgang uit Tilburg. Vervolgens zijn deze dimensies getoetst op moment- en dwarskrachtcapaciteit.

Het dwarsprofiel bestaat uit drie langsliggers en twee dwarsliggers. De breedte van de dwarsliggerelementen is gebaseerd op het wegontwerp dat uitbreidt van twee naar drie rijstroken. Er zijn verschillende elementbreedtes geprobeerd en naast elkaar gelegd. Uiteindelijk is er gekozen voor een dwarsliggerbreedte van 3,70 meter. De diepte van de elementen is gebaseerd op de transporteerbaarheid. De diepte is 2,50 meter.

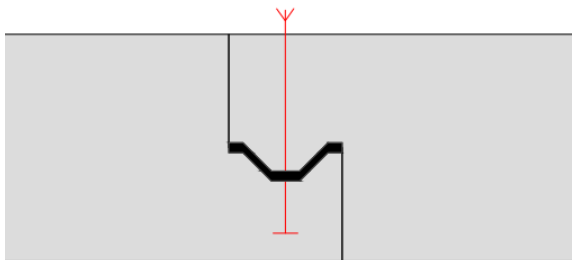
Verbindingen

De betonelementen worden aan elkaar gekoppeld met verankering. Het is mogelijk om de ankers nauwkeurig op de goede plaats te stellen, omdat de langsliggers gestort worden. De verbinding is in Figuur 16 weergegeven.



Figuur 16: Horizontale verbinding dwarsdoorsnede

In langsrichting is er gekozen voor een tandvormige nokverbinding. De nokverbinding wordt verankerd om de elementen op de juiste plek te houden. Daarnaast maakt de verankering het mogelijk om de elementen horizontaal op elkaar te drukken, zodat er een waterdichte verbinding wordt gecreëerd. De verbinding is weergegeven in Figuur 17.



Figuur 17: Horizontale verbinding langsdoorsnede

Circulariteit

De materialen beton en staal zijn circulair. De rubberprofielen zijn niet circulair, maar het rubber is in geringe mate aanwezig.

De langsliggers zijn gestort en dus niet demontabel. Hierdoor scoort het lager op demonteerbaarheid. De gestorte langsliggers zorgen voor een betere verbinding tussen vloer en fundering. De dwarsliggers zijn makkelijk te koppelen en te ontkoppelen. De verbindingen zijn goed toegankelijk.

Het ontwerp is goed uitbreidbaar van twee naar drie rijstroken.

De dikte van de elementen is niet geoptimaliseerd. Er zal nog winst te behalen zijn door materiaalarm te ontwerpen.

Aandachtspunten

Totaal ontwerp

De wand kan momentvast verbonden worden aan de langsliggers van de vloer. De verbinding met de vloer zal geen droge verbinding zijn, maar de verbinding met de wand kan wel demontabel zijn. Dit is afhankelijk van het ontwerp voor de wand. Als bijvoorbeeld variant 2 van de wand 'Stukjes' wordt toegepast, zullen de ankers meegestort worden in de vloer, maar verankert worden aan de wandelementen.

Levensduur

De betonnen elementen hebben een lange levensduur. De levensduur van het staal is minder lang. Dit komt doordat staal geconserveerd moet worden. Daarnaast is er rubber aanwezig om voegen waterdicht te maken. Er is geen onderzoek gedaan naar de levensduur van rubber. Het is waarschijnlijk dat het staal en rubber meerdere keren moeten worden vervangen. Het is dus belangrijk, dat deze onderdelen goed toegankelijk en vervangbaar zijn.

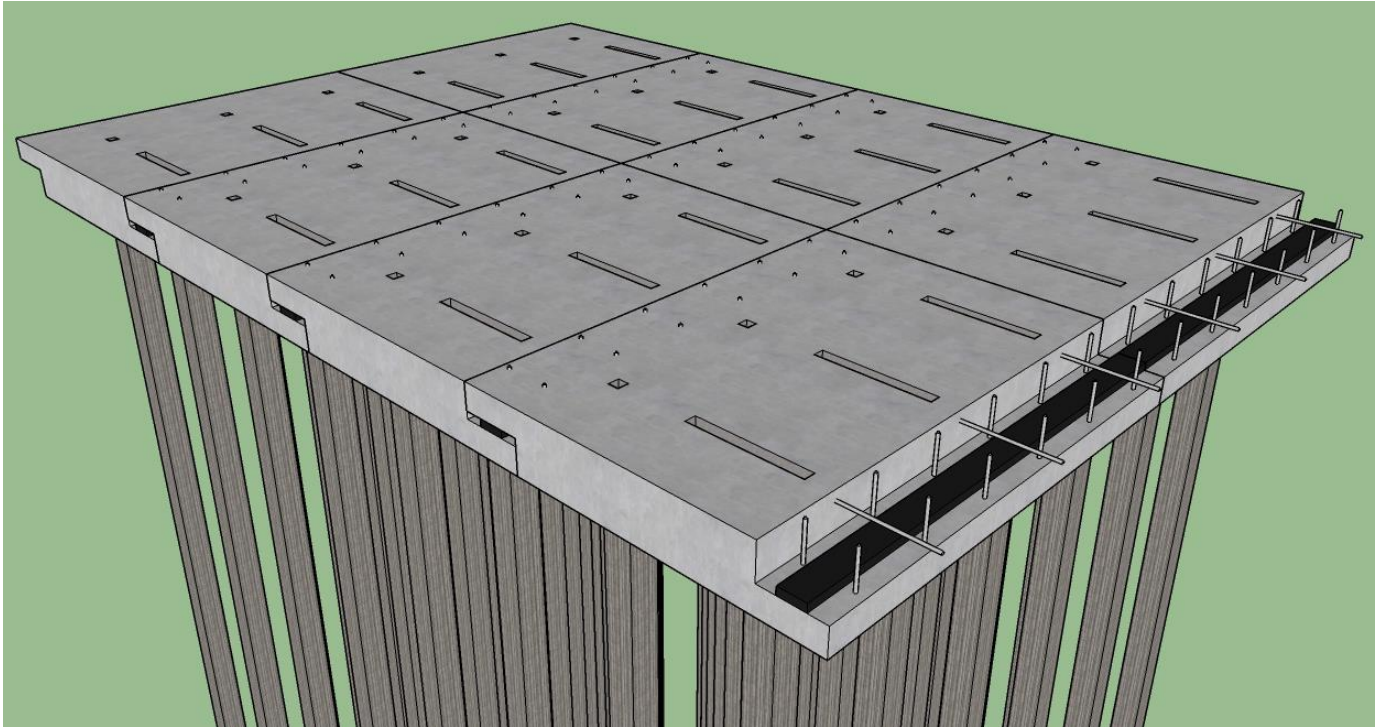
Optimalisatie

De dwarsliggers zijn niet geoptimaliseerd. Deze worden als liggers op twee steunpunten tussen de langsliggers geplaatst. Een vervolgstudie zal de constructie wel moeten optimaliseren.

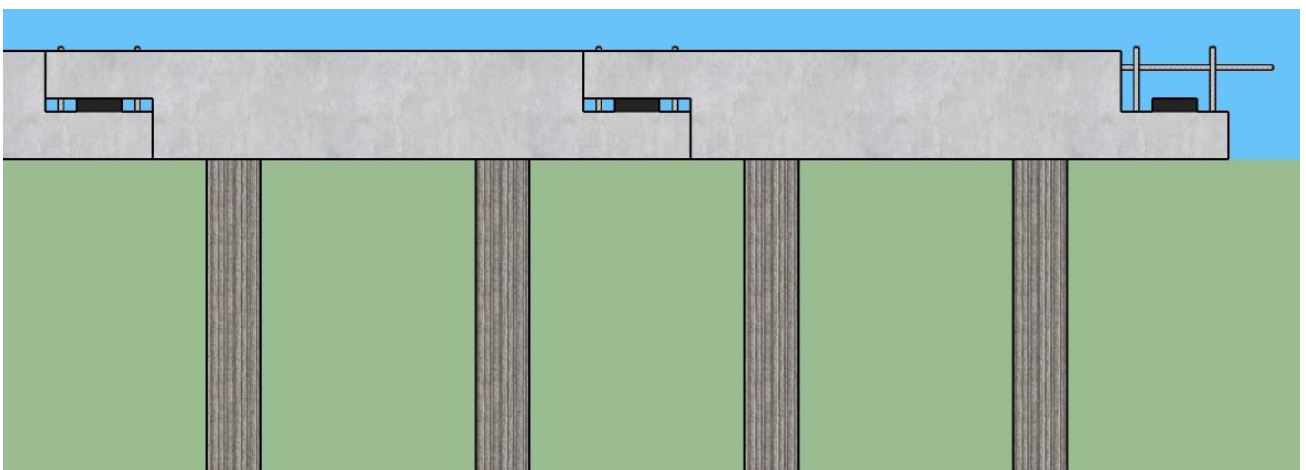
Variant 2 – Maximaal gewicht

Bij deze variant is de focus gelegd op de uitbreidbaarheid van de elementen in de diepterichting. Er zijn zo groot mogelijke elementen toegepast om zo min mogelijk verbindingen nodig te hebben.

In Figuur 18 zijn de palen direct op de elementen aangesloten. Dit hoeft niet het geval te zijn. De elementen dienen demonteerbaar te zijn en er moeten 2 rijen palen per element (in de diepterichting, zie Figuur 19) beschikbaar zijn.



Figuur 18: Variant 2 'Maximaal gewicht' van de vloer.



Figuur 19: Zijaanzicht (diepterichting)

Materiaal

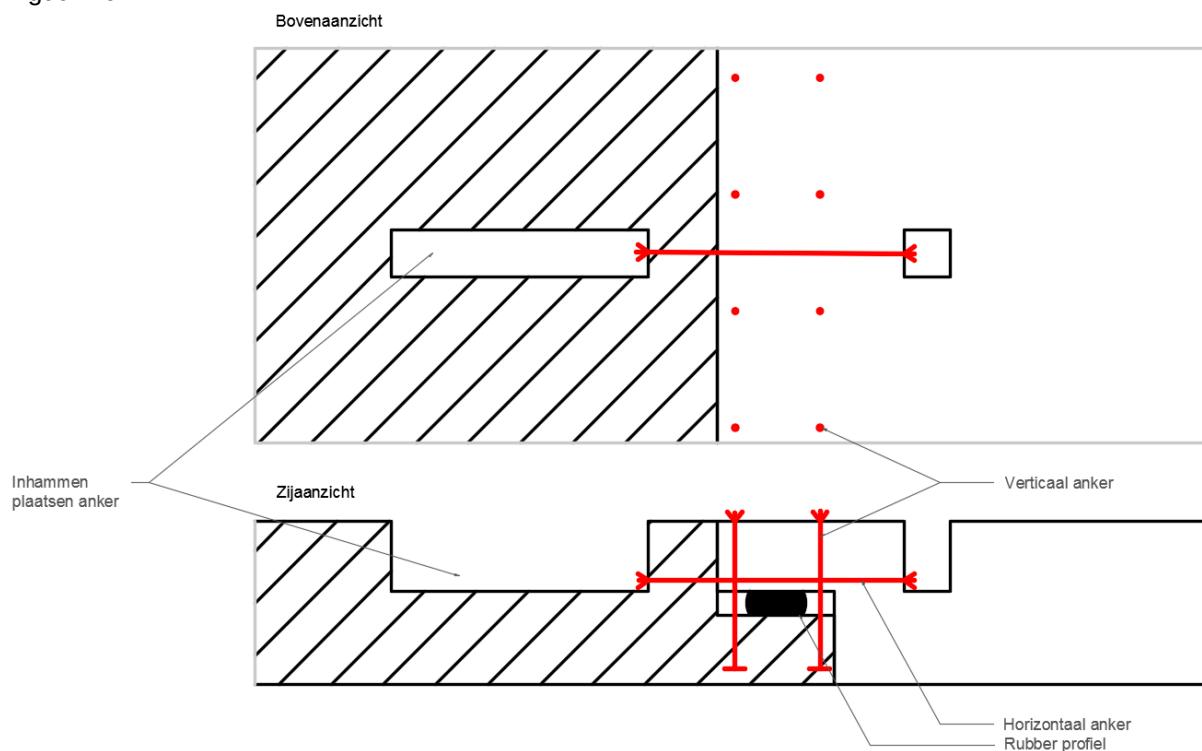
Voor deze variant is beton met staalwapening voor de elementen toegepast. De ankers voor de verbinding zijn ook van staal gemaakt. Daarnaast wordt ook hier een rubber profiel toegepast voor de waterdichtheid.

Dimensies

Maatgevend voor de afmetingen van een element is het maximale gewicht van 50 000 kg. Er zijn hierbij voor het ontwerp 2 elementen nodig in de breedterichting. De afmetingen van een elementen bedragen $b \times l \times h$; $6 \times 4 \times 0.8$ meter.

Verbindingen

Elk element wordt gefundeerd op 2 rijen palen in de diepterichting. Elk element kan hierdoor zelf een moment opnemen. De verbinding tussen de elementen hoeven dus niet moment vast te zijn. Tegen zettingsverschillen dienen de elementen wel verticaal verbonden te worden. Dit wordt gedaan door middel van verticale ankers. Ook worden horizontale ankers toegepast om ervoor te zorgen dat de vloer één geheel wordt. Deze zijn te plaatsen en te demonteren als de elementen op hun plek liggen, hiervoor zitten inhammen in het beton, zie Figuur 20.



Figuur 20: Knoop Vloer, variant 2 Maximaal gewicht.

Waterdichtheid

De verbinding, zie Figuur 19, zal een rubber profiel bevatten dat wordt ingedrukt door verticale ankers.

Circulariteit

Het vermijden van momentvaste verbindingen is gewild in een circulair ontwerp. Tegelijkertijd maken de omvang van de elementen de demonteerbaarheid minder gemakkelijk. De elementen kunnen waterdicht verbonden worden, zodat ze op elke locatie toegepast kunnen worden.

Aandachtspunten

Totaal ontwerp

De verbinding met de wanden is niet behandeld bij deze variant. Afhankelijk van het ontwerp voor de wand kunnen de elementen bij deze variant aangepast worden zodat het verbinden van de wand met deze demontabele elementen wel mogelijk is (momentvast).

Levensduur

Vermoeiing kan ook bij een betonnen vloer een aandachtspunt zijn als er een stalen verbinding wordt toegepast. De belasting bedraagt in dit geval snelverkeer, wat een grote wisselende belasting geeft. Onderzocht kan worden hoeveel effect de vermoeiing van de verbinding heeft op de levensduur.

Optimalisatie

Als er veel palen worden toegepast in een variant, zoals bij deze, zal de vloer waarschijnlijk minder dik hoeven te zijn. De keuze voor het aantal palen is nu gebaseerd op de afmetingen van een element. Als dit wordt gedaan in een vervolgstudie, dient de vloerconstructie wel geoptimaliseerd te worden.

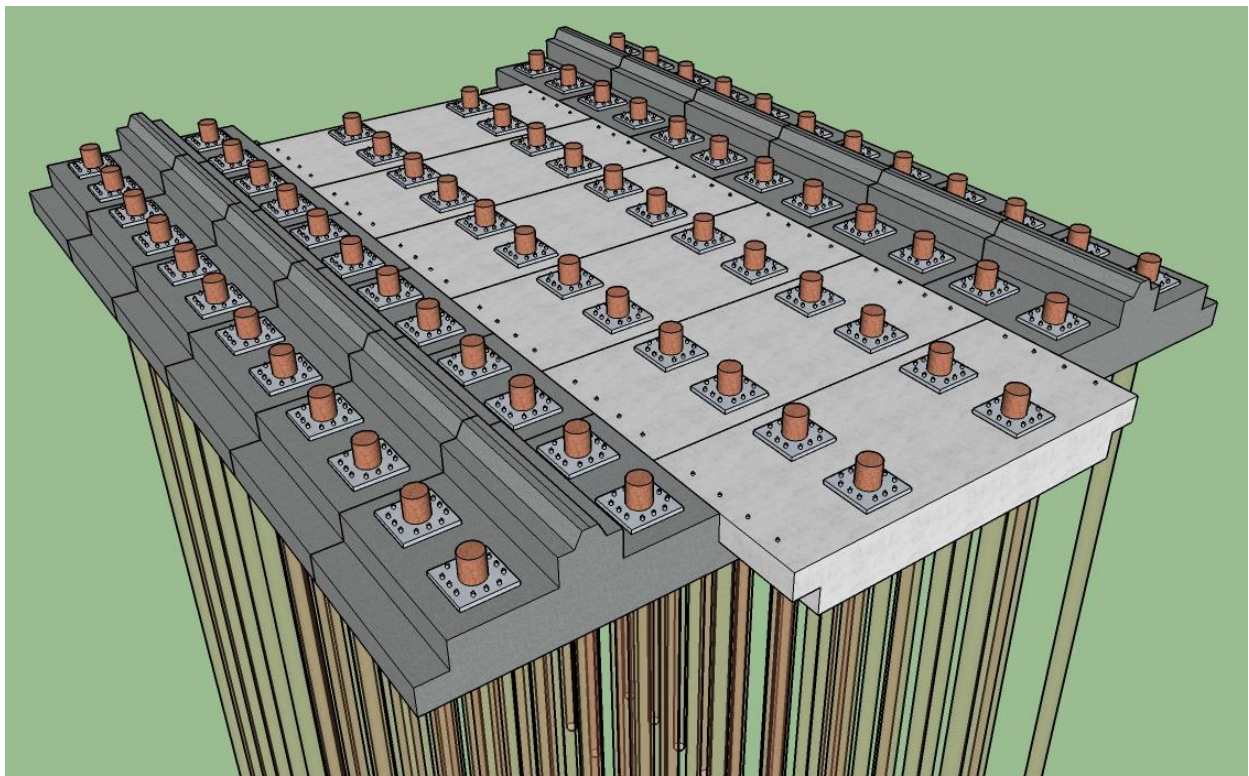
Ook zal er in een vervolgonderzoek een manier gevonden moeten worden om de palen circulair te kunnen plaatsen bij deze variant (anders zal het ontwerp niet geheel circulair zijn). Wellicht kan de oplossing gegeven door variant 1 'palen' van de fundering hier worden toegepast.

7.2.4 Fundering

In het plan van aanpak wordt de fundering meegenomen in het object 'vloer'. Echter is dit een specifiek onderwerp dat erg lastig te ontwerpen is. De fundering wordt als apart object gerekend en hiervoor is één variant opgesteld.

Variant 1 – Palen

De palen variant is een extra variant. Variant 1 'Palen' was in eerste instantie bedoeld als vloer variant. De variant is nu een extra variant gericht op een demontabele fundering met een variatie op de demontabele vloer. De vloer is niet ontworpen op een uitbreiding van twee naar drie rijstroken. Daarnaast is er niet goed nagedacht over de hart op hart maat van de palen. Een uitbreidbare vloer moet gebruik maken van dezelfde hart op hart maten. Meer over variant 4 is te vinden het berekeningsrapport, zie het document 'Berekeningsrapportages Varianten'.



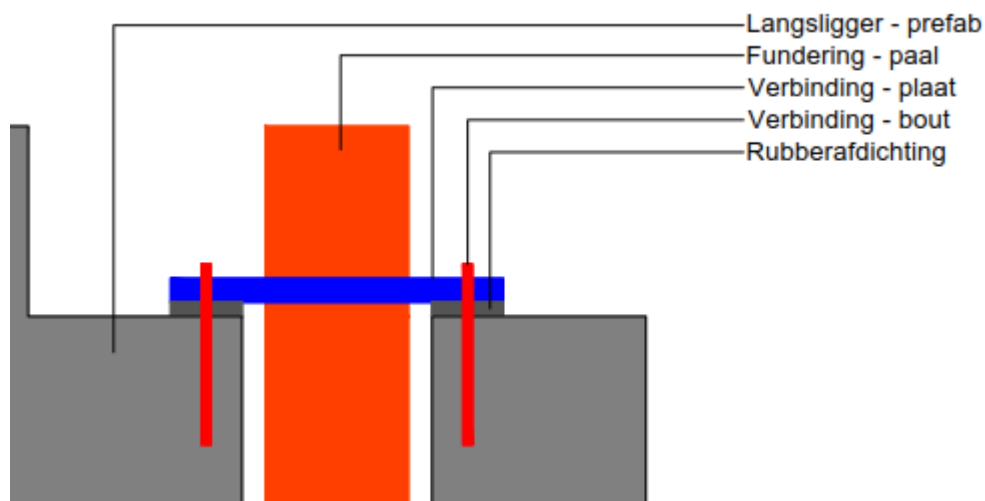
Figuur 21: Variant 1 'Palen' van de fundering.

Materiaal

De elementen zijn opgebouwd uit beton met stalen wapening. De ankers en bouten zijn van staal. Voor het afdichten van de voegen worden rubberprofielen gebruikt.

Waterdichtheid

De palen worden gekoppeld aan de elementen middels bouten. Tussen de stalen plaat en het element zit een rubberstrip. Deze wordt dichtgedrukt door de bouten aan te draaien. In Figuur 22 is het detail weergegeven van de koppeling.



Figuur 22: Detail koppeling funderingspaal – element

De elementen zelf worden gekoppeld met behulp van verankering met daartussen rubberstrips.

Dimensies

De diameter van de funderingspalen is aangenomen op 300 mm. Er is rekening gehouden met een onnauwkeurigheid van het zetten van de funderingspalen van +/- 50 mm. Het gat voor de palen is daarom 100 mm breder als de funderingspaal.

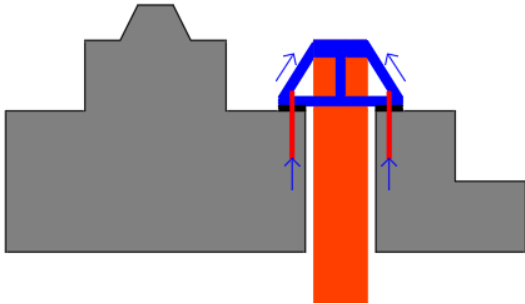
Het dwarsprofiel is opgedeeld in drie elementen. Twee langsliggers en één dwarsligger. Het ontwerp is niet geschikt voor uitbreiding van twee naar drie rijstroken. Tijdens het ontwerpproces is hier niet goed over nagedacht. Voor de uitbreiding van twee naar drie rijstroken moet er in ieder geval gebruik worden gemaakt van vaste hart op hart maten van de palen in verband met de gaten in de betonelementen.

Verbindingen

De betonelementen worden verbonden met een verankering. De funderingspalen worden middels bouten gekoppeld aan het betonelement.

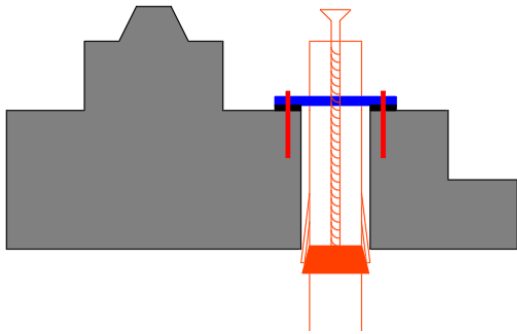
Het is waarschijnlijk dat de bouten te zwak zijn om de trekkrachten, die voortvloeien uit de opdrijving, op te nemen. Een andere mogelijkheid is om de bouten te vervangen voor ankers die verankerd zijn in het betonelement.

Daarnaast is de staalplaat niet ideaal om de trekkrachten op te nemen. De krachten gaan met een hoek van 90 graden door de staalplaat. Hierdoor zal de staalplaat waarschijnlijk bezwijken op pons. Een oplossing is om de krachten om te leiden via een 'muts', zie Figuur 23.



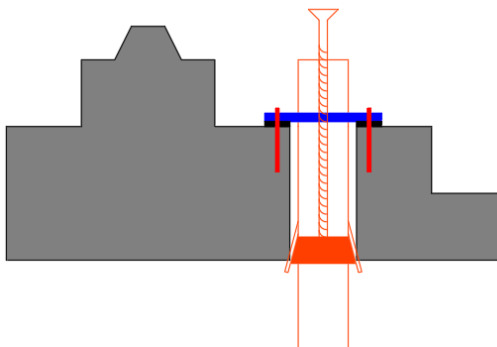
Figuur 23: Krachtenspel funderingspaal met vloerelement

Als de muts niet genoeg is, moet er gebruik worden gemaakt van het betonelement. Er is een 'slimme verbinding' bedacht om het betonelement te gebruiken op druk. Dit wordt als volgt gedaan:



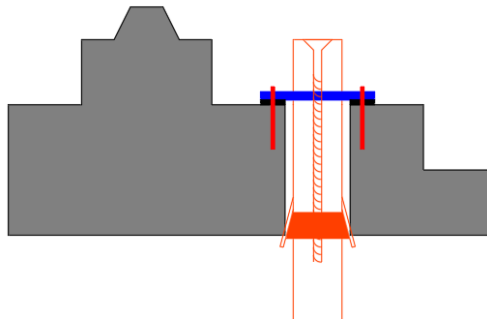
Figuur 24: Slimme verbinding – stap 1

In de funderingspaal zit een schroefmechanisme met aan de kop een schroefkop en aan het eind een schroefplaat (oranje). Aan de zijkant zitten stalen platen, zie Figuur 24.



Figuur 25: Slimme verbinding – stap 2

In Figuur 25 wordt de schroefkop omhoog getrokken. Hierdoor wordt de (oranje) plaat tegen de zijplaten aangedrukt. Hierdoor bewegen de zijplaten naar buiten. Doordat het breder wordt, komt het staal tegen het betonnen vloerelement aan. Hierdoor wordt een verbinding op druk gecreëerd.



Figuur 26: Slimme verbinding – stap 3

Als laatst wordt de schroef aangedraaid om de verbinding vast te maken, zie Figuur 26. Als de fundering nu op druk staat, drukt het vloerelement tegen de schroefplaat.

Circulariteit

De materialen beton en staal zijn circulair. De rubberprofielen zijn niet circulair, maar het rubber is in geringe mate aanwezig.

Op demonteerbaarheid is dit de enige variant van een demontabele fundering. Een demontabele fundering brengt veel moeilijkheden met zich mee. Er zijn veel verschillende belastingscombinaties, waardoor de verbinding tussen fundering en element veel te voorduren krijgt. Er moet nog meer onderzoek worden gedaan naar de haalbaarheid van een demontabele fundering.

Het ontwerp is niet ontworpen op een uitbreiding van twee naar drie rijstroken.

Er zal nog winst te behalen zijn op materiaalarm ontwerpen. De dikte van de elementen is niet berekend. De dikte van de dwarsliggers kunnen waarschijnlijk minder dik. Daarnaast is het de vraag of er funderingspalen nodig zijn onder de dwarsligger.

Aandachtspunten

Totaal ontwerp

Een demontabele verbinding is een *must* als het ontwerp geheel circulair dient te zijn. De mogelijke oplossing, die in deze variant is gegeven, kan wellicht ook toegepast worden bij de varianten van de vloer.

Levensduur

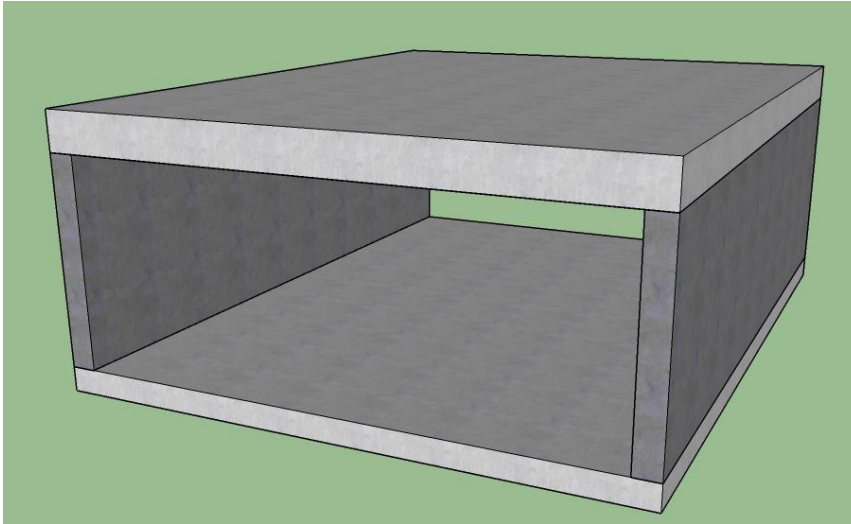
Het toepassen van stalen palen zal zeker invloed hebben op de levensduur ten opzichte van betonnen palen. Dit zal in een vervolgonderzoek uitgezocht moeten worden. Wellicht is er een ander oplossing mogelijk waarin betonnen palen worden toegepast.

Optimalisatie

De kracht per paal is wel bepaald bij deze variant. Echter vielen detailberekening aan de verbinding van de palen met de elementen buiten de scope van dit onderzoek. Bij deze variant is een mogelijke oplossing gegeven voor de verbinding van de palen met de vloer. Een vervolgstudie zal kunnen zoeken naar andere oplossingen, die wellicht gebaseerd zijn op deze variant.

7.2.5 Niet circulair

Ter vergelijking zijn er voor alle objecten ook 'niet circulaire' ontwerpen opgesteld. Deze ontwerpen passen bij een lineaire economie en worden momenteel toegepast. Deze ontwerpen zijn niet zo ver uitgewerkt als de varianten bij de variantenstudie. Deze zijn alleen ter vergelijking in de keuzematrix.



Figuur 27: Niet circulair tunnel stuk t.p.v. dek

Algemeen

De dikte van de tunnel ter plaatse van het dek bedraagt de breedte van het dek, namelijk 14,5 meter.

Materiaal

Er wordt alleen gewapend beton toegepast.

Waterdichtheid

Er zijn geen voegen aanwezig bij deze variant. De waterdichtheid wordt gewaarborgt door het gewapend beton.

Verbindingen

Alle verbindingen zijn natte verbindingen en niet demontabel.

Circulariteit

Wanneer de tunnel gesloopt zal worden, zal de tunnelconstructie niet circulair verwijderd worden. Na het slopen van de materialen kunnen deze wel gerecycled worden.

Dek

Uit het berekeningsrapport blijkt een volume van $142,68 \text{ m}^3$ te gelden voor het dek.

Wanden

De wanden wordt 0,8 meter dik geschat. Er geldt dan een totaal volume voor bijde wanden samen van $104,4 \text{ m}^3$

Vloer

De vloer is net als de vloer varianten op 0,8 meter dik geschat. Het volume bedraagt $142,68 \text{ m}^3$.

Fundering

Voor de fundering wordt een paalfundering gerekend, palen $\varnothing 300 \text{ mm}$ $h=30 \text{ m}$. Het totale volume van alle palen bedragen $75,6 \text{ m}^3$.

VERGELIJKEN VARIANTEN



Het is nu duidelijk welke verschillende varianten er ontworpen zijn. Per object moeten de varianten met elkaar worden vergeleken om de voor- en nadelen van elke variant in kaart te brengen. Deze vergelijking wordt gemaakt aan de hand van een keuzematrix. De methodologie die hiervoor is gebruikt is de Kesselringmethode.

De Kesselringmethode wordt uitgelegd in bijlage 13.3.

8.1 Eisen

Eisen worden onderverdeeld in **functionele** en **circulaire eisen**. Per object zijn er functionele en circulaire eisen opgesteld. De eisen zijn weergegeven in het desbetreffende Excel-bestand van de Kesselringmethode. Zie ook documenten 'Kesselring methode - Keuzematrix', 'Score uitleg - Keuzematrix' en 'Verantwoording scores - Keuzematrix'.

EVR

Per variant zijn de Eco-costs bepaald. Dit wordt gedaan aan de hand van de volumes van het toegepast materiaal in een variant. In 'Bijlage 4 - Bepalen EVR varianten' is uitgewerkt hoe de volumes van de materialen tot stand zijn gekomen en hoe deze leiden tot de EVR.

Waterdichtheid

De score voor de waterdichtheid is bepaald aan de hand van het aantal meter voeg dat een variant heeft. Wanneer 2 elementen op elkaar aansluiten met een droge verbinding, wordt dit gerekend als een voeg. Hoe meer voegen er zijn, hoe groter de kans op lekkage. In 'Bijlage 5 - Voegen en uitbreidbaarheid' wordt toegelicht hoe het aantal meter voegen is bepaald voor elke variant.

Uitbreidbaarheid

Voor de uitbreidbaarheid van een variant is gekeken hoeveel extra materiaal het kost om een variant uit te breiden van 2 naar 3 rijbanen (bij 3 sporen), en hoeveel extra materiaal het kost om een variant uit te breiden van 2 naar 3 sporen (bij 3 rijbanen). In 'Bijlage 5 - Voegen en uitbreidbaarheid' wordt toegelicht hoe deze volumes zijn bepaald en hoe deze worden vertaald naar een score (1 t/m 5).

In het document 'Score uitleg - Keuzematrix' zijn alle factoren voor de eisen uitgewerkt. Hierin is aangegeven hoe de factoren tot stand zijn gekomen. De variabele eisen worden ook in tabel weergegeven.

Circulair	Score				
Variabele eisen	1	2	3	4	5
Toekomstbestendigheid <i>Aantal maatregelen</i>	0	1	2	3	4+
Uitbreidbaarheid (m³)	65+	49-64	33-48	17-32	0-16
Flexibiliteit <i>Aantal soorten elementen</i>	5	4	3	2	1
Toegankelijkheid verbinding	Slecht	Matig	Gemiddeld	Goed	Zeer goed
Demontagetijd verbinding	Zeer lang	Lang	Gemiddeld	Kort	Zeer kort
Type verbinding	Hard chemisch	Zacht chemisch	Direct integraal	Toegevoegde elementen	Droog
Onderhoud <i>Gevoeligheid slijtage en repareerbaarheid</i>	Slecht	Matig	Gemiddeld	Goed	Zeer goed
Recycling	Slecht	Matig	Gemiddeld	Goed	Zeer goed

Tabel 3: Circulaire Variabele eisen

Functioneel	Score				
Variabele eisen	1	2	3	4	5
Optredende belasting <i>In hoeverre is er rekening gehouden</i>	Niet	Krachten bepaald, niet berekend	Gecontroleerd, niet verbeterd	Gecontroleerd, verbeterd	Geoptimaliseerd
Brandveiligheid	Slecht	Matig	Gemiddeld	Goed	Zeer goed
Waterdichtheid <i>Aantal meter voeg</i>	0-70	71-140	141-210	211-280	281-350

Tabel 4: Functionele Variabele eisen

8.2 Resultaten

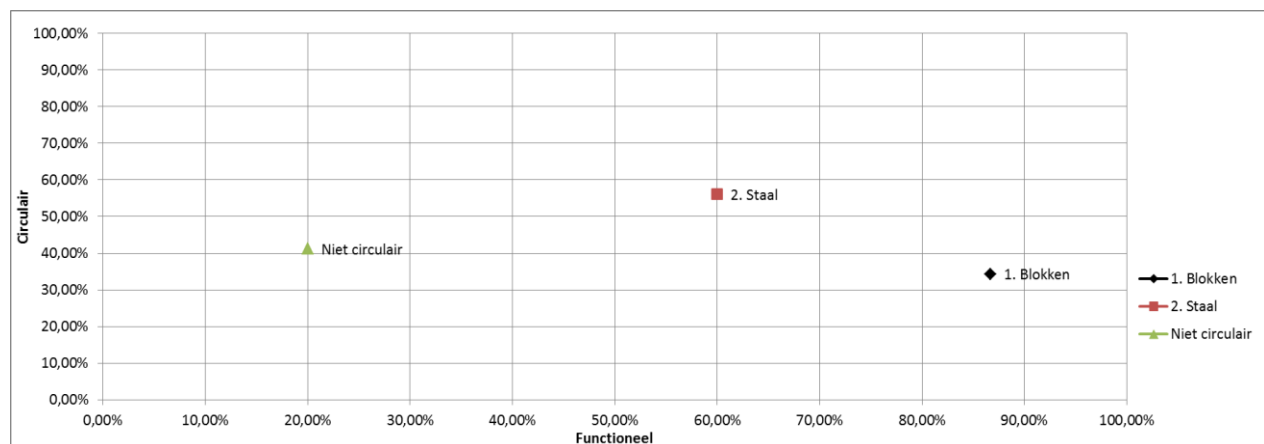
8.2.1 Dek

In de tabel is te zien dat 'Blokken' (variant 1 van het dek) beter scoort op functionaliteit (87%) dan 'Staal' (variant 2) (60%). Echter scoort 'Staal' beter op circulariteit (56%) dan 'Blokken' (34%). Het gebrek aan het voldoen aan de functionele eisen van 'Staal' komt door het niveau waarop de variant is uitgewerkt. Zo worden brandveiligheid en stabiliteit op schets niveau nauwelijks meegenomen, terwijl dit bij staal erg belangrijk is.

'Staal' scoort beter op circulariteit, omdat er minder materiaal nodig is voor de uitbreidbaarheid. Als 'Blokken' wordt uitgebreid, komt er veel materiaal bij doordat de blokken massief zijn. De ruimte tussen de staalprofielen bij 'Staal' hoeven niet opgevuld te worden. Ook scoort staal beter op de recyclebaarheid en op de EVR waarde. De EVR van staal per m³ is hoger, maar doordat er minder materiaal nodig is scoort deze toch beter.

Een niet circulair dek scoort hier het laagst op functionaliteit (20%). Dit komt doordat er geen berekeningen zijn gemaakt en de constructie niet is geoptimaliseerd. 'Niet circulair' scoort op circulariteit hoger dan 'Blokken', doordat deze een lagere EVR heeft. De factor voor de EVR is er hoog, dus telt deze streng mee.

Wanner deze varianten in een vervolgstudie worden toegepast, zullen deze geoptimaliseerd worden. Voor variant 1 'Blokken' is de kans groot dat deze in een vervolgstudie minder materiaal nodig zal hebben. Dan zou 'Blokken' ook hoger scoren op circulariteit.



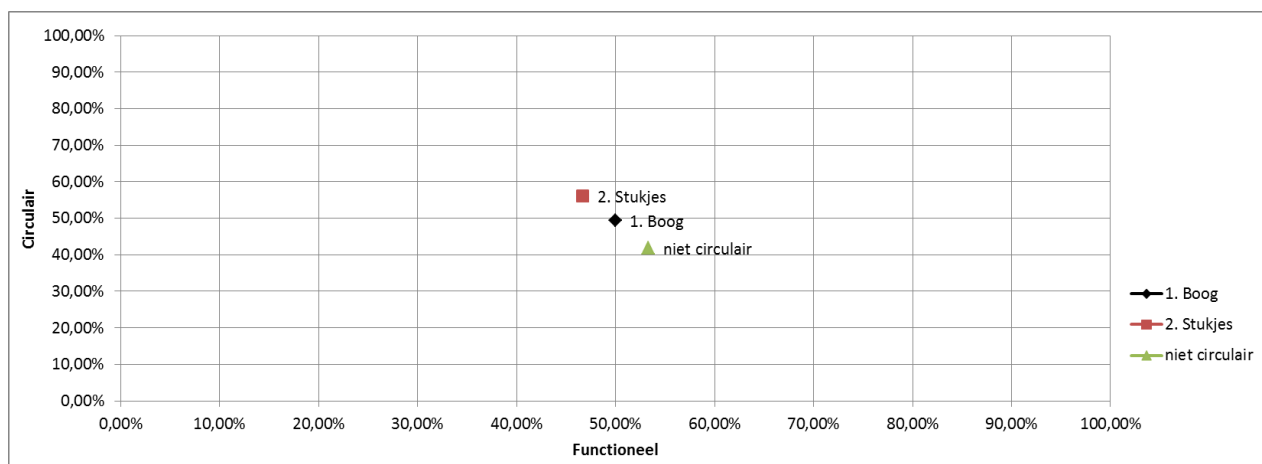
Figuur 28: Grafiek keuzematrix Dek

8.2.2 Wand

'Stukjes' en 'Boog' zitten dicht bij elkaar in de buurt in de tabel. In functionaliteit hebben beide varianten zijn gebreken in de constructie. Bij 'Boog' zal er ook trek optreden, dus geen perfecte drukboog. Bij 'Stukjes' zullen alle trekkrachten ter gevolge van het moment per meter door 2 ankers opgevangen moeten worden zoals de variant nu is ontworpen.

In circulariteit ontstaat een verschil doordat de variant 'Boog' niet uitbreidbaar is in de hoogte. 'Stukjes' zou constructief verder uitgewerkt moeten worden, maar is wel het meest adaptief. De niet circulaire versie van de wanden heeft minder voegen en scoort beter op waterdichtheid. O.a. hierdoor scoort deze beter op functionaliteit. Echter is deze niet adaptief, dus scoort hij slecht op circulariteit.

In een vervolgstudie zal onderzocht kunnen worden wat het effect is van het toepassen van grotere elementen voor variant 2 'Stukjes'. Dit zal negatief werken op de uitbreidbaarheid, maar ook positief op het aantal meter voegen. De waterbestendigheid zal toenemen. Hierdoor zal 'Stukjes' dan wellicht beter scoren op functionaliteit.



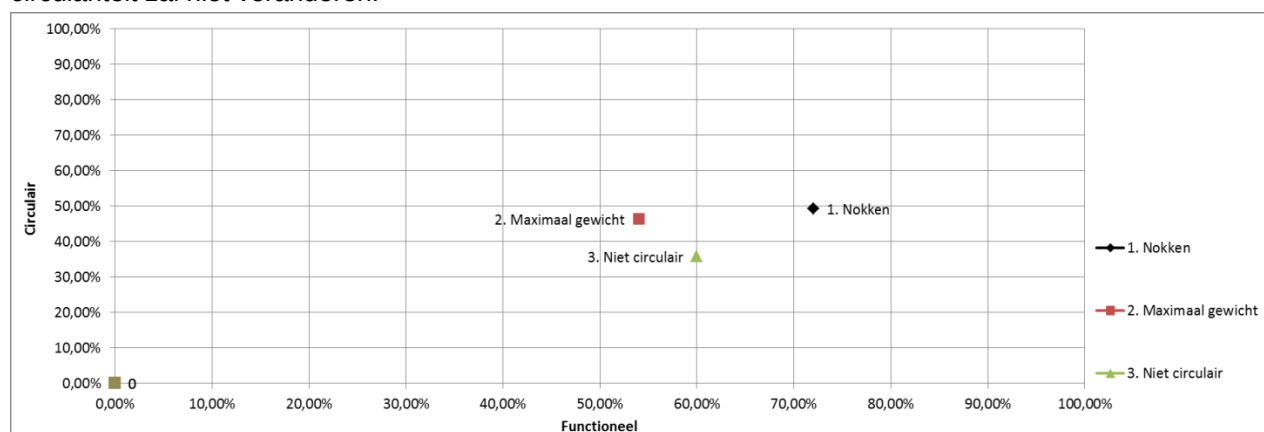
Figuur 29: Grafiek keuzematrix Wand

8.2.3 Vloer

'Nokken' scoort ongeveer net zo hoog als 'Maximaal gewicht' op circulariteit. Echter op functionaliteit scoort 'Nokken' erg hoog met 72%. Dit o.a. doordat er meer berekeningen zijn gemaakt bij dit variant. Bij de andere variant is dit minder gedaan, vanwege de omvang van het project. De krachten zullen niet verschillen tussen de varianten en overall wordt ongeveer dezelfde constructie hoogte toegepast. De constructieve toetsingen zullen dus ook voor de andere variant gelden. De 72% op functionaliteit is dus meer gericht op het uitwerken van de varianten, dan op de variant zelf inhoudelijk.

Ten slotte scoort 'Niet circulair' maar een beetje meer op functionaliteit dan 'Maximaal gewicht', en minder op circulair (zoals verwacht). De functionaliteit gaat dus wel (een beetje) ten koste van de circulariteit.

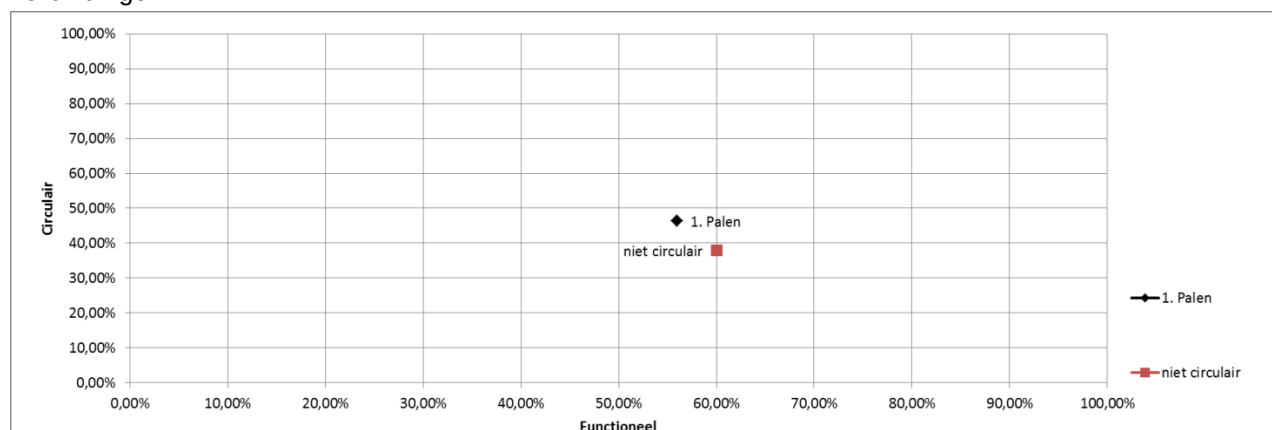
Zowel 'Nokken' als 'Maximaal gewicht' kunnen in een vervolgstudie geoptimaliseerd worden. Het verschil in circulariteit zal niet veranderen.



Figuur 30: Grafiek keuzematrix Vloer

8.2.4 Fundering

Alleen bij de variant voor de fundering, 'Palen', is er een demontabele paalfundering meegenomen. De montage van de fundering wordt bij de andere objecten niet behandeld. 'Palen' is vergeleken met een niet circulaire versie. Hierbij zijn de volumes van de vloer en de palen mee gerekend, zoals ook bij variant 1 'Palen' gebeurt. 'Palen' heeft meer voegen en is dus gevoeliger voor lekkage. Hierdoor scoort deze iets minder op functionaliteit. Voor de circulariteit tellen de recycling en de EVR het zwaarst mee, hierop scoren ze ongeveer even hoog. 'Palen' scoort toch beter op circulariteit door de overige eisen zoals flexibiliteit en toegankelijkheid verbindingen.



Figuur 31: Grafiek keuzematrix Fundering

CONCLUSIE



De huidige economie vraagt veel van de wereld. Grondstoffen uit de technologische kringloop raken snel op en er wordt niet goed omgegaan met materialen uit de biologische kringloop. De transitie naar een circulaire economie is nodig om de wereld te behouden.

Materialen in een circulaire economie circuleren in één van de onderstaande kringlopen:

- Technologische kringloop:
Grondstoffen/materialen zijn beperkt beschikbaar en niet hernieuwbaar.
- Biologische kringloop:
Grondstoffen/materialen zijn natuurlijk en hernieuwbaar.

In een technologische kringloop moet gericht worden op waardebehoud, hergebruik en recycling. In een biologische kringloop moet gericht worden op natuurlijk, hernieuwbaar en niet-toxische materialen.

Het ontwerpproces zal ook moeten veranderen. De duurzame gedachtegang is niet genoeg. Tijdens de ontwerpfase zijn er ontwerpprincipes nodig om tot een goed circulair ontwerp te komen. Tijdens de ontwerpfase zijn de volgende principes van toepassing:

- Materiaalarm en licht ontwerpen;
- Adaptief/flexibel ontwerpen;
- Modulair en demontabel;
- Materiaalkeuze en ontwerp optimaliseren op de minste milieubelasting;
- Ontwerp voor optimaal beheer en onderhoud.

De milieu-impact van GWW-werken wordt in Nederland doorgaans gemeten met DuboCalc. DuboCalc is een rekeninstrument van de Rijksoverheid. Uit DuboCalc volgt een MKI-waarde. De MKI-waarde neemt gegevens uit de gehele levenscyclus mee om de milieu-impact uit te drukken in een prijs (euro). Uit onderzoek bleek, zie document 'Literatuuronderzoek', dat DuboCalc informatie mist over specifieke materialen. Daarnaast zijn de meeste gegevens uit DuboCalc onbetrouwbaar.

Om toch een eenduidige meting voor de milieu-impact te maken, is er naar een ander getal gezocht. De meest geschikte is EVR, wat staat voor Eco-cost/Value Ratio. De EVR is te vergelijken met de MKI. De EVR is, net als MKI, een waarde om de milieu-impact uit te drukken in een prijs (euro). Het verschil met MKI is dat er veel meer gegevens beschikbaar zijn. Dit maakte het mogelijk om voor verschillende materialen een milieu-impact te meten.

Naast de EVR zijn er in de keuzematrix functionele en circulaire eisen meegenomen. Voor elke variant is bepaald hoe deze aan de eisen voldoet. De varianten van een object zijn aan de hand van de uitslag van de keuzematrix met elkaar vergeleken.

Bij het ontwerpen van alle varianten is rekening gehouden met de gestelde eisen en ontwerpprincipes. Echter door goed naar oplossingen te kunnen zoeken is er bij elke variant de focus op een ander onderwerp gelegd. Zo is variant 2 'Stukjes' van de wand bijvoorbeeld adaptief in de hoogte en heeft variant 1 'Palen' van de fundering een demontabele fundering.

Voor het dek scoren de varianten verschillend in de functionele en circulaire eisen, waardoor ze ver uit elkaar liggen in de grafiek van de keuzematrix voor dat object. De varianten van de wand liggen echter een stuk dicht bij elkaar, ondanks dat variant 1 'Boog' niet uitbreidbaar is voor de hoogte. De berekeningen voor de vloer zijn voor de verschillende varianten gelijksoortig, dus worden ze alleen bij variant 1 'Nokken' uitgevoerd. Als dit terzijde wordt gelaten, liggen de varianten van de vloer ook dicht bij elkaar in de grafiek. Alleen de niet circulaire varianten scoren, zoals verwacht, laag op circulariteit.

In 'Bijlage 6 - Antwoorden deelvragen' wordt antwoord gegeven op deelvraag 5 en 6. Deelvragen 1, 2 en 4 zijn beantwoord in het literatuuronderzoek. Deelvraag 3 wordt beantwoord in het materiaalonderzoek. Hieronder wordt antwoord gegeven op de hoofdvraag.

Hoe ontwerp je een circulaire constructie van een spooronderdoorgang?

Om een circulair ontwerp te maken dien je kennis te hebben van de circulaire ontwerpprincipes. Men hoeft geen nieuw onderzoek te doen. Het onderzoek van dit afstudeerproject kan gebruikt worden voor andere projecten. Wel is het verstandig om kennis te hebben van de laatste ontwikkelingen. Voor het meten van circulariteit is er momenteel nog geen uniforme methode.

Om een circulaire constructie te ontwerpen is materiaalgebruik van groot belang. De keuze voor het materiaalgebruik kan gedaan worden aan de hand van een materiaalonderzoek. Ook hiervoor kan het materiaalonderzoek van dit project gebruikt worden. Echter zullen vervolgstudies verder uit moeten werken hoe de detailberekeningen van de constructie, van een type materiaal, effect heeft op de circulariteit.

De kunst bij een circulair ontwerp is om flexibiliteit en adaptiviteit te combineren met materiaalarm ontwerpen. Dit zijn principes die elkaar tegen spreken. Er moet nagegaan worden welk principe belangrijker is. Bij een circulaire onderdoorgang kan afgevraagd worden hoe waarschijnlijk de uitbreiding is van bijvoorbeeld twee naar drie rijstroken. Dit verschilt per situatie. Door flexibiliteit en adaptiviteit mee te nemen in de onderdoorgang, wordt het ontwerp overgedimensioneerd. Dit brengt meer materiaalgebruik met zich mee. Er moet dus, voordat er ontworpen wordt, goed worden onderzocht wat er gevraagd wordt van de onderdoorgang en wat de toekomst zal brengen. Ten behoeve van het afstudeerproject is aangenomen dat in de toekomst uitbreiding van twee naar drie rijstroken waarschijnlijk is.

Er is nog veel mogelijk met de nieuwe technologieën op het vlak van materiaalarm ontwerpen. Met kunstmatige intelligentie is het mogelijk om de meest efficiënte vorm te ontwerpen. Deze (waarschijnlijk) lastig uitvoerbare vormen zijn mogelijk om met 3D-printer uit te voeren. De technologie van kunstmatige intelligentie en de 3D-printer winnen steeds meer terrein op de bouw. Het is een goede manier om materiaalarm te ontwerpen. Wel zal er onderzoek gedaan moeten worden naar de recyclebaarheid van het materiaal wat uit de 3D-printer komt.

Verder is het van belang om de functionele eisen en circulaire eisen tegen elkaar af te stemmen. Deze moeten zo min mogelijk ten koste van elkaar gaan.

Voor elke circulaire constructie zal tijdens de transitie naar een circulaire economie nog veel variantenstudies gedaan moeten worden. Deze kunnen worden gebaseerd op varianten zoals gemaakt in dit project. Na de transitie zullen circulaire constructies gebruikelijk zijn en kunnen dan bestaande ontwerpen meer toegepast worden.

DISCUSSIE



Tijdens het materiaalonderzoek zijn vijf constructieve materialen onderzocht. Dit zijn de voornaamste bouwmaterialen maar er zijn er nog veel meer. Het materiaalonderzoek zou nog verder uitgebreid moeten worden. Een interessant materiaal is bijvoorbeeld biobased composiet. Hier is niet op in gegaan tijdens het materiaalonderzoek maar voor een circulair bouwwerk liggen hier wel kansen. Daarnaast had rubber onderzocht moeten worden met betrekking tot de waterkering in de verbindingen.

De circulariteit van materialen is nu bepaald aan de hand van een materiaaltoets en met principes van technologische en biologische kringloop. De uitkomsten uit beide waren hetzelfde. Het bepalen aan de hand van de principes van de desbetreffende kringloop werkte het best. Er is hier wel kennis voor nodig over het materiaal.

Gegevens van materialen over de milieu-impact (MKI en EVR) zijn (nog) niet nauwkeurig en onbetrouwbaar. Dit komt omdat de gegevens nog niet goed toegankelijk zijn. Fabrikanten dienen hun gegevens in te voeren in een LCA zodat voor elk product een LCA beschikbaar is met de juiste gegevens. In een database zouden deze gegevens beschikbaar moeten zijn. Het meest geschikte programma lijkt hiervoor DuboCalc te zijn.

Tijdens deze afstudeerperiode was er weinig tijd voor de ontwerpfase. De variantenstudie kon niet verder uitgewerkt worden om de beste eigenschappen van elke variant te combineren in een totaal ontwerp. De varianten zijn op schetsniveau uitgewerkt en er zijn bijna geen berekeningen gemaakt aan de verbindingen (behalve variant 1 'Blokken' van het dek). Het is dan ook lastig om grote, concrete conclusies te trekken uit dit onderzoek. Wel geeft deze studie de mogelijkheden aan van circulair bouwen en wat de potentie zou kunnen zijn.

De aanname van een levensduur van 200 jaar is door de auteurs bepaald door de levensduur van huidige civiele kunstwerken te verdubbelen. Circulair bouwen staat nog in de kinderschoenen, en er zijn nog geen nationale standaarden bekend betreffende de minimale levensduur voor een circulair ontwerp. Deze studie had ook van een langere of kortere levensduur uit kunnen gaan. Het zou interessant zijn de invloed van verschillende levensduren te onderzoeken, echter, hier was in deze studie niet voldoende tijd voor.

AANBEVELING



Literatuur- en materiaalonderzoek

Het literatuur- en materiaalonderzoek kunnen direct voor een vervolg onderzoek toegepast worden. Dit hoeft niet opnieuw gedaan te worden. Er kan juist op worden doorgebouwd.

Literatuuronderzoek

Er dient vast te worden gelegd aan welke ontwerpprincipes gedacht moet worden tijdens het ontwerpen van een circulair kunstwerk.

Materiaalonderzoek

Er zou meer onderzoek gedaan moeten worden naar verschillende bouwmaterialen. Biobased composieten zou een interessant materiaal kunnen zijn voor een circulair bouwwerk.

Gebruik geen vezelversterkt kunststof. Vezelversterkt kunststof is tot op heden nog niet hoogwaardig recyclebaar. Materialen die hoogwaardig recyclebaar zijn, krijgen voorrang.

Er dient onderzoek gedaan te worden naar de circulariteit van rubber ten behoeve van de waterdichtheid

Er dient een database te komen, met goed onderbouwde LCA gegevens, die voor iedere ontwerper toegankelijk is. Gegevens dienen betrouwbaar en herleidbaar te zijn.

Een materiaal wordt bepaald of het circulair is aan de hand van de technologische en biologische kringloop. Dit dient eerst bepaald te worden. Daarna wordt er gekeken of het desbetreffende materiaal voldoet aan de principes van de desbetreffende kringloop. Als het voldoet is het materiaal circulair.

Aanbevolen wordt om de milieu-impact van verschillende materialen te berekenen voor verschillende basismechanica schema's. Met deze gegevens is in één opslag te zien welk materiaal de meeste milieu-impact heeft in welke situatie.

Materiaalarm ontwerpen is belangrijk bij een circulair ontwerp. Kunstmatige intelligentie en 3D-printen zijn opkomende technologieën die een nieuwe wereld openen op het gebied van materiaalarm ontwerpen.

Levensduur

Voor dit project is in de eisenstudie de levensduur gesteld op het dubbele van het huidige gehanteerde ontwerplevensduur bij civiele kunstwerken, 200 jaar. In het 'Uitgangspunten-document' en de materiaalstudie is dit meegenomen, maar tijdens de variantenstudie niet. Een goed vervolgonderzoek zou zijn hoe deze levensduur te realiseren is. Is dit te realiseren met duurzaam materiaalgebruik, of moeten de materialen dan zodanig worden toegepast dat het minder milieu-impact heeft als de materialen worden gerecycled? Staalvezel versterkt beton heeft een MKI per m³ van 78,82, standaard beton 40,37. Hoeveel neemt de levensduur toe door de staalvezels dat het deze hogere MKI waard is?

Eisenstudie

De verkeerstromen kruisen elkaar in dit project haaks. In een vervolgonderzoek kan onderzocht worden wat het effect is op het materiaalgebruik wanneer de verkeerstromen elkaar niet haaks kruisen.

Vergelijken

De Kesselringmethode is een gestructureerde, systematische beoordeling. Het is aan te bevelen om varianten te vergelijken met de Kesselringmethode.

Het was beter geweest om niet op objectniveau te vergelijken maar op een kleiner niveau. Bijvoorbeeld verschillende oplossingen voor een verbinding met elkaar vergelijken. Een andere vergelijking zou afmeting van een element kunnen zijn.

Varianten

De beste eigenschappen van elke variant zouden bij elkaar moeten komen in één ontwerp. Dit kan in een vervolgstudie door het maken van een nieuw ontwerp aan de hand van de circulaire ontwerpprincipes die volgen uit het literatuur- en materiaalonderzoek. De mogelijke oplossingen, gegeven in deze variantenstudie, kunnen toegepast worden.

Als de principes uit de varianten gebruikt zullen worden bij een vervolgonderzoek, dienen er een aantal dingen gedetailleerder uitgewerkt te worden.

De horizontale belastingen zijn niet meegenomen in de berekeningen van dit ontwerp (wel uitgezocht, zie 'Uitgangspunten-document'). Het effect van deze krachten op de verbinden wel, maar niet het gevolg van de grootte van deze krachten.

Het ontwerp zal volledig geconstrueerd moeten worden. Zo ook de brandwerendheid, vermoeiing, vervorming en trillingen.

Ook is het bij het ontwerpen met elementen van belang dat er rekening wordt gehouden met de vervorming (o.a. kruip). Vragen moeten gesteld worden zoals: Hoe verbindt je de elementen en wat is het effect van kruip in de elementen op de verbinding.

Wanneer er staal wordt toegepast voor een verbinding, kan er onderzocht worden wat het effect is van het uitzetten van de verbinding door extreme temperaturen. Hoe gaat de verbinding vervormen en welk effect heeft dit op het krachten spel in het hele ontwerp.

Als er een demontabele verbinding wordt gerealiseerd aan de hand van een boutverbinding, dient er rekening gehouden te worden met het effect van het vervormen van de verbinding door gat speling. Dit gebeurt totdat de boutsteel tegen het gat wand drukt.

Ten slotte is het natuurlijk van belang dat bij een volledig constructief ontwerp de elementen zo veel mogelijk zijn geoptimaliseerd. Door zo min mogelijk materiaal toe te passen wordt de milieu-impact geminimaliseerd.

BIBLIOGRAFIE



- Bos, S. (2018). *Grondstoffen*. Retrieved maart 2019, from finler.nl: <https://www.finler.nl/grondstoffen>
- Bouw Circulair. (2018, Januari 24). *Wat zijn LCA en MKI-waarde*. Retrieved April 25, 2019, from bouwcirculair: http://www.bouwcirculair.nl/static/files/tinymce/uploads/BouwCirculair_infoblad_LCA_MKI_waarde_24012018.pdf
- DFB. (n.d.). *De financiële begrippenlijst*. Retrieved April 26, 2019, from Business model: <https://www.dfbonline.nl/begrip/7199/business-model>
- Ellen MacArthur Foundation. (n.d.). *Circular Economy System Diagram*. Retrieved April 25, 2019, from ellenmacarthurfoundation: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/infographic>
- Ellen MacArthur Foundation. (n.d.). *Circularity indicators*. Retrieved April 16, 2019, from ellenmacarthurfoundation: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/insight/Circularity-Indicators_Methodology_May2015.pdf
- Encyclo. (n.d.). *Nederlandse Encyclopedie*. Retrieved April 26, 2019, from encyclo: <https://www.encyclo.nl>
- Het Groene Brein. (n.d.). *Circulaire economie*. Retrieved April 18, 2019, from kenniskaarten.hetgroenebrein: <https://kenniskaarten.hetgroenebrein.nl/kenniskaart/circulaire-economie/>
- PBL. (2016, Juni 22). *Van een lineaire naar een circulaire economie*. Retrieved April 18, 2019, from pbl: <https://www.pbl.nl/infographic/van-een-lineaire-naar-een-circulaire-economie>
- Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (2010, mei 24). *Wat is LCA?* Retrieved maart 2019, from rivm: <https://www.rivm.nl/life-cycle-assessment-lca/wat-is-lca>
- Rijksoverheid. (2015, December 12). *Nederland stemt in met historisch Klimaatakkoord*. Retrieved Mei 2019, from rijksoverheid: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/nieuws/2015/12/12/nederland-stemt-in-met-historisch-klimaatakkoord>
- Rijksoverheid. (2016, September 14). *Rijksbreed programma Circulaire Economie*. Retrieved April 25, 2019, from rijksoverheid: <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2016/09/14/bijlage-1-nederland-circulair-in-2050>
- van Vliet, H. (2007). *Software Engineering: Principles and Practice*. Wiley.
- Verhoeven & Leenders. (n.d.). *Spooronderdoorgang Rauwrakenpad te Tilburg*. Retrieved Mei 2019, from verhoeven-leenders: <https://www.verhoeven-leenders.nl>
- VolkerWessels. (2018, september 11). *PlasticRoad*. Retrieved mei 20, 2019, from VolkerWessel: <https://www.volkerwessels.com/nl/projecten/plasticroad>

13.1 Bijlage 1 - Materiaaltoets

Beton

Vraag 1:

Zijn er toepassingen voor dit materiaal wanneer dit wordt gerecycled/hergebruikt in de volgende levenscycli?

Antwoord:

Ja, na recycling kunnen de bouwgrondstoffen tot op zekere hoogte terug worden gewonnen. Zand en grind worden teruggewonnen als betongranulaat wat weer gebruikt kan worden als secundair toeslagmateriaal in nieuw beton. Niet-gereageerd cement kan teruggewonnen worden door middel van de slimbreker. Het niet-gereageerde cement kan worden hergebruikt in nieuwe betonconstructies. Het gereageerde cement kan als vulstof worden hergebruikt in nieuw beton.

Vraag 2:

Is na de volgende levenscycli nog voldoende vraag naar deze toepassingen?

Antwoord:

Ja, omdat de bouwgrondstoffen grotendeels terug kunnen worden gewonnen, kan er weer beton van worden gemaakt. De normen laten percentages toe tot 20% betongranulaat als secundaire grondstof voor nieuw beton. Tegenwoordig wordt het betongranulaat vooral als fundatiemateriaal onder wegen gebruikt. Omdat beton hoge druksterktes aan kan en het simpel te maken is, zal het in de toekomst een veel gebruikt product blijven.

Vraag 3:

Kunnen de specifieke eigenschappen van het materiaal (grotendeels) in de volgende levenscycli opnieuw benut worden?

Antwoord:

Ja, de teruggewonnen bouwgrondstoffen kunnen weer worden gebruikt in nieuw beton. De eigenschappen van het materiaal gaan niet achteruit. Er wordt zelfs beweert dat het granulaat wat uit de slimbreker komt zelfs betere eigenschappen heeft als een oorspronkelijke toeslagmateriaal.

Vraag 4:

Is er geen negatief effect bij het toepassen van dit materiaal op de hergebruiksmogelijkheden van andere materialen uit de beoogde toepassing?

Antwoord:

Ja, er is geen negatief effect. Hergebruik van het beton is juist positief, omdat er minder cementproductie nodig is. Ook hoeven er geen extra grondstoffen worden gedolven om nieuw beton te maken. Er is wel onderzocht dat meer toeslagmateriaal een hogere MKI-waarde met zich meebrengt. Dit komt doordat het betongranulaat getransporteerd moet worden en het meer water vergt om het materiaal goed te binden.

Conclusie

Beton is circulair.

Staal

Vraag 1:

Zijn er toepassingen voor dit materiaal wanneer dit wordt gerecycled/hergebruikt in de volgende levenscycli?

Antwoord:

Ja, staal is een zeer goed constructiemateriaal, omdat het zowel druk als trek goed op kan nemen. Staal maakt het ook mogelijk om zeer snel te bouwen. Het grote nadeel bij staal is het productieproces. Het is dus van groot belang dat staal zo veel mogelijk wordt gerecycled/hergebruikt.

Vraag 2:

Is na de volgende levenscycli nog voldoende vraag naar deze toepassingen?

Antwoord:

Ja, staal is met beton het meest gebruikte bouw materiaal. Het grote voordeel van staal ten opzichte van beton is dat staal makkelijk te monteren en demonteren is. Voor een circulair ontwerp is dit een belangrijke eigenschap. Circulariteit zal steeds belangrijker worden in de bouwsector.

Vraag 3:

Kunnen de specifieke eigenschappen van het materiaal (grotendeels) in de volgende levenscycli opnieuw benut worden?

Antwoord:

Ja, staal is volledig recyclebaar. Hier moet wel bij gezegd worden dat de roest niet recyclebaar is en hier dus materiaalverlies optreedt. Dit kan voorkomen worden door het staal goed te onderhouden. Een ander belangrijk punt is dat het bij staal zelfs mogelijk is om een betere staalkwaliteit te produceren na recycling.

Vraag 4:

Is er geen negatief effect bij het toepassen van dit materiaal op de hergebruiksmogelijkheden van andere materialen uit de beoogde toepassing?

Antwoord:

Ja, er treedt geen negatief effect op, doordat het mogelijk is om staal om te smelten. Hierdoor kan van het staal weer verschillende producten worden gemaakt.

Conclusie:

Staal is circulair.

Aluminium

Vraag 1:

Zijn er toepassingen voor dit materiaal wanneer dit wordt gerecycled/hergebruikt in de volgende levenscycli?

Antwoord:

Ja, er zijn talloze mogelijkheden om gerecycled aluminium weer toe te passen. Aluminium recycling is zo opgezet dat producten met dezelfde samenstelling met elkaar worden gerecycled om zo vermenging van kwaliteit te voorkomen.

Vraag 2:

Is na de volgende levenscycli nog voldoende vraag naar deze toepassingen?

Antwoord:

Ja, aluminium heeft goede eigenschappen. De goede eigenschappen van aluminium maakt het toepasbaar in veel sectoren.

Vraag 3:

Kunnen de specifieke eigenschappen van het materiaal (grotendeels) in de volgende levenscycli opnieuw benut worden?

Antwoord:

Ja, net als bij staal kan aluminium om worden gesmolten tot nieuw aluminium. Door de verschillende aluminium soorten goed te scheiden, is het mogelijk om dezelfde eigenschappen terug te krijgen.

Vraag 4:

Is er geen negatief effect bij het toepassen van dit materiaal op de hergebruiksmogelijkheden van andere materialen uit de beoogde toepassing?

Antwoord:

Ja, door het aluminium om te smelten zijn er talloze mogelijkheden om er nieuwe producten van te maken.

Conclusie:

Aluminium is circulair.

Vezelversterkte kunststof

Vraag 1:

Zijn er toepassingen voor dit materiaal wanneer dit wordt gerecycled/hergebruikt in de volgende levenscycli?

Antwoord:

Ja, composiet kan worden versnipperd en de versnipperde vezels kunnen worden hergebruikt in bijvoorbeeld beton of asfalt. Hydrolyse en pyrolyse maken het mogelijk om een deel van het gebruikte bindmiddel terug te winnen.

Vraag 2:

Is na de volgende levenscycli nog voldoende vraag naar deze toepassingen?

Antwoord:

Nee, er zal wel genoeg vraag zijn naar het bindmiddel, maar dit terugwinningsproces is niet efficiënt genoeg. Daarnaast kunnen de vezels alleen maar teruggewonnen worden als versnipperde vezels. Deze versnipperde vezels kunnen wel gebruikt worden in beton of asfalt.

Vraag 3:

Kunnen de specifieke eigenschappen van het materiaal (grotendeels) in de volgende levenscycli opnieuw benut worden?

Antwoord:

Nee, de vezels hebben hun kracht, omdat de vezel één geheel is. Na het versnipperen zijn het kleine stukjes, waardoor het niet meer de kracht heeft als toen het één vezel was. Het kan dus ook niet meer toegepast worden zoals het bedoeld is. Er zijn wel laagwaardige toepassingen, zoals het verwerken van composietvezelsnippers in beton of asfalt.

Vraag 4:

Is er geen negatief effect bij het toepassen van dit materiaal op de hergebruiksmogelijkheden van andere materialen uit de beoogde toepassing?

Antwoord:

Nee, zie het antwoord bij vraag 3.

Conclusie:

Niet circulair.

Hout

Vraag 1:

Zijn er toepassingen voor dit materiaal wanneer dit wordt gerecycled/hergebruikt in de volgende levenscycli?

Antwoord:

Ja, als het hout nog in goede staat is, kan het worden hergebruikt. Als het onbewerkt hout betreft kan dit zonder problemen terugvloeien in de natuur. Dit zorgt weer voor voedingsstoffen voor andere bomen.

Vraag 2:

Is na de volgende levenscycli nog voldoende vraag naar deze toepassingen?

Antwoord:

Ja, hout slaat CO₂ op. Zelfs als het verbrand zou worden komt alleen de CO₂ vrij die opgenomen is door de boom. Hout is dus CO₂ neutraal. Bewerkt hout zorgt wel voor minder toepassingen na de levenscyclus.

Vraag 3:

Kunnen de specifieke eigenschappen van het materiaal (grotendeels) in de volgende levenscycli opnieuw benut worden?

Antwoord:

Ja, dit ligt wel aan de toestand van het hout. Als hout niet goed wordt onderhouden gaat het rotten. Een verrotte houten plank kan niet worden hergebruikt met dezelfde eigenschappen. Dit hout kan wel gecomposteerd worden waardoor nieuwe voedingsstoffen in de grond komen voor nieuwe bomen, de biologische kringloop.

Vraag 4:

Is er geen negatief effect bij het toepassen van dit materiaal op de hergebruiksmogelijkheden van andere materialen uit de beoogde toepassing?

Antwoord:

Ja, er is geen negatief effect. Er moet wel gebruik worden gemaakt van het FSC-keurmerk. Het FSC-keurmerk zorgt voor verantwoord bosbeheer. Hierdoor wordt er niet meer gekapt dan er bij groeit.

Conclusie:

Hout is circulair (mits er wordt voldaan aan FSC-keurmerk)

13.2 Bijlage 2 - Wegwijzer

1. Wat is circulariteit?

(beantwoord in literatuur- en materiaalonderzoek hoofdstuk 6)

Must have

1.MH.1	Lineaire economie/bouw beschrijven <i>Om een goed beeld te krijgen waar het begrip “circulariteit” vandaan komt moet er breder gezocht worden dan alleen het begrip “circulair bouwen”. Een beschrijving van de huidige economie is hiervoor noodzakelijk.</i>	Literatuuronderzoek Par 2.
1.MH.2	Circulaire economie/bouw beschrijven <i>Een goede toelichting van het begrip circulaire economie/bouw is van groot belang voor dit onderzoek.</i>	Literatuuronderzoek Par 3.
1.MH.3	Een begrippenlijst m.b.t. circulariteit <i>Circulariteit neemt allerlei begrippen met zich mee. Dit kunnen begrippen zijn waarvan men niet weet wat het betekend. Hiervoor is een begrippenlijst toegevoegd ter verduidelijking.</i>	Literatuuronderzoek Begrippenlijst
1.MH.4	Voor- en nadelen circulair bouwen t.o.v. lineair bouwen <i>Een overzicht met voor- en nadelen van circulair bouwen t.o.v. lineair bouwen is een overzichtelijke conclusie.</i>	Literatuuronderzoek Par 2.3 & 3.5
1.MH.5	Recyclebaarheid materiaal beschrijven <i>Recyclebaarheid is een belangrijk onderdeel voor de materiaalkeuze. Bij circulariteit gaat het onder andere over wat er aan het eind van de levensduur met het kunstwerk gebeurt. Het is een pré als de materialen (liefst hoogwaardig) recyclebaar zijn.</i>	Materiaalonderzoek Par 3.1.9 & 3.2.4 & 3.3.5 & 3.4.4 & 3.5.4

Should have

1.SH.1	Overleggen met experts op het vakgebied van circulair bouwen <i>Om niet alleen informatie te winnen via het internet, wordt er ook informatie gewonnen via mondelingen gesprekken met experts op bepaalde vakgebieden. Dit staat bij should have omdat het goed is om niet alleen informatie vanaf het internet te winnen; Mondeling kan een expert meer toelichten dan wat hij/zij op internet heeft gepubliceerd. Echter is van het internet veel meer bronnen te vinden dan van één persoon en kost een over met een expert veel tijd.</i>	Notities gehouden interviews
1.SH.2	Circulaire ontwerp principes formuleren <i>Bij het maken van een ontwerp is het handig bestaande ontwerpprincipes te gebruiken. Dit geldt ook voor circulariteit.</i>	Literatuuronderzoek Par 3.3 & 4.2

Could have

1.CH.1	Geschiedenis circulariteit beschrijven <i>Om dieper op het begrip “circulariteit” in te gaan, geeft een blik terug in de tijd een goed beeld waar het circulariteit vandaan komt.</i>	Literatuuronderzoek Par 3.1
--------	--	--------------------------------

Won't have

1.WH.1	Circulaire toepassingen buiten de bouw <i>Voor het onderzoek zijn toepassingen buiten de bouw niet zo van belang. Het onderzoek is gericht op het ontwerpen van een civiel technisch kunstwerk.</i>	-
--------	--	---

2. Welke projecten zijn al uitgevoerd in het kader van circulariteit?

(beantwoord in literatuuronderzoek hoofdstuk 6)

Must have

2.MH.1	Er dienen minimaal 3 <u>circulaire</u> referentieprojecten opgezocht te worden <i>Om de deelvraag enige omvang te geven is er een minimaal aantal referentieprojecten opgesteld.</i>	Literatuuronderzoek Par 4.4
2.MH.2	Inzichtelijk hebben hoe de referentieprojecten bruikbaar zijn voor het afstudeerproject <i>Referentieprojecten zijn handig als deze projecten overeenkomsten hebben met het afstudeeronderzoek. Door de bruikbaarheid in kaart te brengen kan dit helpen tijdens het afstudeeronderzoek.</i>	Literatuuronderzoek Par 4.4

Should have

2.SH.1	Een of meer civiel technische referentieproject(en) <i>Omdat circulariteit nog in haar kinderschoenen staat, kan het lastig zijn om referentieprojecten te vinden. Vooral in de GWW-sector, omdat het nog een nieuw begrip is. Civiel technische projecten zijn het meest relevant en bruikbaar voor het afstudeeronderzoek.</i>	Literatuuronderzoek Par 4.4
2.SH.2	Beschrijving van problemen bij circulaire projecten <i>Van problemen leer je, dus tijdens de zoektocht naar referentieprojecten dienen problemen beschreven te worden. Door dit duidelijk te omschrijven, kunnen deze problemen tijdens dit afstudeerproject voorkomen worden.</i>	Literatuuronderzoek Par 4.4
2.SH.3	Oplossingen voor problemen bij circulaire projecten <i>Bij problemen horen oplossingen. Of de oplossing werkt is soms nog de vraag maar van werkende oplossingen kan veel geleerd worden.</i>	Literatuuronderzoek Par 4.4

Could have

2.CH.1	Tekeningen, uitgangspunten, berekeningen van referentieprojecten <i>Dit is specifieke informatie, die vaak niet te verkrijgen is. Maar als het beschikbaar is, kan dit bruikbaar zijn.</i>	Literatuuronderzoek Par 4.4
2.CH.2	Eisen die gesteld zijn aan circulariteit <i>Om een beeld te krijgen welke eisen bij circulariteit horen, zijn gestelde eisen bij een bestaand project een goede referentie. Er is een grote kans dat deze informatie niet beschikbaar is.</i>	-
2.CH.3	Een referentieproject dat <u>niet</u> uit de bouwsector komt <i>Een referentieproject buiten de bouwsector is minder bruikbaar dan een die wel uit de bouwsector komt. Toch kan het zo zijn dat een circulair project buiten de bouwsector bruikbare informatie bevat.</i>	-

Won't have

2.WH.1	Meer dan 6 referentieprojecten <i>Om de zoektocht naar referentieprojecten niet uit de hand te laten lopen qua tijd, is er een maximum van 6 referentieprojecten gesteld.</i>	-
--------	--	---

3. Welke materialen zijn geschikt voor een circulair ontwerp?

(beantwoord in materiaalonderzoek hoofdstuk 6)

Must have

2.MH.1	Er dienen minimaal 3 en maximaal 6 constructieve materialen onderzocht te worden. <i>Om de deelvraag enige omvang te geven is er een minimaal aantal materialen opgesteld. Er is een maximum aangegeven om het materiaalonderzoek af te bakenen in verband met de beschikbare tijd.</i>	Materiaalonderzoek Par 2. t/m 6.
2.MH.2	Aan het eind van het onderzoek moet duidelijk worden welke constructieve materialen circulair zijn. <i>Een doel van het materiaalonderzoek is om er achter te komen op welke manier bepaald wordt of een materiaal circulair is.</i>	Materiaalonderzoek Par 6.2
2.MH.3	In het materiaalonderzoek moet duidelijk worden welke materialen mogelijk geschikt zijn voor een toepassing in de constructie van een circulaire spooronderdoorgang. <i>Een doel van het materiaalonderzoek is het vinden van geschikte materialen voor het ontwerp van een circulaire spooronderdoorgang.</i>	Materiaalonderzoek Par 5.3 & 6.

Should have

2.SH.1	Herkomst van grondstoffen van het materiaal worden beschreven. <i>De herkomst van grondstoffen zou belangrijk kunnen zijn in verband met het transporteren van het materiaal. Transport zorgt immers voor uitstoot.</i>	Materiaalonderzoek Par 3.1.2 & 3.2.1 & 3.3.1 & 3.4.1 & 3.4.2 & 3.5.3
2.SH.2	De verschillende soorten van een materiaal worden beschreven. <i>Een materiaal kan veel verschillende soorten hebben. Wat een verschillende soort is, hangt af van het materiaal. Beton wordt bijvoorbeeld onderverdeeld per cilinderdruksterkte.</i>	Materiaalonderzoek Par 3.1.4 & 3.2.3 & 3.3.3 & 3.4.1 & 3.4.2 & 3.5.3
2.SH.3	De recycling mogelijkheden van het materiaal wordt beschreven. <i>Voor het circulaire ontwerp is het belangrijk om demontabel te ontwerpen in losse elementen. De gebruiksfase van een circulair ontwerp zal veel beter worden gebruikt dan bij een lineair ontwerp. De eindlevensfase van een circulair ontwerp moet ook niet vergeten worden, omdat er aan het eind van de levensfase geen afval mag ontstaan. De recyclebaarheid van een materiaal is dus belangrijk.</i>	Materiaalonderzoek Par 3.1.9 & 3.2.4 & 3.3.5 & 3.4.4 & 3.5.4
2.SH.4	De productieprocessen die nodig zijn om tot het materiaal te komen worden beschreven. <i>Het productieproces kan inzicht geven in hoe slecht een materiaal voor het milieu is. Er kan onderzocht worden hoeveel energie het kost om een materiaal te maken om deze zo aan het eind van het onderzoek naast elkaar te leggen en zo tot een conclusie te komen.</i>	Materiaalonderzoek Par 3.1.3 & 3.2.2 & 3.3.2 & 3.4.3 & 3.5.2

Could have

2.CH.1	Aangeven in welke mate het grondstof beschikbaar is. <i>De beschikbaarheid van een grondstof is belangrijk in een circulaire economie. Als een grondstof beperkt beschikbaar is moet het voorkomen worden die te gebruiken.</i>	Materiaalonderzoek Par 3.1.1 & 3.2.1 & 3.3.1 & 3.4.1 & 3.4.2 & 3.5.1
2.CH.2	Vergelijken van de milieu impact van de materialen. <i>Voor de conclusie zou het goed zijn om de milieu impact van de verschillende materialen te onderzoeken. Dit moet wel objectief gebeuren. Dit zou bijvoorbeeld kunnen door een basisgeval per materiaal uit te rekenen.</i>	Materiaalonderzoek Par 5.

Won't have

2.WH.1	Het materiaalonderzoek gaat niet op berekeningen in. <i>In verband met de beschikbare tijd wordt het materiaalonderzoek globaal uitgewerkt zodat het voor de lezer duidelijk wordt uit welke grondstoffen het desbetreffende materiaal bestaat en waar deze vandaan komen. Ook dienen de recycling mogelijkheden van het materiaal beschreven te worden.</i>	-
--------	---	---

4. Hoe wordt circulariteit gemeten?

(beantwoord in literatuuronderzoek hoofdstuk 6)

Must have

4.MH.1	Beschrijven van verschillende circulaire meetmethodes <i>Om een goed beeld te krijgen van wat er is qua meetmethodes, moeten deze bestaande methodes opgezocht worden.</i>	Literatuuronderzoek Par 5.3
4.MH.2	Beschrijven hoe milieu-impact wordt gemeten <i>Het afstudeeronderzoek is gericht op het terugdringen van de milieu-impact. Het is dus een must have om de milieu-impact te kunnen meten.</i>	Literatuuronderzoek Par 5.6
4.MH.3	Formuleren hoe circulariteit gemeten wordt voor dit project <i>Een meting van de circulariteit is een must have, omdat een circulair ontwerp wordt geconstrueerd. Hier willen we de mate van circulariteit van weten.</i>	Literatuuronderzoek Par 5.7

Should have

4.SH.1	Meting van circulariteit volgens één van de opgezochte methodes <i>Er is een kleine kans dat circulariteit niet te meten is. Daarom staat dit bij should have terwijl het eigenlijk een must have is.</i>	'Kesselring methode – Keuzematrix', Excel 'EVR bepalen varianten'
4.SH.2	Beschrijven uit welke grondstoffen de gekozen materialen bestaan <i>Een circulair ontwerp begint bij de materiaalkeuze. De materiaalkeuze bepaald hoe milieubelastend en of het recyclebaar is aan het eind van de levensduur.</i>	Materiaalonderzoek Par 3.1.1 & 3.2.1 & 3.3.1 & 3.4.1 & 3.4.2 & 3.5.1

Could have

4.CH.1	Meting van circulariteit op kunstwerkniveau <i>Een meting van circulariteit op kunstwerkniveau is een goede toevoeging aan het project. Maar er is een grote kans dat dit niet haalbaar is doordat er nog geen goede meetmethode voor is.</i>	-
--------	--	---

Won't have

4.WH.1	Praktijk gericht onderzoek naar de circulariteit van materialen <i>Er wordt geen praktijk gericht onderzoek gedaan omdat dit al een afstudeeronderzoek op zich is.</i>	-
4.WH.2	Een zelf ontwikkelde-tool om circulariteit te meten <i>Net als bij de 1^e won't have kan dit ook een afstudeeronderzoek op zich zijn.</i>	-

5. Wat zijn de uitgangspunten bij een spooronderdoorgang?

(Beantwoord in hoofdrapport bijlage 6)

Must have

5.MH.1	Een opzet van de belangrijkste punten in een PvE van een circulaire spooronderdoorgang <i>Om een circulair ontwerp te maken van een spooronderdoorgang is het goed om een PvE op stellen met in ieder geval de belangrijkste punten. Een volledig uitgewerkt PvE kan het afstudeeronderzoek belemmeren.</i>	Uitgangspunten- document
5.MH.2	Belangrijkste uitgangspunten van een spooronderdoorgang <i>Om een goed beeld te krijgen van uitgangspunten bij een spooronderdoorgang is het goed om deze te filteren uit een bestaand project.</i>	Uitgangspunten- document
5.MH.3	Belangrijkste uitgangspunten voor een circulair ontwerp <i>Een circulair ontwerp van een spooronderdoorgang is nog nooit uitgevoerd. Het is dus van belang om hier duidelijke uitgangspunten voor neer te zetten en deze duidelijk te beschrijven.</i>	Uitgangspunten- document

Could have

5.CH.1	Een studie naar de eisen van verschillende spooronderdoorgangen en deze vergelijken met de gevonden eisen <i>Dit kan een goede aanvulling zijn. Maar het is niet noodzakelijk, omdat er zelf moet worden nagedacht over de eisen van een circulair ontwerp. Het kan ook zijn dat er niet genoeg tijd is om dit uit te voeren.</i>	-
5.CH.2	Een studie naar de architectonische eisen die gesteld zijn aan de spooronderdoorgang in Tilburg en deze verwerken in het circulaire ontwerp <i>Architectuur is niet belangrijk voor dit afstudeerproject. Toch heeft architectuur een grote invloed op het ontwerp. Het kan dus interessant zijn om hier naar te kijken maar dit ligt aan de beschikbare tijd.</i>	-

Won't have

5.WH.1	Een volledig uitgewerkt PvE van de circulaire spooronderdoorgang <i>Een volledig uitgewerkt PvE kan het afstudeeronderzoek belemmeren.</i>	-
--------	---	---

6. Hoe wordt een circulair ontwerp gemaakt?

(Beantwoord in hoofdrapport bijlage 6)

Must have

6.MH.1	Een opsplitsing van verschillende objecten van een spooronderdoorgang <i>Door het kunstwerk op te delen in objecten, kunnen van deze objecten varianten opgesteld worden. Deze varianten kunnen dan met elkaar worden vergeleken zodat er een optimaal ontwerp uitkomt.</i>	Hoofdrapport Par. 7.2
6.MH.2	Per object dienen tenminste 2 varianten opgesteld te worden <i>Er worden tenminste 2 varianten opgesteld zodat er een keuze is per object.</i>	Hoofdrapport Par. 7.2
6.MH.3	Middels een keuzematrix wordt er per object de beste variant gekozen <i>Een keuzematrix maakt een overzichtelijk overzicht van de verschillende objecten met criteria waar de varianten op scoren.</i>	'Kesselring methode – Keuzematrix' Hoofdrapport H. 8
6.MH.4	In de keuzematrix komt het criterium circulariteit voor <i>Circulariteit is een belangrijk criterium van het afstudeeronderzoek.</i>	Hoofdrapport H. 8.1 Excel 'EVR bepalen varianten'
6.MH.5	De objecten dienen minimaal op schetsniveau uitgewerkt te worden. <i>Omdat het een concept ontwerp wordt, hoeven de objecten niet volledig uitgewerkt te worden tot een definitief ontwerp.</i>	Berekeningsrapport variantenstudie Hoofdrapport Par. 7.2
6.MH.6	De hoofddraagconstructie van de onderdoorgang wordt op schetsniveau uitgewerkt. <i>Met hoofddraagconstructie wordt hier de constructie onder het spoor bedoeld. De constructie bevat een vloer, wanden en een dek.</i>	'Uitgangspunten-document' 'Mechanica model'

Should have

6.SH.1	De varianten moeten zo veel mogelijk voldoen aan de gestelde eisen. <i>Sommige eisen zullen misschien niet haalbaar zijn. Als dit zo is scoort die variant minder op die eis middels de keuzematrix.</i>	'Kesselring methode – Keuzematrix' 'Verantwoording scores - Keuzematrix'
6.SH.2	De constructie van de toeritten worden op schetsniveau uitgewerkt.	-

Could have

6.CH.1	In de keuzematrix komt het criterium kosten voor	-
6.CH.2	Een definitief ontwerp van het circulaire ontwerp <i>Om een definitief ontwerp te kunnen moeten maken moet er minimaal één variant per object ontworpen te worden. Ook dienen de objecten goed op elkaar aan te sluiten. Dit zal niet voor alle varianten mogelijk zijn. Wel kunnen deze varianten interessant zijn voor vervolgstudies. Dus een definitief ontwerp is niet heel belangrijk.</i>	-
6.CH.3	De losstaande objecten moeten aan elkaar te verbinden zijn tot een totaal ontwerp <i>Het is mooi als de losse objecten aan elkaar te verbinden zijn tot één kunstwerk. Maar omdat het een nieuw gebied is, is de kans groot dat dit nog lastig is. Er is dus een relatief grote kans dat dit niet haalbaar is.</i>	'Mechanica model'
6.CH.4	Een uitvoeringsontwerp wat is gericht op circulariteit <i>Een uitvoeringsontwerp zal waarschijnlijk te veel tijd kosten. Er kan wel na worden gedacht over de uitvoering en dit tekstueel beschrijven. De tijd zal bepalen hoe diep op de uitvoering</i>	Berekeningsrapport variantenstudie (per variant meegenomen)

	<i>wordt ingegaan.</i>	
6.CH.5	Een circulair ontwerp wat ook voldoet aan de eisen van de architect <i>Zie 4.CH.2</i>	-
6.CH.6	Een begroting van het gekozen circulaire ontwerp <i>Een kosten indicatie van het ontwerp kan interessant zijn om te vergelijken met het bestaande project in Tilburg.</i>	-
6.CH.7	Overige hoofddraagconstructie <i>Wanneer de toe ritten onder grondwaterstand niveau zouden zitten, is daar ook een constructie voor nodig die onder de hoofddraagconstructie valt.</i>	Berekeningsrapport variantenstudie Hoofdrapport Par. 7.2.2 & 7.2.3

Won't have

6.WH.1	Een begroting per variant. <i>Om het afstudeeronderzoek af te bakenen wordt er geen begroting per variant opgesteld.</i>	-
--------	---	---

13.3 Bijlage 3 - Uitleg Kesselring methode

Zie document 'Kesselring methode - uitleg'.

13.4 Bijlage 4 - Bepalen EVR varianten

EVR staat voor Eco-costs value ratio

In het materiaalonderzoek zijn de EVR-waardes per m³ bepaald van diverse materialen. Voor de variantenstudie zijn de volumes van de varianten bepaald en zodoende de EVR-waarde van die variant.

In het document 'Verantwoording scores - Keuzematrix': hoofdstuk 4, zijn de volumes van het toegepaste materiaal weergegeven van elke variant samen met de EVR van elk materiaal. Ook wordt daarin de totale EVR van een variant bepaald en wordt een score gegeven (1 t/m 5). Het Excel bestand ('EVR bepalen varianten') is ook meegeleverd, zodat dit in een vervolgstudie toegepast kan worden en zodat de waardes traceerbaar zijn.

Hier onder is per variant de conclusie te zien wat de totale EVR is en welke score deze heeft:

Eco-costs				
		Totale Eco-costs variant		
Volumes				
1. Dek				
	Variant 1 Blokken	32.016		1
	Variant 2 Staal	16.132		3
2. Wanden	Alleen t.p.v. dek			
	Variant 1 boog excl dek	6.268		5
	Variant 2 Stukjes	7.330		4
3. Vloeren	Alleen t.p.v. dek			
	Variant 1 Nokken	10.713		4
	Variant 2 Maximaal gewicht	11.881		4
4. Fundering	Variant 4 Palen	18.461		3
5. Niet circulair	Dek	12.149		4
	Wanden	8.890		4
	Vloer	12.149		4
	Fundering	6.437		5

Voor de schaal 1 t/m 5 worden de waarde 0 tot 35 000 aangehouden:

schaal 1 - 5		
35000	1	35000
	2	28000
	3	21000
	4	14000
	5	7000
0		0

13.5 Bijlage 5 - Voegen en uitbreidbaarheid

Het aantal meter voeg en de volumes van de uitbreidbaarheid zijn bepaald aan de hand van het Excel sheet 'Voegen EN Uitbreidbaarheid varianten bepalen'.

Dit Excel bestand is ook meegeleverd, zodat dit in een vervolgstudie toegepast kan worden en zodat de waarden traceerbaar zijn.

In de documenten "Verantwoording scores – object", van de betreffende objecten, wordt aangegeven hoeveel meter voeg elk object heeft.

De volgende schaal wordt toegepast:

Score: 5	0 -	70
Score: 4	71 -	140
Score: 3	141 -	210
Score: 2	211 -	280
Score: 1	281 -	350

Voor variant 2 van het dek 'Staal' zijn geen voegen aanwezig, dit betreft een open frame. Waterdichtheid is dan ook geen eis bij het dek.

Hieronder is te zien hoeveel meter voeg elke variant heeft en welke score daar bij hoort:

variant 1	blokken	197,5	Score: 3
variant 1	boog	153,3	Score: 3
variant 2	stukjes	342	Score: 1
variant 1	nokkies	141,8	Score: 3
variant 2	maximaalgewicht	108	Score: 4
variant 1	palen	153,8	Score: 3
dek	niet circulair	29	Score: 5
wanden	niet circulair	58	Score: 5
Vloer	niet circulair	29	Score: 5
fundering	niet circulair	0	Score: 5

Uitbreidbaarheid

Schaal

Voor de uitbreidbaarheid wordt overal de volgende schaal toegepast voor het verkrijgen van de scores:

Score: 5	0 -	16
Score: 4	17 -	32
Score: 3	33 -	48
Score: 2	49 -	64
Score: 1	65 -	80

Alle verkregen 'extra gewicht' van elke variant past in deze schaal.

De benodigde breedte bij 2 rijbanen bedraagt 8.1 meter. Bij 3 rijbanen is dit 10.7 meter.

De benodigde diepte van de tunnel bij 2 sporen bedraagt 10 meter. Bij 3 sporen is dit 14.5 meter.

Voor de hoogte is gerekend een uitbreiding van de hoogte voor fietsverkeer naar snelverkeer. Dit is van 2,5 meter naar 4,2 meter, een extra hoogte van 1,7 meter.

1. Dek

1.1 Variant 1 Blokken

1.1.1 Breedte

Voor de breedte van het dek geldt van 2 naar 3 sporen, van 10 naar 14,5 meter. Een element is 1.5 meter breed, er zijn dus 3 liggers extra nodig. Een ligger bestaat uit 5 elementen voor de overspanning. Het extra volume bedraagt:

$$3 \text{ st.} * 5 \text{ st.} * b * h * l$$

$$3 * 5 * 1.5 * 1 * 2.5 = 56.25 \text{ m}^3$$

1.1.2 Overspanning

Hiervoor geldt van 2 rijbanen naar 3 (van 8.1 naar 10.7 = +2.6). Er zijn dan 2 elementen voor de overspanning per ligger meer nodig ($2.5 * 2 = 5 > 2.6$). Er zijn totaal 10 liggers. Het extra volume bedraagt:

Extra overspanning	* breedte	* hoogte	
2.5 * 2	* 10*1.5	* 1	= 75 m ³ , score 1

1.2 Variant 2. Staal

1.2.1 Breedte

Voor één spoor extra op het dek zijn 8 liggers HEA1000 van 5 meter nodig die samen 2 liggers van 20 meter vormen. Daarnaast 5 liggers IPE300 van 3 meter en 5 IPE300 van 1,5 meter. Daarnaast zijn de volumes voor de extra knopen nog mee genomen, zie Excel 'Voegen EN Uitbreidbaarheid varianten bepalen', tab 'dek var2 STAAL'. Het extra volume bedraagt 1,77 m³ STAAL! (score 5)

1.2.2 Overspanning

In de Excel 'Voegen EN Uitbreidbaarheid varianten bepalen', tab 'dek var2 STAAL' is dit ook voor de overspanning uitgewerkt. Hier komt een extra volume STAAL uit van 1,36 m³, score 5.

In elke variant wordt het extra volume gegeven van beton. Echter bij deze variant is dit staal. Staal heeft een andere milieu-impact dan beton, dus kan er gediscussieerd worden hoe terecht de scores zijn die deze variant krijgt op uitbreidbaarheid.

2. Wanden

2.1 Variant 1. Boog

2.1.1 Hoogte

De boog is niet uit te breiden in de hoogte. Daarom is de laagste score gegeven, score 1.

2.1.2 Diepte

Het oppervlak van de dwarsdoorsnede van een halve boog bedraagt $2,5 \text{ m}^2$. Een element is 2.5 meter diep. Er zijn dan $(4.5/2.5) = 2$ elementen extra nodig. Het extra volume bedraagt:

$$\begin{array}{llll} A_{\text{halve boog}} & * \text{ extra elementen} & * \text{ diepte element} & * \text{ aantal wanden} \\ 2.5 & * 2 & * 2.5 & * 2 = 24.97 \text{ m}^3 \end{array}$$

2.2 Variant 2. Stukjes

2.2.1 Hoogte

Een element is 1 meter hoog. Er zijn dus in de hoogte 2 elementen meer nodig. Een element is 1 meter diep, dus zijn er 15 elementen nodig (>14.5 meter).

Het extra volume bedraagt:

$$\begin{array}{lllll} \text{extra elementen} & \text{hoogte} & * \text{ hoogte element} & * \text{ breedte element} & * \text{ aantal elementen} & \text{diepte} & * \text{ aantal wanden} \\ 2 & & * 1 & * 0.5 & 15 & & * 2 = 30 \text{ m}^3 \end{array}$$

Score 4

2.2.2 Diepte

Een element is 1 meter hoog. De minimale hoogte bij snelverkeer bedraagt 4.2 meter. Er zijn dus 5 elementen nodig in de hoogte. Van 2 naar 3 sporen geeft een diepte van 10 naar 14,5 meter, hier zijn 5 elementen voor nodig.

Het extra volume bedraagt:

$$\begin{array}{lllll} \text{hoogte} & * \text{ breedte} & * \text{ diepte} & * \text{ aantal wanden} & \\ (5*1) & * 0.5 & * (5*1) & * 2 & = 22.5 \text{ m}^3 \end{array} \quad \text{Score 4}$$

3. Vloer

3.1 Variant 1. Nokken

3.1.1 Breedte

Voor zowel 2 als 3 rijstroken zijn er net zoveel elementen nodig. Om dan 0 m^3 te rekenen zou erg voordelig zijn voor de variant, ter wijl deze eigenlijk niet uit te breiden is van 2 naar 3 rijstroken. Om deze reden wordt er gerekend met de uitbreiding naar 4 rijstroken.

De moot ter plaatse van het dek is 14,5 meter (is breedte dek). De elementen van deze variant zijn 2,5 meter diep. Er zullen in de diepte richting van de tunnel dus 6 elementen nodig zijn. Het oppervlak in de dwarsdoorsnede geldt dan over een diepte van $2.5*6 = 15$ meter.

Het volume van de elementen ter plaatse van het dek voor 3 rijstroken is $122,4 \text{ m}^3$.

Het volume van de elementen ter plaatse van het dek voor 4 rijstroken is $176,4 \text{ m}^3$.

Het extra volume bedraagt 54 m^3 . De score die daar bij hoort is score 2.

3.1.2 Diepte

Bij 3 sporen is de diepte van de moot ter plaatse van het dek = $(\text{afronden}(14.5/2.5)) * 2.5 = 15$ meter.

Bij 2 sporen is deze $(\text{afronden}(10/2.5)) * 2.5 = 10$ meter. Het oppervlak in de dwarsdoorsnede blijft gelijk. Het volume bij 3 sporen is verkregen bij het bepalen van de EVR ($122,4 \text{ m}^3$). $10/15 = 2/3$. Het volume bij 2 sporen bedraagt dan ook $122,4 * 2/3 = 81,6 \text{ m}^3$. Het extra gewicht bedraagt dan $40,8 \text{ m}^3$. Hierbij hoort een score van 3.

3.2 Variant 2. Maximaal gewicht

3.2.1 Breedte

Ook bij deze variant zijn er net zoveel elementen bij 2 en 3 rijstroken en wordt er dus gerekend met de uitbreiding naar 4 rijstroken. Een element is 4 meter diep. Er zijn dus 4 elementen nodig, wat een totale diepte geeft van 16 meter (i.p.v. 14.5 meter).

Het volume van de elementen ter plaatse van het dek voor 3 rijstroken is $153,6 \text{ m}^3$.

Een element is 6 meter breed bij deze variant. Voor de uitbreiding komt er dan gelijk 6 meter in de breedte bij. Er waren eerst (voor 3 rijstroken) 2 elementen nodig (in de breedte), en voor 4 rijstroken 3. Het nieuwe volume bedraagt dus $1.5 * 153,6 = 230,4 \text{ m}^3$.

Het extra volume bedraagt dan $76,8 \text{ m}^3$. De score die daar bij hoort is score 1.

3.2.2 Diepte

Er zijn bij 3 sporen 4 elementen nodig in de diepte richting. Bij 2 sporen zijn dit er 3 (een element is 4 meter diep, $3*4 = 12 > 10$ meter).

Het volume bij 3 sporen bedraagt:

=breedte element * diepte element	* hoogte element	* aantal elementen	
=6	*4	*0,8	*4*2 = $153,6 \text{ m}^3$

Bij 2 sporen is deze”:

=6	*4	*0,8	*3*2 = $115,2 \text{ m}^3$
----	----	------	----------------------------

Het extra volume bedraagt dan $38,4 \text{ m}^3$ met een score van 3.

4. Fundering

4.4 Variant 1. Palen

4.4.1 Breedte

Deze elementen zijn ook 2,5 meter diep, dus geldt een totale diepte van 15 meter.

Bij 2 rijstroken geldt een volume beton van $163,8 \text{ m}^3$, bij 3 rijstroken geldt 195 m^3 . Het extra volume bedraagt dan $31,2 \text{ m}^3$. Hiervoor geldt score 4.

De gaten voor de palen zijn meegerekend als beton, dus eigenlijk is er te streng gerekend. Echter valt deze variant nog net in de score 4, dus had dit niet uit gemaakt.

Het volume voor de palen is NIET meegenomen, aangezien dit bij de andere varianten ook niet is gedaan.

4.4.2 Diepte

Net als bij variant 1 van de vloer bedraagt het volume bij 2 sporen: $2/3 * 195 = 130 \text{ m}^3$ (omdat de elementen net zo diep zijn). Het extra volume bedraagt 65 m^3 .

5 Niet circulair

Deze varianten zijn niet uit te breiden aan de hand van demontabele elementen. Deze krijgen dus de laagste score, score 1.

13.6 Bijlage 6 - Antwoorden deelvragen

In deze bijlage wordt er antwoordt gegeven op deelvraag 5 en 6. Deelvragen 1 t/m 4 zijn beantwoordt in het literatuuronderzoek.

1. Wat is circulariteit?

De huidige economie is lineair. Grondstoffen worden gewonnen, geproduceerd tot product en gebruikt. Aan het eind van de levensfase (na gebruik) wordt het weggegooid en er ontstaat afval.

Grondstoffen zijn eindig. Dit wil zeggen dat grondstoffen niet oneindig te winnen zijn. Doordat het grondstofgebruik steeds harder stijgt, is het tijd voor een andere aanpak, namelijk: de circulaire economie.

Een circulaire economie denkt in kringlopen. Dit kan een biologische of technologische kringloop zijn. Bij een circulaire economie worden grondstoffen gewonnen, geproduceerd tot product en gebruikt. Aan het eind van de levensduur worden producten niet weggegooid, maar gerecycled tot nieuwe grondstoffen. De grondstoffen die vrijkomen tijdens de recycling kunnen weer hoogwaardig worden hergebruikt.

De belangrijkste principes van een circulaire economie zijn:

- Waardebehoud;
- Demonteerbaarheid;
- Herbruikbaarheid;
- Afbreekbaarheid;
- Scheidbaarheid;
- Gebruik hernieuwbare energie;
- Gebruik geen giftige stoffen.

Circulair bouwen is een vrij nieuw begrip in de bouw. Dit blijkt ook uit de literatuur, want er is nog geen eenduidige definitie. Het begrip circulair bouwen is afgeleid van het begrip circulaire economie. Voor ons betekent het begrip circulair bouwen het volgende:

Circulair bouwen is het toepassen van de principes van de circulaire economie op een kunstwerk.

1. Wat is circulariteit? (vervolg materiaalonderzoek)

De vraag wat circulariteit is, is al grotendeels beantwoord in het literatuuronderzoek. Alleen de beschrijving van de recyclebaarheid van de materialen werd niet behandeld in het literatuuronderzoek. De recyclebaarheid is wel besproken in dit document. Hieronder een opsomming van de recyclebaarheid van elk materiaal wat uitgewerkt is.

Beton

De toeslagmaterialen van beton zijn volledig recyclebaar. Het niet-gereageerde cement is ook terug te winnen met de breker van SlimBreken. Het niet-gereageerde cement kan weer gebruikt worden als bindmiddel voor nieuw beton. Het gereageerde cement is ook terug te winnen, maar niet meer te gebruiken als bindmiddel voor nieuw beton. Er lopen wel onderzoeken naar het dehydrateren van het cement. Dit zou het mogelijk moeten maken om gereageerd cement terug te brengen naar de niet-gereageerde vorm. Voor gereageerd cement zijn wel toepassingen, bijvoorbeeld als vulstof in nieuw beton.

Staal

Staal is volledig recyclebaar. Staal kan worden omgesmolten zonder kwaliteitsverlies. Na omsmelting is het zelfs mogelijk door bewerkingsprocessen om een hogere staalkwaliteit te krijgen. Legeringen zijn (meestal) scheidbaar en kunnen opnieuw worden gebruikt.

Aluminium

De recyclebaarheid van aluminium is vergelijkbaar met die van staal.

Vezelversterkt kunststof

De recyclebaarheid van vezelversterkt kunststof is slecht. Er zijn meerdere recyclingprocessen mogelijk. Pyrolyse maakt het mogelijk om 25-30% van het materiaal te hergebruiken. De rest is onbruikbaar en heeft geen toepassing meer. Vezelversterkt kunststof wordt op heden vaak laagwaardig gerecycled door het te versnipperen. De snippers kunnen toegepast worden in bijvoorbeeld beton of asfalt.

Hout

Hout maakt deel uit van de biologische kringloop. Onbehandeld hout kan zonder problemen terugvloeien in de natuur. Echter wordt hout wel gerecycled. Gerecycled onbehandeld hout kan bijvoorbeeld worden toegepast in spaanplaten. Bewerkt hout wordt meestal verbrand met als mogelijkheid energiewinning.

2. Welke projecten zijn er uitgevoerd in het kader van circulariteit?

Tijdens het onderzoek is er gezocht naar circulaire projecten. Tijdens de zoektocht werd al snel duidelijk dat er in de GWW-sector nog nauwelijks circulaire projecten zijn. Er zijn wel diverse partijen bezig met circulariteit. De grootste en meest invloedrijkste is Rijkswaterstaat. Rijkswaterstaat neemt het voortouw in de transitie naar een circulaire economie. Zo heeft Rijkswaterstaat het eerste circulaire viaduct ontworpen en gerealiseerd.

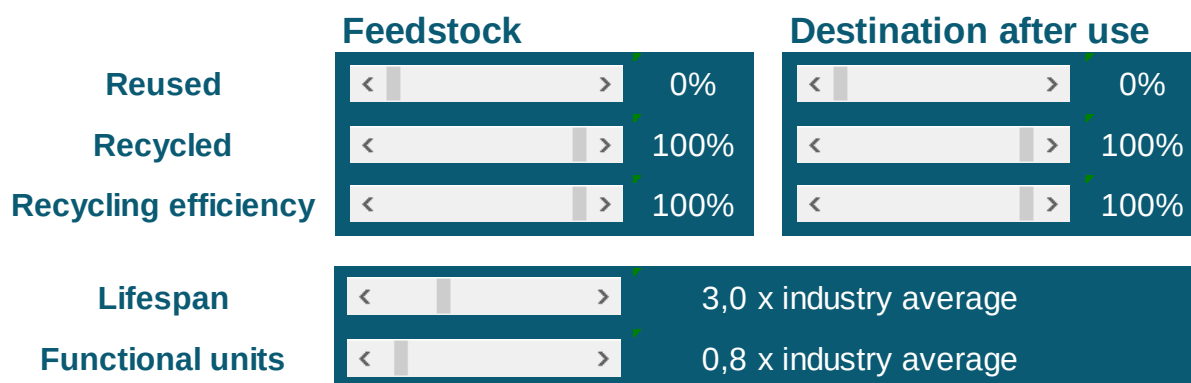
Daarnaast heeft RWS in combinatie met diverse aannemers gewerkt aan circulariteit in het project Reevesluis en InnovA58.

3. Hoe wordt circulariteit gemeten?

Voor het meten van circulariteit is nog niks in normen vastgelegd. Hierdoor is het nog niet mogelijk om een eenduidige en betrouwbare meting voor circulariteit uit te voeren. Er mist tevens betrouwbare informatie over producten en materialen.

Er zijn wel conceptversies voor het bepalen van circulariteit. Bijvoorbeeld voor de circulariteit van een materiaal is er de MCI van het EMF. In deze meetmethode ontbreekt de link van een materiaal/product met het gehele bouwwerk, denk aan demonteerbaarheid van diverse elementen en de scheidbaarheid van diverse materialen. Demonteerbaarheid en scheidbaarheid zijn immers principes van een circulaire economie. Andere partijen hebben dit opgemerkt en werken aan een meer omvattende circulariteitsmeetmethode. Deze zijn echter nog in conceptfase.

Omdat het toch interessant is om een graad van circulariteit te hebben, willen we de circulariteit gaan meten voor materialen. Het Excel-bestand van de MCI is gratis te downloaden via het internet. Met dit Excel-bestand is de circulariteit van een materiaal te meten. Hiervoor zijn de volgende gegevens nodig:



Figuur 32: Benodigde gegevens MCI (Ellen MacArthur Foundation)

Er zijn geen specifieke gegevens beschikbaar. Wel zijn er gemiddelde waardes beschikbaar of kan er een aanname worden gedaan met onderbouwing uit de literatuur.

Materialen die gebruikt zijn voor het circulaire ontwerp van een spooronderdoorgang kunnen worden ingevuld. Het resultaat is een mate van circulariteit tussen 0,1 (geheel lineair) en 1 (geheel circulair).

4. Welke materialen zijn geschikt voor een circulair ontwerp?

Ten eerste is er gezocht naar mogelijke materialen. De materialen dienen in ieder geval constructief toepasbaar te zijn. Er is gekozen om beton, staal, aluminium, vezelversterkt kunststof en hout verder uit te werken. Beton, staal, aluminium en vezelversterkt kunststof behoren tot de technologische kringloop. Hout behoort tot de biologische kringloop.

Technologische kringloop

Materialen uit de technologische kringloop zijn beperkt beschikbaar en kunnen niet makkelijk opnieuw worden gecreëerd. Bij materialen uit de technologische kringloop is het belangrijk om zich te richten op waardebehoud, hergebruik en recyclebaarheid.

Beton, staal en aluminium zijn geschikte materialen uit de technologische kringloop, omdat deze vrijwel volledig recyclebaar zijn. Beton heeft als voordeel dat de grondstoffen in ruime mate beschikbaar zijn. Beton is echter niet volledig recyclebaar, wel voor een groot deel. De grondstoffen van staal en aluminium zijn in mindere mate aanwezig dan die van beton. De grondstoffen komen (meestal) uit landen ver van hier. Staal en aluminium hebben wel als voordeel dat ze volledig recyclebaar zijn.

Biologische kringloop

Bij materialen uit de biologische kringloop ligt het anders. Het zijn organische materialen die kunnen groeien in de natuur. Aan het eind van de levensduur kunnen de reststoffen veilig terugvloeien in de natuur. Bij materialen uit de biologische kringloop is het van belang dat de materialen niet-toxisch zijn. Hout kan bijvoorbeeld verduurzaamd worden door het te impregneren. Door impregnatie wordt de levensduur van het materiaal langer, maar aan het eind van de levensduur kan het niet meer veilig terugvloeien in de natuur. Het is dus van belang dat biologische materialen natuurlijk blijven.

Hout behoort tot de biologische kringloop. Het probleem met hout is dat er vele bewerkingsmethoden zijn om het hout te verduurzamen. Deze bewerkingsmethodes maken veilig terugvloeien in de natuur niet meer mogelijk. Dit komt doordat er chemische stoffen zijn gebruikt. Soms kan het bewerkte hout wel gebruikt worden als energiebron. Onbewerkt hout is het beste om toe te passen. Het onbewerkte hout kan zonder problemen terugvloeien in de natuur en zo ontstaat er geen afval of schadelijke emissies.

5. Wat zijn de uitgangspunten bij een spooronderdoorgang?

Levensduur en betrouwbaarheid

Levensduur en betrouwbaarheid zijn belangrijke punten voor een circulaire onderdoorgang. De technische levensduur van de hoofdconstructie is gesteld op 200 jaar. Dit is twee keer zo lang als een traditionele onderdoorgang. Gesteld wordt dat als dit verdubbeld wordt dit een goed startpunt is voor een circulair ontwerp. Het is belangrijk om de waarde van de hoofdconstructie zo lang mogelijk te behouden. Daarmee wordt sloop en recycling van de elementen zo lang mogelijk uitgesteld. De constructie valt onder veiligheidsklasse CC3. Dit wordt doorgaans gebruikt voor bruggen en viaducten van hoofdinfrastructuur. Omdat het een onderdoorgang is voor een spoor is een hoge betrouwbaarheid nodig. Bezijken van de constructie zou grote maatschappelijke gevolgen kunnen hebben.

Dimensies

Onderdoor gaand verkeer

Er wordt uitgegaan van langzaam en snelverkeer. In eerste instantie zou het een onderdoorgang voor langzaam verkeer worden gebaseerd op het TOR. Later is ook snelverkeer toegevoegd, omdat een uitbreiding van een fietstunnel onwaarschijnlijk is. Bij een onderdoorgang voor snelverkeer is een uitbreiding naar meerdere rijstroken realistischer. Er wordt rekening gehouden met een uitbreiding van twee naar drie rijstroken. Dit, omdat de kans groot is dat de verkeersstromen in de toekomst toenemen.

Bovenlangs gaand verkeer

Het bovenlangs gaand verkeer betreft treinverkeer. Ook hier is naar de toekomst gekeken. De kans is groot dat treinverkeer steeds zwaarder wordt en om die reden is er rekening gehouden met het zwaarst mogelijk treinverkeer in Nederland. Standaard gaan er minimaal 2 sporen over een kunstwerk. 4 sporen past niet in de scope, dus wordt de uitbreidbaarheid van het dek gesteld op de mogelijkheid om van 2 naar 3 sporen uit te kunnen breiden.

Elementen

De elementen waaruit de onderdoorgang wordt opgebouwd dienen transporteerbaar te zijn per vrachtwagen. De vrachtwagen heeft een maximaal laadvermogen van 50 ton. Daarnaast heeft de vrachtwagen maximale afmetingen voor de lading. De elementen mogen deze maximale afmetingen niet overschrijden.

Profiel van vrije ruimte

De profiel van vrije ruimtes zijn afgestemd op het verkeer wat er onderdoor en overheen moet kunnen.

Brandwerendheid

De brandwerendheid van het kunstwerk is gesteld op 30 minuten, dit volgt uit de kromme voor een extreme brand uit de norm NEN-EN1991-1-2.

Belastingfactoren

$$\gamma_{fg1; UGT; Permanent} = 1.32$$

$$\gamma_{fg2; UGT; Permanent} = 1.49$$

$$\gamma_{fg1; UGT; Veranderlijk} = 1.65$$

$$\gamma_{fg2; UGT; Veranderlijk} = \Psi_0 * 1.65$$

$$\Psi_0 = 1.0$$

$$\gamma_{fg; BGT} = 1.0$$

Belastingen

Er zijn in totaal 16 verschillende belastingen. Deze zijn onderverdeeld in blijvende en opgelegde belasting. Hieronder de belastingen conform de gehanteerde onderverdeling.

Blijvende belasting:

- Eigen gewicht
- Rustende belasting
- Gronddruk
- Grondwaterdruk

Opgelegde belasting:

- Spoorbelasting
 - o Spoorverkeersbelasting
 - o Belasting inspectie pad
 - o Remmen en aanzetten
 - o Zijdelingse stoot
- Fiets- en voetpaden
 - o Gelijkmatic verdeeld
 - o Geconcentreerd
 - o Horizontaal fiets- en voetpad
- Snelverkeer
 - o Verticaal
 - o Horizontaal
- Windbelasting
- Temperatuur

Vermoeiing

Er zou ook rekening gehouden moeten worden met vermoeiing. Vermoeiing ontstaat door aanhoudende wisselende belasting over een lange periode. Er is tijdens het afstudeeronderzoek geen rekening gehouden met vermoeiing.

Vervorming en trilling eisen

Er zou rekening gehouden moeten worden met vervorming en trilling eisen. Vanwege de omvang van het project is hier geen rekening mee gehouden.

6. Hoe wordt een circulair ontwerp gemaakt?

Om tot een goed circulair ontwerp te komen zijn er circulair ontwerpprincipes vastgesteld. In het literatuuronderzoek zijn van verschillende marktpartijen de ontwerpprincipes voor een circulair kunstwerk naast elkaar gelegd en samengevat tot de volgende principes:

- *Materiaalarm en licht ontwerpen*
Ontwerp voor duurzaam materiaalgebruik
- *Adaptief/flexibel ontwerpen*
Ontwerp toekomstbestendig
- *Modulair en demontabel ontwerpen*
Ontwerp voor meerdere levenscycli
- *Materiaalkeuze en ontwerp optimaliseren op de minste milieubelasting*
Maak duurzaam gebruik van bestaande objecten, materialen, grondstoffen en natuurlijke processen.
Ontwerp voor minimaal grondstof- en energieverbruik in aanleg- en gebruiksfase.
Verleng de levensduur van bestaande objecten.
Voorkomen: niet doen wat niet nodig is.
- *Ontwerp voor optimaal beheer en onderhoud*

Een ontwerp scoort hoog op circulariteit als over alle principes is nagedacht en de meeste zijn toegepast. In de principes staat materiaalkeus. Het ontwerp van een circulair kunstwerk begint bij het kiezen van geschikte materialen. Het is belangrijk om na te gaan of het materiaal circulair is. Dit wordt bepaald door te analyseren of het materiaal in een biologische of technologische kringloop circuleert. Een materiaal uit de biologische kringloop is natuurlijk, hernieuwbaar en niet-toxisch. Een materiaal uit de technologische kringloop is beperkt beschikbaar en niet hernieuwbaar. Op deze manier kan bepaald worden in welke kringloop het materiaal circuleert.

De volgende stap is het bepalen of het materiaal circulair is. Een materiaal uit de biologische kringloop wordt beoordeeld aan de hand van de volgende termen: natuurlijk, hernieuwbaar en niet-toxisch. Een materiaal uit de technologische kringloop wordt beoordeeld op: waarde behoud, hergebruik en recyclebaarheid. Daarnaast is er een materiaaltoets opgesteld door Royal HaskoningDHV, met vier vragen, waarmee een materiaal getoetst kan worden op circulariteit.

Op een gegeven moment zullen de bovenstaande stappen niet meer nodig zijn. Over een paar jaar zal het algemene kennis worden welke materialen circulair zijn en welke niet. Maar omdat circulariteit in de kinderschoenen staat is het belangrijk om goed vast te stellen welke materialen circulair zijn.

Op element-/kunstwerkniveau is het belangrijk om te richten op een materiaalarm ontwerp. Dit geldt vooral voor materiaal uit de technologische kringloop. Materialen uit de technologische kringloop zijn immers eindig en niet hernieuwbaar. Er moet dus zuinig worden omgegaan met deze grondstoffen. Er moet wel opgepast worden dat er niet te veel gebruik wordt gemaakt van chemische stoffen. In beton kan bijvoorbeeld van alles worden toegevoegd om tot een super sterk betonmengsel te komen. Dit heeft als voordeel dat er materiaalarm kan worden ontworpen en dat er een langere levensduur wordt verkregen met minder onderhoud. Het heeft ook nadelen omdat de stoffen die toegevoegd worden vaak chemisch zijn en niet milieuvriendelijk. Daarnaast maakt het toevoegen van vele stoffen het lastiger om het materiaal te recyclen tot de oorspronkelijke grondstoffen.

Door modulair en demontabel te ontwerpen kan er flexibel en adaptief omgegaan worden met veranderingen van functie of met bijvoorbeeld groeiende verkeersstromen. Als er een uitbreiding nodig is van het kunstwerk, is

dit mogelijk omdat er tijdens het ontwerpproces over na is gedacht. Zo wordt er voorkomen dat er een kunstwerk vroegtijdig moet worden gesloopt.

Het is ook belangrijk om na te denken over beheer en onderhoud. Denk bijvoorbeeld aan een demontabel ontwerp. Een demontabel ontwerp zal relatief veel verbindingen hebben ten opzichte van een niet-demontabel ontwerp. Verbindingen vergen onderhoud. Deze verbindingen dienen, als het mogelijk is, om goed toegankelijk te zijn zodat er onderhoud gepleegd kan worden.