

Onderzoeksrapport

Ontwerpen van straatstenen in een circulaire economie



Sven Oostendorp
HZ University of
Applied Sciences
Engineering

Voorwoord

Dit onderzoeksvoorstel is opgesteld voor mijn afstudeeronderzoek voor de opleiding Engineering afstudeerrichting Design & Innovation van de HZ University of Applied Sciences te Vlissingen. Het onderzoek voor mijn afstuderen wordt gedaan bij het bedrijf Sweco in Middelburg.

Sweco is steeds aan het innoveren en duurzamer aan het worden. Zij zijn zich bewust dat in de toekomst hun projecten moeten gaan passen binnen een circulaire economie. Sweco ziet dit niet alleen als een vraag uit de markt, maar ervaren het als cruciaal om nu al duurzamer te werk te gaan. Zo worden projecten uitgevoerd gericht op het verbeteren van hun ecologische voetafdruk. Dit resulteerde in mijn afstudeeropdracht om onderzoek te doen naar straatstenen in een circulaire economie. Dit moet inzichten geven in hoe hun wegbedekkingen, maar ook andere bouwprojecten, er in de toekomst uit kunnen gaan zien en of nu al aanpassingen gedaan kunnen worden met het oog op de toekomst.

Dit project is uitgevoerd in een samenwerkingsverband met De Hoop in Terneuzen. Dit bedrijf is onder andere gespecialiseerd in de betonindustrie en heeft de nodige kennis en faciliteiten om ondersteuning te bieden in dit project. De resultaten van dit onderzoek geven ook inzichten in de toekomst voor hun bedrijfssector.

Wat mij enorm aantrekt in het onderwerp is dat elke verbetering grote invloed kan hebben op een verlaging van de milieu-impact. De bouwsector zorgt namelijk voor meer dan 5% van de luchtvervuiling per jaar, dus als met de resultaten van mijn onderzoek de bouwsector een geringe fractie duurzamer kan worden is dit een aanzienlijke verbetering.

Het rapport bestaat uit een uitgebreid onderzoek naar de duurzame oplossingen voor straatstenen, vooral gericht op de betonnen varianten hiervan. Het resultaat van het onderzoek zijn drie oplossingsrichtingen om betonstraatstenen duurzamer en goedkoper te maken die ook toepasbaar zijn bij andere wegbedekkingen.

Er zijn veel mensen die mij bij mijn onderzoek hebben geholpen. Zo wil ik graag Richard Koops bedanken voor de kans om bij hem af te studeren. Tevens bedank ik hem voor zijn waardevolle begeleiding en enthousiasme. Daarnaast wil ik graag van de mogelijkheid gebruik maken om Ron de Bruijn, Ron Vlassak, Rudi van Hedel en Christiaan Voorend, allen werkzaam bij Sweco Nederland B.V., te bedanken voor hun adviezen en ondersteuning tijdens mijn afstudeerstage. Ik wil Herwald Gerlderland, contactpersoon bij De Hoop, bedanken voor zijn begeleiding vanuit de producenten kant en Rob Hoek voor de rondleiding bij Bleijko Betonindustrie en informatie hoe straatstenen worden gemaakt. Als laatste wil ik mijn dank richting aan de heer G. Velraeds voor zijn rol als afstudeerdocent en het docententeam van de opleiding Engineering van de HZ University of Applied Sciences voor de begeleiding gedurende de rest van de opleiding.

Sven Oostendorp
December 2016, Middelburg

Colofon

Titel: Ontwerpen van straatstenen in een circulaire economie

Auteur: Sven Oostendorp
Opleiding Engineering
Student nummer: 00061128
oost0056@hz.nl
M +31 6 290 933 43

Afstudeerbedrijf: Sweco
Segeerssingel 6
4337 LG Middelburg
T +31 88 811 66 00



Bedrijfsbegeleider: Richard Koops
Functie: Team Manager Techniek / Manager Expertise & Innovatie
Opleidingsniveau: HBO
Richard.Koops@sweco.nl
T +31 88 811 61 98
M +31 6 511 931 46

Onderwijsinstelling: HZ University of Applied Sciences

Bezoekadres hoofdlocatie
Edisonweg 4
4382 NW Vlissingen



Postadres
Postbus 364
4380 AJ Vlissingen

Afstudeerdocent: G. Velraeds
Velr0001@hz.nl
T +31 118 489 237

Plaats: Middelburg

Inleverdatum: 2 december 2016

Revisiedatum: 3 januari 2017

Samenvatting

De betonindustrie is één van de grootste producenten van koolstofdioxide (CO₂), het is 5% van wereldwijde door mensgemaakte koolstofdioxide. De beste oplossing zou zijn beton dat 100% hergebruikt kan worden. In dit project wordt in kleinere vorm gekeken naar dit probleem, namelijk een volledig recyclebare straatsteen. Aan de hand van dit onderzoek wordt middels de onderzoeksvraag *'Wat is een innovatief ontwerp voor een wegverharding, ter vervanging van traditionele straatsteen, die bij recyclen geen verlies in kwaliteit van de grondstoffen heeft en daarmee een duurzaam product is?'* gekeken naar de mogelijkheden om straatstenen duurzamer te maken.

De drie meest voorkomende soorten wegverhardingen zijn klei, beton en asfalt, elke met zijn eigen voor- en nadelen. De traditionele straatsteen bestaat meestal uit beton. De betonindustrie produceert dit door een mengsel te maken van onder andere cement, grind (granulaten), zand en water. Het water en cement zorgen voor de chemische reactie die nodig is om beton te vormen en de granulaten en zand vullen de ruimtes op die ontstaan in het beton. Deze materialen genereren veel CO₂, vooral de productie van het bestanddeel cement. Daarom het doel om te kijken naar verschillende oplossingen om deze straatstenen milieuvriendelijker te maken, onder andere door gebruik te maken van lokale grondstoffen, gebruik te maken van afvalstromen en de straatstenen zelf beter recyclebaar te maken.

Voor het onderzoek wordt gebruik gemaakt van de ontwerpmethode van Timmers en van der Waals¹. Deze methode is een ontwerpproces opgedeeld in meerdere fases: analyse, idee, concept, materialisatie en prototype. Door deze fases te doorlopen kan een succesvol proces ontworpen worden. Ook al is deze methode meer gericht op het ontwerpen van een product, is de verdeling van de fases en de bijbehorende tools ook toepasbaar voor dit onderzoek.

In dit document staan de resultaten van de onderzoeken naar straatstenen en verschillende manieren om deze milieuvriendelijker te maken. Hierbij is gekeken naar oplossingen die op dit moment al gebruikt of ontwikkeld kunnen worden. Daarnaast is ook gekeken naar de toekomst van de beton- en bouwindustrie op basis van informatie uit dit onderzoek.

Tijdens het uitvoeren van de ontwerpmethode zijn drie oplossingsrichtingen uitgewerkt en getest. Ten eerste een straatsteen waarbij een toevoeging is gedaan van natuurlijke vezels met een hoog percentage lignine. Ten tweede een straatsteen waarbij wilde Japanse oesterschelpen worden gebruikt ter vervanging van een percentage van de granulaten. Als laatste een oplossing waarbij gebruik gemaakt wordt van 3D betonprinten voor het besparen van materiaal.

¹ (J. Timmers & M. van der Waals, 2009)

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond informatie bedrijf	1
1.2	Opdrachtbeschrijving	2
1.3	Projectgrenzen.....	3
1.4	Eindproducten.....	3
1.5	Onderzoeksvraag	4
2	Theoretisch kader.....	5
2.1	Conceptueel model.....	5
2.2	Bronnenonderzoek	6
3	Methodiek	9
3.1	Keuze van methodiek	9
3.2	Fasering Timmers en van der Waals.....	10
4	Resultaten	11
4.1	Resultaten analysefase	11
4.2	Resultaten ideefase	21
4.3	Resultaten conceptfase	25
4.4	Resultaten materialisatiefase	28
5	Conclusies en Aanbevelingen	31
	Bronnenlijst	33

Afbeeldingen

Afbeelding 1: Organogram Sweco Nederland.....	1
Afbeelding 2: Divisie Stad & Milieu uit organogram	1
Afbeelding 3: Conceptueel model	5
Afbeelding 4: weergave biologische en technische kringloop.....	6
Afbeelding 5: Het integrale zonmodel	9
Afbeelding 6: Probleem oplossingsmodel van de Haagse Hogeschool (Wybertjesmodel)	10
Afbeelding 7: Verticale opbouw wegverharding	14
Afbeelding 8: Wrijvingsweerstand tussen twee straatstenen	14
Afbeelding 9: De verschillende milieubelastingen van een straatsteen	15
Afbeelding 10: Schematische weergave AquaBASE	17
Afbeelding 11: Emerging Objects 3D geprint met polymeerbeton	17
Afbeelding 12: Overzichtskaat van oester- en mosselpercelen	19
Afbeelding 13: Straatsteen 3D model.....	30

Tabellen

Tabel 1: CO ₂ uitstoot scenario met traditionele straatstenen	14
Tabel 2: Programma van eisen en wensen.....	20
Tabel 3: Onderzoek ter overstaande traditionele straatstenen	29

Begrippenlijst

Het in de bouw gebruikte jargon is één op één overgenomen in dit onderzoeksrapport om misverstanden te voorkomen. Hieronder een lijst van deze gebruikte begrippen.

Afval	Materiaal met een negatieve waarde dat wordt gestort of verbrand. De grondstof is niet meer beschikbaar voor hergebruik of materiaalrecycling. Deze term is ook een verzamelwoord voor reststof en afval samen, oftewel voor alles wat niet (meer) in zijn oorspronkelijke functie kan worden (her)gebruikt.
Aggregaat	Inert korrelig materiaal zoals zand of grind dat, wanneer het tot een geconglomereerde massa wordt gebonden, beton of mortel vormt.
Betongranulaat	Toeslagmateriaal voor beton, bestaande uit gerecycled beton. Bevat tenminste 90% beton en maximaal 10% andersoortig steenachtig materiaal.
BREEAM	BREEAM (BRE Environmental Assessment Method) is een beoordelingsmethode om de milieubelasting van gebouwen te bepalen.
BRL	Beoordelingsrichtlijn.
Bouw- en Sloopafval (BSA)	Bouw- en verpakkingsmaterialen die overblijven bij het bouwen of vrijkomen bij het slopen. Sinds het stortverbod van Bouw- en Sloopafval in Nederland zijn deze materialen in feite geen 'afval' meer, maar 'grondstof voor materiaalrecycling'.
Circulaire economie	Het begrip 'Circulaire economie' (ook wel Kringloop economie) is de basis van het Cradle to Cradle principe. In een circulaire economie worden alle gebruikte materialen in een product nuttig ingezet in hetzelfde of een ander product zonder kwaliteitsverlies. Wanneer alle restproduct ten hergebruikt kunnen worden en de producten milieu neutraal zijn is deze kringloop compleet.
CO₂-emissie	Vrijkomende CO ₂ bij verbranding van brandstoffen. Deze is verschillend voor de verschillende brandstoffen en dientengevolge bij verschillende 'prestaties'.
CO₂-reductie	CO ₂ -reductie is het streven om de uitstoot van het broeikasgas kooldioxide (CO ₂) te verminderen.
Cradle to Cradle (C2C)	Cradle to Cradle (van wieg tot wieg), een ontwerpconcept van architect William McDonough en chemicus Michael Braungart op basis van eco-effectiviteit, betekent dat producten zo moeten zijn ontworpen dat zij na gebruik op een hoogwaardige manier kunnen worden hergebruikt in een nieuw product, of een voedende functie moeten hebben (afval is voedsel). McDonough en Braungart onderscheiden twee soorten bouwstoffen: biologische en technische. Om bouwstoffen na het afdanken van een product te kunnen inzetten als voeding voor nieuwe producten of terug te brengen in de (ecologische) kringloop moet een product bestaan uit zo min mogelijk componenten. De componenten moeten een bouwstof van één soort zijn gemaakt (bijvoorbeeld alleen uit een biologische grondstof zoals hout inclusief de ver bindingen of uit een technische bouwstof zoals polymeer). Voor de gebouwde omgeving betekent C2C dat wijken of gebouwen een meerwaarde hebben voor de omgeving of een (eco)systeem, doordat ze meer produceren dan ze gebruiken.

Downcyclen	Hergebruiken van materialen voor de productie van grondstoffen of producten, waarbij de gerecycleerde grondstof niet meer de zuiverheid van de oorspronkelijke grondstof heeft.
Duurzaam ontwerpen	Een duurzame ontwerp is een ontwerp die voor ziet in de behoeften van de huidige generatie, zonder daarmee voor toekomstige generaties de mogelijkheid in gevaar te brengen om ook in hun behoeften te voorzien.
Ecologische voetafdruk	Een getal dat weergeeft hoeveel biologisch productieve grond- en wateroppervlakte nodig is om je consumptieniveau te kunnen handhaven, en om de afvalproductie te kunnen verwerken.
Filament	De 'inkt' van een 3D-printer, die meestal gemaakt is van thermoplastisch.
Fotosynthese	Reactie in planten waarbij met behulp van stralingsenergie van de zon organisch materiaal wordt geproduceerd.
Geopolymeerbeton	Dit is een type beton waarbij het cement is vervangen door een bindmiddel dat uitsluitend is samengesteld uit industriële reststoffen.
Granulaat	Een materiaal in korrelvorm of in de vorm van korrelig poeder, wat één van de hoofdbestanddelen van beton is.
Hergebruik	Het als product of als materiaal opnieuw gebruiken of het nuttig toepassen van een reststof. Nuttige toepassing is: het gebruiken van reststoffen of daaruit gescheiden of bereide componenten in een andere, nuttige, functie dan waarvoor ze oorspronkelijk waren bestemd. Een product kan worden hergebruikt in dezelfde of een soortgelijke functie. Ook kan het materiaal waaruit het product bestaat worden hergebruikt.
Kringloop	Een circulatie van materiaal waarbij het materiaal steeds opnieuw wordt gebruikt.
Levenscyclusanalyse (LCA)	Een methode om de milieubelasting van een materiaal of product te berekenen, waarbij alle levensfasen van dat materiaal of product worden meegewogen: winning van grondstoffen, transport, productieproces, toepassing, gebruik, verwijdering en hergebruik.
Lignine	Een stof uit de celwand van planten en bomen, die fungeert als het cement tussen de vezels.
Lokaal/lokale (grondstoffen)	In dit onderzoek gedefinieerd als: Het gebied binnen een straal van 60 km rondom Sweco Middelburg.
Natuurlijke grondstoffen	Stoffen die in de natuur gevonden worden, zoals vruchtbare aarde, olie, mineralen, hout en andere gewassen.
PvE	Programma van Eisen en Wensen. Het bevat de randvoorwaarden en limieten die gesteld worden aan een te ontwerpen proces of product. De eisen zijn de criteria waaraan voldaan moet worden, de wensen zijn de criteria waaraan de verwachting is dat er zo veel mogelijk aan voldaan wordt.
Restafval	Het gedeelte van de afvalstroom van particulieren, instellingen en bedrijven dat overblijft nadat alle bruikbare en recyclebare afvalstromen van de hoofdstroom zijn gescheiden.
Upcyclen	Hergebruiken van materialen voor de productie van grondstoffen of producten met meer ecologische waarde.

Wegverharding

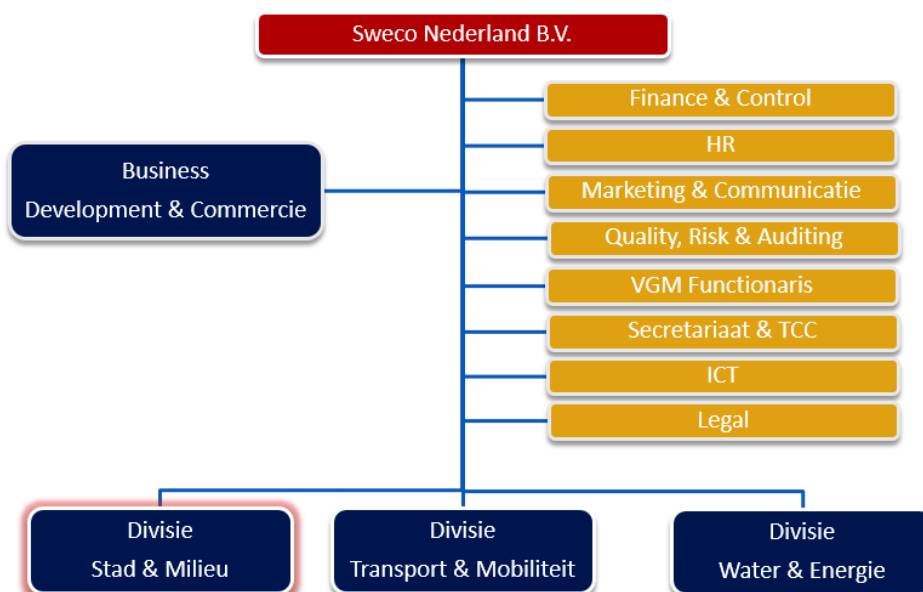
De wijze waarop een weg is verhard, waarbij er onderscheid wordt gemaakt naar de verschillende typen verharding: asfaltverharding (asfaltbeton, ZOAB en steenmastiekasfalt), betonverharding (betonplaten en doorgaand gewapende betonwegen) en elementverharding (klinkers, betonstraatsteen, baksteen en natuursteen).

1 Inleiding

1.1 Achtergrond informatie bedrijf

Sweco Nederland (voormalig Grontmij) is een van oorsprong Nederlands advies- en ingenieursbureau dat in 1913 werd opgericht. Het was in 2015 het op twee na grootste bedrijf op haar gebied in Europa, met circa 7.000 werknemers en 300 kantoren verspreid in de regio en nog eens 50 kantoor elders in de wereld. In oktober 2015 heeft Sweco Grontmij overgenomen. Vanaf 4 april 2016 is Grontmij verder gegaan onder de naam Sweco Nederland.

Sweco ontwerpt en ontwikkelt de samenlevingen en de steden van de toekomst. Hun werk leidt tot duurzame gebouwen, efficiënte infrastructuur en toegang tot elektriciteit en schoon water. Met 14.500 medewerkers in Europa voeren ze jaarlijks projecten uit in 70 landen verspreid over de hele wereld. Sweco is het grootste architecten- en ingenieursadviesbureau in Europa.



Afbeelding 1: Organogram Sweco Nederland

Sweco Nederland houdt zich bezig met dienstverlening op het gebied van energie, wegen en snelwegen, duurzame gebouwen en water en heeft haar activiteiten onderverdeeld in drie divisies:

1. *Stad & Milieu*: multidisciplinaire activiteiten zoals ruimtelijke ordening, stedelijke planning, ontwerp, bouw, grondgebruik, recreatie, landschapsarchitectuur en ecologie;
2. *Transport & Mobiliteit*: diensten voor mobiliteitsbeheer, wegen, spoorwegen, tunnels, waterwegen, verkeersmanagementsystemen en luchthavens;
3. *Water & Energie*: diensten gericht op water, afvalwaterzuivering, industrie, duurzame industriële processen, energietechnieken en duurzame energie.



De afstudeeropdracht zal uitgevoerd worden binnen de afdeling Techniek, die valt onder de divisie Stad & Milieu. De afdeling Techniek is verantwoordelijk voor projectmanagement en opstellen van contracten op het gebied van civiele techniek. Ze verzorgen de technische uitwerking van definitief ontwerp tot en met begeleiding tijdens de realisatie. Sinds 1 september 2016 valt de afdeling Techniek van Middelburg onder Techniek Randstad.

Afbeelding 2: Divisie Stad & Milieu uit organogram

1.2 Opdrachtbeschrijving

De opdracht gaat in eerste instantie om onderzoek te doen naar het optimaliseren van wegverharding ter vervanging van straatstenen in een circulaire economie. Dit betekent dat bij de productie van de wegverharding het gebruikte materiaal zijn waarde blijft behouden of toeneemt. Dit kan door gebruik te maken van duurzamere materialen en productietechnieken of door restmateriaal te gebruiken welke anders weggegooid zou worden.

Als tweede ligt de wens er om de afstand tussen de fabriek en de plaats van het gebruik van de straatstenen te verkleinen. Hierbij wordt gekeken naar het winnen van de grondstoffen door bijvoorbeeld plaatselijke restmaterialen te gebruiken en naar de mogelijkheid om de wegverharding zo dicht mogelijk bij de plaats waar het gebruikt worden te produceren. Voorbeelden van dit soort productie zijn additive manufacturing zoals 3D printen en materiaal persen.

De focus ligt op het onderzoek naar duurzame materialen, lokale bedrijven met geschikt restmateriaal en naar verschillende productietechnieken.

Probleemstelling

Sweco en andere bouwbedrijven gebruiken veelvuldig straatstenen als wegdek. Een wegdek van straatstenen dient de begaanbaarheid voor voertuigen te verbeteren of mogelijk te maken. Echter zijn de benodigde materialen één van de meest milieubelastende in de wereld. Sweco streeft duurzame en winstgevendende oplossingen na voor zowel de klant als voor Sweco en wil dus onderzoeken of dit beter kan. Om de milieu-impact omlaag te brengen willen ze werken met een 'circulaire economie', wat betekent dat de grondstoffen geen waarde mogen verliezen tijdens hergebruik. Ze willen hiervoor gebruik maken van materialen en productiemogelijkheden die lokaal beschikbaar zijn. Onderzocht moet worden welke materialen beschikbaar zijn in de regio. De wegverharding moeten zo dicht mogelijk geproduceerd worden bij de plaats van gebruik, het liefst ter plaatse van de werkzaamheden. Dit allemaal met als doel een straatsteen te ontwikkelen met een lagere milieubelasting.

Huidige situatie

Bij straatstenen wordt er onderscheid gemaakt naar straatbakstenen en betonstraatstenen. Straatbakstenen worden geproduceerd uit klei van eigen bodem. Ze worden in een computergestuurd proces gebakken bij een temperatuur van ruim 1000 °C. Een betonstraatsteen bestaat uit een mix van zand, cement, graniet, basalt en organische pigmenten. Deze mix wordt onder hoge druk samengeperst.

De transport van beide straatstenen is minimaal de afstand van die van de fabriek naar de plaats van gebruik. Hier worden ze meestal door mensen geplaatst met machinale hulp. Na hun levensduur wordt een deel gerecycled door het puin te verpulveren en als granulaat toe te voegen bij de productie van nieuwe straatstenen.

Beide soorten straatstenen maken gebruik van natuurlijke grondstoffen, maar dit zijn echter wel eindige stoffen. Veel van deze grondstoffen zijn in de Nederlandse natuur te winnen maar dat geldt niet voor alle landen, wat transport van deze materialen kan vergroten. De productiemethodes zijn heel milieubelastend vanwege de hoogovens in het productie proces en dit wordt daarnaast verhoogd door het transport.

Gewenste situatie

De wegverharding is gemaakt van natuurlijke grondstoffen of van afvalstoffen van een ander product of proces. Deze grondstoffen zijn lokaal te verkrijgen waardoor het transport wordt geminimaliseerd. De straatstenen worden daarna geprint of geperst in de buurt van de te bestraten weg. Deze productiemethode is veel minder milieubelastend dan de huidige situatie. Na de levensduur van de wegverharding zijn de materialen te hergebruiken als grondstof voor het maken van nieuwe wegverharding. De materialen worden hierbij geupcycled, wat inhoudt dat de kwaliteit hetzelfde blijft of toeneemt.

1.3 Projectgrenzen

In deze paragraaf is de opdracht afgebakend, door vast te leggen wat wel en wat niet bij de afstudeerstage hoort.

1. Er wordt onderzoek gedaan naar straatstenen en niet naar andere bouwmaterialen. Hiervan zal wel informatie verworven worden, maar zal niet meegenomen worden in bijvoorbeeld beslissingen, conclusies en eindproducten;
2. Er wordt gekeken naar (toekomstige) lokale grondstoffen binnen een straal van +/- 60km rond Sweco Middelburg;
3. Niet ieder materiaal zal meegenomen worden in het onderzoek, dit is afhankelijk van tijd, beschikbaarheid van informatie en beschikbaarheid van het materiaal;
4. Er zal geen machine/productietechniek ontworpen worden door de afstudeerder;
5. Niet alle lokale grondstoffen zullen onderzocht worden. De deelvraag die lokale grondstoffen in kaart moet brengen staat welbewust aan het eind van de analysefase. Dit zorgt ervoor dat het zoeken naar lokale grondstoffen die bruikbaar zijn eenvoudiger is. Echter is het niet mogelijk om alle lokale grondstoffen te bekijken in dit onderzoek;
6. Het ontwerp moet voldoen aan onderstaande scenario;
7. Het ontwerp zelf moet wegbedekking zijn dus niet verplicht straatsteen, wel moet het voor het onderzoek dienen als straatsteen. Dit betekent dat er geen directe verbanden zullen worden getrokken naar bijvoorbeeld asfaltwegen;
8. Er zal een kostenschatting worden gedaan en geen exacte kostprijsberekening;
9. Bij het onderdeel circulaire economie zal alleen gekeken worden naar grondstoffen die gebruikt worden voor de productie van de straatstenen. Alleen de straatstenen zelf en eventuele reststoffen/afvalstoffen moeten recyclebaar of te upcyclen zijn.

Scenario

Voor het onderzoek is een scenario gemaakt in overleg met Sweco. Dit scenario is bedoeld als uitgangspunt voor het onderzoek, waardoor het resultaat beter te beoordelen is vergeleken met de traditionele oplossing. Er is een gekozen voor een straat met onderstaande richtlijnen:

1. 180 m lang;
2. 7 m breed;
3. Oppervlakte 1260 m²;
4. Straat bevat minimaal één bocht;
5. Vrachtwagen verkeer;
6. Binnen de bebouwde kom met maximale snelheid 50 km/uur;
7. Omstandigheden van Zeeland: bijv. gemiddelde weer in Zeeland, provincie met zeewater en periodes waarbij vorst optreedt, waartegen zout kan worden gestrooid op het wegdek;
8. Het wegdek moet open gemaakt kunnen worden voor het bereiken van bijvoorbeeld leidingen.

1.4 Eindproducten

Het resultaat van het onderzoek zijn drie oplossingsrichtingen voor een milieuvriendelijkere wegbedekking dan traditioneel betonstraatsteen, welke vastgelegd zijn in dit onderzoeksrapport. Belangrijk hierbij zijn de conclusies en aanbevelingen die toekomstige ontwikkelingen/innovaties weergeven. Het onderzoeksrapport bevat de probleemstelling, de deelvragen, het theoretisch kader, de gebruikte methodiek, de resultaten, conclusies en aanbevelingen. Het rapport heeft een omvang van ongeveer 30 pagina's A4, exclusief voorwerk, nawerk en bijlagen. In het onderzoek ligt de focus voornamelijk op het maken van een overzicht van wat mogelijke materialen en oplossingen zijn. Het onderzoeksrapport zal zich dus richten over het verkrijgen van dit overzicht, hieruit convergeren naar oplossingen met de hoogste potentie en kijken naar realisatie van deze oplossingen.

1.5 Onderzoeksvraag

Hoofdvraag

Wat is een innovatief proces voor een wegverharding, ter vervanging van traditionele straatsteen, die bij recycleren geen verlies in kwaliteit van de grondstoffen heeft en daarmee een duurzaam product is?

Deelvragen

Analysefase

1. Welke tools en methodes bestaan er voor duurzaam ontwerpen en kunnen gebruikt worden?
2. Wat zijn de eisen aan een straatsteen?
3. Met welke omgevingsfactoren moet rekening worden gehouden?
4. Hoe worden traditionele straatstenen geproduceerd?
5. Hoe worden traditionele straatstenen gelegd?
6. Wat is de milieu-impact van traditionele straatstenen?
7. Welke wettelijke normen worden gesteld aan straatstenen?
8. Welke onderzoeken zijn er al gedaan op een soortgelijk gebied?
9. Welke concurrenten en soortgelijke producten zijn op de markt aanwezig?
10. Welke productiemethode (o.a. additive manufacturing) kunnen gebruikt worden en wat zijn de effecten ervan op het ontwerp?
11. Welke extra functies kan de straatsteen eventueel uitvoeren naast zijn hoofdfunctie?
12. Bij welke lokale bedrijven zijn er beschikbare grondstoffen die gebruikt kunnen worden?

Ideefase

1. Welke ideeën zijn er voor de zoekvelden?
2. Welke ideeën lijken goede oplossingsrichtingen en welke ideeën zijn hier nog verder op te bedenken?
3. Welke totaaloplossingen kunnen gemaakt worden, passend bij resultaten uit de analysefase?
4. Met welke totaaloplossingen moet verder worden gegaan?

Conceptfase

1. Welke verbeteringen kan ik aanbrengen zodat de totaaloplossing optimaal aansluit met het Programma van Eisen en Wensen?
2. Welke verbeteringen kan ik aanbrengen zodat de totaaloplossing optimaal aansluit met het 'Zonnemodel van Timmers en van der Waals'?
3. Hoe kan de wegverharding geproduceerd worden?
4. Met welk concept moet verder gegaan worden?

Materialisatiefase

1. Hoe kan de maakbaarheid van het ontwerp geoptimaliseerd worden?
2. Hoe kunnen de kansen op falen en het daarbij optredende risico verkleind worden?
3. Wat moet aan het concept gedaan worden zodat het productie klaar is?
4. Wat zijn de specificaties van de duurzame straatsteen?

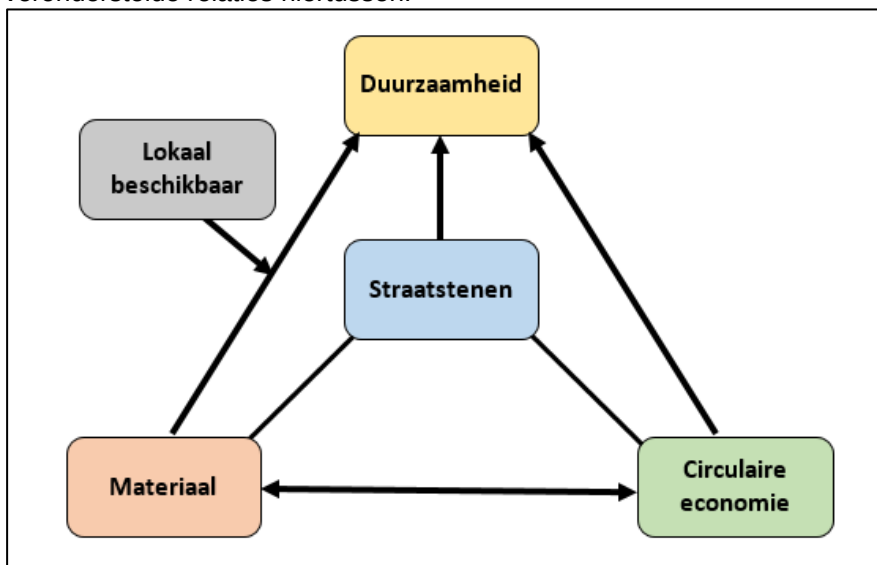
2 Theoretisch kader

Voor het theoretisch kader heb ik gekozen voor een toetsend onderzoek met als uitgangspunt de probleemstelling en de deelvragen. Bij het toetsend onderzoek ga ik door middel van hypothesen na of ik mijn idee ook wetenschappelijk kan aantonen. Bij een toetsend onderzoek is het gebruikelijk om met een conceptueel model te werken². In het conceptueel model wordt aangegeven welke factor invloed heeft op een andere factor. Zo kan vastgesteld worden welke factor beïnvloed moet worden en hoe om het gewenste resultaat uit de doelstelling te behalen. Uit het conceptueel model kunnen vervolgens ook relevante deelvragen worden opgesteld.

2.1 Conceptueel model

Een conceptueel model is een visuele weergave van een theorie en het bestaat uit kaders, pijlen en lijnen. In de kaders worden de kernbegrippen gezet en de pijlen geven de relaties aan tussen twee kernbegrippen. Met de pijl wordt aangegeven dat het begrip waar de pijl vandaan komt een causale invloed (de oorzaak-gevolgrelatie) heeft op het begrip waar de pijl naar verwijst. Als wel een samenhang tussen twee kernbegrippen bestaat maar geen causaal verband, dan wordt een lijn gebruikt.

Onderstaande conceptueel model bevat de kernbegrippen die in het onderzoek centraal staan en de veronderstelde relaties hiertussen.



Afbeelding 3: Conceptueel model

De oorzaak-gevolgrelatie die aangetoond wordt is het volgende: *Straatstenen hebben als hoofddoel de begaanbaarheid voor voertuigen te verbeteren of mogelijk te maken. Door het toepassen van materialen (oorzaak 1) binnen een circulaire economie (oorzaak 2) zal de duurzaamheid van straatstenen verbeteren (het gevolg).*

Bij een oorzaak-gevolgrelatie is er altijd sprake van twee type variabelen: het model bevat de onafhankelijke variabelen Straatstenen, Materialen en Circulaire economie en de afhankelijke variabele Duurzaamheid.

In mijn onderzoek worden nog extra facetten van de oorzaak-gevolgrelatie aangetoond, door middel van een moderatorvariabele. De moderator verandert het effect van de oorzaak-gevolgrelatie tussen de twee variabelen. Het gebruik van 'Lokaal beschikbaar' zal het effect wat het 'Materiaal' heeft op 'Duurzaamheid' versterken.³

² (Communicate Kenniscentrum, 2011)

³ (Swean, B., 2015)

2.2 Bronnenonderzoek

Om een kwalitatief goed onderzoek uit te voeren zijn er bronnen nodig die bij het conceptueel model aansluiten. Hiermee wordt in kaart gebracht wat de bestaande kennis is rondom het conceptueel model en hoe ik tijdens het onderzoek bij bestaande theorieën kan aansluiten.

Op basis van deze kernbegrippen is onderzocht wat daarover vanuit de theorie bekend is. Hiervoor heb ik boeken, (wetenschappelijke) artikelen en soortgelijke onderzoeken gezocht en bestudeerd. De geraadpleegde bronnen zijn in voetnoten opgenomen en met behulp van de standaard Microsoft Word functionaliteit is een bronnenlijst gecreëerd volgens de APA-normen. De verwijzingen in Word die niet volgens de APA-richtlijnen zijn, doordat de Nederlandse vertaling soms te letterlijk is, zijn handmatig gecorrigeerd.

2.2.1 Variabelen conceptueel model

Om een goed beeld te scheppen zijn eerst de afzonderlijke variabelen beschreven.

Straatstenen

Straatstenen maken onderdeel uit van het wegdek. De straatstenen worden gebruikt voor bestrating in de wegenbouw, maar hebben dezelfde functie als het gehele wegdek en dat is om de begaanbaarheid voor voertuigen te verbeteren of mogelijk te maken.⁴

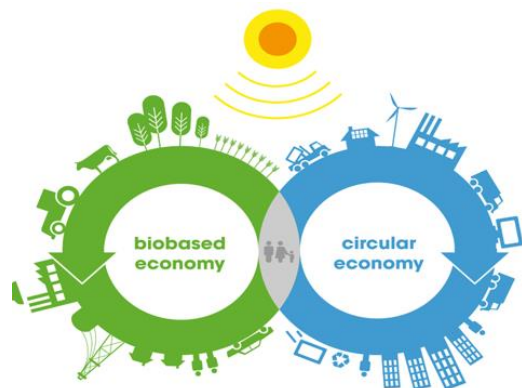
Materiaal

Materiaal betekent in deze situatie grondstoffen/bouwstoffen. Grondstoffen zijn materialen die in een proces gebruikt worden om iets te vervaardigen of te fabriceren. Natuurlijke grondstoffen zijn stoffen die in de natuur gevonden worden, zoals vruchtbare aarde, olie, mineralen, hout en andere gewassen. In productieprocessen kunnen ook niet-natuurlijke grondstoffen, ook wel een halffabricaat genoemd, gebruikt worden. Sommige van deze grondstoffen zijn schaars, ook wel eindige grondstoffen genoemd, zoals bijvoorbeeld aardolie, aardgas, steenkool, metaalerts enzovoorts. Andere materialen raken niet op zoals hout. Er zijn ook grondstoffen die niet snel zullen opraken dit zijn onder andere zand voor het vervaardigen van glas en klei voor het vervaardigen van bakstenen.⁵

Circulaire economie

De circulaire economie is een economisch systeem waarin rest- en grondstoffen zo optimaal mogelijk worden hergebruikt. Binnen een circulaire economie probeert men producten of materialen opnieuw te gebruiken voor nieuwe producten. In de huidige economie, worden grondstoffen meestal omgezet in producten en uiteindelijk weggegooid. Bij een circulaire economie gebruik je het afval- en reststoffen weer als grondstoffen voor andere producten.

Een circulaire economie valt op te splitsen in twee kringlopen: een biologische en een technische kringloop. De biologische kringloop (biobased) waarbij de materialen na gebruik als natuurlijke grondstoffen weer veilig terugkeren in de natuur. En er is de technische kringloop waar producten en onderdelen zo ontworpen worden dat na de levensduur de materialen/onderdelen weer op een kwalitatief hoogwaardig niveau hergebruikt kunnen worden.⁶



Afbeelding 4: weergave biologische en technische kringloop⁷

⁴ (Calisch, I. & Calisch, N., 2003)

⁵ (Kooijman, M. & Pallada, M., 2006)

⁶ (Virida, 2016)

⁷ (Orgabouw, 2016)

Duurzaamheid

“Duurzame ontwikkeling is de ontwikkeling die aansluit op de behoeften van het heden zonder het vermogen van de toekomstige generaties om in hun eigen behoeften te voorzien in gevaar te brengen”.

Dat is de definitie die geformuleerd door de ‘World Commission on environment and Development’ van de Verenigde Naties⁸. Onder duurzaamheid behoort alles van maatschappelijk verantwoord leven, milieu en ecologie. De term duurzaamheid kan omschreven aan de hand van ‘de drie P’s’:

1. People (mensen);
2. Profit (winst);
3. Planet (aarde).

Duurzaamheid heeft betrekking op de huidige behoeftes van de mens en hoe dit verder ontwikkeld kan worden zonder dat mensen, het milieu of de economie negatief beïnvloed worden.

Lokaal beschikbaar

Werkelijke duurzaamheid heeft een lokale basis. Dit betekent dat het beter is om gebruik te maken van lokale grondstoffen en lokale energie, wat zorgt voor lokale werkgelegenheid. Het is mogelijk om een gehele lokale keten op te zetten, waarbij afval lokaal wordt omgezet in grondstoffen en dat lokaal geproduceerde grondstoffen (her)gebruikt worden.⁹

2.2.2 Oorzaak-gevolgrelatie conceptueel model

Straatstenen in relatie tot Duurzaamheid

Een straatbaksteen, ook wel bekend als klinker, is een type baksteen dat gebruikt wordt in de wegenbouw voor bestrating. Straatstenen moeten harder zijn dan stenen die in de huizenbouw gebruikt worden. Dit wordt bereikt door een bakproces met een hogere temperatuur. Hierbij fuseren de kleideeltjes, dat ook wel sinteren wordt genoemd.

Ook zijn er betonstraatsteen die als duurzame, goedkope, vervanging van de straatbaksteen is ontwikkeld. Betonstraatstenen hebben echter een heel andere samenstelling in materiaal en ook een heel ander bereidingsproces. De onderlaag van betonstraatstenen bestaat meestal uit beton voorzien van een deklaag. Wereldwijd wordt er jaarlijks meer dan tienmiljard ton beton geproduceerd en de toepassingen hiervan nemen toe. Momenteel is ongeveer 7% van de CO₂-uitstoot te wijten aan de productie van beton.¹⁰

Voor het verminderen van de milieubelasting van beton geven experts enkele zoekrichtingen voor innovaties.¹¹

1. Het ontwikkelen van beton composities met de laagst mogelijke milieu-impact door het type cement, het materiaal en de dosering van aanvullende cementgebonden materialen aan te passen;
2. Zoeken naar materialen die beton kunnen vervangen, met een lagere milieubelasting;
3. Het verhogen van de levensduur van betonconstructies;
4. De milieubelasting van de productie van cement verlagen, door bijvoorbeeld gebruik te maken van biobrandstoffen;
5. Door de water/bindmiddel verhouding te optimaliseren, waardoor de benodigde hoeveelheid cement met maximaal 1% kan worden verminderd;
6. Toevoegen van materialen die de opname van koolstofmonoxide uit de lucht verbeteren, waardoor het beton milieuvriendelijker wordt naarmate de tijd verstrijkt;
7. Manieren vinden om het betonafval te recycleren/upcyclen, waardoor de behoefte van de materialen afneemt en er een circulaire economie ontstaat.

⁸ (The World Commission on environment and Development, 1987)

⁹ (Handreiking Duurzame Ruimtelijke Ontwikkeling, 2011)

¹⁰ (TU Delft, 2008)

¹¹ (Damtoft, J.S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D. & Gartner, E.M., 2007)

Conclusie: de gevonden bronnen tonen aan dat het produceren van straatstenen heel milieubelastend is vanwege de benodigde productieprocessen en dat door meerdere experts dit probleem herkend wordt. Deskundigen zijn bezig met verschillende oplossingsrichtingen, maar het blijft beperkt tot slechts minimale verbeteringen, prototypes en theorieën. Wel is er voldoende informatie beschikbaar voor dit onderzoek, waarbij de focus ligt op het zoeken naar materialen die grondstoffen van het beton kunnen vervangen, de milieu-impact van de productie van cement verlagen, manieren voor het betonafval te recylen/upcyclen en eventueel het toevoegen van materialen die koolstofmonoxide opnemen.

Circulair ondernemen in relatie tot Duurzaamheid

Deskresearch toont aan dat er zowel mogelijkheden voor circulaire economie zijn bij Nederlandse bedrijven als voor straatstenen. De wegverharding moet voldoen aan één van de twee kringlopen van een circulaire economie: binnen de biologische kringloop waarbij je de materialen veilig kan teruggeven aan de natuur en bij de technische kringloop moet van de materialen weer een wegverharding gemaakt kunnen worden.

Materiaal in relatie tot Duurzaamheid

Voor de relatie tussen materiaal is het belangrijk om te kijken naar de milieubelasting die er is bij het verkrijgen, transporteren, gebruiken en weggooien van materialen.

Er zijn een aantal principes waarbij rekening moet worden gehouden bij de keuze van materiaal om de milieubelasting te beperken:

1. Zoek naar niet-giftige, duurzaam geproduceerde of gerecyclede materialen die minder energie verbruiken bij de verwerking dan de huidige grondstoffen;
2. Gebruik energie-efficiënte productieprocessen en maak producten die minder energie nodig hebben;
3. Kwaliteit en levensduur: een langere levensduur en beter functionerende producten hoeven minder vaak te worden vervangen;
4. Hergebruik en recycling: producten, processen en systemen moeten worden ontworpen voor prestaties wanneer de levensduur behaald is.

Effect Lokale beschikbaarheid van Materiaal op Duurzaamheid

We moeten er van bewust zijn dat de beschikbaarheid van niet hernieuwbare grondstoffen zeer verschillend is. Zand, klei, grind, kalk, ijzer en dergelijke zijn voldoende beschikbaar. Bij deze grondstoffen is de beschikbaarheid niet zozeer het nadeel, maar juist de effecten van grondstofwinning en verwerking. Grondstoffen als olie, koper, lood en dergelijk zijn veel schaarser, los van de hoge milieubelasting die ontstaat bij winning en verwerking is hier ook het beheer van de voorraden een belangrijk punt. Het gebruik van lokale grondstoffen heeft daarnaast een positieve invloed op de lokale economie.

Voordelen van lokale inkoop:¹²

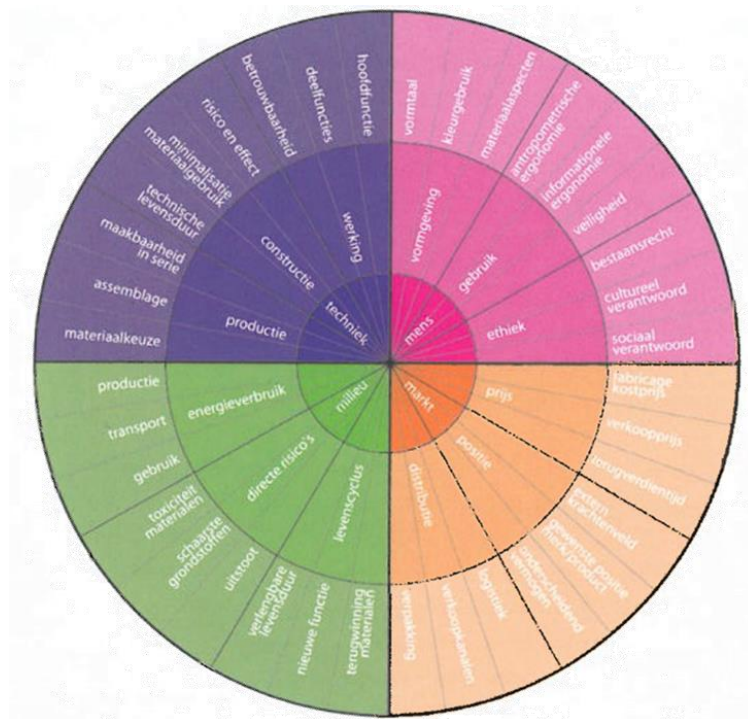
1. Meerdere bevoorradingsketens zorgen voor reserves in het geval van verstoringen bij de leveranciers;
2. Sterkere en langdurige relaties met leveranciers;
3. Plaats van herkomst is beter bekend;
4. Flexibiliteit om kosten en de kwaliteit te optimaliseren;
5. Stimulans voor gezonde concurrentie, constante innovatie en ambachtelijk vakmanschap.

¹² (Supplair, 2016)

3 Methodiek

3.1 Keuze van methodiek

Zowel de Timmers en van der Waals ontwerpmethod, welke afgeleid is van de Delft Design Approach, als de Eggert methode zijn toe te passen voor dit onderzoek. Doordat het onderzoek meer gericht is op het zoeken naar vervangende grondstoffen en het duurzamer maken van het productieproces dan het ontwerpen van een machine is er voor gekozen om de Timmers en van der Waals ontwerpmethod te gebruiken. Het voordeel van deze methodiek is dat gefaseerd wordt gewerkt. De fases van deze methode zijn beschreven in de volgende paragraaf. Door de fasering kan op een systematische wijze ingezoomd worden op het te optimaliseren proces.



In de analysefase wordt het onderzoek gebaseerd op de vier kwadranten (mens, markt, milieu en techniek) van het integrale zonmodel van Timmers en van der Waals. Door dit als leidraad te houden kan op elk kwadrant onderzoek worden gedaan, wat per kwadrant resulteert in een Programma van Eisen en Wensen (PvE).

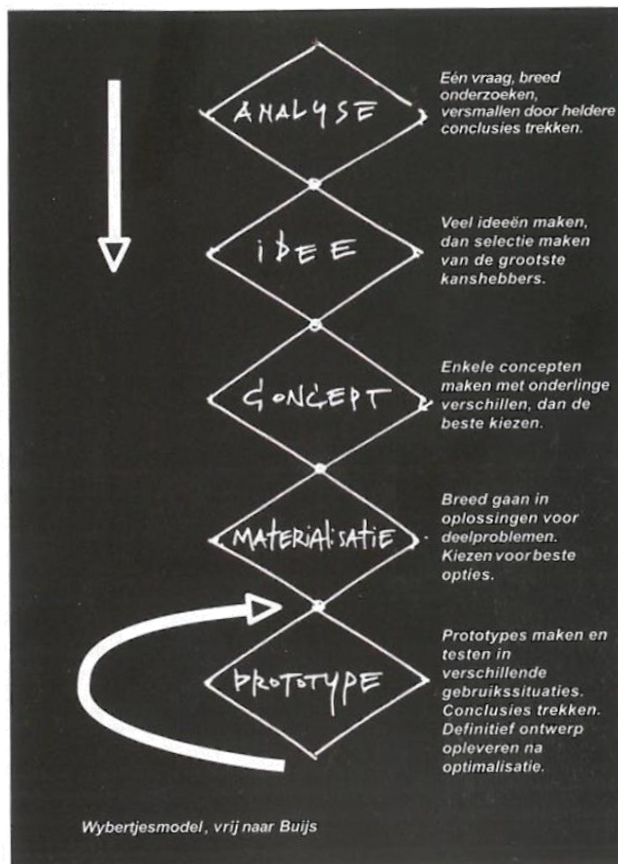
Afbeelding 5: Het integrale zonmodel¹³

Ook zullen tijdens de afstudeerstage onderdelen van de andere methodieken gebruikt worden. Zo zal bijvoorbeeld bij het optimaliseren in de conceptfase gekeken worden naar de tools van het V-model. In de conceptfase zal de nadruk meer liggen op de integratie, verificatie en vastlegging van de oplossingen (rechtterkant van de V) in relatie tot de specificatie, analyse en ontwerp van het systeem (linkterkant van de V).

¹³ (J. Timmers & M. van der Waals, 2009)

3.2 Fasering Timmers en van der Waals

Uit de ontwerpmethodiek van Timmers en van der Waals worden de eerste vier fase toegepast. De fase prototype valt buiten de scope van de opdracht.



Afbeelding 6: Probleem oplossingsmodel van de Haagse Hogeschool (Wybertjesmodel)

gemaakt kan worden, dat investeringen realistisch gezien binnen een redelijke termijn terugverdiend kunnen worden en dat er een reële kans is op een winstgevende situatie. Vervolgens worden de concepten gevalideerd en wordt een keuze gemaakt voor het uiteindelijke ontwerp.

Materialisatiefase

De materialisatiefase is de laatste fase van het ontwerpproces. In deze fase moet het ontwerp zover uitgedacht worden dat het productierijp is. Dit houdt in dat het product en de processen worden gedefinieerd en vastgelegd. Er zullen verschillende methodes gebruikt worden voor het testen en optimaliseren van het ontwerp zoals LCA, DFA, FMEA en FEM berekeningen.

Analysefase

In de analysefase wordt de informatie verzameld die nodig is om de deelvragen te beantwoorden. De informatie wordt gezocht door middel van deskresearch en fieldresearch, waarna het wordt gevalideerd en verwerkt tot conclusies.

Ideefase

Aan de hand van de opdrachtomschrijving, de zoekvelden van de analysefase en het Programma van Eisen en Wensen (PvE) worden in deze fase bestaande oplossingen en onderzoekresultaten onderzocht welke gebruikt worden voor het creëren van nieuwe ideeën. Het convergerende deel van de ideefase bestaat uit het clusteren en beoordelen van ideeën, resulterend in minimaal twee integrale ideeën voor de conceptfase.

Conceptfase

In de conceptfase moeten concepten aantoonbaar haalbaar gemaakt worden in technische en financiële zin. Technisch haalbaar wil zeggen dat het alle functies goed kan vervullen, goed gemaakt kan worden en voldoet aan de technische eisen uit het PvE. Financieel haalbaar wil zeggen dat het product tegen de juiste kostprijs

4 Resultaten

4.1 Resultaten analysefase

De analysefase dient om te analyseren wat de opdracht precies inhoud en informatie te verzamelen die nodig is om het gevraagde product te ontwerpen. Informatie wordt gezocht om antwoorden te vinden op de deelvragen door middel van deskresearch. Tijdens de onderzoeksfase zijn een groot aantal bronnen verzameld die gebruikt kunnen worden bij het beantwoorden van de deelvragen. Deze fase moet een programma van eisen en wensen en zoekvelden voor de ideefase opleveren.

Vanaf de ideefase is gekozen om alleen verder te gaan met betonstraatstenen, daarom is veel informatie in het rapport hierop gericht. Wel is gekeken naar andere wegverhardingen waarvan de gebruikte informatie ook in het rapport en de bijlagen te vinden is.

Doelstellingen analysefase

1. In kaart brengen van materialen en hun beschikbaarheid;
2. Inzicht krijgen in duurzaam ontwerpen;
3. Inzicht krijgen in huidige markt van duurzame straatstenen/bouwproducten;
4. Inzicht krijgen in wat de mogelijkheden zijn in (her)gebruik van materialen, materiaal combinaties en bijbehorende productietechnieken;
5. In kaart brengen van de levenscyclus van de straatsteen;
6. Genereren van een programma van eisen en wensen.

4.1.1 Deelvragen en conclusies

1. **Welke tools en methodes bestaan er voor duurzaam ontwerpen en kunnen gebruikt worden?**

De volgende tools en methodes kunnen gebruikt worden voor duurzaam ontwerpen:

1. Cradle to Cradle (C2C);
2. Levenscyclusanalyse (LCA);
3. BREEAM.

De tools en methodes worden toegelicht in bijlage A. 'Tools en methodes duurzaam ontwerpen'. In het onderzoek wordt gebruikt gemaakt van levenscyclusanalyses en de theorieën die behoren bij 'Cradle to Cradle'.

2. **Wat zijn de eisen aan een straatsteen?**

Procesboom straatsteen^{14,15}

Om een product echt goed te begrijpen, en te weten wat er allemaal mee gaat gebeuren, is een procesboom een handig analysehulpmiddel. Door de levensloop van een product langs te lopen kan een inventarisatie gemaakt worden van alle situaties waarin het product zich kan bevinden. Aan de hand daarvan kunnen dan weer criteria opgesteld worden waaraan dat product in die situatie moet voldoen. Een procesboom bestaat uit de vier primaire levensfasen: Ontstaan, Verspreiden, Gebruik en Verdwijnen, die vervolgens steeds verder verfijnd kunnen worden door bij elke levensfase zoveel mogelijk activiteiten te noemen. Bij specificatie kan een verdere onderverdeling naar onderdelen voorkomen. De uitwerking van de procesboom is opgenomen in bijlage B. 'Procesboom straatsteen'.

Standaard formaat¹⁶

Straatstenen zijn er in meerdere formaten, maar in Nederland komen de volgende drie standaard formaten voor:

¹⁴ (Flexible Pavements of Ohio, 2016)

¹⁵ (Bestrating, 2016)

¹⁶ (Steenhandel Geurds, 2016)

1. Waalformaat: deze stenen zijn relatief klein (210x50 mm - ca. 100 st/m²). Doordat ze zo klein zijn, kun je met klinkers in het Waalformaat eenvoudig verschillende legpatronen maken;
2. Dikformaat: deze stenen zijn net iets forser dan de bekende Waalklinkers (210x70 mm - ca. 72 st/m²). Klinkers in dikvorm worden vaak gebruikt voor grotere oppervlaktes, zoals bijvoorbeeld parkeerplaatsen of opritten;
3. Keiformaat: (200x100 mm - ca. 45 st/m²). Het keiformaat wordt vooral toegepast bij terrassen, paden, pleinen en inritten. Het beschikbare kleurengamma maakt hem uitermate geschikt voor sierstraatwerk.

Bij de formaten kan de exacte maatvoering per fabrikant verschillen, maar de verhoudingen zijn per formaat gelijk. Zo is bijvoorbeeld een waalformaat 4:1, een dikformaat 3:1 en een keiformaat 2:1. De noodzakelijke dikte van betonstenen is afhankelijk van het gebruik. Stenen met een dikte van 5 tot 7 cm zijn geschikt voor voetgangerszones en licht autoverkeer. De meest voorkomende dikte is 8 cm en diktes van 9 tot en met 15 cm zijn bedoeld voor industrie en ander zwaar gebruik.

Straatsteen lagen¹⁷

Betonstraatstenen worden over het algemeen geproduceerd in twee lagen met een grovere onderlaag en een fijnere toplaag. Deze lagen worden in verse toestand samengeperst tot een compacte betonstraatsteen. De onderlaag heeft een grovere betonsamenstelling, heeft een lager cementgehalte is niet in de massa gekleurd, zorgt voor voldoende sterkte en vormvastheid. De toplaag heeft een fijne betonsamenstelling, heeft een hoger cementgehalte, is grijs of met pigmenten in de massa gekleurd zorgt voor kleurvastheid, slijtbestandheid en vorstdooizoutbestandheid.

Betonstraatstenen kunnen ook uit één laag geproduceerd worden, zonder extra toplaag. Over het algemeen is deze productiewijze minder gunstig voor kleur- en slijtbestandheid.

Conclusie

De procesboom geeft inzicht in de levenscyclus van de straatsteen en geeft belangrijke informatie bijvoorbeeld over het eindstadium, waarbij straatstenen deels worden gedowncyceld en deels vermalen terecht komen bij ander bouw- en sloopafval. De eisen die gesteld worden aan de verschillende maten en de lagen van de straatsteen worden toegevoegd aan het PvE.

3. Met welke omgevingsfactoren moet rekening worden gehouden?

In Nederland zijn er drie hoofdcategorieën van wegen¹⁸, namelijk stroomwegen (SW), gebieds-ontsluitingswegen (GOW) en erftoegangswegen (ETW). In het scenario hebben we te maken met gebiedsontsluitingswegen, welke zich kenmerken door scheiding van langzaam- en snelverkeer (parallele fietspaden) en gelijkvloerse kruisingen. Hierop mag buiten de bebouwde kom 80 km/uur worden gereden en binnen de bebouwde kom 50 tot 70 km/uur. Het scenario beperkt zich tot een weg binnen de bebouwde kom, waarbij uitgegaan wordt van maximaal 5000 'lichte' voertuigen en 100 'zware' voertuigen die dagelijks passeren.

Omgevingsfactoren

Het klimaat van Zeeland: Zeeland bestaat uit eilanden en schiereilanden gelegen in het zuidwesten van Nederland. Het Zeeuwse klimaat is een gematigd maritiem klimaat dat onder grote invloed staat van de zee, dit kenmerkt zich ook door het groot aantal regendagen per maand. De temperatuurverschillen tussen de winter en de zomer zijn niet extreem groot. De gemiddelde temperatuur van de koudste maand ligt tussen -3 °C en 18 °C.

Andere aspecten dat het meebrengt, is vorst waartegen zouten gestrooid worden. Als de straatstenen te veel water in zich hebben dan kunnen de stenen beschadigen door vorst. Het toevoegen van fijn zand bij het maken van de straatsteen voorkomt ruimtes waardoor de straatsteen water opneemt. De straatstenen kunnen ook in contact komen met stoffen die zich

¹⁷ (Agentschap Wegen en Verkeer, 2009)

¹⁸ (Wegman, F., Aarts, L., 2005)

bevinden in de zeewater, regenwater en ander water zoals sloten. Ook de wind kan een variatie van stoffen met zich meedragen.

Beplanting langs de weg heeft ook effect op de omgeving. Zo kunnen er mossen, onkruid en algen (veroorzaakt door bomen) gaan groeien op de straatstenen wat het uiterlijk hiervan beïnvloed. Ook kunnen de wortels van bomen/planten onder de wegverharding gaan groeien waar straatstenen last van kunnen krijgen.

Straatstenen hebben meestal een klein beetje reliëf. Het gevolg is dat, als met een auto over de straatstenen wordt gereden, de banden een geluid maken. De geluidsoverlast is ook afhankelijk van hoe hard de auto's rijden en hoe druk de weg is.

Conclusie

Wat vooral belangrijk is dat de straatstenen weers- en vorstbestendig zijn. Alle andere problemen zoals geluidsoverlast en begroeiing wordt meestal tegengegaan door specifieke afdekklagen.

4. Hoe worden traditionele straatstenen geproduceerd?

Het fabricageproces van straatstenen varieert van fabriek tot fabriek, maar is in grote lijnen aan elkaar gelijk. De productie start met het verzamelen van de grondstoffen (cement, grind en zand), waarna deze naar de fabriek worden getransporteerd.

In de fabriek worden de grondstoffen gemengd, om er betonspecie van te maken. Eerst moet zand en grind droog worden gemengd. Vervolgens wordt het cement er aan toegevoegd en tenslotte water om voor een chemische reactie te zorgen waardoor alle bestanddelen aan elkaar hechten¹⁹. Door de chemische reactie met water verhardt het cement. Het bindt de toeslagmaterialen en vult de lege ruimtes tussen het zand en het grind. Er is een minimale hoeveelheid water nodig om al het aanwezige cement te laten reageren. Water is ook nodig voor een goede verwerkbaarheid. Het water dat niet met cement reageert blijft in beton achter en vormt poriën. Meer water in de betonspecie betekent een meer open structuur en een lagere sterkte. De water/cementfactor, ofwel de hoeveelheid water (in kg) gedeeld door de hoeveelheid cement (in kg), is een bepalende factor voor sterkte en duurzaamheid²⁰. Het is belangrijk de betonmortel goed te mengen, zodat een homogene massa ontstaat zonder klonten. Door dit in een vorm te gieten ontstaat de straatsteen. De straatsteen wordt uit twee lagen beton gemaakt, de grootste laag is de onderlaag en daar bovenop komt een toplaag. De toplaag moet sterker zijn omdat deze in contact komt met verkeer. Deze twee lagen worden op elkaar vast getrild zodat ze één straatsteen vormen, waarna ze een dag lang worden uitgehard in een klimaatkamer met een zeer hoge luchtvochtigheid. Tot slot kan de straatsteen voorzien worden van een coating of hydrofobe toplaag die de stenen vocht- en vuilafstotend maakt of een toplaag van natuursteenmineralen die de straatsteen een kleurvast en ruw oppervlak geven. Als de straatstenen volledig uitgehard en nabewerkt zijn, worden ze na controle, gestapeld en klaargezet voor transport naar de afnemer²¹.

Een gedetailleerde beschrijving van het productieproces van straatbakstenen en betonstraatstenen is te vinden in bijlage C 'Productieproces straatstenen'.

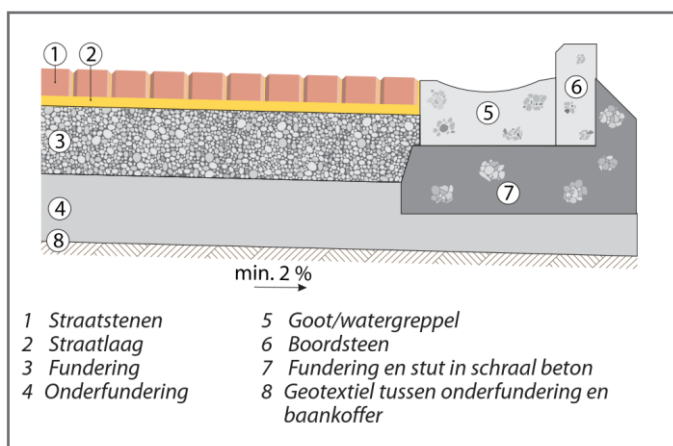
5. Hoe worden de traditionele straatstenen gelegd?

Een wegverharding met straatstenen (ook wel bestrating of 'open' verharding genoemd) wordt opgebouwd uit meerdere lagen, waarbij elke laag een bepaalde rol heeft.

¹⁹ (Enci, 2008)

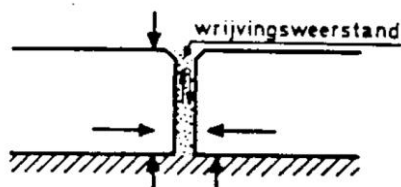
²⁰ (De Vereniging van Ondernemingen van Betonmortelfabrikanten, 2016)

²¹ (Van Kemenade Bestratingen, 2016)



Afbeelding 7: Verticale opbouw wegverharding²²

De toplaag bestaat uit kleine opneembare straatstenen. Voor een zo goed mogelijke spreiding van de druk in de toplaag moeten de straatstenen goed aaneengesloten geplaatst worden, met smalle voegen (2 à 3 mm), waarbij de voegen goed met zand gevuld blijven. Hierdoor



ontstaat in de voegen tussen de straatstenen, die onder belasting ten opzichte van elkaar willen verschuiven, een zekere wrijvingsweerstand. Deze wrijving verhindert een al te grote onderlinge verschuiving van de straatstenen en brengt een beperkt deel van de belasting over op de aangrenzende straatstenen.

Afbeelding 8: Wrijvingsweerstand tussen twee straatstenen

Voor de toplaag zijn betonstraatstenen gunstiger dan gebakken straatklinkers, omdat bij de zeer vorm- en maatvasten betonstraatstenen strakker straatwerk mogelijk is.

De resultaten van het onderzoek naar de verticale opbouw van wegverharding, steenverbanden en dwarsprofiel zijn opgenomen in bijlage D. 'Aandachtspunten leggen bestrating'.

6. Wat is de milieu-impact van traditionele straatstenen?

Ecolizer²³

Met behulp van de Ecolizer tool kan de milieu-impact van een product/materiaal weergegeven worden. Eén eco-indicatorpunt komt overeen met één duizendste van de totale jaarlijkse milieubelasting van een gemiddelde persoon in Europa. De eenheid die gebruikt wordt in de Ecolizer, wordt een millipunt (mPt) genoemd en komt overeen met een miljoenste van deze belasting.

Om een schatting te maken voor de CO₂ uitstoot van de straat uit het scenario (1.260 m²), gelegd met traditionele straatstenen, is gebruik gemaakt van Ecolizer 2.0:

Materiaal & proces	Milieu-impact (mPt)
Grondstofwinning, productie en recycling	1.619.352
Transport (inclusief productie van brandstoffen)	118.800
Totale milieu-impact in 20 jaar (minimale levensduur)	1.738.152
Gemiddelde milieu-impact per jaar	86.908

Tabel 1: CO₂ uitstoot scenario met traditionele straatstenen

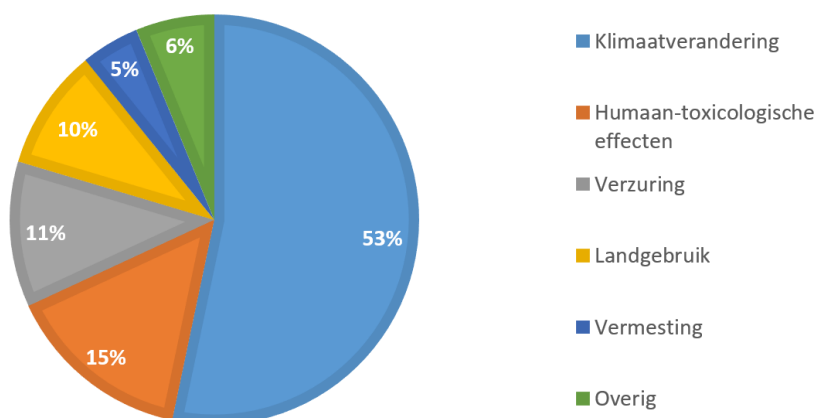
²² (Agentschap Wegen en Verkeer, 2009)

²³ (OVAM, 2016)

In bijlage E. 'CO₂ impact levenscyclus straatstenen' zijn de resultaten van een aantal onderzoeken opgenomen naar de hoeveelheid CO₂ die geproduceerd wordt bij beton en straatstenen.

De berekende CO₂ uitstoot van 86.908 mPt is slechts een deel van de gehele milieu-impact. Het Nederlands Instituut voor Bouwbiologie en Ecologie²⁴ heeft onderzoek gedaan naar de milieubelastingen van een straatsteen. De gegevens uit dit onderzoek zijn verwerkt in onderstaande cirkeldiagram en weergeeft dat naast de CO₂ uitstoot (milieueffect klimaatverandering), ruim 53% van de totale milieubelasting van het product, nog andere effectcategorieën impact hebben op het milieu, onder andere humaan-toxicologische effecten, verzuring, landgebruik en vermesting.

MILIEUBELASTINGEN STRAATSTEEN



Afbeelding 9: De verschillende milieubelastingen van een straatsteen

Uit bovenstaande grafiek blijkt dat de klimaatverandering, waaraan de CO₂ een belangrijke bijdrage levert, de meeste milieu-impact heeft op een straatsteen.

7. Welke wettelijke normen worden gesteld aan straatstenen?

De specificaties van beton, gebruikt voor de productie van betonklinkers, zijn omschreven in NEN-EN 206-1 aangevuld met NEN 8005 voor Nederland. Het gaat om sterkteklassen, consistentieklassen en milieuklassen. De sterkteklasse en milieuklasse zijn ontwerpcriteria waarvan de eisen meestal worden opgesteld door de gemeente. De consistentieklasse is een maat voor de verwerkbaarheid van de beton^{25,26}.

Daarnaast zijn er ook normen gesteld voor de hardheid van de toplaag en de splijttreksterkte van straatstenen. Meer informatie over deze normen zijn te vinden in bijlage F. 'NEN normen materiaal straatsteen'.

8. Welke onderzoeken zijn er al gedaan op een soortgelijk gebied?

Diverse onderzoeken zijn uitgevoerd naar het gebruik van lokale natuurlijke grondstoffen bij de productie van bouwmaterialen, welke mogelijk ook toepasbaar zijn voor wegverharding. Daarnaast is er gekeken naar nieuwe productietechnieken die mogelijk ingezet kunnen worden bij het lokaal produceren van de benodigde materialen voor een wegdek.

De onderzoeken die het meeste raakvlak hebben met deze opdracht zijn hieronder genoemd. Informatie van deze en andere onderzoeken die het vermelden waard zijn, zijn opgenomen in bijlage G. 'Onderzoeken op soortgelijk gebied'.

²⁴ (Het Nederlands Instituut voor Bouwbiologie en Ecologie, 2012)

²⁵ (De Vereniging van Ondernemingen van Betonmortelfabrikanten, 2016)

²⁶ (Agentschap Wegen en Verkeer, 2009)

1. Beton op basis van hennepvezels^{27,28}: momenteel wordt hennepbeton in duurzame bouwprojecten vooral gebruikt om de muren te vormen, maar het is mogelijk ook toepasbaar voor betonnen straatstenen;
2. EcoFaeBricks²⁹: in Indonesië zijn straatstenen ontwikkeld van koeienmest met bodem extracten en uitgehard door gebruik te maken van biogas;
3. Lignine Bio-asfalt³⁰: de bitumen wordt vervangen door een biobased plakmiddel genaamd lignine, een natuurlijke lijm die zorgt voor de stevigheid in planten;
4. Cigarette butt Bricks³¹: sigarettenpeuken zijn heel geschikt zijn om in bakstenen te worden verwerkt, wat er voor zorgt dat deze bakstenen lichter en beter isoleren dan traditionele bakstenen;
5. NNRGY Crops³²: olifantsgras bevat waardevolle vezels en cellulose die gebruikt kunnen worden bij het produceren van bio-beton.

Conclusie

Het gebruik van lokale natuurlijke grondstoffen, bij de productie van bouwmaterialen, wordt de laatste jaren op kleine schaal al toegepast in de bouw met als doel de milieu-impact te verlagen. Daarnaast worden in bouw ook de mogelijkheden van 3D-betonprinten onderzocht voor het printen van duurzame betonconstructies. Dit beperkt zich voornamelijk tot het printen van huizen. Met de kennis die hierbij is opgedaan, kan onderzocht worden of dit ook een oplossing kan bieden voor duurzame straatstenen.

9. Welke concurrenten en soortgelijke producten zijn op de markt aanwezig?

Zeobond³³

Zeobond, is de ontwikkelaar van E-Crete stortklaar beton, dat tot 60% minder CO₂ uitstoot dan conventionele Portlandcement bij de vervaardiging ervan. Zeobond heeft dit bereikt door gebruik te maken van geopolymeren. Geopolymeren zijn net zoals cement een bindmiddel om bijvoorbeeld zand en grind aan elkaar te binden in beton. Het heeft als groot voordeel dat het verhard bij kamertemperatuur als gewoon Portlandcement.

v.d. Bosch Beton³⁴

V.d. Bosch Beton maakt ook gebruik van geopolymeren voor het maken van Reduton cementloos beton. Dit is meestal gebaseerd op elementen als Aluminium en Silicium, mineralen die van nature veel beschikbaar zijn. Door het geopolymeer te mengen met basische materialen (alkaliën) en de toevoeging van een activator ontstaat de polymerisatie. Het materiaal is stabiel, vormvast en optisch gelijk aan cementgebonden materiaal. Het nieuwe geopolymeer graselement heeft een extreem lage CO₂-emissie, waardoor een CO₂-reductie van ca. 80% gerealiseerd kan worden. Daarnaast is het materiaal ook goed recyclebaar, wat bijdraagt aan het milieu. Het kan gebruik maken van bestaande productiemiddelen van traditioneel beton.

Ook werkt v.d. Bosch Beton samen met TenCate Geosynthetics, Tauw BV en Rotim Innovaties B.V. aan het project AquaBASE dat is ontwikkeld voor het zorgvuldig omgaan met water. Het systeem absorbeert snel water en kan dit zowel langzaam en snel weer afstaan al naar gelang de behoefte. Het is daarmee uitermate geschikt voor het probleemloos verwerken van intense regenbuien.

²⁷ (ORGA bouw, 2014)

²⁸ (Biobased Bouwen, 2016)

²⁹ (Design other 90 network, 2011)

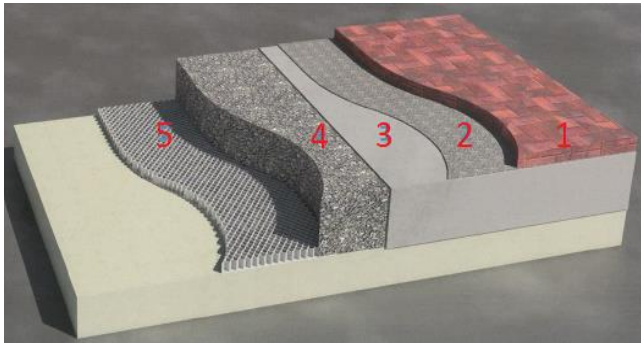
³⁰ (Gosselink, R., 2014)

³¹ (Mohajerani, A., Kadir, A. & Larobina, L., 2016)

³² (NNRGY Crops, 2015)

³³ (The zeobond group, 2016)

³⁴ (v.d. Bosch Beton, 2016)



Afbeelding 10: Schematische weergave AquaBASE

Het meest innovatieve aan deze oplossing is laag 5 van hun schematische weergave, de Accorder 3D geotextiel 55mm. Deze laag van vakjes is gemaakt van polypropreen (PP), waarmee de dikte van de straatlaag sterk kan worden gereduceerd. Deze laag zorgt ervoor dat de laag zand die traditioneel wordt toegepast met meer dan 50% verkleind kan worden.

Een aantal andere concurrenten die het vermelden waard zijn, zijn opgenomen in bijlage H. 'Overige concurrenten soortgelijke producten'.

10. Welke productiemethode (o.a. additive manufacturing) kunnen gebruikt worden en wat zijn de effecten ervan op het ontwerp?

Op het moment zijn er niet veel andere productiemethodes voor straatstenen dan degene die genoemd zijn bij deelvraag 4 'Hoe worden de traditionele straatstenen geproduceerd'.

3D printen

Wel zijn er momenteel testen en onderzoeken naar beton 3D-printers wat mogelijk een productiemethode wordt voor straatstenen in de toekomst. Volgens Behrokh Khoshnevis³⁵ zou het gebruik van deze techniek de rechte lijnige roosters in de meeste bouwwerken verbeteren voor sterke, esthetische bogen, koepels, en andere complexe vormen.

Met deze techniek kunnen goedkoop huizen op maat worden ontworpen met een niveau van kwaliteit dat tot nu toe onbereikbaar was. Verder is deze techniek van huis bouwen veiliger waardoor bedrijfsongevallen tijdens de bouw verminderen. De impact op het milieu zal ook aanzienlijke lager zijn door de energiebesparing voor de bouw en het reduceren van afvalproducten tot bijna nul.



Ook Emerging Objects³⁶ is bezig met het printen van beton. Zij maakt gebruik van vezel versterkt polymeerbeton, waarmee zij een stijve betonnen ondergrond creëren, die vervolgens kan worden gezandstraald om het geheel van een textuur (van glossy tot satijn) te voorzien. Zij zeggen met behulp van 3D printen goedkoper, sterker en milieuvriendelijker te kunnen produceren dan die vervaardigd worden met behulp van standaard bouwmaterialen en technieken.

Afbeelding 11: Emerging Objects 3D geprint met polymeerbeton³⁷

In Nederland neemt de interesse van bouwen met 3D beton ook toe. TU Eindhoven is begonnen met het werken met een 3D betonprinter, waarbij het mogelijk is objecten te printen met een afmeting tot elf meter lang, vijf meter breed en vier meter hoog. De universiteit hoopt met de bouw hun kennis in de loop van een aantal jaren te ontwikkelen tot baanbrekende en eenvoudig te recyclen concrete producten.³⁸

³⁵ (Destefani, J., 2013)

³⁶ (Plafke, J., 2013)

³⁷ (Emerging Objects, 2016)

³⁸ (Boruslawski, P., 2016)

Op locatie produceren

In 2016 is het bedrijf TotalKustom³⁹ gestart met het verkopen van beton 3D printers, die op locatie betonnen huizen kunnen printen.

Aan de Baylor University of Texas heeft de werktuigbouwkunde student Alex Le Roux⁴⁰ een 3D betonprinter ontworpen om snel te worden gemonteerd en gedemonteerd, wat het vervoeren van de machine naar een constructie bouwplaats vereenvoudigd. Alle elektronische componenten zijn afgeschermd en waterdicht, zodat het bestand is tegen de omgevingsfactoren van een constructie bouwplaats.

Conclusie

De beton 3D print industrie is vooral gericht op het printen van grootte objecten zoals muren, omdat beton het meest toegepast wordt in gebouwen. Deze technologieën zijn nog in ontwikkeling, waarbij nog onduidelijk is wanneer deze in de praktijk toegepast kunnen worden. Wel zijn enkele 3D betonprinters de stap naar verkoop aan het zetten wat een indicatie geeft van de status van deze technologie. In dit onderzoek moet uitgezocht worden of 3D betonprinters ook ingezet kunnen worden voor het printen van straatstenen.

11. Welke extra functies kan de straatsteen eventueel uitvoeren naast zijn hoofdfunctie?

Bij deze deelvraag is gekeken of de straatsteen extra functies kan uitvoeren, waarmee de milieubelasting kan worden verlaagd en daardoor de straatsteen duurzamer wordt. De extra functies zijn hieronder opgesomd en worden uitgelegd in bijlage I 'Mogelijke extra functies straatstenen'.

1. CO₂ opnemend⁴¹: door gebruik te maken van fotosynthese in straatstenen kan CO₂ opgenomen worden uit de lucht;
2. Zelfhelend⁴²: het toepassen van een zelfhelend materiaal, dat zichzelf kan repareren nadat het beschadigd is geraakt, kan de levensduur van beton aanzienlijk verlengen;
3. Reflecterend⁴³: door deze extra functionaliteit toe te voegen aan de straatsteen is minder licht nodig, wat resulteert in verlaging van het vermogen van de lichtbron.

Conclusie

Dit onderzoek richt zich op de onderlaag van de straatsteen, terwijl de oplossingen voornamelijk betrekking hebben op de toplaag. Deze oplossingen kunnen in de toekomst toegevoegd worden aan de straatsteen, waardoor de straatsteen nog duurzamer wordt.

12. Bij welke lokale bedrijven zijn er beschikbare grondstoffen die gebruikt kunnen worden?

In Zeeland zijn verschillende afvalverzamelaars actief, de belangrijkste zijn:

- Milieustraat: inzameling en verwerking van huishoudelijk afval;
- Indaver Nederland B.V.: inzameling van niet gevaarlijk afval, zoals gft-afval, groot groenafval, huishoudelijk afval, kunststoffen en papier en karton;
- SUEZ Recycling Services: specialist op het gebied van het inzamelen, transporteren en verwerken van regulier (bedrijfs)afval;
- Van Gansewinkel: inzamelen bouw- en sloopafval (BSA), puin, papier en karton, glas, hout, grofvuil, gevaarlijk en chemisch afval en restafval;
- Den Ouden Groenrecycling: inzamelen groenafval in ten behoeve van groenrecycling;
- Martens Cleaning: inzamelen en verwerken van maritieme afvalstoffen.

De activiteiten van de Zeeuwse afvalverzamelaars en hun contactgegevens zijn te vinden in bijlage J. 'Zeeuwse afvalverzamelaars'.

³⁹ (Rudenko, A., 2016)

⁴⁰ (Grunewald, S., 2015)

⁴¹ (Gocha, A., 2016)

⁴² (Cardiff University, 2015)

⁴³ (Bleijko, 2015)

Daarnaast is er nog restafval dat uit kostenoverweging niet ingezameld wordt, maar op de locatie achter blijft. Dit restafval zou verzameld en afgevoerd kunnen worden wanneer het verwerking in wegbedekking kostendekkend is. Hierbij valt te denken aan:

- Bermgras: het meeste bermgras komt voor bij de instanties die de Zeeuwse wegen buiten de bebouwde kom beheren. Deze wegen zijn voornamelijk in beheer bij *waterschappen*, de *provincie Zeeland* en *Rijkswaterstaat*. Het waterschap beheert bijna vierduizend kilometer aan wegen in Zeeland. Om reden van kostenbesparing hebben de waterschappen besloten om het bermgras te klepelen in plaats van te maaien, waardoor het gras in bermen tot moes wordt geslagen en op de berm achterblijft. Ook bij de provincie Zeeland als bij Rijkswaterstaat is het maaibeheer in 2015 'versoerd' door het bermgras te gaan verklepelen en slechts één keer per jaar te maaien en af te voeren;
- Houtige stromen: top- en takhout van bomen langs wegen, dijken en watergangen wordt veelal versnipperd en wordt ter plaatse achtergelaten. Dit gaat om circa 400 ton per jaar⁴⁴. Ook knip- en snoeihout van de *gemeenten* wordt voor een belangrijk deel ter plaatse versnipperd en achtergelaten;
- Wilde Japanse oesters: op sommige plekken in de Oosterschelde, het Veerse Meer en het Grevelingenmeer groeien nu zoveel oesters dat ze andere schelpdieren verdringen en een veel last veroorzaken mede door het oesterherpesvirus.



Afbeelding 12: Overzichtskaart van oester- en mosselpercelen⁴⁵

Omdat er nog geen goede oplossing is gevonden om het opvissen en verwerken van de oesterschelpen kostendekkend te maken, zijn met name de *mosselkwekers* geïnteresseerd in een oplossing.

⁴⁴ (Veld, J.A. in 't, 2010)

⁴⁵ (Provincie Zeeland, 2007)

4.1.2 Programma van Eisen en Wensen (PvE)

Het Programma van Eisen en Wensen bevat de randvoorwaarden en limieten die gesteld worden aan het project. De eisen zijn de criteria waaraan voldaan moet worden, de wensen zijn de criteria waaraan de verwachting is dat er zo veel mogelijk aan voldaan wordt.

Eis/Wens nr.	Gestelde Eis/Wens	Eis/Wens
MARKT		
101	De wegbedekking moet bestaan uit een geoptimaliseerde versie gebaseerd op de bestaande betonstraatsteen.	Eis
102	De wegbedekking is goedkoper dan de huidige oplossing.	Wens
MILIEU		
201	Er moet een plan zijn waarin is vastgelegd wat er gebeurt met de wegbedekking nadat de levensduur van het product verstreken is.	Eis
202	Het ontwerp moet minstens 10% minder milieu-impact (mPt) hebben dan traditionele straatstenen.	Eis
203	Grondstoffen worden ingewonnen binnen een straal van 60 km van Sweco Middelburg.	Wens
204	In de productie moet gebruik gemaakt worden van afvalstoffen.	Wens
205	Het product moet 100% recyclebaar zijn. De materialen zijn geheel af te breken door de natuur of kunnen weer opnieuw gebruikt worden voor de wegbedekking.	Wens
206	Gebruik maken van de wegbedekking maakt minder geluid dan traditionele straatsteen.	Wens
TECHNIEK		
301	De sterkte van de wegbedekking moet een kracht van 3,6 N/m ² aankunnen.	Eis
302	De wegbedekking moet minstens 20 jaar meegaan.	Eis
303	Normaal gebruik mag geen krassen of andere beschadigingen aanbrengen op het wegoppervlak (met uitzondering van slijtage).	Eis
304	De splijtsterkte mag niet lager zijn dan 2,9 MPa.	Eis
305	De wegbedekking is weersbestendig. (Milieuklassen: XC4: wisselend nat en droog, XD3 wisselend nat en droog, XS1 zouthoudende lucht en XF4 verzadigd met water, met dooizouten of zeewater).	Eis
306	De wegbedekking is vorstdooizoutbestendig.	Eis
307	Er moeten stenen van verschillende verhoudingen kunnen worden geproduceerd die voldoen aan de Nederlandse verhoudingen (bijvoorbeeld een waalformaat 4:1, een dikformaat 3:1 en een keiformaat 2:1).	Eis
308	De begaanbaarheid mag niet verslechteren tegenover de traditioneel straatsteen.	Eis
309	De wegbedekking moet zo dicht mogelijk bij de locatie, waar de bestrating gelegd wordt, geproduceerd worden.	Wens
310	Voor De Hoop kunnen hun bestaande productiemiddelen zoveel mogelijk (her)gebruikt worden.	Wens

Tabel 2: Programma van eisen en wensen

4.2 Resultaten ideefase

De ideefase is gestart met het specifiek maken van de zoekvelden op basis waarvan verder onderzoek is gedaan. Omdat er geen mogelijkheden waren voor het creëren van een grootte kwantiteit aan ideeën door middel van creativiteitstechnieken, conform de gekozen methodiek, is de aanpak meer gericht op de kwaliteit van de zoekveld informatie te verbeteren door geconvergeerde desk- en fieldresearch. Dit leidde tot vier integrale ideeën waaruit een keuze gemaakt is om uit te werken in de conceptfase.

Doelstellingen ideefase

1. Ideeën genereren op basis van zoekvelden;
2. Ideeën genereren op basis van verbeteringen vanuit huidige concurrenten;
3. Ideeën genereren op basis van geschikte materialen;
4. Integrale ideeën creëren voor Sweco op basis van gegeneerde ideeën.

4.2.1 Zoekvelden ideefase

Naar aanleiding van het beantwoorden van de deelvragen in de analysefase zijn verschillende zoekvelden opgesteld. In de ideefase gaan ideeën gegenereerd worden aan de hand van deze zoekvelden.

Gekozen is om alleen verder te gaan met betonstraatstenen. Asphalt is geen goede vervanging voor de traditionele straatsteen, omdat nutsbedrijven bezwaren hebben tegen de hogere onderhoudskosten als gevolg van het openbreken van asphalt in verband met kabel- en leidingwerken en boven een gasleiding in principe geen asphalt met een gasdichte structuur mag liggen. De belangrijkste redenen om verder te gaan met betonstraatstenen, in plaats van gebakken straatstenen, is dat hiervoor gekozen is vanuit Sweco en De Hoop. Deze worden namelijk veel gebruikt in projecten van Sweco en oplossingen voor betonstraatstenen kunnen eventueel ook toegepast worden bij andere betonproducten.

Alternatieven voor het optimaliseren van een straatsteen

1. Geopolymeren/polymeerbeton;
2. 3D betonprinten;
3. Hennepbeton en andere op plant gebaseerde oplossingen;
4. Lokale grondstoffen/afvalstoffen zoals bijvoorbeeld:
 - a. Schelpen/mosselen/oesters;
 - b. Bermgras;
 - c. Sigarettenpeuken;
 - d. Mest.

4.2.2 Integraal idee geopolymere

Veel alkaligeactiveerde cementen zijn momenteel gebaseerd op het gebruik van vliegashoofdbestanddeel. Dit betekent dat ze de CO₂-uitstoot van de productie van het materiaal niet hoeven mee te rekenen. Er hoeft aan de vliegashoofdbestanddeel alleen maar een alkali-activator te worden toegevoegd om een gebonden reactieproduct te vormen. De voornaamste taken van deze alkali-activatoren zijn pH-verhoging van de vliegashoofdbestanddeel om het in kleine ketens af te breken, die vervolgens bijdragen aan de opbouw van een netwerkstructuur van afzonderlijke ketens. Door het nadrukkelijke accent op die ketens van silicium en aluminium (Al-silicaten) wordt hier ook wel gesproken over geopolymere. V.d. Bosch Beton maakt gebruik van geopolymere, voor maken van Reduton cementloos beton. Dit is meestal gebaseerd op aluminium en silicium, mineralen die van nature veel beschikbaar zijn. Door het geopolymer te mengen met basische materialen (alkaliën) en de toevoeging van een activator ontstaat de polymerisatie. Met Reduton kan een CO₂-reductie van ca. 80% gerealiseerd worden. Het kan gebruik maken van bestaande productiemiddelen van traditioneel beton.

Het Cement&BetonCentrum (C&BC) is enthousiast over technologische ontwikkelingen die kunnen bijdragen aan de vermindering van de milieu-impact van betontoepassingen⁴⁶. Beton van geopolymeren zou voor bepaalde toepassingen een milieuvriendelijker alternatief kunnen zijn voor traditioneel beton. Het C&BC is van mening dat eerst onderstaande belemmeringen moeten zijn opgelost voordat geopolymeerbeton grootschalig wordt toegepast:

1. Materiaal schaarste: grootschalige toepassing van geopolymeerbeton zal resulteren in schaarste van de bekende grondstoffen als gemalen hoogovenslak en poederkoolvlieggas, wat er voor zorgt dat deze materialen minder toegepast worden in traditioneel beton (welke materialen nu al wel volledig worden ingezet). Door het CO₂-profiel van de activatoren zal het netto resultaat van de introductie van geopolymeerbeton dan negatief worden.
2. Betonkwaliteit: er is nog onzekerheid over de constructieve eigenschappen van geopolymeerbeton en de ontwikkeling daarvan. Ook over de bescherming tegen corrosie in gecarbonateerd geopolymeerbeton is nog te weinig onderzoek gedaan;
3. Arbeidsomstandigheden: de pH van de activatoren en van de geopolymeerbetonspecie is zodanig hoog dat dit gevaarlijk is voor zowel mens als milieu. Zonder de juiste voorzieningen kunnen snel brandwonden ontstaan;
4. Circulariteit: het recyclen van geopolymeerbeton tot geopolymeerbetongranulaat is problematisch. Geopolymeerbeton kan aan het einde van de levensduur alleen worden toegepast als fundatiemateriaal of als betongranulaat in nieuw geopolymeerbeton. Dit moet worden gewaarborgd om gevaarlijke situaties te voorkomen.

Conclusie

Het gebruik van geopolymeren ter vervanging van cement is een goede oplossing, als het niet beperkt werd door de lage beschikbaarheid van hoogovenslakken en vlieggas. Wel kan dit in kleine hoeveelheden toegevoegd worden aan beton, maar dat wordt op dit moment al toegepast.

4.2.3 Integraal idee lignine

Vezel versterkt beton

Versterking van beton met natuurlijke vezels kan zorgen voor een milieuvriendelijker en goedkoper bouw materiaal. Onderzoeken zijn gedaan naar beton versterkt met vezels van hennep, tarwestro, en olifantsgras⁴⁷. Hieruit zijn verschillende conclusies te halen waarvan de belangrijkste hieronder zijn samengevat.

Hennepvezels als versterking van beton zorgen voor een verbetering van de breuksterkte tot 70% ten opzichte van traditioneel beton. Het wordt verondersteld dat dit komt door de hoge treksterkte en fijnheid van de vezels. Tarwestro en olifantsgras vezels verbeteren de breuksterkte 2% tot 5%. Dit omdat deze materialen minder hoge treksterkte hebben dan hennepvezels en de vezels ruwer zijn. Uit onderzoek bleek dat de breukenergie van het vezel versterkt beton lager is in vergelijking met traditioneel beton, namelijk voor vezels van hennep, stro en olifantsgras respectievelijk 4%, 7% en 8% lager, maar blijft hierbij binnen de gestelde eisen.

Veel factoren hebben invloed op de eigenschappen van beton versterkt met natuurlijke vezels. Zo wordt het beïnvloed door: vezel soort, vezel geometrie, vezel vorm, oppervlakte, mengsel eigenschappen, de mengmethode, methode van uitharden, enzovoorts. Veel studies gebruiken slechts een paar van deze parameters. De meest gebruikte bij onderzoeken zijn vezel inhoud, vezel lengte en vezel type. De Deacon University in Burwood, Australië heeft onderzoek gedaan naar hennepvezel versterkt beton rekening houden met meer van deze invloedfactoren⁴⁸. De volgende conclusies zijn getrokken uit deze studie:

1. De toevoeging van hennepvezel in het betonmengsel resulteert in een lineaire vermindering van verhouding tussen de zwaartekracht en de wateropname;
2. Verschillende mengmethoden beïnvloeden de mechanische en fysieke prestaties van het beton;

⁴⁶ (Cement&BetonCentrum, 2016)

⁴⁷ (Tschegg, E.K., 2012)

⁴⁸ (Zhijian, L., Xunga, i W. & Lijing, W., 2005)

3. De druksterkte van het beton is zwakker in vergelijking met traditioneel beton ongeacht de gebruikte mengmethode;
4. Het vezelpercentage is de belangrijkste factor die van invloed is op de sterkte van de betonstenen.

Er zijn meerdere soorten plantaardige vezels die gebruikt kunnen worden bij het versterken van beton, bijvoorbeeld: hennep, tarwe, stro, olifantsgras, kokos, jute, bamboe en andere grassoorten. Volgens de Universiti Teknologi Mara in Maleisië is een plantaardig materiaal met een hoog gehalte aan lignine het meest geschikt⁴⁹. Zo hebben zij gebruik gemaakt van palmboomvezels, die geschikt werden bevonden voor gebruik in beton, omdat deze 23% lignine bevatte. Zij zijn van mening dat een vezel met een hoog percentage lignine zijn kracht beter behoudt.

Sigarettenstenen⁵⁰

Het eerder genoemde onderzoek van Dr Abbas Mohajerani toonde aan dat sigarettenpeuken heel geschikt zijn om in bakstenen te worden verwerkt. Bakstenen met 2,5% sigarettenpeuken hadden geen grote reducties in hun druksterkte en behaalden een aanvaardbare druksterkte van 10 MPa.

Een sigaret wordt gemaakt van tabak, maar op basis van tabak kan ook lignine geproduceerd worden. Het kan dus zijn dat tabak vergelijkbaar is met andere plantaardige vezels, wat betekent dat met andere plantaardige vezels eventueel ook dezelfde positieve resultaten kunnen worden behaald.

Conclusie

Lignine kan op meerdere manieren toegepast worden in beton. Vezel versterkt beton wordt verder onderzocht om te kijken of dit positieve resultaten oplevert. Hiervoor betekent hoe hoger het percentage lignine in de vezels, des te beter het verwachte resultaat. Lokaal zijn voldoende plantaardige vezels beschikbaar die als restafval achter blijven. Het toepassen van sigarettenstenen zal niet verder onderzocht worden, omdat hiervan niet voldoende beschikbaar is om het te integreren in het productie proces.

4.2.4 Integraal idee mosselen/oester

In een onderzoek uitgevoerd door de University of Florida⁵¹, werden gerecyclede oesterschelpen gebruikt als aggregaat bij productie van een betontegel. De oesters kwamen van lokale restaurants die zo'n 10.000 oesterschelpen per week weggooiden. De testresultaten toonden aan dat na drogen een betonnen tegel met oester aggregaat een vergelijkbare kleur, textuur en sterkte had als die van een traditionele betontegel. Een Koreaanse universitaire studie onderzocht hetzelfde maar dan met betonmortel. Deze vonden geen significante vermindering van de druksterkte van de betonmortel die kleine oesterschelpen deeltjes gebruikte in plaats van zand. Oesterschelpen zijn niet biologisch afbreekbaar en vervuilen het land en het water als ze worden weggegooid. Het gebruik van oesterschelpen als grondstof voor betonproducten zou een effectieve oplossing kunnen zijn om het probleem van de verwijdering van oesterschelpen op te lossen.

Japanse oesters

In de Oosterschelde ligt naar schatting 209 miljoen verwilderde Japanse oesters, welke veel overlast veroorzaken doordat deze oesters de larven van de kokkels en mosselen opeten⁵². Daarnaast wordt ook last ondervonden van zowel het oesterherpesvirus als de Japanse oesterboorder. Dit leidt in de Oosterschelde tot grote sterfte onder, met name jonge, oesters die op sommige percelen kan oplopen tot 90%⁵³. Ook de toeristische sector heeft overlast van de Japanse oester doordat de schelpen massaal te vinden zijn in de Oosterschelde, het Veerse Meer en het Grevelingenmeer, waardoor watersporters en andere recreanten zich regelmatig aan de scherpe oesterschelpen verwonden. Diverse pogingen zijn gedaan om deze overlast te bestrijden. Het opvissen is mogelijk, maar kost erg veel tijd en geld. Het is vechten tegen de bierkaai, want na drie tot zes jaar heeft de wilde oester zich weer hersteld. De provincie Zeeland en de rijksoverheid gaan zelf geen poging meer doen om de

⁴⁹ (Ahmad, Z., Saman, H.M. & Tahir, P.M., 2010)

⁵⁰ (Mohajerani, A., Kadir, A. & Larobina, L., 2016)

⁵¹ (Materia, 2013)

⁵² (Provinciale Zeeuwse Courant, 2010)

⁵³ (Provincie Zeeland, 2016)

overlast te bestrijden. Zij hebben de belanghebbende partijen (mosselkwekers, toeristische sector, gemeenten en het waterschap) toestemming gegeven om onder bepaalde voorwaarden de wilde oesters op te vissen en ze bijvoorbeeld te vermalen tot kippengrit om op het land te verwerken.

Conclusie

Mossel- en oesterschelpen zijn lokale grond-/afvalstoffen die voldoende beschikbaar zijn en toegepast kunnen worden door een percentage van de granulaten hiermee te vervangen bij de productie van betonstraatstenen. Onderzocht moet worden wat exact de invloed hiervan is op het proces. Als de verwilderde Japanse oesters uit economisch oogpunt moeten worden verwijderd uit de lokale wateren, dan zou dit een oplossing kunnen zijn voor het afvalprobleem.

4.2.5 Integraal idee 3D printen

Er zijn verschillende bedrijven bezig met het 3D printen van beton en onderzoeken hiervan. Kenmerkend voor 3D printen is het aanbrengen van materiaal zonder bekisting en direct geproduceerd op de positie waar het nodig is. Vanwege het printen op positie zie je bij huidige 3D printers, die gebruik maken van plastic, dat objecten niet massief geprint worden maar met een infill. Een infill is een patroon zoals bijvoorbeeld van honingraten (hexagonen) die geoptimaliseerd worden voor een goede verhouding tussen kracht en materiaal. Dit geeft de mogelijkheid om de onderlaag van een straatsteen te 3D printen in plaats van massief op te vullen, waardoor beton bespaard kan worden. Hiervoor zouden in het productieproces 3D printers toegevoegd moeten worden voordat de bovenste en onderste laag van een straatsteen worden samengevoegd.

Bij het bedrijf CyBe Construction⁵⁴, een Nederlands bedrijf dat beton 3D print, zijn al positieve resultaten behaald met het printen van beton. De 3D printer van CyBe, in combinatie met speciale betonmix, print met een snelheid van 200 mm per seconde betonconstructies tot 2,5 meter hoog, die na 1 uur belast mogen worden. Dit biedt, naast een verbetering op ecologisch gebied, economisch kansen doordat in de weg- en waterbouw doorlooptijden en kosten gereduceerd kunnen worden. Ook andere beton 3D printers richten zich vooral op het printen van grotere voorwerpen (zoals gebouwen) en op vormvrijheid. Omdat straatstenen relatief kleine objecten zijn en de vormvrijheid vanuit de opdrachtgevers beperkt is, kunnen de 3D printers verder geoptimaliseerd worden voor produceren van straatstenen waardoor ze sneller en nauwkeuriger zijn dan andere 3D betonprinters.

Onderzocht moet worden wat de beste manier van infill is bij het 3D printen van straatstenen met een aanvaardbare druksterkte. Dit soort onderzoeken kunnen gedaan worden door te kijken naar 3D printers die als filament gebruik maken van plastic.

Het soort beton dat geprint gaat worden kan ook duurzamer gedaan worden, zo is project NEXT⁵⁵ in Eindhoven bezig met het ontwikkelen van een biobeton 3D printer.

Conclusie

Vanuit de bouwwereld is er veel interesse in het 3D printen van beton. De ontwikkelingen met deze innovatieve techniek gaan razendsnel. In de afgelopen jaren is er op het vlak van de printsnelheid van 3D betonprinters al veel verbetering geboekt, waardoor het niet lang meer zal duren dat de snelheid toereikend is om lokaal straatstenen voor een compleet wegdek te printen. Verder onderzoek is nodig om te bepalen hoe de betonstraatsteen het best geprint kan worden en hoeveel mobiele 3D printers er nodig voor toepassing in het productieproces.

4.2.6 Keuze Conceptfase

In de conceptfase worden de integrale ideeën 'Lignine', 'Mosselen/Oester' en '3D printen' verder uitgewerkt. Daarnaast wordt in de conceptfase geëxperimenteerd met proefstenen van deze materialen. Het integrale idee 'Geopolymere' wordt niet meegenomen, omdat dit al gebruikt wordt door enkele bedrijven, dit minder aantrekkelijk is voor betonproducten zoals De Hoop en de genoemde problemen eerst opgelost moeten worden voordat dit idee een goede basis vormt om verder te onderzoeken.

⁵⁴ (CyBe Constructruction, 2016)

⁵⁵ (Kley, M. van der., 2016)

4.3 Resultaten conceptfase

In de conceptfase worden concepten aantoonbaar haalbaar gemaakt in technische zin. Technisch haalbaar wil zeggen dat het alle functies goed kan vervullen, goed gemaakt kan worden en voldoet aan de technische eisen uit het programma van eisen en wensen. Dit moet aangetoond worden met bewijzen zoals modellen en berekeningen.

Doelstellingen Conceptfase

1. Inzicht krijgen in de verbeteringsmogelijkheden bij de integrale ideeën ten aanzien van het resultaat en conclusie uit programma van eisen en wensen;
2. Integrale ideeën verder uitwerken tot haalbare ideeën (concepten);
3. De haalbaarheid aantonen door middel van modellen en berekeningen;
4. Optimaliseren ontwerp op basis van resultaten uit modellen en berekeningen.

4.3.1 Levenscyclus analyses concepten

Op basis van de levenscyclus analyse, uitgevoerd bij deelvraag 6 'Wat is de milieu-impact van de traditionele straatstenen', kan een inschatting gemaakt worden over de milieu-impact van de concepten. De OVAM-ecolizer houdt geen rekening met een negatieve milieu-impact zoals het gebruiken van afvalstoffen of het produceren van CO₂ opnemende planten als grondstof. Dit is wel meegenomen in de conclusies maar zal niet berekend worden.

Concept lignine

Door het toevoegen van natuurlijke vezels met een hoge concentratie lignine zal er minder van de huidige materialen nodig zijn. Bij het onderzoek van de sigaretstraatstenen⁵⁶ werd 1% sigarettenpeuken, welke lignine bevatten, toegevoegd aan klei straatstenen wat resulteerde in even sterke straatstenen waarbij 58% minder energie werd gebruikt voor het produceren. Bij betonstraatstenen wordt bij de productie geen warmte gebruikt, dus heeft dit geen impact op de energie hiervan.

De grootste milieu-impact bij betonstraatstenen vindt plaats bij het winnen van de grondstoffen. Door 1% hiervan te vervangen door natuurlijke vezels, neemt de milieu-impact van het grondstofwinnen ook met 1% af. Dit is een verlaging van ongeveer 90 mPt per ton vergeleken met traditioneel beton. Ook de milieu-impact van het transport zal bijna 1% afnemen, doordat de natuurlijke vezels per vrachtwagen getransporteerd worden vanaf een lokale plaats, in plaats van grondstoffen te transporteren per schip (de grootste cementgroeve bevindt zich in Maastricht, ongeveer 160 km van Bleijko in Walsoorden). Dit komt neer op een besparing van 800 mPt per ton.

Bij dit concept moeten de natuurlijke vezels een afvalproduct zijn of verbouwd worden voor deze functie. Als het niet voldoet aan deze eisen zal de milieu-impact van het concept toenemen. Als het een afvalproduct is, dan is de milieu-impact voor het winnen van grondstoffen negatief wat in mindering gebracht mag worden op de totale milieu-impact. Wel moet de milieu-impact van het transport meegerekend worden. Als planten met natuurlijke vezels worden verbouwd voor het product, dan is er wel milieu-impact bij het winnen van de grondstof, maar er ontstaat wel een negatieve milieu-impact tijdens de levenscyclus van de plant die CO₂ omzet.

Concept mossel- en oesterschelpen

De schelpen van mosselen en oesters, wat overblijft als restafval, kan gebruikt worden om het grind en eventueel het zand in beton te vervangen. De milieu-impact van de productie van beton op basis van grind (0,6 mPt per kilo) en zand (0,3 mPt per kilo) zal niet veel verschillen van de productie met gemalen mossel-/oesterschelpen. Maar omdat dat een restafval is heeft het winnen van dit materiaal ook een negatieve milieu-impact. Het is lokale winning waarbij de afstand van de Oosterschelde naar Bleijko per binnenvaartschip circa 30 km bedraagt, waardoor het transport afneemt met ongeveer 100 km, wat een besparing is van 500 mPt per ton. Dit geldt voor zowel mossel-/oesterschelpen die aangeleverd worden bij bv. de milieustraten als het opvissen van de wilde Japanse oesters.

⁵⁶ (Mohajerani, A., Kadir, A. & Larobina, L., 2016)

Het composteren van deze schelpen is niet mogelijk en daarom worden deze meestal met het huisafval verbrand.

Concept 3D printen

Door het gebruik van 3D betonprinten hoeft een straatsteen niet massief te zijn, maar kan de constructie aan de binnenkant geoptimaliseerd worden waardoor materiaal bespaard wordt. Deze besparing geldt over de gehele milieu-impact van de straatsteen, er zal namelijk bespaard worden op winning, productie en transport omdat er minder materiaal nodig is. Bedrijven die gebruik maken van 3D printen zeggen dat de productie hiervan goedkoper en sneller is en dit wordt bevestigd door bedrijven die 3D betonprinten. Omdat 3D betonprinters nu nog gericht zijn op grotere objecten durf ik geen uitspraak te doen dat het printen van straatstenen sneller zal zijn dan de huidige machine. Op basis van informatie met betrekking de snelheid van 3D printers, ontvangen van Cybe Construction, zijn er vermoedelijk tussen de 20 en 25 3D betonprinters te gelijk nodig om net zo snel te kunnen produceren als de traditionele machines.

De huidige 3D betonprinters richten zich voornamelijk op het op maat printen van objecten op locatie. Dit zou in de toekomst eventueel ook kunnen voor straatstenen, maar de eerste stap zou zijn om met 3D printers straatstenen in de fabriek te produceren. Het op locatie printen van op maatgemaakte projecten zou wel resulteren in een lagere milieu-impact, omdat bij het op maat produceren onder andere minder materiaal wordt gebruikt, en de constructie zou verder kunnen worden geoptimaliseerd.

4.3.2 Materiaal besparen 3D printen

Voor het maximaal besparen van materiaal zijn enkele factoren belangrijk: sterkte van de straatsteen en nauwkeurigheid van de machine. De geprinte straatsteen moet voldoen aan de sterkte vermeld in het programma van eisen en wensen. Afhankelijk of aan deze eis voldaan wordt of niet kan meer of minder materiaal bespaard worden. De nauwkeurigheid van de machine wordt bepaald door de laagdikte die de machine print: hoe dikker de lagen hoe minder de constructie geoptimaliseerd kan worden, des te minder materiaal bespaard kan worden. De vergelijking van de materiaalbesparing bij de verschillende laagdiktes per type straatsteen is opgenomen in bijlage K 'Berekening materiaalbesparing holle straatsteen'. Een straatsteen zal niet compleet hol geprint worden, omdat dit niet ten goede komt aan de sterkte van de steen. De sterkte van de steen is afhankelijk van de constructie. Het doel is om een constructie te creëren die vormvast is, dus erg stevig is en niet veel van vorm verandert bij belasting. Een constructie wordt extra vormvast door bogen of driepuntsverbindingen in de constructie te gebruiken. Hoe nauwkeuriger de printer des te beter kan de constructie geoptimaliseerd worden. Deze interne constructie bij 3D printen wordt ook wel de 'infill' genoemd.

Infill^{57,58}

Bij 3D printen worden objecten meestal niet massief geprint maar gevuld met een infill. Een infill is een raster van vierkanten of hexagonalen, tweedimensionale doorsneden, op elkaar gestapeld. Er zijn verschillende infill patronen, slechts drie ervan zijn praktisch toepasbaar: Rectilinear, Concentric en Honeycomb infill, welke zijn toegelicht in bijlage L. 'Onderbouwing infill patronen'.

De infill ontwerpen zijn allemaal 'Z-as onafhankelijke structuren'. Voor de infill vul je een percentage in, bij kunststof 3D printen is dit meestal tussen de 60 en 70%. Bij kunststof 3D printers bestaat ook de mogelijkheid om een 3D infill patroon te gebruiken zoals een dubbele Honeycomb.

De steen kan vanuit drie verschillende oriëntaties geprint worden (X-as, Y-as en Z-as) wat invloed heeft op de sterkte. Als alleen in 2D lagen geprint kan worden, dan moet de beste print oriëntatie worden onderzocht.

Simulaties infill patronen

Met behulp van SolidWorks zijn voor het bepalen van de invloeden van de druksterkte op de straatstenen simulaties gemaakt van verschillende infill patronen. De resultaten van de simulaties zijn te vinden in bijlage M. 'Resultaten simulaties infill patronen'. De SolidWorks simulaties laten zien dat

⁵⁷ (Graham, M., 2015)

⁵⁸ (Matses, J., 2016)

hoe dunner de wanden hoe zwakker het geheel is (weergegeven met een fijne infill) en hoe groter de openingen van de infill des te zwakker die plaats is (weergegeven met een grove infill). Hieruit kan geconcludeerd worden dat dikke wanden gewenst zijn met zo'n klein mogelijke opening.

De huidige 3D printers beschikken over software om de juiste verdeling van de infill te creëren waardoor de openingen geoptimaliseerd worden. De wanddikte is afhankelijk van het infill percentage dat ingevoerd wordt, voor de beste optimalisatie moet dit getest worden met de in te zetten 3D printer.

Onderzoek infill modellen

Met behulp van een drukbank zijn praktijk onderzoeken gedaan naar de sterkte van infill patronen.

De resultaten hiervan zijn te vinden in bijlage N. 'Resultaten onderzoek infill modellen'.

Uit het onderzoek van de infill modellen kan geconcludeerd worden dat de richting waarover geprint wordt de richting is wat de meeste kracht kan hebben. Bij het printen in de Z-richting blijft de druksterkte in die richting gelijk ongeacht het 2D infill patroon. De 3D Honeycomb is zwakker doordat deze zowel vanuit de Z-as als de X-as is geprint. Omdat bij straatstenen de krachten voornamelijk van bovenaf komen en de krachten vanaf de zijkant minder van invloed zijn, vervalt de 3D Honeycomb als infill methode voor straatstenen.

Nader onderzoek moet uitgevoerd worden naar de krachten van de verschillende 2D infill patronen over de X- of Y-as.

4.3.3 Gebruik Lignine^{59,60}

Lignine is een complex natuurlijk biopolymeer, dat normaliter stevigheid verleent aan planten, zoals in hout en stro. Lignine is een netwerk van aaneengeschaalde fenolzuren die in een celwand verbonden zijn met cellulose en hemicellulose. Lignine wordt ingedeeld, op basis van hun samenstelling, in drie verschillende types:

1. Hardhout lignine (verschillende ratio's van coniferyl/sinapyl-alcoholresiduen);
2. Zachthout lignine (vooral coniferyl-groepen en slechts sporen van sinapyl-alcoholgroepen);
3. Monocotyl lignine (gras-type, met significante hoeveelheden p-coumaryl-alcoholgroepen).

De meeste planten bestaan voor 15 tot 25% uit lignine. De opbouw van de lignine is afhankelijk van koper in de enzymen. Wanneer lignine gebrekkig wordt opgebouwd in de celwand zijn de stelen van de plant slap en kunnen zij de zuigkracht van het blad door de verdamping niet weerstaan. Ondanks het belang van lignine in plantenweefsel en vanwege de slechte natuurlijke afbreekbaarheid wordt lignine vaak als afvalstroom of als laagwaardige zijstroom beschouwd in veel pulp- en bioraffinageprocessen. Dit is het geval bijvoorbeeld bij de productie van papier en chemicaliën of bio-ethanol, waarin lignine zelfs 'non-fermentable' wordt genoemd.

Het bedrijf VITO is bezig met het toepassen van bewerkte lignine⁶¹, waarbij de lignine als pure stof uit plantmateriaal wordt gehaald en toegepast als een bio-lijm. Zij ontdekten dat deze bio-lijm goed gebruikt kan worden als structuurverbeteraar in beton, het gebruikt kan worden bij het mengen van polymeren en er mogelijkheden zijn om lignine te ontwikkelen tot een hoge kwaliteit vezel.

⁵⁹ (Wageningen University & Research, 2016)

⁶⁰ (Sar, D.M. van der, 2016)

⁶¹ (VITO, 2016)

4.4 Resultaten materialisatiefase

De materialisatiefase is de laatste fase van het ontwerpproces. In deze fase moet het ontwerp zover uitgedacht worden dat het productierijp is. Dit houdt in dat de informatie van de haalbare concepten wordt uitgewerkt, zodat het gecommuniceerd kan worden met de productiebedrijven.

Doelstellingen materialisatiefase

1. Ontwerpen communiceren met productiebedrijven;
2. Maken schatting kostprijs;
3. Concepten vergelijken met traditionele straatstenen;
4. Ontwerp vastleggen door middel van een technisch tekenpakket.

4.4.1 Veranderingen in productie straatstenen

Door het realiseren van de verschillende concepten zal een deel van het productieproces van straatstenen wijzigen. Hieronder wordt per concept de impact op de kosten en milieubelasting beschreven.

Lignine

Op veel plaatsen in Zeeland zijn natuurlijke vezels aanwezig, die na het oogsten van het product of maaien ten gevolge van onderhoud als restafval achterblijven op locatie. Daarnaast zijn bij groeninzamelpunten, zoals de locatie Den Ouden Groenrecycling te Rilland, grondstoffen aanwezig die gebruikt kunnen worden. De grondstoffen worden getransporteerd naar de fabriek waar het onbewerkt vermengt wordt met het cementmengsel.

Voor de opslag van de natuurlijke vezels zijn nu nog geen voorzieningen beschikbaar, waarvoor eventuele investeringen nodig zijn. Ook zal de toevoer naar de mengmachine moeten worden uitgebreid, doordat de vezels aan het cement moeten worden toegevoegd. Ook dit brengt extra investeringskosten met zich mee.

Mossel- en oesterschelpen

De mossel- en oesterschelpen kunnen op drie manieren worden gewonnen, namelijk door:

1. het inzamelen van de resten van geconsumeerde mosselen/oesters via restaurants en milieustraten. Bij deze methode is het verkrijgen van voldoende materiaal het moeilijkst. De milieustraten moeten hiervoor een nieuwe lijn opzetten om de mossel- en oesterschelpen gescheiden aan te bieden. Eventueel kan er voor gekozen worden om de schelpen op te halen bij de restaurants.
2. het opvissen van de verwilderde Japanse oesters. Deze methode staat gegarandeerd voor het meeste materiaal, maar is nog erg duur. Hiervoor zal meer vraag moeten zijn naar dit soort oplossingen om dit effectief toe te kunnen passen.
3. het inzamelen van de afvalstoffen die achterblijven na het opvissen van de verwilderde Japanse oester. Deze methode is zeer afhankelijk van wat er met de verwilderde Japanse oesters gebeurt, maar bij recreatieve gebieden moeten ze gegarandeerd verwijderd worden in de toekomst.

Methode drie is de beste manier, waarbij genoeg materiaal beschikbaar is en de duurzamere straatstenen bijdragen aan het opruimen van een afvalstof.

Nadat de materialen zijn gewonnen moeten de schelpen vermaalt worden om als granulaat te kunnen gebruiken. Hiervoor kan een compleet nieuwe machine nodig zijn om dit materiaal geheel te vermalen. Granulaten worden al opgeslagen op het terrein en de aanvoer hiervan naar de productiefaciliteiten is ook al aanwezig. Als de schelpen (CaCO_3) tijdens de productie in contact komen met water (H_2O) kan een chemische reactie ontstaan, waardoor een deel van de schelpen oplost. Om de hoeveelheid granulaat binnen de straatsteen gelijk te houden, zal dus een kleine hoeveelheid schelpen extra moeten worden toegevoegd.

3D printen

De methode van grondstof winnen blijft gelijk, alleen is minder grondstof nodig en daardoor minder transport. De productielijn zal vermoedelijk uitgebreid moeten worden met maximaal 25 3D betonprinters. Om het zelfde aantal betonstraatstenen per uur te kunnen produceren, zullen meerdere 3D printers moeten worden geïnstalleerd. Deze machines worden nog niet toegepast bij het produceren van straatstenen, wat betekent dat er kosten bijkomen voor het ontwikkelen en implementeren hiervan. Eventueel komen er extra personeelskosten bij voor het bedienen van de 3D printers.

Concept	Beschikbaarheid materiaal	Investeringskosten	Verwachte kostprijs straatsteen ⁽¹⁾	Milieu-impact
Lignine	Goed	Opslag en toevoer naar de mengmachine	Besparing door vervanging 1 tot 5% grondstoffen	Verbeterd op winnen en transport van grondstoffen en gebruik van een afvalstof
Mossel- en Oester-schelpen	Voldoende ⁽²⁾	Machine voor vermalen	Besparing door vervanging 1 tot 10% granulaten	Verbeterd op winnen en transport van granulaten en gebruik van een afvalstof*
3D printen	-	3D betonprinters en ontwikkeling hiervan	Besparingen op grondstoffen 10 tot 25%	Verbeterd op winnen en transport van grondstoffen

Tabel 3: Onderzoek ter overstaande traditionele straatstenen

⁽¹⁾ is vastgesteld aan de hand van informatie afkomstig van Bleijko en TU Eindhoven

⁽²⁾ afhankelijk wat er in de toekomst gebeurt met de wilde Japanse oester

4.4.2 Recyclen

Beton wordt ook nu al gerecycled, het oude beton vermalen zij en wordt dan bijvoorbeeld als fundering van snelwegen gebruikt of er worden granulaten van gemaakt om nieuw beton van te maken. Hierbij is er sprake van downcyclen. Elke keer als het wordt gerecycled neemt de kwaliteit van het materiaal af waardoor het niet meer altijd voldoet aan de eisen voor hergebruik. Dit is het voornaamste obstakel voor beton in een circulaire economie.

Het bedrijf SmartCrushers bv⁶² is bezig om beton voor 100% te hergebruiken zonder te downcyclen. Ze hebben geëxperimenteerd met het idee en hebben een industriële versie ontwikkeld, waarmee ze hebben aangetoond dat het proces niet alleen op labschaal werkt, maar ook industrieel op te schalen is. Aangetoond is dat het ongebruikte cement in beton tot 50% van het oorspronkelijke cement in het beton terug te dringen is. Ook hebben ze een manier ontwikkeld om het gehydrateerde (gebruikte/geactiveerde) cement te gebruiken als CO₂-neutraal basismateriaal voor nieuw cement. Dit zou er dus voor zorgen dat beton wel past binnen een circulaire economie. Het principe is al aangetoond op industriële schaal maar wegens omstandigheden hebben ze nog niet verder kunnen gaan met hun onderzoek.

⁶² (Schenk, K. & Schippers, A., 2016)

4.4.3 Kostprijs

De kostprijs van beton is op te delen over de volgende kostenposten⁶³:

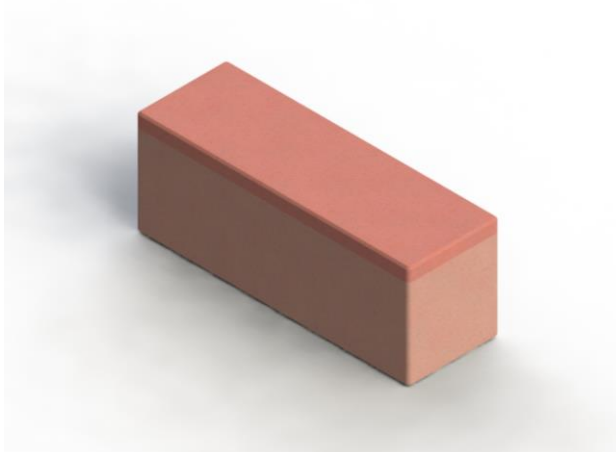
1. Energie en brandstof = 30%;
2. Grondstoffen = 38%;
3. Transport = 12%;
4. Overige kosten zoals arbeid en onderhoud = 20%.

Op basis van deze verdeling is een schatting gemaakt voor de kostprijs bij traditionele straatstenen en bij duurzame straatstenen voor het scenario: een straat van 1.260 m², welke bestraat wordt met dikformaat straatstenen. Uit de berekening, opgenomen in bijlage O. 'Schatting kostprijs', blijkt dat de kostprijs bij traditionele straatstenen € 7.834 bedraagt en bij duurzamere straatstenen € 6.996 wat een besparing van 11% betekent.

Conclusie: naast het feit dat de straatsteen duurzamer wordt, kan naar verwachting 11% op de kostprijs worden bespaard.

4.4.4 Productdocumentatiepakket

Voor de communicatie met productie bedrijven zijn 2D maattekeningen, welke opgenomen zijn in bijlage P. 'Productdocumentatiepakket'.



Afbeelding 13: Straatsteen 3D model

⁶³ (Pabon, A., 2014)

5 Conclusies en Aanbevelingen

5.1.1 Conclusies

'Wat is een innovatief proces voor een wegverharding, ter vervanging van traditionele straatsteen, die bij recyclen geen verlies in kwaliteit van de grondstoffen heeft en daarmee een duurzaam product is?'

Bij een wegverharding kan als basismateriaal gekozen worden uit beton, klei en asfalt. Voor dit onderzoek is gekeken naar beton, omdat dit voor de betrokken partijen het meest interessant is. Het recyclen van beton valt op dit moment onder downcyclen, doordat de materialen slecht van elkaar te scheiden zijn. Onderzocht is of het mogelijk is om de materialen, die benodigd zijn voor het produceren van betonstraatstenen, te verminderen of gebruik te maken van afvalstoffen en lokale grondstoffen.

Op basis van research is 3D betonprinten de meest succesvolle optie, omdat het een innoverende markt is en hier op elk jaar weer nieuwe verbeteringen zullen plaatsvinden. Het onderzoek *'infill modellen'*, waarbij een plastic koker die dertigmaal minder materiaal bevatte als een straatsteen al rond de 1800 kilo aan kon, onderbouwt goed de mogelijkheden van 3D betonprinten als oplossing. Doordat de hoeveelheid benodigd cement hierdoor met 10 tot 25% afneemt, wat verantwoordelijk is voor de meeste milieu-impact, draagt deze oplossing het beste bij aan een duurzamere straatsteen.

De oplossingen lignine en mossel- en oesterschelpen dragen ook bij aan milieuvriendelijkere straatstenen maar wel beperkt. Deze oplossingen zouden goed kunnen werken in combinaties met andere oplossingen. Zo zou bijvoorbeeld een 3D geprinte straatsteen die gebruik maakt van zowel vezels met een hoog percentage lignine als van mossel- en oesterschelpen al veel materiaal besparen. Deze oplossingen zijn het best toe te passen als de gebruikte vezels en mossel- en oesterschelpen afvalstoffen zijn wat de straatstenen milieuvriendelijker maakt. Ook zijn de oplossingen goed toepasbaar voor andere wegbedekkingen zoals kleistraatstenen en asfalt, waarbij mossel- en oesterschelpen kunnen dienen als vervangende granulaten en de lignine bij klei zorgt voor verbeteringen in de productie en bij asfalt als vervanger van de bitumen.

De grootste CO₂ uitstoot wordt veroorzaakt door het cement wat in het beton aanwezig is, doordat in de cementovens de temperatuur zeer hoog is. De beste oplossing is om het cement compleet te vervangen door een andere bindmiddel zoals bijvoorbeeld pure lignine.

De slimbreker van Smartcrushers is één van de betere oplossingen wat het mogelijk maakt om het cement in de straatstenen beter recyclebaar te maken.

5.1.2 Aanbevelingen

3D betonprinten

Zoals gezegd bij de conclusies zal 3D betonprinten zich elk jaar verbeteren. Bedrijven als Sweco en De Hoop moeten deze innovaties goed in de gaten houden, want het kan grote veranderingen voor hun markten betekenen. Er zijn enkele stappen die gemaakt moeten worden om deze productie compleet geschikt te maken voor straatstenen. Ten eerste zal een straatsteen geprint moeten worden met een bestaande printer om de benodigde printtijd per steen vast te stellen en de kracht van deze steen te meten. Hieruit kan geconcludeerd worden of de 3D printers op dat moment voldoen, het kan zijn dat de snelheid of de kracht nog te laag ligt voor massaproductie van straatstenen. Wanneer aan de eisen voor massaproductie voldaan wordt, kunnen machines ontwikkeld en geoptimaliseerd worden.

Op basis van de ontwikkelingen, zoals die van Cybe Construction, verwacht ik dat het nog tussen de 5 en 10 jaar duurt voordat massaproductie van straatstenen mogelijk is door middel van 3D betonprinten. Het grootste probleem voor deze ontwikkelen is dat deze markt op het moment gericht is op grootte objecten zoals het printen van complete huizen.

Lignine als biolijm

Lignine wordt nu nog voor 98% als reststof verbrand voor de productie van papier en karton. Ook is lignine op veel andere plaatsen beschikbaar zoals bijvoorbeeld afvalwater. Lignine kan een alternatief zijn voor synthetische lijm, het kan 30% van de fossiele grondstoffen in lijm vervangen. Het duurt nog ongeveer drie jaar voordat lijm volledig biobased kan worden gemaakt. Deze biolijm zou het cement in beton kunnen vervangen, zoals het de bitumen in asfalt vervangt.

Lignine moet in de gaten worden gehouden voor duurzame projecten, omdat het kan ook dienen voor andere milieuvriendelijke oplossingen zoals bioplastics, wat Sweco zelf al deels ontwikkeld, en voor biobrandstoffen.

Toepassen van een slimbreker

De slimbreker is tot op heden slechts een pilot project geweest. Op dit moment heeft SmartCrushers bv⁶⁴ verbeteringen aan het ontwerp gemaakt, maar wacht op financiering om die te kunnen laten bouwen. Momenteel is geen enkele machine van SmartCrushers bv operationeel. Zij zien wel een groter wordende interesse uit de markt en verwachten in de loop van volgend jaar enkele machines operationeel te hebben. Wanneer de machine klaar is, kan in principe elk betonpuin in de machine verwerkt worden, maar de toepasbaarheid van de materialen die uit de machine komen, hangt af van de kwaliteit van het slopen: het zand en grind uit de machine is zonder meer toepasbaar in alle soorten beton. Het ongebruikte cement zal in eerste instantie gebruikt worden in betonwaren fabrieken, omdat men daar de kwaliteit van het eindproduct test. Voor het gebruikte cement zijn nu al verschillende toepassingen (bijvoorbeeld als vulmiddel) mogelijk.

Innovaties op dit gebied kunnen zorgen voor cement in een circulaire economie. Het cement was het grootste probleem voor het Cradle to Cradle maken van beton en dit zou het uiteindelijk kunnen oplossen.

Toepassen kunststof

Op het gebied van kunststoffen lopen meer innovatieve projecten dan op het gebied van beton. Op een gegeven moment zal kunststof toegepast worden voor producten/projecten waar nu beton wordt toegepast. Zo is KWS Infra bezig met het 'PlasticRoad'⁶⁵ project waarbij ze een wegbedekking ontwikkelen dat voor 100% uit gerecycled plastic bestaat. Enkele voordelen die hier bij genoemd worden zijn:

1. Bestaat uit 100% gerecycled materiaal;
2. Beter bestand tegen slijtage en weersomstandigheden;
3. Snelheid van plaatsen neem aanzienlijk toe (project van maanden kan versnelt worden naar weken);
4. Levensduur van wegen zal verdrievoudigen;
5. Minder en sneller onderhoud;
6. Holle constructie maakt ruimte mogelijk voor bijvoorbeeld kabels en leidingen;
7. Lichte constructie die eenvoudig te plaatsen is;
8. Mogelijkheden voor nieuwe innovaties: modulair bouwen, stillere wegen, verwarmde wegen en energieopwekking.

Kunststof wegen zijn een heel realistisch toekomstbeeld. Hierbij zouden 3D printen en lignine ook bij kunnen dragen om dit te realiseren. Dit zou er voor zorgen dat betonproductie niet meer nodig is en vervangen kan worden door een duurzamere oplossing, waarbij een circulaire economie makkelijker behaald kan worden.

⁶⁴ (Schenk, K. & Schippers, A., 2016)

⁶⁵ (VolkerWessels, 2015)

Bronnenlijst

- Agentschap Wegen en Verkeer. (2009). *Handleiding voor het ontwerp en de uitvoering van verhardingen in betonstraatstenen*. Geraadpleegd op 26 september 2016
- Ahmad, Z., Saman, H.M. & Tahir, P.M. (2010). *Oil palm trunk fiber as a bio-waste resource for concrete reinforcement*. Universiti Teknologi Mara. Geraadpleegd op 6 oktober 2016, van https://www.researchgate.net/publication/268285609_Oil_palm_trunk_fiber_as_a_bio-waste_resource_for_concrete_reinforcement
- Bestrating*. (2016). Geraadpleegd op 22 september 2016, van bouwkundig detailleren: <https://berkela.home.xs4all.nl/cad%20omgeving/cad%20omgeving%20bestrating.html>
- Biobased Bouwen. (2016). *Hennepbeton – DunAgro*. Geraadpleegd op 20 september 2016, van [biobasedbouwen.nl](http://www.biobasedbouwen.nl): <http://www.biobasedbouwen.nl/producten/hempcal-hennepbeton/#tab-id-3>
- Bleijko. (2015, 13 oktober). *Bleijkobright® ... Duurzaam vernieuwd!* Geraadpleegd op 21 september 2016, van [Bleijko.nl](http://www.bleijko.nl): <http://www.bleijko.nl/nl/newsdetail/139/Bleijkobright-2b-23174-3b--Duurzaam-vernieuwd!.aspx>
- Boruslawski, P. (2016, 26 juni). *TU eindhoven helps builders pioneer recyclable concrete constructions with giant 3D printer*. Geraadpleegd op 21 september 2016, van Designboom.com: <http://www.designboom.com/technology/tu-eindhoven-concrete-3d-printer-06-28-2016/>
- Calisch, I. & Calisch, N. (2003). *Nieuw woordenboek der Nederlandsche taal*. Geraadpleegd op 26 september 2016, van [dbnl.org](http://www.dbnl.org): http://www.dbnl.org/tekst/cali003nieu01_01/cali003nieu01_01_0026.php
- Cardiff University. (2015, 28 oktober). *UK's first major trial of self-healing concrete gets underway in Wales*. Geraadpleegd op 21 september 2016, van phys.org: <http://phys.org/news/2015-10-uk-major-trial-self-healing-concrete.html>
- Cement&BetonCentrum. (2016, maart). *Geopolymeren*. Geraadpleegd op 7 oktober 2016, van [cementenbeton.nl](http://www.cementenbeton.nl): <http://www.cementenbeton.nl/c-bc/position-papers/geopolymeren>
- Communicatie Kenniscentrum. (2011, 26 mei). Geraadpleegd op 28 december 2016
- CyBe Constructruction. (2016). *Redefining Construction by enabling 3Dconcrete printing!* Geraadpleegd op 4 oktober 2016, van [CyBe.eu](http://www.cybe.eu/): <http://www.cybe.eu/>
- Damtoft, J.S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D. & Gartner, E.M. (2007). *Sustainable development and climate change initiatives*. Geraadpleegd op 24 augustus 2016
- De Vereniging van Ondernemingen van Betonmortelfabrikanten. (2016). *Prestatie-eisen van beton*. Geraadpleegd op 26 september 2016, van [VOBN.nl](http://www.vobn-beton.nl): <http://www.vobn-beton.nl/beton/beton/prestatie-eisen-beton>
- Design other 90 network. (2011, 11 oktober). *EcoFaeBrick*. Geraadpleegd op 20 september 2016, van [designother90.org](http://www.designother90.org): <http://www.designother90.org/solution/ecofaebbrick/>
- Destefani, J. (2013, 30 mei). *'New' material for 3D printing: concrete*. Geraadpleegd op 21 september 2016, van ceramics.org: <http://ceramics.org/ceramic-tech-today/new-material-for-3d-printing-concrete>

- Emerging Objects. (2016). *OUR 3D PRINTED DESIGN & MATERIAL INNOVATIONS*. Geraadpleegd op 22 september 2016, van emergingobjects.com: <http://www.emergingobjects.com/portfolio/>
- Enci. (2008). *Eenvoudig Betonwerk*. Geraadpleegd op 26 september 2016, van <http://www.hout-en-bouwmaterialen.nl/downloads/enci-eenvoudig-betonwerk-algemene-en-technische-informatie.pdf>
- Flexible Pavements of Ohio. (2016). *Overview of Asphalt Concrete Pavement Design*. Opgehaald van <http://www.flexiblepavements.org/files/events/conferences/Overview%20of%20Asphalt%20Pavement%20Design.pdf>
- Gocha, A. (2016, 16 juni). *'Green' living concrete supports photosynthesis, breathes carbon dioxide*. Geraadpleegd op 21 september 2016, van Ceramics.org: <http://ceramics.org/ceramic-tech-today/biomaterials/green-living-concrete-supports-photosynthesis-breathes-carbon-dioxide>
- Gosselink, R. (2014, 27 november). *Bio-asfalt met lignine in Zeeland*. Geraadpleegd op 20 september 2016, van Wageningen University & Research: <https://www.wageningenur.nl/nl/nieuws/Bioasfalt-met-lignine-in-Zeeland.htm>
- Graham, M. (2015, 8 maart). *3D Printing a 3D Honeycomb Infill concept*. Geraadpleegd op 27 oktober 2016, van engineerdog.com: <https://engineerdog.com/2015/03/08/3d-printing-a-3d-honeycomb-infill-concept/>
- Grunewald, S. (2015, 16 november). *Student-Built Concrete 3D Printer Gets an Upgrade and a New 10'x10'x10' Build Envelope*. Geraadpleegd op 21 september 2016, van 3Dprint.com: <https://3dprint.com/106000/concrete-3d-printer-update/>
- Handreiking Duurzame Ruimtelijke Ontwikkeling. (2011, 28 oktober). *Grondstoffen en materialen*. Geraadpleegd op 28 september 2016, van handreikingdro.nl: <http://www.handreikingdro.nl/uploads/thema%20grondstoffen.pdf>
- Het Nederlands Instituut voor Bouwbiologie en Ecologie. (2012). *NIBE artikel Dag OR_20121008*. Geraadpleegd op 26 september 2016, van <http://publiekeruimte.info/Data/Documents/rc5abtiq/40/Verantwoorde-keuze-van-bestratingsproducten.pdf>
- J. Timmers & M. van der Waals. (2009). *Het ontwerpproces in de praktijk*. Amsterdam: Pearson Education.
- Kley, M. van der. (2016). *project NEXT*. Geraadpleegd op 13 oktober 2016, van [michielvanderkley.nl: http://www.michielvanderkley.nl/next/project-next/](http://www.michielvanderkley.nl/next/project-next/)
- Kooijman, M. & Pallada, M. (2006). *Materiaalkeuze voor ontwerpers*. Bim Media Bv. Geraadpleegd op 26 september 2016
- Materia. (2013, 31 mei). *Oyster Shell Aggregate*. Geraadpleegd op 11 oktober 2016, van [Materia.nl: https://materia.nl/article/oyster-shell-aggregate/](https://materia.nl/article/oyster-shell-aggregate/)
- Matses, J. (2016, 10 juni). *DIY 3D Printed Part Infill For Stronger Parts Fast*. Geraadpleegd op 27 oktober 2016, van CAPUniversity: <http://blog.capinc.com/2016/06/diy-3d-printed-part-infill-for-stronger-parts-fast/>
- Mohajerani, A., Kadir, A. & Larobina, L. (2016). *A practical proposal for solving the world's cigarette butt problem: Recycling in fired clay bricks*. Geraadpleegd op 23 september 2016
- NNRGY Crops. (2015). *ONBENUTTE BOUWGROND TOCH BENUTTEN*. Geraadpleegd op 24 augustus 2016
- ORGA bouw. (2014, 11 februari). *Biobased beton op basis van hennep*. Geraadpleegd op 20 september 2016, van [orga-bouw.nl: http://www.orga-bouw.nl/hennepbeton/](http://www.orga-bouw.nl/hennepbeton/)

- Orgabouw. (2016, 1 september). *Circulaire economie*. Opgehaald van Orgabouw.nl: <http://www.orgabouw.nl/circulaire-economie/>
- OVAM. (2016). *01 beton- en cementproducten*. Geraadpleegd op 28 september 2016, van ecolizer.be: <http://ecolizer.be/catalogus/materiaal/563>
- Pabon, A. (2014, 15 augustus). *Must-know: A business overview of the cement industry*. Geraadpleegd op 29 november 2016, van marketrealist.com: <http://marketrealist.com/2014/08/must-know-cost-elements-cement/>
- Plafke, J. (2013, 20 mei). *Company develops new fiber-reinforced wood, concrete ink for 3D printing*. Geraadpleegd op 22 september 2016, van ExtremeTech: <http://www.extremetech.com/extreme/156305-company-develops-new-fiber-reinforced-wood-concrete-ink-for-3d-printing>
- Provinciale Zeeuwse Courant. (2010, 28 april). *Overlast wilde oester blijvend*. Geraadpleegd op 12 oktober 2016, van PZC.nl: <http://www.pzc.nl/regio/overlast-wilde-oester-blijvend-1.1975235>
- Provincie Zeeland. (2007). *Rapport over zilte teelt*. Geraadpleegd op 19 oktober 2016, van <http://edepot.wur.nl/192090>
- Provincie Zeeland. (2016, 19 maart). *Aanpak problemen oestersector*. Geraadpleegd op 10 oktober 2016, van Zeeland.nl: <https://www.zeeland.nl/actueel/aanpak-problemen-oestersector>
- Rudenko, A. (2016). *3D Concrete House Printer*. Geraadpleegd op 21 september 2016, van Totalkustom.com: <http://www.totalkustom.com/rudenko-s-3d-printer.html>
- Sar, D.M. van der. (2016, 21 augustus). *Klapstelen bij rozen*. Geraadpleegd op 27 oktober 2016, van phytocare.nl: <http://www.phytocare.nl/klapstelen-bij-rozen/>
- Schenk, K. & Schippers, A. (2016). *Daarom SlimBrekers*. Geraadpleegd op 24 november 2016, van SmartCrusher bv: <https://www.slimbreker.nl/>
- Steenhandel Geurds. (2016). *Het juiste formaat kiezen, klinkers in verschillende maten*. Geraadpleegd op 26 september 2016, van steenhandelgeurds.nl: <https://www.steenhandelgeurds.nl/info/formaat-bestrating-kiezen/>
- Supplair. (2016). *Flexible Solutions Through Suppliers*. Geraadpleegd op 25 augustus 2016, van Supplair.com: <http://www.supplair.com/suppliers/local-sourcing>
- Swean, B. (2015, 23 september). *Conceptueel model: Moderatorvariabele*. Geraadpleegd op 28 december 2016, van scribbr.nl: <https://www.scribbr.nl/scriptie-structuur/conceptueel-model-moderatorvariabele/>
- The World Commission on environment and Development. (1987). *Our Common future*. Geraadpleegd op 25 augustus 2016
- The zeobond group. (2016). *Cement comes clean*. Geraadpleegd op 21 september 2016, van zeobond: <http://www.zeobond.com/company.html>
- Tschegg, E.K. (2012). *Fracture energy of natural fibre reinforced concrete*. University of Technology Vienna. Geraadpleegd op 8 oktober 2016, van <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812008963>
- TU Delft. (2008). *Application of bacteria as self-healing agent for the development*. Geraadpleegd op 24 augustus 2016
- v.d. Bosch Beton. (2016, 10 maart). *Inspiratie: Concepten*. Geraadpleegd op 30 september 2016, van vdboschbeton.nl: <http://www.vdboschbeton.nl/concept/reduton>

- Van Kemenade Bestratingen. (2016). *Advies voor bestrating*. Geraadpleegd op 26 september 2016, van vankemenadebest.nl: <http://www.vankemenadebest.nl/advies>
- Veld, J.A. in 't. (2010, 1 april). *Onderzoek haalbaarheid gebruik bioreststromen voor duurzame energie in de provincie Zeeland*. Geraadpleegd op 24 september 2016, van zeeland.nl: <https://www.zeeland.nl/digitaalarchief/zee1001558>
- Virida. (2016). *Wat is de circulaire economie?* Geraadpleegd op 30 september 2016, van virida.nl: <http://virida.nl/circulaire-economie.html>
- VITO. (2016). Geraadpleegd op 26 oktober 2016, van VITO.be: <https://vito.be/nl>
- VolkerWessels. (2015, 10 juli). *VolkerWessels lanceert 'plastic weg'-concept*. Geraadpleegd op 25 november 2016, van volkerwessels.com: <https://www.volkerwessels.com/nl/nieuws/detail/volkerwessels-lanceert-plastic-weg-concept>
- Wageningen University & Research. (2016). *Lignine als grondstof voor de chemische industrie?* Geraadpleegd op 27 oktober 2016, van wur.nl: <http://www.wur.nl/nl/show/Lignine-als-grondstof-voor-de-chemische-industrie.htm>
- Wegman, F., Aarts, L. (2005). *Door met Duurzaam Veilig*. Geraadpleegd op 29 september 2016, van <http://www.swov.nl/rapport/DMDV/DMDV.pdf>
- Zhijian, L., Xunga, i W. & Lijing, W. (2005). *Properties of hemp fibre reinforced concrete composites*. Geraadpleegd op 10 oktober 2016, van <http://www.journals.elsevier.com/composites-part-a-applied-science-and-manufacturing>