

BIJLAGEN

Ontwerpen van straatstenen in een circulaire economie

Sven Oostendorp
HZ University of
Applied Sciences
Engineering

Inhoudsopgave

Bijlage A. Tools en methodes duurzaam ontwerpen	1
Bijlage B. Procesboom straatsteen.....	2
Bijlage C. Productieproces straatstenen.....	5
Bijlage D. Aandachtspunten leggen bestrating	9
Bijlage E. CO ₂ impact levenscyclus straatstenen	12
Bijlage F. NEN normen materiaal straatsteen	15
Bijlage G. Onderzoeken op soortgelijk gebied.....	17
Bijlage H. Overige concurrenten soortgelijke producten.....	20
Bijlage I. Mogelijke extra functies straatsteen	21
Bijlage J. Zeeuwse afvalverzamelaars.....	22
Bijlage K. Berekening materiaalbesparing holle straatsteen	25
Bijlage L. Onderbouwing infill patronen.....	26
Bijlage M. Resultaten simulaties infill patronen	28
Bijlage N. Resultaten onderzoek infill modellen.....	29
Bijlage O. Schatting kostprijs	30
Bijlage P. Productdocumentatiepakket.....	32
Bronnenlijst.....	36

Afbeeldingen

Afbeelding 1: Productieproces straatbaksteen.....	5
Afbeelding 2: Drogerij	6
Afbeelding 3: Keten van de betonstraatstenen	7
Afbeelding 4: Verticale opbouw wegverharding	9
Afbeelding 5: Belangrijkste toegepaste verbanden in straatstenen voor rijwegen.....	10
Afbeelding 6: Tegelverbanden	10
Afbeelding 7: Meest gebruikte dwarsprofielen	11
Afbeelding 8: Kalkdriehoek.....	12
Afbeelding 9: De Hoop's verdeling van totale CO ₂ -emissie per sector	13
Afbeelding 10: De Hoop's relatieve emissie van CO ₂ per m ³ beton	13
Afbeelding 11: Milieustraten in Zeeland	22
Afbeelding 12: Krachten op een vierkant	26
Afbeelding 13: Krachten op een driehoek	26
Afbeelding 14: Hexagoon infill	27
Afbeelding 15: 3D Honeycomb infill (Slic3R).....	27
Afbeelding 16: SolidWorks simulatie 2D Honeycomb Z-as	28
Afbeelding 17: SolidWorks simulatie 2D Honeycomb X-as.....	28
Afbeelding 18: SolidWorks simulatie fijn infill patroon	28
Afbeelding 19: SolidWorks simulatie grof infill patroon	28
Afbeelding 20: Grafiek infillpatronen	29
Afbeelding 21: Voor en na plastische vervorming	29
Afbeelding 22: Straatsteen 3D model.....	32
Afbeelding 23: Maattekening straatsteen dikformaat	33
Afbeelding 24: Maattekening straatsteen waalformaat	34
Afbeelding 25: Maattekening straatsteen keiformaat	35

Tabellen

Tabel 1: Procesboom	3
Tabel 2: Producteisen BRL 5070	4
Tabel 3: Samenstelling Portlandcement.....	7
Tabel 4: Milieu-impact gereed beton	14
Tabel 5: Maximale materiaalbesparing dikformaat	25
Tabel 6: Maximale materiaalbesparing waalformaat.....	25
Tabel 7: Maximale materiaalbesparing keiformaat	25
Tabel 8: Schatting kostprijs scenario bij traditionele straatstenen	30
Tabel 9: Schatting kostprijs veranderingen	30
Tabel 10: Schatting kostprijs scenario bij duurzamere straatstenen.....	31

Bijlage A. Tools en methodes duurzaam ontwerpen

Onderstaande tools en methodes kunnen gebruikt worden voor duurzaam ontwerpen.

Cradle to Cradle^{1,2}

Cradle to Cradle betekent dat de grondstoffen die je gebruikt volledig hergebruikt kunnen worden, zonder hun waarde te verliezen. Volgens het Cradle to Cradle principe is afval gelijk aan voedsel, oftewel: elke stof, elk product, moet volledig hergebruikt kunnen worden zonder dat het zijn waarde verliest. Dan hebben we het over 'upcycling' en niet over 'downcycling' wat regelmatig gedaan wordt. Materialen kunnen niet vaak twee maal voor dezelfde toepassing worden gebruikt, maar krijgen meestal na hun levenscyclus een inferieure toepassing, door recycling. Braungart en McDonough de bedenkers van deze methode onderscheiden twee cycli waarin materialen kunnen circuleren: de biologische kringloop en de technische kringloop. Materialen in de biologische kringloop zijn biologisch afbreekbaar, dit zijn organische stoffen die composteerbaar zijn. Materialen in de technische kringloop kunnen eindelijk hergebruikt worden voor industriële toepassingen.

Levenscyclusanalyse (LCA)³

Levenscyclusanalyse is een methode voor het in kaart brengen van de invloeden van producten en menselijke activiteiten op het milieu. Hierbij wordt gebruik gemaakt van speciale rekenmodellen. In een LCA wordt de gehele levenscyclus van een product bekeken. Van de winning van grondstoffen via productie en van (her)gebruik tot en met afval. De uitkomst van een LCA-studie is een milieuprofiel: een 'scorelijst' met milieueffecten. Aan het milieuprofiel is te zien welke milieueffecten de belangrijkste rol spelen in de levenscyclus.

BREEAM⁴

BREEAM (BRE Environmental Assessment Method) is een beoordelingsmethode om integraal de duurzaamheid van nieuwe gebouwen, bestaande gebouwen, gebieden en slooprojecten te meten en te beoordelen. Op basis van een standaard voor een duurzaam gebouw geeft het aan welk prestatieniveau een gebouw heeft. Het is ontwikkeld door het Centre for Sustainable Construction van het Britse BRE (Building Research Establishment) en wordt gebruikt om gebouwen te analyseren en te verbeteren, zowel voor het ontwerpen van nieuwe gebouwen als het beoordelen van bestaande gebouwen. BREEAM maakt gebruik van een kwalitatieve weging; als totaalscore krijgt een gebouw een waardering als pass, good, very good of excellent.

¹ (McDonough, W. & Braungart, M., 2002)

² (MKB, 2016)

³ (Het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, 2016)

⁴ (BREEAM NL, 2016)

Bijlage B. Procesboom straatsteen

Levensfase	Activiteit	Specificatie	Aantekeningen
Ontstaan	Ontwerpen	Het ontwerpen van de wegverharding wordt gedaan in dit onderzoek.	
		Een ontwerp van waar en hoe straatstenen geplaatst moet worden, kan gedaan worden door een bedrijf als Sweco.	
	Productierijp maken	De ontworpen wegverharding moet voldoen aan de gestelde eisen.	De ontworpen wegverharding is pas echt productierijp als een prototype getest is en voldoet aan gestelde eisen. Dit is voor dit onderzoek geen verplicht opleverproduct, echter zal wel naar de mogelijkheden hiervan gekeken worden.
	Produceren	Bij deelvraag 2.4 'Hoe worden de huidige straatstenen geproduceerd' word hier op ingegaan.	
	Controleren	Na productie moeten stenen gecontroleerd worden op beschadigingen. Hier wordt vooral gelet op grote scheuren in de stenen.	Testen en controleren wordt gedaan door laboratoria meestal ter plaatsen van een fabriek. Hier testen ze of enkele stenen of een partij straatstenen voldoen aan de gestelde eisen. Eens in de zoveel tijd komt de Kiwa de straatstenen controleren.
	Verpakken	Stenen worden gestapeld tot klempakketten.	
	Opslaan	Worden buiten opgeslagen of in een magazijn.	

Levensfase	Activiteit	Specificatie	Aantekeningen
Verspreiden	Adviseren	Adviseren wordt gedaan door Sweco richting hun klanten en door het verkoopteam van De Hoop.	Het onderzoeksproduct kunnen ze aanbieden als optie in plaats van het standaard product.
	Vervoeren	Vervoeren wordt meestal gedaan met vrachtwagens.	

Levensfase	Activiteit	Specificatie	Aantekeningen
Gebruik	Plaatsen	Bij deelvraag 2.5 'Hoe worden de huidige straatstenen gelegd' word hier op ingegaan.	Dit wordt niet gedaan door bedrijven als Sweco of de Hoop.
	In gebruik nemen	De straatstenen gebruikt als wegverharding dienen om de begaanbaarheid voor gemotoriseerde voertuigen, fietsen en voetgangers te verbeteren of mogelijk te maken.	Levensduur van straatsteen is 20 jaar.
	Onbedoeld gebruik	De straatstenen gebruikt als wegverharding zijn bedoeld om gemakkelijk over te verplaatsen. Alles wat hier buiten valt is grotendeels onbedoeld gebruik, met uitzondering van werkzaamheden uitgevoerd door professionals (bv. gemeente of nutsbedrijven).	Moet er een manier ontwikkeld worden zodat alleen professionals de wegverharding kunnen openen?
		Ander onbedoeld gebruik is het vervuilen van het wegdek door bijvoorbeeld graffiti (tenzij dit wegmarkeringen zijn die op aanvraag aangebracht worden) en kauwgom.	Een speciale coating, aangebracht op het wegdek, zorgt ervoor dat graffiti zich niet aan het oppervlak hecht.
	Repareren	Kapotte straatstenen worden zelden gerepareerd, maar meestal vervangen.	Er zijn wel onderzoeken op het moment naar zelf reparend beton.
	Onderhoud	Schoonmaken van de straatstenen (onkruid verwijderen, algen verwijderen, enzovoorts) en het inperken van boomwortels.	Welke reinigingswijze het beste kan worden gekozen hangt af van de situatie. Een specialist kan adviseren welke methode het beste bij de situatie past.

Levensfase	Activiteit	Specificatie	Aantekeningen
Verdwijnen	Recyclen	Oude straatstenen worden vermalen en hergebruikt als toeslagmaterialen voor nieuwe straatstenen.	
	Vernietigen	Wordt vermalen en komt dan bij ander Bouw- en Sloopafval (BSA).	

Tabel 1: Procesboom

KOMO Productcertificaat⁵

Producenten van betonstraatstenen zijn publiekrechtelijk verplicht dat de betonstraatstenen moeten voldoen aan het Besluit bodemkwaliteit. Voor ongewapende betonproducten, zoals betonstraatstenen, geeft BRL 5070 hier de producteisen voor:

Eigenschap	Klasse	Markering
Vorm en afmetingen: maximaal verschil tussen 2 diagonalen van een rechte steen	2	K
Weersbestandheid (vorstdooizoutbestandheid)	3	D
Slijtbestandheid	3	H

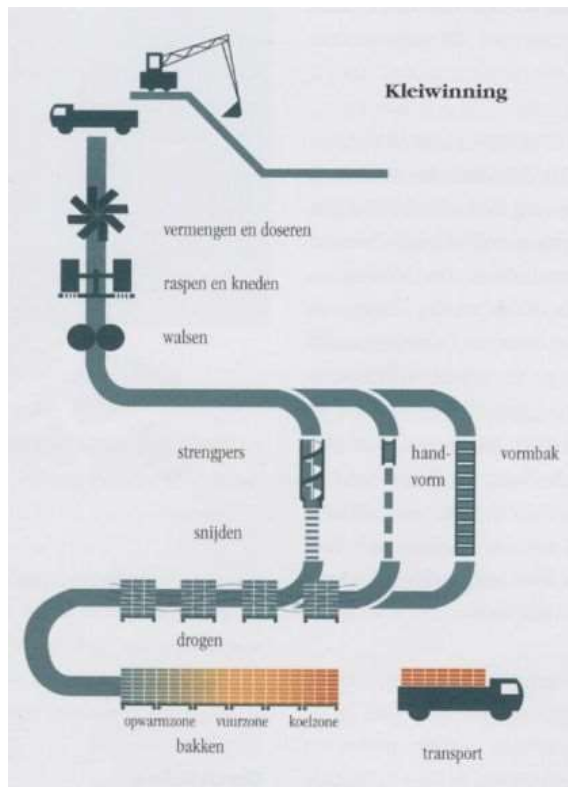
Tabel 2: Producteisen BRL 5070

Op basis van BRL 2312 geeft Kiwa een KOMO Productcertificaat af.

⁵ (Kiwa, 2016)

Bijlage C. Productieproces straatstenen

1 Productieproces straatbaksteen⁶



Afbeelding 1: Productieproces straatbaksteen⁷

Bij de productie van straatbakstenen worden de volgende stappen doorlopen:

1. Kleiwinning: al meer dan 100 jaar wordt de klei van de Nederlandse uiterwaarden van de rivieren, vooral langs Maas, Waal en Rijn, afgegraven. Door die kleiwinning krijgt de rivier de ruimte die hij nodig heeft. In nauwe samenwerking met WNF wordt zo weer nieuwe natuur gecreëerd en veilige vaarwegen gerealiseerd. De rivierklei wordt getransporteerd naar de steenfabriek.
De kleisoort bepaalt grotendeels de eigenschappen van het afgewerkte product. Belangrijke factoren zijn: de mineralogische samenstelling, onder meer het gehalte aan onzuiverheden, en de korrelgrootte. De korrelgrootte bepaalt hoofdzakelijk de mogelijkheid om de stenen te vormen en te drogen alsmede de porositeit van de gebakken steen.
2. Kleivoorbereiding:
 - a. Kneden en malen: eerste wordt het mengsel gekneed en gemalen met als doel de kleimassa homogeen te maken en haar de plasticiteit te geven die voor het vormen van de stenen noodzakelijk is. Tevens wordt tijdens dit proces de vaste bestanddelen die in de klei aanwezig zijn en die de structuur van het gebakken product nadelig zouden beïnvloeden, verbrijzeld en fijn verdeeld in de kleimassa (zoals pyrietknollen en kalkluizen).
 - b. Mengen en doseren: de klei wordt zo nodig gemengd met kleisoorten van verschillende herkomst voor het krijgen van exact de goede verhouding, om zo de juiste kleur en maatvastheid te bereiken. Vette kleisoorten worden 'vermagerd' door toevoeging van zand

⁶ (Bylandt, 2016)

⁷ (Joostdevree, 2016)

of gemalen schiefer. Ook worden mineralen toegevoegd, zoals ijzer-, titaan- en mangaanoxide, om de kleur van de klinkers te bepalen: geel, roodbruin of bijna zwart. Een of meer roerinrichtingen zorgen voor een innig en homogeen mengsel. Door de verschillende samenstellingen kan een breed gamma aan kleuren, texturen en formaten worden gecreëerd.

- c. Optimale vochtigheid: de kleimassa wordt bevochtigd met stoom om het optimale vochtgehalte constant te houden.
3. Vormen: bij het vervaardigen van een vormbaksteen, een baksteen welke volledig door machines vervaardigd wordt, worden drie types onderscheiden:
 - a. Strengpers: dit is een machine waarin de kleimassa in de vorm van een doorlopende streng met zuiver rechthoekige sectie wordt vervaardigd. Deze streng wordt op regelmatige afstanden doorgesneden en ieder stuk vormt een baksteen met vier redelijk gladde zijden als gevolg van het glijden door het mondstuk, en twee snijvlakken die meestal wat ruwer zijn door afsnijding. Bij strengpersstenen kan een andere uitstraling gecreëerd worden door middel van uiteenlopende oppervlaktebehandelingen. De strengpers laat een veel snellere productie toe dan welk ander procédé.
 - b. Handvorm: voor deze bewerking dient het kleimengsel betrekkelijk goed kneedbaar (en dus vochtig) te zijn, omdat anders de vormer teveel kracht moet zetten. De vormer is de persoon die de klei in de vorm werpt en duwt, waardoor een handvormsteen een onregelmatig oppervlak krijgt dat gekenmerkt wordt door een aantal plooiën. Tegenwoordig wordt de dure handvormsteen alleen nog gebruikt voor de buitengevels door zijn "levendig" uiterlijk en zeer grote weerstand onder alle weersinvloeden.
 - c. Vormbak: de klei wordt in vrij droge toestand in de mal gebracht en onder druk in een bezande vormbak geperst om de massa enige cohesie te bezorgen. Elk formaat steen heeft zijn eigen maat bak. Het zand zorgt ervoor dat de vormen ook weer los komen uit de bak. De vormbakken worden omgedraaid waarna de vormen eruit wordt gedrukt op droogplaten. Het zand geeft de stenen ook een deel van de kleur en het karakter. Deze stenen hebben een strakke vorm en ietwat korrelig oppervlak.
4. Drogen: bij het vormen is er vocht gebruikt, wat er weer uit moet voor het bakken. Het gevaar zou anders bestaan dat de stenen bij het bakken zouden gaan barsten of kapot zouden springen door de uitzetten van de waterdamp binnenin de kleimassa. De droogplaten met de net geperste stenen gaan met droogkarren de speciale droogkamers in. Hierin wordt het vochtgehalte teruggebracht van 24% naar 4%. De droogtijd varieert van 32 tot 68 uur.



Afbeelding 2: Drogerij

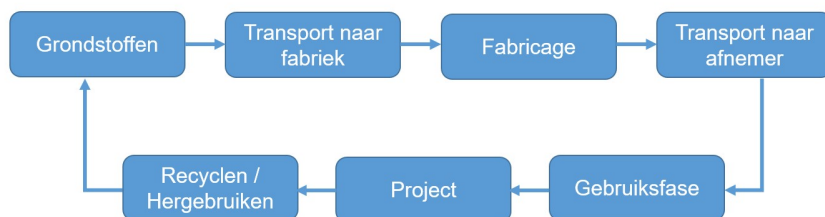
5. Bakken: bij het bakproces moet de temperatuur volgens een bepaald tijdschema worden opgevoerd (opwarmzone) tot de baktemperatuur is bereikt (vuurzone) en daarna weer regelmatig afnemen tot volledige afkoeling (koelzone). De baktemperatuur ligt tussen de 850°C tot 1200°C, afhankelijk van de kleisoort. Iedere kleisamenstelling heeft zijn eigen zogenoemde 'bakcurve'. Hoe hoger de temperatuur, hoe harder de steen. Door te spelen met

de temperatuur en de hoeveelheid zuurstof kunnen stenen in verschillende kleuren of nuances worden gemaakt.

6. Transport: het eindproduct wordt van de ovenwagens gehaald, waarna de stenen worden gestapeld tot klempakketten en klaar zijn voor transport.

2 Productieproces betonstraatstenen

De keten van de betonstraatstenen is in onderstaande schema weergegeven⁸:



Afbeelding 3: Keten van de betonstraatstenen

1. Grondstoffen: een betonstraatsteen is samengesteld uit verschillende grondstoffen. De samenstelling bestaat uit:
 - a. Cement, wat voornamelijk bestaat uit calciumwaterstofsilicaat, is een fijngemalen materiaal dat na het mixen met water omvormt tot een plastische massa, die met behulp van water kan verhard. Met behulp van cement kunnen diverse materialen aan elkaar bevestigd worden tot een stabiele massa. Naast cement worden ook andere bindmiddelen, zoals vliegas, toegepast.

Er zijn verschillende cementtypes. Voor de productie van beton wordt gebruik gemaakt van de volgende cementtypes:

- Portlandcement: dit is het resultaat van het verhitten van klei en kalksteen in steenkoolovens.

Stof	Massa %
CaO	40-60
SiO ₂	20-40
l ₂ O ₃	5-10
MgO	0-10
Fe ₂ O ₃	0

Tabel 3: Samenstelling Portlandcement⁹

- Hoogovencement: hierbij wordt een afvalproduct van de hoogovenslakken (ijzerproductie) gemengd. Calciumoxide (ongebliste kalk / CaO) is niet alleen de grootste component, maar ook de belangrijkste van het cement. Calciumoxide is het bindmiddel dat zorgt dat het cement stevig en hard wordt. Het kan gewonnen worden uit kalksteen of uit schelpen, die beide bestaan uit calciumcarbonaat (CaCO₃). De calciumcarbonaat wordt in een kalkoven verhit tot een temperatuur tussen de 900 en 1100°C. In de oven wordt de calciumcarbonaat omgezet in calciumoxide en koolstofdioxide (CO₂). Bij het metselen reageert het calciumoxide met water en ontstaat calciumhydroxide (gebluste kalk). Het calciumhydroxide (het feitelijke bindmiddel) gaat vervolgens reageren met de koolstofdioxide uit de lucht en vormt calciumcarbonaat (kalksteen).

De cement productie geschiedt doorgaans in cementfabrieken. Hiervoor is veel energie nodig in de verhittingsovens.

⁸ (Boneschansker, H.J. & Hoogland, M., 2015)

⁹ (Ubbels, H., 2016)

- b. Toeslagmateriaal: in Nederland wordt voor toeslagmateriaal gebruik gemaakt van zand en grind, welke op verschillende locaties in Nederland wordt gewonnen. Een groot deel van het grind wordt tevens in Duitsland of België gewonnen.
 - c. Water: water wordt veelal uit eigen bronnen of oppervlaktes gehaald.
- 2. Transport naar fabriek: de grondstoffen die gebruikt worden voor de productie van beton moeten worden getransporteerd (per vrachtwagen, trein of boot) van de plaats van winning naar de fabriek.
- 3. Fabricage: voordat er kan worden begonnen met de productie worden opgeslagen grondstoffen, toeslagstoffen, bindmiddelen, vulstoffen en hulpmiddelen naar de productielocatie binnen de fabriek. Daarna volgt^{10,11}:
 - a. Mengen: dit wordt gedaan in een betonmolen die het gehele mengsel mixt. Als eerst wordt de helft van de toeslagmaterialen toegevoegd met water. Daarna komt hier het cement bij en even later de rest van de toeslagmaterialen. En tot slot water blijven toevoegen tot dat de plasticiteit van het mengsel voldoet;
 - b. Bekisten: Het mengsel moet tijdens het uitharden zijn vorm behouden. Dit wordt gedaan door het mengsel te gieten in een bekisting die het gewicht en de grootte krachten aankan;
 - c. Verdichten: tijdens het betonstorten komt lucht tussen het mengsel en de bekisting en in het mengsel zelf en dit is onvermijdelijk. Om er voor te zorgen dat zo weinig mogelijk lucht in het betonmengsel wordt ingesloten, kan tijdens het storten gebruikgemaakt worden van een triltechniek, die deze luchtballen zo veel mogelijk verwijdert;
 - d. Bescherming tegen uitdroging: als het beton zou uitdrogen, dan zal het gaan krimpen waardoor er trekspanningen optreden die zorgen voor scheuren in het beton (krimpscheuren). Dit kan voorkomen worden door het beton nat te houden, door het beton af te dekken of door het in een ruimte te bewaren met een hoge luchtvochtigheid zoals een klimaat- of hardingskamer of door toevoegingen te gebruiken zoals bijvoorbeeld 'curing compound';
 - e. Bescherming tegen vorst of oververhitting: de snelheid van het uitharden wordt bepaald door de temperatuur, hoe lager de temperatuur des te langzamer zal het beton uitharden. Onder de 0°C wordt geen verharding meer waargenomen. Verharden van beton is een exotherme reactie, dit betekent dat warmte vrij komt, hierdoor is het soms ook niet mogelijk om grote hoeveelheden beton in één keer te storten;
 - f. Bescherming tegen ontmenging: tijdens het beginstadium van het uitharden kan segregatie (ontmenging) optreden. Dat betekent dat de zwaardere toeslagmaterialen naar beneden zinken. Om dit te voorkomen moeten voldoende fijne deeltjes toe gevoegd worden, een lagere water/cement-factor gebruikt worden, de trillingstijd verkort worden of een stabilisator toegepast worden.

Er zijn ook stenen met een speciale kleurechte deklaag, bestaande uit natuurgranulaten die op onderbeton worden geperst. Dit gebeurt bij de verdichtingsstap waarbij beide lagen op elkaar getrild worden tot een geheel. Zo krijgen de stenen een natuurlijk uiterlijk en zijn ze geheel kleurvast. Als de stenen volledig uitgehard zijn worden ze gestapeld en klaargezet voor transport.

- 4. Transport naar afnemer: de betonstraatstenen worden per vrachtwagen vanaf de fabriek getransporteerd en afgeleverd op de projectlocatie.
- 5. Projecten: op de projecten worden de straatstenen machinaal of handmatig gelegd.
- 6. Gebruiksfase en sloop: betonstraatstenen hebben een levensduur van 50 tot 100 jaar. Bij sloop vrijkomende betonstraatstenen kunnen worden gebroken tot betongranulaat of worden hergebruikt. Betongranulaat wordt vaak bij betonreductie gebruikt als vervanger van het grove toeslagmateriaal.

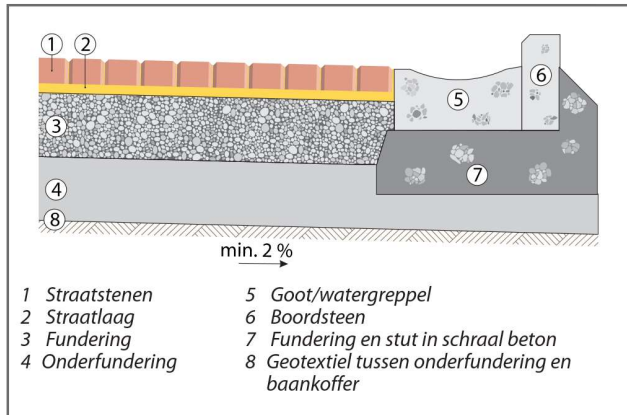
¹⁰ (VOBN, 2015)

¹¹ (Wikipedia, 2016)

Bijlage D. Aandachtspunten leggen bestrating

1 Verticale opbouw wegverharding

Een wegverharding van straatstenen, bestaat naast de toplaag uit meerdere lagen, waarbij elke laag een bepaalde rol heeft.



Afbeelding 4: Verticale opbouw wegverharding¹²

Straatlaag

De straatlaag is nodig omdat het zandbed of de fundering (indien aanwezig) niet vlak genoeg is of de fundering te hard is om de toplaag op aan te brengen. Verder moet de straatlaag de verschillen in dikte van de toplaag opvangen. Omdat de straatlaag dicht bij het aangrijpingspunt van de belasting zit, moet het materiaal elastisch en zeer stabiel zijn. Als materiaal worden daarom speciale zandsoorten toegepast zoals straatzand, hoogovenslakkenzand, brekerzand en voor zeer zware belastingen soms fijne steenslag. Het straatlaagmateriaal mag (vrijwel) geen klei-bestanddelen bevatten om verzachting in de voegen van de toplaag te voorkomen. Indien onder de straatlaag een kwalitatief beter (funderings)materiaal bevindt, dan mag de dikte van de straatlaag minimaal zijn. De dikte is afhankelijk van de uitvoeringstechniek van het bestraten. Bij het traditioneel bestraten is een straatlaagdikte van 50 tot 70 mm nodig. Bij handmatig of machinaal keurig neerleggen kan de dikte van de straatlaag meestal beperkt blijven tot 50 mm.

Fundering

De functie van de fundering is het spreiden van de verkeersbelasting, waardoor de vervorming in de dieper gelegen lagen beperkt blijven. Uiteraard mag de fundering zelf ook niet te veel vervormen. Bij zeer lichte belasting, zoals voetgangersgebieden, trottoirs, fietspaden en dergelijke is een fundering niet nodig. Voor de fundering komen zowel ongebonden steenfunderingen, onder andere hoogovenslakken, puingranulaten en menggranulaten (het meest gebruikt), als (cement)gebonden materialen in aanmerking. De dikte van de steenfundering wordt bepaald door de verkeersbelasting, de draagkracht van de onderliggende constructielagen (inclusief de ondergrond) en de eigenschappen van het steenfunderingsmateriaal zelf. In het algemeen bedraagt de dikte van de steenfundering 200 á 300 mm. Bij een ongebonden steenfundering blijft de ondergrond nog redelijk toegankelijk, waardoor het zonder veel bezwaar kan worden toegepast voor wegen waarin kabels en buizen aanwezig zijn.

Onderfundering

De onderfundering kan de volgende functies hebben:

1. ophoging om het wegdek boven het maaiveld te krijgen;
2. voorkomen van ongewenste vorst- en opdooverschijnselen;
3. tijdelijke opslag van water dat door de voegen in de toplaag of in de constructie is gedrongen;
4. grondverbetering door het vervangen van ongeschikte grond;

¹² (Agentschap Wegen en Verkeer, 2009)

5. werkvloer ten behoeve van de aanvoer van overige materialen;
6. verdere spreiding van de belasting, zodanig dat noch in de onderfundering noch in de ondergrond ontoelaatbare vervormingen optreden.

De dikte van de onderfundering is afhankelijk van de gewenste hoogteligging van het wegooppervlak, de vorstindringingsdiepte, de verkeersbelasting, het draagvermogen van de ondergrond en de eigenschappen van het in de onderfundering toegepaste materiaal.

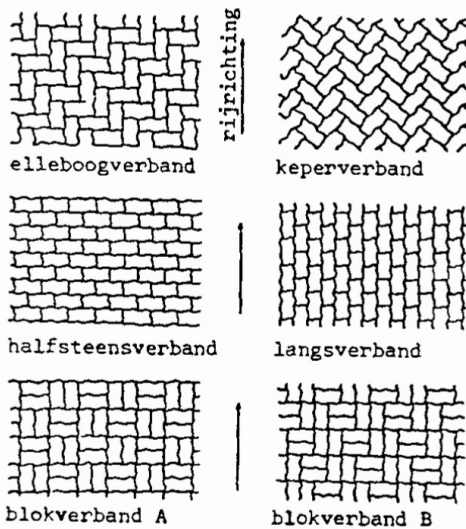
Kantopsluiting

Een kantopsluiting is bij een bestrating nodig om:

1. De stenen op te sluiten;
2. Te voorkomen dat het materiaal van de straatlaag wegspoelt;
3. Zijdelingse beweging en rotatie onder belasting te vermijden;
4. Te voorkomen dat betonstraatstenen onderling wegglijden, kantelen of worden weggeduwd, zowel tijdens het aanbrengen als bij de definitieve in gebruik name.

2 Steenverbanden

De manier waarop de stenen ten opzichte van elkaar gerangschikt worden heeft invloed op het structureel gedrag (sterkte) van de verhardingen en ook op het 'kruipen' (verplaatsen in de rijrichting) van de straatstenen onder invloed van verkeer.



Afhankelijk van het steenformaat zijn er verschillende verbanden (patronen) mogelijk. Elk bestratingsverband heeft zijn eigen mogelijkheden en beperkingen. Maar elk bestratingsverband heeft ook zijn voor- en nadelen.

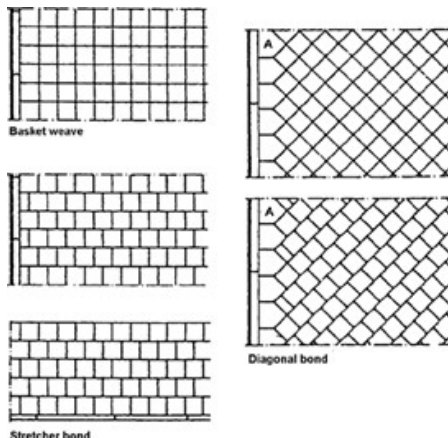
Tegenwoordig wordt op wegen meestal keperverband en soms elleboogverband toegepast (vroeger halfsteensverband).

Elleboogverband wordt veelal toegepast op pleinen, parkeerplaatsen en terreinverhardingen.

Tijdelijke wegen en noodstraten worden, vanwege de hoge productiesnelheid, nogal eens in blokverband aangelegd.

Afbeelding 5: Belangrijkste toegepaste verbanden in straatstenen voor rijwegen

Betontegels kunnen gelegd worden in halfsteensverband, blokverband of diagonaalverband.



Het halfsteensverband wordt algemeen toegepast voor trottoirs en fietspaden. Bij dit verband verspringen de zgn. lintvoegen (voegen in de lengterichting) steeds met een halve tegel, waardoor de tegels onderling een goed verband met elkaar hebben.

Het blokverband is niet zo sterk, omdat de tegels onderling minder steun aan elkaar hebben en wordt daarom alleen toegepast in trottoirs, paden en als sierbestrating.

Het diagonaalverband wordt alleen toegepast als sierbestrating, omdat het praktisch niet uitvoerbaar is.

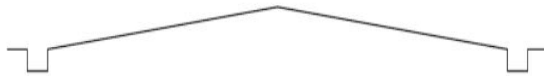
Afbeelding 6: Tegelverbanden

3 Dwarsprofiel¹³

Uit verkeerstechnisch oogpunt zal een aan te leggen weg in dwars- en lengterichting zo vlak mogelijk dienen te zijn. Echter moet er wel naar een goede afwatering van de wegverharding worden gestreefd en insijpelen van regenwater moet worden tegengegaan. Om deze reden zijn er een aantal dwarsprofielen ontwikkeld, ieder met zijn eigen constructiewijze. De meest gebruikte dwarsprofielen zijn:



Hangend dwarsprofiel: bij dit profiel wordt het hemelwater naar één zijde afgevoerd. Vaak toegepast voor wegen met een straatgoot aan één zijde, in bochten, voor fietspaden en trottoirs.



Dakprofiel: een dubbel hangend dwarsprofiel waarbij het hemelwater aan twee zijden wordt afgevoerd. Dit profiel wordt in de praktijk zeer zelden toegepast, omdat in het midden een zeer scherpe rand ontstaat.



Gewijzigd tonrondprofiel: in het midden is dit profiel minder bol. Dit profiel voldoet het beste aan de eisen die tegenwoordig een wegdekken worden gesteld.



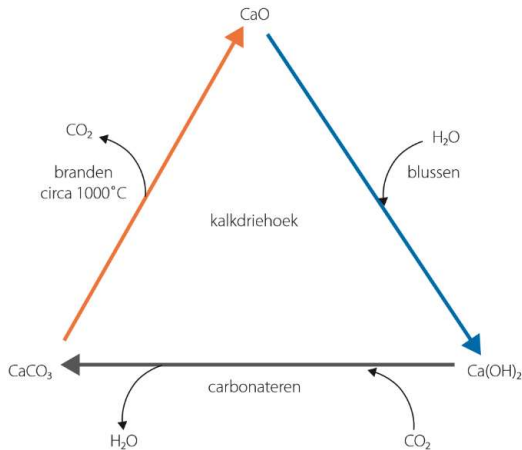
Omgekeerd dakprofiel: dit is een dubbel hangend dwarsprofiel waarbij het hemelwater naar een goot in het midden wordt afgevoerd. Dit profiel wordt in straten met weinig verkeer toegepast.

Afbeelding 7: Meest gebruikte dwarsprofielen

¹³ (Agentschap Wegen en Verkeer, 2009)

Bijlage E. CO₂ impact levenscyclus straatstenen

Bij de productie van straatstenen wordt bij veel cementsystemen (ook nieuwere) het concept van de kalkdriehoek toegepast¹⁴.



Afbeelding 8: Kalkdriehoek

Hierbij is het uitgangsmateriaal kalksteen (CaCO_3), de voorganger van cement. Door branden valt dit uiteen tot vrije kalk (CaO) en kooldioxide (CO_2). Wordt de vrije kalk vervolgens met water (H_2O) geblust, dan ontstaat er door een stormachtige reactie een fijn wit poeder (gebluste kalk) of een witte brij (kalk melk), afhankelijk van de gebruikte hoeveelheid water. In beide gevallen bestaat het product uit calciumhydroxide (Ca(OH)_2). De verharding van calciumhydroxide is in eerste instantie puur gebaseerd op de verdamping van water. Als het mengsel voldoende gedroogd is en er ook CO_2 uit de lucht bij kan komen, dan volgt een carbonatatiereactie waarbij het CO_2 weer wordt opgenomen en als resultaat opnieuw het kalksteen verschijnt.

CO₂ uitstoot Portlandcement

In de kalkdriehoek komt er CO_2 vrij, wordt CO_2 opgenomen (negatieve CO_2 -uitstoot) of is het proces neutraal. Aangezien er CO_2 van CaCO_3 (kalksteen) wordt afgestookt in het productieproces van cement, wordt altijd deze minimale hoeveelheid CO_2 geproduceerd. Per kilogram Portlandcement is dit ongeveer 0,45 kg CO_2 . Voor een gemiddeld Europees Portlandcement is dit iets meer dan 50% van de totale CO_2 -uitstoot tijdens het productieproces. Voor het afstoken van CO_2 zijn bovendien hoge temperaturen nodig. Hiervoor worden brandstoffen verbrand waarbij ook weer CO_2 vrijkomt. Voor hetzelfde gemiddelde Europese cement gaat het dan om een aandeel van circa 35%. Het resterende percentage bestaat uit indirecte emissies, voornamelijk gekoppeld aan het gebruik van elektrische energie (voor bijvoorbeeld het malen van de klinker).

In Nederland wordt relatief veel gebouwd met samengestelde cementen zoals CEM II en CEM III, waarbij het meestal een mengsel is van Portlandcement, hoogovenslak en poederkoolvliegias. Hoogovenslak komt vrij bij de productie van ruwijzer in een hoogoven: ongeveer 20 – 25 kg slak per 100 kg ruwijzer. Ook ruwijzer draagt behoorlijk bij aan de CO_2 -uitstoot. Echter, deze CO_2 -uitstoot wordt volledig toegerekend aan het staal. Rekenkundig gezien komt bij het produceren van hoogovenslak dus geen CO_2 vrij. Een soortgelijke redenering geldt ook voor poederkoolvliegassen die worden geproduceerd tijdens het verbrandingsproces in met poederkool gestookte elektriciteitscentrales. De vervanging van een kilo portlandcementklinker door een kilo hoogovenslak of poederkoolvliegias levert direct een CO_2 -besparing op van de vervangen kilo portlandcementklinker. Door de samenstelling van het cement heeft Nederland wereldwijd het laagste aandeel aan portlandcementklinker in haar cement en daarmee de laagste uitstoot aan CO_2 per kilo cement.

¹⁴ (Cement, 2010)

CO₂-impact productiebedrijf De Hoop¹⁵

Onderstaande afbeelding geeft een beeld van de hoeveelheid CO₂ die het bedrijf De Hoop, een producent van beton en straatstenen, jaarlijks produceert per sector.



Afbeelding 9: De Hoop's verdeling van totale CO₂-emissie per sector

De betonmortel- en betonwarenssector zijn in 2015 samen verantwoordelijk voor meer dan 60% van de totale CO₂-uitstoot. Beide sectoren laten in 2015 een daling zien van de CO₂-uitstoot per m³ beton, wat ook in de volgende afbeelding weergegeven wordt.



Afbeelding 10: De Hoop's relatieve emissie van CO₂ per m³ beton

CO₂ uitstoot betonstraatstenen versus gebakken straatstenen¹⁶

Europees advies- en ingenieursbureau Tauw heeft ook de precieze uitstoot per betonstraatsteen berekend en vergeleken met die van een gebakken straatsteen. De onderzoekers hebben gekeken naar productie, transport, aanleg, onderhoud en sloop en eventueel recycling van de materialen. Bij het maken van één ton betonstraatsteen wordt 88 kg CO₂ geproduceerd. Bij een ton klinkers van baksteen is de uitstoot 130 kg CO₂. Het bakken van de straatstenen kost veel energie en dit is vele malen minder dan bij de productie van betonstraatstenen. Vervoer en sloop hebben bij betonstraatsteen wel meer invloed dan bij gebakken klinkers. De winning van klei voor baksteen gebeurt lokaal, terwijl het zand, grind en cement voor de betonstraatsteen uit Duitsland en Limburg moet komen.

CO₂ opdeling milieubelasting beton

Om de CO₂ impact van gereed beton op te delen in de verschillende onderdelen, is met behulp van de Ecolizer¹⁷ een analyse gemaakt per bestanddeel waaruit het beton is opgebouwd (1-2-3 regel): 1 deel (16,67%) cement, 2 delen (33,33 %) zand en 3 delen (50 %) granulaten (grind).

¹⁵ (De Hoop, 2016)

¹⁶ (Trouw, 2010)

¹⁷ (OVAM, 2016)

Onderstaande tabel bevat de verdeling van de milieu-impact van gereed beton (9 mPt/kg):

Onderdeel	1-2-3 regel	mPt/kg	Milieu-impact (mPt) per kilo gereed beton
Cement (Portland Z52.5)	16,67 %	49	8,16 (16,67% * 49)
Zand	33,33 %	0,3	0,10 (33,33% * 0,3)
Granulaten (grind)	50,00 %	0,6	0,30 (50% * 0,6)
Productieproces beton			0,44

Tabel 4: Milieu-impact gereed beton

Cement is dus ongeveer 90% van de milieubelasting van gereed beton. Voor het produceren van cement is veel energie nodig, doordat in de cementovens de temperatuur zeer hoog moet zijn. Dit is de oorzaak van de hoge ecologische score van cement.

Bijlage F. NEN normen materiaal straatsteen

Sterkteklasse

De sterkte van beton wordt uitgedrukt in de sterkteklasse. De sterkteklasse wordt door de constructeur bepaald en is gebaseerd op de 28-daagse druksterkte, uitgedrukt in N/mm^2 . Deze wordt aangeduid met een 'C' (van Concrete), gevolgd door twee getallen die sterkte weergeeft. Deze twee getallen worden bepaald door $C\ X/Y$, waarbij X = karakteristieke cilinderdruksterkte in N/mm^2 (gemeten aan cilinders met een diameter van 150 mm en hoogte 300 mm) en Y = karakteristieke kubusdruksterkte in N/mm^2 (gemeten aan kubussen met een ribbe van 150 mm). De range van reguliere sterkteklassen is C12/15 tot en met C100/115, vanaf C53/65 wordt het hogesterktebeton genoemd.

Milieuklasse

De omgeving waaraan het beton wordt blootgesteld wordt gekarakteriseerd door milieuklassen. De aanduiding van de milieuklasse wordt voorafgegaan door de X (van eXposure) gevolgd door een letter en een cijfer. De letter betreft het aantastingsmechanisme en het cijfer heeft betrekking op de invloed van de vochtigheid van de omgeving. Voor één bouwdeel kunnen meerdere milieuklassen van toepassing zijn.

1. Geen aantasting:
 - a. X0 (0 = 'zero risk'): geen risico op corrosie of aantasting.
2. Corrosie ingeleid door carbonatatie = XC:
 - a. XC1: droog of blijvend nat;
 - b. XC2: nat, zelden droog;
 - c. XC3: matige vochtigheid;
 - d. XC4: wisselend nat en droog.
3. Corrosie ingeleid door chloriden, anders dan afkomstig uit zeewater = XD:
 - a. XD1 matige vochtigheid;
 - b. XD2 nat, zelden droog;
 - c. XD3 wisselend nat en droog.
4. Corrosie ingeleid door chloriden uit zeewater = XS:
 - a. XS1 zouthoudende lucht;
 - b. XS2 blijvend onder zeewater;
 - c. XS3 getijde-, spat- en stuifzone.
5. Aantasting door vorst/dooiwisselingen met of zonder dooizouten = XF:
 - a. XF1 niet-volledig verzadigd met water zonder dooizouten;
 - b. XF2 niet-volledig verzadigd met water met dooizouten;
 - c. XF3 verzadigd met water, zonder dooizouten;
 - d. XF4 verzadigd met water, met dooizouten of zeewater.
6. Chemische aantasting = XA:
 - a. XA1 zwak agressief chemisch milieu;
 - b. XA2 matig agressief chemisch milieu;
 - c. XA3 sterk agressief chemisch milieu.

Toplaag

Van belang voor het materiaal van de toplaag is de hardheid. Niet alle toeslagmaterialen zijn hard genoeg om ze in zwaar belaste bestratingen voor de toplaag toe te passen. Ze moeten een hardheid van ten minste 6 op de hardheidsschaal van Mohs hebben, zoals graniet, porfier, basalt en kwarts. Naast de hardheid zijn ook volgende kenmerken belangrijk voor toepassing in de toplaag van een wegdek:

1. Het polijstgetal/de versnelde-polijstingscoëfficiënt (VPC): weergeeft de polijstweerstand/mate van gladheid;
2. De Los Angelescoëfficiënt: weergeeft de schokvastheid/mate van verbrijzeling;
3. De Micro-Devalwaarde: weergeeft de slijtbestandheid/mate van afslijting.

Splijttreksterkte

De karakteristieke splijttreksterkte (T) mag voor klassieke betonstraatstenen niet kleiner zijn dan 3,6 MPa. Van geen enkele vorm van wegbedekking mag de splijttreksterkte kleiner zijn dan 2,9 MPa. Voor poreuze betonstraatstenen dient de karakteristieke splijttreksterkte minimaal gelijk te zijn aan 2,5 MPa.

Bijlage G. Onderzoeken op soortgelijk gebied

De volgende onderzoeken zijn al gedaan op een soortgelijk gebied.

Hennepbeton^{18,19}

Beton op basis van hennepvezels is, gezien de kracht van deze natuurlijke grondstof, een veelbelovend duurzaam bouw materiaal. Voor iedere ton hennepvezel die wordt geproduceerd, wordt tussen de 1,7 en 1,9 ton CO₂ opgenomen uit de atmosfeer. Gemiddeld levert een hectare zo'n 10 ton hennep stro op. Momenteel wordt hennepbeton in duurzame bouwprojecten vooral gebruikt om de muren te vormen, maar het is mogelijk ook toepasbaar voor betonnen straatstenen. Het vooroordeel van veel mensen, die de link met wietteelt leggen, staat helaas de ontwikkeling van deze hergroei bare grondstof nog steeds in de weg.

EcoFaeBricks²⁰

In Indonesië zijn EcoFaeBricks ontwikkeld door studenten van Prasetya Mulya Business School, welke gemaakt zijn van koeienmest met bodem extracten en uitgehard door gebruik te maken van biogas. Het resultaat is een bouw materiaal dat 20% lichter is dan traditionele bakstenen, 20% hogere druksterkte heeft en lagere productiekosten heeft.

Lignine Bio-asfalt²¹

Bio-asfalt is voor Zeeuwse wegen ontwikkeld door Wageningen UR Food & Biobased Research, het Asfalt Kennis Centrum (AKC) en het bedrijf H4A uit Sluiskil. In het innovatieve bio-asfalt wordt de bitumen vervangen door een biobased plakmiddel genaamd lignine. Lignine is een natuurlijke lijm die zorgt voor de stevigheid in allerlei planten en bomen en is bijvoorbeeld volop aanwezig in stro en bermgras. Door toepassing van lignine kan bitumen, dat nu gemaakt wordt uit aardolie, worden vervangen. Dit zorgt voor een afname van de milieubelasting. Ook is de verwachting dat functionele eigenschappen, zoals de rolweerstand van het asfalt kan worden verbeterd en dat het asfalt stiller zou zijn dan het huidige asfalt.

Cigarette butt Bricks²²

Dr Abbas Mohajerani toont aan dat sigarettenpeuken heel geschikt zijn om in bakstenen te worden verwerkt. Wanneer bij de productie voor ongeveer 1% sigarettenpeuken worden toegevoegd, dan hebben ze dezelfde eigenschappen als een traditionele baksteen. Daarnaast is er tot wel 58% minder energie nodig om de bakstenen te bakken. Bovendien zijn deze bakstenen lichter en isoleren ze beter dan traditionele bakstenen. Naast het feit dat ze goedkoper te produceren zijn qua energiebehoefte is het ook een effectieve oplossing voor het probleem van het sigaret zwerfafval wereldwijd.

NNRGY Crops²³

NNRGY Crops teelt op dit moment olifantsgras in Rotterdam, Lansingerland en Zwolle. Olifantsgras bevat namelijk waardevolle vezels en cellulose die gebruikt kunnen worden bij het produceren van bio-beton. Op termijn is het zelfs mogelijk om dit bio-beton te printen met een 3D-printer.

Bioblocks²⁴

Bioblocks zijn stenen gemaakt van zogenaamde kraggen en het rietplagsel. Tevens wordt op die manier in de natuur de ruimte geboden om opnieuw CO₂ vast te leggen in nieuwe drijfblagen. BioBlocks worden in samenwerking met Staatsbosbeheer geproduceerd van materiaal uit Nationaal Park Weerribben, één van Nederlands grootste en meest unieke natuur- en cultuurgebieden. Voordeel van deze BioBlocks is dat ze niet in een oven hoeven maar vier tot acht weken natuurlijk drogen door de

¹⁸ (ORGA bouw, 2014)

¹⁹ (Biobased Bouwen, 2016)

²⁰ (Design other 90 network, 2011)

²¹ (Gosselink, R., 2014)

²² (Mohajerani, A., Kadir, A. & Larobina, L., 2016)

²³ (NNRGY Crops, 2015)

²⁴ (BioBlocks, 2016)

lucht. De blokken worden gebruikt in grondkeringen, tuinafscheidingen, zwaluwwandjes, dierenverblijven in de natuur, en zelfs in de wegenbouw.

Mars beton²⁵

Materiaalkundige Lin Wan en haar collega's aan de Northwestern University's Center for Sustainable Engineering of Geological and Infrastructure Materials (SEGIM) in Evanston, Ill, hebben een methode ontwikkeld voor het maken van beton op Mars met behulp van materialen die beschikbaar zijn op Mars en zonder het gebruik van water. Het hoofdelement in het waterloze beton is zwavel. De kracht van het beton is van vergelijkbaar niveau als traditioneel beton, heeft een snelle hardingstijd en is 100% recyclebaar. De zwavel wordt verwarmd tot het 240°C bereikt waarbij het vloeibaar wordt. Dit wordt gemengd met aggregaat-gesimuleerde Mars bodem en wordt afgekoeld. Aangezien zwavel vast wordt, bindt de bodem zich met het mengsel en hardt het materiaal uit. Door middel van compressie testen, ontdekte het team dat het beton een druksterkte van 50 MPa of meer behaalde, dankzij de sterke chemische bindingen die de zwavel maakt met de bodem van Mars tijdens het uitharden.

Buigzaam Beton²⁶

Wetenschappers van de Nanyang Technological University (NTU Singapore) hebben een nieuw type beton genaamd ConFlexPave dat buigzamer, sterker en duurzamer is dan traditioneel beton en minder onderhoud vereist. Deze innovatie maakt het mogelijk de tijd die nodig is voor wegwerkzaamheden en het leggen van nieuwe trottoirs te halveren. ConFlexPave is speciaal ontworpen met bepaalde harde materialen gemengd met polymeer microvezels. De belangrijkste doorbraak was het begrijpen hoe de componenten van de materialen met elkaar mechanisch omgaan op microscopisch niveau.

Cement met biologische structuur²⁷

Onderzoekers van Massachusetts Institute of Technology (MIT) hebben cement ontwikkeld met de structuur en eigenschappen van natuurlijke materialen, zoals botten, schelpen, en diepzee sponzen. Ze namen waar dat deze biologische materialen uitzonderlijk sterk en duurzaam zijn, mede dankzij de precieze montage van hun structuren op meerdere lengteschalen, van moleculair tot macro niveau. Uiteindelijk hoopt het team materialen te gebruiken die in de natuur voorkomen als duurzame en langduriger alternatief voor Portlandcement.

PiGrid Bio-asfalt^{28,29}

Jaarlijks wordt er door varkens wereldwijd ruim 150 miljard liter mest geproduceerd, wat geleid heeft tot een mestoverschot. Onderzoekers hebben ontdekt dat de rijke oliën die in de varkensmest zitten zeer geschikt zijn om asfalt mee te maken. Ze hebben het product PiGrid ontwikkeld dat toegevoegd aan asfalt beter bestand is tegen breuk, waardoor de levensduur van het wegdek wordt verlengd. Daarnaast kan het bij lagere temperaturen worden aangebracht, waarmee brandstofverbruik en emissies tot 60% teruggebracht kunnen worden en kost het 75% minder om te produceren dan op aardolie gebaseerde hechtmiddelen.

Glasbeton³⁰

Door gedeeltelijk cement te vervangen door polymeer, vliegashoudend glaspoeder, zijn ze in staat om beton te maken dat 60% sterker is dan voorheen werd aangenomen mogelijk was te produceren. Hoewel verder onderzoek nodig is om stabiliteit op lange termijn te beoordelen, lijkt het er nu op dat tot 25% van de cement materialen vervangen kunnen worden gebruikt voor de productie van cement.

Chittin bio-adhesive³¹

Een nieuwe laser-geactiveerde bio-lijm met gebruik van chitosan, SurgiLux, werd ontwikkeld door wetenschappers van de Universiteit van New South Wales. Chitosan is een polymeer afgeleid van chitine, die is gevonden in schimmelcelwanden of exoskeletten van schaaldieren en insecten.

²⁵ (Liverani, S., 2016)

²⁶ (Kok, L., 2016)

²⁷ (Chu, J., 2016)

²⁸ (Griggs, M., 2016)

²⁹ (Venturewell, 2014)

³⁰ (Sthankiya, A., 2015)

³¹ (Plastemart, 2012)

Chittin bioplastic³²

Wetenschappers van Harvard University's Wyss Instituut hebben een nieuwe bioplastic ontwikkeld op basis van garnalen. Met behulp van de natuurlijke chitine hebben ze dunne films gemaakt met dezelfde structuur en samenstelling als chitine. Gemaakt met behulp van de verwerkte afgeleide chitosan van garnalen schelpen, komt het nieuwe plastic overeen met aluminium in sterkte bij slechts de helft van het gewicht. Ook is het biologisch afbreekbaar, goedkoop en kan worden gevormd in verschillende 3D-vormen. De onderzoekers zijn optimistisch over het vermogen van het materiaal om de op fossiele brandstoffen gebaseerde kunststoffen te vervangen.

Varkensmest bio-adhesive³³

Bio-Adhesive Alliance produceert duurzame, bio-lijm van varkensmest.

³² (Brownell, B., 2016)

³³ (Bio-Adhesive Alliance, 2016)

Bijlage H. Overige concurrenten soortgelijke producten

Naast de concurrenten van soortgelijke producten genoemd in het Onderzoeksrapport bij deelvraag 9 'Welke concurrenten en soortgelijke producten zijn op de markt aanwezig?' zijn de volgende concurrenten het vermelden waard.

Biomason³⁴

Voor wie liever wat dichter bij de traditionele baksteen blijft, is zelfs hiervoor een biovariant. Biomason laat stenen groeien met behulp van bacteriën en rioolwater. De bacteriën hechten zanddeeltjes in een mal aan elkaar vast. Na vijf dagen is het resultaat de biobrick, welke stevig genoeg is voor gebruik in de bouw.

Novamcem³⁵

Novacem claimt een koolstofnegatief cement te hebben ontwikkeld, gebaseerd op magnesium silicaten in plaats van calciumcarbonaat. Novacem cement absorbeert 30 tot 100 kg CO₂ per ton beton.

Excluton³⁶

De ExcluNatura Pure Olivine van Excluton is een straatsteen die actief bijdraagt aan het terugdringen van CO₂ uitstoot. Dat kan doordat pure olivijn is verwerkt in de toplaag van de steen. Dit is in onpure vorm één van de meest voorkomende mineralen op aarde, maar juist het pure olivijn is bijzonder. Dit heeft de eigenschap dat het CO₂ opneemt uit de lucht en dit omzet in magnesiumbicarbonaat. Doordat pure olivijn bindt met zware metalen is het een ideale combinatie voor een water passerende steen met de mogelijkheid om regenwater te filteren. De ExcluNatura Pure Olivine is dus instaat CO₂ emissie te reduceren zodra de steen in aanraking komt met luchtvochtigheid.

Andere concurrenten:

1. Bylandt³⁷;
2. Ecocem³⁸;
3. Aggregate³⁹;
4. Celitement GmbH⁴⁰.

³⁴ (bioMASON, 2016)

³⁵ (Miles, P., 2012)

³⁶ (Excluton, 2016)

³⁷ (Bylandt, 2016)

³⁸ (Ecocem, 2016)

³⁹ (Aggregate Industries, 2016)

⁴⁰ (ICR Research, 2011)

Bijlage I. Mogelijke extra functies straatsteen

De volgende extra functies kan een straatsteen uitvoeren, waarmee de milieubelasting kan worden verlaagd en daardoor de straatsteen duurzamer wordt.

CO₂ opnemend⁴¹

Door gebruik te maken van fotosynthese kan CO₂ opgenomen worden uit de lucht. Onderzoekers werken aan de ontwikkeling van een betonnen paneel waarop levende organismen zoals mossen, korstmossen en andere micro-organismen kunnen groeien, die als eigenschap hebben dat ze de voor fotosynthese benodigde lichtenergie kunnen opvangen. Het levende beton concept bestaat uit drie lagen die samen een dikte van 3 tot 5 centimeter hebben: in de kern een waterdichte laag, zodat er geen vocht doorlekt naar de structurele laag eronder. Vervolgens een poreuze laag die vocht opslaat die ter ondersteuning dient van het leven van de organismen en ten slotte een buitenlaag die helpt vocht vast te houden.

Zelfhelend⁴²

Veel materialen worden door gebruik zwakker. Dit leidt er toe dat materialen vaak vrij snel vervangen moeten worden. Een zelfhelend materiaal kan zichzelf repareren nadat het beschadigd is geraakt. Deze innovatieve aanpak zou de levensduur van materialen aanzienlijk kunnen verlengen. Door middel van een project, genaamd Materials for Life (M4L), zijn onderzoekers bezig met proeven die de levensvatbaarheid van drie types zelfhelend beton evalueren: zoals vormgeheugen polymeren die geactiveerd worden door een elektrische stroom, één met geneeskrachtige stoffen gemaakt van organische en anorganische verbindingen en één met capsules daarin. M4L's doel is autonome infrastructuur, wegen, tunnels, bruggen en gebouwen, dat zichzelf kan herstellen zonder menselijke tussenkomst.

Reflecterend⁴³

Door een percentage Luxovit aan de toplaag van een wegverharding toe te voegen, ontstaat een optimale lichtreflectie (luminantie) zonder dat er verblinding optreedt. Door deze extra functionaliteit toe te voegen aan de straatsteen is minder licht nodig voor het verkrijgen van een gelijkwaardige luminantie, wat resulteert in het vergroten van lichtmastafstanden en/of het verlagen van het vermogen van de lichtbron. Bovengenoemde uitkomsten zullen recht evenredig resulteren in energiebesparing en een reductie van CO₂.

⁴¹ (Gocha, A., 2016)

⁴² (Cardiff University, 2015)

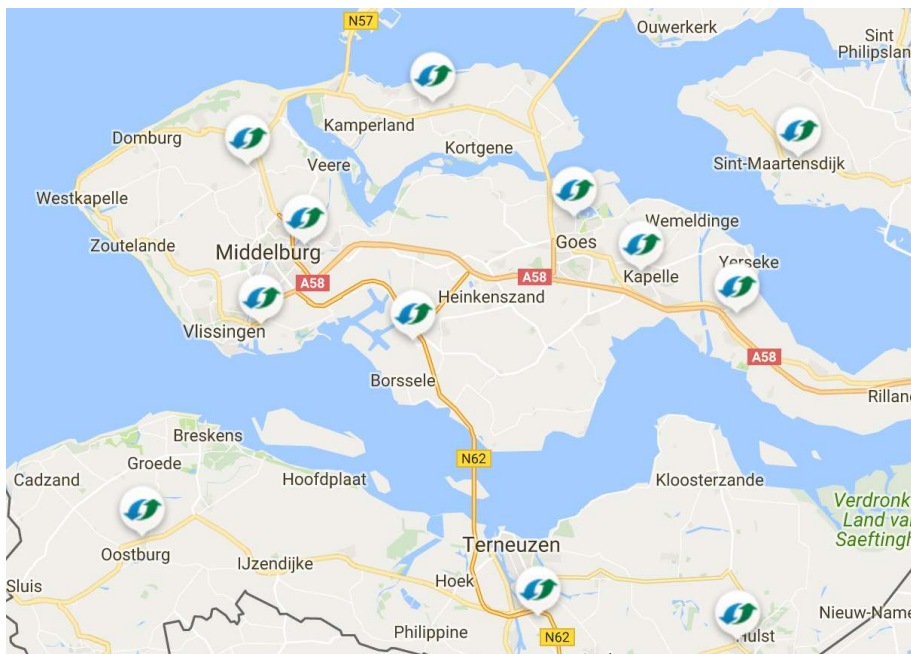
⁴³ (Bleijko, 2015)

Bijlage J. Zeeuwse afvalverzamelaars

In Zeeland zijn verschillende afvalverzamelaars actief, de belangrijkste zijn hieronder met hun contactgegevens opgenomen.

Milieustraat⁴⁴

In Zeeland heeft iedere gemeente een milieustraat, een overzichtelijk ingericht park waar huishoudelijk afval gescheiden, in daarvoor bestemde containers, kan worden aangeboden. Het sorteren, scheiden en verwerken van het huishoudelijk afval is op grond van de Wet milieubeheer een gemeentelijke taak. De dertien Zeeuwse gemeenten hebben een gezamenlijke regeling getroffen in de vorm van het Openbaar Lichaam Afvalverwijdering Zeeland (OLAZ). Het OLAZ heeft voor alle Zeeuwse gemeenten milieustraten waar de inwoners hun afval kunnen brengen. De milieustraten worden geëxploiteerd door de Zeeuwse Reinigingsdienst (ZRD).



Afbeelding 11: Milieustraten in Zeeland

Contactgegevens

Milieustraat Borsele
Polenweg 2
4455 SX Nieuwdorp
T: +31 113 745 758

Milieustraat Goes
Geldeloozepad 3
4463 AJ Goes
T: +31 113 219 514

Milieustraat Hulst
Afrikaweg 6
4561 PA Hulst
T: +31 114 371 355

Milieustraat Kapelle
Dijkwelseweg 1a
4421 PN Kapelle
T: +31 113 745 757

Milieustraat Middelburg
Waldammeweg 9
4338 PM Middelburg
T: +31 118 651 478

Milieustraat Noord-Beveland
Cruijkelcreke 21
4491 PA Wissenkerke
T: +31 113 370 784

Milieustraat Reimerswaal
Stationsweg 8a
4416 PJ Kruiningen
T: +31 113 320 061

Milieustraat Schouwen-Duiveland
Deltastraat 37
4301 RC Zierikzee
T: +31 111 410 081

Milieustraat Sluis
Transportweg 17
4501 PS Oostburg
T: +31 117 451 023

⁴⁴ (Zeeuwse Reinigingsdienst, 2016)

Milieustraat Terneuzen
Koegorsstraat 36
4538 PK Terneuzen
T: +31 115 471 417

Milieustraat Tholen
Nijverheidsweg 36
4695 RC St. Maartensdijk
T: +31 166 667 166

Milieustraat Veere
De Zompe 5
4353 RT Serooskerke
T: +31 118 594 560

Milieustraat Vlissingen
Poortersweg 30
4382 NR Vlissingen
T: +31 118 490 340

Indaver Nederland B.V.⁴⁵

Indaver (voorheen Delta Milieu) verzorgt de inzameling van niet gevaarlijk afval, zoals gft-afval, groot groenafval, huishoudelijk afval, kunststoffen en papier en karton. Daarnaast hebben zij onder andere een contract met OLAZ voor de verwerking van het afval dat verzameld wordt door de milieustraten. Onder dit contract valt vrijwel alle GFT-afval en gedeeltelijk het bermgras en de houtige stromen.

Contactgegevens

Polenweg 4
4455 SX Nieuwdorp
T: +31 113 676 767
F: +31 113 676 760
E: info@indaver.nl

SUEZ Recycling Services⁴⁶

SUEZ (voorheen SITA) is in Nederland specialist op het gebied van het inzamelen, transporteren en verwerken van regulier (bedrijfs)afval, via gescheiden 'monostromen' (glas, hout, metaal, plastic, folie, papier) en via diffuse stromen (restafval, algemeen bedrijfsafval en huisvuil), en van speciale afvalsoorten (gevaarlijk afval, betrouwbare documenten en dossiers, afval uit de medische sector en bouw- en sloofafval).

Contactgegevens

Polenweg 12
4455 SX Nieuwdorp
T: 0900 84 44
E: klantenservicezuid@sita.nl

Van Gansewinkel regio Zuid-West Nederland vestiging Vlissingen⁴⁷

Van Gansewinkel zamelen afval zoveel mogelijk gescheiden aan de bron in. Hierbij valt te denken aan: bouw- en sloofafval (BSA), puin, papier en karton, glas, hout, grofvuil, gevaarlijk en chemisch afval en restafval. De verschillende materialen krijgen na inzameling en sortering vervolgens een tweede leven als grondstof. Het overige afval krijgt een nuttige toepassing als brandstof in afvalenergiecentrales en wordt omgezet in groene of grijze energie. Een minimale restfractie wordt gestort.

Contactgegevens

Polenweg 8
4455 SX Nieuwdorp
T: 0800 01 30

⁴⁵ (Indaver, 2016)

⁴⁶ (SUEZ Recycling and Recovery Netherlands, 2016)

⁴⁷ (van Gansewinkel, 2016)

Den Ouden Groenrecycling locatie Kreekrak⁴⁸

Op de locatie Kreekrak te Rilland neemt Den Ouden groenafval in ten behoeve van groenrecycling. Dit betreft bijvoorbeeld gras, snoeihout, stobben en ander groenafval, dat afkomstig is van gemeenten, provincies en Rijkswaterstaat, bedrijven en particulieren.

Voor overheden en (recycling)bedrijven verrichten zij tevens de verwerking van het groenafval op hun eigen locatie.

Contactgegevens

Westelijke Schelderijweg 1a

4411 TC Rilland

T: +31 73 543 10 00

E: kreekrak@denoudengroep.com

Martens Cleaning⁴⁹

Het inzamelen en verwerken van maritieme afvalstoffen is core business voor Martens Cleaning. In Zeeland zijn zij werkzaam in de havens van Vlissingen en Terneuzen. De in te zamelen afvalstoffen variëren van: sludge, bilgewater, olie/watermengsels, minerale waswaters, ladingrestanten en divers scheepsafval.

Contactgegevens

Spanjeweg 2

4455 TW Nieuwdorp (Zld)

T: +31 113 672 210

F: +31 113 352 442

E: info@martenscleaning.nl

⁴⁸ (Den Ouden Groenrecycling B.V., 2016)

⁴⁹ (Martens Cleaning, 2016)

Bijlage K. Berekening materiaalbesparing holle straatsteen

De laagdikte die het bedrijf Cybe Construction kan printen is 20mm. Voor de berekening van het maximale percentage materiaalbesparing bij een holle straatsteen wordt uitgegaan van een steendikte van 70 mm. Onderstaand is per type straatsteen het maximale percentage materiaalbesparing berekend op basis van verschillende laagdiktes.

Dikformaat

Bij een dikformaat straatsteen (210x70x70mm), welke compleet hol is met aan de buitenzijde volledig gesloten vlakken van 20 mm dik, kan maximaal 153.000 mm³ (170x30x30mm) bespaard worden van de 1.029.000 mm³. De tabel hieronder weergeeft de maximale materiaal besparing die gecreëerd kan worden bij verschillende laagdiktes, waarbij wordt uitgegaan van een compleet holle straatsteen.

Laagdikte (mm)	Inhoud holle ruimte (x1000 mm ³)	Maximale percentage materiaalbesparing (%)
20	153 (170x30x30mm)	14,87
10	475 (190x50x50mm)	46,16
5	720 (200x60x60mm)	69,97
2	897 (206x66x66mm)	87,20

Tabel 5: Maximale materiaalbesparing dikformaat

Waalformaat

Bij een waalformaat straatsteen (210x50x70mm), welke compleet hol is met aan de buitenzijde volledig gesloten vlakken van 20 mm dik, kan maximaal 51.000 mm³ (170x10x30mm) bespaard worden van de 735.000 mm³. De tabel hieronder weergeeft de maximale materiaal besparing die gecreëerd kan worden bij verschillende laagdiktes, waarbij wordt uitgegaan van een compleet holle straatsteen.

Laagdikte (mm)	Inhoud holle ruimte (x1000 mm ³)	Maximale percentage materiaalbesparing (%)
20	51 (170x10x30mm)	6,94
10	285 (190x30x50mm)	38,78
5	480 (200x40x60mm)	65,31
2	625 (206x46x66mm)	85,03

Tabel 6: Maximale materiaalbesparing waalformaat

Keiformaat

Bij een keiformaat straatsteen (200x100x70mm), welke compleet hol is met aan de buitenzijde volledig gesloten vlakken van 20 mm dik, kan maximaal 288.000 mm³ (160x60x30mm) bespaard worden van de 1.400.000 mm³. De tabel hieronder weergeeft de maximale materiaal besparing die gecreëerd kan worden bij verschillende laagdiktes, waarbij wordt uitgegaan van een compleet holle straatsteen.

Laagdikte (mm)	Inhoud holle ruimte (x1000 mm ³)	Maximale percentage materiaalbesparing (%)
20	288 (160x60x30mm)	20,57
10	720 (180x80x50mm)	51,43
5	1.026 (190x90x60mm)	73,29
2	1.242 (196x96x66mm)	88,71

Tabel 7: Maximale materiaalbesparing keiformaat

Bijlage L. Onderbouwing infill patronen

Bij de keuze van een infill gebruikt bij 3D printen, moet er een goede verhouding zijn tussen de krachten en het materiaal. Hierbij is het belangrijk dat een vorm een heel vlak kan opvullen en daarbij vormvast blijft. Een vormvast constructie wordt bereikt als er geen beweging mogelijk is, dus tegen trek- en duwkracht kan. Trekkrachten zijn de krachten die de twee uiteinden uit elkaar trekt en duwkracht zijn de krachten die de twee uiteinden naar elkaar toedruwt.

Een cirkel zou qua materiaalgebruik optimaal zijn, want die heeft de minste oppervlak per inhoud, dus hierbij is het minste materiaal nodig. Cirkels hebben het nadeel dat er geen vlak mee op te vullen is. Bollen kun je dicht op elkaar stapelen, maar er blijft altijd ruimte tussen. Jaren hebben wiskundigen gezocht naar de meest efficiënte stapelwijze, maar pas in 1999 is door wiskundige Thomas Hales bewezen wat de best mogelijke manier is om een oppervlak te vullen met een regelmatige vlakvulling. Een vorm wordt regelmatig genoemd als alle zijden even lang zijn en de hoek tussen elke twee aan elkaar grenzende zijden even groot is. Er zijn exact drie regelmatige betegelingen mogelijk: het vierkant, de gelijkzijdige driehoek en de hexagoon.

Vierkant (hoeken 90°)⁵⁰

Een constructie in de vorm van een vierkant is niet vormvast. In afbeelding 12 is te zien wat er met een vierkant gebeurt als er krachten op komen te staan. De hoeken 1 en 3 komen dicht bij elkaar en de hoeken 2 en 4 gaan verder van elkaar af.

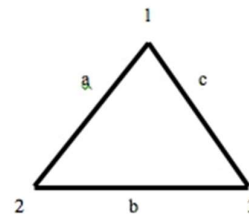


Afbeelding 12: Krachten op een vierkant

Om een vierkant vormvast te maken moet er voor gezorgd worden dat de hoeken op hun plaats blijven, de diagonaal hoeken moeten op dezelfde afstand blijven ten opzichte van elkaar. Als de afstand tussen de hoeken groter wordt, dan komt er een trekkracht te staan op de verbinding die tussen de hoeken geplaatst wordt. Als de afstand tussen de hoeken kleiner wordt, dan komt er een duwkracht te staan op de verbinding die tussen de hoeken geplaatst wordt. Bij de constructie van een niet massieve straatsteen moet er dus gebruik worden gemaakt van materiaal dat zowel tegen trek- als duwkracht bestand is.

Gelijkzijdige driehoek (hoeken 60°)

Een constructie in de vorm van een driehoek is wel vormvast, omdat deze zowel trek- als duwkrachten aan kan. Als in afbeelding 13 zijde a gemaakt is van een materiaal dat tegen trek- en duwkracht kan, dan kan uiteinde 1 en 2 niet naar elkaar toe gedruwd worden en ook niet van elkaar af gaan. Het zelfde geldt voor zijde b met betrekking tot de uiteinden 2 en 3 en zijde c met betrekking tot de uiteinden 3 en 1. Er is dus geen beweging mogelijk, dus is de driehoek vormvast.



Afbeelding 13: Krachten op een driehoek

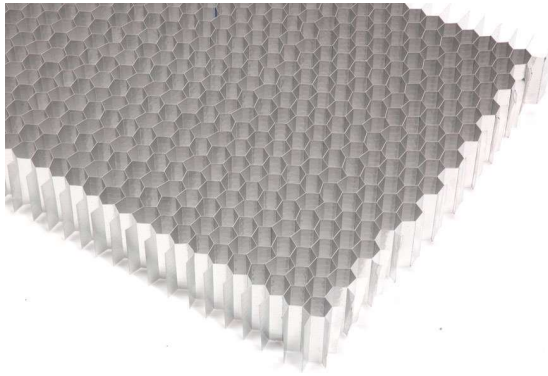
Honeycomb (hoeken 120°)⁵¹

De Honeycomb (regelmatige zeshoek of hexagoon) wordt gezien als een bouwkundig meesterwerk, omdat het de best mogelijke manier is om een oppervlak te vullen met een regelmatige vlakvulling. Deze vorm lijkt het meeste op een cirkel, waarbij het minste materiaal nodig is omdat bij de regelmatige zeshoek de omtrek van de celranden minimaal is.

Binnen een tweedimensionale vlak komt de Honeycomb structuur het beste in aanmerking, omdat deze vorm vormvast is en hierbij het minste materiaal nodig is.

⁵⁰ (Helmussaris, 2016)

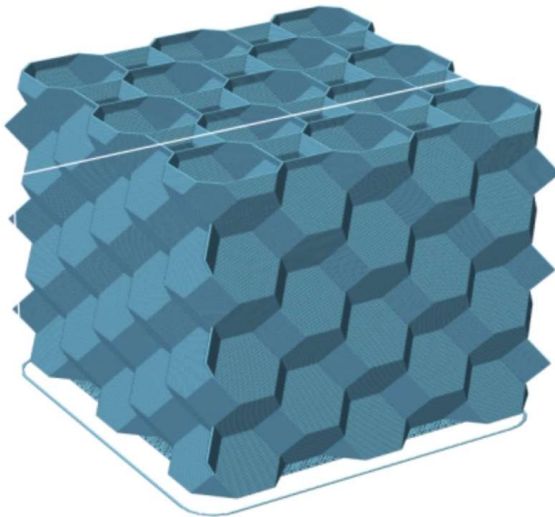
⁵¹ (Stadsbij, 2015)



Om een driedimensionaal vlak in cellen van gelijke volume te verdelen, zodat de oppervlakte van de celranden geminimaliseerd worden, kan als basis (grondvlak) een hexagoon gebruikt worden dat in de ruimte wordt uitgerekt net zoals de bijen de ruimte raat vullend opstapelen.

Afbeelding 14: Hexagoon infill

Binnen de 3D wereld is men steeds op zoek naar het beste infill patroon voor 3D objecten. Slic3R zijn druk bezig om hun 3D Honeycomb ontwerp toe te voegen aan hun software. Zij beweren dat het nieuwe infill patroon, in theorie, maximale sterkte levert over alle assen waarbij het minste materiaal wordt verbruikt.⁵²



Afbeelding 15: 3D Honeycomb infill (Slic3R)

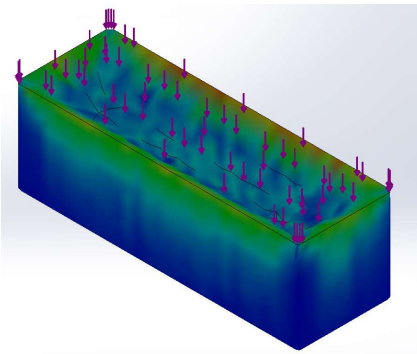
⁵² (Graham, M., 2015)

Bijlage M. Resultaten simulaties infill patronen

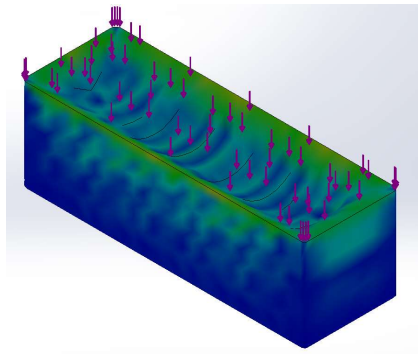
Doordat de gebruikte SolidWorks versie niet beschikt over de materiaalkeuze beton, maar dit geen factor is die van invloed is op de te onderzoeken resultaten, is een willekeurig vast materiaal (aluminium) gekozen.

Om tijdens de simulatie de verschillen tussen de te infill patronen te kunnen analyseren, moet de kracht die erop uitgeoefend wordt groot genoeg zijn. Voor een realistische simulatie is gekozen de straatsteen te belast met een kracht van 57.500N, wat gelijk is aan de maximale belasting per zijde van een as op het wegdek.⁵³

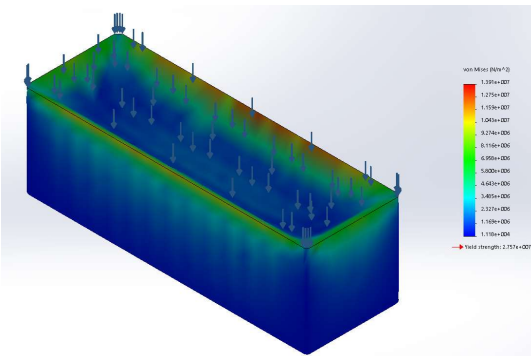
De Von Mises-spanning biedt de mogelijkheid om de krachten binnen een object te visualiseren. Hiermee wordt een waarneembaar verschil aangetoond van hoe de kracht zich verspreid tussen een object met een infill dat vanuit de Z-as wordt geprint ten opzichte van een straatsteen die vanuit de X-as of Y-as wordt geprint. Bij printen over de Z-as gaat de kracht recht omlaag, terwijl bij printen over de X-as een golvende beweging te zien is.



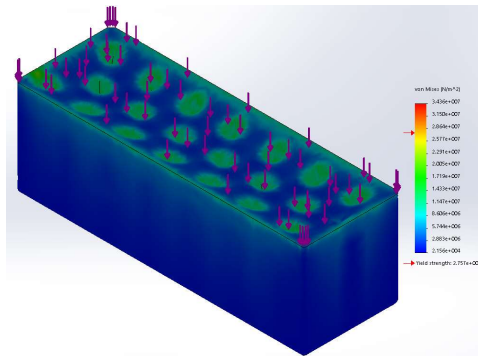
Afbeelding 16: SolidWorks simulatie 2D Honeycomb Z-as



Afbeelding 17: SolidWorks simulatie 2D Honeycomb X-as



Afbeelding 18: SolidWorks simulatie fijn infill patroon

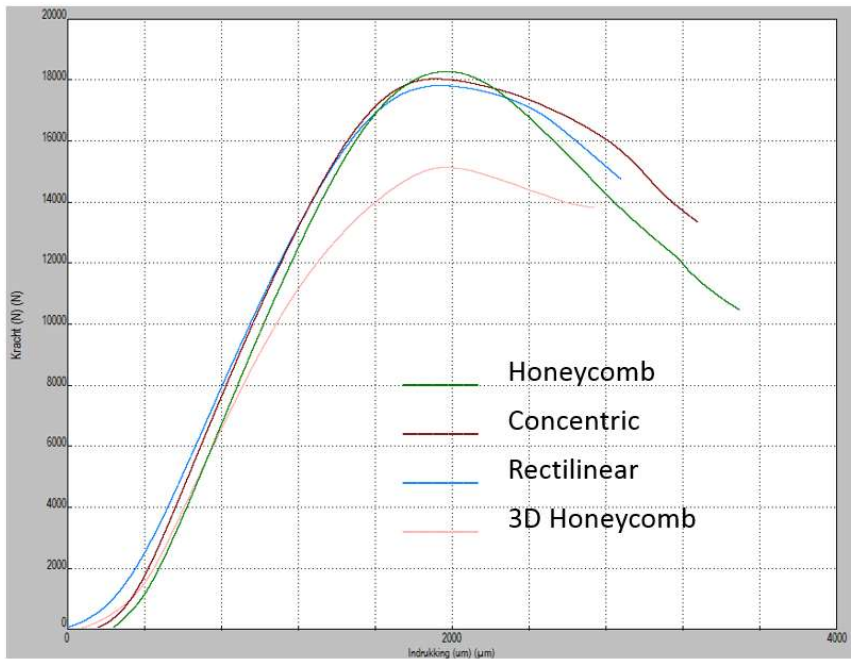


Afbeelding 19: SolidWorks simulatie grof infill patroon

⁵³ (Hersbach, C., Rutten, E., Rus, D. & Hordijk, J., 2011)

Bijlage N. Resultaten onderzoek infill modellen

Om de sterkte van infill patronen te onderzoeken zijn met behulp van een 3D printer vier kunststof cilinders vanuit de Z-as geprint (met een doorsnede van 40mm en een hoogte van 50 mm) met vier verschillende infill patronen (2D Rectilineair, 2D Concentric, 2D Honeycomb en 3D Honeycomb) allen geprint met 30% infill. Met behulp van een drukbank is in de praktijk onderzocht hoeveel kracht nodig is voordat vervorming van de cilinders optreedt. Alle cilinders konden een kracht van circa 18.000N (1.800 kilo) aan voordat plastische vervorming plaatsvond, met uitzondering van de 3D Honeycomb die met een kracht van circa 15.000N (1.500 kilo) vervormde.



Afbeelding 20: Grafiek infillpatronen



Afbeelding 21: Voor en na plastische vervorming

Een 3D infill patroon blijkt niet geschikt voor straatstenen omdat de bij straatstenen de grootste krachten uit één richting komen. Deze patronen zijn meer geschikt voor voorwerpen waarbij gelijke krachten vanuit verschillende richtingen komen.

Bijlage O. Schatting kostprijs

Uitgangspunt bij de berekening van de kostprijs bij traditionele straatstenen en bij duurzamere straatstenen is het scenario: een straat van 1.260 m², welke bestraat wordt met dikformaat straatstenen. Van de dikformaat straatstenen van Bleijko gaan er 68 stenen in een m², welke 2,70 kg/stuk per stuk wegen⁵⁴. Voor het bestraten zijn dus 85.680 stenen nodig met een totaal gewicht van 231.336 kg (afgerond 235 ton). De grondstoffen van Bleijko worden getransporteerd middels een binnenvaartschip over 160 km. De vervoerskosten van ruwe mineralen met een binnenvaartschip over deze afstand is € 4,00 per ton⁵⁵.

Bij het doorrekenen van het scenario resulteert dit in de volgende bedragen bij traditionele straatstenen:

Kostenpost	Deel (%)	Bedrag
Energie en brandstof	30%	€ 2.350
Grondstoffen	38%	€ 2.977
Transport	12%	€ 940
Overige kosten zoals arbeid en onderhoud	20%	€ 1.567
Totaal	100%	€ 7.834

Tabel 8: Schatting kostprijs scenario bij traditionele straatstenen

Bij het schatten van de kostprijs voor de duurzamere straatstenen, wordt er vanuit gegaan dat alle drie de concepten worden toegepast:

1. Lignine: bij de productie van de onderlaag wordt 1 tot 5% van het betonmengsel vervangen door lignine. Hierdoor zullen ook de transportkosten van de huidige grondstoffen met 1 tot 5% afnemen. Echter moeten de natuurlijke vezels, met een hoge concentratie lignine, vanaf een lokale plaats getransporteerd worden naar de fabriek, waardoor de totale transportkosten effectief met 1 tot 3 % afnemen.
2. Mossel- en oesterschelpen: een betonmengsel wordt samengesteld door 1 deel cement, 2 delen zand en 3 delen grind. De prijzen voor cement, zand en grind verhouden zich respectievelijk als 60%, 20% en 20%.⁵⁶ Van het granulaat (zand en de grind) wordt 1 tot 5% vervangen door mossel- en oesterschelpen, waardoor de kosten voor de grondstoffen afnemen met 1 tot 3%.
Hierdoor zullen ook de transportkosten van zand en grind met 1 tot 5% afnemen, maar doordat de schelpen ook moeten worden aangevoerd vanaf de Oosterschelde, het Veerse Meer of het Grevelingenmeer zullen de totale transportkosten effectief met 1 tot 3 % afnemen. Doordat een nieuwe machine nodig is, om het materiaal te vermalen, zullen de kosten voor het verwerken van het granulaat met 0 tot 2 % toenemen.
3. 3D printen: bij het printen worden geen massieve straatstenen geproduceerd, maar een infill gebruikt. Hierdoor kan 10 tot 25% bespaard worden op grondstoffen, waardoor ook de transportkosten met 10 tot 25% afnemen. Door het inzetten van meerdere 3D printers, en eventueel personeel voor het bedienen ervan, zullen de kosten voor het produceren van de straatsteen vermoedelijk met 1 tot 5% toenemen.

In onderstaande tabel is schematisch per kostenpost het effect per concept op de kostprijs van de onderlaag weergegeven.

Concept	Kosten Grondstoffen	Kosten Transport	Overige kosten
Lignine	-1 tot -5%	-1 tot -3%	-
Mossel- en oesterschelpen	-1 tot -3%	-1 tot -3%	0 tot +2%
3D printen	-10 tot -25%	-10 tot -25%	+1 tot +5%

Tabel 9: Schatting kostprijs veranderingen

⁵⁴ (Bleijko, 2016)

⁵⁵ (Policy Research, 2006)

⁵⁶ (onlinebetonbestellen.nl, 2016)

De dikformaat straatstenen uit het scenario zijn 80 mm dik, waarvan de toplaag 10 mm is en de onderlaag 70 mm. De te nemen maatregelen hebben alleen effect op de onderlaag, waarbij de procentuele verandering (ten opzichte van de traditionele straatsteen) per kostenpost als volgt wordt vastgesteld:

1. Energie en brandstof: blijven nagenoeg gelijk;
2. Grondstof = $\frac{1}{8}$ (toplaag) + $\frac{7}{8}$ (onderlaag) * (100% – 3%; gemiddelde besparing ten gevolge van lignine) * (100% – 2%; gemiddelde besparing t.g.v. schelpen) * (100% – 17,5%; gemiddelde materiaalbesparing bij 3D printen) = 81%, dus 19% besparing;
3. Transport = $\frac{1}{8}$ (toplaag) + $\frac{7}{8}$ (onderlaag) * (100% – 2%; gemiddelde besparing ten gevolge van lignine) * (100% – 2%; gemiddelde besparing t.g.v. schelpen) * (100% – 17,5%; gemiddelde materiaalbesparing bij 3D printen) = 82%, dus 18% besparing;
4. Percentage overige kosten = $\frac{1}{8}$ (toplaag) + $\frac{7}{8}$ (onderlaag) * (100% + 1%; gemiddelde toename t.g.v. schelpen) * (100% + 3%; gemiddelde toename bij 3D printen) = 104%, dus 4% toename.

Bij het doorrekenen van het scenario met duurzamere straatstenen resulteert dit in de volgende bedragen:

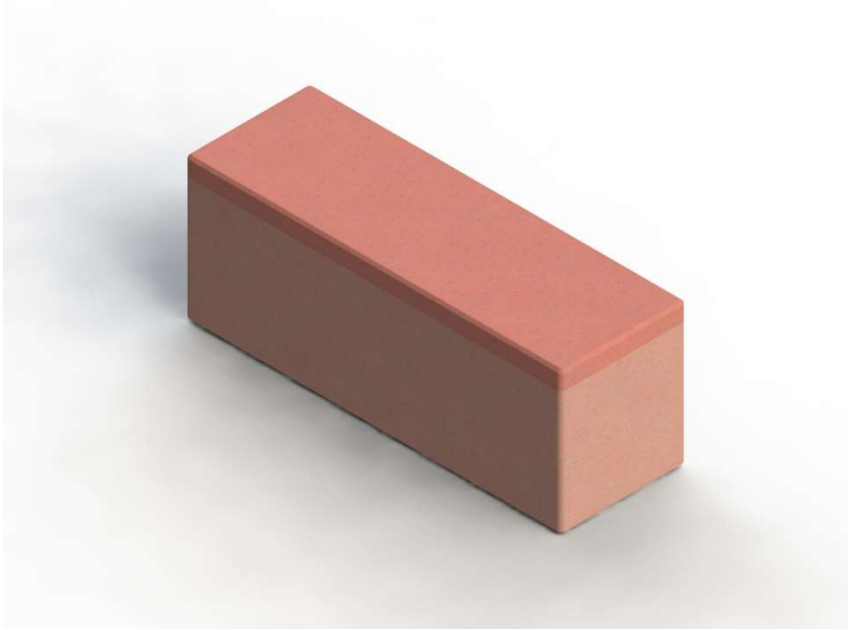
Kostenpost	Traditionele straatsteen	Verandering (uit bovenstaande berekening)	Duurzamere straatsteen
Energie en brandstof	€ 2.350	0%	€ 2.350
Grondstoffen	€ 2.977	-19%	€ 2.411
Transport	€ 940	-18%	€ 771
Overige kosten zoals arbeid en onderhoud	€ 1.567	+4%	€ 1.630
Totaal	€ 7.834	-9%	€ 7.162

Tabel 10: Schatting kostprijs scenario bij duurzamere straatstenen

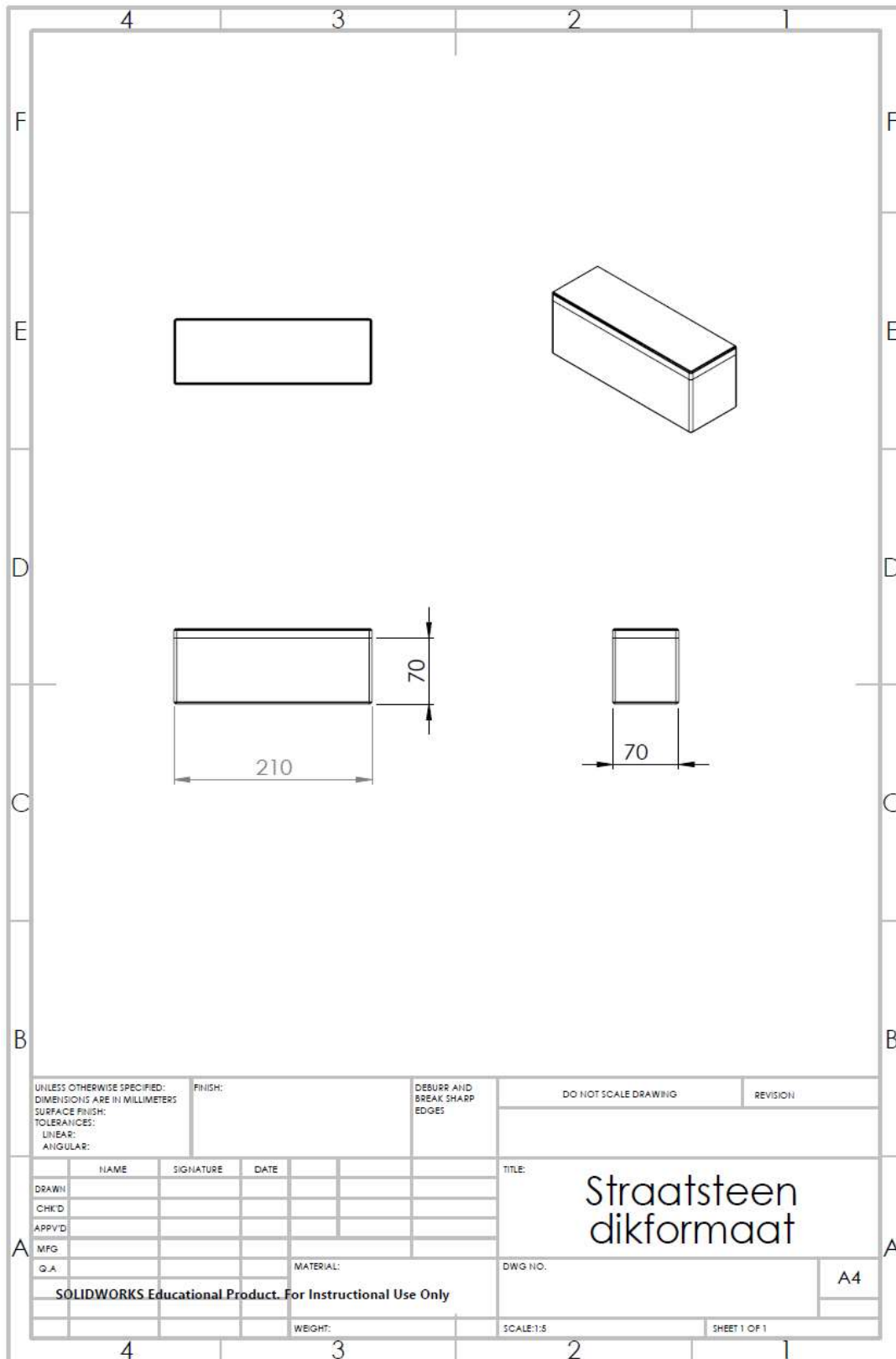
Bijlage P. Productdocumentatiepakket

De maattekeningen zijn gemaakt voor de drie standaard formaten: een dikformaat straatsteen (210x70x70mm), een waalformaat straatsteen (210x50x70mm) en een keiformaat straatsteen (200x100x70mm). Op de maattekeningen is de onderlaag voorzien van een toplaag van 10 mm hoog, waarvan de samenstelling niet verschilt met de traditionele straatstenen waardoor er geen wijzigingen zijn in kleurvastheid, slijtbestandheid en vorstdooizoutbestandheid. De toplaag wordt los gevormd, waarna deze met de onderlaag wordt samen getrild.

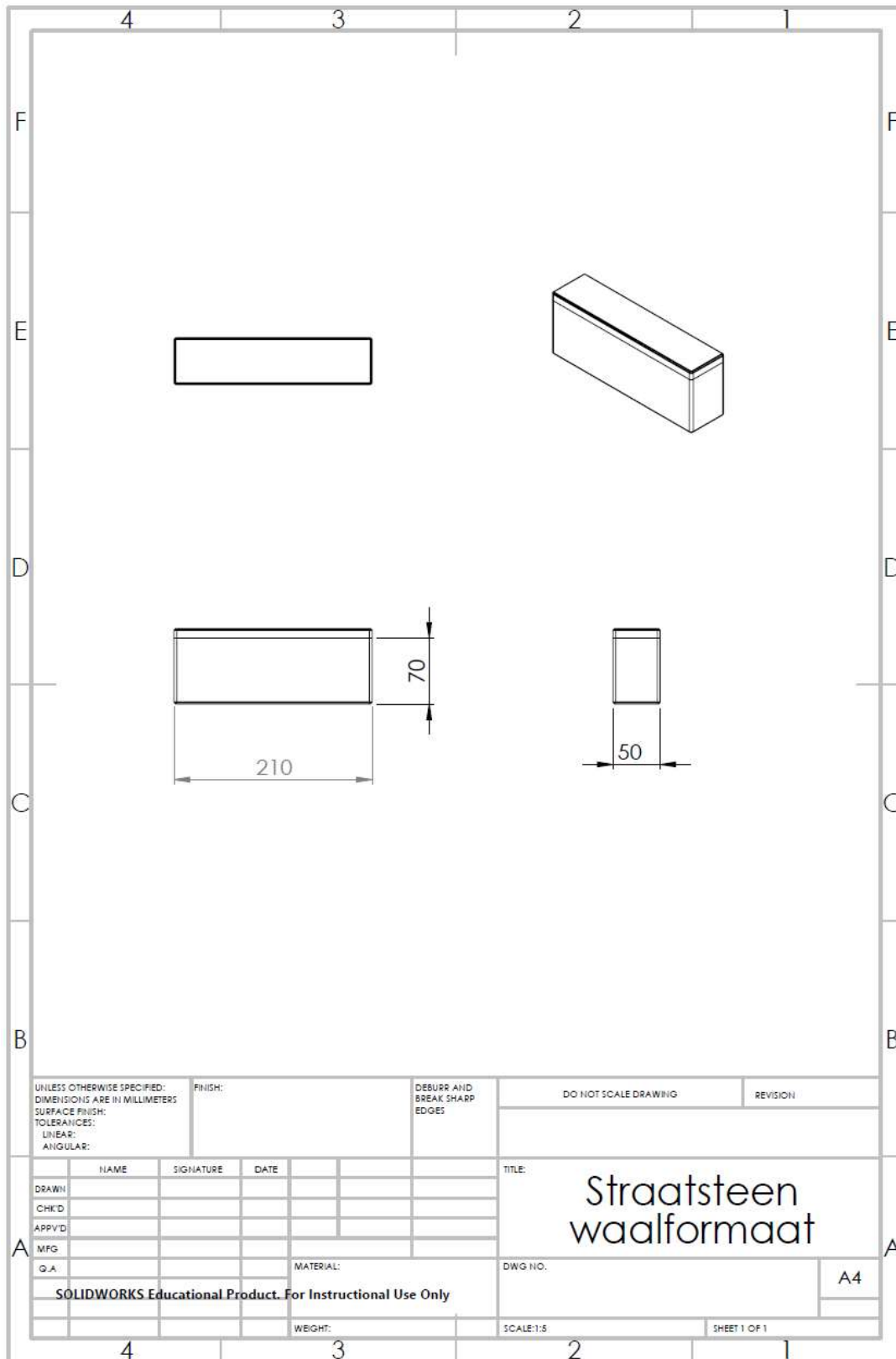
Deze tekeningen kunnen ook gebruikt worden richting een producent van bijvoorbeeld 3D betonprinten.



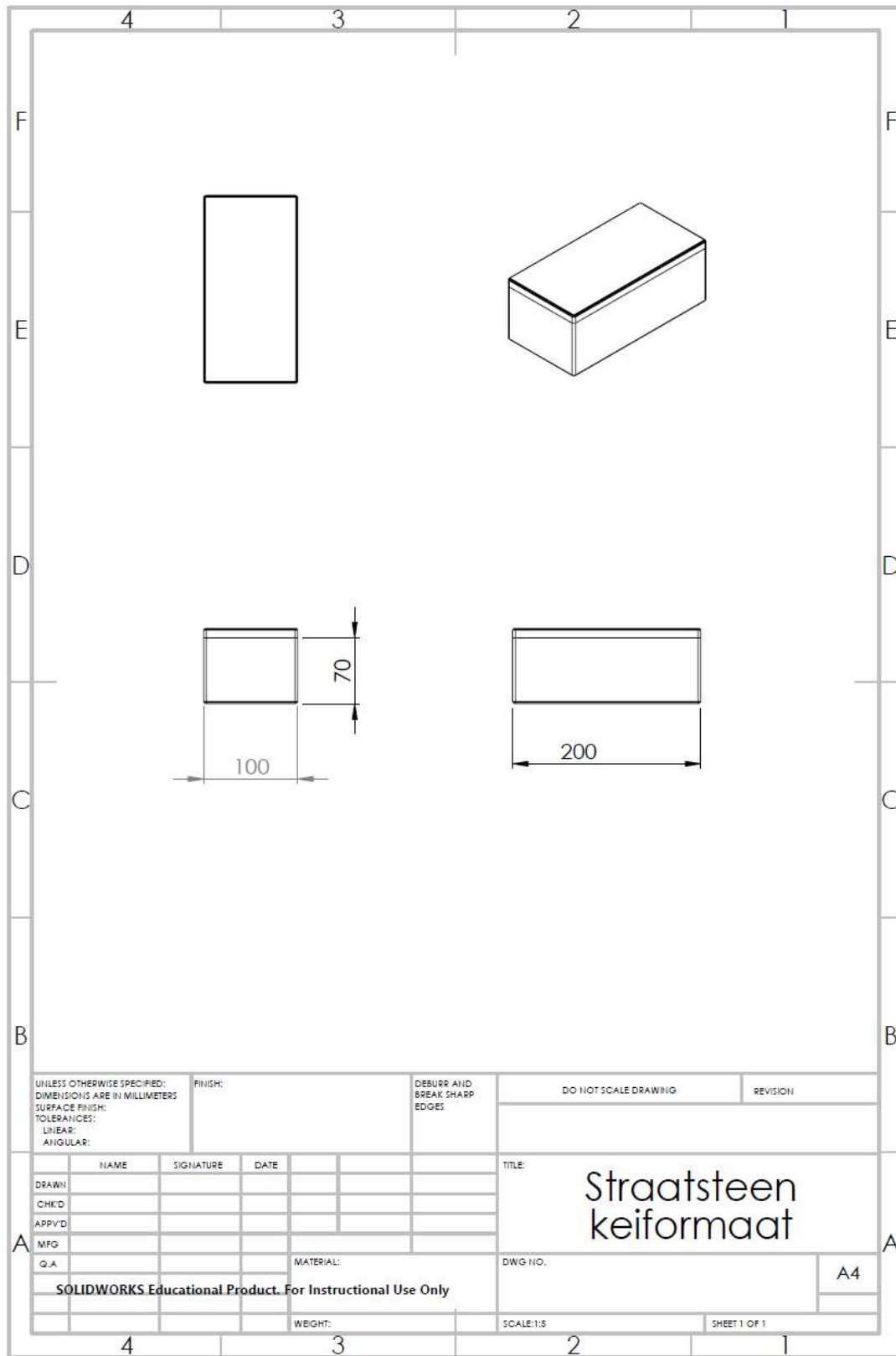
Afbeelding 22: Straatsteen 3D model



Afbeelding 23: Maattekening straatsteen dikformaat



Afbeelding 24: Maattekening straatsteen waalformaat



Afbeelding 25: Maattekening straatsteen keiformaat

Bronnenlijst

- Agentschap Wegen en Verkeer. (2009). *Handleiding voor het ontwerp en de uitvoering van verhardingen in betonstraatstenen*. Geraadpleegd op 26 september 2016
- Aggregate Industries. (2016). *Lafarge Cement*. Geraadpleegd op 26 september 2016, van Aggregate Industries: <http://www.aggregate.com/our-businesses/lafarge-cement/>
- 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>
- Bio-Adhesive Alliance. (2016). *Bio-adhesive from Biomass: A Sustainable Alternative for Petroleum Based Adhesive*. Geraadpleegd op 20 september 2016, van baa-usa.com: <http://www.baa-usa.com/>
- Biobased Bouwen. (2016). *Hennepbeton – DunAgro*. Geraadpleegd op 20 september 2016, van biobasedbouwen.nl: <http://www.biobasedbouwen.nl/producten/hempcal-hennepbeton/#tab-id-3>
- bioMASON. (2016). *bioMASON built with nature*. Geraadpleegd op 21 september 2016, van bioMason.com: <http://biomason.com/>
- Bleijko. (2015, 13 oktober). *Bleijkobright® ... Duurzaam vernieuwd!* Geraadpleegd op 21 september 2016, van Bleijko.nl: <http://www.bleijko.nl/nl/newsdetail/139/Bleijkobright-2b-23174-3b--Duurzaam-vernieuwd!.aspx>
- Bleijko. (2016). *Betonstraatstenen dikformaat*. Geraadpleegd op 28 november 2016, van Bleijko.nl: <http://www.bleijko.com/nl/productdetail/1/2/1/29/31/60/75/1055/Tuin-Nederland-Bestration-Betonstraatstenen-Dikformaat-BSS-Grijs-21x6-2c8x8-Dikformaat-21x6-2c8x8--grijs-.aspx>
- Boneschansker, H.J. & Hoogland, M. (2015). *Ketenanalyse scope 3: betonstraatstenen*. Geraadpleegd op 30 september 2016, van <http://www.hollandgroenwerken.nl/BESTANDEN/Ketenanalyse%20Betonstraatstenen%20jan.%202015%20dd%2017-02-2015.pdf>
- 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/>
- BREEAM NL. (2016). *Wat is BREEAM-NL?* Geraadpleegd op 23 september 2016, van breeam.nl: <https://www.breeam.nl/>
- Brownell, B. (2016, 19 januari). *Five Building Materials to Watch in 2016*. Geraadpleegd op 20 september 2016, van Eco Building Pulse: http://www.ecobuildingpulse.com/products/five-building-materials-to-watch-in-2016_s
- Bylandt. (2016). *Sierbestrating is op en top duurzaam*. Geraadpleegd op 22 september 2016, van bijlandsierbestrating.nl: <https://bylandtsierbestrating.nl/assortiment/op-en-top-duurzaam>
- 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. (2010). *Mythe of Mogelijkheden*. Geraadpleegd op 30 oktober 2016
- Cement&BetonCentrum. (2016, maart). *Geopolymeren*. Geraadpleegd op 7 oktober 2016, van cementenbeton.nl: <http://www.cementenbeton.nl/c-bc/position-papers/geopolymeren>
- Chu, J. (2016, 25 mei). *Finding a new formula for concrete*. Geraadpleegd op 20 september 2016, van news.mit.edu: <http://news.mit.edu/2016/finding-new-formula-for-concrete-0526>

- CyBe Constructruction. (2016). *Redefining Construction by enabling 3Dconcrete printing!*
Geraadpleegd op 4 oktober 2016, van 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 Hoop. (2016, 19 juli). *CO2-emissie De Hoop Terneuzen*. Geraadpleegd op 25 september 2016, van dehoop.nl: <http://www.dehoop.nl/nl/actueel/bericht:co2-emissie-de-hoop-terneuzen.htm>
- De Vereniging van Ondernemingen van Betonmortelfabrikanten. (2016). *Prestatie-eisen van beton*. Geraadpleegd op 26 september 2016, van VOBn.nl: <http://www.vobn-beton.nl/beton/beton/prestatie-eisen-beton>
- Den Ouden Groenrecycling B.V. (2016). *Inname Groene Reststromen*. Geraadpleegd op 19 oktober 2016, van Den Ouden: <https://nl.denoudengroep.com/diensten/inname-groene-reststromen>
- Design other 90 network. (2011, 11 oktober). *EcoFaeBrick*. Geraadpleegd op 20 september 2016, van designother90.org: <http://www.designother90.org/solution/ecofaebriek/>
- 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>
- Ecocem. (2016). *Ecocem Next Generation Cement*. Geraadpleegd op 22 september 2016, van ecocem.ie: <http://www.ecocem.ie/>
- 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>
- Excluton. (2016). *Riezebos*. Geraadpleegd op 24 september 2016, van excluton.nl: <http://gww.excluton.nl/projecten/riezebos>
- 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/>
- Griggs, M. (2016, 28 juni). *Roads Paved With Pig Manure Could Mean A Cleaner Future*. Geraadpleegd op 20 september 2016, van popularscience.com: <http://www.popsci.com/roads-paved-with-pig-manure-could-mean-cleaner-future>
- 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/>
- Helmussaris. (2016). *Theorie constructies*. Geraadpleegd op 2 november 2016, van helmussaris.nl: <http://www.helmussaris.nl>
- Hersbach, C., Rutten, E., Rus, D. & Hordijk, J. (2011). *Overbeladingsschade op provinciale weg*. Geraadpleegd op 11 november 2016, van Verkeerskunde.nl: <http://www.verkeerskunde.nl/Uploads/2011/8/005-Vk-034-Overbelading-LR.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>
- Het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (2016). *Wat is LCA?* Geraadpleegd op 22 september 2016, van RVIM.nl: http://www.rivm.nl/Onderwerpen/L/Life_Cycle_Assessment_LCA/LCA/Wat_is_LCA
- ICR Research. (2011, 22 november). *Celitement – an alternative*. Geraadpleegd op september 23, 2016, van CemNet.com: <http://www.cemnet.com/Articles/story/39899/celitement-an-alternative.html>
- Indaver. (2016). (Indaver.nl, Redacteur) Geraadpleegd op 19 oktober 2016, van <http://www.indaver.nl/nl/home/>
- J. Timmers & M. van der Waals. (2009). *Het ontwerpproces in de praktijk*. Amsterdam: Pearson Education.
- Joostdevree. (2016). *baksteen, fabricage*. Geraadpleegd op 28 september 2016, van joostdevree.nl: http://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/baksteen_fabricage.htm
- Kiwa. (2016, 1 mei). *Beoordelingsrichtlijn Voor de KOMO productcertificaat voor betonstraatstenen*. Geraadpleegd op 30 september 2016, van kiwa.nl: <http://www.kiwa.nl/upload/BRL/BRL%202312.pdf>
- Kley, M. van der. (2016). *project NEXT*. Geraadpleegd op 13 oktober 2016, van michielvanderkley.nl: <http://www.michielvanderkley.nl/next/project-next/>
- Kok, L. (2016, 17 augustus). *Published on: 17-Aug-2016*. Geraadpleegd op 20 september 2016, van ntu.edu: <http://www.ntu.edu.sg/Pages/home.aspx>
- Liverani, S. (2016, 8 januari). *Martian concrete' could be key to future human colonization on Mars*. Geraadpleegd op 20 januari 2016, van ceramics.org: <http://ceramics.org/ceramic-tech-today/martian-concrete-could-be-key-to-future-human-colonization-on-mars>
- Martens Cleaning. (2016). *Inzamelen maritieme afvalstoffen*. Geraadpleegd op 24 oktober 2016, van martenscleaning.nl: <http://www.martenscleaning.nl/nl/diensten/inzamelen-maritieme-afvalstoffen.htm>
- Materia. (2013, 31 mei). *Oyster Shell Aggregate*. Geraadpleegd op 11 oktober 2016, van Materia.nl: <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/>
- McDonough, W. & Braungart, M. (2002). *Cradle To Cradle: Remaking The Way We Make Things*. North Point Pr. Geraadpleegd op 25 augustus 2016
- Miles, P. (2012, 14 februari). *Eco cement: the world's favourite building material gets a green-over*. Geraadpleegd op 21 september 2016, van Ecologist: http://www.theecologist.org/green_green_living/home/1243687/eco_cement_the_worlds_favourite_building_material_gets_a_greenover.html
- MKB. (2016). *Wat is Cradle to Cradle?* Geraadpleegd op 22 september 2016, van mkb servicedesk.nl: <http://www.mkb servicedesk.nl/4024/wat-cradle-cradle.htm>
- 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
- onlinebetonbestellen.nl. (2016). *Prijsvergelijk*. Geraadpleegd op 28 november 2016, van onlinebetonbestellen.nl: <http://www.onlinebetonbestellen.nl/page/prijsvergelijk>
- 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/>
- Orgabouw. (2016, 1 september). *Circulaire economie*. Opgehaald van Orgabouw.nl: <http://www.orga-bouw.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>
- Plastemart. (2012, 29 oktober). *A new laser-activated bio-adhesive polymer*. Geraadpleegd op 20 september 2016, van Plastemart.com: http://www.plastemart.com/plastic-facts-information.asp?news_id=22845&news=A-new-laseractivated-bioadhesive-polymer
- Policy Research. (2006). *Vervoerskosten*. Geraadpleegd op 29 november 2016, van bureauvoorlichtingbinnenvaart.nl: <http://www.bureauvoorlichtingbinnenvaart.nl/vervoeren/kosten/vervoerskosten>
- 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/>
- Stadsbij. (2015, 1 maart). *De wiskunde van de honingraat*. Geraadpleegd op 2 november 2016, van stadsbij.com: <http://www.stadsbij.com/de-wiskunde-van-de-honingraat/>
- 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/>
- Sthankiya, A. (2015, 25 mei). *UBCO researchers turn glass into cement*. Geraadpleegd op september 20, 2016, van KelownaNow: https://www.kelownanow.com/watercooler/news/news/UBCO/16/05/25/UBCO_researchers_turn_glass_into_cement/
- SUEZ Recycling and Recovery Netherlands . (2016). *Over SUEZ*. Geraadpleegd op 19 oktober 2016, van SUEZ: <http://www.sita.nl/>
- Supplair. (2016). *Flexible Solutions Through Suppliers*. Geraadpleegd op 25 augustus 2016, van Supplair.com: <http://www.supplair.com/suppliers/local-sourcing>
- 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>
- Trouw. (2010, 26 augustus). *Baksteen is groener dan beton*. Geraadpleegd op 26 september 2016, van <http://www.trouw.nl/tr/nl/4332/Groen/article/detail/1122124/2010/08/26/Baksteen-is-groener-dan-beton.dhtml>
- Tschegg, E.K. (2012). *Fracture energy of natural fibre reinforced concrete*. University of Technology Vienna. Geraadpleegd op 8 oktober 2016, van <http://www.journals.elsevier.com/construction-and-building-materials/most-downloaded-articles>

- TU Delft. (2008). *Application of bacteria as self-healing agent for the development*. Geraadpleegd op 24 augustus 2016
- Ubbels, H. (2016). *Wat bak jij ervan?* Geraadpleegd op 22 september 2016, van org.uva.nl: http://www.org.uva.nl/e-klassenpreview/januari/SCH-REKV/91__productie_van_cement.html
- v.d. Bosch Beton. (2016, 10 maart). *Inspiratie: Concepten*. Geraadpleegd op 30 september 2016, van vdboschbeton.nl: <http://www.vdboschbeton.nl/concept/reduton>
- van Gansewinkel. (2016). *Strategie*. Geraadpleegd op 19 oktober 2016, van van Gansewinkel: <https://www.vangansewinkel.nl/groep/over-ons/strategie>
- Van Kemenade Bestratingen. (2016). *Advies voor bestrating*. Geraadpleegd op 26 september 2016, van vankemenadebest.nl: <http://www.vankemenadebest.nl/advies>
- Venturewell. (2014, 25 november). *Profile: I-Corps™ Team Bio-Adhesive Alliance*. Geraadpleegd op 20 september 2016, van Venturewell.com: <https://venturewell.org/profile-i-corps-team-bio-adhesive-alliance/>
- VITO. (2016). Geraadpleegd op 26 oktober 2016, van VITO.be: <https://vito.be/nl>
- VOBN. (2015, 13 mei). *Productie op de betoncentrale*. Geraadpleegd op 19 september 2016, van vobn-beton.nl: <http://www.vobn-beton.nl/beton/beton/productie-op-de-betoncentrale>
- 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>
- Wikipedia. (2016, 24 september). *Beton*. Geraadpleegd op 26 september 2016, van <https://nl.wikipedia.org/wiki/Beton>
- Zeeuwse Reinigingsdienst. (2016). *Milieustraten Locaties*. Geraadpleegd op 19 oktober 2016, van ZRD.nl: <https://www.zrd.nl/milieustraten/locaties.htm>
- 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>