

Biobased additieven in aardvochtige betonstraatstenen

Door: Rémon Nagelmaeker en Ruben
van Wijk

Contactgegevens

Naam: Rémon Nagelmaeker
E-mail: r.nagelmaeker@student.han.nl
Studentnummer: 1623179
Telefoonnummer: 06-37172163
Functie binnen onderzoek: afstudeerder

Naam: Ruben van Wijk
E-mail: rd.vanwijk@student.han.nl
Studentnummer: 1616852
Telefoonnummer: 06-38461758
Functie binnen onderzoek: afstudeerder

Naam: Tim van der Wardt
E-mail: tim.vanderwardt@han.nl
Werkfunctie: Docent Constructies
Functie binnen onderzoek: afstudeerbegeleider 1
Telefoonnummer: 06-31990006

Naam: Anaïs Passera
E-mail: anais.passera@han.nl
Werkfunctie: Docent Biobased Bouwen
Functie binnen onderzoek: afstudeerbegeleider 2
Telefoonnummer: 06-27963558

Naam: Rob Hoogendoorn
E-mail: r.hoogendoorn@morssinkhof-groep.nl
Werkfunctie: Kwaliteitsmanager
Functie binnen onderzoek: bedrijfsbegeleider 1
Telefoonnummer: 06-12935362

Naam: Geert Morssinkhof
E-mail: g.p.morssinkhof@morssinkhof-groep.nl
Werkfunctie: Coördinator Productinnovatie en Duurzaamheid
Functie binnen onderzoek: bedrijfsbegeleider 2
Telefoonnummer: 06-16774062

Managementsamenvatting

In dit onderzoek is voor de Morssinkhof Groep in Malden onderzocht of het mogelijk is om cement in aardvochtig beton gedeeltelijk te vervangen door een biobased additief. De Morssinkhof Groep verlangt namelijk naar het omlaag brengen van de MKI-waarde van hun bestratingsmateriaal. Om hierachter te komen is er een onderzoek opgesteld. Aardvochtig beton heeft een lagere watercement-factor en een andere mengselsamenstelling dan traditioneel beton. Hierdoor kunnen ze na ontkisting blijven staan in ca. 15 seconden.

Het doel van het onderzoek is het testen van tenminste drie geschikte additieven om cement gedeeltelijk mee te vervangen in aardvochtig betonnen straatstenen. Hiervoor is onderzoek gedaan naar de invloed van diverse biobased additieven op de fysische eigenschappen van beton. Deze eigenschappen en beschikbaarheid zijn als criteria meegenomen in een keuzematrix om hieruit een selectie te kunnen maken van potentiële additieven die getest en verder onderzocht zullen worden.

Uit de keuzematrix zijn drie additieven naar voren gekomen met een hoge potentie om de vereiste splijtsterkte van $3,6 \text{ N/mm}^2$ te kunnen behalen. Deze additieven zijn houtas, stro-as en hazelnootdoppoeder. De additieven zijn verwerkt in aardvochtige betonmonsters variërend van 5% tot 15% cementvervanging. Bij een aantal monsters met deze percentages aan biobased additief zijn daarnaast monsters gemaakt waar meer water aan is toegevoegd, omdat de additieven veel water opnemen. Deze opname van water door het additief resulteert in sterkteverlies door de verstoring van de hydratatie van het cement met het water. De monsters zijn na 7 dagen en na 35 dagen op splijtsterkte getest.

Uit de onderzoekresultaten is gebleken dat monsters met hazelnootdoppoeder en stro-as niet aan de vereiste splijtsterkte van $3,6 \text{ N/mm}^2$ na 35 dagen uitharding voldoen volgens de NEN 1338. Houtas haalt bij 5% vervanging wel de vereiste splijtsterkte en nadert deze bij 15% vervanging. Mogelijk kunnen alle houtas monsters door een verbeterd recept en verbeterde verwerkingsomstandigheden de vereiste splijtsterkte halen. Gezien er veel vraag is naar de stenen van de Morssinkhof Groep is de wens dat de splijtsterkte van $3,6 \text{ N/mm}^2$ al bereikt is na 7 dagen. Dit wordt bij alle monsters niet behaald.

Naast de splijtsterkte is ook de impact op het fabricageproces onderzocht. Hierbij is geconcludeerd dat enorme aanpassingen niet nodig zullen zijn. In basis moet het machinerecept en mengselrecept aangepast worden op de additieven. Ook kunnen de stenen door een langere uithardingstijd niet na 24 uur en minder hoog gestapeld worden. Stro-as stuift extreem op en moet met uiterste voorzichtigheid toe worden gevoegd aan het mengsel. Hazelnootdoppen moeten eerst tot poeder vermalen worden, voordat het kan worden toegepast in het fabricageproces. Gezien er geen leverancier voor hazelnootdoppoeder is, moet er voor het fijnmalen van de hazelnootdoppen apparatuur worden aangeschaft.

Daarnaast zijn de CO₂-impact en de theoretische beschikbaarheid onderzocht van de additieven. Bij het verbranden van stro en hout komt veel CO₂ in de atmosfeer terecht. Bij de groei van stro en hout wordt deze CO₂ weer opgenomen. Hierdoor worden houtas en stro-as door de EU en de Nederlandse overheid gezien als CO₂-neutrale bron, waarbij het verwerken en transport niet mee is genomen. Hazelnootdoppen nemen tijdens hun groei ook CO₂ op. Deze zouden vóór het vermalen en transporteren als CO₂-negatief beschouwd kunnen worden. Houtas is ruimschoots beschikbaar om aan de productiecapaciteit van de Morssinkhof Groep te voldoen. Stro-as is theoretisch gezien genoeg beschikbaar, maar stro heeft te veel toepassingen waardoor de exacte reststroom niet goed in te schatten is. Hazelnootdoppen blijken te weinig beschikbaar op de Nederlandse markt om aan de productiecapaciteit te voldoen.

Qua regelgeving kan enkel houtas aan de vereiste splijtsterkte volgens de NEN-norm voldoen. Overige testen zoals testen voor weersbestendigheid, slijtbestandheid en glij/slipweerstand zouden nog uit moeten worden gevoerd om zekerheid te krijgen dat er aan de NEN-norm voldaan kan worden. Hetzelfde geldt voor de verplichtingen rondom het KOMO-certificaat. Alle additieven kunnen een EPD-certificaat, waarin de milieu-impact vermeld staat, verkrijgen. Enkel hazelnootdoppoeder kan een ISCC-certificaat verkrijgen. Geen van de additieven voldoen aan de eisen van het RSB-certificaat.

Hieruit kan geconcludeerd worden dat enkel houtas nog een vervolgonderzoek waard is voor gedeeltelijke vervanging van cement. Het kan voldoen aan de vereiste splijtsterkte, komt ruimschoots vrij bij biomassacentrales en verlaagt de CO₂-impact van het product. Bij een vervolgonderzoek zou dus nog gekeken moeten worden of door verbeterde verwerkingsomstandigheden en een verbeterd recept een hogere splijtsterkte en/of vervangingspercentage kan worden gerealiseerd.

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting.....	3
Inleiding.....	6
1. Eisen	7
1.1 Aardvochtig beton & receptuur	7
1.2 Eisen en wensen Morssinkhof Groep.....	9
2. Keuze biobased additief	12
2.1 Welke biobased additieven zijn er voor beton?.....	12
2.2 Criteria keuzematrix biobased additieven	13
2.3 Keuzematrix/Keuzetabel biobased additief	17
2.4 Uitleg keuze additieven	18
3. Testfase	19
3.1 Voorbereiding	19
3.2 Uitvoering.....	22
3.3 Resultaten	26
3.4 Vergelijking.....	27
4. Productieproces.....	28
4.1 Huidig productieproces.....	28
4.2 Benodigde aanpassingen	30
5. Milieu-impact & theoretische beschikbaarheid	31
6. Certificering en regelgeving.....	32
6.1 Verplichte regelgeving.....	32
6.2 Gewenste certificering	33
7. Conclusie, discussie en aanbevelingen.....	35
7.1 Conclusie	35
7.2 Discussie.....	36
7.3 Aanbevelingen.....	37
Executive Summary	38
8. Bibliography.....	40

Inleiding

Morssinkhof Groep is het moederbedrijf van Morssinkhof Infra, Brinkman Baksteencentrum en Tuinvisie. Morssinkhof Groep legt de basis voor een stabiele, aantrekkelijke en toekomstbestendige leefomgeving. In opdracht van de Morssinkhof Groep zijn twee studenten van de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen (Hierna HAN) intern betrokken geweest bij een onderzoek naar duurzamere bestratingsmaterialen. Morssinkhof Groep verlangt namelijk naar het omlaag brengen van de MKI-waarde van hun bestratingsmateriaal met oog op het omlaag brengen van het aandeel cement in de betonindustrie.

Binnen de Civiele Techniek is verduurzaming een hoofdthema geworden. Cement is namelijk het vervuilendste en duurste element in beton. De cementproductie is verantwoordelijk voor ruim 6-20% CO₂-uitstoot in de wereld (Stradus Infra, 2020). Als bouw materiaal is dit percentage hoog te noemen en om de klimaatdoelen op termijn te behalen, zal de CO₂-uitstoot naar beneden moeten. In 2030 moet namelijk een vermindering van 55% aan CO₂-uitstoot vergeleken met 1990 in de bouwsector gerealiseerd zijn (Klimaatakkoord, z.d.). Bovendien wordt cement steeds duurder. De prijs per ton cement zou wel driemaal hoger kunnen worden dan deze nu is (Schepers, 2023).

Goede alternatieve middelen om cement gedeeltelijk mee te kunnen vervangen, kunnen mogelijk gevonden worden in de biobased industrie. Binnen de civiele techniek begint het bouwen met biobased materialen steeds meer de aandacht te trekken van bedrijven en instellingen. Biobased materialen zijn bouwmaterialen gemaakt van dierlijk materiaal of van schimmels, planten en bacteriën die geteeld, geoogst, gebruikt en hergebruikt worden. Biobased materialen zijn biologisch afbreekbaar en minder belastend voor het milieu ten opzichte van traditionele bouwmaterialen (van Heumen, 2022).

In de Nederlandse bouw wordt biobased bouwen nog onvoldoende toegepast, terwijl andere landen zoals Duitsland en Frankrijk hier al wel gebruik van maken. Eén van de redenen dat dit in Nederland nog niet grootschalig wordt toegepast, komt doordat voor deze nieuwe materialen veel certificering mist. Daarnaast is het erg lastig om een geschikt additief te vinden voor toepassingen binnen de civiele sector dat voldoet aan de nodige materiaaleigenschappen zoals sterkte, weersbestandheid en slijtbestandheid.

Het doel van dit verkennend onderzoek is om ten minste drie biobased additieven te testen als gedeeltelijke vervanging van cement en toegepast kunnen worden in het productieproces. Met oog op het omlaag brengen van de CO₂-uitstoot is de keuze gelegd op het vinden en testen van ten minste één additief dat CO₂ heeft opgenomen tijdens de levensduur in de vorm van een poeder. Het biobased materiaal moet ook aan de gestelde eisen voldoen die onder andere uit de norm komen en vanuit de Morssinkhof Groep zijn opgesteld. Het verwachte resultaat van het onderzoek zal een onderzoeksrichting zijn waar de Morssinkhof Groep zelf op voort kan borduren.

Voor het behalen van de doelstelling zijn hoofd- en deelvragen geformuleerd. De hoofdvraag tijdens het afstudeeronderzoek is:

Welk biobased additief kan de Morssinkhof Groep toepassen als meest geschikte gedeeltelijke vervanging van cement bij de productie van aardvochtige betonstraatstenen?

1. Eisen

1.1 Aardvochtig beton & receptuur

1.1.1 Wat is aardvochtig beton?

In dit onderzoek wordt specifiek gekeken naar aardvochtig beton. Dit is namelijk het beton dat de Morssinkhof Groep gebruikt in hun productieproces. Aardvochtig beton is beton met een groene sterkte, wat voldoende is om het product direct na verdichting te ontkisten. Zo kunnen de bestratingsmaterialen op deze manier door middel van transport op de uiteindelijke verhardingsplaats opgeslagen worden. Groene sterkte verwijst naar de mate waarin een versproduct zijn vorm behoudt voordat het uithardingsproces begint. De eigenschappen van het aardvochtige beton qua weerstand tegen fysische en chemische aantasting zijn in veel gevallen gelijk aan traditioneel beton. Aardvochtig beton verschilt echter op verschillende punten ten opzichte van traditioneel beton. Het mengselontwerp is anders dan het ontwerp van traditioneel beton (1.1.2 Receptuur). Het belangrijkste verschil in het mengselontwerp is de watercementfactor (hierna wcf), welke bij aardvochtig beton tussen de 0,28 en 0,35 ligt, terwijl deze bij traditioneel beton over het algemeen 0,5 is. De wcf is de verhouding tussen het water en het cement. Door de lage wcf is de specie minder verwerkbaar en reageert deze veel stijver, wat gunstig is voor de groene sterkte van de straatstenen. De controle op de verwerkbaarheid is dus ook anders ten opzichte van traditioneel beton. Bij aardvochtig beton moet een balans gezocht worden in deze verwerkbaarheid. Het moet niet te nat zijn, want dan blijft de steen niet staan na productie. Ook moet het mengsel niet te droog zijn, want anders brokkelt de steen uit elkaar. De manier van verdichten, verdichtingsenergie, het vullen van de mal en het transport van vers gemaakt product is ook anders bij aardvochtig beton. Aardvochtig beton is goed toepasbaar in een automatisch productieproces (Stutech, 2005). Over het productieproces van aardvochtig beton bij de Morssinkhof Groep is in hoofdstuk 4.1 meer te lezen.

1.1.2 Receptuur

Binnen dit onderzoek wordt het meest toegepaste standaard receptuur gebruikt voor het product. Dit product, een betonnen straatsteen (hierna BSS) in keiformaat, wordt immers later in het onderzoek getest. Een BSS keiformaat heeft bij de Morssinkhof Groep over het algemeen de volgende samenstelling:

Tabel 1.1: Standaardreceptuur voor een BSS.

Grondstof	Percentage van totale volume per m ³ (%)	Dichtheid (kg/m ³)	Gewicht per m ³ (kg)	Gewicht per steen (kg)
Fijn aggregaat A	24,6	2646	651	1,078
Fijn aggregaat B	24,3	2679	651	1,078
Grof aggregaat	24,6	2646	651	1,078
Cement	10,1	2990	302	0,5
Vulstof	2,7	2667	72	0,12
Lucht	1,8	0,0	0	0
Water	12	1000	120	0,198
Totaal	100	-	2447	4,0524¹

De mengverhouding tussen het cement, zand, en grind bedraagt: 1: 4,156: 2,156. Afgerond op gehele getallen betekent dit dat de mengverhouding van het basis aardvochtig betonmengsel 1:4:2 is.

¹ Hierbij is uitgegaan van 1000 stenen per mengsel. Het daadwerkelijke gewicht kan beperkt afwijken.

Aggregaten

Fijne en grove aggregaten zijn de toeslagmaterialen die worden toegevoegd aan het beton. De toeslagmaterialen zorgen voor een robuuster beton. De toeslagmaterialen vullen holle ruimtes op, waardoor de dichtheid toeneemt, wat leidt tot een sterker beton (Betonhuis, 2019). Voor de fijne aggregaten worden twee type zandmengsels gebruikt namelijk gerecycled ecozand en zand. Voor het grove aggregaat is één type steenslag in het basismengsel gebruikt.

Cement

Het type cement dat wordt gebruikt in de stenen is een type hoogovencement, wat in feite een combinatie van portland- en hoogovencement is, maar vanuit de norm genormaliseerd is als hoogovencement. Het cement bestaat uit hoogovenslak en portlandklinker. Hoogovenslak is een korrelvormig residu dat als bijproduct vrijkomt bij de productie van ijzer. Portlandklinker is een hard steenachtig materiaal dat voorkomt uit de sintering² van grondstoffen zoals CaO (kalk), SiO₂ (silica), Al₂O₃ (aluminiumoxide), Fe₂O₃ (rood ijzeroxide) en andere materialen. Kalk is cruciaal voor de hydratatie van het beton, silica voor de sterkte, aluminiumoxide voor sterkte en uitharding en rood ijzeroxide kan worden toegevoegd voor kleur of voor hittebestendigheid. Deze vereisten zijn vastgelegd in NEN-EN 197-1:2018.

Vulstof

Vulstof is een vrijwel inerte dan wel puzzolane³ of latent hydraulische stof (P. van den Berg, 1998), waarvan de deeltjes kleiner zijn dan 63 µm, vergelijkbaar met die van cement. Het wordt toegevoegd ter aanvulling van de hoeveelheid fijn aggregaat om de dichtheid te verhogen. De vulstof draagt om die reden bij aan de sterkteontwikkeling, maar wel in mindere mate in tegenstelling tot cement. Ook verhoogt deze vulstof de verwerkbaarheid (Betonhuis, 2019).

Water

Water is een belangrijke grondstof voor het ontstaan van het betonmengsel. Het water zorgt voor de hydratatie van het cement. Ook bepaalt de hoeveelheid water de verwerkbaarheid van het mengsel. Het water mag geen stoffen bevatten die een negatieve invloed hebben op het uithardingsproces (Betonhuis, 2019).

Hulpstoffen

Naast de algemene onderdelen van de receptuur kunnen ook hulpstoffen worden toegevoegd aan het mengsel, waardoor eventuele negatieve eigenschappen van het gekozen biobased additief gemitigeerd/verwijderd kunnen worden zoals de verwerkbaarheid. De hulpstoffen worden als vloeistof toegevoegd aan het productieproces. De hulpstoffen worden in dit onderzoek niet toegepast, omdat deze de resultaten kunnen beïnvloeden. Hulpstoffen zouden in een later stadium buiten dit onderzoek meegenomen kunnen worden in het verbeteren van de receptuur (Hoogendoorn, Wensen en eisen eindproduct, 2024).

² Sinteren houdt in dat fijne deeltjes van een materiaal worden samengevoegd tot een vast geheel door middel van druk en/of warmte, maar zonder dat het materiaal volledig smelt. Hierdoor ontstaat een sterkere, dichtere en vaak meer homogene structuur.

³ Puzzolanen zijn kunstmatig of natuurlijke materialen die toegevoegd kunnen worden aan cement om de eigenschappen te verbeteren, zoals vlieg-as of vulkanisch gesteente.

1.2 Eisen en wensen Morssinkhof Groep

1.2.1 Eisen

Groene sterkte

De betonstraatstenen moeten voldoende groene sterkte hebben. Hiermee wordt bedoeld dat deze vrijwel direct (na ongeveer 15 seconden) na productie uit de mal kunnen worden gehaald zonder in te zakken en vervolgens op kunnen worden geslagen in de droogkamer. De stenen worden 24 uur aan de lucht gedroogd, waarna deze verder zullen uitharden op het terrein (Stutech, 2005). De groene sterkte is een gevolg van de aantrekkingskracht tussen de watermoleculen onderling (cohesie) en tussen de watermoleculen en een vast oppervlak (adhesie) (van den Berg, Buist, Souwerbren, & de Vree, 1998). De groene sterkte is sterk afhankelijk van de wcf. Voor een aardvochtige BSS met voldoende groene sterkte wordt normaliter een wcf gehanteerd tussen de 0,28 en 0,35. Volgens het besluit bouwwerken leefomgeving mag er zelfs maximaal een wcf van 0,47 worden toegepast. Als de wcf hoger is dan 0,47 moeten er testen worden uitgevoerd voor uitloging (Hoogendoorn, Watercement- en fijnheidsfactor, 2024).

Verwerkbaarheid

De kwaliteit van een BSS wordt sterk beïnvloed door de verwerkbaarheid van het betonmengsel, wat wordt bepaald door de plasticiteit en samenhang van het mengsel. Verwerkbaarheid verwijst naar de hoeveelheid energie die nodig is om het verse mengsel te transporteren, storten en verdichten zonder dat het ontmengt (Stutech, 2005). De verwerkbaarheid hangt af van de wcf, net als bij de groene sterkte. Een te hoge wcf leidt tot zwakke stenen die buiken kunnen krijgen en uit elkaar kunnen zakken, terwijl een te lage wcf kan leiden tot zwakke straatstenen die de vereiste sterkte niet zullen bereiken en makkelijker breken. Water dat niet met cement hydrateert, wordt verdampt tot lucht, wat kan leiden tot sterkteverlies (Hoogendoorn, Splijtsterktetest, 2024). De huidige versie van het IKB-schema⁴ geeft geen methode die representatieve waarden geeft voor de verwerkbaarheid van aardvochtig beton voor betonstraatstenen.

Automatisch productieproces

Het biobased additief moet toe te passen zijn in een automatisch productieproces. Dit houdt in dat het biobased additief toegevoegd kan worden vanuit een silo aan het betonmengsel. Het zou kunnen zijn dat later aan de hand van de testfase blijkt dat aanpassingen nodig zullen zijn. Denk hierbij aan een langere tijdsduur tot de groene sterkte is bereikt of aan het pakketteren van de producten in minder lagen. Zolang het biobased additief meegenomen kan worden in een automatisch productieproces wordt voldaan aan de eis (Hoogendoorn, Wensen en eisen eindproduct, 2024).

Optische eigenschappen

Het eindproduct moet visueel gelijkmatig zijn. Dit betekent dat oneffenheden zoals buiken of scheuren niet zichtbaar mogen zijn. De toeslagmaterialen moeten volledig omhuld zijn door het bindmiddel. Naast het feit dat het product visueel gelijkmatig moet zijn, dient het product goed gemengd te zijn en zo min mogelijk te plakken. Een mengsel dat te veel plakt blijft aan de stempel plakken waardoor het zichtvlak van de steen aangetast wordt. Dit kan komen door te veel water in het mengsel (Hoogendoorn, Wensen en eisen eindproduct, 2024).

⁴ IKB staat voor interne kwaliteitsbewaking. Dit is een beschrijving van de door de leverancier uitgevoerde kwaliteitscontroles, als onderdeel van zijn kwaliteitssysteem (Bron toevoegen)

CE-Markering

Om het product op de Europese markt te verkopen, moet het een CE-markering krijgen (Rijksoverheid, z.d.). Hiervoor moet het eindproduct voldoen aan de NEN-EN 1338 of een nog op te stellen innovatiecertificaat (Hoogendoorn, Wensen en eisen eindproduct, 2024). Het product zal aan veel van de eisen in deze norm automatisch voldoen. Eisen waarop het biobased namelijk geen impact zal hebben, zijn bijvoorbeeld de vorm, afmeting, brandveiligheid en fabricagematen. Het gedeeltelijk vervangen van cement door een biobased additief kan echter effect hebben op de splijtsterkte, weersbestandheid, slijtbestandheid en glij/slipweerstand. Aangezien dit een verkennend onderzoek is, wordt in dit onderzoek enkel de splijtsterkte van de gekozen biobased additieven getest. Het bedrijf wil in eerste instantie namelijk weten of de vereiste splijtsterkte bereikt kan worden. Deze moet minimaal $3,6 \text{ N/mm}^2$ na 35 dagen zijn om aan de eis uit de norm te voldoen. Meer over de verplichte eisen voor de CE-markering is te vinden in hoofdstuk 6.1.1.

1.2.2 Wensen

Beschikbaarheid

Eén van de belangrijkste wensen vanuit de Morssinkhof Groep is dat het biobased additief voldoende beschikbaar is om aan de productiecapaciteit te voldoen. Het biobased additief zou van toepassing kunnen zijn voor 1/3 van de producten van de Morssinkhof Groep getallen over het vervangingsgewicht mogen niet gegeven worden. Fictief gebruikt de Morssinkhof Groep 50.000 ton aan cement per jaar (Hoogendoorn, Productieproces, 2024). Bij een vervangingspercentage van 10% zou dan 1.666 ton biobased additief nodig zijn om aan fictieve vraag van de Morssinkhof Groep te voldoen.

Splijtsterkte

De wens is om na 7 dagen al een splijtsterkte van $3,6 \text{ N/mm}^2$ bereikt te hebben. Deze wens is gesteld, omdat geen enkele steen meer dan 35 dagen op het terrein blijft staan, vanwege de hoge vraag (Hoogendoorn, Splijtsterketest, 2024).

Levensduur

De Morssinkhof Groep wenst een verwachte minimale economische levensduur van 30 jaar voor hun producten (Hoogendoorn, Wensen en eisen eindproduct, 2024). Door een langere levensduur zal de MKI-waarde omlaaggaan. Een grove indicatie van de levensduur kan worden verkregen door middel van een vries- en slijtproef. De exacte levensduur van een steen kan niet bepaald worden. Dit is namelijk naast de kwaliteit ook afhankelijk van de gebruikscondities (Hoogendoorn, Productieproces, 2024).

Circulariteit & milieu

Morssinkhof Groep streeft naar circulaire producten en producten zonder overschrijding van maximale concentraties aan schadelijke verbindingen zoals chloride, fosfaten en andere zuurresten. Deze stoffen kunnen na einde levensduur in het milieu uitlogen en problemen veroorzaken bij hergebruik van betonmaterialen, zoals corrosie van wapening door chloride in gewapend beton (de Veer, 2024).

Certificering

Tot slot wenst de Morssinkhof groep dat het eindproduct gecertificeerd kan worden. Hierdoor kunnen klanten zien dat de producten een bepaalde prestatie kunnen leveren of een bepaalde milieu-impact hebben. Voorbeelden van (mogelijk) gewenste certificaten zijn het KOMO-certificaat, het EPD-certificaat, het ISCC-certificaat en het RSB-certificaat. Meer informatie over deze certificaten is te vinden in hoofdstuk 6.2.

2. Keuze biobased additief

2.1 Welke biobased additieven zijn er voor beton?

Diverse biobased additieven kunnen mogelijk als gedeeltelijke vervanging van cement dienen. Het gebruik van een biobased additief kan invloed hebben op de eigenschappen en de receptuur. Dit onderzoek heeft zich gericht op as-soorten, poeders en vezels. Daarnaast heeft onderzoek plaatsgevonden naar een ander type bindmiddel, wat vermeld is onder overig. Bij het vervangen van cement door een biobased additief is geen onderzoek gedaan naar aardvochtig beton, vanwege het ontbreken van specifieke studies hierover. Het literatuuronderzoek naar biobased additieven heeft zich dus gericht op het effect van verschillende biobased additieven op traditioneel beton of mortel. De resultaten van alle additieven uit het literatuuronderzoek per eigenschap zijn weergegeven in bijlage A1.

2.1.1 As-soorten

Bij de as-soorten lopen de resultaten van de onderzoeken uiteen afhankelijk van de gebruikte as-soort. Bij bijvoorbeeld hazelnootdoppenas, rijstschilas en cacaodoppenas gaat de splijtsterkte in de onderzoeken sterk naar beneden naarmate het vervangingspercentage van het additief omhooggaat. Additieven als dadelpalm-as, dadelpitas, Ficus Exasperata blad-as, kokosnootschilas, bagasse-as en amandeldoppenas zouden in theorie wel mogelijk zijn, maar hebben een lagere beschikbaarheid. Bij het verbranden van de reststroom tot as blijft een stuk minder materiaal over dan voor de verbranding. Na de verbranding blijft ongeveer 10-20% van de massa over als as, blijkt uit diverse bronnen uit de literatuurstudie. Alle onderzochte as-soorten en bronnen zijn te vinden in bijlage A2.

2.1.2 Vezels

Vezels hebben een totaal andere samenstelling dan cement. Het vervangen van cement door vezels kan dan ook, maar met een veel lager vervangingspercentage. Dat kan worden verklaard, doordat de structuur hiervan heel anders is dan die van korrelvormige additieven die meer op cement lijken. Potentiële vezels die bijvoorbeeld in beton kan worden toegepast zijn kokosvezels, sisalvezels of katoenpluisvezels. Ondanks dat het gebruik van vezels goede resultaten biedt, zit het probleem bij vezels in de stugheid en de lengte van de vezels. Alle onderzochte vezels en bronnen zijn te vinden in bijlage A3.

2.1.3 Poeders

Van sommige as-soorten en andere reststromen is onderzocht of deze als poeder kunnen worden toegepast. Dit kan duurzamer zijn, omdat verbranding en de daarmee gepaard gaande CO₂-uitstoot worden vermeden en het rendement aan poedermateriaal hoger is. Een nadeel van het ontbreken van verbranding is echter een naar verwachting lager silicagehalte, wat bijdraagt aan puzzolanische activiteiten. De meeste poedervormen, vooral van nootdoppen, geven hierdoor geen goede resultaten. Hazelnootdoppoeder gaf echter wel goede resultaten, doordat het qua samenstelling op kalk lijkt. Alle onderzochte poeders en bronnen zijn te vinden in bijlage A4.

2.1.4 Overig

Naast poeders, vezels en assen is ook gezocht naar andere biobased additieven. Na de oriëntatie is van alle georiënteerde overige additieven enkel struviet overgebleven om te onderzoeken. Struviet is een veelvoorkomend mineraal in urine en mest, dat mogelijk kan worden toegepast als gedeeltelijke vervanging van cement. Onderzoek wijst uit dat struviet, gewonnen uit afvalwaterzuiveringsinstallaties vrijkomt als kristalpoeder. Zie bijlage A5 voor meer informatie over struviet.

2.2 Criteria keuzematrix biobased additieven

Bij het selecteren van geschikte biobased alternatieven zijn diverse criteria geëvalueerd. Deze criteria zijn onderverdeeld in twee categorieën: de beschikbaarheid en fysieke eigenschappen. De beschikbaarheid is belangrijk om ervoor te zorgen dat het product aan de productiecapaciteit kan voldoen en op korte termijn verkrijgbaar is om aan de hoge vraag en levering te kunnen voldoen. De fysieke eigenschappen zijn belangrijk voor het succes van het onderzoek. Deze eigenschappen vergroten naar verwachting de kans dat het biobased additief met succes kan worden toegevoegd aan de steen.

Deze criteria bepalen de kwaliteit van het product en zijn bepalend geweest om het additief selectief te beoordelen. Deze criteria zijn opgenomen in de keuzematrix. De criteria zijn voornamelijk beoordeeld op procentuele toe- of afnames, omdat in de onderzoeken uit de literatuurstudie gebruik is gemaakt van traditioneel beton en de cijfers in de studie niet direct kunnen worden vergeleken met aardvochtig beton. De toe- en afnames van de eigenschappen kunnen wel een indicatie bieden op het uiteindelijke effect op het aardvochtige betonmonster. Bij veel fysieke eigenschappen is de verandering bij 5% vervanging gebruikt gezien dit resultaat veel beschikbaar was in de onderzoeken. Bij onderzoeken waarbij minder dan 5% vervanging is getest, is het resultaat van het hoogste vervangingspercentage genomen. Bij ieder criterium is de weging in een tabel te zien.

De wegingen van de criteria zijn bepaald aan de hand van de AHP-methode (Analytisch Hiërarchisch Proces), opgesteld door wiskundige Thomas L. Saaty in de jaren 70. Deze methode wordt doorgaans gebruikt om criteria met elkaar te kunnen vergelijken en af te wegen om te bepalen hoe belangrijk een criterium is. Ieder criterium wordt in het model individueel tegen de andere criteria afgewogen en beoordeeld of deze belangrijker of minder belangrijk is. De uitkomsten van het model zijn percentages waaraan de wegingen gekoppeld kunnen worden. De criteria zijn zodoende beter onderbouwd door het toevoegen van een wiskundig aspect aan de wegingen (Passage Technology LLC, 2024). Voor de AHP-methode is een Exceltemplate gebruikt (SCB Associates Ltd, 2016). Deze is opgenomen in bijlage B.

2.2.1 Beschikbaarheid

De eerste criteriumcategorie voor het onderzoek is de beschikbaarheid. Hiermee wordt zowel de beschikbaarheid bedoeld op korte termijn voor het onderzoek als de beschikbaarheid om aan de vraag van de Morssinkhof Groep te kunnen voldoen. Beschikbaarheid is om deze reden verdeeld in twee criteria.

Oorsprong reststroom

Om op korte termijn aan de additieven voor de productie te komen, is de oorsprong van de reststroom belangrijk. Als het additief in Nederland verkrijgbaar is, is het eenvoudiger om deze in de productie te kunnen gebruiken. Als deze echter uit tropische regio's zoals Zuid-Amerika komt, wordt de kans dat deze niet op tijd in de productie ingezet kan worden groter geschat. Om deze reden wordt de oorsprong van de reststroom op basis van afstand beoordeeld. Hierbij krijgt Nederland de hoogste score en Zuid-Amerika en Oceanië de laagste score (figuur 2.1). Dit verhoogt de kans om aan de productiecapaciteit te kunnen voldoen, zeker met de hoge vraag die de Morssinkhof Groep heeft voor het leveren van hun betonstraatstenen.

Oorsprong reststroom: Weging: 9,5%	
Zuid-Amerika/Oceanië	+1
Azië/Zuid-Afrika/ Noord-Amerika	+2
Noord-Afrika/ midden oosten	+3
Europa	+4
Nederland	+5

Figuur 2.1: Scoretabel oorsprong reststroom.

Toepassingsgebieden

De Morssinkhof Groep wil graag het biobased additief op grote schaal kunnen toepassen. Ideaal zou zijn om de exacte grootte van de reststroom te weten. Echter is het voor veel additieven niet mogelijk om op korte termijn de grote van de reststroom in te schatten. Om deze reden is het aantal toepassingsgebieden belangrijk. Dit kan een indicatie geven in welke mate de reststroom al gebruikt wordt. De verwachting is dat als er meer toepassingsgebieden voor het product zijn dat de bruikbare reststroom kleiner is (figuur 2.2).

Aantal toepassingsgebieden: Weging: 13,7%	
Meer dan 4	+1
4	+2
3	+3
2	+4
1 of minder	+5

Figuur 2.2: Scoretabel toepassingsgebieden.

2.2.2 Fysische eigenschappen

De tweede criteriumcategorie is de fysische eigenschappen. De verandering in fysische eigenschappen van de onderzochte monsters zijn van groot belang. Het onderzoeken van deze eigenschappen vergroot namelijk de kans dat het additief met succes kan worden toegevoegd aan de steen. Hierbij zijn de fysische eigenschappen verdeeld in 5 criteria. Alle fysische eigenschappen zijn onderzocht en van ieder additief te vinden in bijlage A.

Vervangingspercentage

Een belangrijke eigenschap waar de additieven op beoordeeld zullen worden, is het vervangingspercentage. Voor ieder biobased additief is gekeken naar het hoogste vervangingspercentage wat in de onderzoeken is gebruikt. Hierbij is de maximale sterktereductie die getolereerd wordt 20%. Indien een grotere sterktereductie dan 20% is waargenomen wordt het maximale vervangingspercentage tot deze reductie als representatief meegenomen in de keuzematrix. Deze maximale sterktereductie van 20% heeft te maken met de oversterkte. Deze oversterkte houdt in dat de huidige steen standaard ongeveer 20 – 30% sterker is dan die dient te zijn (figuur 2.3).

Vervangingspercentage van cement: Weging: 29,6%	
0-2 %	+1
2-8%	+2
8-14%	+3
14-20%	+4
Meer dan 20%	+5

Figuur 2.3: Scoretabel vervangingspercentage.

Sterkteverandering

Bij het kiezen van een additief is het belangrijk dat de kans dat de vereiste slijtsterkte bereikt kan worden zo groot mogelijk is. Daarom is het handig om te kijken naar de sterkteverandering van de betonmonsters in de onderzoeken. Een hogere toename in de sterkte verhoogt de kans op het behalen van de sterkte-eis. In veel onderzoeken worden betonmonsters van traditioneel beton op de slijtsterkte getest. In enkele onderzoeken is de slijtsterkte niet getest en zijn de resultaten van de druksterkte als representatieve waarden gebruikt. De buigsterkte is niet relevant, omdat de stenen niet op buiging worden belast. Niet bij ieder onderzoek zijn even grote vervangingspercentages getest. Bij vrijwel alle onderzoeken is waargenomen wat bij een vervangingspercentage van 5% gebeurt met de sterkteverandering, omdat dit in de meeste onderzoeken is behandeld. De sterkteverandering is naast de beschikbaarheid ontzettend belangrijk, omdat de sterkteverandering een indicatie kan geven wat het effect is op de slijtsterkte na het toevoegen van het biobased additief (figuur 2.4).

Sterkte bij 5% vervanging neemt: Weging: 21,1%	
Meer dan 10% af	+1
1-10% af	+2
Blijft gelijk	+3
1-10% toe	+4
Meer dan 10% toe	+5

Figuur 2.4: Scoretabel sterkteverandering.

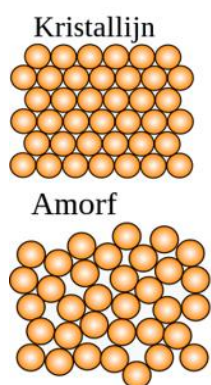
Verwerkbaarheid

Voor betonstraatstenen worden geen officiële testen uitgevoerd om de verwerkbaarheid te meten. De inzakkings test die normaal gesproken wordt gebruikt om de verwerkbaarheid te beoordelen, wordt niet toegepast, omdat straatstenen geen inzakking mogen hebben. Deze test kan echter wel gebruikt worden als leidraad om een indicatie te krijgen van de verwerkbaarheid door te kijken naar eventuele toe- of afnames. Een toename in de inzakkings test kan wijzen op een natter mengsel. Een aardvochtig betonmengsel dat te nat is kan inzakken. Een afname in de verwerkbaarheid kan wijzen op een droger mengsel. Een te droog mengsel kan na het ontmallen uit elkaar brokkelen. Dit kan erop wijzen dat het waterabsorberend vermogen van het additief te hoog is. Een toename in de verwerkbaarheid heeft een groter nadelig effect dan een afname in verwerkbaarheid. Bij een afname in de verwerkbaarheid zou gecompenseerd kunnen worden door meer water aan het mengsel toe te voegen. Bij een toename in de verwerkbaarheid kan echter geen vocht worden onttrokken uit het mengsel. Daarom zijn marges in de scores bij een toename groter dan bij de afname. Vanuit de literatuur (te zien in bijlage A) is naar voren gekomen dat bij 5% vervanging de marges gemiddeld tussen de 0-15% toe/afname zitten. Deze marges zijn verwerkt in de scoretabel. Als bij een onderzoek enkel een toe of afname is genoemd en geen waarden worden gegeven wordt een toename als slecht beoordeeld en een afname als neutraal beoordeeld (figuur 2.5).

Verwerkbaarheid bij 5% vervanging neemt: Weging: 12,3%	
Meer dan 7,5% toe Meer dan 15% af	+1
5 – 7,5% toe 10-15% af	+2
2,5-5% toe 5-10% af	+3
0-2,5% toe 0-5% af	+4
Blijft gelijk	+5

Figuur 2.5: Scoretabel verwerkbaarheid.

Silicagehalte



Figuur 2.6: verschil voorkomen atomenstructuur silica in de aardkorst (BetonLexicon, 2018).

Silica is een mineraal dat van nature in de aardkorst voorkomt en een belangrijk bestanddeel van cement is, omdat het sterkte-eigenschappen verleent. Het kan ook worden opgenomen door planten en gewassen

uit de aardkorst. Silica kan als kristallijn of als amorf voorkomen (figuur 2.6). Kristallijn silica draagt niet bij aan de sterkte, omdat de atomen langs elkaar schuiven, terwijl amorf silica, met ongeordende atomen, wel binding creëert en dus bijdraagt aan de sterkte. Bij de verbranding van additieven tot as blijkt uit onderzoek dat een bepaalde hoeveelheid amorf silica de beste puzzolanische eigenschappen biedt. Vanaf een bepaalde temperatuur wordt meer kristallijn silica gevormd (BetonLexicon, 2018). Hoewel het amorf silicagehalte sterkte-eigenschappen verleent, is uit de onderzoeken gebleken dat bij een laag amorf silicagehalte nog steeds een goede sterkte door het additief kan worden bereikt

en is daardoor een iets minder belangrijke eigenschap. In de onderzoeken is gezocht naar een hoog silicagehalte, gezien het niet volledig in te schatten is hoeveel procent van de silica daadwerkelijk amorf is. Bij een hoger silicagehalte is de kans groter dat het amorf silicagehalte in het additief hoger is en dus meer puzzolanische activiteiten zouden kunnen plaatsvinden. Om deze reden heeft het de laagste weging gekregen (figuur 2.7).

Silica gehalte: Weging: 5,0%	
0-10% silica	+1
10-30% silica	+2
30-50% silica	+3
50-70% silica	+4
Meer dan 70% silica	+5

Figuur 2.7: Scoretabel silica gehalte.

Porositeit en dichtheid

Beton met een lage porositeit is dichter en sterker met minder ruimte voor indringing van vocht en zuurresten. Een lage porositeit vermindert ook de permeabiliteit (doorlaatbaarheid), waardoor beton minder kwetsbaar is tegen indringing van vorst en dooizouten. Indien de porositeit niet onderzocht is, maar de dichtheid wel is gemeten, is dit gebruikt als criterium. De dichtheid en de porositeit zijn bij beton direct aan elkaar te linken (Hoogendoorn, Fysische eigenschappen, 2024). Bij een toename in de porositeit neemt de dichtheid af en vice versa. In de literatuuronderzoeken waarin zowel porositeit als dichtheid behandeld is, is dit ook naar voren gekomen. Verder geldt voor betonmonsters dat als de porositeit met 1% toeneemt een sterkteverlies optreedt van 5% (Hoogendoorn, Fysische eigenschappen, 2024). In de MCA zullen dan ook twee kolommen zijn waar enerzijds de porositeit is bepaald of anderzijds de dichtheid. De reden om porositeit als criterium mee te nemen in tegenstelling tot bijvoorbeeld de korrelgrootte is vanwege de verwachting dat de porositeit meer zegt. Zo kan de korrelgrootte van de as-soorten en poeders één op één worden vergeleken met de korrelgrootte van cement, maar kan dit niet worden gedaan met vezels. De porositeit kan hier wat over zeggen, doordat hierin dan zowel het effect van de korrelgrootte van de assen of poeders als het effect van de diameter en lengte van vezels is meegenomen. Bovendien zou een minder poreus mengsel de kans op indringing door vocht kunnen verkleinen, zodat de indringing van vocht ook minder wordt. Zo bevat porositeit meerdere aspecten die één op één vergeleken kunnen worden met elkaar (figuur 2.8 en 2.9).

Porositeit bij 5% vervanging neemt: Weging: 8,9%	
Meer dan 7,5% toe	+1
1-7,5% toe	+2
Blijft gelijk binnen 1%	+3
1-7,5% af	+4
Meer dan 7,5% af	+5

Figuur 2.8: Scoretabel porositeit.

Dichtheid bij 5% vervanging neemt: Weging: 8,9%	
Meer dan 7,5% af	+1
1-7,5% af	+2
Blijft gelijk binnen 1%	+3
1-7,5% toe	+4
Meer dan 7,5% toe	+5

Figuur 2.9: Scoretabel dichtheid.

2.3 Keuzematrix/Keuzetabel biobased additief

Tabel 2.1: keuzematrix biobased additieven.

	Oorsprong reststroom Weging: 9,5%	Toepassingsgebieden Weging: 13,7%	Vervangingspercentage Weging: 29,6%	Verwerkbaarheid Weging: 12,3%	Sterkteverandering Weging: 21,1%	Silicagehalte Weging: 5,0%	Dichtheid Weging: 8,9%	Porositeit Weging: 8,9%	Totaal
As-soorten									
Stro-as									398
Houtas									360
Walnootdopas									354
HLRA									350
Dadelpalmas									349
Dadelpitas									331
Amandeldopas									329
Bagasse-as									324
Rijstschilas									307
Fiscus Exasperata blad as									279
Kokosnootschilas									274
Hazelnootdopas									269
Cacaodopas									263
Vezels									
Kokosvezel									298
Katoenpluisvezel									269
Sisalvezel									202
Poeders									
Hazelnootdoppoeder									315
Cashewnootdoppoeder									241
Caseïne									205
Cassavemeel									167
Overige additieven									
Struviet									355

Legenda

Kleur	Effect	Score
	Zeer positief	5
	Positief	4
	Neutraal	3
	Slecht	2
	Zeer slecht	1
	Onbekend	0

2.4 Uitleg keuze additieven

Vanuit alle geselecteerde additieven zijn de in paragraaf 2.2 benoemde eigenschappen onderzocht om daaruit een keuze te maken in paragraaf 2.3.

Uiteindelijk is gekozen voor houtas, stro-as en hazelnootdoppoeder. De eerste tweede additieven scoren het beste uit de keuzematrix en bieden daarmee de hoogste potentie. Bij houtas nemen de testresultaten van alle sterkteparameters licht af. Echter is dit materiaal mogelijk in hogere getale beschikbaar, waardoor het makkelijker op grote schaal zou kunnen worden toegepast. Om deze redenen is het meegenomen in het verdere verloop van het onderzoek. Daarnaast zou met het gebruik van stro-as grote vervangings-percentages bereikt kunnen worden volgens de onderzoeken uit de literatuurstudie. Stro-as heeft naast veelbelovende resultaten naar verwachting een grote beschikbaarheid als gewasrest. Stro-as is om deze redenen als tweede as-soort meegenomen in het verdere verloop van het onderzoek.

Naast deze twee additieven zou walnootdopas op de derde plek komen te staan. Echter is besloten om niet alleen as-soorten te testen, maar ook de potentie te bekijken van een poeder. Deze heeft namelijk naar verwachting een hogere potentie om de CO₂-uitstoot te verlagen gezien deze niet verbrand hoeven te worden tot as. Uit de keuzematrix is gebleken dat hazelnootdoppoeder het beste scoort en is meegenomen als derde en laatste additief. In een onderzoek is hazelnootdoppoeder met lage vervangingspercentages succesvol toegepast in beton. Het enige vraagteken hierbij is tot in hoeverre het vervangingspercentage omhoog kan, omdat slechts tot 2,5% vervanging is toegepast in het onderzoek. Toch bood dit onderzoek een flinke marge bij dit kleine vervangingspercentage (bijlage A3). Om deze reden is ervoor gekozen om hazelnootdoppoeder bij hogere vervangingspercentages te testen.

Tot slot is gekeken om struviet ook te gebruiken, omdat dit vanuit de keuzematrix een hoog potentieel blijkt te hebben. Echter is vanuit de beoogde leverancier (Aquaminerals), waar Morssinkhof Groep al connecties mee heeft, afgeraden om struviet te gebruiken o.a. door een te hoge fosfaatconcentratie (Hofkamp, 2024). Ook de kwaliteitsmanager van de Morssinkhof Groep heeft afgeraden met struviet te werken. In het verleden is dit namelijk al geprobeerd en hierbij is geconcludeerd dat de verwerkbaarheid slecht wordt en dat het een nare geur geeft (Hoogendoorn, Fysische eigenschappen, 2024)

3. Testfase

3.1 Voorbereiding

3.1.1 Monsters

Om het experiment uit te kunnen voeren, dienen eerst de monsters gemaakt te worden. Van het basismengsel, genoemd in hoofdstuk 1, wordt 5%, 10% en 15% van het cement vervangen door het biobased additief en wordt de vulstof verwijderd. Door de vulstof te verwijderen, is er geen invloed van de vulstof die de test kan beïnvloeden. De monsters worden in de persmal (figuur 3.1) geperst. Deze persmal heeft ruimte voor 8 stenen met een standaard BSS keiformaat (21 x 10,5 x 8 cm). Als de monsters in de persmal zijn geperst, worden deze verdicht door trilling. Vervolgens worden deze gemerkt. Op deze manier kan bijgehouden worden welk biobased additief is toegevoegd aan welk monster. Aan het eind van dit proces worden de monsters uit de persmal gehaald en worden deze monsters 24 uur aan de lucht gedroogd. Na 24 uur droging worden de monsters onderwater gezet in water van 20° C. Op deze manier is de conditionering van alle stenen in dit stadium exact hetzelfde. De monsters harden respectievelijk voor 7 en 35 dagen uit.

3.1.2 Spleijsterktetest

Als de monsters uit het water worden gehaald, wordt de spleijsterktetest uitgevoerd. De proefmonsters worden onder de spleijtbank (figuur 3.2) geplaatst. De spleijsterkte van de spleijtbank neemt lineair toe. Zodra de steen spleijt, stopt de proef en is de grootte waarbij dit gebeurt de maat voor de spleijsterkte. Het resultaat moet hierbij na 35 dagen minimaal 3,6 N/mm² zijn om aan de norm te voldoen. Zoals eerder aangegeven is de wens om na 7 dagen al een spleijsterkte van 3,6 N/mm² te bereiken (Hoogendoorn, Spleijsterktetest, 2024).



Figuur 3.1: Persmal.



Figuur 3.2: Spleijtbank.

3.1.3 Methode

Per additief worden twee monsters gemaakt. Hiernaast worden ook referentiestenen gemaakt: twee stenen met 100% cement en twee stenen met 90% cement. De reden om een steen met 90% cement te maken, is om te kunnen concluderen dat indien een positief effect zichtbaar is dit volledig te danken is aan het biobased additief. De stenen met 100% cement zijn gemaakt om een gewone steen te kunnen vergelijken met de steen met biobased additief.

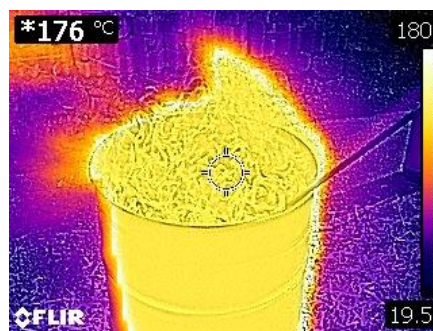
Dit betekent dat in totaal minimaal 10 monsters zullen worden gemaakt. Het formaat waarin de monsters gemaakt worden, is een BSS keiformaat. Dit betekent dat het formaat van alle stenen ongeveer $21 \times 10,5 \times 8$ centimeter is. De samenstelling van één steen is weergegeven in tabel 1.1 (hoofdstuk 1.1.2).

Het cement, zand en grind ligt al voorhanden bij de Morssinkhof Groep. De biobased additieven moeten echter nog verkregen worden. Voor ieder alternatief moet minimaal 1 kilogram aan materiaal verzameld worden. Omwille van beperking in materieel en tijd is gekozen om voor ieder additief een deeltjesgrootte van maximaal $500 \mu\text{m}$ te gebruiken. Het was niet mogelijk om voldoende materiaal te verkrijgen bij een kleinere maaswijdte. De bereidingswijze van de biobased additieven verschilt per additief.

Stro-as

Om stro-as te verkrijgen, moet stro eerst worden verbrand. Bij een verbrandingstemperatuur van 600°C levert één kilogram stro ongeveer 80 gram as met het hoogste gehalte aan amorf silica op (Bheel, Ibrahim, Adesina, Kennedy, & Shar, 2020). Minimaal 12,5 kg stro is dan nodig voor 1 kilogram as. Vanwege een lagere verbrandingstemperatuur van 180°C (figuur 3.3), wat meer dan 3 keer minder is dan gewenst, is meer stro gebruikt. Daarom wordt minstens 40 kg stro nodig geacht. Uiteindelijk is ervoor gekozen om 60 kg stro te verbranden om extra marge te hebben. De stro-as is als volgt verkregen:

- *Verbranden stro*: het stro is verbrand in een schoon olievat met een verbrandingstemperatuur van ongeveer 180°C voor een tijdsduur van ongeveer 4 uur.
- *Zeven as*: Na verbranding is de overgebleven as gezeefd met een zeef met een maaswijdte van $500 \mu\text{m}$.

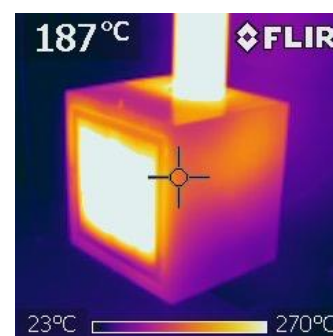


Figuur 3.3: Temperatuurmeting verbranding stro.

Houtas

Om aan houtas te komen, zal eerst hout verbrand moeten worden. De houtsoort die bij dit experiment gebruikt is, is azobé. Dit hout is erg compact en is in houtkachels verbrand (Rikken, 2024). In de praktijk zullen zaagsel, houtsnippers en pellets naar verwachting een grotere reststroom zijn dan blokken hout. Vanwege verbrandingsgemak en beschikbaarheid is ervoor gekozen om houtblokken te gebruiken. Houtas is als volgt verkregen:

- *Verbranden hout:* Het hout is verbrand in een houtkachel met een temperatuur van ongeveer 270 graden (figuur 3.4).
- *Zeven as:* De as werd gezeefd door een zeef met een maaswijdte van 1 mm om grove resten zoals spijkers of schroeven afkomstig uit het hout te scheiden van de as. De as werd vervolgens gezeefd met een zeef van 500 μm .



Figuur 3.4: Temperatuurmeting verbranding hout tot houtas.

Hazelnootdoppoeder

Om aan hazelnootdoppoeder te komen, zullen hazelnootdoppen vermalen moeten worden tot fijn poeder. Optimaal is om de doppen eerst te breken in kleinere grove stukken die beter te vermalen zijn, om deze vervolgens fijn te malen. Door gebrek aan de juiste middelen is dit handmatig uitgevoerd waarbij een, tot zover dit mogelijk was, zo fijn mogelijk poeder verkregen werd. Hazelnootdoppoeder is als volgt verkregen:

- *Hazelnootdoppen verbrijzelen:* De grove, harde notendoppen werden eerst verbrijzeld tot kleinere stukken, zodat deze beter vermalen konden worden tot poeder. Het verbrijzelen werd gedaan door middel van een moker. De hazelnootdoppen zijn tussen een doek gelegd en voorzichtig tot kleinere stukken geslagen.
- *Fijnere bestandsdelen vermalen:* Vervolgens werden de fijnere bestandsdelen vermalen tot poeder. Het vermalen werd gedaan door middel van een antieke koffiemolen, waarop een handboor werd aangesloten (figuur 3.5).
- *Zeven poeder:* Na het vermalen, werd het poeder eerst door een zeef met een maaswijdte van 1 mm gezeefd en vervolgens met een zeef met een maaswijdte van 500 μm .
- *Opnieuw vermalen grove resten:* De grove resten die op de zeef met maaswijdte van 1 mm bleven liggen, werden opnieuw in de koffiemolen vermalen. Op deze manier konden de grovere resten tot een kleinere korrelgrootte vermalen worden. Dit werd drie keer herhaald, zodat het fijn genoeg was om opnieuw te kunnen zeven door de zeef van 500 μm .



Figuur 3.5: Antieke koffiemolen met aangesloten handboor voor vermaling hazelnootdoppen.

3.2 Uitvoering

3.2.1 Hypothese splijtsterktetest

De verwachting is dat de as-soorten vanuit het literatuuronderzoek bij vervangingspercentages van 5,10 en 15% zullen voldoen aan de splijtsterktetest. Uit de literatuurstudies is ook gebleken dat vooral het amorf silicagehalte op langere termijn ervoor zorgt, door het stimuleren van puzzolanische activiteiten (hoofdstuk 2.2), dat de sterkte enorm toe kan nemen en dat dit ook in verband is met het vervangingspercentage. Hoe hoger het vervangingspercentage, des te belangrijker het amorf silicagehalte bleek te zijn om de gewenste sterkte te bereiken. Om deze reden is de verwachting dat hazelnootdoppoeder mogelijk niet tot 10 en 15% vervanging toegepast kan worden, maar wel tot 5%. Hazelnootdoppoeder biedt echter wel van alle onderzochte additieven de grootste marge in splijtsterkte. Bij 2,5% vervanging is de sterkte ruim 3 keer zo hoog t.o.v. 0% vervanging. Ook zijn de hazelnootdoppen handmatig gebroken en zijn deze niet tot de gewenste fijnheid en korrelvorm vermalen. Onder de microscoop bleek dat de korrels vrij grof en langwerpig zijn in tegenstelling tot de hout- en stro-as korrels, die dit weliswaar ook hebben echter in mindere mate. De microscoopfoto's van de additieven zijn te vinden in bijlage C2. De gemiddelde korreldiameter van hazelnootdoppoeder verschilt hierdoor naar verwachting dan ook meer dan bij hout- en stro-as. De gemiddelde korrelgrootte diameter zou groter moeten zijn, wat tot meer holle ruimtes zou kunnen leiden, omdat de korrels veel hoekiger zijn en naar verwachting zal leiden tot minder gevulde poriën. Dit verhoogt de porositeit en zodoende zou bij een lagere splijtsterkte de steen met hazelnootdoppoeder eerder breken dan die van de as-soorten.

Het grootste verwachte nadeel bij hout- en stro-as is dat de sterkte minder goed zou kunnen zijn, doordat de gewenste verbrandingstemperatuur niet bereikt is. Uit de literatuuronderzoek bleek de optimale verbrandingstemperatuur 500-600 graden te zijn voor het amorf silicagehalte. Deze is voor zowel hout- als stro-as niet bereikt. Om deze reden zullen de additieven naast een lager verwachte sterkte ook naar verwachting niet hetzelfde vervangingspercentage bereiken als wanneer deze temperatuur wel bereikt kon worden. De korrels zijn naar verwachting wel veel kleiner dan gedacht, wat blijkt uit de microscoopanalyse. De grootste beperking in een mindere sterkte dan gehoopt, zal naar verwachting dan komen door de verbrandingstemperatuur. Het verbranden van het hout tot as is echter wel op een hogere temperatuur gebeurt dan die van stro-as en de verwachting is dat hier meer amorf silica in zit. Het effect hiervan is mogelijk niet na 7 dagen te zien, maar pas na 35 dagen, omdat een hoog amorf silicagehalte leidt tot puzzolanische effecten die vooral op lange termijn zichtbaar zijn. Op korte termijn is de verwachting dat stro-as de hoogste waarde voor de splijtsterkte zal hebben, omdat dit ook vanuit de literatuurstudie bleek te zijn.

Een andere reden dat stro-as naar verwachting een grotere splijtsterkte heeft, is vanwege het feit dat dit additief veel lichter is dan hazelnootdoppoeder en houtas. Tijdens het zeven is opgemerkt dat er een groter volume aan stro-as nodig is om aan dezelfde massahoeveelheid te komen als houtas en hazelnootdoppoeder. Om deze reden zal meer stro-as toegevoegd moeten worden aan het mengsel om aan hetzelfde vervangingspercentage te komen in massa.

De volumieke massa van stro-as is kleiner dan de andere additieven. Het formaat van de steen blijft echter gelijk. Hierdoor zou het toepassen van stro-as naar verwachting moeten leiden tot een compactere steen die minder poreus is. Uit de keuzematrix kwam ook naar voren dat dit een punt is waar stro-as goed op scoort en tegelijkertijd ook een grote invloed kan hebben op de uiteindelijke sterkte.

3.2.2 Bereidingswijze

Voor ieder monster is allereerst 2,2 kg zand afgewogen en in de mengkom gedaan. Daarna is 1,1 kg grind afgewogen bij het zand en is het aggregatenmengsel tenminste driemaal gemengd (figuur 3.6). Vervolgens is voor de referentiesteen met 100% cement 0,6 kg cement afgewogen en bij het aggregatenmengsel toegevoegd. Bij de overige monsters is dit 0,57 kg of minder, afhankelijk van het vervangingspercentage, zoals is weergegeven in tabel 3.2 t/m 3.4. Het additief is na het afwegen van het cement afgewogen en toegevoegd aan het mengsel. Het cement is daaropvolgend inclusief het biobased additief gemengd met het aggregatenmengsel in de menger. Dit is meerdere malen herhaald, totdat het aggregaat volledig omhuld was door het cement en additief. Als laatste mengstap is het water toegevoegd aan het droge betonmengsel, wat tweemaal en indien nodig driemaal is gemengd. Dit betekent dat bij de referentiestenen met 100% cement een wcf van 0,325 is gebruikt en een mengselverhouding van: 3,67:1,83:1, wat afgerond een verhouding van 4:2:1 weergeeft bij 100% cement en bij 10% minder cement een wcf van 0,36.

Na het mengproces is het mengsel verdeeld over twee mallen in de persmal (figuur 3.7). Dit is tweemaal pre-verdicht alvorens het mengsel in de twee mallen is geëgaliseerd. Hierop zijn de mengsels in de mallen met de hoofdverdichting afgetrild tot twee stenen die uit de mal zijn gehaald. De stenen zijn gemerkt en opgeslagen na verwijdering uit de mal, om 24 uur lang aan de lucht te worden gedroogd, voordat ze in het waterbad worden geplaatst (figuur 3.8). Dit zorgt ervoor dat ze onder dezelfde omstandigheden worden getest op slijtsterkte, na respectievelijk 7 en 35 dagen.



Figuur 3.6: Menger met aggregatenmengsel.



Figuur 3.7: Egaliseren van mengsel in de persmal.



Figuur 3.8: Stenen na verwijdering uit mal.

In onderstaande tabellen is voor de referentie en per additief uitgezet wat de parameters zijn per monster. Voor het zand en grind is dit overal hetzelfde respectievelijk 2,2 en 1,1 kg. Van ieder monster zijn twee stenen gemaakt. In totaal zijn dus 34 stenen gemaakt. De foto's van de monsters na de splijtsterktetest zijn opgenomen in bijlage C1.

Tabel 3.1: Parameters van de referentiemonsters ter vergelijking met de monsters met biobased additieven.

Parameters	Referentiemonsters	
	M 1 (100% cement)	M 2 (90% cement)
Cement (g)	600	540
Watergehalte (ml)	195	195
Wcf	0,33	0,36
Biobased additief (g)	0	0
Vervangingspercentage (%)	0	0

Tabel 3.2: Parameters van de monsters met houtas als biobased additief in verschillende vervangingspercentages.

Parameters	Houtas monsters			
	M 14	M 3	M 7	M 11
Cement (g)	570	540	510	510
Watergehalte (ml)	195	195	195	240
Wcf ⁵	0,32	0,31	0,30	0,37
Biobased additief (g)	45	90	135	135
Vervangingspercentage (%)	5	10	15	15

Tabel 3.3: Parameters van de monsters met stro-as als biobased additief in verschillende vervangingspercentages.

Parameters	Stro-as monsters						
	M 15	M 16	M 5	M 6	M 9	M 10	M 17
Cement (g)	570	570	540	540	510	510	510
Watergehalte (ml)	195	225	195	225	225	240	270
Wcf ⁵	0,32	0,37	0,31	0,36	0,35	0,37	0,42
Biobased additief (g)	45	45	90	90	135	135	135
Vervangingspercentage (%)	5	5	10	10	15	15	15

Tabel 3.4: Parameters van de monsters met hazelnootdoppeoder in verschillende vervangingspercentages.

Parameters	Hazelnootdoppeoder monsters			
	M 13	M 4	M 8	M 12
Cement (g)	570	540	510	510
Watergehalte (ml)	195	195	195	225
Wcf ⁵	0,32	0,31	0,30	0,35
Biobased additief (g)	45	90	135	135
Vervangingspercentage (%)	5	10	15	15

⁵ Versimpelde berekening: een deel van het water wordt opgenomen door het additief. Hierdoor kan de daadwerkelijke wcf afwijken.

3.2.3 Observaties

Tijdens het maken van de monsters zijn verschillende observaties gedaan. De foto's waarnaar verwezen wordt in dit hoofdstuk zijn te vinden in bijlage C3.

Observaties Houtas:

De monsters blijven volledig staan na het verwijderen uit de mal bij alle vervangingspercentages. Wat betreft de kleur van de steen was ook t.o.v. de referentiestenen geen effect hierop te zien met het blote oog bij de diverse vervangingspercentages (figuur C23).

Observaties Stro-as:

De monsters met stro-as zijn te droog bij gebruik van een standaard watergehalte van 195 ml voor aardvochtig beton. Dit komt, doordat materiaal van de stenen valt na het uit de mal komen, wat aangeeft dat de aggregaten niet goed genoeg gebonden konden worden door het cement (figuur C20). Dit suggereert dat stro-as meer water opneemt dan het cement. Om dit te corrigeren, is meer water toegevoegd in overleg met de kwaliteitsmanager, wat het gewenste effect had. Het mengsel werd tijdens het mengen aanzienlijk vochtiger dan bij het mengsel met minder water. Bij het verwijderen van de stenen uit de mal was ook minder materiaalverlies waarneembaar (figuur C21). Door deze observatie met een standaard watergehalte van 195 ml bij monsters met 10% en 15% vervanging zijn bij 15% vervanging extra monsters gemaakt met een hoger watergehalte. Twee monsters met 225 en 240 ml water wat ook voor houtas en hazelnootdoppoeder is gedaan. Aangezien stro-as aanzienlijk meer water absorbeert, is vanuit de kwaliteitsmanager voorgesteld om ook een monster met 270 ml water te maken bij een vervangingspercentage van 15%.

Verder is een opvallend visueel verschil bij de stenen met stro-as zichtbaar. Deze heeft een zwarte kleur, terwijl de stenen met houtas geen verkleuring vertonen en de stenen met hazelnootdoppoeder een lichte verkleuring vertonen. In vergelijking met hazelnootdoppoeder en houtas moest een aanzienlijk groter volume stro-as worden toegevoegd voor 10% vervanging, wat aansluit bij de hypothese dat stro-as een lagere volumieke massa heeft dan hazelnootdoppoeder en houtas.

Observaties Hazelnootdoppoeder:

De monsters met hazelnootdoppoeder bleven beter staan dan de stenen met stro-as, maar lijken droger dan de stenen met houtas bij een vervangingspercentage van 15%. Dit viel op bij het markeren van de steen; de steen bleek relatief zacht te zijn. Het hazelnootdoppoeder heeft dus meer water opgenomen. Uit de literatuurstudie kwam ook naar voren dat dit t.o.v. cement meer water opneemt. Tevens is bij deze steen een lichte kleurverandering opgemerkt. De kleur is door het toevoegen van de bruine kleur van het hazelnootdoppoeder minder grijs (figuur C22).

Observaties ten opzichte van hypothese:

Uit de observaties blijkt dat houtas waarschijnlijk het meest geschikte biobased additief is voor een aardvochtige BSS, omdat het de kleur niet beïnvloedt en de watercementfactor nauwelijks aangepast hoeft te worden. Hazelnootdoppoeder zou op de tweede plaats komen met een lichte bruine verkleuring bij hogere vervangingspercentages en een verminderde waterbestendigheid. Stro-as is waarschijnlijk de minst geschikte optie, zelfs bij lage vervangingspercentages, vanwege de kleurverandering, hogere wateropname en de noodzaak voor een hogere wcf. Deze bevindingen van de stenen met stro-as komen niet overeen met de literatuurstudie.

3.3 Resultaten

Alle monsters zijn op splijtsterkte getest. De foto's van alle monsters na de splijtsterktetest zijn te vinden in bijlage C1. De resultaten zijn te vinden in tabel 3.5 t/m tabel 3.8. Van de testresultaten zijn er in bijlage D staafdiagrammen te vinden.

3.3.1 Referentiestenen

Tabel 3.5: Parameters van de referentiemonsters (RM) ter vergelijking met de monsters met biobased additieven.

Parameters	Referentiemonsters	
	M 1 (100% cement)	M 2 (90% cement)
Watergehalte (ml)	195	195
Splijtsterkte 7 dagen (N/mm ²)	5,7	3,6
Splijtsterkte 35 dagen (N/mm ²)	6,2	4,0

3.3.2 Houtas

Tabel 3.6: Parameters van de monsters met houtas als biobased additief in verschillende vervangingspercentages.

Parameters	Houtas monsters			
	M 14	M 3	M 7	M 11
Vervangingspercentage (%)	5	10	15	15
Watergehalte (ml)	195	195	195	240
Splijtsterkte 7 dagen (N/mm ²)	3,0	2,1	1,3	2,0
Splijtsterkte 35 dagen (N/mm ²)	3,9	2,7	2,0	3,3

3.3.3 Stro-as

Tabel 3.7: Parameters van de monsters met stro-as als biobased additief in verschillende vervangingspercentages.

Parameters	Stro-as monsters						
	M 15	M 16	M 5	M 6	M 9	M 10	M 17
Vervangingspercentage (%)	5	5	10	10	15	15	15
Watergehalte (ml)	195	225	195	225	225	240	270
Splijtsterkte 7 dagen (N/mm ²)	1,1	2,2	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5
Splijtsterkte 35 dagen (N/mm ²)	1,3	2,3	0,6	0,9	0,6	0,8	0,9

3.3.4 Hazelnootdoppoeder

Tabel 3.8: Parameters van de monsters met hazelnootdoppoeder in verschillende vervangingspercentages.

Parameters	Hazelnootdoppoeder monsters			
	M 13	M 4	M 8	M 12
Vervangingspercentage (%)	5	10	15	15
Watergehalte (ml)	195	195	195	225
Splijtsterkte 7 dagen (N/mm ²)	1,6	0,5	0,3	0,4
Splijtsterkte 35 dagen (N/mm ²)	1,8	0,5	0,4	0,6

3.4 Vergelijking

Bij de resultaten van de splijtsterktetest komen verschillende bevindingen naar voren toe die verklaard of aangetoond kunnen worden. Bij geen enkel monster is een afname te zien van de splijtsterkte na verloop van tijd. De grootte van de toename in splijtsterkte verschilt sterk per additief en per watergehalte.

Over het algemeen is te zien dat de monsters met hazelnootdoppoeder gemiddeld de laagste splijtsterkte heeft en dat alle monsters ruimschoots de eis van 3,6 N/mm² niet halen. Ook neemt de sterkte niet met grote getalen toe na een langere uithardingstijd.

De monsters met stro-as haalt ook de splijtsterkte niet, maar is te zien dat naarmate meer water toe wordt gevoegd een hogere splijtsterkte behaald wordt. Bij monster M15 (5% vervanging, 195 ml water) en M16 (5% vervanging 240 ml water) bijvoorbeeld is een sterktoename van 44% te zien door het toevoegen van meer water.

Houtas laat de meeste potentie zien. Monster M14 (5% vervanging, 195 ml water) haalt de vereiste splijtsterkte en monster M11 (15% vervanging, 240 ml water) nadert de vereiste splijtsterkte. Hierbij is te zien dat het toevoegen van meer water een positief effect heeft op het houtasmengsel. Tussen monster M7 (15% vervanging, 195 ml water) en monster M11 is een toename van 39% te zien door het toevoegen van meer water.

Bij alle additieven is te zien dat de monsters met meer water een hogere splijtsterkte halen. Dit is te verklaren, doordat alle additieven veel vocht opnemen. Bij stro-as was het waterabsorberend vermogen het sterkste en was dit effect het beste te zien. Het water dat de additieven opneemt, hydrateert niet met cement, waardoor lagere splijtsterkten behaald worden.

Bij het interpreteren van de resultaten is het belangrijk om er rekening mee te houden dat de fabriekspers een 10 tot 15% hogere splijtsterkte zou bieden. Hierdoor zou bijvoorbeeld monster M11 nog net kunnen voldoen aan de vereiste splijtsterkte. Echter zijn deze resultaten lager dan referentiemonster M1 en M2.

De lage sterkes die veroorzaakt worden bij stro-as in tegenstelling tot houtas zou verklaard kunnen worden door de aanwezigheid van humus in de stro-as. Humus zijn stoffen van organische oorsprong die binding en de hydratatie van cement nadelig kunnen beïnvloeden. Dit zou dan ook de reden kunnen zijn dat de monsters met stro-as bij lagere watergehaltes droog werden bevonden. Echter kan de aanwezigheid van humus op twee verschillende manieren voorkomen. Humus kan voorkomen in de vorm van huminezuren (onschadelijk) en als fulvozuren (schadelijk) (betonlexicon, 2018). Vanuit de onderzochte bronnen in de literatuur is slechts uit één bron naar voren gekomen dat hier iets vermeld is over humus. In deze bron wordt vermeld dat de ontwikkeling van amorfe silica, dat op zijn beurt zorgt voor de sterkte ontwikkeling, is ontstaan door het scheiden van alkalische ionen, basische ionische zouten en de organische verbindingen, oftewel humus (Katman, et al., 2022).

4. Productieproces

Om een beter beeld te kunnen krijgen van de aanpassingen die moeten gebeuren in het productieproces moet eerst onderzocht worden hoe het huidige productieproces in elkaar zit. Hiervoor is het huidige productieproces omschreven en weergegeven middels een stroomschema, welke in bijlage E te zien is. Alle informatie in dit hoofdstuk is verkregen via de kwaliteitsmanager van de Morssinkhof Groep in Malden.

4.1 Huidig productieproces

Stap 1: Aanvoer grondstoffen & ingangsc controle

Als eerste worden alle grondstoffen aangevoerd. De grondstoffen die de Morssinkhof Groep gebruikt voor hun standaard receptuur zijn te vinden in hoofdstuk 1.1.2. Alle grondstoffen worden door de leverancier en de kwaliteitsdienst van de Morssinkhof Groep gecontroleerd op kwaliteit. De kwaliteit en afwijkingen van de aangeleverde producten worden vanuit de betreffende NEN-norm vastgesteld. Hier wordt onder andere op kleur, samenstelling en ontmenging gecontroleerd. De aggregaten worden standaard opgeslagen buiten op de opslag. Het cement en de vulstoffen moeten droog en luchtdicht worden opgeslagen en worden daarom direct in de silo's geplaatst. Deze worden vanuit de vrachtwagen door middel van perslucht verpompt naar de silo's. Tot slot worden de hulpstoffen in speciale vaten opgeslagen. Als een mengsel wordt gemaakt, worden de aggregaten vanuit de opslag in één van de trechters geplaatst. Vanuit hier worden ze via een loopband getransporteerd naar de silo's in de fabriek, wat ook wel de bunker wordt genoemd.

Stap 2: De fabriek

In de controleruimte van de fabriek zit de operator, ook wel persmachinist. De operator krijgt de opdracht welke steen geproduceerd moet worden. Het mengselrecept wordt opgevraagd door de operator. Hierin staan de specifieke hoeveelheden die aan het mengsel moeten worden toegevoegd. De operator kan binnen bepaalde bandbreedte zelf sturing geven aan het machinerecept. Dit is namelijk licht afhankelijk van de kwaliteit van het aangeleverde materiaal. Het machinerecept wordt ingesteld op de productieapparatuur. De machinerecepten omvatten de opgeslagen instellingen voor de apparatuur die zijn afgesteld op het gekozen mengselrecept. In het machinerecept staat informatie zoals de triltijd, verdichtingsenergie en mengtijd. Er zijn geen regels gebonden aan het machineproces: deze zijn uit ervaring vastgesteld. Elk machine- en mengselrecept heeft een uniek nummer en is opgeslagen in de database, waarin ongeveer 1000 verschillende machinerecepten staan. Als alles goed is ingesteld, begint het fabricageproces.

Door de silo's wordt de chagierwagen gevuld met de gewenste hoeveelheden. De chagierwagen leegt zijn inhoud in een trechter. Onder deze trechter zit een kubel (bak waarin de aggregaten terecht komen) die omhooggaat naar de grote menger. Vanuit de kubel komen de aggregaten hierin terecht. Het vochtpercentage van het (nog droge) mengsel wordt in de grote menger gemeten. Tijdens het mengen wordt de juiste hoeveelheid cement toegevoegd aan het mengsel. Het mengsel bevat standaard net te weinig water, zodat de hulp- en kleurstoffen, indien deze gewenst zijn, gemixt met water kunnen worden toegevoegd aan het mengsel. Het mengsel komt wederom in een trechter terecht. Vanuit deze trechter komt het mengsel in de vulwagen, die de mal vult. Eerst wordt het mengsel voorgetrild, wat de verdichting van de steen bepaald. Hierna valt de stempel op het mengsel. Vervolgens worden de stenen nage-trild, wat de vorm van de steen bepaalt. Als laatste worden de stenen automatisch uit de mal gehaald.

Stap 3: Procescontrole

De operator van de fabriek heeft een controlefunctie. Eigenschappen van de steen kunnen, zowel visueel als cijfermatig, gecontroleerd worden. Voor minder ervaren operators is dit voornamelijk cijfermatig. Enkel vakmensen met veel jaren ervaring kunnen dit op een vertrouwde wijze visueel controleren. De operator kan eigenschappen als het vochtpercentage, het formaat en de volumieke massa beoordelen. Als deze testen structureel falen, moet de kwaliteitsmanager gewaarschuwd worden. De kwaliteitsmanager is namelijk verantwoordelijk voor de kwaliteit van het eindproduct.

Stap 4: Droogkamer

Als de producten gecontroleerd zijn, gaan deze naar de droogkamer. In de droogkamer worden de stenen 24 uur lang aan de lucht gedroogd. Bij het maken van de stenen vindt een exotherme reactie plaats. Dit betekent dat er warmte vrijkomt. Deze warmte is over het algemeen voldoende voor het drogen van de betonstraatstenen. 's Winters wordt indien nodig bijgestoken om het product te kunnen drogen op de juiste temperatuur.

Stap 5: Productcontrole

De betonstraatstenen worden nog één keer gecontroleerd op de kwaliteit. Stenen die niet aan de kwaliteitseisen voldoen, worden verkocht als tweede keus. Dit zijn stenen die als bruikbaar, maar laagwaardiger product worden beschouwd. Op deze producten mogen geen keurmerken worden geplaatst. Producten die als onbruikbaar worden beschouwd, belanden op de puinbult waar ze worden gerecycled tot nieuwe betonproducten.

Stap 6: Pakkettering

Als de betonstraatstenen gedroogd en gecontroleerd zijn na 24 uur zijn ze klaar om gepakketteerd te worden. Bij het pakketten, worden de stenen machinaal gestapeld en verpakt. Het aantal lagen waarin het pakket opgestapeld wordt, is afhankelijk van de hoogte van het product. De maximumhoogte van de stapels is gebonden aan de klem van de heftruck. De stenen van 8 centimeter hoog zijn 10 lagen hoog gestapeld. Pakketten die machinaal in elleboogverband gelegd kunnen worden, hebben in totaal 440 stenen per pakket. Bij handpakketten zijn dit 480 stenen. Op ieder pakket moet volgens de norm een unieke code, productnaam, producent, productielocatie, CE-markering en eventuele keurmerken vermeld staan. De unieke code op het pakket moet traceerbaar zijn. Keurmerken die niet verleend zijn aan specifieke producten mogen niet op het pakket staan.

Stap 7: Product beschikbaar voor levering

Nadat de stenen gepakketteerd zijn en minimaal 35 dagen zijn uitgehard, zijn deze beschikbaar voor levering. In uitzonderlijke gevallen worden de producten al eerder dan deze 35 dagen uitgeleverd. Deze worden dan enkel geleverd onder de voorwaarde dat de vereiste sterkte pas na 35 dagen bereikt is. Het gebruik van dit product voor de minimale genormaliseerde uithardingstijd is op risico van de afnemer.

4.2 Benodigde aanpassingen

Of grote aanpassingen in het productieproces nodig zijn, is afhankelijk van het additief dat wordt toegevoegd. Een groot deel van de aanpassingen die moeten plaatsvinden voor het gebruiken van de additieven zijn hetzelfde. Op een aantal aspecten verschilt de implementatie per additief.

1. Kwaliteitscontrole

De kwaliteitscontrole kan verschillen ten opzichte van bijvoorbeeld de controle van cement. Bij het controleren van de biobased additieven kan bijvoorbeeld worden gecontroleerd op deeltjesgrootte, kleur en verbrandingstemperatuur.

2. Opslag

Qua opslag van het biobased additief verandert niets. Deze moet luchtdicht en droog bewaard worden in de silo's.

3. Recepten

Zowel het machinerecept als het mengselrecept moet worden geoptimaliseerd naar aanleiding van het biobased additief. Naarmate het vervangingspercentage hoger wordt, moet meer water worden toegevoegd ten opzichte van het traditionele recept. Het toevoegen van stro-as veroorzaakt het droogste mengsel en zal dus het meeste water nodig hebben.

4. Productieproces

Zowel hazelnootdoppoeder als houtas kan op dezelfde manier als vulstof aan het mengsel worden toegevoegd. Stro-as moet echter met uiterste voorzichtigheid worden toegevoegd aan het mengsel. Stro-as stuift extreem op door de lage dichtheid, waardoor het aan wordt geraden deze enkel toe te passen in een luchtdicht productieproces. Tijdens het productieproces moet de menger gesloten blijven. Het is onwenselijk om handmatig zonder PBM's (zoals stofmaskers, brillen en veiligheidskleding) met grote hoeveelheden van deze stof te werken.

Voordat hazelnootdoppoeder kan worden gebruikt als biobased additief moeten de hazelnootdoppen als eerst worden fijngemalen tot poeder. Hazelnootdoppoeder wordt zover bekend niet geleverd door leveranciers. Voor het vermalen van de hazelnootdoppen zou een machine(s) gekocht moeten worden die deze automatisch op de gewenste fijnheid kan malen. Bijvoorbeeld een kaakbreker en kogelmolen indien dit soort machines in staat zijn de gewenste fijnheid te bereiken.

5. Uitharding en stapeling

Het toepassen van de biobased additieven zorgt voor een lagere splijtsterkte. Dit betekent dat na productie een langere uithardingstijd nodig is om de gewenste splijtsterkte te halen. De langere uithardingstijd heeft ook invloed op het stapelen van het additief. Door een verlaagde splijtsterkte kunnen de stenen pas na een langere uithardingstijd en/of minder hoog gestapeld worden.

6. Onderhoud

Het gebruiken van stro-as kan invloed hebben op de manier waarop de machines aan het eind van de dag schoon worden gemaakt. Stro-as geeft af en geeft een zwarte kleur aan alles waarmee het in contact komt.

5. Milieu-impact & theoretische beschikbaarheid

Voor het onderzoek is gekeken naar het vaststellen van de MKI-waarde en de beschikbaarheid van de drie additieven. Echter is gebleken dat het bepalen van de MKI-waarde niet mogelijk is door het ontbreken van een EPD-certificaat (bijlage G1). Om deze reden is ervoor gekozen om naar de directe en indirecte CO₂-uitstoot van de producten te kijken en deze te vergelijken. Ook is geprobeerd een inschatting te maken van de theoretische beschikbaarheid van de additieven. In dit hoofdstuk wordt de belangrijke informatie uit de research op een rij gezet. Het onderzoek naar de milieu-impact en de theoretische beschikbaarheid van de drie additieven is te vinden in bijlage F.

Uit het onderzoek naar de milieu-impact en de theoretische beschikbaarheid zijn verschillende bevindingen gedaan. De grootte van de CO₂-impact is sterk afhankelijk van de scope waarin de CO₂-uitstoot wordt gemeten. Bijvoorbeeld in de biomassacentrale komt CO₂ vrij die is opgeslagen in het hout en stro. Dezelfde CO₂ wordt gedurende de groeitijd van het hout en stro weer opgenomen. Daarom wordt verbrande biomassa als CO₂-neutraal gezien door de Europese Unie en door de Nederlandse overheid. Het verkrijgen van houtas en stro-as is dus als dit op deze manier gebeurt op papier CO₂-neutraal voordat deze is verwerkt en getransporteerd. Ook het berekenen van de CO₂-uitstoot van hazelnootdoppen is gecompliceerd. Het telen van hazelnoten brengt namelijk zowel CO₂-uitstoot als CO₂-opname met zich mee. Echter is de CO₂-uitstoot van de doppen afhankelijk vanaf welke stap van het productieproces de uitstoot mee wordt genomen.

De uitstoot die plaatsvindt, hoeft technisch gezien pas na het ontdoppen mee te worden genomen, omdat voor deze stap de uitstoot bij de productie van hazelnoten al mee wordt genomen. Bij de productie van hazelnoten wordt CO₂ opgeslagen in de dop. Dit betekent dat de dop CO₂-negatief is, voordat deze wordt verwerkt en getransporteerd. De uitstoot bij het verwerken tot poeder is afhankelijk van de manier waarop dit gebeurt. Bij het verwerken tot poeder met behulp van machines dient te worden opgemerkt dat bij het gebruik hiervan indirect CO₂ vrijkomt. Voor alle additieven geldt dat transport naar de productielocatie nog mee zou moeten worden genomen. Ook geldt voor alle additieven dat ze circulair en biologisch afbreekbaar zijn.

De beschikbaarheid van de additieven verschilt sterk per reststroom. Geschat wordt dat houtas de grootste reststroom is. Dit wordt in biomassacentrales verbrand en hierbij zou enkel op de Nederlandse markt al naar schatting 154.000 tot 254.100 ton beschikbaar zijn voor het toepassen als biobased additief. Voor stro-as is dit al een stuk minder. Als al het geproduceerde stro zou worden verbrand in Nederland zou 25.000 – 30.000 ton aan stro-as beschikbaar zijn. Hierbij is nog geen rekening gehouden met andere toepassingsgebieden. In de praktijk zal dus veel minder beschikbaar zijn. Tot slot is het aandeel theoretisch beschikbare hazelnootdoppen op de Nederlandse markt veel lager dan van tevoren verwacht. Bij de productie van hazelnoten en alle import van hazelnoten zou naar schatting 100 ton aan hazelnootdoppen vrijkomen.

6. Certificering en regelgeving

6.1 Verplichte regelgeving

6.1.1 CE-markering

CE-markering is vereist voor producten die op de Europese markt worden gebracht. Het geeft aan dat het product is getest en voldoet aan EU-wetgeving (Rijksoverheid, z.d.). De specifieke eisen variëren per productcategorie en zijn vastgelegd in EU-wetgeving. Voor betonstraatstenen staan de eisen in de NEN-EN 1338. Nationale overheden mogen geen extra eisen stellen. De fabrikant mag zelf beoordelen of aan de verplichte eisen wordt voldaan.

In de NEN-EN 1338 staan zowel eisen waaraan het product gegarandeerd moet voldoen, als eisen waarbij het toevoegen van het biobased additief een impact kan hebben op de verplichte prestatie. Eisen waarop het biobased weinig tot geen impact zal hebben, zijn bijvoorbeeld de vorm, afmeting, brandveiligheid en fabricagematen. Het toevoegen van het biobased additief heeft echter wel effect op andere gestelde eisen door de norm. De splijtsterkte, weersbestandheid, slijtbestandheid, brandgedrag, productiecontrole en glij/slipweerstand kunnen worden beïnvloed door het toevoegen van het biobased additief.

Splijtsterkte

Een BSS moet een minimale splijtsterkte hebben van $3,6 \text{ N/mm}^2$ na 35 dagen uitharding. Deze eis staat beschreven in hoofdstuk 5.3.3 van de NEN-EN 1338. Deze eis wordt beproefd in de testfase, welke te lezen is in hoofdstuk 3.

Weersbestendigheid

De BSS moet weersbestendig zijn. Hiervoor is de eis afhankelijk van de klasse van het product. Voor een klasse 1 product met de markering A hoeven geen testen te worden uitgevoerd. Om te volstaan als klasse 2 product met markering B mag het product bij de wateropslorpingstest niet meer dan 6,5% in massa opnemen van het water. Een klasse 3 product met markering D wordt blootgesteld aan dooizouten en moet de vorst/dooiproef volbrengen. Om te voldoen aan de vorst/dooiproef moet het gemiddelde massaverlies onder de 1 kg/m^2 liggen. Geen enkele testwaarde mag bij deze test de $1,5 \text{ kg/m}^2$ overschrijden. De weersbestendigheid wordt niet meegenomen in de testfase. Deze zal getest moeten worden om aan de eis te voldoen. Deze eis staat beschreven in hoofdstuk 5.3.2 van de NEN-EN 1338.

Slijtbestandheid

De BSS moet slijtbestand zijn. De slijtbestandheid kan gemeten worden door de breedwielslijtproef. Welke resultaten de steen minimaal moet behalen, is afhankelijk van de klasse. Deze eis wordt niet beproefd in de testfase, omdat de slijtbestandheid afhangt van de aggregaten en niet het biobased additief. Zonder test zal de steen voldoen aan de eisen van een klasse 1 product met markering F. Om aan een klasse 3 markering H te voldoen, zal bij de proef 23 mm of minder gemeten moeten worden. Om aan een klasse 4 markering I te voldoen moet bij de proef 20 mm of minder gemeten worden. Deze eis staat beschreven in hoofdstuk 5.3.4 van de NEN-EN 1338.

Glij/slipweerstand

De BSS moet glij/slipbestand zijn. Deze eis staat beschreven in hoofdstuk 5.3.5 van de NEN-EN 1338. Over het algemeen hoeft deze eis niet getest te worden om aan hieraan te voldoen. In uitzonderlijke gevallen kan de waarde van de glij/slipweerstand geëist worden. In dit geval kan deze met een wrijvingsslinger getest worden.

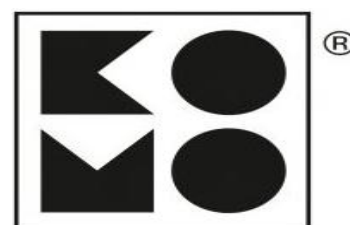
6.1.2 NL-BBL

Vanaf 1 januari 2024 geldt het bouwbesluit 2012 niet meer en is deze vervangen door het Besluit bouwwerken leefomgeving (BBL) (Berghuis & Pothuis, 2023). Hierin staat dat de bestratingsmaterialen geen verontreinigen mogen hebben die de bodem kunnen aantasten. De betonnen straatstenen die Morssinkhof Groep produceert, voldoen aan de NL-BBL en de toekomstige betonstraatstenen met het biobased additief moeten ook voldoen aan de NL-BBL (Hoogendoorn, Productieproces, 2024). Alle gekozen biobased additieven zijn biologisch afbreekbaar en niet schadelijk voor het milieu. Deze zullen dus automatisch aan de NL-BBL voldoen.

6.2 Gewenste certificering

6.2.1 KOMO-certificaat

KIWA is het keuringsinstituut die het KOMO-certificaat afgeeft. Het KOMO-certificaat is officieel niet verplicht, maar veel bedrijven willen graag het KOMO-certificaat hebben voor hun product. Aantonen van zo'n certificaat biedt namelijk meerwaarde vanuit klantenperspectief. Vanuit KIWA wordt regelmatig gecontroleerd of nog steeds wordt voldaan aan de vereisten voor het certificaat (KIWA, z.d.). Het gewenste certificaat van KOMO dat bij betonstraatstenen hoort is BRL 2312. Voor de producteisen wordt veelal in de certificatenormen naar de NEN 1338 verwezen. In deze norm moet de weersbestendigheid voldoen aan een klasse 3 product met markering D en de slijtbestandheid aan een klasse 3 product met markering H. Naast deze producteisen worden in deze norm ook aan de materialen in het product eisen gesteld. Het gedeeltelijk vervangen van cement door biobased alternatieven heeft geen effect omtrent de eisen van de originele ingrediënten die in het mengsel zitten. Het biobased additief heeft echter effect op de normen omtrent vulstoffen. Alternatieve vulstoffen mogen worden toegepast volgens de eisen. Dit moet wel schriftelijk in overeenstemming zijn met KIWA. Naast producteisen en eisen omtrent de ingrediënten heeft KIWA ook nog eisen omtrent kwaliteitscontrole en eisen aan de certificatie-instelling. De verandering in receptuur van het product zal hier naar verwachting geen invloed op hebben (KIWA, 2016).



Figuur 6.1: KOMO-logo (KIWA, z.d.).

Als de steen aan de eisen in het certificaat voldoet, kan het proces voor het verkrijgen van het certificaat gestart worden. Een auditor vertegenwoordigt KIWA als onafhankelijke derde om te kijken of het product voldoet aan de eisen die KIWA gesteld heeft. Indien is vastgesteld dat het product aan de eisen voldoet, wordt het KOMO-certificaat vrijgegeven voor het desbetreffende product en mag het KOMO-logo (figuur 6.1) op de producten worden vermeld. Bij gebreken krijgt de fabrikant 6 maanden de tijd om verbeteringen in het product door te voeren (KIWA, z.d.).

6.2.2 Overige certificering

Naast de gewenste certificering zijn er ook andere certificaten, die overwogen zouden kunnen worden. Deze certificaten zijn het EPD-certificaat, het ISCC-certificaat en het EPD-certificaat. Hierin staat beschreven of de additieven aan de eisen voor het certificaat voldoen en welke stappen ondernomen moeten worden om deze te krijgen. De overige certificaten zijn in bijlage G te vinden.

7. Conclusie, discussie en aanbevelingen

7.1 Conclusie

Vanuit dit onderzoek is voorafgaand onderstaande hoofdvraag geformuleerd:

Welk biobased additief kan de Morssinkhof Groep toepassen als meest geschikte gedeeltelijke vervanging van cement bij de productie van aardvochtige betonstraatstenen?

Uit de testresultaten blijkt dat na 35 dagen enkel het monster met 5% houtas de vereiste sterkte behaalt. Het monster met 15% houtas en meer water nadert de vereiste splijtsterkte en zou mogelijk de verplichte splijtsterkte halen als deze in de fabriek zou zijn gemaakt, gezien deze ca. 10-15% betere resultaten kan opleveren. Uit deze resultaten van de splijtsterketest volgt dan dat met houtas het hoogste vervangingspercentage bereikt kan worden en het laagste watergebruik ten opzichte van de andere additieven. Ook tast houtas het minst de visuele eigenschappen aan van de steen vergeleken met de andere additieven.

Alle additieven kunnen in een automatisch productieproces worden toegevoegd aan het aardvochtige betonmengsel. Hiervoor zijn weinig aanpassingen aan de fabriek nodig. De additieven kunnen allemaal droog en luchtdicht in silo's worden opgeslagen. Het machine- en het mengselrecept moet worden geoptimaliseerd voor de biobased additieven. Stro-as stuift extreem op door de lage dichtheid en moet bij het productieproces voorzichtig behandeld worden. Hazelnootdoppoeder moet eerst worden vermalen gezien er geen leverancier is die dit poeder direct levert.

Tevens is naar voren gekomen in het onderzoek dat vrijkomende CO₂ bij het verbranden van hout en stro in biomassacentrales als CO₂-neutraal mag worden gezien volgens de EU en de Nederlandse overheid, omdat de hoeveelheid CO₂ die wordt uitgestoten ook weer opgenomen kan worden. Bij hazelnootdoppen is juist sprake van een CO₂-negatief additief. Per kilo neemt de dop ongeveer 0,7-1 kg CO₂ op. Alle biobased additieven breken af in de natuur na verloop van tijd. Voor alle additieven is het transport en de verwerking niet meegenomen in de CO₂-berekening.

Wat betreft de certificering zou, zolang aan de vereisten wordt voldaan, voldaan kunnen worden aan de CE en naar verwachting ook aan het gewenste KOMO-certificaat. Een EPD-certificaat is vooralsnog niet beschikbaar bij verschillende leveranciers van alle drie de additieven. Een EPD-certificaat is nodig voor het bepalen van de MKI-waarde van de producten en is voor ieder additief te krijgen. Het is mogelijk om een EPD-certificaat te verkrijgen als een LCA wordt uitgevoerd.

Aan de overige certificaten die niet direct als gewenst gezien worden, maar mogelijk wel interessant zijn, zou bij het gebruik van houtas en stro-as nog niet voldaan kunnen worden. Dit is zou bij hazelnootdoppoeder in één geval wel kunnen namelijk het ISCC-certificaat.

Tot slot biedt houtas ook de hoogste theoretische beschikbaarheid en kan hoogstwaarschijnlijk ook worden voldaan aan de gewenste productiecapaciteit. Met stro-as zou dit theoretisch gezien ook kunnen, maar de beschikbaarheid is in de praktijk onzekerder dan die van houtas. Kortom, de hoofdvraag vanuit dit onderzoek kan worden beantwoord met houtas als meest geschikte biobased additief om cement gedeeltelijk mee te kunnen vervangen voor deze industrie.

Kortom, van alle geteste additieven lijkt houtas de meeste potentie te hebben om te dienen als gedeeltelijke vervanging van cement.

7.2 Discussie

In dit onderzoek zijn monsters gemaakt met drie verschillende biobased additieven. De monsters zijn op splijtsterkte getest onder gelijke omstandigheden en gemeten volgens de eisen in de NEN-EN 1338. Alle monsters zijn onder gelijke omstandigheden geproduceerd en getest met behulp van een splijtbank, zoals beschreven in hoofdstuk 3. Hierdoor kan dit onderzoek als valide gezien worden.

De verschillen tussen de additieven is duidelijk te zien als wordt gekeken naar de splijtsterkte van de monsters met 15% vervanging en het hoogst toegevoegde watergehalte. Het monster van houtas haalt een splijtsterkte van $3,3 \text{ N/mm}^2$, terwijl stro-as een splijtsterkte van $0,9 \text{ N/mm}^2$ en hazelnootdoppoeder een splijtsterkte van $0,6 \text{ N/mm}^2$ haalt. Enkel met houtas is de minimale splijtsterkte van $3,6 \text{ N/mm}^2$ bereikt bij het monster van 5% vervanging. Hierdoor kan er aangetoond worden dat enkel houtas kan worden toegepast als gedeeltelijke vervanging van cement. De onderzoeksresultaten komen niet volledig overeen met verwachtingen op basis van het literatuuronderzoek. Uit het literatuuronderzoek is gebleken dat stro-as namelijk de hoogste potentie heeft om de vereiste splijtsterkte te bereiken.

De verschillen met het literatuuronderzoek kunnen mogelijk verklaard worden door de suboptimale omstandigheden waarmee de additieven zijn verkregen. Voornamelijk de lagere verbrandingstemperatuur bij de as-soorten heeft kunnen leiden tot een lager amorf silicagehalte, wat heeft kunnen bijdragen aan een verminderde compatibiliteit met cement. De stro-as zorgt voor een grote wateropname wat voor minder hydratatie zorgt van het cement. Ook hazelnootdoppoeder heeft niet de gewenste korrelgrootte kunnen bereiken, vanwege gebrek aan juiste materieel en tijd. Dit kan tot lagere resultaten hebben geleid in het onderzoek. Ondanks de suboptimale omstandigheden is de drastische sterktevermindering van stro-as en hazelnootdoppoeder ten opzichte van het literatuuronderzoek opvallend. De reden dat houtas beter presteert dan stro-as en hazelnootdoppoeder kan te danken zijn aan de aanwezigheid van vliegashout (een puzzolaan). Doordat zowel het volume toegevoegde additief als het aantal milliliter toegevoegd water verandert, fluctueert zowel de mengverhouding als de wcf. Hierdoor kan niet direct verklaard worden waar het verlies in splijtsterkte vandaan komt.

Doordat dit onderzoek geen veelbelovende resultaten heeft in de splijtsterkte voor stro-as en hazelnootdoppoeder kunnen deze uit worden gesloten als biobased additief voor gedeeltelijke vervanging van cement in aardvochtig beton. Bij stro-as is een drastische kleurverandering te zien waardoor grote vervangingspercentages onwenselijk zijn. Het gebruik van hazelnootdoppoeder resulteert in drastische sterkteverminderingen. Houtas kan aan de splijtsterke-eis volgens de NEN-norm voldoen. Echter moeten nog testen moeten worden uitgevoerd om te voldoen aan de slijtbestandheid en weersbestendigheid.

Er zijn diverse vervolgonderzoeken die kunnen volgen uit het onderzoek. Zo kan bijvoorbeeld nogmaals gekeken worden naar houtas met de juiste verbrandingstemperatuur en een geoptimaliseerd recept. Hiermee wordt bedoeld dat zowel het mengselrecept als het machinerecept aan wordt gepast aan de nieuwe vulstof. In dit onderzoek zijn gezien de tijd en beschikbaarheid HLRA en walnootdopas niet meegenomen. Dit zijn twee additieven die volgens de onderzoeken ook goede resultaten vertoonden. Deze zouden onderzocht kunnen worden in een vervolgonderzoek. Nog een mogelijkheid voor een vervolgonderzoek is het toepassen van stro-as als biobased kleurstof. Vanwege de sterk zwarte kleur is zelfs bij 5% vervanging de kleurverandering drastisch. Mogelijk kan stro-as dienen als een ondersteunende biobased alternatief voor zwarte kleurstof.

7.3 Aanbevelingen

Aanbeveling 1: Voer een herhaalonderzoek uit naar houtas afkomstig van biomassacentrales. Ditmaal gevormd bij een verbrandingstemperatuur van 600°C gedurende twee uur en met verhoogde fijnheid verkregen door een kogelmolen of vergelijkbaar alternatief. Laat dit uitvoeren door de huidige leverancier Heidelberg Materials Benelux of alternatief bedrijf indien zij dit niet kunnen. Optimaliseer daarnaast het mengselrecept door één of meerdere hulpstoffen toe te voegen, de juiste hoeveelheid water te gebruiken of door de mengverhouding aan te passen. Deze aanpassingen vergroten het potentieel van het additief, terwijl mogelijke nadelige effecten worden beperkt. Gezien de ruime beschikbaarheid van vrijgekomen houtas bij biomassacentrales is dit op korte termijn uitvoerbaar door de Morssinkhof Groep zelf.

Aanbeveling 2: Neem twee additieven, walnootdopas en HLRA, die niet zijn meegenomen in dit onderzoek, maar in de buurt kwamen van de scores van de andere as-soorten, op in een vervolgonderzoek. Deze additieven hebben mogelijk meer potentie dan de geteste additieven in dit onderzoek. Het uitvoeren hiervan kan op korte termijn gedaan worden door de Morssinkhof Groep zelf door hier initiatief in te nemen.

Aanbeveling 3: Optimaliseer de testparameters door:

- Te werken met volumepercentages in plaats van massapercentages bij het toevoegen van vulstoffen. Door met volumepercentages te werken blijven de stenen qua volume even groot. Meet hiervoor voordat de testfase start de dichtheid van de vulstoffen.
- De wcf constant te laten bij alle stenen. Hierdoor veranderen er niet meerdere parameters tegelijk in het onderzoek. Als de mengsels te droog worden, laat de wcf dan met een constante waarde toenemen.
- Bij het maken van een referentiestenen met een verlaagd cementpercentage een vulstof toe te voegen die geen extra sterkte biedt, maar evenveel water opneemt als cement. Door hetzelfde volumepercentage toe te voegen als dat er verwijderd is aan cement blijft het volume van de stenen hetzelfde.

Door op deze manier de wcf en volume van de testmonsters constant te laten kan de sterkteverandering van de steen direct gelinkt worden aan het toevoegen van het additief.

Aanbeveling 4: Onderzoek de geschiktheid van stro-as als alternatieve kleurstof of als ondersteuning van de reeds toegepaste zwarte kleurstoffen x en y om de milieu-impact op een andere manier te verlagen en circulariteit te stimuleren. Voer hierbij een natronloogproef uit in overeenstemming met de NEN-EN 1744 om te onderzoeken of het humusgehalte boven de maximaal aanvaardbare waarde uitkomt. Richt hierbij voornamelijk op het vaststellen van het gehalte aan schadelijke fulvozuren. Voor de Morssinkhof Groep is dit op korte termijn uitvoerbaar, gezien de ruime beschikbaarheid van de geprepareerde as voor dit onderzoek.

Executive Summary

In this research commissioned by the Morssinkhof Groep the possibility of partially replacing cement in no slump concrete with a biobased additive has been examined. The Morssinkhof Groep established in Malden, a small town located in the southeast of the Netherlands, wants to reduce its ECI of their paving material. In order to study this possibility research has been conducted. No slump concrete has a lower water to cement ratio and a different mixing ratio compared to traditional concrete. Because of this lower water to cement ratio no slump concrete paver blocks are able to stand in 15 seconds after demoulding.

The goal of this research is to test at least three suitable additives to partially replace cement in no slump concrete paver blocks. To this end, research has been conducted into the influence of various additives on the physical properties of no slump concrete. There is a high demand to this type of paver blocks, which the Morssinkhof Groep has to fulfil. Because of this high demand, the availability besides the physical properties is taken into account in a decision matrix to make a selection of potential additives, which will be tested and further investigated.

From this decision matrix three additives are considered having the highest potential in achieving the demanded split tensile strength of $3,6 \text{ N/mm}^2$. These additives are wood ash, wheat straw as and hazelnut shell powder. These additives are processed in the no slump concrete samples with various replacement percentages between 5 and 15%. A few of these samples are made again with more water, because of the high observed water absorption of the additives at certain percentages. This high-water absorption results in a loss of strength and disrupts the hydration of cement with water. The split tensile strength was carried out on the samples after 7 and 35 days.

According to these results it's clear that hazelnut shell powder and wheat straw ash don't fulfil to the demanded split tensile strength of $3,6 \text{ N/mm}^2$ after 35 days in according with the NEN 1338. Wood ash on the other hand fulfils to this minimal split tensile strength of $3,6 \text{ N/mm}^2$ replacing 5% of cement and comes very close to this demanded value when 15% of cement is replaced. Because of the high demand for concrete paver blocks, Morssinkhof Groep desires to reach a split tensile strength of $3,6 \text{ N/mm}^2$ after 7 days. None of the samples fulfilled this wish.

In addition to the splitting strength, the impact on the manufacturing process was also investigated. It has been concluded that major adjustments will not be necessary. Basically, the machine recipe and mixture recipe must be adapted to the additives. Also, due to the longer curing time, the stones cannot be stacked at the same height as the standard stones after 24 hours. Straw ash has a very low density and therefore should be added to the mixture with extreme caution. Hazelnut shells must first be ground into powder before they can be used in the manufacturing process. Since there is no supplier for hazelnut shell powder, equipment must be purchased to produce it.

Furthermore, the CO₂-impact and the theoretical availability of the additives are studied. When wheat straw and wood are burned CO₂ will be released into the atmosphere. Since wheat straw and wood grows back, the released CO₂ into the atmosphere will be consumed by them. Due to this circular process, the EU and the Dutch government consider these sources as CO₂-neutral. This is without grinding and transport taken into account. Hazelnut shells also absorb CO₂ during their growth. These could be considered CO₂ negative before grinding and transport. Wood ash is highly available and fulfils to the production capacity of the Morssinkhof Groep. Wheat straw ash does theoretically fulfil to the production capacity, but this theoretical value is less certain. Wheat straw has many more applications, which makes it difficult to estimate the amount of wheat straw that could be used as additive. Hazelnut shells theoretically don't fulfil to the production capacity with the current account in the Netherlands.

In terms of certification and regulations it's concluded that only wood ash fulfils to the demanded split tensile strength according to the NEN 1338. Other tests for weathering resistance, abrasion resistance and unpolished slip resistance should be carried out in further research to make sure that wood ash does fulfil to the NEN 1338. The same goes for obligations regarding the KOMO-certificate. All additives are able to receive an EPD-certificate, which contains their environment impact. Only hazelnut shell powder is able to receive an ISCC-certificate. None of the additives are able to receive an RSB-certificate.

According to these observations and research it can be concluded that only wood ash should be taken further into research. Wood ash is able to fulfil to the demanded split tensile strength, has a high theoretical availability because it's highly produced as residual flow at biomass plant and reduces the CO₂-impact of the product. A follow-up study should therefore examine whether a higher splitting strength and/or replacement percentage can be achieved through improved processing conditions and an improved recipe.

8. Bibliography

- Berghuis, M., & Pothuis, J. (2023, maart 2). *Wijzigingen Bouwbesluit 2012 en BBL in 2023 en 2024*. Opgehaald van omgevingsweb: <https://www.omgevingsweb.nl/nieuws/wijzigingen-bouwbesluit-2012-en-bbl-in-2023-en-2024/#:~:text=Vanaf%20januari%202024%20is%20het,en%20veiligheid%20te%20kunnen%20garanderen.>
- Betonhuis. (2019, Februari 28). *Aanmaakwater voor beton*. Opgehaald van Betonhuis: <https://betonhuis.nl/betonmortel/aanmaakwater-voor-beton>
- Betonhuis. (2019, April 3). *Vulstoffen voor beton*. Opgehaald van Betonhuis: <https://betonhuis.nl/betonhuis/vulstoffen-voor-beton>
- betonlexicon. (2018, december 6). *Humus*. Opgehaald van www.betonlexicon.nl: <https://www.betonlexicon.nl/H/Humus>
- BetonLexicon. (2018, november 30). *Kristallijn*. Opgehaald van www.betonlexicon.nl: <https://www.betonlexicon.nl/K/Kristallijn>
- Bheel, N., Ibrahim, M. H., Adesina, A., Kennedy, C., & Shar, I. A. (2020, november 23). *Mechanical performance of concrete incorporating wheat straw ash*. Opgehaald van [link.springer](http://link.springer.com): <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s41024-020-00099-7.pdf>
- de Veer, T. (2024, februari 23). Circulariteit beton. (R. Nagelmaeker, & R. van Wijk, Interviewers)
- Hofkamp, B. (2024, maart 8). Struviet. (R. van Wijk, & R. Nagelmaeker, Interviewers)
- Hoogendoorn, R. (2024, mei 6). Fysische eigenschappen. (R. van Wijk, & R. Nagelmaeker, Interviewers)
- Hoogendoorn, R. (2024, maart 21). Productieproces. (R. van Wijk, & R. Nagelmaeker, Interviewers)
- Hoogendoorn, R. (2024, maart 1). Splijtsterketest. (R. Nagelmaeker, & R. van Wijk, Interviewers)
- Hoogendoorn, R. (2024, februari 8). Wensen en eisen eindproduct. (R. van Wijk, & R. Nagelmaeker, Interviewers)
- Katman, H. Y., Khai, W. J., Bheel, N., Kirgiz, M. S., Kumar, A., Khatib, J., & Benjeddou, O. (2022, september 2). *Workability, Strength, Modulus of Elasticity, and Permeability Feature of Wheat Straw Ash-Incorporated Hydraulic Cement Concrete*. Opgehaald van mdpi.com: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/9/1363>
- KIWA. (2016, Mei 1). *BRL 2316 Betonstraatstenen*. Opgehaald van KIWA: <https://www.kiwa.com/nl/nl/services/certificering/brl-2312-betonstraatstenen/>
- KIWA. (z.d.). *Certificering*. Opgehaald van KIWA: <https://www.kiwa.com/nl/nl/diensten/certificering/>
- Klimaatakkoord. (z.d.). *Voortgang klimaatdoelen*. Opgehaald van www.rijksoverheid.nl: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/voortgang-klimaatdoelen#:~:text=In%202030%20moet%20Nederland%2055,2050%20wil%20Nederland%20klimaatneutraal%20zijn.>
- P. van den Berg, W. B. (1998). *Betontechnologie*. 's Hertogenbosch: BetonPrisma.

- Passage Technology LLC. (2024). *What Is The Analytic Hierarchy Process (AHP)?* Opgehaald van [passagetechnology.com](https://www.passagetechnology.com/what-is-the-analytic-hierarchy-process): <https://www.passagetechnology.com/what-is-the-analytic-hierarchy-process>
- Rijksoverheid. (z.d.). *Welke producten moeten een CE-markering dragen?* Opgehaald van Rijksoverheid: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/bouwproducten/vraag-en-antwoord/wat-is-een-ce-markering-en-wanneer-moet-ik-deze-op-mijn-product-aanbrengen>
- Rikken, J. (2024, maart 4). Verbranden van hout. (R. van Wijk, & R. Nagelmaeker, Interviewers)
- SCB Associates Ltd. (2016, 11 11). *Analytic Hierarchy Process, AHP*. Opgehaald van [scbuk.com](https://www.scbuk.com/AHP%20Template%20SCBUK.xls): <https://www.scbuk.com/AHP%20Template%20SCBUK.xls>
- Schepers, A. (2023, september 11). *Beton en baksteen worden duurder*. Opgehaald van [klusvisie.nl](https://www.klusvisie.nl/actueel/nieuws/beton-en-baksteen-worden-duurder/8054/): <https://www.klusvisie.nl/actueel/nieuws/beton-en-baksteen-worden-duurder/8054/>
- Stradus Infra. (2020). *Beton en CO2*. Opgehaald van [febe.be](https://www.febe.be/frontend/files/userfiles/files/beton/Beton211/CO2.pdf): <https://www.febe.be/frontend/files/userfiles/files/beton/Beton211/CO2.pdf>
- Stutech. (2005, Februari). *Aardvochtig beton*. Opgehaald van Rijkswaterstaat: https://open.rijkswaterstaat.nl/publish/pages/15670/aardvochtig_beton.pdf
- van den Berg, P., Buist, W., Souwerbren, C., & de Vree, R. (1998). *BetonTechnologie*. 's Hertogenbosch: BetonPrisma.
- van Heumen, Y. (2022, december 30). *Biobased bouwen ligt voor velen nog als beton op de maag*. Opgehaald van [innovationorigins.com](https://innovationorigins.com/nl/biobased-bouwen-ligt-voor-velen-nog-als-beton-op-de-maag/): <https://innovationorigins.com/nl/biobased-bouwen-ligt-voor-velen-nog-als-beton-op-de-maag/>