

TNO-rapport
HAM-RPT-96-345

TNO Technisch Fysische Dienst
TU-Delft

Den Dolech 2
Postbus 595
5600 AN Eindhoven

Telefoon 040 265 64 00
Fax 040 244 93 50

Ontwikkeling van bouwmaterialen uit
anorganische reststoffen en koud
verhardende binders.

opdrachtnummer:
553.006

auteurs:
ing. J.P.G.M. van Eijk
dhr. A. H. de Vries
Dr. Ir. R.A. Terpstra

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
Algemene Voorwaarden voor onderzoeks-
opdrachten aan TNO, dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

aan:
Beheer en Handelmaatschappij
Metselmaterialen B.V.
t.a.v. dhr. P.A. Ordeman
Postbus 9
2100 AA Heemstede

datum:
9 juli 1996

© 1996 TNO



0 Samenvatting

In verschillende sectoren komen momenteel rest materiaal ter beschikking. Te denken valt hierbij aan bouw- en sloopafval, voor de industrie onbruikbare kleien en verbrandingsassen. Verwerking van deze materialen volgens de traditionele keramische weg vraagt een hoog energieverbruik. Wel kunnen deze materialen na een goedkoop calcineerproces gebruikt worden in b.v. bouwmaterialen. Door de toepassing van koud verhardende toeslagstoffen kunnen nieuwe materialen worden gemaakt. Hierdoor wordt een energiebesparing verkregen.

Bij koud verhardende toeslagstoffen kan worden gedacht aan hydraulische cementen (Portland cement en gips) en reactie cementen (aluminiumfosfaat), maar ook zogenaamde precipitatie cementen. Het meest gebruikte precipitatie cement is waterglas (Na_3SiO_3). Het wordt voor tal van toepassingen gebruikt zoals daar waar slijtvastheid en zuurresistentie vereist is, als toeslagmateriaal in bijvoorbeeld de zeep industrie, als binder bij de fabricage van gietmallen voor metaalgietereien of bij de fabricage van bouwmaterialen uit granulaat. Waterglazen zijn oplosbaar in water en precipiteren onder invloed van een harder. Uitharding kan op een aantal manieren worden verkregen b.v. door verlaging van de pH of door de silica concentratie te verhogen. Bij gebruik van waterglas als binder bij de fabricage van bouwmaterialen kunnen twee routes gevolgd worden.

1. Via een gietproces

Het gietproces kan op 2 manieren worden toegepast namelijk:

- 1 Het granulaat kan worden gemengd met de (vloeibare) binder die eventueel verdund kan worden, waarna de slurrie in een vorm wordt gegoten.
- 2 Het granulaat wordt gemengd met de binder tot een plastische massa, waarna deze massa in een vorm gegoten wordt en via trilling verdicht.

2. Via een persproces

Het persproces kan op 2 manieren worden toegepast namelijk:

- 1 Het granulaat, bestaande uit een zg. harder en restmateriaal, wordt geperst en het compact wordt vervolgens geïmpregneerd met de vloeibare binder of met water. De binder is een waterige oplossing van een vloeibaar silicaat. Het water verdampt en de binder verhardt.
- 2 Het granulaat, bestaande uit poedervormige binder, harder en restmateriaal, mengen met water en vervolgens persen.

De technisch haalbaarheid van het proces is aangetoond. Er zijn stenen gemaakt van restmaterialen met een binder die voor bepaalde toepassingen gebruikt kunnen worden. Bouw en sloopafval lijkt geschikt om hergebruikt te worden als bouw materiaal omdat sterktes die gehaald kunnen worden ruim voldoen voor buitenmuur- en binnenmuurstenen, zelfs voor de lagere klasse hogedrukstenen. Gereinigde grond lijkt geschikt om hergebruikt te worden als bouw materiaal omdat sterktes die gehaald kunnen worden voldoen voor binnenmuur- en buitenmuurstenen. Gereinigde grond zal wel een temperatuur behandeling tot 800 °C nodig hebben om de zwarte kleur kwijt te raken. Humusrijke klei gecalcineerd tot 400 °C is in deze vorm nog niet geschikt als bouw materiaal ondanks dat de sterkte voldoende zou zijn voor binnenmuurstenen. Dit is omdat er van de produkten na uitharding materiaal af te schrapen is. Voor vliegias lijken beide vormgevingstechnieken, het gieten en het persen, geschikt om bouwmaterialen te maken voor

binnenmuurstenen. In combinatie met de ander restmaterialen zijn ook andere bouwmaterialen mogelijk waarvoor hogere sterktes vereist zijn.

Voor zover bekend is de hier beschreven combinatie van binders en reststoffen voor de vervaardiging van bouwmaterialen nieuw.

De globale kostprijs berekening gebaseerd op de door ons gebruikte binders en harders wijzen uit dat het nu nog niet mogelijk is op een economisch verantwoorde wijze deze materialen te vervaardigen. De kostprijs van traditionele materialen voor een vergelijkbare toepassing liggen aanzienlijk lager.

Wel is met dit onderzoek een methode ontwikkeld voor de opdrachtgever om, mogelijk in de toekomst, reststoffen te gebruiken tot bruikbare bouwmaterialen.

1 Inhoudsopgave

0	Samenvatting	2
1	Inhoudsopgave	4
2	Inleiding	5
3	Literatuuronderzoek	7
3.1	Inleiding	7
3.2	Literatuurbespreking	7
3.3	Eigenschappen bouwmaterialen	11
4	Materialen en methoden gebruikt bij het onderzoek	12
4.1	Materialen	12
4.1.1	Restmaterialen	12
4.1.2	Binders en harders	16
4.2	Vormgeving	18
4.2.1	Gieten	18
4.2.2	Persen	20
5	Resultaten	22
5.1	Resultaten giet experimenten	22
5.2	Resultaten pers experimenten	25
5.3	Kostprijs berekening	29
6	Conclusies en aanbevelingen	30
7	Referenties	32
8	Ondertekening	32
9	Bijlagen	33

2 Inleiding

In verschillende sectoren komen momenteel rest materiaal ter beschikking. Te denken valt hierbij aan bouw- en sloopafval, voor de industrie onbruikbare kleien en verbrandingsassen. Verwerking van deze materialen volgens de traditionele keramische weg vraagt een hoog energieverbruik. Wel kunnen deze materialen na een goedkoop calcineerproces gebruikt worden in b.v. bouwmaterialen. Door de toepassing van koud verhardende toeslagstoffen kunnen nieuwe materialen worden gemaakt. Hierdoor wordt een energiebesparing verkregen.

Bij koud verhardende toeslagstoffen kan worden gedacht aan hydraulische cementen (Portland cement en gips) en reactie cementen (aluminiumfosfaat), maar ook zogenaamde precipitatie cementen. Het meest gebruikte precipitatie cement is waterglas (Na_3SiO_3). Het wordt voor tal van toepassingen gebruikt zoals daar waar slijtvastheid en zuurresistentie vereist is, als toeslagmateriaal in bijvoorbeeld de zeep industrie, als binder bij de fabricage van gietmallen voor metaalgietereien of bij de fabricage van bouwmaterialen uit granulaat. Waterglazen zijn oplosbaar in water en precipiteren onder invloed van een harder. Uitharding kan op een aantal manieren worden verkregen b.v. door verlaging van de pH of door de silica concentratie te verhogen. Bij gebruik van waterglas als binder bij de fabricage van bouwmaterialen kunnen globaal twee routes gevolgd worden.

1. Via een gietproces

Het gietproces kan op 2 manieren worden toegepast namelijk:

- 1 Het granulaat kan worden gemengd met de (vloeibare) binder die eventueel verdund kan worden, waarna de slurrie in een vorm wordt gegoten.
- 2 Het granulaat wordt gemengd met de binder tot een plastische massa, waarna deze massa in een vorm gegoten wordt en via trilling verdicht.

2. Via een persproces

Het persproces kan op 2 manieren worden onderzocht namelijk:

- 1 Het granulaat, bestaande uit een zg. harder en restmateriaal, wordt geperst en het compact wordt vervolgens geïmpregneerd met de vloeibare binder of met water. De binder is een waterige oplossing van een vloeibaar silicaat. Het water verdampt en de binder verhardt.
- 2 Het granulaat, bestaande uit poedervormige binder, harder en restmateriaal, mengen met water en vervolgens persen.

Bij het begin van het project zijn de volgende doelstellingen geformuleerd.

De technische haalbaarheid van het proces zal worden bekeken. Ook zal er een globaal literatuuronderzoek plaatsvinden om te zoeken naar de eigenschappen van de verschillende bouwmaterialen en naar de nieuweheidswaarde van het te ontwikkelen materiaal.

Een aantal van de grondstoffen zal een voorbehandeling, zoals zeven, malen en calcineren, nodig hebben. De grondstoffen worden geanalyseerd op korrelgrootte verdeling en specifiek oppervlak.

Er was in eerste instantie een oriënterend onderzoek met 1 grondstof (vliegas) uitgevoerd. Van deze grondstof, vliegas, werd een gietbaar slib gemaakt met 2 binders en water. Dit geheel werd gegoten in mallen en vervolgens verhard. Met iedere binder werden een aantal producten gemaakt en vervolgens gekarakteriseerd op sterkte en porositeit. Van deze grondstof wordt ook een te persen massa gemaakt. Er werden producten geperst, deze werden verhard en vervolgens gekarakteriseerd op porositeit en sterkte.

De andere grondstoffen, bouw en sloopafval, humusrijke klei en gereinigde grond, werden volgens een van de methodes uit het oriënterende onderzoek gekarakteriseerd op porositeit en sterkte.

Ook werden er combinaties van vliegas met een andere grondstof gemaakt. De hieruit vervaardigde producten werden vervolgens gekarakteriseerd op porositeit en sterkte.

De resultaten zijn vergeleken met de eigenschappen van bestaande bouwmaterialen.

3 Literatuuronderzoek

3.1 Inleiding

Poedervormige grondstoffen en reststoffen kunnen via diverse technieken zoals gieten en persen tot een vorm verwerkt worden. De vorm krijgt vervolgens zijn sterkte met behulp van een bakproces waardoor de deeltjes met elkaar versmelten of door toevoeging van een binder materiaal. Naast organische binders, die in dit onderzoek buiten beschouwing worden gelaten, onderscheiden wij diverse soorten anorganische of cement-achtige stoffen.

Naast hydraulische cementen (zoals Portland cement en gips) en reactie cementen (zoals aluminiumfosfaat) worden zogenaamde precipitatie cementen, onderwerp van het onderhavige project, gebruikt. Meest gebruikte precipitatie cement is Na_3SiO_3 (waterglas). Het wordt voor tal van toepassingen gebruikt zoals daar waar slijtvastheid en zuurresistentie vereist is, als toeslagmateriaal in bijvoorbeeld de zeep industrie, en als binder of adhesief zoals bij de fabricage van gietmallen voor metaalgieterijen.

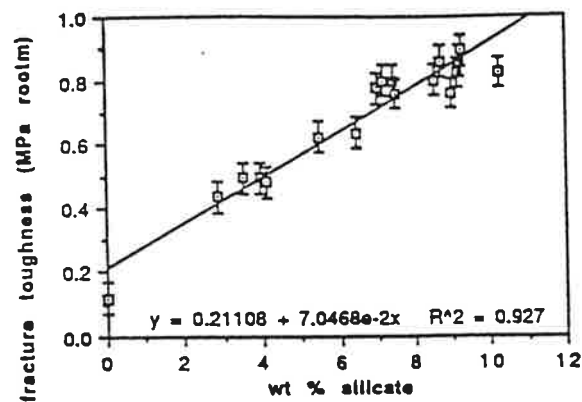
Naast Na komen Li en K-waterglazen voor. Ze zijn oplosbaar in water en precipiteren onder invloed van pH verlaging of toevoeging van zouten. Uithardingsmiddelen zijn bijvoorbeeld Al en Mg-polyfosfaten, Na_3PO_4 , NaSiF en ammonium pentaboraat. Er zijn zeer veel recepturen denkbaar. Naast diverse uithardingsmiddelen kan de SiO_2 /Metaaloxide verhouding en het watergehalte worden gevarieerd, waardoor eigenlijk iedere receptuur uniek is. Diverse van deze binders en uithardingsmiddelen zijn commercieel verkrijgbaar.

3.2 Literatuurbespreking

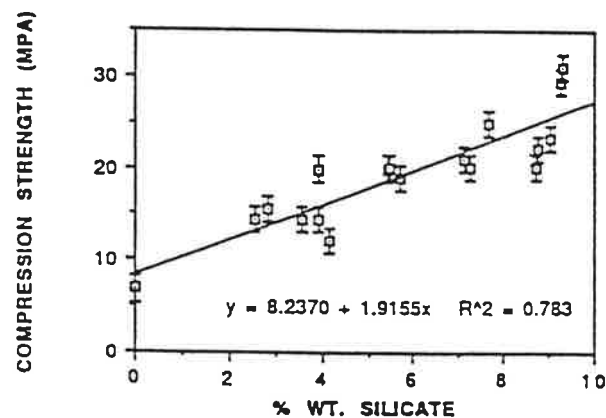
In een project uitgevoerd op Jamaica (Wagh, 1993) heeft men de vervaardiging van bouwmaterialen uit diverse reststoffen en grondstoffen met behulp van waterglas-achtige binders onderzocht. Naast zogenaamde "red mud", een afval produkt van de alumium bereiding, heeft men een lokale klei, bauxiet, gips en kalksteen gebruikt. Van al deze materialen zijn stenen vervaardigd. Het meeste werk is echter verricht aan de "red mud". Als uitgangspunt is gekozen voor een eenvoudige produktie route die moet leiden tot relatief goedkope stenen met een druksterkte van minimaal 7 MPa (1000 Psi) voor een gebouw van één verdieping.

De "red mud" bestaat in droge vorm, uit ijzeroxyde (50 %), aluminiumoxyde (15%), titaanoxyde (7-8%), calciumoxide (3-5%), siliciumoxide (3-5%) en andere metaaloxiden in geringere concentraties. De poeder deeltjes zijn kleiner dan een mm, in contact met water ontstaat een hoge pH van ± 12.5 . Na persen heeft het product een groene sterkte van 2.8 MPa (400 Psi), voldoende hanteerbaar voor de productie van stenen en dakpannen. Commerciële waterglasbinders zijn zeer reactief en hebben in oplossing een hoge pH, maar zijn volgens de auteurs veilig om te gebruiken. Ze kunnen als poeder of in oplossing worden verkregen. Direct mengen van oplossing en grondstof, en vervolgens gieten leidt tot zeer poreuze produkten met een lage sterkte. (Ervaring bij TNO met zeer fijne poeders leert dat deze route wel tot bevredigende resultaten kan leiden mits een goede receptuur wordt ontwikkeld). De geperste stenen (62 x 11 x 6 mm) worden in de waterglas oplossing gedompeld en met behulp van een vacuüminstallatie wordt de steen verzadigd met de silicaatoplossing. De auteurs bevelen uit kostprijs overwegingen aan om hoog geconcentreerde oplossingen aan te schaffen en die vervolgens te verdunnen. Het kiezen van de juiste pH van de oplossing in relatie tot de pH van het compact blijkt zeer belangrijk.

Bij een lage pH in het compact deflocculeert de binderoplossing de gecompacteerde deeltjes en verliest de steen zijn stevigheid. Bij een hoge pH wordt de viscositeit van de oplossing sterk verhoogd en stopt het impregnatie proces nagenoeg waardoor de steen niet verzadigd wordt. Door trial en error is de juiste receptuur gevonden voor dit systeem. De verzadigde producten werden bij kamertemperatuur of buiten in de zon gedroogd. Sterkte en breuktaaiheid nemen lineair toe met de hoeveelheid silicaatbinder zoals weergegeven staat in de onderstaande figuren.



Figuur 1: Breuktaaiheid van "red mud" steen als functie van silicaatbinder gehalte (Wagh, 1993)



Figuur 2: Druksterkte van "red mud" steen als functie van silicaatbinder gehalte (Wagh, 1993)

Hogere concentraties dan de gebruikte 9 % leiden niet tot sterkere of taaiere producten dus deze concentratie lijkt voor dit systeem optimaal te zijn. Bij ± 3 massa % silicaat binder wordt de vereiste druksterkte reeds bereikt. Maximaal is een druksterkte van 30 MPa gehaald bij 9 massa % silicaat binder. De stenen werden verzadigd met gedestilleerd water en met aangezuurd water (geen verdere details bekend) gedurende een aantal dagen, hetgeen geen invloed op de breuktaaiheid van het materiaal had.

De auteurs laten zien dat het vacuümimpregneren achterwege kan worden gelaten als zeer poreuze compacten worden gebruikt die met zeer verdunde oplossingen worden geïmpregneerd. In dat geval wordt een sterkte van 1000 Psi bereikt bij een concentratie van 5 % silicaatbinder.

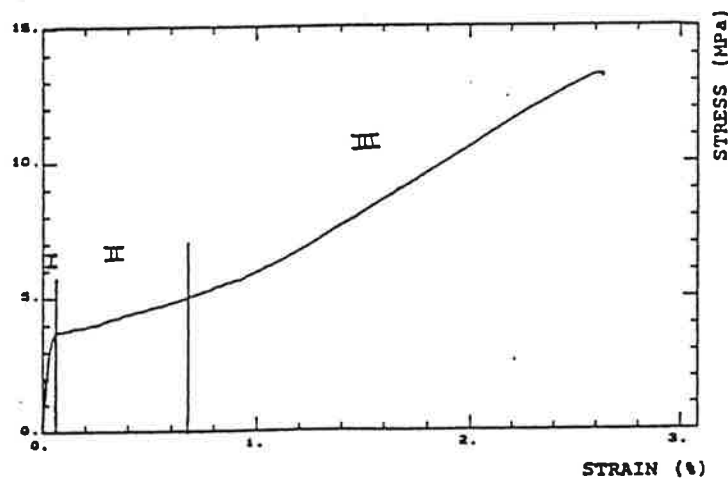
De kostprijs voor de stenen bedraagt \pm hfl 0.20, de verkoopprijs bedraagt hfl 0.50, aldus de auteurs, die voor een betonsteen een prijs van hfl 1.50 noemen. Het is duidelijk dat hier een energiezuinige productiemethode voor bouwmaterialen wordt beschreven, die in potentie geschikt is voor zeer uiteenlopende uitgangstoffen. Voor ieder systeem zal de route en receptuur geoptimaliseerd moeten worden.

Ook vezel composieten kunnen vrij eenvoudige manier worden vervaardigd met behulp van silicaatbinders, ook wel mineral polymers (MIP's) genoemd. Door toevoeging van lange vezels wordt de sterkte en taaigheid aanzienlijk verhoogd. Patfoort e.a. (1989) werken aan systemen die tussen kamertemperatuur en 100 °C uitharden. In onderstaande tabel vergelijken de auteurs verschillende brosse matrix materialen waaruit blijkt dat MIP vezelcomposieten relatief eenvoudig te vervaardigen zijn, en dat zeer veel soorten vezels kunnen worden gebruikt omdat de verwerkingstemperatuur laag is.

Tabel. 1: Karakteristieken van brosse matrix materialen (Patfoort, 1989).

	cement	keramiek	MIP
fabricage temperatuur	laag	hoog	laag
gebruikstemperatuur	gelimiteerd	hoog	hoog
kosten	laag	hoog	laag
processen van composiet	moeilijk	erg moeilijk	makkelijk

In het artikel wordt het gebruik van jute vezels beschreven. De vezels worden gebruikt in de vorm van geweven matjes. Het laminaat wordt gemaakt met een zogenaamde hand lay-up techniek en bevat 17 vol.% aan vezels. Het materiaal wordt gedurende 10 uur bij een temperatuur van 60°C in lucht uitgehard. Het materiaal vertoont dan een mechanisch gedrag onder trek als weergegeven in figuur 3.



Figuur. 3: Trek-rek curve voor jute versterkt mineraal polymeer materiaal (Patfoort, 1989)

Er worden drie gebieden onderscheiden. Een lineair elastisch gebied (I), een gebied waarin de eerste scheurvorming optreedt en de belasting van de matrix naar de vezels wordt overgebracht (II) en een gebied waarin scheuropening optreedt doordat de vezels breken (III). De energie die kan worden geabsorbeerd door het composiet is bijna 600 maal hoger dan die voor het matrix materiaal alleen. Een zelfde beeld wordt verkregen uit buig-rek experimenten. De gemiddelde hoogste buigsterkte van de composieten bedraagt 25.5 MPa. Uit berekeningen volgt dat de composiet ongeveer een gelijke drukbelasting kan weerstaan.

3.3 Eigenschappen bouwmaterialen

Kwaliteitseisen voor metselbaksteen naar toepassingsgebied (NEN 2489)

In de onderstaande tabel staan mechanische de kwaliteits eisen naar toepassingsgebied

Tabel 2

hoofdgroepen gebruiksklassen	toepassingsgebied	kwaliteitseisen (zie toelichting)									
		fysisch				mechanisch		chemisch			
		maten en tole- ranties mm	soecifie- ke water- opzui- ging g/dm ² .min	water- opne- ming % (V/V)	vorst- bestand- heid	druksterkte N/mm ²		splijt- trek- sterkte N/mm ²	sulfaat- gehalte (-SO ₄ ²⁻) % (m/m)	Lipinski- getal % (m/m)	
	boven- grens	boven- grens		min.gem. waarde	onder- grens	onder- grens	boven- grens	boven- grens			
binnenmuursteen	A0 binnenmuren waaraan geen speciale eisen worden gesteld	-	-	-	-	-	7,5	0,3			
	A1 dragende of steunende halfsteens binnenmuren	tabel 2 $B_0 \geq 97$	-	-	-	-	10	0,5			
	A2 binnenmuren van lichtgewichtsteden (schijnbare volumieke massa 1200 tot 1400 kg/m ³)	tabel 2	-	-	-	-	7,5	-	1,50	- ')	
	A3 binnenmuren van lichtgewichtsteden (schijnbare volumieke massa 1000 tot 1200 kg/m ³)		-	-	-	-	6	-			
	A4 binnenmuren van lichtgewichtsteden (schijnbare volumieke massa 800 tot 1000 kg/m ³)		-	-	-	-	5	-			
	A5 binnenmuren van holle blokken (zgn. A5-stenen)		-	-	-	-	10	0,4			
	A6 binnenmuren van „schoon“ metselwerk (zie ook A1)		-	-	-	-	7,5	0,3			0,12
buitenmuren											
buitenmuursteen o.d.	B1 buitenmuren waaraan geen speciale eisen worden gesteld	$B_0 \geq 87$	-	-	*	12,5	7,5	0,3	0,24	0,08	
	B2 buitenmuren voldoende aan verhoogde eisen o.d. in verband met stabiliteit (b.v. muurhoogte > 10 m)	normale condities	tabel 2 $B_0 \geq 97$	-	-	*	17,5	10	0,5	0,18	0,06
		verzwaarde condities	-	-	-	*	25	15	0,8	0,12	0,04
trasramen en kelders											
hoofdgroepen	B4 trasramen	tabel 2	35	27	*	30	20	1,0	0,12	0,04	
	B5 kelders	tabel 2 ($d_1 - d_2 \leq 1$)	25	22	*	45	30	1,5			
zwaar belaste binnen- en buitenmuren											
hoofdgroepen	C1 sterkteklasse 30 (30 N/mm ² = 300 kgf/cm ²)	tabel 2 maat- klasse	30	30	*	30	20	1,0	0,12	0,04	
	C2 sterkteklasse 45 (45 N/mm ² = 450 kgf/cm ²)	$B_0 \geq 98$	25	25	*	45	30	1,5			
	C3 sterkteklasse 60 (60 N/mm ² = 600 kgf/cm ²)	aanv. bep. 1 en 2	20	20	*	60	40	2,0			

4 Materialen en methoden gebruikt bij dit onderzoek

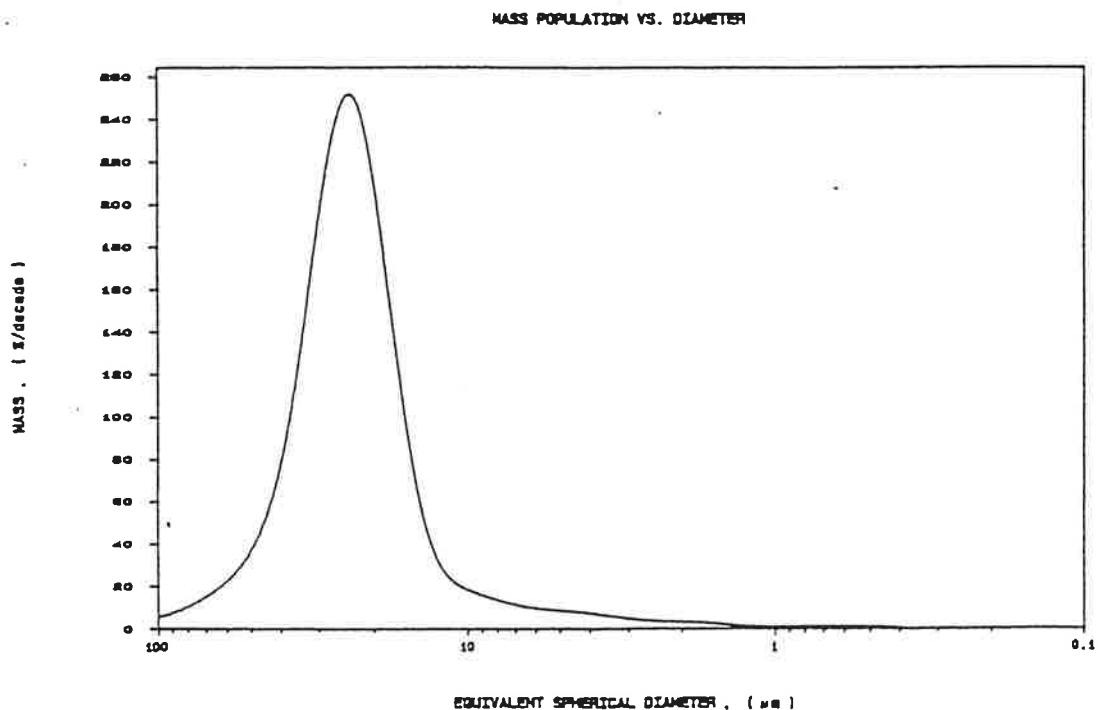
Er zijn 4 verschillende restmaterialen (vliegas, bouw- en sloopafval, humusrijke klei en gereinigde grond) aangeleverd waarvan bekeken wordt of ze geschikt zijn als grondstof voor bouwmaterialen. Er zijn 2 soorten waterglas (Natriumdisilikaat en Natriumtrisilikaat) gebruikt en 2 vormgevingstechnieken (persen en gieten) gebruikt om producten te maken. Hieronder worden de verschillende materialen en methodes beschreven.

4.1 Materialen

4.1.1 Restmaterialen

Vliegas

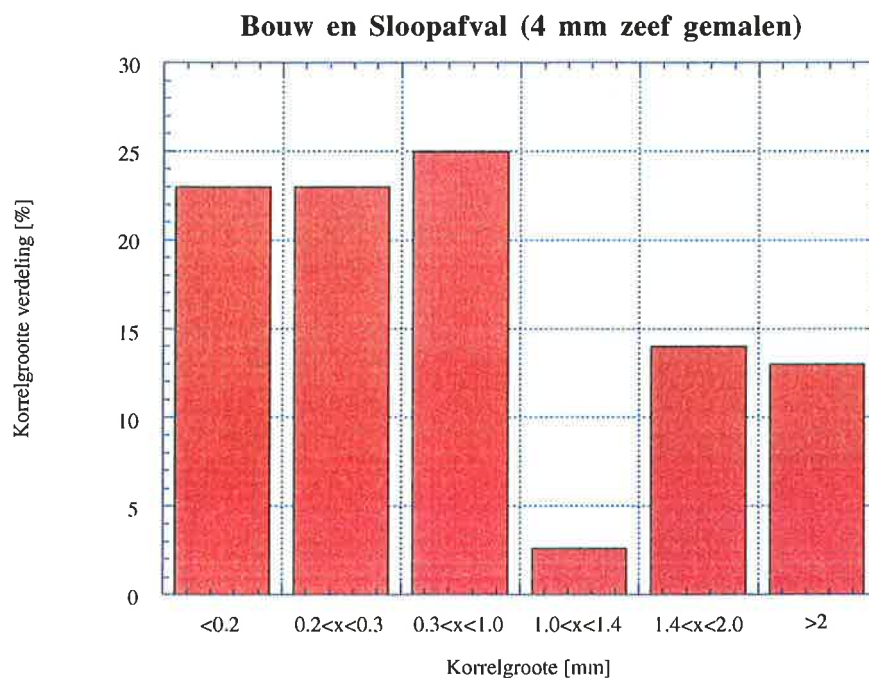
Het grootste deel van het aangeleverde vliegas heeft een korrelgrootte kleiner dan $315 \mu\text{m}$ ($\pm 95\%$). Het deel dat groter is bestaat voornamelijk uit witte korrels (kalk?). De grote witte brokstukken worden er uitgezeefd omdat een nadelige invloed op de sterkte wordt verwacht. Na zeven is de korrelgrootte verdeling bepaald m.b.v. de sedigraaf (Micromeritics 5100 V1.02) (zie figuur 4). De mediane diameter is $23.8 \mu\text{m}$. Het specifiek oppervlak van het vliegas is bepaald m.b.v. een BET-apparaat (Quatachroom Nova 2000) en is $1.2 \text{ m}^2/\text{g}$



Figuur 4: Korrelgrootte verdeling van vliegas (gefractioneerd met een zeef van $315 \mu\text{m}$)

Bouw en sloopafval [B&S]

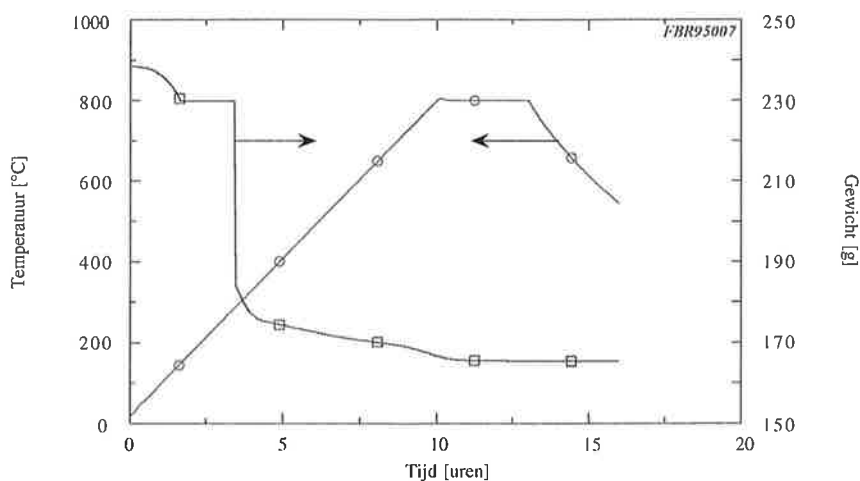
Het bouw- en sloopafval zoals het aangeleverd is nogal grof. Daarom is besloten het te malen m.b.v. een hamerslag molen en vervolgens te fractioneren met een 4 mm zeef. De korrelgrootte verdeling is bepaald d.m.v. zeeffracties (zeven van 2, 1.4, 1, 0.3 en 0.2 mm). Het specifiek oppervlak van het bouw en sloopafval is bepaald m.b.v. een BET-apparaat (Quatachroom Nova 2000) en is $10.4 \text{ m}^2/\text{g}$



Figuur 5.: Korrelgrootte verdeling van bouw & sloopafval bepaald d.m.v. zeeffracties (zeven van 2, 1.4, 1, 0.3 en 0.2 mm)

Humusrijke klei [HK]

De aangeleverde humusrijke klei bevat nogal veel organische stoffen en moet dus gecalcineerd worden om te kunnen verwerken tot bouw materiaal. Er is een TG-curve opgenomen tot $800 \text{ }^\circ\text{C}$ om te kijken bij welke temperatuur het grootste deel van de organisch stoffen verdwenen zijn (zie figuur 6). Uit deze TG-curve blijkt dat het grootste deel hiervan verdwenen is bij $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Het specifiek oppervlak van de humusrijke klei is bepaald m.b.v. een BET-apparaat (Quatachroom Nova 2000) en is van het bij $400 \text{ }^\circ\text{C}$ gecalcineerde materiaal $13.6 \text{ m}^2/\text{g}$ en van het bij $800 \text{ }^\circ\text{C}$ gecalcineerde materiaal $9.3 \text{ m}^2/\text{g}$.



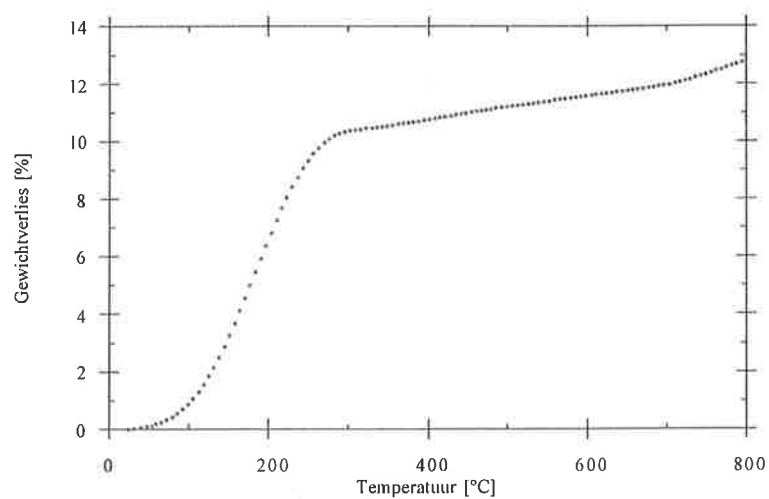
Figuur 6: TG-curve van humusrijke klei tot 800 °C

Gereinigde grond [GG]

De aangeleverde gereinigde grond is nogal grof en is niet geschikt om zo te verwerken tot bouw materiaal. Daarom is het materiaal, net als de humusrijke klei, eerst gemalen in een hamerslagmolen en vervolgens gefractioneerd met behulp van een zeef van 4 mm.

Het specifiek oppervlak van de gereinigde grond is bepaald m.b.v. een BET-apparaat (Quatachroom Nova 2000) en is $8.3 \text{ m}^2/\text{g}$.

De kleur van de gereinigde grond is zwart en dit beïnvloedt de kleur van de uiteindelijke producten. Daarom is d.m.v. een temperatuurbehandeling gekeken of de zwart kleuring verwijderd kan worden. Tevens is het gewichtsverlies bepaald tijdens dit experiment (figuur 7). De kleur van de gereinigde grond na de temperatuurbehandeling is dat van licht rood zand.



Figuur 7: Gewichtsverlies als functie van de temperatuur van gereinigde grond (GG)

4.1.2 Binders en harders

Binders

Bij koud verhardende toeslagstoffen (binders) kan worden gedacht aan hydraulische cementen (Portland cement en gips) en reactie cementen (aluminiumfosfaat), maar ook zogenaamde precipitatie cementen. Het meest gebruikte precipitatie cement is waterglas (Na_3SiO_3). Het wordt voor tal van toepassingen gebruikt zoals daar waar slijtvastheid en zuurresistentie vereist is, als toeslagmateriaal in bijvoorbeeld de zeep industrie, als binder bij de fabricage van gietmallen voor metaalgieterijen of bij de fabricage van bouwmaterialen uit granulaat. Commercieel verkrijgbare silicaten hebben algemeen de volgende formule $\text{M}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Hierin kan M het metaal natrium, kalium of lithium zijn. Commercieel verkrijgbare natriumsilicaten hebben een mol ratio van $m=0.5-4.0$.

Aan de hand van een bij een eerder projekt gedaan literatuuronderzoek en de beschikbaarheid van de binders is er gekozen voor 2 verschillende binders, beide van Crossfield;

- Natriumdisilikaat [P10]
- Natriumtrisilikaat [P60]

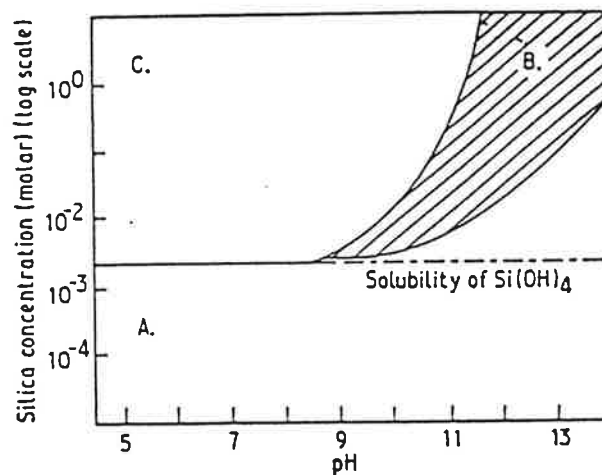
De specificaties van de binders staan beschreven in tabel 3.

Tabel 3: Specificaties van de gebruikte binders

	Natriumdisilikaat	Natriumtrisilikaat
code	Pyramid P10	Pyramid P60
formule $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	2.0/2.1	3.3/3.5
bulk dichtheid (g/cm^3)	0.080 - 0.120	0.550 - 0.650
korrel grootte verdeling		
> 0.063 mm (%)		60 - 85
> 0.1 mm (%)	80 - 95	15 - 40
> 0.25 mm (%)	40 - 60	max. 2
> 0.8 mm (%)	max. 3	
massa verlies (900 °C)	14 - 17	15 - 18
Na_2O (%)	27 - 30	18 - 20
SiO_2 (%)	55 - 60	62 - 65
Mol. verhouding $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	2.0 - 2.2	3.2 - 3.5
max. massa % Binder in water	41.5	50
prijs	fl 1,80/kg	fl 1,30/kg
pH oplossing	> 10	> 10
veiligheid	R36/37/38 irriterend voor ogen, ademhaling en huid	R36/37/38 irriterend voor ogen, ademhaling en huid

Harders

Waterglazen zijn oplosbaar in water en precipiteren onder invloed van een harder. Uitharding (gebied C, fig. 8) kan op een aantal manieren worden verkregen b.v. door verlaging van de pH of door de silica concentratie te verhogen (figuur 8).



Figuur 8: Silicaat ionen in evenwicht met amorf silica bij 25 °C,
 A: mononucleaire silicaat ionen
 B: polysilikaat ionen
 C: oplossing instabiel voor amorf silica

Er zijn verschillende harders gebruikt:

Harder	afkorting	soort harder	prijs fl / kg
vliegas	vliegas	verhoging silica gehalte	
fijn silica	FS	verhoging silica gehalte	
condensed silica fume zwart	CSFZ	verhoging silica gehalte	
condensed silica fume wit	CSFW	verhoging silica gehalte	0.960
condensed silica fume grijs	CSFG	verhoging silica gehalte	0.695
ethylacetaat	EA	verlaging pH	
verdund ehtylacetaat (10%)	EA10	verlaging pH	
zinkoxyde	ZnO	vorming metaal silikaten	
natriumfosfaat	NaP	vorming metaal silikaten en viscositeits verhoging	
silicium poeder	Si	verandering ratio silicaat daardoor minder oplosbaar	

4.2 Vormgeving

4.2.1 Gieten

Bij het gietproces wordt het restmateriaal (vliegas, B&S, HK en GG) gemengd met binder en harder en gegoten in een niet poreuze mal (tabel 4). Het gietproces is in eerste instantie onderzocht met het restmateriaal vliegas, omdat dit materiaal als vulstof en als harder kan dienen. De poeders (harder en restmateriaal) worden gemengd in PE-fles op een rollerbank gedurende 30 minuten. Daarna wordt de binder toegevoegd en de PE-fles met de hand geschud totdat een gietbare suspensie verkregen wordt. Daarna worden de mallen gevuld. Er zijn verschillende soorten mallen gebruikt nl. teflon ringen, messing ringen messing staven en PE-bakjes. De onderkant van de mallen bestaat uit een Teflon plaat of een MDF plaat. Ook is gekeken of de mal of onderplaat ingevet moest worden. Er is één vet soort gebruikt nl. siliconenvet.

De mallen gaan daarna meteen in de droogstoof bij 40 °C. Als de pillen genoeg uitgehard zijn, zodanig dat de pillen hanteerbaar zijn, worden ze uit de mal gehaald en weer terug in de droogstoof geplaatst. De kleine producten zoals die uit de teflon ringen (**B95-001 t/m B95-016**) kwamen, konden na drogen gekarakteriseerde worden. De grotere producten zoals de staven (**B95-030 t/m B95-040**) en de producten uit de PE-bakjes gaven problemen doordat ze krom trokken tijdens het drogen. Een van de oorzaken hiervan zou kunnen zijn dat de viscositeit van de suspensie te laag is. Er zijn ook nog een aantal grotere producten gemaakt d.m.v. gieten. Daarbij werden de poeders (binder, harder en restmateriaal) gemengd in een Hobart menger waarna water werd toegevoegd totdat het een gietbare/schepbare suspensie werd. De suspensie werd in een plastic bakje gedaan waarna dit bakje op een triltafel werd gezet totdat het oppervlak glad was (**B95-042 t/m B95-046**).

De producten zijn daarna gekarakteriseerde op sterkte d.m.v. een BOR-test voor de kleinere pillen en d.m.v. een driepuntsbuigproef voor de staven. De zgn. BOR-sterkte en de driepuntsbuigproef worden gemeten m.b.v. een druk/trekbank (Erichsen AP4000). Bij een BOR-test wordt een kogel in het midden van een pil gedrukt, die op een kogellager ligt. De maximale kracht waarbij de pil bezwijkt wordt gemeten. Uit de waarde van deze kracht tezamen met de diameter en dikte van de pil, kan een materiaal sterkte berekend worden.

De dichtheid is geometrisch (door meten en wegen) bepaald.

Tabel 4: Samenstelling van gemaakte gietmengsels

Code	Materialen (wt.%)	Binder (wt.%)	Harder (wt.%)	Water (wt.%)	Drogen temp[°C]/ tijd [dagen]	Sterkte meting BOR of 3PS
B95-001	vliegas (49.8)	P10 (20.7)		(29.5)	40 / 6.8	BOR
B95-002	vliegas (59.3)	P60 (20.3)		(20.4)	40 / 7.8	BOR
B95-003		P60 (100)				-
B95-004	vliegas (60.9)	P60 (19.5)		(19.6)	40 / 1.0	BOR
B95-005	vliegas (46.8)	P60 (19.1)	FS (4.3)	(29.8)	40 / 1.0 40 / 1.8 40 / 2.8	BOR
B95-006	vliegas (26.0)	P60 (11.7)	FS (5.2)	(57.1)		-
B95-007	vliegas (53.7)	P60 (19.5)	CSFZ (4.9)	(21.9)	40 / 1.0 40 / 1.8 40 / 4.9	BOR
B95-008	vliegas (48.8)	P60 (19.5)	CSFZ (9.8)	(21.9)	40 / 1.0 40 / 1.8 40 / 4.9	BOR
B95-009	vliegas (52.4)	P10 (15.8)	CSFZ (4.8)	(27.0)	40 / 1.0 40 / 1.8	BOR
B95-010	vliegas (47.6)	P10 (15.8)	CSFZ (9.5)	(19.3)	40 / 1.7 40 / 4.7	BOR
B95-011	B&S (50.0)	P10 (16.6)	CSFZ (10)	(23.4)	40 / 1.7 40 / 4.7	BOR
B95-012	B&S (50.0)	P60 (20.0)	CSFZ (10.0)	(20.0)	40 / 4.7	-
B95-013	vliegas (17.2)	P10 (5.2)	CSFZ (1.6), EA (0.3)	(75.7)	20	-
B95-014	vliegas (40)	P10 (13.1)	CSFZ (3.6), EA10 (9.1)	(34.2)	20	-
B95-015	vliegas (45.4) Fe ₂ O ₃ (rood)(9.1)	P10 (15.1)	CSFZ (2.3)	(28.1)	20	-
B95-016	vliegas (44.4), TiO ₂ (8.9)	P10 (14.8)	CSFZ (2.2)	(29.7)	20	-
B95-030	B&S (48.5) vliegas (2.4)	P10 (17.3)	CSFZ (7.3)	(24.4)	40	-
B95-031	vliegas (45.5)	P10 (17.7)	CSFZ (9.1)	(25.0)	40	
B95-032	vliegas (45.5)	P10 (16.6)	CSFZ (9.1)	(23.4)	40 / 30	3PS
B95-033	B&S (50.0)	P10 (16.6)	CSFZ (10.0)	(23.4)	40 / 30	3PS
B95-034	GG (50.0)	P10 (16.6)	CSFZ (10.0)	(23.4)	40 / 30	3PS
B95-035	HK (46.5)	P10 (17.3)	CSFZ (9.3)	(26.8)	40	-
B95-036	HK (45.8)	P10 (17.1)	CSFZ (9.2)	(27.9)	40	-
B95-037	HK (42.6)	P10 (17.7)	CSFZ (8.5), Si (0.9)	(30.2)	60	-
B95-038	HK (42.6)	P10 (17.7)	CSFZ (8.5), ZnO (0.9)	(30.2)	60	-
B95-039	HK (42.6)	P10 (17.7)	CSFZ (8.5), NaF (0.9)	(30.2)	60	-
B95-040	HK (44.0)	P10 (18.3)	CSFZ (8.8)	(29.4)	40 / 30	3PS
B95-042	B&S (53.2) vliegas (10.6)	P10 (7.9)	CSFZ (7.1)	(21.3)	40	-
B95-043	B&S (54.3) vliegas (10.9)	P10 (8.0)	CSFZ (7.2)	(19.6)	40	-
B95-044	B&S (52.2) vliegas (12.0)	P10 (8.0)	CSFW (8.0)	(19.7)	40	-
B95-045	B&S (52.6) vliegas (12.1)	P10 (8.1)	CSFG (8.1)	(19.1)	40	-

4.2.2 Persen

De tweede vormgevingstechniek, het persproces, is op 2 manieren onderzocht nl.:

- 1 persen van een mengsel (vliegas en harder) en vervolgens impregneren met binder (B95-P20)
- 2 nat persen van een mengsel van binder, harder en restmateriaal (vliegas, B&S, HK en GG)(B95-P21 t/m B95-P31)

Tabel 5: Samenstelling van de geperste mengsels (gebruikte persdruk is 15 Mpa)

Code	Materialen (wt.%)	Binder (wt.%)	Harder (wt.%)	wt. % water tijdens persen	Drogen temp[°C]/ tijd [dagen]	Sterkte meting BOR of 3PS
B95-P20	vliegas	P10(imp) P60(imp)	CSFZ	25 25	40 / 4.2 40 / 4.2	BOR BOR
B95-P21	vliegas	P10	CSFZ	25 25 0 (H ₂ O imp) 0 2(H ₂ O imp)	40 / 4.2 40 / 8.3 40 / 4.2 40 / 4.2	BOR
B95-P22	vliegas	P60	CSFZ	25	40 / 4.2	BOR
B95-P23	B & S (58.4) vliegas (12.8)	P10 (8.6)	CSFW (8.6)	11.7	40 / 4	3PS
B95-P24	HK (56.9) vliegas (13.1)	P10 (8.8)	CSFW (8.8)	12.5	40 / 1.0 40 / 7.0 40 / 14	3PS
B95-P25	GG (58.4) vliegas (13.5)	P10 (9.0)	CSFW (9.0)	10.2		
B95-P26	B & S (57.2) vliegas (13.2)	P10 (8.8)	CSFW (8.8)	12.0	20 / 1.0 20 / 7.0 20 / 28 60 / 6 60 met RV95%/6	3PS
B95-P27	vliegas (66.3)	P10 (8.3)	CSFW (8.3)	17.0	20 / 1.0 20 / 7.0 20 / 28	3PS
B95-P28	GG (58.4) vliegas (13.5)	P10 (9.0)	CSFW (9.0)	10.2	20 / 1.0 20 / 7.0	3PS
B95-P29	HK (53.8) vliegas (12.4)	P10 (8.3)	CSFW (8.3)	17.3	60 / 6 60 met RV95%/6	3PS
B95-P30	B&S (57.7) vliegas (13.3)	P10 (8.9)	CSFW (8.9)	11.3		
B95-P31	HK (53.9) vliegas (12.4)	P10 (8.3)	CSFW (8.3)	17.1		

Persen en vervolgens impregneren

De poeders, vliegas en harder (CSFZ), zijn gemengd in een PE-fles op een rollerbank gedurende 2 uur. Van het mengsel zijn daarna pillen geperst met een uniaxiale pers in een mal met een diameter van 22 mm met een kracht van 10 kN(26MPa).

Het mengsel (B95-P20) is niet droog te persen daarom is er een beetje water toegevoegd. Na drogen zijn de pillen geïmpregneerd met een 75 massa % oplossing van zowel binder P10 als binder P60 in lucht. Een 100 % oplossing was voor beide niet mogelijk.

Nat persen

Bij het nat persen zijn 3 verschillende producten gemaakt, pillen(\varnothing 22 mm en \varnothing 63 mm), staven (60 x 12 mm) en stenen (Belgisch formaat 220 x 105 mm).

Omdat de hoeveelheden materiaal voor deze producten verschillend zijn zijn de materialen op verschillende manieren behandeld.

Voor het maken van pillen met een diameter van 22 mm zijn de poeders, vliegas, harder (CSFZ) en binder, zijn gemengd in een PE-fles op een rollerbank gedurende 2 uur. Van het mengsel zijn daarna pillen geperst met een uniaxiale pers in een mal met een diameter van 22 mm met een kracht van 10 kN(26MPa). Er is \pm 25 massa % water toegevoegd in de persmal om stevige producten te krijgen.

Voor het maken van staven (60 x 12 mm) en pillen met een diameter van 63 mm zijn de poeders, restmateriaal (vliegas, B&S, HK en GG), vliegas, harder en binder gemengd in een Hobart menger. Het water is nadat het mengsel een half uur heeft staan mengen ook toegevoegd in de Hobart menger. Er zijn daarna pillen en staven geperst met een druk van \pm 15 MPa.

Voor het maken van stenen met Belgisch formaat (220 x 105 mm) zijn de poeders, restmateriaal (B&S en HK), vliegas, harder en binder gemengd in een grote Hobart menger. Het water is nadat het mengsel een half uur heeft staan mengen ook toegevoegd in dezelfde Hobart menger. Er zijn daarna stenen geperst bij Gouda Vuurvast met een druk van \pm 15 MPa (35 ton).

De producten zijn daarna gekarakteriseerd op sterkte d.m.v. een BOR-test voor de kleinere pillen en d.m.v. een driepuntsbuigproef voor de staven.

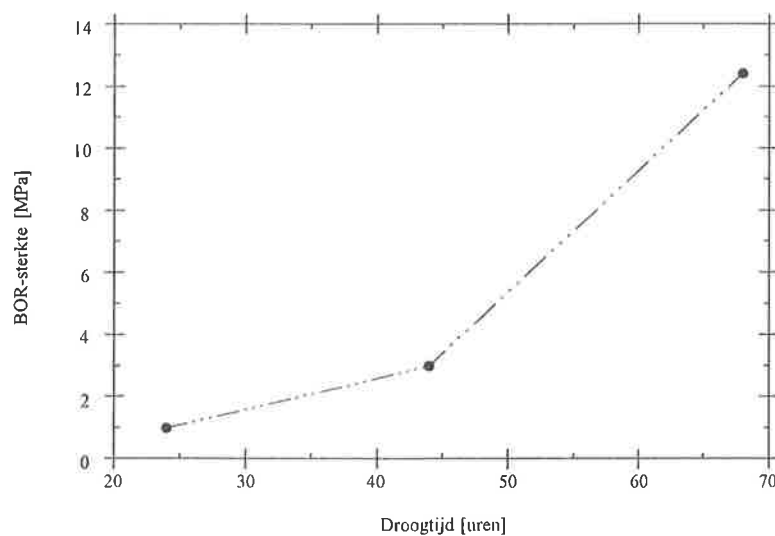
De dichtheid is geometrisch (door meten en wegen) bepaald.

5 Resultaten

5.1 Resultaten giet experimenten

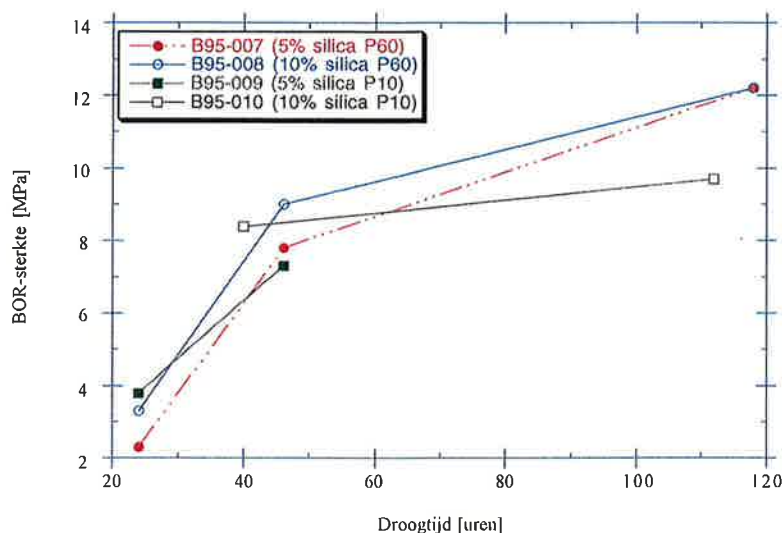
Om te kijken of het gietproces een geschikte vormgevingstechniek is om bouwmaterialen te maken is eerst gekeken wat voor sterkte er haalbaar is met het restmateriaal vliegas. Vliegas heeft als voordeel dat het ook als harder kan dienen.

Om te kijken of vliegas voldoende is als harder zijn er kleine pillen gemaakt ± 3.5 cm diameter met beide binders P10 (**B95-001**) en P60 (**B95-002**). De pillen zijn redelijk sterk resp. 26 ± 3 MPa en 12 ± 5 MPa echter de droogtijden zijn nogal lang resp. 164 en 188 uur. Hierdoor is er besloten om er een extra harder bij te doen. De eerste harder die geprobeerd is fijn silica (**B95-005** en **B95-006**). Dit silica is echter zo fijn dat het slib zich dilatant gedraagt en dus moeilijk te gieten is. Met 4 massa % silica zijn er pillen van gegoten. Deze pillen hadden een hogere sterkte met een langere droogtijd (zie figuur 9)



Figuur 9: BOR sterkte als functie van de droogtijd van het mengsel met fijn silica B95-005

Omdat de hoeveelheid fijn silica die als harder toegevoegd kan worden beperkt is, is er gekeken naar een andere harder, condensed silica fume. Dit silica heeft een grotere korrelgrootte en is zwart (dit zorgt voor de zwarte kleur van de producten). Er zijn mengsels met 5 en 10 massa % silica fume gemaakt voor beide binders P60 (resp. **B95-007** en **B95-008**) en P10 (resp. **B95-009** en **B95-010**).

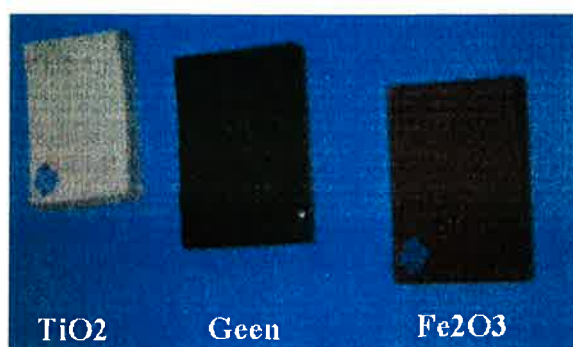


Figuur 10: BOR sterkte als functie van de droogtijd van het mengsel met silica B95-007 t/m B95-010.

Om te kijken of dit systeem ook werkt voor de andere restmaterialen is er een mengsel gemaakt met bouw en sloopafval met 10 massa % harder en beide binders P10 (**B95-011**) en P60 (**B95-012**). Materiaal B95-012 begint te schuimen en is erg poreus zodat dit materiaal niet mechanisch te testen is. Materiaal B95-011 heeft dit niet echter door de grovere structuur van de pillen worden deze ingedrukt tijdens de BOR-test. Dit geeft dus een niet helemaal correcte sterkte voor dit materiaal. De sterkte van het mengsel B95-011 neemt toe met een langere droogtijd nl. van 40 uur drogen tot 112 uur drogen geeft een sterkte van resp. 12.2 MPa, 20.1 MPa

Er zijn ook nog mengsels gemaakt met een andere harder (ethylacetaat **B95-013** en verdund ethylacetaat **B95-014**) maar hiermee waren geen producten te maken.

Ook zijn er mengsels gemaakt met pigmenten om de zwartkleuring tegen te gaan. Er zijn rode producten gemaakt door toevoeging van ijzeroxyde (**B95-015**) en witte producten door toevoeging van titaandioxyde (**B95-016**) (zie figuur 11).



Figuur 11.: Het kleuren van de eindproducten door het toevoegen van pigmenten

Door het resultaat van de experimenten B95-011 en B95-012 is besloten om verder te gaan met binder P10 en om grotere staven te maken in plaats van de pillen met een diameter van 3,5 cm zodat de sterkte gemeten kan worden m.b.v. een driepuntsbuigproef.

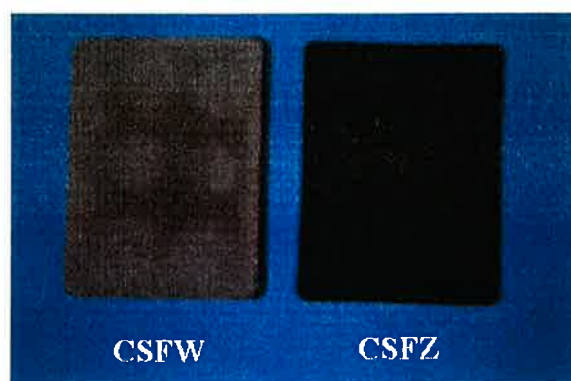
Het maken van de grotere producten geeft problemen omdat de staven krom trekken tijdens het drogen. Ook ontstaat er een toplaag die er uit ziet als een glasmaag. Deze laag is sterk en hard maar ook erg dun. Het materiaal dat er onder zit is poreus en zwak. De resultaten betreffende de staven gemaakt door middel van gieten van de verschillende restmaterialen staan in tabel 4.

Tabel 6: Sterkte en dichtheid van de produkten gemaakt van verschillende restmaterialen

Materiaal	Code	driepuntsbuigsterkte MPa	Dichtheid [g/cm ³]
Vliegas	B95-032	3.1 ± 0.3	1.58 ± 0.02
Bouw en Sloopafval	B95-033	2.2 ± 0.2	1.44 ± 0.02
Gereinigde Grond	B95-034	5.9 ± 2.5	1.53 ± 0.05
Humusrijke klei	B95-040	5.0 ± 1.1	1.34 ± 0.01

De sterkte die gevonden is voor de staven is laag t.o.v. de pillen. Hieruit blijkt dat er extra onderzoek nodig is om het gietproces op te schalen naar grotere producten.

Verbetering moet worden gezocht in de richting van verhoging van de viscositeit van de suspensie eventueel gecombineerd met trillen om zo een ontmenging van grof materiaal en binder te voorkomen. De verhoging van de viscositeit zorgde er voor dat er grotere en rechte producten gemaakt konden worden. Deze producten (zie onderstaande foto) zijn echter niet meer getest.



*Figuur 12: Producten gemaakt van een slib met een hogere viscositeit
Er zijn 2 harders gebruikt witte en zwarte condensed silica fume*

5.2 Resultaten pers experimenten

Persen en vervolgens impregneren

Het mengsel (B95-P20) is niet droog te persen daarom is er een beetje water toegevoegd. Na drogen zijn de pillen geïmpregneerd met een 75 massa % oplossing van zowel binder P10 als binder P60 in lucht. Een 100 % oplossing was voor beide niet mogelijk.

Impregneren met binder P60 gaf lichte schuimvorming zodat de pillen bijna niet te testen waren.

Impregneren met binder P10 gaf goede echter vrij zwakke producten (tabel 5).

Tabel 7:

Code	Opmerking	BOR-sterkte [MPa]	Dichtheid [g/cm ³]
B95-020	met P10 imp.	1.2 ± 0.7	1.49 ± 0.03
	met P60 imp.	5.0 ± 0.8	1.49 ± 0.03

Nat persen

Om te kijken welke van de 2 binders het meest geschikt is voor het nat persen zijn er pillen gemaakt met een diameter van 22 mm van 2 mengsels B95-020 en B95-021.

Het mengsel met binder P10 (natriumdisilikaat)(B95-021) is droog te persen. Echter de pillen zijn erg zwak. Toch zijn er pillen geïmpregneerd met water. Er zijn ook pillen nat geperst met ± 25 massa % water in mal er bijgespoten. Deze pillen zijn na 5 en 10 dagen drogen getest en ze zijn voor het testen eerst nog een keer geïmpregneerd met water. Impregneren met een binder oplossing was niet meer mogelijk, er kwamen tijdens drogen scheuren.

Het mengsel met binder P60 (natriumtrisilikaat)(B95-022) is niet droog te persen en daarom is er water (±25 massa %) toegevoegd in de persmal. Het persen was moeilijk van dit mengsel omdat met te weinig water de pillen kapot gingen en met teveel water de pillen te plastisch werden en bol gingen staan.

Tabel 8:

Code	Opmerking	BOR-sterkte [MPa]	Dichtheid [g/cm ³]
B95-021	drooggeperst 1 maal imp.	4.4 ± 2.0	1.27 ± 0.03
	drooggeperst 2 maal imp.	6.8 ± 1.8	1.39 ± 0.13
	nat geperst 5 dagen drogen	10.1 ± 3.1	1.42 ± 0.12
	nat geperst 10 dagen drogen	12.4 ± 4.2	1.35 ± 0.21
B95-022	nat geperst	21 ± 1.7	1.51 ± 0.04

De pillen met binder P60 lijken het sterkst (tabel 6), echter dit materiaal is het moeilijkst te vormen en na impregneren met water gaan de pillen bol staan. Hierdoor konden alleen de pillen getest worden die er het mooist (vlakheid) uit zagen terwijl dit met pillen met binder P10 niet het geval was.

Hierdoor was besloten door te gaan met binder P10 (natriumdisilikaat).

Omdat de BOR-test afdrucken gaven in de pillen is ook besloten om staven te persen zodat driepuntsbuigproeven gedaan kunnen worden.

Bij de mengsels (**B95-P23 t/m B95-P31**) is 15 massa % vliegas gedaan om het gehalte aan harder te verhogen zodat de hoeveelheid van het duurdere condensed silica fume beperkt kan worden. Bij deze mengsels is ook dezelfde harder gebruikt nl. condensed silica fume wit (CSFW).

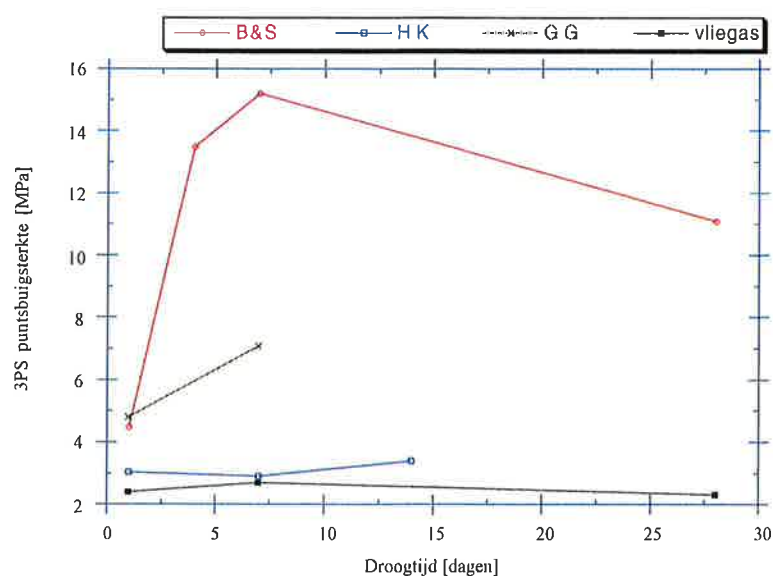
In tabel 7 staan de gemiddelde hoogste driepuntsbuigsterktes verkregen met de verschillende restmaterialen.

De gemaakte mengsels en specificaties van de mengsels zijn terug te vinden in bijlage 2.

De gemiddelde hoogste sterktes zijn verkregen bij een droogtijd van ± 7 dagen aan de lucht (figuur 13). Bij een langere droogtijd wordt de sterkte iets lager en de dichtheid wordt ook lager. Hieruit lijkt het dat de producten afhankelijk zijn van de luchtvochtigheid. Dit valt het meeste op bij de producten gedroogd aan de lucht (GG, HK en B&S), terwijl de producten gedroogd bij 40 °C (HK), dit minder hebben.

Tabel 9: Hoogste gemiddelde Sterkte en bijbehorende dichtheid van producten met binder P10, harder CSFW, ± 15 massa % vliegas en verschillende restmaterialen geperst met een druk van 15 Mpa.

Code	Restmateriaal	BOR-sterkte [MPa]	Dichtheid [g/cm ³]
B95-P24	HK vliegas	3.4 \pm 0.4	1.67 \pm 0.05
B95-P26	B & S vliegas	15.2 \pm 3.3	1.80 \pm 0.08
B95-P27	vliegas	2.7 \pm 0.3	1.45 \pm 0.04
B95-P28	GG vliegas	7.1 \pm 1.0	1.74 \pm 0.02



Figuur. 13: Driepuntsbuigsterkte als functie van de droogtijd van verschillende restmaterialen (humusrijke klei (HK), Bouw & sloopafval (B&S), Gereinigde grond (GG) en vliegias)

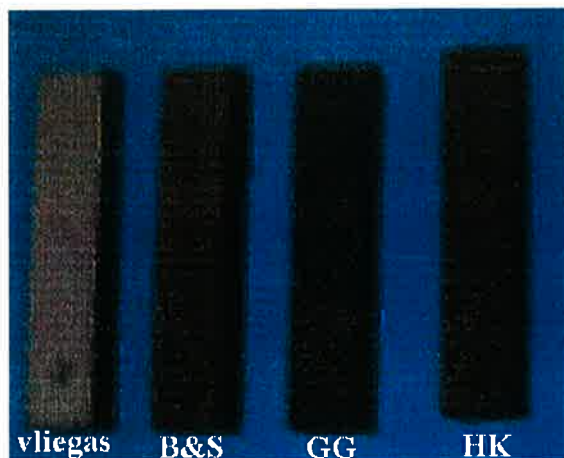
De produkten gemaakt met alleen vliegias en humusrijke klei zijn duidelijk zwakker dan de produkten gemaakt met gereinigde grond en bouw en sloopafval. Ook is van deze produkten materiaal af te schrapen, dit duidt erop dat het materiaal niet voldoende uitgehard is of dat er te weinig binder in de produkten zit.

De pillen met een diameter van ± 63 mm (fig. 14) vertonen vaak scheuren tijdens het drogen. Echter als de pillen direct in de droogstoof gaan en niet aan de lucht gedroogd worden is dit veel minder.

De staven (60 x 12 mm) (Figuur 15) waaraan de sterkte metingen gedaan zijn, vertonen geen scheuren tijdens het drogen.



Figuur 14: Geperste pillen (ϕ 63 mm) van de verschillende rest materialen



Figuur 15: Geperste staven (60 x 12 mm) van de verschillende rest materialen

De invloed van water op de sterkte van de staven (60 x 12 mm) is op de volgende manier onderzocht. Er zijn 10 staven met bouw en sloopafval (B95-P26), 10 staven met humusrijke klei (B95-P24) en 5 staven met vliegas (B95-P27) in een bak met water gelegd. Na 3 dagen zijn er 5 staven met bouw en sloopafval en 5 staven met humusrijke klei uitgehaald en gedroogd gedurende 3 dagen bij 60 °C. Deze staven inclusief de 5 natte staven met humusrijke klei en bouw en sloopafval zijn op sterkte getest met een Driepuntsbuigproef. De sterkte van de gedroogde en staven met bouw en sloopafval en met humusrijke klei neemt veel af, resp. van 11.1 ± 1 MPa en 3.4 ± 0.4 MPa tot 1.9 ± 0.3 MPa en 0.37 ± 0.04 MPa. Bij de staven met vliegas is dit duidelijk minder 2.3 ± 0.2 MPa tot 2.1 ± 0.4 MPa. Hieruit blijkt dat vliegas ook als harder optreedt en dat de materialen met bouw en sloopafval en met humusrijke klei niet voldoende uitgehard zijn.

Voor het maken van stenen van Belgisch formaat (220 x 105 mm) (figuur 16) zijn de poeders, restmateriaal (B&S en HK), vliegas, harder en binder gemengd in een grote Hobart menger. Het water is nadat het mengsel een half uur heeft staan mengen ook toegevoegd in dezelfde Hobart menger. Er zijn daarna stenen geperst bij Gouda Vuurvast met een druk van ± 15 MPa (35 ton). Tijdens het mengen kwam er een harde koek aan de wand van de mengbak, dit was een harde koek die zo bij het fijne materiaal gedaan was. Om de stenen te kunnen persen was het nodig om het met humusrijke klei gemaakte mengsel te fractioneren met een 5 mm zeef. Voor het mengsel met bouw en sloopafval was dit niet nodig. Toch zal men bij het persen van stenen klein granulaat nodig hebben om een mooiere oppervlakte huid van de stenen te krijgen. Het persen van het mengsel met humusrijke klei moet eigenlijk ook bij een lagere druk gebeuren als de 35 MPa die nu gebruikt is echter dit was de laagste stand bij deze pers. Ook blijkt dat het mengsel met humusrijke klei niet optimaal is want na drogen kan men met de hand materiaal verwijderen.

Het drogen van stenen met bouw en sloopafval kan niet aan de lucht of bij 40°C, want dit geeft scheuren. De stenen moeten worden ingepakt in een plastic zak en gedurende 2 weken in een droogstoof bij 40 °C. Daarna kunnen de stenen aan de lucht verder uitharden.



Figuur 16: Geperste stenen, Belgisch formaat (220 x 105 mm) van humusrijke klei (HK) en bouw & sloopafval (B&S)

5.3 Kostprijsberekening

Er wordt hier een kostprijs berekend op stenen met een Belgisch formaat uitgaande van een gewicht van 2 kg per steen en gemaakt volgens het mengsel B95-P30.

Kosten van de materialen:

Binder: $8.9\% \times 2000 \text{ g} = 178 \text{ g} \text{ á } \text{fl}1,80/\text{kg} = \text{fl } 0.32$

Harder: $8.9\% \times 2000 \text{ g} = 178 \text{ g} \text{ á } \text{fl}0,96/\text{kg} = \text{fl } 0.17$

Totaal fl 0.59

Kosten personeel/apparatuur:

fl 0.10

Totaal fl 0.69 per steen

Indien er goedkopere toeslagstoffen gebruikt worden en minder toeslagstoffen gebruikt worden, wordt de kostprijs per steen als volgt:

Kosten van de materialen:

Binder: $5\% \times 2000 \text{ g} = 100 \text{ g} \text{ á } \text{fl}1,00/\text{kg} = \text{fl } 0.10$

Harder: $5\% \times 2000 \text{ g} = 100 \text{ g} \text{ á } \text{fl}0,70/\text{kg} = \text{fl } 0.07$

Totaal fl 0.17

Kosten personeel/apparatuur:

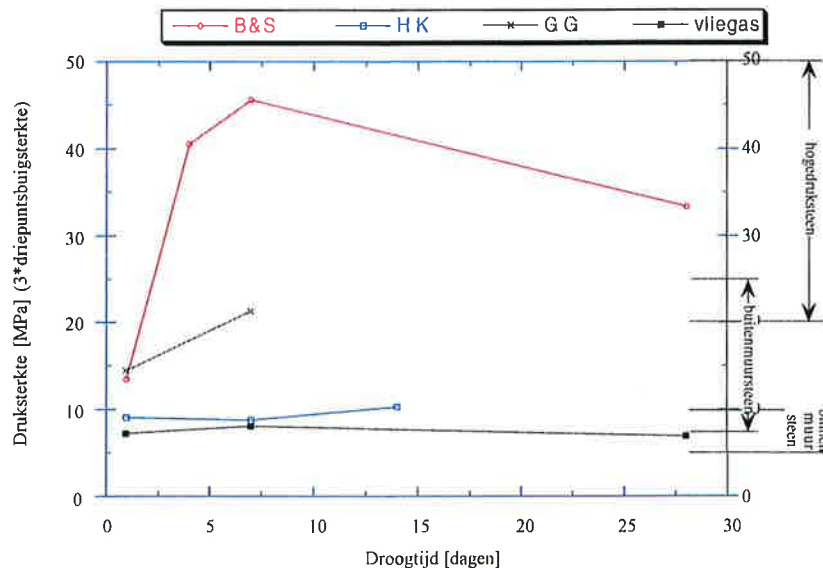
fl 0.10

Totaal fl 0.27 per steen

Uit bovenstaande globale kostprijs berekeningen gebaseerd op de door ons gebruikte binders en harders wijzen uit dat het nu nog niet mogelijk is op een economisch verantwoorde wijze deze materialen te vervaardigen. De kostprijs van traditionele materialen voor een vergelijkbare toepassing liggen aanzienlijk lager.

6 Conclusies en aanbevelingen

De technisch haalbaarheid van het proces is aangetoond. Er zijn stenen gemaakt van restmaterialen met een binder die voor bepaalde toepassingen gebruikt kunnen worden. Om produkten van de restmaterialen te vergelijken, qua sterkte, met bestaande bouwmaterialen moet de gemeten driepuntsbuigsterkte omgerekend worden naar druksterkte (tabel 2). Voor een veilige marge is een factor 3 gebruikt waarmee de driepuntsbuigsterkte vermenigvuldigd (figuur 17) kan worden, dit is relatief aan de lage kant factoren 5 tot 8 zijn bekend. Uit deze figuur blijkt dat met bepaalde restmaterialen meer mogelijk is dan voor andere. Bouw en sloopafval lijkt geschikt om hergebruikt te worden als bouw materiaal omdat sterktes die gehaald kunnen worden ruim voldoen voor buitenmuur- en binnenmuurstenen, zelfs voor de lagere klasse hogedrukstenen. Gereinigde grond lijkt geschikt om hergebruikt te worden als bouw materiaal omdat sterktes die gehaald kunnen worden voldoen voor binnenmuur- en buitenmuurstenen. Gereinigde grond zal wel een temperatuur behandeling tot 800 °C nodig hebben om de zwarte kleur kwijt te raken. Humusrijke klei gecalcineerd tot 400 °C is in deze vorm nog niet geschikt als bouw materiaal ondanks dat de sterkte voldoende zou zijn voor binnenmuurstenen. Dit is omdat er van de produkten na uitharding materiaal af te schrapen is. Voor vliegas lijken beide vormgevingstechnieken het gieten en het persen geschikt om bouwmaterialen te maken echter alleen voor binnenmuurstenen. Maar in combinatie met de ander restmaterialen zijn ook andere bouwmaterialen mogelijk waarvoor hogere sterktes vereist zijn.



Figuur 17: Driepuntsbuigsterkte omgerekend naar druksterkte (druksterkte = 3x driepuntsbuigsterkte) als functie van de droogtijd vergeleken met bestaande bouwmaterialen.

Op basis van de bij ons bekende literatuur zijn met een proces met deze binders in combinatie met deze restmaterialen niet eerder bouwmaterialen gemaakt.

De globale kostprijs berekening gebaseerd op de door ons gebruikte binders en harders wijzen uit dat het nu nog niet mogelijk is op een economisch verantwoorde wijze deze materialen te vervaardigen. De kostprijs van traditionele materialen voor een vergelijkbare toepassing liggen aanzienlijk lager.

Wel is met dit onderzoek een methode ontwikkeld voor de opdrachtgever om, mogelijk in de toekomst, reststoffen te gebruiken tot bruikbare bouwmaterialen.

Natriumdisilikaat geeft betere resultaten als binder dan Natriumtrisilikaat want produkten met natriumtrisilikaat als binder gaan schuimen als gevolg van de aanwezige metalen in de restmaterialen (dit geldt niet voor het restmateriaal vliegias).

Het maken van kleine produkten d.m.v. een gietproces is relatief eenvoudig maar het opschalen geeft problemen. Bij grote produkten kunnen de grovere korrels uitzakken, wat er voor zorgt dat de produkten krom trekken. Dit kan men tegen gaan door de viscositeit te verhogen of door het materiaal verder te malen. De viscositeit verhogen geeft betere produkten. Het nadeel hiervan is dat de mallen moeilijker gevuld kunnen worden en dat de suspensie getrild dient te worden. Een voordeel hiervan is dat er minder water aanwezig is en de suspensie dus eerder uitgehard zal zijn.

Het nat persen van produkten lijkt een goede techniek om produkten te maken. Bij deze productie techniek zal goed gekeken moeten worden naar de uitharding van de binder, of deze volledig heeft plaats gevonden zodat de invloed van water op de sterkte van de produkten kleiner wordt. Dit zou bijvoorbeeld verbeterd kunnen worden door het gehalte aan vliegias te verhogen of door harder en binder vloeibaar te mengen voordat het bij het restmateriaal gedaan wordt.

Aanbevelingen

Bij alle restmaterialen, bouw en sloopafval, humusrijke klei, gereinigde grond en vliegias zal de uitharding van het systeem geoptimaliseerd moeten worden. Dit moet geoptimaliseerd worden naar waterbestendigheid en kostprijs.

Humusrijke klei zal bij een hogere temperatuur (bv. 800°C) gecalcineerd moeten worden zodat de mechanische eigenschappen beter worden. Ook een combinatie met bouw en sloopafval of met gereinigde grond zou een mogelijkheid zijn.

Persen en vervolgens impregneren met binder is een techniek die gebruikt kan worden. Bij het verder ontwikkelen van deze techniek zal de sterkte van de groene produkten i.v.m. hanteerbaarheid en vormvastheid tijdens impregneren extra aandacht vereisen.

7 Referenties

Patfoort, G., Wastiels, J., Bruggeman, P., Stuyck, I., Mineral polymer matrix composites, In: Brittle Matrix Composites, Eds Brandt, A.M., Marshall, I.H., Elsevier Applied Science, London and New York, 1989.

Patfoort, G.A., Wastiels, J., Use of local resources in construction materials, Geobound, no. 2, 1989, pp 12-14.

Patfoort, Georges A., Energie-uitsparing in konstrukties voor ontwikkelingslanden, Mede. Zitt. K. Acad. overzeese Wet., 35 (1989-4): 543-551 (1990).


Patfoort, Georges A., Wastiels, Jan, Geological resources for construction with low energy and low temperature input, In: Greenhouse effect, sea level and draught", Ed. R. Paepe, pp 621-624, Kluwer, 1990.

Wagh, Arun S., Douse, Victor E., Silicate bonding of laterites-an ancient process for construction components, In: Ceramics and civilization VI, Ed. Kingery, W.D., The American Ceramic Society, Westerville, OH, 1993

8 Ondertekening



Ing. J.P.G.M. van Eijk



A.H. de Vries



Dr.Ir. R.A. Terpstra

9 Bijlagen

Bijlage 1: Samenstelling en eigenschappen van gemaakte gietsmengsels

Code	Materialen (wt.%)	Binder (wt.%)	Harder (wt.%)	Water (wt.%)	Drogen temp [°C]/ tijd [dagen]	Sterkte meting BOR of 3PS	Sterkte [MPa] [N/mm ²]	dichtheid [g/cm ³]
B95-001	vliegas (49.8)	P10 (20.7)		(29.5)	40 / 6.8	BOR	26.4 ± 3.2	1.55 ± 0.03
B95-002	vliegas (59.3)	P60 (20.3)		(20.4)	40 / 7.8	BOR	12.4 ± 5.3	1.75 ± 0.02
B95-003		P60 (100)				-		
B95-004	vliegas (60.9)	P60 (19.5)		(19.6)	40 / 1.0	BOR	3.6 ± 0.3	1.84 ± 0.01
B95-005	vliegas (46.8)	P60 (19.1)	FS (4.3)	(29.8)	40 / 1.0 40 / 1.8 40 / 2.8	BOR	1.0 3.0 12.4 ± 3.7	1.60 ± 0.10
B95-006	vliegas (26.0)	P60 (11.7)	FS (5.2)	(57.1)		-		
B95-007	vliegas (53.7)	P60 (19.5)	CSFZ (4.9)	(21.9)	40 / 1.0 40 / 1.8 40 / 4.9	BOR	2.3 7.8 ± 1.3 12.2 ± 2.5	1.52
B95-008	vliegas (48.8)	P60 (19.5)	CSFZ (9.8)	(21.9)	40 / 1.0 40 / 1.8 40 / 4.9	BOR	3.3 9.0 12.2	1.16 1.10
B95-009	vliegas (52.4)	P10 (15.8)	CSFZ (4.8)	(27.0)	40 / 1.0 40 / 1.8	BOR	3.8 ± 0.7 7.3 ± 0.1	1.25 ± 0.01 1.16 ± 0.01
B95-010	vliegas (47.6)	P10 (15.8)	CSFZ (9.5)	(19.3)	40 / 1.7 40 / 4.7	BOR	8.4 ± 1.9 9.7	1.60 ± 0.03 1.47
B95-011	B&S (50.0)	P10 (16.6)	CSFZ (10)	(23.4)	40 / 1.7 40 / 4.7	BOR	12.2 ± 1.0 20.1 ± 4.4	1.71 ± 0.02 1.69 ± 0.01
B95-012	B&S (50.0)	P60 (20.0)	CSFZ (10.0)	(20.0)	40 / 4.7	-		1.11 ± 0.04
B95-013	vliegas (17.2)	P10 (5.2)	CSFZ (1.6), EA (0.3)	(75.7)	20	-		
B95-014	vliegas (40)	P10 (13.1)	CSFZ (3.6), EA10 (9.1)	(34.2)	20	-		
B95-015	vliegas (45.4) Fe ₂ O ₃ (rood)(9.1)	P10 (15.1)	CSFZ (2.3)	(28.1)	20	-		
B95-016	vliegas (44.4), TiO ₂ (8.9)	P10 (14.8)	CSFZ (2.2)	(29.7)	20	-		
B95-030	B&S (48.5) vliegas (2.4)	P10 (17.3)	CSFZ (7.3)	(24.4)	40	-		
B95-031	vliegas (45.5)	P10 (17.7)	CSFZ (9.1)	(25.0)	40			
B95-032	vliegas (45.5)	P10 (16.6)	CSFZ (9.1)	(23.4)	40 / 30	3PS	3.1 ± 0.3	1.58 ± 0.02
B95-033	B&S (50.0)	P10 (16.6)	CSFZ (10.0)	(23.4)	40 / 30	3PS	2.2 ± 0.2	1.44 ± 0.02
B95-034	GG (50.0)	P10 (16.6)	CSFZ (10.0)	(23.4)	40 / 30	3PS	5.9 ± 2.5	1.53 ± 0.05
B95-035	HK (46.5)	P10 (17.3)	CSFZ (9.3)	(26.8)	40	-		
B95-036	HK (45.8)	P10 (17.1)	CSFZ (9.2)	(27.9)	40	-		
B95-037	HK (42.6)	P10 (17.7)	CSFZ (8.5), Si (0.9)	(30.2)	60	-		
B95-038	HK (42.6)	P10 (17.7)	CSFZ (8.5), ZnO (0.9)	(30.2)	60	-		
B95-039	HK (42.6)	P10 (17.7)	CSFZ (8.5), NaF (0.9)	(30.2)	60	-		
B95-040	HK (44.0)	P10 (18.3)	CSFZ (8.8)	(29.4)	40 / 30	3PS	5.0 ± 1.1	1.34 ± 0.01
B95-042	B&S (53.2) vliegas (10.6)	P10 (7.9)	CSFZ (7.1)	(21.3)	40	-		
B95-043	B&S (54.3) vliegas (10.9)	P10 (8.0)	CSFZ (7.2)	(19.6)	40	-		
B95-044	B&S (52.2) vliegas (12.0)	P10 (8.0)	CSFW (8.0)	(19.7)	40	-		
B95-045	B&S (52.6) vliegas (12.1)	P10 (8.1)	CSFG (8.1)	(19.1)	40	-		

Bijlage 2: Samenstelling en eigenschappen van gemaakte persbare mengsels

Code	Materialen (wt.%)	Binder (wt.%)	Harder (wt.%)	water (wt. %) tijdens persen	Drogen temp[°C]/ tijd [dagen]	Sterkte meting BOR of 3PS	Sterkte [MPa] [N/mm ²]	dichtheid [g/cm ³]
B95-P20	vliegas	P10(imp)	CSFZ	25	40 / 4.2	BOR	1.2 ± 0.7	1.49 ± 0.03
		P60(imp)		25	40 / 4.2	BOR	5.0 ± 0.8	1.49 ± 0.03
B95-P21	vliegas	P10	CSFZ	25	40 / 4.2	BOR	10.1 ± 3.1	1.42 ± 0.12
				25	40 / 8.3		12.4 ± 4.2	1.35 ± 0.21
				0 (H ₂ O imp)	40 / 4.2		4.4 ± 2.0	1.27 ± 0.03
				0 2(H ₂ O imp)	40 / 4.2		6.8 ± 1.8	1.39 ± 0.13
B95-P22	vliegas	P60	CSFZ	25	40 / 4.2	BOR	21 ± 1.7*	1.51 ± 0.04
B95-P23	B & S (58.4) vliegas (12.8)	P10 (8.6)	CSFW (8.6)	11.7	40 / 4	3PS	13.5 ± 2.3	1.65 ± 0.10
B95-P24	HK (56.9) vliegas (13.1)	P10 (8.8)	CSFW (8.8)	12.5	40 / 1.0	3PS	3.0 ± 0.4	1.67 ± 0.05
					40 / 7.0		2.9 ± 0.6	1.66 ± 0.07
					40 / 14		3.4 ± 0.4	1.63 ± 0.04
B95-P25	GG (58.4) vliegas (13.5)	P10 (9.0)	CSFW (9.0)	10.2				
B95-P26	B & S (57.2) vliegas (13.2)	P10 (8.8)	CSFW (8.8)	12.0	20 / 1.0	3PS	4.5 ± 0.9	1.83 ± 0.10
					20 / 7.0		15.2 ± 3.3	1.80 ± 0.08
					20 / 28		11.1 ± 1.0	1.84 ± 0.13
					60/ 6		9.73 ± 0.9	1.82 ± 0.03
					60 met RV95%/6		7.1 ± 1.0	1.74 ± 0.02
B95-P27	vliegas (66.3)	P10 (8.3)	CSFW (8.3)	17.0	20 / 1.0	3PS	2.4 ± 0.5	1.48 ± 0.06
					20 / 7.0		2.7 ± 0.3	1.45 ± 0.04
					20 / 28		2.3 ± 0.2	1.46 ± 0.03
B95-P28	GG (58.4) vliegas (13.5)	P10 (9.0)	CSFW (9.0)	10.2	20 / 1.0	3PS	4.8 ± 0.44	1.80 ± 0.02
					20 / 7.0		7.1 ± 1.0	1.74 ± 0.02
B95-P29	HK (53.8) vliegas (12.4)	P10 (8.3)	CSFW (8.3)	17.3	60/ 6 60 met RV95%/6	3PS	3.4 ± 0.4 1.5 ± 0.2	1.64 ± 0.02 1.62 ± 0.04
B95-P30	B&S (57.7) vliegas (13.3)	P10 (8.9)	CSFW (8.9)	11.3				
B95-P31	HK (53.9) vliegas (12.4)	P10 (8.3)	CSFW (8.3)	17.1				