



postbus 61
2700 AB zoetermeer
tel. 079-219313

**83/1
INTERIM RAPPORT
GRANULAAT VAN BETON- EN
METSELWERKPUIN ALS
TOESLAGMATERIAAL VOOR BETON**

Opgesteld door:

Onderzoekcommissie B 29 Hergebruik beton- en metselwerkpuin

INHOUD

Voorwoord		2
Notaties		5
Hoofdstuk 1	Samenstelling van bouw- en sloopafval, hoeveelheden	6
Hoofdstuk 2	Sloop- en verwerkingsmethoden	9
Hoofdstuk 3	Eigenschappen van granulaatsoorten	21
Hoofdstuk 4	Eigenschappen van beton, vervaardigd met granulaten afkomstig van bouw- en sloopafval	30
Hoofdstuk 5	Voortgezet technologisch onderzoek	44
Hoofdstuk 6	Voorlopige voorschriften	46
Hoofdstuk 7	Economisch aspect	49
Hoofdstuk 8	Praktijkervaring	52
Hoofdstuk 9	Buitenlandse ervaringen	55
Hoofdstuk 10	Algemene conclusies	71
Literatuur		72

VOORWOORD

In de loop van de jaren 70 is duidelijk geworden dat voor de noodzakelijke voorziening in grondstoffen voor de bouw naast natuurlijke materialen ook andere materialen, zoals afvalstoffen en industriële bijprodukten, een rol zouden moeten gaan spelen. Enerzijds zou daardoor de noodzaak om materialen door ontgroning aan de Nederlandse bodem te onttrekken gaan verminderen, terwijl anderzijds een bijdrage geleverd wordt tot de oplossing van het afvalstoffenprobleem.

Dit bracht reeds in 1977 de Stichting CUR-VB tot het initiatief om gezamenlijk met Belgische en Duitse instanties bij de Europese Gemeenschap subsidie aan te vragen voor onderzoek betreffende sloopmethoden, hergebruik van beton en demontabel bouwen.

In 1979 besloot CUR-VB het onderzoek in Nederland sterk te stimuleren door de oprichting van onderzoekcommissie B 29, "Beton- en metselwerkpuin", die als opdracht kreeg:

- het analyseren van de aard en van de hoeveelheid bouw- en slooafval;
- het bestuderen van de technische aspecten met betrekking tot sloop en verwerking;
- door technologisch onderzoek na te gaan in hoeverre beton- en metselwerkpuin als toeslagmateriaal voor beton bruikbaar is;
- het ontwikkelen van voorstellen voor voorschriften betreffende deze toepassingen;
- het geven van een indicatie over de economische aspecten van deze toepassingen.

Gedeelten van deze studies werden gesubsidieerd door het ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer en het ministerie van Verkeer en Waterstaat.

De commissie verwacht haar werk in 1984 af te ronden. Uitgaande van de tot heden bereikte resultaten wordt in dit interimrapport tussentijds een indruk gegeven van de mogelijkheden. Naast het geven van bekendheid hieraan, heeft dit rapport ook tot doel belangstelling voor deze toepassingen te wekken en het opdoen van praktijkervaring te bevorderen.

De samenstelling van commissie B 29 en de werkgroepen is:

- Dr.Ir. C.F. Hendriks, voorzitter
- Drs. C.F. van der Schaaf, vice-voorzitter
- Drs. J. Soetens, secretaris

Dr. R.F.M. Bakker
Ing. W. Bies
Ing. F. Blees
Ir. J.G.A. van Hulst
Prof.Ir. P.C. Kreijger
Ir. C. De Pauw
Ing. J.J. Sluijmers
Ir. D. Stoelhorst
Ir. J.A.A.M. Vollebregt
Ir. W.M.A.J. Willart
Ing. K. Zijlstra
Ir. B. Boesmans, rapporteur
Ir. J.G. Wiebenga, rapporteur
Ir. L. Huibregtse, waarnemer
Prof.Ir. B.W. van der Vlugt, mentor

Werkgroep 1 "Inventarisatie"

Ir. W.M.A.J. Willart
Ing. J.J. Sluijmers
Drs. J. Soetens

Werkgroep 2 "Technische aspecten"

Ir. B. Boesmans
Ir. D. Stoelhorst
A.C. Stolwerk
Ing. K. Zijlstra

werkgroep 3 "Karakterisering"

Dr. R.F.M. Bakker
Dr.Ir. C.F. Hendriks
Ir. J.G.A. van Hulst
Ir. C. De Pauw
G. Visser
Ir. J.A.A.M. Vollebregt
Ir. C.A. van der Wal
P.F. Warren
Ir. J.G. Wiebenga

Werkgroep 4 "Economische aspecten"

Dr. R.F.M. Bakker
Ing. W. Bies
Ing. F. Blees
Ir. B. Boesmans
Dr.Ir. C.F. Hendriks
Ing. A.C. van Riel
Drs. C.F. van der Schaaf
Ing. J.J. Sluijmers
B. Steenhuis
Ir. J.A.A.M. Vollebregt

In 1982 is Mr. R.C. Basart uit de commissie getreden; hij werd als secretaris opgevolgd door Drs. J. Soetens. Voorts is in 1982 Ing. P.A. de Wit opgevolgd door Ing. W. Bies en is G. Visser toegetreden tot werkgroep 3.

Het rapport werd geschreven door:

Dr. R.F.M. Bakker

Ir. B. Boesmans

Dr.Ir. C.F. Hendriks

Prof.Ir. P.C. Kreijger

Ir. J.G. Wiebenga

augustus 1983

Stichting voor Onderzoek, Voorschriften en
Kwaliteitseisen op het gebied van beton
(CUR-VB)

NOTATIES

σ_{k28}	betondruksterkte na 28 dagen verharding
σ_{kt}	betondruksterkte na t dagen verharding
σ_{t28}	splijttreksterkte na 28 dagen verharding
σ_{moeder}	druksterkte van het beton, juist voor het tijdstip van slopen
ϵ_{kr28}	krimp na 28 dagen verharding
ϵ_{krt}	krimp na t dagen verharding
$E_{stat.28}$	statische elasticiteitsmodulus na 28 dagen verharding
$E_{dyn.28}$	dynamale elasticiteitsmodulus na 28 dagen verharding
ρ_{sr}	volumieke massa van de korrels met ingesloten lucht
ρ_s	volumieke massa van de korrels zonder ingesloten lucht
ρ_m	volumieke massa van het losgestorte granulaat (stortgewicht)
W_{30m}	waterabsorptie na 30 minuten
W_{24h}	waterabsorptie na 24 uur
n	aantal
r	correlatiecoëfficiënt
s	standaardafwijking
V	volumieke massa van beton

HOOFDSTUK I

SAMENSTELLING VAN BOUW- EN SLOOPAFVAL, HOEVEELHEDEN

"Bouw- en sloopafval" is een verzamelnaam voor afval dat vrijkomt in de sectoren woningbouw, utiliteitsbouw en weg- en waterbouw, zowel tijdens het bouwproces, als aan het eind van de levensduur van een bouwwerk wanneer dit wordt gesloopt. Om inzicht te verkrijgen in de samenstelling heeft de voormalige Stichting Verwijdering Afvalstoffen* (SVA) in 1977 een aantal sloopplaatsen bezocht en op basis van visuele kenmerken het afval geanalyseerd. De resultaten zijn vermeld in tabel 1 (1).

Tabel 1. Samenstelling bouw- en sloopafval op stortplaatsen (in % V/V)

niet brandbaar		brandbaar	
metselwerkpuin	24,0	hout	17,5
grond	19,0	kunststof	2,5
betonpuin	10,0	diversen (kalk, stro, papier,	
asfalt	1,5	textiel)	10,0
metalen	1,5	overige materialen (ander-	
		soortig afval, zoals huis-	
		houdelijk- en bedrijfsafval)	14,0
	56,0		44,0

Hierbij dienen de volgende opmerkingen te worden gemaakt. In de eerste plaats zijn deze materialen aangevoerd zonder dat vooraf sprake was van eventueel hergebruik; het proces (meestentijds sloop) is dan ook niet hierop gericht geweest.

In de tweede plaats zijn op de sloopplaats reeds de materialen met een directe handelswaarde verwijderd. Onderzoek op sloopplaatsen heeft geleerd dat het hier gaat om 20% (V/V) van het te slopen hout en 90-100% (V/V) van de bij sloop vrijkomende metalen ijzer, lood, zink en koper.

Tevens is de gemiddelde samenstelling nagegaan van het bouw- en sloopafval dat in de sector woningbouw de komende jaren zal vrijkomen (zie tabel 2).

* Thans genaamd Instituut voor Afvalstoffenonderzoek (IVA)

Tabel 2. Gemiddelde samenstelling van bouw- en sloopafval in de sector woningbouw over de periode 1977 - 2000 (in % m/m)

metselwerkpuin	62
betonpuin	24
overige soorten puin	6
hout	5
overige materialen	<u>3</u>
	100

Thans bedraagt de totale hoeveelheid bouw- en sloopafval in totaal 3 miljoen ton per jaar. Ongeveer 40% van het totale bouw- en sloopafval is afkomstig uit de woningbouw, de resterende 60% uit de utiliteitsbouw en de weg- en waterbouw. Het percentage betonpuin zal met de tijd stijgen, terwijl dat van metselwerkpuin zal afnemen. Dit wordt veroorzaakt door de sterke toename van de betontoepassing na 1950.

De prognoses voor de totale hoeveelheid bouw- en sloopafval die in de toekomst zal vrijkomen lopen sterk uiteen. De Stichting Bouwcentrum verwacht voor de woningbouwsector tot 2000 een stationaire of zelfs licht afnemende hoeveelheid (2). Het Economisch Instituut voor de Bouwnijverheid verwacht zowel voor de sector woningbouw als voor de totale bouw een sterke toeneming, namelijk in 2000 bijna een verdubbeling van de huidige hoeveelheid puin (beton-, baksteen- en kalkzandsteenpuin tezamen) tot een verdrievoudiging in 2050 (3). De totale hoeveelheid betonpuin zal volgens de laatste bron stijgen van 2 miljoen ton per jaar in 1980 tot 4,5 miljoen ton in 2000 en 14 miljoen ton in 2050; de hoeveelheid metselwerkpuin zou stijgen van 3 miljoen ton in 1980 tot 4 miljoen ton in 2000 en 6 miljoen ton in 2050 (zie fig. 1).

Een algemeen probleem is dat het steeds moeilijker zal worden voor deze hoeveelheden geschikte stortplaatsen te vinden of het afval op andere wijze kwijt te raken (landschapshoevels, geluidswallen e.d.).

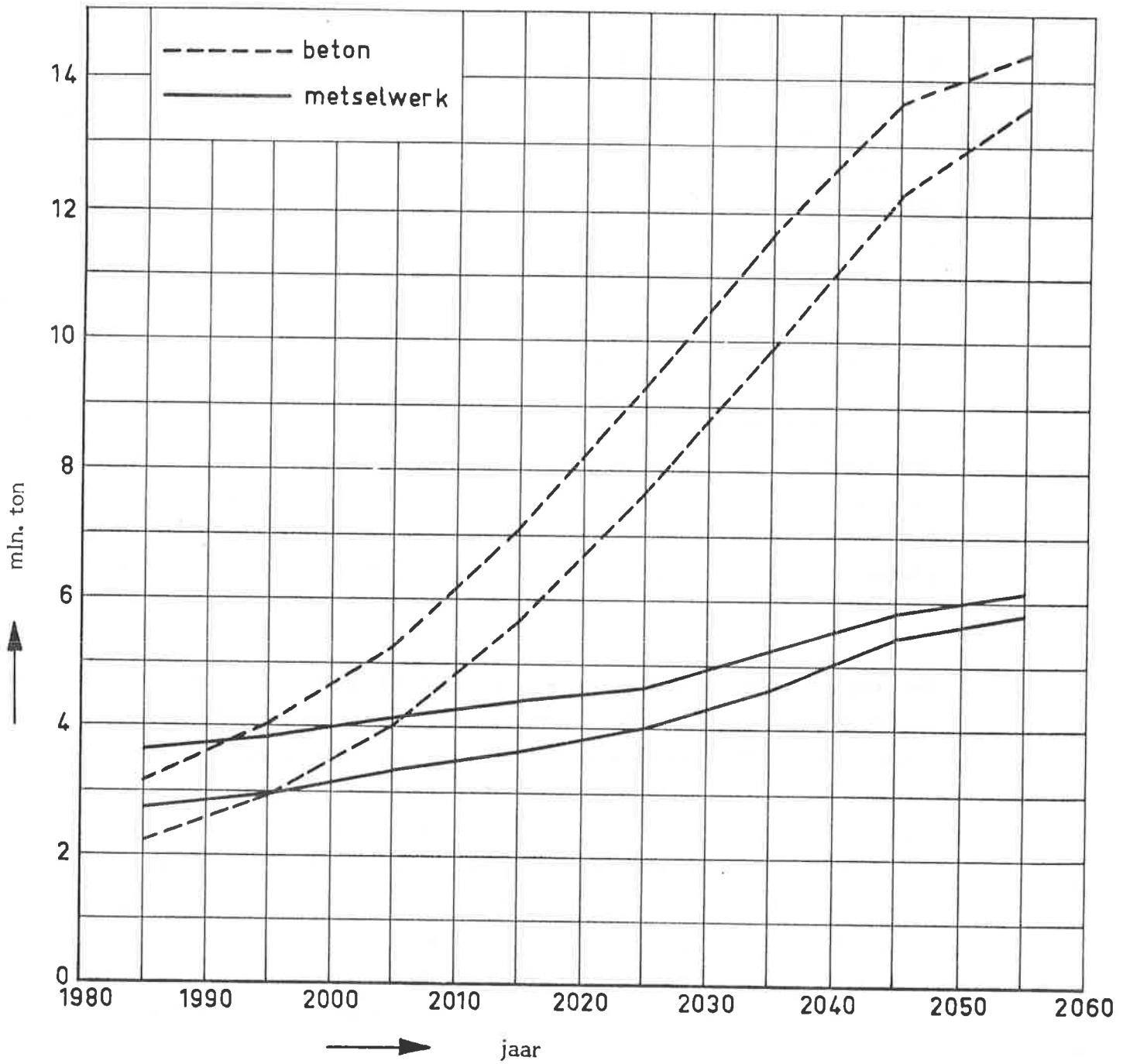


Fig. 1 Minimale en maximale ramingen van metselwerk- en betonpuin als gevolg van verbouwingen en sloop van gebouwen (3).

HOOFDSTUK 2 SLOOP- EN VERWERKINGSMETHODEN

Voor hergebruik in de bouw zijn vooral de deelstromen beton en metselwerkpuin van belang. Een zo goed mogelijke afscheiding van de overige deelstromen zal van grote invloed zijn op de gebruikswaarde van dit puin bij gebruik als toeslagmateriaal in cementbeton.

Daarom zal aandacht moeten worden besteed aan de vraag welke slooptechnieken moeten worden toegepast in relatie tot het hergebruik van steenachtige materialen en in hoeverre scheiding aan de bron, dat wil zeggen selectief slopen, mogelijk is.

Daarbij komt dat voor het slopen van constructies bestaande uit gewapend beton, zowel in technisch als in economisch opzicht nog vele problemen moeten worden opgelost. Juist met het oog hierop is een studie begonnen naar de mogelijkheid om demontabel te bouwen, met andere woorden om bij de bouw reeds rekening te houden met latere sloop.

De keuze van de sloopmethode is van groot belang voor de selectiviteit en derhalve voor het hergebruik van de vrijgekomen materialen, maar deze keuze wordt ook door andere factoren bepaald, zoals de beschikbare tijd en ruimte. Een rapport over de relatie tussen sloopmethoden en hergebruik is in november 1982 uitgebracht (4). Dit onderzoek is verricht door het Verbond van Aannemers van Sloopwerken (BABEX) en DHV Raadgevend Ingenieursbureau B.V. in opdracht van de rijksoverheid.

De huidige indruk is dat een zeker mate van selectiviteit bij het slopen zowel technisch als economisch haalbaar is. Het gaat hierbij vooral om scheiding tussen grote stukken hout, asbesthoudende onderdelen, metalen, gipswanden, dakpannen en dergelijke enerzijds en voor hergebruik bestemd steenachtig materiaal anderzijds. Verschillende aannemers passen met succes deze wijze van selectief slopen toe. Het overgrote deel van de metalen en een belangrijk deel van het hout worden daarbij gescheiden van het puin. Voor een optimaal resultaat is vooral de werkwijze die de sloper volgt van groot belang. Dit heeft ook betrekking op de stukgrootte van het puin die in het algemeen niet groter mag zijn dan $1 \times 0,7 \times 0,5 \text{ m}^3$ in verband met de na de sloop volgende verdere bewerking. De invoeropening van de brekers is daarbij bepalend.

Scheiding aan de bron (de sloopplaats) zal veelal slechts ten dele mogelijk zijn door beperkingen zowel ten aanzien van de economie van het slopen, als ook door speciale

aspecten (brandstichting, kraken, stof- en geluidsoverlast). Vaak is slechts beperkte tijd voor het slopen beschikbaar.

Ook bij het hierop volgende verwerkingsproces zal aan een verdere zuivering van het puin aandacht moeten worden besteed. Er zijn thans ruim 30 bedrijven die puin verwerken met het doel hergebruik hiervan mogelijk te maken. Er zullen richtlijnen moeten worden gehanteerd voor het toeleveren van puin door sloopbedrijven en voor de beoordeling van de geschiktheid van puingranulaten b.v. als toeslagmateriaal voor beton.

Het procédé dat de huidige verwerkingsbedrijven volgen, wordt in algemene termen weergegeven in figuur 2. Slechts enkele bedrijven beschikken evenwel over een wasinstallatie (aquamator) of schroefwasser. Het windziften is als reinigingsmethode in de praktijk nog weinig toegepast. Een nadeel van deze methode ten opzichte van de wasmethode is dat het te reinigen materiaal vóór de zifting in zeeffracties moet worden verdeeld. De voordelen van de ziftmethode zijn:

- ook bruikbaar bij temperaturen beneden 0 °C;
- geen waterverontreinigingsprobleem;
- minder watergebruik (alleen bevochtiging tegen stofoverlast).

Met deze methoden kunnen op effectieve wijze lichte materialen zoals hout, papier en kunststoffen worden gescheiden van het puin.

De capaciteit van de verwerkingsbedrijven varieert van 35-150 ton per uur. Een zieving vóór de voorbreker, bij voorbeeld op circa 10 mm, scheidt een belangrijk deel slib, klei, gips e.d. van het puin. Hierdoor wordt de meest verontreinigde fractie afgescheiden van de rest van het puin.

Bij de zevingen later in het proces kan naast scheiding op korrelgrootte ook op vorm worden gescheiden, bij voorbeeld lange platte stukken zoals hout van meer rond materiaal.

In het algemeen wordt in twee stappen gebroken, namelijk met een voor- en nabreker. Indien in één stap wordt gebroken, bij voorbeeld met een prallmolen, ontstaat het nadeel dat de mogelijkheid tot procesbeïnvloeding geringer is. Bovendien kan reiniging van het puin alleen op het eindproduct worden toegepast, waardoor meer verontreinigingen in het puin achterblijven.

De voorbreker is meestal een kaakbreker of prallmolen, de nabreker een kaakbreker, prallmolen of kegelbreker. Voorts zijn er enkele bedrijven die mobiele breek- en zeefinstallaties exploiteren; deze worden vooral bij wegenbouwprojecten gebruikt voor het breken van asfalt- en betonverhardingen.

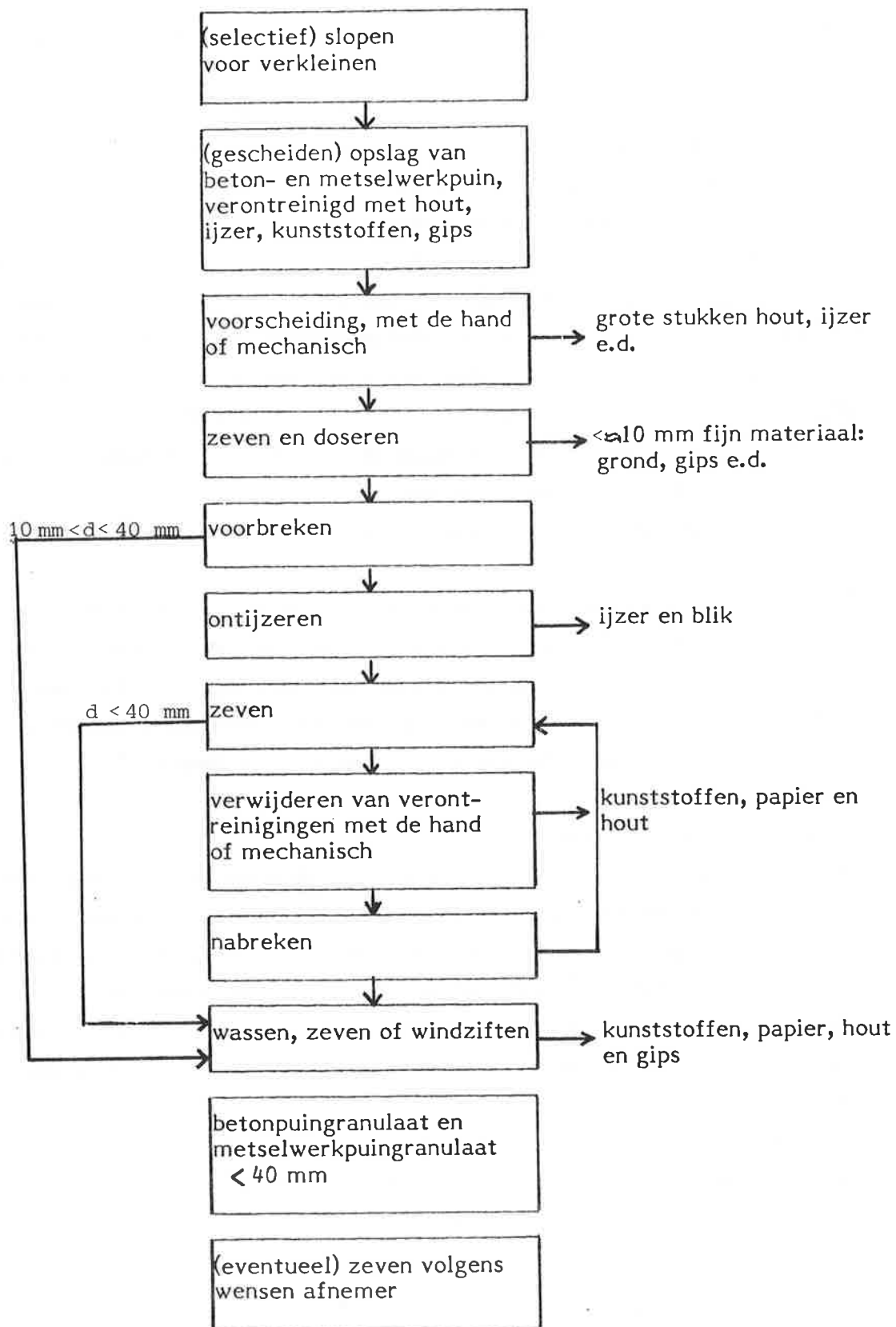


Fig. 2. Verwerkingsproces voor bouw- en sloopafval.

Het breken kan tevens als scheidingsproces worden opgevat: de zwakste steenachtige materialen en een aanzienlijk deel van de verontreinigingen, vooral gips, komen terecht in de fractie kleiner dan 4 mm.

Het breken van sloopafval is door TNO onderzocht (5). In een bureaustudie werden brekers en molens op hun inzetmogelijkheden voor het verkleinen van sloopafval beoordeeld. Op basis van deze bureaustudie is een praktijkonderzoek opgezet en uitgevoerd, ten einde verschillende brekers en molens, alsmede verschillende systemen onderling te kunnen vergelijken. Deze vergelijking vond plaats op basis van de eigenschappen van de eindprodukten zoals korrelgrootteverdeling, korrelvorm en korrelsterkte. Deze eigenschappen werden vergeleken met de bestaande eisen gesteld aan funderings- en toeslagmaterialen voor toepassing in de wegebouw (Eisen 1978 (28)), en die genoemd in de betonvoorschriften (VB 1974 (29)).

Voor de keuze van een breker zijn naast de produkteigenschappen vanzelfsprekend investerings- en bedrijfskosten van belang.

De bedrijfskosten worden in belangrijke mate bepaald door kostenposten als energieverbruik en slijtage.

De resultaten van het onderzoek zijn weliswaar geschikt voor onderlinge vergelijking van de brekers, molens en breek-zeefinstallaties, maar door de ruime variatiemogelijkheden in brekersinstallaties, zeeftrappen e.d. niet algemeen toepasbaar. Hieruit dient de conclusie te worden getrokken dat een goede controlemethodiek in feite een noodzaak is voor elke verwerkingsinrichting van bouw-en sloopafval.

Enkele onderzoekresultaten:

- Uit de korrelgrootte-analyses van de beschouwde monsters is gebleken dat voor de onderzochte materialen en brekersinstallaties de prallmolen, als voor- en nabreker, een produkt levert dat ten opzichte van de eisen voor steenfunderingsmaterialen 0-40 mm een gunstiger korrelopbouw heeft dan de produkten van de andere onderzochte brekers of molens. Stelt men zich evenwel tot doel voornamelijk grof toeslagmateriaal te produceren, dan lijkt een kaakbreker de beste resultaten op te leveren.
- Een mogelijk nadeel van de prallmolen is de hoge slijtage met als gevolg relatief hoge onderhoudskosten bij verwerking van gewapend beton. Omdat de slijtage van de brekers bij dit onderzoek niet kon worden bepaald, zijn hierover geen kwantitatieve gegevens beschikbaar.
- Bij de vergelijking van de nabrekers is de zgn. "brekerkarakteristiek" geïntroduceerd. Deze brekerkarakteristiek geeft het grafisch verband tussen de reductiefactor R (verhouding tussen zeefrest ingevoerd puin en geproduceerd puingranulaat) en

de zeefresten van het puingranulaat op diverse zeven (zie fig. 3). Naast het nut van de brekerkarakteristiek bij de vergelijking van de nabrekers, lijkt het mogelijk om met behulp van de brekerkarakteristiek de korrelverdeling van nabrekerprodukten te voorspellen, als de korrelverdeling van het ingevoerde materiaal bekend is. Bij het opzetten van een goede produktiecontrolemethodiek lijkt de brekerkarakteristiek een zeer nuttig gegeven te kunnen zijn.

- Een groot gedeelte van het eindprodukt van een breek-zeef-installatie blijkt direct afkomstig van de voorbreker (40 mm).

Dit kan problemen geven als de voorbreker een produkt levert dat niet voldoet aan de eisen die voor een bepaalde toepassing worden gesteld. De mogelijkheid om de voorbreker dan zodanig in te stellen dat de verhouding van voor- en nabrekersprodukt in het eindprodukt kan worden gereduceerd, moet aanwezig zijn. Dit houdt in dat de nabreker een voldoende hoge capaciteit moet hebben.

- Voor de beoordeling van de kubiceit van de granulaten is een methode ontwikkeld met een hellende triltafel (helling 17° , oppervlakte 1 m^2 , frequentie 50 Hz, amplitude 0,9 mm). Deze triltafel (zie fig. 4) bezit een rubber oppervlak. Deze methode geeft een nagenoeg volledige scheiding tussen kubische bestanddelen enerzijds en platte of lange stukken anderzijds.

De kubiceit wordt dan uitgedrukt in de kubiceitsindex (percentage door de triltafel gescheiden kubisch materiaal).

Uit de resultaten van de kubiceitsanalyses is gebleken dat de hamerbreker en de prallmolen voor het onderzochte metselwerkpuin de meest kubische produkten leveren. Voor betonpuin blijken de verschillen met de kaak- en kegelbreker verwaarloosbaar klein.

- Te hoge gehalten aan hout of ijzer in het puin kunnen verstoppingen in de brekers veroorzaken. Het breken van **gewapend** beton vormt soms een probleem. Bij kaak- en kegelbrekers kunnen verstoppingen optreden, bij slagbrekers kan een grote slijtage ontstaan.
- Bij proefnemingen in België (6) is gebleken dat verkleining van gewapend betonnen proefkolommen (afmetingen $0,3 \times 0,3 \times 1 \text{ m}^3$) met explosieven een goed alternatief kan zijn voor breken. De scheiding tussen staal en beton is nagenoeg volledig en er wordt een granulaat met een gelijkmatige korrelverdeling verkregen.

Uit een onderzoek van TNO (17) is gebleken dat dergelijke moten gewapend beton ook met grote prallmolens in één bewerkingsstap zijn te verkleinen, zodat de granulaten voldoen aan de Eisen 1978 en de VB 1974.

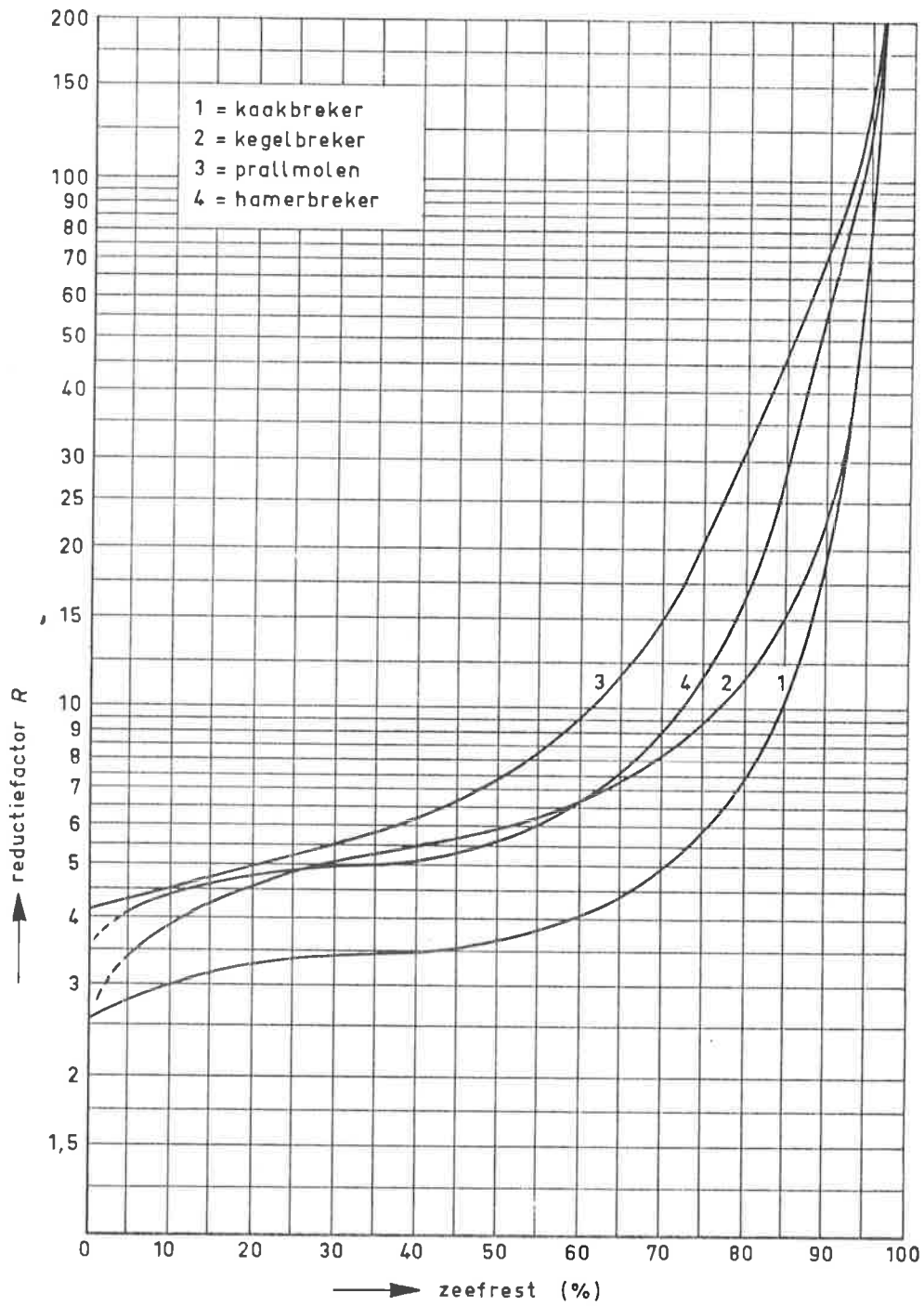
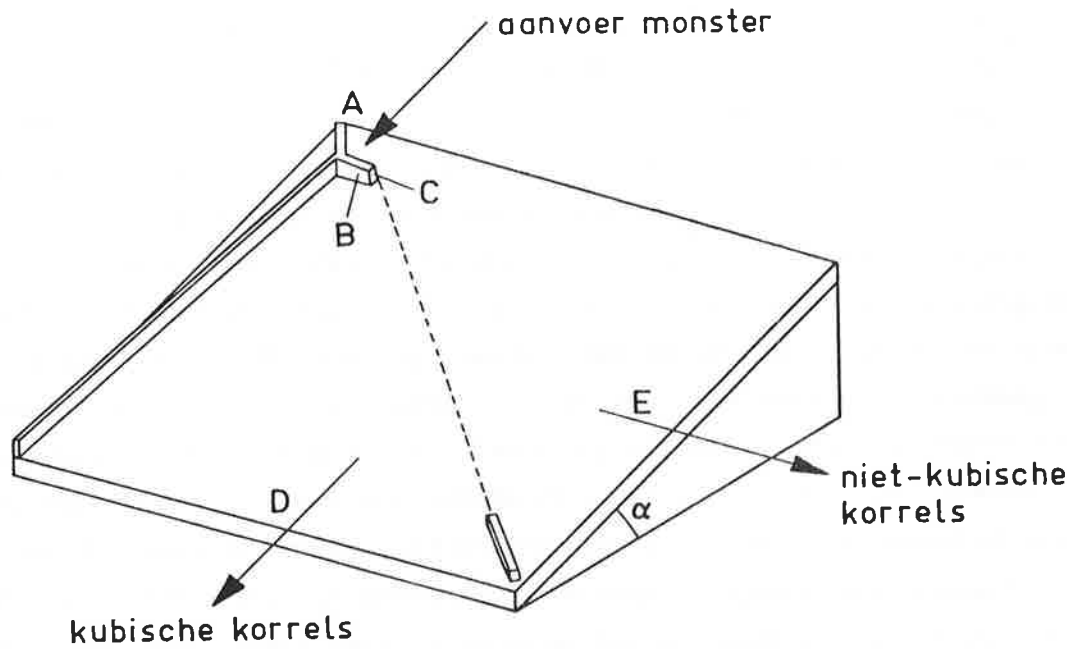


Fig. 3 Brekerkarakteristieken.



afmetingen	: $1 \times 1 \text{ m}^2$	oppervlak	: rubber
helling α	: 17°	zeef fractie monster	: 20-30 mm
trillingsfrequentie	: 50 Hz	trillingsamplitude	: 0,9 mm

Fig. 4 Triltafel ter bepaling van de kubiciteit van de korrels.

Bij de huidige verwerkingsinrichtingen dient men goed te letten op de mate van vervuiling van het aangevoerde sloopafval. Zoals hierboven reeds werd gesteld, geven niet-steenachtige materialen zoals hout, ijzer, tapijt e.d. een verhoogde kans op storingen tenzij een (economisch onverantwoorde) intensieve handsortering wordt toegepast. Om in de toekomst dit vervuilde sloopafval en daarbij dan ook bouwafval te kunnen verwerken, wordt momenteel onderzoek uitgevoerd om tot ontwerp-specificaties van een volgende generatie verwerkingsinrichtingen te komen.

Hierbij wordt vooral aandacht besteed aan het scheiden van granulaat en verontreinigingen, naast het verkleinen van het puin. Veel aandacht behoeft de kwaliteitsbeheersing en kwaliteitscontrole bij het verwerkingsproces. Deze moet beginnen met de registratie bij ontvangst van het bouw- en sloopafval (herkomst, hoeveelheid, globale samenstelling). Een visuele analyse van het thans geproduceerde puin op hoofdbestanddelen, nevenbestanddelen en verontreinigingen heeft aangetoond dat, afhankelijk van de herkomst en de mate waarin selectief is gesloopt, in wisselende hoeveelheden voorkomen: grindbetonpuin, baksteenmetselwerkpuin, kalkzandsteenmetselwerkpuin, betonsteenmetselwerkpuin, natuursteenpuin en grond. Voorts wordt soms asfaltbetonpuin aangetroffen. Met name baksteenmetselwerkpuin is een verzameling van harde en zachte steensoorten.

De gehalten aan verontreinigingen (zoals metalen, rubber, kunststoffen, hout en overig organisch materiaal) bedragen op grond van visuele analyses maximaal enkele massaprocenten.

Op grond van de gewenste kwaliteit van het puingranulaat wordt aanbevolen het sloopmateriaal naar gelang de aard van het hoofdbestanddeel te splitsen in drie deelstromen: asfalt-, beton- en metselwerkpuin. Eventueel kan men nog één of twee mengkwaliteiten onderscheiden. Bestaan er aanwijzingen voor verontreiniging van het puin met andersoortig afval, dan dient dit gescheiden gehouden te worden van bovengenoemde deelstromen.

De produktiecontrole tijdens de verwerking zal in elk geval moeten bestaan uit een geregelde visuele analyse van de samenstelling en van de gradering van het puingranulaat. Voor beide methoden is een frequentie van 1 x per produktiedag een uiterst minimum. Ten behoeve van een snelle visuele analyse van het puingranulaat groter dan 8 mm heeft de commissie een voorschrift in voorbereiding. Deze visuele analyse wordt beschouwd als basis voor eventuele beslissingen omtrent nader onderzoek.

De resultaten van een serie visuele analyses bij een aantal verwerkingsbedrijven zijn

samengevat in tabel 3. De betreffende monsters zijn genomen in de periode 1980 - 1982. Indien de toevoer van bouw- en sloopafval naar de verwerkingsbedrijven toeneemt, kan dit leiden tot een grotere mate van verontreiniging van het toeslagmateriaal.

Tabel 3a geeft de aangetroffen variaties in gebroken materiaal op verwerkingsbedrijven, waarbij de monsters zijn genomen op verschillende tijdstippen van een willekeurige dag. Deze monsters zijn afkomstig van de banden die het gebroken en eventueel gezeefde materiaal transporteerden naar de opgeslagen korrelfracties. Tevens is aan de onderzijde aangegeven welke opslaghopen in het desbetreffende bedrijf zijn bemonsterd.

In de tabel is onderscheid gemaakt tussen de soorten betonpuin (grindbeton, lichtbeton, cementdekvloer- en metselmortel), keramisch puin, asfaltbeton, kalkzandsteenpuin en natuursteenpuin. Ook zijn de totaalpercentages gebroken puin groter en kleiner dan 8 mm vermeld.

Uit de tabel blijkt hoe groot de variatie is. Wat opvalt is, dat vrij veel asfaltbeton en metselmortel worden aangetroffen, terwijl de verontreinigingen erg meevallen.

Tabel 3b geeft bij dezelfde acht verwerkingsbedrijven de variatie op 10 willekeurige dagen. Hieruit blijkt dat een aantal bedrijven toch wel streeft naar het verkrijgen van bepaalde puinsoorten, waarbij een lichte voorkeur voor betonpuin valt waar te nemen. Alleen de bedrijven nrs. 6, 7 en 8 hebben meer keramisch puin of metselwerkpuin. Bedrijf 1 ligt tussen beide groepen in. Wat de aanwezigheid van asfaltbeton betreft, geldt voor de bedrijven nrs. 1 t/m 5 eveneens dat vrij veel van dit materiaal wordt verwerkt.

Metselmortel blijkt nagenoeg steeds in vrij ruime mate aanwezig te zijn, gemiddeld ca. 20%. Kalkzandsteenpuin blijkt slechts in geringe mate voor te komen.

Voor de verontreinigingen geldt hetzelfde beeld als bij tabel 3a n.l. dat deze gering van omvang zijn; glas blijft beperkt tot ten hoogste 0,5%, metalen tot 0,3% en de diverse andere verontreinigingen kunnen ten hoogste 3% bedragen, maar zijn meestal beperkt tot enige tienden van procenten. Wel moet worden bedacht dat het hier om massaprocenten gaat; in volumeprocenten uitgedrukt liggen de percentages van de lichtere verontreinigingen (zoals hout en plastic) een factor 2 à 3 hoger. Vervolgens werd nagegaan of het mogelijk was om bepaalde granulaatsoorten geleverd te krijgen. Gevraagd werd naar vier soorten granulaat, te weten granulaat afkomstig van grindbeton, baksteen-, kalkzandsteen- en betonsteenmetselwerk.

Tabel 3a Classificatie van granulaat (in % m/m) bij verwerkingsbedrijven van bouw-en sloopafval

	samenstelling	verwerkingsbedrijven							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		variaties binnen één dag							
betonpuin	grindbeton	2- 75	97-100	16- 38	18- 70	5- 6	31- 44	4- 18	2- 4
	lichtbeton	0- 2	-	-	-	1- 6	-	-	0- 1
	cem. dekvloer	0- 4	-	-	-	-	-	0- 3	-
	metselemortel	3- 12	-	0- 2	4- 12	6- 14	3- 11	7- 28	7- 24
	subtotaal	16- 75	97-100	16- 38	23- 70	11- 26	41- 52	24- 45	10- 27
keramisch puin	baksteen, hard	9- 79	-	0- 1	-	-	12- 26	0- 34	7- 26
	baksteen, zacht	9- 45	-	1- 2	9- 30	71- 81	12- 22	34- 70	56- 65
	ker. dakpannen	-	-	-	-	-	2- 10	0- 2	-
	ker. tegels	-	-	-	-	≤0,3	0- 1	0- 1	-
	subtotaal	6- 80	-	1- 2	9- 34	71- 81	29- 50	54- 72	71- 86
diverse verontreinigingen	asfaltbeton	1- 27	3	69- 82	8- 72	0- 2	4- 24	0- 1	0- 1
	kalkzandsteen	-	-	-	-	7- 12	-	-	0- 2
	natuursteen	-	-	0- 3	6- 23	-	-	-	2- 4
	glas	-	-	0-0,2	-	0- 1	-	≤0,1	≤0,2
	metaal	0- 2	-	-	≤0,2	≤0,1	-	0- 5	≤0,3
	hout	x	-	x	x	x	x	x	x
	board	x	-	-	-	x	-	x	-
	papier	x	-	x	x	x	-	x	x
	kunststof	-	-	x	-	-	-	x	-
	riet	-	-	-	-	x	-	-	-
	kalk	-	-	-	-	-	-	x	-
	asbestcement	-	-	-	-	-	-	x	-
	klei	x	-	-	x	-	-	-	-
	subtotaal	≤0,4	-	0- 1	0- 3	0- 2	≤0,3	0- 3	≤0,1
>8 mm	38- 96	73- 99	48- 63	55-100	99-100	64-100	74-100	90-100	
<8 mm	0- 62	16- 21	37- 52	0- 45	0- 1	100- 0	0- 26	0- 10	
aangetroffen	5- 8	0- 40	fijn	fijn	0- 12	0- 5	0- 40	0- 5	
korrelfracties	6- 12	5- 40	grof	grof	12- 40	5- 12	4- 40	5- 25	
als gescheiden	9- 22	12- 20			0- 40	12- 22	> 40	15- 25	
opslaghopen	22- 40					22- 50		25- 45	
						0- 60			

Tabel 3b Classificatie van granulaat (in % m/m) bij verwerkingsbedrijven van bouw-en sloopafval

samenstelling	verwerkingsbedrijven								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
variëaties binnen 10 dagproducties									
betonpuin	grindbeton	61- 91	51- 83	45- 83	33- 93	17- 73	8- 48	7- 35	3- 17
	lichtbeton	0- 8	-	-	-	-	0- 2	-	0- 1
	cem. dekvloer	-	-	-	0- 9	-	-	-	-
	metselmortel	0- 8	2- 11	1- 14	2- 4	4- 20	7- 22	7- 35	14- 32
	subtotaal	61- 91	50- 83	49- 89	33- 93	20- 78	22- 55	25- 50	21- 46
keramisch puin	baksteen, hard	-	-	-	-	-	-	-	-
	baksteen, zacht	2- 30	1- 34	4- 34	2- 54	17- 80	43- 77	43- 73	54- 78
	ker. dakpannen	-	-	0- 4	-	2- 21	-	-	0- 2
	ker. tegels	-	-	0- 1	3- 5	0- 1	0- 5	0- 11	0- 1
	subtotaal	2- 30	4- 34	4- 35	2- 54	17- 80	45- 78	44- 73	54- 79
asfaltbeton	0- 8	12- 28	4- 19	0- 37	0- 11	-	-	0- 1	
kalkzandsteen	-	-	-	-	-	0- 3	0- 8	-	
natuursteen	-	-	0- 8	12- 21	-	-	-	-	
diverse verontreinigingen	glas	≤0,1	≤0,2	≤0,3	-	≤0,5	≤0,4	≤1,4	-
	metaal	-	-	-	-	-	≤0,2	0- 2	-
	hout	x	x	x	x	x	x	x	x
	board	x	x	x	-	x	-	x	x
	papier	-	x	x	x	-	x	x	-
	kunststof	-	-	-	x	-	x	x	-
	riet	-	x	x	x	-	-	-	-
	kalk	-	-	-	-	-	-	x	-
	asbestcement	-	-	-	-	x	x	x	-
	klei	-	-	-	-	x	-	-	-
subtotaal	≤0,2	≤0,3	≤0,3	0- 1	0- 1	0- 1	0- 3	≤0,4	
>8 mm	77- 94	54- 91	48- 77	51- 70	91-100	61-100	78-100	97- 99	
<8 mm	6- 32	9- 47	23-52	26- 49	0- 9	6- 40	0- 22	1- 3	

Analoog aan de indeling van tabel 3 werden deze door een groot aantal leveranciers geleverde monsters eveneens onderzocht. Tabel 4 geeft hiervan de resultaten. Het blijkt dat de gevraagde granulaatsoort minimaal voor 86% aanwezig was.

Tabel 4 Gemiddelde samenstelling van vier soorten granulaat (in % m/m)

Samenstelling	granulaatsoorten aangeduid als				granulaatsoorten samengesteld uit tabel 3 (voor een nadere toelichting zie pag. 21)		
	grindbeton	baksteen- metsel- werk	kalkzandst. metsel- werk	betonsteen- metsel- werk	a	b	c
	(d)	(e)	(f)	(g)			
grindbeton	94,9	1,0	3,1	-	99,5	1,0	32,5
lichtbeton	-	-	-	94,4	-	0,1	-
metselmortel	-	12,9	8,3	3,5	-	17,6	5,8
sub-totaal	94,9	13,9	11,4	97,9	99,5	18,7	38,3
baksteen, hard	4,7	-	1,9	1,0	-	12,8	-
baksteen, zacht	-	85,7	-	0,4	-	60,9	37,3
keramische tegels	-	-	0,1	-	-	-	-
sub-totaal	4,7	85,7	2,0	1,4	-	73,7	37,3
asfaltbeton	0,2	-	-	-	0,5	0,2	36,1
kalkzandsteen	-	-	86,7	0,4	-	0,3	-
natuursteen	0,1	0,4	-	-	-	1,6	5,7
glas	0,1	-	-	-	-	0,3	-
hout		x	-	-	-	x	x
papier		x	-	-	-	x	x
> 8 mm	82,9	80,6	83,4	84,6	77,3	97,3	83,4
< 8 mm	17,1	19,4	16,6	15,4	22,7	2,7	16,6

HOOFDSTUK 3 EIGENSCHAPPEN VAN GRANULAATSOORTEN (16)

Om variaties in granulaateigenschappen vast te kunnen stellen, dienen verschillende soorten granulaat te worden onderzocht. Vooral de korrelsterkte en absorptie blijken van groot belang te zijn. Voor de laatstgenoemde eigenschap speelt, bij voorbeeld bij betonpuingranulaat, ook het breekproces zelf een rol. Hierbij zullen zich vooral in de zwakkere mortelfractie scheuren concentreren, zodat de fijnere fracties grotendeels uit verharde morteldeeltjes bestaan en de grovere fracties voor een groot deel uit de minder poreuze oorspronkelijke granulaten. De absorptie van de fijne fracties zal daardoor groter zijn dan die van grove.

Bovendien ontstaan tijdens het breken zeer fijne scheurtjes ($2-3\mu\text{m}$) in de deeltjes uit de mortelfractie, wat eveneens bijdraagt tot verhoogde waterabsorptie. Daar de soortelijke massa van de cementsteen veelal lager is dan die van het oorspronkelijke granulaat, heeft het breken ook tot gevolg dat de soortelijke massa van de fijnere fracties lager is dan van de grovere fracties.

Er werden granulaten onderzocht bestaande uit:

- a. ten minste 95% grindbetonpuin
- b. ten minste 75% baksteenmetselwerkpuin en ten hoogste 25% beton- of cementmortelpuin
- c. ca. 1/3 deel betonpuin, 1/3 deel baksteenmetselwerkpuin en 1/3 deel asfaltbetonpuin

Alle drie soorten (a, b en c) werden verkregen uit bestaande monsters, waarvan in tabel 3 een overzicht wordt gegeven; de samenstelling is vermeld in tabel 4.

Van genoemde granulaatsoorten werden bepaald de korrelgradering, het vochtgehalte, de waterabsorptie (volgens NEN 3543), de volumieke massa van de droge korrels (volgens NEN 3542), de verbrijzelingsfactor (volgens Eisen voor Bouwstoffen in de Wegbouw 1978) en het gloeiverlies (volgens NEN 3542). Tabel 5 vermeldt de resultaten.

Vervolgens werden dezelfde eigenschappen als vermeld in tabel 5 eveneens onderzocht aan het materiaal vermeld in tabel 4 (d t/m g). De resultaten hiervan zijn gegeven in tabel 6, aangevuld met de volumieke massa van het losgestorte granulaat (stortgewicht) en het sulfaatgehalte.

Uit tabellen 5 en 6 blijkt dat de fracties 16 -31,5 mm en 8 - 16 mm niet geheel voldoen aan de graderingsvoorschriften. Tevens blijkt dat het verschil tussen de

Tabel 5 Korrelgradering en eigenschappen van drie soorten granulaten

zeven volgens NEN 2560 in mm	zeefresten cumulatief in % (m/m)						eisen
	grindbetonpuin (a)		metselwerkpuin (b)		1/3 beton-, 1/3 metselwerk-, 1/3 asfaltbetonpuin (c)		
	4-31,5 mm 2)	0->31,5 mm 1)	4-31,5 mm 2)	0->31,5 mm 1)	4-31,5 mm 2)	0->31,5 mm 1)	
31,5	0	14	0	30	0	32	$\geq 10 - < 62$ $\geq 30 - < 85$ > 90
16	52	51	52	66	40	55	
8	79	70	93	78	77	77	
4	100	85	100	99	100	90	
vochtgehalte (% m/m)							
16-31,5 mm	2,8		4,1		2,2		
8-16 mm	3,8		3,5		3,0		
4-8 mm	5,6		3,6		4,4		
waterabsorptie (% m/m)							
16-31,5 mm	30 m. 3,1	24 h 3,7	30 m. 9,7	24 h 10,7	30 m. 2,8	24 h 2,8	
8-16 mm	3,5	3,5	9,5	10,2	3,0	3,0	
4-8 mm	3,9	4,4	10,0	11,6	4,9	4,9	
vol. massa droge korrels (ρ_{sr} in kg/m ³)							
16-31,5 mm	2390		1870		2270		
8-16 mm	2330		1890		2290		
4-8 mm	2250		1850		2210		
gem.	2323		1870		2260		
verbrijzelings- factor 22,4-31,5 mm	0,75		0,67		0,77 ³⁾		eis voor steenfun- deringen $\geq 0,65$
gloeiverlies 1000 °C (% m/m) 4-31,5 mm	4,6		4,7		6,9 ⁴⁾		eis voor licht toe- slagmate- riaal < 5% m/m

1) oorspronkelijk monster

2) na verwijderen van korrels kleiner dan 4 mm en groter dan 31,5 mm

3) het (zachte) deel asfaltbeton werd niet verbrijzeld, waardoor een hoge waarde werd verkregen

4) door de asfalt kon het granulaat niet worden gemalen maar werd het gebroken.

Tabel 6 Korrelgradering en eigenschappen van vier soorten granulaat

zeven volgens NEN 2560 in mm	zeefresten cumulatief in % (m/m)								eisen
	grindbeton (d)		baksteen- metselwerk (e)		kalkzandsteen- metselwerk (f)		betonsteen- metselwerk (g)		
	4-31,5 mm	0->31,5 mm	4-31,5 mm	0->31,5 mm	4-31,5 mm	0->31,5 mm	4-31,5 mm	0->31,5 mm	
	2)	1)	2)	1)	2)	1)	2)	1)	
31,5	0	17	0	22	0	20	0	23	$\geq 10- \leq 62$ $\geq 30- \leq 85$ >90
16	55	57	58	58	62	60	60	58	
8	87	80	86	75	89	78	86	73	
4	100	89	100	84	100	85	100	82	
vochtgehalte (% m/m)									
16-31,5 mm	5,5		14,8		8,4		19,7		
8-16 mm	6,7		16,6		8,5		20,3		
4-8 mm	7,3		16,8		8,8		19,4		
waterabsorptie (% m/m)	30 m	24 h	30 m	24 h	30 m	24 h	30 m	24 h	
16-31,5 mm	4,5	4,8	11,9	13,0	7,9	8,2	21,5	24,2	
8-16 mm	4,2	4,2	11,7	11,9	8,3	8,3	22,2	25,1	
4-8 mm	4,6	5,1	12,5	12,8	8,3	8,3	21,4	23,2	
vol. massa droge korrels (ρ_{sr} in kg/m^3)									
16-31,5 mm	2191		1675		1950		1278		
8-16 mm	2193		1715		1936		1292		
4-8 mm	2178		1699		1964		1368		
gem.	2187		1696		1950		1313		
vol. massa los ingestorte droge granulaten (ρ_m in kg/m^3)									
4-31,5 mm	1227		978		1053		667		
4-16 mm	1211		967		1039		673		
verbrijzelings- factor									eis voor steenfun- deringen $\geq 0,65$
16-22,4 mm	0,73		0,65		0,63		0,58		
11,2-16 mm	0,75		0,62		0,64		0,62		
gloeiverlies 1000 °C (% m/m)									eis voor licht toe- slagmate- riaal < 5% m/m
4-31,5 mm	4,5		3,2		7,1		11,4		
sulfaatgehalte als SO_3 (% m/m)									t.a.v. licht- toeslagmat. geldt < 1% m/m
4-31,5 mm	0,19		0,38		0,11		0,99		

1) oorspronkelijk monster

2) na verwijderen van korrels kleiner dan 4 mm en groter dan 31,5 mm

waterabsorptie gedurende 30 minuten (W_{30m}) en 24 uur (W_{24h}) gering is, nl. maximaal ca. 2% bij lage volumieke massa's van de korrels ρ_{sr} . De verschillende granulaten hebben, uitgezonderd asfaltbeton en sommige soorten natuursteen, nagenoeg dezelfde soortelijke massa. Dit houdt in dat de eigenschappen voornamelijk samen moeten hangen met de porositeit, dat wil zeggen met de volumieke massa van de korrels ρ_{sr} .

Een bepaalde open porositeit kan het gevolg zijn van een groot aantal nauwe capillairen, een klein aantal wijde capillairen of een combinatie van beide. Deze capillaire opbouw beïnvloedt wel de snelheid van wateropnemen, echter nauwelijks de eindwaarde van de absorptie. Het ligt voor de hand dat er een goede correlatie moet bestaan tussen de uiteindelijke waterabsorptie en de volumieke massa van de korrels indien alle poriën voor water toegankelijk zijn. Indien na breken de korrelvorm ongeveer dezelfde rondheid of hoekigheid vertoont, zal bij ongeveer gelijke gradering eveneens een goede correlatie moeten bestaan tussen de volumieke massa van de korrels ρ_{sr} en het stortgewicht ρ_m . Het is duidelijk dat de verbrijzelingsfactor -naast uiteraard de materiaalsterkte - meer samenhangt met het aantal en de breedte van de capillairen. Een eventuele correlatie van de verbrijzelingsfactor met de volumieke massa van korrels of het stortgewicht zal daardoor veel minder goed zijn. Op deze basis werden de figuren 5 t.m. 7 opgesteld.

Inderdaad blijkt het bovengestelde juist te zijn. Er blijkt een goede correlatie tussen ρ_{sr} en ρ_m enerzijds (lineair, zie fig. 5) en tussen ρ_{sr} en de waterabsorptie anderzijds (parabolisch, zie fig. 6) te bestaan. Tussen ρ_{sr} en ρ_m is geen goede lineaire correlatie met de verbrijzelingsfactor aanwezig (zie fig. 7).

Uit de meetresultaten werden de regressievergelijkingen berekend. Deze zijn samengevat in tabel 7, waarbij de regressievergelijkingen werden genummerd. Tevens werd nog een aantal andere verbanden berekend, namelijk tussen waterabsorptie en stortgewicht ρ_m (vergelijking 6 en 7). Ook deze regressies (W_{30m} , W_{24h}) hebben een hoge correlatiecoëfficiënt. Daar een stortgewicht eenvoudiger is te bepalen dan een ρ_{sr} , zullen rechtstreekse correlaties met stortgewicht de voorkeur verdienen, mits de residuele variantie zo laag is dat een schatting van ρ_{sr} uit het stortgewicht voldoende nauwkeurig is. De residuele variantie zal nog nader moeten worden bepaald.

Ten slotte werd nog berekend dat ook de correlatie tussen ρ_{sr} en stortgewicht ρ_m goed is (vergelijking 8); ook hier geldt dat de vergelijking 1 de voorkeur verdient. Hieruit blijkt dat het stortgewicht, een eenvoudig te bepalen grootheid, van veel belang is. Immers hieruit kunnen direct zowel de volumieke massa van de korrels ρ_{sr}

als de waterabsorpties na 30 minuten, en na 24 uur (W_{30m} resp. W_{24h}) worden afgeleid.

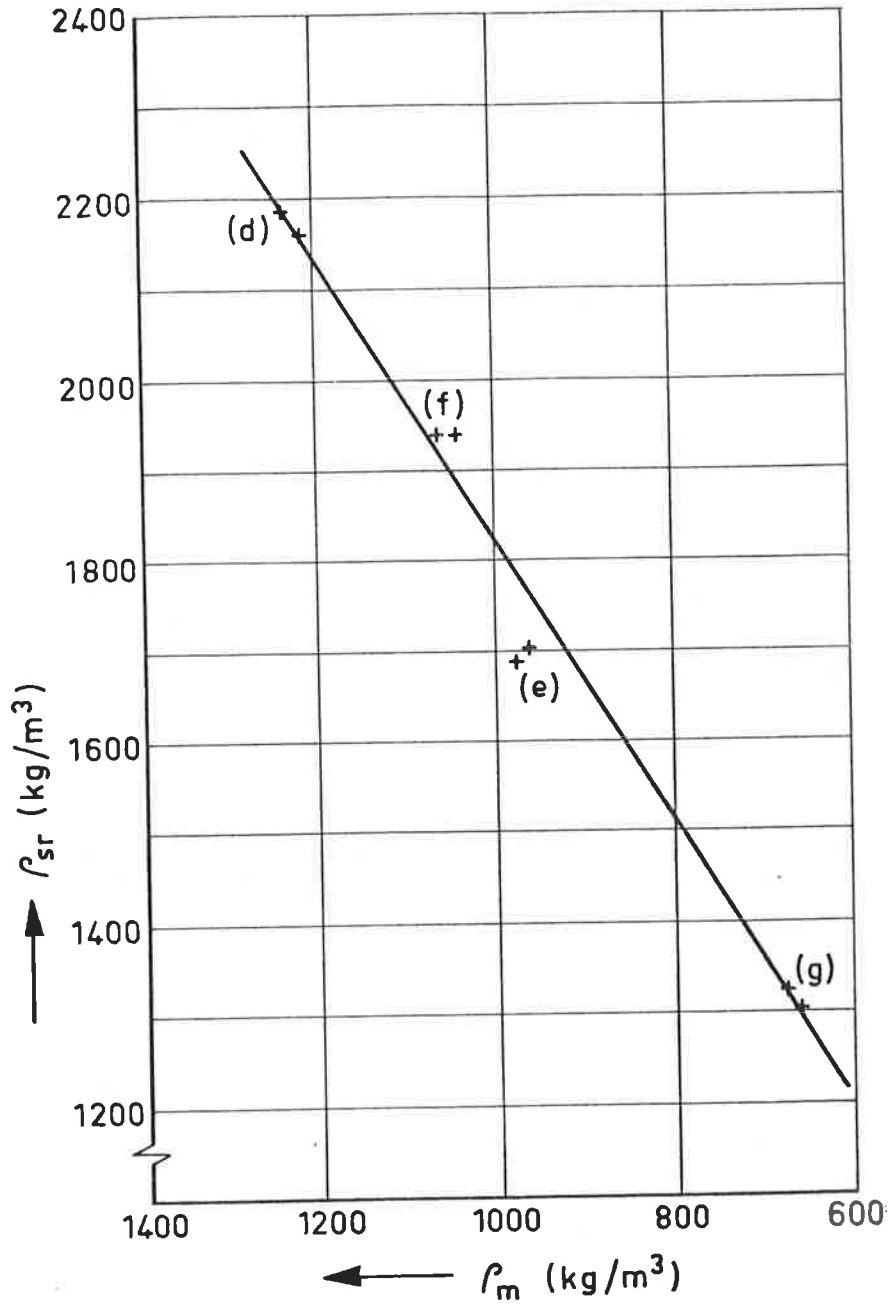


Fig. 5 Verband tussen de volumieke massa van de los ingestorte granulaten (stortgewicht) ρ_m en de volumieke massa van de korrels ρ_{sr} .

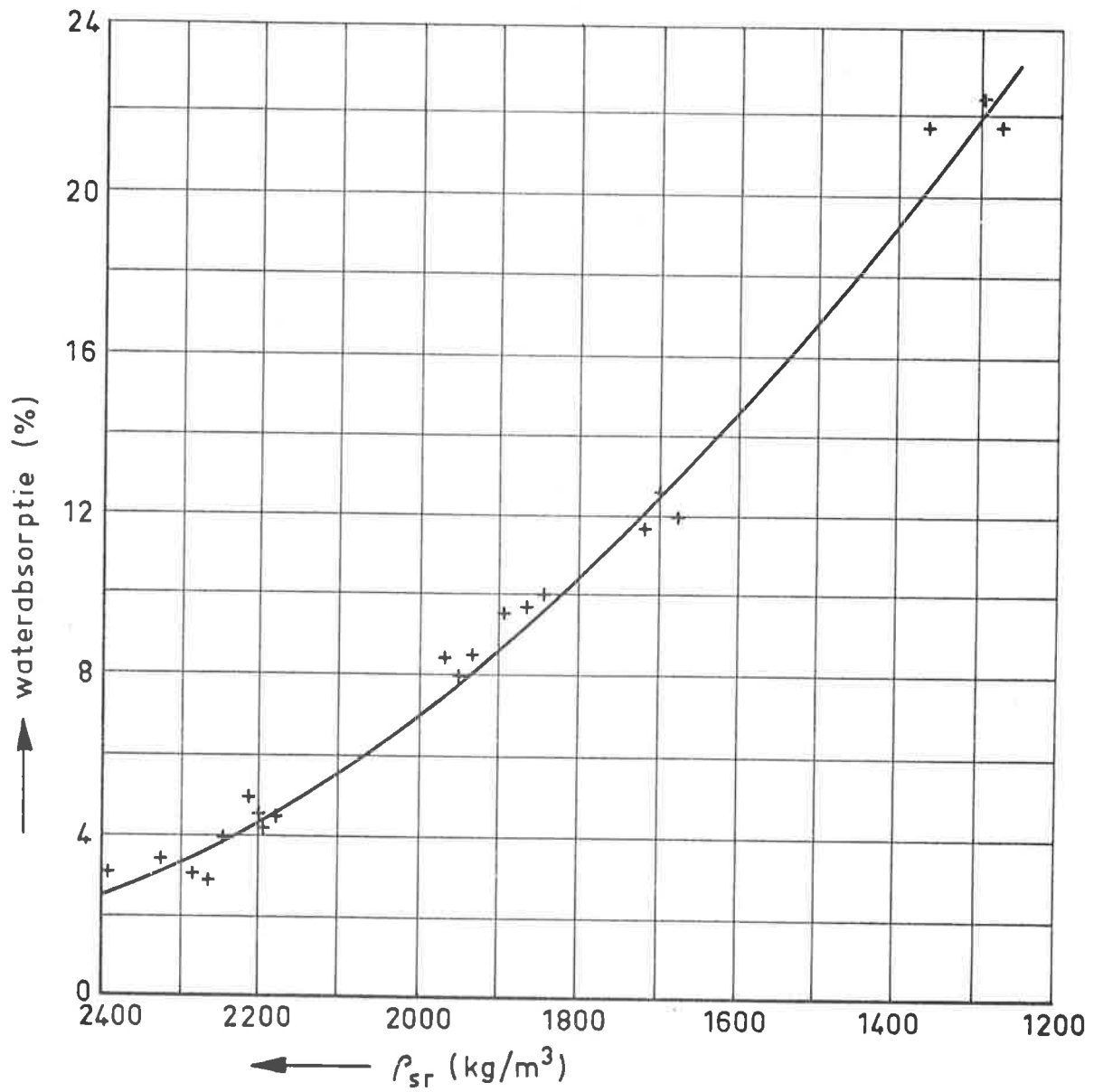


Fig. 6 Verband tussen de volumieke massa van de korrels ρ_{sr} en de waterabsorptie na 30 minuten.

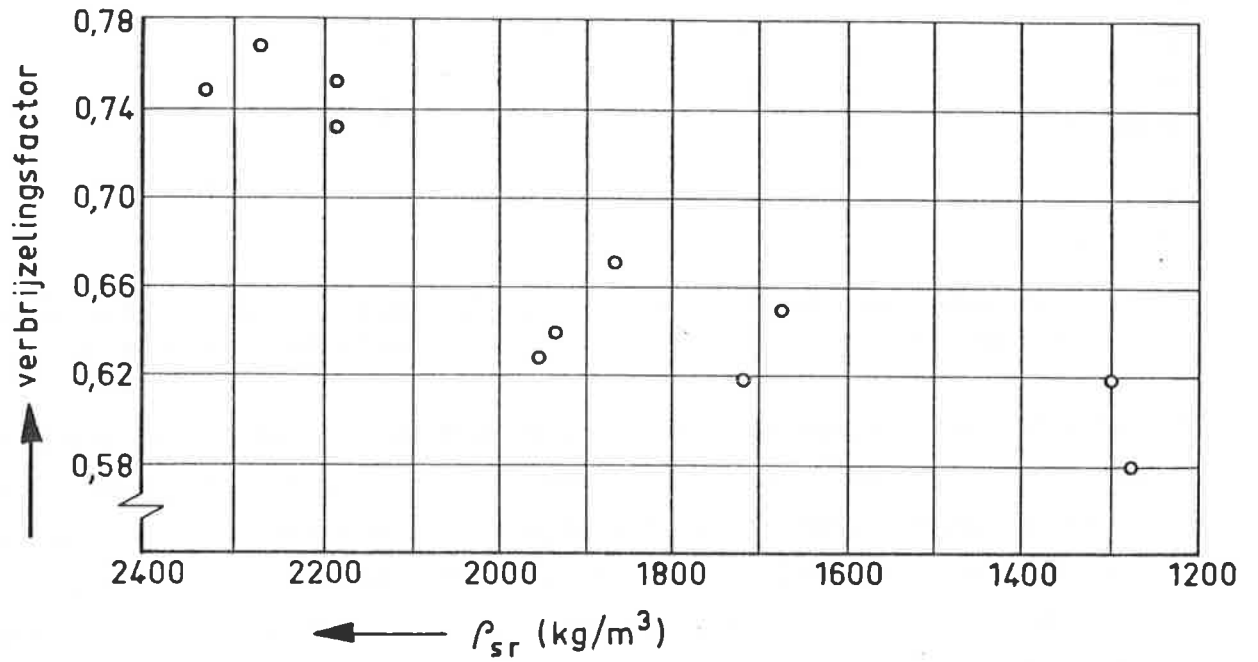
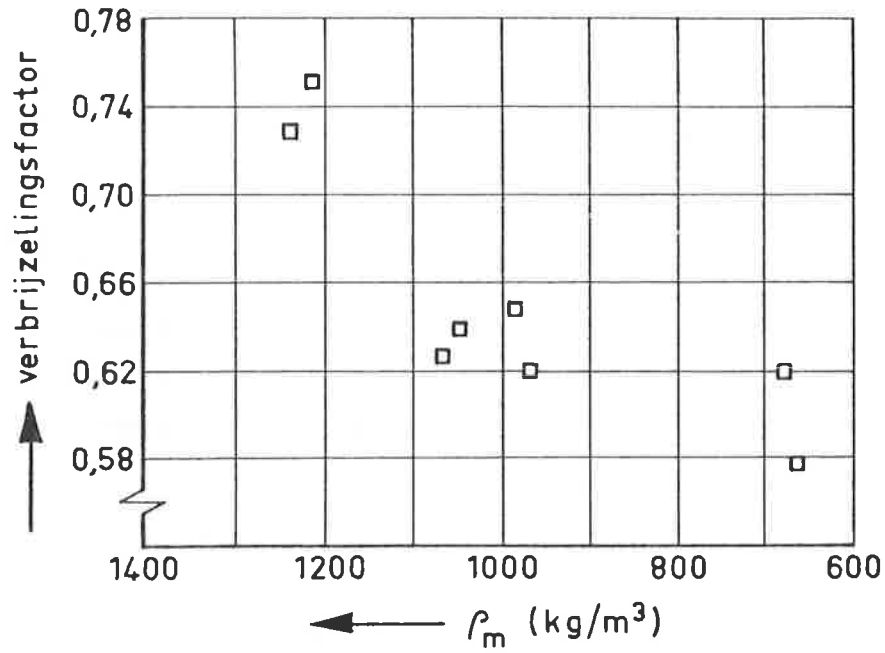


Fig. 7 Verband tussen de volumieke massa van de korrels ρ_{sr} c.q. het stortgewicht ρ_m en de verrijzingsfactor.

Tabel 7 Regressievergelijkingen

nummer	variabelen (y t.o.v. x)	vergelijking	n (aantal)	r (correlatie- coëfficiënt)
1	ρ_{sr} ρ_m	$\rho_{sr} = 235 + 1,592 \rho_m$	8	0,998
2	$\sqrt{W_{30m}}$ ρ_{sr}	$\sqrt{W_{30m}} = 8,345 - 0,00283 \rho_{sr}$	21	-0,993
3	$\sqrt{W_{24h}}$ ρ_{sr}	$\sqrt{W_{24h}} = 8,803 - 0,0030 \rho_{sr}$	21	-0,990
4a = 1 + 2	$\sqrt{W_{30m}}$ ρ_m	$\sqrt{W_{30m}} = 7,68 - 0,0045 \rho_m$	8-21	-
4b = (ber.)	$\sqrt{W_{30m}}$ ρ_m	$\sqrt{W_{30m}} = 7,91 - 0,0047 \rho_m$	8	-0,994
5a = (ber.)	$\sqrt{W_{24h}}$ ρ_m	$\sqrt{W_{24h}} = 8,10 - 0,0048 \rho_m$	8-21	-
5b = (ber.)	$\sqrt{W_{24h}}$ ρ_m	$\sqrt{W_{24h}} = 8,39 - 0,0051 \rho_m$	8	-0,495
6 (verg. 4)	W_{30m} ρ_m	$W_{30m} = 43,12 - 0,032 \rho_m$	8	-0,994
7 (verg. 5)	W_{24h} ρ_m	$W_{24h} = 48,03 - 0,037 \rho_m$	8	-0,989
8 (verg. 1)	$\sqrt{\rho_{sr}}$ ρ_m	$\sqrt{\rho_{sr}} = 23,57 + 0,02 \rho_m$	8	-0,989

ρ_{sr} = volumieke massa van de korrels
 ρ_m = stortgewicht (kg/m³)

W_{30m} = waterabsorptie na 30 minuten
 W_{24h} = waterabsorptie na 24 uur

Deze handelwijze is alleen dan zinvol, als de betrouwbaarheid van het resultaat voldoende is. Dit zal nader statistisch moeten worden geanalyseerd. Laatstgenoemde twee eigenschappen kunnen ook worden afgeleid uit de volumieke massa van de korrels. Wil men een verbrijzelingswaarde weten, dan zal deze moeten worden bepaald; er blijkt nauwelijks een correlatie met ρ_m of ρ_{sr} aanwezig te zijn, zoals op grond van de vermelde argumentatie ook niet was te verwachten.

Overigens moet worden opgemerkt dat het voorgaande alleen geldt bij overeenkomstige graderingen. In een later stadium zal moeten worden vastgesteld hoe de correlaties zijn als van verschillende graderingen wordt uitgegaan.

Uit figuur 5 blijkt dat de granulaten in feite gerangschikt dienen te worden onder de "lichte" toeslagmaterialen, waarbij de grindbetongranulaten de toeslag voor normaal

grindbeton redelijk benaderen. Indien de soortelijke massa ρ_s , de volumieke massa van de korrels ρ_{sr} en het stortgewicht ρ_m bedraagt, dan gelden de volgende betrekkingen:

porositeit van het toeslagmateriaal zelf (ϵ):

$$\epsilon = \frac{\rho_s - \rho_{sr}}{\rho_s} \cdot 100\% \text{ (V/V)}$$

holle ruimte in een toeslagmengsel (H):

$$H = \frac{\rho_{sr} - \rho_m}{\rho_{sr}} \cdot 100\% \text{ (V/V)}$$

De soortelijke massa ρ_s zal normaliter 2600 à 2700 kg/m³ bedragen voor van sloop afkomstige granulaten. Vergelijking van de hier gevonden waarden met die van de gebruikelijke lichte toeslagmaterialen kan plaatsvinden met behulp van de literatuur **(7a)**.

HOOFDSTUK 4

EIGENSCHAPPEN VAN BETON, VERVAARDIGD MET GRANULATEN AFKOMSTIG VAN BOUW- EN SLOOPAFVAL (8, 16)

Met de in hoofdstuk 3 beschreven zeven puingranulaten (grootte 4-31,5 mm) werden drie series betonmengsels vervaardigd.

Bij serie 1, werden de granulaten a t/m c en bij serie 2 de granulaten d t/m g gebruikt. Aan beide series werden referentiemengsels met grind als toeslagmateriaal toegevoegd. De mengsels werden vervaardigd met ca. 320 kg/m³ hoogovencement klasse A (referentiemengsel ook met 285 kg/m³); in de tweede serie werd voor grindbetongrunulaat d ook de vergelijking met een referentiemengsel met 400 kg/m³ portlandcement klasse B gemaakt.

Als derde serie werden met de granulaten d, e, f en g (grootte 4-16 mm) ook betonproefstukken met meer open structuur vervaardigd waarbij een toepassing als "betonsteen" voor ogen stond. Toegepast werd ca. 180 kg portlandcement klasse A. De gradering was hier uiteraard verschillend van die bij de series 1 en 2.

Tabel 8 geeft de gebruikte korrelgraderingen die bovendien grafisch zijn weergegeven in figuur 8.

Tabel 9 en 10 geven de betonsamenstellingen met enige eigenschappen van betonspecie en verhard beton. In figuur 9 zijn de resultaten grafisch weergegeven.

Daar in de monsters grindbetongrunulaat en baksteenmetselwerkrunulaat bij de bestelde monsters d en e zich meer fijn bevond dan bij de monstertrekkingen a en b (zie onderaan tabel 9), werden ten slotte opnieuw betonmengsels met de granulaten d en e vervaardigd nadat deze waren schoongespoeld met water om het fijne materiaal te verwijderen (serie 4). Tabel 10 geeft ook de resultaten hiervan.

Gezien de verschillen in de volumieke massa van de korrels tussen de verschillende granulaten en de relatie tussen korrelafmeting en volumieke massa van de korrels bij de puingranulaten, zijn alle samenstellingen berekend op basis van overeenkomstige korrelvolumepercentages. Voorts gold als uitgangspunt dat de graderingen zich dienden te bevinden in het gebied tussen de A- en B-lijnen voor grindbeton van de Voorschriften Beton 1974 (29). Ten slotte werden slechts mengsels vergeleken met nagenoeg dezelfde zetmaat.

Bij de mengsels met puingrunulaat vond, gezien de porositeit, voorbevochtiging van het toeslagmateriaal plaats.

Tabel 8 Korrelgraderingen van betonmengsels

zeven volgens NEN 2560	series 1 en 2 zeefresten t.b.v. beton met gesloten structuur in % V/V			serie 3 zeefresten t.b.v. beton met open structuur in % V/V		
	grove granulaat	beton- zand	58% grove granulaat 42% beton- zand	grove granu- laat	beton zand	76% grove granulaat 24% beton- zand
31,500	0	0	0	0	0	0,0
16,000	42	0	24	0	0	0,0
8,000	85	0	49	60	0	46,0
4,000	100	5	60	100	5	77,0
2,000	100	14	64	100	14	79,0
1,000	100	33	72	100	33	84,0
0,500	100	56	82	100	56	89,0
0,250	100	85	94	100	85	96,0
0,125	100	98	99	100	100	99,5

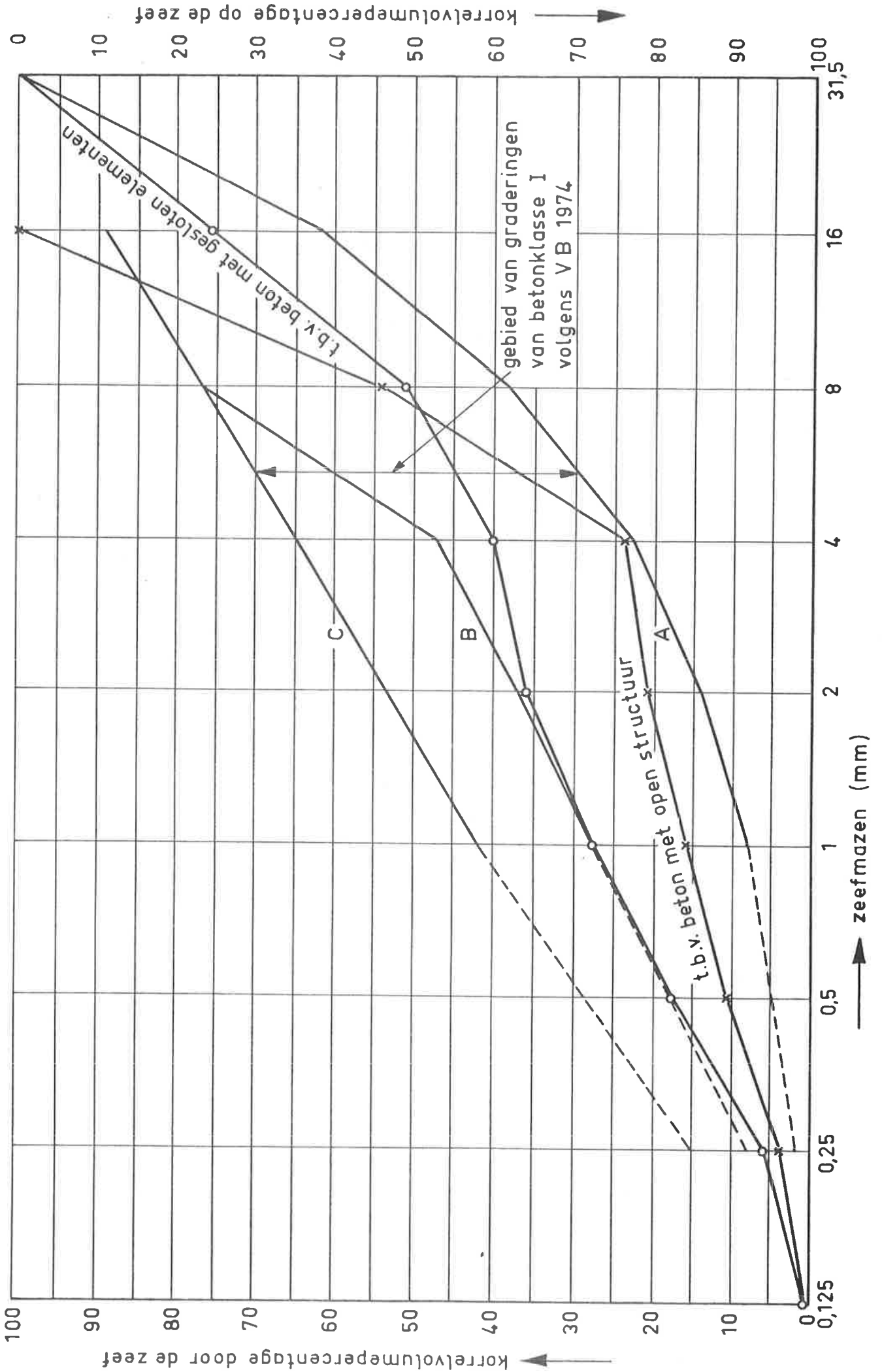


Fig. 8 Toegepaste korrelgraderingen.

Tabel 9 Betonsamenstellingen en enige eigenschappen (series 1 en 2)

aanduiding gebruikte granulaten	serie 1 beton met gesloten structuur					serie 2 beton met gesloten structuur							
	a	b	c	h ₁	i ₁	d ₁	e ₁	f ₁	g ₁	h ₂	i ₂	d ₂	k
	95% grindbeton	75% baksteenmetselsoorten 25% cementmortel	1/3 grindbeton + 1/3 baksteen metselwerk + 1/3 asfaltbeton	referentiebeton 1a	referentiebeton 2a	95% grindbeton	86% baksteenmetselwerk 13% cementmortel	87% kalkzandsteenmetselwerk 8% cementmortel	95% betonsteenmetselwerk	referentiebeton 1b	referentiebeton 2b	95% grindbeton	referentiebeton 3
Betonsamenstelling													
soort cement	hc-A	hc-A	hc-A	hc-A	hc-A	hc-A	hc-A	hc-A	hc-A	hc-A	hc-A	pc-B	pc-B
cement kg/m ³	323	320	322	320	285	318	326	324	324	320	285	400	396
granulaat, droog (kg/m ³)	969	783	920	-	-	890	706	812	538	-	-	899	-
grind, droog (kg/m ³)	-	-	-	1082	1100	-	-	-	-	1082	1101	-	1076
betonzand, droog (kg/m ³)	795	788	792	787	800	783	802	798	798	787	801	790	782
totaal water (kg/m ³)	206	241	206	167	168	221	290	249	290	167	168	194	138
geabsorbeerd water (kg/m ³)	41	81	39	13	13	45	91	72	121	13	13	45	13
wcf effectief	0,51	0,50	0,51	0,48	0,54	0,55	0,61	0,55	0,52	0,48	0,54	0,37	0,32
Specie-eigenschappen													
zetmaat (mm)	100	90	100	100	110	100	100	100	90	100	110	-	-
schudmaat (mm)	430	390	400	460	470	390	410	380	350	420	450	1,46*	1,45*
vol. massa (kg/m ³)	2291	2132	2238	2355	2355	2210	2184	1952	2355	2356	2356	2284	2393
luchtgehalte (%)	1,4	4,1	2,7	1,7	1,5	4,0	3,3	3,6	5,3	2,2	1,8	3,0	2,6
waterabsorptie granulaat na 30 min (%)	3,7	9,7	3,6	-	-	4,4	12,1	8,2	21,7	-	-	4,4	-
waterabsorptie grind en zand na 10 min (%)	-	-	-	0,7	0,7	-	-	-	-	0,7	0,7	-	0,7
	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Betoneigenschappen													
σ _{k 7} (N/mm ²)	24,6	22,3	16,7	25,8	21,2	23,3	22,1	23,9	19,4	27,6	23,0	46,6	54,8
(%)	95	86	65	100	82	84	80	87	70	100	83	85	100
σ _{k28} (N/mm ²)	35,5	30,7	22,3	35,0	31,5	32,7	30,7	35,1	25,9	39,2	34,8	51,4	63,0
(%)	101	88	64	100	90	82	77	88	65	100	88	82	100
vol. massa 7 d (kg/m ³)	2303	2156	2255	2378	2371	2232	2145	2206	1991	2379	2375	2285	2404
vol. massa 28 d (kg/m ³)	2308	2161	2252	2376	2375	2238	2160	2216	1984	2386	2383	2286	2415
σ _{t28} (N/mm ²)	3,4	2,8	2,5	3,4	3,0	3,0	3,0	3,7	2,9	3,9	4,0	4,3	4,5
(%)	100	82	74	100	88	77	77	95	74	100	102	96	100
ε _{kr 7} (‰)	0,18	0,10	0,15	0,16	0,15	0,18	0,11	0,14	0,14	0,15	0,14	0,26	0,18
ε _{kr28} (‰)	0,32	0,23	0,28	0,26	0,26	0,37	0,32	0,28	0,24	0,26	0,24	0,41	0,29
ε _{kr91} (‰)	0,50	0,44	0,47	0,39	0,39	0,54	0,54	0,45	0,45	0,35	0,29	0,57	0,35
(%)	128	113	121	100	100	164	164	136	136	100	94	163	100
% mm < 0,25 mm in vochtige granulaten	0,6	0,8				2,0	5,0						

* verdichtingsmaat

Tabel 10 Betonsamenstellingen en enige eigenschappen (series 3 en 4)

aanduiding gebruikte granulaten	serie 3 beton met open structuur				serie 4 beton met gesloten structuur		
	d ₃	e ₂	f ₂	g ₂	d ₄	e ₃	h ₃
	95% grindbeton	86% baksteenmetselwerk 13% cementmortel	87% kalkzandsteenmetselwerk 8% cementmortel	95% betonsteenmetselwerk	95% grindbeton	86% baksteenmetselwerk 13% cementmortel	referentiebeton 1c
<u>Betonsamenstelling</u>							
soort cement	hc-A	pc-A	pc-A	pc-A	hc-A	hc-A	hc-A
cement kg/m ³	178	183	182	181	323	328	319
granulaat, droog (kg/m ³)	1146	938	1047	707	904	712	-
grind, droog (kg/m ³)	-	-	-	-	-	-	1080
betonzand, droog (kg/m ³)	443	466	455	453	795	807	785
totaal water (kg/m ³)	147	235	182	238	220	293	170
geabsorbeerd water (kg/m ³)	54	117	89	157	45	91	13
wcf effectief	0,52	0,64	0,51	0,45	0,54	0,61	0,49
<u>Specie-eigenschappen</u>							
zetmaat (mm)	-	-	-	-	100	90	100
schudmaat (mm)	1,33*	1,33*	1,33*	1,33*	410	380	420
vol. massa (kg/m ³)	1916	1816	1867	1577	2241	2138	2356
luchtgehalte (%)	-	-	-	-	2,7	2,6	1,7
waterabsorptie granulaat na 30 min (%)	4,4	12,1	8,2	21,7	4,4	12,1	-
waterabsorptie grind en zand na 10 min (%)	-	-	-	-	-	-	-
	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
<u>Betoneigenschappen</u>							
σ _{k7} (N/mm ²)	6,1	7,4	9,1	6,2	25,7	21,8	27,9
(%)	-	-	-	-	92	78	100
σ _{k28} (N/mm ²)	9,2	7,9	10,6	8,4	35,1	29,3	41,2
(%)	-	-	-	-	85	71	100
vol. massa 7 d (kg/m ³)	1908	1837	1861	1560	2268	2158	2379
vol. massa 28 d (kg/m ³)	1977	1842	1885	1620	2268	2163	2390
σ _{t28} (N/mm ²)	1,0	1,4	1,3	1,0	-	-	-
(%)	-	-	-	-	-	-	-
ε _{kr7} (°/oo)	0,16	0,05	0,12	0,11	-	-	-
ε _{kr28} (°/oo)	0,37	0,31	0,32	0,38	-	-	-
ε _{kr91} (°/oo)	0,50	0,51	0,44	0,64	-	-	-
(%)	-	-	-	-	-	-	-

* verdichtingsmaat

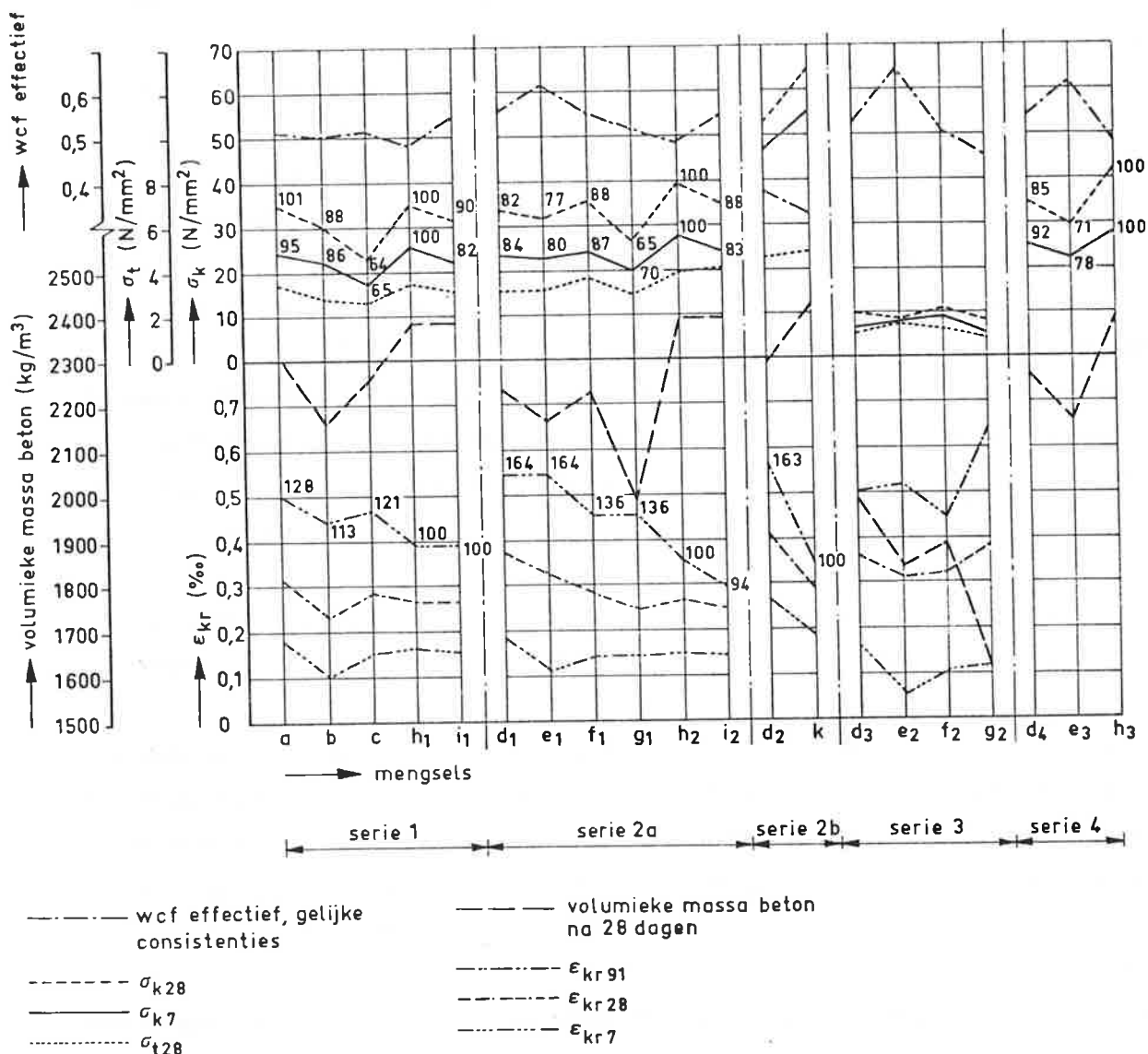


Fig. 9 Eigenschappen van beton vervaardigd met behulp van granulaten (tabel 9 en 10) afkomstig van bouw- en sloopafval.

Bij het vervaardigen van de betonsamenstellingen werden de granulaten eerst met een deel van het aanmaakwater gedurende 15 seconden gemengd. Na 10 minuten wachten werd het cement toegevoegd en nogmaals 1 minuut gemengd. Na toevoegen van de rest van het mengwater werd nog 2 minuten gemengd. Direct na het mengen werden de zetmaat, de schudmaat (eventueel de verdichtingsmaat), de volumieke massa en het luchtgehalte bepaald. De kubussen (150 x 150 x 150 mm³) en prisma's (100 x 100 x 500 mm³) voor respectievelijk de sterkte- en krimpbeoordeling, werden verdicht op een

triltafel, vervolgens afgedekt met plastic folie en na 24 uur ontkist. De sterkteproefstukken werden daarna onder water (20 °C) geplaatst tot de beproeving, terwijl de krimpproefstukken bij 20 °C en 65% RV werden bewaard. Uit de tabellen 9, 10 en uit figuur 9 blijkt dat een kwaliteit B 22,5 (waarbij een gemiddelde sterkte van 31 N/mm² geldt bij een standaardafwijking van 5 N/mm²) niet wordt bereikt voor samenstelling c (1/3 grindbeton, 1/3 baksteenmetselwerk, 1/3 asfaltbeton) en voor samenstelling g₁ (95% betonsteenmetselwerk). De asfaltverontreiniging is in mengsel c ook aanmerkelijk, terwijl de porositeit van het betonsteengranulaat (g₁) de hoogste is van de gebruikte granulaten (tabel 6 en 9).

De krimpverhoging door het gebruik van de diverse granulaten is aanzienlijk (13-64%). Metselwerkpuin als granulaat laat ten opzichte van de referentiesamenstelling eerst een verlaging van de krimp zien; na 1 à 2 maanden gaat dit over in een verhoging. De vochttopslag in het granulaat zal de cementsteen eerst voor te sterke uitdroging behoeden.

Bij de korrelbetonsamenstellingen van serie 3 werden druksterkten bereikt van dezelfde orde van grootte als aangegeven in NEN 7027 "Bouwblokken en -stenen van beton", druksterkteklasse 5.

Een kwaliteit B45 (400 kg cement, serie 2b) werd met grindbetongranulaat net niet gehaald. De conclusie van hoofdstuk 3, dat de granulaten zijn te beschouwen als lichte toeslagstoffen, leidt tot het daarbij gebruikelijke verband tussen sterkte en volumieke massa, dat volgens figuur 10 inderdaad redelijk aanwezig is voor de verschillende toegepaste cementgehalten. Ook de water-cementfactorwet blijkt in figuur 10 te worden gevolgd, behalve voor de mengsels c en g.

Men kan zich afvragen in hoeverre aan de hand van de granulaateigenschappen een indicatie kan worden verkregen van de met deze granulaten te behalen betondruksterkte. Uit hoofdstuk 3 volgt dat de volumieke massa van de korrels (en daarmee het stortgewicht) de waterbeweging bepaalt en dat deze tevens enige relatie geeft inzake de verbrijzelingsfactor die toch een maat voor de sterkte is. De correlaties tussen betoneigenschappen (welke in tabel 9 zijn vermeld) en volumieke massa van de korrels c.q. stortgewicht van de granulaten (zie tabel 5 en 6) zijn uitstekend, zoals uit de figuren 11 t.m. 14 en tabel 11 blijkt. Op deze wijze wordt het dus mogelijk door bepaling van het droge stortgewicht van de granulaten bij overeenkomstige gradering de sterkte van het hiermee te vervaardigen beton te schatten, als de zetmaat ca. 100 mm en het gehalte aan hoogovencement ca. 320 kg/m³ bedraagt. Ook hier dient uiteraard nog statistisch te worden aangetoond dat deze schatting een voor de

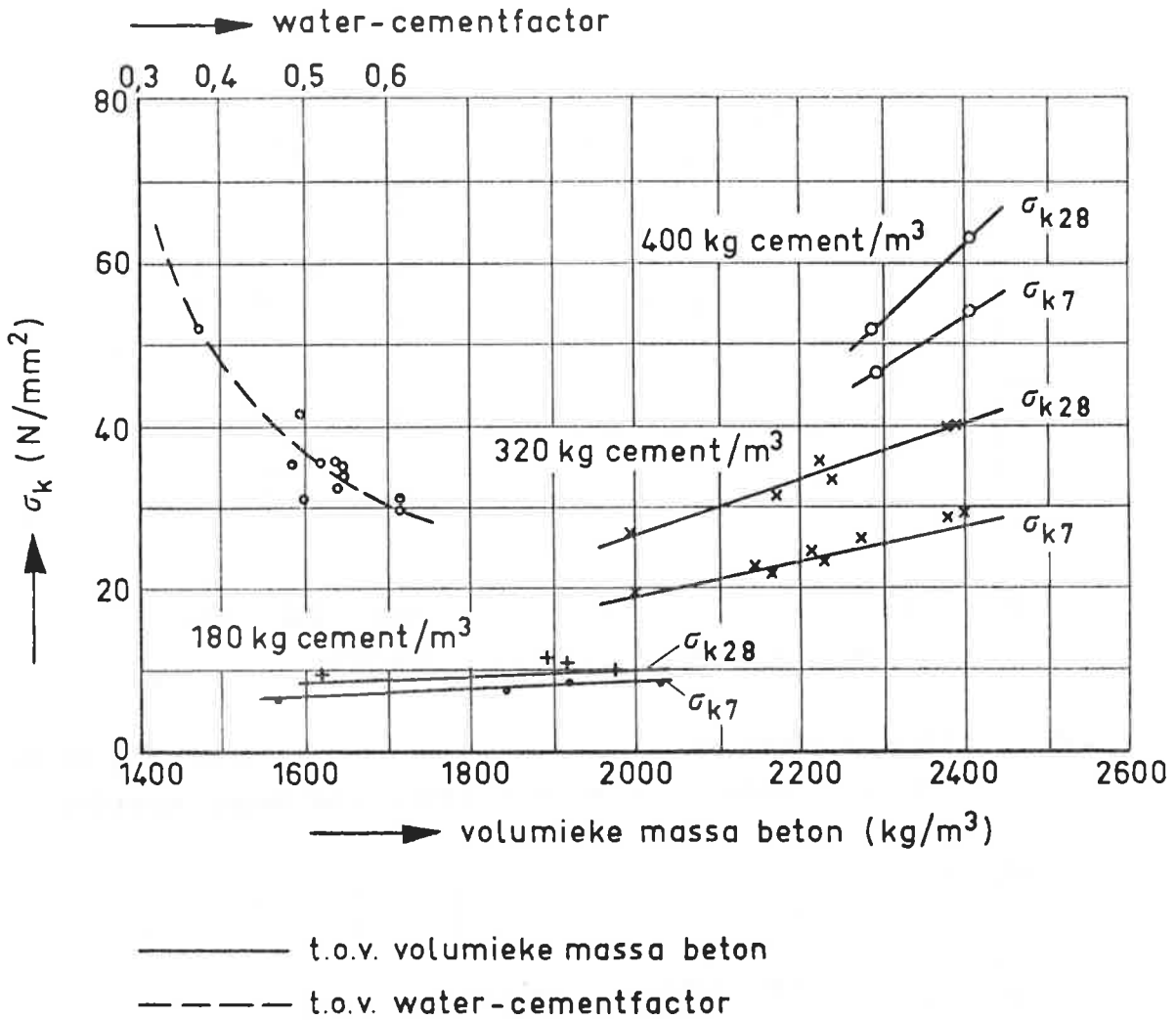


Fig. 10 Verband tussen de volumieke massa van het beton en de druksterkte, alsmede het verband tussen de water-cementfactor en de druksterkte.

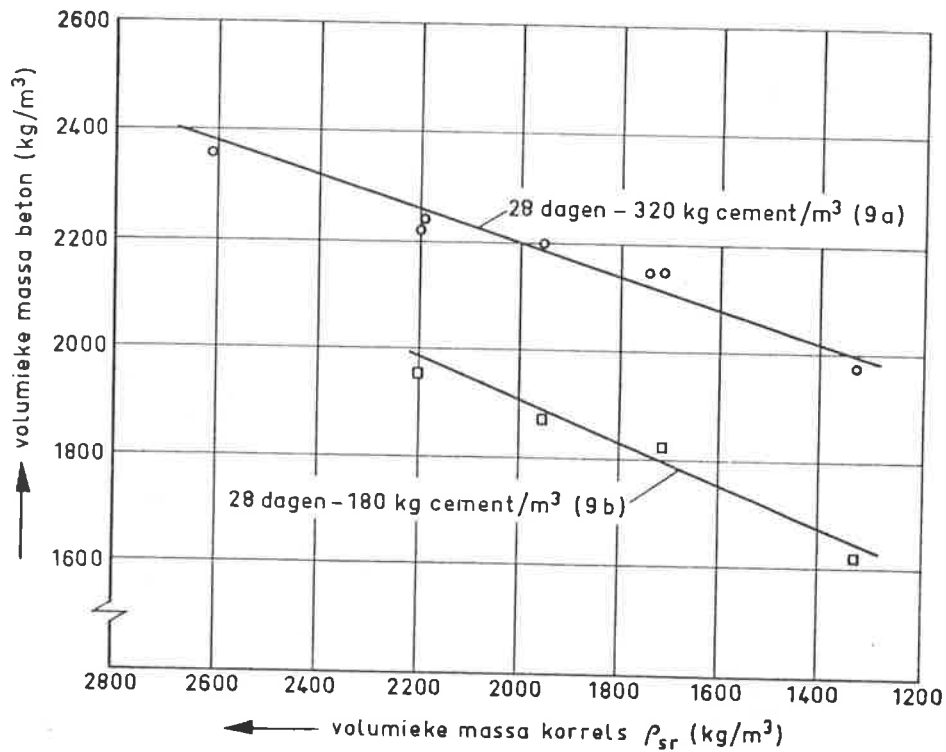


Fig. 11 Verband tussen de volumieke massa van de korrels ρ_{sr} en de volumieke massa van het beton (regressievergelijkingen 9a en 9b).

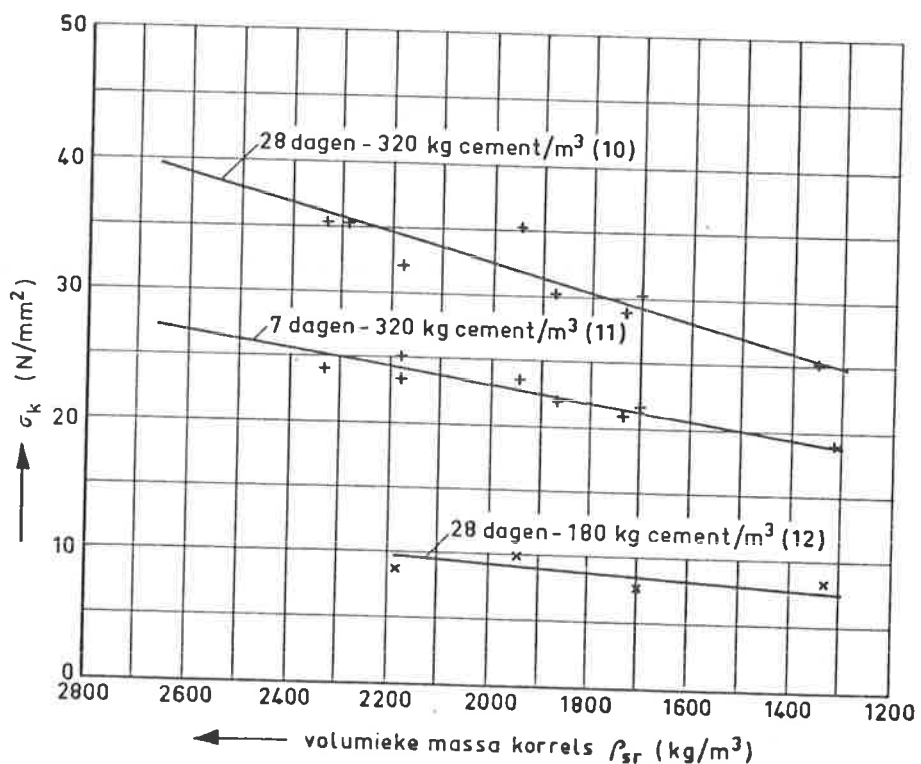


Fig. 12 Verband tussen de volumieke massa van de korrels ρ_{sr} en de druksterkte van het beton (regressievergelijkingen 10, 11 en 12).

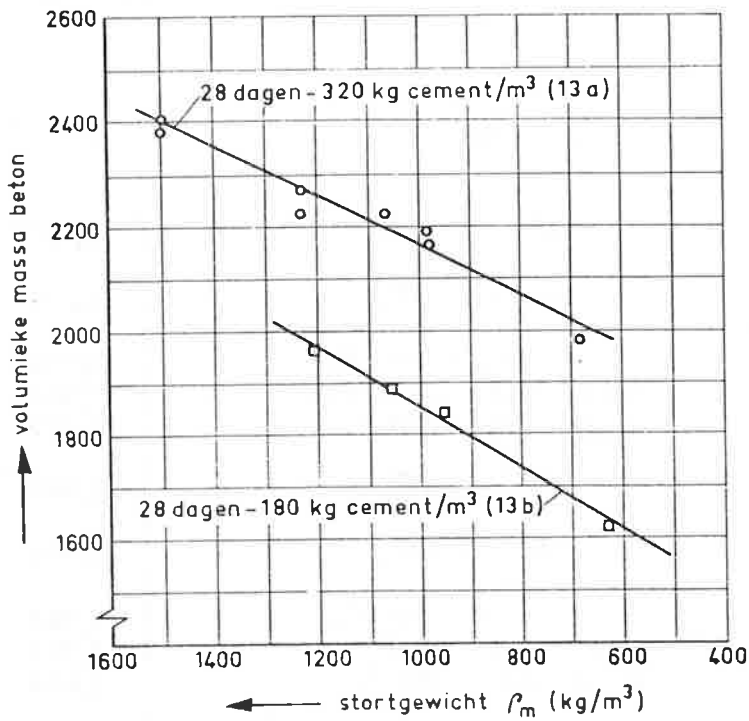


Fig. 13 Verband tussen het stortgewicht van de granulaten ρ_m en de volumieke massa van het beton (regressievergelijkingen 13a en 13b).

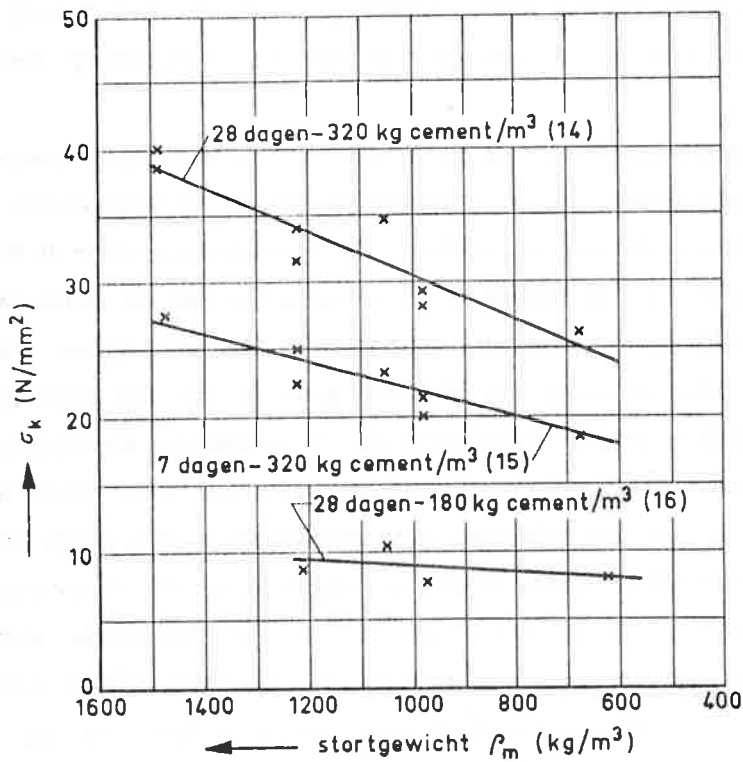


Fig. 14 Verband tussen het stortgewicht van de granulaten ρ_m en de druksterkte van het beton (regressievergelijkingen 14, 15 en 16).

Tabel 11 Regressievergelijkingen tussen betoneigenschappen en granulaateigenschappen

nr.	variabelen (y t.o.v. x)	vergelijking	n	r
9a	V t.o.v. P_{sr} 320 kg cement/m ³	$V = 1656 + 0,28 P_{sr}$	11	0,980
9b	V t.o.v. P_{sr} 180 kg cement/m ³	$V = 1102 + 0,41 P_{sr}$	4	0,979
10	σ_{k28} t.o.v. P_{sr}	$\sigma_{k28} = 14 + 0,0095 P_{sr}$	11	0,938
11	σ_{k7} t.o.v. P_{sr}	$\sigma_{k7} = 11,2 + 0,0062 P_{sr}$	11	0,958
12	σ_{t28} t.o.v. P_{sr}	$\sigma_{t28} = 2,0 + 0,006 P_{sr}$	8	0,659
13a	V t.o.v. P_m 320 kg cement/m ³	$V = 1695 + 0,46 P_m$	11	0,990
13b	V t.o.v. P_m 180 kg cement/m ³	$V = 1243 + 0,61 P_m$	4	0,999
14	σ_{k28} t.o.v. P_m	$\sigma_{k28} = 13,9 + 0,017 P_m$	11	0,942
15	σ_{k7} t.o.v. P_m	$\sigma_{k7} = 12,4 + 0,01 P_m$	11	0,963
16	σ_{t28} t.o.v. P_m	$\sigma_{t28} = 2,1 + 0,001 P_m$	8	0,659
V = volumieke massa beton (kg/m ³) σ_k = kubusdruksterkte beton (N/mm ²) σ_t = splijttreksterkte beton (N/mm ²)		P_{sr} = volumieke massa van de korrels (kg/m ³) P_m = stortgewicht granulaten (kg/m ³) r = correlatiecoëfficiënt		

praktijk bruikbare waarde geeft. Verder moet worden gesteld dat het gehalte aan asfaltbetongranulaat laag moet blijven, daar dit als een verontreiniging dient te worden beschouwd.

Voor de in dit hoofdstuk besproken mengsels geldt dat de hoogste sterkte waarden werden bereikt met grindbetongranulaat en kalkzandsteen metselwerkgranulaat, de laagste sterkte met betonsteen metselwerkgranulaat. De steekproefgrootte is echter slechts één per puingranulaatsoort. Bovendien is bij de selectie van de metselwerkpuingranulaten gebruik gemaakt van de laagste kwaliteit puin die verkrijgbaar was.

Zoals werd aangetoond, kan door bepaling van het stortgewicht van het betreffende granulaat direct een goede indruk worden verkregen van de te behalen sterkte, indien de korrelgroep 4-31,5 mm van zo'n granulaat als toeslagmateriaal voor beton wordt gebruikt. Wel dient rekening te worden gehouden met verhoogde krimp, zoals tabel 9 duidelijk aangeeft. Hier is geen eenvoudige afleiding mogelijk, omdat de krimp van veel meer factoren afhankelijk is, onder meer van de elasticiteitsmodulus van het granulaat die niet bekend is. De regel dat de krimp vooral afhankelijk is van het totaalwatergehalte, gaat bij deze granulaten niet meer op in verband met de soms

sterke absorptie. Een betere relatie is aanwezig met de effectieve watercementfactor; deze is echter ongeschikt om gebruikt te worden voor voorspellingen. Gezegd moet worden dat ten opzichte van het referentiebeton de uitdrogingskrimp toeneemt met:

- ca. 30 à 60% bij grindbetongranulaat;
 - ca. 20 à 60% bij baksteenmetselwerkgranulaat;
 - ca. 40% bij kalkzandsteenmetselwerkgranulaat;
 - ca. 40% bij betonsteenmetselwerkgranulaat.
- Gemiddeld is er dus een toeneming van ongeveer 40%.

Bij de in dit hoofdstuk beschreven proefnemingen met puingranulaten zijn de eigenschappen vergeleken met die van grindbeton. Daarbij blijkt dat onder de gegeven condities en afhankelijk van het soort puingranulaat en de vereiste betonsterkte, de cementbehoefte bij puingranulaat tot maximaal 20% hoger kan zijn dan bij grindbeton van overeenkomstige sterkte. Daarbij moet men zich realiseren dat algemeen gesproken de cement- (en water-) behoefte bij gebruik van hoekige granulaten groter zal zijn dan bij gebruik van ronde granulaten.

Anderzijds echter, worden met grindbeton veelal sterkten bereikt die niet benodigd zijn, hetgeen wordt veroorzaakt door eisen ten aanzien van de betonsamenstelling ten behoeve van de duurzaamheid. Door deze eisen is het bij voorbeeld praktisch niet mogelijk de kwaliteit B 12,5 en zelfs B 17,5 te vervaardigen.

Voorts moet erop worden gewezen dat bij dit onderzoek alleen de grove fractie is samengesteld uit puingranulaat. Onder meer op basis van buitenlands onderzoek (9) kan worden verwacht dat bij gelijktijdige vervanging van de grove en fijne fractie toeslagmateriaal in grindbeton de achteruitgang belangrijk groter zal zijn.

De vraag kan dan worden gesteld in hoeverre het graderingsgebied van de VB 1974 het meest ideale gebied is voor puingranulaatbeton.

In de Bondsrepubliek Duitsland heeft de eerste jaren na de tweede wereldoorlog een DIN-norm bestaan voor de toepassing van baksteenpuin in beton. (10)

Men onderscheidde daarbij dicht en poreus baksteenpuinbeton. De mengsels werden opgebouwd uit de fracties 0 - 4 (eventueel 0 - 8), 4 - 8, 8 - 16 en 16 - 32 mm. Voor dicht baksteenpuinbeton was het zeefkrommegebied smaller dan thans de VB 1974 aangeeft. De ondergrens van de VB zou een te stug beton opleveren, terwijl de bovengrens wegens de hoge cementbehoefte van het steenslag in de zandfractie ondoelmatig hoog is. Het gehalte aan sulfaat (gips) en aan vulstof in het puin werden aan maxima gebonden. In alle gevallen diende door geschiktheidsproeven te worden

aangetoond dat het mengsel voldeed aan de eisen. Dicht baksteenpuinbeton werd toegepast voor constructief gewapend en ongewapend beton, poreus baksteenpuinbeton voor isolerende wanden en lichtbeton.

Naast het door de commissie verrichte onderzoek is deze voormalige DIN-norm als een belangrijk hulpmiddel gebruikt bij het opstellen van voorlopige voorschriften, zie hoofdstuk 6.

Voorts is nagegaan in hoeverre betonsteen met puingranulaat als toeslag voldoet aan het gesteld in NEN 7027 "Bouwblokken en -stenen van beton". Daartoe werd op verzoek van de commissie door een betonwarenfabrikant een viertal series betonstenen gefabriceerd met respectievelijk grind, baksteenpuingranulaat (twee kwaliteiten) en betonpuingranulaat als grof toeslagmateriaal. Voor elk van de series werd 235 kg/m³ hoogovencement klasse A gebruikt.

Volgens de procedure, beschreven in NEN 7027, werd de krimp bepaald als verschil tussen de lengte na 4 dagen verblijf in water en de lengte na drogen bij 50 °C en 17% relatieve vochtigheid. Voorts werd bij een ouderdom van 50 dagen de druksterkte bepaald. De resultaten zijn vermeld in tabel 12.

Uit de resultaten blijkt dat de stenen voldoen aan de eisen voor klasse 30. Wel is, waarschijnlijk als gevolg van de aanwezigheid van cementbeton in de puingranulaten, de krimp van deze stenen hoger dan die van grindbetonstenen. Uit de druksterktere-sultaten blijkt dat vervanging van grind door puingranulaten niet noodzakelijkerwijs een hoger cementgehalte vereist.

Tabel 12 Resultaat onderzoek betonstenen

Grof toeslagmateriaal	krimp gemiddeld (0/00)	druksterkte		
		gemiddeld (N/mm ²)	standaardafwijking (N/mm ²)	karakteris- tieke waarde (N/mm ²)
grind	0,29	35,4	3,5	30,3
baksteenpuingr. 1	0,37	30,8	1,2	29,1
baksteenpuingr. 2	0,47	29,6	1,3	27,7
betonpuingranulaat	0,41	33,7	2,7	29,8
	(eis vol- gens NEN 7027:<0,6)	(eis volgens NEN 7027 klasse 30 voor de karakteristieke waarde: > 25,5)		

Voorts werd nagegaan of en in welke mate variaties in de kwaliteit van de in 1982 door verschillende producenten geleverde puingranulaten invloed uitoefenen op de sterkte van het hiermee vervaardigde beton.

Daartoe werd door een zevental betoncentrales op drie verschillende produktiedagen beton vervaardigd met grindbetonpuingranulaat als grof toeslagmateriaal. De herkomst van het grindbetonpuingranulaat verschilde per centrale. Het vervaardigde beton bevatte 375 kg/m^3 hoogovencement klasse A, de zetmaat diende ca. 100 mm te bedragen en de streefwaarde voor de druksterkte was B 37,5. De gemiddelde druksterkte per centrale bleek te variëren van 41,0 tot $50,6 \text{ N/mm}^2$.

Hierbij traden significante verschillen tussen de betoncentrales op. Er werden geen significante verschillen gevonden in de variaties per centrale. De standaardafwijking tussen de charges ($n = 3$) per centrale was gemiddeld $3,0 \text{ N/mm}^2$, hetgeen betekent dat de spreiding in de betonkwaliteit bij gebruik van betonpuingranulaat niet groter hoeft te zijn dan bij gebruik van grind. Bij 5 van de 7 combinaties centrale/soort puingranulaat voldeed de betonsterkte aan de eis voor B 37,5.

Bij een soortgelijk onderzoek met baksteenpuingranulaat werd beton vervaardigd door 3 fabrikanten van betonwaren. Hierbij werd 320 kg/m^3 hoogovencement klasse A toegepast. De zetmaat diende ca. 100 mm te bedragen. Er werd gestreefd naar een kwaliteit B 22,5.

Er werden per fabrikant geen significante verschillen aangetoond in de gemiddelde druksterkte van mengsels op drie produktiedagen bereid. De gemiddelde druksterkte per fabrikant varieerde van 24,9 tot $29,8 \text{ N/mm}^2$.

De standaardafwijking tussen de charges ($n = 3$) per centrale bedroeg gemiddeld $2,4 \text{ N/mm}^2$. Bij twee van de drie combinaties fabrikant/soort puingranulaat werd aan de druksterkte-eis voor B 22,5 voldaan. Ook ten aanzien van het baksteenpuingranulaat geldt dat de spreiding in betonkwaliteit niet groter hoeft te zijn dan bij gebruik van grind.

HOOFDSTUK 5 VOORTGEZET TECHNOLOGISCH ONDERZOEK

Het door de commissie B 29 verrichte betontechnologisch onderzoek heeft aangetoond dat, zij het onder bepaalde voorwaarden, toepassing van beton- en metselwerkpuingranulaten als toeslagmateriaal voor beton mogelijk is. Op hoofdpunten sluiten de resultaten aan bij eerdere, beperkt opgezette onderzoeken in het buitenland (9).

Verder onderzoek wordt noodzakelijk geacht naar kruip, krimp en langeduursterkte. Hierbij worden naar analogie van de methode beschreven in deel G van de VB 1974 (opgesteld voor lichtbeton) verhoudingsgetallen bepaald ten opzichte van grindbeton. Hierdoor kunnen bij constructieve berekeningen de gevolgen van het vervangen van zand en grind door puingranulaten worden bepaald. Dit onderzoek is thans gaande; resultaten mogen in 1984 worden verwacht. Tegelijkertijd wordt onderzoek uitgevoerd naar de vorstbestandheid, waterindringing en carbonatatie. Tevens wordt meer gedetailleerd ingegaan op de gevolgen van het vervangen van de zandfractie in beton door puingranulaat.

Ten slotte wil de commissie de resultaten in een aantal praktijkproeven toetsen.

Voor zover het de vorstbestandheid betreft, zijn er reeds proeven voltooid op betonprisma's die werden vervaardigd met betonpuingranulaat en baksteenmetselwerkpuingranulaat. Deze proefstukken werden verkregen bij een praktijkproef, waarbij het beton werd geleverd door een betonmortelcentrale ten behoeve van het storten van een aantal rijplaten.

De prisma's werden na 28 dagen verhard en aan een vriesproef onderworpen, waarbij het vorstfront vanaf één zijde op een kistvlak werd aangebracht.

Het ontdooien geschiedde met zoet water. Onderzocht werden beton met hoogovencement en betonpuingranulaat, beton met hoogovencement en baksteenmetselwerkpuingranulaat en beton met portlandcement en betonpuingranulaat. Als vergelijkingsbasis diende een beton met hoogovencement en grind. De vriesproef werd begonnen na "vrijwillige" verzadiging met water en na verzadiging bij half-vacuum.

Bij alle proeven bleek dat het beton met baksteenmetselwerkpuingranulaat ernstige schade vertoonde in de vorm van zwellen van de baksteenkorrels en het afdrukken van betonschilfers. Kennelijk was er sprake van het ijslensmechanisme. Daarbij ontstaat in de grotere holten (van de baksteenkorrels) ijsdruk, omdat deze grenzen aan fijnere poriën (van de cementsteen).

Het beton met betonpuingranulaat vertoonde zowel bij gebruik van portlandcement als van hoogovencement geen schade, ook niet bij de verzadiging in half-vacuum.

Buiten verwachting vertoonde het blanco beton vervaardigd met grind en hoogovencement ook schade, zij het in geringe mate.

Bovenstaande resultaten zullen aan het praktijkgedrag dienen te worden getoetst.

HOOFDSTUK 6 VOORLOPIGE VOORSCHRIFTEN

Op basis van de tot dusver verkregen resultaten heeft de commissie een voorlopige voorschriftentekst voor beton- en metselwerkpuin opgesteld ten behoeve van voorschriftencommissie 13 "Toeslagmaterialen". In dit concept zijn ook definities opgenomen van genoemde puinsoorten. De belangrijkste aspecten ten aanzien van het puin zijn opgenomen in tabel 13; voor metselwerkpuin is dit gedaan in tabel 14.

Naar het oordeel van de commissie garandeert het stellen van een minimale waarde aan de volumieke massa van de korrel van 2100 kg/m^3 dat betonpuingranulaat een voldoende kwaliteit heeft voor toepassing in alle betonsoorten ten aanzien van sterkte, waterindringing en vorstbestandheid. Overigens kan op basis van de hoofdstukken 3 en 4 ook bij puinsoorten met een lagere massa de te verwachten betonsterkte worden afgeleid. Voor veel onderdelen van het concept geldt dat de eventuele noodzaak tot nader onderzoek volgt uit de herkomst en visuele analyse van de puingranulaten.

Een punt van discussie is de vraag in hoeverre glas in verband met de alkali-aggregaatreactie kan worden toegelaten, hetzij als nevenbestanddeel, hetzij als verontreiniging.

Ten aanzien van organische verontreinigingen, zoals klei en carbonaat, beveelt de commissie aan dezelfde eisen te hanteren als bij zand en grind.

Veel nadruk legt de commissie op een frequente controle ten aanzien van de eis voor sulfaat, gelet op de mogelijke aanwezigheid van gipsresten in het puingranulaat. Ten aanzien van de gradering laat de commissie voorlopig twee mogelijkheden open. Indien alleen met de fracties 0 - 4 en 4 - 32 mm wordt gewerkt, wordt hetzelfde graderingsgebied voorgesteld als in de nieuwe concept-norm voor zand en grind. (12) Wordt evenwel in meerdere fracties gewerkt, dan verdient het smallere graderingsgebied, dat is afgeleid uit DIN 4163 (10), de voorkeur. Hierdoor wordt de verwerkbaarheid bevorderd en kan een lager cementgehalte worden toegepast.

Indien op basis van onderzoek aan de puingranulaten twijfel blijft bestaan omtrent de eventuele aanwezigheid van voor beton schadelijke bestanddelen, wordt een controle-onderzoek met betonkubussen aanbevolen.

Wat betreft het toepassingsgebied wordt opgemerkt dat het gebruik van betonpuin voorlopig wordt beperkt tot ongewapend en gewapend beton. In nader te bepalen gevallen zou betonpuin echter ook kunnen worden gebruikt voor voorgespannen beton,

bij voorbeeld als de herkomst van het materiaal bekend is en als door proeven is aangetoond dat het puin voor de betreffende toepassing geschikt is.

Tabel 13 Voorstel ontwerp-norm t.a.v. de hoofdaspecten van betonpuin (later uit te werken door de betreffende voorschriftencommissie)

- a. hoofdbestanddeel in % (m/m) - 90% betonpuingranulaat met droge volumieke korrelmassa $>2100 \text{ kg/m}^3$
- b. nevenbestanddeel - 10% steenachtige materialen genoemd onder b. in tabel 14
- c. korrelgroepen - 0-4, 4-8, 8-16, 4-32, 16-32 mm
- d. gradering - indien in fracties wordt gewerkt overeenkomstig (10) (smal gebied)
- indien niet in fracties wordt gewerkt overeenkomstig zand en grind (12)
- deeltjes $< 63 \mu\text{m}$, 0-4 $\leq 4\%$ (m/m), overige korrelgroepen $\leq 2\%$ (m/m)
- e. verontreinigingen - deeltjes $< 63 \mu\text{m}$, zachte bestanddelen, fijne stoffen van organische oorsprong, chloriden, sulfaten, carbonaten: eisen overeenkomstig zand en grind (12)
- bitumineuze materialen, kunststoffen vuurvast steen, metalen, hout en andere materialen totaal $< 1\%$ (m/m) en $< 0,1\%$ (V/V)
- f. vormvastheid - expansieverschijnselen, bestendigheid
- g. vlekvorming - ijzer- en vanadium verbindingen (vlekindex ≤ 20)
- h. vertragende c.q. sterkteverlagende bestanddelen - controle via proef van Vicat maximaal 15%
- geschiktheidsonderzoek verschil t.o.v. referentie
- i. kubiciteit - kubiciteitsindex $> 70\%$ m/m, gehalte platte stukken $\leq 30\%$ (m/m)
- j. vorstbestandheid - verwering $< 3\%$ (m/m)
- k. toepassingsgebied - ongewapend en gewapend beton

Tabel 14 Voorstel ontwerp-norm t.a.v. de hoofdaspecten van metselwerkpuin (later uit te werken door de betreffende voorschriftencommissie)

a. hoofdbestanddeel in % (m/m)	- $\geq 65\%$ gebroken materiaal, afkomstig van stenen en blokken vervaardigd van baksteen en/of cementbeton
b. nevenbestanddeel in % (m/m)	- kalkzandsteen ($\leq 20\%$), licht beton ($\leq 20\%$), gasbeton ($\leq 10\%$), keramische materialen ($\leq 20\%$), glas ($\leq \dots\%$)*, natuursteen ($\leq 20\%$), mortel ($\leq 25\%$)
c. korrelgroepen	} - conform betonpuingranulaat
d. gradering	
e. verontreinigingen	
f. vormvastheid	
g. vlekvorming	
h. vertragende c.q. sterkte verlagende bestanddelen	
i. kubiciteit	
j. vorstbestandheid	} - nader vast te stellen (o.a. op basis van de resultaten lange duuronderzoek)
k. toepassingsgebied	

* In afwachting van de resultaten van nader onderzoek naar het effect van glas uitsluitend in de grove fractie, wordt dit percentage op maximaal 5 gesteld.

Naast deze voorstellen zijn ook beproevingsvoorschriften uitgewerkt voor de bepaling van de kubiciteitsindex en de uitvoering van de visuele analyse.

HOOFDSTUK 7 ECONOMISCH ASPECT

Wat het economisch aspect betreft, wordt volstaan met een globale indicatie. Deze heeft betrekking op de orde van grootte, waarin de verwerkingskosten van het puin mogen blijven, uitgaande van de eis dat toepassing van afvalstoffen goedkoper moet zijn dan toepassing van natuurlijk zand of grind. In tabel 15 zijn de hoofdelementen voor de kostprijs van deze produkten weergegeven.

Tabel 15 Kostenfactoren bij toepassing van natuurlijke grondstoffen en van puingranulaten

<u>natuurlijke granulaten</u>	<u>hergebruik van puingranulaten</u>
concessiekosten f n₁	extra bewerking sloopplaats f s₁
produktiekosten f n₂ (inclusief tussenopslag)	stortkosten (negatief) f s₂
bulktransportkosten f n₃	transportkosten naar stort (negatief) f s₃
transportkosten naar bouw f n₄	transportkosten naar verwer- kingsfabriek f s₄
	verwerkingskosten f s₅
	transportkosten naar bouw- plaats f s₆
	extra kosten bereiding en verwerking f s₇
<hr style="width: 20%; margin: 0 auto;"/> f $\sum_{i=1}^i n_i$	<hr style="width: 20%; margin: 0 auto;"/> f $\sum_{i=1}^i s_i$
Eis $f \sum s_i \leq f \sum n_i$	

De extra bewerking op de sloopplaats in verband met de gewenste selectiviteit blijkt uit praktijkervaring ten hoogste 25% van de normale sloopkosten te bedragen.

De stortkosten s₂ zijn sterk regionaal bepaald, maar vertonen in alle gevallen een stijgende tendens. In 1982 varieerden de stortkosten tussen f 3,- en f 30,- per m³.

Ten aanzien van de extra verwerkingskosten bij toepassing als toeslagmateriaal voor beton moet voor de betonmortelcentrale worden gerekend op extra slijtage door de hoekigheid van het gebroken toeslagmateriaal, extra opslag, schoonmaken van de installatie bij wisseling van soort toeslag, kosten van de voorbevochtiging van het puin, extra controlekosten (partijkeuring of certificering) en extra administratiekosten door een zekere variëteit aan toeslagmaterialen.

Bij regelmatige verwisseling van toeslagmateriaal is voor een betonmortelcentrale het werken met gekleurde puingranulaten (zoals baksteenpuingranulaat) onpraktisch, gelet op de schoonmaakkosten van de installatie. Door de betonafnemer moet op extra verwerkingskosten worden gerekend ten aanzien van meer verdichtingsenergie (ten opzichte van ronde granulaten) en meer bedrijfscontrolekosten. Afhankelijk van de eigenschappen kan verwerking van puin in constructief opzicht extra kosten met zich meebrengen, indien extra dekking en/of meer cement nodig is en kruip en krimp hoger zijn, alles ten opzichte van grindbeton. Hiertegenover staan besparingen als gevolg van de lagere volumieke massa van het puin en (voor zover van belang) de sterkere isolerende werking en de betere brandwerendheid.

Op basis van het prijsniveau van 1982 en op grond van de resultaten van het betontechnologisch onderzoek (gelijke sterkte) is een vergelijking in kostenprijzen opgesteld tussen mengsels met grind, grindbetonpuingranulaat en metselwerkpuingranulaat. De transportkosten voor de verschillende mengsels werden daarbij gelijkgesteld. In tabel 16 zijn aansluitend de verschillkosten weergegeven.

Uit dit kostenoverzicht blijkt dat puingranulaatbeton nog niet concurrerend is ten opzichte van grindbeton, indien de stortkosten van puin buiten beschouwing worden gelaten. Hierbij moet, naast wat reeds eerder is gesteld over stortrechten, worden opgemerkt dat de huidige marktprijzen voor puingranulaat vooral zijn afgestemd op de markt voor wegfunderingsmaterialen. In 1982 werd bijna 2 miljoen ton bouw- en sloopafval omgewerkt tot puingranulaat voor ongebonden wegfunderingen. De prijzen per ton van deze materialen liggen aanzienlijk hoger dan die van grind. Gelet op de afnemende omvang van de behoefte aan wegfunderingsmaterialen en de stijgende produktie van puingranulaten mag worden aangenomen dat de afzet als toeslagmateriaal in de nabije toekomst van meer belang zal worden.

De aangegeven extra kosten zijn gebaseerd op een gemiddelde schatting van een aantal verwerkingsbedrijven van bouw- en sloopafval.

De conclusie luidt dat puingranulaatbeton thans economisch gezien niet voordelig is ten opzichte van grindbeton. Dit beeld kan zich in de naaste toekomst wijzigen; de ingevoerde extra kosten à f 12,-- spelen hierbij een belangrijke rol.

Tabel 16 Kostenvergelijking

1. grindbeton met 1080 kg grind à f 22,00/ton	<u>f 23,76/ton</u>
2. betonpuingranulaat beton	
- 900 kg betonpuingranulaat 4-32 mm à f 17,00/ton	f 15,30/ton
- 40 kg cement (extra t.o.v. 1) à f 125,00/ton	f 5,00/ton
- extra kosten (keuring, opslag, verkoop) à f 12,00/ton	<u>f 12,00/ton*</u>
	<u>f 32,30/ton</u>
3. baksteenpuingranulaat beton	
- 800 kg baksteenpuingranulaat 4-32 à f 17,00/ton	f 13,60/ton
- 40 kg cement (extra t.o.v. 1) à f 125,00/ton	f 5,00/ton
- extra kosten (keuring, opslag, verkoop) à f 12,00/ton	<u>f 12,00/ton*</u>
	<u>f 30,60/ton</u>
4. menggranulaat beton (beton + baksteen)	
- 850 kg puingranulaat 4-32 à f 17,00/ton	f 14,45/ton
- 40 kg cement (extra t.o.v. 1) à f 125,00/ton	f 5,00/ton
- extra kosten (keuring, opslag, verkoop) à f 12,00/ton	<u>f 12,00/ton*</u>
	<u>f 31,45/ton</u>

* dit bedrag werd mede ingevoerd omdat de meeste installaties nog niet op de verwerking van puingranulaten zijn ingespeeld; na een zekere ontwikkelingsfase lijkt het redelijk dit bedrag te herzien.

HOOFDSTUK 8 PRAKTIJKERVARING

Betonpuingranulaat en metselwerkpuingranulaat worden reeds enkele jaren op grote schaal toegepast als ongebonden steenfunderingsmaterialen 0 - 40 mm in wegfunderingen.

De vorstbestandheid van puingranulaatbeton werd getoetst door middel van de aanleg van proefvakken op een fietspad nabij Helmond.

Dit betrof een mengsel met 65% (V/V) betonpuingranulaat 3 - 30 mm, 35% (V/V) betonzand en 365 kg portlandcement A (wcf 0,47). Na 28 dagen werden kernen uit de verharding geboord (28-daagse druksterkte 43,9 N/mm²) die op vorst-dooizoutbestendigheid werden onderzocht. Na 40 cyclussen werd ten opzichte van grindbeton geen significant verschillend gewichtsverlies gevonden (gemiddeld 0,11 kg/m² voor betonpuingranulaatbeton en 0,13 kg/m² voor het referentie-grindbeton). Bij betonpuingranulaatbeton bestaat derhalve geen groter gevaar voor afschilfering aan het oppervlak onder invloed van vorst of dooizouten.

Bij een soortgelijke proef met metselwerkpuingranulaat werd evenwel een 8 maal zo groot gewichtsverlies gevonden vergeleken met grindbeton, hetgeen derhalve tot snellere aantasting van het oppervlak onder invloed van vorst-dooizoutinwerking zal leiden.

Op de vliegbasis Volkel bleek bij een praktijkproef dat 80% (m/m) betonpuingranulaat 0 - 40 mm met 20% (m/m) zand, ter plaatse gemengd met 80 kg/m³ hoogovencement, een 20% lagere druksterkte opleverde dan overeenkomstig schraalbeton (13).

In 1979 werden, als onderdeel van een werk in cementbeton op de vliegbasis Volkel, enkele proefvakken met betonpuingranulaat aangelegd (14).

De mengsels bestonden uit 85-90% (V/V) betonpuingranulaat 0 - 31,5 mm en 10-15% (V/V) betonzand met 350 kg/m³ portlandcement A, terwijl als hulpstof een superplastificeerder werd toegevoegd. De consistentie was overeenkomstig die van vloeibeton. Door de hoekige toeslag bleek het mengsel als vloeibeton moeilijk verwerkbaar, hetgeen een aanwijzing is om te kiezen voor een consistentie van ten hoogste halfplastisch. De 28-daagse druksterkte van de proefvakken betonpuingranulaatbeton met resp. 10 en 15% (V/V) betonzand was 20% c.q. 10% lager dan het referentiegrindbeton (waarvan de 28-daagse druksterkte ongeveer 45 N/mm² bedroeg).

In 1981 werd bij de aanleg van een rolbaan en een platform op de luchthaven Zuid-Limburg eveneens betonpuingranulaatbeton gebruikt. Het betonpuin was afkomstig

van opengebroken "dispersals" op de luchthaven en werd ter plaatse met een mobiele brekerinstallatie verkleind en afgezeefd in de fracties 0 - 15 mm en 15 - 30 mm. Volgens het bestek werd een kwaliteit B 37,5 geëist bij een maximale water-cementfactor van 0,43 en een minimum cementgehalte van 350 kg/m³. Ook was een superplastificeerder voorgeschreven en diende de consistentie ten hoogste halfplastisch te zijn.

Aan de eisen kon ruimschoots worden voldaan met een betonmengsel dat 15-25% (V/V) betonzand, 40-60% (V/V) betonpuingranulaat 0 - 15 mm en 25-35% (V/V) betonpuingranulaat 15 - 30 mm bevatte met 380 kg/m³ portlandcement A (en een superplastificeerder).

Bij maximale verdichting werd met dit mengsel zelfs de kwaliteit B 45 gehaald. (15)

Ook onder de directe verantwoordelijkheid van de commissie worden praktijkexperimenten verricht. Een eerste kleine proefneming werd uitgevoerd in 1982 in het kader van de metro-aanleg te Rotterdam. De eerste resultaten zijn analoog aan bovengenoemde ervaringen. In een later stadium zal hierover worden gerapporteerd.

Door de praktijkresultaten wordt bevestigd wat op basis van het betontechnologisch laboratoriumonderzoek mocht worden verwacht; betonpuingranulaat is bruikbaar als toeslagmateriaal voor beton.

In verband met de porositeit is het noodzakelijk het materiaal vooraf te bevochtigen. Bij de mengsamenstelling moet men rekening houden met het feit dat de volumieke massa van de korrels van het puingranulaat afneemt met het kleiner worden korrelafmeting; in de fijnere fracties bevindt zich relatief meer (lichter) cementbeton, in de grovere fracties relatief meer (zwaarder) toeslagmateriaal. De cementbehoefte is over het algemeen hoger (20-60 kg/m³) dan bij grindbeton van dezelfde sterkte.

Voor metselwerkpuingranulaten gelden analoge conclusies, waarbij de vorst-dooizoutbestendigheid nadere aandacht behoeft.

Met name voor de hogere betonkwaliteiten moet worden aanbevolen een maximaal toelaatbare water-cementfactor en een minimaal toelaatbaar cementgehalte voor te schrijven. Daarmee wordt voorkomen dat te natte mengsels worden verwerkt die kunnen ontmengen, waardoor de kwaliteit van de toplaag vermindert en daarmee de slijtweerstand. Om dezelfde reden is aan te bevelen dat de consistentie van het beton ten hoogste halfplastisch is. Om aan het bovenstaande te voldoen en er voor te zorgen

dat het mengsel goed verwerkbaar is, wordt het gebruik van een superplastificeerder aangeraden.

Het betonpuingranulaatbeton kan met het gebruikelijke materieel worden verwerkt.

De verdichting die machinaal moet worden uitgevoerd, vereist iets meer energie dan bij gebruik van ronde toeslagmaterialen zoals grind.

Voor gebruik van puingranulaten ten behoeve van betonconstructies moeten met name de resultaten van het thans lopende langeduur-sterkte-onderzoek worden afgewacht.

HOOFDSTUK 9 BUITENLANDSE ERVARINGEN

9.1 Inleiding

In diverse andere landen is de afgelopen jaren eveneens onderzoek uitgevoerd naar de toepassing van puingranulaten in beton. In dit hoofdstuk wordt hierop per land verder ingegaan.

9.2 Belgisch onderzoek (6, 16 en 18)

Met grindbetongranulaten afkomstig van 30 verschillende 15 jaar oude betonsoorten, waarvan samenstelling en sterktypen bekend waren, werd kringloopbeton vervaardigd met 350 kg portlandcement, 1250 kg granulaat (2-40 mm), 600 kg Rijnzand (0-2 mm) per m³ beton en een water-cementfactor 0,57 (6). Er blijkt een vrij goed verband te bestaan tussen σ_{k28} van het kringloopbeton en de σ_{k28} van het oorspronkelijke beton het zgn. "moederbeton", indien dit met portlandcement was vervaardigd.

De 28-daagse sterkte van het kringloopbeton bleek bij toepassing van portlandcement in het moederbeton veel lager dan de sterkte van het moederbeton op het ogenblik juist voor de sloop. De terugval bedraagt ongeveer 10% bij een sterkte van het moederbeton $\sigma_{moeder} = 40 \text{ N/mm}^2$ tot ca. 35% bij $\sigma_{moeder} = 70 \text{ N/mm}^2$. Tussen deze grenzen neemt de sterktereductie van het kringloopbeton ongeveer lineair toe met de toename van σ_{moeder} . Bij toepassing van hoogovencement bleek σ_{moeder} (variërend van 30-70 N/mm²) nauwelijks van invloed te zijn op de σ_{k28} van het kringloopbeton (35-38 N/mm²).

Aanwezigheid in het moederbeton van slakkenzand of kalksteenzand en -grind leveren bij toepassing van hoogovencement een hogere σ_{k28} op van het kringloopbeton, terwijl bij gebruik van portlandcement juist een lagere σ_{k28} van het kringloopbeton werd behaald (t.o.v. de hiervoor genoemde correlatie).

Indien de bron van grindbetongranulaat dus bekend is, kan hiermee rekening worden gehouden ten aanzien van het met zo'n granulaat te vervaardigen kringloopbeton. Te slopen beton met hoge druksterkte en vervaardigd met portlandcement geeft grindbetongranulaten waarmee kringloopbeton van de hoogste sterkte kan worden bereikt.

In (18) wordt bericht over onderzoek aan kringloopbeton waarin kunstmatige verontreinigingen werden aangebracht. Enerzijds is daarbij uitgegaan van

grindbetonpuin samen met natuurzand, anderzijds met puingranulaat als zandfractie. Als verontreinigingen werden ingebracht (uitgedrukt in m/m ten opzichte van het totaal aan toeslag):

- . 0,2 , 1 en 5% fijn gips (deeltjes tot 10 mm)
- . 1, 5 en 10% grof gips (deeltjes tot 20 mm)
- . 1, 5 en 10% baksteen
- . 1 en 5% kalkmortel

Alle samenstellingen hebben hetzelfde cementgehalte en dezelfde water-cementfactor als die van het referentiebeton, zodat de consistentie van de mengsels duidelijk verschilde. Een toenemende concentratie verontreiniging leidt tot afname van de consistentie.

Toename van de gipsverontreiniging gaf een duidelijke sterktereductie ten opzichte van de referentiesamenstelling (zie fig. 15).

De auteurs geven tevens de volgens hun toelaatbare percentages verontreinigingen aan. Deze percentages zijn gebaseerd op die hoeveelheid verontreiniging die ten opzichte van de referentiesamenstelling een sterktereductie geeft van 15%.

Ten slotte werden nog gewapende betonbalken (doorsnede 0,16 x 0,40 m, overspanning 4,12 m) beproefd op buigbelasting. Hieruit bleek dat ten opzichte van referentiebeton (zand en grind als toeslag) alleen vervanging van grind door grindbetonpuingranulaat leidt tot een 4,2% grotere doorbuiging, terwijl vervanging van zowel zand als grind door grindbetonpuingranulaat leidt tot een 16% grotere doorbuiging.

9.3 Duits onderzoek (10, 16, 19, 20)

Reeds eerder werd gewezen op het vele werk dat in West-Duitsland na de tweede wereldoorlog op dit gebied werd gedaan en waarbij DIN 4163 (10) werd gehanteerd ten aanzien van het gebruik van baksteenmetselwerkgranulaten voor beton met dichte en met open structuur (korrelbeton).

Genoemde norm stelt bij voorbeeld een limietwaarde aan sulfaat van 1% m/m ten opzichte van het totaal aan toeslagmateriaal (berekend als SO₃), zoals dat overigens ook staat in de Nederlandse norm NEN 3542 "Zand en grind voor gewapend beton en voorgespannen beton". Ook werden in DIN 4163 aanbevelingen voor graderingsgebieden gegeven. Overigens zal tegenwoordig een korrelverdeling op basis van lichte toeslagstoffen dienen te worden gevolgd,

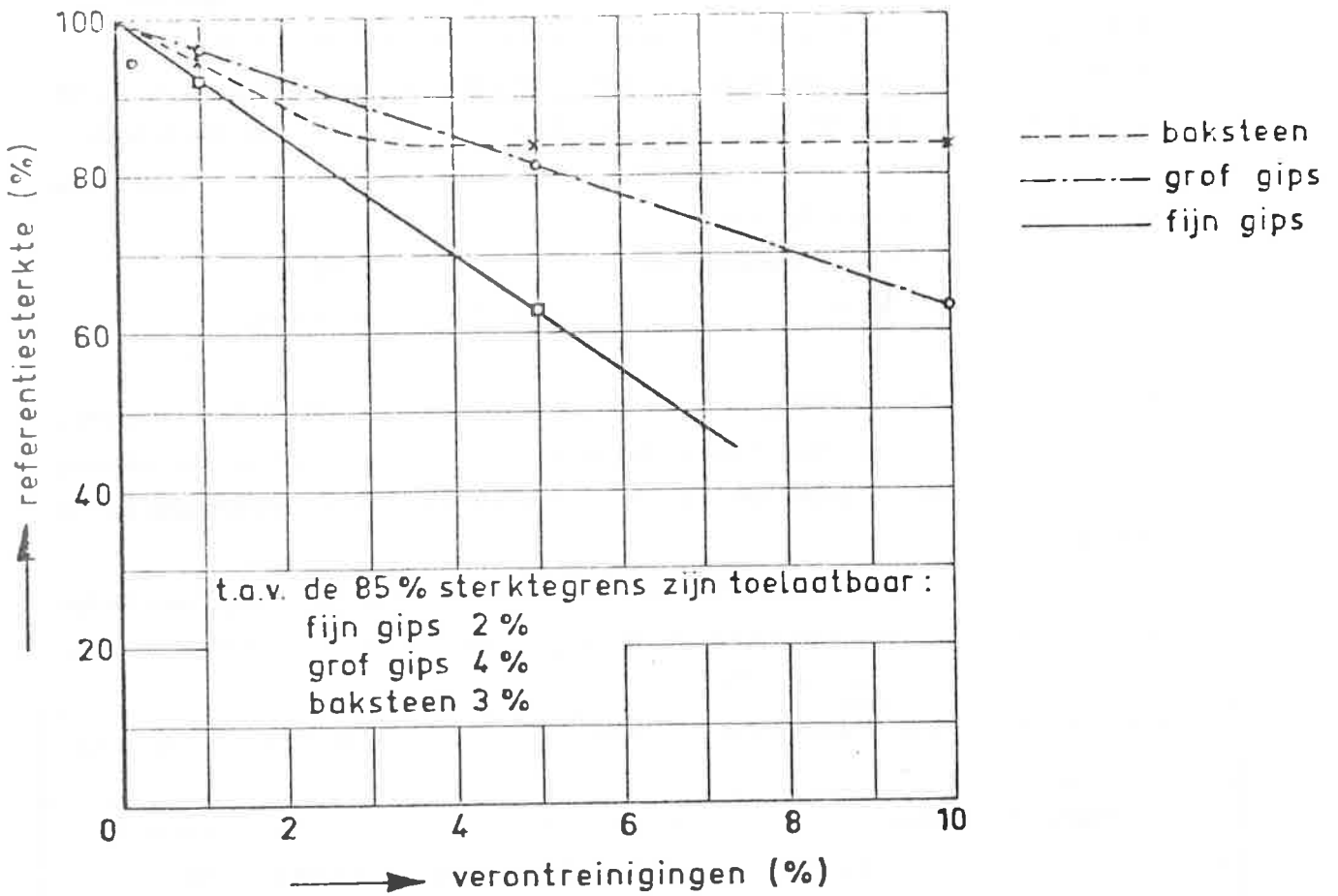


Fig. 15 Invloed van verontreinigingen op de sterkte (18).

waarbij wordt uitgegaan van de volumieke massa van de korrels. Voorts wordt gewezen op het voormengen van het granulaat met een deel van het mengwater in verband met de absorptie en het goede nabehandelen vooral bij korrelbeton.

Uit (19) worden enige figuren overgenomen die een indruk geven van de te behalen sterktecijfers met baksteengranulaat (zie fig. 16) en de invloed van de baksteenkwaliteit (zie fig. 17) die wordt aangegeven door middel van een "Zertrümmerungsgrad".

Ten slotte kan nog worden gewezen (19) op de lagere warmtegeleidingscoëfficiënt (λ) van beton met baksteenpuingranulaat, namelijk 0,76 W/mK bij beton met 1630 kg/m³ baksteengranulaat en 4,5% vochtgehalte ten opzichte van 1,74 W/mK voor het referentiegrindbeton. Voor korrelbeton werd een elasticiteitsmodulus gevonden van ca. 4000 N/mm², een krimp van 0,2 à 0,3 0/00 en een λ -waarde die samenhangt met de korrelgrootte:

korrelbeton met korrelgrootte	3-7	7-15	15-30 mm
geeft een λ van	0,44	0,58	0,67 W/mK

Korrelbeton, in tegenstelling tot baksteengranulaatbeton met dichte structuur, zou echter niet vorstbestand zijn. Dit beton mag daarom niet te nat worden, reden waarom wordt aanbevolen aan de buitenzijde een goede pleisterlaag aan te brengen.

Een recent Duits onderzoek (20) betreft deformatie (kruip, krimp) van beton vervaardigd met betonpuingranulaat, afkomstig van 3 jaar oude betonproefstukken met de volgende samenstellingen.

cement : toeslag : wcf	cementsoort	toeslag	zeeflijn	$\sigma_{k70-100d}$
massaverhouding		4 mm	4 mm	N/mm ²
1 : 5,50 : 0,45	PZ35F	Rijnzand	Rijngrind	A32/B32 50
1 : 6,03 : 0,45	PZ35F	Rijnzand	basaltsplit	A32/B32 60

De eigenschappen van het betonpuingranulaat zijn gegeven in tabel 17. In deze tabel zijn ook gegevens opgenomen over hiermee vervaardigd beton (na 7 dagen vochtig bewaren en verder bij 20 °C/65% R.V. tot de beproevingen).

Zowel de krimp- als kruipontwikkelingen in de tijd bleken goed door exponentiële functies te kunnen worden benaderd.

Het blijkt dat de kringloopbetonsamenstellingen na 28 dagen een ca. 10 à 20% lagere sterkte en elasticiteitsmodulus hebben dan het referentiebeton. De

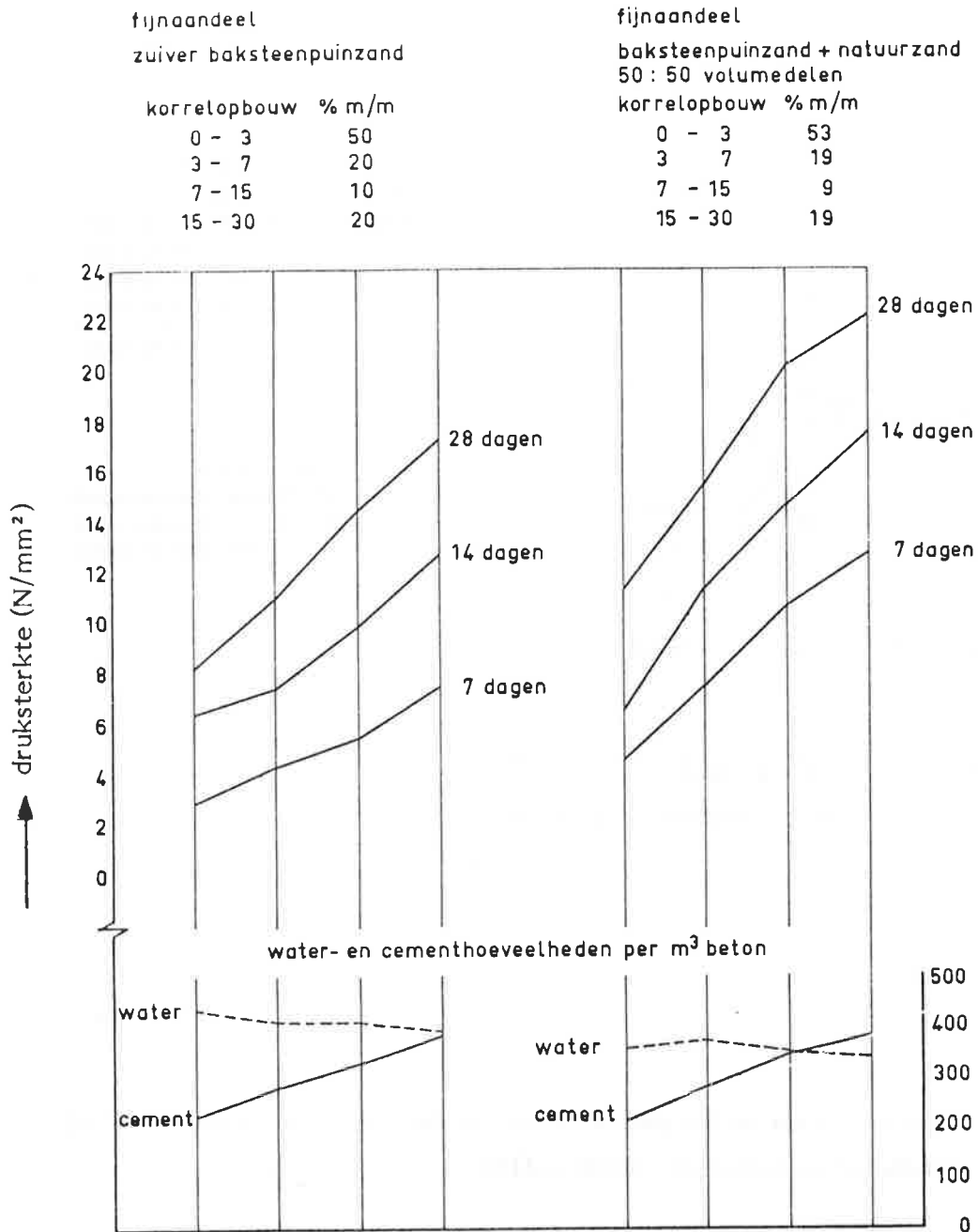


Fig. 16 Verband tussen respectievelijk de water- en de cementhoeveelheid en de druksterkte van baksteenpuinbeton.
Baksteensoort: "Vormauerziegel VMZ 150" en lagere kwaliteiten (19).

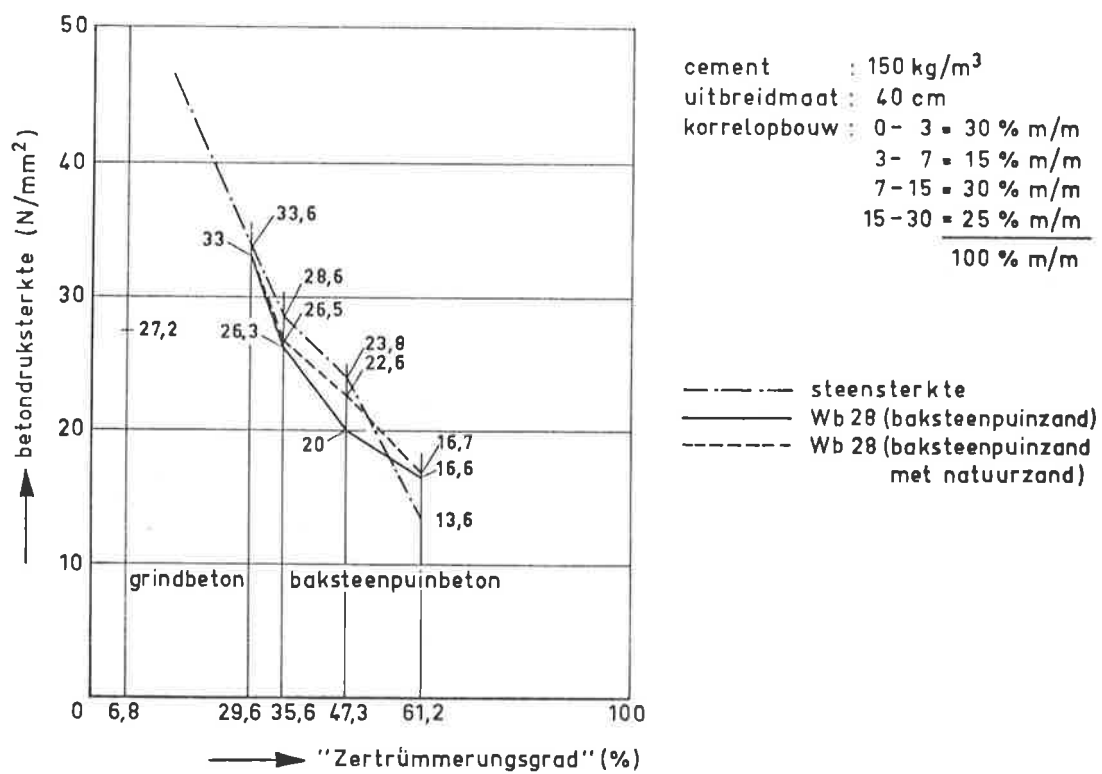


Fig. 17 Verband tussen de betondruksterkte en de "Zertrümmerungsgrad" bij grindbeton en baksteenpuinbeton (19).

uitdrogingskrimp is na 100 dagen ca. 40% hoger. De kruip is na 100 dagen belasting op een spanningswaarde $1/3 \sigma_{k28}$ ongeveer 45% hoger dan bij het referentiebeton.

Tabel 17 Eigenschappen van betonpuingranulaten en hiermee vervaardigd beton

	referentiebeton met		kringloopbeton met	
	grind	basaltsplit	grindbeton- puingrunulaat	basaltsplitbeton- puingrunulaat
Samenstelling				
vol. massa van de korrels 4-8 mm (kg/m ³)	-	-	2306	2591
vol. massa van de korrels 8-16 mm (kg/m ³)	-	-	2330	2660
vol. massa van de korrels A16-B16 (kg/m ³)	-	-	2455	2623
30 min. waterabsorptie 4-8 mm (% m/m)	-	-	4,5	3,9
30 min. waterabsorptie 8-16 mm (% m/m)	-	-	3,9	3,4
waterabsorptie A16-B16 (% m/m)	-	-	2,1	2,0
<hr/>				
cementsoort	PZ35F	PZ35F	PZ35F	PZ35F
toeslag/cement (m/m)	5,10	5,48	4,82	5,13
wcf-effectief	0,45	0,45	0,45	0,45
zetmaat (mm)	15	6	13	12
verdichtingsmaat	1,17	1,27	1,18	1,24
<hr/>				
Eigenschappen				
σ_{k28} (N/mm ²)	52,0	67,4	48,9	52,8
(%)	100	100	94	78
$E_{stat\ 28}$ (N/mm ²)	34100	38900	27700	32900
(%)	100	100	81	85
$E_{dyn\ 28}$ (N/mm ²)	43900	49500	37700	40700
(%)	100	100	86	82
$\epsilon_{kr\ 100}$ (0/00)	0,12	0,10	0,14	0,14
(%)	100	100	117	140
Specifieke kruip na 100 dagen belasting t.o.v. 28 dagen belasting (belasting na 28 dagen op $1/3 \sigma_{k28}$)	60	58	90	82
(%)	100	100	140	141

9.4 Engels onderzoek (6, 16, 21, 22)

Ook in Engeland werd, zij het op veel minder grote schaal dan in Duitsland, na de tweede wereldoorlog gebruik gemaakt van uit gesloopte constructies afkomstig puin voor hergebruik als granulaat.

Dit betrof vooral overtollig geworden defensie-objecten, voornamelijk baksteen-constructies. Deze waren praktisch nooit gepleisterd zodat gipsverontreiniging hier nauwelijks een rol speelde, dit in tegenstelling tot het bouw- en sloopafval van woningen en gebouwen.

In (21) worden onderzoekresultaten vermeld betreffende beton, vervaardigd met metselwerkpuingranulaten afkomstig van zulke defensie-objecten, waarbij het SO₃-gehalte varieerde van 0,1-1,1% (m/m ten opzichte van de totale toeslag). Voorzichtigheidshalve werd toch aanbevolen de granulaten te gebruiken voor beton en mortel dat in droge condities wordt toegepast. Voor buitenwanden wordt een bepleistering aanbevolen.

Toepassingen zijn steen of blokken voor binnenwanden (ook als korrelbeton), vloeren, schoorsteenblokken en brandbescherming van onderdelen van staalconstructies.

In tabel 18 zijn enige resultaten uit genoemd onderzoek samengebracht.

Uit het onderzoek bleek:

- Na breken van het baksteenmetselwerk en zeven werd een heel redelijke korrelverdeling gevonden, zowel van het fijne granulaat (<4,76 mm) als van het grove granulaat (4,76-19 mm).
- De gevonden betondruksterkte is voldoende voor de meeste toepassingen met 1:2:4 (V/V)-samenstellingen. In de regel is de druksterkte zelfs iets hoger dan die van 1:2:4-beton met zand en grind.
- De volumieke massa van het baksteenbeton is lager dan die van grindbeton; de waarde stijgt bij vervangen van fijn baksteengranulaat door zand. De lagere volumieke massa is het gevolg van de porositeit van het granulaat, zodat het vochtgevoeliger zal zijn. Bij blootstelling aan vocht wordt daarom een goede bepleistering aanbevolen.
- De warmte-isolerende eigenschappen zijn aanmerkelijk beter dan die van normaal beton. Zijn deze eigenschappen van belang, dan dient zoveel mogelijk granulaat in de samenstelling te worden opgenomen.
- De brandweerstand van beton met baksteenmetselwerkgranulaat is aanmerkelijk hoger dan die van zand-grindbeton. Zo werd bij voorbeeld gevonden dat bij verhitten tot:

400 °C	600 °C en	800 °C,	na afkoelen het sterkteverlies bedroeg:
34%	77%	100%	- voor zand/grindbeton
6%	22%	< 50%	- voor baksteenmetselwerkbeton

Dit bleek ook uit brandwerendheidsbepalingen volgens BS 476 op samengestelde kolommen met een doorsnede van 0,20 x 0,15 m drsn. Op het staalprofiel was een

Tabel 18 Enige eigenschappen van beton en mortel vervaardigd met baksteenmet-
selwerkpuin als toeslag

Samenstelling in volumedelen	28 dagen verhardend						n (aantal soorten)	
	in water van 18 °C			bij 18 °C /65% R.V.				
cement: toeslag:toeslag fijn grof	σ_{k28}^*	s	vol. massa	σ_{k28}^*	s	vol. massa		
b = baksteen z = zand g = grind	(N/mm ²)		(kg/m ³)	(N/mm ²)		(kg/m ³)		
1 : 2b : 4b	32,8	5,9	2109	29,1	6,3	1984	8	
1 : 2z : 4b	31,5	4,5	2212	34,4	4,7	2129	8	
1 : 2z : 4g	30,8	-	2403	29,6	-	2323	1	
1 : 1,5b : 3b	27,7	4,9	2055	31,0	4,5	1933	3	
1 : 1,5z : 3b	29,9	5,7	2173	34,8	3,5	2087	3	
1 : 2b : 4b	23,2	3,5	2030	27,6	4,6	1911	3	
1 : 2z : 4b	26,7	3,0	2167	28,1	1,7	1078	3	
1 : 2,5b : 7b	14,2	1,1	1991	16,0	0,7	1842	3	
1 : 2,5z : 7b	15,1	1,4	2103	17,3	1,2	1986	3	
mortels cement: kalk: toeslag fijn				σ_{k28}^{**}	s	σ_{k28}^{***}		
				(N/mm ²)		(N/mm ²)		
1 : 0 : 3b				24,4	0,4	2,5	0,04	8
1 : 0 : 3z				29,8	-	2,5	-	1
1 : 1 : 6b				11,6	2,3	1,6	0,3	3
1 : 1 : 6z				9,6	-	1,2	-	1
1 : 2 : 9b				5,5	0,2	1,0	0,1	3
1 : 2 : 9z				3,9	-	0,9	-	1
cement: toeslag:toeslag fijn grof (b1 t.m. b4 = 4 baksteensoorten)	vol. massa (kg/m ³)		watergehalte (% m/m)		warmtegeleidings coëff. (W/mK)			
1 : 2b1 : 4b1	1682		6,3		0,86			
1 : 2b3 : 4b3	2163		1,8		0,94			
1 : 2b4 : 4b4	1762		3,2		0,72			
1 : 2z : 4b1	1922		4,4		1,15			
1 : 2z : 4b2	2082		3,9		1,44			
1 : 2z : 4b3	2243		2,1		1,30			
1 : 2z : 4b4	1954		2,4		1,08			
1 : 0 : 6b3	1842		1,9		0,75			
1 : 0 : 6b4	1570		2,7		0,65			

* druksterkte bepaald op kuben 100 x 100 x 100 mm³

** druksterkte bepaald op kuben 71 x 71 x 71 mm³

*** treksterkte bepaald op achthoekige proefstukken

dekking aangebracht van 50 mm 1:2:4 beton. De brandwerendheid bedroeg bij toepassing van beton met baksteenmetselwerkgranulaat 246 minuten en bij normaal beton 210 minuten.

Ten aanzien van gewapend betonvloerplaten met een dikte van 90 mm waren de brandtijden respectievelijk 120 en 31 minuten. Dit betere brandgedrag bleek ook in de praktijk bij oudere gebouwen in Londen, waar zulke vloeren waren toegepast.

De mortelsterkte bij gebruik van baksteengranulaat was meestal hoger dan bij gebruik van zand; zo'n mortel wordt echter niet voor buitenwerk aanbevolen, maar alleen daar waar droge condities aanwezig zijn.

Ook tegenwoordig begint in Engeland weer belangstelling te komen voor de mogelijkheden om vooral gebroken beton als grindbetongranulaat te gebruiken in kringloopbeton (6, 22). Genoemde literatuur geeft echter voornamelijk resultaten van Amerikaans en Canadees onderzoek.

9.5 Japans onderzoek (16, 23)

In Japan werd kort na de oliecrisis van 1973 een commissie opgericht "Research on disposal and reuse of construction materials" die uitgebreid onderzoek verrichtte met voornamelijk grindbetonpuingranulaten en hierover onder andere publiceerde in (23). Hierbij werd gebruik gemaakt van (fijn + grof) gebroken beton als toeslag (type 3), zand + grof gebroken beton als toeslag (type 1) en een mengsel van (zand + fijn gebroken beton) als fijne toeslag met grof gebroken beton (type 2).

Het gebroken beton wordt onderscheiden in type A (van vooraf in het laboratorium vervaardigde beton, $\sigma_{k28} = 37,5, 28,9$ en $22,0$ N/mm²) en type B (afkomstig van 23, 45 en 50 jaar oude betonconstructies).

De verhouding fijn:grof van het betonpuin na breken bleek steeds 3:7 te zijn, terwijl het totale granulaat type B ca. 4% (m/m) verontreinigingen bleek te bevatten (graniet, baksteen, gips, pleister, houtsplinters, glas, tegelsplinters, keramiek, kunststoffen, papier en metaal).

Tabel 19 geeft de eigenschappen van de granulaten, waaruit blijkt, dat weinig verschil bestaat tussen de type A en B; alleen de spreiding bij type B was groter.

Ten opzichte van zand/grind betonspecie (referentiebeton) van dezelfde samenstelling bleken bij hogere zetmaat (ca. 200 mm; 190 l water/m³ referentie) de

typen 1, 2 en 3 respectievelijk 7, 14 en 24 l/m³ meer water nodig te hebben voor gelijke zetmaat.

Bij lage zetmaat vond men geen verschillen.

Tabel 19 Eigenschappen van granulaten afkomstig van grindbeton

Eigenschappen	fijne toeslag			grove toeslag		
	granulaat		zand	granulaat		grind
	A	B		A	B	
- soortelijke massa (kg/m ³)	2060	2060	2510	2310	2290	2590
variatiecoëff. (kg/m ³)	1,0	3,1		0,4	2,8	
- absorptie (% m/m)	11,5	10,5	2,0	6,4	6,0	99
variatiecoëff. (% m/m)	3,6	18,9		3,2	18,9	
- stortgewicht (kg/m ³)	1310	1280	1670	1310	1370	1650
variatiecoëff. (kg/m ³)	1,3	4,1		1,3	3,4	

Bij de typen 2 en 3 gebruikte men 1% respectievelijk 3% meer fijne toeslag dan voor type 1. Het luchtgehalte van de specie was nauwelijks groter dan die van het referentiebeton na een correctie voor fijne toeslag; zonder deze correctie bleek het luchtgehalte wel hoger (type 1: 4%, type 3: 6%).

Wat de eigenschappen van verhard beton betreft, wordt geconcludeerd:

- Bij de drie typen treedt een significant verschil in druksterkte (σ_{k28}) op. Type 1 heeft gemiddeld een sterkte die 3,0 N/mm² respectievelijk 6,0 N/mm² hoger is dan bij de typen 2 en 3.

In procenten bleek ten opzichte van het referentiebeton (= 100% met spreiding 80-120%) voor σ_k te gelden:

voor type 1: 85% (62-110%)

voor type 2: 75% (60-96%)

voor type 3: 70% (55-96%)

De variatie in betondruksterkte van kringloopbeton bleek niet hoger te zijn dan die van het referentiebeton.

- De elasticiteitsmodulus bleek bij gebruik van toeslag van type 1 gemiddeld 24000 N/mm² en voor type 3 gemiddeld 20000 N/mm² te bedragen. Deze elasticiteitsmoduli zijn ongeveer 70 à 80% van de waarden gevonden bij het referentiebeton.
- De treksterkte bij gebruik van type 1 granulaat, bleek slechts 2 à 3% lager te liggen dan die van het referentiebeton; voor de typen 2 en 3 wordt een duidelijk lagere treksterkte gevonden (ca. 15%).
- De hechtsterkte van wapening aan beton lag voor typen 1, 2 en 3 respectievelijk 5%, 15% en 20% lager dan die van het referentiebeton.
- Voor de verhardingskrimp wordt bij gebruik van granulaat van de typen 1 en 3 respectievelijk gevonden 0,8 à 1,0 0/00 en 1,1 à 1,2 0/00 ten opzichte van 0,7 0/00 van het referentiebeton; met andere woorden de verhardingskrimp is bij de typen 1 en 3 ca. 30-60% hoger.
- Bij lage water-cementfactor bleek de carbonatatie diepte van beton met granulaten nagenoeg hetzelfde te zijn als bij het referentiebeton. Bij hogere water-cementfactor nam deze diepte echter aanmerkelijk toe ten opzichte van het referentiebeton.
De weerstand tegen vorstaantasting bleek praktisch gelijk te zijn aan die van het referentiebeton.
- Stoomverharding bleek bij gebruik van granulaat van het typen 1 en 2 tot ongeveer dezelfde sterkte te leiden als bij het referentiebeton; toeslag van het type 3 geeft wel een duidelijke verlaging. Er werd geen krimp-reductie door stoomverharding gevonden bij dit onderzoek. Wel bleek de krimp van kringloopbeton 1,5 - 2,5 maal groter te zijn dan die van het referentiebeton, hoewel die absoluut gezien toch laag lag.
- De invloed van verontreiniging werd vastgesteld. Hierbij bleek dat de volgorde van de verontreinigingen op de sterktevermindering was.
Polyvinylacetaat - verf - asfalt - gips - hout - grond - pleister. Het maximum van deze verontreinigingen dat toelaatbaar is met betrekking tot 15% sterkte-

verlaging ten opzichte van het referentiebeton, bedroeg (in vol. % van het toeslagmateriaal):

pleister	7%
grond	5%
hout (cypres)	4%
gips	3%
asfalt	2%
polyvinylacetaatverf	0,2%

- Met de grindbetongranulaten werden betonblokken vervaardigd, waarbij de druk- en buigsterkte ongeveer gelijk tot iets hoger bleken te zijn dan die van het referentiebeton ($\geq 6,0 \text{ N/mm}^2$). De permeabiliteit bleek echter groter, terwijl voor toeslag van het type 3 hogere krimp werd gevonden dan voor de overige soorten.
- Met toeslag van het type 1 en 3 ($\sigma_k = 25,7$ respectievelijk $21,7 \text{ N/mm}^2$) en zand/grind ($\sigma_k = 24,9 \text{ N/mm}^2$) werden gewapende betonbalken gemaakt van verschillende doorsneden (150×150 tot $200 \times 250 \text{ mm}^2$) en verschillende overspanningen ($1,80 - 2,10 \text{ m}$). Met de toeslag van type 3 werd een ca. 15% lagere buigsterkte bereikt ten opzichte van de andere samenstellingen en een ca. 20 à 30% geringere schuifsterkte. Voor constructief beton kan volgens dit onderzoek daarom zonder problemen de grove toeslag (grind) worden vervangen door grindbetongranulaat.

9.6 Amerikaans en Canadees onderzoek (6, 16, 24, 25, 26, 27)

Reeds onder 9.4 werd gewezen op literatuur (6) waarin een goed overzicht van de hier te behandelen literatuur wordt gegeven; dit betreft dan vooral (24, 25, 26 en 27).

In (26) wordt erop gewezen dat, indien fijn grindbetongranulaat $\leq 0,150 \text{ mm}$ wordt gebruikt, dit meestal bestaat uit gehydrateerd cement, waardoor de water-cementfactor van hiermee te vervaardigen beton sterk toeneemt.

In (24, 25 en 26) wordt aangetoond dat de vries-dooi bestandheid van kringloopbeton gelijk tot beter is dan die van het referentiebeton. Als verklaring denkt men dat de mortel-coating van de toeslagkorrels de poriën beter afsluit voor watertoetreding.

Indien alleen de grove toeslag wordt vervangen door grindbetongranulaat, geven de figuren 18 en 19 (27) enige resultaten betreffende druksterkte, elasticiteitsmodulus en zetmaat van beton en betonspecie bij gebruik van verschillende cementsoorten (type III en I). De samenstelling bedroeg - 1 cement - 2 fijne toeslag - 3 grove toeslag (% m/m) met watercementfactoren van 0,55, 0,65 en 0,75.

Alle toeslag wordt gebruikt in waterverzadigde toestand met droog oppervlak, zodat van een effectieve watercement-factor sprake is.

Uit de figuren 18 en 19 kan worden gezien dat de verwerkbaarheid c.q. de zetmaat nagenoeg gelijk was, terwijl de druksterkte en de elasticiteitsmodulus van het beton met het hergebruikte betonpuin kleiner waren, respectievelijk 4 tot 14% en maximaal 40%.

In (27) wordt verder aangetoond, dat de aanhechtsterkte toeslagmateriaal-cementmatrix in geval van hergebruikt betongranulaat 22-45% kleiner was. Hieruit kan worden afgeleid dat als het grove toeslagpercentage relatief hoog is, slechts sprake is van een geringe sterktereductie.

Het mortelgehalte zou de sterktereductie bepalen. Voor kringloopbeton wordt hier gevonden dat de druksterkte tenminste 86% bedraagt van die van het referentiebeton, terwijl de elasticiteitsmodulus tot 60% van die van het referentiebeton kan teruglopen.

In (24, 25 en 26) wordt gevonden dat toeslag, bestaande uit fijn grindbetongranulaat, een waterabsorptie heeft van ca. 8 - 10% (m/m), terwijl dit voor het grove gebroken beton ca. 4 - 6% bedraagt. Ook de soortelijke massa van de granulaten is iets lager dan die van de normale toeslag. In (26) wordt aangetoond dat in de gehydrateerde cementsteen die het oppervlak van de gebroken toeslagkorrels bedekt, microscheurtjes van 2 - 4 μ m worden waargenomen. Vermoedt wordt dat deze aanleiding geven tot de verhoogde waterabsorptie.

Met het oog op mogelijke verontreinigingen past men in de hier behandelde landen bij voorkeur gebroken wegenbeton toe om daarmee op dezelfde plaats als de gesloopte weg een nieuwe weg aan te leggen.

Zulke "kringloop"-betonwegen houden zich tot nu toe (na 3 - 15 jaren) uitstekend.

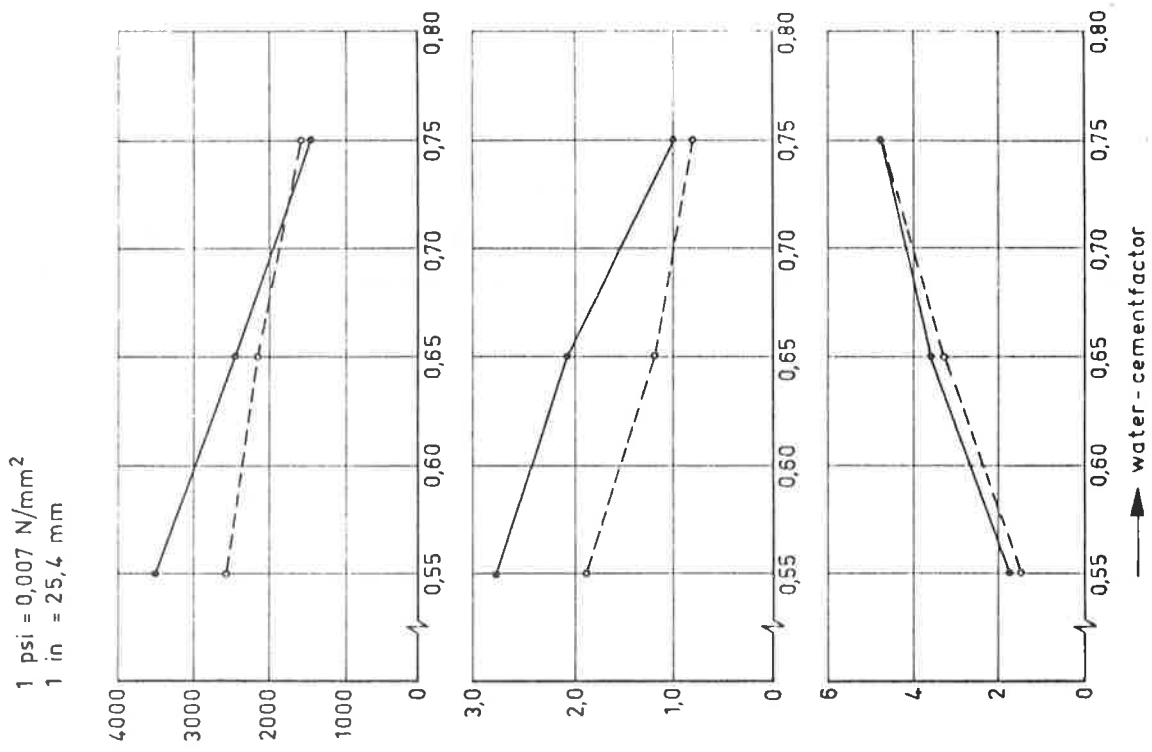


Fig. 18 Relatie tussen de w/c en verschillende eigenschappen (27)

cement : PC type III
fijne toeslag: Ottawa-zand

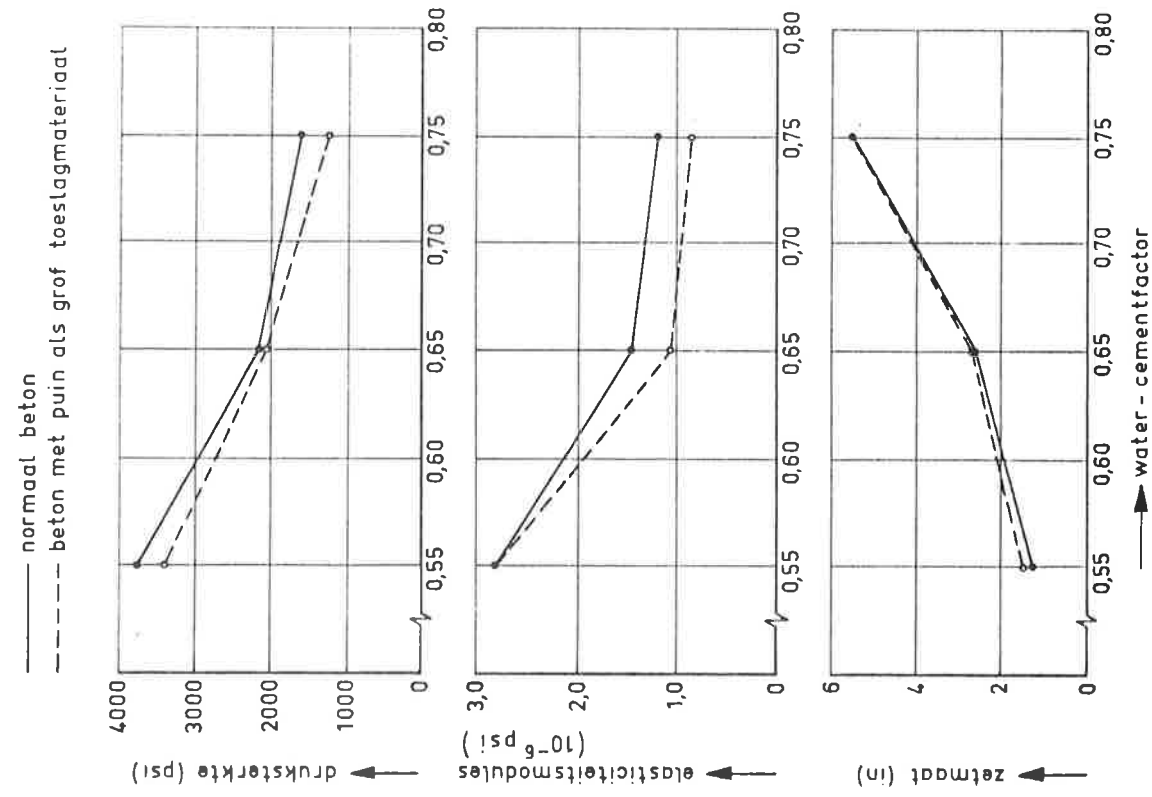


Fig. 19 Relatie tussen de w/c en verschillende eigenschappen (27)

cement : PC type I
fijne toeslag: graniet-zand

9.7 Algemeen

Het buitenlands onderzoek bevestigt dat betonpuingranulaat een toeslagmateriaal is dat in beginsel bruikbaar is voor alle kwaliteiten beton. Voor de overige puingranulaten wordt de overeenkomst met andere lichte toeslagmaterialen bevestigd. Verder onderzoek zoals aangegeven in hoofdstuk 5 naar onder andere de lange-duursterkte en de carbonatatie is nodig, voordat een definitief uitsluitel kan worden gegeven omtrent de toepassingsmogelijkheden.

HOOFDSTUK 10 ALGEMENE CONCLUSIES

Op basis van de thans bekende onderzoekresultaten worden de volgende conclusies getrokken.

1. Met de thans in praktijk gebrachte sloop- en verwerkingsmethoden is het mogelijk beton- en metselwerkpuingrunulaat te produceren dat in principe bruikbaar is als toeslagmateriaal voor beton. Dit geldt met name voor toepassing van puingrunulaten als grof toeslagmateriaal. De fijne fractie puingrunulaten kan relatief meer zwakke en/of schadelijke bestanddelen bevatten, hetgeen bij toepassing als wegfunderingsmateriaal iets minder bezwaarlijk is dan bij toepassing als toeslagmateriaal. De bereiding en verwerking van beton met puingrunulaten als toeslag kunnen plaatsvinden met behulp van de gebruikelijke methoden.
2. Bij toepassing van puingrunulaten als grof toeslagmateriaal moet ten opzichte van grindbeton met een overeenkomstige samenstelling, rekening worden gehouden met een lagere sterkte en een hogere krimp. Er bestaat (bij overeenkomstige gradering) een lineair verband tussen de droge volumieke massa van het toeslagmateriaal en de betonsterkte (zowel druk- als slijttreksterkte). Ten opzichte van grindbeton geldt dat voor het bereiken van eenzelfde sterkte bij beton met puingrunulaten de cementbehoefte groter is en wel tot maximaal 20% voor de hogere betonkwaliteiten.
3. Betonpuingrunulaat is in principe bruikbaar als toeslagmateriaal voor alle kwaliteiten beton en is in velerlei opzicht (nagenoeg) gelijkwaardig aan grind. De krimp van beton vervaardigd met betonpuingrunulaat is hoger dan van grindbeton. De vorstbestandheid doet niet onder voor die van grindbeton.
4. Metselwerkpuingrunulaat is in principe bruikbaar als toeslagmateriaal voor beton, maar het toepassingsgebied zal nader moeten worden vastgesteld op basis van de resultaten van het thans nog lopende langeduur-sterkte-onderzoek. De vorstbestandheid van beton met metselwerkpuingrunulaat is lager en de krimp hoger dan van grindbeton.

Literatuur

1. Interim Rapport Bouw- en Sloopafval, Stichting Verwijdering Afvalstoffen, Amersfoort, rapport 1759, september 1976.
2. Bouw- en Sloopafval in Nederland, Regionale spreiding naar omvang en samenstelling 1977 - 2000, Stichting Bouwcentrum, Rotterdam, februari 1979.
3. Broek, P.J. van de, Puin, naar een indicatie van de op lange termijn te verwachten hoeveelheden metselwerk- en betonpuin, Economisch Instituut voor de Bouwnijverheid, Amsterdam, april 1981.
4. Sloopmethoden en hergebruik van sloopmateriaal, DHV Raadgevend Ingenieursbureau B.V., Verbond van Aannemers van sloopwerken BABEX, i.o.v. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Den Haag/Leidschendam, november 1982.
5. Gerritsen, R., Evaluatie brekertechneken, deel I en II, MT-TNO Apeldoorn, februari 1980/januari 1981.
6. Pauw, C. De, Kringloopbeton, Tijdschrift van het Wetenschappelijk Technisch Centrum Bouwbedrijf, Brussel nr. 2 juni 1980 pag. 2 - 14.
- 7a. CUR-rapport nr. 48, Lichtbeton, Stichting voor Onderzoek, Voorschriften en Kwaliteitseisen op het gebied van beton, Zoetermeer, mei 1971.
- 7b. Neville, A.M., Properties of concrete, Pitman publ. Ltd. London, 1981, pag. 118 - 203.
8. Wiebenga, J.G., Rapportage onderzoek 1980 en 1981, i.o.v. onderzoekcommissie B 29, Instituut voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies TNO, Rijswijk, 1982.
9. Nixon, P.J., Recycled Concrete as an aggregate for concrete, a review, Materials and Structures, nr. 65, september/oktober 1978, pag. 371 - 378.
10. DIN 4163 - Ziegelsplittbeton, Bestimmungen für Herstellung und Verwendung, februari 1951.
11. Bakker, R.F.M., Afvalglas en alkalireaktiviteit, nog te publiceren.
12. NEN-norm zand en grind (herziening NEN 3542) nog te verschijnen.
13. Heerkens, J.C.P., T. van Rijswijk, Hergebruik van sloopbeton als cementgebonden funderingsmateriaal, Wegen 54 nr. 1, januari 1980, pag. 31 - 38.
14. Heerkens, J.C.P., Kringloopbeton of het hergebruik van sloopbeton als toeslagmateriaal voor hoogwaardig beton, Wegen 54, nr. 2 februari 1980, pag. 47 - 53.
15. Bakker, R.F.M., M. Leewis, Verhardingsconstructie met betonpuin op de Luchthaven Zuid-Limburg, nog te publiceren.

16. Kreyger, P.C., Hergebruik van bouw- en sloopafval als toeslagmateriaal in beton, TH-Eindhoven, afdeling bouwkunde, rapport M 83-1, januari 1983.
17. Esmeyer, F.G., Eentrapsverkleining van beton, rapport 82-07639 MT-TNO, Apeldoorn 1982.
18. Lambotte, H., C. De Pauw, The influence of contaminants on the quality and the behaviour of recycled concrete, in Adhesion problems in the recycling of concrete, Nato conference, Series III on Materials Science, vol. 4, Plenum Press. New York, London 1980, pag., 379 - 383.
19. Bijen, J., Toeslagstof voor beton uit puin, ervaringen in Duitsland, rapport Intron Maastricht, augustus 1981.
20. Wesche, K., R.R. Schulz, Beton aus afbereiteten Altbeton, Beton, februari 1982, pag. 64 - 68, maart 1982 pag. 108 - 112.
21. Newman, A.J., The utilisation of brick rubble from demolished shelter as aggregate for concrete. J. of the Institute of Municipal and Country Engineers vol. 73, nr. 2, september 1946, pag. 113 - 121.
22. Nixon, P.J., The use of materials from demolition in construction, Resources Policy dec. 1976, pag. 276 - 283.
23. Takeshi Mukai, Torao Kemi, Muneo Nakagawa, Masafumi Ki kuchi, Study on the reuse of waste concrete for aggregate of concrete Seminar "energy and resources conservation in concrete technology", San Francisco, 1975.
24. Buck, A.D., Recycled Concrete Highway Research Record nr. 430, 1973, pag. 1 -8.
25. Buck, A.D., Recycled concrete as a source of aggregate ACI-Journal, 1977, pag. 212 - 219.
26. Malhotra, V.M., The use of recycled concrete as a new aggregate, Seminar "energy and resource conservation in the Cement and Concrete Industry", Ottawa 1976.
27. Frondistou-Yannas, S., Waste concrete as aggregate for new concrete, ACI-Journal, 1977, pag. 373 - 376.
28. Eisen 1978 voor Bouwstoffen in de Wegbouw, Staatsuitgeverij, Den Haag.
29. Voorschriften Beton 1974 (VB 1974), NEN 3861-3868.

