



Kiwa KOAC B.V.

Esscheweg 105
5262 TV Vught

T 088 562 26 72

F 088 562 25 11

E info@kiwa-koac.com

www.kiwa-koac.com

e170314801-5

Onderzoek naar minder beton in menggranulaat





Projectnummer : e170314801-3
Offertenummer en datum : o171367-2 d.d. 2 februari 2018
Titel rapport : Onderzoek naar minder beton in menggranulaat
Status rapport : Definitief

Naam opdrachtgever : BRBS Branchevereniging recycling, breken en storten
Adres : Van Heemstraweg West 2/B
Plaats : 5301 PA ZALTBOMMEL
Naam contactpersoon : de heer P. Broere
Datum opdracht : 27 juli 2018
Kenmerk opdracht : e-mail

Contactpersoon Kiwa KOAC : P.W. (Peter) van der Bruggen
Auteur(s) rapport : P.W. (Peter) van der Bruggen

Rapportage

Naam: Peter van der Bruggen

Functie: Senior adviseur

Handtekening:

Datum: 5 juni 2020

Autorisatie

Naam: Jacob Groenendijk

Functie: Senior adviseur

Handtekening:

Datum: 5 juni 2020

Zonder schriftelijke toestemming van Kiwa KOAC mag het rapport niet anders dan in zijn geheel worden gereproduceerd.



Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
2	Materialen	4
3	Karakterisering materialen	5
3.1	Monstervoorbereiding	5
3.2	Korrelverdeling	5
3.3	Samenstelling	6
4	Samenstelling mengsels.....	8
4.1	Samenstelling	8
4.2	Korrelverdeling mengsels	8
5	Onderzoek mengsels	10
5.1	Eénpuntsproctordichtheid	10
5.2	Vervaardigen testopstelling LWD-Metingen Prima 100 t.b.v. oppervlaktestijfheid.....	11
5.3	Metten oppervlaktestijfheid	13
5.4	Resultaten oppervlaktestijfheid.....	14
5.5	Onderzoek naar verklaring vreemde resultaten	15
5.6	Omrekening oppervlaktestijfheid naar E_{v2} -stijfheden	16
6	Conversie stijfheidsmoduli.....	17
7	Rekenvoorbeelden	20
8	Conclusies.....	24
Bijlage 1	26



1 Inleiding

De vraag naar betongranulaat neemt toe als gevolg van ketensluiting (Betonakkoord) in de betonsector, althans dat is de verwachting van de opdrachtgever.

Doelstelling van het Betonakkoord is 100% terugname van vrijkomend beton in de betonketen. Wanneer de vraag naar betongranulaat toeneemt, kan de beschikbaarheid van voldoende betonpuin voor menggranulaat in het geding komen.

Om de consequenties hiervan vast te stellen heeft de BRBS Recycling - Branchevereniging recycling, breken en storten aan Kiwa KOAC gevraagd een onderzoeksvorstel op te stellen voor het onderzoek van 3 verschillende menggranulaten.

Onderzocht zijn de volgende mengsels:

- 'menggranulaat' met 15% betongranulaat
- 'menggranulaat' met 32,5% betongranulaat
- 'menggranulaat' met 50% betongranulaat (referentie)

Het onderzoek, de resultaten en conclusies worden beschreven in dit rapport.

2 Materialen

De benodigde materialen zijn door de opdrachtgever aangeleverd.

Het betreft:

- Metselwerkgranulaat 0/31,5 mm
- Betongranulaat 0/31,5 mm

Van het metselwerkgranulaat zijn 2 big bags ontvangen.

Van het betongranulaat is in 1^e instantie 1 big bag aangeleverd. Vanwege bezetting van apparatuur (testopstelling LWD) kon het onderzoek niet kort na aanleveren van de materialen worden opgestart. Door het niet direct kunnen opstarten van het onderzoek is mogelijk de bindingscapaciteit van het (verse) betongranulaat afgenomen.

Daarom heeft Kiwa KOAC een nieuwe verse partij betongranulaat, wederom 1 big bag, laten komen voor het onderzoek.

Het onderzoek is uitgevoerd op mengsels met 'vers' betongranulaat zodat er voldoende bindingscapaciteit verzekerd was.



3 Karakterisering materialen

De onderzoeken zijn uitgevoerd door het laboratorium van Kiwa KOAC te Vught.

De onderzoeken bestaan uit een beperkte karakterisering van de materialen en onderzoeken op de samen te stellen mengsels.

Van het metselwerkgranulaat en betongranulaat zijn de korrelverdeling en samenstelling vastgesteld.

3.1 Monstervoorbereiding

De materialen zijn met een roterende verdeler verdeeld in handzame porties (deelmonsters). De deelmonsters hadden een grootte van circa 50 kg en zijn gebruikt voor het verdere onderzoek.

3.2 Korrelverdeling

Van de materialen is een korrelverdeling vastgesteld, gebruikmakend van een beperkte set aan zeven, om de materialen enigszins te kunnen karakteriseren en om de samenstelling van de te vervaardigen mengsels te kunnen sturen.

Sturing op de korrelverdeling van de fractie < 4 mm, door middel van uitzeven en samenstellen, is niet haalbaar.

De korrelverdeling is vastgesteld middels een droge zieving conform K-IP-122 gelijkwaardig aan NEN-EN 933-1.

Kiwa KOAC laboratorium Vught is geaccrediteerd voor deze verrichting.

De resultaten van de korrelverdeling zijn vermeld in tabel 1.

Tevens is de eis voor een steenmengsel 0/31.5 toegevoegd. Zie § 80.16.01 van de Standaard RAW Bepalingen 2015.

Tabel 1 Korrelverdeling

	Betongranulaat	Metselwerkgranulaat	Eis	Eenheid
K-IP-122 gelijkwaardig aan NEN-EN 933-1				
Bepaling van de korrelgrootteverdeling - Zeefmethode (droge zieving)				
Door zeef 63 mm	100	100	100	%(^m / _m)
Door zeef 31.5 mm	80	96	75-100	%(^m / _m)
Door zeef 16 mm	59	83	50-90	%(^m / _m)
Door zeef 8 mm	43	62	30-75	%(^m / _m)
Door zeef 4 mm	32	45	20-60	%(^m / _m)

Beide materialen voldoen aan de gestelde eisen.

De zeven fijner dan 4 mm zijn niet onderzocht.



3.3 Samenstelling

Ten behoeve van het samenstellen van de mengsels uit metselwerk- en betongranulaat zijn de materialen uitgezeefd in de fracties:

- 0-4 mm
- 4-8 mm
- 8-16 mm
- 16-31.5 mm
- > 31.5 mm

Van de verkregen fracties > 4 mm is de samenstelling vastgesteld.

De samenstelling is vastgesteld conform NEN-EN 933-11.

Kiwa KOAC laboratorium Vught is geaccrediteerd voor deze verrichting.

De fractie > 31,5 mm is in het onderzoek niet meegenomen. Het betongranulaat bevat veel meer materiaal op zeef 31,5 mm dan het metselwerkgranulaat. Door het materiaal op 31,5 mm te gebruiken zou de hoeveelheid metselwerkgranulaat (2 big bags) niet toereikend zijn om de 3 mengsels samen te stellen. Daarnaast leiden de grofste korrels mogelijk tot meer inhomogeniteit.

De resultaten van de samenstelling zijn vermeld in tabel 2 voor het betongranulaat en tabel 3 voor het metselwerkgranulaat.

De samenstelling is een visuele beoordeling tot welke groep de korrels groter dan 4 mm behoren.



Tabel 2 Samenstelling betongranulaat

Fractie	Betongranulaat			Eenheid
	4-8 mm	8-16 mm	16-31.5 mm	
NEN-EN 933-11				
Classificatiebeproeving voor de bestanddelen van grove gerecyclede toeslagmaterialen				
Gehalte component Rc - cementbeton(producten), mortel, metsелеlementen van cementbeton	93	91	94	%(^m /m)
Gehalte component Ru - ongebonden aggregaten, natuurlijk gesteente, hydraulisch gebonden aggregaten (bindmiddel zijnde hydraulisch [cement of slak], en zijnde geen bitumen)	1.9	2.5	1.9	%(^m /m)
Gehalte component Rb - metsелеlementen van gebakken klei (waaronder baksteen, gebakken dakpannen, metselen voegmortel, gebakken klinkers), kalkzandsteen, cellenbeton, keramiek	3.3	4.6	3.7	%(^m /m)
Gehalte component Ra - bitumineuze producten, natuursteen met een bitumenhuid of -omhulling	1.7	1.9	0	%(^m /m)
Gehalte component Rg - glas	0.1	0.0	0.0	%(^m /m)
Gehalte component X - overige bestanddelen	0.0	0.1	0.0	%(^m /m)

Tabel 3 Samenstelling metselwerkgranulaat

Fractie	Metselwerkgranulaat			Eenheid
	4-8 mm	8-16 mm	16-31.5 mm	
NEN-EN 933-11				
Classificatiebeproeving voor de bestanddelen van grove gerecyclede toeslagmaterialen				
Gehalte component Rc - cementbeton(producten), mortel, metsелеlementen van cementbeton	13	9.2	11	%(^m /m)
Gehalte component Ru - ongebonden aggregaten, natuurlijk gesteente, hydraulisch gebonden aggregaten (bindmiddel zijnde hydraulisch [cement of slak], en zijnde geen bitumen)	2	2.3	0	%(^m /m)
Gehalte component Rb - metsелеlementen van gebakken klei (waaronder baksteen, gebakken dakpannen, metselen voegmortel, gebakken klinkers), kalkzandsteen, cellenbeton, keramiek	82	86	89	%(^m /m)
Gehalte component Ra - bitumineuze producten, natuursteen met een bitumenhuid of -omhulling	0.3	0.1	0	%(^m /m)
Gehalte component Rg - glas	0.3	0.0	0.0	%(^m /m)
Gehalte component X - overige bestanddelen	1.9	2.1	0.5	%(^m /m)



4 Samenstelling mengsels

4.1 Samenstelling

Om te komen tot de gewenste mengsels met een bekend gehalte aan betongranulaat zijn het metselwerk- en betongranulaat gemengd.

De mengverhoudingen zoals in tabel 4 weergegeven zijn aangehouden om tot het vereiste gehalte aan betongranulaat te komen.

Hierbij is rekening gehouden met het aandeel beton in het metselwerkgranulaat en omgekeerd.

Tabel 4 Mengverhoudingen

Gewenst	Metselwerkgranulaat	Betongranulaat	Eenheid
15	97.5	2.5	%(m/m)
32.5	76	24	%(m/m)
50	55	45	%(m/m)

4.2 Korrelverdeling mengsels

Het metselwerk- en betongranulaat zijn uit de gezeefde fracties gemengd in de oorspronkelijke verhoudingen zoals gevonden bij de korrelverdeling, zie tabel 1, waarbij het materiaal > 31,5 mm niet meer is gebruikt.

De verhoudingen in de korrelverdeling zijn in tabel 5 vermeld.

Tabel 5 Verhoudingen korrelverdeling

	Betongranulaat	Metselwerkgranulaat	Eenheid
> 31,5 mm	0	0	%(m/m)
16 – 31,5 mm	26	14	%(m/m)
8 – 16 mm	20	22	%(m/m)
4 – 8 mm	14	18	%(m/m)
< 4 mm	40	47	%(m/m)

De berekende resultaten van de korrelverdelingen zijn vermeld in tabel 6. Tevens is de eis voor een steenmengsel 0/31.5 toegevoegd. Zie § 80.16.01 van de Standaard RAW Bepalingen 2015.



Tabel 6 Korrelverdeling mengsels

	Gehalte aan betongranulaat in %				Eenheid
	15	32.5	50	Eis	%(m/m)
K-IP-122 gelijkwaardig aan NEN-EN 933-1					
Bepaling van de korrelgrootteverdeling - Zeefmethode (droge zeping)					
Door zeef 63 mm	100	100	100	100	%(m/m)
Door zeef 31.5 mm	100	100	100	75-100	%(m/m)
Door zeef 16 mm	86	83	81	50-90	%(m/m)
Door zeef 8 mm	64	62	60	30-75	%(m/m)
Door zeef 4 mm	47	45	44	20-60	%(m/m)

De mengsels voldoen aan de eisen voor de korrelverdeling.

De zeven fijner dan 4 mm zijn niet onderzocht omdat hierop niet kan worden gestuurd.



5 Onderzoek mengsels

5.1 Éénpuntsproctordichtheid

Voor het inbouwen van de materialen met een verdichtingsgraad van 101% is een referentiedichtheid (éénpuntsproctordichtheid) benodigd.

De referentiedichtheid is vastgesteld conform proef 10 van de Standaard RAW Bepalingen 2015. Kiwa KOAC laboratorium Vught is geaccrediteerd voor deze bepaling.

De bepaling is in 2-voud uitgevoerd.

De resultaten zijn weergegeven in tabel 7 t/m 9.

Tabel 7 Mengsel 15% betongranulaat

Mengsel	15% beton			Eenheid
	1	2	Gemiddeld	
RAW 2015 proef 10				
Bepalen van de éénpuntsproctordichtheid				
Vochtgehalte	12.0	12.7	12.4	% ^(m/m)
Droge dichtheid	1.619	1.573	1.596	Mg/m ³
Is er na het verdichten water uitgetreden?	Nee	Nee	-	

Tabel 8 Mengsel 32.5% betongranulaat

Mengsel	32.5% beton			Eenheid
	1	2	Gemiddeld	
RAW 2015 proef 10				
Bepalen van de éénpuntsproctordichtheid				
Vochtgehalte	11.7	11.5	11.6	% ^(m/m)
Droge dichtheid	1.658	1.646	1.652	Mg/m ³
Is er na het verdichten water uitgetreden?	Nee	Nee	-	

Tabel 9 Mengsel 50% betongranulaat

Mengsel	50% beton			Eenheid
	1	2	Gemiddeld	
RAW 2015 proef 10				
Bepalen van de éénpuntsproctordichtheid				
Vochtgehalte	11.4	10.8	11.1	% ^(m/m)
Droge dichtheid	1.715	1.681	1.698	Mg/m ³
Is er na het verdichten water uitgetreden?	Nee	Nee	-	

De dichtheid neemt toe bij een hoger gehalte aan betongranulaat. Het vochtgehalte neemt af met een toenemend betongehalte. De verhoudingen zijn goed en overeenkomstig de verwachtingen.



5.2 Vervaardigen testopstelling LWD-Metingen Prima 100 t.b.v. oppervlaktestijfheid

In de verschillende testopstellingen zijn de mengsels met de verschillende aandelen betongranulaat ingebouwd tot een streefverdichtingsgraad van 101 % t.o.v. de gemiddelde éénpuntsproctordichtheid en uitgaande van het gemiddelde optimum vochtgehalte verminderd met 1%.

In de opstelling is een dikte van 40 cm menggranulaat ingebouwd. De opstelling is 100 bij 100 cm². Het materiaal is in 2 lagen ingebouwd waarbij laag 1 na verdichten aan het oppervlak is opengetrokken voor een goede interactie met de 2^e laag.

T.b.v. het inbouwen is de hoeveelheid per laag berekend met de volgende formule:

$$\text{Hoeveelheid [kg]} = \text{Epd} * ((100+(O-1))/100) * (V/100) * L * B * D$$

Waarbij:

Epd	=	Eénpuntsproctordichtheid [kg/m ³]
O	=	Optimum vochtgehalte [%]
(O-1)	=	Verlaging van het vochtgehalte met 1%
V	=	Verdichtingsgraad [%]
L	=	Lengte bak [m]
B	=	Breedte bak [m]
D	=	Dikte laag [m]

Het materiaal wordt direct na het mengen in de opstelling gebracht en met een metalen stamper aangedrukt en vervolgens met een trilplaat op een houten plaat verdicht tot de laag de juiste dikte heeft.

Foto 1 geeft een beeld van het mengen in een dwangmenger. Het materiaal is in verschillende charges gemengd. Per charge is 75 kg gemengd.



Foto 1 Menggen



Foto 2 toont het materiaal van laag 1 in de opstelling.



Foto 2 1^e laag materiaal in opstelling

Laag 1 wordt na het verdichten aan de bovenzijde losgekrabd alvorens het materiaal van laag 2 in de opstelling wordt gebracht. Dit voor een goede interactie tussen beide lagen.

Na het verdichten van laag 2 wordt het geheel goed afgedekt om verdamping van vocht te voorkomen. De opstellingen zijn bewaard bij kamertemperatuur.

In eerste instantie is van elk van onderstaande mengsels 1 testopstelling gemaakt.

- Menggranulaat met 50 % beton
- Menggranulaat met 32,5 % beton
- Menggranulaat met 15 % Beton



Bij het meten van de oppervlaktestijfheid (zie paragraaf 5.3) van de verschillende testopstellingen bleek echter dat de gemeten stijfheid van de opstelling met 32,5 % betongranulaat consequent lager was dan van de opstelling met 15% betongranulaat, terwijl het tegenovergestelde verwacht werd.

Er is daarom besloten een extra opstelling te bouwen met 32,5 % betongranulaat en deze net zo te beproeven als de andere opstellingen. Tevens is besloten om achteraf, als de nieuwe opstelling van 32,5% betongranulaat ten minste de vereiste verhardingstijd (56 dagen) heeft doorlopen, onderzoek te doen naar de mogelijke oorzaak van de vreemde resultaten.

5.3 Meten oppervlaktestijfheid

In de tijd, bij een toenemende ouderdom en dus verhardingstijd, is de oppervlaktestijfheid van de mengsels gemeten met een Prima 100 Light Weight Deflectometer.

Opgemerkt moet worden dat er meerdere merken LWD-apparaten op de markt zijn die niet vergelijkbare resultaten produceren.



De oppervlaktestijfheid is in iedere opstelling en bij iedere ouderdom op 4 plaatsen gemeten.

In iedere hoek, op 15 cm uit de wand, zijn de metingen uitgevoerd.

Hiervoor is een houten plaat met uitsparing gebruikt. Zie foto 3.

De volledige resultaten van de LWD-metingen zijn in bijlage 1 gegeven.

Foto 3 Meten oppervlaktestijfheid



5.4 Resultaten oppervlaktestijfheid

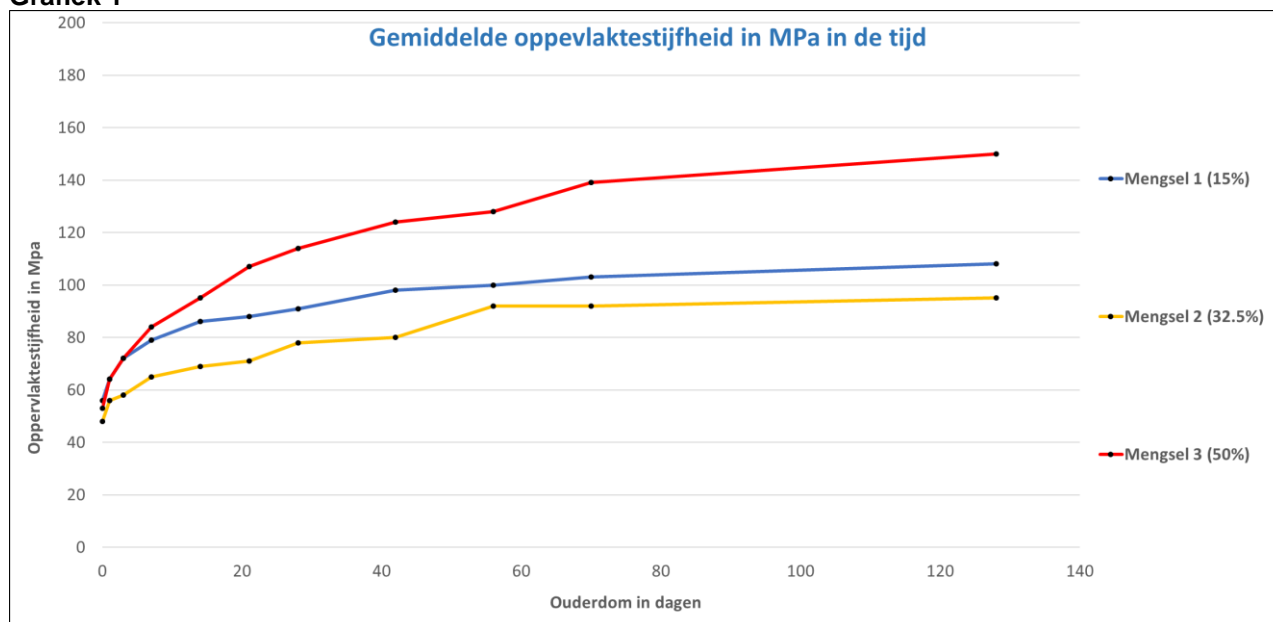
In tabel 10 zijn de gemiddelde meetresultaten van de oppervlaktestijfheid in MPa van de mengsels en verschillende ouderdommen weergegeven.

Tabel 10 Oppervlaktestijfheid in MPa

Mengsel	Verhardingstijd in dagen											
	0	1	3	7	14	21	28	42	56	70	79	128
15%	56	64	73	79	87	88	91	98	101	103	-	108
32.5%	48	56	58	65	70	72	78	80	92	92	-	95
50%	53	64	72	85	95	107	114	124	128	139	-	151
32.5% (2)	83	82	92	100	97	101	106	112	106	117	112	-

In grafiek 1 zijn de gemiddelde resultaten van de 3 oorspronkelijke opstellingen weergegeven.

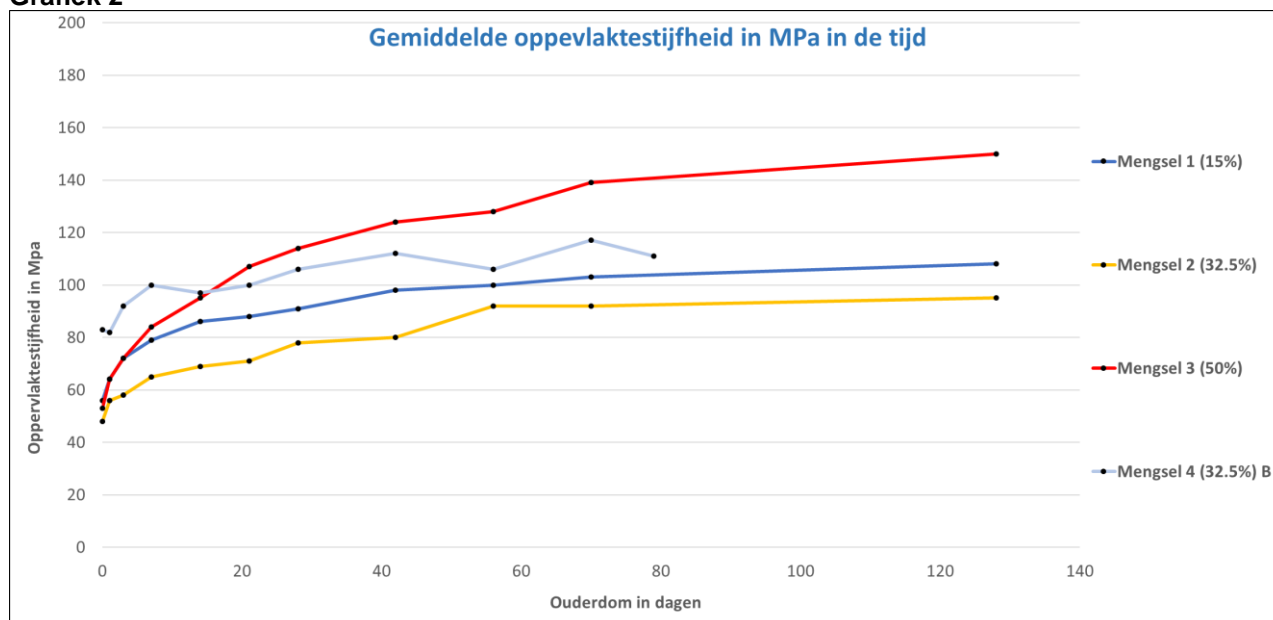
Grafiek 1





In grafiek 2 zijn de gemiddelde resultaten van alle 4 opstellingen weergegeven.

Grafiek 2



5.5 Onderzoek naar verklaring vreemde resultaten

Na het beëindigen van alle metingen is onderzoek gedaan om de afwijkende resultaten van de 1^e opstelling met 32,5% betongranulaat vast te stellen door:

- Hoeveelheid materiaal in de opstelling vaststellen;
- Onderzoek naar de dichtheid met:
 - o Nucleaire metingen;
 - o Grindvervanging.
- Onderzoek naar vochtgehalte;
- Onderzoek naar samenstelling.

De resultaten van dit onderzoek zijn:

- De ingebouwde hoeveelheid materiaal bij de 4 opstellingen is juist;
- De dichtheid van het menggranulaat met 15% en 50% betongranulaat zijn juist;
- De dichtheid van de 2^e opstelling met 32.5% menggranulaat is juist;
- De dichtheid van het menggranulaat in de 1^e opstelling van 32.5 %, bovenste laag, is te laag. De onderlaag is juist. Dit geeft een lagere verdichtingsgraad voor de bovenste laag en dit resulteert in een lagere oppervlaktestijfheid. De gemeten verdichtingsgraad is 96% i.p.v. de beoogde 101%.
5% verschil in verdichtingsgraad heeft dus een enorme invloed op de stijfheid;
- Het vochtgehalte is op hetzelfde niveau als bij inbouwen en juist;
- De samenstelling van de mengsels die zijn ingebouwd is juist.



5.6 Omrekening oppervlaktestijfheid naar E_{v2} -stijfheden

De oppervlaktestijfheid is omgerekend naar een indicatieve equivalente stijfheid E_{v2} .

Hiervoor is een eigen database gehanteerd alsmede de volgende referenties:

Referenties

- 1 Estimating stiffness of subgrade and unbound materials for pavement design (2008). Synthesis 382. National Cooperative Highway Research Program. TRB. Washington DC.
- 2 Lehmann, S. (2011). Untersuchung zur Korrelation zwischen statischen und dynamischen Plattendruckversuchen. Bachelor Thesis. Technische Universität Darmstadt.

De resultaten zijn weergegeven in tabel 11.

Tabel 11 Berekende waardes van E_{v2}

Mengsel	ouderdom											
	0	1	3	7	14	21	28	42	56	70	79	128
15%	122	131	142	149	157	160	162	170	173	176	-	182
32.5%	114	123	126	133	138	140	148	150	164	164	-	167
50%	120	132	141	155	167	181	188	200	205	217	-	230
32.5% (2)	153	153	164	172	170	173	180	187	180	192	186	-



6 Conversie stijfheidsmoduli

De conversie van de in de proeven met de LWD (Prima 100) gemeten stijfheidsmoduli naar stijfheidsmoduli die in ontwerpberoeeningen worden gebruikt is niet eenvoudig.

In de LWD-proef wordt gemeten met een spanningsniveau van ongeveer 100 kPa. De meting wordt direct op het funderingsmateriaal uitgevoerd. Er is geen sprake van een bovenbelasting of spanningspreiding door andere constructielagen.

In de dimensionering van asfaltverhardingen wordt conform de ontwerpmethodiek van CARE en OIA uitgegaan van een ontwerpbelasting van nominaal 700 kPa. Omdat het funderingsmateriaal zich spanningsafhankelijk gedraagt zal het verschil in belasting gebruikt in de LWD-proef en de ontwerpbelasting effect hebben op de stijfheid van de fundering van menggranulaat. Bovendien zorgt in het ontwerp de asfaltlaag voor meer opsluiting van de fundering en meer lastspreiding. Beide factoren hebben invloed op de stijfheidsmodulus van de fundering.

Op dit moment bestaat nog geen algemeen geaccepteerde methodiek om de stijfheidsmoduli van laboratoriumproeven te converteren naar stijfheidsmoduli die dienen als input in ontwerpberoeeningen. Wel geeft het CROW richtwaarden direct na inbouwen hetgeen niets zegt over de 'eindsituatie'.

Om een indruk te krijgen van de verschillen tussen de resultaten uit laboratoriumproeven en ontwerpcondities zijn data van jarenlang onderzoek van de heren Sweere en Van Niekerk geanalyseerd.

Sweere heeft in zijn proefschrift onderzoek gedaan naar de ontwikkeling van de stijfheidsmodulus van diverse funderingsmaterialen. Hierbij heeft hij o.a. een proefvak geanalyseerd met diverse funderingsmaterialen waarbij de ene zijde bestond uit een ongeveer 250 mm dikke fundering en de andere zijde uit een 250 mm fundering overlaagd met 100 mm asfalt. In het proefvak met menggranulaat bleek de stijfheidsmodulus van het menggranulaat onder het asfalt gemiddeld 2,3 stijver (factor k_2) dan gemeten op het niet met asfalt afgebouwde proefvak.

Voor de stijfheidsmetingen op het niet met asfalt bedekte proefvak gebruikte Sweere een proefbelasting van 30 kN wat overeenkomt met een contactspanning van ongeveer 420 kPa. Bij de LWD-metingen is gemeten met een contactspanning van ongeveer 100 kPa. De verhouding in spanningsniveaus van 4,2 leidt tot een verhouding in stijfheidsmoduli van $4,2^{k_2}$. De factor k_2 in de vorige formule is de coëfficiënt uit de Mr-Theta-relatie die doorgaans wordt gebruikt om het spanningsafhankelijk stijfheidsgedrag van granulaire funderingsmaterialen te karakteriseren. De waarde van k_2 is afhankelijk van diverse factoren. Van Niekerk heeft aangetoond dat k_2 voor menggranulaat van ongeveer 28 dagen ouderdom ongeveer 0,5 bedraagt. Dit houdt in dat een spanningsverhouding van 4,2 gepaard gaat met een stijfheidsverhouding van $4,2^{0,5} = 2,05$, afgerond 2.



Samengevat kan op basis van resultaten van LWD-proeven op menggranulaat waarbij de toename van de stijfheidsmodulus met de tijd enigszins is gestabiliseerd de ontwerpstijfheidsmodulus in asfaltdimensioneringen worden geschat door het LWD-resultaat te vermenigvuldigen met het product van de getallen 2,3 en 2,0, is 4,6.

Als een menggranulaat moet voldoen aan de gangbare ontwerpstijfheidsmodulus voor menggranulaat van 400 MPa, dan moet de LWD-stijfheidsmodulus na 28 dagen of meer tenminste $400 / 4,6 = 87$, afgerond 90 MPa bedragen.

Zoals te zien is in tabel 10, wordt daaraan voldaan door alle onderzochte mengsels met de juiste verdichtingsgraad, maar niet door het mengsel met 32,5% betongranulaat met een te lage verdichtingsgraad.

Het zou echter volgens Kiwa KOAC onjuist zijn om bovenstaande conclusie betreffende de enkelvoudige testopstellingen uit dit onderzoek te veralgemeniseren, en te concluderen dat ook voor mengsels met 15% en 32,5% betongranulaat de gangbare ontwerpstijfheidsmodulus van 400 MPa voor menggranulaat met ten minste 50% betongranulaat mag worden gehanteerd. Die ontwerpstijfheidsmodulus is immers niet een gemiddelde eigenschap, maar een veilige karakteristieke waarde, die rekening houdt met o.a.:

- spreiding in materiaaleigenschappen;
- plaatselijk lagere verdichtingsgraad, zoals toegestaan in de RAW 2015;
- mogelijk geringere bindingsontwikkeling door ongunstige vochtomstandigheden;
- mogelijke verstoring van de bindingsontwikkeling door (bouw)verkeer;
- mogelijke toekomstige lange-termijn degradatie van het materiaal onder invloed van verkeer en vorst-dooi.

Daarbij wordt ook aangetekend dat het onderzochte mengsel met 15% betongranulaat nauwelijks meer betongranulaat bevat dan gewoon metselwerkgranulaat, waarvoor de gangbare ontwerpstijfheidsmodulus slechts 150 MPa bedraagt.

Verder wordt opgemerkt dat de gegevens uit het onderhavige onderzoek slechts 1 partij materiaal betreffen en alleen metingen onder laboratoriumomstandigheden. Generalisatie naar algemene waarden is daarom lastig.

Daarom stelt Kiwa KOAC voor om concept-ontwerpwaarden te baseren op de verhoudingen tussen de gemeten stijfheden van de mengsels met minder betongranulaat t.o.v. het mengsel met 50% betongranulaat. Die verhoudingen zijn over de gehele tijdsduur van het onderzoek dalend. Dat wil zeggen dat de stijfheidsontwikkeling van de mengsels met lagere gehalten betongranulaat niet alleen absoluut maar ook relatief achterblijft t.o.v. de stijfheidsontwikkeling van het mengsel met 50% betongranulaat.

Na 70 dagen bedraagt de stijfheid van het mengsel met 15% betongranulaat 74% van de stijfheid van het mengsel met 50% betongranulaat, en na 128 dagen nog 72%.

Na 70 dagen bedraagt de stijfheid van het correct verdichte mengsel met 32,5% betongranulaat 84% van de stijfheid van het mengsel met 50% betongranulaat. Voor dit mengsel zijn er geen gegevens na 128 dagen.



Bovenstaande percentages, toegepast op de gangbare ontwerpmodulus van 400 MPa voor menggranulaat met ten minste 50% betongranulaat, geven waarden van ongeveer 330 MPa voor 32,5% betongranulaat en ongeveer 280 MPa voor 15% betongranulaat. Rekening houdend met de gangbare ontwerpwaarde van 150 MPa voor metselwerkgranulaat, lijken ontwerpwaarden van 200 MPa voor het mengsel met 15% betongranulaat en 300 MPa voor het mengsel met 32,5% betongranulaat acceptabel.



7 Rekenvoorbeelden

Om de effecten van een lagere funderingsstijfheid te beoordelen zijn enkele series ontwerpberoeeningen gemaakt met OIA, om te bepalen hoeveel extra asfalt- of funderingsdikte nodig is om een lagere funderingsstijfheid te compenseren. Hierbij zijn de volgende instellingen van OIA gebruikt.

Tabel 1 Gebruikte ontwerpgegevens verhardingsconstructie

Omschrijving	Waarde
Ontwerpperiode	20 jaar
Aantal werkdagen per jaar	270
Aantal vrachtauto's per dag per richting	Basis: 500 Variant: 50
Aslastspectrum	CROW Provinciale weg zwaar
Bandspectrum	CROW standaard
Snelheid voertuigen	80 km/uur
Jaarlijkse verkeersgroei	0%
Herkomst verkeersbelasting	Schatting
Aantal rijstroken per richting	1
Rijstrookbreedte	2,75 m
Afstand tot rand verharding	0,3 m
Laagdikte deklaag	35 mm
Aangenomen eigenschappen deklaag	CROW SMA-NL 11B
Laagdikte tussenlaag	45 mm
Aangenomen eigenschappen tussenlaag	CROW TL-C 16 (S=5500, eps6=80, fc=0,4, ITSr=70 en HR=6,5)
Aangenomen eigenschappen onderlagen	Basis: "CROW RAW-onderlaagmengsel" (S=8000, eps6=105, fc=0,2, ITSr=70 en HR=4,5) Variant: CROW OL-B
Laagdikte onderlaag	Te bepalen
Laagdikte menggranulaat fundering	Basis: 250 mm Varianten: Te bepalen
Elasticiteitsmodulus menggranulaat fundering	Basis: 400 MPa Varianten: 300 en 200 MPa
Laagdikte zandbed	500 mm
Elasticiteitsmodulus zandbed	100 MPa
Elasticiteitsmodulus ondergrond (vaste klei)	Basis: 50 MPa Variant: 100 MPa (zand)
Betrouwbaarheid diktedimensionering	70%
Toelaatbaar schadepercentage (begin vermoeiing-scheuren onderin asfalt)	30%

Voor de basisgegevens berekent OIA een benodigde totale asfaltdikte van 188 mm.



Vervolgens is de stijfheid van de menggranulaat fundering verlaagd naar 300 en 200 MPa, als rekenwaarde (zie hoofdstuk 6) voor de stijfheid van menggranulaat met respectievelijk 32,5% en 15% betongranulaat.

Bij die funderingstijfheden is berekend welke asfaltdikte of funderingsdikte, of combinatie van beide, nodig is voor dezelfde levensduur als de basisvariant. De resultaten staan weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2 Varianten asfalt- en funderingsdikte bij lagere funderingsstijfheid (getallen tussen haakjes zijn verschillend t.o.v. basisvariant)

Variant	Asfaltdikte (mm)	Funderingsstijfheid (MPa)	Funderingsdikte (mm)
Basis1	188	400	250
MG 300 MPa, dikker asfalt	200 (+12)	300	250
MG 300 MPa, dikkere fundering	188	300	530 (+280)
MG 200 MPa, dikker asfalt	213 (+25)	200	250
MG 200 MPa, dikkere fundering + asfalt	202 (+14)	200	1000 (+750)

De invloed van een 100 MPa lagere funderingsstijfheid op de asfaltdikte blijkt beperkt (12 mm meer asfalt), maar de benodigde extra funderingsdikte is aanzienlijk (280 mm meer fundering). Bij een 200 MP lagere funderingsstijfheid is de invloed op de asfaltdikte nog steeds relatief beperkt (25 mm meer asfalt), maar is het niet mogelijk om de lagere funderingsstijfheid te compenseren een grotere funderingsdikte. Zelfs bij de maximale in OIA toegestane, maar praktisch niet realistische, funderingsdikte van 1000 mm, is ook nog 14 mm extra asfaltdikte nodig. De extra 750 mm funderingsdikte geeft dus maar 11 mm reductie op de benodigde extra asfaltdikte.

Ook is onderzocht wat de invloed van lagere funderingsstijfheid is bij lagere verkeersintensiteit. Daarom zijn de bovengenoemde varianten ook doorgerekend voor 50 VA/dag i.p.v. 500. De resultaten hiervan staan weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3 Varianten asfalt- en funderingsdikte lagere verkeersintensiteit (getallen tussen haakjes zijn verschillen t.o.v. basis 2)

Variant	Asfaltdikte (mm)	Funderingsstijfheid (MPa)	Funderingsdikte (mm)
Basis2	115	400	250
MG 300 MPa, dikker asfalt	131 (+16)	300	250
MG 300 MPa, dikkere fundering + asfalt	120 (+5)	300	1000 (+750)
MG 200 MPa, dikker asfalt	147 (+32)	200	250
MG 200 MPa, dikkere fundering + asfalt	139 (+24)	200	1000 (+750)

Bij deze verkeersintensiteit blijkt de invloed van een 100 MP lagere funderingsstijfheid op de asfaltdikte nog steeds beperkt (16 mm meer asfalt), maar het blijkt bij deze stijfheid al niet meer



mogelijk om de lagere funderingsstijfheid alleen te compenseren met extra funderingsdikte. Naast 750 mm extra funderingsdikte is ook nog 5 mm extra asfaltdikte nodig.

Bij een 200 MP lagere funderingsstijfheid is de invloed op de asfaltdikte nog steeds relatief beperkt (32 mm meer asfalt), maar zelfs bij een funderingsdikte van 1000 mm is ook nog 24 mm extra asfaltdikte nodig. De extra 750 mm funderingsdikte geeft hier dus maar 8 mm reductie op de benodigde extra asfaltdikte.

De grotere invloed van een lagere funderingsstijfheid bij lagere verkeersintensiteit wordt veroorzaakt doordat de asfaltdikte bij lagere verkeersintensiteit ook lager is, waardoor de bijdrage van de fundering aan de totale draagkracht van de verharding groter is. Verlaging van de funderingsstijfheid heeft dus grotere gevolgen.

Tenslotte zijn nog twee andere sets varianten doorgerekend:

- Met een ondergrondstijfheid van 100 MPa (zand) i.p.v. 50 MPa (vaste klei)
- Met onderlaagasfalt OL-B i.p.v. RAW-onderlaagmengsel.

De resultaten hiervan staan weergegeven in Tabel 4 en Tabel 5.

Tabel 4 Varianten asfalt- en funderingsdikte hogere ondergrondstijfheid (getallen tussen haakjes zijn verschillend t.o.v. basis3)

Variant	Asfaltdikte (mm)	Funderingsstijfheid (MPa)	Funderingsdikte (mm)
Basis3	185	400	250
MG 300 MPa, dikker asfalt	197 (+12)	300	250
MG 300 MPa, dikkere fundering	185	300	710 (+460)
MG 200 MPa, dikker asfalt	210 (+25)	200	250
MG 200 MPa, dikkere fundering + asfalt	202 (+17)	200	1000 (+750)

Bij deze hogere ondergrondstijfheid is het asfaltpakket slechts 3 mm dikker dan bij de basisvariant met een klei ondergrond. De effecten van een lagere funderingsstijfheid op de asfaltdikte zijn gelijk aan die van de basisvariant. De effecten van een lagere funderingsstijfheid op de benodigde funderingsdikte zijn echter aanzienlijk groter dan bij de basisvariant.



Tabel 5 Varianten asfalt- en funderingsdikte onderlaag OL-B (getallen tussen haakjes zijn verschillend t.o.v. basis4)

Variante	Asfaltdikte (mm)	Funderingsstijfheid (MPa)	Funderingsdikte (mm)
Basis4	258	400	250
MG 300 MPa, dikker asfalt	271 (+13)	300	250
MG 300 MPa, dikkere fundering	258	300	490 (+240)
MG 200 MPa, dikker asfalt	285 (+27)	200	250
MG 200 MPa, dikkere fundering + asfalt	271 (+13)	200	1000 (+750)

De effecten van lagere funderingsstijfheid op zowel de asfaltdikte als de funderingsdikte zijn bij deze soort onderlaagafalt vrijwel gelijk aan die van de basisvariante met het RAW onderlaagmengsel, ook al is het hele asfaltpakket aanzienlijk dikker.



8 Conclusies

De conclusies zijn:

- De ontwikkeling in de tijd van de stijfheid van alle opstellingen is zoals mag worden verwacht. De 2^e opstelling met 32,5% betongranulaat vertoont enkele afwijkingen van een vloeiende lijn. De oorzaak hiervan is niet bekend.
- De positionering van de lijnen in de grafieken met oppervlaktestijfheden van de mengsels met 50% beton, 32,5% beton (2^e) en 15% beton, alle met de juiste verdichtingsgraad, is zoals mag worden verwacht.
- De invloed van de circa 6% te lage verdichtingsgraad van de opstelling met 32,5% beton (1^e) t.o.v. de 2^e opstelling is aanzienlijk: 93 MPa t.o.v. 117 MPa bij 70 dagen ouderdom.
- De oppervlaktestijfheid van het mengsel met 50% betongranulaat in de opstelling blijft na de conversie, zie hoofdstuk 6, equivalent te zijn met de gebruikelijke ontwerpstijfheid van 400 MPa voor dit materiaal.
- In de praktijk is het ene menggranulaat het andere niet. De rekenwaarde van 400 MPa voor menggranulaat is een karakteristieke veilige waarde. Er zullen in de praktijk veel waarden hoger zijn, en enkele lager.
- De ontwikkeling van de stijfheid in de tijd is belangrijk en aanwezig:
 - o Het mengsel met 50% betongranulaat ontwikkelt zich van een oppervlaktestijfheid van gemiddeld 53 MPa direct na vervaardigen, naar 64 MPa na 1 dag en vervolgens naar 114 MPa na 28 dagen verharden. Deze toename, op eenzelfde manier berekend als bij de CBR-toename conform annex D van NEN-EN 14227-2, bedraagt 115%.
 - o Van de mengsels met 15% en 32,5% betongranulaat, met de juiste verdichtingsgraad, neemt de oppervlaktestijfheid tussen 0 en 28 dagen toe met 61%.
 - o Van het mengsel met 32,5% betongranulaat, met te lage verdichtingsgraad, neemt de oppervlaktestijfheid tussen 0 en 28 dagen toe met slechts 28%.
 - o De eis uit de Standaard RAW Bepalingen 2015 voor de toename bedraagt bij een niet hydraulisch menggranulaat 25%. Voor een hydraulisch menggranulaat is de eis voor de toename 50%. Aan beide eisen wordt door alle mengsels met de juiste verdichtingsgraad voldaan.
 - o De stijfheidsontwikkeling gaat tot aan 128 dagen en waarschijnlijk zelfs daarna nog steeds door, hoewel het mengsel met 32,5% betongranulaat, met te lage verdichtingsgraad, na 56 dagen nog slechts weinig ontwikkeling vertoond.
- De invloed van minder beton in het menggranulaat op de stijfheid is duidelijk waarneembaar. Voor de mengsels met 15% betongranulaat en 32,5% betongranulaat kunnen rekenwaardes worden aangehouden van 200 respectievelijk 300 MPa, zie hoofdstuk 6. Voor menggranulaat met 50% betongranulaat is de rekenwaarde 400 MPa, en voor metselwerkgranulaat 150 MPa.



- Een verlaging van de funderingsstijfheid van 400 naar 300 MPa heeft een relatief beperkte invloed, ca 10-20 mm, op de benodigde asfaldikte (basis 115-260 mm afhankelijk van verschillende ontwerpgegevens) om dezelfde levensduur te verkrijgen.
- Deze verlaging van de funderingsstijfheid compenseren met grotere funderingsdiktes, ca 250 tot meer dan 1000 mm extra funderingsdikte t.o.v. de basisdikte van 250 mm, is economisch niet haalbaar.
- Bij een verdere verlaging van de funderingsstijfheid tot 200 MPa is ca 20-40 mm extra asfaldikte nodig t.o.v. een funderingsstijfheid van 400 MPa. Die extra benodigde asfaldikte kan enigszins verlaagd worden door een dikkere fundering toe te passen, maar het effect van een dikkere fundering van 200 MPa is zeer gering.
- Aanbevolen wordt om mogelijkheden te onderzoeken om de stijfheid van menggranulaat met lagere percentages betongranulaat zodanig te verhogen dat weer een ontwerp-stijfheid van 400 MPa mag worden gehanteerd. Daarbij kan gedacht worden aan het toevoegen van fijngemalen hydraulische slak.

Randvoorwaarden:

- Er is geen onderzoek gedaan naar andere dan de beschreven eigenschappen en er is geen onderzoek gedaan naar technische duurzaamheid.



Bijlage 1

Resultaten Stijfheid

(2 pagina's, exclusief voorblad)

>

Gemeten oppervlaktestijfheid EV _d in MPa													
Mengsel	Bepaling	Ouderdom in dagen											
		0	1	3	7	14	21	28	42	56	70	79	128
15%	1	60	57	65	69	75	77	80	84	87	93		97
	2	53	61	73	81	94	95	98	111	111	111		125
	3	43	57	66	71	77	79	80	86	90	90		90
	4	66	79	86	93	100	102	106	110	114	117		120
	Gem.	56	64	73	79	87	88	91	98	101	103		108
	Stdev.	9.9	10.5	9.7	11.0	12.4	12.2	13.1	14.8	14.0	13.3		17.1
32.5%	1	52	61	62	70	73	75	84	85	94	96		104
	2	49	60	63	70	76	75	83	88	101	91		92
	3	44	54	56	62	66	70	75	74	85	86		88
	4	48	49	52	57	63	66	69	71	89	94		95
	Gem.	48	56	58	65	70	72	78	80	92	92		95
	Stdev	3.3	5.6	5.2	6.4	6.0	4.4	7.1	8.3	6.9	4.3		6.8
50%	1	49	59	66	76	84	94	100	110	110	121		131
	2	58	69	77	92	103	116	130	141	143	147		172
	3	61	72	80	95	106	123	126	140	146	125		163
	4	44	57	65	76	85	94	98	105	114	161		137
	Gem.	53	64	72	85	95	107	114	124	128	139		151
	Stdev	7.9	7.4	7.6	10.2	11.6	15.0	16.8	19.2	18.9	18.9		19.8
32.5% 2 ^e opstelling	1	73	80	87	91	92	97	99	110	110	114	109	
	2	89	85	94	106	103	104	113	121	103	120	111	
	3	83	78	90	99	95	97	102	105	109	110	107	
	4	85	85	97	102	99	104	110	111	103	124	119	
	Gem.	83	82	92	100	97	101	106	112	106	117	112	
	Stdev	6.8	3.6	4.4	6.4	4.8	4.0	6.6	6.7	3.8	6.2	5.3	

Berekende E_{V2} uit oppervlaktestijfheid													
Mengsel	Bepaling	ouderdom											
		0	1	3	7	14	21	28	42	56	70	79	128
15%	1	128	124	133	138	144	147	150	155	158	165		170
	2	120	128	142	151	166	167	170	185	185	186		201
	3	109	124	134	140	146	149	150	156	161	161		162
	4	134	149	157	165	173	175	179	185	189	192		196
	Gem.	122	131	142	149	157	160	162	170	173	176		182
	stdev	10.8	12.2	11.1	12.4	14.5	13.7	14.6	17.0	16.0	15.3		19.2
32.50%	1	119	128	129	139	142	145	155	155	166	169		177
	2	115	128	131	139	145	144	154	160	174	162		164
	3	110	121	123	130	135	138	144	144	156	157		159
	4	114	115	119	124	130	134	138	140	161	166		167
	Gem.	114	123	126	133	138	140	148	150	164	164		167
	stdev	3.8	6.1	5.5	7.3	6.8	5.2	8.2	9.3	7.7	5.2		7.6
50%	1	115	126	134	145	154	166	173	184	184	197		208
	2	125	138	147	164	176	191	207	220	222	227		254
	3	129	141	150	167	180	199	202	218	226	201		244
	4	110	124	133	145	156	166	171	178	189	243		215
	Gem.	120	132	141	155	167	181	188	200	205	217		230
	stdev	8.7	8.1	8.8	11.9	13.4	17.1	18.9	22.1	21.8	21.8		22.2
32.50% 2e opstelling	1	142	150	158	163	164	169	172	184	184	189	183	
	2	161	156	166	180	176	178	187	197	176	196	186	
	3	153	148	162	171	168	169	175	179	183	184	181	
	4	156	156	169	175	172	177	184	186	176	200	194	
	Gem.	153	153	164	172	170	173	180	187	180	192	186	
	stdev	8.0	4.1	4.8	7.2	5.2	4.9	7.1	7.6	4.3	7.1	5.7	