

Het gebruik van graniet als basis voor meetmachines

Citation for published version (APA):

Hendriks, R. A. (1990). *Het gebruik van graniet als basis voor meetmachines*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Vakgroep Produktietechnologie : WPB; Vol. WPA0975). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1990

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Technische Universiteit Eindhoven
Faculteit der Werktuigbouwkunde
Vakgroep WPA

**Het gebruik van graniet als
basis voor meetmachines.**

R.A. Hendriks
Rapportnummer: WPA-0975

Literatuuronderzoek in opdracht van:
Prof. ir. J.M. van Bragt

Onder begeleiding van:
ing. J.J.M. Schrauwen

Eindhoven, november 1990

Samenvatting

Materiaal dat nodig is voor precisie-apparatuur, dient een aantal eigenschappen te bezitten voor deze toepassing. De stabiliteit, het thermomechanisch gedrag en bijvoorbeeld de kosten zijn enkele belangrijke factoren.

Graniet, en dan speciaal de soort gabbro, is een materiaal dat frequent wordt gebruikt als basis voor een meetmachine. Dit gabbro is een steensoort die een aantal geschikte eigenschappen bezit, die de nadelen relatief sterk overheersen.

Substitutie-materialen worden wel gezocht omdat graniet als een natuur-produkt toch niet onuitputtelijk is. Ook probeert men uiteraard materialen te vinden die gewoon geschikter zijn.

Tot op heden is er echter nog geen structureel beter materiaal gevonden. Wel komen er materialen naar voren die, zoals aluminium-keramiek, als (toekomstige) alternatieven kunnen worden aangemerkt.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
Hoofdstuk 1. Inleiding	4
Hoofdstuk 2. Het selecteren van materialen voor precisie-apparatuur	
2.1 Aspecten van thermisch gedrag.	5
2.2 Het gebruik van ratio's.	6
Hoofdstuk 3. Het gebruik van graniet in precisie-apparatuur	
3.1 Soorten graniet.	9
3.2 Bijzondere aspecten van natuursteen als precisie-materiaal.	10
3.3 Perspectieven voor graniet toepassingen.	12
Hoofdstuk 4. Substitutie-materialen voor graniet	
4.1 Keramische materialen.	13
4.2 Synthetisch graniet en cementbeton.	14
Hoofdstuk 5. Conclusies	16
Literatuurlijst	17

1. Inleiding

Aan de materialen die in meetmachines verwerkt zijn, worden specifieke eisen gesteld. Een aantal criteria, zoals lineaire uitzettingscoëfficiënt, stabiliteit, hardheid, maakbaarheid, mogelijkheden van bewerking en de kosten, zijn belangrijk voor deze toepassing. Ook zijn er eigenschappen die minder belangrijk, maar wel wenselijk zijn.

De belangrijkste fysische eigenschappen van een materiaal dienen uiteraard bekend te zijn voordat over de toepassing kan worden gedacht. Ook het verloop van de eigenschappen met betrekking tot de tijd en de temperatuur, ofwel de stabiliteit, zijn essentieel.

In 3D-meetmachines komen frequent onderdelen voor die uit graniet bestaan. Zo is de basis van een aantal meetmachines veelal hoofdzakelijk vervaardigd uit graniet.

Er wordt vaak graniet als basis in precisie-apparatuur gebruikt. De eigenschappen die hiervoor van belang zijn zullen worden besproken, evenals welke andere materialen daarvoor in aanmerking kunnen komen.

2. Het selecteren van materialen voor precisie-apparatuur

Materialen die in precisie-apparatuur worden gebruikt, voldoen meestal ruim aan de eisen die gesteld worden met betrekking tot de sterkte. Bij meetmachines zal de belasting in het algemeen niet erg hoog zijn.

Om de trillingsamplitude klein te houden, of zelfs te vermijden, zijn de materiaaldemping en de stijfheid belangrijke eigenschappen. Er wordt ook gestreefd naar hoge eigenfrequenties. Om dit te realiseren, zal de stijfheid zo groot mogelijk, en de massa zo klein mogelijk moeten zijn [$w_n = \sqrt{k/m}$].

Een belangrijke factor waarmee rekening gehouden dient te worden, is het gedrag van het materiaal onder invloed van warmtebronnen. Warmtebronnen veroorzaken temperatuurfuctuaties en -gradiënten.

Het inzicht in het thermomechanisch gedrag van materialen is essentieel om de geschiktheid te kunnen beoordelen voor precisie-apparatuur. Enkele materiaaleigenschappen en ratio's zijn hiervoor relevant.

2.1 Aspecten van thermisch gedrag.

Om de effecten van thermische expansie te neutraliseren, kan er ontworpen worden via twee principes. De een werkt met compensatie en de ander met eliminatie.

Compensatie kan worden bereikt door diverse materialen met verschillende lengten en uitzettingscoëfficiënten parallel en/of in serie te zetten. Uiteindelijke lengte verschillen worden dan zo opgeheven. Eliminatie houdt in dat gebruik wordt gemaakt van materiaal met een (zeer) kleine uitzettingscoëfficiënt.

In de praktijk zijn er een drietal redenen die ervoor kunnen zorgen dat de thermische toestand niet in evenwicht is:

- * De omgeving heeft temperatuurgradiënten (externe warmtebronnen).
- * De constructie bevat relatief constante warmtebronnen (motoren).
- * Er kunnen relatief snelle thermische veranderingen op en (verlichting of airco inschakelen, verplaatsing van de luchtlagers).

Door temperatuurgradiënten en/of veranderingen kunnen zowel lengte- als vormveranderingen optreden. Ook is het dan mogelijk dat er hoge spanningen in de constructie ontstaan. Deze zijn ongewenst vanwege het veroorzaken van instabiel gedrag.

2.2 Het gebruik van ratio's.

Om het thermische gedrag van een materiaal inzichtelijk te maken, worden er verhoudingen gehanteerd tussen een drietal specifieke thermische parameters.

- β = uitzettingscoëfficiënt
- k = warmtegeleidingscoëfficiënt
- c_p = specifieke warmtecoëfficiënt

De twee belangrijke ratio's die hieruit voortkomen zijn:

- * β/k : voor toepassing in precisie-apparatuur dient de waarde zo laag mogelijk te zijn.
- * c_p/k : $=1/d$, waarbij d de thermische diffusie is. Deze thermische diffusie moet bij voorkeur zo groot mogelijk zijn.

Als ratio voor de mechanische eigenschappen is gebruik gemaakt van:

- ρ = dichtheid
- E = elasticiteit modules

De ratio die hieruit voortkomt is:

- * ρ/E : een hoge waarde van deze ratio is gewenst.

In de volgende drie grafieken (Figuren 1,2 en 3 en Tabel 1) staan een aantal materialen vermeld die worden gebruikt in precisie-apparatuur. De pijlen geven de richting aan waarin de betreffende ratio gunstiger wordt. De gegevens zijn genomen bij een temperatuur van 293 K.

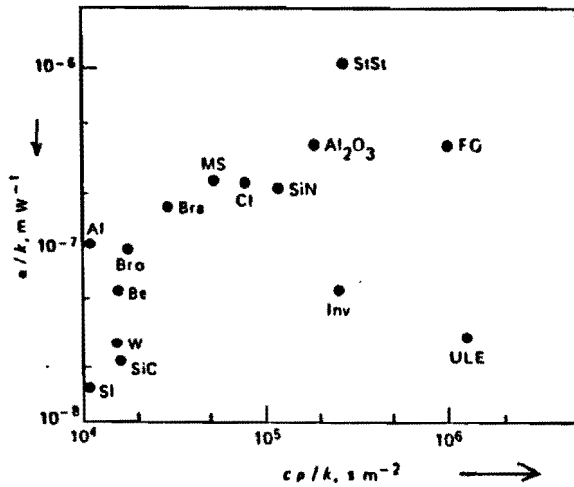


Fig 1 Material property map of expansion/conductivity against inverse diffusivity

Table 1. Key to symbols in Figs 1, 2 and 3.

Al	Aluminium (Duralumin is similar)
Al ₂ O ₃	Alumina
Be	Beryllium
Bra	70/30 brass
Bro	90/10 bronze
Cl	Cast iron
FG	Fused quartz
Inv	Invar
MS	Mild steel
Si	Single crystal silicon
SiC	Silicon carbide (reaction bonded)
SiN	Silicon nitride (reaction bonded)
SiSt	18/8 stainless steel
ULE	Ultra-low expansion glass ('Zerodur')
W	Tungsten

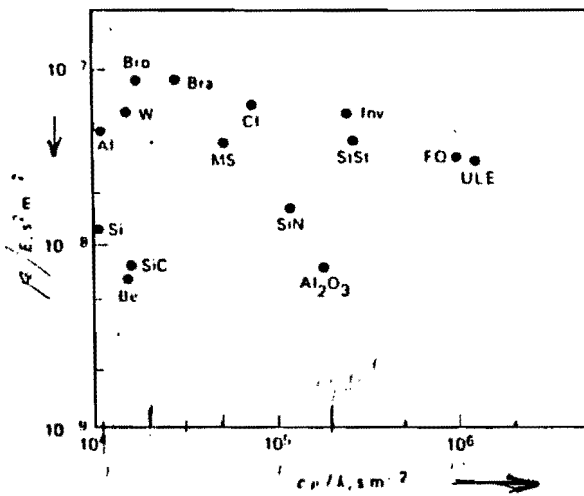


Fig 2 Material property map of inverse specific stiffness against inverse diffusivity

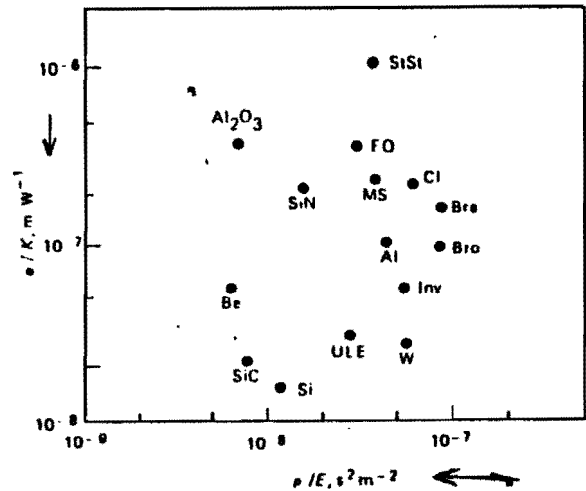


Fig 3 Material property map of expansion/conductivity against inverse specific stiffness.

Het thermisch gedrag van materialen die worden toegepast in precisie-apparatuur, is belangrijker dan het mechanisch gedrag. Natuurlijk is het ook essentieel dat de constructie zo stijf mogelijk is. Dit hangt dan zowel af van de E-modulus als van de constructie.

De mechanische eigenschappen veranderen vrijwel niet in de loop van de tijd of tijdens gebruik. De thermische situatie fluctueert tijdens gebruik echter wel.

Bij de beschouwingen over het thermisch gedrag en de materiaalkeuze worden drie mogelijke situaties onderscheiden:

- 1) Langzame temperatuur wisselingen vanuit de omgeving.
 - * Een geschikte materiaalkeuze is er dan een met een zo laag mogelijke uitzettingscoëfficiënt.
- 2) Een plotseling sterke warmtetoevoer.
 - * Als er dan weer snel naar een stabiele situatie gestreefd wordt, moet het materiaal een goede warmtegeleiding hebben.
- 3) Een onvermijdelijke constante warmtetoevoer.
 - * Dan is de ratio van lineaire uitzettingscoëfficiënt/ warmtegeleiding een maatstaf om de materiaalkeuze mee te bepalen.

De keuze van het toe te passen materiaal in precisie-apparatuur is afhankelijk van een aantal factoren. Zo is het thermomechanisch gedrag erg belangrijk vanwege de maat- en vormveranderingen die er door kunnen ontstaan. Maar er moet ook zeker rekening worden gehouden met de wijze van het vervaardigen en de kosten die daarmee gepaard gaan.

3. Het gebruik van graniet in precisie-apparatuur

In vele 3D meetmachines zijn bepaalde onderdelen uit "graniet" vervaardigd. De tafel en kolommen voor diverse geleidingen zijn bekende voorbeelden. Het graniet heeft voor deze toepassingen dus een aantal geschikte eigenschappen.

De verschillende soorten graniet en de kenmerken hiervan zullen verderop worden toegelicht. Ook worden materialen besproken die eventueel als vervanging van graniet kunnen dienen.

3.1 Soorten graniet.

Graniet wordt gevormd tijdens het stollingsproces van de gloeiende, vloeibare massa in de aardkorst. Er ontstaan dan verbindingen tussen de diverse elementen uit het magma, die bij een bepaalde temperatuur overgaan in een vaste kristallijne toestand. Bepaalde mineralen kristalliseren vroeger dan andere. De later kristalliserende mineralen kunnen hun oorspronkelijke vorm niet aannemen. Zij worden namelijk in hun groei beperkt door reeds aanwezige gekristalliseerde mineralen.

Een hoog SiO_2 -gehalte leidt vaak tot een grof kristallijne structuur. Een hoog gehalte van netwerk wijzigende elementen, zoals ijzer, mangaan, calcium en magnesium, levert een fijnere kristallijne structuur op. Dit leidt dan tot betere mechanische eigenschappen.

De benaming "graniet" wordt in het algemeen gebruikt voor meerdere materialen uit de groep stollings-gesteenten met uiteenlopende eigenschappen. Men kan onder andere de volgende soorten onderscheiden:

Graniet	- ca. 70% SiO_2 met een hoog K-gehalte.
Syeniet	- ca. 60% SiO_2 met veel Na.
Dioriet	- ca. 55% SiO_2 met veel Ca.
Gabbro	- ca. 50% SiO_2 met hoge Mg- en Fe-gehalten.
Peridotiet-	ca. 40% SiO_2 met Al en hoge Mg- en Fe-gehalten.

Het zou nu voor de hand liggen om vlakplaten te vervaardigen van Peridotiet vanwege de fijne kristalstructuur. Dit materiaal heeft echter een zeer hoog ijzer gehalte (ca. 30% van het totale volume), waardoor het erg zwaar is en vaak brosse breuk vertoont. Zeer geschikt daarentegen blijken Dioriet en met name Gabbro te zijn.

Er zijn twee soorten Gabbro, zwart/wit en zwart/wit met een groene glans. Beide zijn fijn, hoog gekristalliseerd en goed te bewerken. De laatste jaren wordt steeds meer Afrikaanse Gabbro gebruikt, omdat alleen dit in voldoende hoeveelheden en grotere afmetingen verkrijgbaar is. Daarnaast heeft dit materiaal een aantal voordelige eigenschappen ten opzichte van andere stollings gesteenten:

- Gunstige mineralogische samenstelling met als gevolg een betere oppervlakte ruwheid en een fijnere kristalstructuur.
- Hogere E-modules (hogere stijfheid).
- Lager uitzettingscoëfficiënt.
- Mindere water absorberend.
- Lagere dichtheid.
- Stabiliteit van het materiaal is beter.
- Geen aantasting door chemicaliën of oliën.

3.2 Bijzondere aspecten van natuursteen als precisie-materiaal.

Om een beeld te krijgen van de belangrijkste fysische eigenschappen van graniet, kunnen ze worden vergeleken met die van andere materialen (Tabel 2). De materialen waarmee wordt vergeleken, komen ook frequent voor in precisie-apparatuur.

	Staal	Aluminium	Graniet	Keramiek	Glas
Soortelijke massa [kg/m^3]*	$7,8 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^3$	$2,9 \cdot 10^3$	$3,7 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^3$
Elasticiteitsmodulus [N/m^2]	$2,1 \cdot 10^{11}$	$7 \cdot 10^{10}$	$4-8 \cdot 10^{10}$	$3,0 \cdot 10^{11}$	$5-10 \cdot 10^{10}$
Glijdingsmodulus [N/m^2]	$7 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$2-4 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^{11}$	
Constante van Poisson [-]	0,3			0,21	
Druksterkte [N/m^2]	$5-10 \cdot 10^8$		$6,8 \cdot 10^7$	$2,1 \cdot 10^9$	
Treksterkte [N/m^2]	$3-9 \cdot 10^8$	$4-10 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^8$	
$\frac{\text{Elasticiteitsmodulus}}{\text{Soortelijkemassa} \cdot 10^6}$ [-]**	27	25	14-27***	81	
Lineaire uitzettingscoëfficiënt [$\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$]	12	24	6	8	9,4
Warmtegeleidingscoëfficiënt [$\text{W/m}^\circ\text{C}$]	50	220	3,5	25	8

Tabel 2. Fysische eigenschappen van enkel materialen.

Het graniet wordt in vaste vorm gewonnen. De uitgekozen brokken materiaal, worden daarna bewerkt met veelal CNC gestuurde machines. Hierbij wordt dan gebruikt gemaakt van speciaal op de granietsoort afgestemde diamant gereedschappen. Om de vereiste kwaliteit oppervlakte ruwheid en vlakheid te krijgen, wordt het machinaal en handmatig läppen gedaan met poeders die diamant en siliciumcarbide bevatten. Afmetingen van $6\text{m} \cdot 2\frac{1}{2}\text{m} \cdot 1\text{m}$ zijn zonder meer te bewerken.

Graniet heeft als nadeel dat het water absorbeert. Dit leidt tot een zwelling ter plekke van de absorptie. Schoonmaken met water is derhalve uit den boze. Dit kan beter geschieden door het gebruik van een vluchtige vloeistof, zoals alcohol en/of parafines.

Verschillen van temperatuur in het werkstuk worden minder snel vereffend dan bij bijvoorbeeld gietijzer het geval is. De geleidingscoëfficiënt is dan ook erg laag. Zodoende is een zeer exacte klimaatregeling in de meetkamer vereist, vooral vanwege stralingsbronnen. Stralingsbronnen zijn onder andere verlichting, vloerverwarming en airconditioning.

Zo kan een vlakplaat bol gaan staan, wanneer er een temperatuurverschil heerst. De formule voor de berekening van die bolling wordt beschreven door:

- B = bolling
- L = lengte vlakplaat
- D = dikte vlakplaat
- β = uitzettingscoëfficiënt
- $T_1 - T_2$ = temperatuurverschil tussen boven- en onderzijde van de plaat

$$B = L^2 * \beta * (T_1 - T_2) / (8 * D)$$

3.3 Perspectieven voor graniet toepassingen.

Er worden steeds hogere eisen gesteld aan de nauwkeurigheid van bewerkingen en metingen. Enkele granietsoorten, waarvan gabbro een van de belangrijkste is, zullen voorlopig nog toegepast kunnen worden in de basis van precisie-apparatuur. Dit komt vanwege een aantal gunstige eigenschappen zoals:

- de goede oppervlaktebewerkbaarheid.
- kleine tolerantie afwijkingen over het hele gebied.
- de kleine oppervlakte ruwheid.
- de grote stabiliteit.
- de lage uitzettingscoëfficiënt.
- relatief gunstig kostenplaatje ten opzichte van materialen met vergelijkbare eigenschappen.

De nadelen zoals, de vochtgevoeligheid, de afhankelijkheid van de natuur als herkomst, en de niet eenvoudige vervaardiging die ook niet goedkoop is, wegen hier (nog) niet tegen op.

4. Substitutie-materialen voor graniet

Graniet wordt tegenwoordig nog vaak gebruikt als basis voor meetmachines. Er wordt wel gezocht naar een beter alternatief, maar echte doorbraken zijn hier nog niet bereikt.

Bij het zoeken naar vervangende materialen concentreert de aandacht zich op een paar groepen. De voornaamste is die van de keramische materialen. Maar er wordt ook onderzoek verricht naar het toepassen van harsbeton ofwel synthetisch graniet op epoxybasis.

4.1 Keramische materialen.

Voor het toepassen van keramische materialen in de geometrische meettechniek, waar grote nauwkeurigheidseisen worden gesteld, wordt hoofdzakelijk aluminium keramiek gebruikt. Dit bestaat voor 87% tot 99,7% uit aluminiumoxyde, waaraan nog enkele stoffen toegevoegd worden.

Het aluminium keramiek voldoet ten opzichte van de andere keramische materialen het best aan de criteria die hier worden gesteld. De relatief gunstige prijs speelt hierin een belangrijke rol.

De sterkte en de hardheid van keramische materialen onderscheiden zich in gunstige zin van die van andere materialen (Tabel 2). Daarbij zijn ze nog bijzonder glad en vlak af te werken tot in submicrometer gebied. Verder vertonen ze zeer goede eigenschappen op het gebied van stabiliteit en slijtage.

De lage dichtheid gecombineerd met de hoge stijfheid zijn vooral een voordeel bij dynamische toepassingen zoals bijvoorbeeld een bewegende kolom van een 3-D meetmachine. Lichte en stijve constructie-elementen komen de nauwkeurigheid ten goede vanwege de kleine traagheidskrachten.

Vocht en de meeste chemicaliën hebben geen invloed op de materiaalstructuur en de oppervlaktekwaliteit. Ook de gevoeligheid voor temperatuurschommelingen zijn laag, wat een relatief lage lineaire uitzettingscoëfficiënt oplevert.

Het bewerken van dit keramiek is niet eenvoudig. Vanwege de grote hardheid zijn er hiervoor diamantgereedschappen nodig. Dit heeft tot gevolg dat de kosten voor precisie produkten van aluminium keramiek relatief hoog liggen ten opzichte van conventionele materialen (b.v. graniet, gietijzer, staal).

Restspanningen zijn door een gloei- en afkoelingsbehandeling verdwenen. Er resulteert een zeer stabiel constructiemateriaal dat geschikt is voor toepassingen waarbij het gaat om nauwkeurigheden tot op enkele micrometers.

Glas en glaskeramiek zijn materialen met een dicht en zeer glad oppervlak. Het wordt gebruikt voor kleine referentie vlakken. Bepaalde glaskeramische materialen hebben zelfs een zeer lage uitzettingscoëfficiënt. Een nadeel is dat het een zacht materiaal betreft (krassen), wat ook erg bros en duur is.

4.2 Synthetisch graniet en cementbeton.

Harsbeton ofwel synthetisch graniet op epoxybasis is een nieuw en nog weinig bekend materiaal. Inmiddels wordt het reeds gebruikt voor het machinebed van zeer nauwkeurige slijpmachines.

Het materiaal is gemakkelijk vormbaar en heeft goede dempingseigenschappen. De demping gaat echter vaak samen met plastische vervorming.

Als sterk nadeel zijn te noemen de lage warmtegeleidings- en zeer hoge uitzettingscoëfficiënt (Tabel 3). Vooral bij plaatselijke temperatuurverschillen kunnen bollingen op het oppervlak ontstaan. Deze kunnen relatief behoorlijke onnauwkeurigheden introduceren bij bijvoorbeeld meetmachines. Om deze effecten te vermijden moeten hogere eisen gesteld worden aan de klimaatbeheersing.

Over synthetisch graniet is echter nog veel onbekend. Zo bestaat er nog weinig kennis over de stabiliteit op langere termijn, het veranderen van het hars, de invloeden van het licht en de temperatuurwisselingen.

Cementbeton is een materiaal wat wordt gebruikt voor fundaties. Een zeer groot nadeel is dat het materiaal niet stabiel, en zelfs na tien jaar nog niet uitgewerkt is. Het ongebonden cement blijft reageren met vocht.

Een ander nadeel is dat de warmtegeleidingscoëfficiënt bijzonder laag is, waardoor een goede klimaatbeheersing wordt vereist. Er is op het moment al een draaibank waarvan het bed (fundament) vervaardigd is uit gewapend cementbeton, maar het wordt nog niet toegepast bij meetmachines.

	Modulus of elasticity N/mm ²	Density kg/m ³	Coefficient thermal expansion °K ⁻¹ · 10 ⁻⁶	Thermal conduc- tivity Wm ⁻¹ °K ⁻¹	Tensile strength N/mm ²	Compressive strength N/mm ²
Cast iron (grade 17)	117,000	7,210	12	75	230	
Epoxy granite (granitan S100)	39,000	2,450	14	0.8	20	120
Polymer concrete (Motema)	42,000	2,300	17		11	120
Natural granite (Garbo/Impala)	125,000	2,900	5	3	14	250

Tabel 3. Fysische eigenschappen van synthetisch graniet.

5. Conclusies

Over graniet als basis voor meetmachines, en over materialen die het graniet kunnen vervangen voor die toepassing, is niet veel literatuur beschikbaar. Bij de sectie Meten van de vakgroep WPA is een groot gedeelte van de beschikbare informatie bekend en aanwezig.

Enkele speciale soorten graniet worden frequent als basis voor meetmachines gebruikt. Zeer geschikt voor deze toepassing is gabbro.

Er worden ook wel meetmachines geproduceerd met een basis van ander materiaal dan graniet. Bijvoorbeeld van aluminium-keramiek. Dit materiaal heeft een aantal voordelen, maar ook een aantal sterkere nadelen ten opzichte van graniet. Er zijn tot nu toe dan ook nog geen echt geschiktere substitutie-materialen gevonden.

Er ontbreekt een standaardnorm, die aan materialen voor de basis van precisie-apparatuur, kan worden gesteld. Dus welke eigenschappen belangrijk zijn en in welke mate, zijn niet vastgelegd. Dit is ook niet eenvoudig vanwege het feit dat de vereiste eigenschappen afhankelijk zijn van de constructie van de machine. Zo komen in de praktijk namelijk een aantal verschillende typen meetmachines voor die ieder zijn gebouwd volgens een bepaald principe.

Literatuurlijst

- * König, W., Popp, M., Precision machining of advanced ceramics - a challenge in production technology. Ultra precision manufacturing engineering, Proceedings of the international congress for ultra precision technology in Aachen/FRG., Edited by; Weck, M., Hartel, R., Springer-Verlag, Aken, mei 1988.
- * Knol, P.H., Szepesi, D., Huybers, M., New design features of a fully hydrostatic ultra precision CNC turning machine, type super-microturn CNC. Ultra precision manufacturing engineering, Proceedings of the international congress for ultra precision technology in Aachen/FRG., Edited by; Weck, M., Hartel, R., Springer-Verlag, Aken, mei 1988.
- * Creyke, W.E.C., Sainsbury, I.E.J., Morrell, R., Design with non-ductile materials. Applied science publishers, Londen, 1982.
- * Nijs, J.F.C. de, Constructie en bouw van een 3D-meetmachine. WPA rapportnummer 0796, Eindhoven, september 1989.
- * Velde, S. van de, Onderzoek van het thermomechanisch gedrag van 3D-meetmachines. Eindhoven, oktober 1989.
- * Boogers, A.W.M., Kampen, M. van, Graniet met haar eigenschappen en toepassingen. Pelt & Hooykaas B.V. "Precision Granite", Helmond, 1989.
- * Beek, J.W. van, Bruin, W. de, Toto precisie aluminium keramiek. Schut, Groningen, 1988.
- * Chetwynd, D.G., Selection of structural materials for precision devices. In: Precision engineering, Butterworth & Co, Coventry, 1987.
- * Huis in 't Veld, A.J., Metaalmatrix composieten. In: Materialen, nr.8, Apeldoorn, 1990.
- * Pelt & Hooykaas B.V., Product info; Precision granite, Helmond, 1990.