

**Materialen van de toekomst
(not) safe for designers? - IX**

Tempelman, Erik

Publication date

2020

Document Version

Final published version

Published in

De Constructeur

Citation (APA)

Tempelman, E. (2020). Materialen van de toekomst: (not) safe for designers? - IX. *De Constructeur*, 60(12), 42-46.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Materialen van de toekomst

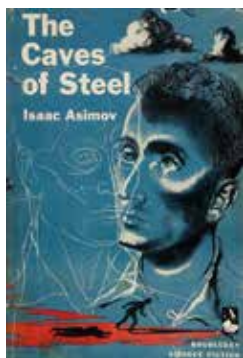
(NOT) SAFE FOR DESIGNERS? – IX

Wat voor materialen gaan we in de toekomst gebruiken voor onze constructies? Met die vraag moet u bij de wetenschap niet aankloppen! Wetenschappers zijn immers superspecialisten en voor vragen over materialen in de bredere zin hebt u een generalist nodig – net als voor toekomstvoorspellingen. Daarom een ander vertrekpunt: dat van de sciencefiction.

ERIK TEMPELMAN, ADVIESBUREAU ERIKTEMPELMAN.COM, UNIVERSITAIR HOOFDDOCENT TU DELFT – INDUSTRIEEL ONTWERPEN

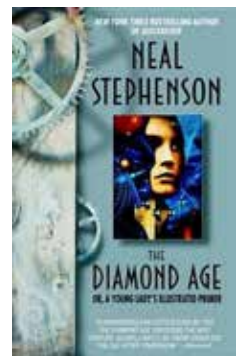
The Caves of Steel

In *The Caves of Steel* (1951) schetste *grand old man* van de SF Isaac Asimov ons een verre toekomst waarin negen miljard mensen onze aarde bevolken, levend in gigantische steden die met stalen koepels zijn afgeschermd van de buitenwereld. Dat inwonertal leek de schrijver indertijd ongetwijfeld enorm, maar zoals we nu weten zat zijn voorspelling niet ver naast de laatste projecties. En als je dan toch koepels gaat bouwen, dan is ook de keuze voor staal op zich een goede: staal is sterk en taai, het is goedkoop, er is genoeg van te vinden en het is prima te recycleren. Staal, en met een bescheiden extensie, de metalen, vormen onze eerste groep constructiematerialen van de toekomst.



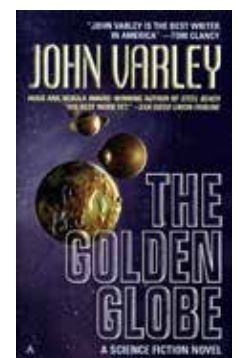
The Diamond Age

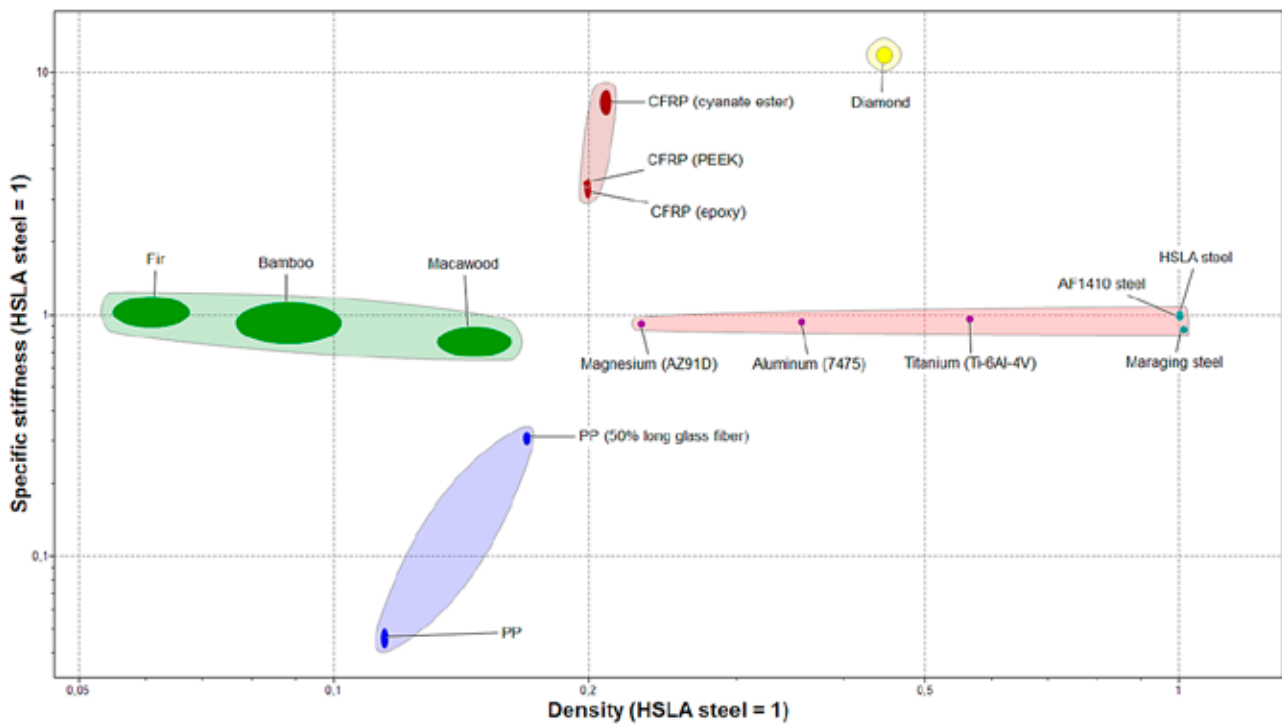
Cyberpunk-schrijver Neal Stephenson presenteert ons in *The Diamond Age* (1995) een toekomst waarin met nanotechnologie werkelijk alles snel en goedkoop gemaakt kan worden. Wel, waarom dan geen diamant als constructiemateriaal: het is licht van gewicht en is zo'n beetje de hardste stof die we kennen. Ergens in dit boek komen we dan ook een zeppelin tegen, serene zwevend boven de oceaan, met onderin de gondel een doorzichtige, diamanten dansvloer – niet voor lezers met hoogtevrees! Dit materiaal vormt, samen met koolstofvezels, grafeen en andere verschijningsvormen van koolstof, onze tweede groep materialen.



The Golden Globe

Meesterverteller John Varley neemt ons in *The Golden Globe* (1998) mee naar een toekomst tussen de planeten, waar mensen wonen in reusachtige roterende ruimtestations. Deze stations worden bijeen gehouden met spinrag en opnieuw: waarom ook niet? Afhankelijk van wie u het vraagt is dit materiaal vijf tot tien maal sterker dan staal, bij gelijk gewicht. Om er ge-





noeg van te produceren, stelt Varley voor om met genetische manipulatie spinnen te maken van letterlijk olifanteske proporties – een griezelig vooruitzicht. Spinrag, en de natuurlijke materialen in de bredere zin, vormen onze derde groep.

Rainbows End

Wat krijg je als je materialen voorziet van een netwerk van sensoren en actuatoren? In *Rainbows End* (2006) heeft SF-genie Vernor Vinge deze innovatie voorzien. Het resulterende ‘cyberstuff’ – geen materiaal-aanduiding van van Vinge maar van ondergetekende) kan de erop werkende belastingen precies meten en actief tegenwerken. Feitelijk bestaat zo’n systeem vandaag de dag al, bijvoorbeeld in de vorm van de actieve ophangsystemen voor grote, ultradunne telescoopspiegels. Vinge extrapoleert de technologie naar toepassing in aardbevingsbestendige gebouwen. Dankzij een soort *internet-of-materials* kan zo’n gebouw ook ‘gehackt’ worden – maar laat ik de plot niet voor u verklappen! Cyberstuff is onze vierde en laatste groep materialen.



Vier SF-romans, vier materiaalparadigma’s: staal en de metalen, diamant en andere vormen van koolstof, natuurlijke materialen, en cyber-stuff. Welke van deze *science fictions* worden ooit *engineering facts*? We gaan het zien.

De specifieke stijfheid en het soortelijk gewicht – de materialen vergeleken.

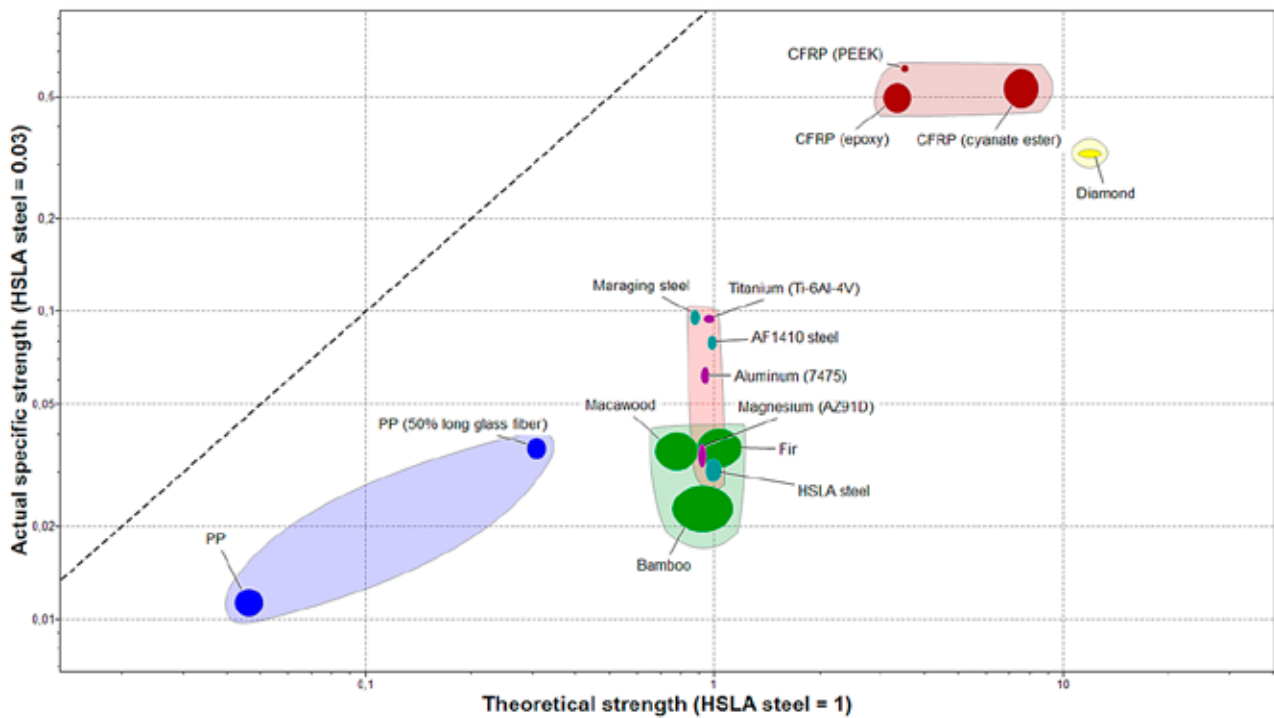
De fundamentele oorsprong van stijfheid

Materialen, ook constructiematerialen, moeten aan taal van eisen voldoen. Omwille van de ruimte beperken we ons hier tot drie basiseigenschappen, waarvan afbeelding 1 de eerste betreft: de stijfheid. Wat u ziet is een vergelijk tussen diverse materiaalgroepen, met op de verticale as de stijfheid E gedeeld door de dichtheid ρ . Immers, constructiematerialen moeten in de regel niet alleen stijf zijn maar ook licht van gewicht, en vandaar deze ‘indicator’ E/ρ .

Op de horizontale as staat de dichtheid uitgezet, zodat we de verschillende materialen makkelijk uit elkaar kunnen houden. Blauw zijn diverse plastics, groen enkele houtsoorten, rood de metalen, bruin composieten en geel diamant. Merk op dat beide assen een logaritmische schaal hebben en dat alle getalswaarden genormaliseerd zijn door de waarden van HSLA-staal (*High Strength, Low Alloy*): deze staalsoort zelf zit dus op de coördinaten 1, 1.

We zien onder meer dat kunststoffen weliswaar licht zijn maar ook zeer flexibel: zelfs glasgevuld blijft polypropreen nog op respectvolle afstand van de metalen – die verrassend genoeg allemaal ongeveer even goed scoren¹. Dit laatste komt door de gekozen indicator E/ρ : aluminium is bijvoorbeeld drie maal lichter dan staal maar ook drie maal minder stijf. Zouden we kijken naar specifieke buigstijfheid (indicator: $\sqrt{E/\rho}$) dan ‘wint’ aluminium wel van staal. Echter, met voldoende vormvrijheid kunnen we buiging, evenals andere ongunstige belastingsvormen (zie NSFD – IV), effectief uitsluiten. Al het materiaal wordt dus op pure trek en druk belast, en dan geldt E/ρ als de maatstaf. En vormvrijheid hebben we vandaag de dag al genoeg, dankzij

¹ Het exotische metaal beryllium scoort wél ruim hoger dan staal, maar is zeer zeldzaam – zowel op aarde als daarbuiten. Beryllium constructies van enig formaat zijn derhalve geen SF maar Fantasy.



3D-printers, laat staan in de toekomst. Een fundamenteel probleem is het hoe dan ook niet. ρ

Waar is het spinrag?

Kijken we bovenin de grafiek, dan zien we dat diamant de beste prestaties biedt. Koolstofcomposieten zitten daar opmerkelijk dicht bij in de buurt, al hebben de gekozen varianten wel alle vezels in één richting liggen: ze mogen dus ook alleen in die richting worden belast. En waar is het spinrag? Wel, sommige natuurlijke materialen doet het verrassend goed: zie hoe hout en bamboe vrijwel hetzelfde scoren op E/ρ als de gekozen metalen. Dat belooft wat – maar spinrag stelt in dit opzicht zwaar teleur: het is uiterst flexibel en zou niet in maar *onder* de grafiek komen te staan. Voor welke eigenschappen dit materiaal dan ook is geëvolueerd, stijfheid is daar niet bij.

Keurig verklaard

De in afbeelding 1 weergegeven verschillen zijn inmiddels door de materiaalkundigen keurig verklaard. Stijfheid vindt zijn fundamentele oorsprong in (a) de intensiteit van de aantrekkingskracht tussen de atomen dan wel moleculen, en (b) in de grootte van die deeltjes. Zo zijn plastics relatief flexibel omdat ze door Van der Waalskrachten bijeen worden gehouden – en die krachten zijn veel

De theoretische versus werkelijke sterkte.

zwakker dan bijvoorbeeld de metaalbinding (in metalen, uiteraard), de ionische binding (in bijvoorbeeld glasvezels), of de covalente binding (in diamant en koolstofvezel). En aangezien we intussen alle soorten deeltjes² en bindingen wel zo'n beetje kennen, kunnen we vaststellen dat diamant ook in de toekomst de *chart-topper* zal blijven. Maar wat doet grafeen dan, zult u zeggen? Ja, dat lijkt nog beter te scoren – alleen is het een '2D' materiaal, en daar kun je het begrip stijfheid niet 1-2-3 op loslaten.

Niet beter?

Kunnen we echt niet beter dan diamant? Jawel: cyber-stuff heeft theoretisch een vrijwel oneindig grote stijfheid, en zou dus *boven* de grafiek uitkomen. Het concept werd voor het eerst in de jaren '80 omschreven³, vindt zoals gezegd reeds toepassing, en zou in de (nabije?) toekomst breder kunnen worden ingezet. Vanuit het perspectief van stijfheid is deze *mechatronics meets materials*-technologie beslist veelbelovend.

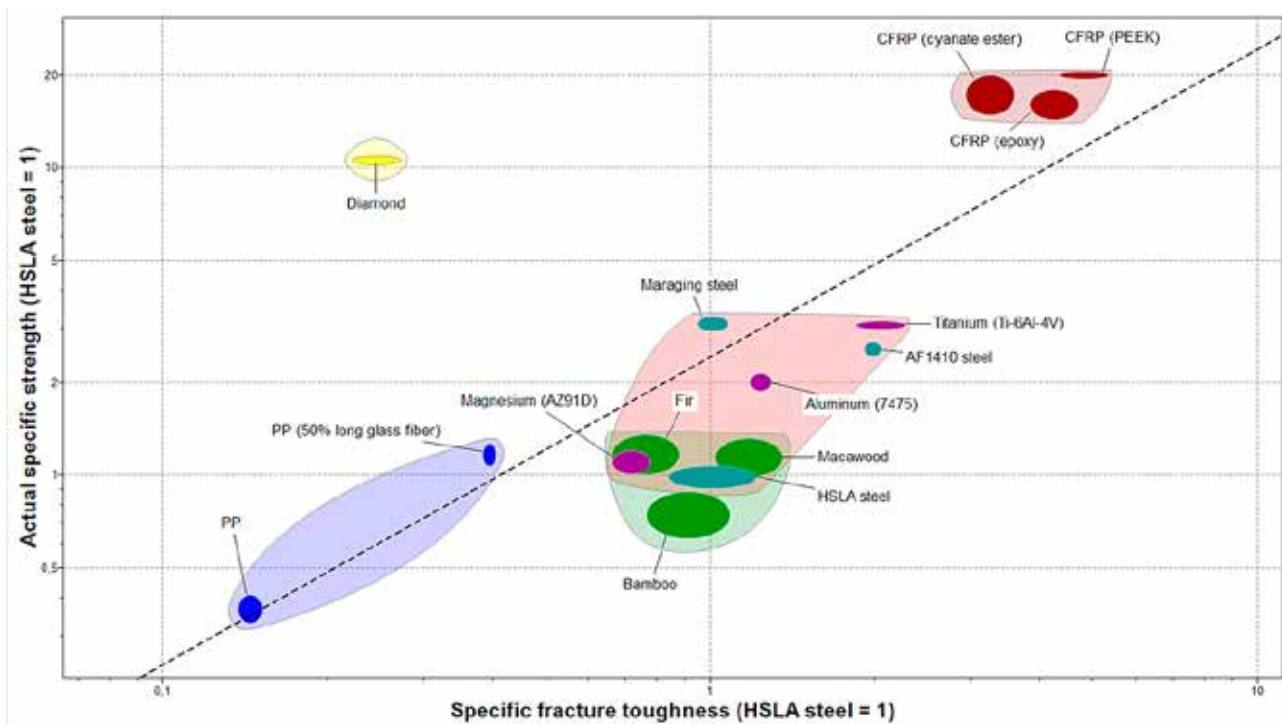
Sterkte: theorie en praktijk

Naast stijfheid verwachten we van een constructiemateriaal ook sterkte. Welnu, afbeelding toont een vergelijk van de *theoretische* sterkte van de eerder gekozen materialen tegen hun *werkelijke* sterkte. Bei-

2 Voor de fijnproever: ja, er komt af en toe een nieuw trans-uraan atoom het lab uit. Maar nooit voor lang (ze zijn tot dusverre allemaal radioactief), en bovendien zijn deze nieuwe elementen zeer zwaar. Uitgesloten dus als constructiemateriaal van de toekomst – elke toekomst.

3 'Active Structures' by Soong et al., Journal of Structural Engineering (1987), vol. 113, nr. 11, pp. 2290-2302

4 Vanuit de kerftaaiheid en de stijfheid van een materiaal kunnen we de eigenschap afleiden die in het Engels *toughness* heet, ook wel *work-of-fracture* en *fracture energy* genaamd. De Nederlandse vertaling zou "stevigheid" kunnen zijn, zoals uitgelegd in 'Stevigheid als materiaaleigenschap?', Constructeur 5, 2018.



den zijn weer gedeeld door de dichtheid, want die is nog steeds van belang. Opnieuw zijn de schalen logaritmisch en zijn alle getalswaarden genormaliseerd naar de theoretische sterkte van HSLA-staal.

Taaigheid – de vergeten eigenschap

Naast stijfheid en sterkte verwachten we van een constructiemateriaal ook taaigheid. Het is een ondergewaardeerde en slecht begrepen eigenschap, die echter van groot belang is. Specifiek hebben we het dan over de *kerftaaigheid* (Engels: *fracture toughness*) dat wil zeggen de spanning die een materiaal kan verdragen in de aanwezigheid van een kleine kerf of ander soort imperfectie⁵, alvorens het bros faalt. Het is dus iets anders dan de (taai) breukrek, en ook anders dan het energie-absorberend vermogen van een materiaal, onder elastische of plastische vervorming. Vermoeiingscheuren, onvolkomenheden in de materiaalproductie zoals krimpcheuren of ingesloten deeltjes, per ongeluk of expres aangebrachte schade, het werkt allemaal als een kerf met een zekere lengte en vorm. Zo'n kerf kan er toe leiden dat het materiaal bij een zeker spanningsniveau plotsklaps bros breekt, ook als het materiaal zich in de afwezigheid van die kerf wel taaï zou gedragen. Wat we nu willen is dat deze 'brosse-breuk-spanning' hoger ligt dan de vloeigrens van ons materiaal, want dan speelt het probleem geen rol.

⁵ Om precies te zijn: een 1-mm scheurtje in het oppervlak, loodrecht op de belasting. Zou het een scheurtje niet op maar in het materiaal zitten, dan moet het 2 mm lang zijn om hetzelfde effect te bewerkstelligen.

Bros of taaï? De materialen opnieuw vergeleken.

Niet buigen maar barsten

Echter, afbeelding 3 laat zien dat dit niet altijd lukt, en dan is het een geval van 'niet buigen maar barsten'. Het plaatje verdient enige uitleg. Op de horizontale as staat de kerftaaigheid per eenheid gewicht, opnieuw genormaliseerd middels delen door de bijbehorende waarde voor HSLA-staal. Op de verticale as staat de sterkte per eenheid gewicht – feitelijk hetzelfde als in de vorige grafiek. De schuine stippellijn representeert de brose-breuk-sterkte die het materiaal zou hebben in de aanwezigheid van een scherp scheurtje van 1 mm lang⁶. Het resultaat is dit: alles wat onder de lijn zit, faalt eerder taaï dan bros, en voor alles boven de lijn is het omgekeerde het geval.

Oppassen!

Nu zien we waarom massief diamant, los van de prijs of andere eigenschappen, geen goed constructiemateriaal is: het is weliswaar stijf en sterk, maar heeft totaal onvoldoende taaigheid en kan derhalve niet met kerfjes dan wel spanningsconcentraties van welke vorm dan ook omgaan⁶. Ook bij de andere 'verschijningsvormen van koolstof' is het oppassen. Plastics falen (bij de gekozen scheurlengte!) maar al te makkelijk bros, en koolstofcomposieten doen dat zeker – daar moeten we dus middels een veiligheidsfactor rekening mee houden. En ook het

⁶ Glas heeft hetzelfde probleem, maar voor glasplaat is er een soort van oplossing: door temperen kunnen we drukspanningen in het oppervlak van een glasplaat aanbrengen, in balans gehouden door trekspanningen in de kern, waardoor de slechte kerftaaigheid minder problematisch wordt.

‘wondermateriaal’ grafeen heeft overigens een belabberde kerftaaiheid: slechts zo’n 4 MPa·√m, terwijl gewoon staal makkelijk het tienvoudige haalt. Oersterk, maar je hebt er constructief gezien bar weinig aan.

Weer de materiaalkunde

Weer levert de materiaalkunde ons de verklaring. Taaiheid blijft niet zozeer met plasticiteit van doen te hebben, maar met het vermogen om genoeg energie te kunnen absorberen alvorens een scheur energetisch gezien instabiel wordt en met een klap doorgroeit. Bij metalen zorgen diezelfde dislocaties daar voor – dat hierbij plastische dat wil zeggen blijvende vervorming optreedt, en we een metaal dus kunnen buigen, smeden en zo meer, is feitelijk bijvangst. Dit verklaart ook dat je op de duur in de problemen komt als je die dislocaties te zeer verhin-dert te bewegen. Afbeelding 3 toont zo dat staalsoort AF1410 bij een 1-mm equivalent scheur-tje nog lang niet bros zal falen – maar het iets sterke-maraging staal doet dat wel. Ook de taaiheid van titanium valt op, en is deel van de reden waarom dit bijzondere metaal zo gewild is voor constructies, mits de prijs geen bezwaar is natuurlijk.

Weer geen spinrag?

Spinrag is weer niet aangegeven, gewoon omdat er geen betrouwbare data voorhanden zijn. Maar, gezien de toepassing – insecten vangen, die naar we mogen aannemen hard hun best zullen doen om zich los te knagen – kunnen we rekenen op vol-

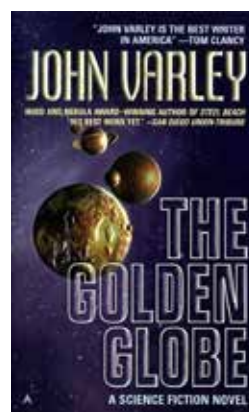
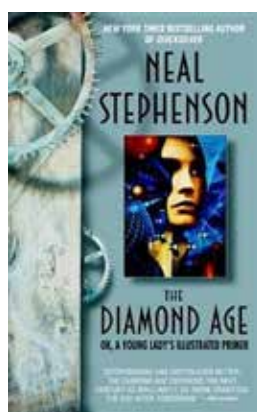
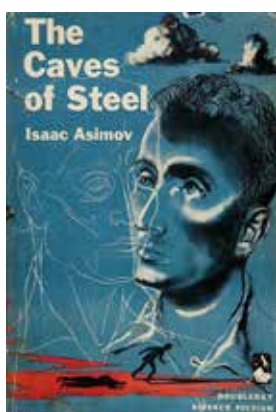
doende taaiheid. Ook voor cyberstuff is geen kerftaaiheid bekend en deze is ook niet 1-2-3 te geven: constructies van dit SF-materiaal zullen immers dezelfde waarde hebben als het basismateriaal waaruit ze zijn opgebouwd. Mogelijk kan de aanwezige sensoriek nog wel een waarschuwend signaal geven als er een scheurtje wordt ontdekt (‘self monitoring’ dus), en kan dit materiaalconcept de taaiheid van de componenten nog overschrijden. De toekomst zal het ons leren.

Resumerend: de materialen nogmaals vergeleken

Vier paradigma’s uit de SF – welke wordt engineering fact? De tabel vat de resultaten samen. Isaac Asimov zat met staal goed op weg, diamant wordt het niet maar koolstofcomposieten wel, spinrag valt door de mand, en Vernor Vinge’s cyberstuff representeert een veelbelovend nieuw materiaal-idee dat wel eens de uiteindelijke winnaar zou kunnen worden.

We sluiten deze NSFD-bijdrage af met een verrassend bericht. Vanuit het Graphene Flagship-programma berichtten onderzoekers in september 2017 over een doorbraak: grafeen vermengd met spinrag blijkt zeer goede mechanische eigenschappen te bieden. Dus, wie weet is er toch nog hoop voor Neal Stephenson’s ‘diamant’, als het maar de krachten bundelt met de spinnen van John Varley? ●

Dit was de laatste bijdrage in de NSFD serie over constructies en materialen. In 2021 gaan we door met productie. Tot dan!



	Staal	Diamant	Spinrag	Cyberstuff
Stijfheid	+	++	--	++(?)
Sterkte	+	++	++	+(?)
Taaiheid	++	--	+(?)	++(?)