

Materialer for ballistisk beskyttelse

Stian Sksiudalen, Ove Dullum, Svein Morten Bergsrud og Erik Wulvik

Forsvarets forskningsinstitutt/Norwegian Defence Research Establishment (FFI)

26. mars 2009

FFI-rapport 2009/00651

101801

P: ISBN 978-82-464-1559-8

E: ISBN 978-82-464-1560-4

Emneord

Panser

Ballistisk beskyttelse

Metaller

Fibermaterialer

Keramiske materialer

Transparente materialer

Komposittmaterialer

Materialmodeller

Godkjent av

Ove Dullum

Prosjektleder

Jan Ivar Botnan

Avdelingssjef

Sammendrag

Metaller har fra tidenes morgen vært brukt både som våpen og beskyttelse. Teknologi for bearbeiding ble tidlig utviklet, og råvarene var tilgjengelige. Metaller er de materialene, innenfor beskyttelsessammenheng, med desidert lavest kostnad. Dette skyldes selvfølgelig anvendeligheten og derav den høye etterspørselen og produksjonsmengden.

Fordelen med metaller er at de i seg selv både kan være en bærende struktur, samt ugjøre beskyttelsen. Metaller er relativt enkle å bearbeide og enkle å reparere ved skade. Evnen til å fange kinetisk energi er høy. Dessuten vil metall være mer eller mindre intakt utenfor de områdene som blir direkte truffet av trusler som prosjektiler, fragmenter osv. Metaller har en stor ulempe, som tilsynelatende ødelegger for et ellers perfekt materiale i beskyttelsessammenheng; vekten. Fremtidens utsikter når det gjelder metaller er også noe usikker [1]. Jordens lagre begynner å minke, samtidig som gjenvinning ikke er nok til å demme opp for den økende etterspørselen. Ut fra dagens forbruk av metaller, kan man beregne hvor lenge lagrene vil kunne fortsette å forsyne industrien. Tallene er skremmende. Eksempelvis vil jern (Fe) være oppbrukt i løpet av 50 år! Hvilke andre materialer finnes?

Fibermaterialer som benyttes til ballistisk beskyttelse er som oftest spesielle organiske fibre som er fremstilt i en industriell prosess og kalles filamentfibre. Disse er bygd opp av svært lange molekylkjeder som er dannet ved sammenkobling (polymerisering) av kortere molekyler; ”byggesteinene”. Tråd som er utgangspunktet for oppbygging både av ballistisk duk og kompositter, kan bestå av mange hundre filamentfibre. Ikke organiske fibre som for eksempel glassfibre, benyttes oftest bare i matriser.

Aramid er en fellesbetegnelse for flere typer aromatiske polyamider (”aramider”). Det er i hovedsak to produsenter som har bidratt til utviklingen av disse fibre for ballistisk beskyttelse; DuPont og Akzo Nobel (Teijin) med produktnavn hhv. Kevlar og Twaron. Aramid var den første organiske fiberen som egnet seg til ballistisk beskyttelse, hvis en ser bort fra ballistisk Nylon. Ulempene ved aramidfibre er at de svekkes når de utsettes for UV stråling.

Utviklingen av polyetylen til ballistiske formål ble startet på midten av 1980-tallen, og ble kommersialisert av Honeywell (Allied Fibers). De er satt sammen av et meget stort antall etylenenheter og har derfor meget høy molekylvekt. Denne fiberen betegnes derfor UHMWPE som står for Ultra-High Molecular Weight PE. Kommersielle navn er Dyneema, Spectra og Tensylon.

PBO er en syntetisk fiber opprinnelig utviklet ved Wright Research and Development Centre fra 1960 tallet og fremover. PBO ble patentert på 1980-tallet. Patentet ble kjøpt opp av Toyobo, Japan, og fiberen ble første gang markedsført i 1998 under navnet Zylon. Fiberen vil svekkes under påvirkning av fuktighet ved høyere temperaturer, samt UV stråling. Denne egenskap har medført en heftig debatt om hvorvidt denne fiberen er egnet for beskyttelsesformål.

PIPD (M5) er en fibertype som lenge har vært under utvikling, men som ennå ikke er kommersielt tilgjengelig. Utvikling av denne fiberen startet opp ved Akzo Nobel i Holland i perioden 1995-1998. Fiberen antas å kunne oppnå bedre materielle og ballistiske egenskaper enn de andre

ballistiske fibrene. Det hersker noe usikkerhet rundt den faktiske produksjonen når rapporten skrives.

Keramikk forbindes i første rekke med baderomsflis, middagsservise og sanitærartikler. Disse artiklene er fremdeles de som dominerer keramikkindustrien. Behovet for mer avansert keramikk er imidlertid stort i elektronisk industri. I tillegg er også keramikk som ballistisk beskyttelse blitt en økende produktkategori. Dette er resultat av en økende trussel med utstrakt bruk av såkalte panserbrytende prosjektiler.

Keramikk har flere gode egenskaper som utnyttes i ballistisk beskyttelse. Det har lavere tetthet enn stål. Keramikk har videre høyere E-modul enn stål, som betyr at materialet er stivere. I tillegg er keramikk hardere, og kan overgå hardheten til prosjektilene (truslene). Ulempen med keramikk er at materialet ikke er spesielt tøyelig. Det resulterer i at keramikk sprekker opp, og dermed mister sin mekaniske styrke. Denne effekten kan derimot motvirkes ved å støtte opp keramikklplatene med "tøylige" materiale på baksiden – en såkalt backing. Backingen kan bestå av stål, aluminium, komposittplater eller andre myke (sett i forhold til keramikk) materialer.

Det finnes flere keramikktyper som brukes i forbindelse med ballistisk beskyttelse. Alumina er det vanligste og på sett og vis det "simpleste" av de forskjellige keramene som benyttes. Alumina har god virkeevne til lav kostnad. Silisiumkarbid har bedre yteevne enn alumina med ca 10 % vektreduksjon. Silisiumkarbid blir mer og mer viktig med tanke på beskyttelse mot prosjektiler med harde kjerner, til tross for høyere tetthet enn eksempelvis borkarbid. Borkarbid er det tredje nest hardeste materiale man kjenner til, samtidig som det er meget lett. Likevel er borkarbid et sprøtt materiale. Dette har ført til at materialet lett sprekker opp og ikke får så god ballistisk ytelse som hardheten skulle tilsi. Titandiborid har i enkelte sammenhenger vist noe lavere ballistisk ytelse på vektbasis enn silisiumkarbid og borkarbid mot panserbrytende prosjektiler, men viser seg å yte likeverdig eller bedre mot andre typer prosjektiler. Sammenligner man ytelse mot tykkelse, er titandiborid det beste materialet. Andre aktuelle keramikktyper er aluminiumnitrid, wolframkarbid, titankarbid og silisiumnitrid.

I et kjøretøy er man avhengig av utsyn. I en totalløsning for pansring av kjøretøy vil det derfor være et behov for transparente flater; vinduer. Laminert glass er en lagvis oppbygning av glass og plast, og er det dominerende beskyttelsestiltaket i pansrede kjøretøy. Glasskeramer er amorfe materialer som i utgangspunktet er produsert som vanlig glass. Gjennom varmebehandling får man en krystallisering, slik at materialene får keramiske egenskaper. Glasskeramer finnes i rikt omfang på ethvert kjøkken; som topp på komfyr og koke- og bakeutstyr, eksempelvis ildfaste former.

Transparente keramiske materialer har de siste 20 årene blitt utviklet for bruk i vinduer. Fordelen med å bruke keramiske materialer, i kombinasjon med eksempelvis glass eller plast, er økt beskyttelsesgrad på vektbasis. I tillegg vil en kunne redusere tykkelsen på pansrede vinduer, som kan være ønskelig for å øke volumet av kabinen. Den harde overflaten til keramikk vil i tillegg være mer motstandsdyktige mot miljøpåvirkninger som riper, kjemikalier, sollys osv. Ulempen med transparent keramikk er de foreløpige høye produksjonskostnadene.

Tre typer transparent keramikk er dominerende. Safir er rent monokrystallinsk aluminiumoksid. Fordelen med monokrystallinske materialer er graden av gjennomsiktighet, som ofte er overlegen de polykrystallinske keramene. Spinel er polykrystallinsk magnesiumaluminiumoksid ($MgAl_2O_4$). I realiteten er dette alumina (Al_2O_3) som inneholder grupper av MgO. Spinel pulver (råvaren) er kommersielt tilgjengelig, og vil dermed kunne produseres av flere leverandører, som fører til et konkurrerende marked. ALON er en forkortelse for aluminiumoksynitrid ($Al_2O_3 \cdot 2/3 AlN$). Dette er også en polykrystallinsk keramikk basert på alumina, men med grupper av aluminiumnitrid. Surmet har eiendomsretten til ALON pulver (råmateriale) som dermed ikke kan produseres på det åpne markedet. ALON har vist seg vanskelig å få tak i. I tillegg rapporteres det om høye kostnader av de som får tilgang til materialet. Bruk av transparent keramikk kan gi en vektreduksjon på opp mot 50 % i forhold til standard ballistisk (laminert) glass.

Kompositt panser er etter hvert blitt så avansert at det erstatter metallisk panser på lettere og mer mobile stridskjøretøyer hvor kravet til lav vekt er dominerende. Kompositt panser forbindes ofte med fiberkompositter. Dette er bare halve virkeligheten. Kompositt panser kan ha en meget kompleks oppbygging, bestående av både fiberkompositter, men også keramiske kompositter. Et fellestrekk i oppbyggingen er et hardt sjikt ytterst, og med et tykt sjikt av glass eller organisk fibermateriale som oftest i en plastmatrise, innerst (kalt spall-liner). Eksempler på keramiske kompositter er kermet (keramikk i metallmatrise), keramikk i plastmatrise eller blandinger av to eller flere keramiske materialer.

Keramiske tandemsystemer er multiple lag av keramikk og metall / fiberkompositt. Mellom hvert lag legges et isolasjonsmateriale. Dette skal hindre sjokkbølger i å forplante seg fra ett lag til det neste, og dermed at keramikken i de neste lagene sprekker opp før evt. prosjektilet treffer. Resultatet er en bedre ytelse enn en tilsvarende mengde materiale i kun to homogene lag. Ulempen vil være økt bruk av plass (volum).

Oppdagelser av stadig nye materielle egenskaper, og nye områder for anvendelse, har ført til en knippe interessante (gjerne eksotiske) materialer som kan bli aktuelle å ta i bruk i fremtidens beskyttelser mot ballistiske trusler. Eksempler på dette er amorfe metallegeringer, auksetiske materialer, nanokeramikk, autenitisk nitrogenstål, skjærfølsomme væsker og superbainitt. Noen er allerede testet ut for formålet med svært lovende resultater.

Å svare helt konkret på hvilke typer materialer man skal velge for å beskytte seg til et visst nivå, er veldig vanskelig. Dette spørsmålet avhenger både av økonomi, vekt, konfigurasjon (kjøretøy eller personell etc.) og selvfølgelig trussel. Fiberkompositter eller metaller er velegnet alene til de aller laveste truslene. Øker trusselnivået til å innebære panserbrytende prosjektiler, må man ta i bruk hardere materialer som keramikk i kombinasjon med metaller eller komposittmaterialer. Dagens teknologi er kommet så langt at, så lenge de økonomiske rammer tillater det, må det tenkes alternativt i forhold til "gammeldagse" materialer som stål og laminert glass.

English summary

This report gives an overview over various materials, used for ballistic protection. The report starts with the well known and widely used metals. This includes rolled homogeneous armour (RHA), which often is used in comparison when new materials or new structural concepts are considered.

The metals are more and more often replaced by fibre, fibre composites and ceramics. This is a direct result from the performance versus weight trade-off. In the last decades, armour piercing (AP) projectiles are more often seen in the operational theatre. To arrest these threats, without exceeding the weight tolerance, the metals have to be replaced or at least supplemented by more efficient materials.

In the last two decades, new transparent materials have developed and become very interesting in the weight versus performance assessment. The transparent ceramics are still somewhat expensive, however the prices will decrease if the military market is demanding and willing to use these materials in a larger scale. This report dedicates therefore a section for the transparent materials with focus on the transparent ceramics. For those who are curious, exotic materials are also described. The materials listed are believed to become important in future protection systems.

To understand how the various materials behave during ballistic penetration, the report focuses on material parameters and how they are connected to the energy absorbing phenomena. For completeness a few material models, and their parameters for various materials, are described in order to understand the role and complexity of finite element simulations. Simulations are important to understand the threat and target interaction.

Ballistic test data are represented when suitable and necessary.

Innhold

1	Innledning	11
2	Ballistisk beskyttelse	11
2.1	Kvalitetsmål for beskyttelse	11
3	Materialparametere – en oversikt	12
4	Metaller	16
4.1	Generelt	17
4.2	Metallers egenskaper til ballistisk beskyttelse	18
4.3	Stål	19
4.3.1	Homogent valset stål (RHA)	19
4.3.2	Hardt homogent stål (HHS)	20
4.3.3	Overflateherdet stål	21
4.4	Aluminium	23
4.5	Titan	24
4.6	Sammenligning av metallene	25
5	Fibermaterialer	27
5.1	Generelt	27
5.2	Egenskaper ved fibre til ballistisk beskyttelse	28
5.3	Aramid	29
5.3.1	Kevlar	29
5.3.2	Twaron	30
5.3.3	Andre polyamider	32
5.4	Polyetylen (PE)	32
5.4.1	Dyneema og Spectra	32
5.4.2	Tensylon	34
5.5	PBO (ZYLON)	34
5.6	M5 (PIPD)	36
5.7	Glassfiber	37
5.8	Andre fibre	38
5.8.1	Vectran (LCP)	38
5.8.2	Silke	39
5.8.3	Karbon nanorør	39
5.8.4	Keramiske fibre	41
5.9	Sammenligning av fibre	42

6	Keramikk	44
6.1	Generelt	44
6.2	Produksjonsmetoder	45
6.2.1	Sintring	45
6.2.2	Trykksintring (HPS)	45
6.2.3	Varm isostatisk pressing (HIP)	46
6.2.4	Reaksjonssintring (RB)	46
6.2.5	Etterbehandling	46
6.3	Egenskaper ved keramikk for ballistisk beskyttelse	46
6.3.1	Ballistisk styrke og materialparametere	47
6.3.2	Parametrenes innvirkning ut fra en hierarkisk struktur	50
6.4	Typer keramikk	51
6.4.1	Alumina	51
6.4.2	Silisiumkarbid	52
6.4.3	Borkarbid	54
6.4.4	Titandiborid	54
6.4.5	Aluminiumnitrid (AlN)	55
6.4.6	Wolframkarbid (WC)	56
6.4.7	Titankarbid (TiC)	57
6.4.8	Silisiumnitrid (Si ₃ N ₄)	57
6.5	Oversikt – Noen egenskaper for keramer i forhold til andre materialer	58
7	Transparent panser	60
7.1	Generelt	60
7.2	Glass	64
7.3	Glasskeramer	67
7.3.1	Kvarts og silika	67
7.3.2	Litiumdisilikat (Transarm)	68
7.4	Plastmaterialer	68
7.4.1	Termoplast	69
7.4.2	Herdeplast	73
7.5	Transparente keramiske materialer	73
7.5.1	Safir	74
7.5.2	Sub-µm alumina	76
7.5.3	Spinel	76
7.5.4	ALON	78
7.5.5	Sammenligning av transparente keramiske materialer	79
8	Kompositter	81

8.1	Fiber i plastmatrise	83
8.1.1	Glassfiber kompositt	84
8.1.2	Dyneema / Spectra	85
8.1.3	Kevlar/Twaron	86
8.2	Keramiske kompositter	87
8.2.1	Keramikk i metallmatrise (kermet)	87
8.2.2	Biomorfe keramiske materialer	88
8.2.3	Keramiske blandinger	89
8.3	Tandemsystemer av keramikk og metall	90
9	Eksotiske materialer	91
9.1	Amorfe metallegeringer	91
9.2	Auksetiske materialer	92
9.3	Nanokeramikk	94
9.4	Austenitisk nitrogenstål	95
9.5	Skjærfølsomme væsker	95
9.6	Superbainitt	97
10	Konstitutive modeller	98
10.1	Johnson-Cook-modellen	98
10.2	Zerilli-Armstrong-modellen	99
10.3	Johnson-Holmquist-modellen	100
	Referanser	104
	Appendix A Database for våpenvirkninger	110
A.1	Tabeller	110
A.2	Spørringer	113
A.3	Skjemaer	114
A.4	Søkefunksjoner	118
	Appendix B Keramikk, materialelegenskaper og produsenter	119
B.1	Alumina	119
B.2	Silisiumkarbid	120
B.3	Borkarbid	121
B.4	Titandiborid	122
B.5	Aluminiumnitrid	123
B.6	Silisiumnitrid	124

1 Innledning

Hensikten med denne rapporten er å gi en oversikt over aktuelle ballistiske beskyttelsesmaterialer. Rapporten fokuserer på de materialene som er aktuelle til bruk på lettere kjøretøyer og hvor trusselen fra håndvåpen og mellomkalibervåpen er dominerende.

Notat vil i første rekke presentere forskjellige materialer som er aktuelle for beskyttelsesformål; hvilke egenskaper slike materialer har; hva som er deres styrker og svakheter; og hvordan de produseres. Det gis også en del kvantitative data for hvor gode materialene er mot forskjellige trusler og i hvilken grad materialer kan kombineres for å gi best mulig ytelse i forhold til vekten. Det er lagt vekt på å gi de mest relevante mekaniske data og hvordan materialets konstitutive likning er. Den sistnevnte er nødvendig når materialet skal brukes i hydrokoder og annen software hvor materialets oppførsel skal simuleres.

Å presentere rene ballistikkdata i form av hvilken beskyttelse som kreves for å stanse et gitt prosjektil på en gitt avstand, er ikke hovedfokus i denne rapporten, men slike data er tatt med i den grad det er hensiktsmessig.

2 Ballistisk beskyttelse

Hovedformålet for nesten alle former for ballistiske beskyttelse er å gi høyest grad av ballistisk beskyttelse for minst mulig vekt. I enkelte få tilfeller er det også et poeng av beskyttelse skal ta minst mulig plass; dvs. være så tynt som mulig. I siste instans må det man sparer i form av vekt og eventuelt volum avveies mot kostnaden av en beskyttelse.

2.1 Kvalitetsmål for beskyttelse

Panserstål eller RHA (Rolled Homogeneous Armour) er en standard for beskyttelsesmaterialer. Det er derfor vanlig at kvaliteten av ethvert beskyttelsesmateriale relateres til RHA. For å beskrive graden av vektbesparelse brukes ofte relasjonen:

$$E_M = \frac{\rho_{RHA} P_{RHA}}{\rho_{mat} P_{mat}}, \quad (2.1)$$

hvor ρ_{mat} er tettheten av det materialet man vil karakterisere og P_{mat} er nødvendig tykkelse av materialet for å beskytte mot en viss trussel. ρ_{RHA} og P_{RHA} er tilsvarende størrelser når kun RHA brukes som beskyttelse; altså referanseverdiene for den aktuelle trusselen. E_m kalles for massefaktoren eller masseeffektiviteten (MEF), og er forholdet mellom arealtetthetene til henholdsvis RHA og materialet som karakteriseres.

For en lagdelt beskyttelse bestående av flere materialer blir uttrykker for E_m som følger:

$$E_m = \frac{\rho_{RHA} P_{RHA}}{\sum_i \rho_i P_i}, \quad (2.2)$$

der summasjonen går over alle materialer i sammensetningen. En E_m på eksempelvis 3, betyr at ved å bruke det aktuelle materialet i stedet for stål, vil vekten reduseres med en faktor 3 for samme grad av beskyttelse.

På helt tilsvarende måte kan man definere volumfaktoren eller volumeffektivitetsfaktoren som

$$E_v = \frac{P_{RHA}}{P_{mat}}, \quad (2.3)$$

hvor en E_v på eksempelvis 3 betyr at panserets tykkelse er 1/3 av tykkelsen til et stålpanser med samme beskyttelsesevne.

Verken E_m eller E_v er størrelser som er gitt en gang for alle for et gitt materiale. Faktorene er avhengige av hva slags prosjektil man bruker, hvilken hastighet det har, hvilken vinkel det treffer med og eventuelt hvilken sammensetning et lagdelt panser har. Rekkefølgen av materialer i et lagdelt panser vil også ha stor betydning.

3 Materialparametere – en oversikt

Når man vurderer materialer, og særlig veier materialer opp mot hverandre, benyttes en rekke materialparametere. Alle kjenner og har en anelse av hva som menes med tetthet, hardhet osv. Andre parametere som Poisson-tall og flytegrense er kanskje ikke like kjent. For at leseren skal få full glede av denne rapporten, vil vi kort beskrive alle materialparametere som nevnes i denne rapporten, samt hvilke betydning de har for ballistisk beskyttelse.

Materialkonstant	Enhet	Beskrivelse
Absorpsjonskoeffisient (Lys)	% m ⁻¹	Et mål på andelen av energi (lys) som absorberes / ikke slippes igjennom et materiale. En faktor som er lineært avhengig av materialets tykkelse, og har betydning for transparent panser.
Absorpsjons (Vann)	%	Vektøkningen i et materiale som skyldes opptak av vann, sett i forhold til vekten av tørket / tørt materiale. Vil ha betydning for materialer som mister ytelse i fuktige omgivelser.
Bruddfasthet	Pa	Se strekkfasthet.
Bruddforlengelse	1 (%)	Den tøyningen et materiale har ved brudd. Dette er viktig eksempelvis ved bruk av fibere i ballistisk beskyttelse. Energiopptaket vil avhenge av hvor mye en fiber kan tøyes.

Bruddmodul	Pa	Den spenningen (kraft pr areal) som skal til for å få materialet til å ryke i en bestemt konfigurasjon.
Bruddstyrke (K_{IC})	Pa m ^{1/2}	Evnen i et materiale, som inneholder en revne, til å motstå videre sprekkdannelse. Ved lav bruddstyrke kan materialet karakteriseres som sprøtt, mens høy bruddstyrke betyr at materialet oppfører seg duktilt eller fleksibelt. Denne parameteren vil kunne fortelle materialets evne til å ta opp energi fra prosjektiler.
Brytningsindeks	1	Forholdet mellom lyshastigheten i et bestemt materiale, og vakuum (luft). Brytningsindeksen sier noe om hvordan lyset brytes gjennom materialet.
Bulkmodul	Pa	Et materials evne til å motstå uniform kompresjon; hvor stort trykk som må til for å oppnå en gitt volumendring. Dette vil si noe om styrken og energioptaket til et materiale som utsettes for høyt trykk eksempelvis fra prosjektiler.
Bølgehastighet	m/s	Hastigheten som de molekylære bevegelsene forplanter seg med, i et materiale. Dette blir ofte omtalt som lydhastigheten i et materiale, selv om lydbølger kun er en bestemt bølgeform (longitudinal bølge). Høyere bølgehastighet betyr en økt spredning og dermed økt energioptak i et materiale; men vil også innebære at et større område blir ødelagt.
Bøyestyrke	Pa	Hvor mye et materiale kan bøyes før brudd oppstår. Dette er mer en mekanisk egenskap, enn egenskap i forbindelse med ballistisk beskyttelse.
CTE	K ⁻¹	”Coefficient of Thermal Expansion”. Se termisk utvidelseskoeffisient.
Duktilitet	J m ⁻²	Se seighet.
E-modul (E)	Pa	Elastisitetsmodulen sier noe om materialets stivhet; forholdet mellom en-akset spenning og en-akset tøyning. En materialeegenskap som sier noe om energioptaket i et materiale, samt materialets evne til å endre form under påtrykket, men uten å få en permanent endring (elastisk område).
Flytegrense	Pa	En grense som sier når et materiale begynner å deformere plastisk, dvs. å få en permanent forandring. Ballistisk sett er flytegrensen spesielt interessant for materialer hvor mesteparten av energioptaket er plastisk deformasjon.
Garndimensjon	tex (dtex) / den	tex er et mål som angir tyngden i gram (g) pr 1000 m. dtex eller decitex er antall gram (g) pr 10.000 m. Det er også vanlig å bruke denier (forkortet ”den” eller ”d”). Dette er antall gram (g) pr 9000 m.

Glasstransisjonsvarme	°C (K)	Temperaturen hvor amorfe materialer som glass og plast blir sprø / harde under kjøling eller duktile ved oppvarming. Denne temperaturen angir hvilket temperaturområde materialet kan benyttes som ballistisk beskyttelse.
Hardhet	Div.	Hardhet er et mål for materialets evne til å motstå plastisk deformasjon. Hardhet kan også reflektere stivhet, herding eller motstand mot riper. Det finnes mange hardhetsskalaer, dvs. målemetoder. De mest kjente er Brinell, Vickers, Rockwell og Knoop.
HEL	Pa	”Hugoniot Elastic Limit”. Dette er overgangen, målt i påtrykt spenning, mellom området for elastisk bølgeforplantning og plastisk bølgeforplantning. Dette er den dynamiske versjonen av flytegrensen.
Kompresjonsmodul	Pa	Se bulkmodul
Kompresjonsstyrke	Pa	Grensen for når et materiale ikke lenger motstår en-akset kompresjonskraft. Materialet vil ved dette punktet gå fra intakt til brudd / knust tilstand. Dette har stor betydning for motstand mot ballistiske prosjektiler.
Kornstørrelse	m	Sier noe om størrelsen til kornene i et polykrystallinsk materiale, eksempelvis keramikk. Størrelsen på kornene (krystallene) er med på å bestemme hardhet.
Krymp	l (%)	Forskjellen i avstand mellom to punkter på en fiber, eksempelvis i en vevd tekstil, sammenlignet med avstanden mellom de samme punktene når fiberen er strukket ut (definert gjennom en bestemt strekkraft). Dette forteller hvordan fiberen bukler seg [2].
Lydhastighet	m/s	Se bølgehastighet.
LOI	%	LOI står for “Limiting Oxygen Index”. Denne verdien angir minimum prosentandel med oksygen som må til for at en forbrenning skal opprettholdes. Hvis LOI indeksen er mindre enn 21 % (som er andelen oksygen i luft) betyr det at materialet brenner uten tilførsel av oksygen.
Poisson-tall (ν)	1	Hvis et materiale blir strukket eller presset sammen i en retning, vil dimensjonene i de to andre retningene endres. Poisson-tallet sier noe om størrelsen av denne mekaniske egenskapen. Et Poisson-tall kan eksempelvis være 0,25. Anta et kubisk materiale presses sammen i en retning, dvs. <i>reduserer</i> utstrekningen. Da vil de to andre retningene <i>øke</i> med 0,25 av den reduserte utstrekningen.

Porøsitet	%	Volumandel av gasslommer i et materiale. Ved ballistisk beskyttelse vil masse ofte være avgjørende for et materials beskyttende egenskap, og gasslommer vil derfor være u hensiktsmessig. Dette vil også føre til en volumøkning mot for samme masse i et kompakt materiale (0 % porøsitet).
Renhet	%	Forteller hvor godt man har rensset materialet for uønskede elementer. Renhet er viktig for hardhet, samt gjennomskiktigheten i transparente materialer.
Seighet	J m ⁻²	Seighet er et mål for hvor mye energi (per volum) et materiale er i stand til å ta opp før det bryter sammen. Helt konkret er seigheten arealet under den totale strekk-tøyningskurven. Et eksempel på en slik kurve er vist i Figur 5.15. En nært beslektet verdi er slagseighet.
Skjærmodul (<i>G</i>)	Pa	Forholdet mellom skjærspenning og skjærtøyning. Skjærmodulen er derfor et mål på materialets evne til å motstå krefter som virker i planet. Skjærmodulen er viktig for å forstå energioptak i materialet.
Skjærstyrke	Pa	Grenseverdien for hva materialet tåler av skjærkrefter før brudd. Dette har betydning både for mekanisk styrke, men også for hvordan materialet oppfører seg under høye spenningskonsentrasjoner som under ballistisk penetrasjon.
Slagseighet	J m ⁻²	Materialets evne til å ta opp energi under bruddannelsen / oppsprekking. Denne materialstyrken kvantifiseres ved tester der hurtig deformasjon gjør at materialet ikke har nevneverdig plastisk deformasjon forut for bruddannelsen. Viktig for å kvantifisere energioptaket ved ballistisk penetrasjon. Se også seighet.
Smeltepunkt	°C (K)	Definerer temperaturen hvor materialet går fra fast til flytende form; faseovergang. Har størst betydning i bearbeidelse av materialer.
Spesifikk varmekapasitet	J kg ⁻¹ K ⁻¹	Hvor my varmeenergi som trengs for å øke temperaturen en grad for en kilo materiale.
Strekkfasthet (σ)	Pa cN/dtex	Angir hvor høy last i strekk (kraft pr areal) som et materiale tåler før det ryker. Dette har mest betydning for de mekaniske egenskaper, men har også betydning for ballistisk beskyttelse ved bruk av fiber.
Strekkforlengelse	%	Se tøyning
Strekkstyrke	Pa	Se strekkfasthet.
Termisk utvidelseskoeffisient	K ⁻¹	Strekkforlengelse på grunn av temperaturforandring. Dette har først og fremst betydning for materialers kompatibilitet.

Tetthet (ρ)	kg m^{-3}	Masse pr volumenet.
Torsjonsstyrke	Pa	Materialers evne til å motstå vridning i et plan før brudd. Dette vil være viktig for både energiopptak men også for mekanisk styrke.
Transmisjon	%	Sier noe om andelen lys (energi) som slipper gjennom et materiale med en gitt tykkelse. Det er forholdet mellom innfallende og transmittert intensitet. Dette er viktig for transparente materialer.
Transmisjonsgrense	%	Se transmisjon.
Tøyning	l (%)	Materialets endring i en retning pga en påtrykt last, i forhold til dimensjon ved starttilstand hvor ingen krefter virker på materialet.
Varmeledningsevne	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Hvor mye varmeenergi et materiale kan lede pr sekund, pr lengdeenhet og for en gitt temperatur.
Weibull modul	1	Et mål for distribusjonen av sprekker i et materiale. Den representerer uniformitet i et gitt utvalg, og sier dermed noe om forventet styrke basert på sprekke dannelse. Høy verdi gir høy uniformitet.
Youngs modul	Pa	Se E-modul.

4 Metaller



Figur 4.1 Tysk rustning, ca 1480.

4.1 Generelt

Metaller har i flere århundrer vært brukt både som våpen og beskyttelse (Figur 4.1). Teknologi for bearbeiding ble tidlig utviklet, og råvarene var tilgjengelige. Metaller er de materialene, innenfor beskyttelsessammenheng, med desidert lavest kostnad. Dette skyldes både anvendeligheten og tilgjengeligheten; og derav den høye etterspørselen og produksjonsmengden.

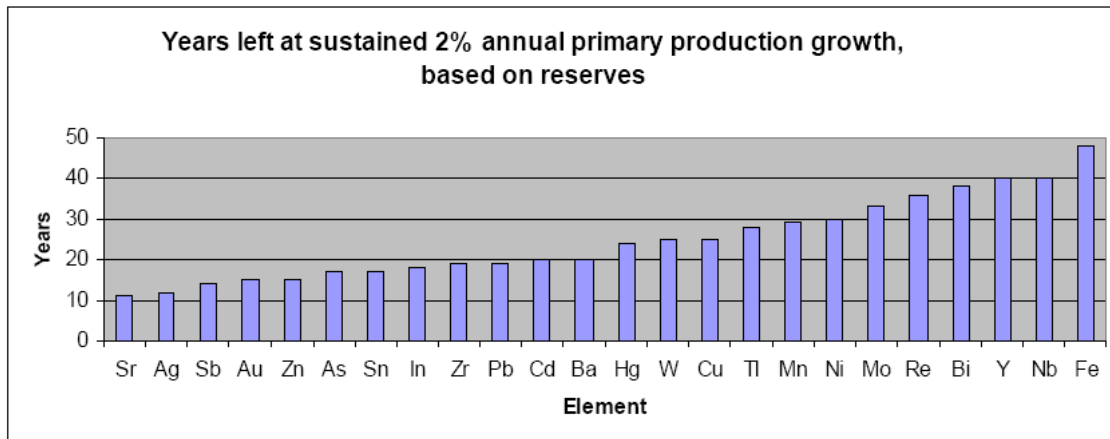
Det finnes utallige utgaver og kvaliteter av metaller. Det vil ikke være rom for å gå inn på alle typer i denne rapporten. Vi vil nøye oss med å nevne de kvalitetene som gjennom tidene, og i dag, er mest brukt til beskyttelse.

Fagfeltet er fortsatt i utvikling. Det gjelder først og fremst nye legeringstyper med økt ytelse sett i forhold til en eller annen ønsket kvalitet. Man ser også en økende evne til å herde metaller, dvs. øke hardheten (Brinell tallet).

Fordelen med metaller er at de i seg selv både kan være en bærende struktur, samt ugjøre beskyttelsen. Metaller er relativt enkle å bearbeide og enkle å reparere ved skade. Evnen til å fange kinetisk energi er høy. Dessuten vil metall være mer eller mindre intakt utenfor de områdene som blir direkte truffet av trusler som prosjektiler, fragmenter osv. Metaller har en stor ulempe, som tilsynelatende ødelegger for et ellers perfekt materiale i beskyttelsessammenheng; vekten.

I følge Diederer [1] er jordens reserver av flere typer metaller i ferd med å gå tomme. Med reserver menes her de forekomstene som er økonomisk driveverdige ved det tidspunktet vurderingen finner sted. Utvinning av metaller krever store mengder energi. Jo lavere kvalitet en forekomst har jo høyere energimengde kreves. Av økonomiske grunner utvinnes til enhver tid de forekomstene som er lettest tilgjengelig; altså de med høyest kvalitet og dermed krever lavest energiforbruk. Ettersom energimangelen i verden ser ut til å bli et økende problem, så vil antall driveverdige forekomster ikke øke i takt med etterspørselen. Gjenvinning, eller bruk av andre typer metaller (substitusjon), er foreløpig ikke nok til å demme opp for dette gapet.

Figur 4.2 gir en oversikt over en rekke elementer, og antall år med gjenværende reserver. Kalkulasjonene er basert på en årlig økning i forbruket på 2 %. Eksempelvis vil jern (Fe) være oppbrukt i løpet av 50 år!



Figur 4.2 En oversikt over antall gjenværende år av jordens reserver for forskjellige elementer. Beregningene er basert på 2 % årlig økning i forbruket. Merk at jern (Fe) antas å være brukt opp i løpet av ca 50 år. Figuren er hentet fra Diederer, TNO [1].

4.2 Metallerers egenskaper til ballistisk beskyttelse

Metaller beskytter oss mot trusler ved å absorbere energi. Dette skjer først og fremst ved elastisk og plastisk deformasjon. Dette betyr at E-modulen og flytegrensen er viktig når man skal velge materiale. En annen viktig parameter er hardhet, ofte målt i Brinell (HBN). Normalt ligger panserstål (RHA; Rolled Homogeneous Armour) mellom 330-380 HBN. Tettheten er også en viktig parameter når vekt skal vurderes opp mot ballistisk beskyttelse. Noen andre parameter vil også være viktige med tanke på de strukturelle egenskapene, disse vil derimot ikke omtales her.

Tetthet

Tettheten til materialet bestemmer massen og derav vekten. Tettheten bør derfor være lav. Høy grad av beskyttelse med lav tetthet er relativt enkelt med trusler hvor hastigheten er lavere en ca 1500 m/s. Trusler med hastighet fra 1500 m/s (eksempelvis pilammunisjon), og særlig hastigheter større enn 2500 m/s (eksempelvis hulladninger), penetrerer målet under såkalte hydrodynamiske forhold. For slike trusler er størst mulig tetthet helt essensielt hvis man *kun* ønsker å benytte passive beskyttelsestiltak.

E-modul

Materialets elastisitetsmodul bør være så høy som mulig. Denne verdien angir metallens evne til å motstå en spenning (kraft pr arealenheter) i det elastiske området. Jo høyere dette tallet er, jo større evne har metallet til å absorbere energi uten å bli permanent deformert.

Flytegrense

Flytegrensen angir den grensen for hvilken påtrykt spenning materialet kan motstå før det begynner å deformere plastisk. En plastisk deformasjon er en permanent deformasjon. Gjennom plastisk deformasjon, absorberer metallet kinetisk energi til den innkommende trussel. Jo høyere denne verdien er jo større mengde energi absorberes pr volum deformert materiale. Flytegrensen bør derfor være størst mulig.

Seighet

E-modulen og flytegrensen vil være verdier som er representert i et strekk-tøyningsdiagram. Disse to parametrene representerer henholdsvis det elastiske og plastiske området til metallet. For å vite den totale mengden energi som et materiale er i stand til å ta opp, ser man på duktiliteten eller seigheten. Denne verdien vil være arealet under hele strekk-tøyningsdiagrammet (inkludert det elastiske og plastiske tøyningsområdet). Jo høyere denne verdien er jo bedre er metallet til å ta opp energien fra prosjektiler og fragmenter.

Hardhet

Hardheten til materialet er med på å skade, fragmentere eller deformere trusler som prosjektiler og fragmenter på deres vei gjennom målet. Dette fører til at energien som i utgangspunktet er fokusert innenfor et areal tilsvarende prosjektilets diameter blir spredt utover et større areal. Dette letter opptaket av energien. For å oppnå denne ønskede effekten, bør hardheten i metallet være høyere enn innkommende trussel. Ulempen med ekstremt harde metaller er at de blir sprøe. Dette betyr at trøtthetsbrudd (sprekker) kan oppstå lettere enn i mykere metaller. Videre er harde metaller (hardere enn RHA kvalitet) vanskelig å bearbeide. Dette betyr at ekstremt harde metaller ikke er å foretrekke i bærende strukturer.

Arbeidsharding

Metaller har også en siste egenskap som ikke andre materialer har. Dette kalles arbeidsharding. Med arbeidsharding menes at flytegrensen øker når materialet blir utsatt for tøying. Dette øker selvfølgelig energiopptaket, jf. punktet om flytegrense.

4.3 Stål

Stål er ”alle pansers mor” og har siden antikken vært det viktigste panseringsmaterialet. Panserstål er da også det materialet som alle andre pansertyper sammenligner seg med når godheten av et panser skal kvantifiseres.

4.3.1 Homogent valset stål (RHA)

Den stålkvaliteten som vanligvis brukes som referanse er valset homogent stål (RHA – Rolled Homogeneous Armour). Denne kvaliteten er definert i forskjellige standarder, men noen globalt anerkjent spesifisering finnes ikke. En ekvivalent kvalitet som ofte brukes er den amerikanske stålstandarden Steel 4340. Kvaliteten 4340 inneholder kun 0,4 % karbon. De viktigste øvrige elementer er 1,7 % nikkell og 0,8 % krom. En typisk sett av verdier er gitt i Tabell 4.1.

I forhold til de fleste andre stål kvaliteter er RHA, som navnet antyder, homogent. Det innebærer at stålet har noenlunde de samme egenskaper og sammensetning gjennom hele platens tykkelse. RHA har en gunstig kombinasjon av hardhet og seighet samtidig som det kan maskineres. RHA arbeidsharder i moderat grad, og har også i noen grad tøyningsrateavhengige egenskaper. Hardheten av RHA vil variere med platetykkelsen. I USA brukes normene gitt i Tabell 4.2. Hardheter opp mot 380 HBN oppnås for tynne plater (5-10 mm).

Tabell 4.1 Et typisk sett av materialverdier for homogent valset stål (RHA)

	Enhet	Typiske RHA verdier
Tetthet	kg m ⁻³	7830
E-modul	GPa	207
Flytegrense	MPa	792
Hardhet	HBN	360
Bruddforlengelse	%	15
Poisson-tall		0,3
Smeltepunkt	K	1793
Spesifikk varmekapasitet	J kg ⁻¹ K ⁻¹	461
Strekkestyrke	MPa	1080
Termisk utvidelseskoeffisient	10 ⁻⁶ K ⁻¹	11,21
Varmeledningsevne	W m ⁻¹ K ⁻¹	37,56

Tabell 4.2 Hardheten av RHA som funksjon av platetykkelsen etter USA normen

Platetykkelse [mm]	Hardhet [BHN]
25	310 – 350
38	280 – 320
51	260 – 290
64	240 – 275
76 – 127	240 – 260
>127	220

Stålkvaliteten 4340 har følgende konstitutive likning tilpasset John-Cook modellen (avsnitt 10.1):

$$\sigma = (792 + 510\varepsilon^{9,18}) \left(1 + 0,014 \ln \dot{\varepsilon}\right) \left(1 - T^{*1,03}\right) \text{ [MPa]} \quad (4.1)$$

Tabell 4.3 gir en oversikt over forskjellige ammunisjonstyper og typiske penetrasjonsverdier i RHA, samt den ekvivalente arealvekten. Avstanden til målplaten er også angitt. Vær oppmerksom på at denne tabellen bygger på forskjellige kilder. Dette kan innebære at stålkvaliteten i testene er ulik, som igjen vil ha innvirkning på penetrasjonsdybden. Tallene presentert i denne tabellen vil derfor kunne variere noe sammenlignet med andre kilder. Likevel gir tabellen et godt bilde av ytelsen.

4.3.2 Hardt homogent stål (HHS)

I likhet med RHA er dette en kvalitet som er homogent tvers i gjennom platen. Hardheten er imidlertid mellom 400 og 500 HBN, hvilket innebærer en strekkstyrke på mellom 1500 og 1700 MPa. Flytegrensen er også i tilsvarende grad økt i forhold til RHA. Denne kvaliteten trenger spesialverktøy for å maskineres.

Tabell 4.3 Nødvendig platetykkelse for beskyttelse mot noen aktuelle prosjektiler [3;4].

Trussel	RHA		
	Penetrasjon [mm]	Arealvekt [kg/m ²]	Avstand [m]
9 mm Ball	0,1	1	6
9 mm blyfri	0,1	1	6
5,56 mm Ball	4,2	33	6
5,56 mm Blyfri	5,3	42	6
5,56 mm APWC	14,3	112	6
7,62 mm Ball	5 – 8	39 – 63	0 – 6
7,62 mm Blyfri	6	47	6
7,62 mm AP	15	118	0
7,62 mm APWC	19 – 24 (15)	149 – 188 (118)	0 – 6 (300)
12,7 mm APWC	41	322	200
14,5 mm AP	28	220	500
14,5 mm APWC	35	275	500
25 mm APDS	62 (50)	393	300 (1000)
25 mm APFSDS	80	628	1000
30 mm APDS	61	479	1000
30 mm APFSDS	110	864	1000
35 mm APDS	90	707	1000
35 mm APFSDS	120	942	1000
40 mm APDS	135	1060	1500
40 mm APFSDS	150	1178	1500

Slikt panser ble i sin tid utviklet for det amerikanske MBT-70-programmet som senere ble kansellert. Stålet bestod av hele 9 % nikkel og 4 % kobolt og ble laget i 40 mm plater med hardhet på 500 BHN.

Merker som Armox og Hardox (SSAB Oxelösund) er lett tilgjengelige med hardhet opp i 600 HB for tynne plater. Selv om Armox er de stålkalitetene som er ment til beskyttelse, egner også Hardox seg godt pga hardheten.

Massefaktoren for hardt homogent stål ligger i størrelsesorden på 1,2 – 1,3 mot AP prosjektiler, og 1,4 mot pilammunisjon [3].

4.3.3 Overflateherdet stål

Det er en fordel at et panser er bygget opp på en slik måte at det ytterste laget har høy hardhet. Dette bidrar til at prosjektilet, eller spissen av prosjektilet, blir mest mulig deformert. Dette vil hemme prosjektilet i dets videre ferd innover i materialet.

Et stål som er herdet vil vanligvis ha større hardhet nær overflaten enn inne i platen. De fleste ståltypene herdes ved en bråkjøling av materialet som låser fast dislokasjoner i materialet og

dermed gjør det mindre deformerbart. En bråkjøling vil på grunn av varmeledningen i materialet skje raskere på utsiden enn dypere inne i materialet. Derfor vil i særdeleshet tykke plater være langt hardere på utsiden enn inne i platen. Dette betyr også at dersom man skal bygge opp en pansring av stålplater, vil en samling av mange tynne plater være en bedre løsning enn få, men tykke plater.

Tabell 4.4 *Armox kvaliteter fra SSAB [5].*

Armox kvalitet	Hardhet [HBN]	Beskrivelse
370 T Class 1	380 – 430 (< 20 mm) 340 – 390 (20 – 40 mm) 300 – 350 (40 – 80 mm)	Tradisjonell RHA for ballistisk beskyttelse.
370 T Class 2	280 – 330 (3 – 150 mm)	Tradisjonell RHA for egnet til beskyttelse mot blast.
440 T	420 – 480	Egnet mot blast beskyttelse.
500 T	480 – 540	Hard stål kvalitet som kan benyttes til ballistisk beskyttelse i form av tilleggspansring (add-on).
600 T	570 – 640	Hard stål kvalitet som kan benyttes til ballistisk beskyttelse i form av tilleggspansring (add-on).

Tabell 4.5 *Hardox sliteplater med kvaliteter som også egner seg til ballistisk beskyttelse. Ref. [6]*

Armox kvalitet	Hardhet [HBN]
400	370 – 430
450	425 – 475
500	470 – 530 (4 – 32 mm) 450 – 540 (32 – 80 mm)
550	525 – 575
600	570 – 640
Extreme	700 (10 mm) 650 (25 mm)

En annen løsning med stål, som gir en lignende effekt, er å ha tynne plater med ulik hardhet, og valse disse sammen til en enkelt plate. Et stålverk i Brno i Tsjekkia har gjort dette med tre plater av ulik hardhet; ett lag med ekstremt høy hardhet; ett lag med normal høy hardhet; og ett lag med mykt stål. Det harde laget blir da den delen som vendes mot trusselen. En slik valsing må gjøres uten at temperaturen i stålet blir så høy at hardheten går tapt. Et annet problem er at slikt panser er

problematisk å fremstille i større plater. Grunnen til dette er at store plater vil ”slå seg” da det myke laget blir mest deformert under valsingen og bidrar til krumning av platen.

4.4 Aluminium

Det er i hovedsak tre forskjellige aluminiumskvaliteter som er brukt til panser (Tabell 4.6)

- Al 5083 – magnesium- og manganlegert
- Al 7039 – sink- og magnesiumlegert
- Al 2519 – kopperlegert

Al 5083 er første generasjons aluminiumspanser og er brukt i de amerikanske vognene M113, M109 og M108. Kvaliteten er også brukt i den nyere M2 Bradley, men da med en plate av hardt stål på utsiden. I forhold til RHA er denne legeringen 10–15 % dårligere mot geværammunisjon, men den er bedre enn RHA som beskyttelse mot splinter. I stedet for 5083 kan også kvaliteten 5086 brukes. Den har omtrent de samme egenskapene. 5083 har en massefaktor på ca 0,8 mot AP prosjektiler, men har en fordel mot fragmenter.

Al 7039 ble tatt i bruk på 1960-tallet på den amerikanske M551 Sheridan. Senere ble den brukt i den britiske Alvis Scorpion and den franske AMX-10. Denne legeringen er klart bedre enn 5083 og også bedre enn RHA på vektbasis. Massefaktoren kan komme opp i nærmere 1,5 mot AP prosjektiler og ved bruk av vinklet pansring [3]. I bærende konstruksjoner har den imidlertid vist seg å være utsatt for spenningsbrudd. En noe sterkere og mer motstandsdyktig legering ble utviklet av Alcan Co. kalt 7017. Mot 14,5 mm AP-ammunisjon skal denne utgaven være rundt 20 % bedre enn RHA på vektbasis og rundt 16 % bedre enn 5083 [7].

Tabell 4.6 Materialdata for tre Aluminiumkvaliteter benyttet til pansring

	Enhet	Aluminium 2519	Aluminium 5083	Aluminium 7039
Tetthet	kg m ⁻³	2820	2660	2770
E-modul	GPa	72	71	70
Flytegrense	MPa	393	165	337
Hardhet	HBN	140	78	123
Bruddforlengelse	%	9	12	13
Poisson-tall		0,33	0,33	0,33
Smeltepunkt	K	916	914	911
Spesifikk varmekapasitet	J kg ⁻¹ K ⁻¹	864	962	875
Strekkstyrke	MPa	455	276	400
Termisk utvidelseskoeffisient	10 ⁻⁶ K ⁻¹	24,4	23,5	23,4
Varmeledningsevne	W m ⁻¹ K ⁻¹	170	118	140

Al 2519 er en forholdsvis ny kvalitet som brukes på det amerikanske Advanced Amphibious Assault Vehicle (AAAV). De ballistiske egenskapene til denne legeringen er på høyde med 7039, men den har bedre korrosjonsbestandighet og er ikke så utsatt for spenningsbrudd.

Al 7039 har følgende konstitutive likning tilpasset Johnson-Cook modellen [8]:

$$\sigma = (337 + 343\varepsilon^{0,41})(1 + 0,01 \ln \dot{\varepsilon})(1 - T^*) \text{ [MPa]}. \quad (4.2)$$

Dette innebærer at aluminium har mindre evne til å arbeidsherde enn stål.

4.5 Titan

Titan har vært brukt til konstruksjonsformål i ca 60 år. I forhold til stål og aluminium gir det ca 45 % lavere vekt med samme styrke. De store bruksområdene er ubåtskrog og helikopterskrog (Blackhawk, Apache). Det er også i ferd med å bli tatt i bruk som fragmenterende materiale i visse stridshoder.

Tabell 4.7 Typisk sett av materialdata for titan panserplater

	Enhet	Ti-6Al-4V
Tetthet	kg m ⁻³	4450
E-modul	GPa	103
Flytegrense	MPa	793
Hardhet	HBN	300-370
Bruddforlengelse	%	10
Poisson-tall		0,3
Smeltepunkt	K	1977
Spesifikk varmekapasitet	J kg ⁻¹ K ⁻¹	586
Strekstyrke	MPa	862
Termisk utvidelseskoeffisient	10 ⁻⁶ K ⁻¹	9,4
Varmeledningsevne	W m ⁻¹ K ⁻¹	7,1

Tabell 4.8 Ytelse av titanpanser i forhold til RHA mht beskyttelse mot noen prosjektiler [3;9].

Ammunisjon	Ytelse i forhold i RHA (massefaktor)
7,62 mm AP	1,14
12,7 mm AP	1,31
14,5 mm AP	1,62
APFSDS	1,73 - 1,95

Titan fås som regel i form av en legering med 6 % aluminium og 4 % vanadium, kalt Ti-6Al-4V. Denne sammensetningen har vært noe sårbar overfor oppsprekking rundt treffpunktet. En annen

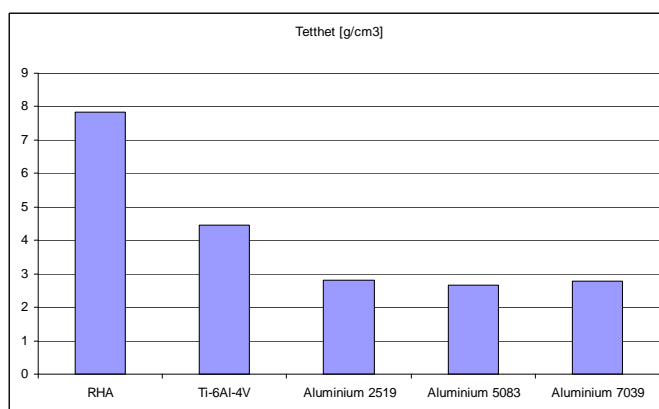
type, med noenlunde samme kjemiske sammensetning kalt Ti-6Al-4V ELI har noe bedre slagseighet. Et typisk sett at materialegenskaper for titan er gitt i Tabell 4.7.

Anvendelsen av titan til pansringsformål er av nyere dato. Fordelen med titan i forhold til stål blir bedre dess grovere trusselen er. Den relative effekten på vektbasis er gitt i Tabell 4.8 [10].

4.6 Sammenligning av metallene

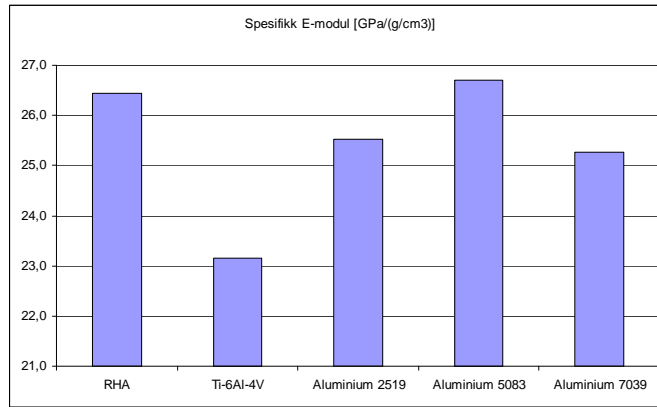
For å sammenligne de tre metallene, er de fire viktigste materialparametrene blitt plottet i Figur 4.3 - Figur 4.6. I den første figuren er tettheten presentert, der aluminium har lavest og stål har høyest verdi.

I Figur 4.5 er spesifikk¹ E-modul sammenlignet. Her kommer RHA og aluminium som likeverdige og de beste materialene. Men, ballistisk beskyttelse bestemmes ikke av E-modulen alene. Plastisk deformasjon er svært viktig for opptak av energi og dermed vil flytegrensen gi et annet bilde som vist i Figur 4.5. På vektbasis er det titan og aluminium 2519 som har de beste egenskapene. Hardheten er til slutt sammenlignet i Figur 4.6.

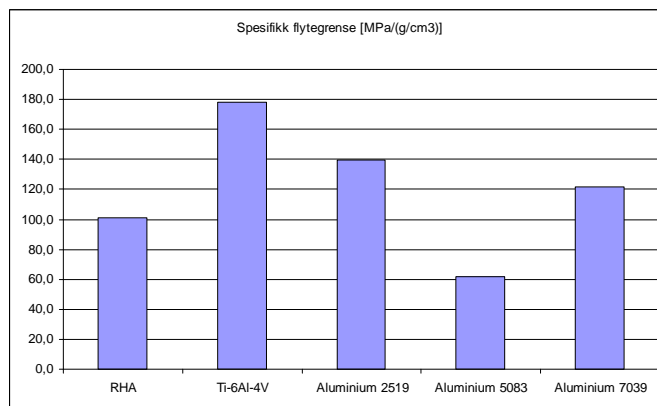


Figur 4.3 Sammenligning av tettheten for aktuelle metalltyper.

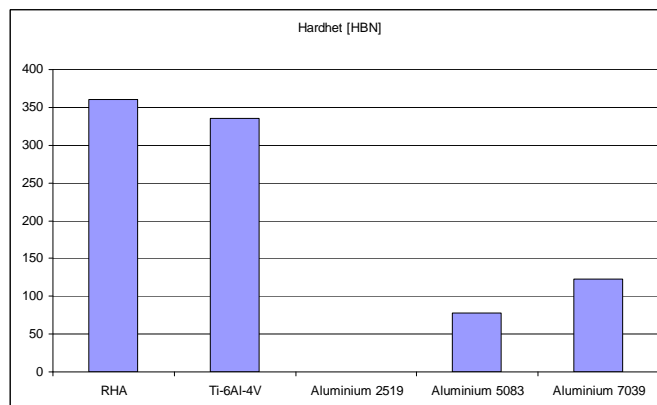
¹ Spesifikk verdi (eks E-modulen) er verdien delt på tettheten til materialet. Dette gir et bedre bilde når man ønsker best mulig egenskaper på vektbasis. Eks høyeste spesifikke E-modul, gir den beste elastiske egenskapen pr masseenheter.



Figur 4.4 Sammenligning av spesifikk E-modul for aktuelle metalltyper.

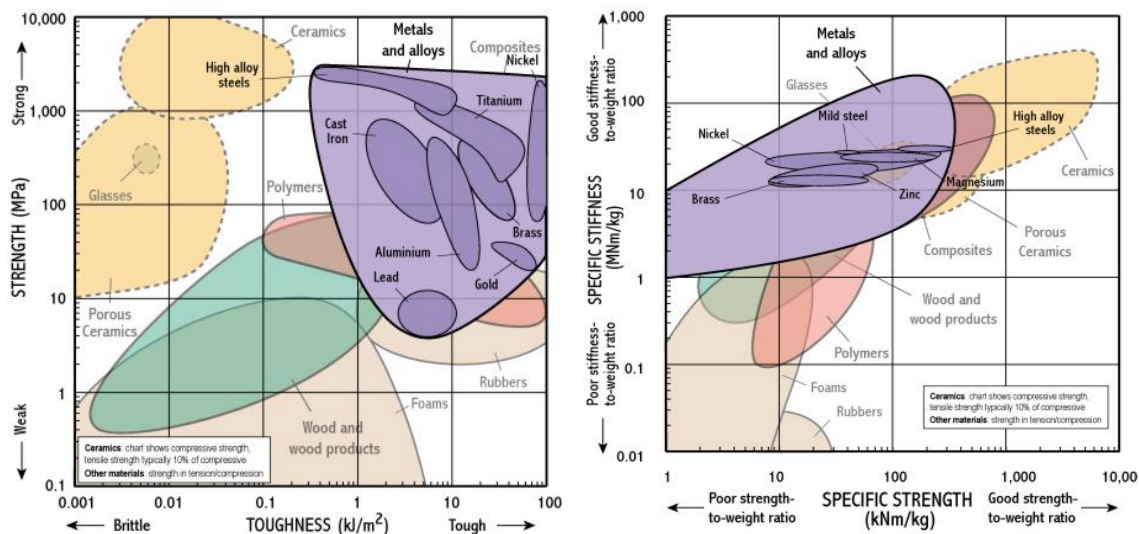


Figur 4.5 Sammenligning av spesifikk flytegrensen for aktuelle metalltyper



Figur 4.6 Sammenligning av hardheten for aktuelle metalltyper. Tall for Al 2519 legeringen er ikke funnet, men antas ikke å avvike mye i forhold til de andre aluminiumslegeringene.

For å få et inntrykk av hvordan metaller forholder seg til hverandre i styrke og seighet samt hvordan denne materialgruppe forholder seg til andre materialgrupper, vises en grov oversikt i Figur 4.7. ”Strength” er her bruddstyrken, mens ”Toughness” (seighet) er et mål for hvor mye energi (per volum) som et materiale tar opp før det bryter sammen.



Figur 4.7 En sammenligning av noen materialegenskaper for metaller i forhold til andre materialgrupper.

5 Fibermaterialer

5.1 Generelt

Fibermaterialer som benyttes til ballistisk beskyttelse er som oftest spesielle organiske fibre som er fremstilt i en industriell prosess og kalles filamentfibre. Disse er bygd opp av svært lange molekykjeder som er dannet ved sammenkobling (polymerisering) av kortere molekyler; ”byggesteinene”. Tråd som er utgangspunktet for oppbygging både av ballistisk duk og kompositter, kan bestå av mange hundre filamentfibre. Ikke organiske fibre som for eksempel glassfibre, benyttes oftest bare i matriser til oppbygging av stive plater for ballistisk beskyttelse.

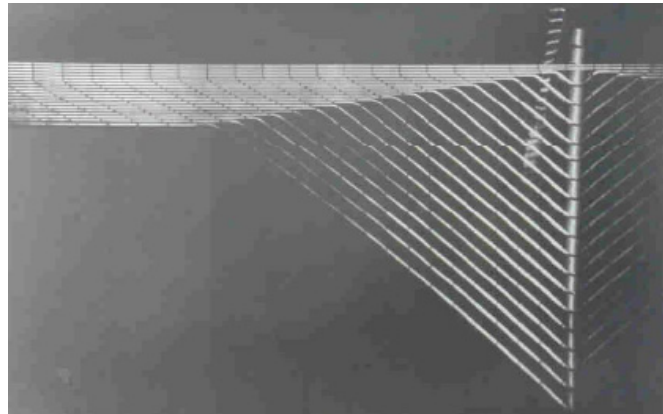
Tabell 5.1 Omregningsfaktorer for noen materialparametere med spesielle benevninger.

Materialparameter	Omregningsfaktor
Garndimensjon	1 denier = 10/9 dtex = 1/9 tex
Kraft pr areal	1 g/d tilsvarer $(8,829 \cdot 10^7 \times \rho)$ Pa; der ρ er tettheten i g/cm ³
Kraft pr areal	1 g/dtex tilsvarer $(9,81 \cdot 10^7 \times \rho)$ Pa; der ρ er tettheten i g/cm ³
Kraft pr areal	1cN/dtex tilsvarer $(\rho \cdot 10^8)$ Pa; der ρ er tettheten i g/cm ³

For angivelse av fiber- eller garndimensjon benyttes betegnelsen ”denier”; forkortet ”d” eller ”den”. Denne måleenheten angir antall gram pr 9000 m tråd. En tilsvarende måleenhet er ”tex” som angir antall gram pr 1000 m. Ofte benyttes ”dtex” (decitex), som vil tilsvare antall milligram pr 10.000 m, se avsnitt 3. For angivelse av strekkstyrke brukes gjerne gram/denier (g/d), gram/decitex eller cN/dtex. For at leseren enklere skal kunne sammenligne materialparametere for fibre med andre materialer er det listet noen omregningsfaktorer i Tabell 5.1.

5.2 Egenskaper ved fibre til ballistisk beskyttelse

Ser man på fibre alene, absorberes energi ved hjelp av tøyning og avrivning av fibre. Fibre tar dermed opp energi ved elastisk og plastisk tøyning. Som regel antas det at fibre går direkte fra elastisk tøyning til brudd; dette er selvfølgelig en tilnærming. Det er derfor i hovedsak fire faktorer som er viktig i beskyttelsessammenheng; E-modul, strekkstyrken, tetthet og bruddforlengelsen.



Figur 5.1 Bildet viser en samling av fotografier av et prosjektil som treffer en fiber. Dette illustrerer tydelig fiberens evne til å oppta kinetisk energi ved elastisk og plastisk tøyning [11].

Figur 5.1 viser hvordan den kinetiske energien blir overført til fiberen ved elastisk og plastisk tøyning. Figuren er satt sammen av flere bilder, tatt med korte tidsintervall. Den transversale bevegelsen til fiberen kan tydelig sees. De sorte merkene på fiberen er et hjelpemiddel for å se den longitudinale tøyningen; de beveger seg i retning av prosjektillets treffpunkt. Ut fra dette ser man at den longitudinale bølgeforplantningen er raskere enn den transversale.

Tetthet

Tetthet, og derav vekt, er i alle sammenhenger viktig når det gjelder beskyttelse. Uten unntak, ønskes lavest mulig vekt. Bølgehastigheten, som er invers proporsjonal med kvadratroten av tettheten, vil øke med lavere tetthet. Økt bølgehastighet betyr at energioptaket fordeles utover et større område (Figur 5.1). Dette er enda et argument for at lavere tetthet er ønskelig.

E-modulen

Den elastiske egenskapen til fiberen (E-modulen) bør være så høy som mulig, for å oppnå to ting. For det første vil bølgehastigheten øke, da den er proporsjonal med kvadratroten av E-modulen, noe som betyr at energien blir fordelt over en større del av fiberens utstrekning. For det andre innebærer en høyere E-modul at kraften som skal til for å strekke fiberen øker, noe som resulterer i økt energioptak.

Strekstyrke og bruddforlengelse

Strekstyrken angir hvor høy last (kraft pr areal i strekk) som et materiale tåler før det ryker. Denne verdien bør være så høy som mulig. En ekvivalent materialparameter er bruddforlengelsen, som sier noe om hvor stor tøyning man har ved brudd. For ballistiske fibre, spesielt til personlig beskyttelse, bør denne verdien ikke være for høy. Høye tøyninger kan føre til skader i form av trauma. Derimot vil en høy strekkstyrke kombinert med høy bruddforlengelse være gunstig for energioptaket. Ofte vil spesifikk styrke være oppgitt. Dette er strekkstyrken delt på tettheten; altså hvor stor kraft materialet tåler pr masseenheter.

Andre egenskaper

Fibre benyttes som lagvise strukturer, med eller uten matrisemateriale. Dette vil føre til at også vekselvirkningen mellom fibre spiller inn når det gjelder energioptak, blant annet i form av friksjon. Ved å benytte matrise vil man oppnå flere effekter, som energioptak gjennom delaminering, uttrekking av fibre etc. Tilsetter man matrise til fibre kan dette klassifiseres som komposittmaterialer, og vil bli omtalt nærmere i avsnitt 8.1.

5.3 Aramid

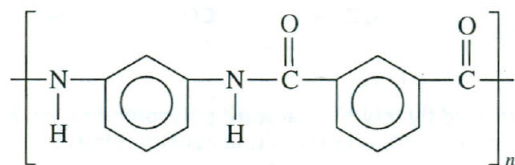
Aramid er en fellesbetegnelse for flere typer aromatiske polyamider ("aramider"). Det er i hovedsak to produsenter som har bidratt til utviklingen av disse fibrene for ballistisk beskyttelse; DuPont og Akzo Nobel (Teijin). Aramid var den første organiske fiberen som egnet seg til ballistisk beskyttelse, når en ser bort fra ballistisk Nylon. Men i motsetning til nylon er aramid ikke en termoplast.

Aramid er en herdeplast, og vil dekomponere (ikke smelte) ved ca 430 – 480 °C. En stor ulempe med aramidfibre er at de er sensitive for UV-stråling; mer spesifikt i bølgelengdeområdet 300 – 450 nm (Figur 5.5). En er derfor avhengig av at aramidfibre beskyttes mot denne type stråling. Aramidfibre har en LOI² på 28-30 % [12], hvilket betyr at det trenger tilførsel av oksygen for å opprettholde forbrenning i vanlig luft (som inneholder kun 21 % oksygen). Aramidfibre har relativt god kjemisk motstandsevne.

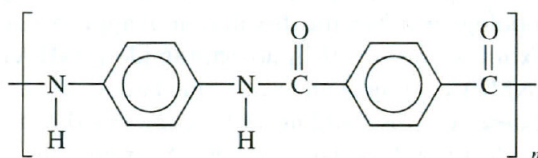
5.3.1 Kevlar

DuPont lanserte først en såkalt meta-aramid fiber under navnet Nomex (Figur 5.2). Nomex har ikke de gode ballistiske egenskaper som man skulle ønske. Høytemperateregenskapene er imidlertid gode og den benyttes derfor ofte i varmebeskyttende tekstiler. På midten av 60-åra utviklet DuPont en aromatisk para-aramid som fikk varenavnet Kevlar (Figur 5.3). I 1971 kom Kevlar 29 med strekkfasthet (22 g/d eller 2800 MPa) som var tre ganger større enn ballistisk Nylon (alifatisk polyamid/Nylon 66/Cordura). Etter hvert er nye kvaliteter kommet til både med høyere strekkfasthet og E-modul, deriblant Kevlar 49, Kevlar 129 (slutten av 1980-tallet) og Kevlar 149. Eksempler på produkter som brukes i dag til ballistisk beskyttelse er produkter med navn Kevlar KM2 og Kevlar XP, som har 15 % økt ballistisk effekt over Kevlar 29 [13;14].

² LOI står for "limiting oxygen index"; se avsnitt 3.



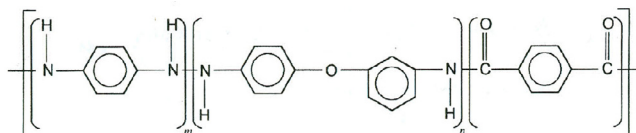
Figur 5.2 Strukturformler for Nomex [15].



Figur 5.3 Strukturformel for Kevlar [15].

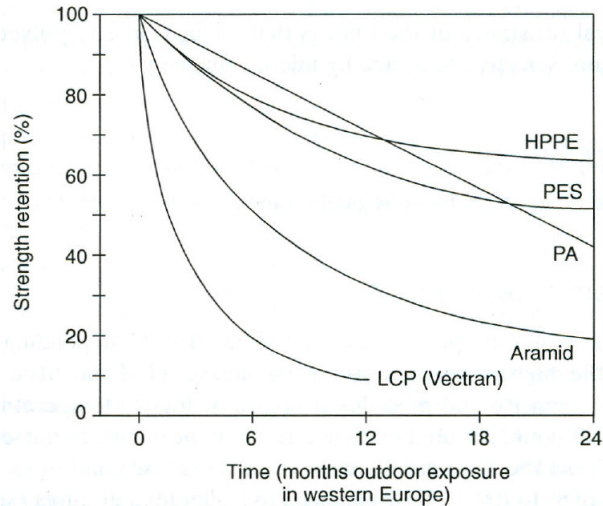
5.3.2 Twaron

Twaron er en ballistisk fiber utviklet av Akzo Nobel, og har samme molekylstruktur som Kevlar (Figur 5.2). Denne fiberen produseres av Akzo Nobel gjennom firmaet Teijin. Twaron ble introdusert første gang i 1986. En av de nyeste generasjon Twaron er CT Microfilament. Teijin har også lansert en såkalt kopolymer³ under navnet Technora (Figur 5.4). Denne fiberen er noe mer fleksibel enn Twaron, og noe lettere å produsere. Technora har ikke, så vidt vi vet, blitt brukt til ballistisk beskyttelse.



Figur 5.4 Strukturformel for Technora [15].

³Kopolymer er en fiber bygget opp av to forskjellige aramid ”bygggestener”.



Figur 5.5 Sammenligning av reduksjon i strekkfasthet mellom aramid, UHMWPE og Vectran ved UV-påvirkning.

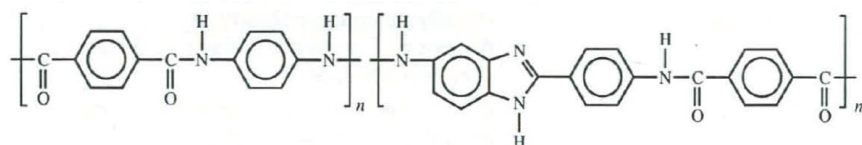
Tabell 5.2 Data for noen kvaliteter av aramid.

	Enhet	Aramidfiber				
		Kevlar 149	Kevlar 49	Kevlar 29	Twaron HM	Armos ⁴
Tetthet	g/cm ³	1,47	1,44	1,44	1,450	1,42-1,45
E ₁ -modul i fiberretningen	GPa	179	131	58	121	134 ± 18
						150-160 [17]
Spesifikk E-modul	g/d	1380	1030	460	940	1062 ± 143
Strekkfasthet i lengderetningen, σ ,	MPa	3450	3600	3620	3150	4870 ± 700
Spesifikk strekkfasthet	g/d	26,6	28,2	28,4	24,6	39,5 ± 5
Bruddforlengelse	%	3,3	2,8	1,9 – 2,5	2,0	4,64 ± 0,37
						2,5-3,5 [18]
E2-modul, på tvers av fiberretningen	GPa		4,2	4,2		4 – 6
Kompresjonsstyrke	GPa		0,65		0,85	0,81 ± 0,06
Poisson-tall, ν_{12}	1		0,35	0,35		
Skjærmodul, G ₁₂	GPa		2,9	2,9		
Termisk utvidelseskoeffisient langs fiberretningen, α_1	10 ⁻⁶ K ⁻¹		-4	-4		
Termisk utvidelseskoeffisient på tvers av fiberretningen, α_2	10 ⁻⁶ K ⁻¹		54	54		

⁴ Ref.: Andres Leal, University of Delaware, og ref. [15;16]

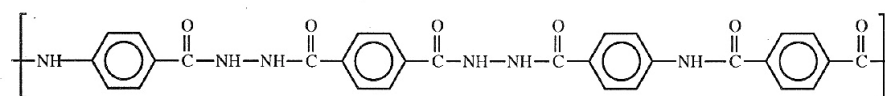
5.3.3 Andre polyamider

En ny type aramidfiber er utviklet i Russland, og er også en kopolymer³. Fiberen går under handelsnavnet ARMOS (Figur 5.6). Den viser svært lovende egenskaper mht strekkfasthet. Det hevdes at denne fiberen har bedre egenskaper enn sine konkurrenter (Tabell 5.2), men at den derimot har en noe ujevn kvalitet. Fiberen produseres av et russisk firma, ”Tverchimvolokno” Joint-Stock Company, og har vært utviklet i samarbeid med All-Russian Research Institute of Polymeric Fibres. Armos sin forgjenger var SVM, også kjent som Vnivlon. Disse to fibreene er de mest egnede på det russiske markedet innenfor ballistisk beskyttelse.



Figur 5.6 Strukturformelen for ARMOS [15].

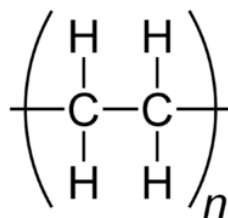
Monsanto har utviklet en kopolyamid kalt X500 (Figur 5.7). Fordelen med denne fiberen er at man kan oppnå mange bindinger mellom molekykjedene. Denne fiberen har foreløpig kun vært utviklet på laboratorieskala, og har ikke nådd et kommersielt marked.



Figur 5.7 Strukturformel for X500 [15].

5.4 Polyetylen (PE)

5.4.1 Dyneema og Spectra



Figur 5.8 Etylengruppe som er basis for UHMWPE fibre.

Utviklingen av PE til ballistiske formål ble startet på midten av 1980-tallen, og ble kommersialisert av Honeywell (Allied Fibers). De er satt sammen av et meget stort antall etylenenheter (Figur 5.8) og har derfor meget høy molekylvekt. Denne fiberen betegnes derfor UHMWPE som står for Ultra-High Molecular Weight PE. Andre betegnelser kan være HMPE

(”High Modulus Polyethylene”); HPPE (”High Performance Polyethylene”); og noen ganger ECPE (”Extended Chain Polyethylene”).

Fibren produseres for det europeiske og asiatiske marked av DSM (Nederland) og Toyobo (Japan) under handelsnavnet Dyneema. Produsenten av fibren for det amerikanske marked er Honeywell/Allied Signal og markedsføres under navnet Spectra Fiber. Noen typiske data for UHMWPE fiber er gitt i Tabell 5.3. I det daglige liv benyttes fibren i form av multifilament tråd, bl.a. til fiskesnøre, seil, høytalerkoner og tantråd.

Fibren har et meget fordelaktig styrke-vekt forhold. Som eksempel kan en tråd på 1 mm i diameter holde en vekt på 250 kg. Fibren absorberer praktisk talt ikke vann, men garn av UHMWPE fibre har ca 40 % tomrom som vil kunne trekke til seg fuktighet. Fibrene degraderes derimot ikke av dette. UHMWPE fibre er også meget motstandsdyktige mot kjemikalier. Fibrene har en tendens til å degraderes i kontakt med sterkt oksiderende media. I normal luft, vil fibrene være relativt stabile. Fibrenes styrke reduseres noe ved påvirkning av UV-lys (Figur 5.5). Men i motsetning til aramid er de relativt stabile.

Tabell 5.3 Noen data for Dyneema og Spectra. Spectra 2000 er siste generasjons fiber fra Honeywell [15;19].

		Dyneema ⁵	Spectra, A	Spectra 2000	Tensylon
Tetthet	g/cm ³	0,97	0,97	0,97	0,97
E ₁ -modul i fiberretningen	GPa	87 - 117	120	116-124	100 ⁶
	cN/dtex	900 – 1215	1250	1200	1080 ⁶
Strekkfasthet	GPa	2,7 – 4,0	2,7	3,25-3,34	Ca 1,8 – 2,7
	cN/dtex	26,5 – 39,0	26,5		
Bruddforlengelse	%	3,5	3,5	2,9-3,0	1,9
E ₂ -modul, på tvers av fiberretningen	GPa	3	3	3	
Kompresjonsstyrke	GPa	0,1	0,1	0,1	
Krymp, 100°C	%	< 1			
Termisk ledningsevne (aksial) ved 23°	W m ⁻¹ K ⁻¹	20	20	20	
Termisk utvidelseskoeffisient	10 ⁻⁶ K ⁻¹	-12	-12	-12	

En ulempe er at fibren er termoplastisk og relativt lett brennbar, med en LOI på 17 %, dvs. en forbrenning vil opprettholdes i normal atmosfære (som inneholder ca 21 % oksygen). Smelte-

⁵ DSM rapporterer om 4 fiberkvaliteter, SK 60, SK 65, SK75 og SK76 som ligger innenfor de angitte dataintervaller.

⁶ Anslått verdi

punktet er mellom 144 – 152 °C. Strekkfastheten vil reduseres med økende temperatur, men vil ikke permanent forringes så lenge smeltetemperaturen ikke overskrides.

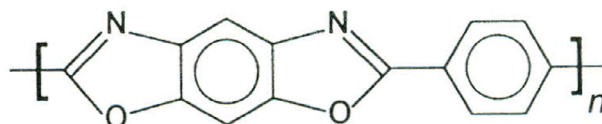
5.4.2 Tensylon

Dyneema og Spectra fibre blir produsert ved hjelp av såkalt ”gel-spinning” prosess. Dette er en forholdsvis dyr prosess. Sent på 1970-tallet ble det utviklet en metode for å ekstrudere polyetylen i fast form. Denne metoden ble videreutviklet av Nippon Oil Company til kommersiell utnyttelse, og ble et lavkostnadsalternativ til ”gel-spinning” prosessen, med en antatt prisreduksjon på rundt 50 %. En testfabrikk sto ferdig i 1994, hvor fibre en kort periode ble solgt under navnet Milite. På lisens, ble denne teknikken overført til Synthetic Industries, og Integrated Textile Systems i USA, som startet produksjon i 1999 under navnet Tensylon [15].

I hovedtrekk har Tensylon og Dyneema/Spectra de samme egenskapene, men strekkstyrken er noe lavere enn både aramid og ca 65 – 75 % av strekkstyrken til Dyneema / Spectra. Tensylon skal være lettere å overflatebehandle, samt at den har betydelig bedre UV stabilitet noe som delvis skyldes at det er mulig å legge til farge med UV beskyttelse i Tensylon fibre. Dette er ikke like enkelt ved en ”gel-spinning” prosess, og derfor er Dyneema fibre hvite (eller fargeløse).

5.5 PBO (ZYLON)

PBO står for poly(p-phenylene benzobisoxazole); kjemisk struktur er vist i Figur 5.9. Det er en syntetisk fiber opprinnelig utviklet ved Wright Research and Development Centre fra 1960 tallet og fremover. PBO ble patentert på 1980-tallet. Patentet ble kjøpt opp av Toyobo, Japan, og fiberen ble første gang markedsført i 1998 under navnet Zylon. Data for fiberen er gitt i Tabell 5.4.



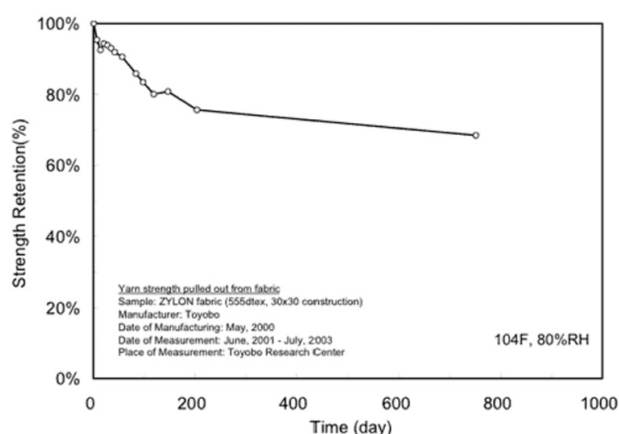
Figur 5.9 Strukturformelt for PBO (Zylon)

Fiberen har en relativ høy strekkfasthet (høyere enn PE og aramid) og er slitesterk. Fiberen er meget motstandsdyktig mht flammepåvirkning, da den har en LOI på hele 68 %. PBO har god motstandevne mot kjemikalier. Fiberen starter ikke å dekomponere før ved ca 650 °C.

Ulempen er at fiberen vil svekkes under påvirkning av fuktighet ved høyere temperaturer, Figur 5.10. Denne egenskap har medført en heftig debatt om hvorvidt denne fiberen er egnet i myke vester for beskyttelse av personell. Armor Holdings, USA, benytter fortsatt vevd duk av denne fiber i sine hybridvester, dvs. i kombinasjon med duk av aramid og UHMWPE fibre. Det ballistiske panelet er da forseglet slik at fuktighet (f.eks. svette) ikke kommer i kontakt med fibermaterialene. PBO må også beskyttes mot dagslys (UV-stråling). Etter 6 måneder i dagslys har PBO fibre kun 35 % av styrken igjen Figur 5.11.

Tabell 5.4 Noen data for Zylon fiber [15;20]

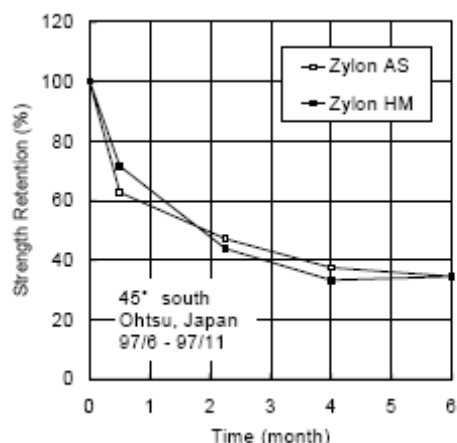
	Enhet	ZYLON	
		Regulær E-modul (AS)	Høy E-modul (HM)
Tetthet	g/cm ³	1,54	1,56
E ₁ -modul	GPa	180	270
	cN/dtex	1150	1720
Strekkfasthet	GPa	5,8	5,8
	cN/dtex	37	37
Bruddforlengelse	%	3,5	2,5
Garn dimensjon	dtex	278, 555, 1110, 1670, 3330	273, 545, 1090 1640, 3270
Antall filamentfibre pr garn		166, 332, 664, 996, 1992	166, 332, 664, 996, 1992
Kompresjonsstyrke	GPa	0,2	0,2
Termisk utvidelseskoeffisient	10 ⁻⁶ K ⁻¹		- 6



Figur 5.10 Testresultater for Zylon fibre, hvor fiberen er utsatt for 80 % relativ luftfuktighet og en temperatur på 40 °C (104 F). Kilde: Toyobo, Japan.

Second Chance, USA, har markedsført vester (ULTIMA og ULTIMAX) med bare Zylon duk, sannsynligvis ubeskyttet mot fuktighet. Det har inntruffet gjennomskyting av én, opprinnelig NIJ godkjent, vest i USA med dødsfall og et omfattende rettsoppgjør som resultat. Det må antas at vesten har vært i bruk en stund. Slike tynne og lette vester krever stor varsomhet mht behandling og oppbevaring.

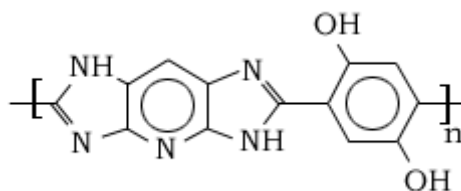
DSM, Holland, som samarbeider med Toyobo, startet opp med produksjon av vester basert på Zylon for det tyske marked, men trakk disse vester tilbake pga de ovennevnte problemer. I dag anvender de ikke Zylon i sine vester.



Figur 5.11 Graf som viser gjenværende styrke som funksjon av tid for PBO. Fiberen er eksponert for UV-stråling [21].

5.6 M5 (PIPD)

PIPD (Figur 5.12), eller poly(2,6-diimidazo[4,5-b4',5'-e]pyridinylene-1,4(2,5-dihydroxy)-phenylene) er en fibertype som lenge har vært under utvikling, men som ennå ikke er kommersielt tilgjengelig. Utvikling av denne fiberen startet opp ved Akzo Nobel i Holland i perioden 1995-1998. Fiberen antas å få bedre materielle og ballistiske egenskaper enn de andre ballistiske fibrene.



Figur 5.12 Strukturformel M5 [15].

Tabell 5.5 Noen data for M5-fiberen [15]

		M 5	
		Målte verdier, produsert i laboratorieskala, april 2002	Forventede verdier, produsert i industriell skala
Tetthet	g/cm ³	1,7	1,7
E ₁ -modul	GPa	330	400 – 450
Strekfasthet	GPa	5	9,5
Bruddforlengelse	%	1,5	> 2
Kompresjonsstyrke	GPa	1,6	4

I forbindelse med restrukturering av firmaet ble patentet kjøpt opp av Magellan International Systems, USA. Dette firma, i samarbeid med DuPont, er nå i gang med en testfabrikk som tar

sikte på å produsere 60 tonn pr år. Det hersker noe usikkerhet rundt den faktiske produksjonen i dag. I år 2010 er målsetningen en årsproduksjon på 3-5000 tonn og med en pris sammenlignbar med aramid. Noen materialdata er listet opp i Tabell 5.5.

LOI verdien ligger høyere enn 50 %, hvilket innebærer at også denne fiberen brenner dårlig i vanlig luft. UV stabilitet rapporteres til å være svært god [15].

5.7 Glassfiber

Glassfiber, som oftest i form av vevd duk innbakt i en organisk matrise (kompositt), benyttes bl.a. til ballistisk beskyttelse av kjøretøyer. Den kjemiske sammensetningen av glassfibre varierer og er forskjellig fra den man finner f.eks. i vanlig vindusglass som ikke gir den ønskede mekaniske styrke.

Til ballistisk beskyttelse ble E-glass først benyttet i kompositter (siden sent på 1940 tallet). E-glass var et resultat av forskningen som ble igangsatt for å komme frem til en fiber basert på glass. Hensikten var å finne frem til et isolasjonsmateriale innen den elektroniske industrien, derav forbokstaven "E". Denne kvaliteten er relativt billig, lett å fremstille og sterk nok til anvendelse i ikke kritiske strukturer.

Glasset som benyttes i kompositter til ballistisk beskyttelse er en videreutvikling og kalles S-glass. Denne typen glassfiber gir en forbedret strukturell styrke, derav forbokstaven "S". Den ble opprinnelig utviklet av Ferro Corporation under betegnelsen S-1014. Firmaet ble senere kjøpt opp av Reichhold Chemical og produksjonen av S-1014 opphørte i begynnelsen av 80-åra. Samtidig utviklet Owens Corning en litt billigere versjon av denne typen glassfiber med litt dårligere mekaniske egenskaper som de kalte S-2. Det drives kontinuerlig forskning for å finne frem til nye modifiseringer av S-glass fiberen, eksempelvis bedret overflatebehandling (priming) for å oppnå bedre feste mellom fiber og matrise.

Tabell 5.6 Noen data for glassfiber

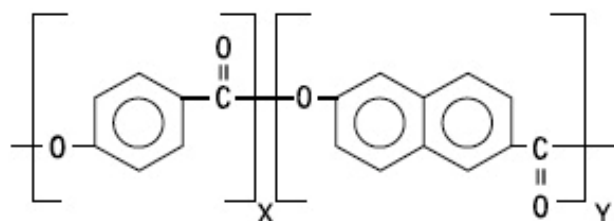
		S-2 glass	S-glass, generisk	E-glass
Tetthet	g/cm ³	2,46	2,48 – 2,49	2,54 – 2,6
E-modul	GPa	86,9	85,5 – 86,9	72,4
Strekkfasthet	MPa	4890	4585	3448
Bruddforlengelse	%	5,7	5,4	4,8
Dielektrisitetskonstant		5,3	5,1 – 5,34	6,3 – 6,6
Poisson-tall		0,23	0,22	0,2
Skjær modul	GPa	35	35	30
Smeltepunkt	°C		1725	1725
Spesifikk varmekapasitet	J kg ⁻¹ K ⁻¹	737	737	810
Termisk utvidelseskoeffisient, 20 °C	10 ⁻⁶ K ⁻¹	1,6	5,2 – 5,6	5
Varmeledningsevne	W m ⁻¹ K ⁻¹	1,45		1,3

Hovedkomponentene i S-2 glass er: SiO₂ (52-65 Wt %), Al₂O₃ (24-26 Wt %) og MgO (9-11 Wt %). Noen data for S- og E - glassfiber er gitt i Tabell 5.6. Fibertypene kalt A-glass, C-glass og D-glass er ikke inkludert siden disse ikke er aktuelle i forbindelse med ballistisk beskyttelse.

5.8 Andre fibre

5.8.1 Vectran (LCP)

Vectran er et termoplastisk multifilament garn. Det kan klassifiseres som en aromatisk polyester, og blir spunnet fra liquid crystal polymer (LCP), Figur 5.13. Vectran er kommersielt tilgjengelig blant annet som tauverk, men er ennå ikke brukt i forbindelse med ballistisk beskyttelse. Tekniske utviklinger kan gjøre også denne typen fiber aktuell [22].



Figur 5.13 Molekylstruktur for Vectran LCP [23].

Fibren skal ha høy styrke og E-modul, lav fuktighetsabsorbering, god kjemisk motstandsevne. Fibren smelter derimot ved 330 °C, og har dårligere UV-motstand enn både aramid og PBO (Figur 5.5 og Figur 5.10).

Fibren ble funnet opp av Celanese Acetate LLC, og produseres i dag av Kuraray Co., Ltd. Noen materialegenskaper finnes i Tabell 5.7.

Tabell 5.7 Materialparametere for to varianter av Vectran LCP [15;24].

	Enhet	Vectran HT	Vectran UM
Tetthet	g/cm ³	1,4	1,4
E-modul	GPa	75	103
Strekfasthet	GPa	3,2	3,0
Bruddforlengelse	%	3,8	2,8
LOI	%	28	30
Smeltepunkt	°C	330 – 350	330 – 350
Termisk utvidelseskoeffisient ved 20 – 145 °C	W K ⁻¹	-4,8	-4,8
50 % reduksjon i styrke ved	°C	145	150

5.8.2 Silke

Folk flest forbinder silke med tekstiler laget av fibre / tråder produsert av silkeormen. Denne fiberen har ikke på langt nær den strekkfasthet som den silkefiber edderkoppene produserer under oppbyggingen av sine fangnett. I disse fangnettene er det de trådene som nettet henger i ("dragline") som har den største styrken. US Army har siden 1960 åra vært interessert i anvendelse av disse fibre til myke ballistiske paneler for beskyttelse av personell. Imidlertid kan man ikke produsere denne silken ved å opprette "edderkoppfarmer" på samme måte som med silkeormer. Edderkoppene er kannibaler og ville etter hvert drept hverandre. Det er over flere tiår lagt ned mye tid og penger på å lage denne silken på kunstig vis. Nexia Biotechnologies Inc. i Canada har satset stort på genmodifiserte geiter basert på gener fra edderkopper (august, år 2000). Melken fra disse geitene inneholder noen av de proteinene som edderkoppsilke er bygget opp av. Disse proteinene benytter Nexia til fremstilling av fibre (BioSteel) med en styrke som er akseptabel i forhold til edderkoppsilke. Tekstiler laget av disse fibre ligner på vanlig silketekstil (fra silkeormen) både i utseende og mykhet.

Det er vel tvilsomt om denne fiberen i fremtiden vil bli anvendt til ballistisk beskyttelse i noen større grad. Nye fibre som M-5 og ikke minst fibre basert på karbon nanorør (0), vil sannsynligvis bli foretrukket ut fra enda bedre egenskaper både mht styrke og jevnere kvalitet. Imidlertid er den nevnte silkefiberen biologisk degraderbar og benyttes nå som suturtråd, og på sikt når prisen blir akseptabel, kanskje bl.a. også til fiskeliner.

I Tabell 5.8 er det gitt noen data for kunstig fremstilt edderkoppsilke basert på ett av de proteinene som finnes i denne silken (ADF-3) samt data for "dragline"-silke fra edderkopp *Araneus diadematus* (korsedderkopp), til sammenligning. Som man ser er det stor spredning mellom prøvene.

Tabell 5.8 Noen data for kunstig fremstilt edderkoppsilke (ADF-3) sammenlignet med data for "dragline"-silke fra edderkopp *Araneus diadematus*. [25].

	Enhet	ADF – 3, prøve 1	ADF – 3, prøve 2	ADF – 3, prøve 3	<i>Araneus diadematus</i> , dragline
E-modul	g/d	42,8	110,6	63,2	38 – 76
Strekkfasthet	g/d	1,91	2,26	1,8	7 - 11
Bruddforlengelse	%	59,6	43,4	45,0	19 - 30

5.8.3 Karbon nanorør

Karbon nanorør (CNT) ble oppdaget av Sumio Iijima ved NEC Corporation i Japan, [26]. Siden har forskningen på denne karbonforbindelsen akselerert med stor kraft bl.a. når det gjelder fremstillingsmetoder, karakterisering og anvendelsesområder. Karbon nanorør er det stiveste materialet vi vet om med en E-modul på over 1000 GPa (1 TPa)!

For å få et begrep om strukturen av CNT kan en tenke seg et todimensjonalt grafittflak som brettes opp langs to motstående sider og ”sveises” sammen til et rør. Man får da en såkalt ”Single-Wall carbon Nano Tube” (SWNT) med diameter 1–2 nm (Figur 5.14). En annen type CNT består av flere rør inne i hverandre. Disse kalles ”Multi-Wall carbon Nano Tubes” (MWNT) med diameter 3-30 nm. Lengdene av disse rørene kan variere ganske mye etter produksjonsmetode. Typiske verdier for kommersielt tilgjengelige rør er 0,5-2 μm (1 μm tilsvarer 1/1000 mm). I Tabell 5.9 er det gitt noen data for CNT. I Figur 5.14 er det vist et bilde som viser form og gitterstruktur av SWNT.

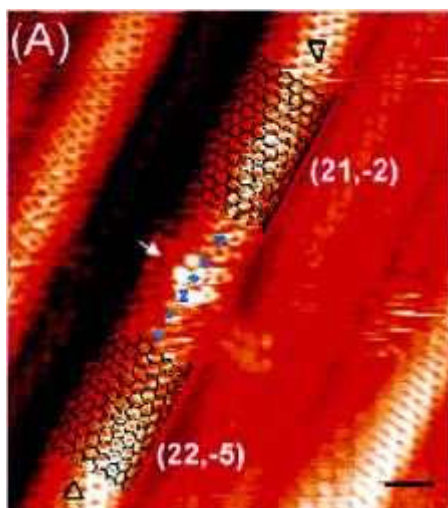
Å spinne fibre av CNT på samme måte som de forannevnte fibre har vist seg å by på store problemer som ikke er løst ennå. CNT med lengder i μm -området, har en sterk tendens til å flokkulere (dvs. å bunte seg sammen i fugleredelignende ansamlinger). Det har vist seg å være svært vanskelig å finne et dispersjonsmiddel som ”løser opp” disse ansamlingene når konsentrasjonen av rørene øker opp til et nivå som egner seg for spinning. Imidlertid arbeides det intenst med å nyttiggjøre seg av CNT til fremstilling av avanserte fibre. Ved *University of Texas, Department of Chemistry and The Nano Tech Institute*, har man funnet frem til en metode for fremstilling av fibre bestående av 60 % SWNT og 40 % polyvinylalkohol (PVA) med diameter 50 μm [27]. Denne fiberen, som også er elektrisk ledende, må man anta er begynnelsen på utviklingen av en helt ny type fibre basert på CNT, som etter hvert vil få et meget bredt anvendelsesområde, hvor også myke ballistiske paneler inngår. Med dagens lengder på fibre vil det ikke være aktuelt at CNT skal erstatte eksisterende ballistiske fibre. Det vil være mer aktuelt å tilsette CNT i matrisen for å øke mekanisk styrke som igjen vil kunne øke energiopptaket.

Tabell 5.9 Data for ”Single-wall” og ”Multi-wall” CNT.

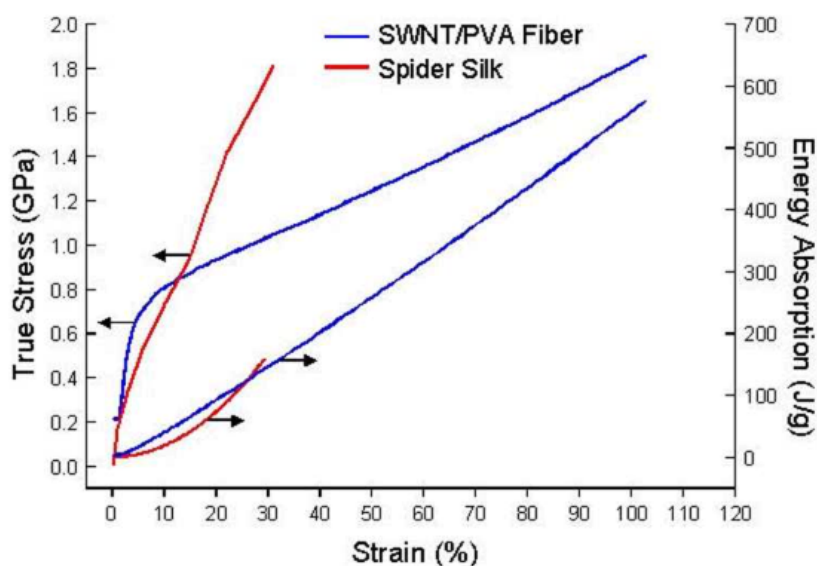
	Enhet	SWNT	MWNT
Tetthet	g/cm^3	1,3-1,4	
E-modul	GPa	1000 – 5000	500 – 1000
Strekfasthet	GPa	300 - 1500	300 - 600
Bruddforlengelse	%	20 – 40	20 - 40

I Figur 5.15 er CNT sammenlignet med den sterkeste edderkoppsilke. De to kurvene til venstre viser strekkfastheten som funksjon av strekkforlengelsen og de to kurvene til høyre viser energiopptak som funksjon av strekkforlengelsen. Det er rapportert senere at CNT fiberen er forbedret ytterligere enn hva som er vist av dataene i Figur 5.15.

Det er også publisert arbeid hvor SWNT (10 Wt %) er blandet inn i PBO fiber med bl.a. 50 % økning av strekkfastheten [28].



Figur 5.14 Bilde av SWNT tatt vha Scanning Tunnelling Microscopy (STM). Gitterstrukturen kommer tydelig frem (Eindhoven University and Technology).



Figur 5.15 Strekkfasthet (de to kurvene til venstre) og energioptak (de to kurvene til høyre) som funksjon av strekkforlengelse for SWNT/PVA fiber (blå) og edderkoppsilke (rød). Energiopptaket til brudd er 570 J/g for CNT fiberen (104 % forlengelse) sammenlignet med 165 J/g for edderkoppfiberen (30 % forlengelse). Til sammenligning har Kevlar fiber 33 J/g og karbonfiber 12 J/g.

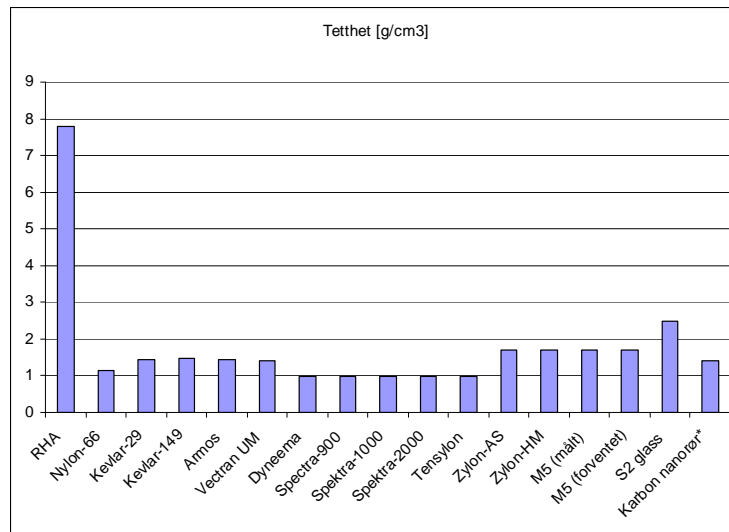
5.8.4 Keramiske fibre

Eksempler på keramiske fibre er alumina fibre, silisiumkarbid fibre, og andre fibre basert blant annet på bor (B). Disse fibre tåler høy varme og er slitesterke. Grunnen er at fibre blant annet har høy kompresjonsstivhet. På grunn av høye produksjonskostnader og relativt dårlige ballistiske egenskaper har ikke disse fibre blitt brukt til ballistisk beskyttelse.

5.9 Sammenligning av fibre

I dette kapittelet er de fire viktigste materialeegenskapene til fibrene sammenlignet, også i forhold til typiske verdier for stål (RHA).

I Figur 5.16 vises tettheten. For det første ser vi en gruppering av fibertyper; eksempelvis har alle fibre som er basert på polyetylen (Dyneema og Spectra) lik tetthet. Det samme gjelder for aramidene (Kevlar/Twaron og Armos), og gruppen Zylon / M5. For det andre er PE de eneste som har tilnærmet, eller noe lavere tetthet enn vann.

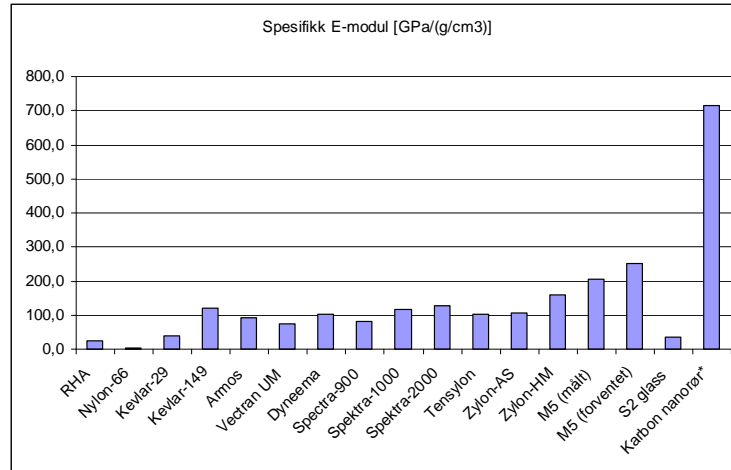


Figur 5.16 Tetthet for de forskjellige fibrene, sammenlignet med stål (RHA). *) SWNT

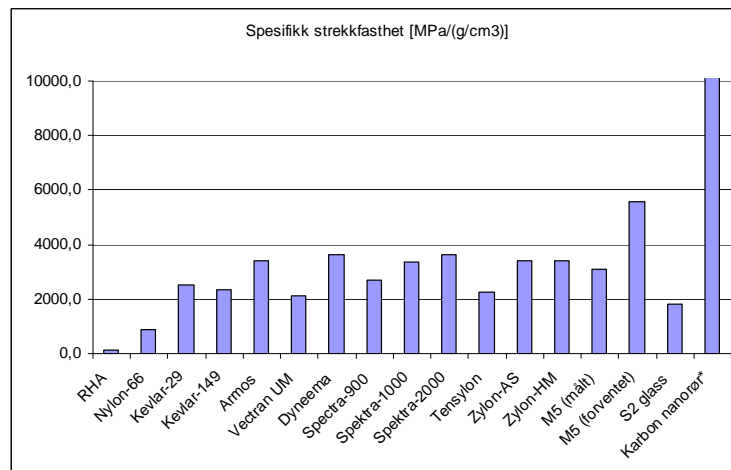
Figur 5.17 gir en oversikt over den spesifikke⁷ E-modulen. Her er Zylon (PBO) det beste alternativet ut fra hva som finnes på markedet i dag, hvis ytelsen kun dømmes ut fra denne parameteren. Vi ser at M5 har et potensial, om denne kommer ut på markedet. Det samme har karbon nanorør, men dette er noe lenger frem i tid. Aramidene og UHMWPE-baserte fibre har omtrent de samme egenskapene.

Figur 5.18 sammenligner den spesifikke strekkfastheten. Stål kommer dårlig ut i denne sammenligningen, pga den høye tettheten. Altså må man ha mye større masse for å oppnå samme kvalitet ved å bruke stål. Figur 5.19 viser bruddforlengelsen til fibrene.

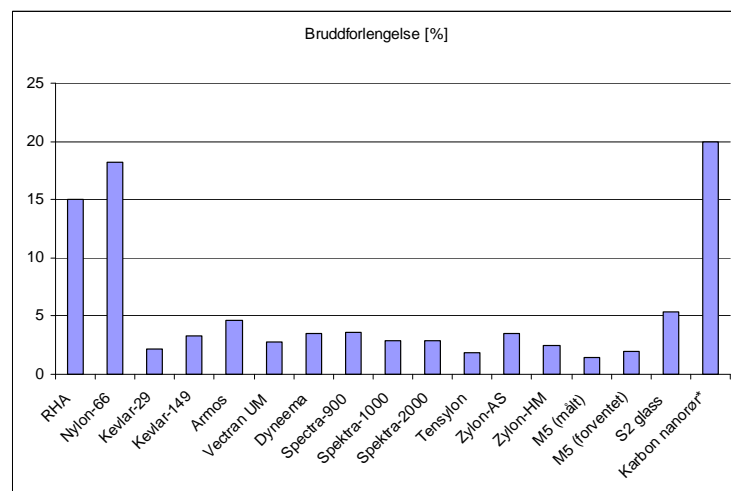
⁷ Spesifikk verdi (eks E-modulen) er verdien delt på tettheten til materialet. Dette gir et bedre bilde når man ønsker best mulige egenskaper på vektbasis. Eks høyeste spesifikk E-modul, gir den beste elastiske egenskapen pr masseenheter.



Figur 5.17 Spesifikk E-modul for forskjellige fibre og sammenlignet med stål (RHA). *) SWNT

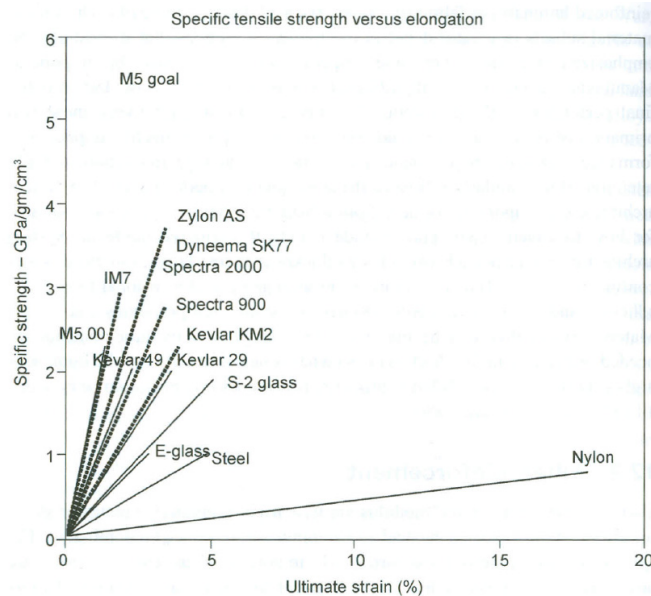


Figur 5.18 Spesifikk strekkfasthet for forskjellige fibertyper, samt stål (RHA). *) SWNT



Figur 5.19 Sammenligning av bruddforlengelsen for noen fibertyper, sammen med stål (RHA). *) SWNT

Spesifikk strekkfasthet ("strength") og bruddforlengelsen ("ultimate strain") er også plottet sammen i Figur 5.20. Ønsket er å få størst mulig energiopptak, med minst mulig tøyning. Altså er det fordelaktig å befinne seg i øverste venstre hjørnet av figuren. Igjen ser vi at Zylon og PE fibre kommer godt ut av de kommersielle fibrene, mens M5 og karbonfibre har gode utsikter hvis disse realiseres. Merk at bruddforlengelsen av karbonfibre ikke stemmer overens i Figur 5.19 og Figur 5.20. Grunnen til dette er at karbonfiber IM7 er ikke karbon nanofiber.



Figur 5.20 Sammenligning av styrke og tøyning for forskjellige typer fibre. Figuren er hentet fra ref. [29], s. 338. IM7 er karbonfiber, som regnes for det karbonfibret mest optimalt for ballistisk beskyttelse. M5 00 er M5 fiber målt i laboratoriet.

6 Keramikk

6.1 Generelt

Keramikk forbindes i første rekke med baderomsflis, middagsservise og sanitærartikler. Disse artiklene er fremdeles de som dominerer keramikkindustrien. Behovet for mer avansert keramikk er imidlertid stort i elektronisk industri. I tillegg er også keramikk som ballistisk beskyttelse blitt en økende produktkategori.

Det er tilsynelatende heller ikke helt klart hva som er keramikk. Enkelte definerer glass som keramikk, andre ikke. Det som skiller glass fra andre keramer er den atomære eller molekylære strukturen. Glass er et amorft materiale, som innebærer at molekylene med noen få Ångstrøms ($\text{\AA}=10^{-10}$ m) avstand imellom, ikke har noen ordnet struktur. Glass er som oftest et gjennomsiktig materiale mens keramikk som oftest ikke er det. Denne egenskapen er likevel ikke egnet til å skille disse to materialgruppene. Andre keramer er krystallinske hvilket betyr at atomene ligger ordnet i en gitterstruktur. Krystallinsk keramikk kan være gjennomsiktig og amorft glass kan være ugjennomsiktig.

Tatt i betraktning denne noe uklare avgrensningen av hva keramikk er, deler man likevel keramikk inn i to grupper, avhengig om de inneholder oksygen eller ikke. Normalt er de oksygenholdige keramene billigere og enklere å produsere. De keramiske materialene som ikke inneholder oksygen, er mer motstandsdyktige mot slitasje og erosjon, men er også mer kostbare.

6.2 Produksjonsmetoder

Utgangspunktet for all avansert keramikk er et finfordelt pulver av den aktuelle kjemiske sammensetningen. Denne pulvermassen blir først presset sammen til den ønskede formen, for deretter å gjennomgå en komprimeringsprosess. Her finnes det ulike prosesser, som er beskrevet nærmere i de neste underavsnittene.

Felles for alle disse prosessene er at tettheten øker, hvilket samtidig innebærer at volumet blir redusert. Prosentvis reduksjon i dimensjonene varierer noe fra prosess til prosess, men kan komme opp i hele 15 %. Det er derfor viktig at dette tas høyde for før komprimeringen starter. Denne oppførselen fører til at produksjonen er mer uforutsigbar og dermed fordyrende.

6.2.1 Sintring

Sintring består i oppvarming til ca 1600 °C. Under denne varmebehandlingen vil pulverkornene gradvis vokse sammen slik at porene lukkes og tettheten øker. Dette fører til at volumet krymper betydelig. For aluminiumoksid vil man få en krymping på 15 % i alle retninger. Sintringsprosessen varer fra timer til flere døgn. For å unngå reaksjon med luft bør sintringen foregå i en hydrogenatmosfære, men dette er ikke alltid påkrevd. Fordelen med denne produksjonsmetoden er lav porøsitet og ingen utilsiktede faser⁸ ved korn grensene. Ulempen er krav om høy temperatur, samt at kornstørrelsen blir stor i forhold til andre produksjonsmetoder.

En noe mer sofistikert versjon av sintring er sintring der en eller flere av komponentene er i en flytende metallisk fase og med bruk av additiver. Dette kalles "liquid phase sintering" (LPS). Også ved denne prosessen oppnås lav porøsitet. Ulempen er at det dannes glassaktige (amorfe) faser i korn grensene bestående av oksider.

6.2.2 Trykksintring (HPS)

Trykksintring ("hot pressed sintering"; HPS) er en prosess hvor man i tillegg til å varme opp, øker trykket inntil ca 30 MPa under sintringen. Denne prosessen gir lav porøsitet og styrken i materialet kan bli fordoblet i forhold til sintring uten trykk. Ulempen ved denne prosessen er at man kun er i stand til å lage enkle geometriske strukturer som fliser. Prosessen er 2,5-3 ganger mer kostbar enn sintring [30], dette på grunn av manglende automatisering.

⁸ Med 'faser' menes her elementer eller urenheter som ikke er tilsiktede som bestanddel i produksjonen. Eksempler kan være luftlommer (porøsitet), grafitt og rent karbon i borkarbid eller elementer av glassaktige oksider som i silisiumkarbid.

6.2.3 Varm isostatisk pressing (HIP)

Varm isostatisk pressing (HIP – Hot Isostatic Pressing) er den mest avanserte formen for sintring. Her foregår prosessen under et gasstrykk på ca 200 MPa ved ca 1500 °C. Dette gir et ekstremt homogent materiale med svært lav porøsitet. Kun enkle geometriske strukturer er foreløpig mulige å prosessere.

6.2.4 Reaksjonssintring (RB)

Som et alternativ til sintringen, kan noen keramiske materialer fremstilles ved reaksjonssintring (reaction bonded ceramics). Her må prosessen foregå i en spesiell atmosfære. Ved fremstillingen av eksempelvis silisiumnitrid varmer man silisiumpulver i en atmosfære av nitrogen. Så lenge materialet er porøst, vil nitrogenmolekylene trenge inn i materialet, reagere med silisiumet, og danne silisiumnitrid (Si_3N_4). Ulempen med denne prosessen [31] er at materialet blir mer porøst enn ved de andre keramiske produksjonsprosessene, samt at 10-20 % av eksempelvis silisiumet ikke reagerer med nitrogen. Dette fører til svakheter i materialet. Andre materialer som lages ved hjelp av denne prosessen er silisiumkarbid og borkarbid. Fordelene er at det kreves lave temperaturer, og man er i stand til å lage mer komplekse strukturer. Produksjonskostnadene er billigere enn HPS og HIP; se avsnitt 6.2.2 og 6.2.3. Reaksjonssintret keramikk oppnår ikke samme ballistiske ytelse som eksempelvis sintret eller varm isostatisk presset keramikk. Likevel har reaksjonssintret keramikk blant annet blitt benyttet på noen HMMWV kjøretøyer [32].

6.2.5 Etterbehandling

Keramikk er generelt vanskelig å bearbeide. Enkel maskinering er vanligvis umulig uten helt spesielle redskaper. Derfor bør keramikk helst tilpasses behovet allerede før sintringsprosessen. Dette øker maskineringskostnadene med inntil 50 %. Keramikk er også dyrt å reparere. I praksis må et keramisk panser lages etter byggeklossprinsippet ved at mindre deler, f.eks. fliser, limes sammen. Dette er en tidkrevende prosess, og kan skape svake punkter i skjøtene.

6.3 Egenskaper ved keramikk for ballistisk beskyttelse

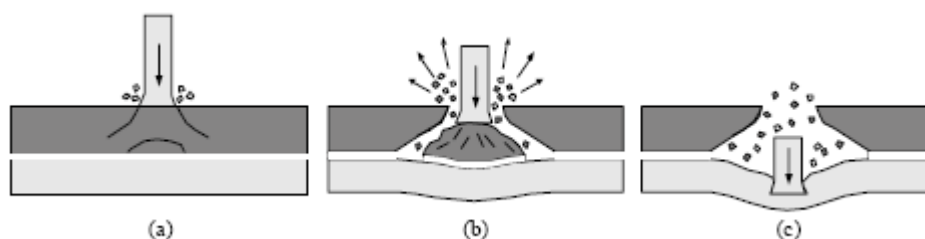
Det har i ca 40 år vært forsket på hvilke fysiske prosesser som bestemmer oppførselen av keramikk i panseringsrollen. Et stort antall modeller har vært foreslått, men ingen gir et fullt ut tilfredsstillende svar. Likevel er forståelsen av keramikk langt bedre i dag enn den var i 60-årene. Problemet synes å ligge i at nesten all deformasjon skyldes oppsprekking. Beskrivelsen av sprekker og sprekkeforplantningen er kjent for å være noe av det vanskeligst å modellere innenfor mekaniske fag.

Keramikk har flere gode egenskaper som utnyttes i ballistisk beskyttelse [33]. Det har lavere tetthet enn stål (f.eks. RHA), noe som alltid vil være viktig ved pansring av kjøretøyer. Keramikk har høyere E-moduler enn stål, som betyr at materialet er stivere. Og keramikk er hardere, dvs. har en høyere flytegrense. Dette betyr at materialet ikke så lett lar seg deformere plastisk.

Ulempen med keramikk er at materialet ikke er spesielt tøyelig. Det resulterer i at keramikk sprekker opp, og dermed mister sin styrke. Denne effekten kan derimot motvirkes ved å støtte opp

keramikkplatene med ”tøyelige” materiale på baksiden – en såkalt backing. Backingen kan bestå av stål, aluminium, komposittplater eller andre myke (sett i forhold til keramikk) materialer.

Penstrasjonsforløpet i keramikk, se f.eks. [34;35] deles gjerne inn i tre faser, Figur 6.1. Den første fasen er fragmentering av keramikkplaten. Dette skjer på grunn av elastiske bølger i keramikken fra det tidspunktet prosjektilet treffer keramikkflisens overflate. Oppbrytningen skjer hovedsakelig i et avgrenset område rundt prosjektilets treffpunkt, og har en konisk form gjennom keramikens tykkelse. Siden keramikken rundt dette koniske området vil være intakt, hindres fragmentert keramikk å flykte andre steder enn hvor prosjektilet kommer fra. Etter hvert som prosjektilet fortsetter penetrasjonen, vil keramikken ytterligere brytes opp. Dette fører til at pulverisert keramikk strømmer opp langs prosjektilets side, som dermed eroderes. Dette er den andre fasen i penetrasjonsforløpet. Den tredje fasen starter når prosjektilet, eller restene av det, har perforert keramikkplaten og starter å penetrere backingplaten. Etter at prosjektilet har penetrert keramikken vil restenergien være vesentlig redusert, både i form av hastighetsreduksjon og massereduksjon. I tillegg vil lasten som prosjektilet utøver mot backingen være fordelt over et større område. Alt dette vil øke muligheten til å stoppe trusselen.



Figur 6.1 Faser i penetrasjonsprosessen for keramisk materiale. (a) Fragmentering. (b) Penetrering. (c) Penetrasjon av backingen.

Backingen (i form av stål el.) bidrar til å holde keramikk materialet på plass, som dermed øker eroderingsprosessen av innkommende projektiler. Ut fra denne kunnskapen har det vært forsøkt å øke eroderingsprosessen ytterligere ved å hindre bevegeligheten til keramikkplatene i flere retninger [34].

6.3.1 Ballistisk styrke og materialparametere

Det har vist seg vanskelig å beskrive penetrasjonsforløpet i keramikk kvantitativt, dvs. å finne sammenhenger mellom penetrasjonsforløp og materialeegenskaper. Man har derfor forsøkt å finne empiriske sammenhenger mellom ballistisk ytelse og noen materialeegenskaper. Materialeegenskapene bestemmes av mikrostrukturen i materialet. Med mikrostrukturen menes blant annet kornstørrelse, porøsitet, faser, faseoverganger og amorfisering som følge av indre spenninger. Nedenfor er det forsøkt å peke på de viktigste materialeegenskapene, og på hvilken måte de påvirker ytelsen [36;37].

Tetthet

Tettheten bør være lav. Lette materialer gir som regel et større energioptak pr masse enn tunge materialer. Dessuten, ut fra en enkel hydrodynamisk betraktning av deformasjonsprosessen, vil ytelsen til en pansring øke med den inverse kvadratroten av tettheten. Geværprosjektiler har imidlertid for lav hastighet til at man kan bruke en ren hydrodynamisk betraktning. Avhengigheten av tettheten vil derfor være svakere i en slik sammenheng. Tettheten kan senkes ved å ha en mer porøs keramikk, men porøsitet har svært uheldig virkning på andre ballistikkrelaterte egenskaper, f.eks. E-modulen.

Elastisitetsmodul

E-modulen (Youngs modul) bør være høy, og over 325 GPa. Den høye stivheten fører til at det tar tid før materialet sprekker opp. Høy E-modul fører også til høye bølgehastigheter som gir høy energispredning.

Hardhet

En keramikk bør være så hard som mulig og helst en del hardere enn det prosjektilet som keramikken skal stoppe. Dermed oppnår man at prosjektilet, snarere enn pansringen, knuses. Hardheten bør være over 1250 HV. Ray et al. [38] har rapportert at ballistisk ytelse, målt ved bruk av DOP tester, er godt korrelert med materialets hardhet. Flere andre artikler støtter opp om dette, eksempelvis artikler publisert i referanse [39].

Bruddstyrke

Det er forskjellige meninger om hvordan bruddstyrken affekterer den ballistiske ytelsen. Man synes å være enig om at den i alle fall ikke bør være for lav. Dette går direkte på slitasje i felt, samt multi-hit egenskaper. Imidlertid er det ikke klart hvorvidt en ekstremt høy bruddstyrke er å foretrekke. Dannelsen av sprekker er med på å øke energioptaket. Lav grad av sprekkdannelsen kan derfor være uheldig. Samtidig er det vanskelig å oppnå både høy bruddstyrke og høy hardhet. Høy hardhet oppnås ved å eliminere ikke-krystallinske faser i grenseflatene mellom kornene; mens denne ikke-krystallinske fasen er viktig for å redusere sprekkdannelser (altså øke bruddstyrken) [40].

Lydhastighet

Høy E-modul og lav tetthet tilsier en høy lydhastighet. Dette innebærer at den kinetiske energien raskt blir transportert utover fra treffpunktet slik at energitettheten i området der prosjektilet treffer, blir lavest mulig. Lydhastigheten i keramikk er høyere enn i de fleste andre materialer og bør minimum være 10 km/s.

Mekanisk styrke

Den mekaniske styrken (f.eks. bøyestyrken) bør trolig være høy. Imidlertid ser man eksempler på at en relative lav bøyestyrke på 250 MPa i alumina gir en god grad av beskyttelse.

I Figur 6.4 er de omtalte egenskapen gitt for de mest aktuelle keramikktypene. I Tabell 6.1 er det listet opp noen data for de mest brukte keramiske materialene. De samme materialene, samt noen

flere, vil bli behandlet i mer detalj i avsnitt 6.4. Data gitt fra forskjellige produsenter er gitt i egne tabeller fra side 119 og utover. Merk at tallene ikke alltid vil stemme overens, da forskjellige produsenter vil ha forskjellige kvaliteter, samt at utførelsen av materialtestene i stor grad påvirker verdiene som måles.

Tabell 6.1 Materialdata for noen keramiske beskyttelsesmaterialer.

Keramikk	Tetthet [g/cm ³]	Hardhet [HV GPa]	Bruddstyrke [MPa m ^{1/2}]	E-modul [GPa]	Lydhast. [km/s]	Bøyestyrke [MPa]
AL95	3,720	11,5	4 – 5	303		
AL98	3,800	12,9	3,15	340	10,2	300
AL99,6	3,900	15,4	3,25	425	11,2	350
SiC (sint)	3,150	22,5	3,5	410	11,2	320
SiC (HP)	3,270		5,25	445	11,6	680
Si ₃ N ₄	3,330	17,5	7,8			760
AlN	3,260		2,5	330		350
B ₄ C	2,480	32	3,3	450	13,3	280
Ti ₂ B	4,500	23,5	6,8	550	11,1	340

Impedanseffekter

Akustisk impedans er produktet av tetthet og lydhastighet, og er et uttrykk for ”motstanden” mot påtrykte svingninger i et materiale. Når bølger går fra ett medium med en akustisk impedans til et annet med en annen akustisk impedans, oppstår både refleksjon og transmisjon av den innkommende bølgen. Jo større forskjellen er mellom impedansene, jo større blir andelen reflekterte bølger.

Når keramikk brukes sammen med enten metaller eller komposittmaterialer vil dette gi opphav til slike impedanseffekter. Keramikk som for eksempel festes til et materiale med lav tetthet og dermed lav impedans, og limet som benyttes i tillegg har lav skjærstyrke, får man reflektert tøyingsbølger fra baksiden av keramikken [34;41]. Reflekterte tøyingsbølger fører til en økt oppsprekking av keramikkflisen, og en reduksjon i erosjonseffekten.

Gooch [34] sier at beskyttelsesevnen øker med styrken til limlaget, og ved bruk av metallurgiske bindinger som gir god skjærkobling. For å oppnå minst mulig variasjon i ballistisk beskyttelse blir det vist til DOP tester hvor tykkelsen på limfugen er variert. Disse viser at tynnere limlag (<127 µm) gir mindre variasjoner i ytelsen.

Størrelse og utforming

Hazell et al. [42] har utført eksperimenter hvor man har konkludert med at beskyttelsesevnen til keramikk er avhengig av flisstørrelsen. Dette henger delvis sammen med impedanseffekter referert til ovenfor. Denne effekten antas å være på grunn av reflekterte bølger fra periferien av flisene, som vil fremskynde fragmenteringen av keramikkplaten, og dermed hindre erosjon av prosjektilet. Det har blitt utført enkle tester med å skråskjære flisene i kantene, og at dette har en

positiv effekt [41]. Utforming og flisstørrelse bør være slik at et treff fra et prosjektil ikke gir full desintegrasjon av flisa. Dette fører til at andre nærliggende fliser fortsatt holdes på plass, og dermed beholder sin ballistiske ytelse. Samtidig bør dimensjonen være så liten at flere påfølgende trefninger (multi-hit) ikke penetrerer samme flis.

6.3.2 Parametrene innvirkning ut fra en hierarkisk struktur

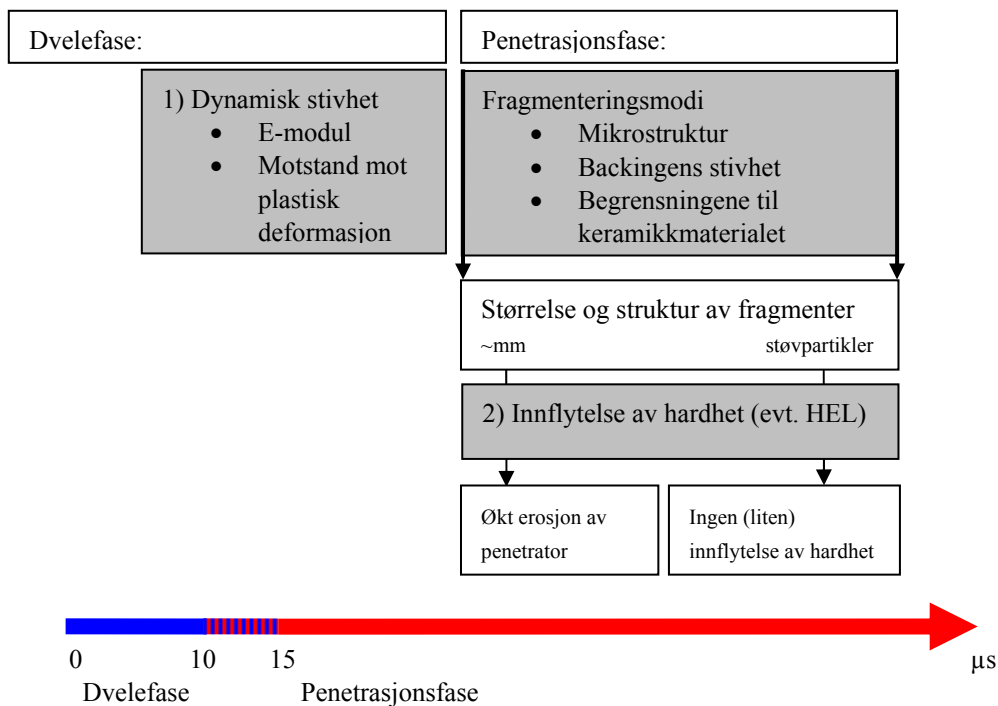
Krell og Strassburger [43] har foreslått en hierarkisk struktur av materialparametere for å forklare den ballistiske evnen til en type keramikk. De har basert denne strukturen på flere DOP forsøk utført mot kommersielle keramer, der resultatene ofte er både overraskende og tilsynelatende selvmotsigende ut fra hva som beskrives i avsnitt 6.3.1.

Strukturen er basert på to faser kalt dvelefasen og penetrasjonsfasen. Dvelefasen er den første, hvor Youngs modul (E-modulen) er antatt å ha størst innvirkning. I denne korte perioden, som kan sies å vare mindre enn 10 μs , vil den dynamiske stivheten overgå lasten fra prosjektilet. Prosjektilet vil derfor ikke penetrere materialet, men ”dvele” ved overflaten. Hardheten til materialet (som sier noe om evnen til å motstå plastisk deformasjon i et begrenset område) vil være av mindre betydning da en slik plastisk deformasjon ennå ikke har funnet sted.

Selve penetrasjonsforløpet starter 10-15 μs etter at prosjektilet kommer i kontakt med materialet. I starten er penetrasjonshastigheten lav og er assosiert med erosjon og fragmentering av både prosjektil og keramikk. Det er antatt at keramikk raskt mister styrken i bindingene mellom mikrostrukturene, og at dette forklarer hvorfor man ikke observerer en sammenheng mellom ballistisk motstandsevne og statisk styrke. For å deselerere innkommende prosjektil, er man avhengig av at de keramiske fragmentene har stor nok treghet til å utøve stor nok kraft. Den ballistiske evnen i penetrasjonsfasen er derfor avhengig av hvordan materialet fragmenterer og hardheten til disse fragmentene (hardheten i mikrostrukturen). Krell og Strassburger [43] har gjort overslag som kan tyde på at man får en økt erosjonseffekt ved økt **størrelse** av spisse fragmenter (hvilket innebærer at antall fragmenter reduseres). Ved større fragmenter vil økt hardhet øke erosjonen. I tillegg til mikrostrukturen er både backingens stivhet og en evt. innesperring av materialet med på å bestemme størrelse og antall fragmenter.

Når det gjelder hardhet, ser man en lineær sammenheng mellom statisk hardhet og HEL (Hugoniot Elastic Limit). Krell og Strassburger [43] argumenterer derfor at både statisk hardhet og HEL kan benyttes til en slik vurdering av materialets ballistiske egenskap.

Andre parametere er antatt enten å være avhengig av de ovennevnte parametere, om en på en kompleks måte, og vil derfor ikke tas med i hierarkiet for enkelthetsens skyld. En oppsummering av parametrene innvirkning på den ballistiske beskyttelsesevnen finnes i Figur 6.2.



Figur 6.2 Varighet av dvelefase og penetrasjonsfase i et keramisk materiale, med de respektive materialegenskapene som er styrende for materialets motstandsevne mot ballistiske prosjektiler.

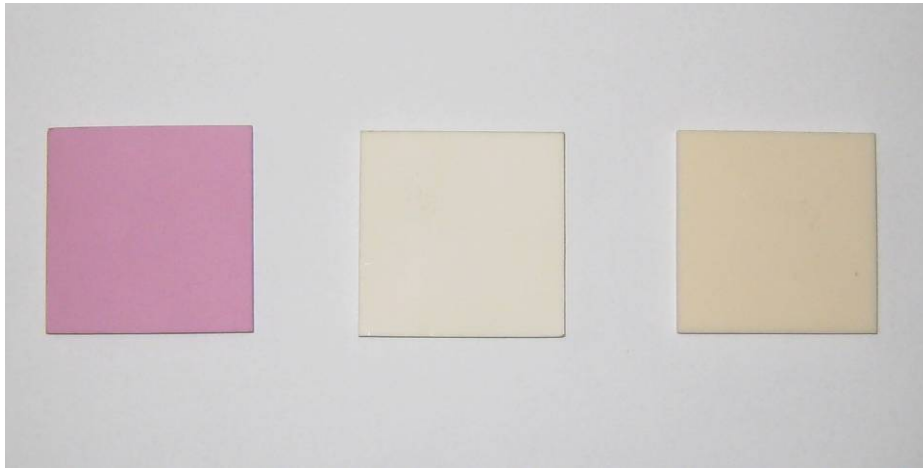
6.4 Typer keramikk

Det finnes flere keramikktyper som brukes i forbindelse med ballistisk beskyttelse. I de påfølgende underkapitler vil de mest brukte bli beskrevet i noe mer detalj.

6.4.1 Alumina

Aluminiumoksid, Al_2O_3 , også kalt alumina, er det vanligste og på sett og vis det "simpleste" av de forskjellige keramene som brukes som beskyttelse. Alumina har god virkningsgrad til lav kostnad. Råvaren er anslagsvis 10 – 25 % av prisen for laveste kvalitet av silisiumkarbid hvilket innebærer 2,5 – 6,5 \$/kg. Alumina kan produseres på flere måter, og krever ikke spesielle tiltak som inert atmosfære (som Argon gass el.). Produksjonstemperaturen ligger på 1500-1650 °C.

Alumina forekommer i naturen som mineralet korund og er en bestanddel i bauxitt som er råvaren i produksjon av aluminium. Ved utvinning av alumina oppnår man forskjellig grad av renhet. Ved lav renhet (ca 90 %) har den en rosa farge på grunn av innholdet av jern- og titanoksider. Ved en høyere renhet blir fargen hvit, og ved en renhet på over 99 % er den nærmest preg av elfenben (Figur 6.3). Alumina er motstandsdyktig mot de fleste sure og basiske løsninger. Noen typiske data er gitt i Tabell 6.2



Figur 6.3 Alumina; lavest renhet til venstre. De to flisene til høyre (hvite) er begge av høy kvalitet men har forskjellige produsenter.

Tabell 6.2 Typiske materialdata for Alumina ved tre forskjellig renhetsgrader.

	Enhet	Alumina			Alumina/zirconia [44]
Renhet	%	85	96	99,5	
Tetthet	g/cm ³	3,420	3,720	3,900	4,010
E-modul	GPa	221	303	370	360
Hardhet	GPa	9,4	11,5	14,1	14,4
Bruddstyrke	MPa m ^{1/2}	3 – 4	4 – 5	4 – 5	5 – 6
Lydhastighet	km/s	9 – 10	9 – 10	9 – 10	
Bøyestyrke	MPa		358	379	
Farge		rosa	hvit	elfenbenshvit	hvit
Kompresjonsstyrke	GPa	1,93	2,07	2,6	
Poisson-tall		0,22	0,21	0,22	0,23
Spesifikk varmekapasitet	J kg ⁻¹ K ⁻¹	755			885
Termisk utvidelseskoeffisient	10 ⁻⁶ K ⁻¹		8,2	8,2	8,3
Varmeledningsevne	W m ⁻¹ K ⁻¹	16	22,4	30	27

Alumina med (99,5 % renhet) kan tilpasses Johnson-Holmquist-modellen, se Tabell 10.1.

Alumina / zirconia (dvs. en form for keramisk kompositt) kan også brukes som ballistisk beskyttelse. Men, dette vil kun være aktuelt hvis vekt ikke er kritisk, da tettheten ligger på noe over 4 g/cm³.

6.4.2 Silisiumkarbid

Silisiumkarbid består av en tetraederstruktur av silisium- og karbonatomer med sterke bindinger i krystallstrukturen [45]. Dette gjør at silisiumkarbid er et hardt og sterkt materiale. Det påvikes ikke av sure, basiske eller saltløsninger opp til ca 800 °C.

Silisumpulver utvinnes ved reduksjon av SiO₂. Prisen er ca \$25-30 pr kg. Totalt utvinnes ca 1 million tonn pr år [30].

Silisiumkarbid kan produseres på flere måter. De vanligste produksjonsformene er sintring og varm isostatisk pressing (HIP). Som for borkarbid har silisiumkarbid fra slutten av 1990-tallet blitt produsert ved hjelp av reaksjonssintring [37]. De to sistnevnte metodene vil øke mulighetene for å lage mer komplekse geometriske strukturer som hjelmer etc. Rendtel et al. [46] har gjort hardhetsmålinger på SiC produsert på forskjellige måter. Konklusjonen er at renhet og fasekomposisjonen i materialet er med på å bestemme hardheten. De høyeste målingen ble gjort mot singelkrystall SiC, HIP-SiC og bor dopet sintret SiC. Lavere hardhet fant man i LPS (liquid phase sintered) SiC og HP (hot pressed) SiC utført i en aluminiumholdig flytende fase. Tester utført på sintret SiC (sSiC) og liquid-phase-sintered SiC (LPS SiC), viser at så langt er kun sSiC er aktuell til ballistisk beskyttelse [42]. Cercom har utviklet SiC-B [47], se side 120.

Tabell 6.3 Typiske materialdata for silisiumkarbid.

	Enhet	SiC
Tetthet	g/cm ³	3,1 – 3,3
E-modul	GPa	390 – 450
Hardhet	GPa	22 – 32
Bruddstyrke	MPa m ^{1/2}	3 – 5
Lydhastighet	km/s	11-12
Bøyestyrke	MPa	300 – 700
Farge		grå
Kompresjonsstyrke	GPa	2 – 4
Poisson-tall		0,17
Spesifikk varmekapasitet	J kg ⁻¹ K ⁻¹	715
Termisk utvidelseskoeffisient	10 ⁻⁶ K ⁻¹	3,5 – 4,5
Varmeledningsevne	W m ⁻¹ K ⁻¹	150

Silisiumkarbid blir mer og mer viktig med tanke på beskyttelse mot prosjektiler med harde kjerner [37], til tross for høyere tetthet enn eksempelvis borkarbid. I tillegg har SiC ikke ulempen med faseoverganger som gjør at materialet bryter sammen under store spenningspåtrykk (se avsnitt 6.4.3).

Silisiumkarbid har bedre yteevne enn alumina med ca 10 % vektreduksjon [33]. Materialegenskaper for silisiumkarbid er listet i Tabell 6.3. Silisiumkarbid kan tilpasses Johnson-Holmquist modellen, Tabell 10.1.

6.4.3 Borkarbid

Etter diamant og bornitrid er borkarbid, B_4C , det hardeste materiale man kjenner til, samtidig som det er meget lett. Likevel er borkarbid et sprøtt materiale, som ikke har god yteevne mot multi-hit. Borkarbid lages vanligvis ved sintring eller varm (isostatisk) pressing.

Borkarbidpulver lages i en karbotermisk reduksjonsprosess. Mengden som produseres pr år er ca 100 tonn [30]. Prisen ligger på \$35-40 pr kg, altså noe høyere enn SiC.

Borkarbid har i senere tid vist seg ikke å være vesentlig bedre enn silisiumkarbid når det gjelder å beskytte seg mot prosjektiler med harde kjerner. Dette sies å være et resultat av faseoverganger i borkarbid, som gjør at materialet har mindre motstandsevne enn hva silisiumkarbid har [37;48].

Fra slutten av 1990-tallet har reaksjonssintring blitt oftere brukt. Ved reaksjonssintring blandes pulver av borkarbid sammen med rent karbon. Ved infiltrering av eksempelvis silisium dannes SiC. Denne prosessen binder råvaren (borkarbidpulveret) sammen til keramiske strukturer, med en andel SiC. Rent silisium vil også legge seg i porer, slik at materialet blir fullstendig kompakt. Aghajanian et al. [32] rapporterer at borkarbid bevarer sine gode egenskaper med tanke på bruddstyrke og ballistiske beskyttelsesevne med et silisiuminnhold opp til 30 %. Silisiuminnhold i reaksjonssintret borkarbid gjør materialet mindre sprøtt enn rent borkarbid, samt reduserer kostnadene betraktelig da SiC pulver er billigere enn borkarbid.

Noen materialegenskaper er gitt i Tabell 6.4. Borkarbid kan tilpasses Johnson-Holmquist modellen, se Tabell 10.1.

Tabell 6.4 Typiske materialdata for borkarbid

	Enhet	B_4C
Tetthet	g/cm^3	2,5
E-modul	GPa	380 - 460
Hardhet	GPa	28 - 32
Bruddstyrke	MPa $m^{1/2}$	2,5 - 5
Lydhastighet	km/s	~ 12,5 - 13,5
Bøyestyrke	MPa	250 - 450
Farge		svart / grønn
Kompresjonsstyrke	GPa	1,7 - 3,9
Poisson-tall		0,18
Termisk utvidelseskoeffisient	$10^{-6} K^{-1}$	~5
Varmeledningsevne	$W m^{-1} K^{-1}$	50 - 90

6.4.4 Titandiborid

Titandiborid, TiB_2 , er keramikk med ekstremt høyt smeltepunkt (3170 K), høy hardhet og bra slagseighet. Eksperimenter indikerer at titandiborid også får økt skjærstyrke med økt påtrykk (eks. ved hardere prosjektiler, eller økt hastighet på prosjektiler) [49]. Ulempen er relativ høy

tetthet. Titandiborid har vist noe lavere ballistisk ytelse, på vektbasis, enn silisiumkarbid og borkarbid, mot 7,62x51 mm WC prosjektiler [48], men den kan yte bedre mot andre typer prosjektiler (Figur 6.6). Sammenligner man ytelse mot tykkelse, er titandiborid bedre.

Råmaterialet lages som borkarbid ved karbotermisk reduksjon. Totalt produseres ca 120 tonn årlig. Prisen på råstoffet ligger på ca \$35-65 pr kg [30].

Rent titandiborid er dyrt. Det har derfor vært forsøkt å lage lavkost alumina / titandiborid kompositter [50]. Utgangspunktet er at disse materialene skulle yte nært opptil rent titandiborid. Så langt har resultatene vist at de yter bedre enn rent alumina, men dårligere enn rent silisiumkarbid, borkarbid og titandiborid. Økt produksjonskostnader fører derfor til at en slik løsning ikke ennå er kosteffektivt. Noen av de viktigste materialegenskapene er listet i Tabell 6.5.

Tabell 6.5 Typiske materialdata for titandiborid.

	Enhet	TiB ₂
Tetthet	g/cm ³	4,5
E-modul	GPa	550
Hardhet	GPa	21 – 25
Bruddstyrke	MPa m ^{1/2}	5,5 – 7,0
Lydhastighet	km/s	~ 11
Bøystyrke	MPa	270 – 340
Farge		grå
Kompresjonsstyrke	GPa	1,8
Poisson-tall		0,1 - 0,2
Spesifikk varmekapasitet	J kg ⁻¹ K ⁻¹	617
Termisk utvidelseskoeffisient	10 ⁻⁶ K ⁻¹	8,2
Varmeledningsevne	W m ⁻¹ K ⁻¹	25

6.4.5 Aluminiumnitrid (AlN)

Aluminiumnitrid ble først syntetisert i 1877 men det var ikke før i 1980 at dets anvendelse i mikroelektronikken fremskyndet kommersiell produksjon. Materialet karakteriseres bl.a. ved meget høy varmeledningsevne, faktisk bedre enn kopper ved 200 °C, noe som gjør den anvendbar for bortledning av varme innen mikroelektronikken med et stadig økende krav til tettere pakking av komponentene. Aluminiumnitrid har en heksagonal krystallstruktur, med kovalente bindinger. Keramikken begynner først å oksidere ved ca 700 °C. Den er stabil i hydrogen- og karbon-dioksidholdig atmosfære opp til en temperatur på 980 °C. Ulempen er at aluminiumnitrid løses sakte opp i mineralsyrer, sterke basiske løsninger, samt at den hydrolyserer i vann [51]. Dette betyr at aluminiumnitrid praktisk talt må skjermes mot miljøpåvirkninger. I Tabell 6.6 er det gitt noen data for aluminiumnitrid. Aluminiumnitrid kan tilpasses Johnson-Holmquist modellen, Tabell 10.1.

Tabell 6.6 Typiske materialdata for aluminiumsnitrid.

	Enhet	AlN
Tetthet	g/cm ³	3,25
E-modul, ved 25 °C	GPa	330
Hardhet	GPa	10,7
Bruddstyrke	MPa m ^{1/2}	2,5 – 3
Lydhastighet	km/s	~ 10
Bøystyrke	MPa	310 – 350
Kompresjonsstyrke	GPa	2,1
Poisson-tall		0,24
Spesifikk varmekapasitet	J kg ⁻¹ K ⁻¹	819,7
Strekfasthet	MPa	350
Termisk utvidelseskoeffisient	10 ⁻⁶ K ⁻¹	5,2
Varmeledningsevne ved 25°C	W m ⁻¹ K ⁻¹	80

6.4.6 Wolframkarbid (WC)

Rent wolframkarbid er et skjørt materiale med høy E-modul (600 GPa). Til sammenligning har diamant 1000 GPa. Ved innblanding av 6–10 % kobolt (se avsnitt 8.2.1) øker man seigheten. Egenskapene til denne kermeten gjør det velegnet som materiale f.eks. til bruk for bearbeiding av dreiestål, eller som slipemateriale. Cercom har produsert Wolframkarbid til beskyttelsesformål [47;52]. Ulempen er at materialet har høy tetthet, og er i seg selv meget sprøtt.

Tabell 6.7 gir noen typiske materialverdier for wolframkarbid. Wolframkarbid kan tilpasses Johnson-Cook modellen, Tabell 10.2 og Tabell 10.3.

Tabell 6.7 Typiske materialdata for wolframkarbid.

	Enhet	WC
Tetthet	g/cm ³	15,60
E-modul	GPa	690
Hardhet	GPa	22
Bruddstyrke	MPa m ^{1/2}	7
Lydhastighet (long.)	m/s	6858
Bøystyrke	MPa	1100
Kompresjonsstyrke	MPa	~4500
Kornstørrelse	µm	0,9
Poisson-tall		0,20
Renhet	%	96,8
Skjærmodul	GPa	287
Smeltepunkt	°C	2800
Strekstyrke	MPa	590

6.4.7 Titankarbid (TiC)

Titankarbid benyttes der det er krav til høy slitestyrke og er meget motstandsdyktig mot termiske sjokkpåvirkninger. Av anvendelsesområder kan nevnes vifteblad i jetmotorer. I Tabell 6.8 er noen data gitt for titankarbid.

Tabell 6.8 Typiske materialdata for titankarbid.

	Enhet	TiC
Tetthet	g/cm ³	4,9
E-modul, ved 25 °C	GPa	440
Hardhet	GPa	29 – 32
Bruddstyrke	MPa m ^{1/2}	1,7 – 3,0
Lydhastighet	km/s	~ 9,5
Poisson-tall	MPa	118,6
Smeltepunkt		0,187 – 0,189
Spesifikk varmekapasitet	J kg ⁻¹ K ⁻¹	710 – 780
Strekkfasthet ved 1000 °C	W m ⁻¹ K ⁻¹	5,64
Varmeledningsevne ved 1000 °C	K	3470

6.4.8 Silisiumnitrid (Si₃N₄)

Varmepresset silisiumnitrid har tilnærmet ingen porøsitet. Det fremviser høy hardhet og styrke også ved temperaturer over 1000 °C og er resistent overfor termisk sjokk pga. den lave termiske utvidelseskoeffisienten. Silisiumnitrid har vist, på vektbasis, ballistisk ytelse tilsvarende titandiborid mot 7,62 x 51 mm WC prosjektiler. Ytelsen er dermed noe dårligere enn silisiumkarbid og borkarbid [48]. I

Tabell 6.9 er noen data gitt for silisiumnitrid.

Tabell 6.9 Typiske materialdata for silisiumnitrid.

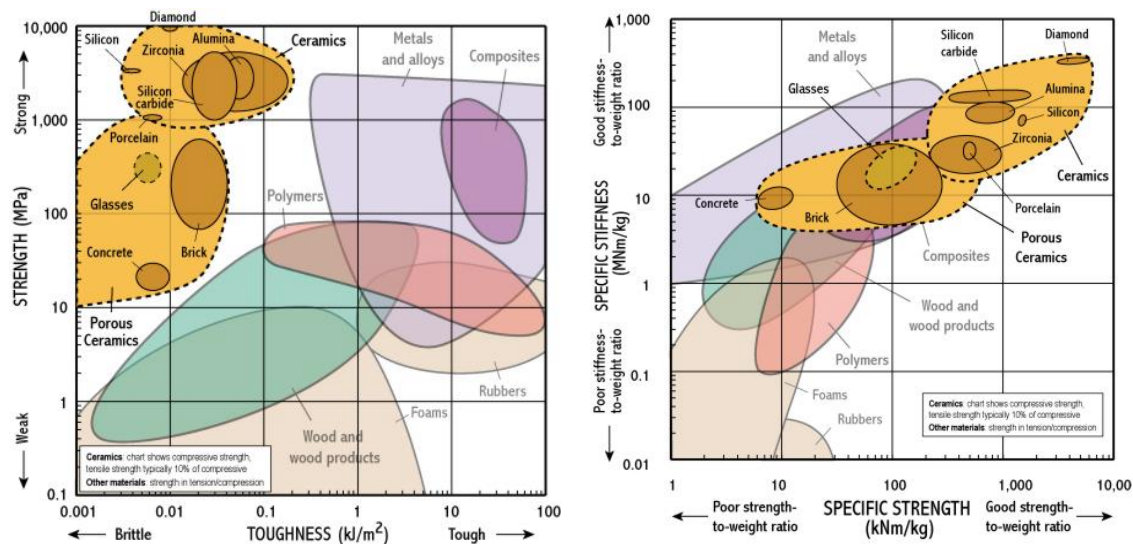
	Enhet	Si ₃ N ₄	Sialon
Tetthet	g/cm ³	3,2 – 3,3	3,24
E-modul	GPa	280 – 330	288
Hardhet	GPa	15 - 17	14 – 18
Bruddstyrke	MPa m ^{1/2}	5,5 – 7,8	6,0 – 7,0
Lydhastighet	km/s	~ 9,7	~ 9,4
Bøyestyrke	MPa	700 – 900	760
Farge		Grå/svart	Grå
Kompresjonsstyrke	GPa	2 – 3,5	
Poisson-tall		0,22 – 0,27	0,25
Strekkfasthet ved 1000°C	MPa	400 – 580	
Spesifikk varmekapasitet	J kg ⁻¹ K ⁻¹	680 – 800	
Termisk utvidelseskoeffisient	10 ⁻⁶ K ⁻¹	3,3 - 3,4	3
Varmeledningsevne	W m ⁻¹ K ⁻¹	20 - 30	15 – 20

Silisiumnitrid lages ved nitridering av silisumpulver, eller reduksjon av silisiumimid (SiHN). Totalt sett produseres noen hundre tonn pr år til en pris av \$30-150 pr kg [30].

Sialon [53] er finkornet, ikke-porøs silisiumnitrid, hvor man har tilsatt noe alumina. Materialet produseres av Accuratus og har i følge produsenten høy styrke, hardhet og bruddstyrke. I tillegg har den god motstand mot korrosjon og oksidasjon. Materialverdier er oppgitt i Tabell 6.9.

6.5 Oversikt – Noen egenskaper for keramer i forhold til andre materialer

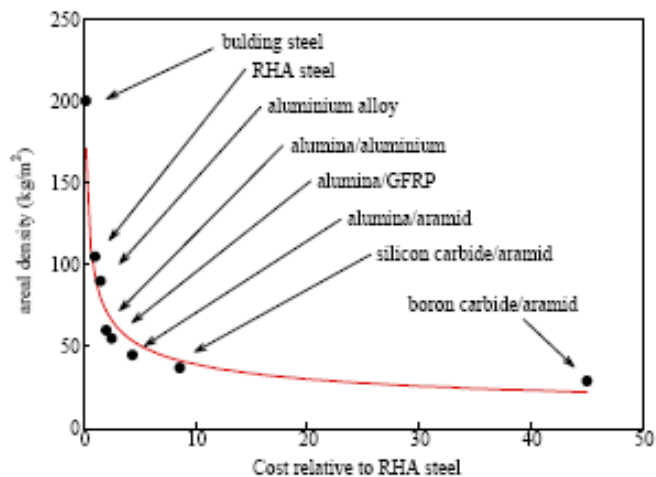
For å få et inntrykk av hvordan forskjellige typer keramikk forholder seg til hverandre i styrke og seighet samt hvordan denne materialgruppe forholder seg til andre materialgrupper, vises en grov oversikt i Figur 6.4.



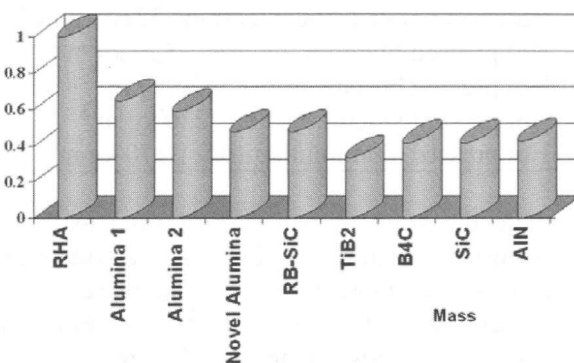
Figur 6.4 En sammenligning av noen materialegenskaper for keramer i forhold til andre materialgrupper.

Roberson [33] har sammenlignet forskjellige beskyttelseskonfigurasjoner mot en 7,62 mm AP prosjektil hvor anslagshastighet var 850 m/s. Keramikk inngår i noen av dem enten i kombinasjon med metall eller kompositt, Figur 6.5.

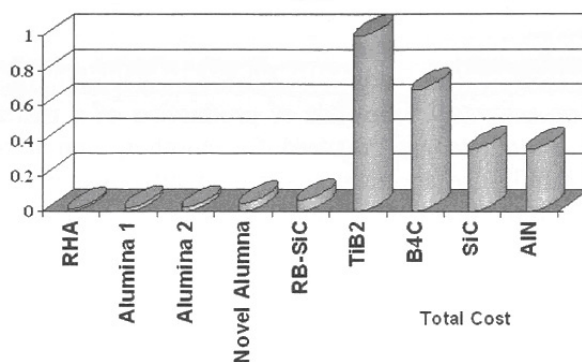
James [41] har sammenlignet ytelser av forskjellige typer keramikk, samt sammenlignet mot stål (RHA kvalitet). Disse sammenligningene finnes i Figur 6.6 - Figur 6.8. Disse gir en pekepinn på nødvendig masse, kostnad og tykkelse som er påkrevd for å stoppe en gitt småkalibret trussel. Tallene er relative.



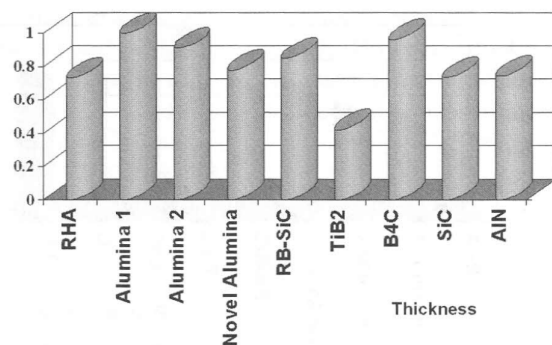
Figur 6.5 Sammenligning mellom noen konfigurasjoner for ballistisk beskyttelse mot 7,62 AP hvor anslagshastighet var 850 m/s.



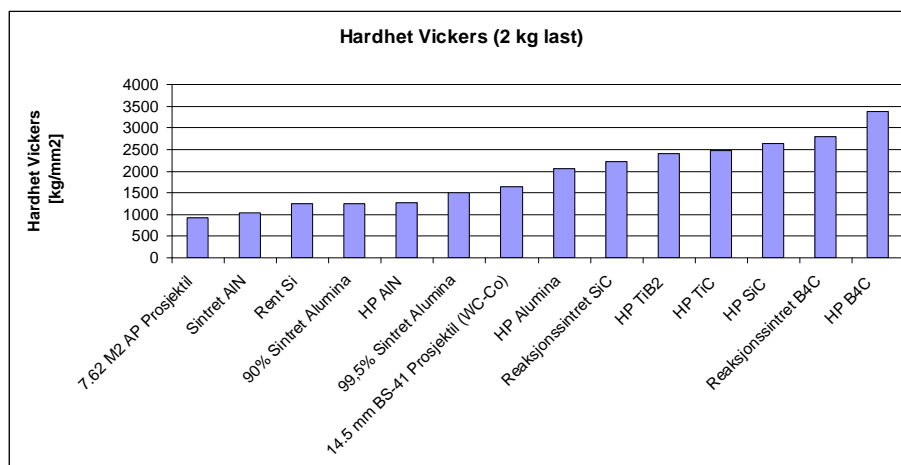
Figur 6.6 Sammenligning av forskjellige typer keramikk hvor man angir nødvendig vekt for å stoppe en gitt trussel. Figuren er hentet fra [41]. Alumina 1 og 2 er sintret alumina med hhv 95 % og 98 % renhet. Novel alumina er DSTL utviklet alumina.



Figur 6.7 Relativ kostnad for forskjellige typer keramikk, og sammenlignet med RHA. Figuren er hentet fra [41]. Alumina 1 og 2 er sintret alumina med hhv 95 % og 98 % renhet. Novel alumina er DSTL utviklet alumina.



Figur 6.8 Sammenligning av forskjellige typer keramikk hvor man angir nødvendig tykkelse for å stoppe en gitt trussel. Figuren er hentet fra [41]. Alumina 1 og 2 er sintret alumina med hhv 95 % og 98 % renhet. Novel alumina er DSTL utviklet alumina.



Figur 6.9 Sammenligning av hardheten for forskjellige materialer. Disse er sammenlignet med hardheten av to typiske trusler (prosjektiler). Kilde: [54].

Av figurene kan vi konkludere følgende:

- Titandiborid, borkarbid og silisiumkarbid er best ut fra masseeffektiviteten.
- Silisiumkarbid og aluminiumnitrid kommer godt ut også kostnadsmessig.
- Titandiborid er det desidert dyreste materialet, men er best egnet med tanke på volumeffektivitet.
- For å ha høyere hardhet enn en typisk trussel med wolframkarbidkjerne, må man rette fokus på varmsintret trykksintret og varmisostatisk presset keramikk.

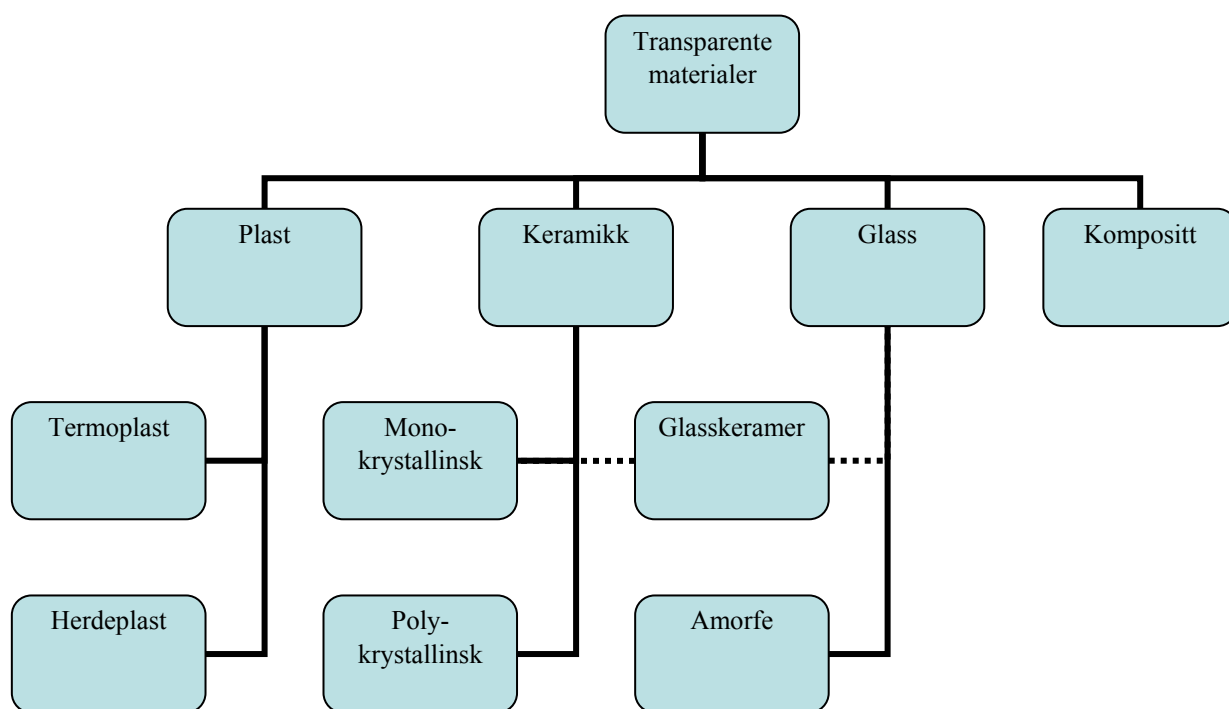
7 Transparent panser

7.1 Generelt

I et kjøretøy er man avhengig av utsyn. I en totalløsning for pansring av kjøretøy vil det derfor være et behov for transparente flater; vinduer.

I Figur 7.1 finnes en grov oversikt over typer materialer som brukes til transparente beskyttelses-tiltak. De forskjellige typene blir behandlet i egne underavsnitt, men først litt generelt om de krav man setter til slike materialer.

En selvfølge er at transparente flater må ha samme evne til å stanse prosjektiler som den øvrige pansringen, dette innebærer også treff av flere påfølgende prosjektiler innenfor et begrenset område (multi-hit). Sikten må ikke reduseres vesentlig ved anslag av et eller flere prosjektiler. I tillegg bør / må gjennomsiktigheten ikke svekkes på grunn av normale miljøpåvirkning. Ved valg av materiale er det derfor viktig å forstå de mulighetene og begrensningene som ligger i materialets natur [55]. Et vesentlig punkt er gjennomsiktigheten; hvor transparent er materialet? Hvor mye lys slippes gjennom?



Figur 7.1 Skjematisk oversikt over transparente materialer.

Man må skille mellom materialer som, på den ene siden, er gjennomsiktig eller transparente, og på den andre siden kun gjennomskinnelige (eng. translucence). En enkel test for å skille mellom disse materialene er å se gjennom dem. Hvis begge typene av materialene ligger på et ark med skrift, vil man ikke kunne se forskjell. Skrifta vil være like tydelig gjennom begge typene. Forskjellen blir derimot åpenbar hvis man øker avstanden mellom bakgrunnen og materialet. For materialet som kun er gjennomskinnelig vil bakgrunnen bli mer og mer diffus, jo større avstanden er. Dette er ikke tilfellet for et materiale som er transparent.

Når man måler gjennomsiktigheten i et materiale, vil dette noen ganger være oppgitt i prosent av teoretisk maksimum. En bør derfor være klar over hva teoretisk maksimum innebærer. Når lys går fra et medium til et annet (med en annen lyshastighet som representeres gjennom en brytningsindeks) vil noe bli reflektert og noe transmittert. Når man evaluerer materialer til bruk

som vinduer har man to grenseflater. Multiple refleksjoner finner sted mellom disse overflatene. Totalt refleksjonstap (R) med vinkelrett innfallende lys, og hvor absorpsjon i materialet er sett bort fra, er gitt ved

$$R = \frac{2R_1}{1 + R_1}, \quad (7.1)$$

hvor R_1 er refleksjonen ved en grenseflate, og uttrykkes ved brytningsindeksen n til mediet som følger:

$$R_1 = \left[\frac{n-1}{n+1} \right]^2. \quad (7.2)$$

Dette gir en teoretisk maksimal transmisjon (T) på

$$T = 1 - R = \frac{2n}{1 + n^2}. \quad (7.3)$$

Det bør også her nevnes at dette gjelder for en perfekt plan overflate. Hvis man inkluderer absorpsjon i materialet [56] vil transmisjonene være gitt som:

$$T^* = \frac{(1 - R^*)^2 e^{-\alpha b}}{1 - (R^*)^2 e^{-2\alpha b}}, \quad (7.4)$$

der α er absorpsjonskoeffisienten, b er tykkelsen av materialet og R^* er normalrefleksjonen ved en grenseflate gitt ved:

$$R^* = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}. \quad (7.5)$$

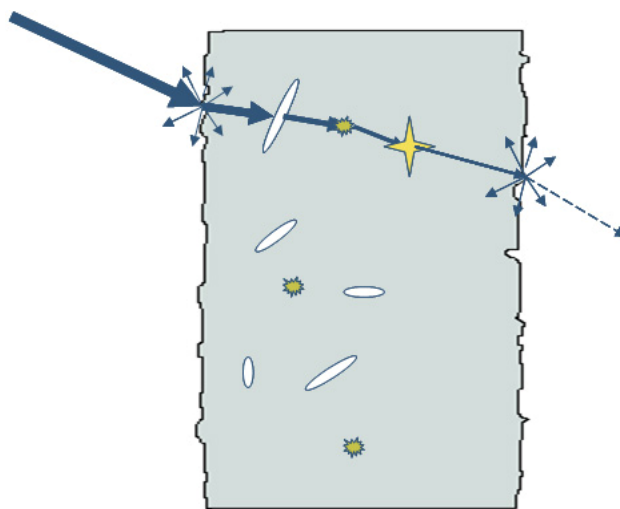
n og k er henholdsvis reell og imaginær del av brytningsindeksen. Absorpsjonskoeffisienten er gitt ved imaginær brytningsindeks (k) og bølgelengde (λ):

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}. \quad (7.6)$$

I realiteten vil overflaten være noe ru. Gjennomsiktigheten forbedres ofte ved etterbehandling som polering, slik at spredningen ved overflatene reduseres til et minimum (Figur 7.2). For noen materialer er denne prosessen både helt avgjørende og tidkrevende, og vil ofte begrense produksjonsmengden samt øke produksjonskostnadene [57]. I tillegg er det mer krevende å polere krumme flater, som man blant annet bruker til frontvinduer i kjøretøy.

Andre faktorer som er med på å styre transmittansen er porøsiteten, og renheten til materialet. Porer fører til flere overflater, og dermed flere kilder til ekstra lysspredning. Renheten til materialet er med på å bestemme molekylstrukturen, som for noen materialer er viktig for å oppnå god transmisjon. Begge disse faktorene er med på å fordyre prosessen, da produksjonen blir detaljstyrt for å oppnå best mulig resultat.

Kravet for gjennomsiktighet gjelder ikke bare i det synlige området. Med dagens teknologi, bør det også være krav til at teknisk utstyr, basert på andre bølgelengder enn lys (eks. IR), fungerer; det vil si at beskyttelsen også slipper gjennom lys med bølgelengder på μm -skalaen.



Figur 7.2 For å oppnå god transmittans, må overflaten være så jevn som mulig, antall porer (luftlommer) må reduseres til et minimum, samt at urenheter fjernes. I tillegg må man velge riktig materiale for å unngå absorpsjon av de interessante bølgelengdene.

Selv om et materiale er transparent, dvs. slipper igjennom synlig lys og evt. andre aktuelle bølgelengder, vil det også være mulig å hindre bestemte bølgelengder (eks. laserlys) å slippe gjennom. Et transparent materiale vil derfor også kunne fungere som beskyttende materiale (ikke-transparent) i andre sammenhenger. I Tabell 7.1 er brytningsindeks og absorpsjonskoeffisient gitt for noen utvalgte materialer omtalt i de neste kapitlene.

Tabell 7.1 Brytningsindeks og absorpsjonskoeffisient for transparente materialer [56] i synlig og IR område.

Materiale	Brytningsindeks ved		Absorpsjonskoeffisient ved 4 μm (cm^{-1})
	0,5 μm (Synlig lys)	4 μm (IR)	
ALON (polykrystallinsk)	1,800	1,700	0,100
Kalsium aluminat glass	1,678	1,607	0,190
Presset silika	1,462	1,389	
Germanate glass	1,680	1,605	
Safir	1,774	1,677	0,047
Spinel (polykrystallinsk)	1,723	1,635	0,018

7.2 Glass

En av de fremste glassprodusentene i dag er Sain-Gobain [58], og noe forenklet kan man si at det finnes tre typer glass:

- vindusglass (float-glass / annealed glass):
- varmeherdet glass (heat strengthened glass)
- herdet glass (thermally toughened glass)

Tabell 7.2 Materialdata for vindusglass (float glass)

Tetthet	kg m^{-3}	2530
Bruddstyrke	$\text{MPa m}^{1/2}$	0,8
Brytningsindeks		ca 1,5
Bøyestyrke	MPa	69
E-modul	GPa	63
Hardhet	GPa	4,6
Poisson-tall		0,2
Smeltepunkt	$^{\circ}\text{C}$	1127
Spesifikk varmekapasitet	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	0,7
Strekstyrke	MPa	35
Termisk utvidelseskoeffisient	10^{-6}K^{-1}	3,2
Varmeledningsevne	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	1,4

Den industrielle float-glass prosessen ble innført på 60-tallet. I korte trekk består produksjonen i 6 deler. (1) Først blandes råvarene. Dette består stort sett av sand, soda (natriumbaserte mineraler), lime (kalsiumbaserte mineraler) og noe glass til gjenvinning. Metalliske oksider kan tilsettes for å oppnå fargenyanser og magnesium eller aluminium brukes for å øke motstandsevnen mot miljøpåvirkninger. (2) Denne blandingen varmes opp til omlag 1550 $^{\circ}\text{C}$. (3) Flytende glass helles dermed over i et basseng med flytende tinn. Glasset legger seg som en uniform hinne på toppen av dette tinnbadet (herav navnet "float glass"). Glasslaget blir dratt gjennom badet med en bestemt hastighet; tykkelsen på glasset avhenger blant annet av denne hastigheten. Temperaturen

reduseres til ca 1000 °C, før (4) glasset blir belagt med metalloksider (for samme grunn som over). (5) Glasset føres inn i en ”lehr” hvor det avkjøles kontrollert fra ca 600 °C til under 50 °C. Formålet med denne nedkjølingen er å fjerne alle indre spenninger (annealing). (6) Til slutt kuttes glasset opp i standard dimensjoner. Krumme flater lages ved å varme glasset opp til 500-600 °C, forme de og deretter kjøle ned kontrollert for igjen å unngå indre spenninger. Noen data for float glass er gjengitt i Tabell 7.2.

Float-glass kan tilpasses Johnson-Holmquist-modellen som følger:

$$\sigma_i = 930(P^* + T^*)^{0,77} (1 + 0,003 \ln \dot{\epsilon}) [\text{MPa}] \quad (7.7)$$

og

$$\sigma_f = 88P^{*0,35} (1 + 0,003 \ln \dot{\epsilon}) [\text{MPa}] \quad (7.8)$$

med knusningsgrad

$$D = \frac{\sum \Delta \epsilon_p}{0,053(P^* + T^*)^{0,85}} \quad (7.9)$$

og med tilstandslikning

$$P = 45,4\mu - 138\mu^2 + 290\mu^3 [\text{GPa}] \quad (7.10)$$

i kompresjon, og

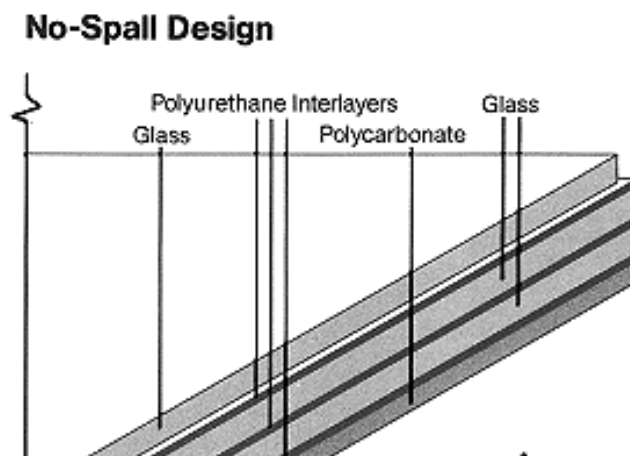
$$P = 45,4\mu [\text{GPa}] \quad (7.11)$$

i tøyning.

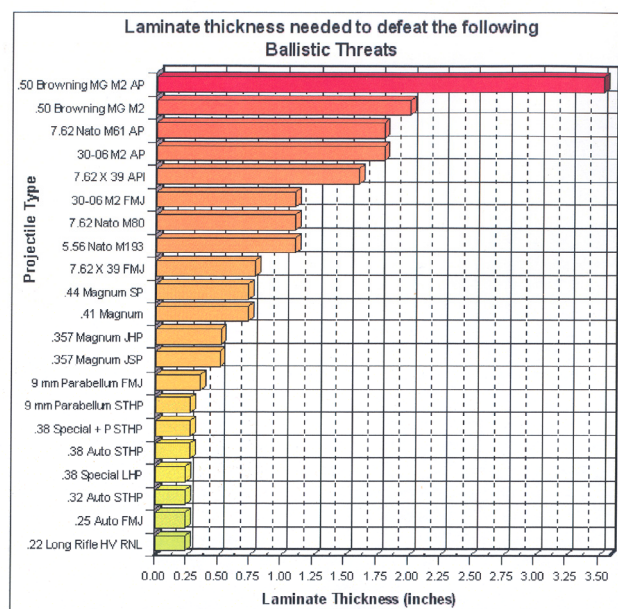
Herdet glass lages av vindusglass (float glass). Glasset blir først kuttet, formet ved sliping og eventuelt emaljert. Deretter varmes glasset opp til ca 600 °C, for deretter å bråkjøles ned til ca 300 °C. Emaljen vil da smelte sammen med glasset slik at de mekaniske egenskapene øker. Samtidig oppstår det termiske spenninger inne i glasset. Dersom en sprekk oppstår i et slikt glass vill spenningene utløses og det dannes straks en kaskade av sprekker i hele ruten. Resultatet er små kubiske glasspartikler, i stedet for store skarpe knivformede glasskår. Disse glasskubene er mindre skadelig om ruten knuses. Ulempen med slike glass er at når de først er herdet, kan man ikke endre form eller størrelse.

Varmeherdet glass er også en termisk kontrollert behandling som øker de mekaniske egenskapene. Men hvis ruten knuses, dannes ikke den kaskade av sprekker som er typisk for herdet glass.

Laminert glass er en lagvis oppbygning av glass og plast. Saint-Gobain bruker eksempelvis polyvinyl butyral (PVB), men andre plasttyper (PC, PUR etc.) brukes også. Glass og plast varmes opp til ca 100 °C for å få god heft mellom lagene. Plastlaget vil (1) redusere sjokkforplantningen fra prosjektiler som treffer ruten, samt (2) holde glasset på plass dersom ruten skulle knuse. Laminert glass er den vanligste formen for pansrede vinduer, pga. lave produksjonskostnader og formbarhet. Figur 7.3 viser en typisk oppbygning, mens Figur 7.4 viser typiske tykkelser for beskyttelse mot noen utvalgte trusler. Figuren viser tykkelse i tommer (1 inch = 2,54 cm). Glassrute på 1 in har (tettheten for glass er gitt av Tabell 7.2) en arealtetthet på ca 64 kg/m².



Figur 7.3 Vanlig oppbygging av transparent panser hovedsaklig basert på laminert glass [41].



Figur 7.4 Tykkelse av laminert glass for beskyttelse mot noen ammunisjonskalibre [41].

Starphire er en type vindusglass (float glass) som blant annet produseres av Precision Glass & Optics [59] (PGO; CA,USA) og brukes til transparent beskyttelse. Starphire har noe høyere E-modul enn vanlig vindusglass. PGO rapporterer E-modul på 73,1 GPa. Transmisjonen av synlig

lys ligger på noe over 90 %. En videreutviklet materialmodell basert på vanlig float-glass modell er rapportert av Grujicic et al. [60].

7.3 Glasskeramer

Glasskeramer er amorfe materialer som i utgangspunktet er produsert som vanlig glass. Gjennom varmebehandling får man en krystallisering, slik at materialene får keramiske egenskaper. Glasskeramer finnes i rikt omfang på ethvert kjøkken; som topp på komfyr og koke- og bakeutstyr, eksempelvis ildfaste former. Normalt brukes benevnelsen glasskeramer om materialer som inneholder litium-, silisium- eller aluminiumoksider.

7.3.1 Kvarts og silika

Smeltet kvarts og silika er den ikke-krystallinske formen for kvarts, og er begge basert på denne naturlige forekomsten av silisiumdioksid. Råmaterialet er rent kvarts eller kvartssand. Dette smeltes om i en elektrisk ovn, eller forbrenningsovn, ved en temperatur på ca 2000 °C. Resultatet blir transparent (smeltet silika), eller matt som gjerne refereres til som smeltet kvarts. Silika er amorft og ligner på den måten vanlig glass. Likevel ser man på silika som en form for keramikk med sin rigide 3 dimensjonale struktur.

Tabell 7.3 Eksempler på smeltet kvarts / smeltet silika og deres materialeegenskaper.

	Enhet	Vycor [®] [61]	Vitreosil [®] [62]	Fused Silica [63]
Produsent		Corning	Saint-Gobain	Accuratus
Tetthet	g/cm ³	2,18	2,2	2,2
Brytningsindeks (589,3 nm)		1,458		
Bulkmodul	GPa			41
Bøystyrke	MPa		65	
E-modul	GPa	66	72	73
Hardhet		487 (Knoop 100)	7 (Mohs skala)	600 kg/mm ²
Kompresjonsstyrke	MPa		1100	1108
Maks temp	°C			1100
Poisson-tall		0,19	0,16	0,17
Porøsitet	%			0
Skjærmodul	GPa	28		31
Strekkstyrke	MPa		50	
Termisk utvidelseskoeffisient	10 ⁻⁶ K ⁻¹	0,75	0,54	0,55
Torsjonsstyrke	MPa		30	
Transmisjon i synlig område	%		ca 92	

Smeltet silika og kvarts er så vidt vi vet kun brukt i visirer / beskyttende briller. Det vil være utfordringer med å lage større og krumme flater til bruk i f.eks. bilvinduer. Dette kan omgås ved å bruke mosaikkmønster, tilsvarende keramiske materialer.

Et par eksempler på produkter av silika finnes i Tabell 7.3. Produsentene som oppgir material-egenskapene er også gitt i tabellen.

7.3.2 Litiumdisilikat (Transarm)

Transarm [64] er rekrystallisert (varmebehandlet) litiumdisilikat (glass). Rekrystalliseringen skjer med en temperatur på 550-650 °C og over en tid på 12-102 timer. Dette transparente glasskeramet etterbehandles ved at det nedsenkes i en smelte av salt. Dette fører til en utveksling av ioner på overflaten som øker motstanden; mot hva spesifiseres ikke. Man kan forme dette materialet som vanlig amorft glass, men når materialet er krystallisert, får det materialegenskaper som ligner keramikk [65].

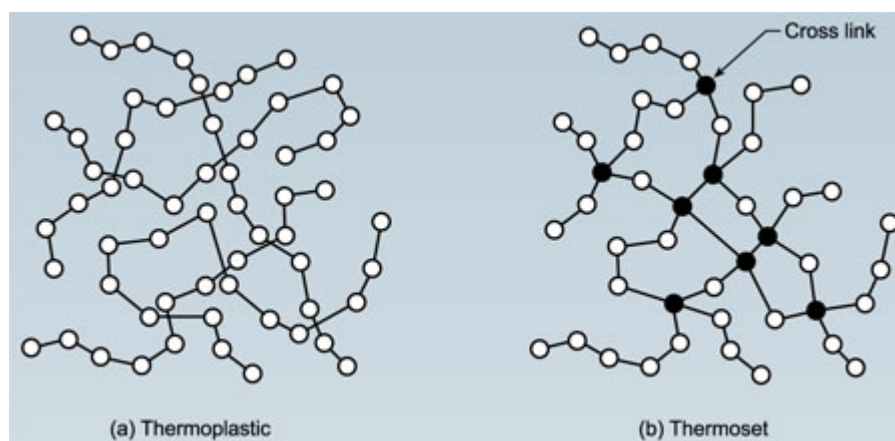
Transarm produseres av GEC Alstom UK Ltd, og kan brukes i visirer, kjøretøy og vinduer i helikoptre. Transarm brukes i kombinasjon med en transparent backing plate, f.eks. polykarbonat. I Tabell 7.4 vises bestanddelene i Transarm.

Tabell 7.4 Bestanddel i TransarmTM [64].

Bestanddel	Vektprosent
SiO ₂	71,8
Li ₂ O	11,0
ZrO ₂	8,0
P ₂ O ₅	2,0
Al ₂ O ₃ (Alumina)	4,5
ZnO	0,5
K ₂ O	2,2

7.4 Plastmaterialer

Plastmaterialer deles inn i to grupper på bakgrunn av de fysiske og termomekaniske egenskapene. Termoplaster består av lineære polymerer, der de molekylære kjedene ikke ”henger” sammen. Dette gjør det enklere for polymerkjedene å flyte i forhold til hverandre; dermed blir termoplaster myke og deformerbare under oppvarming. Den andre gruppen er herdeplast (eng. thermoset). Disse polymere kjedene er bundet sammen i en 3-dimensjonal struktur. Dette hindrer flyt under økt temperatur, og dermed også muligheten for deformasjon, Figur 7.5.



Figur 7.5 Eksemplifisert molekylær struktur av plastmaterialer. (a) Termoplaster som består av polymere enkeltkjeder (b) Herdeplaster hvor de polymere kjedene er bundet sammen i en 3-dimensjonal struktur. Kilde: [66]

7.4.1 Termoplaster

7.4.1.1 Polykarbonat (PC)

Polykarbonat er et plastmateriale som oftest benyttes i forbindelse med transparent ballistisk beskyttelse; både alene (ansiktsskjermer, vinduer etc.) og som spall-liner i kombinasjon med glass og/eller transparente keramiske materialer. PC har høy seighet, og egner seg godt til å stoppe små ballistiske prosjektiler og fragmenter. PC egner seg ikke i tykkere lag.

Tabell 7.5 Materialdata for polykarbonat.

	Enhet	PC [67;68]	Lexan [57]
Tetthet	g/cm ³	1,02-1,23	1,2
Arealtetthet	kg/m ²		30,3
Bruddforlengelse	%	50 – 130	
E-modul	GPa	0,093 - 2,3	2,21
Hardhet	Rockwell M(R)	53 – 71 (117 – 122)	
Kompresjonsmodul	MPa		1660
Kompresjonsstyrke	MPa	83	83
Maks. arbeidstemperatur	°C	135	121
Skjærmodul	MPa		1000
Skjærstyrke	MPa		45
Spesifikk varmekapasitet	J kg ⁻¹ K ⁻¹	1700 – 177	
Strekkfasthet	MPa	49,6 - 62,0	66
Strekkforlengelse, elastisk	%	5,5 – 10	
Termisk utvidelseskoeffisient	10 ⁻⁶ K ⁻¹	65 – 70	
Vannabsorpsjons	%	0,13 - 0,40	
Varmeledningsevne	W m ⁻¹ K ⁻¹	0,173 - 0,214	

PC har en god motstandsevne mot sure løsninger. Ulempen med PC er at den er noe følsom for UV-stråling, basiske løsninger og organiske løsemidler [69]. Noen data er gitt i Tabell 7.5. Noen av disse verdiene har et stort intervall. Eksempelvis varierer bruddforlengelsen for PC fra 50 – 130 %. Grunnen til dette er både at plastmaterialene varierer i kvalitet og varianter, men også pga at disse materialene er vanskelige å kvantifisere.

7.4.1.2 PMMA (Akryl / Perspex)

Polymetylmetakrylat (PMMA) er en transparent amorf termoplast. Materialet er stivt, har stor hardhet men er skjørt og er følsom for bruddanvisninger. Materialet har evnen til momentan økning av trykkfastheten når det blir utsatt for en spontan trykkøkning, typisk hva som skjer ved anslag av et prosjektil. Når PMMA anvendes til ballistisk beskyttelse, er det som et første lag, tilsvarende keramikk. Bekymringen for splint (spall) effekter gjør at PMMA kombineres med f.eks. polykarbonat som spall liner på baksiden.

PMMA sies å ha god motstand mot UV-stråling, sure og basiske løsninger, men har dårlig motstand mot løsemidler (ikke nærmere spesifisert) [70]. Noen data for materialet er gitt i Tabell 7.6. Den store spredningen i dataene er pga. mange variasjoner i bruksområdet, og derav mange varianter PMMA.

Tabell 7.6 Materialdata for PMMA.

Referanse	Enhet	Akryl [71-73]	Pleksiglass G [57]
Tetthet	g/cm ³	1,04 - 1,19	1,19
Arealtetthet	kg/m ²		30,3
Bruddforlengelse	%	4,6 – 90	
Bruddforlengelse, elastisk	%	3,8 – 40	
Bøystyrke	MPa	100 – 150	
E-modul	GPa	1,38 - 3,3	3,1
Glasstransisjonsvarme	°C	100	100
Hardhet	Rockwell M (R)	27 – 89 (61 – 76)	
Kompresjonsmodul	MPa		3030
Kompresjonsstyrke	MPa	42,8 - 79,0	124
Maks. arbeidstemperatur (smeltepkt.)	°C	< 71-85(132)	95
Skjærmodul	MPa		1151
Skjærstyrke	MPa		62
Slagseighet	kJ/m ²	< 3	
Spesifikk varmekapasitet	J kg ⁻¹ K ⁻¹	1250 – 1700	
Strekkfasthet (yield)	MPa	28 – 60	72
Termisk utvidelseskoeffisient	10 ⁻⁶ K ⁻¹	50 – 120	
Vannabsorpsjonsrate	%	0,1 - 2,0	
Varmeledningsevne	W m ⁻¹ K ⁻¹	0,187 - 0,222	

7.4.1.3 Polyuretan (PUR)

Polyuretan er et samlebegrep for organiske materialer som inneholder uretanbindinger. Polyuretan kan både være en herdeplast og en termoplast. Det har dermed et bredt anvendelsesområde, fra myke gummiaktige til harde produkter.

Simula Technologies, Inc. i USA, har blant annet utviklet polyuretan kjent som SIM 2003 (eller Cleargard) og SIM 1802. I følge Simula Tech. skal disse materialene ha bedre egenskaper enn polykarbonat [74], og dermed kan erstatte andre plasttyper og med økt effekt av ballistisk beskyttelse på vektbasis. SIM 2003 er et mykere materiale som kan erstatte PC, mens SIM 1802 er hardere og sprøere, og egner seg bedre som erstatter til de harde lagene i beskyttelsen [75]. I Tabell 7.7 er noen av materialegenskapene for PUR (i ballistisk sammenheng) listet opp.

Tabell 7.7 Materialdata for PUR.

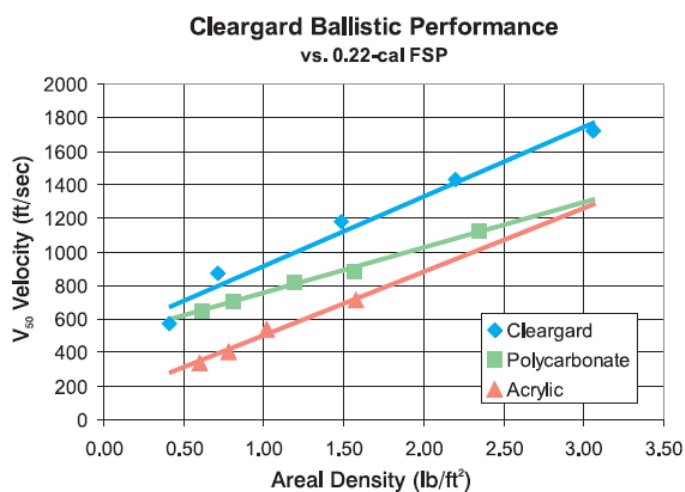
	Enhet	Cleargard [76]	Simula 2003 PUR [57]
Tetthet	g/cm ³	1,14	1,104
Arealtetthet	kg/m ²		27,8
E-modul	MPa	813	689
Kompresjonsmodul	MPa		1241
Kompresjonsstyrke	MPa		72
Maks. arbeidstemperatur	°C		149
Strekkfasthet	MPa	50,5	62
Strekkforlengelse	%	286	

I Figur 7.6 er det gitt en grafisk sammenligning mellom PUR, og PMMA og PC basert på V_{50} for en 0,22 cal FSP. Denne figuren viser at Cleargard har høyere terskel for penetrasjon enn de to andre plastmaterialene. Et forslag til sammenstilling av et frontvindu er skissert i Figur 7.7.

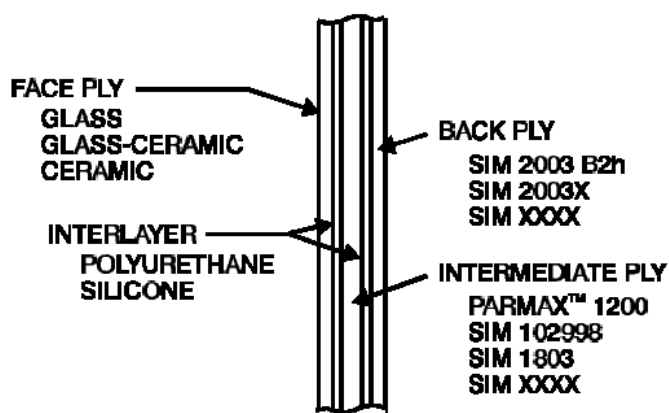
I Tabell 7.8 Sammenligning mellom Cleargard (PUR) og PC for tre forskjellige trusler [77]. finnes en sammenligning mellom Cleargard og PC for tre forskjellige trusler. Merk at ikke alle sammenligningene er gjort med rent plastmateriale, men at eksempelvis glass er en del av strukturen ved forsøk med 7,62 mm M80 Ball ("rifle").

Tabell 7.8 Sammenligning mellom Cleargard (PUR) og PC for tre forskjellige trusler [77].

Trussel	Prosjektil	Hastighet [m/s]	Cleargard		Polykarbonat	
			[kg/m ²]	[cm]	[kg/m ²]	[cm]
Fragment	0,22 cal,	360	7,1	0,64	12,3	1,04
	17 gr FSP					
Håndvåpen	0,44 Mag, 240 gr	427	33,6	3,2	39,0	3,3
	NIJ standard III-A					
	7,62 mm M80 Ball	838	50,4	2,7	56,0	2,8
	NIJ standard III					



Figur 7.6 Sammenligning av V_{50} versus arealtetthet med trussel av typen 0,22 cal FSP; Sammenligningen er mellom plasttypene polyuretan, PMMA (Acrylic) og polykarbonat [78].



Figur 7.7 Forslag til sammenstilling av transparent panserglass bl.a. basert på PUR [79].

7.4.2 Herdeplast

Herdeplast er ikke relevant som transparent materiale i ballistisk beskyttelse.

7.5 Transparente keramiske materialer

Transparente keramiske materialer brukes som keramikk ellers (se avsnitt 5.9). Et ytre hardt lag skal bidra til å knuse og eroderer innkommende trussel slik at prosjektilet brytes opp i mindre deler, eller at prosjektilet blir butt, og dermed lettere kan fanges opp i de bakenforliggende lagene. Disse lagene fungerer også som støtte for selve keramikken, og er helt nødvendig da hard keramikk er et sprøtt materiale.

Fordelen med å bruke keramiske materialer i kombinasjon med eksempelvis glass eller plastikk, er økt beskyttelsesgrad på vektbasis. I tillegg vil en kunne redusere tykkelsen på pansrede vinduer, som kan være ønskelig for å øke volumet av eksempelvis førerhus. Den harde overflaten til keramikk vil i tillegg være mer motstandsdyktig mot miljøpåvirkninger som riper, kjemikalier, sollys osv.

Ulempen med keramikk er generelt høye produksjonskostnader. Dette har først og fremst med fabrikkeringen å gjøre. Blant annet er sliping og polering, for å oppnå høy transmisjon, en vesentlig del av kostnadene, og kan utgjøre opp mot 50 % av prisen [75]. Etterspørsel er en annen drivende faktor for prisen. Størrelser og formen (krumme flater) er også foreløpig noe begrensende, spesielt hvis man ønsker hele vindusflater i kjøretøy. Alternativet er mosaikk-mønstrede ruter, men disse vil kunne redusere gjennomsiktigheten, samt fordyre produksjonen enda mer.

Det er flere fysiske egenskaper som bestemmer hvor transparent et keramisk materiale er. Tre ting er allerede nevnt i avsnitt 7.1; maksimal teoretisk transmisjon, overflatens ruhet og absorpsjon av lys. Absorpsjonen skjer hovedsakelig ved eksitering av vibrasjonsmodi i krystallstrukturen (oppvarming), og er selvfølgelig avhengig av materialets tykkelse. En fjerde egenskap ved keramiske materialer henger sammen med krystallstrukturen.

Transparente keramiske materialer kan enten være monokrystallinske, eller polykrystallinske. Monokrystallinske materialer er et sammenhengende krystall. Polykrystallinske materialer består av korn (med varierende kornstørrelse), som er komprimert (fused) sammen. I grenseflatene mellom kornene vil det kunne oppstå uønsket lysspredning; (1) fordi man har forskjellig brytningsindeks i de to tilgrensede kornene eller (2) fordi man har porer i materialet. Lys som spres "mistes" på veien, og vil redusere gjennomsiktigheten.

Hvis vi ser på selve krystallstrukturen (og uavhengig om materialet er monokrystallinsk eller polykrystallinsk) vil disse kunne ha flere former. Noen av disse, som kubiske strukturer, vil være optisk isotrope. Dette betyr at transmisjonen er lik i alle retninger; materialet har samme brytningsindeks i alle retninger. Andre strukturer er ikke kubiske. Disse materialene vil kunne gi dobbeltbrytning (Figur 7.8) pga ulik brytningsindeks i de romlige retningene.

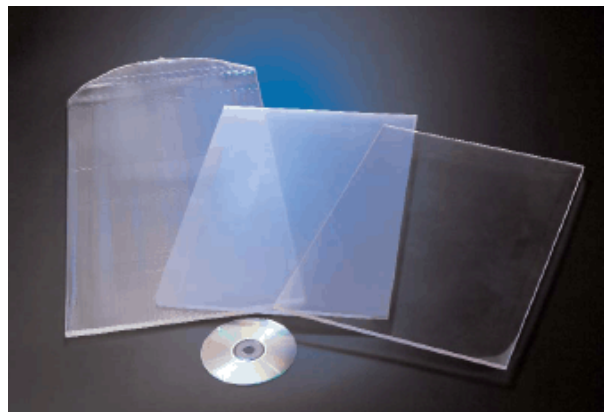
I de neste underkapitlene vil vi ta for oss de keramene som er transparente i UV til IR området, og som er aktuelle i forbindelse med ballistisk beskyttelse.



Figur 7.8 Dobbelbrytning. Kilde: [80].

7.5.1 Safir

Rent monokrystallinsk aluminiumoksid (Al_2O_3) kalles safir. Fordelen med monokrystallinske materialer er graden av gjennomsiktighet, som ofte er overlegen de polykrystallinske keramene, til tross for at safir er optisk anisotrop, og vil være utsatt for dobbeltbrytning. Hovedgrunnen er at man unngår spredninger i overgangen mellom kornstrukturer.

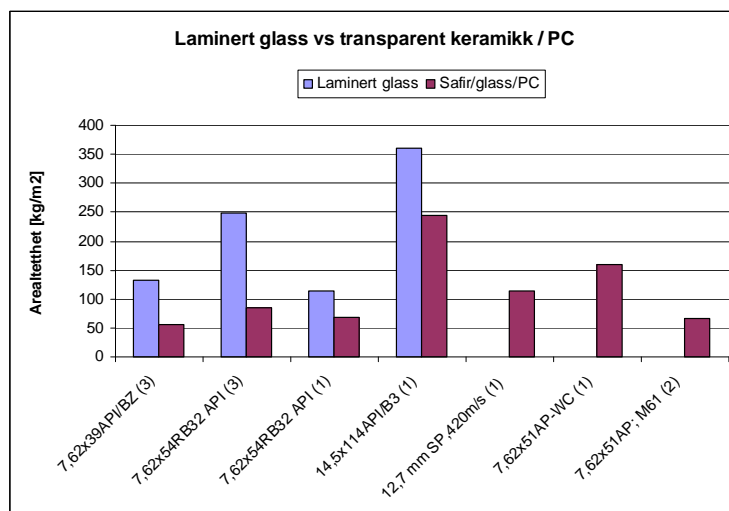


Figur 7.9 Monokrystallinsk safir. Bildet hentet fra referanse [81].

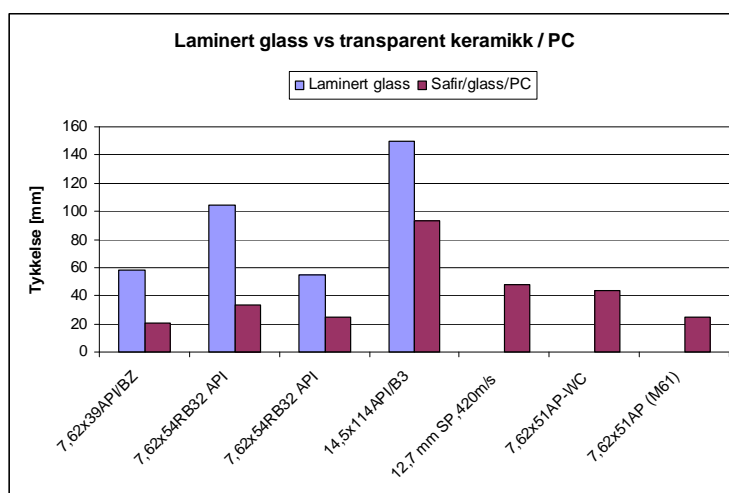
Safir blir produsert av en rekke fabrikanter. Crystal Systems Inc. produserer safir ved såkalt HEM-teknikk (Heat Exchanger Method), og Saphikon Inc. (Saint-Gobain) produserer ved hjelp av EFG-metoden (Edge-defined Film-fed Growth) [75]. Sistnevnte produserer flater på 300 mm x 2000 mm, og med tykkelse på ca 10-11 mm. Disse er blant annet produsert for å møte krav til F-35 JSF og F-22 Raptor. De produseres også bueformet. U.S. Army Research Laboratory (ARL) har deltatt i utvikling av safir.

Safir er dyrt til tross for konkurranse fra eksempelvis ALON og Spinel. Den høye kostnaden skyldes blant annet at høye prosess temperaturer kreves i produksjonen. I tillegg må man som alle transparente keramer, etterbehandle ved sliping og polering for å oppnå ønsket gjennomsiktighet [57].

Jones et al. [82-84] har rapportert tester hvor safir er brukt i kombinasjon med glass og polykarbonat, mot trusler som er definert i STANAG 4569. Resultater for noen av disse truslene er rapportert og sammenlignet med vanlig laminert glass, se Figur 7.10 og Figur 7.11 [82-84].



Figur 7.10 Nødvendig arealvekt for kombinasjon av safir, glass og PC, og sammenlignet med nødvendig arealvekt av laminert glass, for noen trusler. Antall treff som strukturen tåler er angitt i parentes.



Figur 7.11 Nødvendig total tykkelse for kombinasjon av safir, glass og PC, og sammenlignet med nødvendig tykkelse av laminert glass, for noen trusler. Antall treff som strukturen tåler er angitt i parentes.

7.5.2 Sub- μm alumina

Sub- μm Al_2O_3 er en gjennomsiktig form av alumina (se avsnitt 6.4.1). Det er flere forutsetninger for at alumina skal bli gjennomsiktig [55;85]. Først og fremst kreves høy renhet, som innebærer at råmateriale består av rundt 99,99 % alumina. For det andre må prosesseringen ikke gi defekter i keramikken.

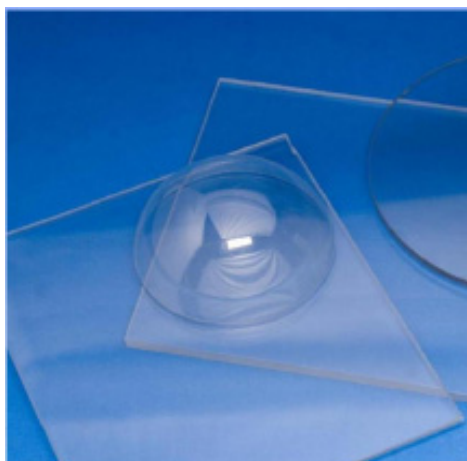
Som alle polykrystallinske keramer må porøsiteten fjernes for å oppnå god gjennomsiktighet. Den mest utbredte teknikken er presintring uten trykk, etterfulgt av komprimering under høy temperatur og trykk (HIP).

Alumina er som safir optisk anisotropt, og gir redusert transmisjon pga dobbeltbrytning i grenseflatene mellom kornstrukturene. Gjennomsiktigheten er derfor mer avhengig av tykkelsen enn de andre transparente keramene. Krell m.fl. [55;85] har klart å motvirke denne effekten ved å redusere kornstørrelsen i keramikken. En reduksjon til sub- μm området ($\sim 0,4\text{-}0,6 \mu\text{m}$) gjør at fotonene ikke "ser" kornstørrelsen og oppfatter materialet som homogent. Lysbrytning i overgangene mellom krystallene vil dermed reduseres, og gjennomsiktigheten øker. De har rapportert transmisjon på opp mot 93 % av teoretisk maksimum (total transmisjon på 80 %) med tykkelse på 0,8 mm (bølgelengde på 640 nm). Det arbeides mye med å optimalisere disse prosessene, men dette vil ikke bli omtalt her.

Sintret sub- μm alumina er hardest av alle kjente transparente keramer, men er så vidt vi vet finns ingen kommersiell produksjon. Krell et al. [55] konkluderer med at pga. redusert transmisjon ved økt tykkelse, vil sintret sub- μm alumina ikke (med dagens teknologi) kunne produseres i tykkelser egnet for pansring mot prosjektiler med høy penetrasjon, og samtidig beholde et akseptabel gjennomsiktighet i forhold konkurrentene (ALON og spinel).

7.5.3 Spinel

Spinel er polykrystallinsk magnesiumaluminiumoksid (MgAl_2O_4). I realiteten er også dette alumina (Al_2O_3) som inneholder grupper av MgO. I motsetning til alumina, har spinel en isometrisk kubisk gitterstruktur. Spinel har dermed fordelen av ikke å være utsatt for dobbeltbrytning. Spinel er derfor et av materialene som kan oppnå gjennomsiktighet opp mot teoretisk maksimum [55]. Men som alle keramiske transparente materialer, må porøsiteten ned på et minimum.



Figur 7.12 Transparent magnesiumaluminiumoksid; spinel.

Spinel blir sintret og (HIP) presset, ved ca 1600 °C i ca 24 timer. Sammenlignet med ALON er dette både lavere temperatur og kortere varighet. Det er også mulig å fremstille spinel ved krystallisering / krystallvekst i en væske. Fra Tabell 7.10 kan vi se at spinel har noe lavere verdier av styrke og hardhet. Likevel er spinel ansett for å ha god yteevne som ballistisk beskyttelse (Figur 7.15). Det blir påstått at spinel vil kunne redusere vekt med 50-60 % fra standard ballistisk glass. Noen data for spinel er gitt i Tabell 7.10.

Tabell 7.9 Styrke- og feilmodell for alumina og spinel. Tallene for alumina er hentet fra Autodyns materialliste.

	Enhet	AL2O3-99,7 (Autodyn)	Spinel
Tetthet	kg/m ³	3800	3800
Skjærmodul	GPa	135	135
HEL	GPa	135	135
Styrkeparametre:			
A		0,989	0,989
B		0,77	0,77
C		0	0
M		1	0,9
N		0,3755	0,3755
Max fracture strength ratio		0,5	0,6
Ødelegelsesparametre:			
Hydro tensile limit	MPa	-29,0	-29,0
Model type		Continuous (JH2)	Continuous (JH2)
D1		0,005	0,01
D2		1,0	1,0
Bulking konstant, beta		1,0	1,0

Spinel pulver (råvaren) er kommersielt tilgjengelig, og vil dermed kunne produseres av flere leverandører enn ALON. Til tross for dette er fortsatt spinelpulver dyrt; rundt \$100/kg [86].

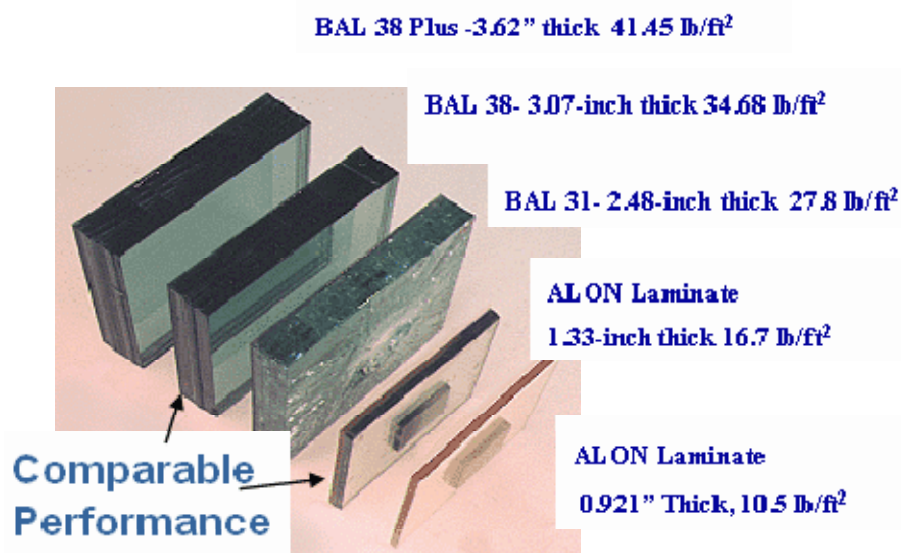
Spinel produseres blant annet av Bright Crystals Technology (Kina) og Surmet Corporation og TDA Research Inc. i samarbeid med Technology Assessment and Transfer Inc. (TA&T). Produerte flater rapporteres opp mot 1000 mm x 400 mm. Krumme vinduer på tykkelser opp til ca 15 mm er også demonstrert og levert US Army.

Spinel har vært modellert, med gode resultater, ved å bruke Johnson-Holmquist stryke- og feilmodell [87]. Verdiene som er rapportert er justeringer av eksisterende modell for alumina i Autodyn. Verdiene er gitt i Tabell 7.9.

7.5.4 ALON

ALON er en forkortelse for aluminiumoksynitrid ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{N}_2$). Dette er også en isometrisk kubisk form av alumina og aluminiumnitrat (AlN) [55]. Kornstørrelsen er på ca 100-300 μm .

ALON ble først utviklet på starten av 1970-tallet i et samarbeid mellom USA og Frankrike. Raytheon Company utviklet ALON videre til å bli et transparent materiale på slutten av 1970-tallet, mens produksjonen i dag er overført til Surmet Corporation [88]. Materialet benyttes blant annet som nesekappe for Stinger missiler og som vindusglass. Surmet Corporation produserer ALON ved sintring og pressing, og har produsert bueformede vinduer, noe som vil gjøre det tilgjengelig for kjøretøy. Surmet har eiendomsretten til ALON pulver (råmateriale) som dermed ikke kan produseres på det åpne markedet. ALON har vist seg vanskelig å få tak i. I tillegg rapporteres av de som har tilgang, at materialet er kostbart.



Figur 7.13 Sammenligning av ALON med standard ballistisk vindu [89]. Det er ikke oppgitt hva trusselen er.

ALON har noe mindre hardhet enn transparent alumina, men er et slitesterkt materiale med høy styrke. ALON sies å være stabil også ved høye temperaturer, samt ha god kjemikaliebestandighet [90]. I tillegg hevdes det at ALON har god multi-hit egenskaper. En sammenligning mellom ALON og standard ballistisk vindu er presentert i Figur 7.13. Trusselen for denne sammen-

ligningen er ikke oppgitt. Men skal vi tro sammenligningen, vil bruk av ALON utgjøre en vektreduksjon på opp mot 50 % i forhold til standard ballistisk (laminert) glass.

7.5.5 Sammenligning av transparente keramiske materialer

I Tabell 7.10 er det listet opp materialegenskaper for transparent keramikk. I Figur 7.14 er transmisjonen mellom Alon, spinel og safir sammenlignet. Det er liten forskjell i det synlige området, men noe forskjell i IR-området (bølgelenger større enn 3,5 μm).

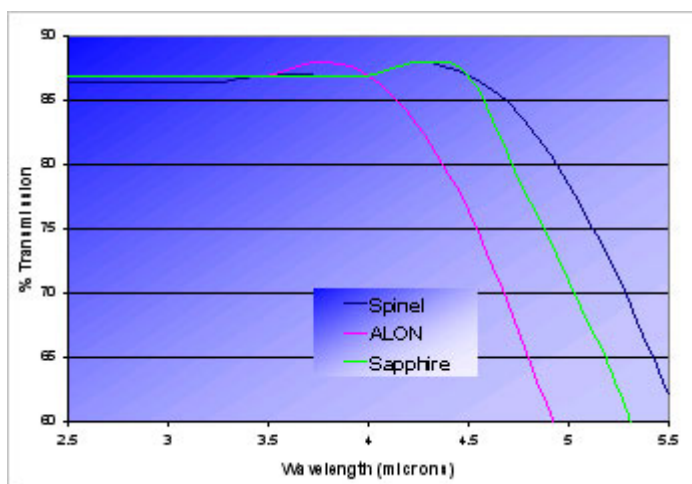
Tabell 7.10 Noen mekaniske og fysiske egenskaper for ALON, Spinel, Safir og sub- μm alumina [75;84;85;88;91-93].

	Enhet	ALON	Spinel (MgAl_2O_4)	Safir (Al_2O_3)	Sintret Sub- μm Al_2O_3
Tetthet	g/cm^3	3,6-3,7	3,58	3,97	~3,9
Bruddfasthet	MPa	2	1,5	3,5	
Bruddstyrke	$\text{MPa m}^{-1/2}$	1,4-2,4	1,5 -2,0	2	~3,5
Brytningsindeks (0,589mm)		1,793	1,715	1,765	
Bulkmodul	GPa	208-234			
Bøystyrke	MPa	300-315	190-277	750	
CTE	10^{-6}K^{-1}	8,8	8	7,8	
E-modul	GPa	323	190-277	344-380	~400
Hardhet HV10	GPa	18	14,5-15	15-22	20,5-21,5
Hardhet Knoop (200g)	kg/mm^2	1950	1150-1650	1950-2200	
Kornstørrelse	μm	150-200	25 & 150 (Bimodal)		
Longitudinal bølgehastighet	km/s	10,3-10,5			
Poisson-tall		0,24-0,27	0,24-0,26	0,27-0,29	
Skjærmodul	GPa	120-130			
Smeltepunkt	$^{\circ}\text{C}$	2150	2135		
Strekkfasthet	MPa	300	185	350	
Termisk utvidelseskoeffisient	10^{-6}K^{-1}	8,8	6,7-8,0	7,8	
Transmisjonsgrense (3,50mm)	%	86	88	87	
Varmeledningsevne	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	12,6-25	14,6-25	24-34	

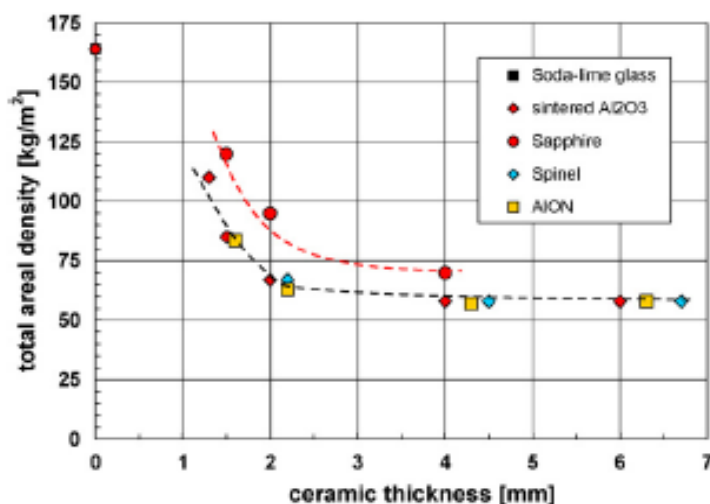
Figur 7.15 viser resultatet av en ballistisk test utført med 7,62 x 51 mm AP (masse 3,7 g og lengde 23,5 mm). Total masse på prosjektilet var 9,5 g, og hadde en nominell hastighet på 850 m/s. Målet var et lag med keramikk som frontlag. Tykkelsen av dette laget er gitt på x-aksen. Keramikken var backet opp med laminert glass og polykarbonat (på 4 mm tykkelse). Den totale flatetettheten (y-aksen) viser hva som er tilstrekkelig for å stoppe prosjektilet. Det er verdt å legge

merke til tre ting. (1) Allerede ved 2 mm tykkelse av keramikk har man oppnådd mer enn 50 % reduksjon i vekt. (2) Ved ca 4 mm keramikk oppnås maksimal reduksjon i vekt. (3) Sintret alumina, ALON og spinel gir bedre resultat enn safir, på vektbasis.

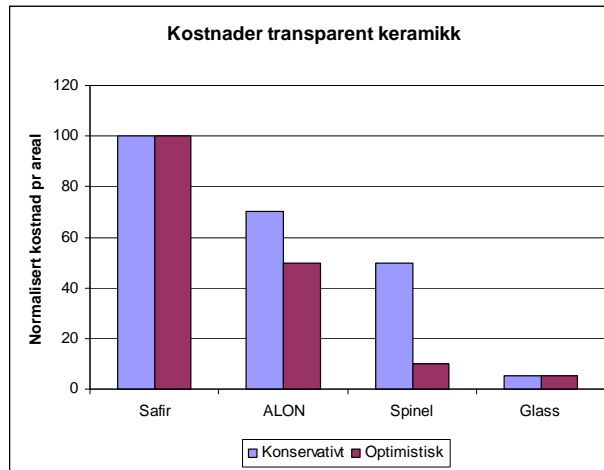
Til slutt vises i Figur 7.16 et overslag over relative kostnader mellom safir, Alon, spinel og glass. Både konservative og optimistiske kostnader vises. De optimistiske kostnadene baserer seg på at etterspørselen øker, og dermed at produksjonskapasiteten øker, samt at produksjonsmetodene effektiviseres. Det er kun angitt relative kostnader pr areal. Reell pris vil være sterkt avhengig av kvantum, samt de geometriske dimensjonene på materialet.



Figur 7.14 Sammenligning av transmisjon for ALON, Safir og Spinel [94].

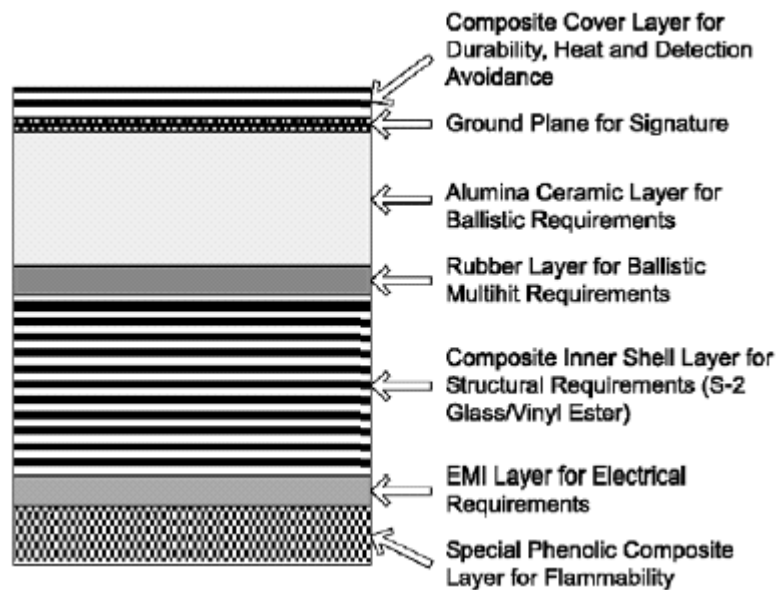


Figur 7.15 Nødvendig flatetetthet som funksjon av keramisk tykkelse (av et hardt frontlag) for å stoppe en trussel av typen 7,62 x 51 mm (AP) med stålkjerne. Nominell hastighet var 850 m/s [95].



Figur 7.16 Normalisert kostnad pr areal for transparent keramikk, sammenlignet med glass. Konservativt tall er basert på sintring og HIP, samt etterbehandling som sliping og polering. Optimistiske tall er basert på en evt. oppskalering av produksjonen. Dette endrer mest på kostnadene for spinel, råmaterialet er kommersielt tilgjengelig. Figuren er hentet fra Patterson et al. [86].

8 Kompositter



Figur 8.1 Forslag til et lettvekts kompositt panser utviklet (2001) av US Army.

Kompositt panser er etter hvert blitt så avansert at det erstatter metallisk panser på lettere og mer mobile stridskjøretøyer hvor kravet til lav vekt er dominerende. Denne type panser kan ha en meget kompleks oppbygging, se Figur 8.1. Vanligvis vil oppbyggingen være noe enklere. Et fellestrekk i oppbyggingen er et hardt sjikt, f.eks. keramikk, keramikkpartikler i en metall- eller plastmatrise etc. ytterst, og med et tykt sjikt av glass eller organisk fibermateriale som oftest i en plastmatrise, innerst (kalt spall-liner).

Ved ønsket om tilleggspansring av lettere kjøretøyer som BV 206 og Toyota Landcruiser, er det naturlig at det blir satt opp krav til totalvekten av panseret for å gi en definert ballistisk beskyttelse. I noen tilfeller kan det også tenkes at kjøretøyets konstruksjon må forsterkes på utsatte steder dersom vektgrensen må overskrides for å oppnå ønsket beskyttelsesgrad. Det er ikke gitt at det finnes et panser som har akseptabel egenvekt og som samtidig gir ønsket ballistiske beskyttelse. Et aktuelt panser for lettere beskyttelse kan være plater bygget opp av fibre i plastkompositt. Denne type vektbesparende panser har bl.a. ført til utvikling av spesielle prototyper av pansrede kjøretøy, som vist i Figur 8.2- Figur 8.4.



Figur 8.2 Stridskjøretøy med skrog i kompositt panser (CAV-ATD) fra United Defence.



Figur 8.3 ACAVP- Advanced Composite Armoured Vehicle Platform - fra QinetiQ – med skroget bygget opp av panser basert på glassfiberkompositt (E-glass).



Figur 8.4 Pansrede Land Rovere (CAV-100) med etterpansring av S-2 glassfiber CAMAC kompositt fra NP-Aerospace. Utgaven til høyre utløste en landmine i tidligere Jugoslavia uten skader på personellet i kjøretøyet.

8.1 Fiber i plastmatrise

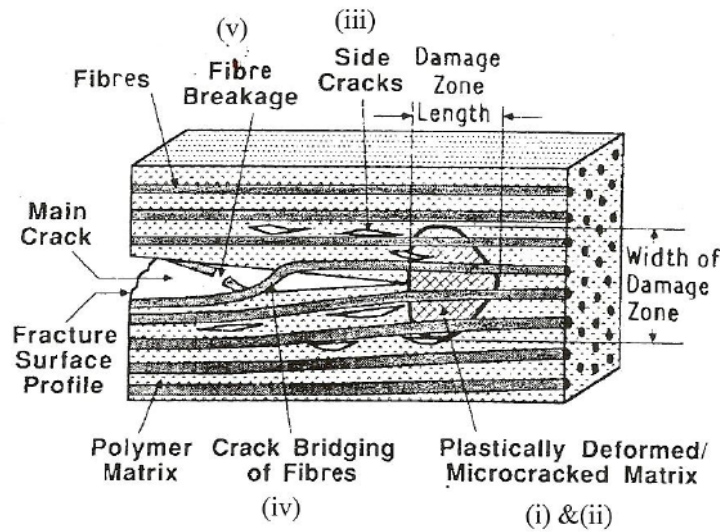
Ballistiske fibre kan stives opp og holdes sammen av et matrisemateriale. Dette fører til at fibrene ikke så lett bøyer av for spisse prosjektiler i penetrasjonsfasen. Matrisemateriale har et lavt voluminnhold (gjærne mindre enn 20 %). Matrisemateriale består av plastmaterialer; enten herdeplaster eller termoplaster, eller en blanding. Herdeplastene er noe dyrere enn termoplastene, i tillegg tilbyr termoplastene en mulighet for forming (under oppvarming) etter produksjonen. Dog er termoplastene mer utsatt for miljøpåvirkninger. Matrisematerialet infiltreres enten inn i en lagvis oppbygning av fiber, eller fibrene preimpregneres ("prepreg") med bindemateriale før pressing og oppvarming. Eksempel på matrisematerialer er gitt i Tabell 8.1.

Tabell 8.1 Eksempler på matriseelementer brukt fiberkompositter[96].

Herdeplast	Termoplast
Fenoler (Phenolic resins)	Akryl (Acrylic resins)
Vinylester (Vinylester resins)	Polyuretan (Polyurethane resins)
Polyester (Polyester resins, eks styren)	Polyetylen
Epoxy (Epoxy resins)	Polypropylen
	Polyvinylbutyral
	Polykarbonat
	Polysulfon
	Syntetisk gummi

Å øke effektiviteten, betyr å øke energiopptaket i materialet. Fibermaterialer er behandlet i avsnitt 5, der energiopptaket ene og alene et resultat av at fibre tøyes og evt. slites av. Når man legger fiber i en plastmatrise, oppnås flere energiabsorberende effekter. Blant annet reduseres fibrenes mulighet til å bøye av for prosjektiler, samt at energien spres utover flere fibre. Figur 8.5 summerer opp de viktigste energiabsorberende funksjonene, både i matrisen og fibrene. Kompositter vil være vesentlig bedre ballistisk beskyttelse en rene fiberprodukter [97]. Ulempen er at

materialet blir stivt, og egner seg mindre til eksempel i personlig beskyttelse. For kjøretøy, er utfordringen å kunne forme platene, noe som vil øke produksjonskostnadene vesentlig.



Figur 8.5 Energiabsorberende elementer i et fiberkompositt.

En av de første matrisene som ble utviklet til bruk i Kevlar var en blanding av fenolresin og polyvinylbutyral (PVB). Andelen PVB er 40 – 60 %. Termoplaster som polyetylen (LDPE og LLDPE) og polypropylen [98] har også vært brukt i aramidstrukturer.

For Spectra (polyetylen kompositter) brukes gjerne vinylester (herdeplast) eller polyuretan (termoplast), også i et bestemt blandingsforhold. En stiv herdeplast hindrer fibrenes bevegelser, og vil øke energiopptaket. Men den samme herdeplasten vil også føre til at komposittpaneler blir sprøe og reduserer effekten fra delaminering i energiopptaket. Vanligvis blandes flere typer matriselementer for å oppnå best mulig energiopptak. Andre termoplaster benyttet til Spectra og Dyneema plater er styren-butadiene-styren kopolymerer.

8.1.1 Glassfiber kompositt

Glassfiberkompositt var først ute i beskyttelsessammenheng. Med dagens trusler vil glassfiber være underlegen andre fiberkompositter i ytelse. Glassfiber er derimot vesentlig billigere enn andre typer fiberkompositter, og blir ofte vurdert når tilgjengelig plass og vekt ikke er kritisk, samt når trusselnivået er lavt. Tabell 8.2 gir typiske verdier for glassfiberkompositt basert på S-2 fiber.

Tabell 8.2 Data for glassfiber kompositt (S-2 Glass Fiber unidirectional) fra Advanced Glassfiber Yarns LLC. BMI (bismaleimide) er en tokomponent herdeplast som er et vanlig matrisemateriale.

	Enhet	Epoxy	BMI
Tetthet	g/cm ³	1,96 – 2,02	1,96 – 2,02
Bøystyrke	MPa	1240 – 1720	
E-modul (longitudinal)	GPa	53 – 59	59 – 70
E-modul (transversal)	GPa	16 – 20	17 – 21
Fibervolum	%	57 – 63	59 – 65
Kompresjonsgrense (long.)	%	1,1 – 1,8	1,7 – 2,5
Kompresjonsgrense (trans.)	%	1,1 – 2	1,5 – 2,2
Kompresjonsstyrke (long.)	MPa	690 – 1240	1240 – 1516
Kompresjonsstyrke (trans.)	MPa	110 – 200	138 – 207
Poisson-tall		0,26 – 0,28	0,27 – 0,31
Skjærmodul	GPa	6 – 9	11 – 21
Skjærstyrke (i fiberplanet)	MPa	62 – 165	124 – 221
Skjærstyrke (interlaminert)	MPa	55 – 103	69 – 124
Skjærtøyning (i fiberplanet)	%	1,6 – 2,5	2 – 2,5
Strekkforlengelse (long.)	%	2,7 – 3,5	3,2 – 3,6
Strekkforlengelse (trans.)	%	0,25 – 0,5	0,4 – 0,6
Strekkstyrke (long.)	MPa	1540 – 2000	1930 – 2200
Strekkstyrke (trans.)	MPa	41 – 82	62 – 96

8.1.2 Dyneema / Spectra

Dyneema paneler blir blant annet produsert av Scanfiber AS (Danmark). Utgangspunktet er UHMWPE som er preimpregnert av polyuretan [99]. Duk av denne prepreg UHMWPE legges lagvis, til ønsket tykkelse, og presses sammen ved bruk av høyt trykk og varme. Trykk, varme og varighet av varmepåvirkningen vil variere med tykkelsen på panelene. Temperaturen ligger på rundt 160 °C for panel på 18 mm tykkelse. Scanfiber har tilgjengelig en presse som maksimalt gir et trykk tilsvarende 4000 tonn, fordelt over et areal på maksimalt 3 x 1,6 m².

Paneler av Dyneema kan til en viss grad formes ved oppvarming. Temperaturen bør da ikke overstige 80-90 °C. Dette er for at fibreene ikke skal ta varig skade. Kritisk temperatur vil ligge på ca 130 °C. FFI har gjort enkle forsøk med temperaturer opp mot denne kritiske verdien uten å kunne se store forandringer i strukturen. Temperatur opp mot denne temperaturen er også nødvendig for å oppnå ønsket forming. Produsenten vil ikke garantere ytelsen ved en slik behandling.

Dyneema kan dekkes med et beskyttende lag (coating) som kalles UREA-coating. Dette er for å hindre slitasje og oppflising av panelene.

I dag bruker Scanfiber fiber med betegnelsen HV 26. HB 50 er en ny kvalitet som sies å ha bedre ballistisk ytelse, samt vil gi enda en reduksjon i vekt. HB 50 er derimot innsatt med et stoff som gjør det vanskeligere å få god heft til paneler ved eksempelvis liming.

Dyneema er å betrakte som det beste materialet innen fiberkompositt mot småkalibrede trusler, til tross for noen ulemper som lavt smeltepunkt og brennbarhet (se avsnitt 5.4).

8.1.3 Kevlar/Twaron

Kevlar eller Twaron er to merkenavn for aramidfibre. Disse er vevde matter som kan brukes både med og uten matrise. Matrisen som produsenten Scanfiber bruker, er polypropylen [100]. Ut fra mengden matrise, blir panelene enten delvis eller helt stive. Mot tilsvarende trussel hevder Scanfiber at ved bruk av aramid i forhold til UHMWPE, trengs en dobling av vekten pr areal-enhet. Videre hevder Scanfiber at Kevlar / Twaron egner seg bedre i kombinasjon med keramikk en hva Dyneema gjør. Dette skyldes at keramikken lettere lar seg lime til Kevlar enn Dyneema.

Scanfiber har produkter hvor aramid er innsatt med en matrise av vulkanisert gummi. Dette vil bedre den ballistiske evnen, men vil også øke vekten.

I Tabell 8.3 er det angitt nødvendig arealvekt for å stoppe et utvalg trusler. Dette er data fra DuPond.

Tabell 8.3 Vekt og tykkelse av Kevlar panserplater i forhold til beskyttelsesnivå. Matrise-materialet er ikke angitt.

Panel referanse	Trussel	Arealvekt [kg/m ²] ± 15 %	Tykkelse [mm] ± 15 %
KAP-1	9 mm Luger	7,5	6,3
KAP-2	0,357 Magnum	8,9	7,5
KAP-3	0,357 Magnum	9,2	8,0
	0,44 Rem. Magnum		
KAP-4	0,357 Magnum	8,9	7,5
	0,44 Rem. Magnum		
KAP-5	0,357 Magnum	6,8	6,0
	0,44 Rem. Magnum		
KAP-7	9 mm FMJ	5,7	6,0
	0,357 Magnum JSP		
KAP-8	9 mm FMJ	7,2	8,9
	0,44 Magnum JHP		
”High temp”	7,62 mm NATO (0,308 cal) FMJ	25	18,5

8.2 Keramiske kompositter

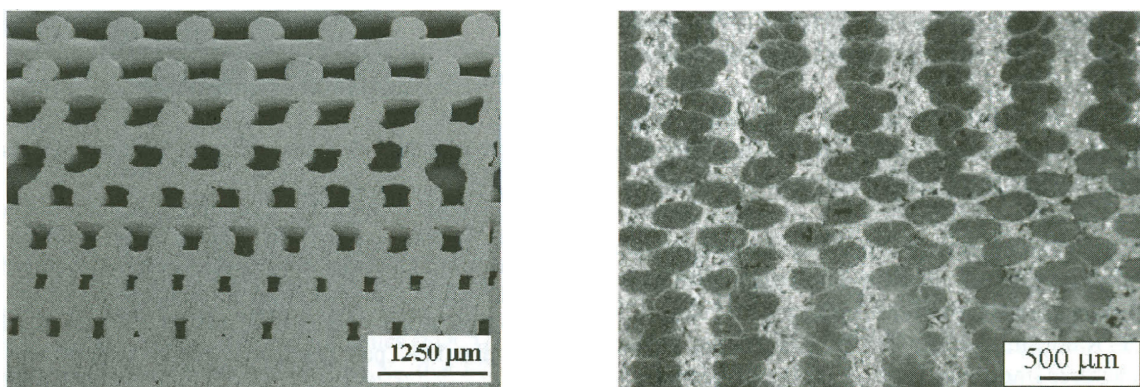
8.2.1 Keramikk i metallmatrise (kermet)

Kermet⁹ er kompositter som produseres ved at keramisk pulver blir blandet i flytende metall og deretter varmebehandlet for å fjerne eventuelle porer, og for å oppnå god kontakt mellom materialene. Man får et materiale med hardhet nært opp til keramikk og seigheten til et metall, selv om ingen av disse egenskapene blir like gode som i de rene materialene. Den andre fordelen er å begrense bevegeligheten til keramikk, som har vist seg å øke erosjonseffekten mot prosjektilet (trusselen).

Det metallet som brukes er vanligvis aluminium eller en aluminium-bronse-legering. Det finnes eksempler på at borkarbid, silisiumkarbid og titankarbid har vært brukt som keramisk tilsetning. Keramikkinnholdet bør være høyt, helst 80 % eller mer på volumbasis. Det er tilsynelatende et problem å få god nok homogenitet, men det finske firmaet Exote Oy har tilsynelatende fått til en blanding basert på titankarbid hvor homogeniteten er meget god og partikkelstørrelsen også er svært ensartet. Med en slik beskyttelse hevder man å kunne stanse en 7,62 mm prosjektil med kjerne av wolframkarbid med 52 kg/m². 12,7 mm AP-prosjektil krever 110 kg/m². Tidligere annonserte samme firma en løsning med titandiborid i en aluminium-bronse-legering som hadde omtrent samme ytelse [101].

Andre eksempler på kermet er silisiumkarbid i aluminium (Lanxide), nikkel / titankarbid og aluminium / borkarbid. I hovedsak består disse av keramikk som er trykksintret eller varmiso-statisk presset (HIP), og er derfor i utgangpunktet dyre materialer [102].

Flere metoder er i senere tid utviklet for å lage slike kompositter. Eksempel på såkalt "fused deposition of ceramics" (FDC) er vist i Figur 8.6.



Figur 8.6 Venstre: SEM bilde som viser oppbygningen av alumina skaffold. Høyre: Optisk bilde som viser alumina infiltrert med kobber - oksygen legering. Begge bildene er hentet fra referanse [54].

⁹ Disse materialene kalles gjerne "cermets" på engelsk. Kermet på norsk er akseptert ifølge enkelte ordbøker.

8.2.2 Biomorfe keramiske materialer

Dette er et keramisk materiale [103] som produseres med utgangspunkt i trevirke, eksempelvis MDF (medium dense fiber boards) eller WBC (wood based composites); i Norge har byggebransjen tilsvarende produkter med navn som Huntonitt og sponplate. Dette er plater som lages ved sammenpressing av trefliser/-spon med plastmatrise som bindemiddel.

For å lage en keramisk struktur, blir først trevirket utsatt for pyrolyse i en inert gass (eksempelvis N₂-gass) ved ca 1650 °C. Resultatet er en karbonpreform med åpen porøsitet på 40-60 %. En smelte av eksempelvis silisium blir tilsatt, hvorpå silisiumet infiltreres kapillært. Den inerte gassen er pumpet ut slik at man har tilnærmet vakuum. Temperaturen er fortsatt rundt 1650 °C. Teknikken kalles ”liquid silicon infiltration” (LSI). Mesteparten av silisiumet reagerer med karbonet og danner silisiumkarbid (SiC). Resultatet er en biomorft materiale bestående av SiC, noe rent Si og en liten andel rent karbon. Andelen SiC kan varieres i området 20-85 vol. %.

Materialeegenskaper for biomorfe materialer er sammenlignet med ALOTEC alumina, og konvensjonell SiC. Disse er gjengitt i Tabell 8.4. Ballistiske tester, rapportert i samme referanse, viser at biomorft SiSiC har likeverdige eller bedre egenskaper enn SiC og Al₂O₃ på vektbasis.

Tabell 8.4 Sammenligning mellom materialdata for biomorft SiSiC og standard SiC og alumina. Tallene er hentet fra referanse [103].

Materialeegenskaper	Enhet	Biomorft SiSiC		SiC	ALOTEC Al ₂ O ₃	
		MDF	WBC		96 SB	99SB
Tetthet	g/cm ³	2,8	3,1	3,0-3,17	3,8	3,39
Andel Al ₂ O ₃	Vol. %	NA	NA	NA	96	99,7
Andel SiC / Si	Vol. %	61/35	85/13	NA	NA	NA
Bruddstyrke	MPa m1/2	2,6	2,8	3-5*	3-6*	3-6*
Bøyestyrke	MPa	232	400	190-250	≥250	≥280
E-modul	GPa	276	386	300-400	≥310	≥365
Hardhet (HRA)	HRA	77	83	95	-	-
Porøsitet	%	1,4	0,1	-	0	0
Vickers HV10	GPa	-	-	23	≥12	≥15
Vickers HV1	GPa	20,1	-	23-24	-	-

*Verdier er hentet fra avsnitt 5.9.

Fordelen med biomorfe keramiske materialer er mange. Først og fremst er produksjonskostnadene lave som følge av lave priser på råmateriale (trevirke, bindemateriale i form av plastmatrise og silisium). Selve produksjonsprosessene er uavhengig av høyt trykk og høye temperaturer, i motsetning til mange andre keramiske materialer. I tillegg er man i stand til å produsere relativt komplekse geometrier, ved å forme selve trevirket forut for pyrolysen. Denne formen vil forbli mer eller mindre uforandret gjennom pyrolysen og omdannelsen til keramikk.

Heidenreich et al. [104] har også forsøkt å forsterke LSI SiSiC med karbonfiber; C/C SiSiC. Dette ble sammenlignet med rent biomorft SiSiC. Forsøkene viste at selv om den ballistiske evnen var sterkt redusert i forhold til rent SiSiC, så var multi-hit egenskapene for C/C SiSiC bedre på grunn av mindre skade rundt treffpunktet til prosjektilet. Materialdata finnes i Tabell 8.5.

Tabell 8.5 Sammenligning mellom typer kompositter for SiC. Data hentet fra Heidenreich et al. [104].

Materialeegenskaper	Enhet	Biomorft SiSiC	Sintret SiC	C/C-SiC	
				Silca XB	Silca SF
Karbonfiber				Vevd	Kort fiber (40 mm)
Fibertype				Ortotrop	Stokastisk
Tetthet	g/cm ³	2,8	3,15	1,9	2,0-2,1
Andel SiC / Si	Vol. %	79 / 20	100 / 0	16.apr	35-40 / 3-5
Bøystyrke	MPa	165 – 259	410	160	90 – 140
E-modul	GPa	>300	380	60	50 – 70
Hardhet (HRA)	HRA	74	95	49	49
Hardhet (HV10)	GPa	-	23	-	-
Porøsitet	%	<1	0	4	<3

8.2.3 Keramiske blandinger

Med keramiske blandinger menes materialer som er satt sammen av flere typer keramikk [102]. Eksempler på dette har allerede vært nevnt i avsnitt 5.9, uten å kalle disse sammensatte keramene for kompositter.

Formålet med slike kompositter er å få ned kostnadene ved å benytte billig keramisk materiale (som alumina), samtidig som de materielle og ballistiske egenskapene forbedres ved å kombinere med mer kostbare materialer som karbider og nitrider.

Eksempler på slike kompositter er alumina / zirconia (se avsnitt 6.4.1), Al₂O₃ / SiC, TiB₂ / B₄C, TiB₂ / SiC og SiC / Si₃N₄ / Al₂O₃. Det er også mulig å tilsette rent silisium (Si). Da blir det en definisjonssak om dette da bør kalles en kermet (avsnitt 8.2.1). Disse typene materialer har lavere verdier med tanke på materialeegenskaper (Tabell 8.6), men har vist en god ballistisk evne; også multi-hit egenskaper.

Medvedovski [102] rapporterer (uten nærmere å spesifisere nødvendig vekt og tykkelse) at disse keramiske komposittene (med en gitt tykkelse) kan stanse prosjektiler av typen 7,62x39 mm, 7,62x51, samt NIJ IV ammunisjon (30.06 M2AP), der aramid eller aluminium brukes som backing. I tillegg rapporterer han tilfredsstillende beskyttelse mot en innleggsplate i ballistisk vest med opptil 9 treff.

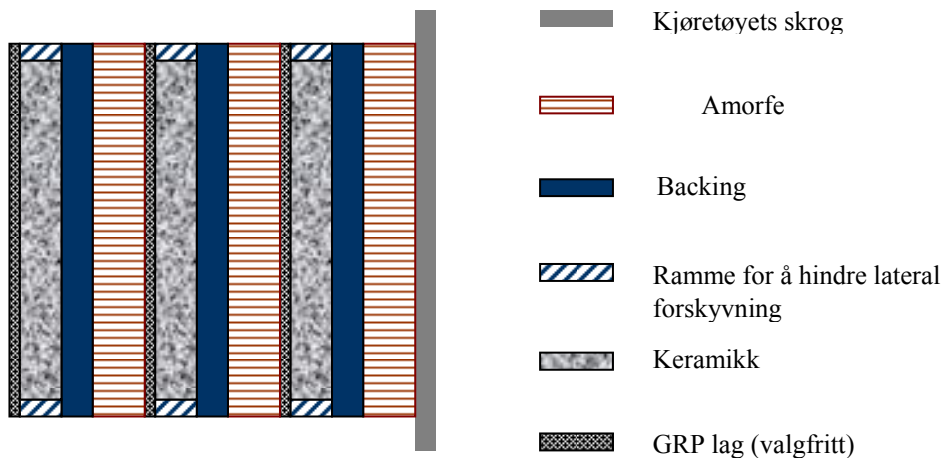
Tabell 8.6 Noen materialdata for SiC baserte kompositter, sammenlignet med sintret og reaksjonssintret (rent) SiC [102].

	Enhet	SiC-(Si ₃ N ₄)- Al ₂ O ₃ kompositter	SiC-Si ₃ N ₄ - Al ₂ O ₃ -Si kompositter	Sintret SiC (Saint-Gob.)	Reaksjonssintret SiC (Saint-Gob.)
Tetthet	g/cm ³	2,7-3,2	2,85-3,05	3,06-3,10	3,04-3,07
Bøystyrke	MPa	105-155	120-140	350-400	240-280
E-modul	GPa	240-310	260-280	400-420	370
Lydhastighet	km/s	9,8-11,2	9,8-10,05		
Rockwell hardhet:	HRC	40-55	45-55		
	HRA	58-77	68-78		

Måten slike materialer produseres på er støping (slip casting), pressing, eller sprøytstøping (injection moulding).

Lagvise kombinasjoner av keramiske materialer er også demonstrert mulige å produsere. Orlovskaya et al. [105] har demonstrert lagvise kompositter av borkarbid og silisiumkarbid med økt bruddstyrke.

8.3 Tandemsystemer av keramikk og metall



Figur 8.7 Prinsippskisse for keramiske tandemsystemer.

Keramiske tandemsystemer (eng. tandem ceramic armour; TCA) er multiple lag med beskyttelse [34]. Prinsippet er vist i Figur 8.7. Man designer et godt beskyttende lag av keramikk på metallplate. Keramikken kan i tillegg være montert i en (metall)ramme for å hindre lateral forskyvning. Dette vil kunne øke erosjonseffekten. Foran keramikken kan man velge å legge på materiale for å redusere sannsynligheten for å bli detektert, og/eller hindre selve keramikken i å unnsnippe også denne retningen.

For å utnytte den gode kombinasjonen av keramikk og metall, bruker man dette additivt. Mellom hvert lag legges et isolasjonsmateriale. Dette skal hindre sjokkbølger i å forplante seg fra ett lag til det neste. Dette vil hindre keramikken i de neste lagene å sprekke opp før evt. prosjektilet treffer.

Slike systemer vil være mer effektivt enn rent stål på vektbasis. En ulempe er tykkelsen på beskyttelseslaget.

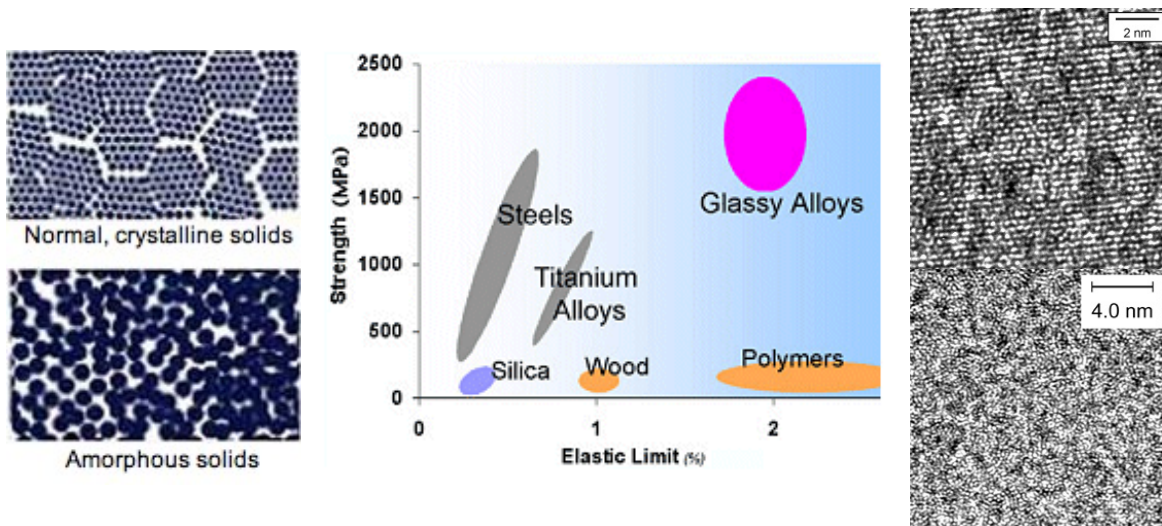
9 Eksotiske materialer

9.1 Amorfe metallegeringer

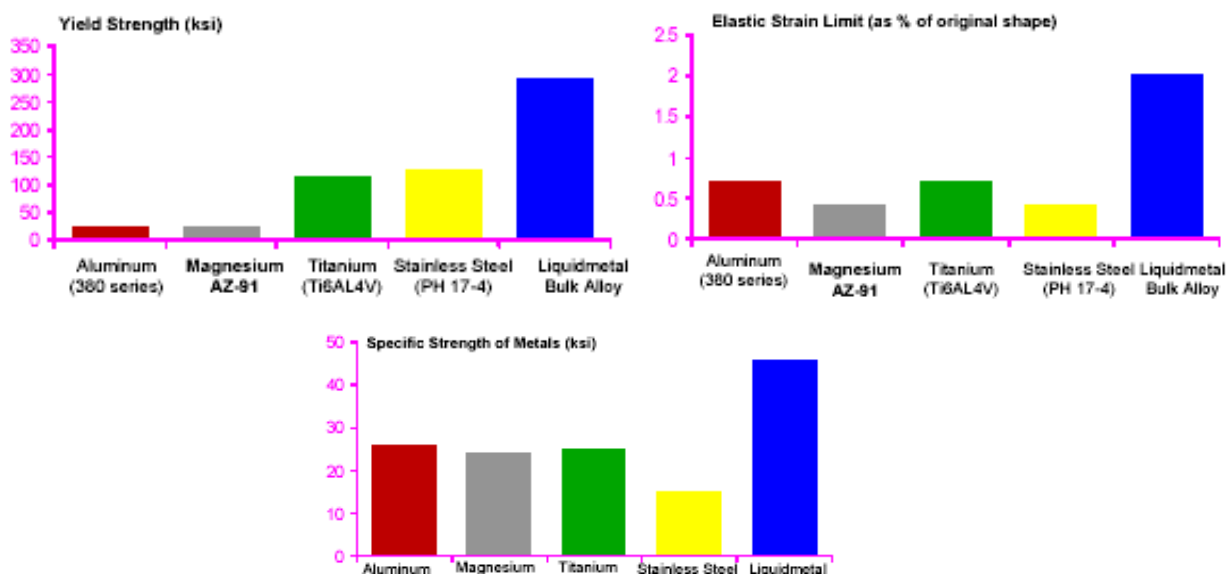
De fleste metaller og metallegeringer er bygget opp av korn eller regioner med atomstruktur ordnet i et bestemt tredimensjonalt mønster. Disse regioner kaller man krystallitter. I Figur 9.1, øverst til venstre, er det vist en skisse som anskueliggjør denne strukturen og over til høyre, et TEM-bilde av en krystallinsk zirkonium legering, hvor atomstrukturen vises.

Amorfe metallegeringer, eller ikke krystallinske legeringer, har en ikke ordnet atomstruktur. Det vil si at atomene er mer eller mindre tilfeldig plassert (Figur 9.1, nederst til venstre). Den tilfeldige ordningen av atomene finner man bl.a. i vanlig vindusglass. En kaller derfor også disse legeringene for "metallic glass" på engelsk. Strukturen medfører at legeringene får tilført helt spesielle egenskaper som høy strekkfasthet kombinert med høy bruddfasthet. Til høyre i samme figur er egenskaper for amorfe metallegeringer sammenlignet med noen andre materialer. Disse legeringene har i tillegg spesielle termiske egenskaper. I likhet med glass vil de ved oppvarming bli myke og etter hvert seigflytende slik at de lett kan overføres til komplekse strukturer.

Metoden for fremstilling av amorfe metallegeringer er å avkjøle den flytende legeringen så hurtig at den ikke får tid til å innta den nevnte krystallstrukturen. Ved fremstilling av de første metallegeringer for ca 40 år siden måtte man ha en kjølerate nærmere 10^6 °C/s, hvilket bare kunne oppnås i små emner. Ved å bruke spesielle legeringer, kan kjøleraten i dag ligge i området 0,1 – 100 °C/s som muliggjør tilvirkning av større emner. Disse legeringene kaller man gjerne amorfe metallegeringer av 2. grad eller "Inoue legeringer" etter prof. Akihisa Inoue, Tohoku University, Sendai, Japan, som har vært og fortsatt er banebrytende innefor arbeidet med amorfe metallegeringer. En av publikasjonene fra hans gruppe rapporterte en metallegering ($\text{Co}_{43}\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5,5}\text{B}_{31,5}$) med en bruddstyrke på 5185 MPa, E-modul på 268 GPa, spesifikk styrke på $31,10^6$ Nm/kg og spesifikk E-modul på $31,10^6$ Nm/kg [106]. I følge Inoue gjelder følgende empiriske regler for fremstilling av amorfe metallegeringer: Minst tre elementer må være til stede, atomdiameteren til disse elementene må avvike mer enn 12 % fra hverandre og blandevarmen for elementene må være negativ.



Figur 9.1 En sammenligning av molekylstruktur og styrke mellom vanlige metaller (crystalline solids) og amorfe metaller (amorphous solids/glassy alloys), samt styrke- bruddforlengelse forhold av amorfe metaller mot stål, titan og andre materialgrupper [107]. Til høyre er det vist bilder (TEM) av en zirkoniumlegering, øverst en krystallinsk struktur og nederst en amorf.

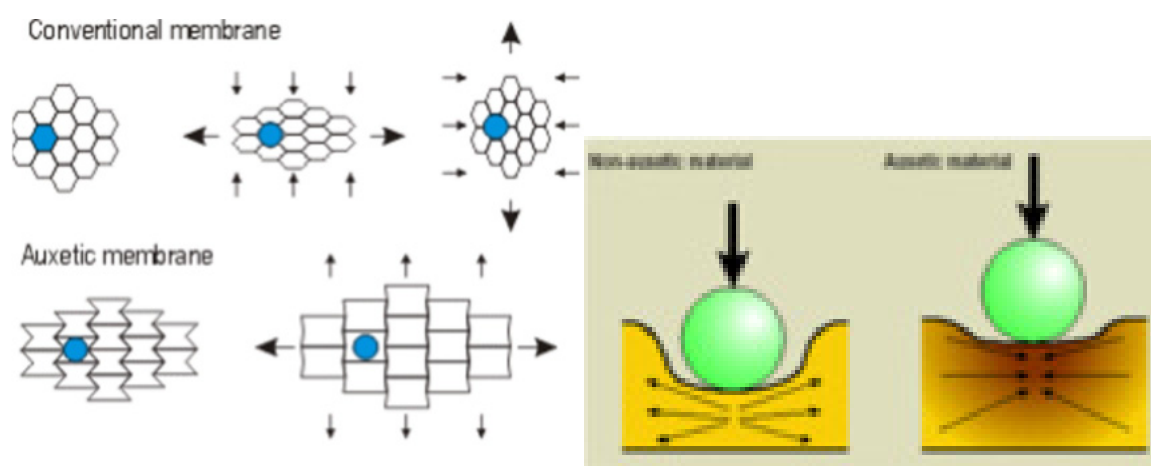


Figur 9.2 Noen materialegenskaper for amorfe metallegering i sammenligning med andre spesifiserte metallegeringer [108].

9.2 Auksetiske materialer

Når et ”vanlig” materiale blir strukket vil materialet som regel bli ”tynnere” på tvers av strekkretningen. Dette gjenspeiler seg i positivt Poisson-tall ν hvor: $\nu = \epsilon_{\text{tvers}} / \epsilon_{\text{langs}}$, der $\epsilon_{\text{tvers}} = (l_0 - l) / l_0$ tvers av strekket og $\epsilon_{\text{langs}} = (l - l_0) / l_0$ langs strekket. l_0 er målt verdi før strekkingen og l er målte verdi

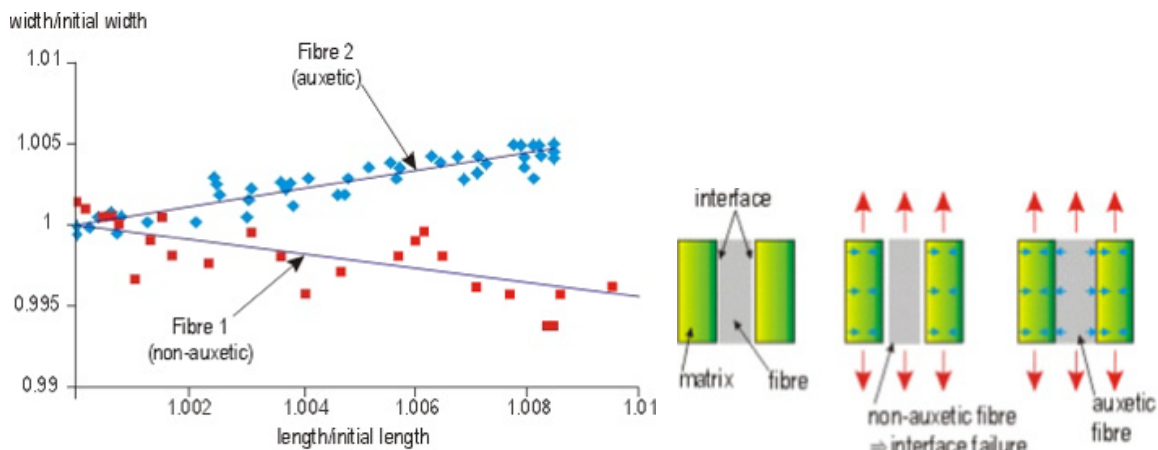
etter strekkingen. Auksetiske¹⁰ materialer er karakterisert ved at de utvider seg på tvers av strekkretningen, dvs. $l_{tvers} > l_{0,tvers}$, og således har dette materialet et negativt Poisson-tall. For de fleste materialer ligger ν i området 0,2 til 0,4. Disse egenskapene er illustrert med en skisse av en ”honeycomb” membran i form av et filter i Figur 9.3, til venstre. I et auksetisk filter vil porene ved strekking, bli større både langs strekkretningen og på tvers. Derved blir det lettere å rense filteret sammenlignet med et ikke auksetisk filter hvor porene blir stukket ut i en ellipseform. Trykker man på et auksetisk materiale, vil det trekke seg sammen og således bli hardere. Dette er illustrert i skissen til høyre i Figur 9.3.



Figur 9.3 Illustrasjonen til venstre viser hvordan en vanlig og en akustisk membran reagerer ved strekking. Illustrasjonen til høyre viser hvordan et vanlig materiale reagerer sammenlignet med et auksetisk materiale ved trykkpåvirkning.

Fremstilling og anvendelse av auksetiske materialer er fortsatt i sin spede begynnelse. Det bør nevnes at det er utviklet en prosess for kontinuerlig produksjon av mikroporøse, auksetiske polypropylenfibre. Denne typen fibre har anvendelsespotensialer på en rekke områder enten som monofilament eller som multifilament garn innvevd i spesielle tekstiler. En annen anvendelse kan være i forbindelse med innlegg i kompositter f.eks. for ballistisk beskyttelse. Når komposittmaterialet blir strukket vil de akustiske fibre utvide seg og derved forbedre koblingen mellom matrisematerialet og fibre.

¹⁰ Ordet *auksetisk* finnes neppe i norske ordbøker. Det er en direkte oversettelse av det engelske *auxetics* som betegner en materialer som utvider sit volum når det strekkes. Ellers kan man også bruke betegnelsen *anti-gummi*, som indikerer at det oppfører seg omvendt av gummi. Betegnelsen *materiale med negativt kontraksjonsforhold* er uhyre presist, men noe tungvint.



Figur 9.4 Figuren til høyre viser dimensjonsforandringer for vanlig- og auksetisk polypropylen fiber ved strekking [109]. Illustrasjonen til venstre viser disse to fibrenes reaksjon i et kompositt som blir strukket.

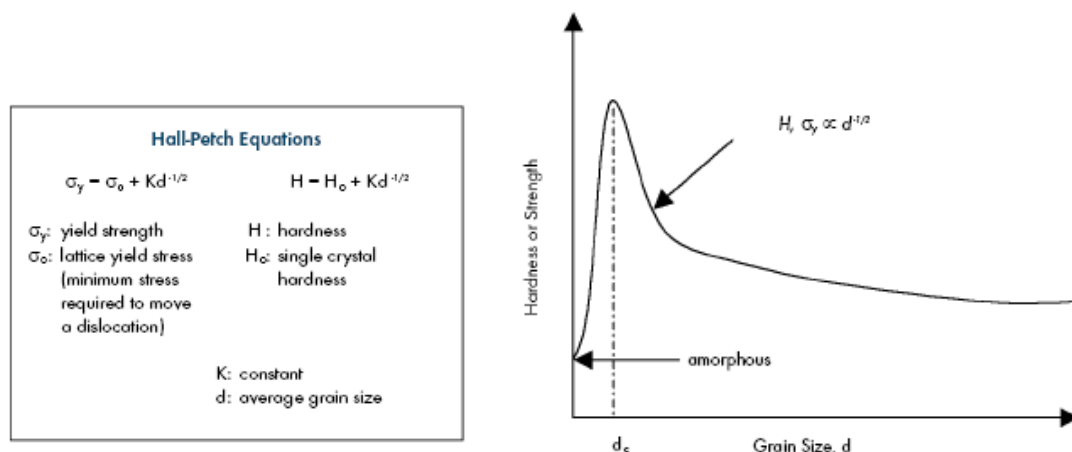
9.3 Nanokeramikk

En karakteristikk ved keramikk er størrelsen på de pulverpartiklene som danner grunnlaget for det harde faste materialet. Styrken i materialet er i noen grad bestemt av denne størrelsen. Når keramikk settes under spenning vil spenningen i stor grad måtte tas opp av grenseflatene mellom disse krystallinske kornene. Grenseflatene danner også grunnlag for spenningskonsentrasjoner som i sin tur kan føre til at materialet sprekker opp. Dersom kornene er mindre, blir den totale overflaten av kornene større og spenningen får en større flate å fordele seg over. I tillegg vil heller ikke eventuelle spenningskonsentrasjoner bli like sterke som i et grovkornet materiale.

Den mest aksepterte hypotesen når det gjelder å forklare de mekaniske egenskapene til polykrystallinske nanomaterialer er basert på de såkalte Hall-Petch likninger, Figur 9.5 (venstre). Disse likningene viser at styrke og hardhet øker med avtagende størrelse på krystallittene, og gjelder ned til en kritisk størrelse (d_c) på ca 10 nm. En ytterligere reduksjon i størrelsen vil imidlertid medføre at styrken svekkes igjen, Figur 9.5 (høyre). Ved å minske kornstørrelsen vil forholdet mellom det volumet som utgjør grenseflatesjiktene og restvolumet, øke. Ved en partikkelstørrelse på ca 5 nm vil 50 % av volumet være tilknyttet grensesjiktet noe som medfører at tettheten av krystalldefekter blir svært høy. Man antar at dette fører til en hurtig diffusjon av atomer og såkalte vakanser (manglende atomer/ledige plasser i den ideelle krystallstrukturen) i spenningsområdene, noe som gjør at grenseflatene sklir lettere forbi hverandre og således reduserer styrken av materialet.

I grovkornet keramikk (kornstørrelse større enn 100 μm) øker styrken proporsjonalt med den inverse kvadratroten av kornstørrelsen. For finkornet keramikk er økningen mindre, men dog økende med avtagende kornstørrelse. Gjennom en prosess tilknyttet nanoteknologi kan man produsere keramiske partikler som kun er noen få titalls nanometer i diameter.

Sennett et al. [110] har utført forsøk med å lage kompositter ved bruk av nanokeramikk (her alumina), forsterket med karbon nanorør (MWNT; se avsnitt 0). Resultatene tyder på økt strekkfasthet og økt bruddstyrke med en volumfraksjon på 5-10 % MWNT. Begge disse styrkeparametrene har en økning på faktor to, sammenlignet med verdier for Safir (en-krystallinsk alumina).



Figur 9.5 Styrke / hardhet av krystallinske materialer som funksjon av kornstørrelser i nanometer (nm) området ($d_c \approx 10 \text{ nm}$) [111].

9.4 Austenitisk nitrogenstål

Dette er en stål kvalitet som brukes av IBD i forskjellige anvendelser. Sammensetningen av IBD kvalitet er ikke kjent, men den kan være den samme som Uranus B66© produsert av Creusot-Loire Industrie. Legeringen inneholder 0,47 % nitrogen og kun 0,02 % karbon. I tillegg er innholdet av krom så høyt som 23,8 % og av nikkel 21,2 %. Jerninnholdet er på kun 41,5 % [112]. Den kan derfor under tvil kalles for stål.

De ballistiske egenskapene med austenitisk nitrogenstål er at det arbeidsherder og at det er mer strekkrateavhengig enn de fleste andre metaller.

I [113] har man angitt en konstitutiv modell som er en blanding av en Johnson-Cook-modell og en Zerelli-Armstrong modell:

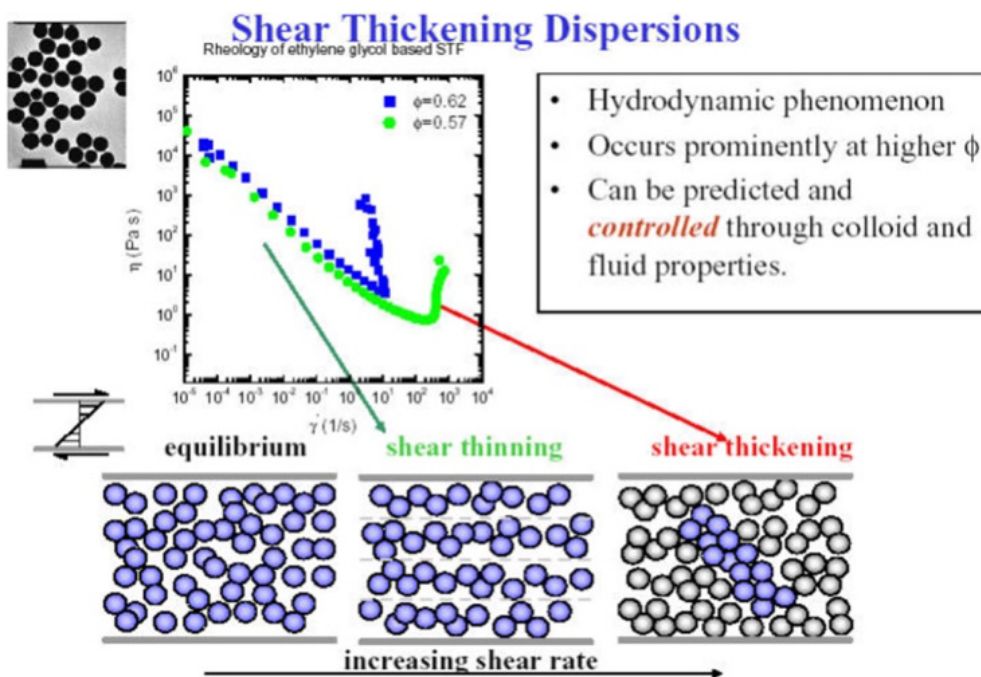
$$\sigma = \left[708 + 1063(1 - \exp(-5,69\varepsilon)) \right]^{1,84159} + 27,79 \ln \dot{\varepsilon} \left[1 - T^{*0,76337} \right] \text{ [MPa]} \qquad (9.1)$$

9.5 Skjærfølsomme væsker

Ved væskestrømning i et rør vil væskens hastighet variere over tverrsnittet til røret, fra null ved rørvæggen til maksimum ved rørkaksen. Væskens skjær (shear) gjør at veggen utøver et friksjonsdrag på væsken som virker mot driftstrykket. For ikke Newtonske væsker vil dette friksjonsdraget (i motsetning til Newtonske væsker) forandre seg med strømningshastigheten av væsken gjennom røret, dvs. at væsken er skjærfølsom. For noen væsker vil dette friksjonsdraget bli mindre når

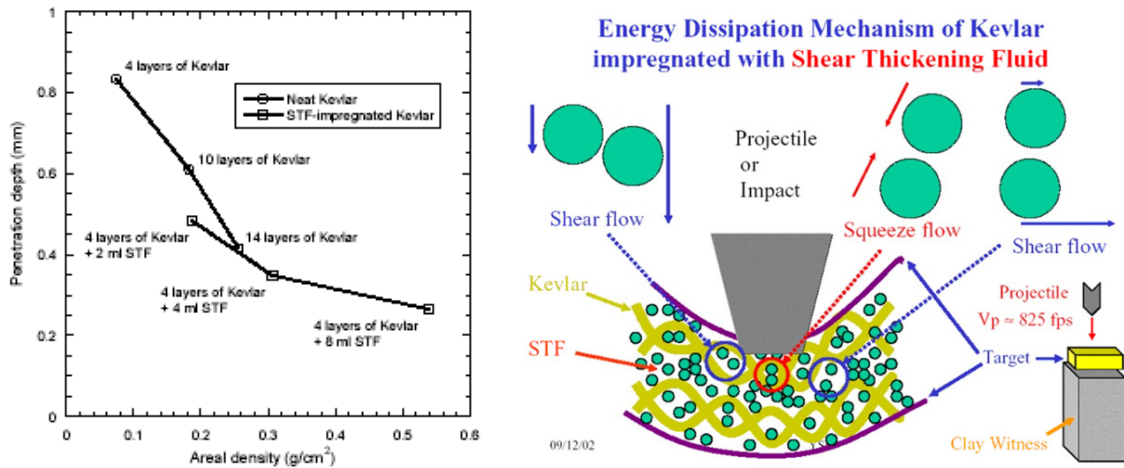
strømningshastigheten overskrider en grenseverdi (engelsk: shear thinning fluids). For andre væsker vil dette friksjonsdraget øke (shear thickening fluids; STF) når hastigheten overskrider en grenseverdi, dvs. man registrerer en økning i væskens viskositet. Kolloide suspensjoner, eller væsker som inneholder finfordelte partikler, er et eksempel på den sistnevnte typen.

I Figur 9.6 er det gitt en skjematisk fremstilling av hvordan partiklene i SFT reagerer etter som skjærhastigheten øker. Videre er det innlagt kurver som viser hvordan viskositeten forandrer seg som funksjon av skjærhastigheten.

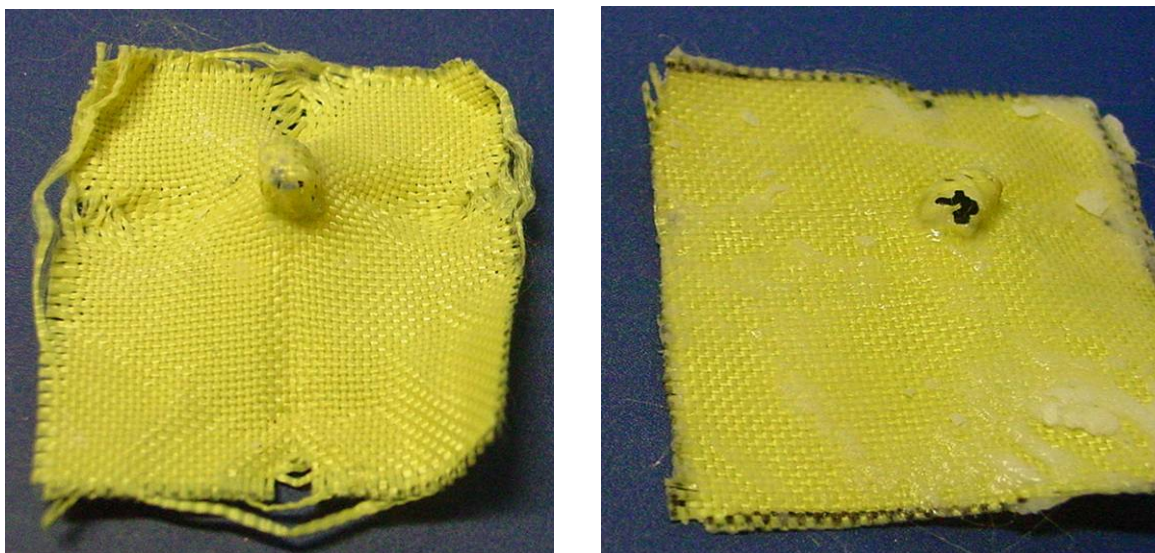


Figur 9.6 Illustrasjon av hvordan partiklene i en skjærfølsom væske påvirker viskositeten når skjærhastigheten i væsken øker.

I forbindelse med ballistisk beskyttelse er det de kolloide, eller såkalte "shear thickening fluids" som er aktuelle. I forbindelse med ballistisk beskyttelse kan egenskapene til disse spesielle dispersjonene benyttes til å forbedre beskyttelsesevnen til ballistiske fibre i vevd duk. Det er bl.a. gjennomført en studie som viser at ved å impregnere Kevlar vev med en slik væske (57 vol % SiO₂ i etylen glykol) vil duken få en større evne til å ta opp anslagsenergien til prosjektilet [114]. Prosjektilet var en FSP kal 22 med anslagshastighet (V_0) på 244 m/s. Kevlarpanelene ble spent opp mot en vitnebakgrunn i form av en blokk plastilina og penetrasjonsdybden etter gjennomskyting ble målt (Figur 9.7 og Figur 9.8).



Figur 9.7 Til venstre vises inntrengningsdybden av et 22 kal FSP i en plastilina backing ved gjennomskyting av 4 lag Kevlarduk med og uten preparering med STF. Til høyre er det gitt en skjematisk forklaring på effekten av preparering med STF [114].



Figur 9.8 Kevlarpanel etter beskytning. Til venstre uten preparering. Til høyre et panel som er STF preparert og som viser at det typiske tråduttrekksmønsteret til venstre er fraværende.

9.6 Superbainitt

Materialet er utviklet i et samarbeid mellom DSTL, QinetiQ og Cambridge University [115]. Metoden som brukes for å lage kvaliteten kalles isotermisk herdeprosess (isothermal hardening). Dette innebærer at stålet blir varmet opp til omlag 1000 °C, for så å kjøles ned til 200 °C. Stålet holdes ved denne temperaturen en hvis tid før avkjøling til romtemperatur. Strukturen i stålet danner på denne måten en fase som kalles bainite, og som gjør stålet ekstremt hardt.

Produksjonen er nå satt i livet sammen med Corus og Bodycote (UK). Ved å introdusere huller i stålplatene, reduseres vekt, samtidig som dette øker sannsynligheten for at prosjektiler treffer en kant som igjen vil endre retningen til trusselen.

10 Konstitutive modeller

En konstitutiv modell uttrykker hvordan materialets styrke avhenger av tøyning, tøyingsrate, trykk og temperatur. Dette er en av de mest kritiske faktorene i forbindelse med modellering av den dynamiske materialoppførselen i både målmateriale og prosjektilmateriale. Gjennom årene har det dukket opp tallrike modeller av denne typen. Hvilken modell som er best vil avhenge av hva slags materiale man betrakter. Et metall beskrives gjerne på en annen måte enn keramikk, og en fiberkompositt må igjen behandles på sin egen måte.

I tillegg til den konstitutive modellen har man ved slike beregninger som regel behov for en tilstandslikning. En slik likning beskriver hvordan tettheten av materialet er avhengig av trykk og temperatur. Dette forholdet kan som regel beskrives langt enklere enn den konstitutive modellen.

De aller fleste modellene finnes tilgjengelige i numeriske (finite element) programmer som LS-DYNA og ANSYS Autodyn. Se for eksempel referanse [116].

Vi vil kort presentere noen av de mest brukte konstitutive modellene til beregninger av materialstyrker og hvordan beskyttelsesmaterialer oppfører seg under påtrykt last fra prosjektiler.

10.1 Johnson-Cook-modellen

Denne modellen [8;117] ble utviklet for å ta hensyn til arbeidsharding, tøyingsrate og termisk mykning. Modellen har følgende form:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*\right) \left(1 - T^{*m}\right), \quad (10.1)$$

hvor ε er tøyningen, $\dot{\varepsilon}$ er tøyingsrate, $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ er relativ tøyingsrate der $\dot{\varepsilon}_0 = 1,0s^{-1}$. T^* kalles homolog temperatur, og er definert

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_s - T_0}. \quad (10.2)$$

T_0 er referansetemperaturen og T_s er smeltepunktet. A , B , C , m og n er alle tilpasningskoeffisienter, hvor kun A og B er benevnede.

Svakheten med denne modellen er at den ikke inneholder særlig mye fysikk. Hvert ledd er en forenklet beskrivelse av sammenhengen mellom flytegrense og henholdsvis tøyning, tøyingsrate og temperatur. Likevel har den blitt mye brukt, og har vært grunnlag for andre modeller av samme art.

Johnson-Cook modellen har også en bruddmodell ("fracture model") som er gitt av

$$\varepsilon^f = \{D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)\} \{1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*\} \{1 + D_5 T^*\}, \quad (10.3)$$

der ε^f er tøyningen ved brudd, $\dot{\varepsilon}^*$ er den ekvivalente dimensjonløse tøyingsraten og hvor den dimensjonløse trykk - spenningsfaktoren (σ^*) er gitt av

$$\sigma^* = \sigma_m / \sigma, \quad (10.4)$$

hvor σ_m er gjennomsnittet av spenningen i de tre retningene (trykket), og σ er den ekvivalente von Mises spenningen. D_1 til D_5 er materialkonstantene. Svakheten til denne modellen er at man har et materiale som enten er intakt eller feilet. Dette er i motsetning til Johnson-Holmquist modellen (se avsnitt 10.3) som vil ha en glidende overgang mellom intakt og feilet materiale.

Data for Johnson-Cook-modellen for en del aktuelle materialer er gitt i Tabell 10.2.

10.2 Zerilli-Armstrong-modellen

Modellen til Zerilli-Armstrong [118] bygger delvis på Johnson-Cook-modellen, men tar i større grad hensyn til de fysiske prosessene som finner sted under rask deformasjon av et materiale. Modellen tar hensyn til kornstørrelse, bevegelse av dislokasjoner og krystallstruktur. Det var også meningen at den skulle ta hensyn til tvillingdannelse¹¹ i visse materialer, men dette har så vidt vi vet ikke blitt publisert.

For materialer med kubisk flatesentrert struktur (fcc)¹², som f.eks. kopper, er modellen for flytespenningen

$$\sigma = c_1 + c_2 \exp(-c_3 T + c_4 T \ln \dot{\varepsilon}), \quad (10.5)$$

mens den for romsentrerte strukturer (bcc)¹³, som f.eks. jern og vanlig stål, er

$$\sigma = c_1 + c_2 \sqrt{\varepsilon} \exp(-c_3 T + c_4 T \ln \dot{\varepsilon}) + c_5 \varepsilon^n, \quad (10.6)$$

hvor c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 og n er tilpasningskoeffisienter. c_1 inneholder et konstantledd og et ledd som er avhengig av kornstørrelsen l på følgende vis:

¹¹ Tvillingdannelse er dannelse av symmetriflater i krystallstrukturen som bidrar til å gjøre materialet hardt.

¹² Krystallstruktur bestående av kuber med et ekstra atom midt på hver sideflate. Strukturen er den tetteste og mest regelmessige monoatomære struktur som er mulig.

¹³ Krystallstruktur bestående av kuber et ekstra atom midt i kuben. Denne strukturen er noen mer åpen enn fcc-strukturen

$$c_1 = \sigma^* + \frac{k}{\sqrt{l}} \quad (10.7)$$

Til forskjell fra Johnson-Cook er det her en kopling mellom tøyingsraten og den termiske mykningen. Dessuten kan man legge merke til at det ikke er arbeidsharding i kubisk romsentrerte materialer.

Selv om Zerilli-Armstrong-modellen er en prinsipielt bedre modell enn den til Johnson-Cook er den brukt i begrenset grad. Koeffisientene er kjent for et lite antall materialer og den er forholdsvis krevende å bestemme verdiene av dem.

10.3 Johnson-Holmquist-modellen

Denne modellen [119] er tilpasset til sprø materialer (som keramikk) og tar hensyn både til den fasen hvor materialet er intakt og hvor det er fragmentert.

Det intakte materialet beskrives ved

$$\sigma_i = A(P^* + T^*)^N (1 + C \ln \dot{\epsilon}), \quad (10.8)$$

hvor P^* og T^* er henholdsvis normaliserte trykk og maksimale hydrostatiske strekk i det intakte materialet. Det fragmenterte materialet beskrives ved

$$\sigma_f = BP^{*N} (1 + C \ln \dot{\epsilon}). \quad (10.9)$$

σ_{HEL} er kalt Hugoniots Elastiske Grense som er det trykk eller spenning hvor materialet under kompresjon slutter å oppføre seg elastisk.

Graden av fragmentering beskrives ved parameteren D , også kalt grad av ødeleggelse. Den er definert som

$$D = \frac{\sum \Delta \epsilon_p}{D_1 (P^* + T^*)^{D_2}}, \quad (10.10)$$

der tellere gir den akkumulerte plastiske tøyningen som har oppstått på grunn av hele tøyningshistorien. D_1 og D_2 er tilpasningskoeffisienter.

For et delvis fragmentert materiale er styrken da gitt ved

$$\sigma^* = \sigma_i - D(\sigma_i - \sigma_f) \quad (10.11)$$

Tabell 10.1 er hentet fra referanse [119] og gir parametrene for fire sentrale keramikktyper samt for vanlig glass.

Tabell 10.1 Parametrene for fire sentrale keramikktyper samt for vanlig glass i Johnson-Holmquist modellen.

	B4C	SiC	AlN	Alumina	Glass
Tetthet (kg/m ³)	2510	3163	3226	3700	2530
Skjærmodul (GPa)	197	183	127	90,16	30,4
Styrkeparametre:					
A	0,927	0,96	0,85	0,93	0,93
B	0,7	0,35	0,31	0,31	0,088
C	0,005	0	0,013	0	0,003
M	0,85	1,0	0,21	0,6	0,35
N	0,67	0,65	0,29	0,6	0,77
Strekkstyrke (GPa)	0,26	0,37	0,32	0,2	0,15
Norm. bruddstyrke	0,2	0,8			0,5
HEL (GPa)	19	14,567	9	2,79	5,95
HEL trykk	8,71	5,9	5	1,46	2,92
HEL vol. tøying	0,0408		0,242	0,01117	
HEL styrke (GPa)	15,4	13,0	6,0	2,0	4,5
Ødeleggelsesparametre:					
D1	0,001	0,48	0,02	0,005	0,053
D2	0,5	0,48	1,85	1,0	0,85
Tilstandsligning:					
K1 (GPa)	233	204,785	201	130,95	45,4
K2 (GPa)	-593	0	260	0	-138
K3 (GPa)	2800	0	0	0	290

Tabell 10.2 Data for Johnson-Cook-modellen for noen materialer [8,120-123].

Materialer	Tetthet [kg/m ³]	E-modul [GPa]	Poisson-tall	A [MPa]	B [MPa]	C	n	m	T _{melt} [K]	C _p [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Ref
Al 2024-T351	2770	73	0,33	265	426	0,015	0,34	1	775	875	[6]
Al 6061-T6	2700	69	0,33	324	114	0,002	0,42	1,34	846	875	[96]
Al 7039	2770	71	0,33	337	343	0,01	0,41	1	877	875	[6]
Aluminium	2700	65,762	0,3	148,361	345	0,001	0,183	0,859	893	920	[99]
Jern (ARMCO)	7890	207 - 211	0,29 - 0,30	175	380	0,06	0,32	0,55	1811	452	[6,98]
Kobber (OFHC)	8960	124	0,33	90	292	0,025	0,31	1,09	1356	383	[6,98]
Messing	8520	100	0,34	112	505	0,009	0,42	1,62	1189	385	[6]
PC	1190	6	0,28	420	343	0,01	0,134	1	388	125	[95]
RHA	7850	210	0,3	792	510	0,014	0,26	1,03	1793	477	[97]
Stål 11106	7890	210	0,3	350	275	0,022	0,36	1	1811	452	[6]
Stål 4340	7830	200	0,3	792	510	0,014	0,26	1,03	1793	477	[6,98]
Ti-6Al-4V	4430	113	0,3	862	331	0,012	0,34	0,8	1941	520	[96]
Tungsten (Wolfram)	17600	286	0,28	1506	177	0,016	0,12	1	1723	134	[97]
Tungsten Carbide	14770	620	0,215	3000	89000	0	0,65	1	1768	250	[92]
WHA	17300	347	0,3	926	843	0,0385	0,4	0,5727	3000	134	[95]

Tabell 10.3 Data til Johnson-Cook brudd modell for utvalgte materialer.

Materiale	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	Referanse
Aluminium	0,071	1,248	-1,142	0,147	0,0	[124]
Jern (ARMCO)	-2,20	5,43	-0,47	0,016	0,63	[123]
Kobber (OFHC)	0,54	4,89	-3,03	0,014	1,12	[123]
Stål 4340	0,05	3,44	-2,12	0,002	0,61	[123]
Tungsten Carbide	0,0	0,0019	-3,0	0,0	0,0	[117]
Tungsten Carbide, G-15	0,0	0,0095	-1,95	0,0	0,0	[125;126]

Referanser

- [1] Diederer AM, "Metal minerals scarcity: A call for managed austerity and the elements of hope," 2009.
- [2] "Industrial fibers - Aramid", Aramid, Ltd., <http://www.aramid.com>, 2009.
- [3] Ogorkiewicz R, "Fundamentals of armour protection course," Armour: 2007.
- [4] Bergsrud SM and Helgesen H, "Terminalballistikk for utvalgte håndvåpenprojektiler," Forsvarets forskningsinstitutt (FFI), Kjeller, FFI-rapport 2007/00949, 2007.
- [5] "SSAB", SSAB (Oxelösund), <http://www.ssab.com/>, 2009.
- [6] "The application of new technology to aluminum armor systems", Key to Metals AG, <http://www.keytometals.com/Article90.htm>, 23-3-2009.
- [7] Johnson GR and Cook WH, "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures" 1983.
- [8] Wickert M, Hohler V, Schneider E, and Färber J, "Ballistic performance of G-TiAl in comparison to Ti-6Al-4V" 2002.
- [9] Olgilvy J and Larry M, "Titanium's Growing Role in Defense Application," *Outlook, Special Edition 1*, vol. 23, no. 2-3 2002.
- [10] Jameson JW and et al., "Dynamic distribution of strain in textile materials under high-speed impact: Part III Strain-time-position history in yarns," *Textile research journal*, vol. 32, pp. 858-860, 1962.
- [11] "DuPont", DuPont Home page, <http://www2.dupont.com.com/>, 2008.
- [12] *Lightweight ballistic composites. Military and law-enforcement applications*, 1 ed Woodhead publishing limited, 2006.
- [13] Hearle JWS and et al., *High-performance fibres* Woodhead Publishing Limited, 2001.
- [14] "Armos high strength fibers", LTD Lirsot, http://www.advtech.ru/lirsot/product_amos_eng.html, 2009.
- [15] "Honeywell", Honeywell Advanced Fibers and Composites, <http://www51.honeywell.com/sm/afc/>, 2009.
- [16] "PBO fiber ZYLON", Toyobo CO., Ltd., http://www.tufftemp.com/Download/PBO_TDS.pdf, 2001.
- [17] Vectran Fiber, <http://www.vectranfiber.com>, 2008.
- [18] Science, vol. 295, 2002.
- [19] Nature, vol. 354, 1991.

- [20] Nature, vol. 423, 12-6-2003.
- [21] *Macromolecules*, vol. 35, pp. 9039-9043, 2002.
- [22] Tressler RE, "An assessment of low cost manufacturing technology for advanced structural ceramics and its impact on ceramic armor" in *Ceramic Armor Materials by Design*, 134 ed. McCauley JW, Crowson A, Gooch Jr.WA, Rajendran AM, Bless SJ, Logan KV, Normandia M, and Wax S, Eds. 2002, pp. 451-462.
- [23] Hazell PJ, Donoghue SE, Roberson CJ, and Gotts PL, "The penetration of armour piercing projectiles through reaction bonded ceramics" in *Advances in ceramic armor*. Swab JJ, Zhu D, and Kriven WM, Eds. 2005, pp. 143-150.
- [24] Aghajanian MK, Schultz BE, Kremer K, Holmes TR, Lyons FS, and Mears J, "Tactical vehicle armor systems that utilize large, complex-shaped reaction bonded ceramic tiles" in *Advances in ceramic armor*. Swab JJ, Zhu D, and Kriven WM, Eds. 2005, pp. 263-270.
- [25] Roberson CJ, "Ceramic materials and their use in lightweight armour systems" 1995.
- [26] Gooch Jr.WA, "An overview of ceramic armor applications" in *Ceramic Armor Materials by Design*, 134 ed. McCauley JW, Crowson A, Gooch Jr.WA, Rajendran AM, Bless SJ, Logan KV, Normandia M, and Wax S, Eds. 2002.
- [27] Zaera R and Sánchez-Gálvez V, "Analytical modelling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armours," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 133-148, 1998.
- [28] Medvedovski Eugene, "Alumina Ceramics for Ballistic Protection," *Am Cer Soc Bull*, vol. 81, no. 3-4 2002.
- [29] Karandikar PG, Evans G, Wong S, and Aghajanian MK, "A review of ceramics for armor applications" in *Advances in ceramic armor IV*. Franks LP, Ohji T, and Wereszczak A, Eds. 2009, pp. 163-175.
- [30] Ray D, Flinders R, Anderson A, and Cutler R, "Effect of room-temperature hardness and toughness on the ballistic performance of SiC-based ceramics," *Ceram Sci Eng Proc*, vol. 26, no. 7, pp. 131-142, 2005.
- [31] Swab JJ, Zhu D, and Kriven WM, *Advances in ceramic armor* The American Ceramic Society, 2005.
- [32] Flinders M, Ray D, and Cutler R, "Toughness-hardness trade-off in advanced SiC armor" in *Ceramic Armor and Armor Systems*, 151 ed 2003, pp. 37-48.
- [33] James B, "Practical issues in ceramic armour design" in *Ceramic Armor Materials by Design*, 134 ed. McCauley JW, Crowson A, Gooch Jr.WA, Rajendran AM, Bless SJ, Logan KV, Normandia M, and Wax S, Eds. 2002.
- [34] Hazell PJ, Roberson CJ, and Moutinho M, "The design of mosaic armour: The influence of tile size on ballistic performance," *Materials and Design*, vol. 29, pp. 1497-1503, 2008.
- [35] Krell A and Strassburger E, "Hierarchy of key influences on the ballistic strength of opaque and transparent armor" in *Advances in Ceramic Armor III*. Franks LP, Salem J, and Zhu D, Eds. 2007, pp. 45-55.

- [36] Coorstek amazing solutions, <http://www.coorstek.com>, 2008.
- [37] "Accuratus", Accuratus, <http://www accuratus.com/>, 2002.
- [38] Rendtel A, Moessner B, and Schwetz KA, "Hardness and hardness determination in silicon carbide materials" in *Advances in ceramic armor*. Swab JJ, Zhu D, and Kriven WM, Eds. 2005, pp. 161-167.
- [39] R. Palicka, "Ballistic development of U.S. high density tungsten carbide ceramics" in *Ceramic Armor Materials by Design*, 134 ed. McCauley JW, Crowson A, Gooch Jr.WA, Rajendran AM, Bless SJ, Logan KV, Normandia M, and Wax S, Eds. 2002.
- [40] Roberson C and Hazell PJ, "Resistance of different ceramic materials to penetration by a tungsten carbide cored projectile" in *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 24 ed. Medvedovski Eugene, Ed. 2003, pp. 153-163.
- [41] Dandekar DP and Rapacki EJ, "Compressibility and shear strength of titanium diboride under plane shock wave loading" in *Ceramic Armor Materials by Design*, 134 ed. McCauley JW, Crowson A, Gooch Jr.WA, Rajendran AM, Bless SJ, Logan KV, Normandia M, and Wax S, Eds. 2002, pp. 249-259.
- [42] Adams JW, Gilde GA, Burkins M, and Franks LP, "Microstructure development of aluminum oxide / titanium diboride composites for penetration resistance" in *Ceramic Armor Materials by Design*, 134 ed. McCauley JW, Crowson A, Gooch Jr.WA, Rajendran AM, Bless SJ, Logan KV, Normandia M, and Wax S, Eds. 2002, pp. 629-634.
- [43] Peron P-F., "Ballistic development of tungsten carbide ceramics for armor applications" in *Ceramic Armor Materials by Design*, 134 ed. McCauley JW, Crowson A, Gooch Jr.WA, Rajendran AM, Bless SJ, Logan KV, Normandia M, and Wax S, Eds. 2002.
- [44] McCuiston RC, Danforth SC, Matthewson MJ, and Niesz DE, "Solid freeform fabrication of advanced armor concepts: Opportunities for design and manufacture" in *Ceramic Armor Materials by Design*, 134 ed. McCauley JW, Crowson A, Gooch Jr.WA, Rajendran AM, Bless SJ, Logan KV, Normandia M, and Wax S, Eds. 2002, pp. 473-481.
- [45] Krell A, Hutzler T, and Klimke J, "Transmission physics and consequences for materials selection, manufacturing, and application," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 29, pp. 207-221, 2009.
- [46] Harris DC., "Durable 3-5 μm transmitting infrared window materials," *Infrared Physics & Technology*, vol. 39, pp. 185-201, 1999.
- [47] Sands JM, Patel PJ, Dehmer PG, and Hsieh AJ, "Protecting the future force: Transparent Materials Safeguard the army's vision.", *The AMPTIAC Quarterly*, vol. 8, no. 4. <http://amptiac.alionscience.com/quarterly>, 2004.
- [48] Saint-Gobain, <http://uk.saint-gobain-glass.com/>, 2008.
- [49] "PPG - Starphire", Precision Glass & Optics, <http://www.pgo.com>, 2008.
- [50] Grujicic M, Pandurangan B, Coutris N, Cheeseman BA, Fountzoulas C, Patel P, and Strassburger E, "A ballistic material model for starphire, a soda-lime transparent-armor glass," *Material Science and Engineering A*, vol. 491, pp. 397-411, 2008.
- [51] "Base Vycor 7913", Corning Incorporated, <http://www.corning.com>, 2001.

- [52] "Transparent Quartz - Plates for Industrial application.", Saint-Gobain Quartz, <http://www.quartz.saint-gobain.com>, 2005.
- [53] "Fused Silica (SiO₂)", Accuratus, <http://www accuratus.com/fused.html>, 2002.
- [54] Silva DD and Boccaccini AR, "Industrial developments in the field of optically transparent inorganic materials: A survey of recent patents.," *Recent patents on materials science*, vol. 1, pp. 56-73, 2008.
- [55] Dehmer PG and Klusewitz MA, "High performance visors", Army Research Laboratory, <http://www.arl.army.mil/arlreports/2002/ARL-RP-45.pdf>, 2002.
- [56] Paroli RM, Liu KKY, and Simmos TR, "Thermoplastic Polyolefin Roofing Membranes", National Research Council Canada, http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/ctus/30_e.html, 1999.
- [57] Matweb, <http://www.matweb.com>, 2008.
- [58] Polymerweb.com, <http://www.polymerweb.com>, 2008.
- [59] Tangram Technology Ltd., <http://www.tangram.co.uk>, 2008.
- [60] Huyett RA, "Advanced transparent polymer development for lightweight transparent armor", Simula Technologies Inc., <http://www.dtic.mil/ndia/>, 1-4-1999.
- [61] Patel P and Gilde GA, "Transparent armor materials: Needs and requirements" in *Ceramic Armor Materials by Design*, 134 ed. McCauley JW, Crowson A, Gooch Jr. WA, Rajendran AM, Bless SJ, Logan KV, Normandia M, and Wax S, Eds. 2002.
- [62] "Cleargard Transparent Polymer", Simula Technologies Inc., <http://www.tslaerospace.com/product/simula/PDF/cleargard.pdf>, 2008.
- [63] "Birefringence", ESAA, <http://www.ecoles-bordeaux.com/IMG/jpg/birefringence.jpg>, 23-3-2009.
- [64] Jones C, Rioux JB, Locher JW, Pluen V, and Mandelartz M, "Advances in ballistic performance of commercially available Saint-Gobain sapphire transparent armor composites" in *Advances in ceramic armor IV*. Franks LP, Ohji T, and Wereszczak A, Eds. 2009, pp. 63-74.
- [65] Jones C and et al., "Ballistic performance of commercially available Saint-Gobain sapphire transparent armor composites." in *Advances in Ceramic Armor III*. Franks LP, Salem J, and Zhu D, Eds. 2007, pp. 113-124.
- [66] Jones C and et al., "Large area EFG sapphire for transparent armor" in *Advances in Ceramic Armor II*. Franks LP, Wereszczak A, and Lara-Curzio E, Eds. 2007, pp. 155-163.
- [67] Krell A, Klimke J, and Hutzler T, "Advanced spinel and sub- μm Al₂O₃ for transparent armor applications," *J.Eur.Ceram Soc.*, 2008. In Press.
- [68] Patterson MCL, Gilde G, and Roy DW, "Spinel armor - Clearly the way to go" in *Ceramic Armor and Armor Systems*, 151 ed 2003, pp. 83-90.

- [69] Fountzoulas CG, Sands JM, Gilde GA, and Patel PJ, "Applying modeling tools to predict performance of transparent ceramic laminate armors" in *Advances in ceramic armor IV*. Franks LP, Ohji T, and Wereszczak A, Eds. 2009, pp. 45-53.
- [70] McCauley JW and et al., "ALON: A brief history of its emergence and evolution," *J Eru. Ceram.Soc.*, 2008. In Press.
- [71] Surmet Corporation, <http://www.surmet.com>, 2008.
- [72] "Surmet Corporation sees high demand for ALON optical ceramic; company signs multiple government contracts valued at \$2 million for military applications", BNET, http://findarticles.com/p/articles/mi_m0EIN/is_2004_April_26/ai_n5997883, 26-4-2004.
- [73] Technology Assessment & Transfer, Inc., <http://www.techassess.com>, 2008.
- [74] Quote for transparent ceramic spinel. Internett communication between Li zehn, Brightcrystals (ma@brightcrystals.com) and Stian Skriudalen, FFI (stian.skriudalen@ffi.no), 19-1-0009.
- [75] Strassburger E, "Ballistic testing of transparent armour ceramics," *Journal of the European Ceramic Society*, 2008. In Press.
- [76] Dyneema og Kevlarprodukter i Sanfiber. Internett communication between Jensen JR, Scanfiber AS (jr@scanfiber.dk) and Stian Skriudalen, FFI (stian.skriudalen@ffi.no), 24-2-2009.
- [77] Exote, www.epicos.com/epicos/extended/finland/exote/exote_material.html, 2009.
- [78] Medvedovski Eugene, "Silicon carbide-based ceramics for ballistic protection" in *Ceramic Armor and Armor Systems*, 151 ed 2003, pp. 19-35.
- [79] Heidenreich B, Gahr M, Strassburger E, and Lutz E, "Biomorphic SiSiC-materials for lightweight armour" in *Advances in Ceramic Armor III*. Franks LP, Salem J, and Zhu D, Eds. 2007, pp. 113-124.
- [80] Heidenreich B, Krenkel W, and Lexow B, "Development of CMC-materials for lightweight armor" in *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 24 ed 2003, pp. 375-381.
- [81] Orlovskaya N et al., "Design and manufacturing B4C-SiC layered ceramics for armor applications" in *Ceramic Armor and Armor Systems*, 151 ed 2003, pp. 59-70.
- [82] *Nature Materials*, vol. 2, 21-9-2003.
- [83] Barry PL, "Liquids on pause", *Science NASA*, http://science.nasa.gov/headlines/y2003/16oct_viscosity.xml, 16-10-2003.
- [84] Liquid metal technologies, <http://www.liquidmetal.com>, 12-11-2004.
- [85] *Materials World*, vol. 8, pp. 12-14, 2000.
- [86] Sennett M, Sekyung C, Doremus RH, Siegel RW, Ajayan PM, and Schadler LS, "Improved performance of alumina ceramics with caron nanotube reinforcement" in *Ceramic Armor Materials by Design*, 134 ed. McCauley JW, Crowson A, Gooch Jr.WA, Rajendran AM, Bless SJ, Logan KV, Normandia M, and Wax S, Eds. 2002, pp. 551-556.

- [87] "A look into nanotechnology", AMTIAC QUARTERLY, vol. 6, 2999.
- [88] Fréchar S, Abdelkrim Redjaïmin, Metauer G, Erhardt L, and Lichtenberger A, "Comportement dynamique et évolution microstructurale d'un acier inoxydable austénitique allié à l'azote" 2002.
- [89] Fréchar S, Lichtenberger A, Rondot F, Faderl N, Redjaïmia, and Adoum M, "A new constitutive model for nitrogen austenitic stainless steel" 2003.
- [90] Y. S. Lee, E. D. Wetzel, R. G. j. Egres, and N. J. Wagner, "Advanced body armor utilizing shear thickening fluids" Orlando, FL: 2004.
- [91] "MoD News - New armour has holes in it!", Internet article, http://www.modoracle.com/news/New-Armour-Has_Holes_in_it_17247.html?category_15-1-2009.
- [92] Century Dynamics Ltd., "AUTODYN Theory Manual,".
- [93] Holmquist TJ, Johnson GR, and Gooch WA, "Modeling the 14.5 mm BS41 projectile for ballistic impact computations" in Computational Ballistics II. Sanchez-Galvez V, Brebbia CA, Motta AA, and Anderson CE, Eds. 2005, pp. 61-75.
- [94] Zerilli FJ and Armstrong RW, "Dislocation.mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations," *J. Appl. Phys.*, vol. 61, no. 5, pp. 1816-1825, 1987.
- [95] Cronin DS, Bui K, and Kaufmann C, "Implementation and Validation of the Johnson-Homquist Ceramic Material Model in LS-Dyna" 2003.
- [96] B. Gailly and Espinosa HD, "Modelling of failure mode transition in ballistic penetration with a continuum model describing microcracking and flow of pulverized media," *Int. J. Numer. Meth. Engng*, vol. 54, pp. 365-398, 2002.
- [97] Lesuer DR, LeBlanc MM, and Kay GJ, "Modeling Large-Strain High-Rate Deformation in Metals," *Engineering Research Development and Technology*, vol. 6 1998.
- [98] Westerling L, Lundberg P, and Lundberg B, "Tungsten long-rod penetration into confined cylinders of boron carbide at and above ordnance velocities," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 25, pp. 703-714, 2001.
- [99] G. R. Johnson and W. H. Cook, "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures" in *Engineering Fracture Mechanics*, 21 ed 1985, pp. 31-48.
- [100] Iqbal MA and Gupta NK, "Ballistic Limit of Single and Layered Aluminium Plates," *Strain*, vol. 45, no. 2 2009.
- [101] Frøyland Ø and Moxnes JF, "Tensile tests of wolfram carbide hard cores," Forsvarets forskningsinstitutt (FFI), Kjeller, FFI-rapport 2006/03865, 2006.
- [102] Frøyland Ø and Moxnes JF, "Mechanical studies of wolfram carbide," Forsvarets forskningsinstitutt (FFI), Kjeller, FFI-rapport 2004/03860, 2004.

Appendix A Database for våpenvirkninger

En database er en samling av data i tabeller. Hver tabell inneholder data om et avgrenset emne. Mellom tabellene eksisterer det relasjoner som knytter data i en tabell til data i en annen tabell. Via relasjonene kan man håndtere data på tvers av tabeller og bygge opp brukergrensesnitt som henter data fra flere tabeller og presenterer for brukeren det han/hun måtte ønske. På denne måten kan man enkelt trekke nyttig informasjon ut fra store dataforekomster.

En annen stor fordel med databaser er flerbrukerkontroll, det vil si at databaseprogrammet tillater flere brukere å operere på dataene samtidig, og ulike brukere kan ha ulike rettigheter når det gjelder tilgang til data.

Det utføres kontinuerlig terminalballistiske forsøk med ulike håndvåpen ved FFI, både mot myke mål som vevsimulanter og mot en rekke forskjellige beskyttelsesmaterialer. For å dra nytte av disse dataene på en mest mulig hensiktsmessig måte, er det etablert en database for våpenvirkninger hvor alle resultatene lagres sammen med data over egenskaper for ammunisjon, våpen og målmaterialer.

I det følgende vil det gis en beskrivelse av hvordan databasen over våpenvirkninger er bygget opp, og hvilke data som lagres og presenteres i den.

A.1 Tabeller

Resultatene fra de ulike forsøkene lagres i egne tabeller. Databasen inneholder foreløpig resultat-tabeller for tre ulike testoppsett.

1. Tester mot vevsimulant som gelatin og såpe. Her registreres sentrale trekk ved sårkanalen samt kalibreringsresultater for simulanten.
2. Tester mot homogene materialer som for eksempel stål og LECA, hvor prosjektilet har stoppet i målet, slik at penetrasjonsdybde kan måles.
3. Tester mot ulike ballistiske paneler hvor resultatet angis som penetrasjon/ikke penetrasjon. Resthastighet hvis penetrasjon og trauma i plastelina ved stopp registreres også i mange tilfeller.

En oversikt over hvilke data tabellene inneholder, er listet opp i det følgende.

Tabell 1 Vevsimulant

- Våpen benyttet i forsøket
- Ammunisjon benyttet i forsøket
- Målmateriale beskytt (gelatin eller såpe)
- Skyteavstand
- Hastighet målt med kronograf

- Penetrasjonsdybde
- Lengde av stabil sårkanal
- Lengde inn til maksimal diameter på sårkanal
- Maksimal diameter på sårkanal
- Fragmentering av prosjektil Ja/Nei
- Volum av sårkanal
- Kalibreringsresultater for gelatin

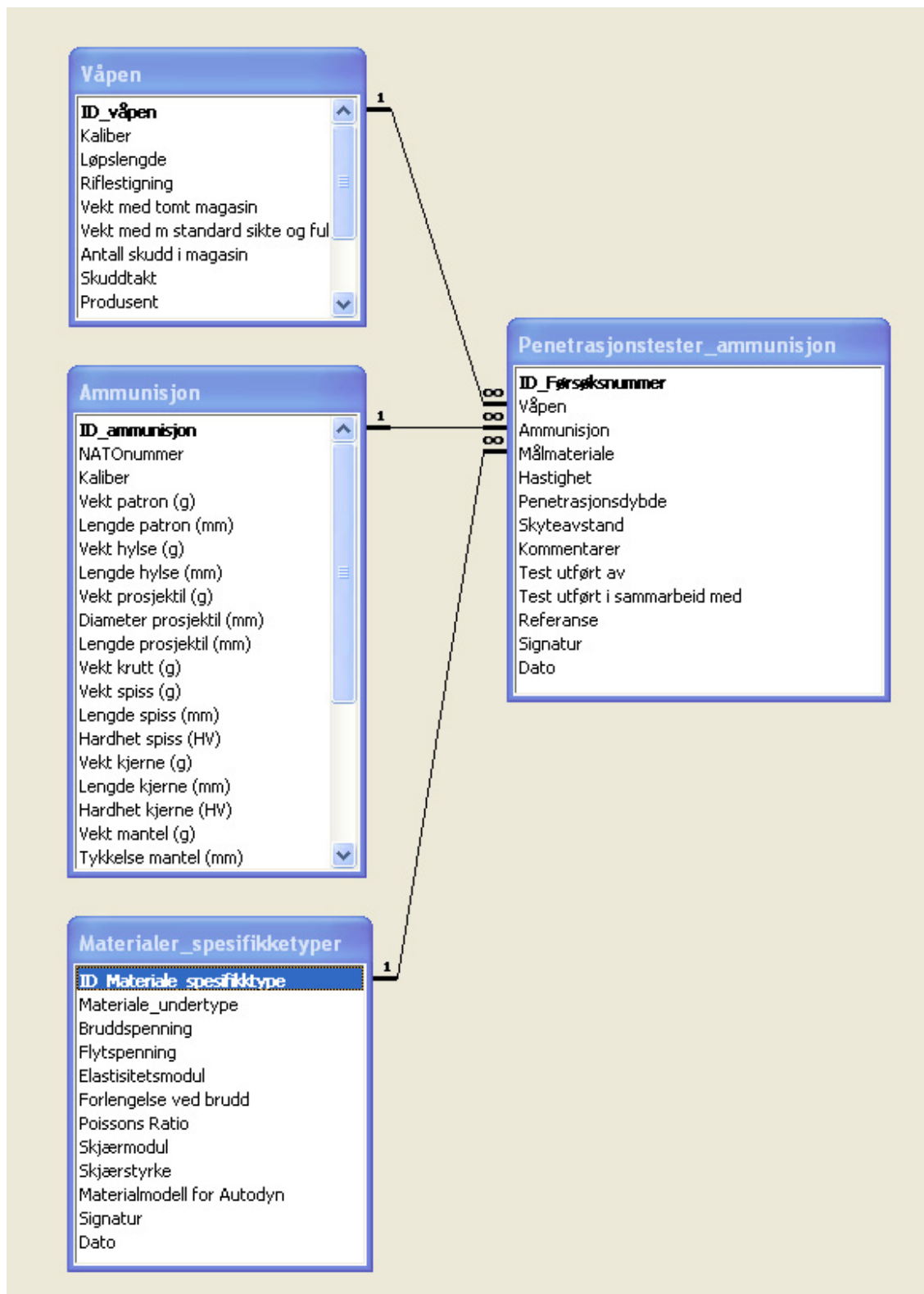
Tabell 2 Penetrasjonstester

- Våpen benyttet i forsøket
- Ammunisjon benyttet i forsøket
- Målmateriale beskytt
- Skyteavstand
- Hastighet målt med kronograf
- Penetrasjonsdybde

Tabell 3 Ballistiske plater

- Plate ID (Referer til en egen tabell som beskriver platens oppbygning)
- Beskrivelse av eventuell støttestruktur bak plate
- Stand off til eventuell støttestruktur
- Ammunisjon benyttet i forsøket
- Våpen benyttet i forsøket
- Skyteavstand
- Hastighet målt med kronograf
- Penetrasjon Ja/Nei
- Trauma hvis stopp
- Resthastighet hvis penetrasjon

Hver av de overnevnte tabeller inneholder noen statiske felt, det vil si felt som ikke er del av de målte resultatene. De viktigste er våpen, ammunisjon og måltype/materialer. Dette er felt som er interessant å ha en mer detaljert kunnskap om, slik at man kan innhente mer informasjon om omstendighetene rundt testen når man ønsker det. Det er derfor laget egne tabeller som inneholder informasjon om hvert av de statiske feltene. Tabellene er koblet sammen gjennom såkalte relasjoner. Figur A.1 eksempel for tabell 2 ”Penetrasjonstester” med tilhørende relasjoner til tabeller for våpen, ammunisjon og materialer. De samme relasjonene eksisterer også for de andre resultat-tabellene.



Figur A.1 Tabell 2 "Penetrasjonstester" med tilhørende relasjoner til tabeller for våpen, ammunisjon og materialer.

For tabell 3 "Ballistiske plater" er det også laget en tabell som beskriver materialene i platens oppbygning. Den er bygget opp som følger.

Tabell 4 Plateoppbygning

- Plate ID
- Materialtype i frontplate (typisk keramikk)
- Materialtype benyttet som spall-liner (typisk fiberduk)
- Matrise benyttet som bindemiddel i plata.
- Arealvekt av plate
- Totalvekt av plate
- Klassifisering av plate (STANAG, NIJ osv.)
- Produsent av plate

Databasen inneholder også en tabell for registrering av munningshastighet for ulike våpen og ammunisjon kombinasjoner.

A.2 Spørringer

Når man har opprettet de tabellene man ønsker, er det er naturlig å lage ett sett med spørringer. En spørring henter data fra flere tabeller og setter dette sammen, ved hjelp av relasjonene, til et såkalt "View". Et "View" er en imaginær tabell som ikke eksiterer fysikk, men er bare et bilde på skjermen bygget opp av kolonner og rader hentet fra flere tabeller. I spørringene kan også data grupperes, slik at man får presentert gjennomsnittlige verdier av like tester.

De viktigste spørringene i databasen inneholder følgende data.

Spørring generert fra tabell 1:

- Ammunisjon benyttet i forsøket
- Målmateriale beskytt (gelatin eller såpe)
- Våpen benyttet i forsøket
- Skyteavstand
- Gjennomsnitt av hastighet målt med kronograf
- Gjennomsnitt av penetrasjonsdybde
- Gjennomsnitt av lengde av stabil sårkanal
- Gjennomsnitt av lengde inn til maksimal diameter på sårkanal
- Gjennomsnitt av maksimal diameter på sårkanal
- Fragmentering av prosjektil Ja/Nei
- Antall testforsøk med samme ammunisjonstype, våpen, målmateriale og skyteavstand

Spørring generert fra tabell 2:

- Ammunisjon benyttet i forsøket
- Målmateriale beskytt
- Våpen benyttet i forsøket
- Skyteavstand
- Gjennomsnitt av hastighet målt med kronograf

- Gjennomsnitt av penetrasjonsdybde
- Minste penetrasjonsdybde
- Største penetrasjonsdybde
- Standardavvik penetrasjonsdybde
- Antall testforsøk med samme ammunisjonstype, våpen, målmateriale og skyteavstand


Spørring generert fra tabell 3 og tabell for oppbygning av plate:

- Plate ID
- Materialtype i frontplate (typisk keramikk)
- Materialtype benyttet som spall-liner (typisk fiberduk)
- Matrise benyttet som bindemiddel i plata.
- Arealvekt av plate
- Totalvekt av plate
- Klassifisering av plate (STANAG, NIJ osv.)
- Beskrivelse av eventuell støttestruktur bak plate
- Stand off til eventuell støttestruktur
- Ammunisjon benyttet i forsøket
- Våpen benyttet i forsøket
- Skyteavstand
- Gjennomsnitt av hastighet målt med kronograf
- Penetrasjon Ja/Nei
- Gjennomsnitt av trauma hvis stopp
- Gjennomsnitt av resthastighet hvis penetrasjon
- Antall testforsøk med samme ammunisjonstype, våpen, testoppsett, plate, og penetrasjonsresultat.

A.3 Skjemaer

Selv om dataene nå er flettet sammen og gruppert på en måte som er hensiktsmessig for brukeren, er brukergrensesnittet ennå på tabellform. Ved hjelp av skjemaer kan men presentere data fra spørringene i et bedre grensesnitt enn tabeller. Figur A.2 viser hvordan databasen er presentert gjennom et skjema.

Ammunisjon

ID_ammunisjon	<input type="text" value="7.62mm Ball NM223"/>		
Kaliber	<input type="text" value="7.62 x 51 mm"/>		
Vekt patron (g)	<input type="text" value="23,34"/>	<input type="button" value="Tester penetrasjon"/>	<input type="button" value="Info om våpen"/>
Lengde patron (mm)	<input type="text" value="70,8"/>		
Vekt hylse (g)	<input type="text" value="11,21"/>	<input type="button" value="Tester vevsimulant"/>	
Lengde hylse (mm)	<input type="text" value="51"/>		
Vekt prosjektil (g)	<input type="text" value="9,45"/>	<input type="button" value="Tester beskyttelsesmaterialer"/>	
Diameter prosjektil (mm)	<input type="text" value="7,82"/>		
Lengde prosjektil (mm)	<input type="text" value="28,4"/>		
Vekt spiss (g)	<input type="text"/>		
Lengde spiss (mm)	<input type="text"/>		
Hardhet spiss (HV)	<input type="text"/>		
Vekt kjerne (g)	<input type="text"/>		
Lengde kjerne (mm)	<input type="text"/>		
Hardhet kjerne (HV)	<input type="text"/>		
Vekt mantel (g)	<input type="text"/>		
Tykkelse (mm)	<input type="text"/>		
Kjernematerialer	<input type="text" value="Bly"/>		
Bilder			
Kommentarer	<input type="text"/>		

Post: 24 av 34

Skjemavisning

Figur A.2 Skjemapresentasjon av databasen.

Skjemaet gir en oversikt de ulike ammunisjonstypene som finnes i databasen. Ved å trykke på en av knappene i skjemaet kommer en videre til skjemaer som presenterer de forskjellige testresultatene samt en knapp for å se detaljert info om våpen.

Figur A.3 - Figur A.5 fremgår skjemaene for de ulike testresultatene.

Platedata

Plate ID:
 Frontpanel:
 Spalliner/Strukturelt lag:
 Matrise:
 Arealvekt (kg/m2):
 Vekt (g):
 Bruksområdet:
 Klassifisering:
 Kommentarer:
 Detaljert informasjon:

Testresultater

Suport backing:
 Stand off (mm):
 Ammunisjon:
 Skyteavstand:
 Våpen:
 Hastighet:
 Penetrasjon:
 Gjenn Av Trauma (mm):
 Gjenn Av Resthastighet (m/s):
 Kommentarer:
 Test utført av:
 Test utført i samarbeid med:
 Referanse:
 Antall Av Penetrasjonstester:

Post: av 156

Skiemavisning

Figur A.3 Skjema for testresultater mot ballistiske plater.

Penetrasjonstester

Ammunisjon	<input type="text" value="9mm NM233"/>
Målmateriale	<input type="text" value="Stål ST 37"/>
Våpen	<input type="text" value="MP5 N"/>
Skyteavstand	<input type="text" value="6"/>
Test utført av	<input type="text" value="FFI"/>
Gjsn av hastighet (m/s)	<input type="text" value="413,33333"/>
Gjsn av penetrasjonsdybde (mm)	<input type="text" value="0,5333333"/>
Min penetrasjonsdybde (mm)	<input type="text" value="0,5"/>
Max penetrasjonsdybde (mm)	<input type="text" value="0,6"/>
Antall av penetrasjonstester	<input type="text" value="3"/>
Referanse	<input type="text"/>

Figur A.4 Skjema for testresultater mot homogene materialer.

Vevsimulant

Testresultater

Ammunisjon	<input type="text" value="5.56mm NM229"/>
Måltype	<input type="text" value="Gelatin: Gelitia SG-720N"/>
Våpen	<input type="text" value="G36 C"/>
Skyteavstand (m)	<input type="text" value="6"/>
Gjsn av hastighet (m/s)	<input type="text" value="747"/>
Gjsn av penetrasjonsdybde (mm)	<input type="text" value="430"/>
Gjsn av lengde av stabil sårkanal (mm)	<input type="text" value="10"/>
Gjsn av lengde inn til maks diameter (mm)	<input type="text" value="190"/>
Gjsn av maksimal diameter på sårkanal (mm)	<input type="text" value="120"/>
Fragmentering	<input type="checkbox"/>
Antall av testresultater_vevsimulant	<input type="text" value="1"/>
Referanse	<input type="text"/>

Figur A.5 Skjema for testresultater mot vevsimulanter.

A.4 Søkefunksjoner

Et viktig verktøy i databasen er søkefunksjoner. I tabeller, spørringer og skjemaene kan en søke etter ønsket informasjon. Dette gjøres ved at man i et søkevinduet velger verdien på et eller flere felter, databasen søker opp og presenterer bare de data som tilfredsstillende de valgte verdiene.

Et eksempel på dette kan være at man ønsker å finne de beskyttelsesplatene som stopper en gitt ammunisjonstype. En velger da ønsket ammunisjonstype og velger "Penetrasjon = Nei" i skjemaet vist i Figur A.3. Databasen siler da ut alle data fra visningen som ikke tilfredsstillende dette kravet. Ønsker man å vite penetrasjonsegenskapene til en gitt ammunisjonstype i stål, velger man ønsket ammunisjonstype og ståltype i skjemaet vist i Figur A.4.

Appendix B Keramikk, materialelegenskaper og produsenter

B.1 Alumina

Materialegenskap	Enheter	CoorsTek				Morgan Technical Ceramics				Saint-Gobain		Accuratus		
		AD-90, 90% Alumina	Z-PLUS™ 94*) Alumina	Zirconica-Alumina **)	AD-96 96% Alumina	FG-98 Alumina	CAP 4 98,5% Alumina	CAP 3 99,5% Alumina	Sintox™ Alumina	Sintox™ CL Alumina	Sintox™ FA-Ballistics		T196 Alumina	T198 Alumina
Tetthet	g/cm ³	3,60	3,70	4,01	3,72	3,80	3,80	3,90	3,89	3,74	3,75	3,80	4,00	3,89
E-modul	GPa	276	303	360	303	350	350	370	380	320	300	380	340	375
Hardhet Knoop (100 g)	GPa													
Hardhet Knoop (1000 g)	GPa	10,4	11,5	11,5	11,5	13,7	13,7	14,1						14,1
Hardhet Rockwell R45N		75	78	85	78	82	83	83	85	78				
Bruddstyrke MPa m ^{1/2}		3-4	4-5	5-6	4-5	4-5	4-5	4-5	3,5	4,6	4	3,5	5,8	4
Lydhasighet m/s									10000	9000				
Bøystyrke MPa		338	352	450	358	375	379	379	410	350	300	320	320	379
Bulkmodul GPa														228
CTE 10 ⁻⁶ /°C		8,1	8,2	8,3	8,2	8,2	8,2	8,2	8,0		7,5	7,5	8	8,4
Farge				Hvit					Hvit	Rosa				Elfenben
Kompresjonsstyrke MPa		2482	2103	2900	2068	2500	2600	2600	2000	2000	>2000	>2000	>2000	2600
Kornstørrelse µm				2					4	4				
Maks brukstemperatur °C														1750
Poisson-tall	1	0,22	0,21	0,23	0,21	0,22	0,22	0,22	0,25	0,23	0,15			0,22
Porøsitet %	%								0	0				0
Renhet %	%	90	94		96	98	99,5	99,5	98,6	95-96				152
Skjærmodul MPa				290					150	130				
Strekstyrke MPa														
Termisk ledningsevne W/m K		16,7	22,4	27	22,4	27,5	30	30	25	25	25	29	22	35

*) Zirconica-Impr. Alumina

**) ZirconicaThoughtened Alumina

B.2 Silisiumkarbid

Materialegenskap	Enheter	CoorsTek		Morgan		MC2		Ceradyne		Bae Systems		Cercom		Saint-Gobain		Accuratus	
		SC-DS Direct-Sintered Silicon Carbide	SC-RB Reacto-Bonded Silicon Carbide	CVD Silicon Carbide	RB Silicon Carbide A3-82	RB Silicon Carbide	SiC-N Silicon Carbide	Ceralloy 146-3E Hot-pressed Silicon Carbide	CeraTrex™ P2 CVD Silicon Carbide	SC- Hot-pressed Silicon Carbide	Ceralloy 146-S5 Sintered Silicon Carbide	PAD*** SiC-N Silicon Carbide	Cercom SiC-B	Hexoloy Sintered SiC	Crystar Bonded SiC	Reaction Bonded SiC	SiC
Tetthet	g/cm ³	3,15	3,10	3,21	3,05	3,04-3,10	3,20	3,20	3,20	3,2	3,20	3,20	3,13	3,1	3,05	3,1	3,1
E-modul	GPa	410	393		380	390,00	440	450	450	430	460	455	410	300-380	300-380	410	410
Hardhet Knoop	GPa	26	24,5			20-22,5					24		27			27	27
Hardhet Vickers	kg/mm ²			2800	2200			2300		2600		2700					
Hardhet Rockwell	R45N	90															
Brudstyrke	MPa m ^{1/2}	3-4	3-4	2,94	4	4	3,1	4,3	4,3	4,3	4,5	5,2	4,60	4,0	4,0	4,0	4,6
Lydhastighet	m/s					11000,00						12250****					
Bøystyrke	MPa	480	462	450	280	250,00	375	634	634	400	570	655	380	200	250	550	550
CTE	10 ⁻⁶ /°C	3,5	3,5	4,5		4,30	4,5	4,8	4,8	4,5	4,5		4,02	4,3	4,1	4,0	4,0
Farge																	
Karakteristisk styrke	MPa					2000,00							3900				
Kompresjonsstyrke	MPa											4,0	4-10				3900
Kornstørrelse	µm																
Maks temp	°C																
Masseeffektivitetsfaktor																	
Poisson-tall	1	0,21	0,19				0,17	0,17	0,17	0,17	0,15	0,14	0,14	0,19	0,19	0,14	0,14
Porøsitet	%					<0,75											
Renhet	%					99***	99,9995	98,5	98,5	95							
Skjæremodul	GPa																
Strekstyrke	Mpa					120,00	200	115	115	120	95	195	125,6	160	160	120	120
Termisk ledningsevne	W/m K	150,0	100	250			12	18	18	15	10	18	10	10	10	10	10
Weibulls modul	m																

* -18% Si

**7,62 M80 Ball

*** 84-89% SiC, 10-15% Si

****Longitudinal. (Transversal = 7650m/s)

B.3 Borkarbid

Materialelegenskap	Enheter	CoorsTek		MC2		Ceradyne		Bae Systems, Cercom		Saint-Gobain	
		Boron Carbide Reaction-Bonded Boron Carbide	Boron Carbide	Reaction-Bonded Boron Carbide RBBC-751	Ceralloy 546 Pressed Boron Carbide	Hot Ceralloy 546-3E Hot PRESSED Boron Carbide	Ceralloy 546-4E Hot PRESSED Boron Carbide	PAD*** Boron Carbide	Norbide Hot PRESSED Boron Carbide		
Tetthet	g/cm ³	2,65		2,57	2,50	2,50	2,50	2,485	2,51		
E-modul	GPa	379		380	460	460	460	450	440		
Hardhet, Knoop	GPa	25,5			31,4	27,5	31,4	26,5	27,5		
Hardhet	Vickers			2800							
Bruddstyrke	MPa m ^{1/2}	3-4		5,0	2,5	2,5	2,5	3,0	3,1		
Bøystyrke	MPa	250		280	410	410	410	450	425		
CTE	10 ⁻⁶ /°C	4,5			5,6	5,6	5,6	5,0	5		
Farge					Sort	Sort	Sort				
Kompresjonsstyrke	MPa	1721			15	15	15	10	3900		
Kornstørrelse	µm								8		
Masseeffektivitetfaktor				4,85**							
Poisson-tall	1	0,18			0,17	0,17	0,17	0,16	0,18		
Renhet	%			74*	98,5	98,5	99,5	****			
Termisk ledningsevne	W/m K	50			90	90	90	45	90,0		
Weibulls modul	m				12	12	12	12	12		

* SiC (9%) Si (16%)

** 7,62 AP M2

*** Pressure Assisted Densification

**** Maksverdier: 79,50% B; 22,50% C; 0,20% Si; 0,15% Fe

B.4 Titandiborid

Materialelegenskap	Enheter	Ceradyne		Bae Systems, Cercom
		Ceralloy pressed Diboride	Hot Titanium Diboride	
Tetthet	g/cm ³	4,50		4,48
E-modul	GPa	540		555
Hardhet Vickers	kg/mm	2100		
Hardhet Knoop	GPa			26,5
Bruddstyrke	MPa m ^{1/2}	5,47		6,9
Bøystyrke	MPa	265		275
Poisson-tall	1	0,22		0,11
Termisk ledningsevne	W/m K	25		
CTE	10 ⁻⁶ /K	8,2		
Kornstørrelse	µm			15
Renhet	%	98,5		
Weibulls modul				11

*Pressure Assisted Densified

B.5 Aluminiumnitrid

Materialelegenskap	Enheter	Bae Systems, Cercom		Accuratus
		Armor PAD*	Aluminium Nitride	Aluminium Nitride
Tetthet	g/cm ³	3,25		3,26
E-modul	GPa	330,00		330
Hardhet Knoop	GPa	10,7		10,7
Bruddstyrke	MPa m ^{1/2}	3,0		2,6
Bøystyrke	MPa	310		320
Poisson-tall	1	0,24		0,24
Kompresjonsstyrke	MPa			2100
Termisk ledningsevne	W/m K	80		140-180
CTE	10 ⁻⁶ /°C	5,2		4,5
Kornstørrelse	µm	5-8		
Porøsitet	%			0
Weibulls modul	m	11,00		
Karakteristisk styrke	MPa	325		

* Pressure Assisted Densification

B.6 Silisiumnitrid

Materiallegenskap	Enheter	Bae Systems, Cercom										Accuratus	
		PSG Crystalline Sintered Silicon Nitride	PSX Amorphous Sintered Silicon Nitride	PSX-H Sintered/HIPed Silicon Nitride	PSO-H1 Sintered/HIPed Silicon Nitride	NSG PAD* Silicon Nitride	Sialon	Silicon Nitride Hot Pressed	Silicon Nitride Pressureless Sintered				
Tetthet	g/cm ³	3,24	3,24	3,28	3,28	3,28	3,25	3,24	3,29	3,27			
E-modul	GPa	320	310	300	300	275	300	288	310	310			
Hardhet Knoop	GPa						14,2	14,1-18,1	15,5	14,2			
Hardhet Vickers	kg/mm ²	1450	1450	1510	1600	1600							
Bruddstyrke	MPa m ^{1/2}	5,7	6,0	5,9	6,5	6,5	5,5	6,0-7,5	6,1	5,7			
Bøvestyrke	MPa	690	700	780	760	760	900	760	830	689			
Bulk modul	GPa							220					
CTE	10 ⁻⁶ /°C	3,3	3,4	3,3	3,3	3,3	3,3	3	3,3	3,3			
Farge								Grå	Grå-svart	Grå-svart			
Karakteristisk styrke	MPa	720	740	825	805	805	930						
Kornstørrelse	µm	1,2	1,0				0,6						
Maks temp	°C							1200	1000	1000			
Poisson-tall		0,27	0,24	0,27	0,24	0,24	0,27	0,25	0,27	0,24			
Porøsitet	%							<1	0	0			
Skjærmodul	GPa							120					
Termisk ledningsevne	W/m K	30	30	30	20	20	20	15-20	30	29			
Weibulls modul		15	14	14	16	16	10						

*Pressure Assisted Densified