



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

ASSI JAHKONEN

KUITUVAHVISTETUT BALLISTISET HENKILÖSUOJAVARUSTEET JA NIIDEN
VAATIMUKSET

Diplomityö

Tarkastaja: prof. Pertti Nousiainen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Auto-
maatio-, kone- ja materiaalitekniikan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
6.2.2013

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Kuitu- ja tekstiilitekniikan koulutusohjelma

JAHKONEN, ASSI: Kuituvahvistetut ballistiset henkilösuojavarusteet ja niiden vaatimukset

Diplomityö, 69 sivua, 10 liitesivua

Huhtikuu 2013

Pääaine: Tekniset ja erikoistekstiilit

Työn tarkastaja: Professori Pertti Nousiainen

Avainsanat: aramidi, ballistinen suojaus, sirpalesuojaliivi, komposiittikypärä, luotisuojapaneeli, v_{50} -arvo

Diplomityö jakautuu kahteen osaan. Alussa esitellään ballistiset henkilösuojavarusteet yleisesti. Lisäksi ensimmäisessä osassa käsitellään niissä käytettäviä materiaaleja, erilaisia rakenteita sekä valmiiden tuotteiden yleisimpien standardien mukaista testausta. Materiaaleja käsittelevässä luvussa keskitytään ensisijaisesti yleisimpään ja tärkeimpään kuituun, aramidiin. Kovissa luotisuojapaneeleissa yleisin materiaali on keraami, tarkemmin alumiinioksidi. Rakenteista tärkeimmät ovat kuitukankaat, kudotut kankaat sekä erilaiset komposiittirakenteet. Teoriaosuus on tärkeä tutkimusosuuden ymmärtämiseksi.

Toisessa osassa keskitytään varsinaiseen tutkimusongelmaan, eli kypärien sekä sirpale- ja luotisuojaliivien vaatimuksiin ympäri maailman. Osa maista pitää suojaustason salaisena tietona, joten maat on valittu sen mukaan. Julkisten tietojen perusteella eri maiden vaatimuksissa ja varusteissa ei ole mainittavia eroja. Kypärät ovat tyypillisesti aramidikomposiittikypäriä, ja niiden v_{50} -arvo on 540 - 650 m/s. Kypärät eivät varsinaisesti anna suojaa luoteja vastaan. Sirpalesuojaliivien v_{50} -arvo on suurimmalla osalla maista suunnilleen sama kuin kypärällä. Myöskään sirpalesuojaliivejä ei ole tehty suojaamaan luodeilta. Luotisuojapaneelien suojaustaso on tyypillisesti korkein standardissa määriteltä taso.

Teorian sekä vaatimustutkimusten tueksi suoritettiin käytännön koeammunnat, jotka auttavat ymmärtämään kokonaisuutta. FY-Composites Oy:n valmistamien keraamisten luotisuojapaneelien koeammuntojen tuloksista tehdyt vaurioanalyysit, laskennalliset tulokset ja koejärjestelyjen esittelyt ovat diplomityön viimeisenä osiona. Tarkoituksena oli selvittää, pysäyttääkö jokin koepaneelin rakenteista 7,62x39-luodin. Tuloksista voidaan havaita suojaustason riippuvuus keraamikerroksen paksuudesta. Tuloksien ja valokuvien perusteella voidaan päätellä, että alle neljän millimetrin paksuinen alumiinioksidikerros ei pysäytä 7,62x39-luotia, kun nopeus on noin 700 m/s. Luoti lävistää ongelmitta myös lasikuitu-fenoli-laminaatista valmistetun sekundaarisen sirpalesuojakerroksen.

Myös keraamikerroksen rakenteella on merkitystä. Mosaiikkityyppinen, laatoista koostuva kerros kestää yleensä useita iskuja, sillä halkeamien eteneminen päättyy yleensä saumakohtiin. Tällaisessa rakenteessa saumat ovat kuitenkin heikoimpia kohtia. Monoliittisessa eli yhtenäisessä keraamipaneelissa ei ole heikkoja saumakohtia, mutta näin ollen yhden osuman aiheuttamat halkeamat etenevät usein reunoihin saakka tehden paneelin käyttökelvottomaksi.

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Fibre and Textile Engineering

JAHKONEN, ASSI: Fibre-reinforced ballistic body armour and their requirements

Master of Science Thesis, 69 pages, 10 appendix pages

April 2013

Major: Technical and special textile technology

Examiner: Professor Pertti Nousiainen

Keywords: Ballistic protection, military textiles, composite helmet, high technology fibres, ballistic vest, v_{50} -value

This thesis is divided into two parts. At first the basic information about ballistic personal armour is given. In the first part, fibre materials, fabric structures and testing of helmets, vests and panels are also explored. In materials section the main focus is an aramid fibre. Ceramics, more specific alumina, are the most common materials in hard armour. The most important structures are non-woven, fabrics and different composites. Theory part is important for understanding the research.

The second part is concentrating on the main research problem, requirements for helmets and vests all over the world. Some countries, USA for example, have their personal ballistic protection and requirements classified. That is why this thesis will introduce only few European countries, Nordic countries, Southern Africa and Russia. According to public information of those requirements, there are no significant differences between countries and their armies. Ballistic helmet is typically made of aramid-composite and its v_{50} -value is 540 - 650 m/s. Helmets are not made to protect person from bullets. Also soft armour are made to protect from fragments only. Protection-level of hard armour is mainly the highest level that the standard defines.

To support the literature and tacit knowledge, few practical tests were made. Ceramic armour panel made by FY-Composites Oy was shot with 7,62x39-bullet. The intention was to find out, if some of the structures could stop the bullet. Results, analysis and photos of damages are in the last section of this thesis. Results show that the level of protection depends on the thickness of ceramic layer. Judging from results, 4 millimetres is a minimum thickness of ceramic layer to stop 7,62x39-bullet, while alumina is used as a ceramic material and a velocity of the bullet is around 700 m/s. The bullet pierces also the spall liner made of glassfibre-phenol-laminate-layers without problems.

A structure of the ceramic layer has an effect on the protection. A mosaic-structural layer made of small tiles is able to absorb multi-hits, too. Seams between the tiles usually stop the propagation of cracks. In the structure like that, the seams are usually the weakest parts, though. Monolithic ceramic layer does not have weak parts, but just one hit may cause widely scattered cracks. After that the panel is useless.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Puolustusvoimien Teknillisen Tutkimuslaitoksen Asetekniikkaosastolla syksyn 2010 ja kevään 2011 välisenä aikana sekä tämän ajanjakson jälkeen osittain aiheeseen liittyvän projektin rinnalla. Työn ohjasi ase- ja materiaalitekniikan tutkimusalojohtajana toiminut tekniikan lisensiaatti Jukka Merikoski ja tarkastajana toimi professori Pertti Nousiainen.

Haluan osoittaa kiitokseni kaikille, jotka ovat kannustaneet ja suorastaan potkineet minua valmistumaan. Kiitos perheelle, avopuolisolle, ystäville ja muille, jotka ovat osaltaan mahdollistaneet opiskeluni sekä valmistumiseni. Luonnollisesti kiitokset kuuluvat myös diplomityön tarkastajalle ja ohjaajalle.

Diplomityöhön vaikuttaneet tahot ansaitsevat maininnan. Oli hienoa, että sain mahdollisuuden päättää opiskelijaurani Puolustusvoimilla ja tehdä diplomityöni aiheesta, joka aidosti kiinnostaa. Kiitos PVTT:n, FY-Composites Oy:n ja Verseidag Ballistic Protection Oy:n välle.

Tampereella 9.2.2013

Assi Jahkonen

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	BALLISTISET HENKILÖSUOJAVARUSTEET	3
2.1	Kevytliivi	3
2.2	Taktinen liivi	4
2.3	Kypärä	5
3	BALLISTISISSA HENKILÖSUOJAVARUSTEISSA KÄYTETTÄVÄT MATERIAALIT	7
3.1	Materiaalien vaatimukset.....	7
3.2	Materiaalivaihtoehtoja	9
3.3	Aramidi.....	11
3.4	Polyamidi (PA)	13
3.5	Polyeteeni (UHMWPE).....	14
3.6	PBO	15
3.7	Keraamit.....	16
4	SIRPALELIIVIN JA LUOTISUOJAPANEELIN RAKENTEET	18
4.1	Kudotut kankaat	18
4.2	Kuitukankaat	19
4.3	Laminoidut kerroslevyrakenteet.....	20
4.4	Keraamipaneelien rakenteet.....	22
5	BALLISTISEN KYPÄRÄN RAKENNE	24
6	TESTAUS	26
6.1	V50-arvo	26
6.2	Esivalmistelut testausta varten	28
6.2.1	<i>Sirpalesuojaliivit ja luotisuojapaneelit</i>	28
6.2.2	<i>Kypärä</i>	29
6.3	Sirpaleen tai luodin valinta	30
6.4	Märkättestaus	31
6.5	Testin suoritus.....	32
6.5.1	<i>Sirpalesuojaliivit</i>	32
6.5.2	<i>Luotisuojapaneeli</i>	33
6.5.3	<i>Kypärä</i>	34
6.6	Taustavaha trauman syvyyden määrittämisessä	35
7	PAINEAALTO JA LÄPÄISEMÄTTÖMÄN ISKUN AIHEUTTAMA TRAUMA	36
8	VAATIMUKSET.....	39
8.1	Suomen Puolustusvoimien varusteet	42

8.1.1	<i>Sirpale- ja luotisuojaliivit</i>	42
8.1.2	<i>Kypärä</i>	43
8.2	Iso-Britannian armeijan varusteet	44
8.3	Tšekin armeijan varusteet	44
8.4	Sveitsin armeijan varusteet	45
8.5	Belgian armeijan varusteet	45
8.6	Varusteet muissa Pohjoismaissa.....	46
8.7	Etelä-Afrikan armeijan varusteet	46
8.8	Saksan armeijan varusteet.....	46
8.9	Hollannin armeijan varusteet	47
8.10	Ranskan armeijan varusteet.....	48
8.11	Venäjän armeijan varusteet.....	48
9	KOKEELLINEN OSA.....	50
9.1	Paneelin kuvaus ja koeammuntasuunnitelma.....	50
9.2	Kokeen suoritus	52
9.3	Tulokset	53
9.4	Osumavaikutusanalyysi.....	54
9.4.1	<i>4,0 mm Al₂O₃ Bitossi</i>	55
9.4.2	<i>3,2 mm Al₂O₃ Morgan</i>	59
9.4.3	<i>2,0 mm Al₂O₃ Barat Ceramics</i>	60
10	YHTEENVETO.....	62
11	LÄHTEET	64
12	LIITTEET.....	70
	Liite 1: Kypärän FH-580 tekniset tiedot	70
	Liite 2: Kypärän FH-610 tekniset tiedot	72
	Liite 3: Koeammuntojen pöytäkirja (4,0 mm)	74
	Liite 4: Koeammuntojen pöytäkirja (3,2 mm)	75
	Liite 5: Koeammuntojen pöytäkirja (2,0 mm)	76
	Liite 6: STANAG 2920 ed. 4 (draft) mukaiset suojaustasot.....	77
	Liite 7: Yhteenvetotaulukko vaatimuksista.....	78

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AP	armour-piercing, panssariluoti
API	armour-piercing incendiary, panssarisytytysluoti
atm	normaali-ilmakehän paine, 101,325 kPa
BABT	behind armour blunt trauma, läpäisemättömän luodin vaikutuksesta keuhon syntyvät vauriot
BL	ballistic limit, raja-arvo, jota suuremmilla nopeuksilla luoti tai sirpale läpäisee suojaruusteen
denier	kuidun lineaarisen massatiheyden yksikkö, [g / 9000 m]
EDANA	European Disposables and Nonwovens Association
FH-580	Fragment Helmet, Suomen Puolustusvoimien kypärä, jonka v_{50} -arvo on 580 m/s
FH-610	Fragment Helmet, Suomen Puolustusvoimien kypärä, jonka v_{50} -arvo on 610 m/s
FMJ	full metal jacketed, kokovaippaluoti
FSP	fragment simulating projectile, sirpaletta simuloiva projektiili
GOST R	venäläinen vaatimustenmukaisuussertifikaatti, joka mahdollistaa tuotteiden myynnin Venäjällä
HC	hard core, kovaytiminen luoti
HDPE	high-density polyethylene, korkeatiheyksinen polyeteeni
HPPE	high-performance polyethylene, korkean suorituskyvyn polyeteeni
JHP	jacketed hollow point, reikäpäinen vaippaluoti
K 99	vanha nimitys FH580-kypärälle
M 91	Suomen Puolustusvoimilla käytössä oleva suojaliivi
M_n	lukukeskimääräinen moolimassa
M_w	painokeskimääräinen moolimassa
MATINE	Maanpuolustuksen tieteellinen neuvottelukunta
MOD	Ministry of Defence, puolustusministeriö
NATO	North Atlantic Treaty Organization, Pohjois-Atlantin liitto
NIJ	National Institute of Justice
PA	polyamidi
Para	Parabellum-luoti
PASGT	Personal Armor System Ground Troops
(P-)BFS	(perforation) backface signature, suojaruusteen taakse läpäisemättömän luodin vaikutuksesta syntyvä muodonmuutos
PBO	poly-p-fenyleeni-2,6-bentsobisoksatsoli
PBZT	poly-p-fenyleenibentsobistiatsoli
PE	polyeteeni

POM	polyoksimeteeni
PP	polypropeeni
PPTA	poly-p-fenyleeni-tereftaalamidi
PVB	polyvinylibutyraali
PVTT	Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos
RH	relative humidity, suhteellinen ilmankosteus
RN	round nose, pyöreäkärkinen (luoti)
SFS	Suomen standardisoimisliitto
STANAG	NATO Standardization Agreement, NATO:n standardointisopimus
TEVASTA	Standardoimisyhdistys, Tekstiili- ja vaatetusteollisuus ry:n yhteydessä
tex	SI-järjestelmän mukainen kuidun lineaarisen massatiheyden yksikkö, [g / 1000 m], yleisesti käytössä dtex [g / 10000 m]
TNT	trinitrotolueeni, räjähdysaineena käytetty kemiallinen yhdiste
trauma	läpäisemättömän iskun aiheuttama muodonmuutos, suojaraharusteen takapuolinen pullistuma
UD	uni-directional, yhdensuuntainen (kuitumatosta puhuttaessa)
UHMWPE	ultra-high-molecular-weight polyethylene, erittäin korkean molekyyli-painon polyeteeni, kauppanimiä esim. Spectra, Dyneema
V _{2,5}	nopeus, joka sirpaleella tai luodilla on 2,5 metrin päässä asesta piipusta
V ₅₀	nopeus, jolla läpäisyn todennäköisyys on 0,5

1 JOHDANTO

Toimivat ja tarkoituksenmukaiset suojarusteet ovat sotilaan hengissä pysymisen perusedellytykset taistelutilanteessa. Näihin kuuluvat vaatetuksen ja jalkineiden lisäksi ballistiset suojaliivit ja kypärä, jotka suojaavat vartalon tärkeimpiä alueita sirpaleilta, luodeilta ja iskuilta, sekä esimerkiksi suojalasit ja kuulosuojaimet. Aseiden kehittyessä ja sodankäynnin muuttuessa teknisemmäksi myös suojarusteiden on pysyttävä kehityksessä mukana. Toisaalta etenkin Euroopan maissa keskitytään ja osallistutaan nyt rauhanajan toimintaan ja rauhan ylläpitoon – ei sotimiseen. Toisen maailmansodan jälkeen 70 - 85 prosenttia vammauttavista ja tappavista osumista johtui erilaisista sirpaleista. Nykytilanne on erilainen, ja todennäköisimmät kuolinsyyt ovat erilaisista räjähdyksistä aiheutuvat paineiskut, lento-onnettomuudet sekä jalkaväen aseluodit.

Suojavarusteiden pitäisi muuttua koko ajan kevyemmiksi ja huomaamattomammiksi, mutta kuinka pitkälle kehityksessä voidaan mennä ilman suojaustason heikentymistä? Lisäksi tutkimus- ja kehittämiskustannukset nousevat todella korkeiksi, kun etsitään sitä kevyintä mahdollista turvallista ratkaisua. Aina ei välttämättä kannata valita teoriassa korkeimman suojaluokan varustusta, vaan pitää ottaa huomioon olosuhteet. On osattava hahmottaa myös oikea uhkakuva. Todennäköiset uhkat ovat aivan erilaiset Afganistanissa olevilla rauhanturvaajilla, ranskalaisilla naispoliiseilla ja suomalaisilla sotilaille kotimaassa. Parhaan suojauksen antavat kovat suojaliivit (hard armour) ovat huomattavasti raskaampia ja kömpelömpiä päällä kuin niin kutsutut kevytliivit (soft armour). Vaativassa maastossa sotilas ei pärjää kömpelönä ja hitaana, vaan pukee päällensä ennemmin kevyemmät sirpaleliivit ja nostaa varusteidensa suojaustasoa tarvittaessa lisäämällä erillisiä luotisuojaneiteita.

NATOn (North Atlantic Treaty Organization) eli Pohjois-Atlantin liiton alainen komitea on laatinut jäsen- ja yhteistyömaille standardin kaltaisen ohjeen (STANAG 2920 eli Standardization Agreement) sirpalesuojien testauksesta. STANAG 2920 ei mainitse mitään sirpaleliivien ja kypärien ominaisuuksista ja vaatimuksista, vaan pitää sisällään ainoastaan näiden suojarusteiden testauksen v_{50} -arvon määrittämiseksi. Suojaustaso on kansallinen päätös, siihen NATO ei ota kantaa. Maailmanlaajuisesti käytännöt kuitenkin eroavat maiden välillä. Tässä diplomityössä tulee esille muutamia käytössä olevia standardeja. Suurelta osin sisältö on sama, mutta joitakin eroavaisuuksia eri standardien välillä löytyy.

Tämä diplomityö pyrkii kokoamaan tärkeimmät ballistiseen henkilösuojaukseen liittyvät testausmenetelmät, vaatimukset sekä standardit yhteen selkokielellisesti. Eri maiden käytännöt ja suojaustasovaatimukset ovat vaikeasti saatavilla ja tieto on hyvin hajanaista. Jotta aihe ei leviä liian suureksi, tässä keskitytään testaukseen, ominaisuuksiin ja

vaatimukseen Suomessa ja ulkomailla. Tällaisessa työssä ei voida perehtyä jokaisen yksittäisen maan vaatimukseen ja käytäntöihin, vaan ulkomaista käsitellään osa Pohjoismaista yhdessä luvussa, joitakin Keski-Euroopan maita omissa luvuissaan, Iso-Britannia, Etelä-Afrikka sekä Venäjä. Yksittäisiä vaatimuksia ja eroja nostetaan esille muistakin maista, joiden vaatimusmäärittelyjä kokonaisuudessaan ei luovuteta ulkopuolisille. Yhdysvallat esimerkiksi pitää tietoja suojarusteistaan luottamuksellisina.

Ballistiseen suojaukseen käytettävistä materiaaleista tässä käsitellään lähinnä kuitumateriaaleja sekä hieman keraameja. Päivi Henttu on tehnyt diplomityön jälkimmäisiin liittyen (Keraamisen suojalevyn kehittäminen) vuonna 1991. Näin ollen ei ole syytä perehtyä yksityiskohtaisesti keraameihin ballistisina materiaaleina. Muita materiaaleja, kuten metalleja, sivutaan siinä määrin kuin se on tarpeellista kokonaisuuden kannalta. Materiaaleilla on olennainen vaikutus valmiin tuotteen ballistisiin ominaisuuksiin, joten tärkeimmät materiaalit on syytä esitellä. Ballististen suojarusteiden valmistusta tässä diplomityössä ei oteta esille, sillä niiden valmistus on yksinään jo laaja aihealue. Myöskään ballistista iskua tapahtumana ei juuri käsitellä. Tästä aiheesta on Ilkka Laine tehnyt kattavan diplomityön vuonna 1999 nimellä Ballistisen iskun energia-absorptio kuitukangasrakenteessa.

Teoriaosuuden kirjallisuuden tueksi ja kokonaisuuden hahmottamiseksi diplomityöhön lisättiin käytännön testauksia. Luotisuojapaneelien koeammunnat suoritettiin osana Teknologia 2010 -hanketta yhteistyössä FY-Composites Oy:n kanssa. Tähän työhön koestuksista on liitetty koeammuntasuunnitelma, selostus kokeen suorittamisesta sekä osumavaikutusanalyysi. Tutustuminen koeammuntarataan, erilaisiin kypäriin, suojalii-veihin ja luotisuojalevyihin sekä aseisiin oli tärkeää asian ymmärtämiseksi. Suojavarusteiden ja testauslaitteistojen ominaisuuksia, käyttöperiaatteita ja teknisiä tietoja käytännössä on vaikea hahmottaa pelkkiä manuaaleja lukemalla.

Lähdemateriaalin laajentamista varten tehtiin vierailuja suomalaisiin kypäriä ja suojalii-vejä valmistaviin yrityksiin, kuten FY-Composites Oy ja Verseidag Ballistic Protection Oy. Lisäksi tietoja saatiin Maavoimien materiaalilaitoksen esikunnan asiantuntijoilta. Sopivaa materiaalia työhön ja lisäkokemuksia tarjosi jonkin verran myös osallistuminen NATO:n Prahassa järjestämään Future Soldier[®] -näyttelyyn. Diplomityössä viitataan myös MATINE Tutkimushanke 2005 -raporttiin. *TABAS Taistelijan ballistisen suojauksen kuormittavuuden vähentäminen uusilla kevyemmällä materiaaleilla ja rakenteilla* -raportin on koonnut Markku Honkala TTY:n Kuitumateriaalitekniikan laitokselta.

2 BALLISTISET HENKILÖSUOJAVARUSTEET

Ballistiikka jaetaan yleensä kolmeen alasektoriin; sisäballistiikkaan, väliballistiikkaan ja ulkoballistiikkaan. Joissain lähteissä puhutaan sisä-, ulko- ja maaliballistiikasta. Sisäballistiikkaan kuuluvat kaikki aseiden putkessa laukauksen aikana tapahtuvat ilmiöt. Väliballistiikka tutkii putken suulla tapahtuvia laukauksen aikaisia ilmiöitä. Nämä ilmiöt kohdistuvat aseeseen, ammukseseen sekä ympäristöön. Ulkoballistiikan tarkoitus on ammuksen lentoradan laskeminen. Tässä diplomityössä ballistiikalla tarkoitetaan pääasiassa maaliballistiikkaa, joka tutkii kohteessa tapahtuvia ilmiöitä. [1]

Erilaisissa tehtävissä toimivien sotilaiden suojavarusteilta vaaditaan erilaisia ominaisuuksia. Lisäksi vartijoille ja poliiseille on omat tarkoituksenmukaiset suojavarusteensa. Nykyään monia erilaisia suojaliivejä ei sotilaskäytössä enää juuri ole, vaan ballistinen suojaus on integroitu sotilaan varustukseen modulaarisesti. Puhutaan, että sotilas on systeemi. Tämä tarkoittaa sitä, että vakiovarustuksen suojaustasoa muutellaan uhkakuvien mukaan lisäämällä irrallisia luotisuojapaneeleita tarpeellinen määrä. Parhaan mahdollisen suojaustason saavuttamiseksi ei kannata valita parhaiten pysäyttävää suojaliiviä, vaan on osattava optimoida suojaustaso ja suojattava pinta-ala ottaen huomioon paino ja liikkuvuus. Suojaliivit voidaan jakaa kahteen tyyppiin, kevytliivit ja taktiset liivit, ”pehmeät” ja ”kovat” suojaliivit. [2]

2.1 Kevytliivi

Kevytliivi rakentuu kudotuista kankaista tai laminoituista kuitukerroksista. Pelkkä liivi sellaisenaan painaa yleensä kolmesta seitsemään kiloa. Kevytliivi antaa suojan esimerkiksi räjähdyksistä syntyviä pieniä sirpaleita vastaan. Se suojaa kuitenkin vain peittämiänsä kehon osia, jolloin kädet, jalat ja kasvot ovat edelleen vaarassa kypärän suojatessa päätä.

Niin kutsutun pehmeän suojaliivin tarkoitus on jakaa sirpaleen iskuenergia laajalle pinta-alalle ja eri kangaskerroksiin, ja siten estää läpäisyn tapahtuminen. Sirpaleen liikeenergia on niin suuri, että suojaliiviin pysähtyessäänkin se voi kuitenkin aiheuttaa vammoja, kuten mustelmia, luunmurtumia tai muita sisäisiä vaurioita. [2]

Sirpaleita syntyy esimerkiksi sirpalepommeista, -kranaateista, -miinoista, käsikranaateista, kiväärinkranaateista sekä rakettien ja ohjusten sirpaloituvista taistelukärjistä. Pelkkä kevytliivi ei periaatteessa anna suojaa luoteja vastaan. Esimerkiksi kaikki FMJ-eli kokovaippaiset kiväärinluodit läpäisevät sen jopa 500 metrin etäisyydeltä. Se voi kuitenkin pysäyttää pienikaliiperisten käsiaseiden hitaita ja pehmeitä luoteja. Ampumaseen kaliiperi on aseiden putken pienin sisähalkaisija. [1]

2.2 Taktinen liivi

Taktinen liivi on usein sama kuin kevytliivi, mutta siihen on lisätty kovat luotisuojapaneelit liivin etu- ja takapuolelle. Näin sirpalesuojaliivien suojaluokka kasvaa. Toki on huomioitava, että edelleenkin liivi ei suojaa muilta kuin paneeleihin kohdistuvilta luodeilta tai sirpaleilta. Nykyään käytössä on jonkin verran myös pieniä suojapaneeleita suojaamaan kylkiä sekä olkavarsia. Kaulan ja niskan suojaksi voidaan myös lisätä kauluksia. [3]

Jotkut valmistajat käyttävät luotisuojapaneeleissa edelleen metallilevyjä, mutta useimmat ovat siirtyneet keraami- tai polyeteenipaneeleihin. Jälkimmäiset ovat kevyempiä kuin metallilevyt antaen silti vähintään yhtä hyvän suojan. Keraamilevyt valmistetaan usein alumiinioksidista tai boorikarbidista, jotka kovina materiaaleina pyrkivät hajottamaan luotisuojapaneeliin osuvan luodin. Keraamilevyn takana tai ympärillä oleva kudottu aramidikangas tai muu kuiturakenne pitää hajoavan keraamilevyn kasassa, pysäyttää irtoavat sirpaleet ja absorboi luodin energiaa. [3]

Luotisuojapaneeli pysäyttää normaalin FMJ-luodin, jonka lyijy-ydin sekä kuparisinkkivaippa ovat pehmeitä aineita, sillä luoti muokkautuu törmäyksessä ja sen kärjen pinta-ala kasvaa. Näin ollen luodin tunkeutuminen suojamateriaaliin vaikeutuu. [1]



Kuva 2.1. Vasemmalla Yhdysvaltain armeijan taktinen liivi purettuna osiin [4] ja oikealla Suomen Puolustusvoimien taktinen liivi. [5]

Yllä olevassa kuvassa (kuva 2.1.) on oikealla puolella suomalainen M 91 -luotisuojaliivi ja vasemmalla puolella Yhdysvaltain armeijan taktinen liivi osiin purettuna. Kuvasta on hyvin nähtävissä, kuinka monesta eri osasta liivi koostuu. Se ei siis ole kokonaisuudessaan pelkkä liivi sekä irrallinen luotisuojapaneeli. Taktisesta liivistä kuitenkin puhutaan kokonaisuutena, eli suojaluokitus ilmoitetaan aina tietyn luotisuojapaneelin mukaan, eli sillä oletuksella, että kyseinen paneeli on integroituneena suojalii-

veihin. Sotilaan mukavuutta ajatellen luotisuojalevyjä voidaan muotoilla valmistusvaiheessa kaareviksi, jotta ne mukautuvat vartaloon paremmin. Paneelista voidaan tehdä myös epäsymmetrinen siten, että asetta käyttävä käsi pääsee liikkumaan helpommin.

2.3 Kypärä

Sotilasvarusteena kypärä on sirpaleliivien rinnalla elintärkeä asuste. Sen tarkoituksena on suojata sotilaan päätä ensisijaisesti räjähteistä sinkoavilta sirpaleilta. Kypärän täytyy pysäyttää päin tuleva sirpale ja vaimentaa sirpaleen aiheuttamaa iskua, jotta pää, kaula-ranka ja sitä kautta muu elimistö ei vaurioidu. Joidenkin tilastojen mukaan kypärän käyttö vähentää pään alueen vammoja noin 24 prosenttia. [6]

Kypärän malli ja materiaali ovat muuttuneet ensimmäisen maailmansodan jälkeen huomattavasti. Kypärästä on tullut kevyempi ja tarkoituksenmukaisempi. Aikaisemmin kypärä oli hyvin yksinkertaisen muotoinen ja materiaalina käytettiin terästä. Kehityksen myötä kypärä sai uusia muotoja, mikä teki kypärästä mukavamman päässä mahdollistaen samalla erilaisten oheistarvikkeiden käytön. Tällaisia ovat esimerkiksi kuulosuojaimet, suojalasit, viestintävälineet ja suojanaamari. 1970-luvulla kypäränvalmistukseen alettiin käyttää aramidikuituja ja polyvinyylibutyyraalia (PVB). Ne mahdollistivat kypärän keventymisen ja paremmat ballistiset ominaisuudet. Kuvassa 2.2. on vasemmalla ja keskellä erityyppiset komposiittikypärät, jotka on valmistanut Šestan-Busch. Oikeassa reunassa on saksalainen M16, jota alettiin valmistaa 1916. Kypärän materiaalina on 1,1 mm paksu krominikkeliteräs. [2; 7; 9]



Kuva 2.2. Vasemmalla BK-3 ja BK-PASGT, molempien NIJ (National Institute of Justice) -standardin mukainen suojaustaso IIIA. Oikealla M16 otsapanssarilla. [8; 9]

Joissain maissa käytetään edelleen teräskypärää. Myös Suomessa niitä on vielä käytössä komposiittikypärien rinnalla. Teräskypäriä voidaan kuitenkin pitää vaarallisina. Pienikin osuma, joka komposiittikypärään jättäisi ainoastaan ulkoisen vaurion, voi repiä teräskypärästä osumakohtasta liuskoja, joiden terävät reunat voivat sisäänpäin kääntyessään painautua syväälle päähän aiheuttaen vakavia vammoja.

Kypärään voi joissain tehtävissä olla tarpeen lisätä silmiä ja kasvoja suojaava visiiri. Sen on oltava läpinäkyvä ja kova. Hajotessa siitä ei saa lentää sirpaleita, vaan sen pitää pysyä kasassa. Näiden ominaisuusvaatimuksien vuoksi polykarbonaatti on paras vaihto-

ehto visiirin materiaaliksi tällä hetkellä. Tavalliseen sotilasvarustukseen visiiri ei kuulu. Kuvasta 2.3. voidaan nähdä, kuinka suomalaisen kypärän muotoilu mahdollistaa maakuuasennostakin ampumisen ongelmitta.



Kuva 2.3. Suomalainen sotilas kotimainen kypärä päässään. [5]

Kypärän kehityksessä ei ole näkyvissä lähitulevaisuudessa selkeää muutosta tai edistystä, mikäli kuitukehityksessä ei tapahdu oleellisia muutoksia. Suojaustason parantaminen vaatisi kypäräänkin keraamisia lisälevyjä, mikä on mahdoton toteuttaa ihmisen fysiologiaa ajatellen. Kypärän keventäminen tosin on mahdollista vaihtamalla aramidikuidut polyeteenikuituihin (PE) tai poly-p-fenyleeni-2,6-bentsobisoksatsolikuituihin (PBO). Tällöin ongelmaksi muodostuu kuitenkin dimensioiden kasvaminen sekä säännösten heikkeneminen. Lisäksi PE- ja PBO-kuidut ovat hinnaltaan korkeampia. Yksi vaihtoehto kypärän keventämiseksi on pienentää suojauspinta-alaa, mutta siinä kasvaa riski saada osama suojaamattomalle alueelle. Kuitenkin esimerkiksi panssariajoneuvojen kuljettajat käyttävät pinta-alaltaan pienempiä kypäriä, joiden kanssa on mahdollista käyttää useita elektronisia varusteita.

3 BALLISTISISSA HENKILÖSUOJAVARUSTEISSA KÄYTETTÄVÄT MATERIAALIT

3.1 Materiaalien vaatimukset

Aikaisemmin suojaliivejä on valmistettu muun muassa teräksestä ja silkistä. Ensimmäiset versiot suojavaatuksesta tehtiin eläinten nahoista ja turkeista, joita kiedottiin vartalon ympärille useita kerroksia. Nämä tosin suojasivat ainoastaan kolhuilta, joita metsästyksessä saattoi tulla. Vähitellen siirryttiin käyttämään rautahaarniskoja. Kokonaisuudet olivat massiivisia, mikä vielä lisäsi suojavaarusteiden painoa. Vuosien kuluessa on tullut tarpeelliseksi kehittää kevyempiä ja parempia ratkaisuja raskaiden suojavaarusteiden tilalle. [2; 3]

Sirpale- ja luotisuojaukseen käytettäville materiaaleille voidaan asettaa fysikaalisia, fysiologisia, ympäristöllisiä ja ballistisia vaatimuksia. Näihin kuuluvat kestävyys erilaisissa olosuhteissa, veto- ja repimislujuus, kulutuskestävyys, vedenhylkivyyden, ilmanläpäisykyky, alhainen paino, käytön helppous, ilmankosteuden- ja vesihöyrynläpäisykyky, käyttömukavuus, ballistinen suojauskyky, palamisenestokyky ja resistanssi kemiallisia ja biologisia aineita sekä ydinaseita vastaan. Lisäksi materiaaleilla tulee olla hyvät häivetekniset ominaisuudet, eli varusteista ei saa lähteä kovaa ääntä liikuttaessa ja niissä pitää olla sopivat värit sekä kuvioinnit naamioitumiseen. [10]

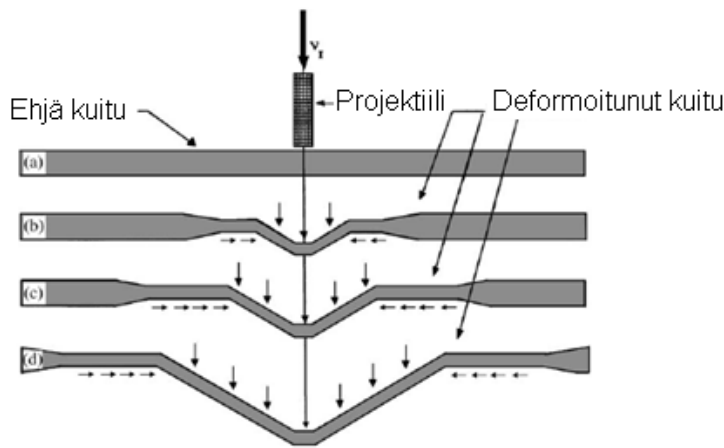
Vuosikymmenien kehityksen tuloksena on saatu erinomaisia kuituja ballistisia suojavaarusteita varten. Korkean teknologian kuidut ovat kevyitä ja lujia, joten ne soveltuvat hyvin tähän tarkoitukseen. Esimerkiksi aramidikuitujen lujuus suhteessa painoon on viisinkertainen aiemmin käytössä olleeseen teräkseen verrattuna. Kuitumateriaalit ovat myös hyviä absorboimaan iskuenergiaa. [2; 3]

Ballistisen iskun vaikutus kankaaseen riippuu monista tekijöistä. Sirpaleen tai luodin muodon ja massan, iskunopeuden ja ampumiskulman lisäksi kohteena olevan kuitumateriaalin ominaisuudet vaikuttavat. Tällaisia ovat esimerkiksi kuidun ja langan ominaisuudet, kankaan rakenne ja tiheys, kankaan neliömassa ja päällekkäisten kerroksien lukumäärä. Käytettävältä kuitumateriaalilta vaaditaan erityisen korkeaa elastista modulia, kimmokerrointa, joka kuvaa materiaalin jännityksen ja venymän suhdetta. Niissä yhdistyvät sekä korkea lujuus, hyvä vetolujuus että alhainen murtovenymä. [11; 12; 13]

Ballistisen iskun aikana kohdemateriaalissa rasituksen ottaa vastaan laajempi alue kuin vain osumakohta. Kaikki kuidut, jotka ovat yhteydessä osumakohdan kuitujen kanssa, osallistuvat iskuenergian minimointiin. Toki isku vaikuttaa hieman eri tavalla suojan eri puolilla tai eri kerroksissa oleviin kuituihin. Sirpale pyrkii hajottamaan kuituja tieltään edetessään materiaalissa. Korkean lujuuden kuituja katkoessaan sirpaleen

liike-energia putoaa ja kuitujen välisen kitkan vaikutus pienenee. Lisäksi sirpale yrittää työntää kuituja sivuun, mitä taas korkea kitka pyrkii estämään. Jos kuitujen välillä on alhainen kitka, sirpale pystyy liike-energiansa voimalla siirtämään kuituja sivuun ja tunkeutumaan niiden välistä. Tällöin se ei menetä liike-energiaa niin paljoa, ja se pystyy läpäisemään kankaan helpommin. [11]

Kuitumateriaalien ballistiset ominaisuudet perustuvat seuraaviin energian absorbointimekanismeihin. Kuidut kuljettavat pistemäisen iskun aiheuttamaa iskuenergiaa laajemmalle alueelle projektiilin edetessä materiaalin sisällä muuttaen komposiittirakenteen kartiomaiseksi. Primäärikuidut kiristyvät ja sekundaarikuidut muuttavat muotoaan. Tekstiilin rakenne alkaa delaminoitua ja matriisi murtua. Projektiilin ja kuidun välinen kitka hidastaa projektiilin etenemistä ja pienentää sen liike-energiaa. Projektiili voi iskuenergiansa ansiosta myös irrottaa palasen osumakohdasta. Hallitseva mekanismi riippuu käytettävästä materiaalista. [14]



Kuva 3.1. Kartiomaisen vaurion muodostuminen kuiturakenteilla. [14]

Yllä oleva kuva 3.1. esittää, mitä kuituvahvisteiselle sirpalesuojaliiville tapahtuu, kun projektiili osuu siihen. Kuidun poikittainen siirtymä osumakohdassa aiheuttaa siihen vetojännityksen, joka etenee aaltona kuidun suuntaisesti iskukohdasta pois päin. Kuvassa vaakasuuntaiset nuolet osoittavat pitkittäisen aallon aiheuttaman langan massaalkioiden virran kohti osumapistettä. Pystysuuntaiset taas osoittavat poikittaisen aallon. Kuitukerrokset muodostavat kartiomaisen profiilin, kun kuidut venyvät absorboidessaan energiaa. [14]

Phoenix ja Porwal ovat määrittäneet tutkimustensa perusteella matemaattisen mallin kuitujen ominaisuuksien ja ballististen suojauskyvyn riippuvuussuhteelle. Cunniff on jo aikaisemmin löytänyt vastaavanlaisen tuloksen empiiristen tutkimusten perusteella. Esitettävät yhtälöt ovat päteviä, kun kyseessä ovat kuitumateriaalit sekä lieriömäiset projektiilit. [15]

$$\Omega = \frac{\sigma \varepsilon}{2\rho} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

(1)

missä σ on kuitulujuus (N/m^2), ε on kuidun murtovenymä, ρ on kuidun tiheys ja E on kuidun moduli. Ω :n yksiköksi muodostuu m^3/s^3 .

Cunniffin vastaava relaatio on

$$\frac{v_{50}}{\sqrt[3]{\Omega}} = f\left(\frac{AD_{target}}{AD_{projectile}}\right) \quad (2)$$

missä AD on neliöpaino ja $f\left(\frac{AD_{target}}{AD_{projectile}}\right)$ on empiirisesti määritetty kohteen ja projektii-
lien välinen funktionaalinen suhde.

$$\sqrt[3]{\Omega}(\text{m/s}) = 171 \frac{\sigma(\text{cN/dTex})^{2/3}}{E(\text{N/tex})^{1/6}} \quad (3)$$

Kolmas yhtälö on johdettu ensimmäisestä ja se määrittelee kuidun lujuuden, modulin ja tiheyden perusteella minkä tahansa kuitumateriaalista valmistetun suojaruusteen ballistisen suojauskyvyn. Yhtälön perusteella tietyllä muuttumattomalla kuidun modulin arvolla kuitulujuuden kasvaminen johtaa ballistisen suojauskyvyn kasvuun, ja muuttumattomalla kuitulujuuden arvolla modulin pieneneminen kasvattaa ballistista suojauskykyä. [15]

Yksittäisten kerrosten lukumäärällä on merkittävä vaikutus ballistiseen suojauskykyyn ja trauman syvyyteen. Traumalla tarkoitetaan suojaruusteen rakenteeseen syntyvää muodonmuutosta. Kerrosten lisääminen kasvattaa aina sotilaan kantamaa taakkaa ja samalla suojaliivin liikkuvuus ja joustavuus kärsii. [11] Yleisesti sotilaan suojavaatetukselta ja -varustukselta vaaditaan keveyttä, erinomaista kestävyyttä, vähäistä huoltotarvetta ja hyvää käsiteltävyyttä. Varusteiden on oltava antistaattisia, jotta vältetään syttymiseltä ja kipinöiltä. Lisäksi varusteiden on hyvä olla pitkäikäisiä sekä helppohoitoisia, jotta niitä voidaan hoitaa ja mahdollisesti korjata kenttäolosuhteissa. Varusteille on myös taloudellisia vaatimuksia. [16]

3.2 Materiaalivaihtoehtoja

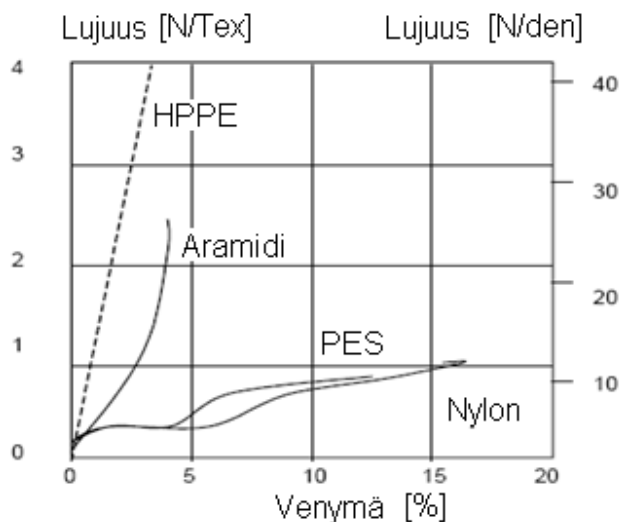
Tällä hetkellä materiaalivaihtoehtoja on useita. Yleisimmin käytössä ovat paraaramidikuidut, joiden tunnetuimpia kaupunimiä ovat Kevlar[®] ja Twaron[®]. Sirpaleliivejä voidaan valmistaa myös polyamidista (PA) tai PBO:sta. UHMWPE (Spectra[™], Dyneema[®]) eli erittäin korkean molekyylipainon polyeteeni on uusimpia ja hyvin tarkoitukseen sopivia materiaaleja. Kypärien valmistuksessa käytetään pääasiassa aramidia,

mutta jonkin verran myös polyamidia sekä polyeteeniä. Tulevaisuudessa voidaan odottaa myös polypropeenin (PP) kehittymistä yhdeksi kärkipään materiaaliksi sirpalesuojien valmistuksessa. Myös poly-p-fenyleenibentsobistiatsoli (PBZT) on potentiaalinen tulevaisuuden kuitu ballistisiin rakenteisiin.

Taulukko 3.1. Tekstiilikuitujen ominaisuuksia verrattuna teräkseen. [16]

	Teräslanka	Nylon	Kevlar 29	Dyneema SK60
Vetolujuus (MPa)	4000	2100	3400	2700
Moduli (MPa)	18	4,5	93	89
Venymä (%)	1,1	19	3,5	3,5
Tiheys (g/ml)	7,86	1,14	1,44	0,97

Taulukossa 3.1. on joitain tekstiilikuitujen ja teräslangan ominaisuuksia. Tätä tarkasteltaessa voidaan tehdä johtopäätöksiä siitä, mitkä materiaalit ovat parhaita ballististen suojavarusteiden valmistukseen. Jos kuidulla on korkea venymä kuten polyamidilla, suojavarusteen rakenteesta tulee joustavampi, jolloin suojavaikutus on heikompi ja trauman suuruus läpäisemättömillä sirpaleilla ja luodeilla ammuttaessa suurempi. Venymä ja moduli korreloivat toistensa kanssa. Niillä kuiduilla, joilla moduli on korkea, venymä on pieni, sillä moduli tarkoittaa kuidun pyrkimystä vastustaa muodonmuutosta.



Kuva 3.2. Ballistisissa sovellutuksissa käytettävien kuitujen lujuus- ja murtovenymäärä-voja. [10]

Kuvassa 3.2. olevat käyrät esittävät eri kuitumateriaalien vetolujuutta ja venymää katkeamishetkellä, eli murtovenymää. Pystyakselilla oleva vetolujuus ilmoitetaan muodossa newtonia yhtä texiä kohden ja newtonia yhtä denieriä kohden. Vaaka-akselilla oleva venymä ilmaistaan prosentteina alkuperäisestä pituudesta. Kuvan perusteella voidaan havaita, että korkean suorituskyvyn polyeteeni (HPPE) ei juuri veny suurillakaan rasituksilla ja että sillä on erittäin hyvä vetolujuus. Polyamidi 66, eli kuvaajassa Nylon,

on huomattavasti heikompi ja sen venymä voi olla jopa 15 - 20 prosenttia alkuperäisestä pituudestaan vedon alaisena. Aramidikuidut asettuvat näiden väliin ollen kuitenkin lähempänä HPPE:n ominaisuuksia. [10]

Kuvassa 3.2. on käyrä myös polyesterille (PES), jota voidaan käyttää sotilasvaateuksissa, mutta joka ei ole tällä hetkellä käytössä varsinaisessa ballistisessa suojauksessa. Polyesterikuituja voidaan modifioida ballistisiin sovellutuksiin sopiviksi, mutta sellaisenaan ne eivät ole yhtä hyviä kuin esimerkiksi aramidi. Modifioimattomana polyesterin alin pitkäaikainen käyttölämpötila on -20 °C, joten se ei kestä kovia pakkasia. Polyesterillä ei myöskään ole hyvä iskulujuus. Sekoitteena muiden kuitujen kanssa polyesteri voi olla varteenotettava raaka-ainevaihtoehto. Eräs polyesterijohdannainen ballistisissa sovellutuksissa käytetty kuitu on Vectran[®]-nestekidepolymeerikuitu. [17]

Luotisuojalevyihin käytettävien keraamimateriaalien huonoja puolia ovat terästä korkeampi hinta sekä hauraus. Käytetyimpiä keraameja ballistisissa sovellutuksissa ovat alumiinioksidi ja boorikarbidi. Myös piikarbidiä käytetään jonkin verran. Keraamit ovat kovia ja lujia, sekä polymeerikuitujen tapaan kevyitä. Hauraus aiheuttaa keraamipaneelleille kuitenkin sen, että ne kestävät huonosti useita iskuja. Myös UHMWPE:sta on viime aikoina onnistuttu valmistamaan tehokkaita ja kevyitä luotisuojapaneeleita.

Taulukko 3.2. *Materiaaliryhmät ja ominaisuudet, joissa on odotettavissa 20 - 25 % parannuksia vuoteen 2020 mennessä.* [18]

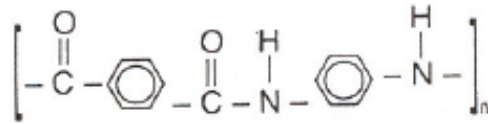
Materiaaliryhmä	Lujuus	Sitkeys	Jäykkyys	Tiheys	Korroosion-kesto	Korkeiden lämpötilojen kesto
Metallit	Ei	Ei	Ei	Ei	Kyllä	+100°C
Metallimatriisikomposiitit	Kyllä	Ei	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei
Keraamit	Kyllä	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei
Keraamimatriisikomposiitit	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei	Kyllä
Polymeerit	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä

Taulukossa 3.2. on listattuna erilaisia materiaaliryhmiä ja niiden ominaisuuksia, sekä arvioita niiden kehityksestä seuraavan kymmenen vuoden aikana. Siitä voidaan päätellä, että keraamimatriisikomposiitit sekä polymeerimatriisikomposiitit ovat tulevaisuuden kehittyviä materiaaleja. Pelkkien keraamien ja metallien ominaisuuksiin ei ole odotettavissa merkittäviä parannuksia. Tässä arvioissa ei ole huomioitu nanometallien kehitymistä. [18]

3.3 Aramidi

Aramidikuidut ovat aromaattisia polyamideja, joiden sisältämät aromaattiset bentseenirenkaat antavat molekyyille jäykkyyden. Amidiryhmiä väliset polaariset sidokset ja kuidun kiteinen rakenne lisäävät vielä sen lujuutta. US Federal Trade Commissionin

määritelmän mukaan aramidikuitu on kuitu, joka muodostuu pitkäketjuisesta synteettisestä polyamidista, jossa vähintään 85 % amidiryhmistä liittyy suoraan kahteen aromaattiseen renkaaseen. Aramidin kemiallinen rakenne näkyy kuvassa 3.3. [19; 20] Aramidikuidut ovat keltaisia, ja niitä on erittäin vaikea värjätä muun väriksi. Yksittäisen kuidun poikkileikkaus on pyöreä ja noin 12 µm halkaisijaltaan. [21]



Kuva 3.3. Aromaattisen polyamidin kemiallinen molekyyli rakenne, aromaattinen ryhmä pääketjussa para-asemassa. [21]

Aramidi valmistetaan askelpolymeraatiolla ja kuidutetaan polymeeristä yleensä dry jet -märkäkehruuna. Polymerointi tehdään matalassa lämpötilassa p-fenyleenidiamiinin ja tereftaalihappokloridin polykondensaatioreaktiolla amidiliuoksessa. Liuottimen avulla kasvatetaan polymeerin moolimassaa sopivaksi kuitujen muodostumiselle. Alhainen lämpötila estää sivutuotteiden syntymisen. [21]

Muodostuva polymeeri liotetaan rikkihappoon (H₂SO₄), ja liuos kuljetetaan 80-asteisena kehrusuuttimien läpi kaasukerroksen kautta yksiasteiseen kehruukylpyyn. Kuidut kiinteytyvät jäähdytysilmassa ja happo neutraloidaan yksiprosenttisella natriumhydroksidilla. Lukuisista filamenteista muodostuva kuitukimppu pestään vielä kylmällä vedellä tai natriumkarbonaattiliuoksella, kuivataan hitaasti 65 - 130 Celsius-asteessa ja puolataan. Reikälevyn kapillaari ja ilmasuihku aiheuttavat kiertymistä, minkä seurauksena kuidusta muodostuu erittäin kiteinen ja kuidun pituusakselin suuntaisesti orientoitunut. [19; 20; 21; 22]

Ilmasuihku mahdollistaa korkeamman kuidutuslämpötilan ja vahvemman seoksen. Näiden ansiosta kehruunopeus kasvaa. Se voi olla jopa satoja metrejä minuutissa. Aramidi- eli PPTA-kuidut voidaan syntetisoida lähtöaineidensa nestekide- tai liuosfaasista märkäkehruun lisäksi kuumavetämällä. Molekyylit pyrkivät orientoitumaan kuidun pituussuuntaan. Kuidun mekaaniset ominaisuudet sekä kiteytymisaste määräytyvät kuidutusprosessin eri parametrien perusteella. Myös kuitujen lämpökäsittelyllä voidaan nostaa kimmomodulia. [21; 23]

Kevlarilla ja ensimmäisellä kaupallisella aramidikuidulla, Nomexilla, on se ero, että Kevlar on para-aramidikuitu, eli poly-p-fenyleenitereftaaliamidi (PPTA) ja Nomex meta-aramidikuitu, eli poly-m-fenyleeni-isoftaaliamidi. Jälkimmäinen näistä ei käy ballistisiin sovellutuksiin. Meta-aramidikuituja käytetään korkeiden lämpötilojen sovellutuksissa ja palamattomuutta vaativissa kohteissa, kuten palomiesten vaatteissa. Useista eri Kevlar-tyypeistä ballistisiin tuotteisiin käytetään tyypillisesti kuitua Kevlar 29. [20]

Aramidikuidut ovat hyvin lujia ja kevyitä, ja niillä on korkea moduli, alhainen sähkönjohtavuus, hyvä kemiallinen kestävyys, alhainen kutistuvuus, korkea lujuus, erittäin hyvä mittapysyvyys sekä hyvät palonesto-ominaisuudet. Kuitua on myös helppo prosessoida. [24] Niiden hyvä vetolujuus ja korkea moduli perustuvat siihen, että kuitujen li-

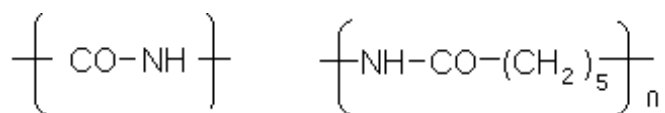
neaariset ja jäykät molekyyliketjut ovat hyvin orientoituneita kuidun pituusakselin suuntaan. Molekyyliketjuissa vaikuttavat vahvat kovalenttiset sidokset. [23]

Aramidikuiduista valmistetut kankaat ovat kevyitä ja joustavia, mikä antaa suojaileville käyttömukavuutta. Aramidikuiduilla on parempi lujuus suhteessa painoon kuin polyamidilla ja niiden murtovenymä on paljon pienempi kuin silkkikuiduilla ja alifaattisilla PA-kuiduilla. Kuitujen huonoja puolia ovat heikko UV-valonkesto sekä hygroskooppisuus, eli taipumus imeä kosteutta itseensä. Kosteus ei kuitenkaan vaikuta kuidun suuntaiseen vetolujuuteen juurikaan. Leikkaus- ja puristuslujuuteen sekä kuituakselin suhteen poikkisuuntaiseen vetolujuuteen kosteus vaikuttaa lujuutta heikentävästi. Auringonvalon UV-säteilyä lukuun ottamatta aramidikuitujen säänkesto on hyvä, kuidut toimivat sekä lämpimässä että pakkasessa. Aramidikuiduilla, kuten lähes kaikilla muillakin korkean suorituskyvyn kuiduilla, on huono puristuslujuus sen anisotrooppisuudesta johtuen. Kulutuksenkesto on aramidikuiduilla kohtuullisen hyvä. [2; 3; 6; 20; 21; 25]

Twaron CT Microfilament on kuitu, jonka sanotaan olevan jopa 23 % kevyempi ja hienompi kuin tavallinen aramidikuitu. Se on perusrakenteeltaan Kevlarin tavoin paraaramidikuitu, ja sen kehruprosessi samantyyppinen. Hienoudestaan johtuen se on myös pehmeämpi ja joustavampi, mikä antaa siitä valmistetuille ballistisille suojaileville käyttömukavuutta ja liikkuvuutta. Moninkertainen määrä hienoja kuituja takaa myös paremmat ballistiset ominaisuudet ja kyvyn absorboida energiaa nopeammin. [20; 24]

3.4 Polyamidi (PA)

Polyamidit, joista PA 66 ja PA6 ovat yleisesti tunnettuja kauppanimellä Nylon, ovat olleet kohtalaisen hyviä materiaaleja sirpaleliivien valmistukseen. Aramidikuitujen kehittyessä alifaattiset polyamidit on kuitenkin syrjäytetty lähes kokonaan, sillä polyamidista valmistetut liivit ovat huomattavasti painavampia ja PA-kuidulla on liian suuri venymä. Polyamideja ovat kaikki polymeerit, joissa rakenneyksiköt ovat liittyneet toisiinsa amidiryhmillä. Kuvassa 3.4. on esitetty amidiryhmä sekä polyamidin koko kemiallinen rakenne. [19]



Kuva 3.4. Polyamidin sisältämä amidiryhmä ja PA 6:n molekyylirakenne.

Polyamidit ovat alifaattisia, alisyklisiä tai aromaattisia. Tavallinen PA on alifaattinen. Se valmistetaan kondensaatioreaktiolla ja valmistuksessa voidaan käyttää kahta lähtöainetta, diamiinia ja dikarboksyylihappoa. PA voidaan valmistaa myös yhdestä lähtöaineesta, jolloin käytetään aminohappoja tai rengasmaisia amideja eli kaprolaktaameja. [19] Kaprolaktaamin polymeeraatiossa reaktioon lisätään vettä, jotta laktaamirenkaat aukeaisivat. Vesi poistetaan nostamalla lämpötilaa, jolloin muodostuu lineaarinen polymeeri. Polykaprolaktaami on tasapainotilassa, kun siinä on noin 10 % monomeeria

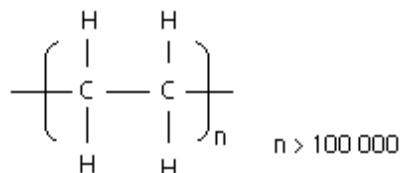
jäljellä. Loput poistetaan pesemällä polymeeri vedellä ennen kehruuta. Kehruulämpötilassa polymeeri muodostaa lisää monomeeria säilyttääkseen tasapainotilansa, jolloin se pitää poistaa uudelleen, jotta polymeeri voi saavuttaa hyvät kuituominaisuudet. [26]

Polyamidit nimetään sen mukaan, kuinka monta hiiliatomia diamiinissa ja dikarboksylihapossa on. Tällöin numeroita tulee kaksi. Kun lähtöaineita on yksi, numeroita on yksi. Tavallisimpia polyamideja ovat PA 66, PA 610, PA 612, PA 6, PA 11 ja PA 12. Näistä polyamideilla 66 ja 6 on merkittävästi paremmat lujuus- ja lämmönkestominaisuudet kuin muilla, mutta heikompi kemiallinen kestävyys sekä korkeampi kosteudenabsorptio. Näiden alifaattisten polyamidien mekaaniset ominaisuudet ovat melko hyvät, mutta aramidikuituja huonommat. PA-kuitujen murtolujuus on alhaisempi ja murtovenymä paljon suurempi kuin esimerkiksi aramidikuiduilla. [19; 24; 26]

Ballistisissa sovellutuksissa käytetään pääsääntöisesti aromaattisia polyamideja, eli aramideja. Jonkin verran on käytössä myös alifaattisia polyamideja, niistä tyypillisesti PA 6 ja PA 66. Polyamidi kuidutetaan sulakehruumenetelmällä. Menetelmä mahdollistaa kuitujen ominaisuuksien muuntelun. Kuiduista saadaan lujia, kevyitä ja hankausta kestäviä. Lisäksi niillä on kohtalaisen hyvä kemiallinen ja mikrobien kesto. Säänkesto on parhaimmillaankin vain kohtuullinen, ja UV-säteily voi vahingoittaa PA-kuituja. [26]

3.5 Polyeteeni (UHMWPE)

UHMWPE on lineaarinen korkeatiheyksinen polyeteeni (HDPE), jolla on erittäin pitkät polymeeriketjut ja erittäin korkea molekyyliaino. Kun polyeteenivahoilla viskositeettimittauksiin perustuva keskimääräinen molekyyliaino on alle 10 000, niin UHMWPE-laaduilla molekyyliaino voi olla jopa useita miljoonia. Se on todella luja materiaali, jolla on korkein iskulujuus muoveista. [19; 27] Lujuuden maksimoimiseksi moolimassajakauman tulee olla kapea, eli polydispersiteetti-indeksi (M_w/M_n) on oltava korkeintaan 5. [28] Kemiallisesta reagoimattomuudestaan johtuen sillä on melko huono adheesio polymeerisiin matriisimateriaaleihin. Paras mahdollinen adheesiota parantava pintakäsittely saadaan käyttämällä kylmäkaasuplasmaa. Polyeteenin kemiallinen rakenne on kuvassa 3.5. [20; 21]



Kuva 3.5. UHMWPE:n kemiallinen molekyyli rakenne.

UHMWPE valmistetaan tyypillisesti Ziegler- tai metalloseenikatalyyttien avulla ja kuidutus tehdään sulakehruulla. Muovigranulaatit siis sulatetaan korkeassa lämpötilassa tasaiseksi polymeerimassaksi, joka puristetaan kehrusuulakkeiden läpi, venytetään

kuiduksi ja jäädytetään, jolloin kuitu jähmettyy. Kuidutetun UHMWPE:n polymeeriketjujen orientaatio voi olla yli 95 % ja kiteisyysaste nousta 85 prosenttiin. [3; 21; 29]

UHMWPE voidaan valmistaa myös geelikehruulla (gel-spinning). Kyseistä prosessia käytetään erikoislujien ja muiden erityiskuitujen tuotannossa. Polyeteenimolekyylit liuotetaan liuottimeen, liuos kuumennetaan ja ekstrudoidaan. Polyeteeni ei ole kuitenkaan täysin nestemäisenä kuten täydellisessä liuoksessa, vaan polymeeriketjut ovat sitoutuneet toisiinsa satunnaisista pisteistä nestekidemuodossa. Tällöin filamentteihin muodostuu ketjujenvälisiä voimia, mikä nostaa merkittävästi muodostuvien kuitujen vetolujuutta. Ekstruusiossa syntyvien leikkausvoimien takia nestekiteet asettuvat riviin kuidun pituusakselia pitkin. Filamentit muodostuvat erittäin korkea-asteisesti orientoituneina, mikä kasvattaa lujuutta vielä lisää. [3; 30]

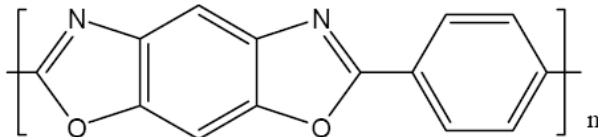
Hollantilainen yhtiö DSM kaupallisti 1970-luvun loppupuolella uuden korkean teknologian PE-kuidun, Dyneeman. Myös toista tunnettua UHMWPE-kuitua, Spectra-polyeteeniä, voidaan käyttää sekä kypärien että sirpaleliivien valmistukseen. Esimerkiksi ranskalaiset rauhanturvaajat ovat käyttäneet tällaisia kypäriä 1990-luvun alkupuolella, minkä jälkeen niitä suositeltiin myös Yhdysvaltoihin ja Eurooppaan poliiseille. [20]

Polyeteenikuidut eivät muuta ominaisuuksiaan vedessä toisin kuin aramidi, ja ne kestävät UV-valoa paremmin. Polyeteeni on osakiteinen polymeeri, jonka kiteisyysaste riippuu valmistusmenetelmästä. Polyeteenin kiteisyys kasvaa tiheyden kasvaessa. Lisäksi korkeamoolimassaisella polyeteenillä on matala sulaviskositeetti. Tällöin myös kovuus, moduli ja lujuus kasvavat ja termiset ominaisuudet paranevat. [29] Korkeamoolimassaisesta polyeteenistä valmistettuja kuituja käyttämällä voidaan laskea sirpaleliivin painoa jopa 15 prosenttia. Spectra-polyeteenin lujuus suhteessa painoon on kymmenen kertaa parempi kuin teräksellä. Aramidikuituihinkin verrattuna sillä on 40 % parempi ominaislujuus. [24]

Huonoja puolia ovat sen korkea hinta sekä sitkeyden aiheuttama huonompi kudottavuus ja muu prosessoitavuus. Säänkesto polyeteenikuiduilla on heikko, eivätkä ne kestä korkeita lämpötiloja. [22] Hyvin voimakkaasti orientoituneet molekyyliketjut heikentävät UHMWPE:n kulutuksenkestoa ja taivutusrasituksenkestoa, sillä pintakerroksen kuidut fibrilloituvat herkästi. [28]

3.6 PBO

PBO eli poly-p-fenyleeni-2,6-bentsobisoksatsoli on orgaaninen, aromaattinen, korkean lujuuden kuitumateriaali. Amidiryhmien sijaan sillä on heterosyklinen rakenne, joka takaa korkeamman elastisen modulin kuin aramidilla on. Kuvassa 3.6. on polymeerin kemiallinen rakennekuva. PBO-kuidulla on myös hyvät virumisominaisuudet ja kemiallinen kestävyys. Kuidut kestävät mekaanista kulutusta paremmin kuin esimerkiksi aramidikuidut, mutta huonommin kuin polyeteenikuidut. [23; 31]



Kuva 3.6. PBO:n kemiallinen molekyyli rakenne. [31]

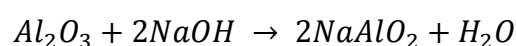
Japanilaisesta kauppanimellä Zylon™ tunnetusta PBO-kuidusta kokeiltiin valmistaa ballistisia sirpalesuojaliivejä. Ne jouduttiin kuitenkin vetämään pois markkinoilta vuonna 2001 vain kolmen vuoden tuotannon jälkeen. Kyseistä materiaalia käyttämällä olisi mahdollista saada yhtä suorituskykyinen sirpaleliivi kuin aramidista ja jopa puolet aramidiliivin paksuudesta, mutta hinta moninkertaistuisi. Lisäksi Zylonin valmistajan (Toyobo) omien tutkimusten perusteella kuidulla on ei-toivottuja ominaisuuksia. PBO-kuitujen ominaisuudet heikentyvät ajan mittaan heikon UV-valon- ja kosteudenkeston takia, mitä ei voi suojaliivisovellutuksissa hyväksyä. Kuidun lujuus heikkenee tasaisesti lämpötilan noustessa huoneenlämmöstä ylöspäin, aina kuidun hajoamiseen saakka. Toyobon mukaan kuidun lujuus on kuuden kuukauden UV-valolle altistamisen jälkeen enää 35 % alkuperäisestä. Toisaalta polyeteeniä ja PBO:a sekoittamalla on saatu melko hyviä tuloksia. [22; 23]

3.7 Keraamit

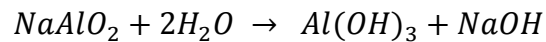
Keraamit ovat epäorgaanisia ja epämetallisia yhdisteitä. Niillä on hyvä kemiallinen ja rakenteellinen stabiilius myös hyvin korkeissa lämpötiloissa. Keraameilla on yleisesti korkea lujuus sekä moduli. Lujuudestaan huolimatta keraamit ovat samalla hauraita materiaaleja. Niiden puristuslujuus on erinomainen, mutta vetolujuus heikko. Ne kestävät hyvin korkeita lämpötiloja ja niiden sulamispiste on erittäin korkea. Keraameja käytetään paljon lujitteina korkeiden lämpötilojen rakenteellisissa materiaaleissa. [20]

Yleisin ja tärkein keraamimateriaali ballistisissa sovellutuksissa on alumiinioksidi, Al_2O_3 . Se voi muodostaa kolme erilaista allotrooppista muotoa. Stabiilein muoto on α -muoto, jota käytetään myös ballistisissa sovellutuksissa. Alumiinioksidiksi kutsutaan keraamia, jonka Al_2O_3 -pitoisuus on suurempi kuin 80 %. Alumiinioksidin puhtaus vaikuttaa siitä valmistetun luotisuojapaneelin tehokkuuteen. Puhtain mahdollinen (Al_2O_3 -pitoisuus ~99,5 %) on paras, ja puhtauden aletessa materiaali heikkenee. [32] Puhtaimmat alumiinioksidit ovat kuitenkin kalliita, joten usein käytetään noin 98-prosenttista.

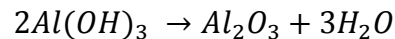
Alumiinioksidi voidaan valmistaa esimerkiksi Bayerin menetelmällä. Bauksiitti murskataan ja liuotetaan väkevään natriumhydroksidiin (NaOH). Liukenematon osa suodatetaan pois ja liuennut alumiini on natriumalumiinioksidin muodossa. [32; 33]



Natriumalumiinioksidin annetaan reagoida veden kanssa, jolloin muodostuu alumiinihydroksidia.



Kalsinoinnissa alumiinihydroksidi kuumennetaan 1200 - 1300 Celsius-asteeseen, jolloin saadaan alumiinioksidia ja sivutuotteena vettä.



Toiseksi yleisin keraami ballistisissa sovellutuksissa on boorikarbidi. Boorikarbideja on useita eriasteisia. Yhdisteen mekaaniset ominaisuudet riippuvat sen hiilipitoisuudesta. Ne paranevat 20 C at-prosenttiin asti, mikä vastaa rakennetta B₄C. Kemiallisesti kyseinen keraami on hyvin stabiili. Yleistäen boorikarbidikuitujen lujuusominaisuudet ja kimmomoduli ovat erinomaiset. Boorikarbidi on kalliimpi materiaali kuin piikarbidi ja alumiinioksidi. Boorikarbidista on mahdollista valmistaa kevyempiä luotisuojapaneeli- ta samalla suojaustasolla kuin alumiinioksidista. B₄C on kuitenkin huomattavasti kal- liimpaa kuin alumiinioksidi ja piikarbidi. Boorikarbidia valmistetaan booritrioksidista (B₂O₃) ja hiilestä. [20]

Kolmas käytetyistä keraamimateriaaleista on piikarbidi, SiC. Se on koko ajan yleis- tymässä luotisuojapaneelien valmistuksessa erinomaisten ominaisuuksiensa takia. Sillä on samanlainen kiderakenne kuin timantilla. SiC on hyvin luja, jäykkä ja kevyt materi- aali. Sillä on hyvä lämmönjohtavuuskyky, vaikka pääsääntöisesti keraamit ovat eristei- tä, ja lisäksi se on termisesti stabiili. Se on myös kemiallisesti stabiili, mutta reagoi voimakkaasti sulien metallien kanssa. Huono puoli piikarbidissa on se, että kuidun val- mistaminen on hyvin hankalaa. Piikarbidikuidut valmistetaan höyrystämällä kivihii- lervapohjaista hiilikuitua piikarbidilla. Ohutta SiC-kuitua saadaan käyttämällä sili- konipolymeeriä lähtöaineena. [20; 34]

Piikarbidia valmistetaan muun muassa reaktiosintrauksella. Tapa on jo 1950-luvulla käytetty, mutta vasta viime aikoina sitä on alettu käyttää luotisuojakeraamien valmis- tukseen. Reaktiosintrattu piikarbidi saadaan aikaan infiltroimalla piikarbidista ja grafiit- tista muodostettu huokoinen aihio kaasumaisella tai sulalla piillä. Pii ja hiili reagoivat keskenään muodostaen piikarbidia, joka sitoo alkuperäiset piikarbidipartikkelit yhteen. Lopullinen rakenne on piin ja piikarbidin komposiitti. Vaihtoehtoisesti voidaan aiheut- ta reaktio puhtaiden pulverimuodossa olevien piin ja grafiitin kesken. [32]

4 SIRPALELIIVIN JA LUOTISUOJAPANEELIN RAKENTEET

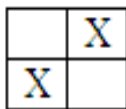
Materiaalin valinnan lisäksi henkilösuojavarusteiden suojaustasoon vaikuttaa niiden rakenne. Yleisin käytössä oleva rakenne on kudottu kangas, kun käsitellään niin kutsuttuja pehmeitä suojavarusteita, mutta myös erilaisia kuitukankaita käytetään. Kuitujen vaatimukset ja vaikutukset esiteltiin jo edellisessä kappaleessa. Myös erityyppisille kankaille ja muille rakenteille on omat vaatimuksensa.

4.1 Kudotut kankaat

Kudotussa kankaassa loimi- ja kudelangat ovat tasossa kohtisuorassa toisiaan vastaan ja kulkevat risteillen toistensa yli ja ali. Lankajuoksujen pituus ja sidospisteiden määrä riippuvat käytettävästä sidoksesta. Perussidoksia ovat palttina, satiini ja toimikas. Yleensä ballistisissa sovellutuksissa käytetään palttinasidoksellista kangasta.

Kudotun kankaan ballistisiin ominaisuuksiin vaikuttavat kuitujen ja lankojen dynaamis-mekaaniset ominaisuudet, kudontatiheys, sidostyyppi sekä kuitujen lukumäärä langassa. Sidoksen peittoluvun pitäisi olla 0,6 - 0,95, jotta voidaan saavuttaa parhaat mahdolliset ballistiset ominaisuudet. Peittoluku kuvaa sidoksen tiheyttä. Liian harvasta sidoksesta sirpale pääsee helposti läpi työntymällä kuitujen väleistä hajottamatta niitä. Tällöin sirpaleen tai luodin liike-energia ei pienene tarpeeksi ja se kykenee läpäisemään koko rakenteen helposti. [24]

Palttinasidoksellinen kangas on paras, sillä siinä loimi- ja kudelangoilla on eniten sidospisteitä verrattuna muihin sidoksiin. Mitä hienommasta kuidusta sirpaleliivi on tehty, sitä enemmän ja tiheämmässä siinä on sidospisteitä ja sitä paremmat ballistiset ominaisuudet sillä tällöin on. Kudotusta kankaasta valmistetut suojaliivit eivät suojaa kuitenkaan terävillä aseilla tehtäviltä iskuilta. Kuvassa 4.1. (alla) näkyy palttinasidoksen sidosraportin perusruuu vasemmalla puolella, ja oikealla on saman sidoksen skemaattinen kuva. Sidoksessa loimi- ja kudelangat kulkevat vuorotellen toistensa yli ja ali. Sidos on tällöin tasavaltainen ja kääntöpuoli on samannäköinen kuin pinta. [23; 24]



Kuva 4.1. Palttinasidoksen sidosraportin perusruuu ja skemaattinen kuva sidoksesta.

Kudotussa kankaassa kude- ja loimilangat ovat usein eri vahvuisia. Yleensä kudelangat ovat heikompia ja hajoavat ensin kangasta rasitettaessa. Ballistisissa sovellutuksissa on kuitenkin suositeltavaa käyttää molempiin suuntiin täsmälleen samanlaisia lankoja samalla tiheydellä ja saman verran. Tämä takaisi iskuenergian jakautumisen kankaaseen tasaisesti ja paremman energia-absorptioon, sekä kankaan tasalaatuisuuden eri suuntiin. [11] Lankojen on hyvä olla sellaisia, että niiden välinen kitkakerroin on korkea. Se estää lankoja luistamasta ja sidosrakenne pysyy kasassa. Kuitujen poikkileikkauksen muoto vaikuttaa kuidun pinta-alaan ja siten myös kitkan suuruuteen. Ballistisissa sovellutuksissa langat koostuvat yleensä pitkistä, hyvin vähäkierteisistä filamenttikuitukimpuista, kun tavallisissa tekstiileissä langat ovat tyypillisesti kierrettyistä säikeistä muodostettuja kierrettyjä rakenteita. [23]



Kuva 4.2. Vasemmalla Kevlar 29:sta kudottu kangas, johon sirpale on uponnut, mutta ei läpäissyt. Oikealla Twaronista kudottu palttinasidoksellinen kangas. [35; 36]

Kuvassa 4.2. on vasemmalla puolella Kevlarista kudottu kangas, jossa näkyy sirpale uponneena. Sirpale on aiheuttanut kankaan sidokselle vaurioita, ja osumakohdalta on muutama kude- sekä loimilanka lähtenyt vetämään. Lisäksi sidos on vääristynyt, kun sirpaleenreian ympärillä langat ovat joutuneet väistymään. Oikealla on vahingoittumaton Twaronista kudottu kangas.

4.2 Kuitukankaat

SFS TEVASTAN suosituksen mukaan kuitukangas määritellään seuraavasti: ”Suoraan kuiduista valmistettu kangas, jossa kuidut on sidottu toisiinsa mekaanisin, fysikaalisin tai kemiallisin menetelmin ja/tai niiden menetelmien yhdistelmin, ei kuitenkaan kutomalla, neulomalla tai ompelemalla. Huom.: Perinteisesti huovuttamalla valmistettuja kankaita eli huopia ja langoilla vahvistettuja kuitukankaita ei Tullitariffin eikä EDANAN määritelmän mukaan lasketa kuitukankaiksi.” [37]

Kuidut voivat olla kuitukankaassa yhdensuuntaisia, ristikkäisiä tai täysin satunnaisesti sekaisin. Todellisuudessa sekarainoissa on pystysuuntaisia kuituja melko vähän. Yhdensuuntaisrainan ominaisuudet ovat erilaiset pituus- ja poikkisuunnassa, kun taas

sekarainoissa ominaisuudet ovat suhteellisen tasalaatuiset molempiin suuntiin. Kuitukankaiden valmistusmenetelmiä ovat kuivamenetelmä (drylaying), märkämenetelmä (wetlaying), kehrumenetelmä (spinlaying) sekä suoramenetelmä (directlaying) jota voidaan soveltaa kolmeen ensimmäiseen tapaan. Ballistisiin suojaruuvareksovellutuksiin käytetään tyypillisesti kehrumenetelmää. [38]

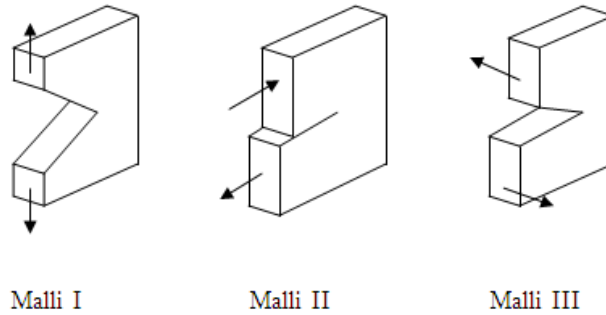
Kehrumenetelmässä polymeerisula ekstrudoidaan suulakkeiden ja reikälevyn läpi, minkä jälkeen muodostuvat kuidut jäädytetään halutulla tavalla filamenteiksi ja vedetään lopulliseen orientaatioon, muotoon ja pituuteen. Haluttu kuituorientaatio saadaan aikaan pyörittämällä kehrusuulaketta, ilmavirtojen avulla, sähköisillä varauksilla ja vedon määrällä. Filamentit voidaan ohjata suoraan liikkuvan kuljetinviiran päälle kuitumatoksi joko jatkuvana filamenttina tai katkokuituna. Tällöin on kyse suoramenetelmästä. Filamentit voidaan kuitenkin myös ajaa rullakartioille, jotka kuljetetaan kuitukankaan valmistukseen. [38]

Spectrasta valmistettu suojapaneeli on tyypillisesti kuitukangasta toisin kuin Kevlarista valmistettu. Toki aramidikuidustakin on mahdollista tehdä kuitukangasta ja polyeteenistä kudottua kangasta. Polyeteenisulasta kehrätyt ja jatkuviksi filamenteiksi jäädytetyt kuidut johdetaan yhdensuuntaisina suoraan liikkuvalla viiralla. Näin ne muodostavat yhdensuuntaisen kuitumatton. Kuitumatot päällystetään usein sideaineella ja useampia mattoja sidotaan yhteen neulaamalla tai tikkaamalla. Tikkausmenetelmällä rakenteesta tulee jäykempi, mutta siitä johtuen osumasta jäävä traumajälki jää pienemmäksi. Mitä tiheämpi tikkaus on, sitä jäykempi lopputulos. Kokonaisuus voidaan päällystää vielä molemmin puolin PE-kalvolla, jolloin saadaan aikaan sandwich-rakenne. [39]

4.3 Laminoidut kerroslevyrakenteet

Ballistinen rakenne voi olla myös laminoitu. Tällaisessa rakenteessa perustana ovat usein hyvin ohuet kuitukankaat. Siinä vuorottelevat jotkin termoplastiset kerrokset sekä yhdensuuntaiset kuitukankaat eli UD-kerrokset (uni-directional). UD-kerroksen materiaali voi olla aramidi, UHMWPE tai polyamidi.

UD-kerrokset vuorottelevat suunnissa, esimerkiksi $0^\circ / 90^\circ$. Tiiviisti vierekkäin olevista filamenteista koostuvat kuitumatot laminoidaan kiinteäksi ja jämähäksi levyksi käyttämällä joko molemmin puolin laminoitavaa kalvoa tai esimerkiksi dispergoimalla jokin sideaine kuitumattoon. [2; 40] Jokaisen UD-kerroksen välissä on yksi tai useampi termoplastinen kalvo ja kerroksia voi olla jopa useita kymmeniä. Kalvon ominaisuuksia hyödyntäen rakenne kiinnitetään yhtenäiseksi levyksi lämmön ja paineen avulla. Termoplastina käytettäviä materiaaleja ovat esimerkiksi polyolefiinimuovit – polyeteeni ja polypropeeni. Rakenteen ballistiset ominaisuudet paranevat, jos se sisältää 5 - 12 painoprosenttia jotakin elastomeeria. [40]



Kuva 4.3. Delaminoitumismoodit. [41]

Laminaattirakenteet voivat hajota usealla eri tavalla. Yllä on kuvattu kolme erilaista delaminoitumistapaa (kuva 4.3.). Ensimmäinen moodi näyttää kuinka kerrokset lähtevät irtomaan toisistaan kohtisuoraan pois päin, ikään kuin ohut levy halkeaisi vielä kahdeksi ohuemmaksi levyksi. Toisen delaminoitumismoodin mukaan kerrokset liukuvat sivusuunnassa toisistaan irti. Kolmas moodi on eräänlainen yhdistelmä näistä – kerrokset lähtevät aukeamaan samaan tapaan kuin ensimmäisessä mallissa, mutta samalla ne liukuvat vastakkaisiin suuntiin. Liimaukset voivat myös pettää kerroslevyrakenteessa. Liima-aine voi pettää (koheesiomurtuma), liiman tartunta voi pettää (adheesiomurtuma) tai laminaatin sisällä kerrokset voivat hajota (leikkausmurtuma). [34]

Tulevaisuudessa ballististen suojaliivien rakenteisiin pyritään käyttämään entistä ohuempia kuituja ja lankoja sekä tiheämpiä sidoksia. Niiden avulla voidaan saavuttaa vielä parempi suoja yhä pienempiä sirpaleita vastaan. Näin suojaliivin kokonaispaino ei nouse, vaikka suojaustaso paranee ja yksittäisten kerrosten määrä kasvaa. Hienompien kuitujen kehitys ja valmistus vie kuitenkin aikaa.

Taulukko 4.1. Kerroksien lukumäärän vaikutus suojaustasoon. [24]

Kerrosten lukumäärä	Materiaali	Suojaustaso
16-20	Kevlar	IIA
20-24	Kevlar	IIA
24-28	Kevlar	IIIA
1/4"	Teräs	III
1/2"	Teräs	IV

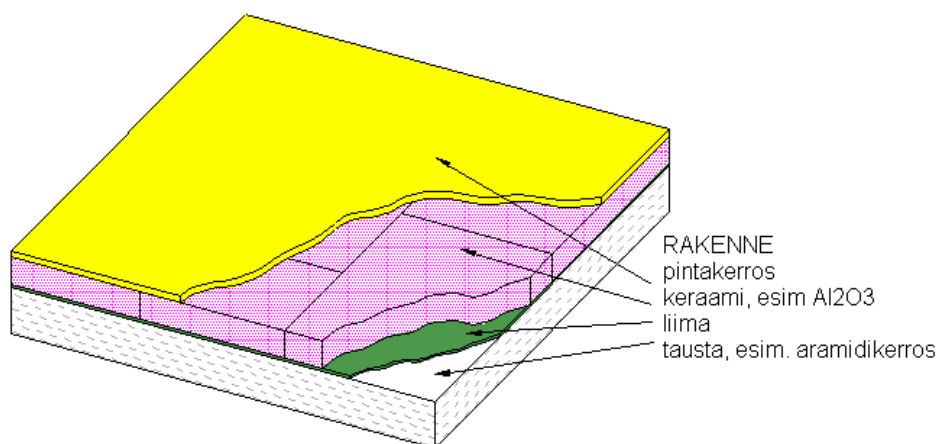
Kangasrakenteesta ja vaadittavasta suojaustasosta riippuen kerroksien lukumäärä voi vaihdella muutamasta kerroksesta jopa viiteenkymmeneen kerrokseen. Yllä (taulukko 4.1.) on taulukoituna esimerkkejä siitä, kuinka monta kerrosta Kevlarista valmistettuja kankaita suunnilleen vaaditaan, jotta saavutetaan tietty NIJ 0101.04 -standardin mukainen suojaluokka. Se ei ole kuitenkaan yksiselitteinen totuus, vaan asiaan vaikuttaa moni muukin tekijä. Vertailun vuoksi taulukossa on myös esimerkit panssariteräksen vaadittavasta paksuudesta. 1/4" vastaa 6,35 millimetrin paksuista ja 1/2" 12,7 millimetrin paksuista panssariterästä. [24]

4.4 Keraamipaneelien rakenteet

Keraami on sellaisenaan lähes hyödytön materiaali ballistisessa suojauksessa. Se on kyllä kovaa, mutta hyvin haurasta ainesta, eikä kestä useita iskuja. Haurautensa takia keraamipaneelit menevät helposti rikki, esimerkiksi maahan putoaminen voi aiheuttaa särkymisen ja käyttökelvottomuuden. Luotisuojapaneeleita pitää siis käsitellä varovasti kaikissa olosuhteissa.

Keraamilevyn takana on aina energiaa absorboiva materiaali, joka voi olla henkilösuojapaneelissa esimerkiksi aramidikuitua. Oikeanlainen keraamilevy pyrkii hajottamaan luodin ja jakamaan pistemäisen iskun vaikutuksen kartiomaisesti suuremmalle alueelle hajottaessaan keraamia. Taustalla oleva materiaali absorboi iskuenergiaa ja pysäyttää pienet irtosirpaleet. [2] Keraamipaneeli on tarkoitettu suojaamaan AP-luoteja vastaan. Myös keraamipaneelin pinnassa tulee olla kerros, joka estää murenevia keraamipaloja sinkoilemasta ympäriinsä, sillä nekin voivat aiheuttaa vammoja lentäessään esimerkiksi kaulaan ja kasvoihin. [42; 43]

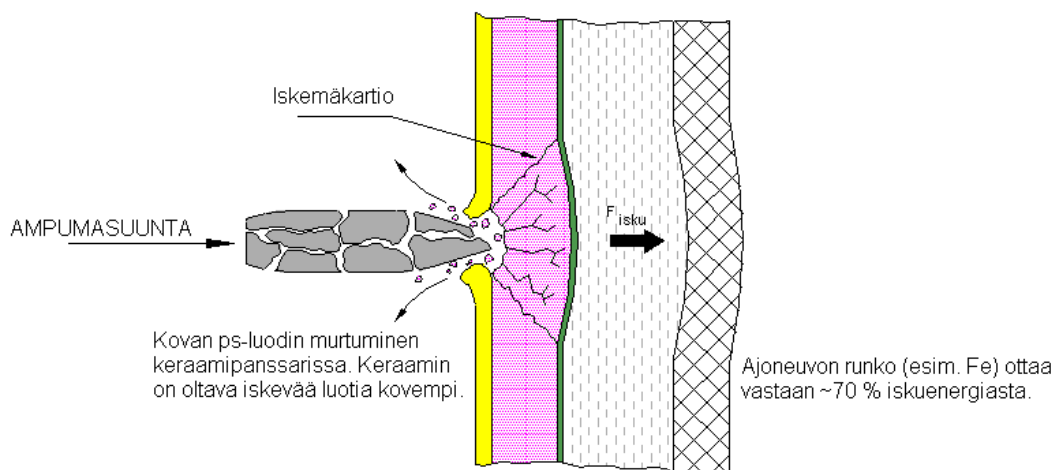
Kuvassa 4.4. on tyypillinen keraamipaneelin rakenne. Välissä voi olla myös iskua vaimentava materiaali, kuten esimerkiksi kanadalaisissa malleissa. Luotisuojapaneelin tehokkuuteen voidaan vaikuttaa keraamikerroksen paksuudella. Liiman tulee olla sellaista, että sillä on hyvä adheesio sekä keraamipintaan että taustamateriaaliin.



Kuva 4.4. Keraamisen luotisuojalevyn rakenne. [42]

Luotisuojapaneelin keraamiosa voi olla iso, yhtenäinen levy, jolloin paneeliin on mahdollista saada kaarevuuksia. Kaareva rakenne mukautuu paremmin ihmisvartalon liikkeisiin ja on mukavampi päällä. Yhtenäisessä, eli monoliittisessä keraamipaneelissa on tosin se huono puoli, että se ei kestä useita iskuja, vaan säröt ja halkeamat pääsevät etenemään rakenteen reunoihin saakka. Keraamikerros voi olla myös pienistä keraamilaatoista tehty, kuten kuvassa 4.4 näkyy. Tällöin luotisuojapaneelista on tehtävä kuitenkin täysin suora, ja tällaisessa rakenteessa laattojen väliset saumakohtat ovat heikkoja. Hyvä ominaisuus tässä vaihtoehdossa on se, että iskusta aiheutuneet vauriot eivät etene koko paneelin pinta-alalle, vaan pysähtyvät yleensä ensimmäiseen saumakohtaan. Tällöin luotisuojapaneeli saadaan kestävämmän useita iskuja. [43]

Keraaminen luotisuojalevy vastaanottaa ja pystyy ”tuhoamaan” vain 30 prosenttia luodin kineettisestä energiasta. Loput 70 % pääsee etenemään suojattuun kohteeseen asti. Näin ollen vaikka läpäisyä ei tapahtuisi, isku on niin voimakas, että se voi vaurioittaa sisäelimiä ja luita. Keraamipaneelin sirpaloitumisen lisäksi tästä syystä paneelin takana tulee olla energiaa absorboiva kuitumateriaalikerros. [42]



Kuva 4.5. Keraamilevyn toimintaperiaate ballistisessa suojauksessa. [42]

Kuvassa 4.5. näkyy keraamisen luotisuojapaneelin toimintaperiaate, kun siihen osuu luoti. Vaikka kuvassa on kyse ajoneuvon suojauksesta, sama pätee henkilösuojaimiin. Kova keraamilevy pyrkii hajottamaan luodin, joka ei tällöin läpäise paneelia. Luodin hajoaminen edellyttää sitä, että keraami on kovempi kuin iskevä luoti. Toinen mekanismi on iskemäkartion muodostus. Keraamikerros jakaa iskuenergian laajemmalle alueelle siten, että iskukohdan taakse muodostuu hajonneesta keraamista vähitellen levenevä kartiomainen alue. Tällöin siis iskuenergian levitessä laajemmalle alueelle suurempi pinta-ala paneelissa osallistuu läpäisyn estämiseen. [42]

5 BALLISTISEN KYPÄRÄN RAKENNE

Komposiittikypäriä on käytössä sotilaiden ja poliisien lisäksi esimerkiksi moottoripyöräilijöillä. Komposiittirakenteilla voidaan saavuttaa ainutlaatuisia termomekaanisia ominaisuuksia, jotka eivät ole mahdollisia tavanomaisille materiaaleille. Niillä saadaan aikaan korkea lujuus ja sitkeys materiaalin säilyessä kuitenkin erityisen kevyenä. Kuitukomposiitissa on kuituja noin 80 % kokonaisuudesta. Kuten taulukosta 5.1. voidaan huomata, kypärien kehitys on ollut merkittävä. Kypäran painon laskiessa huomattavasti ominaisuudet ovat silti parantuneet ja suojaava pinta-ala kasvanut. Verrattuna vanhanmalliseen teräskypäran aramidikypäran v_{50} -arvo on lähes kaksinkertainen. [2; 14]

Taulukko 5.1. Vertailu vanhan saksalaisen teräskypäran ja nykyaikaisen aramidikomposiittikypäran välillä. [44]

	Teräskypäriä 1A1	Aramidikypäriä
Kuoren paino (kg)	1,020	1,000
Pinta-ala (m ²)	0,109	0,118
Pinta-alamassa (kg/m ²)	9,32	8,48
V_{50} (m/s)	360	630

Komposiittikypäran lujitekuituna käytetään aramidia ja jonkin verran polyeteeniä. Myös polyamidi on mahdollinen, mutta ei yhtä hyvä ballistisilta ominaisuuksiltaan. Komposiittirakenteen matriisina, sideaineena kerrosten välillä sekä komposiittirakenteen jäykisteenä toimii esimerkiksi vinyyliesteri- tai fenoli/PVB -hartsit. [45]

Kypäran komposiittirakenne voidaan muodostaa samantyyppisesti kuin laminoitu kerroslevyrakenne. Aramidikuiduista muodostetaan tasainen matto asettamalla kuidut tiiviisti vierekkäin. Kuidut sidotaan toisiinsa laminoimalla sopivasta materiaalista tehdyllä kalvolla tai jollakin sideaineella, kuten suojapaneelinkin laminoinnissa. Kuitumateriaali on siis komposiittirakenteen lujitemateriaali ja sideaine toimii matriisina. Ideaalissa tapauksessa kuidut ovat tasalaatuisia ja symmetrisiä, sekä asettuneet tasaiseen jakaumaan. Yksisuuntaisessa lamellissa kaikki kuidut ovat samansuuntaisesti orientoituneet. Komposiittirakenteessa kerrokset pinotaan päällekkäin siten, että kuitusuunta vaihtelee kerroksittain esimerkiksi 0°/90° tai 0°/45° - vaihtoehtoja on lukuisia. [14; 45]

Suomessa käytössä oleva komposiittikypäri valmistetaan kudotusta aramidipreg-kankaasta. Yksi kerros on noin kaksi millimetriä paksu palttinasiidoksellinen, hyvin tiheäksi kudottu kangas. Preg-kankaasta leikataan lakiosaan timantinmuotoinen ja sivuille epäsäännölliset suikalepalat, jotka ommellaan kypäran muotoon. Kerrok-

sia ladotaan päällekkäin tarvittava määrä, ja kokonaisuus puristetaan lämmön ja voiman avulla yhteen. [45]

Kypärän reunassa on hyvä olla jokin käsittely, joka estää kerrosten delaminoitumisen sekä vieraiden aineiden ja kosteuden pääsyn kerrosten väliin. Suomen sotilaskäytössä oleviin kypäriin on valettu elastomeerista reunanauha, joka pysyy paremmin kiinni kuin monissa muissa maissa kypärän reunaan liimattava kumimateriaali. Se estää myös rakenteessa mahdollisesti suuntaa muuttavan sirpaleen pääsyn reunasta ulos ja alas kohti selkää tai olkapäätä. Kotimainen kypärä on esikyllästetty fenolilla. [6; 45]

Samantyyppistä kypärää valmistetaan esimerkiksi Norjassa, mutta kypärä tehdään valmiista prepreg- eli puolivalmistelevystä puristamalla, kun taas Suomessa muotoon ommellut yksittäiset prepreg-kangaskerrokset kootaan halutunkokoiseen pinnoon ja puristetaan siis tällaisena kokonaisuutena tiiviiksi. [45] Norjan tapa on halvempi, yksinkertaisempi ja nopeampi kuin Suomessa käytössä oleva, sillä levyä voidaan tehdä metri-tavarana ja siten kypäriä sarjatuotantona, mutta aiheuttaa myös ongelmia. Kun levy puristetaan muotin päälle lämmön avulla ja venytetään oikeaan muotoonsa, levyn keski-kohta eli kypärän päälaki ohenee melko paljon. Lisäksi sisäpintaan muodostuu vekkejä. Tällöin sen pitkäaikaiskestävyys on heikompi kuin palasista käsin kootulla rakenteella.



Kuva 5.1. Kotimaisen aramidikomposiittikypärän sisäosat. [45]

Yläpuolella olevassa kuvassa (5.1.) on FY-Composites Oy:n valmistaman Puolustusvoimilla käytössä olevan komposiittikypärän sisäosat. Kuten kuvasta näkyy, kypärä on säädettävissä useista pisteistä. Lakipala vaimentaa suoraan yläpuolelta tulevia iskuja. Sisäosienkin materiaalit ja ominaisuudet on lueteltu liitteenä olevissa kypärien teknisissä erittelyissä.

6 TESTAUS

Suojaliivien ja kypärän testauksessa voidaan käyttää samaa laitteistoa ja samaa tekniikkaa. Sekä sirpaleliivit että kypärät testataan Suomessa STANAG 2920 *Ballistic Test Method for Personal Armour Materials and Combat Clothing* -standardin (myöhemmin STANAG 2920) mukaan sirpaleilla. Tämä ei oikeastaan ole virallinen standardi, vaan vakiointisopimus, jonka tarkoitus on yhdenmukaistaa NATO:n käytössä olevia teknisiä normeja ja käytäntöjä sen jäsen- ja yhteistyövaltioiden puolustus- ja asevoimien yhteistoiminnan parantamiseksi. STANAG 2920 pitää sisällään testausmenettelyn v_{50} -arvon määrittämiseksi. [46]

Yhdysvaltalainen National Institute of Justice (NIJ) on laatinut luotisuojille suoja-luokkataulukon, joka on käytössä myös laajasti ympäri maailmaa. Se löytyy standardista NIJ Standard-0101.06 *Ballistic Resistance of Body Armor*. Taulukossa määritetään tarkasti asetyypit, nopeudet iskuhetkellä, luotien massat sekä suurimmat sallitut osuman aiheuttamat painaumat, traumat. Useilla mailla on kuitenkin rinnalla myös omat suojaustasoluokituksensa. Standardi pitää sisällään myös luotisuojajaneelien sekä sirpale-suojaliivien testauksen luodeilla. [47]

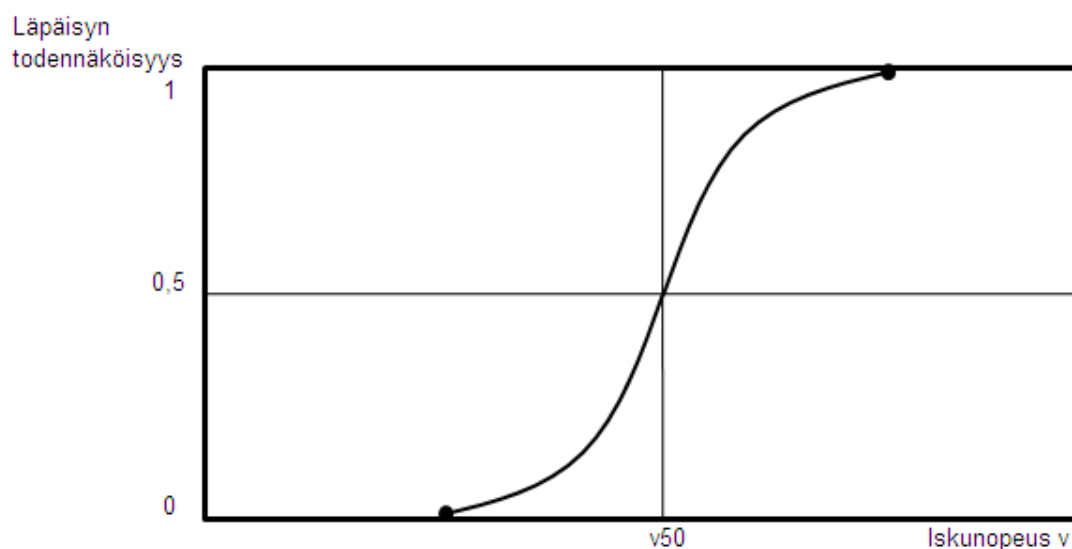
6.1 V_{50} -arvo

V_{50} -arvo on tärkeä käsite suojavaarusteiden ballistisessa testauksessa. Termin tausta ja merkitys tulee ymmärtää täysin, jotta sitä voi käyttää tarkoituksenmukaisesti. Yksinkertaistettuna se tarkoittaa sirpaleen sitä nopeutta, jolla täydellisen läpäisyn (complete perforation) todennäköisyys on 0,5. Nopeudella tarkoitetaan aina iskunopeutta, ei projektii-
lin lähtönopeutta. Mitä suuremman v_{50} -arvon kypärä tai suojaliivi saa, sitä paremmin se suojaa sirpaleilta. Arvo määritetään tarvittaessa jokaiselle erikokoiselle ja erimuotoiselle sirpaleelle erikseen. V_{50} -arvo on oikeastaan ainoa mittari, jolla voidaan vertailla eri suo-
javarusteiden ballistisen suojauskyvyn paremmuutta.

Arvon määrittämiseen tarvitaan parillinen määrä testiammuntoja, kuitenkin vähintään kuusi. Yhtä monen sirpaleen pitää pysähtyä testimateriaaliin ja läpäistä se. Aloitusnopeudeksi ensimmäiselle sirpaleelle valitaan oletettu v_{50} -arvo. Jos sirpale pysähtyy, seuraava ammutaan 30 m/s suuremmalla nopeudella. Jos sirpale taas läpäisee kohteen, seuraava ammunta suoritetaan 30 m/s alhaisemmalla nopeudella. Kun saadaan kolme pysäytystä tai läpäisyä, seuraavat sirpaleet ammutaan 15 m/s suuremmalla tai pienem-
mällä nopeudella. Näin jatketaan, kunnes on saatu yhteensä vähintään kolme pysäytystä ja vähintään kolme läpäisyä. [46]

Nopeuksien ero ei saa olla yli 40 m/s. Mikäli tällaisella nopeuserolla ei saada hyväksytyjä tuloksia, testiammuntoja jatketaan, kunnes saadaan viisi läpäisyä ja viisi pysäytystä nopeuseron ollessa 50 m/s. Jos vieläkin ei onnistuta saamaan hyväksytyjä tuloksia, jatketaan seitsemään läpäisyyn ja pysäytykseen. Tällöin nopeusero saa olla 60 m/s. Näin saadaan riittävän tarkka lopputulos. [46]

Lopullinen v_{50} -arvo on nopeuksien aritmeettinen keskiarvo. Keskiarvo lasketaan tyypillisesti kolmesta alhaisimmasta läpäisy nopeudesta ja kolmesta korkeimmasta pysäytymisnopeudesta. Tuloksista piirrettävä v_{50} -käyrä on kuvan 6.1. mukaisesti loivan s-kirjaimen muotoinen. Käyrä kuvaa siis läpäisyn todennäköisyyttä iskunopeuden funktiona. Alhaisilla nopeuksilla läpäisyn todennäköisyys on näin ollen nolla ja nopeuden kasvaessa myös läpäisyn todennäköisyys kasvaa. Todennäköisyys ei siis kuitenkaan kasva lineaarisesti suhteessa nopeuden kasvuun. Kuvaajasta v_{50} -arvo saadaan s-käyrän puolesta välistä.

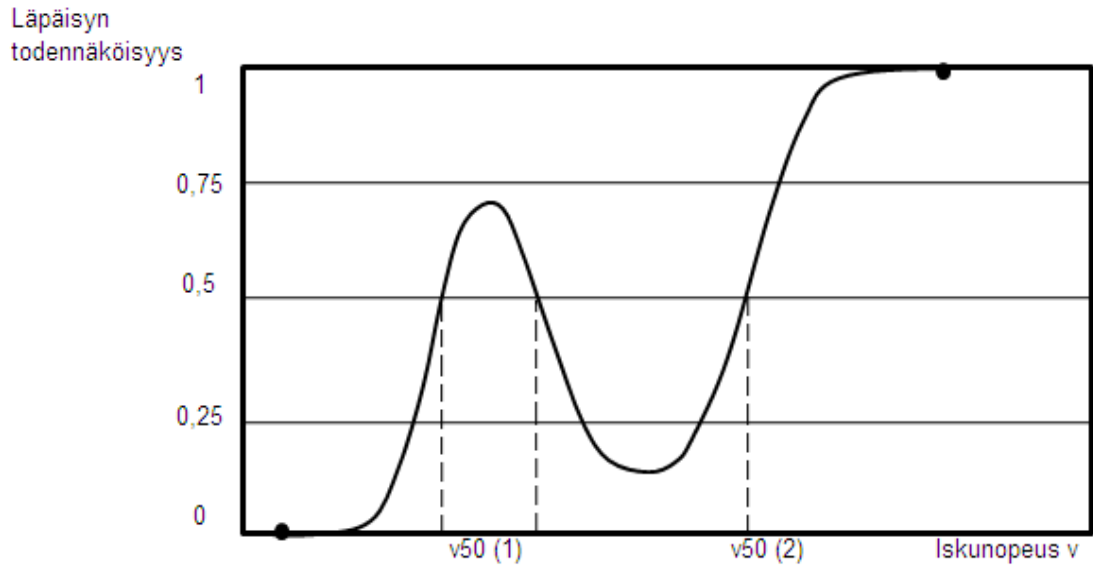


Kuva 6.1. V_{50} -käyrä. [46]

Käytössä on myös termi v_0 . Se on teoreettinen maksiminopeus, jolla läpäisyä ei tapahdu, eli läpäisyn todennäköisyys on nolla. V_0 -arvo ei ole kuitenkaan yhtä kattava ja informatiivinen kuin v_{50} , joten erikseen ei ammuta v_0 -arvoja. Samalle asialle on myös toinen määritelmä eri näkökulmasta katsottuna. Ballistinen raja-arvo, v_{BL} , on alhaisin nopeus, jolla tietty projektiili läpäisee täydellisesti tietyn tiheyden ja tiettyjen ominaisuuksien materiaalin tietyllä osumakulmalla. V_0 -arvo voidaan laskea vähentämällä v_{50} -arvosta koesarjan keskihajonta. Näin saatu arvo ei kuitenkaan ole absoluuttinen takuu siitä, että läpäisyä ei tapahtuisi. [48]

Hyvin laajalla nopeusalueella v_{50} -käyrä on erilainen, kun ammutaan keraamilevyjä kovilla luodeilla. Tällöin puhutaan kaksivaiheisesta v_{50} -käyrästä. Ilmiössä on kyse siitä, että ammuttaessa suhteellisen korkeilla nopeuksilla ($v_{50} 1$ ja $v_{50} 2$ välissä oleva kuoppa) luoti hajoaa, eikä läpäisyä tapahdu sen takia. Vähän alhaisemmilla nopeuksilla luoti kuitenkin läpäisee kohteen melko suurella todennäköisyydellä, sillä iskuenergia on riit-

tämätön hajottamaan luotia. Kun nopeutta nostetaan riittävän paljon yli edellä mainitun kuopan, iskuenergia kasvaa niin paljon, että hajonnutkin luoti läpäisee luotisuojapaneelin. Tästä seuraa se, että keraameilla on tyypillisesti kolme v_{50} -arvoa, kaksi alhaista v_{50} -arvoa (1) ja yksi korkea v_{50} -arvo (2). Periaate on esitetty alapuolella olevassa kuvassa 6.2. Ilmiön englanninkielinen nimitys on shatter-gap. [32; 49]



Kuva 6.2. Kaksivaiheinen v_{50} -käyrä keraamipaneeleille. [49]

Kuvassa olevan käyrän esittämiä nopeuseroja voidaan havainnollistaa lukuarvoilla. Jos ensimmäisten v_{50} -arvojen katkoviivalla merkityt nopeudet ovat esimerkiksi 760 m/s ja 780 m/s, niiden jälkeisen kuopan pohjalla nopeus voi olla 820 m/s, ja korkeampi v_{50} -arvo voi olla tällöin 850 m/s. Nämä lukuarvot eivät ole absoluuttisia arvoja, vaan hieman suuntaa-antavia hahmottamisen helpottamiseksi. [49]

6.2 Esivalmistelut testausta varten

6.2.1 Sirpalesuojaliivit ja luotisuojapaneelit

Kaikkien standardien ja suositusten mukaan testattavat näytteet on esi-ilmastoitava. Näytteiden tulee olla vapaana, ilman minkäänlaista räsitusta, vähintään 24 tuntia vakioolosuhteissa. Lämpötilan marginaali on STANAG 2920:n mukaan ± 2 °C ja ilman suhteellisen kosteuden ± 5 %. Vakioarvot pitää kirjata testausraporttiin. Nämä lukemat koskevat sekä kevytliivejä että kovia luotisuojapaneeleja. NIJ 0101.06 -standardin mukaan esi-ilmastointi tapahtuu 25 ± 10 °C lämpötilassa suhteellisen kosteuden ollessa 20 - 50 %. [46; 47]

NIJ-standardin mukaan sirpalesuojaliivien esirasitukseen kuuluu kastelun lisäksi niiden altistaminen räsituksille rummussa, joka pyörii kymmenen vuorokauden ajan (\pm

1 h) nopeudella $5,0 \pm 1,0$ rpm, eli yhteensä 72000 ± 1500 täydellistä pyörähdystä. Kulutuskestävyyteen vaikuttava käsittely tapahtuu vakio-olosuhteissa. [47]

Testauksessa käytettävä koease valitaan kaliiperin tai sirpaleen koon, sekä haluttujen nopeuksien mukaan. Koease kiinnitetään telineeseen ja luoti tai projektiili laitetaan aseeseen. Testattava materiaali kiinnitetään koeammuntasuunnitelman tai käytettävän standardin mukaiselle etäisyydelle koeaseen piipun päästä. Mikäli halutaan määrittää trauman suuruus, testattavan materiaalin taakse asetetaan muovailuvahamainen materiaali. Käytössä on yleisesti Roma Plastilina N:o 1. Tätä käsitellään tarkemmin kappaleessa 6.6. Koeammunnoissa, joissa käytetään todistelevyä, kiinnitetään ohut alumiini-levy testattavan kappaleen taakse 15 senttimetrin etäisyydelle. Levynä käytetään usein 2024-T3 tai 2024-T4 -alumiinia. Näiden paksuus on ainoastaan 0,5 millimetriä. [47]

Suojavarusteiden valmistaja voi määrittellä hyväksytyt etäisyydet reunan ja osuman välille jokaiselle testikappaleelle ja sirpaleelle erikseen. NIJ 0101.06 kuitenkin määrittelee sitä noudattaville testeille ehdottomat minimi- ja maksimit näille etäisyyksille. Vierekkäisten osumien pienin hyväksytyt etäisyys on 51 millimetriä. Liian lähelle ammuttava testisirpale tai -luoti osuu jo valmiiksi heikentyneelle alueelle ja vääristää näin ollen tulosta. [47] STANAG 2920:n mukaan etäisyyden reunoihin, reikiin ja edellisiin osumakohtiin on oltava vähintään viisinkertainen käytettävän projektiilin kaliiperiin verrattuna. Testattavaan suojaruusteeseen merkitään suunnitellut osumakohtat. [46]

Jokaisesta sirpalesuojaliivistä ja luotisuojapaneelistä tulee löytyä valmistajan nimi tai muu tunnistus sekä paikka, suojausluokka ja sen määrittävä standardi, paneelin koko, sarjanumero ja valmistuspäivämäärä. Lisäksi paneeliin pitää merkitä etu- ja takapuoli, kun luotisuojapaneeli on oikeaoppisesti sijoitettu liiveihin. Testikappaleissa pitää olla merkittynä maininta siitä, että kyseessä on nimenomaan testikappale, jolloin sen kestävydestä ei voida mennä takuuseen. [47]

Uuden, vielä työn alla olevan neljännen STANAG 2920 -version myötä merkinnät tulevat muuttumaan suojaustason merkitsemisen osalta. Uusi versio tulee määrittelemään myös luotisuojaluokat. Suojavarusteen suojausluokka merkitään siten, että ensin on luotisuojaluokitus sekä pysäytysnopeus, ja sen perässä sirpaleen tyyppi sekä v_{50} -arvo. Kovissa luotisuojapaneeleissa tulee olla merkittynä myös osumien lukumäärä sekä reuna-alueet. Tämän luotisuojaluokkataulukon tämänhetkinen versio merkintätapamalleineen ovat liitteenä 6. [49]

6.2.2 Kypärä

Kypärille määritetään yleensä sirpaleenkesto ja luodinkesto erikseen. Kypärän luodinkeston testaamisella ei tosin kovin suurta merkitystä ole, sillä kypärän ensisijainen tehtävä on suojata päätä sirpaleilta. Luodeilta suojaamiseen se soveltuu huonosti. Kypärä asetetaan tarvittavan etäisyyden päässä aseensa piipusta olevaan telineeseen ja kiinnitetään tavalla, joka ei häiritse testin suorittamista tai vääristä tulosta. Tyypillisin etäisyys on viisi metriä.

Hyvin laajasti ympäri maailmaa käytössä olevan NIJ Standard (NIJ-STD-) 0106.01 *For Ballistic Helmets* määrittelee kypärille luodinkestävyyden. Sen mukaan kypärät voidaan jakaa kolmeen luokkaan. Taulukkoon 6.1. on kerätty kyseisen standardin eri suojuokkatyypit ja niiden vaatimukset. Kypärää testattaessa tulee ampua neljä onnistunutta osumaa ja yksikään ei saa läpäistä kypärää. [50]

Sirpaleenkesto määritetään STANAG 2920:n mukaisesti kuten sirpalesuojaliiveillekin, siten saadaan kypärän v_{50} -arvo. Suojaustasot luoteja vastaan määritellään luokasta II ylöspäin kuten suojuoliiveille, standardin NIJ 0101.04 tai 0101.06 mukaan.

Taulukko 6.1. Kypärän luodinkestävyys standardin NIJ Standard 0106.01 *For Ballistic Helmets* mukaan. [50]

Tyyppi	Testimuuttujat			Vaatimukset		
	Ase	Luodin massa (g)	Piipun pituus (cm)	Luodin nopeus (m/s)	Onnistuneet osumat	Sallitut läpäisyt
I	22 LRHV Lead	2,6	15,0 - 16,5	320 ± 12	4	0
	38 special RN Lead	10,2	15,0 - 16,5	259 ± 15	4	0
II-A	357 Magnum JSP	10,2	10,0 - 12,0	381 ± 15	4	0
	9mm JSP	8,0	10,0 - 12,0	332 ± 15	4	0
II	357 Magnum JSP	10,2	15,0 - 16,5	425 ± 15	4	0
	9mm JSP	8,0	10,0 - 12,0	358 ± 15	4	0

NIJ 0106.01 -standardin mukaan läpäisytesti on suoritettava vähintään kahdelle kypärälle. Ensimmäinen testataan kuivana ja toinen märkänä. Toisen on oltava kahdesta neljään tuntia 25 ± 5 -asteisessa vedessä. [50] STANAG 2920:n mukaan kypärän testaukseen pätee samat esi-ilmastointimääräykset kuin sirpaleliivien testaukseen. [46]

6.3 Sirpaleen tai luodin valinta

Sirpaleen koko ja luodin tyyppi valitaan määritetyn uhkakuvan perusteella. Taulukossa 6.2. on esitetty STANAG 2920:n mukaiset sylinterinmuotoiset sirpaleet. Yleisimmin käytetty testaussirpale on 1,1-grammainen. Taulukossa kirjain A merkitsee sirpaleen halkaisijaa ja kirjaimella B on merkitty sirpaleen pituutta arvioiden. Mikäli testiammunoissa käytetään kyseisenlaisia sirpaleita, testausraportissa riittää maininta sen massasta. Jos sirpale poikkeaa standardista, raportissa tulee olla tarkka selvitys tästä. [46]

Taulukko 6.2. STANAG 2920 -ohjeen mukaiset mitat sylinterinmuotoiselle pikkusirpaleelle. [46]

massa (g)	A (mm)	B (mm)
4,15 ± 0,03	8,74 ± 0,03	8,82
2,83 ± 0,03	7,49 ± 0,04	8,19
1,10 ± 0,03	5,39 ± 0,06	6,17
0,49 ± 0,03	4,06 ± 0,14	4,78
0,33 ± 0,03	3,60 ± 0,19	4,07
0,24 ± 0,03	3,25 ± 0,22	3,64
0,16 ± 0,03	2,64 ± 0,27	3,77

1,1 g on yleisin testaussirpaleen massa sen takia, että suurin osa tykistökranaattien sirpaleista painaa 0,1 - 10 g. Muiden yleisesti käytössä olevien pienten testaussirpaleiden massat ovat 0,237 grammaa sekä 5,3 grammaa. Räjähävän ammuksen sirpaleen lähtönopeus riippuu räjähdeaineesta ja ammuskuoresta. Kirjallisuudessa sirpaleen lähtönopeuden oletetaan yleensä olevan 1200 m/s. Testauksessa käytettävä nopeusalue riippuu käytössä olevasta laitteistosta ja koeaseesta. [6]

Valittu sirpale asetetaan muoviseen sabottiin, joka laitetaan hylsyn sisään. Sabotti kuoriutuu sirpaleen ympäriltä heti, kun se on irronnut piipusta. Pelkkä sirpale jatkaa matkaansa kohti maalia. Saavutettavaan nopeuteen voidaan vaikuttaa laitteiston lisäksi hylsyyn annosteltavalla ruudin määrällä. Mitä enemmän käytetään ruutia, sitä suurempiin nopeuksiin päästään. Alhaisilla nopeuksilla ruutia annostellaan vähemmän. Isot sirpaleet (54 grammaa) ammutaan ainakin PVTT:lla Lakialassa 37-millimetrisellä panssaritorjuntatykillä.

6.4 Märkätestaus

Suojavarusteen rakenteeseen pääsevä kosteus voi heikentää ballistista suojauskykyä. Kosteus pienentää kuitujen tai lankojen välistä kitkaa, ja näin sirpale työntää iskutapah- tumassa helpommin kuituja sivuun tieltään. Kosteus vaikuttaa myös heikentävästi joi- denkin kuitujen lujuteen. Kosteus voi vaikuttaa myös luotisuojapaneelin ominaisuuks- siin. Tästä johtuen testit suoritetaan yleensä sekä kuivalle että kostealle materiaalille erikseen. Näin saadaan varmistettua, että suojavaruste toimii moitteettomasti myös kos- teissa olosuhteissa.

Esirasitetuille sirpalesuojaliiveille suoritetaan vain kuivatestaus. NIJ 0101.06 - standardin mukaan jokainen paneeli ja suojaliivi tulee asettaa roikkumaan veteen 30 - 35 minuutiksi siten, että varusteen yläreuna on 100 ± 25 mm veden pinnan alapuolella ja että sen ympärillä on vähintään 50 mm tilaa joka suunnassa. Kelluviin suojavarustei- siin asetetaan painot alakulmiin, mutta muuten testattavaan kappaleeseen ei saa kohdis- tua rasiuksia kastelun aikana. [47]

Asianmukaisen kastelun jälkeen suojaliivi tai paneeli tulee ripustaa vertikaalisesti ja sen tulee antaa kuivua 10 - 15 minuuttia ennen testin suoritusta. Testaus tulee suorittaa kokonaisuudessaan 40 minuutin sisällä siitä, kun testattava kappale on poistettu vedestä. Veden lämpötilan on oltava 21 °C, kun marginaali on + 2,9 °C / - 5,8 °C. [47]

6.5 Testin suoritus

6.5.1 Sirpalesuojaliivit

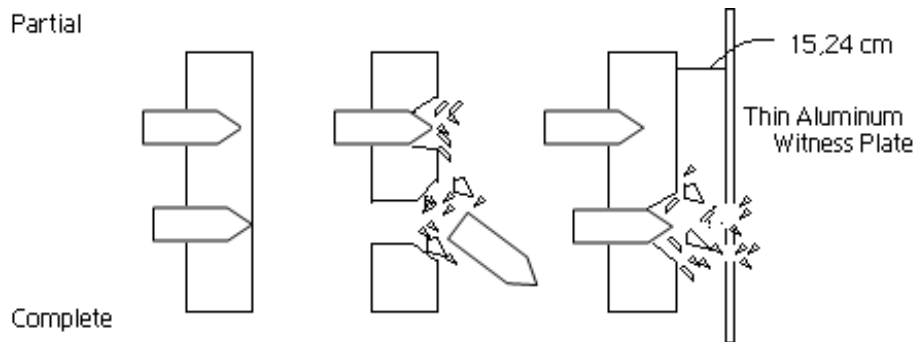
Ballistiset testit tulee suorittaa vakio-olosuhteissa. STANAG 2920 ilmoittaa ainoastaan raja-arvot vakio-olosuhteille. Ne ovat ± 5 °C ja ± 10 %. [46] Aikaisempi versio kyseisestä ohjeesta määritteli myös vakio-olosuhteet, mutta muutamien jäsenmaiden vastustuksesta ne jätettiin pois uusitusta ohjeesta. Mikäli testausolosuhteet eroavat esi-ilmastoinnin olosuhteista, testaus tulee suorittaa 45 minuutin kuluessa esi-ilmastoinnin päättymisestä. [46] NIJ 0101.06:n mukaan testiolosuhteet kuiville sirpalesuojaliiveille ovat $21 \pm 2,9$ °C ja suhteellinen ilmankosteus 50 ± 20 %. Esirasitetuille olosuhteet ovat 65 °C ja RH 80 %. [47]

Testaukseen tarvitaan 14 sirpalesuojaliiviä jokaista luotityyppiä kohden. Näin ollen tyyppien NIJ IIA - IIIA liivejä tarvitaan 28 kappaletta kutakin, sillä näihin suojaluokkiin kuuluu kaksi eri luotia. Tyyppien III ja IV sirpalesuojaliivit testataan vain yhdellä luodilla, joten liivejä tarvitaan 14. Harva kevytliivi tosin on tasoa NIJ III tai IV. Jokaisessa sarjassa pitää olla sekä suuria että pieniä kokoja, molemmista sekä kuivia uusia että esirasitettuja. [47]

Kun testataan kudotusta kankaasta valmistettua sirpaleliiviä, on otettava huomioon rakenteessa risteilevät langat. Yhteenkään kude- tai loimilankaan ei saa kohdistua useampaa kuin yksi laukaus. Rinnakkaisammunnat on siis tähdättävä tarkasti eri puolille testimateriaalia siten, että vaurioituneisiin loimi- ja kudelankoihin ei osuta. [46]

Testattavaa materiaalia voidaan ampua joko kohtisuoraan tai jostakin tietyistä kulmista, tyypillisesti 30° tai 45°. Osuma on hyväksytty, jos sirpale osuu ± 5 asteen marginaalilla kohteeseen. Käytettäessä luotia kulman toleranssi on ± 3 astetta. Testausraporttiin tulee kuitenkin kirjata myös hylätyt koeammunnat. [46]

Eri käyttötarkoituksissa oleville suojarusteille on erilaiset määritelmät sille, milloin tapahtuu täydellinen läpäisy ja milloin osittainen eli sirpale pysähtyy materiaaliin. Kuvassa 6.3. on havainnollistettu eri määritelmiä. Kuvassa ylemmät projektiilit kuvaavat osittaista läpäisyä eli pysähtymistä. Alemmat projektiilit läpäisevät testattavan materiaalin kokonaan.



Army Ballistic Limit Navy Ballistic Limit Protection Ballistic Limit

Kuva 6.3. Määritelmät läpäisylle eri tahojen tarpeiden mukaan. [51]

On siis olemassa tapauksia, joissa täydellisen läpäisyn määritelmän täyttyminen vaatii testattavan materiaalin läpäisyn lisäksi sen, että projektiili läpäisee vielä taustalla olevan todistelevynkin. Tällöin luodilla tai sirpaleella on siis jonkinlainen jäännösnopeus, ja sen liike-energia on suurempi kuin energiamäärä, jonka kohdemateriaali kykenee absorboimaan. Jos projektiili läpäisee kohteen osittain, sen liike-energia on pienempi kuin kohteen energianabsorbointikyky. Luoti tai sirpale voi läpäistä kohdemateriaalin täydellisesti myös siten, että sen jäännösnopeus on nolla. Tässä tapauksessa projektiilin liike-energia on yhtä suuri kuin kohdemateriaalin kyky absorboida energiaa. [14]

6.5.2 Luotisuojapaneeli

Testausolosuhteet ovat luotisuojapaneeleita testattaessa samat kuin sirpalesuojaliivien ollessa kyseessä. Testisarjaan kuuluvat NIJ 0101.06 -standardin mukaan sekä P-BFS-testit että BL-testit. P-BFS eli perforation backface signature tarkoittaa, että määritetään paneelin takapuolisen pullistuman suuruus, kun luoti ei läpäise paneelia täydellisesti. Testiin kuuluu 24 laukausta. BL eli ballistic limit määrittää luotisuojapaneelin luodin-pysäytyskyvyn. Tähän osuuteen kuuluu 24 tai 12 laukausta. [47]

Yhteen sarjaan valittavien paneelien lukumäärä riippuu siitä, pitäisikö sen olla tasoa NIJ III vai NIJ IV. III-tason paneeleita tarvitaan yhdeksän, ja jokaiseen ammutaan kuusi luotia. Näistä neljälle paneelille suoritetaan P-BFS-testi ja neljälle paneelille BL-testi. Yksi paneeli jää varalle. Tason IV paneeleita tarvitaan ”riittävä määrä”, jotta 24 luodin P-BFS ja 12 luodin BL onnistuu, kun yhteen paneeliin voidaan ampua maksimissaan kuusi kertaa. Lisäksi tarvitaan yksi paneeli varalle. [47]

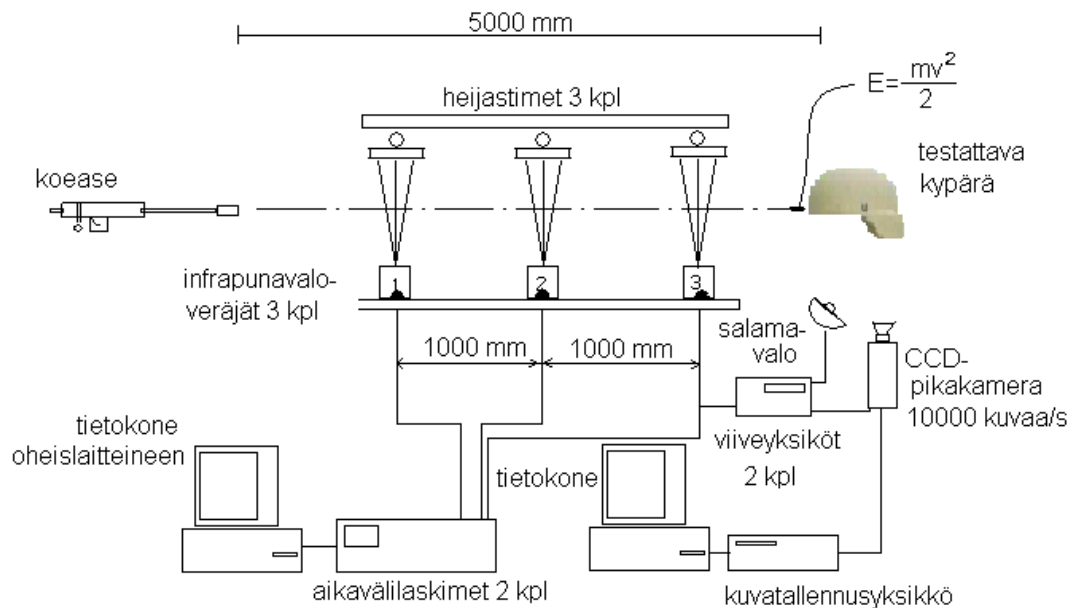
Osa luotisuojapaneeleista altistetaan lämpörasitukselle ennen koeammuntaa. Tasaisen korkean lämpötilansietokyvyn testilämpötila ja suhteellinen kosteus ovat 65 °C ja 80 %. Paneelia pidetään mainituissa olosuhteissa 10 vuorokautta ennen ammuntojen suorittamista. Toinen testi kestää vuorokauden, ja suhteellinen kosteus pidetään 50 prosentissa. Ensin paneelia pidetään 25 °C lämpötilassa kaksi tuntia. Tämän jälkeen lämpötilaa lasketaan 10 °C ja pidetään siinä kaksi tuntia. Näin jatketaan, kunnes paneeli on ollut kaksi tuntia -15 °C lämpötilassa. Tästä lähdetään nostamaan 15 °C kerrallaan, ja

jokaisessa lämpötilassa paneelia pidetään kaksi tuntia. Näin jatketaan aina 90 Celsius-asteeseen saakka. [47]

6.5.3 Kypärä

Luotien läpäisyä testattaessa ensimmäinen luoti ammutaan kohtisuoraan kypärän etuosaan. Kypärä käännetään ja toinen luoti kohdistetaan kypärän takaosaan ensimmäisen osumakohdan vastakkaiselle puolelle. Näiden jälkeen kypärä ja todistelevy tarkastetaan. Mikäli läpäisyä ei tapahtunut, kypärään ammutaan vielä kaksi luotia, yksi molemmille sivuille. Jos läpäisyä ei tapahdu, suoritetaan sama testi toiselle, märälle kypärälle. Todistelevyä käytetään jokaisessa laukauksessa. [50]

Kypärän v_{50} -arvo määritetään STANAG 2920:n mukaan kuten sirpaleliivienkin. Kypärien luotisuojauksen määrittämiseen on lukuisia muitakin tunnettuja standardeja kuin NIJ 0106.01. Useimmissa testausmenettelyt ovat pääpiirteissään samanlaiset. Luo-deilla ammuttaessa nopeudet ovat huomattavasti alhaisemmat kuin varsinaisia luotisuojia testattaessa. Kuvassa 6.5. näkyy kaaviokuvana testiammunnan järjestelmä. Samanlainen systeemi pätee myös sirpalesuojaliivien ja luotisuojapaneelien koemunntaan.



Kuva 6.5. Kaaviokuva testiammunnan systeemistä. [6]

Suomen Puolustusvoimien kypärään ammutaan standardiin verrattuna ylimääräinen reunalaukaus, jonka avulla arvioidaan reunanauhan kestoa ja reunan delaminoitumista. Testin perimmäisenä tarkoituksena on selvittää, miten sirpale käyttäytyy ammuttaessa reunaan. Yleensä se pyrkii lyhintä ja helpointa reittiä ulos rakenteesta, ja reunassa helpoin matka on suoraan alaspäin. Tämä tarkoittaa sitä, että sirpale muuttaa suuntaa kohti olkapäätä. Suunnan muutos rakenteen sisällä perustuu siihen, että sirpale etenee helpommin kerrosten välissä kuin niiden läpi. Myös sirpaleen osuma vinokulmassa

kypärän pintaa vastaan aiheuttaa sen, että se jatkaa matkaansa kerrosten välissä. Jos reunanauha pettää, sirpale saattaa iskeytyä niskaan, yläselkään tai olkapäähän, jos nopeutta on riittävästi. Näin voi käydä, vaikka kypärän pitäisi v_{50} -arvon perusteella pysäyttää sirpale. Ammunta suoritetaan 50 millimetrin päähän reunasta. [45]

6.6 Taustavaha trauman syvyyden määrittämisessä

Varsinkin kypäriä ja sirpaleliivejä testattaessa käytetään usein taustamateriaalia. Taustamateriaali asetetaan testattavan suojaruusteen taakse siten, että suojaruuste on kosketuksissa taustavahaan. Tarkoituksena on, että siitä voidaan mitata painauman suuruus, kun luoti tai sirpale ei läpäise täydellisesti testattavaa materiaalia. Käytössä on yleisesti öljy/savi -sekoitus, esimerkiksi Roma Plastilina®. Vaikka se onkin kovempaa ja vaikeammin hajoavaa kuin ihmisen iho ja kudokset, sillä voidaan havainnollistaa vaurioiden suuruutta. [47]

Kun luoti tai sirpale iskeytyy testattavaan ballistiseen suojaruusteeseen, tapahtuu ruusteen rakenteessa muodonmuutoksia. Takapuolelle muodostuu pullistuma, joka painautuu taustavahaan. Rakenteen vaurioita tutkittaessa mitataan taustamateriaalista siihen painautuneen kuopan syvyys. Jonkinlainen pullistuma muodostuu lähes aina, pysähtyy luoti tai ei. Läpäisseen luodin aiheuttamalla traumalla ei ole kuitenkaan merkitystä, sillä luoti aiheuttaa tällöin suuremmat vammat.

Sopivan materiaalin valinta ja yleensäkin taustamateriaalin käyttö on tärkeää, sillä sirpaleliivin kaltaisen joustavan materiaalin ollessa kyseessä ihmisvartalon iho, luut, kudokset ja sisäelimet joutuvat koville osuman iskiessä. Kun sirpaleliivi absorboi energiaa laajemmalle alueelle, energia johtuu ihmiseen asti ja jatkaa kulkuaan ihmisessä. Sopivalla taustamateriaalilla tätä ihmiseen kohdistuvaa rasitusta pystytään arvioimaan testausvaiheessa.

Trauman leveyttä ja syvyyttä tutkimalla voidaan tehdä johtopäätöksiä kangaskerrosten absorboimasta energiasta sekä luotisuojapaneelien iskulujuudesta ja spall liner -kerroksen energianabsorbointikyvystä. Spall linerilla tarkoitetaan kovissa luotisuojapaneeleissa olevaa energiaa absorboivaa kuitumateriaalikerrosta, jonka tehtävänä on lisäksi pysäyttää paneelista irtoavat sirpaleet. Jos osumakohta ei ole kovin syvä, paneeli hajottaa sirpaleen liike-energian hyvin ja jakaa sen laajalle alueelle. Tällöin siis vaarakin on pienempi. Jos kyseinen paneeli ei pysty absorboimaan energiaa hyvin ja levittämään sitä laajemmalle, trauma on syvä, koska sama energiamäärä kohdistuu hyvin pienelle alueelle. [11]

7 PAINEAALTO JA LÄPÄISEMÄTTÖMÄN ISKUN AIHEUTTAMA TRAUMA

Englanninkieliset termit trauma, backface deformation ja BFS eli backface signature kuvaavat ilmiötä, joka tapahtuu, kun luoti tai sirpale ei läpäise kohdetta täydellisesti. Ammutun kappaleen iskuenergia on kuitenkin niin suuri, että se aiheuttaa suojaruusteeseen muodonmuutoksen. Rakenteen takapuolelle, joka on vartaloa vasten, muodostuu pullistuma. Trauman suuruus riippuu iskuenergian suuruudesta sekä suojaruusteen rakenteesta ja materiaaleista. Mitä paremmin rakenne absorboi energiaa, sitä laajemmalle alueelle iskuenergia jakaantuu ja sitä pienempi trauman syvyys on.

BABT on lyhenne sanoista behind armour blunt trauma. Sillä tarkoitetaan pullistuman vartaloon aiheuttamia lääketieteellisiä vaurioita. Räjähdyksen tai muun vastaavan aiheuttamaa paineaaltoa kutsutaan usein englanninkielisellä termillä blast. Myös tämän vaikutuksia tutkitaan sotälääketieteessä. [52]

On mahdotonta tehdä sellainen käyttökelpoinen suojaruuste, että trauma ei muodostuisi lainkaan. Kypärän, sirpalesuojaliivin ja luotisuojapaneelin rakenteet täytyy optimoida siten, että trauma ei aiheuta kuolettavia vammoja sisäelimiin. Esimerkiksi STANAG 2920:n ja henkilösuojaruusteisiin sovellettavien NIJ-standardien mukaan kypärän maksimitrauma on 25 mm ja sirpalesuojaliivin sekä luotisuojapaneelin 44 mm. Kyseiset syvyydet on määritetty siten, että niiden ei pitäisi aiheuttaa hengenvaarallisia vammoja. [47, 49]

Parhaassa tapauksessa trauma on niin pieni, että sillä ei ole vaikutusta. Iskun voimasta muodostunut pullistuma voi kuitenkin aiheuttaa kudonvaurioita, murtaa luita tai vahingoittaa sisäelimiä. Mitä kevyemmiksi kypäriä ja suojaliivejä yritetään saada, sitä paremmin on otettava huomioon trauman muodostuminen. Kevyet rakenteet kykenevät vastustamaan muodonmuutosta heikommin. [52]

Koska ballistisissa sovellutuksissa käytettävät kuitumateriaalit vastustavat kuitenkin jonkin verran muodonmuutosta ja pyrkivät rasituksen jälkeen osittain palautumaan alkuperäiseen tilaansa, aiheutuu iskutapahtumassa toinenkin rasite ihmisen keholle. Ensin kaikki osumakohdan ympäristössä olevat ihmisen sisällä olevat kudokset, elimet ja muut painautuvat kasaan sisäänpäin, ja kun suojaruuste palautuu kohti alkuperäistä muotoansa hyvin nopeasti, ihmisvartalon iskukohta pääsee palautumaan yhtä rajusti. Tällöin tapahtuu vastakkaisuuntainen, mutta yhtä raju jännitys toiseen suuntaan, mikä voi aiheuttaa myös vaurioita, vaikka itse iskutapahtumassa mitään ei olisi vielä käynyt. Joidenkin tutkimusten mukaan nimenomaan palautuva jännitys on se vaarallisempi. [53; 54]

Sellaisetkin luodit, jotka eivät läpäise kypärää, aiheuttavat suuria voimia kalloon, aivoihin ja niskaan. Luodin ja kypärän keskinäinen kosketus kestää noin 0,2 ms ja kypärän ja pään välinen mahdollinen kosketus 2,0 ms. Kohtisuoran osuman ja sen aiheuttaman kiihtyvyyden ollessa kyseessä voidaan soveltaa moottoripyöräkypärille asetettuja vaatimuksia. Eurooppalainen standardi ECE 22.05 ei hyväksy 300 G korkeampia kypärään kohdistuvia kiihtyvyyksiä lainkaan ja 150 G:n kiihtyvyys saa kestää viisi millisekuntia. Pohjoisamerikkalainen DOT 218 -standardi määrittelee rajat siten, että yli 400 G:n kiihtyvyyksiä ei saa kohdistua kypäriin lainkaan, 200 G:n kiihtyvyys saa kestää enintään 2 ms ja 150 G:n kiihtyvyys enintään 4 ms. [53]

Tutkimusten mukaan ihmisen aivot kestävät 150 G:n kiihtyvyyttä viiden millisekunnin ajan. 200 G on erittäin korkea riski, ja voi aiheuttaa toimintakyvyttömyyden. Aivovaurio on kuitenkin mahdollinen jo 80 G:n kiihtyvyydessä, kun sitä kestää kolmen millisekunnin ajan. Kypärän sisään kiinnitettävät pehmustetyynyt voivat lieventää iskun voimakkuutta 25 prosenttia. Tai vastaavasti aivot kestävät 25 prosenttia kovemman kiihtyvyyden. [52; 53]

Iskun osuessa päähän aivot vaurioituvat ensimmäisenä. Niska kyllä kestää saman iskuenergian kuin pää. Esimerkiksi 9 mm luodilla ammuttaessa niskavamman todennäköisyys on pieni alle 460 m/s nopeuksissa. [54] Kun isku osuu kypärään vinosti, se aiheuttaa pyörimiskiihtyvyyden päähän. Kiertoliike ei yleensä aiheuta niskaan vakavia vammoja. Jos osuma kuitenkin aiheuttaa päähän voimakkaan nykäisyn taaksepäin, niska voi katketa. Tutkimukset ovat osoittaneet, että päähän kohdistuvan voiman ollessa 4256 N on 50 prosentin todennäköisyys saada kallonmurtuma. 45 asteen kulmassa osuva isku aiheuttaa suuremmat jännitykset aivoihin kuin muut osumakulmat. Rotaatiokiihtyvyyden ollessa 10 krad/s^2 tai pyörimisnopeuden muutoksen ollessa 100 rad/s voi päähän aiheutua laajalle alueelle hermosoluvaurioita. Jos pyörimisnopeuteen tai -kiihtyvyyteen lisätään kohtisuoria voimia, raja-arvot pienenevät. [52; 53]

Taulukko 7.1. Räjähdeaineen määrän vaikutus vaurioittavaan etäisyyteen. [55]

Räjähdeaineen annostus (kg)	Etäisyys (m), jolla räjähdys aiheuttaa 1 % todennäköisyydellä:		
	Tärykalvon puhkeaminen	Kuolema	Vakavat vammat
1	7	1	1
10	16	4	2,5
100	35	10	8
1000	75	24	22
10^6	750	250	600

Yllä olevaan taulukkoon (taulukko 7.1.) on koottu räjähdeaineen määrästä riippuvia etäisyyksiä, joilla ihminen vammautuu yhden prosentin todennäköisyydellä paineaallon vaikutuksesta. Vammoiksi on valittu tärykalvon puhkeaminen korvassa, vakavat vammat sekä kuolema. Esimerkiksi räjähdeainemäärän ollessa 10 kg ihmisen tärykalvo puhkeaa 16 metrin päässä ainakin yhden prosentin todennäköisyydellä. [55]

Tärykalvojen puhkeamisen riski saavutetaan 25 kPa:n paineella. 100 kPa:n paine aiheuttaa lisäksi vakavia vammoja sisäkorvaan. Mitä lyhyemmän aikaa ylipaine vaikuttaa, sitä suuremman paineen ihminen kestää ilman vaurioita. Keuhkovaurioilla raja on noin 50 millisekuntia. Jos ylipaineen vaikutus kestää kauemmin, vauriot ovat riippuvaisia ajasta. 350 kPa:n paine lamauttaa keuhkot, ja 50 % ihmisistä kuolee. [55]

8 VAATIMUKSET

National Institute of Justice (NIJ) on määritellyt yhdenlaiset luokitteluperusteet ballistisille suojarusteille niiden luodinkeston mukaan. Kyseiset standardin NIJ 0101.06 mukaiset suojaruokat ovat alla olevassa taulukossa 8.1. Taulukossa on määritelty luodin tyyppi ja massa, nopeus marginaaleineen, suurin sallittu trauma ja hyväksytyjen osuimien minimilukumäärä sekä 0-kulmassa että 30 tai 45 asteen kulmassa ammuttuna. Standardista poiketen Suomessa puhutaan yleensä 90 asteen kulmasta, kun tarkoitetaan nol-lakulmaa.

Alempana olevassa taulukossa 8.2. ovat edellisen version, NIJ 0101.04, suojausluokitukset. Versiota uudistettaessa on tehty joitakin muutoksia nopeuksiin ja jätetty taso I pois. Useimmat tässä luvussa esitellyt maat ovat luokitelleet omat suojarusteensa tämän vanhemman version mukaan. Luotityyppinä on kolmessa alimmassa luokassa kaksi ja kahdessa parhaassa yksi. Tämä tarkoittaa sitä, että luokkien IIA - IIIA suojalii-vit tulee testata kahdella eri ase- ja luotityypillä, luokkien III ja IV vain yhdellä. Kovat luotisuojapaneelit testataan ainoastaan yhdellä tyyppillä. [47]

Taulukko 8.1. NIJ 0101.06 -standardin mukaiset suojausluokat. [47]

Suoja-luokka	Testimuuttujat				Vaatimukset		
		Luodin tyyppi	Luodin massa (g)	Luodin nopeus (m/s)	Hyväksytyt osumat 0°	Trauma (mm)	Hyväksytyt osumat 30°/45°
IIA	1	9mm FMJ RN	8,0	373 ± 9,1	4	44	2
	2	.40 S&W FMJ	11,7	352 ± 9,1	4	44	2
II	1	9mm FMJ RN	8,0	398 ± 9,1	4	44	2
	2	.357 Magnum JSP	10,2	436 ± 9,1	4	44	2
IIIA	1	.357 SIG FMJ FN	8,1	448 ± 9,1	4	44	2
	2	.44 Magnum SJHP	15,6	436 ± 9,1	4	44	2
III	1	7,62mm NATO FMJ	9,6	-	6	44	0
	1	.30 Caliber M2 AP	10,8	-	1-6	44	0

Taulukko 8.2. NIJ 0101.04 -standardin mukaiset suojausluokat. [56]

Suoja- luokka	Testimuuttujat			Vaatimukset			
		Luodin tyyppi	Luodin massa (g)	Luodin nopeus (m/s)	Hyväksytyt osumat 0°	Trauma (mm)	Hyväksytyt osumat 30°
I	1	.22 Caliber LR LRN	2,6	329 ± 9,1	4	44	2
	2	.380 ACP FMJ RN	6,2	322 ± 9,1	4	44	2
IIA	1	9mm FMJ RN	8,0	341 ± 9,1	4	44	2
	2	.40 S&W FMJ	11,7	322 ± 9,1	4	44	2
II	1	9mm FMJ RN	8,0	367 ± 9,1	4	44	2
	2	.357 Magnum JSP	10,2	436 ± 9,1	4	44	2
IIIA	1	9mm FMJ RN	8,2	436 ± 9,1	4	44	2
	2	.44 Magnum JHP	15,6	436 ± 9,1	4	44	2
III	1	7,62mm NATO FMJ	9,6	838 ± 9,1	6	44	0
IV	1	.30 Caliber M2 AP	10,8	869 ± 9,1	1	44	0

Vaikka NATOn jäsenvaltioissa sekä yhteistyövaltioissa on yleisesti käytössä STANAG-ohjeistus, eri maiden vaatimukset eroavat toisistaan, sillä kyseinen ohje ottaa kantaa ainoastaan testaukseen sirpaleilla, ei ballistisen suojauksen vaatimuksiin. Lisäksi NATOn ulkopuolisissa maissa on erilaiset vaatimukset ja suositukset ballistisen henkilösuojauksen testauksen suhteen. Euroopassa noudatetaan testauksessa hyvin pitkälti samaa STANAG 2920 -ohjetta kuin Suomessakin. Samoin suojaustasomääritykset tehdään NIJ 0101.04:n tai uudemman version mukaan. Useat maat käyttävät näiden rinnalla omia standardejaan.

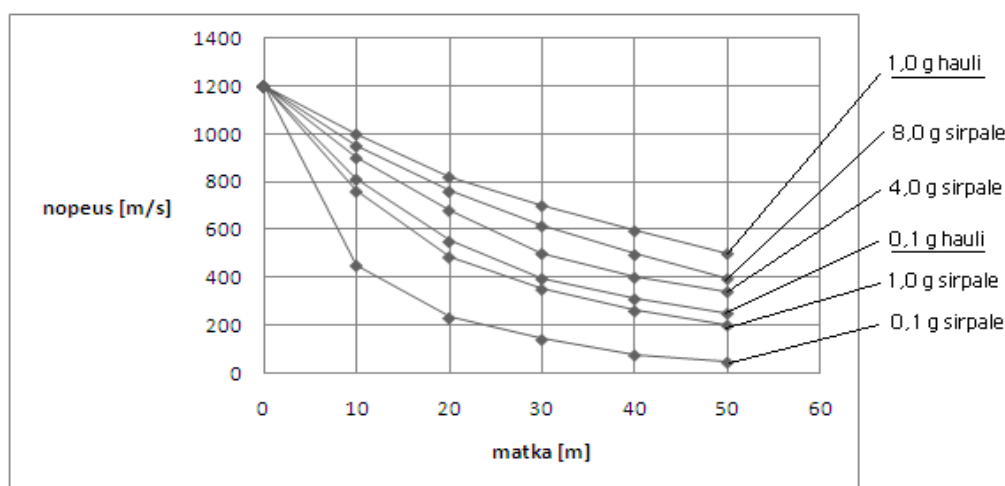
Ensisijaisesti suojavarusteiden tulee tietysti suojella kantajansa henkeä ja vartaloa. Jotta ne olisivat turvallisia, niiden pitää olla myös sopivia, joustavia, mahdollisimman mukavia päällä ja kevyitä. Vaativissa maastoissa ja kuumissa olosuhteissa on erityisen tärkeää, että suojavarusteet ovat tarkoituksenmukaiset. Paras mahdollinen lopputulos on kompromissi suojaliivin suojuokituksen, painon ja liikkuvuuden kesken. Toisaalta pitää ottaa huomioon, että suojuokan kasvu ja painon nouseminen kulkevat lähes käsi kädessä – aina, kun halutaan nostaa suojuokkaa, suojuokan paino nousee noin kolme kilogrammaa. [3]

Teknisten vaatimusten lisäksi kannattaa ottaa huomioon sirpalesuojaliivin ja kypärän näkyvyysominaisuudet. Materiaalit pitää valita käyttöolosuhteiden mukaan häveteknisesti oikein, eli suojavarusteen tulisi herättää mahdollisimman vähän huomiota. Väriä voidaan tosin muokata myös erilaisten huppujen ja kankaiden avulla. Suojavarusteiden suojuokasoa valittaessa on ajateltava kokonaisuutta. Niin sanotusta liian korkeasta suojuokasosta ei välttämättä ole mainittavaa hyötyä.

Esimerkiksi Saksassa vaatimukset kypärän v_{50} -arvolle nousivat nopeuteen 620 m/s heti aramidikypärien kehittyessä 1990-luvun puolivälissä. Myöhemmin Ranska nosti omaa vaatimustasoaan vielä korkeammaksi v_{50} -arvon ollessa nyt 680 m/s. Loputtomiin

v_{50} -vaatimusta ei kuitenkaan kannata nostaa, sillä sen toteuttaminen vaatii suojavarusteiden painon nostamista huomattavasti ja noin suurissa nopeuksissa muutamalla kymmenellä metrillä sekunnissa ei ole enää mitään merkitystä. Kun etäisyys on suuri, muutama kymmenen m/s v_{50} -arvossa ei vaikuta ratkaisevasti, sillä sirpaleen lentonopeus hidastuu hyvin voimakkaasti heti alkulennon aikana. Aseen piipun tai kranaatin räjähdyspaikan vieressä ei korkeammalla v_{50} -arvolla ole mitään merkitystä, koska tällöin paineaallon vaikutus on sirpaleen mahdollista osumaa pahempi uhka. [44]

Sama pätee luoteihin. Ei ole välttämättä järkevää nostaa luodin pysäytysvaatimuksia kovin korkealle, sillä tietyn rajanopeuden jälkeen luodin kiihtyvyys aiheuttaa ihmisen päähän liian suuren iskun ja aivoihin vakavia vammoja, vaikka kypärä pysäyttäisikin luodin. Kyseisen kiihtyvyyden raja-arvo, jolla aivovaurio on mahdollinen, on 80 kertaa maan vetovoiman aiheuttama kiihtyvyys (80 G) kolmen millisekunnin (3 ms) ajan. [1]



Kuva 8.1. Terässirpaleiden ja -haulien nopeus matkan funktiona. [1]

Kuvassa 8.1. on esitetty eripainoisten terässirpaleiden ja -haulien nopeuksia kantomatkojen suhteen. Näistä kuvaajista voidaan lukea, kuinka paljon sirpale ehtii hidastua tietyllä matkalla, jos oletetaan alkunopeudeksi sirpaleen maksimilähtönopeus, 1200 m/s. Jotta ihmiseen osuisi sirpale, joka lentää 680 m/s nopeudella, hänen pitäisi seistä vain reilun 10 metrin päässä räjähdyspaikasta. Näin pienellä etäisyydellä paineaaltokin on sen verran voimakas, että sirpale on toissijainen uhka. [1]

Muita huomioitavia asioita kypärän suunnittelussa, valmistuksessa ja vaatimusten määrittelyssä on kypärän ja sen kiinnityshihnojen käyttäytyminen paineiskussa. Jos paineisku tulee altapäin ja pääsee kypärän sisään, leuan alla oleva hihnasto voi kuristaa kypärän kantajan. Kiinnitysten pitää päästä aukeamaan, tai hihnaston pitää olla kypärässä sellaisessa kohdassa kiinni, että leuan alta kulkeva hihna pääsee esteettä nousemaan leuan edestä ollessaan tarpeeksi löysällä. Tämän takia kypärän tulee olla malliltaan sellainen, että se pysyy tukevasti päässä, vaikka hihnoja ei olisi kiristetty äärimmilleen.

8.1 Suomen Puolustusvoimien varusteet

8.1.1 Sirpale- ja luotisuojaliivit

Suomen Puolustusvoimilla on käytössä luotisuojaliivi M 91, jonka M-koko painaa ilman lisälevyjä enintään 6,6 kg. Suojavaatimus ilman lisälevyjä v_{50} -arvolla ilmaistuna on 600 m/s STANAG 2920:n mukaisella 1,1 gramman sirpaleella ammuttuna. Suojaliivin pitää pysäyttää myös 9 mm FMJ-luoti, kun sitä ammutaan nopeudella 426 m/s. NIJ-standardin mukaan se saavuttaa silloin suojausluokan IIIA. [1; 5; 47]

Liiviin voidaan lisätä luotisuojalevy, joka parantaa suojaustasoa. Yksi paneeli painaa 2,8 kg. Paneelin ja suojaliivin yhteinen suojaustaso on 7,62x51 AP, mikä tarkoittaa NIJ-suojaluokkaa IV. Suomessa suurin sallittu paneelin sisäpuolinen pullistuma on STANAG 2920:n mukainen 44 millimetriä. Sama pätee myös luotisuojaliiville. [1; 5; 47]

Uusin versio luotisuojaliivistä on M 2010. Se on hieman kevyempi kuin aiemmat versiot, noin 5,0 kg. Muita parannuksia edellisiin versioihin verrattuna ovat esimerkiksi kyljissä ja olkavarsissa olevat taskut, joihin voidaan asettaa pienet luotisuojapaneelit. Myös selässä on ison taskun lisäksi pieniä paneeleita varten lisätaskut. Lisäksi suojaliiviin voidaan integroida kurkkusuoja, jonka suojaluokka on IV. Koko luotiliivikonaisuus saadaan hyvin nopeasti pois päältä kiskaisemalla rinnan kohdalla olevasta nauhas- ta. Suojaliivi kaikkine lisälevyineen painaa 13 kg. Suojaliivissä on myös 15 Joulen puukkosuoja, joka toimii samalla traumavaimentimena. Vaatetustekstiilit ovat duPont'n Cordura®-polyamidia. [57]

Sirpalesuojaliivin (myös M 91) v_{50} -arvo 1,1-grammaisella standardisirpaleella on kuivana 450 m/s ja märkänä 430 m/s. Luodinpysäytysvaatimuksia ei ole. M-kokoisen liivin maksimipaino 3,56 kg. Sirpalesuojaliivi koostuu päällisestä ja kevyistä, pehmeistä sisäpaneeleista. Sirpalesuojaliivin uudemman mallin (M 05) v_{50} -arvo on hieman vanhaa parempi, 500 m/s samalla 1,1-grammaisella STANAG 2920:n mukaisella sirpaleella. Sirpalesuojaliivinkin maksimipullistuma on 44 millimetriä. [1]

Sekä luoti- että sirpalesuojaliivin pitää olla helposti puettava ja riisuttava. Sotilaan pitää pystyä riisumaan liivi tarvittaessa vain toista kättä käyttäen. Myös luotisuojapaneelin tulee olla helposti poistettavissa liivin sisältä. Haavoittumisen sattuessa myös ulkopuolisen pitää saada liivi helposti ja nopeasti pois sotilaan päältä. Suojaliivin pitää yksinään suojata rintaa, vatsan seutua, kylkiä, selkää, käsivarsia, olkapäitä ja lantiota. Keraamisen lisälevyn kanssa M 91 -liivit pysäyttävät lisäksi rynnäkkökiväärin luodin ja luotisuojaliivi myös panssariluodin. [1]

Suomen Puolustusvoimille suojaliivejä valmistaa pääasiassa Verseidag Ballistic Protection Oy. Suojaliivien käyttöiän pitäisi olla vähintään seitsemän vuotta. Tällä hetkellä ne täyttävät vaatimukset kuivina vielä kymmenen vuoden jälkeen. [57] Toinen Puolustusvoimille suojaliivejä valmistava yritys on Rymaco Oy.

8.1.2 Kypärä

Suomessa käytössä olevan FH-580 -komposiittikypärän (entinen K 99) v_{50} -arvo on vähintään 580 m/s NATO STANAG 2920:n mukaisella 1,1 gramman sirpaleella ammuttuna. Samalla sirpaleella kypärän sisäpuolinen suurin sallittu pullistuma on 20 mm nopeudella 530 m/s taustavahamenetelmällä mitattuna. Kypärän pitää pysäyttää myös 420 m/s nopeudella ammuttava 9 mm 7,5 g Para FMJ -luoti. Tällöin sen NIJ-taulukon mukainen suojaluokka on suomalaisille sotilasvarusteille tyypillinen IIIA. Reunusta kiertävän elastomeerinauhan on pysyttävä kiinni ja estettävä reunan delaminointuminen eli komposiittikerroksien liuskoittuminen irti toisistaan, kun ammutaan samalla 9 mm 7,5 g Para FMJ -luodilla nopeudella 350 m/s etäisyyden ollessa 50 mm kypärän reunasta. [5; 45; 47]

FH-580:stä hieman paranneltu versio on FH-610, jonka v_{50} -arvo on nimensä mukaisesti vähintään 610 m/s. Sallitut traumarajat ovat samat kuin FH-580 -kypärälle. Luodinkestävyysvaatimus on myös sama, mutta siihen on määritely myös trauman maksimiarvo, joka on 70 millimetriä. [45]

Ballistisesti suojaavien ominaisuuksien lisäksi kypärältä vaaditaan monia muita asioita. Kypärällä on oltava hyvä säänkesto erilaisissa olosuhteissa ja sen pitää kestää myös UV-valoa. Komposiittirakenteessa mukana oleva aramidikuitu ei kestä UV-valoa hyvin, mutta kypärän maalaus ja muu jälkikäsitteily antaa sille hieman paremman suojan. Paloturvallisuus ja kemikaalien, kuten liuottimien ja taistelukaasujen, kesto ovat oleellisia ominaisuuksia. Kypärän on säilytettävä mittansa, muotonsa ja mekaaniset ominaisuutensa ajan kuluessa. Kypärässä pitää olla riittävä ilmastoituvuus. Lämpötila kypärän sisällä ei saisi nousta yli 40 asteen, mutta se on melko vaikea tavoite. On huomioitava, että sama kypärä on käytössä kesät talvet, ja lisäksi rauhanturvaajilla kuumissa olosuhteissa. [5; 6; 45]

Nykyisessä suomalaisessa kypärässä on neljästä kohdasta säädettävä hihnasysteemi, mikä takaa kypärän sopivuuden erilaisiin päihin. Hihnasysteemin nauhat ovat puuvillaa ja säädettävät soljet polyoksimeteeniä (POM). Kypärän sisäosassa on pehmuste sekä päälakea kohdalla että koko reunusta kierteen. Keskellä päälakea on lisäksi solustetusta polystyreenistä eli styroksista tehty kiekko vaimentamaan iskuja. Muiden pehmusteiden tarkoitus on myös vaimentaa iskuja, mutta lähinnä tehdä kypärästä mukavampi päähän. [45]

Kypärän ballistisen kuoren ja ihmisen pään väliin jäävän tilan pitää olla 25 millimetriä, joka on sama arvo kuin STANAG 2920:n suurin sallima kypärän sisäpuolinen pullistuma. Liian pieni etäisyys kuoren ja sisäosan välillä aiheuttaa kypärän käyttäjälle vaaran. Jos tilaa on liikaa, kypärä ei pysy tukevasti päässä ja heiluu, mikä ei myöskään ole turvallista. Kotimaisen komposiittikypärän paino on 1200 - 1600 grammaa koosta ja mallista riippuen. Suojaava pinta-ala on mallissa FH-580 1200 cm² ja mallissa FH-610 1300 cm², kun esimerkkinä on koko M molemmista malleista. [6; 45]

Suomen kypärämallien FH-580 ja FH-610 tarkemmat speksit löytyvät liitteistä 1 ja 2, jotka ovat FY-Composites Oy:n laatimat tekniset erittelyt kyseisille kypärämalleille.

8.2 Iso-Britannian armeijan varusteet

Iso-Britanniassa jokaiselle suojarahusteelle ja testille on oma spesifikaationsa. UK/SC/4898 määrittää luotisuojauksen ja UK/SC/5449 (*Ballistic Test Method for Personal Armours and Lightweight Materials*) -spesifikaation avulla voidaan määrittää v_{50} sekä v_0 . Näiden rinnalla on käytössä myös STANAG 2920. Iso-Britanniassa suojaustasovaatimukset ovat salattua tietoa, mutta niiden arvellaan olevan suunnilleen NIJ 0101.04 -standardin tasoja III ja IV vastaavaa suojaluokkaa. Käytössä on sekä keraamietta aramidipaneeleja, jotka on päällystetty polyamidilla. [16, 58]

Luotisuojaliivit valmistetaan aramidista ja luotisuojapaneelit monoliittisesta keraamista, jossa on aramiditausta. Suurin sallittu trauma on 44 millimetriä molemmissa. [58] Iso-Britanniassa on käytössä polyamidista valmistetut komposiittikypärät, joillain erikoisjoukoilla on myös aramidikypäriä. Yleisin kypärämalli on MK6. Sen v_{50} -arvo 1,1-grammaiselle standardisirpaleelle on 415 m/s. Kevytiliivien materiaaleina käytetään sekä aramidia, jota tarvitaan 12 kerrosta, että polyamidia, jota tarvitaan neljä kerrosta. Myös vaatetuksessa käytetään näitä materiaaleja. Polyamidin neliömassa on 0,290 kg/m² ja aramidikuidun hienous on 163 tex. Iso-Britanniassa kevyimmät taistelusuojavarusteet painavat ainoastaan 2,5 - 3,5 kg. Nopeita luoteja vastaan toimivan vartaloa suojaavan varustuksen paino voi nousta jopa viiteentoista kilogrammaan. Tähän ei siis ole laskettu kypärän painoa mukaan. [16]

8.3 Tšekin armeijan varusteet

Tšekeissä käytetään sekä NIJ-standardia että omaa ČSN 395360 -standardia. Tšekkiläisessä standardissa suojaluokat ovat 1 - 7 ja 2/CZ - 7/CZ. Ballistisen suojaliivin suojaustaso on TBO 2/CZ, mikä tarkoittaa, että sen pitää pysäyttää nopeudella 470 m/s ammuttu sirpale tai 7,62x25-luoti. Kyseinen suojaliivi valmistetaan aramidikuidusta ja se painaa keskimäärin 5,2 kg. Suurin sallittu painauma tšekkiläisen standardin mukaan on 25 millimetriä. Suojaliiviin voidaan integroida aramidilla laminoitu keraamilevy, joka painaa 3,25 kg. Sirpaleliivi ja suojapaneeli antavat yhdessä suojaustason TBO 7. Tällöin kokonaisuuden pitää pysäyttää nopeudella 820 m/s ammuttu 7,62x51 Ball. Keraamilevyn paksuus on 17 mm ja mitat 31 cm x 25 cm. [58; 59]

Tšekin armeijalla on käytössä myös NIJ 0101.04 -standardin mukaiset suojarahusteet. Luokan IIIA sirpalesuojaliivi pysäyttää .44 Magnum JHP -luodin ja 9 mm FMJ RN -luodin nopeudesta 436 m/s. Suojaliivi on valmistettu aramidikuidusta. Kokoja on viisi, ja näistä L-koko painaa 5,1 kg. Niin kutsuttu hyllyikä suojaliivillä on kymmenen vuotta ja operatiivinen käyttöikä viisi vuotta. Hyllyiällä tarkoitetaan sitä aikaa, jonka suojarahusteet pysyvät käyttökelpoisina varastossa.

Tason NIJ IV luotisuojapaneelin tulee pysäyttää yhdessä sirpalesuojaliivin kanssa .30 caliber M2 AP -luoti nopeudesta 878 m/s. Paneeli on keraamia ja siinä on aramidilaminaatti sekundaarisena sirpalesuojana. Paneeli on muotoiltu kaarevaksi sekä pystyettä vaakasuunnassa. Kokoja on kolme ja koon L paino on 2,6 kg ja mitat 27 cm x 22

cm. Käyttöikä on 10 vuotta. Sekä sirpalesuojaliiviä että luotisuojapaneelia valmistavat tšekkiläiset yritykset SPV 3 sekä MarS. Molempien maksimitrauma on NIJ-standardin mukaisesti 44 mm. [58; 59]

8.4 Sveitsin armeijan varusteet

Sveitsin armeijalla on käytössä Schubertthin valmistama 826-mallin kypärä. Kyseistä mallia on neljää kokoa, joista koko II painaa noin 1550 grammaa. Se on myös monikerroksinen, korkean suorituskyvyn aramidikomposiittikypärä, jossa on kolmipistekiinnitys. Kypärän v_{50} -arvo 1,1-grammaisella sirpaleella ammuttuna on vähintään 650 m/s. Lisäksi sveitsiläisen standardin ja Sveitsin armeijan asettamien vaatimusten mukaan se pysäyttää 9 mm Para Pist Pat 41, kun $v_{2,5}$ on 410 ± 10 m/s. $V_{2,5}$ tarkoittaa nopeutta, joka luodilla on 2,5 metrin päässä aseensa piipusta. [60]

Vaatimukset määritellään saksalaisen poliisistandardin mukaan. Standardi määrittelee suojaluokat SK L, SK 1, SK 2, SK 3 ja SK 4. Sveitsin armeijan suojaliivi valmistetaan aramidista ja se painaa keskimäärin 4 kg. Niitä toimitetaan heille sveitsiläisten valmistajien lisäksi esimerkiksi Saksasta ja Suomesta. Sirpaleliivin paksuus on noin 12 mm ja neliömassa $4,5 \text{ kg/m}^2$. Suojapaneeli on keraamia, jonka neliömassa on 40 kg/m^2 . Paneeli on 21 mm paksu ja painaa yksinään 3 kg. Näin ollen kokonaisuuden painoksi tulee noin 7 kg, riippuen suojaliivin koosta. [58]

Sirpaleliivin suojaluokitus on German SK 1, mikä tarkoittaa, että siihen pysähtyy nopeudella 410 m/s ammuttu 9 mm FMJ -luoti. Liivin ja suojapaneelin yhteissuojaluokka on German SK 4, jolloin se pysäyttää 7,62x51 FMJ/HC -luodin, jonka nopeus on maksimissaan 820 m/s. Pelkälle liiville sekä paneelin ja liivin kokonaisuudelle sallittu trauma on 40 millimetriä. Kumpaankin, sekä liiviin että kokonaisuuteen, ammutaan kolme laukausta niitä testattaessa. Sirpaleliivi voidaan testata myös STANAG 2920 -ohjeistuksen mukaisesti 1,1-grammaisella sirpaleella, jolloin sille saadaan määritettyä v_{50} -arvo, joka on 620 m/s. Sirpaleliivien pitäisi kestää käytössä 10 vuotta. [58]

8.5 Belgian armeijan varusteet

Belgia käyttää testausstandardina STANAG 2920 -ohjeistusta ja määrittelee ballististen suojavaarusteidensa suojaustasot NIJ 0101.04 -standardin mukaan. Aramidista valmistettu sirpaleliivi on suojaustasoltaan IIIA, eli se pysäyttää 9 mm FMJ RN -luodin sekä .44 Magnum SJHP -luodin nopeudesta 436 m/s. Keraaminen paneeli on tasoltaan IV pysäyttäen .30 caliber M2 AP -luodin nopeudesta 878 m/s. Luotisuojapaneeli painaa 2,8 kg ja sen neliömassa on noin 40 kg/m^2 . [58]

Sirpaleliivien v_{50} -arvo on vähintään 550 m/s 1,1-grammaisella sirpaleella ammuttuna. Liivejä on kahtatoista eri kokoa. Belgian armeijan sirpale- ja luotisuojaliiveille trauman maksimi on NIJ-standardin mukainen 44 mm. Sirpaleliivit Belgian armeijalle valmistaa Yhdysvaltalainen BAE Systems. Keraamilevyt belgialaiset ostavat Norjasta NFM Groupilta. [58]

8.6 Varusteet muissa Pohjoismaissa

Norjan armeija testaa ja määrittelee varusteidensa suojausluokat STANAG 2920:n ja NIJ 0101.04:n mukaisesti. Heidän sirpaleliivinsä on aramidikuidusta tehty ja suoja-paneelinsa boorikarbidista. Levyn tiheys on $2,65 \text{ g/cm}^3$ ja paino enintään 2 kg. Molemmat toimittaa NFM Group. [61]

Tanskan asettamista vaatimuksista on vain hieman vanhempaa tietoa, vuodelta 2006. NIJ-standardista heillä oli käytössä 0101.03. Mosaiikkikeraamisen suojapaneelin v_{50} -arvo oli 745 m/s, kun ammuksena standardin kyseessä olevan version mukaan oli 7,62x39 LPS. Suurin hyväksyttävä trauma oli 50 millimetriä. Saksalaisen Mehler-yhtiön valmistama suojapaneeli oli kooltaan 28 cm x 26 cm. Käyttämättömänä paneelin ominaisuudet säilyvät 10 vuotta ja operaatiokäytössä 8 vuotta. [61]

Myös Ruotsin armeijan henkilösuojarusteiden vaatimuksista on vuoden 2006 tietoa. Standardina Tanskan tapaan edellinen versio NIJ-standardista. Sirpaleliivi ja luotisuojapaneeli yhdessä pysäyttävät 820 - 830 m/s nopeudella ammuttavat 7,62x51 AP-luodit. Paneeli on alumiinioksidia, Al_2O_3 , johon on tehty aramidikuiduista tausta. Paneelin suojaava pinta-ala on 30 cm x 25 cm ja paksuus 17 mm. Käyttöäksi ilmoitetaan ainoastaan viisi vuotta. Suojarusteet on valmistanut ruotsalainen Akers Krutbruk Protection. [61]

8.7 Etelä-Afrikan armeijan varusteet

Bullet Proofing Technology valmistaa Etelä-Afrikan suojaliivit. Etelä-Afrikan armeijan vaatimus sirpalesuojaliiveille ja luotisuojapaneeleille on suojaustaso IV standardin NIJ 0101.04 mukaisesti. Ilmoittamiensa speksien mukaan sirpaleliivi sekä paneeli yhdessä pysäyttävät 5,56x45 NATO Ball -luodin nopeudesta 965 m/s. Lisäksi 7,62x39 pysähtyy nopeudesta 710 m/s, 7,62x51 NATO Ball nopeudesta 862 m/s ja 7,62x39 API nopeudesta 725 m/s. Suurin sallittu trauma on 44 millimetriä. [58]

Etelä-Afrikan armeijan sirpalesuojaliiviin integroitava suojapaneeli on lasikuidulla vahvistettua keraamia. Keraamimateriaalina on alumiinioksidi, Al_2O_3 . Taustamateriaalina toimii aramidi. Paneelin koko on $28,7 \pm 0,8 \text{ cm} \times 23,7 \pm 0,4 \text{ cm}$ ja paksuus 17 mm. Suojarusteiden niin kutsuttu hyllyikä on 20 vuotta, ja operatiivisessa käytössä niiden tulisi kestää 10 vuotta. Etelä-Afrikalla on myös naispuolisille sotilaille omat erilliset suojarusteensa. [58]

Kypärä on jo 1980-luvulta asti käytössä ollut M87-aramidikomposiittikypärä.

8.8 Saksan armeijan varusteet

Schuberth valmistaa 826-kypärää Sveitsin lisäksi myös Saksan armeijalle. Siinä on kuitenkin joitakin eroavaisuuksia verrattuna Sveitsin saman mallinumeron kypärään. Saksan malli on hieman kevyempi painaen 1500 grammaa. Vaatimuksina on STANAG 2920 mukaisella 1,1-grammaisella sirpaleella v_{50} -arvo 620 m/s. Saksan armeijan vaati-

musten (German TL 8470-0004) mukaan kypärän pitää pysäyttää lisäksi 9 mm Para FMJ soft core (8,0 g), kun luodin iskunopeus on 410 ± 10 m/s.

Saksan armeijalla on käytössä myös toinen Schuberthin valmistama kypärä, Airborne 828. Sen paino on 1540 grammaa ja v_{50} -arvo 620 m/s. Armeijan asettamat vaatimukset luoteja vastaan ovat samat kuin 826-kypärälle. Tätä kypärää on ainoastaan kahta eri kokoa. Muotoilultaan se on yksinkertaistetumpi kuin 826-mallit, molemmat sivut ja etuosa ovat litistettyjä. [60]

Sirpalesuojaliivit ja luotisuojapaneelit Saksan armeijalle valmistaa sama saksalainen yritys, Mehler, kuin Tanskallekin. Saksan vaatimuksista ei ole myöskään tuoretta tietoa, vaan speksit ovat vuodelta 2006. Standardina heillä oli Technische Richtlinie Schutzwesten, jonka mukaan sirpalesuojaliivi ja luotisuojapaneeli yhdessä pysäyttävät .308 Win AP nopeudesta 820 ± 10 m/s. Kyseinen luoti on sama kuin 7,62x51 NATO. Trauman suuruus saa olla ainoastaan 20 cm. [61]

Suojapaneelin materiaaleina käytetään Saksassa sekä alumiinioksidia että piikarbidia. Alumiinioksidista valmistettu paneeli painaa 3 kg ja piikarbidipaneeli on hieman kevyempi, 2,6 kg. Paneelin koko on 30 cm x 25 cm ja paksuus 20 mm. [61]

8.9 Hollannin armeijan varusteet

Hollannissa määritetään v_{50} -arvot STANAG 2920 mukaisesti sirpaleenkeston ilmoittamisessa. Luotisuojausvaatimukset ilmoitetaan NIJ 0101.04 -standardissa määriteltyjen suojaustasojen mukaan. Heillä on kolme eritasoista alumiinioksidista ja aramidikaasta valmistettua luotisuojapaneelia. Tason III paneeli pysäyttää 7,62x51 FMJ Ball NATO M80 -luodin nopeudesta 838 m/s. Tasojen III ja IV välillä oleva paneeli pysäyttää 5,56x45 NATO SS109 -luodin 930 m/s nopeudesta. Parhaan tason (IV) paneeli pysäyttää 7,62x63 AP M2 -luodin, jonka iskunopeus on 869 m/s. [58]

Paneelien massa pinta-alayksikköä kohden on 51 kg/m^2 . Niiden pinta-ala on 25 cm x 30 cm ja paksuus alle 29 millimetriä. Yhden paneelin massa on alle 3,5 kg. Luotisuojapaneelien pitää kestää viisi vuotta, tai operatiivisessa käytössä kuusi kuukautta. Käytössä olevien paneelien kuntoa tarkkaillaan ja ne testataan kahden vuoden välein. Hollannin armeijan luotisuojapaneeleita valmistavat Liba concept TCAA sekä Rabintex. [58]

Sirpalesuojaliivit on valmistettu hyvin hienosta kuidusta. Niiden materiaalina käytetään Twaron CT709 -aramidia, joka on mikrofilamenttikuitua. Sirpalesuojaliivin v_{50} -arvon 1,1-grammaisella sirpaleella ammuttuna pitää olla vähintään 550 m/s. 0,325-grammaista sirpaleella käytettäessä v_{50} -arvon pitää olla yli 630 m/s. Sirpalesuojaliivien kankaan neliömassa on $4,2 \text{ kg/m}^2$ ja suojaava pinta-ala $0,5 \text{ m}^2$. Suojaliivi saa painaa enintään 2,5 kg ilman lisälevyjä. Sirpalesuojaliivien kuntoa tarkkaillaan samaan tapaan kuin luotisuojapaneelien. Suojaliivit valmistaa FECSA. [58]

Hollannin armeijalla käytössä oleva UHMWPE:sta (Dyneema) valmistettu kypärä on huomattavan kevyt, ainoastaan 850 grammaa, muiden kypärien painaessa yli kilon. Tällaisen kypärän v_{50} -arvo on 580 m/s.

8.10 Ranskan armeijan varusteet

Ranskassa testataan ballistiset henkilösuojavarusteet STANAG 2920:n mukaisesti ja lisäksi he noudattavat oman puolustusministeriönsä (French MOD) määrittelemiä vaatimuksia. Ranskassa on kaksi erilaista luotisuojapaneelia. Toinen on korkeatiheyksisestä polyeteenistä (HDPE) valmistettu, ja se on muotoiltu kaarevaksi. Tämän pitää pysäyttää sirpalesuojaliivin kanssa 5,56x45 NATO Ball -luoti 1000 m/s nopeudesta. Luotisuojapaneeli painaa 1,4 kg, sen pinta-ala on 25 cm x 30 cm ja paksuus 20 mm. Neliömassa on 17,5 kg/m². [58]

Toinen luotisuojapaneeli on alumiinioksidista valmistettu monoliittinen keraami-paneeli, jossa on spall linerina aramidi- tai polyeteenikangas. Se on pinta-alaltaan samankokoinen kuin HDPE-paneeli, mutta hieman ohuempi, 18 mm. Neliömassa on 40 kg/m² ja paneelin paino 2,8 kg. Myös keraamipaneeli on muotoilultaan kaareva. Kummankin paneelin maksimitrauma on 30 mm ja käyttöikä yli 10 vuotta. Valmistajia ovat Ten Cate sekä SADAC. [58]

8.11 Venäjän armeijan varusteet

Venäläiset määrittelevät ballististen henkilösuojavarusteidensa vaadittavat suojaustason sekä oman standardinsa GOST R 50744-95:n että NIJ 0101.04:n mukaan. Lisäksi kypärien luokittelussa käytetään standardia NIJ 0106.01. Venäläisen GOST-standardin määrittelemät speksit ovat alla olevassa taulukossa 8.3. Standardin mukaan maksimitrauma on 17 millimetriä.

Taulukko 8.3. Venäläinen standardi GOST R 50744-95. [62]

	Asetyyppi		Luoti		Testausolosuhteet	
			Tyyppi	Paino (g)	Testietäisyys (m)	Luodin nopeus (m/s)
I	Käsiase	9x18mm	Makarov PM Nagant Revolver	5,9	-	290 - 315
	Käsiase	7,62x38		6,8	-	265 - 285
II	Käsiase	5,45x18	PSM	2,5	-	310 - 325
	Käsiase	7,62x25	Tokarev TT	5,5	-	415 - 445
IIA	Haulikko	12 gauge	Hunter	35	-	390 - 410
III	Kivääri	5,45x39	AK-74	3,4	-	870 - 890
	Kivääri	7,62x39	AKM	7,9	-	710 - 725
IV	Kivääri	5,45x39	AK-74	3,4	-	870 - 890
	Kivääri	7,62x54R	SVD	9,6	-	825 - 835
V	Kivääri	7,62x39	AKM	7,9	-	710 - 725
VI	Kivääri	7,62x54R	SVD	9,6	-	820 - 835

Venäjällä käytetään sekä kuitukomposiittikypäriä että titaani- ja alumiinikypäriä. Komposiittikypäriissä käytetään aramidikuituja. Näiden kypärien v_{50} -arvo on 540 - 600 m/s. GOST-standardin mukaan kypärän suojaustaso luoteja vastaan on I ja NIJ 0106.01 -standardin mukaan IIA. Lisäksi kypärässä on 50 Joulen traumavaimennin. Kuitukomposiittikypära painaa koosta riippuen 900 - 1600 grammaa. [63]

Perusmalli sotilaan komposiittikypärästä on P7. Se painaa keskimäärin 1200 grammaa ja sen v_{50} -arvo on 560 ± 20 m/s. Makarov PM:n 9x18-millisen luodin pitää pysähtyä kypäriin nopeudesta 320 m/s ja Uzi-konepistoolin luodin nopeudesta 380 m/s. Uzin luodin lähtönopeus on ainoastaan 400 m/s ja se on 9 mm Parabellum -luoti. [63; 64]

Alumiini- ja titaanikypäriissäkin on sisäpuolella kuituvahvistus, joka pysäyttää sekundaarisirpaleet ja pienentää traumaa. Sotilaskäytössä olevan venäläisen teräskypärän, K6, paino on 1600 g ja v_{50} -arvo 650 ± 20 m/s. Sen tulee pysäyttää lisäksi Makarovin luoti nopeudesta 320 m/s ja Tokarev TT-33:n luoti nopeudesta 365 m/s. Uzin luotia vastaan kypära ei suojaa. [63; 64]

Venäläisessä sirpalesuojaliivissä on perinteisen mallin lisäksi kiinnitettävät kaula-, hartia- ja solisluusuojat. Volfram-merkkinen suojaliivi painaa 3,9 kg ja sen suojaava pinta-ala on $53,5 \text{ dm}^2$. GOST-standardin mukainen suojaluokka on I. Paranneltu versio tästä, Volfram-1, painaa 11,9 kg ja on suojaavalta pinta-alaltaan $53,5 (+15) \text{ dm}^2$. GOST-suojaluokka on tällöin VI. [65]

Titan-merkkinen suojaliivi painaa 11,1 kg ja sen suojaava pinta-ala on sama $53,5 (+15) \text{ dm}^2$. Sen suojaluokat ovat myös GOST I ja paranneltuna GOST VI. Titan-III -suojaliivi painaa 12 kg, on samankokoinen kuin Titan ja saa NIJ 0101.04 -standardin mukaisesti suojaluokat NIJ IIIA ja NIJ III. Näiden mainittujen parempien suojaustasojen saavuttamiseksi Venäjällä käytetään panssariterästä (Grade 44 ja 56) ja titaania sekä niiden yhdistelmiä. [65]

Dessant-suojaliivi on tehty NIJ 0101.04 -standardin asettamia suojaustasoja ajatellen. Suojaliivi itsessään on suojaustasoltaan NIJ II ja kun siihen integroidaan Venäjällä käytettävät teräspaneelit, suojaluokka nousee tasoon NIJ III, joka vastaan venäläisen standardin luokkaa V. Teräspaneelien materiaali on panssariteräs Grade 56. Suojaava pinta-ala on 35 dm^2 , jota voi kasvattaa 15 dm^2 :llä. Suojaliivin paino on 10 kg. [65]

9 KOKEELLINEN OSA

Diplomityön kokeellinen osa käsittelee suomalaisen FY-Composites Oy:n valmistamien luotisuojapaneelien testausta. Suomen Puolustusvoimille kypäriäkin valmistava yritys toimitti Puolustusvoimien Teknillisen Tutkimuslaitoksen asetekniikkaosastolle muuttaman eripaksuisen paneelin testattavaksi. Diplomityötä varten niistä valittiin sellainen paneeli, joka voisi teoriassa olla mahdollinen myös henkilösuojaukseen. Paksummat paneelit ovat muihin, raskaampiin rakenteisiin tarkoitettuja. Kyseiset paneelit ja niiden koeammunnat ovat osa Teknologia 2010 -hanketta, jossa on mukana lisäksi muun muassa Tampereen teknillinen yliopisto.

9.1 Paneelin kuvaus ja koeammuntasuunnitelma

Testattavana on FY-Composites Oy:n valmistama Ball 652/2 -koepaneeli. Yhteen 400 mm x 400 mm paneeliin on tehty kolme erilaista osaa. Muuten rakenne on osioissa sama, mutta alumiinioksidikerrokset ovat eri paksuisia – 2,0 mm, 3,2 mm ja 4,0 mm. Al_2O_3 :n puhtaus on 98 prosenttia. Paneelin osumapinnassa on lasikuitu-epoksi-laminaatti. Pintakerroksen alla on itse keraami. Keraamin ja alimman kerroksen välissä on uretaaniliima. Spall linerina eli sekundaarisena sirpalesuojana ja energiaa absorboivana materiaalina on lasikuitu-fenoli-laminaatti, jossa lasikuitu on kudottu palttinasidokselliseksi kankaaksi. Koko paneeli painaa 5,5 kg ja sen kokonaispaksuus on 12 millimetriä.

Lasikuidulla yksistään on huono iskulujuus ja heikot ballistiset ominaisuudet. Kudottuna lasikuitumattona ja laminoituna jollain sideaineella siitä tulee kuitenkin erittäin kova ja luja komposiittimateriaali. Lasi on kevyttä ja siitä voidaan vetää hyvin pitkiä kuituja. Lasikuitu-polyesteri-laminaattia käyttivät muun muassa Yhdysvaltojen merivoimat toisen maailmansodan aikaan sirpalesuojapaneeleissa. [66]

Epoksi on kertamuovi. Sen valmistusprosessi vaatii kovettamisen, mikä suoritetaan korkeassa lämpötilassa. Lämpötila ei ole ongelma tässä, kun toisena materiaalina on lasikuitu. Kuitenkin korkea lämpötila pitää ottaa huomioon aina prosessissa, varsinkin sellaisten materiaalien kanssa, joilla ei ole erityisen hyvä korkeampien lämpötilojen kesto. Fenolihartsia saadaan kondensoimalla fenolia formaldehydin kanssa.



Kuva 9.1. FY-Composites Oy:n valmistama keraaminen luotisuojapaneeli.

Kuvassa 9.1. näkyvät eri osioissa sanat Bitossi, Barat Ceramics ja Morgan. Bitossi on italialainen keraamien valmistaja. Barat Ceramics on saksalainen yritys, joka valmistaa erityisesti teknisiä keraameja. Morgan Technical Ceramic on Iso-Britanniasta lähtöisin oleva teknisiä keraameja valmistava yritys. Edellä mainitut yritykset ovat siis toimittaneet FY-Composites Oy:lle alumiinioksidit, joita testattaviin paneeleihin on käytetty. Eri valmistajista johtuen keraamien laaduissakin voi olla eroja, vaikka puhtausprosentti on kaikissa sama. Laatuvarioinnilla voi olla siten vaikutusta ammuntojen lopputuloksiin.

Taulukko 9.1. Patruunoiden vertailua. [1; 64]

Ominaisuus	NATO patruuna 7,62x51	762 RK kotimainen 7,62x39	NATO patruuna 5,56x45	Soviet M1943 7,62x39
Kaliiperi (mm)	7,62	7,62	5,56	7,62
Luodin massa (g)	9,45	8,0	3,56	7,97
Luodin pituus (mm)	28,9	22,5	19,0	
Hylsyn massa (g)	11,2	8,5	6,2	
Hylsyn pituus (mm)	51,0	38,7	44,5	38,65
Patruunan massa (g)	23,6	18,0	11,4	
Patruunan pituus (mm)	70,8	55,7	57,4	55,8
Panoksen massa (g)	2,9	1,68	1,62	1,6
Lähtönopeus (m/s)	780	715	975	710
Maksimipaine (MPa)	330	304	360	
Suuenergia (J)	2870	2050	1690	2010

Tavoitteena paneelin testauksessa on selvittää, pysäyttääkö jokin paneelissa olevista rakenteista 7,62x39 -luodin. Kyseessä on siis 7,62-millinen kiväärin luoti. Taulukossa

9.1. on koeammunnoissa käytettävän luodin ominaisuuksia. Vertailun vuoksi siinä on myös kahden erikaliiperisen, 7,62x51 ja 5,56x45, NATO-patruunan, sekä 7,62x39 kottimaisen rynnäkkökiväärin luodin ominaisuuksia. Koeammunnoissa ei siis haeta paneelille v_{50} -arvoa eikä mitata trauman syvyyttä. Testit suoritetaan kuivalle paneelille. Saatujen tuloksien perusteella tehdään päätelmät siitä, minkälainen paneelin tulee olla, jotta se pysäyttää luodin. Paneeli tutkitaan ja havaintojen perusteella tehdään vaurioanalyysi. Koeammuntatuloksista laaditaan mittauspöytäkirjat. Osumavaikutusanalyysien yhteydessä on selostusta tukevia kuvia keraamipaneelin purkamisen eri vaiheista.

9.2 Kokeen suoritus

Testipaneelin koeammunnat suoritettiin 28. - 29.10.2010 Puolustusvoimien Teknillisen Tutkimuslaitoksen sisäampumaradalla. Olosuhteet olivat tasaiset koko koeammuntojen ajan, lämpötila 22,1 °C ja ilman suhteellinen kosteus 20 %. Näyte oli kuiva ja sen lämpötila myös 22,1 °C. Ammuksena oli 7,62-millinen venäläisen Kalashnikovin M43 kovaippaluoti, jossa on pehmeä teräsydin. Kyseisen luodin paino on 8,0 grammaa. Testit ammuttiin nollakulmassa (eli 90 asteen kulmassa) 25,0 metrin etäisyydeltä.

Testattava paneeli kiinnitettiin telineeseen 25,0 metrin etäisyydelle ampuma-aseen piipun päästä. Paneelin taakse kiinnitettiin 0,5 mm paksu alumiininen todistelevy. Jokaiseen testattavaan osioon merkittiin kolme kohtaa, joihin oli tarkoitus ampua. Kohdat valittiin siten, että osumien etäisyys oli vähintään 6,0 cm. Ne eivät myöskään olleet samalla vaaka- tai pystyakselilla. Telineen taakse asetettiin kamera, joka kuvasi todistelevyissä tapahtuvia mahdollisia muutoksia iskun aikana. Ampumaradalla on lisäksi kiinteästi muita laserosoittimella varustettuja kameroita ja operointipuolella näyttöjä, joiden avulla voidaan testien aikana kohdistaa ase suunniteltuun osumakohtaan ja valvoa, ettei radalla liikuta.

Luotien iskunopeudet mitattiin tutkalla. Ampumaradalla on käytössä myös infrapunavaloveräjät (3 kpl) ja aikavälilaskimet, mutta niillä saadaan nopeudet ainoastaan pienillä etäisyyksillä (5,0 m ja 10,0 m). Näissä koeammunnoissa käytetty pitkä etäisyys vaatii tutkan tai muun vastaavan välineen iskunopeuden määrittämiseen. Pöytäkirjassa lukeva etäisyys 22,5 metriä tarkoittaa keskimmäisen valoveräjän ja maalitelineen välistä etäisyyttä. Luotien nopeutta säädeltiin ruudin määrällä.

Koease 7,62x39 n:o 1338 kiinnitettiin ammuntapenkkiin ja kohdistettiin laserin ja kameroiden avulla. Tutka ja sen perusteella nopeuskäyrät piirtävä ohjelma käynnistettiin tietokoneelta. Toisella tietokoneella pidettiin pöytäkirjaa. Pöytäkirjaan tulostuvat automaattisesti valoveräjien antamat nopeudet, mutta niillä ei tässä tapauksessa ole merkitystä. Tutkan mittaamat nopeudet kirjataan pöytäkirjaan erikseen. Tietokoneohjelma laskee nopeuksien lisäksi ballistisen kertoimen, joka kuvaa luodin hidastuvuutta. Tämä saadaan kaavalla

$$c = \ln\left(2 * \frac{v_{12}}{v_{13}} - 1\right), \quad (4)$$

missä v_{12} on ensimmäisen ja toisen valoveräjän välinen keskinopeus ja v_{13} ensimmäisen ja kolmannen valoveräjän välinen keskinopeus.

9.3 Tulokset

Ensimmäisessä testattavassa osassa alumiinioksidikerroksen paksuus oli neljä millimetriä. Tämä osa näkyy kokonaisuudessaan kuvassa 9.2. Testipaneelin tähän osaan ammuttiin kolme kertaa. Ensimmäinen luoti pysähtyi rakenteeseen, kun iskunopeus oli 691 m/s. Toinen ammuttu luoti läpäisi rakenteen nopeudella 718 m/s. Viimeinen ammus läpäisi myös koepaneelin nopeudella 714 m/s.



Kuva 9.2. Koepaneelin yläosa. 4,0 mm paksu alumiinioksidi.

Toisessa osiossa (oikealla kuvassa 9.3.) Al_2O_3 -kerroksen paksuus oli 2,0 mm. Alueelle ammuttiin vain kerran, sillä jo ensimmäinen osuma läpäisi rakenteen. Luodin iskunopeus oli 683 m/s. Viimeisen testattavan osion (vasemmalla kuvassa 9.3.) alumiinioksidikerros oli 3,2 mm. Siihenkin ammuttiin ainoastaan yksi laukaus, sillä jo ensimmäinen läpäisi sen rakenteen. Iskunopeus oli 693 m/s.



Kuva 9.3. Koepaneelin alaosa. Vasemmalla 3,2 mm paksu alumiinioksidi, oikealla 2,0 mm paksu alumiinioksidi.

Pysähtyneiden ja läpäisseiden perusteella voidaan päätellä 2,0-millimetrinen sekä 3,2-millimetrinen kerroksen olevan liian ohuita suojaamaan kyseisenlaisilta luodeilta,

kun keraamimateriaalina on alumiinioksidi. 4,0 millimetriä voi riittää pysäyttämään luodin, jos nopeus pysyy alle 700 m/s ja luoti osuu sopivaan kohtaan, eikä esimerkiksi saumakohtaan.

Luodeille voi laskea kineettisen energian iskuhetkellä käyttäen kaavaa

$$E = \frac{1}{2}mv^2, \quad (5)$$

missä E on kineettinen energia eli liike-energia, m on luodin massa ja v on luodin nopeus iskuhetkellä. Taulukossa 9.2. näkyy kaikkien testissä ammuttujen luotien kineettiset energiat sillä hetkellä, kun luoti iskeytyy maaliin. Koeammuntapöytäkirjat ovat diplomityön liiteosiossa liitenumeroilla 3, 4 ja 5.

Taulukko 9.2. Luotien liike-energiat iskuhetkellä.

Keraamin paksuus	Laukaus nro	Iskunopeus v (m/s)	Läpäisy/Pysäytys	Kineettinen energia E (kJ)
4 mm	1	690,91	PYS	1,91
	2	717,66	LÄP	2,06
	3	714,05	LÄP	2,04
3,2 mm	1	693,32	LÄP	1,92
2 mm	1	683,1	LÄP	1,87

Kineettisten energioiden suuruuksista voidaan tehdä päätelmiä koskien testattavan materiaalin ballistista kestävyyttä. Kun verrataan koeammunnoissa saavutettuja iskuenergioita ja taulukon 9.1. teoreettista suuenergian arvoa (2,05 kJ, kun nopeus 715 m/s) voidaan huomata, että energia ei juuri vähene matkalla. Tapauksessa, jossa luoti pysähtyy testipaneeliin, kaikki kineettinen energia muuttuu iskuenergiaksi. Läpäisytilanteissa luodille jää jäännösnopeus ja siitä johtuen myös kineettistä jäännösenergiaa. Jäännösnopeutta ei kuitenkaan voida määrittää luotettavasti ilman tarkoituksenmukaisia välineitä, joten yllä oleva taulukko ei ole täydellinen.

Luotien matkaan suunnilleen käyttämät ajat saadaan laskettua kaavasta

$$t = \frac{s}{v}, \quad (6)$$

missä t on aika sekunneissa, s on luodin ilmassa kulkema matka metreissä (22,5 m), ja v on luodin nopeuden 2. valoveräjällä ja luodin iskunopeuden keskiarvo. Tällä kaavalla saadaan luotien matkaan käytettyjen aikojen keskiarvoksi 0,032 sekuntia eli 32 ms. Tässä jää kuitenkin huomiotta aseiden piipun ja toisen valoveräjän välinen 2,5 metrin matka, sillä tarkkaa suunopeutta ei määritetty.

9.4 Osumavaikutusanalyysi

Ongelmana pienistä, kooltaan 5,0 cm x 5,0 cm olevista keraamilaatoista muodostuvissa paneeleissa on se, että rakenne ei ole homogeeninen. Saumakohtat ovat tällaisessa rakenteessa aina heikompia. Osuma saumakohtaan testauksessa väärentää tulosta heiken-

tävästi, ja osuma keskelle paneelia taas antaa ymmärtää paneelin olevan parempi kuin kokonaisuus onkaan. Tositilanteessa osuma saumakohtaan voi olla vaarallinen, vaikka paneelin periaatteessa pitäisi pysäyttää luoti. Toisaalta taas erilliset laatat, tai lähinnä niiden välissä olevat saumat, voivat estää murtuman etenemisen rakenteessa. Tällöin paneeli voi kestää useita osumia. Jos yhtenäinen keraamipaneeli saa osuman, murtuma leviää lähes poikkeuksetta koko paneelin pinta-alalle tehden sen näin ollen käyttökelvottomaksi yhdellä osumalla.

Seuraavia vaurioanalyysyjä varten testipaneeleista irrotettiin ensin puukon ja vasaran avulla päällä ollut lasikuitu-epoksi-laminaatti. Keraamikerrokset ovat tässä koepaneelissa niin ohuet, että varsinaisia luodin aiheuttamia iskemäkartioita ei näihin ole muodostunut, tai ainakaan näistä ei voi sellaisia paljain silmin havaita. Keraamikerrokseen aiheutuneiden vaurioiden analysoinnin jälkeen keraamilaatat irrotettiin. Näin saatiin esiin lasikuitukerros, jotta voitiin tutkia kuituihin ja sidokseen aiheutuneet vauriot. Ohuita lasikuitukerroksia oli 16 kappaletta. Jokainen kerros otettiin yksitellen irti. Paltinasidokselliset lasikuitumatot olivat joka kerroksessa yhtä ehjiä ja vaurioitumattomia.

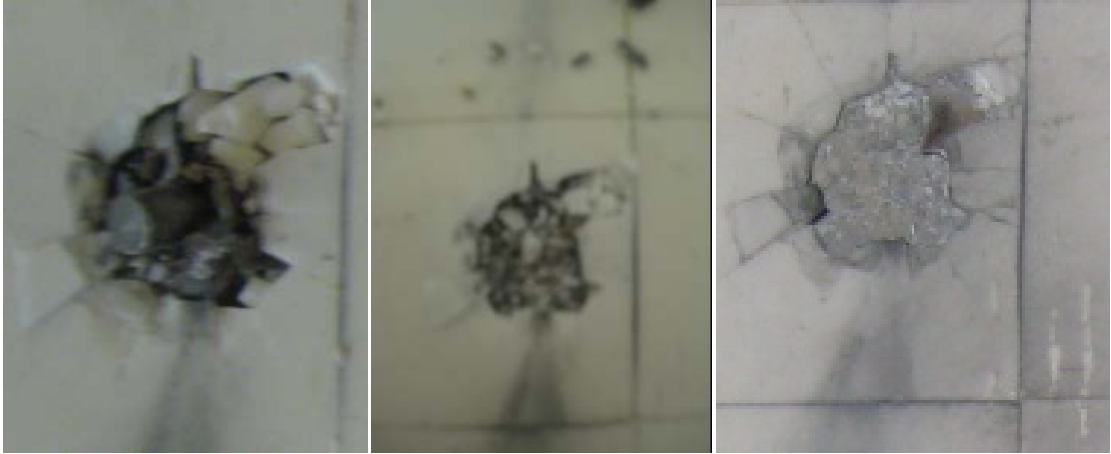
9.4.1 4,0 mm Al₂O₃ Bitossi

Koepaneelin yläosassa oli siis kolme osumakohtaa. Jokainen osuma on aiheuttanut pintakerroksena olevan laminaatin irtoamisen vaakasuunnassa osumakohtaan molemmiin puolin, yhteensä noin 20 cm matkalta. Lisäksi koko koepaneelin yläosa on osittain delaminoitunut paneelin paksuuden puolivälistä iskun voimasta. Tämän voi havaita kuvasta 9.4., jossa on koepaneelin sivuprofiili ja siinä ohuita mustia poikkisuuntaisia rakoja.



Kuva 9.4. Koepaneelin yläosan sivuprofiilista näkyy, että paneelin sisällä on tapahtunut lasikuitukerrostensa välistä delaminoitumista.

Ensimmäisen laukauksen osumakohdassa oli edelleen luoti, sillä tapahtui pysäytys. Luoti on osunut hyvin levyyn siten, että reikä ei ole ulottunut saumakohtiin. Reikä oli melko siisti, halkaisijaltaan noin 1,5 cm. Keraami on halkeillut osumakohdan ympäriltä melko vähän. Kuvassa 9.5. on tämän osumakohdan tilanne, kun osumakohta on koskematon, kun luoti on poistettu ja kun osumakohta on putsattu kokonaan. Tämä oli ainoa osumakohta, josta saattoi havaita iskun voimasta muodostuneen pienen iskemäkartion, kun keraamilaattoja irrotettiin rakenteesta.



Kuva 9.5. Pysäytys. Vasemmalla luoti on edelleen reiässä, keskikuvassa luoti on poistettu. Oikealla kuva kokonaan putsatusta osumakohdasta.

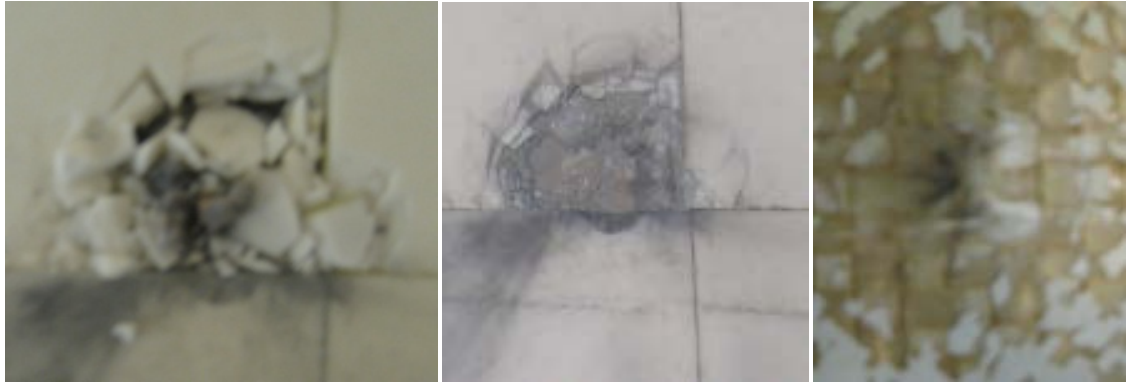
Musta uretaaniliima on irronnut lasikuitumatosta ja jäänyt keraamilaattoihin kiinni, paitsi pieneltä alueelta luodinreiän ympäriltä. Lasikuitukerroksessa näkyi pieniä vaurioita kohdassa, josta luoti poistettiin. Osumakohdassa oli vielä luodinjäänteitä. Osumakohdasta ympäröivä sidos oli täysin ehjä. Alla olevat kuvat (kuva 9.6.) on otettu hieman yläviistosta koepaneelin suhteen parhaan mahdollisen kuvakulman ja valaistuksen saamiseksi. Vasemman puoleisessa kuvassa näkyy, miten keraami on hajonnut kerroksittain halkeillen. Oikealla puolella on osumakohta, josta näkyy sidoksen eheys luodinreiän ympärillä. Luoti on hajottanut hieman päällimmäistä lasikuitukangaskerrosta. Musta rengas on uretaaniliimaa.



Kuva 9.6. Keraamipinnan alle syntyneet vauriot.

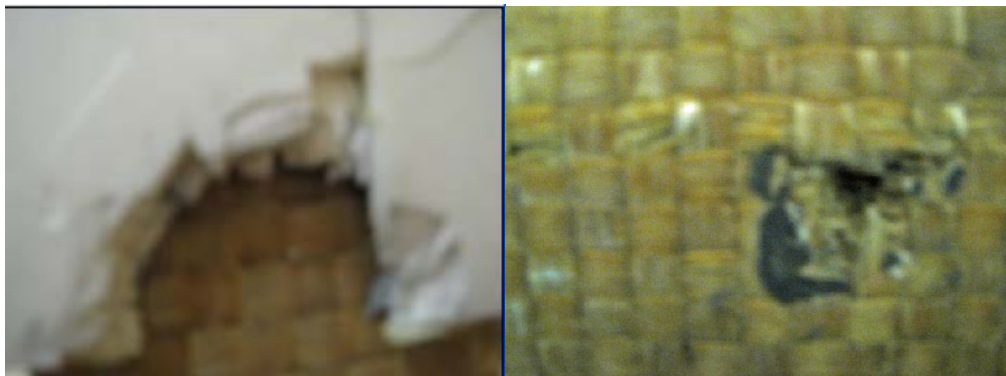
Seuraavat koepaneelin samaan osioon ammutut luodit läpäisivät koko rakenteen. Ensimmäisessä läpäisyssä luoti on osunut laatan kulmaan ja tehnyt keraamiin noin 1,5 cm x 2,5 cm kokoisen reiän. Keraamisirpaleet olivat jääneet paikalleen osumakohtaan, eivätkä lentäneet ympäriinsä. Lisäksi siinä oli luodin jäänteitä. Laatta, johon luoti osui, ei murtunut osumakohdan ympäriltä paljoakaan. Halkeamia ei näkynyt. Viereisestä laatasta on lohjennut hyvin vähän keraamiin pintaa. Osumakohdan pohjasta näkyi vähän vaurioitunutta lasikuitukerrosta, luodinreikää ei näkynyt. Paneelin takapuolella näkyi

luodin ulostuloreikä, ja muutamia senttejä halkaisijaltaan oleva lasikuitukerrostien pulistuma. Alla olevassa kuvassa 9.7. näkyy osumakohta sellaisenaan, putsattuna sekä paneelin takaa kuvattuna.



Kuva 9.7. Lämpäisy. Vasemmalla ja keskellä osumakohta paneelin etupuolelta ja oikealla takapuolelta kuvattuna.

Kun keraamilaatat irrotettiin, osumakohdan laatan alla lasikuitusidos oli ehjä luodinreiän ympärillä. Luodin osuessa lähes laattojen risteyskohtaan alemman laatan alla oleva ylin loimilanka oli hieman vaurioitunut. Samoin reunoilla oli kudelankoja poikki. Kuva 9.8. havainnollistaa keraamilaattojen alla tapahtuneita vaurioita. Vasemmanpuoleisessa kuvassa näkyy osumakohdan reunus keraamilaatassa. Kuva on otettu, kun keraamilaatat on jo irrotettu ja siirretty pois tieltä. Siksi kuvassa ei näy luodinreikää. Oikealla puolella on luodinreikä paneelin yläpäästä kuvattuna. Kyseisen kuvan keskellä ja vasemmassa yläviistossa näkyy sidokseen kohdistuneita vaurioita hieman. Kuitukimput ovat väistyneet hieman luodin tieltä.



Kuva 9.8. Osumakohdan keraamilaattaan syntyneet vauriot ja luodinreikä.

Myös kolmas samaan osioon ammuttu luoti on osunut juuri laatan kulmaan. Tämäkin luoti siis läpäisi koko rakenteen. Keraamilaatassa näkyi osumakohdan ympärillä halkeamia. Myös viereinen laatta on lohjennut reunasta jonkun verran. Keraamissa oli noin 2,0 cm x 2,5 cm kokoinen reikä. Ylemmässä laatassa näkyi keraamin pinnassa halkeama, joka ulottui laatan yläreunaan saakka. Osumakohdan pohjassa näkyi lasikuitukerros ja vähän luodin läpimenoireikää. Paneelin takapuolella luodin ulostuloreikä oli

suuri ja selkeä. Lasikuitukerroksen palttinasidos on selvästi vaurioitunut osumakohdan ympäriltä, ja useat kuitukimput ovat auenneet sidoksesta irti. Tämän osumakohdan vauriot näkyvät kuvassa 9.9.



Kuva 9.9. Toinen läpäisy. Vasemmalla ja keskellä osumakohta paneelin etupuolelta ja oikealla takapuolelta kuvattuna.

Ylemmän laatan halkeama ulottui lasikuitukankaaseen asti, vaikka keraamilaatan päältä näytti aluksi, että halkeama on ainoastaan pinnassa. Halkeaman syvyys kuitenkin tuli esille, kun keraamilaatat poistettiin. Sidosrakenteessa näytti olevan monttu osumakohdan alapuolella ja pullistuma sen yläpuolella. Luodinisku on siis vaikuttanut kuiturakenteeseen. Se on aiheuttanut lasikuitukerroksien delaminoitumista luodinreiän yläpuolella ja toisaalta aiheuttanut alapuolelle suuremman traumapullistuman.

Keraamilaatan reuna on rikkoutunut halkeillen. Pinnassa näkyi osumakohdasta ulospäin suuntautuvia halkeamia. Osa näistä oli vain pintahalkeamia, osa läpi keraamin. Keraamilaattaan on muodostunut melko suuri reikä, mikä käy ilmi alla olevasta kuvasta. Luodinreikä oli melko kaukana keraamin reunasta. Kuvassa 9.10. näkyy lisäksi luodinreikä ja sen ympärille sidokseen aiheutuneet vauriot.



Kuva 9.10. Vasemmalla keraamilaattaan iskun aiheuttamat vauriot ja oikealla luodinreikä sekä sidosvauriot.

9.4.2 3,2 mm Al₂O₃ Morgan

Ensimmäinen luoti läpäisi rakenteen, jossa keraamin paksuus oli 3,2 millimetriä. Luoti on osunut juuri kahden levyn väliseen saumakohtaan, kuten kuvasta 9.11. voi huomata. Osumakohdalla saattoi olla vaikutusta läpäisyn tapahtumiseen. Koepaneelin päällimmäisenä kerroksena ollut lasikuitu-epoksi-laminaatti on irronnut keraamin pinnasta osumakohdan ympäriltä iskun voimakkuudesta johtuen. Tämä alue oli halkaisijaltaan noin kymmenen senttimetriä. Alue näkyy kappaleen alussa olleessa kuvassa 9.1. tummana läiskänä pintakerroksen alla. Lisäksi laminaatti oli revennyt vaakasuunnassa osumakohdan molemmin puolin, yhteensä noin 15 cm pituiselta matkalta.

Keraami ei ole hajonnut kovin laajalta alueelta, osumakohdan ympäriltä koko keraamikerros on rikkoutunut noin kahden - kolmen senttimetrin halkaisijalta. Hieman laajemmalla on irronnut vähän pintaa. Murtumat eivät ole levinneet pitkälle, edes pinnassa ei näy selviä halkeamia.

Osumakohdan takapuolella oli melko siisti, suurehko luodin ulostulojälki. Paltinasidoksellinen lasikuitukerros on revennyt osumakohdan ympäriltä kuitujen mentyä poikki. Fenolipinnoite on lohkeillut. Sidos ei ole lähtenyt purkautumaan kauempaa eikä osumakohdan ympärillä näy vaurioita kuiduissa.



Kuva 9.11. *Läpäissyt laukaus 3,2 mm paksun keraamin rakenteeseen. Vasemalla koskematon osumakohta, keskellä irtopalaset putsattu pois, ja oikealla osumakohta paneelin takapuolelta.*

Keraamilaattoja poistettaessa huomasi hyvin eron paksuimman kerroksen ja tämän kerroksen välillä. Tämä kerros ei irronnut yhtä hyvin, ja uretaaniliima oli jämähtänyt lasikuiturakenteeseen kiinni, jolloin sitä oli vaikea irrottaa vaurioittamatta sidosrakennetta. Vaikka keraamilaatoissa ei ollut näkyviä vaurioita, laatat, joihin luoti oli osunut, irtosivat hajoten ja murentuen. Kaikki muut laatat irtosivat ehjinä. Myös uretaaniliima lähti irti helpommin vaurioituneiden laattojen alta, se oli siis delaminoitunut osittain jo iskun vaikutuksesta.



Kuva 9.12. Keraamilaatan reuna osumakohdassa ja luodinreikä.

Yläpuolisessa kuvassa 9.12. on vasemmalla esitetty keraamin reunavauriota osumakohdan ympärillä. Kuvasta näkyy, että keraami on rikkoutunut melko siististi, eikä halkeamia lähde etenemään osumakohdasta ulospäin. Reuna on lisäksi melko tasainen, keraami ei ole murtunut pinnan alta, eli kovin suurta iskemäkartiota ei ole muodostunut. Oikeanpuolisessa kuvassa on erittäin siisti ja pyöreä luodinreikä. Kuvasta ei voi havaita suuria vaurioita sidoksessa paneelin etupuolella. Kuten aiemmassa kuvassa 9.11. näkyi, paneelin takapuoliset vauriot sidoksessa ovat huomattavasti suuremmat.

9.4.3 2,0 mm Al₂O₃ Barat Ceramics

Paneelin ohuinta osaa ammuttaessa luoti on osunut aivan yhden laatan nurkkaan, lähelle neljän laatan risteyskohtaa. Kuvan 9.13. keskimmäisestä osasta voidaan huomata, että kohdelaatan lisäksi vain sen yläpuolella ollut laatta on lohjennut hieman. Viereisissä laatoissa ei ole lainkaan murtumia. Yläpuolisesta laatasta on lohjennut kaksi isompaa keraamipalaa, kun osumakohdan ympäriltä keraami on mennyt murskaksi.

Kuten kappaleen ensimmäisestä kuvasta 9.1. nähdään, päällimmäinen laminaattikerros irtoaa suikaleina vaakasuunnassa osumakohdan molemmin puolin yhteensä noin kymmenen sentin matkalta.



Kuva 9.13. Ohuimman rakenteen läpäissyt osuma. Vasemmalla koskemattomana, keskellä putsattuna ja oikealla paneelin takapuolelta kuvattuna.

Luoti on lävistänyt tämän koko koepaneelin ohuimman kohdan todella nätisti, iskeytynyt ”sukkana läpi”. Ainoastaan murskautunut keraami on irronnut, eikä luodinreiän ympäriltä näkynyt juuri edes kudottua lasikuitukerrosta, vaan uretaaniliimakerros oli jäänyt vahingoittumattomana kiinni lasikuitupintaan kiinni. Uretaaniliiman adheesio keraamiin on kuitenkin pettänyt iskun vaikutuksesta. Osumakohdan tausta on todella siisti ja luodin ulostuloreikä hyvin pieni, kuten kuvan 9.13. viimeisestä osasta voi nähdä. Lasikuitusidoksesta on katkennut vain pari kuitukimppua, eikä laajemmalla alueella näy vaurioita.

Paneelin ohuimmat keraamilaatat oli vaikea irrottaa. Uretaaniliima piti ne tiukasti kiinni lasikuitukerroksessa, ja ne murenivat liuskoittuen hyvin pieneksi niitä hakattaessa irti. Paksummat laatat lähtivät huomattavasti helpommin, joko lohkeillen tai kokonaisina. Alla olevassa kuvassa 9.14. näkyvät keraamilaattojen alla olevaan kerrokseen aiheutuneet vauriot.



Kuva 9.14. Keraamin reunaan muodostuneet vauriot ja luodinreikä.

Lasikuitukerroksen sidoksessa ei näkynyt vaurioita luodinreiän ympärillä. Luoti on lävistänyt kaikki kerrokset siististi, ja kuidut ovat katkenneet ainoastaan luodinreiän kohdasta. Sidos oli pysynyt hyvin tiiviinä ympäröivällä alueella, lasikuitukimput eivät ole pullahtaneet sidoksesta ulos, eivätkä siirtyneet luodin tieltä.

10 YHTEENVETO

Ballistisille henkilösuojavarusteille asetetuissa vaatimuksissa ei ole suuria eroja verrattaessa keskenään eri maiden käytäntöjä. Eniten huomiota kiinnittävät ne maat, joilla on edelleen käytössä esimerkiksi teräskypäriä tai jokin muu niin sanotusti vanhentunut tuote tai tekniikka. Osa maista ei anna lainkaan suojavarusteisiinsa liittyvää tietoa ulkopuolisille. Vaikka uhkakuvat ovat hieman erilaisia eri puolilla maailmaa, suojavarusteiden ominaisuudet ja vaatimukset eivät poikkea toisistaan huomattavasti. Kypärien luotisuusluokka on yleensä NIJ II - NIJ IIIA ja v_{50} -arvo vaihtelee 540 m/s ja 650 m/s välillä. Sirpalesuojaliivien luotisuusluokka on suunnilleen sama kuin kypäriä, sillä kumpakaan ei ole tarkoitettu pysäyttämään luoteja. Myös v_{50} -arvo on suunnilleen samaa tasoa kuin kypäriä. Luotisuusjapaneelit ovat tyypillisesti suojaluokaltaan NIJ IV tai vastaava.

Yleisimmät materiaalit ballistisissa henkilösuojavarusteissa ovat aramidikuidut sekä keraamit, lähinnä alumiinioksidi. Alumiinioksidi on luotisuusjapaneelien hinta-laatusuhteeltaan paras vaihtoehto keraameista. Suojavarusteissa käytetään kudottuja kankaita, kuitukankaita ja erilaisia komposiittirakenteita. Vielä ei ole kehitetty suorituskykyisempiä taloudellisia ja kevyitä materiaaleja, joiden avulla saataisiin parempia suojavarusteita. Kuitumateriaalien voidaan olettaa kehittyvän lähitulevaisuudessa entistä paremmiksi. Myös uusia kuituja, joita ei aiemmin ole juuri käytetty ballistisissa sovelluksissa, tullaan varmasti käyttämään enemmän.

STANAG 2920 on käytetyin standardinkaltainen ohje, joka pitää sisällään sirpalesuojaliivien ja kypärien testausmenetelmät v_{50} -arvon määrittämiseksi. Luotisuusluokan taso voidaan määrittää samoilla välineillä, mutta yhtenäistä vertailun mahdollistavaa absoluuttista arvoa ei ole. National Institute of Justice on laatinut suojaluokat luoteja vastaan määrittävän taulukon. Uusin versio on NIJ 0101.06, mutta käytetyin on sitä edeltävä 0101.04. Kyseisen taulukon avulla voidaan vertailla jonkin verran erilaisia luotisuusluokkia keskenään, mutta aseita ja luotityyppejä on niin lukuisia erilaisia, että taulukko ei mitenkään kykene kattamaan koko kirjoa. Diplomityön liitteenä ovat työssä esiteltyjen maiden vaatimukset taulukoituna.

Kokeellisessa osassa testattiin keraamipintaisen luotisuusjapaneelin suojaustasoa. Koeammuntatulokset toimitettiin pöytäkirjamallisena FY-Composites Oy:lle. Lisäksi toimitettiin tähän diplomityöhön liitetyt osumavaurioanalyysit. Ainoastaan 4,0 mm paksu alumiinioksidikerros riitti pysäyttämään yhden 7,62x39 -luodin. Tämänkin luodin pysähtymiseen vaikutti se, että se osui keskelle laattaa. Luodin nopeus oli alle 700 m/s ja etäisyys 25,0 metriä. Kaksi muuta samaan osaan ammuttua luotia osuivat lähelle laattojen saumoja, jotka ovat heikoimpia paikkoja. Nämä luodit läpäisivät koko rakenteen.

Ohuemmat keraamikerrokset, 2,0 mm ja 3,2 mm, eivät riittäneet kyseisen luodin pysäyttämiseen, kun nopeutta luodilla oli alle 700 m/s ja etäisyys sama 25,0 m.

Spall linerina toimineet fenolilaminoidut palttinasidokselliset lasikuitukerrokset olivat koepaneelissa niin tiiviitä, että kuitujen pullahtamista tai väistymistä luodin tieltä ei tapahtunut lainkaan. Kyseisessä kerroksessa ainoat, tosin riittävät, vauriot aiheutuivat siitä, kun luoti leikkasi kuidut rikki siltä kohdalta, miltä se lävisti ne. Osumakohdan ympärille ei pahoja vaurioita tullut. Spall linerin lisäksi keraamin pinnalla ollut lasikuitu-epoksi-laminaatti piti hyvin keraamisirpaleet rakenteen sisällä.

Kokeellisen osan perusteella voidaan päätellä, että luotisuojapaneelin keraamikerroksen tulee olla paksumpi kuin 4,0 mm, jotta paneeli pysäyttäisi 7,62x39 -luodin. 4-millimetrinen kerros saattaa pysäyttää, mikäli luoti osuu sopivaan kohtaan ja nopeus on alle 700 m/s. Mikäli keraamikerroksen paksuutta ei kasvateta, tulee lasikuituista spall liner -kerrosta kasvattaa kohtuuttomasti, jotta kokonaisuus voisi pysäyttää kyseisen luodin. Luotettavampi pysäytystodennäköisyys saadaan kuitenkin keraamia lisäämällä. Paneelia tutkittaessa ja lasikuitukerroksia purettaessa kävi ilmi, että luodit lävistivät jokaisen kerroksen yhtä helposti. Spall liner -kerros ei siis hidastanut luotia merkittävästi, vaan reiän siisteydestä ja symmetrisyydestä päätellen lasikuitukimput katkesivat helposti. Tämän perusteella spall lineria ei voida pitää pysäyttävänä, vaan sen päällä on oltava luodin pysäyttävä materiaali.

Keraamisen luotisuojapaneelin kykyyn pysäyttää luoteja vaikuttaa keraamikerroksen paksuuden ja spall linerin lisäksi se, onko keraamiosa yhtenäinen vai pienistä laatoista tehty. Yhtenäinen on yleensä käyttökelpoton yhden iskun jälkeen, koska sen sekundaarihalkeamat ulottuvat usein reunoihin asti, tai ainakin hyvin laajalle alueelle. Yhtenäinen paneeli voi kuitenkin saada kaarevia muotoja, jolloin se istuu paremmin ihmisvartalolle. Pienistä laatoista tehty keraamipaneeli voi olla ainoastaan suora, jolloin se ei mukaudu hyvin vartaloon. Tällainen luotisuojapaneeli kuitenkin kestää useita iskuja, koska sekundaarihalkeamatkin pysähtyvät yleensä laattojen saumakohtaan. Kyseiset saumakohdat tosin ovat aina paneelin heikoimpia kohtia.

Keraamiseen luotisuojapaneeliin ammuttaessa luodin nopeudella on merkitystä myös alhaisinta läpäisynopeutta korkeammista nopeuksista puhuttaessa. Kovana materiaalina keraami pyrkii hajottamaan luodin, ja tarpeeksi korkeissa nopeuksissa luodista riippuen se onnistuu. Tällöin luoti ei läpäise luotisuojapaneelia, vaikka se alhaisemmissa nopeuksissa voisi läpäistä.

11 LÄHTEET

[1] Yleinen ase- ja asejärjestelmäopas. Vammala 2001, Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus. 389 s.

[2] Iremonger, M.J. & Tobin, L.B. Modern body armour and helmets: an introduction. Canberra, Australia 2006, Argon Press. 135 p.

[3] Body Armour – Technological Issues. Military Technology. (2006)4, pp. 72-79.

[4] StrategyPage [WWW]. [viitattu 16.9.2010]. Saatavissa: <http://www.strategypage.com/gallery/images/modular-tactical-vest.jpg>

[5] Merikoski, J. Posterit Suomen Puolustusvoimien varusteista

[6] Mäkinen, M.J.J. Kotimainen komposiittikypärä teräsmyrskyihin. ASE-lehti (1999)3, s. 46-50.

[7] Scott, B.R., Spagnuolo, D.M. & Walsh, S.M. The development of hybridized thermoplastic-based structural materials with applications to ballistic helmets. Proceedings of the 22nd International Symposium on Ballistics, Vancouver BC, Canada, 14-18 November 2005. Pennsylvania, USA, 2005, DEStech Publications, Inc. pp. 735-742.

[8] Šestan-Busch d.o.o [WWW]. [viitattu: 20.10.2010]. Saatavissa: <http://www.sestan-busch.hr/en/proizvodi.html>

[9] Saksalaismallisen sotilaskypärän vaiheita [WWW]. [viitattu 18.2.2011]. Saatavissa: <http://www.pkymasehist.fi/sakskyp.html>

[10] Carpus, E., Mihai, C., Milici, M., Scarlat, N., Toma, D. & Visileanu, E. Woven technical textiles for ballistic protection. Proceedings of NOKOBETEF 6 and 1st European Conference on Protective Clothing, Stockholm, Sweden, May 7-10 2000. Stockholm, Sweden 2000, National Institute for Working Life. pp. 114-118.

[11] Eren, R., Karahan, M. & Kus, A. An investigation into ballistic performance and energy absorption capabilities of woven aramid fabrics. International Journal of Impact Engineering. 35(2008), pp. 499-510.

- [12] Lim, C.T., Ng, Y.H. & Shim V.P.W. Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor. *International Journal of Impact Engineering*. 28(2003), pp. 13-31.
- [13] Scott, R.A. Fibres, textiles and materials for future military protective clothing. *Proceedings of NOKOBETEF 6 and 1st European Conference on Protective Clothing*, Stockholm, Sweden, May 7-10 2000. Stockholm, Sweden 2000, National Institute for Working Life. pp. 108-113.
- [14] Naik, N.K., Reddy, B.C.K. & Shirao, P. Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation. *International Journal of Impact Engineering*. 32(2006), pp. 1521-1552.
- [15] van der Werff, H. Modelling of ballistic impact on fiber composites. NATO ASI "Defense Related Intelligent Textiles and Clothing for Ballistic and NBC (Nuclear, Biological, Chemical) Protection.
- [16] Scott, R.A. Military protection. In: Scott, R.A. *Textiles for protection*. UK 2005, Woodhead Publishing. pp. 597-621.
- [17] Machalaba, N.N., Budnitskii, G.A., Shchnetinin, A.M. & Frenkel, G.G. Trends in the development of synthetic fibres for armor material. *Fibre Chemistry*. 33(2001), pp. 31-40.
- [18] *Materials research to meet 21st-century defense needs*. 2003, Washington, D.C. The National Academies Press.
- [19] Tammela, V. *Polymeeritiede ja muoviteknologia*. Osa III. Helsinki 1989, Otakustantamo. 431 s.
- [20] Chawla, K.K. *Composite Materials: Science and Engineering*. 2nd Edition. New York, 1998, Springer-Verlag. 483 p.
- [21] Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa, V. *Komposiittirakenteet*. Helsinki, 2007, Muoviyhdistys ry. 494 s.
- [22] Brown, A. New Options in Personal Ballistic Protection [WWW]. *High-Performance Composites*, March 2003. [viitattu 7.9.2010]. Saatavissa: <http://www.compositesworld.com/articles/new-options-in-personal-ballistic-protection>
- [23] Honkala, M. TABAS – Taistelijan ballistisen suojauksen kuormittavuuden vähentäminen uusilla kevyemmällä materiaaleilla ja rakenteilla. MATINE Tutkimushanke

2005 -raportti. Tampereen teknillinen yliopisto, Kuitumateriaalitekniikan laitos, 2005. 51 s.

[24] Chaudry, I. & Chen, X. Ballistic protection. In: Scott, R.A. Textiles for protection. UK 2005, Woodhead Publishing. pp. 529-556.

[25] Pat. US 5926842. Ballistic Vest. Safariland Ltd., Inc., Ontario, California. (Price, A.L., Young, S.A.). 08/727838, 2.10.1996. (27.7.1999). 11 p.

[26] Billmeyer, F.W. Jr. Textbook of polymer science. 3rd edition. Canada 1984, John Wiley & Sons, Inc. 578 p.

[27] Cohen, Y., Rein, D.M. & Vaykhansky, L. A novel composite based on ultra-high-molecular-weight polyethylene. Composites Science and Technology. 57(1997), pp. 1149-1154.

[28] Pat. EP 1335048B1. A ballistic material comprising high strength polyethylene fibers. Toyo Boseki Kabushiki Kaisha, Osaka JP. (Yukihiro, N.). 03006187.3, 23.03.2000. (13.08.2003). 17 p.

[29] Nykänen, S. Polyeteeni (PE) [WWW]. Tampereen teknillinen yliopisto. [viitattu 22.11.2010]. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_pe_fi.pdf

[30] Manufacturing: Fiber Formation Technology [WWW]. [viitattu 31.1.2011]. Saatavissa: <http://www.fibersource.com/f-tutor/techpag.htm>

[31] Kawabata, S., Okada, S., Tanaka, A. & Yamashita, Y. Mechanical Characteristics of PBO Single Fiber. The University of Shiga Prefecture, Japan. 7 p.

[32] Hazell, P.J. Ceramic Armour: Design and Defeat Mechanics. Canberra, Australia 2006, Argos Press. 168 p.

[33] Alumiinien prosessointi [WWW]. [viitattu 20.10.2010]. Saatavissa: <http://www.helsinki.fi/kemia/opettaja/aineistot/alumiini/prosessi.htm>

[34] Lujitemuovitekniikka eri toimialoilla. POLYKO - Polymeeripohjaisten materiaalien käyttöaluekohtaisesti räätälöityjen koulutusmateriaalien tuottaminen. 138 s.

[35] ArmorCo [WWW]. [viitattu 20.10.2010]. Saatavissa: <http://www.armorco.com/shop/item.aspx?itemid=215>

- [36] ArmorCo [WWW]. [viitattu 20.10.2010]. Saatavissa: <http://www.armorco.com/shop/item.aspx?itemid=241>
- [37] VTT, Nonwovenin määritelmiä. Suominen Kuitukankaat Oy.
- [38] Nurmi, S. Kuitukankaiden valmistusmenetelmät. Tampere 2000, Tampereen teknillinen korkeakoulu. Opintomoniste. 104 s.
- [39] Body Armor News [WWW]. [viitattu 6.9.2010]. Saatavissa: <http://www.bodyarmornews.com/bulletproof-vests.htm>
- [40] Pat. DE FI/EP1399703 T3. Laminoitu ballistinen rakenne, joka käsittää vuorottelevia yksisuuntais- ja termoplastisia kerroksia. Teijin Aramid GmbH, Wuppertal, Saksa. (Bergmans, J.M., Winkler, E.M., Stolze, K.R.H-H. & Rose, C.K.J.). EP02778880.1, 5.6.2002. (24.3.2004). 6 s.
- [41] Ernst, L.J., Heru Utomo, B.D., van der Meer, B.J. & Rixen, D.J. Modelling delamination of composites using cohesive zone techniques. Proceedings of the 23rd International Symposium on Ballistics, Tarragona, Spain, 16-20 April 2007. Madrid, Spain, 2007, Gráficas Couche, S.L. c/ Cerámica. pp. 1389-1396.
- [42] Sotatekninen arvio ja ennuste 2025. STAE 2025, Osa 1. Teknologian kehitys. Ylöjärvi 2008, Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos. 564 s.
- [43] Broos, J.P.F. & Gunters, R. Study on the ballistic performance of monolithic ceramic plates. Proceedings of the 23rd International Symposium on Ballistics, Tarragona, Spain, 16-20 April 2007. Madrid, Spain, 2007, Gráficas Couche, S.L. c/ Cerámica. pp. 1561-1567.
- [44] Schuster, D. Improved Ballistic Protection Materials with Twaron, the p-aramid fibre of AKZO Nobel. Clothing & personal equipment for the combat soldier – post 2000. Colchester UK 3rd-6th October 1995. Essex UK 1995. pp. 156-161.
- [45] Soltin, Eeva. Tuotekehityspäällikkö & laatupäällikkö, FY-Composites Oy. Nokia. Yritysvierailu 6.10.2010. Vapaamuotoinen keskustelu ja esitteet aiheesta.
- [46] PFP(NAAG)D(2006)0001. STANAG 2920 (edition 3) - Ballistic test method for personal armour materials and combat clothing. Brussels, BE 2001, North Atlantic Council. 31 p.
- [47] NIJ Standard-0101.06. Ballistic Resistance of Body Armor. Washington DC, USA 2008, National Institute of Justice. 74 p.

- [48] MIL-STD-662F. V₅₀ Ballistic test for armor. VA, USA 1997. U.S. Army Research Laboratory. 18 p.
- [49] STANAG 2920 (Edition 4) AEP-//Volume 1 (Draft) - Procedures for evaluating the protection level of personal armour materials and combat clothing. 2008, NATO Standardization Agency. 24 p.
- [50] NIJ Standard-0106.01. For Ballistic Helmets. Washington DC, USA 1981. National Institute of Justice. 13 p.
- [51] Mascianica, F.S. Chapter 3: Ballistic testing methodology. In: Czanderna, A.W. & Wolsky, S.P. Methods and Phenomena: Their Applications in Science and Technology, volume 5, Ballistic Materials and Penetration Mechanics. Amsterdam, The Netherlands. 1980. Elsevier Science Publishers B.V. pp. 41-69.
- [52] Anctil, B., Bourget, D., Davis, G., Keown, M., Pageau, G. & Rice, K. Performance evaluation of ballistic helmet technologies. Proceedings of the Personal Armour Systems Symposium 2006, Leeds, UK 18-22 September 2006. Ipswich UK 2006, SEEBOLD. pp. 102-108.
- [53] Aare, M. & Kleiven, S. Evaluation of head response to ballistic helmet impacts using the finite element method. International Journal of Impact Engineering (2007)34, pp. 596-608.
- [54] Bass, C., Bolduc, M. & Waclawik, S. Development of a non-penetrating, 9 mm, ballistic helmet, trauma test method. Proceedings of the Personal Armour Systems Symposium 2002, The Hague, The Netherlands November 18-22 2002. pp. 61-68.
- [55] Hagwall M. Vapenverkan – Information utarbetad vid FOA om verkan av olika vapentyper mot markmål. Stockholm, Sverige 1985, Försvarets Forskningsanstalt. 96 s.
- [56] NIJ Standard-0101.04 Ballistic Resistance of Personal Body Armor. Washington DC, USA 2000, National Institute of Justice. 56 p.
- [57] Salonen, Heikki. Toimitusjohtaja ja tekninen johtaja, Verseidag Ballistic Protection Oy. Vantaa. Yritysvierailu 16.11.2010. Tuote-esittely, vapaamuotoinen keskustelu ja esitteet aiheesta.
- [58] Overview of Ballistic Plates which are in use within Armies of NATO/ PfP Countries. 2009.

- [59] MarS. Holsters and ballistic products [katalogi]. Czech Republic. 71 p.
- [60] Schuberth Gmbh. Product datasheet. Military. 2010.
- [61] Overview of Ballistic Plates which are in use within Armies of NATO/ PfP Countries. 2006.
- [62] Protaurius Ballistic Protection [WWW]. [viitattu 15.9.2010]. Saatavissa: http://www.protaurius.com/_wcm/documents/PROTAURIUS_ball_stand_GostR
- [63] Ballistic Helmets | Russian Arms, Military Technology, Analysis of Russia's Military Forces [WWW]. [viitattu 22.10.2010]. Saatavissa: <http://warfare.ru/?linkid=2481&catid=340>
- [64] Cutshaw, C.Q. & Gander, T.J. Jane's Ammunition Handbook. 6th Edition. UK 1997, Jane's Information Group Inc. 604 p.
- [65] BODY ARMOR | Russian Arms, Military Technology, Analysis of Russia's Military Forces [WWW]. [viitattu 22.10.2010]. Saatavissa: <http://warfare.ru/?lang=&catid=340&linkid=2482&linkname=BODY-ARMOR>
- [66] Laible, R.C. Chapter 4: Fibrous Armor. In: Czanderna, A.W. & Wolsky, S.P. Methods and Phenomena: Their Applications in Science and Technology, volume 5, Ballistic Materials and Penetration Mechanics. Amsterdam, The Netherlands 1980, Elsevier Science Publishers B.V. pp. 73-115.

12 LIITTEET

Liite 1: Kypärän FH-580 tekniset tiedot

VALMISTAJA: FY-COMPOSITES OY, Nokia

Ballistinen kuori

<i>Materiaali</i>	korkealuokkainen esi-impregnoitu aramidikuitu
<i>Suojausalue</i>	1200 cm ² (koko M)
<i>Neliömassa</i>	8,0 kg/m ²
<i>Sirpaleenkestävyys</i>	STANAG 2920 V ₅₀ -arvo > 580 m/s todellinen muodonmuutos nopeudella 530 m/s < 25 mm valokuvausmenetelmällä < 20 mm vahapäämenetelmällä
<i>Luodinkestävyys</i>	NIJ-STD-0106.01 mukaisesti testattuna > 420 m/s 7,5 gramman FMJ-luodille Osuma 50 mm etäisyydelle kypärän reunasta ei delaminoi kuoren reunaa.
<i>Maali</i>	tummanvihreä AN 11
<i>Heijaste</i>	750 - 950 nm 20 – 35 %
<i>Naarmuuntuvuus</i>	10 minuutin hankaus erityisellä testauslaitteella: reunanauha on ehjä, maali ei ole lohkeillut suurina paloin, pintalaminaatti on ehjä.
<i>Kaasunkesto</i>	sinappikaasu
<i>Kemikaalienkesto</i>	SFS 3566 Anti Corrol benssiini moottoriöljy rasva
<i>Syttyvyys</i>	ISO 3873 / SFS 2466, SFS 2465 propanikaasuliekki
<i>Napalminkesto</i>	ISO 3873 / SFS 2465 20 ml palavaa napalmia
<i>Iskunkestävyys</i>	EN 397 työsuojelukypärille, < 5 kN
<i>Säänkesto</i>	Puolustusvoimien tutkimuskeskuksen (nyk. teknillinen tutkimuslaitos) tutkimustodistus / 132/Sk2/18.12.1990

28 päivän kiihdytetty säärasitus

Sisäosa

Materiaalit

pintakankaat 85 % PA / 15 % elastaani, pintaväri musta
 pehmuste PE-vaahtoa, paksuus 5 mm, 30/70 kg/m³
 kangaskudos pehmusteen sisällä 100 % PES
 lakipalan pehmuste EPS-muovia, tiheys 20 kg/m³
 niskatyynylle muodon antava jousi lujittamatonta massavärjättyä
 POM-muovia, musta
 sisäosan säätöhihna lujittamatonta massavärjättyä LDPE-muovia,
 musta
 hikinauha nahkaa
 nauhat 100 % CO, leveys 18 mm, vihreä / musta, nauhan solki lu-
 jittamatonta massavärjättyä POM-muovia, musta

Muuta

Paino

S-koko < 1000 g ± 50 g
 M-koko < 1100 g ± 50 g
 L-koko < 1200 g ± 50 g

NSN =

S-koko 8470580000756

Nato Stock Number

M-koko 847058000757

L-koko 847058000758

Merkinnät

jokaisessa kypärässä nimikekoodi, valmistusvuosi, valmistajan nimi tai tunnus, koko ja yksilönumero

Lyhenteet

PA = polyamidi

EPS = solustettu polystyreeni

PE = polyeteeni

POM = polyoksimeteeni

PES = polyeetterisulfoni

LDPE = matalatiheyksinen polyeteeni

Liite 2: Kypärän FH-610 tekniset tiedot

VALMISTAJA: FY-COMPOSITES OY, Nokia

Ballistinen kuori

<i>Materiaali</i>	korkealuokkainen esi-impregnoitu aramidikuitu
<i>Suojausalue</i>	1300 cm ² (koko M)
<i>Neliömassa</i>	8,5 kg/m ²
<i>Sirpaleenkestävyys</i>	STANAG 2920 V ₅₀ -arvo > 610 m/s todellinen muodonmuutos nopeudella 530 m/s < 25 mm valokuvausmenetelmällä < 20 mm vahapäämenetelmällä
<i>Luodinkestävyys</i>	NIJ-STD-0106.01 mukaisesti testattuna > 420 m/s 7,5 gramman FMJ-luodille maksimimuodonmuutos < 70 mm Osuma 50 mm etäisyydelle kypärän reunasta ei delaminoi kuoren reunaa.
<i>Maali</i>	tummanvihreä AN 11
<i>Heijaste</i>	750 - 950 nm 20 – 35 %
<i>Naarmuuntuvuus</i>	10 minuutin hankaus erityisellä testauslaitteella: reunanauha on ehjä, maali ei ole lohkeillut suurina paloin, pintalaminaatti on ehjä.
<i>Kaasunkesto</i>	sinappikaasu
<i>Kemikaalienkesto</i>	SFS 3566 Anti Corrol benssiini moottoriöljy rasva
<i>Syttyvyys</i>	ISO 3873 / SFS 2466, SFS 2465 propanikaasuliekki
<i>Napalminkesto</i>	ISO 3873 / SFS 2465 20 ml palavaa napalmia
<i>Iskunkestävyys</i>	EN 397 työsuojelukypärille, < 5 kN
<i>Säänkesto</i>	Puolustusvoimien tutkimuskeskuksen (nyk. teknillinen tutkimuslaitos) tutkimustodistus / 132/Sk2/18.12.1990 28 päivän kiihdytetty säärasitus

Sisäosa

<i>Materiaalit</i>	pintakankaat 85 % PA / 15 % elastaani, pintaväri musta pehmuste PE-vaahtoa, paksuus 5 mm, tiheys 30/70 kg/m ³ kangaskudos pehmusteen sisällä 100 % PES
--------------------	---

lakipalan pehmuste EPS-muovia, tiheys 20 kg/m³
 niskatyynylle muodon antava jousi lujittamatonta massavärjättyä
 POM-muovia, musta
 sisäosan säätöhihna lujittamatonta massavärjättyä LDPE-muovia,
 musta
 hikinauha nahkaa
 nauhat 100 % CO, leveys 18 mm, vihreä / musta, nauhan solki lu-
 jittamatonta massavärjättyä POM-muovia, musta

Muuta

Paino

S-koko < 1250 g

M-koko < 1350 g

L-koko < 1450 g

NSN =

S-koko 8470580000759

Nato Stock Number

M-koko 847058000760

L-koko 847058000761

Merkinnät

jokaisessa kypärässä nimikekoodi, valmistusvuosi, valmistajan nimi tai tunnus, koko ja yksilönumero

Lyhenteet

PA = polyamidi

EPS = solustettu polystyreeni

PE = polyeteeni

POM = polyoksimeteeni

PES = polyeetterisulfoni

LDPE = matalatiheksinen polyeteeni

Liite 3: Koeammuntojen pöytäkirja (4,0 mm)

Aset-os / PvTT:n
 koeammuntapöytäkirjan n:o 10/ /D/ .10.2010 LIITE 2
 1 (1)

PUOLUSTUSVOIMIEN TEKNILLINEN AMMUNTATULOKSET
 TUTKIMUSLAITOS Asetekniikkaosasto
 Ase- ja materiaalitekniikka
 Ylöjärvi 29.10.2010

Asiakas: FY-Composites Oy

Kohde: Testilevy, 4 mm Aloksidi + laminaatti
 Valmistaja: FY-Composites Oy
 Näyte: Ball 652/2
 Koko: 400 mm x 400 mm, paksuus: 12 mm, massa: 5,5 kg
 Näytteen tila: kuiva 22.1 = C

Ammunta: 7.62 x 39

Ase: Koease 7.62 x 39 N:o 1338
 Ammus: FMJ-luoti pehmeä teräsydin, 7.62, 8,0 g
 Ampumakulma (NATO): 0
 Ympäristö: 22..1 = C, RH 20 %

Ls n:o	Läpäisy	Pullistuma [mm]	vi [m/s]
1	E		690,91
2	K		717,66
3	K		714,05
läpäisyjä: 2		k.a: ,0	k.a: 707,54
pysäyksiä: 1		s: ,0	s: 14,52

Läpäisseet:					Pysähtyneet:				
Ls	v12	v13	vi	c	Ls	v12	v13	vi	c
	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[1/m]		[m/s]	[m/s]	[m/s]	[1/m]
2	738	738	718	0,001227	1	708	708	691	0,001084
3	735	734	714	0,001231					
Ka	736,4	735,9	715,9			708,4	708,0	690,9	
Hidast:	,5		20,1			,4		17,1	
c = ln(2 * v12/v13 - 1)									
Etäisyys keskimmaiselta kehikolta maaliin: 22,50 m									

Ammuntapäivä: 22.10.2010, henkilöstö: RG, PR
 Tiedosto: C:\AMPU\FY2010.AMP

Liite 4: Koeammuntojen pöytäkirja (3,2 mm)

Aset-os / PvTT:n
koeammuntapöytäkirjan n:o 10/ /D/ .10.2010 LIITE 4
1 (1)

PUOLUSTUSVOIMIEN TEKNILLINEN AMMUNTATULOKSET
TUTKIMUSLAITOS Asetekniikkaosasto
Ase- ja materiaalitekniikka
Ylöjärvi 29.10.2010

Asiakas: FY-Composites Oy

Kohde: Testilevy, 3.2 mm Aloksidi + laminaatti
Valmistaja: FY-Composites Oy
Näyte: Ball 652/2
Koko: 400 mm x 400 mm, paksuus: 12 mm, massa: 5,5 kg
Näytteen tila: kuiva 22.1 = C

Ammunta: 7.62 x 39

Ase: Koease 7.62 x 39 N:o 1338
Ammus: FMJ-luoti pehmeä teräsydin, 7.62, 8,0 g
Ampumakulma (NATO): 0
Ympäristö: 22..1 = C, RH 20 %

Ls n:o	Läpäisy	Pullistuma [mm]	vi [m/s]
1	K		693,32
läpäisyjä: 1	k.a: ,0		k.a: 693,32
pysäyksiä: 0	s: ,0		s: ,00

Läpäisseet:				Pysähtyneet:					
Ls	v12	v13	vi	c	Ls	v12	v13	vi	c
	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[1/m]		[m/s]	[m/s]	[m/s]	[1/m]
1	713	712	693	0,001198					

Ka 712,7 712,3 693,3

Hidast: ,4 18,9

$c = \ln(2 * v12/v13 - 1)$

Etäisyys keskimmäiseltä kehikolta maaliin: 22,50 m

Ammuntapäivä: 22.10.2010, henkilöstö: RG, PR

Tiedosto: C:\AMPU\FY2010.AMP

Liite 5: Koeammuntojen pöytäkirja (2,0 mm)

Aset-os / PvTT:n
 koeammuntapöytäkirjan n:o 10/ /D/ .10.2010 LIITE 3
 1 (1)

PUOLUSTUSVOIMIEN TEKNILLINEN AMMUNTATULOKSET
 TUTKIMUSLAITOS Asetekniikkaosasto
 Ase- ja materiaalitekniikka
 Ylöjärvi 29.10.2010

Asiakas: FY-Composites Oy

Kohde: Testilevy, 2 mm Aloksidi + laminaatti
 Valmistaja: FY-Composites Oy
 Näyte: Ball 652/2
 Koko: 400 mm x 400 mm, paksuus: 12 mm, massa: 5,5 kg
 Näytteen tila: kuiva 22.1 °C

Ammunta: 7.62 x 39

Ase: Koease 7.62 x 39 N:o 1338
 Ammus: FMJ-luoti pehmeä teräsydin, 7.62, 8,0 g
 Ampumakulma (NATO): 0
 Ympäristö: 22..1 °C, RH 20 %

Ls n:o	Läpäisy	Pullistuma [mm]	vi [m/s]
1	K		683,10
läpäisyjä: 1	k.a: ,0		k.a: 683,10
pysäyksiä: 0	s: ,0		s: ,00

Läpäisseet:				Pysähtyneet:					
Ls	v12	v13	vi	c	Ls	v12	v13	vi	c
	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[1/m]		[m/s]	[m/s]	[m/s]	[1/m]
1	702	702	683	0,001207					

Ka 702,3 701,9 683,1

Hidast: ,4 18,8

$c = \ln(2 * v12/v13 - 1)$

Etäisyys keskimmäiseltä kehikolta maaliin: 22,50 m

Ammuntapäivä: 22.10.2010, henkilöstö: RG, PR

Tiedosto: C:\AMPU\FY2010.AMP

Liite 6: STANAG 2920 ed. 4 (draft) mukaiset suojaustasot

Category	Ammunition		Classification
Lead core	9x19 Ball	8 g, 365 m/s	A1
	9x19 Ball 4,6x30 DM11 5,7x28 SS190	8g, 430 m/s	A1
	5,56x45 SS92 / M193 7,62x51 Ball M80 / DM111 / L2A2	3,6 g 9,3 - 9,6 g	A3 A5
	Emerging threats / NA specified		A Special
Mild steel core	5,56x45 SS109 / M855 / DM41 7,62x39 57N231 7,62x51 M59	4 g	B3 B4 B5
	Emerging threats / NA specified		B Special
Hardened steel core	7,62x39 API BZ 7,62x54R B32 API 7,62x51 P80 Emerging threats / NA specified	9,45 g	C4 C6 C7 C Special
WC core	5,56x45 DM 31 7,62x51 Nammo AP8 / M993 9x19 AP DM 91 7,62x51 RUAG Swiss P AP (Sniper Ammo)	4 g 5,7 g	D3 D5
	Emerging threats / NA specified		D Special

A1, 400; FX, 600

A1	B1
400	600

A1 = luotisuojaluokka

400 = nopeus, josta luoti pysähtyy

FX/B1 = sirpaleen tyyppi

600 = v50-arvo

	Kypärä						Suojaliivi						
	Luotisuusuoja		Standardi ja taso	Materiaali	Trauma mm	Paino g	Luotisuusuoja		Standardi ja taso	Materiaali	Trauma mm	Paino g	
	v50 m/s	Kaliiperi					Kaliiperi	m/s					
Belgia							9mm FMJ	436	NIJ IIIA	Aramidi	44		
Etelä-Afrikka							DM41 / 9mm FMJ	360	PrEN ISO 14876-2	Aramidi	44	2500	
Hollanti									Luottamuksellinen	Polyamidi, aramidi	44	2500	
Iso-Britannia							9mm FMJ RN	436	NIJ IIIA	Aramidi	44		
Norja													
Ranska													
Ruotsi													
Saksa	620	9mm Para FMJ SC	410	German TL 8470-0004		1500							
Suomi	580	9mm Para FMJ	420	NIJ IIIA	Aramidi	25	1100	9mm FMJ	426	NIJ IIIA	Aramidi, polyamidi	44	6500
Sveitsi	650	9mm Para Pist Pat	v2,5= 410		Aramidi		1550	9mm FMJ	410	German SK, taso SK1	Aramidi	40	4000
Tanska													
Tsekki								7,62x25	470	TBO, taso 2/CZ	Aramidi	25	5200
Venäjä	560	9x18	320	GOST R 50744-95, taso I / NIJ IIA	Aramidi	17	1200	9x18	290	GOST R 50744-95, taso I		17	3900

Liite 7. Tiettyjen valtioiden vaatimukset

Paneeli (suojaustaso ilmoitettu suojaliivin kanssa yhdessä)						
	Luotisuus		Standardi ja taso	Materiaali	Trauma mm	Paino g
	Kaliiperi	m/s				
Belgia	.30 M2 AP	878	NIJ IV	Keraami	44	2800
Etelä-Afrikka	7,62x51 NATO Ball	862	NIJ IV	Alumiinioksidi + lasikuitu / aramidi	44	
Hollanti	7,62x63 AP M2	869	NIJ IV	Alumiinioksidi + aramidi	44	3500
Iso-Britannia			Luottamuksellinen	Keraami + aramidi	44	
Norja	.30 M2 AP	878	NIJ IV	Boorikarbidi	44	2000
Ranska	5,56x45 NATO Ball	1000	French MOD	HD polyeteeni	30	1400
Ruotsi	7,62x51	830	NIJ 0101.03	Alumiinioksidi + aramidi	44	3350
Saksa	.308Win AP	820	TechnischeRicht- linieSchutzwesten	Alumiinioksidi/ piikarbidi	20	3000/ 2600
Suomi	7,62x51 AP		NIJ IV	Keraami	44	2800
Sveitsi	7,62x51 FMJ/HC	820	German SK, taso SK4	Keraami	40	3000
Tanska	7,62x39 LPS	745	NIJ 0101.03	Keraami	50	
Tsekki	7,62x51	820	TBO, taso 7	Keraami + aramidilaminaatti		3250
Venäjä	7,62x39	710	GOST R 50744- 95, taso V / NIJ III	Panssinteräs		