

ALEXANDRA BERGMAN, MATHIAS FORSBERG, CECILIA GULLSTRÖM,
HANS KARIIS, STEFAN KARLSSON, FRIDA KROHN, ANNIKA LÖÖF,
JENNIFER SILANDER, OLIVER SINNOTT, PHILIP LUTS,
MATTIAS UNOSSON, CHRISTINA ÅKERLIND



Alexandra Bergman, Mathias Forsberg, Cecilia Gullström, Hans Kariis, Stefan Karlsson, Frida Krohn, Annika Löf, Jennifer Silander, Oliver Sinnott, Philip Luts, Mattias Unosson, Christina Åkerlind

Material- och produktionsteknik

Verksamhet vid FOI 2025

Titel	Material- och produktionsteknik – Verksamhet vid FOI 2025
Title	Materials and production technology
Rapportnr/Report no	FOI-R--5865--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2025
Antal sidor/Pages	26
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsmakten
Forskningsområde	Övrigt
FoT-område	Temaområde
Projektnr/Project no	E51613
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Telekrig

Bild/Cover: Aerogel, ett extremt lätt material, Foto: Jennifer Silander, FOI

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Denna rapport sammanfattar verksamheten som bedrivits under 2025 inom Forsknings- och Teknikutvecklings (FoT) projektet Material och Produktionsteknik, där den presumtiva framtida militära nyttan av utvalda material och produktionstekniker studeras. Vad av tekniker har framförallt prioriterats utifrån potentiell användbarhet för vår uppdragsgivare, Forsvarsmakten, men även andra intressenter har identifierats.

Exempel på civila forskningsframsteg inom materialteknik som kan ge militär nytta finns inom lätta värmetåliga material för värmeisolering, hårda slitstarka material för eldrör, miljövänliga och nedbrytbara material för fältbruk, hårda och sega material för pansar och färgskiftande material för signaturanpassning.

Inom produktionsteknik har studerats metoder som kan öka effektivitet, förbättra kvalitet, korta ledtider och sänka kostnader. Exempel på tekniker är additiv tillverkning, pulverkompaktering, optisk simulering, pulvermalning och kvantberäkningar.

Egen experimentell verksamhet vid FOI har utförts inom utvalda områden. Arbetet har även inkluderat nätverkande och samarbete med relevanta militära och civila aktörer, deltagande vid konferenser, utveckling av laboratorieresurser samt litteraturstudier. Internationellt samarbete har bedrivits, företrädesvis inom EDA och Nato.

Några slutsatser som har kunnat dras under årets arbete är:

- Materialteknik är ett område som uppvisar en snabb utveckling, främst i den civila sektorn. Bred bevakning är viktig för att identifiera långsiktig militär nytta av dagens akademiska forskning.
- Produktionsteknik utvecklas också snabbt civilt och dessa landvinningar kan komma till militär nytta på relativt kort sikt.
- Samarbete är en nyckel till framgång för ett litet land som Sverige.

Nyckelord: material, produktionsteknik, 2D-material, additiv tillverkning, aerogeler, pulvermetallurgi, reaktiva material

Summary

The present report aims at summarizing the work done at FOI in the field of materials and production technology during 2025 for the Swedish Armed Forces. Potential future military utility of selected project related aspects has been identified through monitoring of and cooperation with civilian research.

Examples of civilian research advances in materials technology that could provide military utility include lightweight heat-resistant materials for thermal insulation, hard and durable materials for gun barrels, environmentally friendly and biodegradable materials for field use, high strength materials for armor, and color-changing materials for signature management.

In production technology, methods have been studied that can increase efficiency, improve quality, shorten lead times, and reduce costs. Examples of techniques include additive manufacturing, powder compaction, optical simulation, powder milling, and quantum computing.

Experimental work at FOI has been conducted in selected areas. The work has also included network building and cooperation with relevant actors, conference participation, development of laboratory resources and literature studies.

Some conclusions from this years work:

- Materials technology exhibits rapid development, especially in the civilian sector. Broad monitoring of the field is important in order to identify long term military utility emerging from present academic research.
- Materials technology is also rapidly developing in the civilian sector and the progress is expected to be of military use also in a relatively short term.
- Cooperation is the key to success for a small nation like Sweden.

Keywords: materials, production technology, 2D-materials, additive manufacturing, aerogels, powder metallurgy, reactive materials.

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Materialteknik	8
	2.1 Nanocellulosa	8
	2.2 Ull	9
	2.3 Aerogeler	10
	2.4 Pansarkeramer	12
	2.5 Eldrörsmaterial.....	13
	2.6 Pansarstål	13
3	Produktionsteknik.....	14
	3.1 Additiv tillverkning av metaller och keramer	14
	3.2 Additiv tillverkning av polymerer och kompositier	16
	3.3 Kulkvarn	16
	3.4 Pulverkompaktering	17
	3.5 Multifysik-mjukvara för simulering av optiska egenskaper	18
	3.6 Spektroskopi för optimering av fiberlasrar.....	18
4	Bevakning och samverkan.....	20
	4.1 Konferenser	20
	4.1.1 Wallenberg Wood Science Center.....	20
	4.1.2 SPIE Sensors + Imaging.....	21
	4.1.3 Materials for tomorrow	21
	4.1.4 Workshop Photonics and Electronics 4 Defence	22
	4.1.5 Temadag kvantberäkningar för försvarstillämpningar	22
	4.1.6 Virtual workshop on Metamaterials.....	23
	4.2 Kontakter med industri, lärosäten och institut	23
	4.3 Samarbete inom EDA	23
	4.3.1 EDA workshop: Kritisk AM-infrastruktur för EU-försvar.....	24
	4.4 Samarbete inom Nato.....	25
	4.4.1 AVT-ET-249	25
5	Slutsatser	26

1 Inledning

Pågående akademisk forskning och industriell produktutveckling har på senare tid tagit fram och studerat ett stort antal material och materialkombinationer med nya eller förbättrade egenskaper. Det kan handla om mekaniska, termiska, optiska, kemiska eller elektromagnetiska egenskaper. Vidare är ett materials miljöpåverkan ur ett livscykelperspektiv viktigt att kartlägga redan innan materialet byggs in i ett system. Exempel på studerade materialkategorier är nanocellulosa, textila material, pansarstål, pansarkeramer och aerogeler.

Inom det produktionstekniska området sker också en snabb civil utveckling. Nya metoder möjliggör framställning av produkter som inte går att tillverka med traditionella metoder. Produktion kan även göras mer flexibel och/eller mer kostnadseffektiv med avancerad produktionsteknik. Exempel på metoder är additiv tillverkning, pulverkompaktering och kulkvarnsmalning.

I syfte att möjliggöra vassare framtida krigsförband arbetar FOI med att identifiera vilka material, strukturer och produktionstekniker som kan komma ifråga för militära tillämpningar.

Området har bevakats genom aktivt deltagande i nationella och internationella samverkansgrupper, t ex inom ramen för EDA, Nato och Vinnova. Studiebesök på företag, försvarsmaktsförband och universitet har också varit metoder att bevaka området liksom aktivt deltagande i såväl vetenskapliga som militära konferenser.

2 Materialteknik

Här beskrivs forskning under det materialtekniska området. Ett antal olika materialklasser har studerats varvid materialens förmåga att ge egenskaper som kan förbättra den militära nyttan speciellt beaktats vid analysen.

2.1 Nanocellulosa

I ett examensarbete¹ undersöktes potentialen att använda nanocellulosa för ett hållbart skenmål av ett grönt nylonält. Genom reflektionsmätningar, reflektionsspridningsmätningar och hållfasthetstester, jämfördes nanocellulosaproverna med tältduken och ett granprov.

De nanocellulosaprover som användes för denna utvärdering bestod av cellulosa nanofibril (CNF), avjoniserat vatten, glycerol samt varierande mängd av en blandning av kromoxidgrönt (COG) pigment och avjoniserat vatten. Proverna torkades med ugn. Tre av de totalt fem färgade nanocellulosaproverna som användes för optiska tester kan ses i Figur 1. Samtliga nanocellulosaprover som användes för hållfasthetstesterna kan ses i Figur 2.



Figur 1: Färgade nanocellulosaprover för optiska mätningar.



Figur 2: Färgade nanocellulosaprover som användes för hållfasthetstester.

Reflektionsmätningarna visade att nanocellulosaproverna efterliknade tältets reflektion väl inom regionerna ultraviolett (UV, 250–400 nm), visuellt (VIS 400–700 nm) och termiskt infrarött (TIR 2,5–15 μm) området, men betydligt sämre inom nära infrarött (NIR, 700–1000 nm) och kortvågs infrarött (SWIR 1000–2500 nm). Reflektionsspridningsmätningarna vid 633 nm visade att både

¹ Luts, Philip and Lindkvist, Mikaela, The Potential of Nanocellulose and Wool for Sustainable Decoy Target, Master theses 2025, Linköping University, Department of Physics, Chemistry and Biology. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1978195&dswid=7268>

nanocellulosaproverna och tältduken sprider ljus jämnt och uppvisar ökande framåtspridning och bakåtspridning när infallsvinkeln av ljuset ökar.

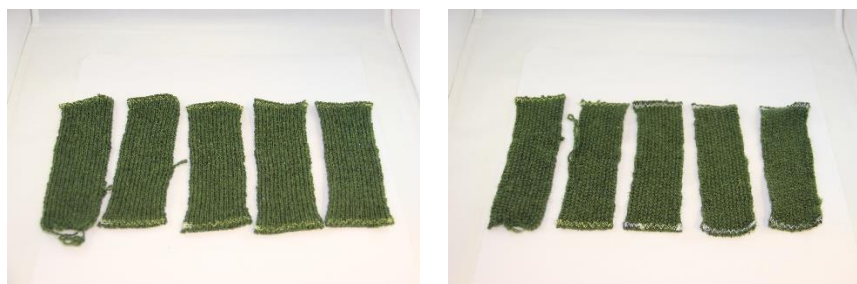
Hållfasthetstesteterna utfördes med fem identiska nanocellulosaprover (3a–3e) och fem identiska tältduksbitar, samtliga prover i samma dimensioner. Resultaten visade att tältduken är betydligt starkare än nanocellulosaproverna men att de är ungefär lika elastiska. Detta kan dock undersökas vidare på grund av flera möjliga felkällor i mätningarna.

Nanocellulosaproverna imiterar inte tältdukens mekaniska och optiska egenskaper fullkomligt. Proverna visar dock potential inom vissa våglängdsområden, som inom UV–VIS och IR, och skulle med ytterligare modifieringar eventuellt kunna användas som ett skenmål av ett grönt nylontält. Kostnaden bör också undersökas då det ur ett kostnadsperspektiv kan vara mer fördelaktigt använda ett tält, inte ett skenmål av ett tält. För att imitera mer dyrbar utrustning, såsom fordon, skulle mer omfattande anpassningar krävas.

2.2 Ull

I ett examensarbete² undersöktes potentialen i att använda ull för ett hållbart skenmål efterliknande ett grönt nylontält. Genom reflektionsmätningar, reflektionsspridningsmätningar och hållfasthetstester, jämfördes ullprover med tältduken och ett granprov.

Ullproverna bestod av svensk ull, stickade i ribb- och mosstickning. De färgade ullproverna kan ses i Figur 3.



Figur 3: Färgade ullprover i ribbstickning (vänster) och mosstickning (höger).

Ullprovernas reflektion efterliknade tältet väl i regionerna UV-NIR (250–1000 nm) och från 5–15 μm , men sämre från 2,5–5 μm och inom SWIR (1000–2500 nm). Reflektionsspridningsmätningarna vid 633 nm visade att båda typerna av ullprover och tältduken sprider ljus jämnt och uppvisar ökande framåtspridning och bakåtspridning när infallsvinkeln av ljuset ökar.

Hållfasthetstesteterna utfördes för fem färgade ullprover i ribbstickning, fem färgade ullprover i mosstickning (Figur 3) och fem tältduksprover, samtliga prover med samma dimensioner. Resultaten visade att tältduken är betydligt starkare än ullproven men att ullproverna har en högre elasticitet än tältduken.

² Luts, Philip and Lindkvist, Mikaela, The Potential of Nanocellulose and Wool for Sustainable Decoy Target, Master theses 2025, Linköping University, Department of Physics, Chemistry and Biology. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1978195&dswid=7268>

Detta kan dock undersökas vidare på grund av flera möjliga felkällor i mätningarna.

Utöver de optiska och mekaniska mätningarna genomfördes även en livscykelanalys av svensk ull. Analysen visade att det kan vara fördelaktigt att använda svensk ull som skenmål ur ett livscykelperspektiv. Ullen har flera positiva egenskaper, bland annat sin biologiska nedbrytbarhet. Samtidigt krävs förbättringar för att göra användningen mer gynnsam, eftersom materialet också medför vissa miljöpåverkande aspekter.

Ullproverna imiterar inte tältdukens mekaniska och optiska egenskaper fullkomligt. Materialet visar dock potential inom vissa våglängdsområden, som inom UV-NIR och från 5–15 μm , och skulle med ytterligare modifieringar eventuellt kunna användas som ett skenmål av ett grönt nylontält. För att imitera mer dyrbar utrustning, såsom fordon, skulle mer omfattande anpassningar krävas.

2.3 Aerogeler

Under året genomfördes ett exjobb av Linnea Åberg i samarbete med Linköpings Universitet, som handlade om att tillverka och karaktärisera aerogeler³. Aerogeler är namnet på ett material som är poröst med en ultra-låg densitet. Detta gör att aerogeler ofta har en låg termisk konduktivitet och är därmed väldigt isolerande samtidigt som att de väger väldigt lite. Aerogeler kan tillverkas av olika material och på olika sätt. En aerogel kan vara organisk, inorganisk eller en hybrid av dessa. De kan skapas exempelvis via frystorkning eller superkritisk torkning (eng. *supercritical drying*). Historiskt sett användes kiselbaserade aerogeler som isolering i NASA:s rymdfärjor.

I exjobbet undersöktes de termiska och optiska egenskaperna hos aerogeler som bestod av karboxymetylerad nanocellulosa.

Den karboxymetylerade nanocellulosan köptes in i gel-form och blandades med en korslänkare kallad GOPS⁴ för att kemiskt stärka strukturen och därmed de mekaniska egenskaperna. I några prover blandades även den ledande polymeren PEDOT:PSS⁵ ned som additiv. Den resulterande gelen frystes på två olika sätt för att sedan frystorkas för att vätskan skulle sublimeras till gas (luft). För att torka aerogelen ytterligare samt stärka korslänkningen placerades proven i en ugn i ca 30 minuter.

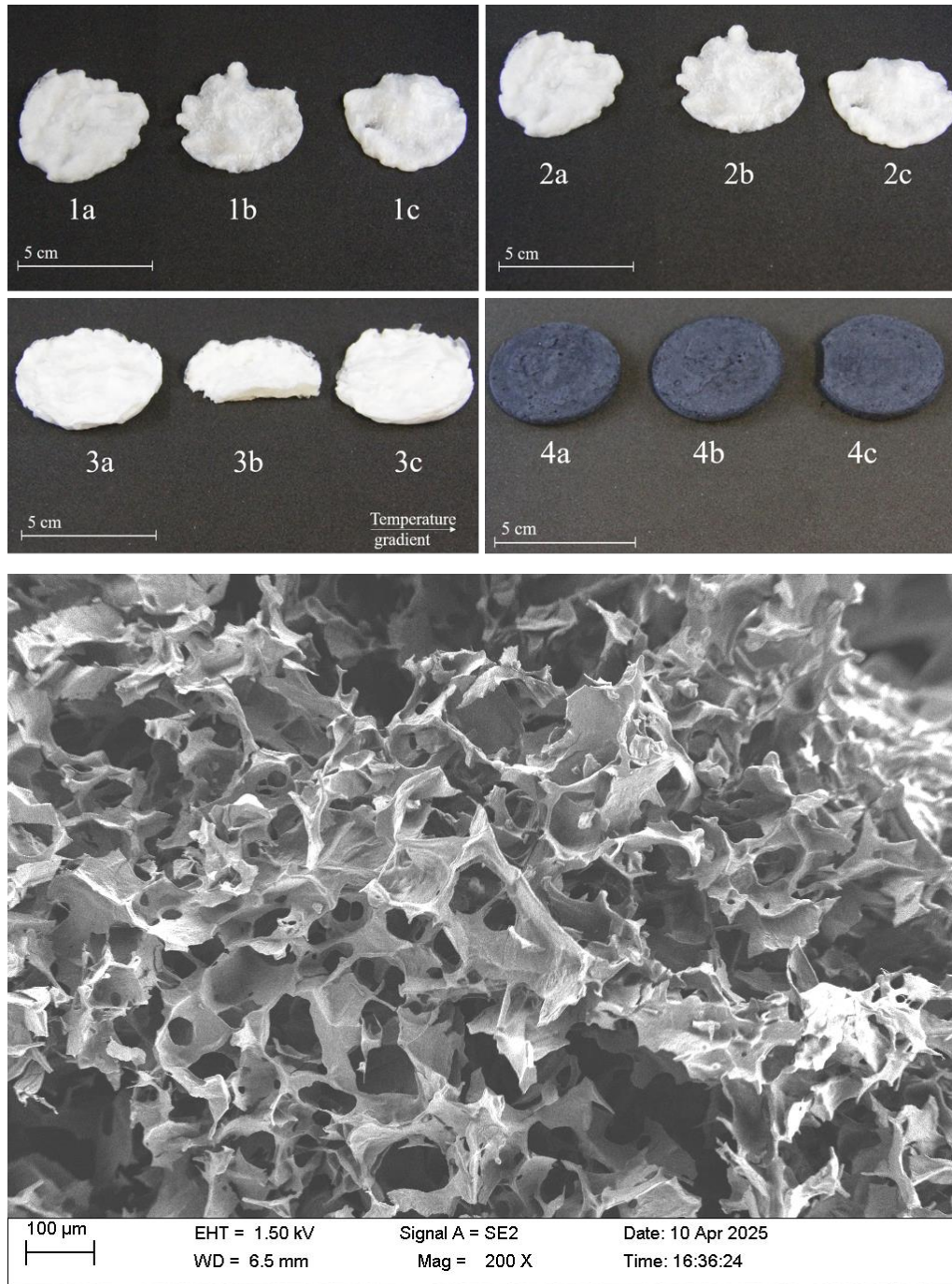
Fyra olika typer av prover tillverkades, med tre prov av varje typ. Dessa kan ses i Figur 4. Prov 1a-c är tillverkat av endast cellulosa. Prov 2a-c och 3a-c innehöll cellulosa och korslänkare och prov 4a-c innehöll cellulosa, korslänkare och PEDOT:PSS. Samtliga prover med undantag för 3a-c frystes genom att placeras i en frys, detta gav en isotropisk frysning (provet fryses från alla håll samtidigt). Proverna 3a-c placerades på en kopparplatta där ena änden var nedsänkt i varmt vatten och den andra var nedsänkt i flytande kväve. Detta

³ L. Åberg, "Optical and Thermal Properties of Carboxymethylated Cellulose Aerogels", Dissertation, 2025. Linköping Universitet. Hämtad från <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-215239>, 2025-10-02

⁴ (3-glycidioxypropyl) trimethoxysilane

⁵ Poly(3,4-ethylenedixythiophene:poly(styrene sulfonate)

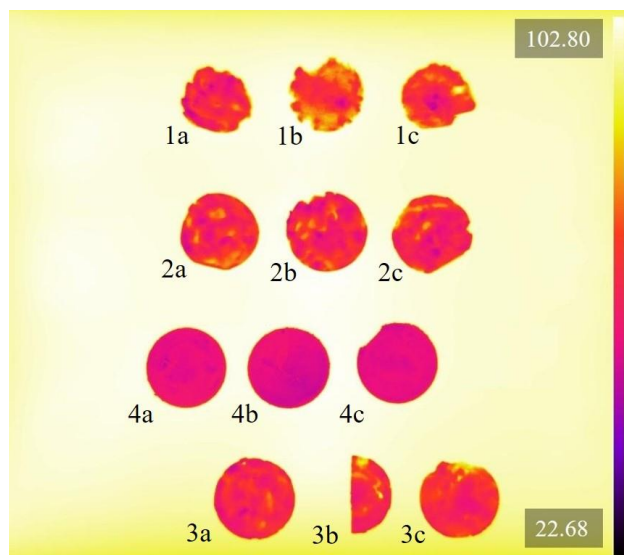
ledde till en bidirektionell frysning då proven frystes dels från den kalla sidan av kopparplattan mot den varma sidan, och dels nedifrån och upp.



Figur 4. Tillverkade aerogeler bestående av cellulosa (1a-c), cellulosa och korslänkare (2a-c, 3a-c) och cellulosa, korslänkare och additiv (4a-c). Längst ner SEM-bild på prov 4.

Strukturen av proverna undersöktes med svepelektronmikroskop (SEM). De spektrala och termiska egenskaperna undersöktes med spektrometrar respektive en termisk kamera. Storleken på porerna minskade från prov 1 till prov 4, där prov 4 hade en struktur som kan liknas med ett korallrev, Figur 4. Spektralt reflekterade den vita aerogelerna högre än de svarta inom visuellt till MWIR. Men för LWIR ökade reflektansen för de prover med additivet PEDOT:PSS. De termiska egenskaperna undersöktes genom att placera proverna på en

värmeplatta och studera proverna med en termisk kamera (FLIR T1020). Proverna undersöktes vid olika temperaturer. I Figur 5 ses ett exempel när värmeplattan var 100°C. Samtliga aerogeler isolerar mot plattan, men de prover som kan ses isolera mest är prov 4a-c. Vid 100°C är provernas skenbara medeltemperatur 55°C.



Figur 5. Aerogelerna placerade på en värmeplatta och observeras av en termisk kamera.

Aerogeler används i olika tillämpningar idag, främst inom byggindustrin som isoleringsmaterial. En militär tillämpning skulle vara att applicera aerogel på ett fordon, för att minska den termiska signaturen. Är aerogelen anisotropisk, att den leder värme lite bättre åt en riktning än den andra, skulle den kunna leda bort värme från t.ex. en uppvärmd del av fordonet till en annan del. Detta skulle leda till en mer utjämnad termisk signatur och reducerad risk för upptäckt av en IR-hotsensor.

Arbetet presenterades även på konferensen SPIE Sensors+Imaging Target and Background Signatures⁶.

2.4 Pansarkeramer

Genom kontakter inom ramen för bilaterala avtal har myndigheten sedan ett par år information om möjligheten att förbättra den ballistiska skyddsförmågan hos ett specifikt kerampansarmaterial genom modifiering av dess sammansättning i kombination med särskilda pulvermetallurgiska tillverkningsprocesser. Under 2024 genomfördes en kartläggning av den nationellt tillgängliga kompetensen och förmågan inom området, där forskargrupper på tre lärosäten identifierades som de bäst lämpade att genomföra en studie. Genom ett samarbete med FMV tecknades ett avtal om

⁶ <https://spie.org/spie-sensors-imaging/presentation/Optical-and-thermal-properties-of-carboxymethylated-cellulose-aerogels/13673-8> Hämtad 2025-10-02

uppdragsforskning med dessa lärosäten för perioden 2025-2027 som koordineras av FOI. Resultaten från arbetet rapporteras separat.

2.5 Eldrörsmaterial

Sedan 2023 pågår ett arbete med att utvärdera potentialen att förlänga livstiden för eldrör med en ytbehandlingsmetod som utvecklats av ett svenskt uppstartsföretag. För utvärderingen kommer skräddarsydda eldrör att tillverkas, ytbehandlas och provas. Resultaten från arbetet rapporteras separat.

2.6 Pansarstål

SSAB utvecklar sedan några år metallpulver för de additiva tillverkningsprocesserna pulverbädd (PBF) och påsvetsning (DED), med egenskaper motsvarande pansarstål. Under 2024 upprättades ett samarbete mellan SSAB, FMV och FOI inom vilket utvecklingsmål diskuteras och aktiviteter genomförs. Resultaten från arbetet rapporteras separat.

3 Produktionsteknik

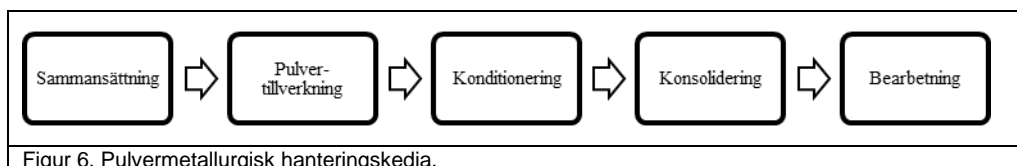
Här beskrivs produktionstekniska metoder som utvecklats eller studerats.

3.1 Additiv tillverkning av metaller och keramer

Under året har FOI investerat i ett nytt labb och en utrustning för additiv tillverkning av typen pulverbädd, med flerårig finansiering från FMV för att genomföra utvecklingsarbete inom områden av gemensamt intresse.

Utrustningen ska användas för utveckling av nya material för tillämpningar inom vapen och skydd i första steget, men med avsikt att utöka nyttan inom Forsvarsmaktens övriga forsknings- och teknikområden.

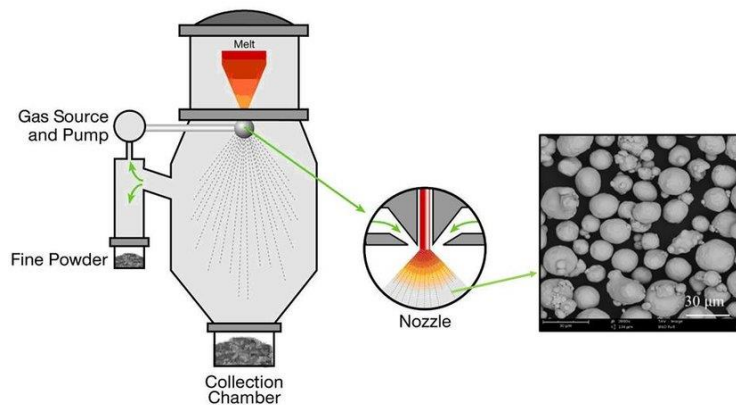
I Figur 6 visas en typisk hanteringskedja och tillika de utvecklingssteg mellan vilka man itererar i ett utvecklingsarbete.



Figur 6. Pulvermetallurgisk hanteringskedja.

Utifrån önskade materialegenskaper i den tilltänkta tillämpningen bestäms i det första steget vilka atomer som ska ingå i legeringen och vid vilka halter. Till stöd för detta finns bland annat beräkningsverktyg baserade på termodynamiska modeller. Ett av de globalt mest använda och välrenommerade beräkningsverktygen av denna typ utvecklas och marknadsförs av svenska Thermo-Calc Software AB.

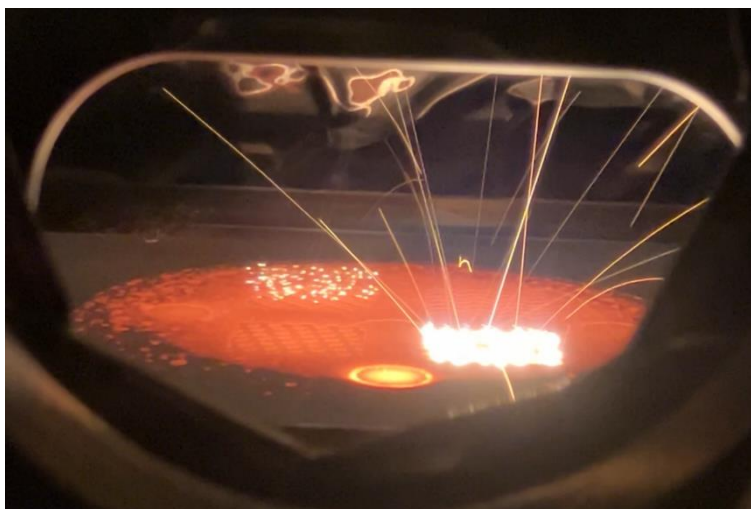
För tillverkning av pulver utgår man vanligtvis från en smälta med sammansättning enligt det första steget. Det man smälter kan antingen vara en gjuten förlegering eller en samling uppvägda separata bitar av de olika ingångsämnen. Den industriellt mest förekommande processen kallas gasatomisering, där man låter den smälta legeringen rinna ut ur botten av smältkärlet och in i en ström av inert gas. Den flytande legeringen finfördelas då i små pulverdroppar som sedan stelnar. Ett exempel på några sådana pulverpartiklar visas i Figur 7.



Figur 7. Schematisk figur av gasatomiseringsprocessen samt foto från svepelektronmikroskop av pulverpartiklar⁷.

Steget konditionering omfattar flera möjligheter. Olika typer av siktning av pulvret görs i stort sett alltid för att bli av med de allra minsta och de allra största pulverpartiklarna. Konditionering av pulvret kan även innefatta ytbehandling, malning, värmebehandling och blandning med andra pulver.

Konsolidering är ett samlingsbegrepp för en mängd tillverkningsprocesser med syfte att tillverka en fastkropp av pulvret. Bland fördelarna med pulverbäddsteknik (powder bed fusion, PBF, på engelska) som ett metallurgiskt verktyg för materialutveckling finns möjligheterna att arbeta med små materialmängder samt att enkelt variera processparametrar och dessutom göra det utanför de begränsningar som finns med traditionella tillverkningsmetoder. Bland för- och nackdelarna finns nödvändigheten av pulver som utgångsmaterial. I Figur 8 visas en bild på pulverbäddprocessen.



Figur 8. Foto av processområdet i en pulverbäddsutrustning. Till vänster kan man nästan urskilja individuella pulverpartiklar som glöder rött av eftervärme. I de vita områdena pågår smältprocessen och i det gula området pågår svalning efter smältning.

⁷ Figur från <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atomization.jpg>

3.2 Additiv tillverkning av polymerer och kompositer

Additiv tillverkning, även känt som 3D-skrivning, tillåter lokal tillverkning av plastdetaljer vilket lämpar sig väl för flexibel produktion och prototyper. De 3D-skrivare som har använts under projektets gång är kommersiella FDM-skrivare (eng. *fused deposition modelling*), till exempel Original Prusa XL. I skrivaren byggs komponenter upp lager för lager från upphettad plast vilket gör att komplexa geometrier med exempelvis hålrum är möjliga. Framst har vanliga termoplaster som ABS och nylon använts men även kompositer bestående av plaster och additiv såsom grafen eller kolnanorör, vilka ökar elektriska och termiska ledningsförmågan samt styrkan på materialet. För att ytterligare förbättra ledningsförmågan kan 3D-skrivna plaster beläggas med tunna metallskikt. Detta kan möjliggöra komponenter med liknande skärmningsegenskaper som solida metallobjekt men med lägre vikt. Under året har inledande försök gjorts med lovande resultat och utrustning inköpts för fortsatt utveckling av produktionstekniker.

3.3 Kulkvarn

FOI Linköping har införskaffat en kulkvarn av typen Retsch mixer mill 500, se figur 9. Detta är ett mångsidigt instrument som kan mala både hårda och vissa mjuka material utan att vara specialiserad mot endera. Malbägarna i denna utrustning vibrerar istället för roterar, som är fallet för en planetkulkvarn. Detta tillåter att malbägaren kan kylas effektivt under malningsprocessen. Locket på malbägaren kan även förses med ventil så att de kan anslutas till processgas om malning av reaktivt material ska genomföras. Den totalförsvarsmässiga nyttan i detta instrument kan indelas i tre kategorier.



Figur 9. Retsch mixer mill 500

Den första och mest självklara är malning av material till pulver. Malning av diverse material är en bra metod för att både erhålla och studera partikelstorleksberoendet för en viss parameter. Detta har exempelvis studerats

för det radarabsorberande materialet strontiumhexaferrit på FOI via ett examensarbete av en student vid Linköpings universitet⁸.

Den andra kategorin som detta instrument möjliggör är mekanosyntes. Den energi som tillförs via tryck, anslag och friktion kan användas för att skapa material som är svåra att tillverka med andra metoder men som har intressanta egenskaper, exempelvis vissa högentropiska material⁹, eller metallorganiska ramverk¹⁰. Båda dessa materialgrupper har flera totalförsvarsmässiga användningsområden.

Retsch mixer mill 500 är ett laboratorieinstrument och klarar malning och mekanosyntes endast i liten skala. Uppskalning till industriell skala är dock relativt enkel från en liten kvarn till större kvarn jämfört med andra syntesvägar. Om en syntesväg eller malningsprocess är känd och behöver utvecklas för detta i framtiden kan processparametrar från labbskala översättas till större utrustning.

Den tredje och sista kategorin, handlar snarare om provpreparering än tillverkning av material. Genom att mala en provbit med okänd komposition ges möjligheten att homogenisera en potentiellt inhomogen provbit. Det homogeniserade pulvret underlättar provtagning och analys och ger en bättre representation av kompositionen i provbiten. Vanligtvis används detta för att ta reda på näringsinnehåll i mat, eller som försteg till en separationsprocess. Detta är en bra tillgång för FOI som kan behöva studera komposition eller separera komponenter ur inhomogena material för att förstå dem bättre.

3.4 Pulverkompaktering

Ett sätt att tillverka solida produkter från metallpulver är att kompaktera pulvret, detta kan åstadkommas med ett antal olika metoder för en rad olika material.

För att kompaktera pulver krävs en kombination av tryck, tid och temperatur. Beroende på materialet som används och krav på slutprodukten kan de tre parametrarna kombineras på olika sätt för att nå det önskade resultatet.

Att simulera pulverkompaktering är en del i arbetet att utöka kompetensen kring tillverkning med pulvermetallurgiska processer. Simulering är ett verktyg som kan användas för att stödja det experimentella arbetet. En väl uppställd simuleringsmodell kan ge ett förväntat resultat och identifiera potentiella problem så att dessa kan åtgärdas redan innan tillverkning av uppställningen.

Under året har det arbetats med två olika simuleringsmodeller som motsvarar två kompakteringsmetoder av enaxligt pålagt tryck. Den ena är en statisk

⁸ L. Olsson, *Investigation of SrFe₁₂O₁₉ Particle Size Distribution and its Effect on Radar Absorption*. i FOI Examensarbete. Linköping, 2025. Åtkomstdatum: 27 oktober 2025. [Online]. Tillgänglig vid: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-214711>

⁹ A. Martínez-García *m.fl.*, "Mechanosynthesis of High Entropy Ceramics of MgAlTiCrNi System", *Microscopy and Microanalysis*, vol. 31, nr Supplement_1, s. oza048.1047, juli 2025, doi: 10.1093/mam/ozaf048.1047.

¹⁰ J. F. Reynes, F. Leon, och F. García, "Mechanochemistry for Organic and Inorganic Synthesis", *ACS Org. Inorg. Au*, vol. 4, nr 5, s. 432–470, okt. 2024

kompaktering och den andra en dynamisk. Arbetet med detta kommer att fortsätta och utökas.

3.5 Multifysik-mjukvara för simulering av optiska egenskaper

Projektet Material- och Produktionsteknik har delfinansierat ett inköp av en multifysik-mjukvara som är användbart för att modellera och simulera elektromagnetiska egenskaper, t.ex. transmission, reflektans och diffraktion, hos material. Metamaterial som består av periodiserade nanostrukturer, vilka ofta förekommer i strukturerade färger, är av särskilt intressera att modellera och simulera. För mer information om metamaterial och strukturella färger hänvisar vi till¹¹. Multifysik-mjukvaran kan användas till att simulera mycket mer, såsom t.ex. icke-linjära optiska effekter, ljusspridning, fotonik, plasmonik, ljuspolarisation, värmetransport, frekvensselektiva ytor etc. FOI ser fram emot att bygga kunskap inom multifysikmodellering och simulering kopplat mot material. Nyttan med multifysikmodellering är att det kommer att bidra till en ökad förståelse och effektivare utveckling av nya metamaterial.

3.6 Spektroskopi för optimering av fiberlasrar

Lasrar har många olika militära tillämpningar och fiberlasrar specifikt har en rad egenskaper som gör dem särskilt intressanta¹². De är t.ex. kompakta, robusta, pålitliga, effektiva och kapabla att ge förhållandevis hög effekt.

Kvartsglas är ett vanligt medium för fiberlasrar där specifika dopämnen i fiberkärnan fungerar som laseraktiva joner. Vanliga dopämnen är sällsynta jordartsmetalljoner (RE^{3+} , såsom t.ex., Yb^{3+} , Er^{3+} eller Tm^{3+})¹³. Lösligheten för RE^{3+} är dock väldigt låg i kvartsglas och vid för hög halt så bildas kluster av RE_2O_3 vilket påverkar lasereffektiviteten negativt. För att öka lösligheten kan man tillsätta andra oxider men det medför samtidigt att den kemiska molekylära strukturen blir mer komplex. En parameter som tydligt påverkar lasereffektiviteten är avståndet mellan RE^{3+} därför är det intressant att studera den lokala kemiska strukturen för RE^{3+} . En kraftfull teknik för att studera den lokala kemiska strukturen för grundämnen är röntgenabsorptionsspektroskopi. Ramanspektroskopi är en annan kraftfull teknik för att få ett fingeravtryck på den molekylära strukturen i material. Teknikerna beskrivs översiktligt i referens¹⁴.

Kommersiella fiberlasrar har studerats med hjälp av röntgenabsorptionspektroskopi och Ramanspektroskopi, både i formen som fiber men även som preform (dvs. formen innan det dragits till en fiber). Konfokal Ramanmikroskopi är en teknik för att studera Ramanspektroskopi i ett

¹¹ C. Gullström och S. Karlsson, "Optiska metamaterial för låg signatur - En litteraturstudie inom programmet Vägval Stridsflyg", Swedish Defense Research Agency, Linköping, FOI-D--XXXX--SE, 2025.

¹² L. Dong och B. Samson, *Fiber lasers: basics, technology, and applications*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2017.

¹³ P. D. Dragic, M. Cavillon, och J. Ballato, "Materials for optical fiber lasers: A review", *Applied Physics Reviews*, vol. 5, nr 4, s. 041301, dec. 2018, doi: 10.1063/1.5048410.

¹⁴ S. Karlsson *m.fl.*, "Signaturmaterial 2023-2025 - Slutrapport", Swedish Defense Research Agency, FOI, FOI-R--XXXX--SE, 2025.

mikroskop, vilket kan ge en avbildning av ytan som visar skillnader i den kemiska strukturen. Det har gjorts för både ett preform och fiberlasermaterial, se Fig. 10.

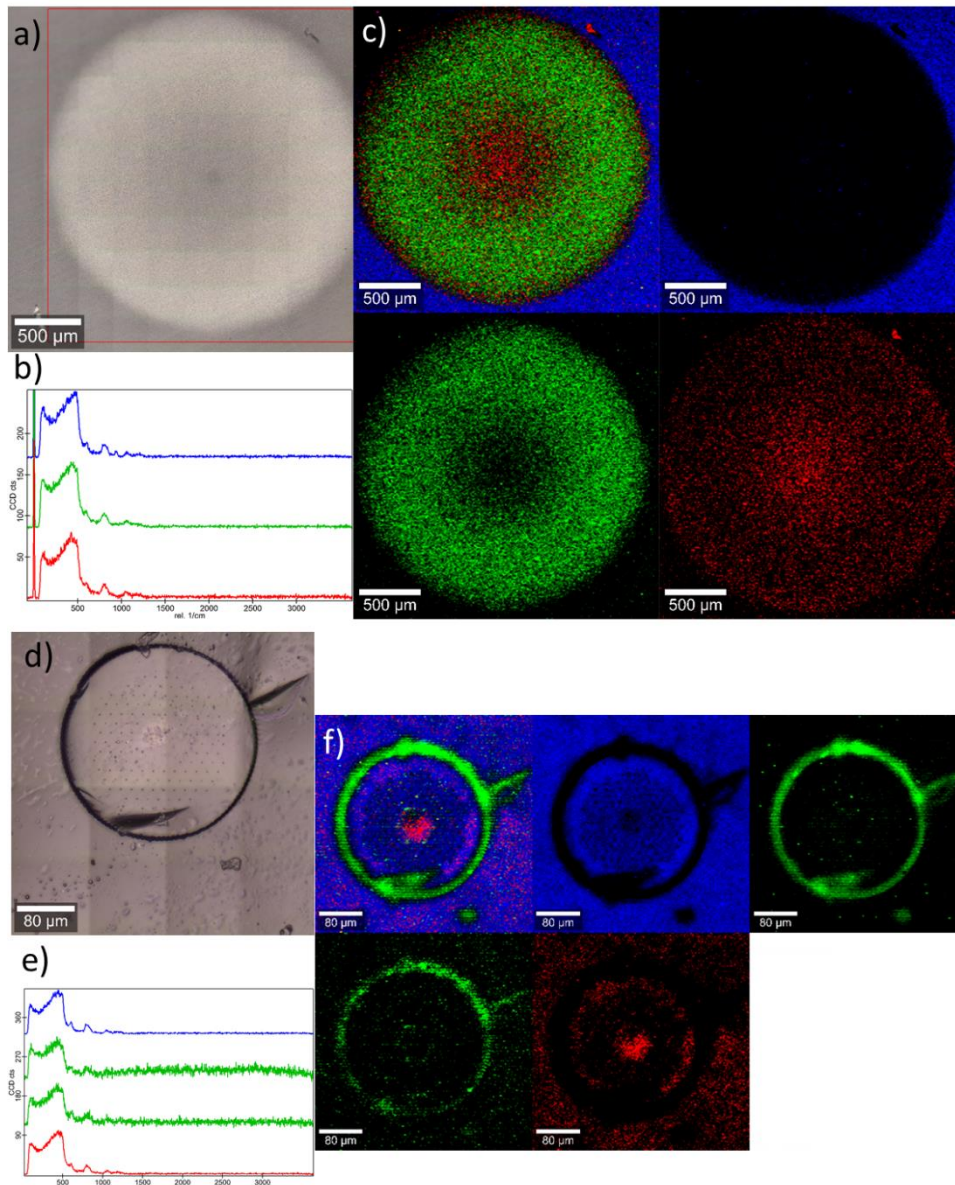


Fig. 10: a) är ett ljusmikroskopfoto på kärnan av en preform, b) visar Ramanspektra med signifikanta skillnader i kemisk struktur som visas med respektive färg i c). d) är ett ljusmikroskopfoto på kärnan av en fiberlaser och e) visar Raman spektra med signifikanta skillnader som förespeglas i f).

4 Bevakning och samverkan

Här beskrivs kunskap om inom material- och produktionsteknisk utveckling i vår omvärld som inhämtats inom ramen för projektet.

4.1 Konferenser

Under året har projektet bevakat de konferenser som beskrivs nedan.

4.1.1 Wallenberg Wood Science Center International conference

Under våren gavs möjligheten att delta vid konferensen WWSC 2025 som hölls på KTH.

Wallenberg Wood Science Center är ett forskningscenter med fokus på nya material med trä som ursprung. Det grundades år 2009 med hjälp av en donation från Alice och Knut Wallenberg. Donationen var över 10 år och har sedan dess förlängts till 2028. Centret skapar kunskap och bygger kompetens kring grundforskning vilket kan leda till en innovativ och hållbar framtid där råmaterialet är en värdefull del.

Den svenska skogsindustrin har länge varit ledande, men har på senare tid fått konkurrens av Eukalyptus-industrin, detta då Eukalyptus växer snabbt och att dess växtzoner ligger i ekonomiskt expanderande områden. Svensk skogsindustri kan inte stagnera med ”gamla” produkter och existerande kunnande. Industrin behöver expandera visionerna och ta initiativ för forskningsområden med framtida alternativ till våra fossilbaserade produkter.

WWSC är ett gemensamt forskningscenter tillsammans med Kungliga tekniska högskolan (KTH), Chalmers tekniska högskola (CTH) och Linköpings universitet (LiU). Grunden kommer från Knut and Alice Wallenberg Foundation. Svensk industri stöder WWSC via plattformen Treeseearch. Träavverkning genererar främst resurser till klassiska områden som:

- Bränsle
- Byggmaterial
- Massatillverkning

Det genereras också en hel del restprodukter. Det är under denna punkt som fokus för den framtida forskningen tycks ligga och de flesta föreläsningarna handlade om hur vi handhar ”restresurserna” från skogsindustrin. Skogen är en av våra förnyelsebara naturtillgångar tillsammans med sol och vind, men vi måste lära oss att utnyttja den bättre och mer hållbart. Idag är det många rester som inte tas omhand eller utnyttjas på effektivast sätt.

I genomsnitt består trä (bortsett från vatten) av:

- Cellulosa (polysackarider) (40–50 %) ($C_6H_{10}O_5$)_n
- Lignin (20–30 %) serie av polymera aromatiska föreningar
- Hemicellulosa (20–30 %) korta grenade polysackarider
- Andra ämnen, som fett, stärkelse, protein, kåda med flera (1–3 %)

Cellulosa kan användas till papper och textilier (viskos). Lignin är olämpligt för papper, däremot har det ett högt energivärde och kan eldas t ex i form av pellets. Hemicellulosa ger sämre pappersmassa. Metoderna för att frigöra cellulosan från ligninet är en intressant del av framtidsforskningen som innehåller hållbara och doftfria lösningar. Många intressanta idéer verkade ligga i hur man kan ersätta vissa delar av de molekylära kedjorna i främst hemicellulosan, för att få nya önskvärda egenskaper. Något annat som var värt att notera var att den amorfa egenskapen hos lignin och dess egenskap av att vara den sammanbindande komponenten av trä som kompositmaterial. Den militära nyttan av inhemskt producerade material som Sverige har rik tillgång på som är biologiskt nedbrytbara, energirika och kan göras lätta och hållfasta bör fortsätta bevakas.

4.1.2 SPIE Sensors + Imaging

SPIE, en internationell organisation för optik och fotonik, organiserar konferenser, erbjuder nätverk för forskare, studenter, industriledare och ingenjörer samt verkar för transformation och innovation inom området.

Årligen arrangeras konferensen Security + Defence någonstans i Europa. Den samlar forskare och utvecklare inom optik för militära tillämpningar och består av flera delkonferenser. I år hölls konferensen 15 – 16 september 2025 i Madrid, Spanien. Delkonferensen Target and Background Signatures XI: Hide and Seek bestod av sex sessioner med olika teman. Session ett handlade om AI och ”counter-AI”. Session två handlade om metodik kring mätningar och session tre om modellering och simulering inom IR. Session fyra bjöd på insikter kring karakterisering av material. Session fem och sex var en delad session med konferens 13680 (Autonomous Systems for Security and Defence II) om detektion och spårning.

Det talades mycket om klassificering med hjälp av AI, adversariala mönster i syfte att lura AI, IR modellering samt detektion och spårning med hjälp av olika algoritmer.

På delkonferensen presenterades två arbeten genomförda på FOI:

- *Methodology for outdoor scatterometry using solar illumination*, som presenterades av Linnea Serrander.
- *Optical and thermal properties of carboxymethylated cellulose aerogels*, som presenterades av Jennifer Silander.

4.1.3 Materials for tomorrow

Konferensen Materials for Tomorrow 2025 fokuserade på hur naturens egna lösningar kan inspirera utvecklingen av framtidens material och teknologier. Fokus låg på forskning inom fem områden. Inledningsvis behandlades bioinspirerad elektronik där forskare visade hur biologiska system kan ge upphov till nya typer av elektroniska material. Här diskuterades bland annat nanokompositter med oregelbundna strukturer, bioinspirerade kraftkällor och hybridmaterial som kombinerar levande och syntetiska komponenter för att efterlikna naturens sätt att generera och transportera energi. Därefter följde ett

block om bioinspirerad energilagring som tog upp hur naturens strategier för att lagra energi kan överföras till tekniska lösningar. Fokus låg på kompositer och nanostrukturer som erbjuder förbättrad värmelagring, lättviktsegenskaper och möjligheten att kombinera mekanisk hållfasthet med elektrokemiska funktioner. Den tredje delen, konstruktion av biostrukturer, riktade sig mot hur komplexa biologiska strukturer och deras hierarkiska uppbyggnad kan inspirera konstruktionen av avancerade tekniska system. Exempel inkluderade spiralstrukturer, biomimetisk fiberproduktion och konstruktion av strukturer som efterliknar biologiska nanoporer. Därefter behandlades tillverkning av bioinspirerade material där fokus låg på praktiska metoder såsom magnetiskt styrd 3D-printning, orienterade mikrostrukturer och utvecklingen av adaptiva kompositer som efterliknar naturen. Konferensen avslutades med temat bioinspirerade material för hälsa, där fokus låg på medicinska tillämpningar som vävnadsmodeller, mjuka robotsystem, biomaterial för benreparation och multifunktionella material.

4.1.4 Workshop Photonics and Electronics 4 Defence

Photonic Sweden arrangerade en workshop om fotonik och elektronik för försvarstillämpningar med stöd ifrån Photonics²¹, ett europeiskt nätverk med syfte att samla företag och forskningsaktörer inom fotonik¹⁵. Inom Photonics²¹ finns en arbetsgrupp som behandlar säkerhet, rymd och försvarstillämpningar. Workshopen var ett initiativ att försöka möta *EU:s Defence Technological and Industrial Base* (EDITB). FoT MoP var med och bevakade workshopen med en representant. Under workshopen berättade FMV och FOI om sina verksamheter inom R&D respektive elektrooptiska system. Finland berättade om sin stora satsning *The Flagship for Photonics Research and Innovation* (PREIN¹⁶) där man bl.a. vill skapa ett Living-lab för försvarstillämpningar. Därefter berättade företag: IRnova, Lumibird Photonics, Aimpoint, Optronic, Exail Photonics, 7L Test, Nordic Air Defense, Sting (*Stockholm Innovation & Growth*) och FLIR Systems, om sina verksamheter med koppling till försvarstillämpningar:

4.1.5 Temadag kvantberäkningar för försvarstillämpningar

Tekniska tillämpningar av kvantmekanik är ett hett forsknings- och utvecklingsområde, inte minst efter tillkännagivandet av 2025 års nobelpris i fysik. FOI arrangerade under hösten en temadag för att mer specifikt diskutera försvarsnytta av den snabba utvecklingen inom kvantberäkningar. Dagen inleddes med ett föredrag om vad som gör kvantinformatiön speciell där grundläggande teori om kvantinformatiön, kvantkoder och feltolerans togs upp. Detta följdes av en presentation om kvantberäkningar i noisy intermediate-scale quantum (NISQ)-eran. Under eftermiddagen hölls en genomgång av kvantalgoritmer för försvarstillämpningar där optimeringsalgoritmer för exempelvis vård, transport och prioritering diskuterades. Dagen avslutades med en presentation om kvantoptimering inom flygplanering.

¹⁵ <https://www.photonics21.org/> Hämtad 2025-11-05.

¹⁶ <https://prein.fi/> Hämtad 2025-11-05.

4.1.6 Virtual workshop on Metamaterials

Inom det internationella samarbetet CANESE, ett trilateralt samarbete mellan Kanada, Nederländerna och Sverige inom material och nanoteknologi, arrangerades en virtuell workshop om metamaterial. *Defence Research and Development Canada* (DRDC), TNO (nederländska organisationen för tillämpad vetenskaplig forskning) och FOI berättade om sina verksamheter kopplat mot metamaterial. FOI bidrog med två presentationer:

- Overview of metamaterials activities at FOI with focus on signature applications, Dr Hans Kariis, FOI.
- Metasurfaces on glass for tailoring its optical properties !? - antireflection and other functionalities, Dr Stefan Karlsson, FOI.

4.2 Kontakter med industri, lärosäten och institut

Projektet har deltagit i olika nätverkande aktiviteter, bl.a.:

- WISE nätverksdag Norrköping 28 januari
- IMA Innovative Materials Arena nätverksträff samordnat med SIO Grafens vårmöte om Grafen och 2D-material, 8 april
- FMV Teknisk prognos, På spaning mot framtidens teknik, tema försvarsinnovation, Stockholm, 30 september
- SIO Grafen höstmöte Västerås 7-8 oktober
- IMA nätverksträff med besök på Elements 13 oktober

Projektet följer Vinnovas Strategiska innovationsprogrammet SIO Grafen och är aktiv i dess styrelsearbete. Under året har styrelsearbetet handlat om färdvägen framåt när finansieringen för den totalt tolvåriga satsningen på grafen inom SIO Grafen upphör nästa år. Man undersöker möjlig samverkan med andra strategiska innovationsområden för en fortsatt färdväg framåt inom material. Man tittar på möjligheter till framtida excellenskluster och samtidigt följer man Europeiska satsningar och initiativ för samverkan inom avancerade material.

Inom området strukturella material har under året möten med och studiebesök genomförts hos:

- 13 företag
- 9 universitet (varav 8 svenska)
- 5 institut (varav 1 svenskt)

4.3 Samarbete inom EDA

Europeiska försvarbyrån EDA (eng. European Defence Agency) stödjer den europeiska försvarsförmågan. Verksamheten organiseras i 15 CapTechs (Capability Technology groups). Frågor om material- och produktionsteknik hanteras inom CapTech materials & structures. Möten hålls vanligen tre gånger per år och innefattar uppföljning av avslutade projekt, återrapportering från pågående projekt och planering inför kommande projekt.

4.3.1 EDA workshop: Kritisk AM-infrastruktur för EU-försvaret

FOI deltog vid en EDA-workshop i samband med det senaste mötet 21 oktober 2025 på Fraunhofer IKTS (Institut för Keramisk Teknologi och System) i Dresden, Tyskland. Workshopen handlade huvudsakligen om projektet MAREO (eng. additive MANufacturing for REpair in naval vessel maintenance repair Operations) vars syfte är att möjliggöra additiv tillverkning (AM) för reparation och reservdelar i havsbaserade applikationer. Workshopen syftade till att undersöka vilka aktörer som kan bidra till MAREO-projektet samt att samordna utvecklandet av nya processer och material. Workshoppens första session handlade generellt om AM-processer och fokuserade bland annat på fördelar med DED (eng. Direct Energy Deposition). Det är en process där pulver eller tråd beläggs på en yta och omedelbart smälts på med hjälp av riktat plasma eller laser. Fördelarna, i kontrast med traditionell maskinbearbetning, är mindre materialförbrukning, kortare ledtider och mindre efterbehandling, eftersom komponenten som byggs upp är strukturellt lik slutprodukten.

DED möjliggör även nya typer av material när pulver används med lasersmältning eftersom sammansättningen kan styras i varje lager. Exempelvis finns multilagerstrukturer där sammansättningen alternerar lager för lager, och gradientstrukturer där man sakta ökar koncentrationen av en tillsats över flera lager. DED kan även användas för att tillverka högentropilegeringar HEA (eng. High Entropy Alloys) genom att kombinera flera olika grundämnen, till exempel värme- och oxidationsresistent CrMoNbTaTiZr. Med plasma-DED kan man även belägga ytor på många typer av substrat, exempelvis koppar på trä, magnetisk metall på plaster och keramer på metaller. Denna ytfunktionalisering är möjlig för stora och komplexa strukturer, till exempel antenner.

I andra sessionen presenterade nationella grupper sina material, 3D-skrivningsprocesser, testningsförmågor och forskning som möjligen kan bidra till MAREO-projektet. Dessa grupper bestod av företag och akademi från Belgien, Portugal, Luxemburg, Nederländerna, Tjeckien, Spanien och Italien. De senare två var av särskilt relevanta och återges nedan.

Den italienska gruppen lyfte fram sin forskning inom elektromagnetiska metamaterial vars egenskaper kan skräddarsys för att absorbera, reflektera eller styra infallande EM-vågor. Detta lämpar sig för att skydda elektronik i kraftnät och transportmedel mot störande signaler. Metamaterialen skulle även kunna implementeras i antenner för att förbättra deras styrka, riktverkan och bandbredd. Italienska gruppens framtida forskning kommer fokusera på lättare och tunnare radarabsorberande strukturer som kan användas även vid lägre frekvenser, specifikt L-bandet. De föreslog två tillvägagångssätt: magnetiska bikakestrukturer 3D-skrivna med magnetiskt filament, samt staplade kompositiskt av glasfiber, epoxiharts och magnetiska partiklar.

Den spanska gruppen betonade sin förmåga att återvinna keramiskt och metalliskt industriavfall. Genom en mikrovågsplasmprocess omvandlas avfallet till ett uniformt pulver som kan packas tätt och flyter lätt. Dessutom presenterades möjligheten att skapa stora reservdelar med 3D-skanning och utskrift på plats med hjälp av DED och pulverbäddsfusion PFC med laser. De lyfte fram sin förmåga att under tillverkning kunna övervaka temperatur,

arbetsavstånd och lagertjocklek med syfte att kunna skapa modeller för att förutspå reservdelens egenskaper. Slutligen diskuterades ett pilotprojekt om att efterbehandla komplexa 3D-skrivna komponenter. Stödstrukturer och lagerlinjer kan poleras bort kemiskt för att därefter beläggas med metallskikt i elektrolytbad.

Efter presentationerna avslutades workshopen med en rundtur i Fraunhofer IKTS laboratorier för: pulverhantering, additiv tillverkning och formning, värmebehandling, karakterisering och maskinbearbetning.

4.4 Samarbete inom Nato

Materialtekniska frågor hanteras inom Natos forskningsorganisation främst av panelen AVT (Applied Vehicle Technology). Medarbetare i projektet har närvarat vid NATO AVT Panel Bussnies Meeting i Riga där samarbetspartner och representanter från olika europeiska företag och organisationer kan träffas. Under veckan hölls även *AVT-407 Research Specialists' Meeting on System Qualification and Certification by Analysis*.

4.4.1 AVT-ET-249

Inom projektet har arbete bedrivits inom AVT-ET-249. Detta arbetspaket rör tvådimensionella material relaterade till militära applikationer. Vanligaste diskussionsområdet är det tvådimensionella materialet grafen, men även övergångsmetall-dichalcogenider (TMD), bornitrid och heterostrukturer med mera är av intresse. Detta var sista året för denna grupp och det beslutades att en ny grupp skulle skapas. Den nya gruppen kommer organiseras i form av en research workshop (RWS). Deltagande nationer är Storbritannien (delad ordförande, ledarnation), Nederländerna (delad ordförande), USA, Sverige, Estland, Norge, Turkiet och Tyskland. Förslaget har presenterats och planering förväntas äga rum under 2026 och genomförande av workshop 2027.

5 Slutsatser

Materialteknik är ett område som uppvisar en snabb utveckling, främst i den civila sektorn. Exempel på detta är:

- Metallstrukturer framtagna med pulverbäddsteknik
- Biomimetiska material
- Högpresterande pansarmaterial
- Värmeisolerande och extremt lätta aerogeler

Produktionsteknik utvecklas också snabbt civilt och dessa landvinningar kan komma till militär nytta genom att t ex

- Produkter kan, i enstaka exemplar, tillverkas snabbare
- Produkter och strukturer som inte går att tillverka med traditionella produktionsmetoder kan tillverkas med ny teknik
- Avancerade produkter kan tillverkas i en provisorisk verkstad nära fronten
- Skräddarsydda material och komponenter kan tas fram för reparation

Samarbete är en nyckel till framgång för ett litet land som Sverige. Detta sker t ex genom:

- Täta kontakter mellan Försvarmakten, FMV, FOI och svensk industri
- Medverkan i Europeiska Försvarsbyråns (EDA) projekt
- Samverkan inom Nato
- Samverkan med svensk industri
- Akademiskt samarbete med universitet och högskolor
- Medverkan vid vetenskapliga och militära konferenser



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se