



Älykäs Valmistus Ekosysteemissä

Tulosraportti 2020



Sisällys

Alkusanat	3
1. Älykäs valmistus ekosysteemissä	5
1.1 Taustaa.....	5
1.2 Konsortio	5
2. Materiaalit	6
2.1 Materiaalien vaatimuspohjainen määrittely	7
2.2 Mekaanisten ominaisuuksien manipulointiprosessit	12
2.3 Älykäs materiaalien testaus	15
3. Valmistus	19
3.1 Suunnittelun ja valmistuksen integrointi	19
3.2 Digitaalisen valmistuksen tutkimusympäristöt	23
3.3 Tunnistusmenetelmät toimitusketjussa	30
4. Toimitusketju.....	39
4.1 Kannattavuuden johtaminen ja ohjaaminen	39
4.2 Ohjauksen peruselementit	40
4.3 Projektien merkitys hankinnassa.....	41
4.4 Keskeiset tulokset.....	43
4.5 Toimitusketjun digitaalinen kaksonen.....	44
5. Tulevaisuuden haasteet	49
ÄVE-projektin julkaisut	50

Alkusanat

Tutkimustiedon (ÄVE) rooli konepajateollisuuden kilpailuedun rakentamisessa

Älykäs Valmistus Ekosysteemissä hankkeen aikana tutkimus kiihdytti vähitellen tuomaan avauksia valmistavan teollisuuden osaamisen hiipuvaan tilaan. Kahden vuoden jakso on tutkimukselle lyhyt aika, mutta ÄVE-hankkeessa pystyttiin luomaan muutama merkittävä uudistumisloikka soveltamiseen ja monta tason nostoa, joilla päästään jo näyttämään tulevaisuudessa uusia mahdollisia kyvykkyyden polkuja teollisuudelle.

Suurin syy onnistumiseen oli tutkimusryhmien yhteistyö ja toisaalta säännöllinen teollisuuden rooli tutkimusryhmissä sekä muutama cross-funktionaalinen projekti yritysten ja tutkimuspartnerien kesken. Parhaimmat tutkimusprojektit kaivoivat sekä näkyvää tietoa että hiljaista tietoa työskentellessä yritysten tiloissa ja oppimassa realiteetteja tutkimustiedon jalostamiseksi. Tutkijat, jotka jalkautuivat konepajaympäristöön tai olivat läheisessä vuorovaikutussuhteessa siihen, tuottivat tiedettä reaaliympäristön ehdoilla käytännön sovelluksiin.

Kansainvälinen tutkijavaihto joutui valitettavasti perääntymään koronan takia jalkautumisesta osamiskeskukseen. Kuitenkin luotuja yhteistyökanavia alan huippuyksiköihin pystyttiin hyödyntämään, kuten RWTH Aachenin hiontatutkimusryhmän kokeellinen tutkimus ja huippuosaaminen. Tähän yhdistettiin huippuammattilaisten hiljainen tieto ja Tampereen yliopiston tutkijoiden paneutuminen mikrorakenteisiin, tekoälyyn ja simulointiin, jolla täydennettiin saksalaisten peruskaavoja sekä kokeellista tutkimusta. Creanex puolestaan avaa latua hionnan digitaaliseen kaksoseen, jolla taas pystytään osaltaan kouluttamaan Suomesta puuttuva hiontatekniikan opettajat sekä valmistustekniikan opiskelijat.

Konepajakoulu 2.0 konsepti, jolla ratkaistaan osaltaan konepajaosaajien pulaa, pohjautuu vahvasti perustyöhön, jota ÄVE-hankkeessa tehtiin. Samoin yksi merkittävä vaikutus oli konepajaosaamisen fokuksen nosto itse tutkimuksen sisällä. Pystyttiin osoittamaan, että yritysten arkisista perusasioista voidaan tehdä syväluotaavaa tiedettä ja liikkumaan jopa tekoälyn maailman luokan pioneerina. Tämä tieteen iskun mahdollisuus teollisuudelle ei ole helposti näkyvissä ja vaatii toki aktiivista kokeilun halua myös teollisuusosapuolelta. ÄVE-hanke osoitti kuitenkin, että aito yhteistyö on valtava voima ja sai rikki myös yliopiston organisaatiosillot. Toivon, että saimme alkuun myös sysäyksen uuteen kulttuuriin tutkimuksen sisällä sekä yritys yhteistyön rajapinnoilla. Täytyy muistaa, että yritysten ja tutkimuksen yhteistyö mahdollisti näkyvät tulokset yrityksissä sekä suoraan että epäsuorasti.

Pasi Julkunen / MexLink Oy

Teollisuuden rajapinta ÄVE:n tutkimushankkeeseen

ÄVE-hanke yhdisti ja edisti!

Älykäs valmistus ekosysteemissä – tutkimushanke toteutettiin suurelta osin poikkeusaikana Covid19 -pandemian vallitessa koko maailmassa. Tästä huolimatta ÄVEN avulla saatiin aikaiseksi runsaasti hyviä tutkimustuloksia, uusia tutkimus- ja oppimisympäristöjä, kansainvälisiä lehtijulkaisuja, opinnäytetöitä, diplomitöitä ja väitöskirjoja. Mutta ennen kaikkea ÄVE -hanke ÄVE loi toimintatavan, joka sekä yhdisti tutkimustoimijoita keskenään että myös lähensi tutkimusmaailmaa ja yrityksiä toisiinsa.

Hankkeen kokonaisbudjetti oli lähes 3 milj. euroa ja hankkeet rahoitti Business Finland, osallistuvat yritykset ja tutkimuslaitokset. ÄVE-hankkeen tutkimusosapuolina toimivat Teknologian tutkimuskeskus VTT, Tampereen ammattikorkeakoulu sekä Tampereen yliopisto. Kokonaisuudessaan tutkijoita mukana on n. 40, joiden osaamiset täydensivät toisiaan käsittäen mm. materiaalitekniikan, suunnittelun, valmistustekniikan, teollisuustalouden ja tekoälyn osaamisia Kokonaisuudessaan ÄVE voidaan nähdä osana isompaa teollisuuden ja tutkimuksen yhteistä liikettä, jonka jatkuvalla toiminnalla haetaan vaikuttavuutta todelliseen kilpailukykyyn.

ÄVEN tutkimustoiminta keskittyi kolmeen eri fokusalueeseen: materiaalitutkimukseen, valmistustekniikan tutkimukseen sekä toimitusketjujen tutkimukseen. Poikkileikkaavana ajatuksena koko hankkeessa oli kehittää perusteknologioita- ja kompetensseja digitaalisuuden mahdollisuudet huomioiden. Kansainvälisestikin merkittäviä tuloksia saavutettiin kaikilla kolmella osa-alueella. Tutkimustoiminnan ollessa kuitenkin pitkäjänteistä, voidaan todeta, että maailma ei tullut valmiiksi tänäkään hankkeen avulla vaan jatkotutkimusta tarvitaan.

Sandvik Mining and Construction Oy:llä veturiyrityksenä on ollut aktiivisesti edistämässä koko yritysjoukon yhteistyötä ja suuri kiitos kuuluu Pasi Julkuselle, jonka merkitys hankkeen suunnitteluvaiheessa sekä hankkeen aikana tutkimustoiminnan sparraajana on ollut merkittävä. Kiitos Pasi! Lisäksi hankkeen suunnitteluvaiheessa Synocus Oy:n rooli oli tärkeä yritysjoukon kokoojana. Mutta ilman kaikkia yritysosallistujia emme olisi voineet puhua ekosysteemisestä tekemisestä. Joten kaikkien rooli oli tärkeä!

Tämä raportti on toinen ÄVE-hankkeen tulosraporteista ja se keskittyy erityisesti vuosien 2020-2021 tuloksiin. Kaikista aiheista on mahdollista saada lisätietoa ko. aihealueen yhteishenkilöiltä, jotka on mainittu raportissa. Lisäksi toivomme, että kiinnostuneet yritykset ja tahot ottavat kappia raportissa esitetyistä tuloksista ja soveltavat niitä käytäntöön mahdollisuuksien mukaan. Tässä me tutkijat olemme mielellämme apuvoimina. Lisäksi toivomme, että myös tulevat hankkeet veisivät jatkotutkimusehdotuksiamme eteenpäin sekä edistäisivät ÄVE-hankkeen aloittamaa yhteistä tekemistä, jotta Suomen valmistava teollisuus voisi hyvin vielä 2030-luvullakin.

Business Finlandille suuri kiitos tuesta ÄVE-hankkeelle.

25.03.2021

Prof. Kari T. Koskinen, ÄVE-hankkeen vastuullinen johtaja, Tampereen yliopisto
Mika Sirén, projektipäällikkö VTT
Lasse Hillman, projektipäällikkö TAMK

1. Älykäs valmistus ekosysteemissä

Smart Machines and Manufacturing Competence Centre (SMACC) on Teknologian tutkimuskeskus VTT:n sekä Tampereen yliopiston muodostama osaamiskeskittymä, joka tarjoaa tutkimusosaamista valmistavan teollisuuden yrityksille. Älykäs valmistus ekosysteemissä (ÄVE) –tutkimushanke (jatkossa *ÄVE-hanke*) muodostettiin SMACCin koordinoimana. Hankkeen taustalla on laaja keskustelu eri toimijoiden välillä, joissa on todettu suomalaisen kone- ja laitevalmistuksen keskeiset ominaispiirteet: Suomalaisten koneenrakentajien kärkituotteet, älykkäät koneet ovat globaalistikin pisimmälle kehitettyjä ja valmistuksellisesti vaativimpia tuotteita, jotka edellyttävät kiinteää vuorovaikutusta suunnittelun, valmistuksen ja kokoonpanon välillä. Ne ovat myös yksi nopeimmin digitalisoituvista kohteista sekä tuoteominaisuuksien että suunnittelu- ja valmistusteknologioiden ja tuotteen elinkaaren hallintavaatimusten osalta.

Ekosysteemimäinen toimintatapa tarjoaa tehokkaan kehittämisalustan uusien materiaalien soveltamiseksi, uusien suunnittelu- ja valmistusmenetelmien toiminnallistamiseksi sekä tuotteiden elinkaarinhallinnan digitalisoimiseksi. Tämä on myös perusta kokonaisuuden kannattavuuden johtamiselle. Ekosysteemin tavoitteiden saavuttaminen edellyttää kyvykkyyttä suunnitella ja valmistaa älykkäitä laitteita, älykkäistä osista, älykkäin menetelmin. Tämän perusteella päätettiin käynnistää Älykäs valmistus ekosysteemeissä (ÄVE) t&k -hankekokonaisuus. Käynnistettävät kokonaisuuden projektit ovat vahvasti synergisiä, ja sen osa-alueet toisistaan riippuvaisia. Kokonaisuus voidaan toteuttaa onnistuneesti vain ekosysteemisellä ajattelumallilla ja yhdistämällä pilottipohjaisesti valmistavien ja tietotekniikkayritysten osaaminen sekä johtava teoreettinen ja soveltava tutkimus. Tutkimushankkeen tehtävänä on tukea monitieteisesti ÄVE -yritsekosysteemin kehittymistä ja vahvistumista ja samalla tuottaa uutta tietoa laajemmin hyödynnettäväksi keskittyen materiaalien, valmistuksen ja toimitusketjujen tutkimukseen.

1.1 Taustaa

Suomalaiseen kone- ja valmistustekniikan alaan kohdistuu useita haasteita. Väestön ikääntyessä ammattiosaajien määrä teollisuudessa vähenee, sillä eläköityminen on nopeampaa kuin uusien osaajien tulo alalle. Lisäksi kone- ja valmistustekniikan korkeatasoista koulutusta on vähennetty voimakkaasti viimeisen vuosikymmenen aikana ja uudet osaajat ovat teknisesti heikompia kuin edelliset, johtuen koulutuksen painopisteen muutoksista. Alalta poistuu hiljaista tietoa – ammattiin liittyvää tietoa, joka on hankala kuvata ja tunnistaa – ja yleinen tietotaidon taso alenee.

Edellä mainittuihin haasteisiin voidaan vastata hyödyntämällä digitalisaation ja automatisoinnin menetelmiä valmistavassa teollisuudessa sekä kehittämällä korkeakoulujen tutkimusympäristöjä uusien tutkimushankkeiden avulla. Lisäksi erityisen tärkeää on yritysten sekä tutkimusorganisaatioiden välinen yhteistyö, jonka avulla saadaan entistä parempia tutkimuksellisia avauksia ja nopeutetaan uuden tiedon siirtymistä organisaatioiden välillä. Älykäs valmistus ekosysteemissä –tutkimushanke vastaa juuri näihin haasteisiin.

1.2 Konsortio

ÄVE- projektikokonaisuus toteutetaan tiiviissä yhteistyössä koko hankekonsortion toimijoiden kanssa kuitenkin niin, että kaikilla osapuolilla on selkeästi yhdessä sovitut roolit, painopistealueet ja tavoitteet. Vaikka projektin suunnittelutyö tehtiin pääasiassa yhteistyössä Sandvik Mining and Construction Oy:n kanssa, sen toteutuksen aikana on pyritty aktiivisesti yhteistyöhön ekosysteemin muiden yritysten kanssa. Tässä yhteistyössä on onnistuttu hyvin, ja useissa tutkimushankkeen osissa yrityksillä on ollut suora yhteys tutkimusorganisaatioiden tutkijoihin pystyen vaikuttamaan valittuihin

tutkimuskysymyksiin. Hyvänä esimerkkinä yhteistyöstä voidaan pitää 3.12.2020 pidettyä ÄVE-webinaaria, jossa yritykset pääsivät esittämään omia projektiokonaisuuden tutkimushankkeitaan.

Tutkimusorganisaatiot

Tampereen yliopiston (TAU) tärkeimmät projektitason tavoitteet ovat syvälinen materiaali- ja valmistustekniikan tutkimus, joita aktiivisesti tukee kannattavuuden johtamisen tutkimus sekä tekoälytutkimus. TAU:n tavoitteena on pitkäjänteisten tutkimushankkeiden toteuttaminen kone- ja materiaali-tekniikan alueella yhdessä yritysten kanssa, ja näin valittujen teknologia-alueiden vahvistaminen kansallisesti. Hankkeeseen liittyy oleellisesti myös kansainvälinen yhteistyö alan huippuyliopistojen kanssa, esimerkkinä RWTH Aachen Saksasta. Tavoitteena on myös lisätä alan tutkimuksen ja ope- tuksen houkuttelevuutta huippututkimukseen pyrkivien tutkimuskohteiden myötä. Kannattavuustut- kimuksen tavoitteena hankkeessa on tutkia kannattavuuden johtamisen vaikuttavuutta ekosysteem- meissä ja digitaalisuuden lisääntymisen myötä muuttuvassa teollisuuden toimintaympäristössä.

VTT tavoittelee koko ÄVE-hankkeen osalta kokonaisvaltaista ja systeemistä, samalla neutraalia lä- hestymistapaa. Toteutuksessa otetaan huomioon koko tuotteen elinkaaren aikaiset näkökulmat sekä mallipohjaisuuden ja digitaalisten kaksosten kokonaisvaikutuksen prosesseihin, tuotemalleihin, tie- torakenteisiin, organisaatioihin/verkostoihin, osaamiseen jne. Neutraalia lähestymistapaa tukevat sekä menetelmät että viimeisimmän tieteellisen tutkimustiedon hyödyntäminen. Tutkimus tuottaa yleis- tettävää tietoa, joka hyödyttää laajasti kotimaista valmistavaa teollisuutta, erityisesti toimitusketjuja ja pk-yrityksiä. VTT:n projektityö keskittyy

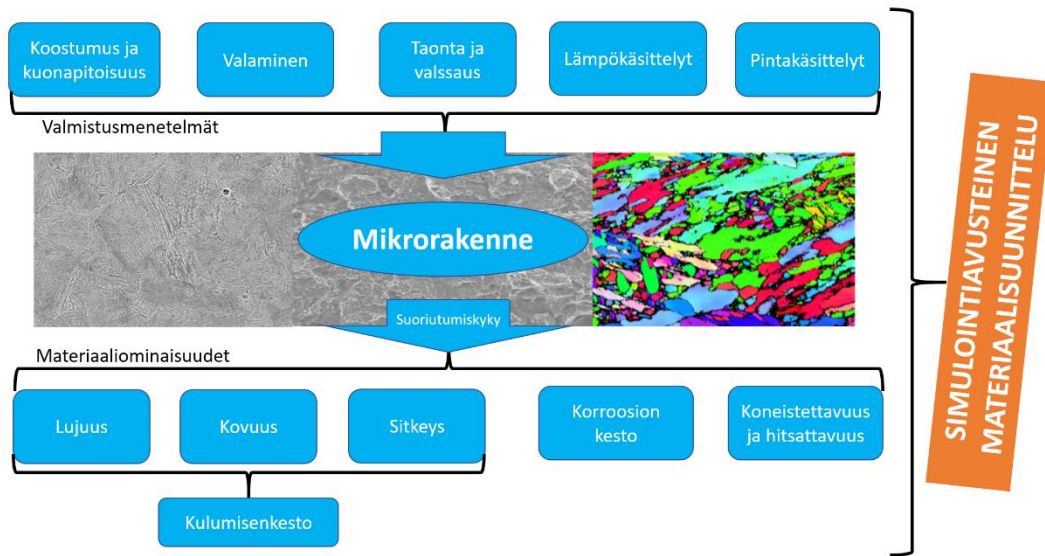
- koneoppimismallien kehittämiseen älykkään valmistuksen laadunvalvontaan, prosessien au- tomatisointiin ja tuotteiden elinkaareen hallintaan
- kappaleiden ja komponenttien tuotannon- ja käytönaikaisten mittaus- ja tunnistusteknologi- oiden kehittämiseen kulloisenkin käyttöympäristön vaatimusten mukaisiksi
- koko tuotantoketjun mallintamiseen ja sen toiminnan kehittämiseen
- VTT:n projektiin sisältyy myös merkittävästi kansainvälistä tutkimusyhteistyötä materiaali- suunnittelun, tunnistusmenetelmien ja tekoälyteknologioiden alueilla

Tampereen ammattikorkeakoulun (TAMK) osaprojekti ja sen tavoitteet liittyvät mallipohjaisen suunnitteluun ja siellä osaamisen nopeaan kasvattamiseen ja käyttöönottoon valmistavan teollisuu- den yrityksissä. Erityisesti TAMK demonstroi ja jalkauttaa pääprojektin mallipohjaisen suunnittelun tutkimustulokset yritysten käyttöön ja hyödynnettäväksi. TAMK toteuttaa mallipohjaiseen suunnitte- luun perustuvan demonstraatio- ja oppimisympäristön sekä demonstraatioita yrityksille mallipohjai- seen suunnitteluun pohjautuvan prosessin toiminnasta ekosysteemeissä.

2. Materiaalit

ÄVE:n Materiaalit-osa-alueen (työpaketit WP1-WP3) tavoitteena oli ohjata materiaalivalintoja kunkin valmistettavan osan omien, tarkoin määritettyjen loppukäyttövaatimusten pohjalta. Tutkimustyössä keskityttiin; 1) valmistusmenetelmien ja koostumuksen jäännöspitoisuuksien vaikutukseen loppu- tuotteen ominaisuuksiin, 2) metallien mikrorakenteille asetettavien vaatimusten määrittelyyn väsy- misen ja iskumaisten kuormitusten kestävyuden parantamiseksi, 3) lämpökäsittelyjen optimointiin ja lopuksi 4) älykkääseen materiaalien suorituskyvyn testaukseen ja todentamiseen.

Tavoitteena oli vaatimusperusteinen suunnittelu, jossa tunnistetaan materiaalin ominaisuudet mää- rittävä rakenne ja sen käyttökohteen vaatimusten mukaisuus. Lisäksi huomioitiin komponentin omi- naisuuksiin vaikuttavat valmistusmenetelmistä johtuvat tekijät, koska vaadittavat ominaisuudet muo- dostuvat valmistusmenetelmien tuottaman mikrorakenteen perusteella (kuva 1). Tänä päivänä vaa- timusperusteinen suunnittelu toteutetaan usein mallinnus/simulointityökaluilla.



Kuva 1. Lopputuotteen ominaisuuksien muodostuminen rakenteen ja valmistusmenetelmien yhteisvaikutuksesta.

2.1 Materiaalien vaatimuspohjainen määrittely

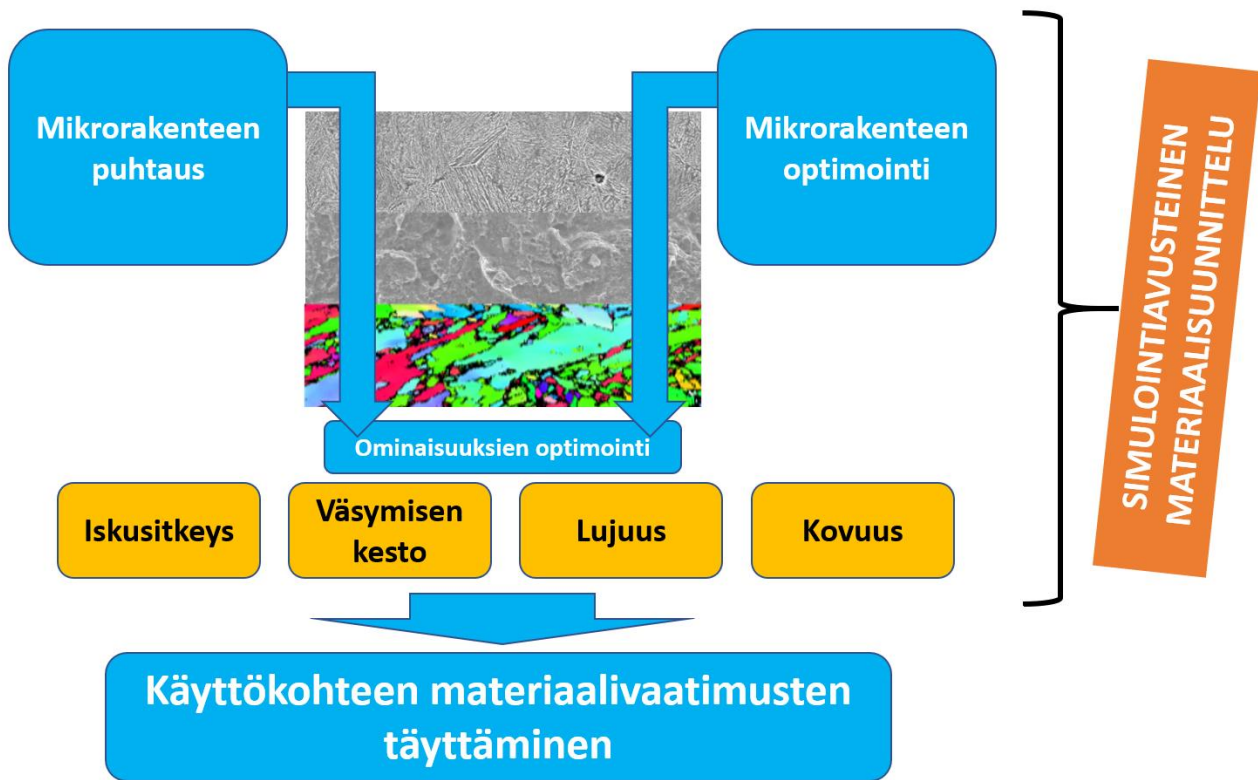
Työpaketissa Materiaalien vaatimuspohjainen määrittely pääpaino oli materiaalien valmistusmenetelmien vaikutukseen vaativien komponenttien suorituskykyyn. Taustalla oli joko kriittisten komponenttien vaurioituminen tai rajoitettu käyttöikä. Käytännössä tehdyssä tutkimustyössä yhdistettiin sekä kokeelliseen tutkimukseen ja materiaalimallinnukseen/simulointiin. Tampereen yliopisto teki pääosin kokeellista tutkimusta ja VTT vastaavasti mallinnusta.

Yhteyshenkilöt: Pasi Peura, TAU, pasi.peura@tuni.fi
 Tomi Suhonen, VTT, tomi.suhonen@vtt.fi

Tavoite

TAU:n osalta työpaketin tavoitteena oli yhdistää valmistustavasta ja koostumuksen vaihteluista johtuva ominaisuuksien hajonta lopputuotteen suorituskykyyn ja sitä kautta määrittellä/optimoida käyttökohteen vaatimusten perusteella käytettävä materiaali ja sen rakenne kuvan 2 mukaisesti. Tavoitteena oli myös tarkastella kriittisesti koko valmistusketjua raaka-aineen valmistuksesta (materiaalista) aina loppukäyttäjälle asti.

VTT:n työn tavoitteena oli käynnistää materiaalimallinnukseen ja simulointiin perustuva mikrorakennepohjainen vaatimusmäärittely kulutusta ja iskumaisia kuormituksia kestäville materiaaleille. Suunnittelun pohjalta käynnistetään ko. materiaalien varsinainen suunnittelu ja optimointi materiaalimallinnuksen ja -simuloinnin avulla käyttäen VTT:n ProperTune® laskenta-alustaa.



Kuva 2. Materiaalin mikrorakenteen ja materiaalin puhtauden vaikutus ominaisuuksiin.

Toimenpiteet, tärkeimmät tulokset ja päätelmät

Tampereen yliopisto:

Tässä työpaketissa yhdistettiin valmistusparametrit, materiaalien sisäinen rakenne kuten mikrorakenne, suotaumat ja kuonapuhtaus, valmiin komponentin suorituskykyyn. Tulosten perusteella kehitettiin vaativiin käyttökohteisiin iskusitkeyden ja väsymiskestävyyden suhteen paremmin optimoituja mikrorakenteita. Tämä toteutettiin tarkastelemalla kriittisesti koko valmistusketjua raaka-aineen valmistuksesta aina loppukäyttäjälle asti.

Terästen soveltuvuuteen haastaviin käyttökohteisiin liittyy monta tekijää, jotka liittyvät suurimmilta osin materiaalin valmistusprosessiin. Valmistusprosessien kautta voidaan hallita materiaalin mikrorakennetta ja koostumusta, joiden kautta voidaan edelleen vaikuttaa mm. materiaalin karkenevuuteen ja lopullisiin ominaisuuksiin. Prosessien kautta voidaan myös vaikuttaa materiaalin homogeenisyyteen ja (kuona)puhtauteen, joilla molemmilla on lähes yhtä tärkeät roolit materiaalin suorituskyvyn nostamisessa kuin pelkästään koostumuksella. Vaativissa käyttökohteissa, kun ollaan materiaalin käytettävyyden ääri rajoilla, standardin mukaisten materiaalien ongelmaksi saattaa muodostua standardien sallima koostumushajonta. Se korostuu käytettäessä eri valmistajien materiaaleja, mutta myös saman valmistajan eri sulatuserät voivat poiketa paljonkin toisistaan. Myös terässulan jähmettymisen seurauksena mikrorakenne voi olla jo lähtökohtaisesti epähomogeenistä. Tämä luonnollisesti lisää hajontaa lopullisissa mekaanisissa ominaisuuksissa.

Valmistettaessa komponentteja väsytyksen kannalta kriittisiin kohteisiin on teräksen kuonapuhtaus erittäin tärkeää. Varsinkin suuret komponentin pinnalla sijaitsevat sulkeumat saattavat lyhentää komponentin käyttöikää huomattavasti. Sulatus/valumenetelmillä on suuri vaikutus kuonapuhtau-

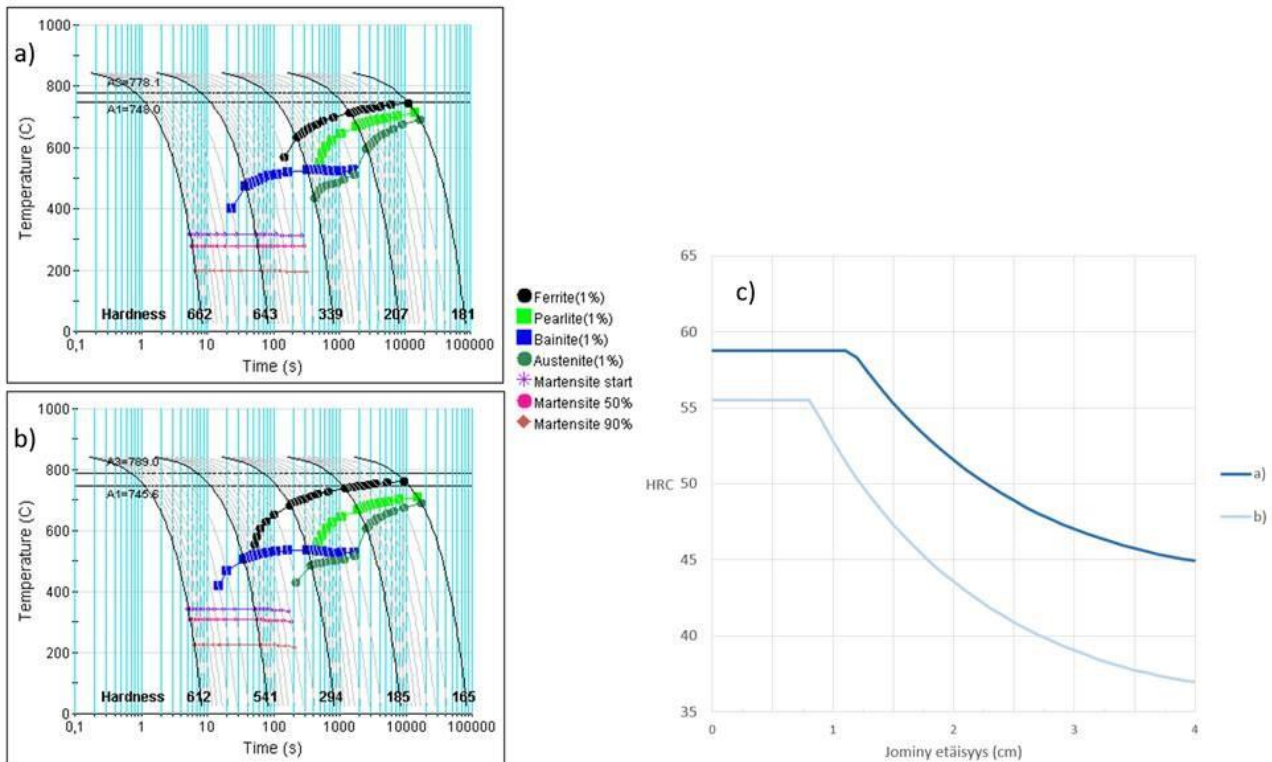
teen. Työkaluterästen valmistuksessa yleisesti käytetyt uudelleen sulatusmenetelmät ovat tästä äärimmäinen esimerkki. Epämetallisia sulkeumia voidaan vähentää ESR:n (Electro Slag Remelting) avulla ja VAR:n (Vacuum Arc Remelting) avulla voidaan vaikuttaa jonkin verran suotautumien syntyyn. Eli näillä menetelmillä pystytään maksimoimaan materiaalin puhtaus ja homogeenisyys – valitettavasti menetelmien käyttöä rajoittaa niiden myötä lisääntyvät materiaalikustannukset. Lisäksi tunnetut terästehtaat pystyvät valmistamaan jo muutenkin useimpiin sovellutuksiin riittävän puhdasta terästä.

Vaatuspohjaiseen materiaalin määrittelyyn etsittiin ratkaisu selvittämällä tutkimuskohteeksi valitun komponentin käytön aikainen kuormitus siinä määrin kuin se oli mahdollista. Samalla tarkasteltiin kriittisesti raaka-aineena olevan teräksen valmistusketjua.

Oleellinen lähtökohta oli koostumus- ja puhtaustietojen tilastollinen tarkastelu. Tuloksena saatiin kattava kuva käytetyn teräksen koostumuksien hajonnasta ja kuonapuhtaudesta. Koottu tieto yhdistettiin kuonapuhauteen vaikuttaviin tekijöihin, jolloin saatiin hyvä kuva mahdollisuuksista vaikuttaa väsymiskestävyyteen. Samalla saatiin koottua tietoa millainen teräksen mikrorakenteen pitää olla kyseisessä käyttökohteessa. Tulosten perusteella standardin sallima koostumusvaihtelu näkyy mekaanisten ominaisuuksien hajonnassa. Tätä havainnollistaa kuvassa 3 esitetyt simuloidut CCT-diagrammit havaittujen koostumusvaihteluiden ääripäissä ja vastaavasti lasketut Jominy -käyrät. Syynä eroihin on erityisesti erot mangaanin, nikkelin ja molybdeenin määrissä. Lisäksi, jos materiaalin karkeavuus on liian matala ja samaan aikaan voimakasta suotaumaa, karkaistun ja päästetyn teräksen ominaisuuksissa tulee olemaan hajontaa johtuen epähomogeenisestä mikrorakenteesta.

Edellä esitetyn perusteella selvitettiin lämpökäsittelyjen suoritusajan vaikutusta rakenteeseen ja lopullisiin ominaisuuksiin. Simulointien tulokset verifioitiin laboratoriokokeilla. Ihan kaikkia lämpökäsittelyjä ei voitu simuloida, jolloin ne toteutettiin pelkästään laboratoriossa. Lopputuloksena näyttää että, standardin sallima koostumuksen vaihteluväli on niin laaja että, se näkyy lopullisissa ominaisuuksissa. Tämä liittyy sekä karkenevuuteen että muodostuvaan mikrorakenteeseen. Lisäksi tulosten perusteella suunniteltiin yhteistyössä WP2:n kanssa valmistustapa, jota testataan WP3:ssa.

Erittäin vaativissa kohteissa käytettävien terästen kohdalla edellytetään usein tasalaatuisuutta ja huipputason ominaisuuksia. Tehdyn tutkimuksen perusteella näyttää, että standardin mukaisten terästen koostumuksen vaihteluväli voi olla liian suuri tasalaatuisen lopputuotteen kannalta. Tältä osin näyttäisi, että vaativille tuotteille kannattaisi rajata standarditerästen spesifikaatioita ja kehittämällä oma tarkempi analyysi. Tällä tavalla toimivat mm. OEM yritykset autoteollisuudessa. Vain tätä kautta päästään tämän työpaketin otsikon mukaiseen vaatuspohjaiseen materiaalin määrittelyyn. Tulosten perusteella pystyttiin määrittämään tutkimuskohteeksi valitun komponentin käyttöolosuhteiden vaatimuksista liikkeelle lähtien teräs ja sille optimaalinen mikrorakenne, että valmistustapa testattavaksi työpaketissa WP3:ssa. Yhteenvedona, pystyttiin määrittämään komponentissa käytettävälle materiaalille asetettavat vaatimukset koostumuksen ja käsittelyjen suhteen. Lisäksi pystyttiin näyttämään, että tavanomaisista lämpökäsittelyistä poikkeavalla käsittelyllä on mahdollista parantaa edelleen ominaisuuksia. Joten työpaketin alkueraiset tavoitteet täyttyivät suunnitellun mukaisesti.

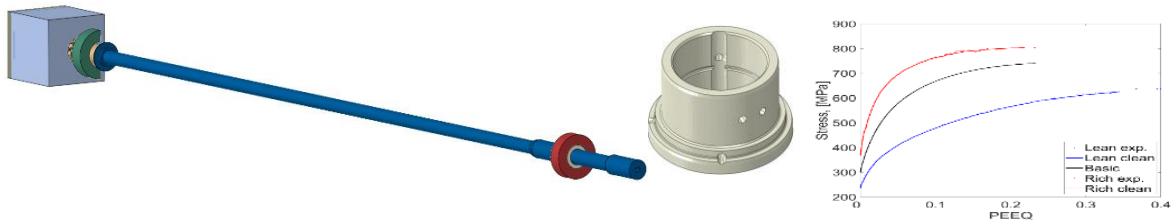


Kuva 3. Simuloidut CCT-diagrammit yhden tutkitun teräksen karkenevuuden ääripäistä, a) karkenevampi mate-riaali, ja b) matalaan karkeneva, ja c) vastaavat Jominy-käyrät Just:n kaavoilla lasketuna (Just, 1968). Terästen austenitointilämpötila 860°C ja raekoko 7.

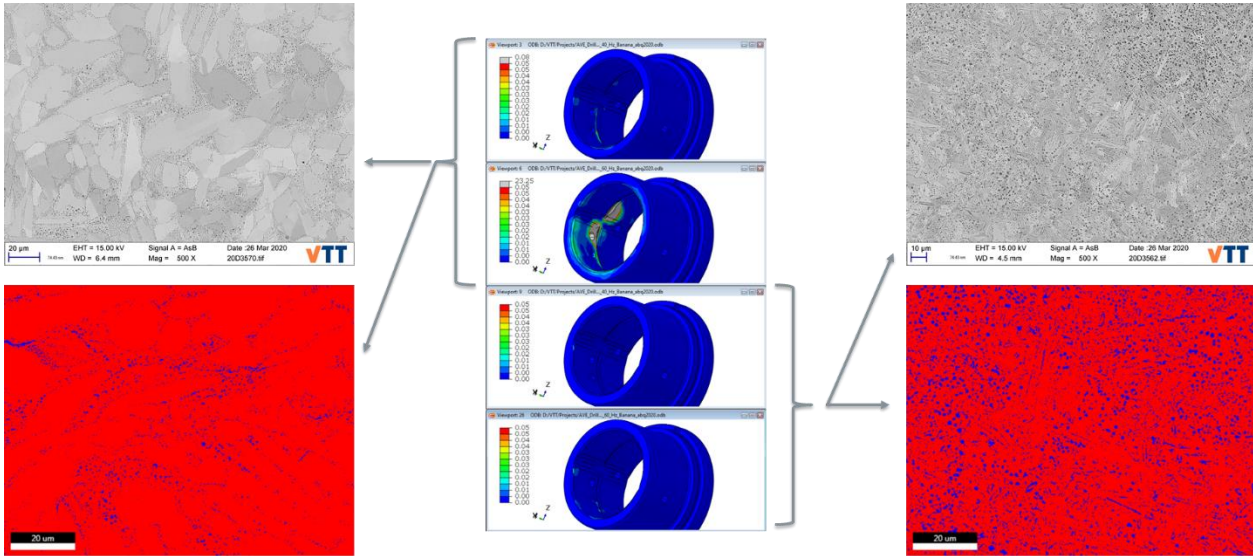
VTT:

VTT:n WP1 tavoitteena oli mallinnusavusteisesti optimoida valetun alumiinipronssin (Johnson Metall) mikrorakenne Sandvikin porakoneen laakeriin. 3D-mikrorakennetarkastelujen pohjalta (3D HR-SEM, EDS- ja EBSD-analyysit, nanoindentaatiotestit, vetokokeet) luotiin mikrorakennemallit. Sandvikilta saaduille käytetyille laakereille suoritettiin vaurioanalyysjä (mittapoikkeamat, mikrorakenne ja pinnan topografian muutokset). Myös valetun alumiinipronssin tuotanto- ja koneistustoleransseja tarkasteltiin. Porakoneen dynaaminen malli on yhdistetty komponentti-, meso- ja mikrorakennetasojen malleihin (dislokaatiodynamiikka pohjainen kideplastisuusformulaatio on parametrisoitu liuoslujitus-, kidekoko-, dislokaatorakenne-, erkauma- yms efekteillä). Koneoppimissovelluksia kehitettiin approksimoimaan ProperTunen fysikaalisia malleja: PT:lla generoitu opetusdataa koneoppimismalleille, jonka tuloksia verrattiin PT-tuloksiin ja tarkennettiin iteratiivisesti.

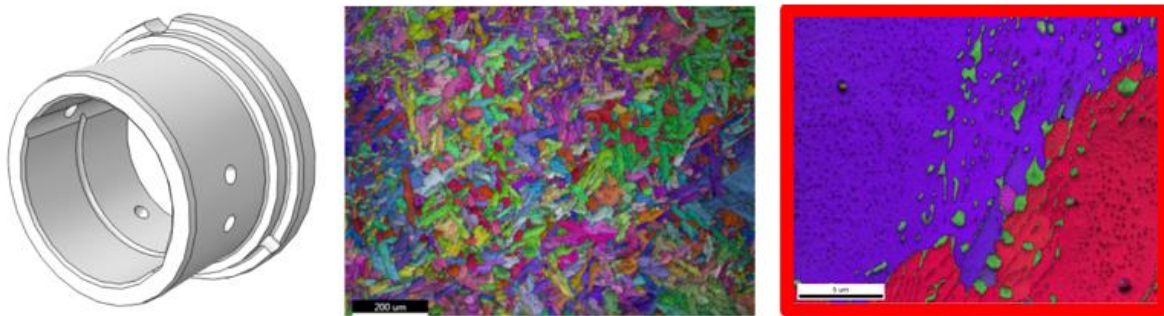
Kuvassa 4a on esitetty dynaamisen makromallin osiot, sisältäen mm. kiven, kruunun, varren, niskan ja niskan laakerin materiaalmallit. Kuvassa 4b on esitetty mallin vastaavuus kokeellisiin mittauksiin jännitys-venymä käyrinä. Yhtenä tarkastelukohteena oli standardin sallimien koostumusrajojen vaikutus syntyviin mikrorakenteisiin ja niiden ominaisuuksiin (esimerkki ns. laiha vs. keskimääräinen koostumus vs. rikas vetokokeikäyrät kuva 4b). Kyseistä mallia käytettiin luomaan niska-laakeri kontaktiparille vaatimusprofiileita eliniälle ja suorituskyvylle eri parametrien kuten poraustaajuuden tai mittatoleranssien funktiona. Nämä vaatimusprofiilit syötettiin mikrorakennetaso malleihin. Kuvassa 5 on esitetty esimerkki koostumuksen vaikutuksesta mikrorakenteeseen ja sen kokemaan kuormitukseen. Kuvassa 6 esitettynä dislokaatiodynamiikkapohjaisen kideplastisuusmallin mittaskaalat.



Kuva 4. Dynaaminen makromalli a), ja b) laakerimateriaalin mikrorakenteen vaikutus veto-kokeessa (plastinen osuus esitetty).



Kuva 5. Esimerkki mikrorakenteen vaikutuksesta komponentin kokemiin kuormituksiin (40Hz vs 60Hz poraus).



Kuva 6. Mikrorakenne mallin moniskaalaisuus, a) komponenttitaso (makro), b) mikrorakennetaso (meso) ja c) alle primääri kidekoon taso (kiteiden sisäiset hierarkiat, erkaumat, yms.).

Projektin tuloksena ymmärrys mikrorakenteen (joka määräytyy koostumuksen ja valmistusprosessien mukaan) vaikutuksesta väsyttävään kuormitukseen kasvoi merkittävästi.

Jatkotutkimukset

Väsyttävässä, iskumaisessa kuormituksessa on oleellista minimoida materiaalissa esiintyvät epäjatkuuskohdat. Käytännössä tämä tarkoittaa kuonapuhautuden ja suotautumien vähentämistä. Vaativissa kohteissa käytetyt teräkset ovat yleensä hyvin korkealaatuisia ja niiden kuonapuhautuden parantaminen on vaikeata ilman edistyksellisiä valmistusmenetelmiä. Jatkossa olisi syytä selvittää ESR

ja VAR, sekä niiden yhdistelmien vaikutus teräksen suorituskykyyn. Edellisten lisäksi jäännösauste-
niitin määrän ja morfologian rooli iskumaisessa ja väsyttävässä kuormituksessa sekä päästöraken-
teen muokkaaminen ovat kohteita, jotka vaativat lisätutkimuksia. Nyt suurin osa tutkimustuloksista
on terästen osalta koottu kokeellisen työn kautta – mallinnusta/simulointeja käytettiin lähinnä karke-
nevuuteen liittyen. Niiden edut nähtiin WP:n alumiinipronssiin liittyneessä osiossa, missä optimointia
pitäisi vielä jatkaa. Jatkossa on syytä ottaa laajemmin käyttöön simulointiohjelmiä, koska niiden
avulla helpotetaan ja nopeutetaan tutkimuksen etenemistä varsinkin tutkimuksen alussa. Simulointi
ja laskentaohjelmien käyttö ei kuitenkaan sulje pois kokeellista työtä, vaan ne täydentävät tehok-
kaasti toisiaan.

Osaamisen ja uuden tiedon levittäminen

Työpakettin tutkimustulokset raportoitiin partneriyrityksille, ja työpakettin Mekaanisten ominaisuuksien
manipulointi (WP2) tutkijoille sekä tarvittavissa määrin WP3:n (Älykäs materiaalitestausta) tutki-
joille. Tulokset esiteltiin myös yhdessä muiden ÄVE:n työpakettien tulosten kanssa projektin semi-
naareissa.

2.2 Mekaanisten ominaisuuksien manipulointiprosessit

Mekaanisten ominaisuuksien manipulointi (WP2) tavoitteena oli parantaa teräksisen komponentin
suorituskykyä valmistusmenetelmien optimoimisen kautta. Työpaketti toteutettiin tiiviissä yhteis-
työssä työpakettien Materiaalien vaatimus pohjaisen määrittely (WP1) ja Älykäs materiaalien testaus
(WP3) kanssa. Tiivis yhteistyö oli luonnollista, koska komponenttien ominaisuudet, ja elinikä ovat
tiukasti sidoksissa toisiinsa. Materiaalien koostumukset, mikrorakenteet, valmistusmenetelmät ja
valmistusreitit vaikuttavat voimakkaasti valmiin komponentin suorituskykyyn ja laatuun. Tämän
vuoksi tässä työpaketissa komponentin valmistusketjusta tunnistettiin tekijät, joilla voidaan vaikuttaa
lopputuotteen rakenteeseen ja ominaisuuksiin. Käytännössä tutkimus ja kehitystyö keskittyi kokeel-
liseen toimintaan ulottuen materiaalin toimitustilasta karkaisun käytännön järjestelyihin. Ainoastaan
karkenevuutta sekä karkaisua tarkasteltiin laskennallisin keinoin. Tämän tyyppisissä projekteissa
olisikin jatkossa hyvä yhdistää kokeelliseen toimintaan materiaalmallinnus ja -simulointi käyttäen
esimerkiksi VTT:n ProperTune® laskenta-alustaa. materiaalien ja valmistusreittien suunnittelu ja op-
timointi hyödyntäen.

Yhteyshenkilö: Pasi Peura, TAU, pasi.peura@tuni.fi

Tavoite

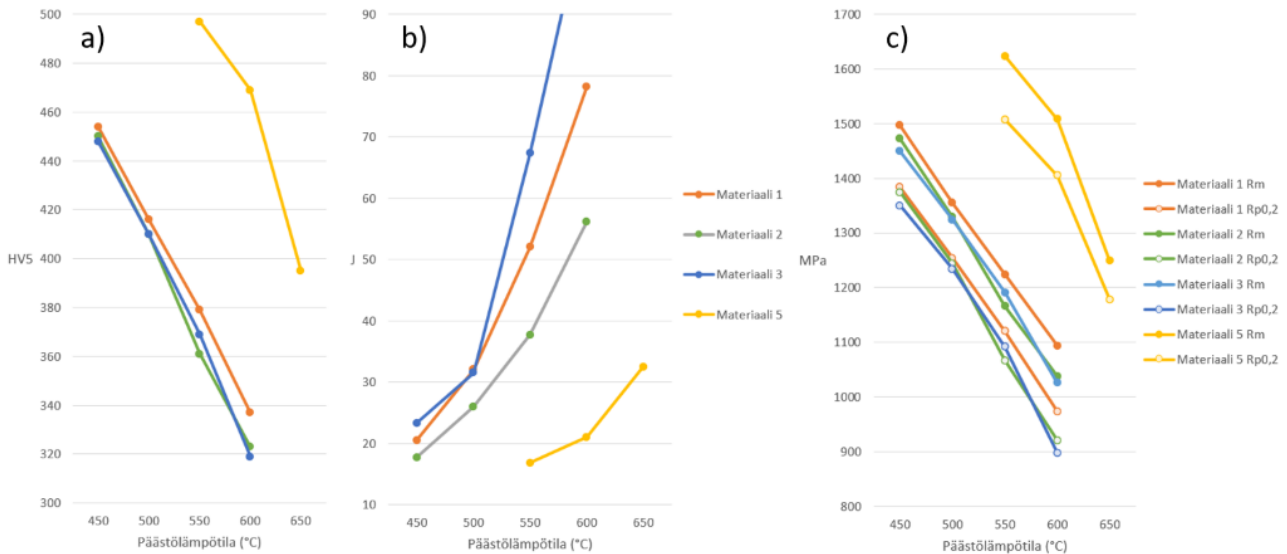
Tavoitteena oli kehittää teräksestä valmistetun komponentin valmistusreittiä suorituskyvyn paranta-
miseksi. Tutkimuskohteiksi valittiin komponentit, joiden kestoikässä tiedettiin olevan hajontaa. Käy-
tännössä valittujen komponenttien kulumisen- ja väsymisenkestoa sekä iskukitkeyttä optimoitiin mo-
difoimalla niiden mikrorakennetta valmistusprosessin ja/tai materiaalin valinnan avulla.

Toimenpiteet, tärkeimmät tulokset ja päätelmät

Tutkimuskohteeksi valitun komponentin ja siinä käytetyn teräksen ominaisuushajontojen selvittä-
miseksi koottiin kaikki mahdollinen prosessidata valmistusprosessista. Kyseessä oli läpikarkaistu
komponentti. Sen tärkeimmät ominaisuudet olivat iskukitkeys, kulumisen - ja väsymiskestävyys. Näi-
den kannalta merkittävimmiksi tekijöiksi osoittautuivat teräksen koostumuksen normaalin hajonnan
lisäksi valmistusprosessin aikaiset lämpötilat, lämpökäsittelyihin liittyvät ajat ja niiden hajonta, kom-
ponentin sijainti lämpökäsittelyuunissa ja asento karkaistaessa, jäähtymiseen liittyvät parametrit ja

myös odotusajat eri valmistusvaiheiden välillä. Valmistusprosessin aikaiset lämpötilat ja ajat tarkoittavat tässä yhteydessä karkaisun lopetuslämpötilaa, karkaisun lopetuksen jälkeen mahdollisesti tehtävän jäähdytyksen nopeutta ja tämän jäähdytyksen lopetuslämpötilaa.

Helpoin tapa modifioida teräksen ominaisuuksia on lämpökäsittellä se, jolloin sen mikrorakenne



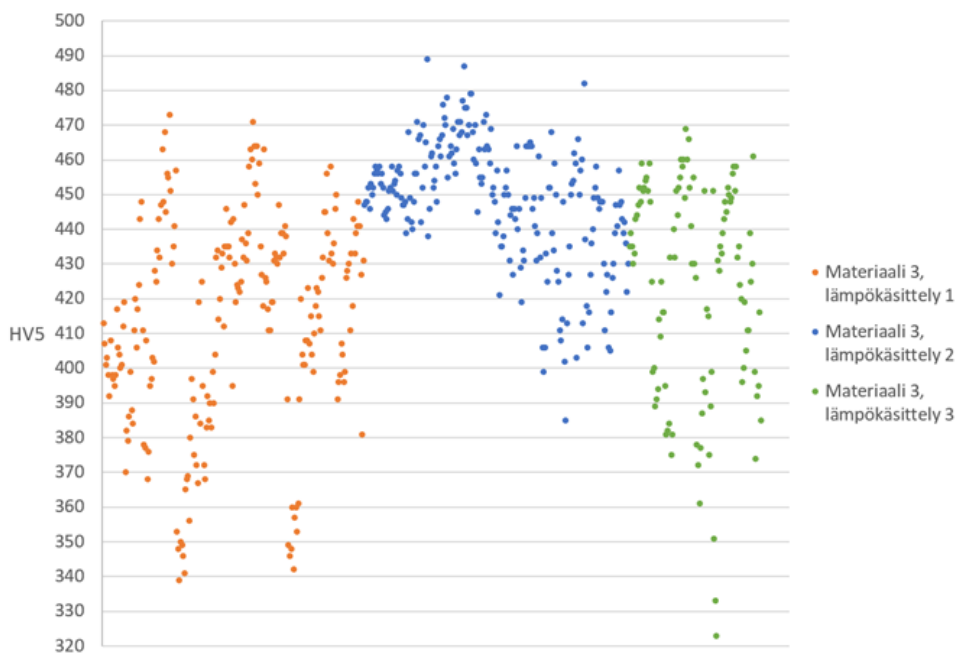
Kuva 7. Tutkittujen materiaalien ominaisuudet päästölämpötilan funktiona; a) kovuus, b) Charpy-V iskuthekyys, c) murto- ja myötölujuus. Teräkset 1-3 ovat standardin mukaan samaa CrMo-terästä ja teräkseen 5 on lisätty myös nikkeliä.

muuttuu tavalla tai toisella. Tämän vuoksi lämpökäsittelyjen simulointien lisäksi osana kokeellista tutkimusta tehtiin normaaleja karkaisu- ja päästökokeita, joiden jälkeen määritettiin kovuudet, iskuthekydet ja mekaaniset ominaisuudet (kuva 7). Koko komponentin valmistusprosessi käytiin läpi ja lopputuotteen ominaisuuksien kannalta kriittiset vaiheet tunnistettiin. WP1:n tavoin identifioitiin myös tyypillinen mikrorakenne, jonka ominaisuudet täyttävät lopputuotteen vaatimukset. Vaikka useimmat tutkitut koemateriaalit olivat standardin mukaan samaa terästä, niiden päästökäyttäytyminen ja varsinkin iskuthekydet päästön jälkeen erosivat toisistaan merkittävästi päästölämpötilan kohotessa (kuva 7b). Vastaavasti runsaammalla seostuksella ei ole välttämättä hyötyä iskuthekyden heikkenemisen myötä (teräs 5, kuvassa 7).

Lähtörakenteen ja lämpökäsittelyn toteutus vaikutti myös voimakkaasti ominaisuushajontaan. Tämä on luonnollista, koska läpikarkaistavan komponentin hiilipitoisuudella ja sillä missä hiiliatomit ovat, on suuri merkitys. Myös lämpötilagradientti ja paikalliset konsentraatio- ja jäähtymiserot vaikuttavat samalla tavalla. Esimerkkinä tästä on kuva 8, jossa on esitetty CrMo-teräksen kovuuden hajonta kolmella eri tavalla toteutetun lämpökäsittelyn jälkeen. Kuva kertoo selkeästi, kuinka ominaisuushajontaa voi sekä vähentää että lisätä riippuen siitä, kuinka lämpökäsittely toteutetaan. Hajontaa lisänsi erityisesti kokeissa, joissa komponentit austenisointiin että karkaistiin horisontaalisessa asennossa. Vastaavasti vertikaalien asento tuotti huomattavasti pienemmän kovuushajontaa.

Työpaketissa WP2 tehtiin tiivistä yhteistyötä sekä WP1 että WP3 kanssa. Yhdessä WP1:n kanssa ehdotettiin valmistusreittiä ja siihen liittyvät käsittelyt WP3:ssa tehtävään materiaalien testausta varten. Tutkimustulosten perusteella pystyttiin luomaan materiaalille asetettavat vaatimukset koostumuksen ja käsittelyn suhteen. Löydettiin myös lämpökäsittelymenetelmä, jonka avulla pystyttiin nostamaan kovuutta ilman muiden ominaisuuksien heikkenemistä. Lisäksi pystyttiin osoittamaan, että

korkealuokkaisten ominaisuuksien aikaan saamiseksi on hallittava koko valmistusketju raaka-aineesta lopputuotteeseen. Tämä tarkoittaa myös jäljitettävyyttä, jonka avulla tiedetään, miten kukin valmistuserä on todellisuudessa tehty. Lisäksi materiaalin toimitustilan tärkeyttä ei aina oteta huomioon kuten ei tuotantolaitteiden aiheuttamia rajoituksiakaan, vaikka molemmat voivat vaikuttaa merkittävästi valmiin komponentin ominaisuuksiin. Työpakettien alkuperäisenä tavoitteena oli kehittää teräksestä valmistetun komponentin valmistusreittiä sen suorituskyvyn parantamiseksi. Projektissa opittiin, kuinka tärkeää ominaisuuksien optimoinnissa on komponentin koko valmistusketjun hallinta. Komponenttien kulumisen- ja väsymisenkestoa sekä iskusitkeyttä optimoitiin modifioimalla niiden mikrorakennetta valmistusprosessin, lähinnä lämpökäsittelyjen ja/tai materiaalin valinnan avulla. Työpakettien alkuperäiset tavoitteet olivat kunnianhimoiset, mutta ne saavutettiin kaikkien huolimatta prosessidataan liittyneistä haasteista.



Kuva 8. Kovuuden hajonta kolmella eri tavalla lämpökäsitellyssä CrMo-teräksessä. X-akseli ainoastaan erottelee mittauspisteet toisistaan.

Jatkotutkimukset

Työpakettien WP1 ja WP2 jatkotutkimuskohteet ovat hyvin saman tapaisia ja ne olisivatkin hyvä yhdistää. Väsyttävässä, iskumaisessa kuormituksessa on oleellista minimoida materiaalisia esiintyvät epäjatkuvuuskohdat. Käytännössä tämä tarkoittaa kuonapuhautuksen parantamista ja suotautumien vähentämistä. Lisäksi hienjakoisempi karbidirakenne todennäköisesti parantaisi vielä lisää teräksen suorituskykyä. Vaativissa kohteissa käytetyt teräkset ovat yleensä hyvin korkealaatuisia ja niiden kuonapuhautuksen parantaminen on vaikeata ilman edistyksellisiä valmistusmenetelmiä. Jatkossa olisi syytä selvittää ESR ja VAR, sekä niiden yhdistelmien vaikutus teräksen suorituskykyyn, mutta myös kustannustasoon. Modifioitujen lämpökäsittelyjen taustalla olevat mekanismit eivät ole vielä täysin selvillä. Niiden selvittäminen vaatii lisätutkimuksissa monipuolisten tutkimusmenetelmien käyttöä. Nyt suurin osa tutkimustuloksista on terästen osalta koottu kokeellisen työn kautta – simuloitua käytettiin lähinnä karkenevuuteen liittyen. Jatkossa olisi lisättävä mallintamisen/simuloinnin

käyttöä nopeuttamaan ja helpottamaan ominaisuuksien ja materiaalien sisäisenrakenteiden muutosten ymmärtämistä. Tämä voidaan toteuttaa yhteistyössä VTT:n hyödyntäen heidän ProperTune laskeinta alustaa.

Osaamisen ja uuden tiedon levittäminen

Työpakettin tutkimustulokset raportoitiin partneriyrityksille ja tarvittavissa määrin WP3:n tutkijoille. Tulokset esiteltiin myös yhdessä muiden ÄVE:n työpakettien tulosten kanssa koko projektia koskeissa seminaareissa.

2.3 Älykäs materiaalien testaus

Älykäs materiaalien testaus (WP3) -työpaketissa tehtiin laaja-alaista ja poikkitieteellistä tutkimusta seuraavien avainteknologioiden piirissä: laadunvalvonta Barkhausen kohina menetelmällä ja sen tehostaminen koneoppimismenetelmillä, sekä kriittisten komponenttien väsyminen, väsytyksen menetelmien kehitys ja väsytystestaus. Tutkimusteemat integroituvat toisiinsa ja ÄVE-projektin muihin osaluaisiin (kuten WP1- materiaalien vaatimus pohjainen määrittely ja WP2- valmistusprosessin kehitys) muodostaen täten kokonaiskuvan, jossa materiaalien perusominaisuudet (koostumus, mikrorakenne, ym.) ja prosessointi (lämpökäsittely ja koneistukset) linkittyvät komponenttien laatuun, suorituskykyyn ja elinikään.

Yhteyshenkilö: Arto Lehtovaara, TAU, arto.lehtovaara@tuni.fi

Tavoite

Työpakettin tavoitteena oli kehittää ja rakentaa ÄVE-ekosysteemin yhteistä materiaalitestaustuskeskitymää, joka hyödyntää pitkälle kehitettyjä ainetta rikkomattomia menetelmiä laadunvalvonnassa ja jolla on kattavat komponenttitason väsymistestausvalmiudet.

Toimenpiteet, tärkeimmät tulokset ja päätelmät

Barkhausen kohina

Barkhausen kohina -osiossa tavoitteena oli ottaa käyttöön Barkhausen kohina (BN) entistä monipuolisempaan tarkastusmenetelmänä kriittisten komponenttien pinnanlaadun todentamisessa ainetta rikkomattomasti. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi tutkittiin koneoppimismenetelmien tuomia mahdollisuuksia analysoida BN-mittausdataa tehokkaasti siten, että mahdolliset laatu poikkeamat pystytään havaitsemaan nopeasti ja luotettavasti tuotanto-olosuhteissa.

Koneoppimisen hyödyntäminen Barkhausen kohinan yhteydessä

ÄVE-hankkeen aikana tehtiin ensimmäinen kartoitus uusien älykkäiden menetelmien (koneoppiminen) käyttömahdollisuuksista Barkhausen kohinan kanssa kriittisten komponenttien pinnan jäännösjännitystilän varmentamisessa. Hankkeelle tehdyssä diplomityössä kartoitettiin sopivia koneoppimisen mallinnusmenetelmiä ja testattiin niitä komponenteista mitatuilla datoilla. Malleissa pyrittiin arvioimaan pinnan jäännösjännitystilaa ja pinnan kovuutta ainetta rikkomattomasti. Nämä parametrit ovat tärkeässä roolissa komponentin eliniän kannalta, mutta niitä on monesti vaikea määrittää riittävästi nopeasti ja komponenttia rikkomatta etenkin tuotanto-olosuhteissa ja -mittakaavassa. Mallin lähtöparametreina käytettiin Barkhausen kohinan parametreja, joita saadaan yleisesti käytetystä laitteistosta/ohjelmistosta (Microscan) suoraan. Koneoppimisen menetelmistä Lasso ja Random forest vaikuttivat potentiaalisimmilta. Diplomityön jälkeen kartoitettiin malliin vaikuttavia parametreja vielä

tarkemmin. Yhteenvetona voidaan todeta, että menetelmä vaikuttaa jatkokehityskelpoiselta, mutta yksi ja sama malli ei käy suoraan kaikille komponenteille. Koneoppimisen lopullinen soveltaminen tuotantoprosessiin vaatii lisää tutkimusta, mutta onnistuessaan menetelmä mahdollistaa BN:än käyttämisen uudelleen hionnan laadunvalvontaan, jossa voidaan tuotantomittakaavassa tehokkaasti ja luotettavasti varmistaa hionnan onnistuminen etenkin vaikeasti saavutettavien jäännösjännitysten osalta.

Koneoppimismallin edellyttämä tutkimustieto

Heti projektin alussa oli selvää, että toimiakseen luotettavasti ja tehokkaasti koneoppimismalli tarvitsee riittävästi laadukasta mittaustietoa. Teollisuusympäristössä ainetta rikkomattomia tutkimusmenetelmiä käytetään yleensä vain valmiin komponentin laadun varmistuksen yhteydessä. Tämän kaltaisen mittaustieto ei pelkästään riitä koneoppimismallin opettamiseen. Niinpä oli välttämätöntä tehdä kattava ja monipuolinen sarja laboratoriomittauksia, joiden pohjalta malli pystyttiin rakentamaan. Tämä data jaettiin karkeasti kahteen luokkaan, ns. ”hyvään” (tavoiteltuun) tulokseen ja ns. ”huonoon” tulokseen (erilaisiin poikkeamiin, kuten epäonnistuneen hionnan lopputulokseen). Tällaisen monipuolisen mittaustietoa avulla malli pystyttiin opettamaan kattavasti. Etenkin erilaisten poikkeamien tutkimuksessa tehtiin laajaa ja antoisaa yhteistyötä Aachenin yliopiston RWTH instituutin kanssa ja Tampereen Yliopiston sisäisten hankeosapuolien kesken. Lisäksi on syytä huomata, että laboratoriomittausten ohella käytettiin merkittävässä määrin partneriyritysten keräämää aineistoa, joka sisälsi tietoa sekä tuotantoprosessista että komponenttien suorituskyvystä. Näin voitiin luoda kattava ja todenmukainen tutkimusaineisto koneoppimismallien kehitystä varten.

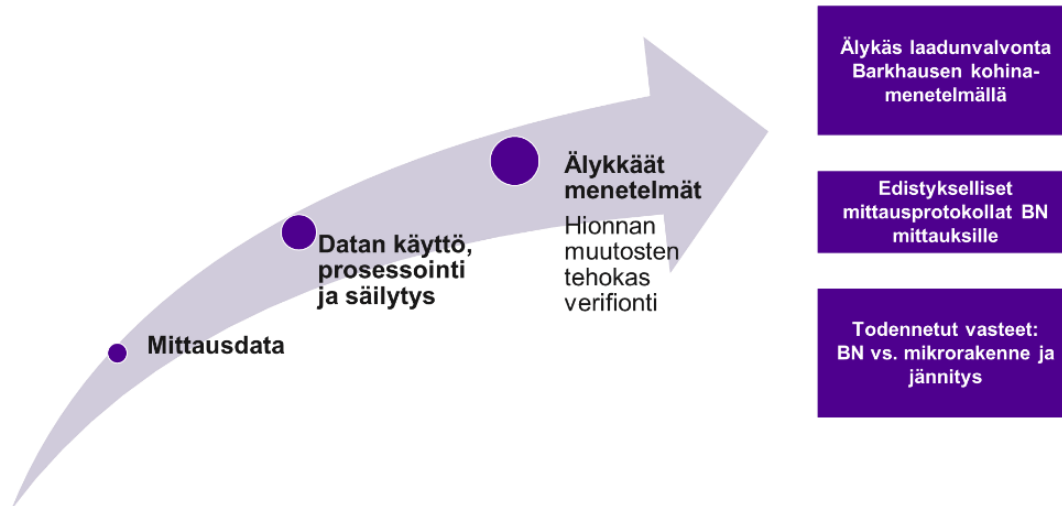
Yksityiskohtaisempi jaottelu toteutuksesta ja sisällöstä

Työpaketti WP3a voidaan jakaa muutama osakokonaisuuteen oheisen listan mukaan:

Tavoite: Barkhausen kohinan soveltamismahdollisuuksien kartoitus älykkäiden menetelmien (koneoppimisen) avulla

- 1) Työstöprosessin vaikutus syntyvään pintakerrokseen
 - a) hiontaprosessin eri vaiheiden vaikutus pintakerrokseen sylinterimäisessä komponentissa: olemassa olevan hiontaprosessin vaiheiden kartoitus, prosessin ongelmien tunnistaminen
 - b) kovatorvauksessa syntyvän pintakerroksen verifiointi (mikrorakenne, kovuus ja jäännösjännitykset)
- 2) Barkhausen kohinalla varmennettujen hiontapalamisten tarkempi karakterisointi: hiontavirhepäiväkirjan pitäminen (6 kk) ja analysointi partneriyrityksessä
- 3) Hionnan parametrien systemaattinen muuttaminen ja näiden aiheuttamien vaikutusten verifiointi hionnan lopputulokseen
- 4) Komponentin käytönaikaisten muutosten verifiointi ja yhdistäminen vaurioituneiden referenssi-komponenttien karakterisointiin

Kriittisten komponenttien pinnanlaadun luotettava verifiointi: Ainetta rikkomattomat menetelmät (Barkhausen kohina, BN) edistyksellisessä laadunvalvonnassa



Kuva 9. Havainnollistava kuva Barkhausen kohina-datan edistyksellisestä hyödyntämisestä laadunvalvonnassa, kun mittausdatan analyysiin tuodaan mukaan koneoppimiseen perustuvia menetelmiä.

Väsyminen - väsytyksen menetelmien kehitys ja väsytystestaus

Väsyminen-osiossa oli kolme päätavoitetta: 1) kehittää koelaitteita, testausmenetelmiä ja testausympäristökomponenttitaso väsytystestausympäristöön sekä määrittää S-N-käyrät valituille perustapauksille, 2) mitata valitun pilottikappaleen todellinen, käyttöolosuhteissa esiintyvä jännitystila sekä kartoittaa menetelmiä väsytystestaukseen iskumaisella kuormituksella ja 3) ottaa käyttöön testausympäristöön soveltuvat analyysimenetelmät, joiden avulla väsytystestaukset voidaan suunnitella tarkoituksenmukaisiksi ja väsymisdataa voidaan analysoida mahdollisimman tehokkaasti. Käytännössä tavoitteeseen 3) liittyvä tutkimustoiminta nivoutui saumattomasti kahteen ensimmäiseen tavoitteeseen, niinpä se käsitellään seuraavassa ilman erillistä esitystä.

Komponenttitaso väsytystestausympäristön kehitys

Yleisesti ottaen väsymistutkimuksessa ja materiaalien väsytystesteissä käytetään suhteellisen pienikokoisia sauvoja muun muassa koelaitteistojen ja -menetelmien asettamien rajoitteiden takia. Tämä asettaa haasteita väsytystestauksen hyödyntämiselle mitoituksessa, sillä todelliset komponentit ovat monesti huomattavasti suurempia kuin laboratoriotestisauvat, jolloin niin sanottuja väsymisen kokoefektejä (kuten ns. kriittisen virheen esiintymistiheys) voidaan lähestyä vain numeerisesti ennustaen. Lisäksi suurissa kappaleissa voi olla lämpökäsittelystä tai työstöprosessista johtuen mikrorakenteen gradientteja, erilaisia pintakerrosvyöhykkeitä (kuten hiilletyskerros) tai geometrisia piirteitä (esim. koneistettu ura), joita ei yksinkertaisesti voida tutkia pienillä sauvoilla.

Edellä mainitun haasteen ratkaisemiseksi ÄVE-projektissa otettiin tavoitteeksi kehittää komponenttitaso väsytystestausympäristö, jossa voidaan tutkia suuria, komponenttikokoluokan koesauvoja siten, että saadaan luotettavaa ja yleispätevää mittaustietoa koneensuunnittelun ja materiaalikehityksen tueksi. Pääasiallisesti koemenetelmäksi valittiin niin sanottu kiertotaivutusväsytyksen menetelmä, jota konseptia hyödyntämällä suunniteltiin ja rakennettiin suuren kokoluokan kiertotaivutusväsytyksen koelaitte (eng. rotating beam fatigue machine, RBFM). Kehitetty laite mahdollistaa suurtehoisten SN-käyrän määrittämisen käyttäen koesauvoja, joiden mitta-alueen halkaisija on noin 30 mm, eli selvästi tyypillisiä koesauvoja suurempi. Samalla kehitetyn laitteen kuormitustaajuus on kuitenkin vastaava

kuin monilla pienemmällä perinteisillä aineenkoetuslaitteilla, ts. noin 50 sykliä sekunnissa, mikä mahdollistaa lähes yhtä nopean testaustoiminnan kuin pienemmällä koesauvoilla (kun huomioidaan suuren koelaitteen mukanaan tuoma lisääntynyt asetus aika mittausten välillä).

Koelaitteen toiminta demonstroitiiin mittaamalla sekä partneriyrityksen tyypillisesti käyttämän materiaalin että yhdessä ÄVE-projektin muiden toimijoiden kanssa kehitetyn kokeellisen materiaalin väsymiskäyttäytyminen. Varsinaisten väsytykokeiden lisäksi tehtiin karakterisointia ainetta rikkomat- tomilla menetelmillä (röntgendiffraktio) sekä toteutettiin koesauvojen mikrorakenne- ja murtopinta- tarkasteluita. Tällä tavoin väsymistutkimus nivottiin yhteen ÄVE-projektissa tehtävän metallurgia- /prosessi-kehityksen ja ainetta rikkomattomien menetelmien kehityksen kanssa. Eri lähteistä kerätty mittaustieto koottiin ja sitä analysoitiin käyttäen sekä tilastollista että murtumismekaanista analyysia.

Yhteenvedona voidaan todeta, että komponenttitason väsytystestausympäristö onnistuttiin toteutta- maan suunnitellusti. Kehitetyllä koelaitteella mitatut tulokset antoivat arvokasta palautetta materiaa- lien vaatimus pohjaiseen määrittelyyn ja valmistusprosessin kehitykseen. Kerättyjen kokemusten pe- rusteella koelaitteesta saadaan paras hyöty, kun testaustoimintaan yhdistetään laaja-alainen, eri menetelmiä hyödyntävä mittaus- ja analysointitoiminta (kuten mikrorakenne- ja NDT-tarkastelut, ti- lastollinen ja murtumismekaaninen analyysi).

Pilottikappaleen todellinen, käyttöolosuhteissa esiintyvä jännitystila ja menetelmät väsytystestauk- seen iskumaisella kuormituksella

Tietyissä väsymisen kannalta kriittisissä komponenteissa mitoitusta hankaloittaa se seikka, että komponentin käytönaikaisia kuormituksia ei voida suoraan mitata ja/tai että kuormitusmuoto poik- keaa olennaisesti tyypillisestä laboratoriotesteissä käytetystä. Tässä työpaketin osiossa tätä haas- tetta lähestyttiin käyttämällä erästä partneriyrityksen kriittistä komponenttia case-tapauksena. Kom- ponentti altistuu käytön aikana toistuvalla iskumaisella kuormituksella, jonka muoto ja suuruus voi- daan päätellä lähinnä epäsuorien mittausten ja numeeristen laskelmien avulla. Lisäksi kuormitus- tapa voi johtaa väsymisvaurioon, joka johtuu useista yksinään tai yhdessä esiintyvistä ilmiöistä (vä- rähtelyiden aiheuttamat paikalliset kuormitushuiput, mikrorakenteen ja pinnan laadun muutokset eri- laisissa kontaktipinnoissa jne.). Etenkin erilaisten ilmiöiden yhdistelmästä syntyvät vauriot ovat erit- täin haastavia ennustaa etukäteen.

Edellä mainittuihin haasteisiin tartuttiin kahdessa vaiheessa:

1. Valitulle pilottikappaleelle suunniteltiin laboratoriomittaus, jossa tarkkaan instrumentoituun koekappaleeseen kohdistettiin todellista tilannetta mahdollisimman hyvin muistuttava isku- mainen kuormitus ja koekappaleen vaste mitattiin. Mittaustuloksia verrattiin numeerisen las- kennan ennusteisiin. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että nykyaikaiset elementti- menetelmäohjelmistot kykenevät varsin hyvin ennusteisiin niin kauan kuin ollaan niin sano- tun kontinuumimekaniikan pätevyysalueella. Erilaisten mikromekaanisten ilmiöiden, kuten toisiinsa iskevien kappaleiden iskupintojen mikrotason plastisuuden ja vaurioitumisen ennus- taminen on kuitenkin selvästi haastavampaa.
2. Edelliseen viitaten tutkittiin mahdollisuutta kehittää iskukuormituksesta johtuvan väsymisen tutkimukseen soveltuva koelaitte, joka mahdollistaa hyvin kontrolloidun ja mitattavan sykli- mäisen iskukuormituksen tuottamisen koekappaleeseen riittävän suurella iskutaajuudella. Alustavan kartoituksen perusteella päädyttiin muokkaamaan TAU Materiaalitekniikan ns. Split Hopkinson Bar -laitteisto automatisoituun sykliseen toimintaan. Kehitetty prototyyppi ky- kenee hyvin kontrolloitujen iskukuormituspulssien tuottamisen taajuudella 0.5 Hz sisältäen koekappaleen automaattisen uudelleenasetuksen. Tehtyjen havaintojen perusteella lait-

teisto soveltuu alustavasti iskumaisen kuormituksen aiheuttamien väsymisilmiöiden tutkimiseen, mutta tehokkaan tutkimustoiminnan mahdollistamiseksi laitteistoa olisi hyvä jatkokehittää muun muassa nostamalla iskutaajuutta.

Yhteenvedona voidaan todeta, että tälle työpaketin osalle asetetut tavoitteet kyettiin toteuttamaan suunnitellusti. Tietyistä syventävistä lisämittauksista, kuten tutkimusvierailusta The Ohio State Universityyn (USA) jouduttiin luopumaan vallitsevan maailmantilanteen takia, mutta nämä seikat kyettiin pitkälti kompensoimaan muun tutkimustoiminnan avulla. Tutkittu pilottikappale ja sen kuormitustilanne ovat hyvin monimutkaisia sisältäen monia eri näkökohtia (mm. iskumaisen kuormituksen aiheuttamat värähtely- ja muodonmuutoksen lokalisatioilmiöt, kappaleen mikrorakenteen erityispiirteet, kuormitustilanteen ympäristöolosuhteet jne.), mikä tekee tilanteen analysoinnista haastavaa. Niinpä tässä projektissa tehtyä tutkimusta on suotavaa viedä eteenpäin tuomalla väsytykokeiden rinnalle mukaan materiaaliominaisuuksien syventävää karakterisointia (esimerkiksi suuren kuormitusnopeuden lujuusominaisuuksien mittaaminen) ja mikrorakennetason numeerista mallinnusta.

Osaamisen ja uuden tiedon levittäminen

Työpaketin yksityiskohtaiset tutkimustulokset raportoitiin partneriyrityksille seikkaperäisesti. Lisäksi tutkimusta, sen tuloksia ja yhteyttä muihin ÄVE:n työpaketteihin esiteltiin kattavasti ÄVE:n seminaareissa.



Kuva 10. Projektin aikana kehitetty suuren näytekokoon kiertotaivutusväsytykkoeläite (RBFM).

3. Valmistus

3.1 Suunnittelun ja valmistuksen integrointi

Yhteyshenkilöt:

Asko Ellman, TAU, asko.ellman@tuni.fi

Jussi Kiljander, VTT, jussi.kiljander@vtt.fi

Lasse Hillman, TAMK, lasse.hillman@tuni.fi

Työpaketin keskeisenä tutkimuskysymyksenä on, miten hyvin mallipohjaisen suunnittelumetodiikan mukaiset CAD-mallit ovat integroitavissa älykkääseen valmistukseen yritysten muodostamassa ekosysteemissä. Asian selvittämiseksi tutkimusryhmä teki haastatteluja ja tutustui projektien osallistujayritysten toimintaan tässä ekosysteemissä: Sandvik, Tasowheel, Nomet ja Salon konepaja. Tutkimuksessa havaittiin, että mallipohjaisen suunnittelu- ja valmistusmenetelmän käyttöönotto on valmiuksia, mutta siihen liittyy myös erilaisia yritysten toimintatavoista riippuvia rajoitteita. Tästä aiheesta kirjoitettu tutkimus julkaistiin IFIP Advances in Information and Communication Technology book series (IFIPAICT, volume 594) kirjasarjassa.

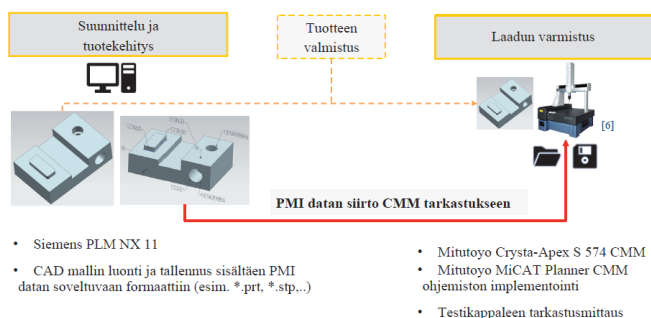
Projektissa tehtiin kokeellinen tutkimus kahden, kompleksisuudeltaan erilaisen kappaleen suunnittelu-, valmistus- ja tarkastusajasta, kun käytetään sekä perinteistä, että mallipohjaista menetelmää. Tutkimuksessa havaittiin, että yksittäiskappaleiden valmistuksessa on mahdollista saavuttaa jopa 50 % säästö yksittäiskappaleen toteutusajassa käyttämällä mallipohjaista menetelmää. Lisäksi havaittiin, että ajansäästö oli suurempi geometrialtaan kompleksisemmän kappaleen kohdalla. Tutkimus tehtiin Jaakko Peltolan diplomityön yhteydessä ja siitä tehty tutkimuspapere on tarjottu julkaistavaksi ICED 2021 –konferenssiin.

Yllä mainitun lisäksi VTT:n, Tampereen yliopiston ja Tampereen ammattikorkeakoulun tutkijoita on osallistunut Metstan vetämään mallipohjaisen tuotemäärittelyn työryhmään. Ensimmäinen ryhmän kirjoittama opas v. 2016 pyrki vastaamaan kysymykseen: mitä on mallipohjainen tuotemäärittely? Laaja-alainen ryhmä kehittää parasta aikaa uutta opasta yrityksille mallipohjaisen tuotemäärittelyn käyttöönottamisesta sekä mallinnuksen ja mallien hyödyntämisen käytännöistä. Metstan on tarkoitus julkaista ilmainen opas aiheesta vuoden 2021 aikana. Näin jo ennen ÄVE-projektia aloitettua työtä digitaalisen, mallipohjaisen tuotemäärittelyn käyttämiseksi koko suomalaisen valmistavan teollisuuden arvoketjuissa edistetään myös jatkossa.

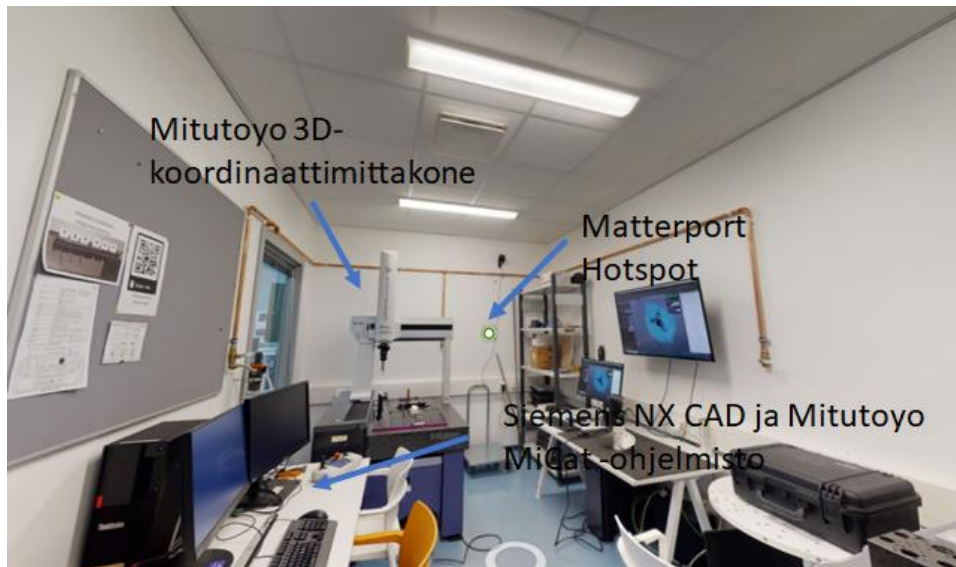
Niin kuin tämä raportin ihan alkusanoissa mainittiin, ÄVE yhdisti ja edisti. Etenkin se näkyi ja toteutui tässä työpaketissa, jossa kaikki ekosysteemin tutkimuslaitokset, korkeakoulut ja yritykset etsivät yhdessä ratkaisuja PMI –datan hyödyntämiseen. TAMKin kontribuutio tähän projektiin tuli nimenomaan tämän työpaketin kautta. Projektissa TAMKin osalta oli tavoitteena luoda TKIO -ympäristö PMI –datan tutkimiseen ja opettamiseen. Tämä tavoite saavutettiin, kun TAMKin FieldLab ympäristön Mitutoyo 3D-koordinaattimittakone ja Siemens NX CAD ohjelma integrointiin toimimaan yhdessä Mitutoyo MiCAT –sovelluksen avulla.

PMI implementointi CMM tarkastukseen TAMKissa

Konsepti ja pilot case: Kappaleen mittauksen kehittäminen PMI dataa hyödyntävän CMM tarkastuksessa



Kuva 11. ÄVE -projektissa implementointiin PMI data käyttöön TAMKissa laadunvarmistuksessa ja mittauksessa.



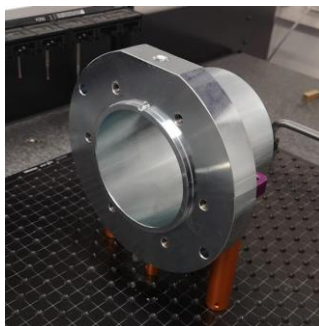
Kuva 12. Kuva on TAMKin FieldLab ympäristön virtuaalisesta Matterport mallista. FieldLab ympäristöön on mahdollista tutustua myös virtuaalisesti ja saada tarvittavia tietoja malliin linkitettyjen hotspottien avulla.

FieldLab -ympäristö on yritysten ja muiden sidosryhmien hyödynnettävissä. Siihen voi tutustua myös virtuaalisesti Matterport -mallin välityksellä tai suoraan mittakonevideo linkistä <https://sites.tuni.fi/uploads/2021/02/e4604653-tamk-fieldlab-measurement-capabilities-valmis.mp4>

FieldLabissa on tutkittu PMI -datan käyttöä niin yritysten toimeksiantoina, opinnäytetöissä, konetekniikan Technology Academy -kurssilla kuin projektitöissäkin. Tutkimusaiheina on ollut koordinaattimittauksen lisäksi esimerkiksi PMI -datan soveltamista 3D -tulostuksessa. Lisäksi on selvitetty PMI -datan toimimista eri CAD -ohjelmistoversioiden ja tiedostoformaattien kesken. Näissä tutkimuksissa on saatu paljon hyödyllistä tietoa jatkoa ajatellen.

TAMK Pilot cases

Projektin aikana tutkittiin esimerkiksi alla olevan kuvan mukaista laipan mittaamista PMI -dataa hyödyntäen.

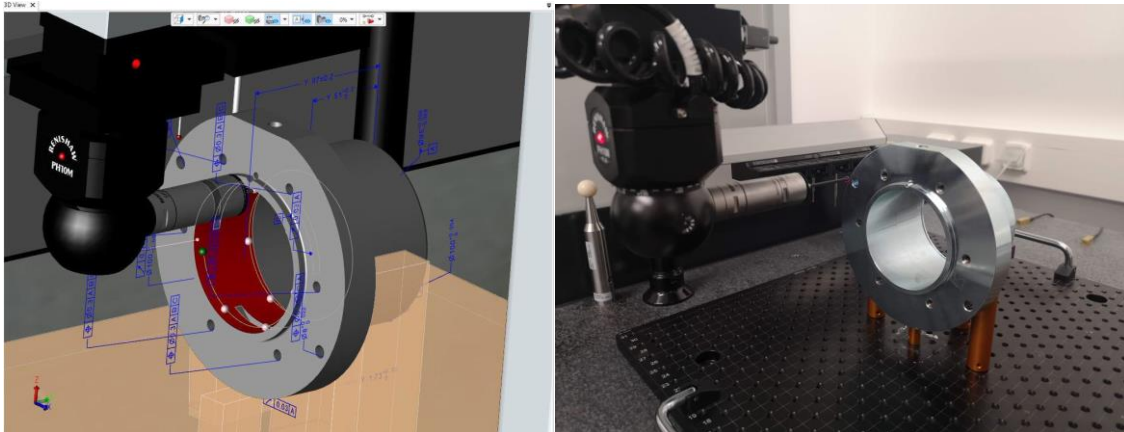


Kuva 13. Laippa.

Laippa mallinnettiin Siemens NX 12-ohjelmalla Parasolid .x_t tiedostomuodossa. Malliin lisättiin Siemens NX 11 -ohjelmalla kappaleen teknisen piirustuksen mukainen PMI -data. Siemens NX 11 -ohjelmistolla siitä syystä, että mittalaitteen ohjelmisto ei tukenut uudemmalla NX 12 -versiolla tehtyä

tiedostoa. Näiden tiedosto ja ohjelmistoversioiden kanssa täytyy olla tarkkana, ja selvittää aina tapauskohtaisesti tukevatko käytössä olevat laitteet ja ohjelmistot tekemistä.

Laipan CAD-malli ladattiin PMI-datalla lisättyä MiCAT Planner -ohjelmistoon.



Kuva 14. Mittausohjelman tutkimista virtuaaliympäristössä ja kappaleen mittausta koordinaattimitakoneella.

MiCAT – Planner luo mittausohjelman automaattisesti PMI-dataa sisältävästä 3D-mallista, ottaen huomioon mallissa valmiina olevat toleranssi ja geometria tiedot. Kappaleen mittaaminen tätä uutta teknologiaa hyödyntäen on jopa neljä kertaa nopeampaa perinteiseen menetelmään verrattuna. Mittausprosessi on myös yksinkertaisempi, jolloin välikäsien aiheuttamien virheiden riski pienenee.

Kappaleen mittauksen lisäksi tehtiin projekti, jossa tutkittiin PMI -datan käytön mahdollisuuksia ja rajoituksia 3D -tulostuksessa.

PERINTEINEN	PMI
Geometria tiedot	Geometria tiedot
2D-piirustukset	Toleranssit
	Materiaali speksit
	Väri
	Pinnanlaatu
	Tulostus suunta
	Layer vahvuus
	Seinä vahvuus
	Lattices (täyttö %, kuoren vahvuus, mallin täyttö)
	Yksikkö määrä
	Jälkikäsitteily
	Poisto suunta
	Tukirakenteiden sijainti

Kuva 15. Informaatiovertailu perinteisen menetelmän ja PMI data välillä 3D -tulostuksessa.

3D-tulostus ohjelmat käyttävät mallista tehtyä STL-tiedosto muotoa. STL-tiedosto määrittää 3D-suunnitteluohjelmalla suunnitellun mallin geometrian nimellismitoista. STL-tiedosto ei sisällä mallin rakenteita kuten PMI-dataa. Tämä olisi välttämätöntä, jotta mallia voitaisiin hyödyntää 3D -tulostuksessa. PMI-dataa pystyttäisiin hyödyntämään 3D-tulostamisessa, jos CAD-ohjelma toisi toleranssit STL-tiedostoon. Tämä tarkoittaa sitä, että CAD-ohjelman tulisi pystyä muuttamaan 3D-mallin geometria toleranssien keskikohtaan PMI-datan perusteella. Tällöin tulostin pyrkisi

tulostamaan kappaleen STL-mallin perusteella toleranssien keskelle. Tällä hetkellä tätä eivät kuitenkaan yritykset käytä tai toimintaa ei ole CAD-ohjelmaan saatavissa. Tulostaessa kappaleita mallinetaan mallit valmiiksi toleranssien puoliväliin.

3D-tulostusohjelmistot ovat menossa tällä hetkellä lähemmäs CAD-ohjelmia. Tämä tarkoittaa sitä, että tulostus ohjelmistot pyrkivät integroitumaan CAD-ohjelmiin. Tällöin mallin toleranssi tietojen saaminen tulostusohjelmaan helpottuu. Tällä pyritään myös siihen, että tulostus parametrit ja niiden historia saataisiin menemään CAD-mallin mukana PLM-järjestelmään.

3D-tulostuksen kehittyessä saadaan kerättyä dataa, jonka pohjalta pystytään tietämään mihin kohtaan toleranssia esimerkiksi sisä- tai ulkohalkaisija kannattaa mitoittaa. Tähän vaikuttaa tietenkin tulostettavan kappaleen muoto, joka vaikeuttaa tällaisten mitoitusperiaatteiden tekemistä. Tällä hetkellä tällaista tietoa ei ole vielä saataville, joten 3D-mallit kannattaa mitoittaa toleranssien keskelle. Tässä voidaan kuitenkin hyödyntää samaa periaatetta kuin koneistamisessa. Tämä periaate on, että ulkohalkaisija pyritään tähtäämään toleranssin alarajalle ja sisähalkaisija ylärajalle. Tällöin kappaleiden tulisi helpommin sopia käyttökohteeseen.

3.2 Digitaalisen valmistuksen tutkimusympäristöt

Tavoite

Digitaalisella valmistuksella tarkoitetaan yhteen liitettyä, tietokoneavusteista järjestelmien simulointia, mallien avulla tehtyä visualisointia sekä analysointia. Pyrkimyksenä on kehittää tuotteita ja valmistusprosesseja samanaikaisesti, jolloin haluttu tuotannon lopputulos saavutetaan nopeasti ja tehokkaasti. Tässä tutkimushankkeen osassa (WP5) rakennettiin hionnan ja koneistuksen tutkimusympäristö sekä kehitettiin hiomakoneen digitaalista kaksosta. Lisäksi tutkittiin hiljaisen tiedon keruumenetelmiä, minkä tavoitteena oli saada kuvattua kokemuseräistä tietoa.

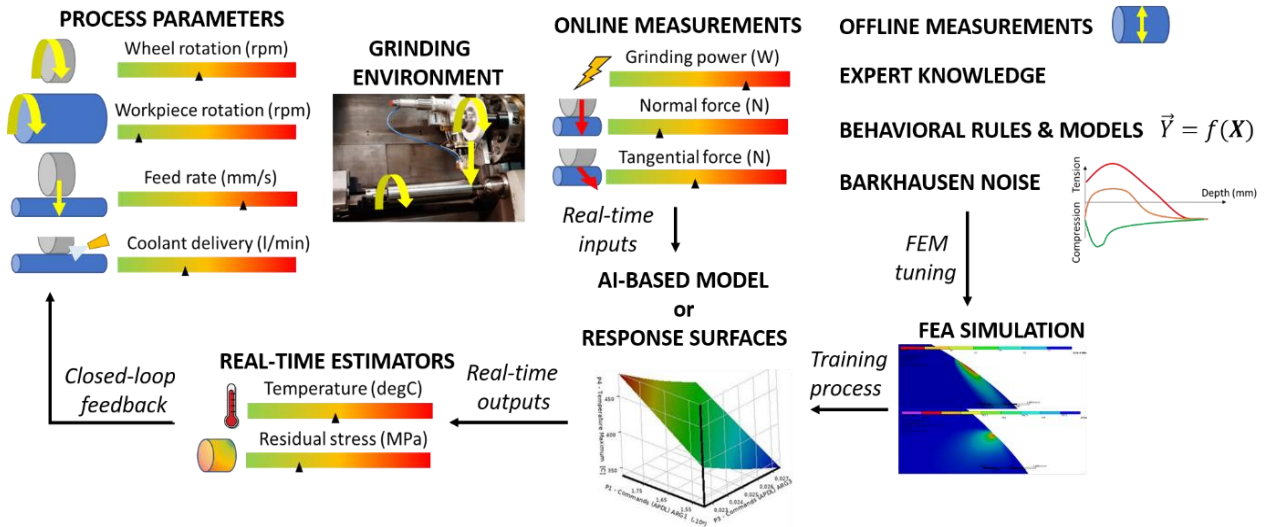
Yhteyshenkilö: Eric Coatanéa, TAU, eric.coatanea@tuni.fi

Toimenpiteet, tärkeimmät tulokset ja päätelmät

Digitaalisen kaksosen kehittäminen

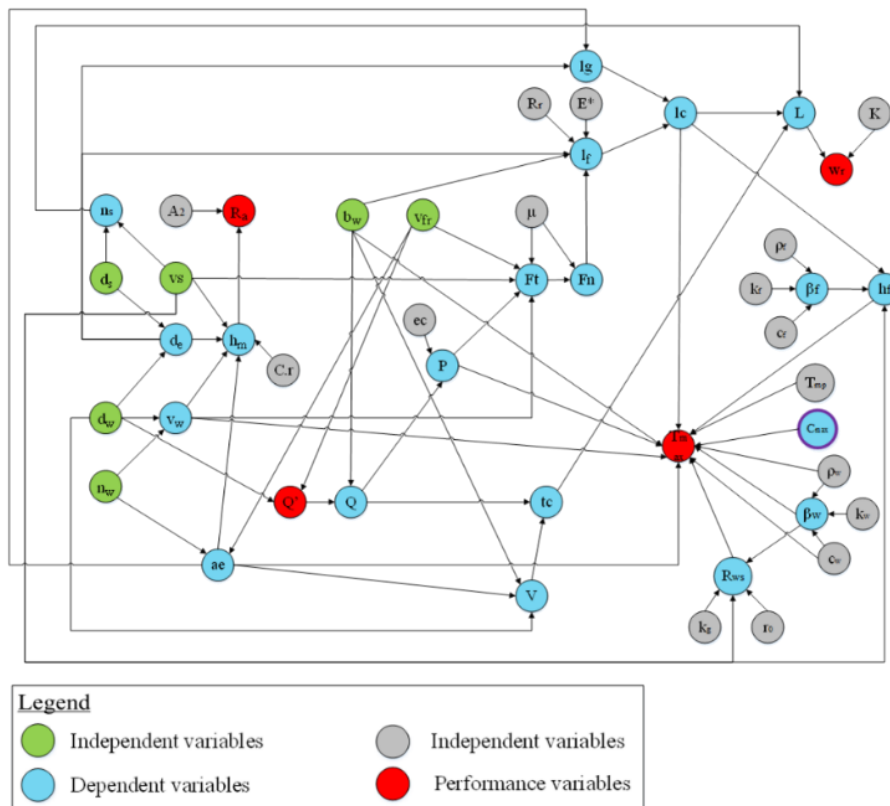
Tässä työpaketin osatehtävässä kehitettiin hiomaprosessin digitaalista kaksosta. Digitaalinen kaksosen on kokonaisuus, joka yhdistää reaali maailman koneen, esineen tai prosessin digitaaliseen malliin. Digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää simuloitaessa sen kohteen toimintaa tai käyttää sitä valvontatyökaluna.

Hiontaprosessin digitaalisen kaksosen lopputuloksena on saavutettava työkappale, joka täyttää sille asetetut vaatimukset muodon, pinnanlaadun sekä mekaanisten ominaisuuksien suhteen. Hiontaprosessin digitaalinen kaksosen koostuu oikeasta reaali maailman prosessista, jonka keskiössä on hiomakone, matemaattisista malleista sekä mittadatasta. Digitaalisen kaksosen rakenne on esitetty kuvassa 16. Valmiissa digitaalisessa kaksosessa hiomakone anturoidaan ja tätä dataa hyödynnetään digitaalisen kaksosen malleissa, joiden avulla tuotetaan lisätietoa prosessista ja sen kulusta. Digitaalinen kaksoseen voidaan yhdistää erilaisia mallinnusmenetelmiä kuten fysikaalisia numeerisia malleja tai koneoppimiseen perustuvia malleja.

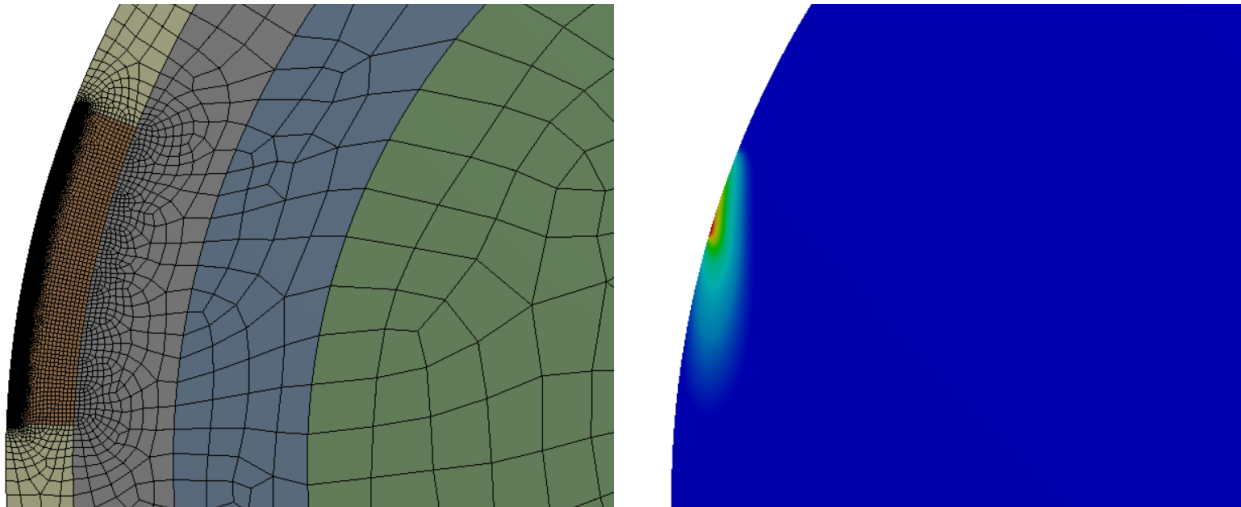


Kuva 16. Hiomaprosessin digitaalisen kaksosen rakenne.

Osatehtävän aluksi kehitettiin kirjallisuuslähteisiin perustuen graafipohjainen malli, jolla voidaan kuvata prosessiparametrien syy-seuraussuhteita (kuva 17). Graafipohjaisen mallin avulla prosessin muuttujat jaettiin ryhmiin. Riippumattomat muuttujat (engl. independent variables), joihin muut järjestelmien muuttujat eivät vaikuta, näytetään vihreinä. Ne sisältävät esimerkiksi suunnittelumuuttujat ja koneparametrien asetukset.



Kuva 17. Hiomaprosessin syy-seurauskaavio



Kuva 18. Lämpömallin verkko (vasen) ja lämpötilakenttä hionnan aikana (oikea).

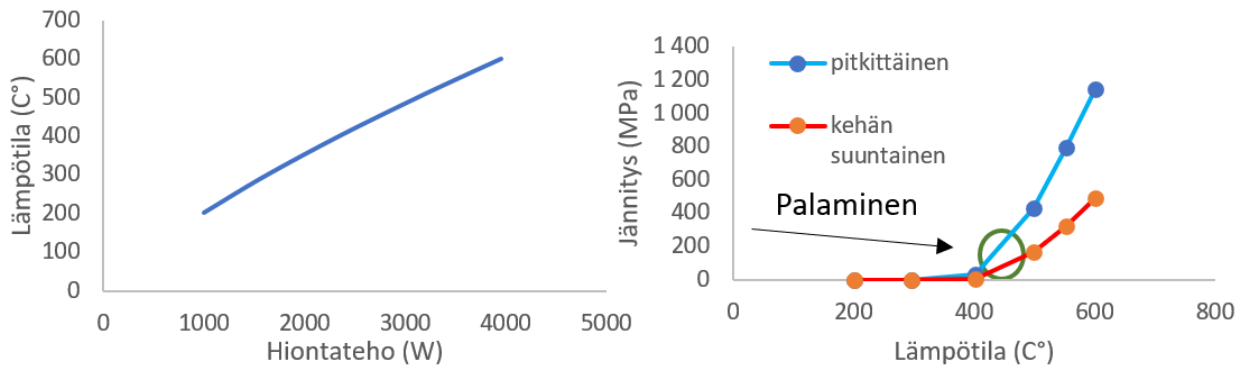
Ulkoisten syiden aiheuttamat (eksogeeniset, engl. exogenous variables) muuttujat näkyvät harminana. Ne asetetaan usein tai niitä pidetään vakioina tutkittavassa järjestelmässä. Esimerkiksi materiaalin ominaisuuksia pidetään usein eksogeenisinä muuttujina. Riippuviin muuttujiin (engl. dependent variables), jotka on merkitty sinisellä, vaikuttavat muut muuttujat, kuten eksogeeniset ja riippumattomat muuttujat. Riippuvia muuttujia voidaan mahdollisesti mitata antureilla. Suorituskykymuuttujat (engl. performance variables) tai objektiivimuuttujat näkyvät punaisina, jotka osoittavat järjestelmän lopullisen suorituskyvyn.

Mallissa on neljä suoritusmuuttujaa: tuottavuus (Q'), pinnankarheus (Ra), hiomalaikan kuluminen (w_r) sekä hiontalämpötila. Mallin kehittämisen pääajatuksena on käyttää sitä perustana hiontaprosessin digitaalisena kaksoosena. Se tarjoaa mahdollisuuden käyttää sitä pohjana todennäköisyssimulaatioihin kääntämällä syy-seurauskaavio Bayesian verkkoihin. Lisäksi sen avulla voidaan visualisoida työstöparametrien vaikutusta hiontaprosessiin, jolloin sitä voidaan käyttää koulutustarkoituksiin.

Huomattiin, että tiettyjen suoritusarvojen analysointiin tarvittiin tarkempia mallinnusmenetelmiä. Tämän takia lähdettiin kehittämään hionnan lämpömallia. Lämpömalli on elementtimenetelmään pohjautuva malli, jossa työstöparametreihin perustuva lämpövuoto liikkuu ajan mukana työkappaleen pinnalla lämmittäen sitä. Työ aloitettiin keskittymällä lieriömäisen kappaleen ulkopuoliseen pyöröhiontaan. Lämpömallin laskentaverkko sekä lämpötilakenttä erällä työstöparametreilla on esitetty kuvassa 18.

Lämpömalliin kytkettiin rakenneratkaisija, jolloin pystyttiin tutkimaan hionnan lämpötilan vaikutusta hionnassa kehittyviin jäännösjännityksiin. Hionnan maksimilämpötila hiontatehon funktiona on esitetty kuvassa 19 (vasen) ja lieriömäisen kappaleen paikalliseen lämpötilanmuutokseen liittyvät jäännösjännitykset (oikea). Mallin avulla voidaan tehoa mittaamalla arvioida, koska lämpötila nousee niin korkeaksi, että hiottavaan kappaleen pinnalle syntyy haitallista vetojäännösjännitystä. Jäännösjännitysten merkitys hionnassa kasvaa lähitulevaisuudessa, sillä ne vaikuttavat hiottavien kappaleiden

väsymiskestävyyteen, jonka kasvattaminen on tärkeää kestäväen kehityksen näkökulmasta. Kehitystyössä tehtiin tiivistä yhteistyötä Aachenin teknillisen yliopiston (RWTH Aachen), muiden ÄVE-tutkimushankkeen osapuolten kanssa, sekä valmistavan teollisuuden yritysten kanssa.



Kuva 19. Hionnan maksimilämpötila hiontatehon funktiona (vasen) sekä lämpötilanmuutoksiin liittyvät jäännösjännitykset.

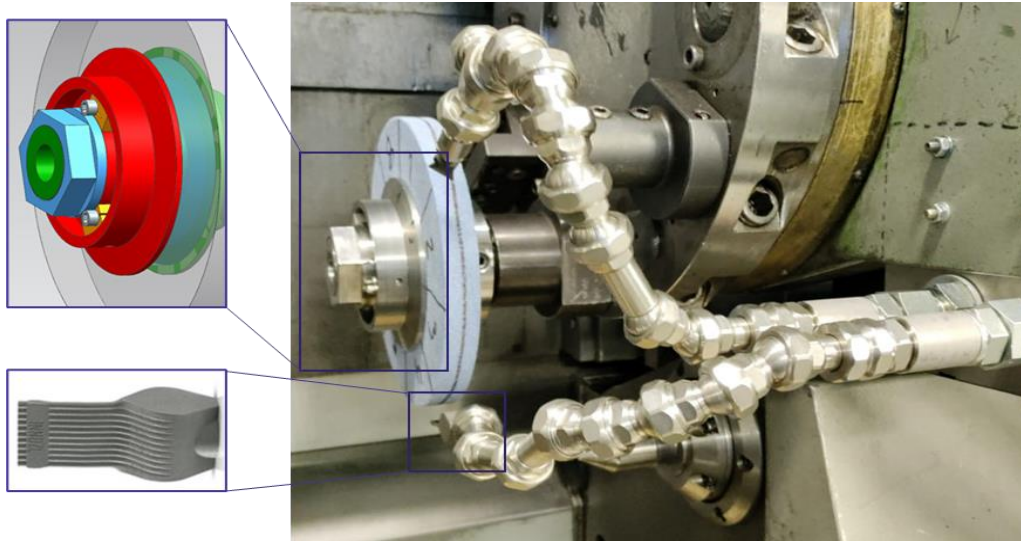
Hionnan ja koneistuksen tutkimusympäristö

Työpaketin (WP5) tämän osatehtävän tarkoituksena oli rakentaa vanhaan sorviin tutkimusympäristö, joka sisältää sorvauksen lisäksi hiontaa ja laserprosesseja kuten karkaisua ja suorakerrostusta. Tavoitteena oli hyödyntää tutkimusympäristöä digitaalisen kaksosen kehittämisessä. Lähtökohtana oli GF NDM 10/160 sorvi, joka on hankittu aikoinaan tutkimussorviksi akselimaisille kappaleille. Sen runko on värähtelyitä hyvin vaimentavaa betonikomposiittia, siksi sen uusiminen ja muiden valmistusprosessien lisääminen on mahdollista ja kannattavaa. Ensisijaisesti lisättävä menetelmä oli pyöröhionta ja toissijaisesti suorakerrostus. Molempien menetelmien integrointia varten suunniteltiin, hankittiin ja valmistettiin useita osia. Suurimmat hankinnat tehtiin yliopiston sisäisen hankintaprojektin kautta ja valmistettavat osat tehtiin omassa laboratorioissa.

Hionta

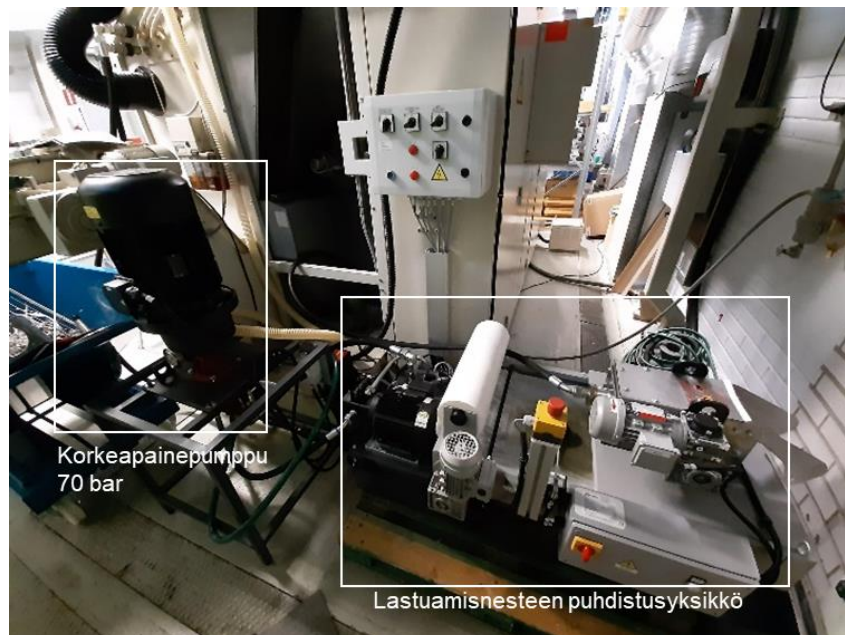
Hiontaprosessia varten hybridisorviin suunniteltiin ja valmistettiin yksilöllinen adapteri (kuva 20) hiomalaikalle, joka sopii sorvin pyörivien työkalujen karaan. Hiomalaikan tasapainotus tehdään pääsääntöisesti manuaalisesti ulkopuolisessa tasapainotuslaitteessa adapterin lisäpainojen paikkaa säätämällä. Adapteri on suunniteltu siten, että hiomakiveä ei tarvitse irrottaa adapterista tasapainotusta, eikä työkalumittausta varten, vaikka ne tehdään koneen ulkopuolella.

Hiontaprosessi vaatii toimiakseen oikeanlaisen lastuamisnestejärjestelmän. Tätä varten hybridisorviin asennettiin kaksi uutta lastuamisneste-pumppua, painetasoiltaan 70 bar ja 20 bar. Testivaiheessa 20 bar pumppua käytetään hiomakiven puhdistukseen prosessin aikana ja 70 bar pumppua hiomakiven ja työkalun kontaktipinnan voiteluun. Hiomakiven puhdistuksessa nesteen tehtävä on irrottaa hiomakiveen jäänyttä hiontajätettä. Kontaktipinnan voitelussa tehtävä on vähentää kitkaa ja lämpötilaa hiomakivessä ja työkalulehdessä. Hiomakiven puhdistusta varten hankittiin kaksi litteäpäistä suutinta, joista neste tulee suurella paineella. Kontaktipintaa varten hankittiin erityinen suutin, jonka päässä on useampi reikä lastuamisnesteelle (kuva 21). Hiomakiven oikaisuun ja teroitukseen (timantointi) tarvittavan osan liityntä tehtiin istukan kylkeen, jolloin toimenpiteestä tulee mahdollisimman stabiili. Samalla karaan lisättiin jarru.



Kuva 20. Hiomakiven adapterin CAD-malli ja valmistettu kappale.

Lastuamisnesteen käyttö hiontaprosessissa vaatii tehokkaan lastuamisnesteen puhdistusjärjestelmän. Puhdistusjärjestelmän kaksi tärkeintä tehtävää on tuottaa riittävän puhdasta nestettä tarpeeksi nopeasti, jotta prosessi pysyy käynnissä halutun ajan. Tämä on varmistettu suunnittelemalla järjestelmä siten, että likaista nestettä puhdistusyksikköön siirtävän pumpun kapasiteetti on yhtä suuri kuin puhdistusyksikön kapasiteetti. Lisäksi siirtopumppu siirtää likaista nestettä nopeammin kuin prosessissa käytettävät kaksi pumpppua kuluttavat puhdistettua nestettä. Puhdistamattoman ja puhdistetun lastuamisnesteen säiliöissä on pinnantasoaanturit, jotka ohjaavat pumpppujen toimintaa (kuva 21). Työtilaan kertyy hiontapölyä ja suorakerrostuksessa ylijäämäjauhetta. Näiden partikkelien poistamiseksi sorviin lisättiin tehokas suodatusyksikkö.

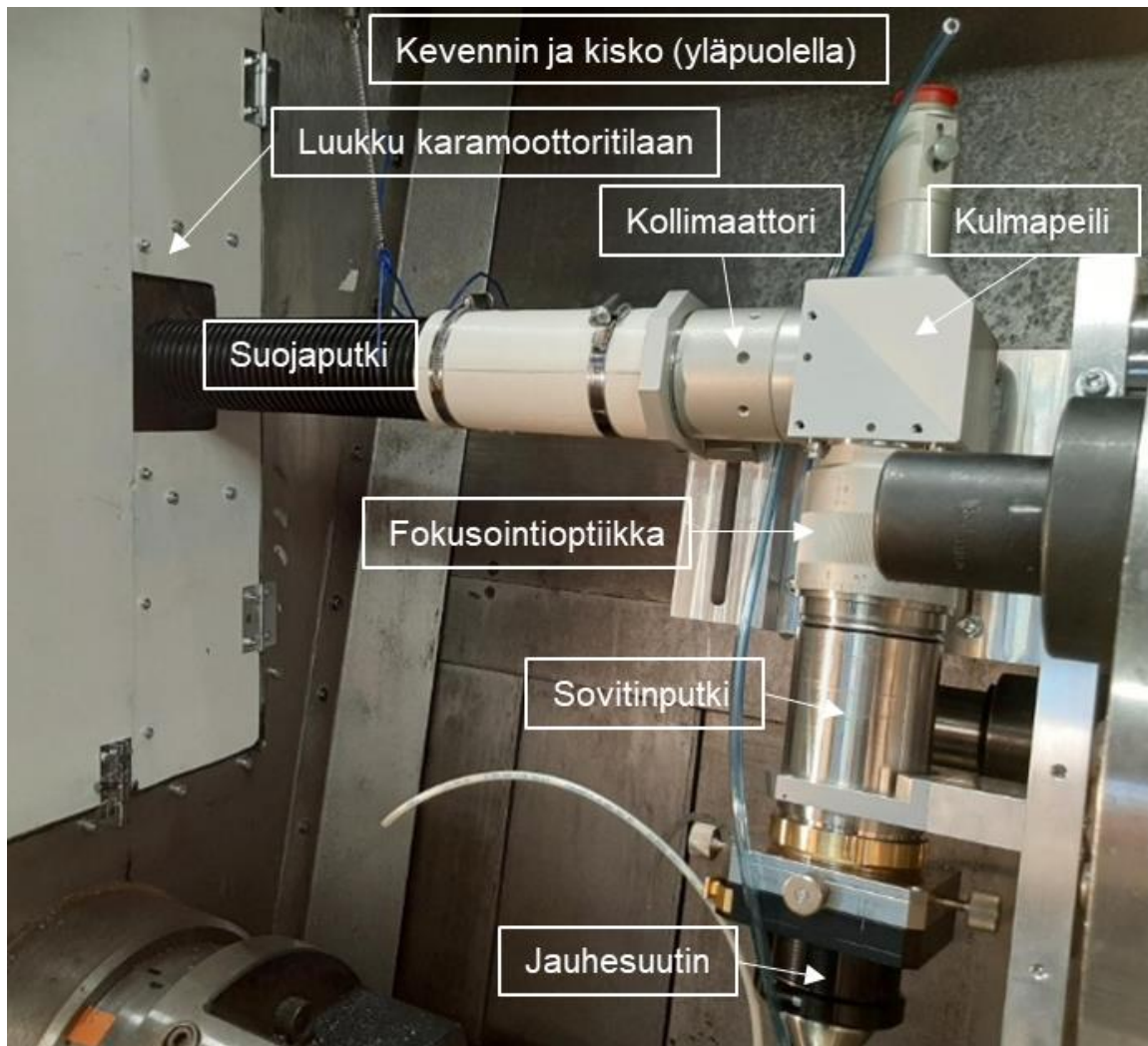


Kuva 21. Lastuamisjärjestelmä.

Suorakerrostus

Suorakerrostusprosessissa käytettävää suorakerrostuspäätä varten valmistettiin yksilöllinen adapteri, jolla se kiinnittyy sorvin työkalurevolveriin (kuva 22). Kiinnitykseen käytetään kahta revolveripaikkaa, koska suutin on kohtalaisen painava ja kookas. Suorakerrostuspää koostuu kuituliitännästä, kollimaattorista, kulmapeilistä, fokusointioptiikasta, sovitinputkesta ja jauhesuuttimesta. Lisäksi päähän on liitetty jauheenjakaja kahden eri jauheen sekoittamiseksi. Suorakerrostuspää suunniteltiin siten, että kollimaattori ja fokusointilinssi on vaihdettavissa erikseen. Kaikki suorakerrostuspäähän tulevat letkut ja kuitu on suojattu kestäväällä suojaletkulla. Sorvauksen ja hionnan ajaksi suorakerrostuspää pitää ottaa manuaalisesti pois ja siksi sen siirtämiseen on rakennettu keventimillä ja kiskoilla toimiva mekanismi. Pää siirretään muiden prosessien ajaksi karamoottorin tilaan. Suorakerrostuksessa käytettävän laserin vuoksi sorvin läpinäkyvän pleksilasin päälle laitettiin lasersuojajakkuna.

Suorakerrostusprosessiin liittyy muita komponentteja kuten laser, jäähdytin, jauheensyöttölaite, kaasusäiliö. Kaikki nämä ovat sorvin ulkopuolella ja niitä ohjataan sorvin logiikan avulla, johon tehtiin mittavia muutoksia niin suorakerrostusta kuin hiontaakin varten.

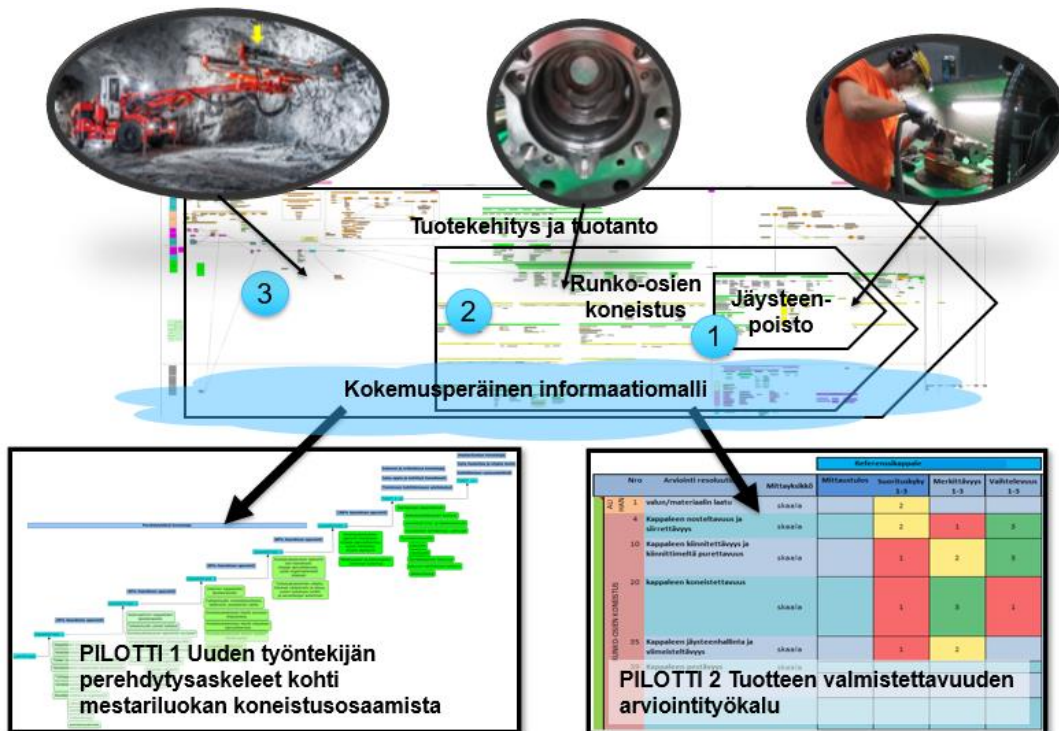


Kuva 22. Suorakerrostuspää kiinnitettynä sorvin työkalurevolveriin.

Hiljaisen tiedon keruumenetelmien tutkimus

Tutkimuksessa sovellettiin japanilaiseen tuotantotapaan (Monozukuriin) liittyvää tiedon virtauksen kuvaamista valmistuksen kokemusperäisen hiljaisen tiedon pyydystämiseen. Sovelletun ja jatkokehitetyn keruumenetelmän pohjana käytettiin kymmenissä yrityksissä testattua tiedon virtausmallinmenetelmää.

Tutkimus jakaantui kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa pyydystettiin ja mallinnettiin valmistuksen hiljaista tietoa tarkastelemalla vallitsevia standardirutiineja. Mallinuskohteeksi valittiin runko-osien koneistusosaaminen. Tiedon pyydystys toteutettiin kolmivaiheisesti (kuva 23). Ensimmäiseksi kuvattiin yksityiskohtaisesti kohdeyrityksen jäysteenpoisto-osaaminen. Toisessa vaiheessa kuvattiin runko-osien koneistusosaamista kokonaisvaltaisesti siitä pisteestä, kun uusi kappale vastaanotetaan siihen pisteeseen, kunnes koneistettu kappale luovutetaan seuraavaan tuotannon vaiheeseen. Kolmannessa vaiheessa kuvattiin koneistusosaamista linkitettynä kohdeyrityksen tuotteen kokovalmistusjärjestelmään keskittyen suunnitteluun ja tuotantoon. Tiedon pyydystys toteutettiin kenttätutkimuksena, joka sisälsi 142 kenttätuntia koneistuksessa ja 26h haastatteluja. Tiedon pyydystämässä ja soveltamisessa oli mukana 14 yrityksen asiantuntijaa 6 eri funktiosta.



Kuva 23. Kolmivaiheinen tiedonpyydystysmenetelmä.

Tutkimuksen toisessa osassa sovellettiin kuvattua kokemusperäistä tietoa kahdessa pilotissa. Ensimmäinen pilotissa kuvattua kokemusperäistä tietomallia sovellettiin uusien työntekijöiden perehdytysohjelman rakenteen suunnitteluun. Pilotissa tunnistettiin uudelle työntekijälle viisi tärkeää rutiinien kehitystasoa, joita voidaan hyödyntää työntekijän systemaattisen perehdytyksen suunnittelussa. Lisäksi pilotissa tunnistettiin työntekijäkohtaisen osaamisen kehittämisen tueksi yrityskohtainen koneistusosaamisen taksonomiataulukko. Pilotin aikana esitettiin rakenne koulutussuunnitelmaan.

Toisessa pilotissa kokemukseräistä tietomallia tarkasteltiin koko valmistusjärjestelmän tasolla ja sovellettiin suunnittelun ja tuotannon kehityksen yhteistyössä valitun tuotteen valmistettavuuden arviointiin rajautuen koneistuksen kannalta oleellisiin tekijöihin. Kokemukseräinen tietomalli loi rakenteen työkalulle, jossa tuotteen valmistettavuutta mitattiin yhteistyössä suunnittelijoiden ja tuotannon kehittäjien kanssa. Lopputuloksena kohdetuotteen valmistettavuus arvioitiin laadullisesti ja pisteytettiin. Kuvauksessa hyödynnettiin liikennevalomallia, jonka avulla on kyky tunnistaa tarkasteltavan tuotteen valmistettavuuden kannalta kriittisiä kehityskohteita.

Jatkotutkimukset

Työstöparametreilla on merkittävä vaikutus koneenosien väsymisikään hionnassa. Tulevaisuudessa olisi syytä selvittää yksityiskohtaisesti tärkeimpien parametrien vaikutus. Tämä olisi hyödyllistä sekä valmistavan teollisuuden yritysten että kestäväen kehityksen näkökulmasta, jonka merkitys tulee lähitulevaisuudessa korostumaan. Jatkossa osaprojektissa rakennettua tutkimusympäristöä tulisi hyödyntää hiontatutkimuksessa. Hiomakone tulisi anturoida ja liittää osaksi digitaalista kaksosta, jotta hiomaprosessia voitaisiin tutkia reaaliaikaisesti. Koska laskennallisesti raskaat simulaatiot eivät sovi osaksi reaaliaikaista digitaalista kaksosta, ne voitaisiin korvata hyödyntämällä tekoälypohjaisia malleja kuten neuroverkkoja. Koska tekoälypohjaisen mallin opettaminen vaatii suuren määrän toistoja, voitaisiin tiedonkeruu toteuttaa osittain kehitetyn elementtimenetelmään pohjautuvan mallin avulla.

3.3 Tunnistusmenetelmät toimitusketjussa

Tavoite

Työpaketin (WP6) ensimmäisenä päätavoitteena on ollut tutkia työstökoneiden anturointia ja hyödyntää matalan tehonkulutuksen radioteknologioita langattomassa mittauksessa. Toinen päätavoite liittyy tunnistusmenetelmien hyödyntämiseen ja kehitykseen.

Älykkään valmistuksen toteuttaminen suuremmissa mittakaavassa edellyttää tehotaloudellisia ja pienikokoisia anturisoluja useassa prosessin osassa. Kiviporakoneiden mäntien hiontaprosessin valvonnan kehittäminen on ollut työpaketin spesifisen tutkimuksen ja demonstraation kohteena. Nykyinen mäntien ja siten myös hionnan laadun arviointi perustuu valmiille männille tehtyyn dimensioiden lasermittaukseen ja näiden pinnasta tapahtuvaan Barkhausen-kohinan mittaukseen. Näiden perusteella mäntä voidaan hyväksyä tai hylätä, mikä johtaa hävikkiin vailla tietoa hiontavirheen aiheuttajasta. Tavoitteena tutkimustyössä on ollut tehdä havaintoja hiontaprosessin aikana, jotta virheet hionnassa voidaan havaita välittömästi ja liittää ne prosessin ohjaukseen. Hionnan ns. timantointivaiheen onnistumista voidaan myös näin arvioida.

RFID-teknologia tarjoaa helpon automaattisen etäluennan, joustavuutensa ja tarvittaessa suuren datasisältönsä vuoksi moneen sovellukseen ylivoimaisen tunnistusratkaisun. Käytännön haasteena on ollut kuitenkin RFID-tagien kestävyys haastavissa ympäristöissä ja integroitavuus kappaleisiin. Tähän on projektissa haettu ratkaisua tagin suoran metallikappaleeseen integroinnin kautta.

Yhteyshenkilö: Kaarle Jaakkola, VTT, kaarle.jaakkola@vtt.fi

Toimenpiteet, tärkeimmät tulokset ja päätelmät

Työstökoneen anturointi

Langallinen datankeruu

Mittausantureiksi hiomakoneeseen valittiin VTT:n kehittämä laajakaistainen akustisen emission anturi ja kaupallinen kiihtyvyyssanturi. Näiden käytön tavoitteena on kattaa hionnan akustomekaaniset ilmiöt matalista taajuuksista noin 300 kHz:iin asti. Ensimmäisessä vaiheessa anturit asennettiin hiomakoneeseen ja koeajoja suoritettiin langallisen mittausjärjestelmän avulla. Langallisen mittausjärjestelmän näytteistystaajuus oli 20 kHz molemmille antureille ja siinä hyödynnettiin NI USB 6363 -datankeruukorttia ja VTT:n laatimaa ohjelmistoa. Kiihtyvyyssanturilta kerättiin kiihtyvyyssarvo- eli raakadata ja akustisen emission anturilta rms- eli integroitu tehollisarvodata. Kuvassa 24 on esitetty antureiden vaihtoehtoisia sijainteja ja nestetiivisiin koteloihin sijoitettujen antureiden lopullinen sijainti (sijainti 2.) hiomakoneessa. Aluksi tutkittiin hiomakiven puolen sijaintia (nro 1), mutta päädyttiin hiottavan männän puoleen sijoitukseen. Kuva 25 on otettu männän hionnan aikana - anturikotelot näkyvät kuvassa vasemmalla. Olosuhteet hiomakoneessa ovat vaativat ja langalliset mittaukset päättyivätkin toisen anturin kaapelin katkeamiseen. Koska mittauksista profiloivaa dataa oli kuitenkin saatu, päätettiin tämän perusteella edetä langattomaan mittauksen toteutukseen. Kuvassa 26 on esitetty akustisen emission kokonaisamplitudi (rms) ajan funktiona päällekkäin kolmelle hionnalle. Vasteesta on tunnistettavissa hionnalle ominainen akustinen ”sormenjälki” vaiheiden ollessa vertailukelpoisia hiontojen välillä.

Langaton datankeruu

Langattoman mittausjärjestelmän toteutusvaihtoehtoina tutkittiin LoRa-, Bluetooth- ja WiFi-tekniikoita. Langallisten mittausten ja eri järjestelmien evaluoinnin perusteella todettiin, että mittauksen vaatiman signaali- ja datan siirtonopeus ei LoRa-tekniikkaa, jota VTT on hyödyntänyt ja kehittänyt eri sovelluksiin, tule kysymykseen. LoRa tarjoaa parhaan tehotalouden, mutta tiedonsiirtokaista on maksimissaan vain noin 50 kbps. Koska langallisen mittauksen tulosten perusteella ei voitu päätellä suoraa indikaattoria datan merkityksellisistä osista, päätettiin kaikki data siirtää ja tallentaa myös langattomassa mittauksessa. Langaton mittausjärjestelmä päätettiin toteuttaa hyödyntäen Raspberry Pi Zero -alustaa, mikä mahdollistaa sekä Bluetooth- että WiFi-tiedonsiirtoyhteyden käytön. Datan määrän vuoksi päädyttiin käyttämään WiFi-yhteyttä.

Langattomassa mittausjärjestelmässä käytettävät anturit ovat samat kuin langallisessa. Langattoman järjestelmän lohko- ja kaaviot on esitetty kuvassa 27. Kuvassa 28 vasemmalla on esitetty langattoman mittausjärjestelmän osat: tietokone, joka sisältää mittauksen käyttöliittymän, hiomakoneeseen kiinnitettävä koneyksikkö sekä 4G-modeemi tietokoneen etähallintaa ja tiedonsiirtoa varten. Kuvassa oikealla on koneyksikkö kansi avattuna. Kuvassa näkyy akku, Raspberry Pi Zero -korttitietokone sekä oikealla alhaalla akustisen emission anturi. Muu elektroniikka (AD-muuntimet, suodattimet, regulaattorit ja liitäntäpiirit) sekä kiihtyvyyssanturi on koottu omalle piirikortilleen, joka sijaitsee Raspberry-kortin alla.

Datan reaaliaikainen visualisointi hiomakoneen operaattoreita varten sekä mahdollisuus tallentaa reaaliaikaisia huomiota mittauksesta on ollut Sandvikin toive. Kuvassa 29 on esitetty langattoman mittauksen web-käyttöliittymä, jossa näkyy akustisen emission ja kiihtyvyyssanturien reaaliaikaiset signaalit taajuustasossa sekä painikkeet neljän eritasoisen huomion (värikoodaus) ja niihin liittyvien kommenttien tallentamiseen. Kommenttien yhteydessä niille tallentuu aikaleima, jolloin ne voidaan liittää mittauksen tiettyihin vaiheisiin.

Langaton mittausjärjestelmä liitettiin Sandvikin uuteen hiomakoneeseen - langalliset mittaukset oli tehty vanhassa koneessa. Kuvassa 30 ja 31 näkyy koneyksikkö kiinnitettynä hiomakoneeseen. Koneyksikön alumiinisen kotelon takana on teräslevy, jota hyödyntäen se on kiinnitetty voimakkaan magneetin avulla hiomakoneeseen. Ensimmäisessä asennuksessa voimakas magneettikenttä aiheutti akustisen emission anturin saturoitumisen, joten asennusta muutettiin hieman muovisilla väliskeillä magneettivuon uudelleenohjaamiseksi.

Kuvassa 32 on esitetty näyte langattoman anturijärjestelmän tallentamasta mittausdatasta: akustisen emission signaali ja kiihtyvyyssignaali aikatasossa (ylärivi) ja taajuustasossa (alarivi).

Tunnistusmenetelmät

Hankkeen toisena päätavoitteena oli etätunnistuksen kehittäminen. Käytännön kehitys- ja demonstraatiokohteeksi otettiin VTT:n patentoima lähikenttä-UHF-RFID-tagirakenne, joka ohuena ja melko yksinkertaisena rakenteena voidaan toteuttaa koneenosiin tarvittaessa additiivisin valmistusmenetelmin. Alkuperäisenä suunnitelmana oli toteuttaa RFID-tageja ko. menetelmin GA Techiin suuntautuneen tutkijanvaihdon yhteydessä (ks. kpl ”Tutkijanvaihto”), mutta vaihdon keskeydyttyä Covid-19 -pandemian myötä päätettiin tagien additiivista valmistusta kehittää ja demonstraattori toteuttaa VTT:n voimin yhteistyössä Advanced Manufacturing Technologies ja Sensor System Integration -tiimien välillä.

Demonstraattorissa RFID-tagit toteutettiin suoraan metalliosan pintaan. Tagi koostuu metallisen kappaleen pintaan tulevasta dielektrisubstraatista ja tämän päälle muodostettavasta johdekuviosta. Rakenne perustuu metallisen kappaleen hyödyntämiseen tagin toiminnallisena osana. Metallisen kappaleen pintaan ruiskutettiin ensin DWTS-metelmällä (Direct Write Thermal Spray) keraaminen (Al_2O_3) substraatti, jonka päälle tulostettiin hopeapastalla johdekuvio. Koteloimaton piiri kiinnitettiin johdekuviioon demonstraattorissa hopeapoksin avulla. Tuotantomittakaavassa piiri kiinnitetään anisotrooppisen liiman (ACA) avulla. Erytisesti alumiinioksidisubstraatin ruiskuttaminen suuren metallikappaleen pintaan osoittautui haastavaksi kappaleiden erisuuruisten lämpökapasiteettien vuoksi. Tähän löytyi kuitenkin ratkaisu kuparisesta välikerroksesta ja jäähdytyksestä. Valmistettujen tagien toimintaa evaluoitiin Tagformance -RFID-mittalaitteen avulla. Kuvassa 35 on esitetty Impinj Matchbox -lähikenttäantennilla mitatusta tehovasteesta laskettu tehomarginaali taajuuden funktiona kahdella mittausetäisyydellä. Kuvaan on myös merkitty Euroopassa käytetty UHF-RFID:n keskitaajuus 867 MHz.

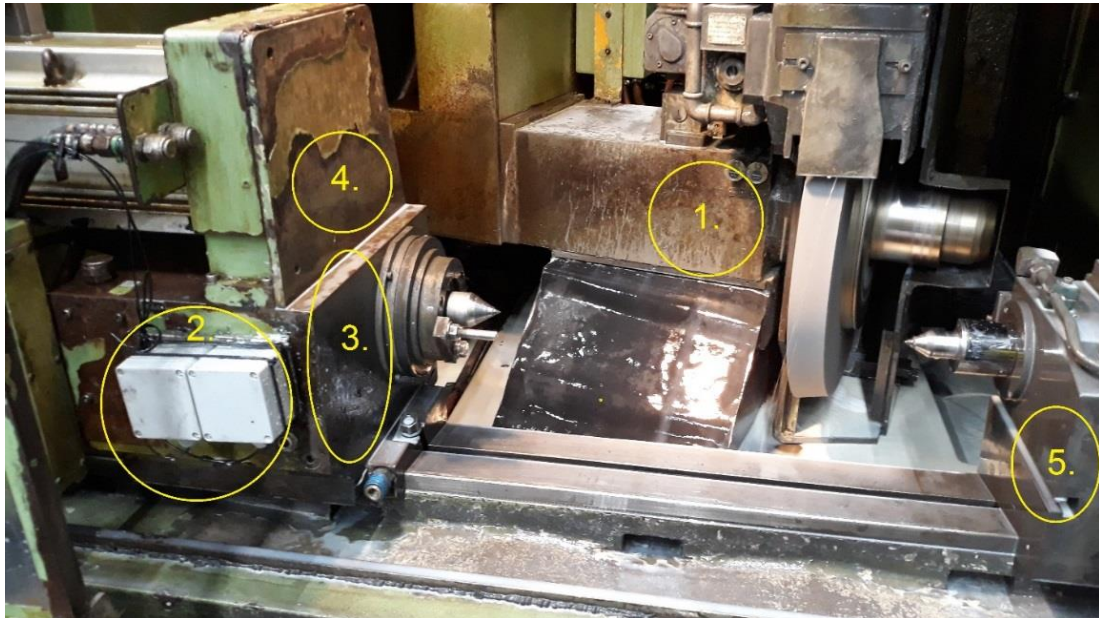
Tutkijanvaihto

Kaarle Jaakkolan tutkijanvaihdon kohteena oli Georgia Institute of Technology (Atlanta, GA, USA), School of Electrical and Computer Engineering, ATHENA Lab (Agile Technologies for High-performance Electromagnetic Novel Applications) ja isäntänä prof. Manos M. Tentzeris. Suunniteltu kesto oli 2.3. - 30.5.2020 (89 vrk) ja toteutunut kesto 2.3. - 28.3.2020 (26 vrk). Vierailun tavoitteena oli tutkia RFID-tunnisteiden toteutettavuutta additiivisten valmistusteknologioiden avulla ja toteuttaa näin projektin tavoitteiden mukainen, vaativaan mekaaniseen ympäristöön soveltuva RFID-tagit. Suunnittelun lähtökohtana oli VTT:n patentoima lähikenttä-UHF-RFID-tunnistetyyppi. Vierailun keskeydyttyä Covid-19 -pandemian vuoksi ei RFID-tagin käytännön toteutukseen ehditty edetä. Vierailulla saatiin kuitenkin hankittua ja jaettua tietoa ATHENA-ryhmän kanssa mm. liittyen RF- ja millimetriaaltotaajuiseen energian harvestointiin, energiatehokkaaseen takaisinsirontakommunikaatioon (merkittävää passiivisia etäanturitoteutuksia ajatellen) ja antenniryhmien toteutukseen 3D-tulostuksella. Vierailun päätyttyä ennenaikaisesti suunniteltua RFID-demonstraattoria alettiin toteuttaa VTT:n voimin yhteistyössä Advanced Manufacturing Technologies ja Sensor System Integration -tiimien välillä.

Jatkotutkimukset

Sekä kehitetyn langattoman mittausjärjestelmän että projektissa esitetyn RFID-ratkaisun hyödyntämistä ja kehitystä ja pyritään jatkamaan uusissa hankkeissa. Kehitetty langaton mittausjärjestelmä web-käyttöliittymineen soveltuu käytettäväksi erilaisten anturien kanssa ja voidaan ohjelmoida toimimaan erilaisilla näytteistystaajuuksilla ja mittaussekvensseillä. Mekaanisesti robustina se soveltuu myös kuormittaviin ja likaisiin ympäristöihin. Raspberry Pi -perustaisena se on ohjelmoitavissa monipuoliseen datan prosessointiin ja myös laitteiston osalta laajennettavissa tarpeen mukaan.

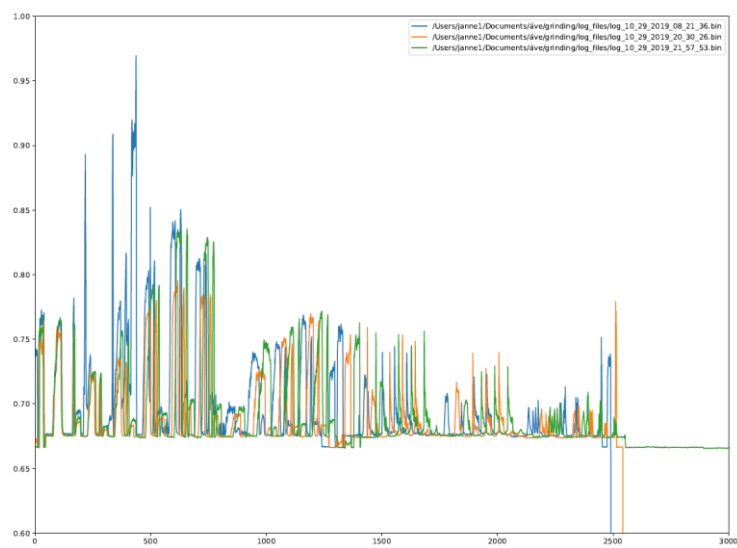
Onnistuneen demonstraattorin myötä RFID-tagikonsepti on valmis jatkokehitykseen. Valmistusprosessia voidaan kehittää siten, että tagi upotetaan metallikappaleeseen ja suojataan nykyistä substraattia vastaavalla tai muulla dielektrikerroksella (keraami, epoksi, muovi tai komposiitti) myös päältä päin. Antennirakennetta voidaan kehittää kaukokenttäratkaisuksi, jolloin lukuetaisyyttä saadaan kasvatettua. Kappaleeseen integroituja antennejä voidaan lisäksi hyödyntää myös esim. pienikokoisten langattomien anturinodejen yhteydessä. Tällöin elektroniikka kannattaa myös upottaa kappaleeseen hyödyntäen samoja additiivisen valmistuksen menetelmiä.



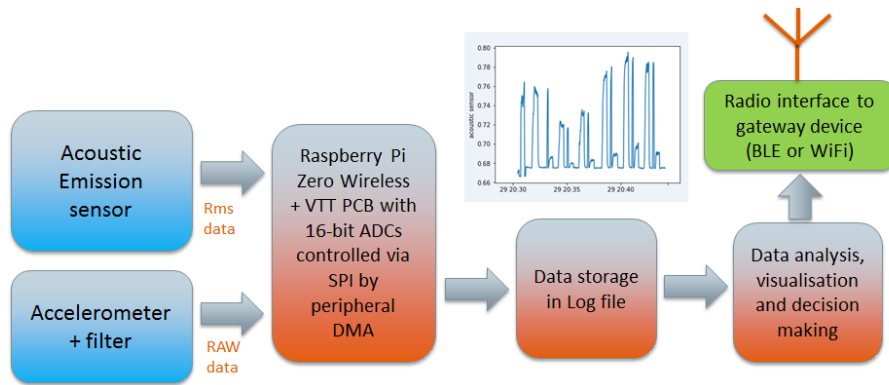
Kuva 24. Akustisen emission ja kiihtyvyyssantureiden vaihtoehtoiset sijainnit sekä valittu sijainti (2.) hiomakoneessa.



Kuva 25. Männän hionta. Anturikotelot kuvassa vasemmalla.



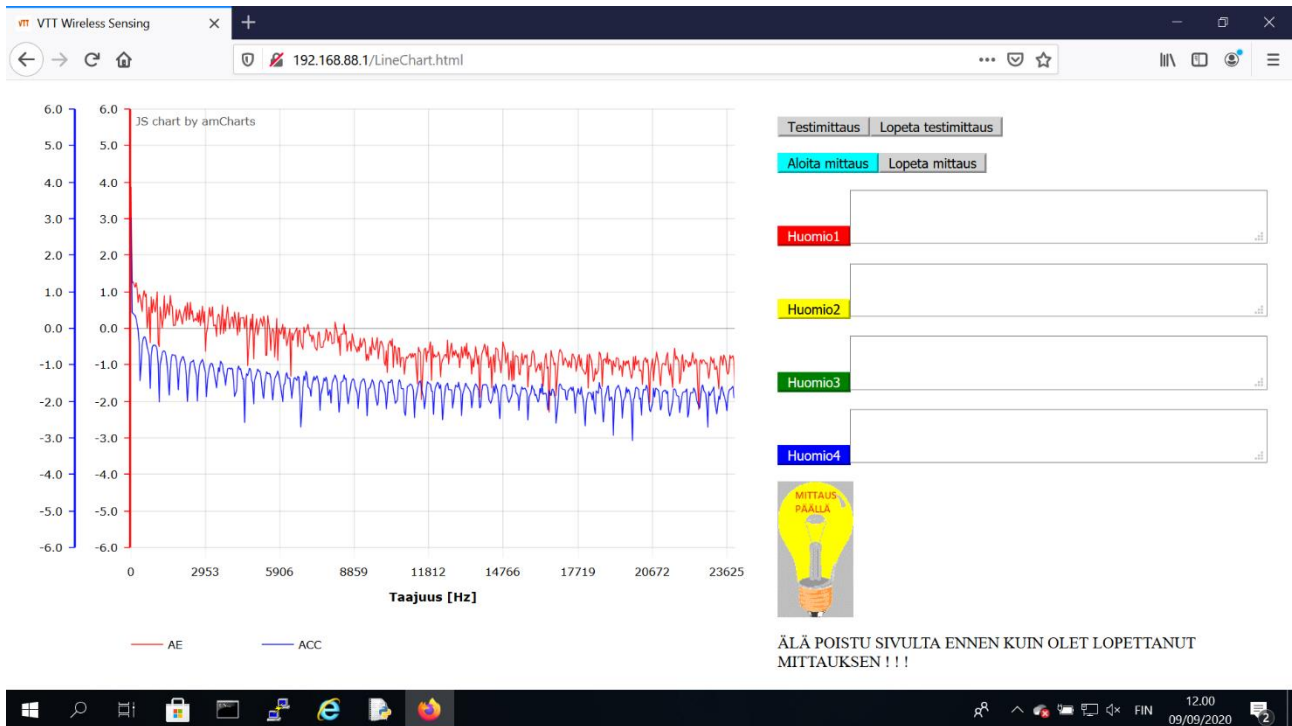
Kuva 26. Kolmen männän hionnan akustisen emission "sormenjälki".



Kuva 27. Hiomakoneen langattoman mittausjärjestelmän lohkokaavio ja kiihtyvyyssignaali taajuus-tasossa (reaaliaikainen fft-muunnos).



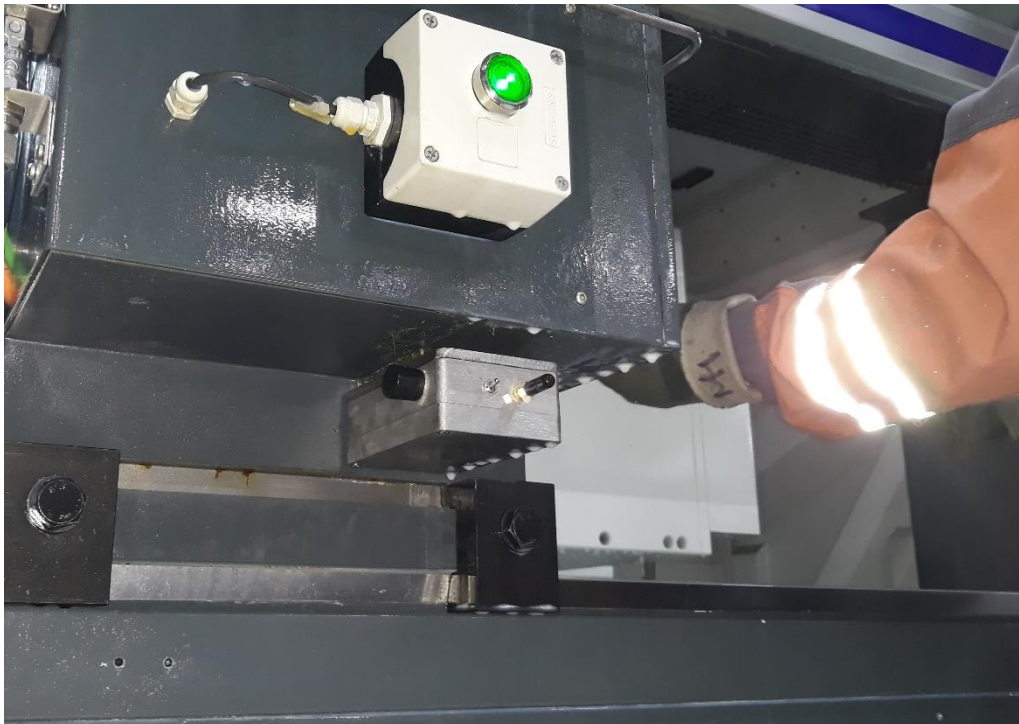
Kuva 28. Langattoman mittausjärjestelmän osat ja koneyksikkö kansi avattuna.



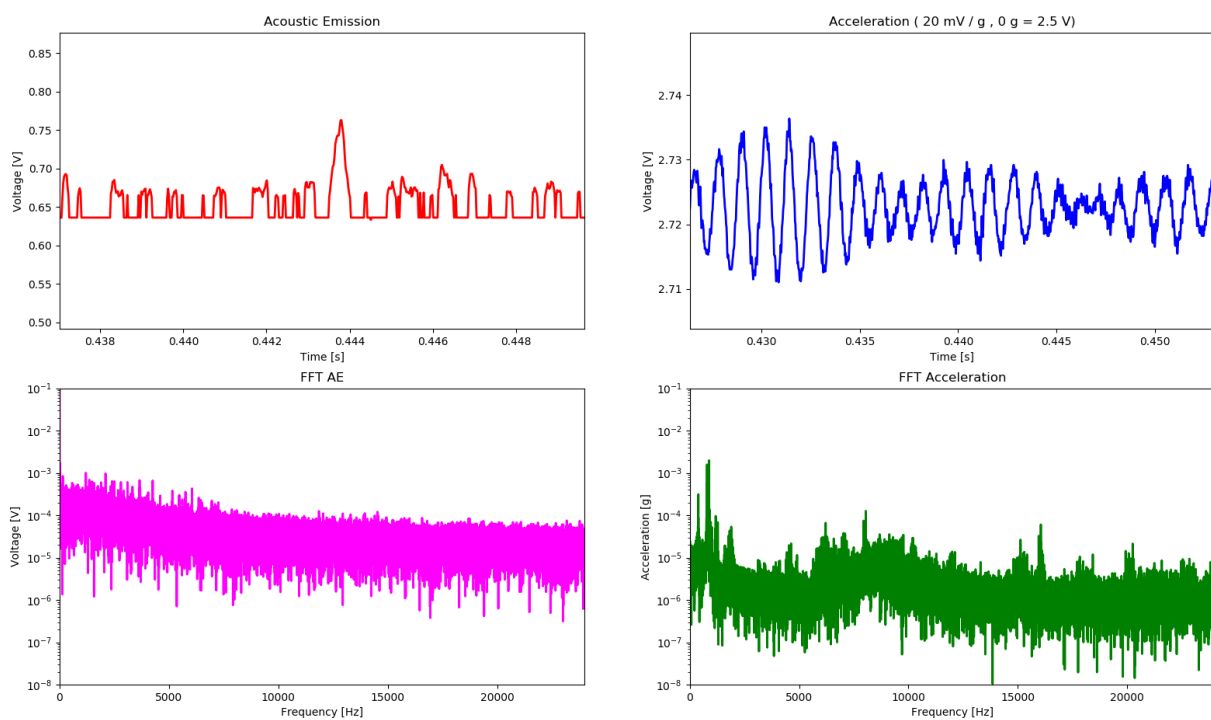
Kuva 29. Langattoman mittausjärjestelmän web-käyttöliittymä.



Kuva 30. Langattoman mittausjärjestelmän koneyksikkö asennettuna hiomakoneeseen.



Kuva 31. Langattoman mittausjärjestelmän koneyksikkö asennettuna hiomakoneeseen.



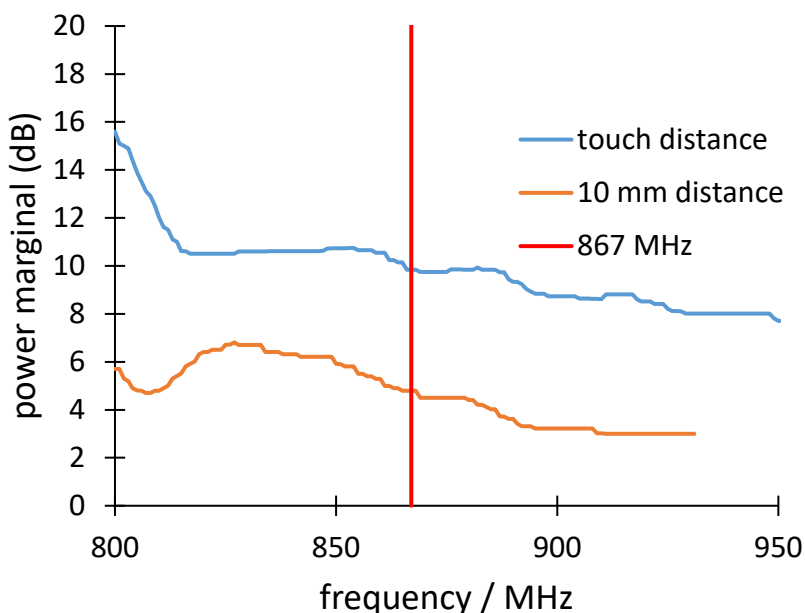
Kuva 32. Näyte langattoman mittausjärjestelmän anturidatasta: akustinen emissio ja kiihtyvyyssignaali aika- (ylärivi) ja taajuustasossa (alarivi).



Kuva 33. Teräslevyn pintaan integroitu RFID-tag.



Kuva 34. 3D-tulostetun teräskappaleen pintaan integroitu RFID-tag.



Kuva 35. Kuvan 34 Teräskappaleeseen integroidun RFID-tagin tehomarginaali taajuuden funktiona Tagformance-mittalaitteella mitattuna.

4. Toimitusketju

4.1 Kannattavuuden johtaminen ja ohjaaminen

Osakeyhtiöiden olemassaolon tarkoitus määrittää osakeyhtiölaissa: Osakeyhtiön tarkoituksena on tuottaa lisäarvoa omistajille, ellei yhtiöjärjestyksessä toisin määrätä. Kannattavuus kertoo lisäarvon syntymisestä.

Yhteyshenkilö: Jari Paranko, TAU, jari.paranko@tuni.fi

Tavoite

Tässä hankkeessa kannattavuuden johtamisen ja ohjaamisen nykytilaa on selvitetty haastattelututkimuksella sekä kyselytutkimuksella. Haastattelu tutkimus kohdistui neljään ÄVE-hankkeen pk-yritykseen. Kyseisen tutkimuksen tuloksista on raportoitu edellisessä ÄVE-raportissa. Kyselytutkimuksen kohderyhmänä olivat suuret suomessa toimivat koneenrakentajat. Kysely suunnattiin yritysten strategiselle hankintatoimelle. Hankintatoimen valintaa kohdefunktioksi voidaan perustella seuraavilla kahdella argumentilla. Hankintatoimen kautta syntyy reilusti yli puolet koneenrakentajien kustannuksista. Hankintatoimi on se taho, joka on kosketuksessa ÄVE-hankkeeseen kuuluviin toimittajiin. Kysely on toteutettu neljässä eri organisaatiossa tätä raporttia kirjoitettaessa. 40 henkilöä on vastannut kyselyyn yhteensä. Tulemme toteuttamaan sen useammassa organisaatiossa vielä tulevaisuudessa. Saaduille vastauksille tehtiin klusterianalyysi, jonka perusteella muodostuneista vastaajaryhmistä haastateltiin yksi henkilö per ryhmä. Haastattelun tarkoituksena oli syventää meidän tutkijoiden ymmärrystä siitä, miksi henkilö oli vastannut tietyllä tavalla. Haastattelujen jälkeen pidettiin kaikille vastaajille yhteinen palautetilaisuus. Tilaisuudessa me tutkijat kävimme läpi keskeiset

havainnot ja niiden pohjalta annetut toimenpidesuosituksset. Lisäksi tilaisuudessa käytiin avointa keskustelua aiheen tiimoilta. Kohdeyrityksiltä saatu palaute kyselykokonaisuudesta on ollut erittäin positiivista.

Haastattelujen ja kyselyiden lisäksi hankkeessa on avustettu erinäisillä laskelmilla yhtä pk-yritystä, jonka maksuvalmius heikkeni koronan vaikutuksesta merkittävästi. Kyselyn laatiminen sekä välttämättömät käsiteanalyysit johtamiseen ja ohjaamiseen liittyen ovat vaatineet merkittävän työpanoksen. Panosten tuottamista hedelmistä päästään nauttimaan vielä pitkään ÄVE-hankkeen päättymisen jälkeenkin.

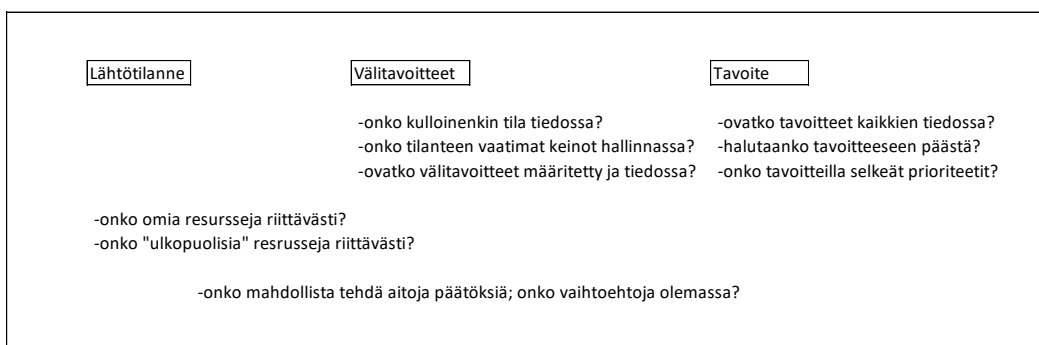
Toimenpiteet, tärkeimmät tulokset ja päätelmät

Ohjauksen peruselementit

Hankkeen aikana on tehty syvällistä käsiteanalyysiä niin kannattavuuden johtamisesta kuin sen ohjaamisestakin. Tässä raportissa keskitytään näistä käsitteistä ohjaamiseen ja erityisesti ohjaamisen perusedellytyksiin. Käsiteanalyysin perusteella olemme päätyneet siihen, että ohjauksen perusedellytykset muodostuvat seuraavista elementeistä:

1. Tavoitteet
 - a. Tavoitteet tiedetään
 - b. Tavoitteet on jaettu mielekkäällä tavalla alatavoitteisiin
 - c. Tavoitteet on asetettu tärkeysjärjestykseen
2. Olemme motivoituneita pyrkimään tavoitteisiin.
3. Tilannetietous
 - a. Meillä on riittävä tietämys siitä, missä me kulloinkin olemme suhteessa loppu- ja välitavoitteisiin.
4. Meillä on vaihtoehtoja, joista suoritamme valinnan.
5. Meillä on riittävästi resursseja käytössämme päätöksentekoon ja toteutukseen.
6. Meillä on riittävä ymmärrys siitä,
 - a. milloin poikkeamiin tulee reagoida.
 - b. millaisia toimenpiteitä tietyn suuruiset poikkeamat edellyttävät.
7. Meillä on riittävä osaaminen tarvittavien toimenpiteiden toteuttamiseksi.

Kuva 36 havainnollistaa ohjauksen peruselementtejä.



Kuva 36. Ohjauksen peruselementit

Tämän työn kyselyssä hyödynnetyt arvosteluasteikot ovat sekä kuusi- että viisiportaisia ja niitä hyödynnettiin kysymyspareina sekä yksittäisinä kysymyksinä eri tarkoituksissa. Yksittäisissä kysymyksissä vastaaja arvioi tiettyä väitettä kuusiportaisella Likert-tyyppisellä asteikolla. Kysymysparit koostuivat kuusi- ja viisiportaisesta asteikosta. Kuusiportaisella asteikolla vastaaja arvioi mielipidettään tietyn asian tilaan, kun taas viisiportaisella vastaaja pystyi ilmaisemaan tyytyväisyytensä asian tilaan tai toivotun muutoksen suuntaa ja voimakkuutta. Kysymyspareilla saatiin mielestämme onnistuneesti kuvattua sekä se, miten henkilö kokee asian olevan, että se, onko hän kokemaansa tyytyväinen. Pelkän tyytyväisyyden/tyytymättömyyden sijaan vastauksesta ilmenee se, haluaisiko vastaaja kyseistä asiaa lisäävän vai vähennettävää. Tarkasteltaessa neljän eri organisaation ohjauksen peruselementtien tilaa keskiarvoilla voidaan niistä tehdä seuraavat havainnot:

- Vastaaajilla on selkeä halu päästä tavoitteisiin.
- He tietävät hyvin toiminnan tavoitteet.
- Heillä on kohtuullisen hyvin tarkoituksenmukaiset keinot hallinnassa.
- Resursseja (sisäisiä ja ulkoisia) ei ole riittävästi.
- Tavoitteille ei ole määritelty prioriteetteja.

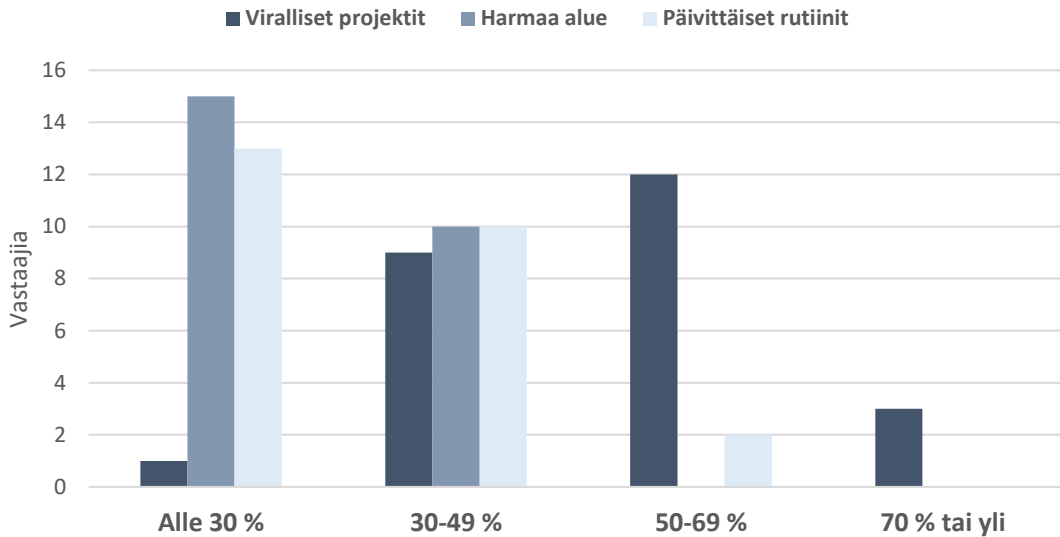
Kyselyssä tiedusteltiin välitavoitteiden asettamista ja niiden selkeyttä projekteihin liittyen. Yhdessä yrityksessä välitavoitteet ovat hyvällä tasolla ja vastaajat haluaisivat niitä vain pienessä määrin lisää. Yrityksessä, jossa tyytymättömyys oli kaikkein suurinta, myös välitavoitteiden puute koettiin yhdeksi keskeiseksi ongelmaksi. Samainen yritys arvioi ”hankinnassa tavoitteiden olevan hyvin tiedossa” ja oli vallitsevaan tilanteeseen melko tyytyväinen. Kokonaisuudessaan kyseisen yrityksen tilannetta tavoitteiden suhteen voidaan kuvata seuraavasti. Hankinta on tietoinen toimintansa tavoitteista, mutta tavoitteiden priorisointiin ja välitavoitteiden asetantaan kohdistuu muutostoiveita. Toiveet liittyvät läheisesti myöhemmin käsiteltävään resurssien riittämättömyyteen. Kyseisen yrityksen ehkäpä keskeisin ongelma on siinä, että hankintatoimeen tulee toimeksiantoja useasta eri lähteestä. Kaikilla toimeksiannoilla on luonnollisesti kiire ja kukaan ei tällä hetkellä koordinoi yksitaiseen toimijaan kohdistuvaa kokonaisuormaa. Toimija joutuu itsenäisesti laittamaan tehtävät jonkinlaiseen järjestykseen. Järjestys menee liian usein uusiksi, kun ylemmältä johdolta tulee kiireellisiä toimeksiantoja. Toimintaa leimaa suunnittelemattomuus ja turhautuneisuus. Kyselyn vastauksista ilmeni selkeästi resurssipula, tavoitteiden prioriteettien puute sekä välitavoitteiden puute. Haastattelussa kävi ilmi suunnittelemattomuus sekä se, ettei yksittäisten toimijoiden kokonaisuormaa seurata.

Elementtien tilaan kohdistuvat halut menevät koko lailla käsi kädessä sen kanssa, miten asioiden koettiin olevan. Ensimmäisenä toivomuslistalla oli saada lisäresursseja sekä omaan tiimin että tiimin ulkopuolelta. Prioriteetteja kaivattiin lisää, samoin haluttiin tilannetietoisuuteen parannusta. Vaikka resurssipulasta valittaminen on melko tyypillinen piirre kaikille organisaatioille, kahdessa yrityksessä resurssipula vaikutti suurelta. Ensimmäisessä näistä yrityksistä kyseessä oli irtisanoutumisista johtunut väliaikainen ilmiö. Jälkimmäisessä resurssipula vaikutti krooniselta, ja tästä johtuva liiallinen työn kuormittavuus heijastui koko tiimin vastauksista.

Projektien merkitys hankinnassa

Projektien roolia hankinnan työssä selvitettiin usealla kysymyksellä. Kysymyksillä kartoitettiin projektien merkitystä hankinnassa, vastaajan käyttämää työaikaa eri projekteihin, projektien vaikutusta tuloksellisuuteen, vastaajan osallistumisesta projekteihin sekä vastaajan kokemuksesta projektien lisäresursoinnin tarpeesta. Selvitettäessä projektien roolia hankinnan henkilöstön työajasta pyydettiin

vastaajia arvioimaan työaikaansa prosentuaalisesti virallisten projektien, projektimaisten tehtävien sekä päivittäisten rutiinien välillä. Kuva 37 havainnollistaa henkilöstön työajan jakaumaa.



Kuva 37. Hankinnan henkilöstön työajan jakautuminen

Tulosten perusteella projektit ovat ajallisesti merkittävässä osassa hankinnan työtä. Kuvan pylväskaavion perusteella 15 vastaajaa 25:stä arvioi käyttävänsä työajastaan 50 % tai enemmän virallisiin projekteihin. Projektein merkitys näkyy myös tarkastellessa työajan jakautumista keskiarvillisesti. Harmaaseen alueeseen kuuluviin projektimaisiin tehtäviin sekä päivittäisiin rutiineihin käytettiin molempiin keskiarvillisesti noin neljännes työajasta, kun taas noin puolet kuluu virallisiin projekteihin. Luonnollisesti sitä, miten jokainen vastaaja ymmärsi harmaan alueen projektimaisten tehtävien ja päivittäisten rutiinien eron, ei voida tietää varmaksi. Tulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että projektit vievät merkittävän osan vastaajien työajasta ja myös osa työstä kuluu projektimaisiin tehtäviin, jotka ovat virallisten projektien ulkopuolella.

Osalla väitteistä arvioitiin vastaajan kokemusta projektien vaikutuksesta hankinnan tuloksellisuuteen. Taulukossa (taulukko 1) on esitetty vastausten keskiarvo ja hajonta projektien merkitystä kartoittavaan kysymykseen.

Taulukko 1. Vastaukset kysymykseen projektien merkityksestä

Väite (1 = täysin eri mieltä, 6 = täysin samaa mieltä)	K. arvo	K. hajonta	N	En osaa sanoa
Projektien toteutus vaikuttaa keskeisesti hankintatoimen tuloksellisuuteen	4,9	0,9	35	1

Tulosten perusteella projekteilla on selkeä vaikutus hankinnan tuloksellisuuteen. Taulukon 1 perusteella väite koskien projektien merkitystä hankinnan tuloksellisuuteen sai hyvin korkean keskiarvon: 4,9. Lähes kaikki vastaajat olivat myös samaa mieltä väitteen kanssa, ja 71 % vastaajista oli väitteen kanssa vahvasti samaa mieltä (antoi arvosanan 5 tai 6). Vastaajat kokivat myös, että hankinnan tulisi panostaa lisää resursseja projektien toteutukseen (väitteen keskiarvo 4,6 ja vain noin 10 % vastaajista oli eri mieltä väitteen kanssa).

Projektisalkunhallinta hankinnassa

Projektisalkunhallinnan tilasta hankinnassa selvitettiin sekä sen vaikutusta tuloksellisuuteen että sen suunnitelmallisuutta. Arvioitaessa projektisalkunhallinnan merkitystä vastaajilta kysyttiin heidän kokemustaan salkunhallinnan tuloksellisuudesta, mutta myös sitä, voitaisiinko salkunhallinnalla vaikuttaa paremmin tuloksellisuuteen sekä sitä, onko panostuksilla salkunhallintaan positiivisia vaikutuksia. Lisäksi vastaajia pyydettiin arvioimaan salkunhallinnan suunnitelmallisuutta. Taulukkoon (taulukko 2) koottu väitteet liittyen salkunhallinnan merkitykseen sekä niiden saamat keskiarvot ja -jakaumat, vastausten kokonaismäärä sekä *En osaa sanoa* -vastausten määrä eri väitteille.

Taulukko 2. Vastaukset kysymyksiin projektisalkunhallinnan merkityksestä

Väite (1 = täysin eri mieltä, 6 = täysin samaa mieltä)	K. arvo	K. hajonta	N	En osaa sanoa
Projektisalkunhallinta vaikuttaa merkittävästi hankintatoimen tuloksellisuuteen.	4,8	1,0	36	0
Toisin hoidettuna projektisalkunhallinnalla voitaisiin vaikuttaa nykyistä merkittävästi positiivisemmin hankintatoimen tuloksellisuuteen.	4,3	1,0	36	1
Panostukset projektisalkunhallintaan johtavat hyviin lopputuloksiin.	4,6	1,1	34	0
Projektisalkunhallinta on mielestäni... (1 = ei ollenkaan suunnitelmallista, 6 = todella suunnitelmallista)	3,5	0,9	30	0

Tulosten perustella projektisalkunhallinnalla on merkitystä hankinnan tuloksellisuuteen, mutta vaikutusta ei pidetty yhtä merkittävänä kuin projektien kohdalla. Väite projektisalkunhallinnan vaikutuksesta tuloksellisuuteen sai keskiarvon 4,8 ja suurin osa vastaajista (92 %) oli myös väitteen kanssa samaa mieltä. Kuitenkin väitteen kanssa vahvasti samaa mieltä (antoi arvosanan 5 tai 6 arvosteluasteikolla) oli vain 64 % vastaajista, verrattuna 71 %:iin vastaajista, jotka kokivat, että projektien toteutuksella on merkittävä vaikutus tuloksellisuuteen. Taulukon toinen väite liittyen siihen, voisiko projektisalkunhallinnan vaikutus olla positiivisempi toisin hoidettuna, jakoi vastaajia enemmän. Väitteestä oli eri mieltä 20 % vastaajista ja väite sai vain keskiarvon 4,3. Projektisalkunhallintaan panostamisen johtaminen hyviin lopputuloksiin sai myös eräviä mielipiteitä, mutta yli 90 % oli väitteen kanssa samaa mieltä ja yli puolet vahvasti samaa mieltä (antoi arvosanan 5 tai 6 arvosteluasteikolla).

Keskeiset tulokset

Kyselyn perusteella voidaan tehdä kolme projektinomaiseen työskentelyyn liittyvää johtopäätöstä strategisessa hankinnassa: 1) projektit ovat merkittävässä osassa hankinnan työtä isoissa organisaatioissa, 2) projekteilla on keskeinen vaikutus hankinnan tuloksellisuuteen näissä organisaatioissa sekä 3) projektisalkunhallinta on keskeisessä osassa hankinnan tuloksellisuudessa. Hankinnan projekteja ei ole käsitelty kattavasti kirjallisuudessa ja keskittyminen on ollut lähinnä projektihallintataitojen merkityksen esiintuomisessa hankinnan henkilöstön osaamisessa. Näin ollen voidaan perustellusti väittää, että hankkeessa on pystytty tuottamaan uutta tietoa strategisen hankintatoimen perusluonteesta.

Lisäksi kyselyn perusteella voidaan todeta, että hankintatoimessa keskeisimmät ohjattavuuden parantamiskeinot tulisi suunnata seuraaviin kohteisiin: 1) Tavoitteiden priorisointi ja 2) Välitavoitteiden asetanta. Vaikka resurssien riittämättömyys nousi esiin erityisesti kahdessa organisaatiossa, ei sitä nosteta keskeisten parantamiskeinojen joukkoon. Osittain näin menetellään siitä syystä, että aihe ”kestohitti” monilla listoilla. Merkittäviä lisäpanoksia henkilömääriin tuskin on odotettavissa. Luonnollisesti pois lähteneet henkilöt useimmiten korvataan uusilla. Lisäresurssien hankkimisen sijaan suosittelimme panostuksia yksittäisten henkilöiden työkuorman seurantaan ja hallintaan. Suurissa globaaleissa konserneissa on vaarana se, että töitä putoilee liian monelta taholta hallitsemattomasti yksittäisille toimijoille. Ratkaisuna ehdotamme sitä, että esimiehet ottavat vastakseen alaistensa kuormituksen hallinnasta. Heidän tehtävänä on tietää alaistensa kulloinenkin työkuorma sekä tehdä alaisen kanssa yhteistyössä töiden vastaanotto. Vastaanoton yhteydessä työjonolle tulee määrittää tekojärjestys.

4.2 Toimitusketjun digitaalinen kaksosen

Toimitusketjun digitaalinen kaksosen toteuttamiseksi oli aiemmin hahmoteltu karkeaa tietojärjestelmäarkkitehtuuria. Projektin edetessä havaittiin se, että kyse on huomattavasti tietojärjestelmäratkaisua syvällisemmästä haasteesta. Digitaalisella kaksosella on yleisesti ottaen seuraavia piirteitä:

Yhteyshenkilö: Antti Pulkkinen, VTT, antti.pulkkinen@vtt.fi

1. Digitaalisella kaksosella pitää olla vastaava fyysinen kaksosen
2. Digitaalisen ja fyysisen kaksosen välillä on kaksisuuntainen informaatiovirta
3. Digitaalisen kaksosen pitää pystyä kuvaamaan muuttuva tilanne

Tuotannon ja tuotantojärjestelmien mallinnuksessa digitaaliset kaksoset ovat kehittyneet esimerkiksi robottisolujen suunnittelusta ja discrete event -simuloinnista siten, että samaa ohjauskoodia on voitu käyttää ja testata simulointiympäristöissä ennen varsinaisia käyttöönotto-testejä sekä muokata saadun simulointi- ja reaalijärjestelmän palautteen perusteella. Tuotantoverkoston tapauksessa digitaalisen kaksosen objektit ja tapahtumat eivät luonnollisesti ole samalla tarkkuustasolla kuin yksittäisen tuotantosolun tai edes tuotantolinjan diskreettien tapahtumien simuloinnissa. Toimitusverkon digitalisaatiossa fokus voi olla esimerkiksi laatutiedon koneluettavassa jakamisessa, tilausten jäljitettävyydessä ja valmiusasteessa, tuotannollisen kapasiteetin käyttöasteessa ja vapaissa resurssien määrässä ja laadussa – ks. kuva 38.

Konejärjestelmän digitaalisen kaksosen tarkoitus on tutkia järjestelmään tehtävän muutoksen vaikutusta, joka yleensä liittyyvää järjestelmän toimintaan tai elinjaksoon. Verkottuneen tuotantojärjestelmän, ts. valmistusekosysteemin, digitaalisen kaksosen tarkoitus voi olla selvittää esimerkiksi järjestelmän tiedonkulkuun tai muihin vuorovaikutussuhteisiin liittyvien muutosten vaikutuksia, kuten tutkia kuormitusilanteen muutosten vaikutusta esimerkiksi toimitusaikapitoon tai tiedon jakamisen tapaa laaduntuottokykyyn. Tämän takia tutkimuksessa päädyttiin systeemidynaamisen mallinnuksen soveltamiseen, jota tutkittiin samaan aikaan VTT:n Data Unleashed –projektissa.

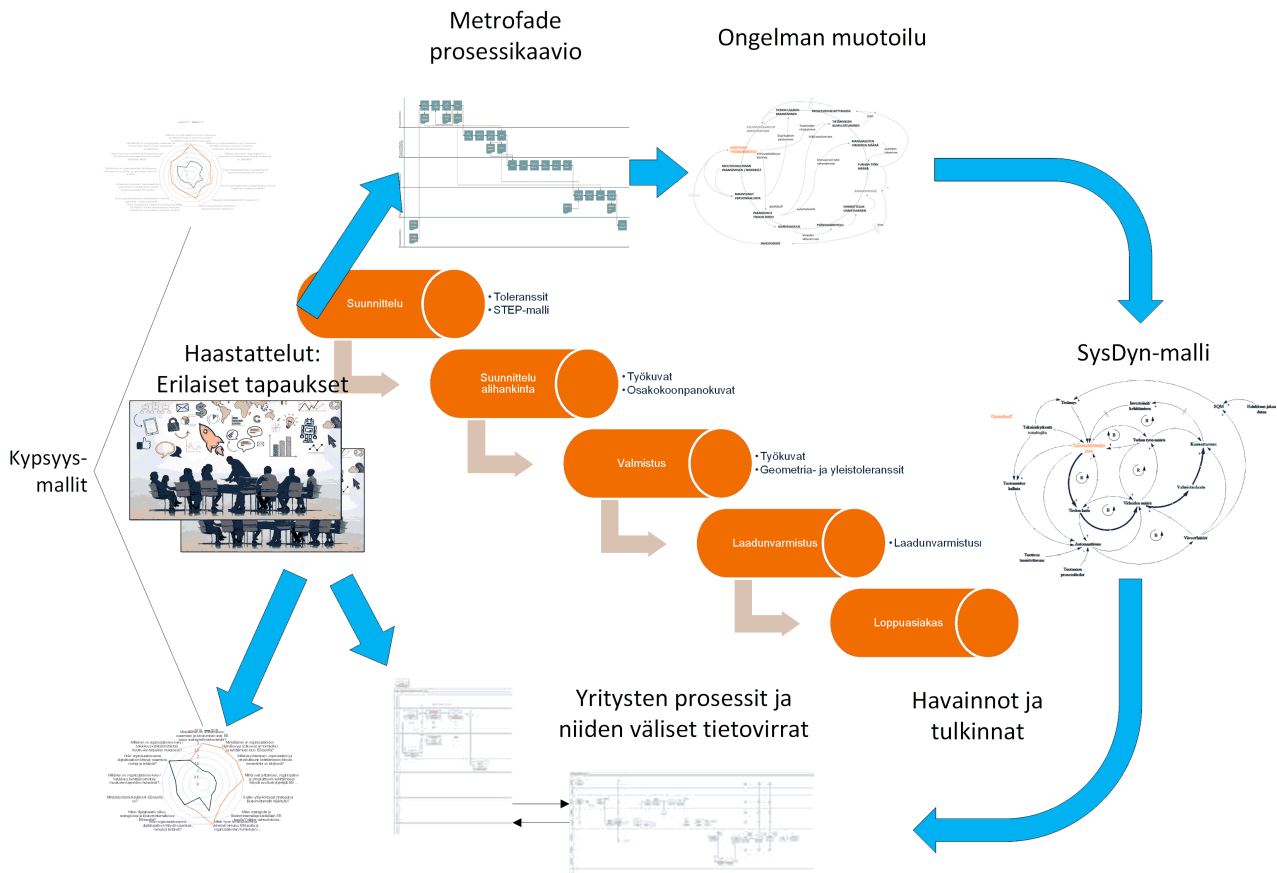


Kuva 38. Viisiportainen malli kohti datan jakamiseen perustuvaa älykästä valmistusekosysteemiä.

Mallinnusta varten haastateltiin toimittajayrityksiä, mutta todettiin pian se, että tarkat, todellisen liiketoiminnan mallit ovat luottamuksellisia. Lisäksi haastateltiin kahta toimittajayritystä aiemmassa projektissa (ks. Pulkkinen et al. 2019) kehitetyn digitaalisen laajennetun yrityksen (Digital Extended Enterprise) kypsyyss- ja kyvykkyyssmallia soveltaen. Lopuksi vertailtiin näissä projekteissa tapahtuneita kehitysaskelaita.

Luottamuksellisuuden ja koronatilanteen takia päädyttiin käyttämään VTT:n julkisen Metrofade -kehityshankkeen (Metrology based robust fatigue design) aineistoa esimerkkimateriaalina. Metrofade-projekti oli MIKESin vetämä VTT:n omarahoitteinen projekti, jossa demonstroitiin dimensionaalisten mittausten hyödyntämistä väsymiskriittisten hitsattujen rakenteiden suunnittelussa ja optimoinnissa, tuotemäärityksessä ja laadunvarmistuksessa. Metrofade-projektissa suunniteltiin todellisen hitsatun rakenteen kriittisiä hitsausliitoksia kuvaava mockup-rakenne, josta valmistettiin kaksi kymmenen kappaleen sarjaa, ja mitattiin rakenteista väsymiskriittisten hitsausliitosten sovitussuhteet useilla eri mittalaitteilla.

Alla (kuva 39) esitetään, kuinka sekä ÄVE-projektia edeltävät että projektissa tehdyt haastattelut sekä niiden perusteella tehdyt kypsyyss- ja prosessimallit edesauttoivat tapausten tulkitsemisessä, ongelman muotoilussa ja systeemidynaamisen mallin kehittämisessä. ÄVE-projektin yrityshaastattelujen perusteella oletettiin, että Metrofade-hankkeen toimitusketjut ovat riittävän samanlaisia ÄVE-yritysten toimitusketjujen kanssa. ÄVE-projektissa siis kuvattiin ja analysoitiin Metrofade-projektin aineiston avulla niitä vuorovaikutussuhteita ja ominaisuuksia, joita liittyy toimitusketjun toimintaan ja ominaisuuksiin.



Kuva 39. Tutkimuksen eteneminen kaaviokuvana.

Keskeiset tulokset

Systeemidynaamisen mallin avulla voitiin kuvata yritysten ja yritysverkoston rakenteellisia ja toiminnallisia ominaisuuksia. Malli perustuu prosessikuvauksiin uuden tuotesuunnitelman kehittämisen eri vaiheista, suunnitelmaa vastaavien tuotteiden hankinnoista, osavalmistuksesta ja laadunvarmistuksesta. Kyseisellä systeemidynaamisella mallilla kyettiin kuvaamaan kolme suunnittelun ja tuotannon kerrosta ja abstraktiotasoa:

1. Fyysinen tuote ja sen valmistus: Tuotesuunnitteluun, valmistukseen ja mittaamiseen liittyvä laatu ja epävarmuus
2. Tuotetieto ja sen virtaus: Mallipohjaisuus ja reaali-prosessien suunnittelu - tuotemäärittelyyn liittyvä epävarmuus
3. Dynaamisen liiketoimintasynteesin suunnittelu: Päätöksenteko, kommunikaatio, inhimilliset tekijät, viiveet, takaisinkytkennät, edellytykset ja vaikutukset

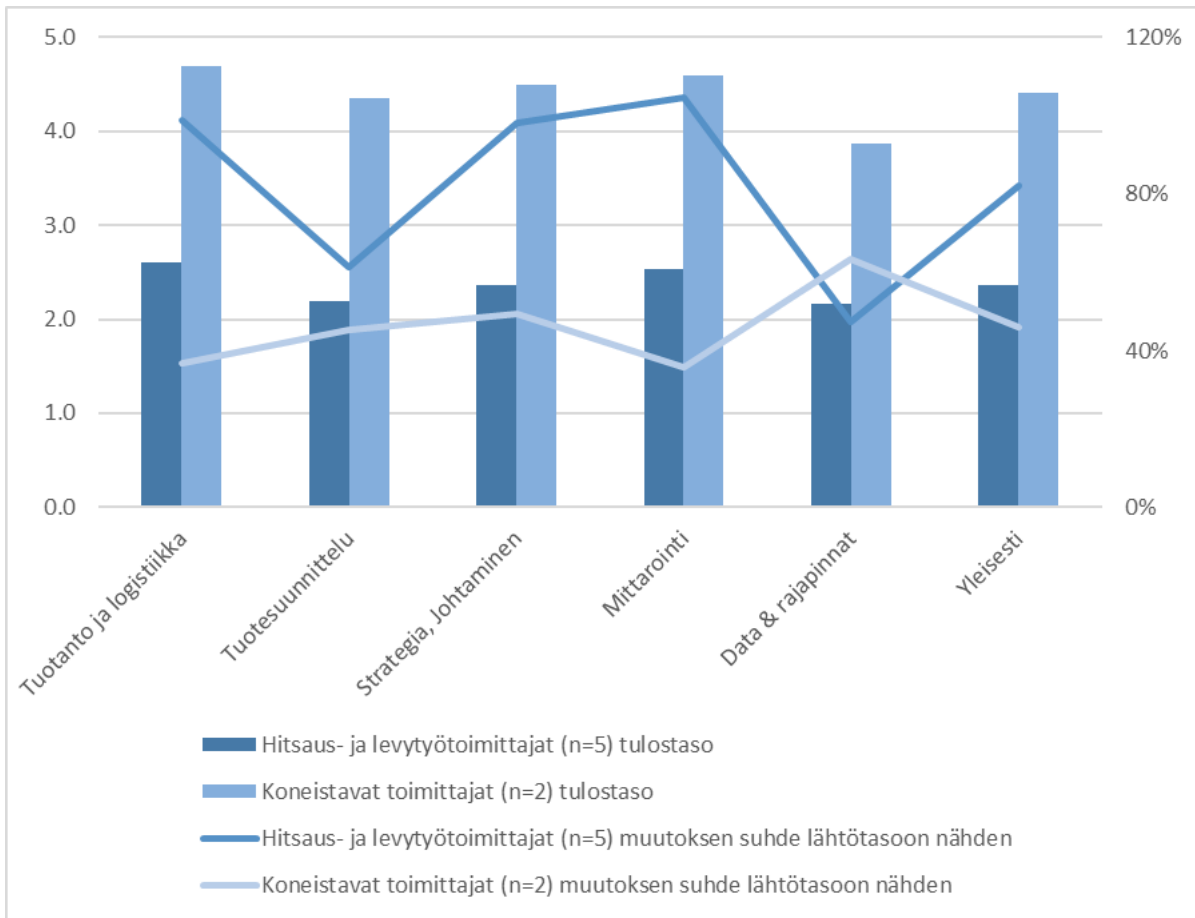
Metrofade-projektin konkreettinen tavoite oli määrittää kokonaiskustannus laadulle, tarkemmalle mittaamiselle ja toisaalta epävarmuudelle, josta kumpuaa laatuongelmia ja -kustannuksia. Toisaalta tavoitteena oli hahmottaa uudenlaisia digitalisaatiota soveltavia prosesseja laadun parantamiseksi ja kustannusten vähentämiseksi. Prosesseja mallintamalla tutkittiin, miten epävarmuutta kuljetetaan prosessien läpi ja mistä laatuongelmat ja poikkeamat johtuvat. Tämän lisäksi Metrofade-projektista havaittiin monia sellaisia organisaatioiden toimintaa ja vuorovaikutussuhteita kuvaavia seikkoja, jotka eivät välttämättä ratkea pelkästään digitalisaation avulla. Näitä on tarkemmin eritelty työpaketin erillisessä loppuraportissa (Pulkkinen et al. 2021).

Edellä esitetystä herää luonnollisesti kysymys: kuinka samankaltainen voi VTT:n tutkimusprojekti ja siitä tehty malli olla yritysten toiminnan kanssa? Käytännössä Metrofade-projektin prosessikuvaus vastaa pääpiirteissään niitä prosesseja, joita ÄVE-yrityksissä ja niiden välillä suoritetaan uusien suunnitelmien, hankintojen ja valmistuksen myötä jatkuvasti. Näin tutkitun aineiston suhteen samankaltaisia vuorovaikutuksia ja riippuvuuksia esiintyy käytännössä toistuvasti joko uusien tai muuttuneiden tuotesuunnitelmien myötä.

Erityisesti Metrofade-projektissa esiintynyt vesiputousmalli, kuten projektia mallinnettaessa todettiin ”putkimalli”, estää vuorovaikutuksen ja tiedonkulun osaprosessien aikana: keskeneräistä tuotemääritystä ei jaeta verkoston kesken, vaan siitä tehdyt yksityiskohtaiset valmistusdokumentit lähetetään suunnittelutyön loputtua valmistavalle yritykselle. ÄVE-verkoston yritysten toiminta poikkeaa kuitenkin jonkin verran tästä, koska vuorovaikutusta ”putkien välillä” esiintyy. Esimerkiksi valmistavan alihankkijayrityksen henkilö saattaa tarkentaa yksittäisen attribuuttitiedon arvon tilaajayrityksen suunnittelijalta tai jopa ehdottaa muutosta ko. arvoon. Tämänkaltainen vuorovaikutus ei ole yritysten välisessä tiedonsiirrossa kuitenkaan täysin systemaattista ja digitalisoitua. Tuotemääritystä koskevaa vuorovaikutusta esiintyy, mutta se perustuu usein yritysten omiin toimintamalleihin tai henkilöstön valvutuneisuuteen eikä välttämättä verkostossa yhteisesti sovittuihin systemaattiseen prosessiin. Tietojen jakaminen perustuu molemmissa tapauksissa (sekä Metrofade että ÄVE-projekti) sähköpostiviesteihin ja puheluihin, sekä dokumenttien ja mallien lähettämiseen. Näin prosessikäytännöt eivät tue metatiedon automaattista, aktiivista ja älykästä hyödyntämistä. Henkilöihin perustuvista vuorovaikutuksista jää myös harvoin jälki yritysten tietojärjestelmiin, jolloin esim. muutetusta tuotesuunnitelmasta voi eri yrityksissä olla toisistaan poikkeavia versioita – on tehty ns. ”pimeä muutos”. Sen sijaan taloudelliset transaktiot, kuten tilausten käsittely yritysten välillä, hoituvat lähes poikkeuksetta niitä varten kehitettyjen tietojärjestelmien avulla systemaattisesti.

Kun haastatteluiden perusteella tehtyjä kypsyysmalleja verrataan ajallisesti samanmittaiseen kehityshankkeeseen (ks. kuva 40) voidaan todeta, että koneistavat yritykset ovat keskimäärin levytöitä tekeviä yrityksiä kyvykkäämpiä kaikilla kypsyysmallin osa-alueilla. Voidaan olettaa, että koneistavat yritykset ovat toimintatavoissaan ja digitalisaatiossa pidemmällä kuin levytöitä tekevät yritykset.

Koneistavien yritysten kehitys ei kuitenkaan ollut suhteessa lähtötasoon yhtä suurta kuin levytöitä tekevillä yrityksillä oli samankaltaisessa, toki pienemmässä, hankkeessa. Vaikuttaa siltä, että pidemmälle edetessä kehitysaskelien ottaminen käy entistä haastavammaksi. Poikkeus tästä on yritysten välinen digitalisaatio ja vuorovaikutus verkoston rajapinnoilla, missä ÄVE-projektissa saavutettiin suhteellisesti suurin kehitysaskel. Havainto vahvistaa ÄVE-projektin tavoitteen: projektissa panostettiin suunnittelun ja valmistuksen vuorovaikutukseen, mm. mallipohjaiseen tuotemääritykseen. Näin ainakin systeemidynaamisen mallin kahdella ensimmäisellä abstraktitasolla (*Fyysinen tuote ja sen valmistus sekä Tuotetieto ja sen virtaus*) voidaan todeta kehitystä tapahtuneen ÄVE-projektissa. Tosin toiminta ja digitalisaation hyödyntäminen verkoston rajapinnoilla on edelleen muita kyvykkyyksiä alhaisemmalla kypsyystasolla, minkä vuoksi siihen on syytä edelleen panostaa.



Kuva 40. Vertailu kahden ÄVE-verkoston koneistavan yrityksen ja aiemman projektin levytöitä tekevän yritysten kypsyyss tasojen ja kehittymisen välillä.

Otanta on molemmissa tapauksissa pieni ja tutkimus perustuu subjektiivisiin arvioihin – toki vakioidulla kysymyspattereilla. Siksi haastatteluiden tuloksiin kannattaa suhtautua varauksella ja havaintojen vahvistaminen vaatisi laajempaa tutkimusta. Erityisesti houkutteleva ajatus on se, että systemidynaamisella mallilla voitaisiin kuvata ja simuloida liiketoiminnassa tehtäviä valintoja, kuten mitä todennäköisesti seuraa siitä, jos hankitaan komponentti yksikkökustannukseltaan edullisemmalta, mutta kyvykkyyksiltään heikommalta toimittajalta kuin jos hankitaan kyvykkyyksiltään paremmalta toimittajalta, jonka hintataso on korkeampi? Entä mikä voisi olla yritysten välisen vuorovaikutuksen, joka voi koskea tuotetta, tietoa tai päätöksentekotapoja, ominaisuuksilla toimittajan tuotelaatuun?

5. Tulevaisuuden haasteet

Project proposal:

DM³ Digital Materials, Manufacturing and Monitoring

Technology	Process	Cell	Service
Digital Materials Engineering	Heat treatment ProperTune [®]	QC/QA & NDT, eg. BNA	Traceability, Aftermarket QA, Predictive Maintenance, Prognostics,
Digital Manufacturing Processes	Manufacturing process Digital Twins	Digital Grinding Simulator	
Online Monitoring, Control & Quality Management	Adaptive control, QC/QA & Measurements	Manufacturing data collection & analysis	

Cybersecurity in networks - AI applications - Reconfigurability - Ecosystems management

Kuva 41. DM³ Konsepti.

Kuten tämä loppuraporttikin osoittaa, ÄVE-tutkimuskokonaisuudessa saavutettiin suuri määrä erinomaisia tuloksia, mutta myös uusia ajatuksia tutkimusaiheiksi. Luonnollinen kysymys kuuluukin: miten näitä ideoita voidaan vielä eteenpäin ÄVEN jälkeen. Vaikka tutkimusympäristö jossain määrin muuttuikin aivan v. 2020 lopulla, tutkimusosapuolten näkemys on, että uusia tutkimushankkeita voitaisiin suunnitella aiemmin esitellyn DM³-konseptin pohjalta, kuva 41.

Vahvana ytimenä on edelleen digitaalisuus valmistuksessa, mutta erona ÄVEen on entisestään korostunut laadun ja sen kokonaisvaltaisen hallinnan rooli. DM³:n kantavana ajatuksena on lähestyä digitaalisen valmistuksen haasteita kolmella tasolla, tai mittakaavassa: valmistusprosessi, valmistusyksikkö, esim. koneistussolu ja tuotteen käyttövaihe kentällä, ml. jäljitettävyyden ja sen mahdollistama ennakoiva kunnossapito. Kaikilla näillä tasoilla sovelletaan digitaalisen materiaalitekniikan, valmistusmenetelmien sekä mittaus- ja anturointitekniikan ratkaisuja.

Näihin teknologia-alue liittyvät kiinteästi läpileikkaavina teknologioina kyberturvallisuus erityisesti verkostoissa, tekoälysovellukset ja niiden mahdollistamat nopeat tuotanto- ja asetuserämuutokset nopeissa tuotemuutoksissa eli vaihdettaessa valmistettavaa tuotetta, sekä verkostojen ja ekosysteemien hallinta. Tutkimusaiheita voidaan lähteä valmistelemaan esimerkiksi MEXFinlandin kautta tai yhteisrahoitteisilla hankkeilla Business Finlandin eri tutkimusohjelmissa, mutta erityisesti on syytä muistaa myös kuluvana vuonna täydellä vauhdilla liikkeelle lähtevä monivuotinen eurooppalainen Horizon Europe -puiteohjelma. Mahdollisuuksia on lukuisia, nyt on aika lähteä hyödyntämään niitä yhdessä!

ÄVE-projektin julkaisut

Adlin, N., Nylund, H., Lanz, M., Lehtonen, T., & Juuti, T. (2020). *Lean Indicators for Small Batch Size Manufacturers in High Cost Countries*. In *Procedia Manufacturing* (Vol. 51).

Chakraborti, A., Heininen, A., Koskinen, K., Lämsä, V. (2020). *Digital twin: a dimension reduction method for performance optimization of the virtual entity*. CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2020, Chicago, United States.

Chakraborti, A., Heininen, A., Väänänen, S., Vainio, H., Koskinen, K., *Evidential Reasoning based Digital Twins for Performance Optimization of Complex Systems*, CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2021, lähetetty.

Clotet Matamala, J. (2019): *PMI/MBD data in robust design*. Thesis work 5/2019 (Tampere University of Applied Sciences)

Haavisto, T. *Hybridivalmistus NC-työstökoneella – menetelmien integrointi ja virtuaalinen malli*. Tampereen yliopisto, diplomityö 2021.

Heininen, A., Prod'hon, R., Mokhtarian H., Coatanéa, E., Koskinen, K., *Finite element modeling of temperature in cylindrical grinding for future*. CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2021, lähetetty.

integration in a digital twin

Isakov, M., Lehtovaara, A., Kuokkala, V., *Koneenosien väsymisominaisuuksien määrittämismenetelmien kehitystyö Tampereen yliopistossa*, Materia, käsikirjoitus lähetetty

Isakov, M, Terho, S, Kuokkala, V-T. 2020. *Low-Cycle Impact Fatigue Testing Based on an Automated Split Hopkinson Bar Device*, 19th International Conference on Fracture and Damage Mechanics-konferenssin yhteydessä, webinaari 15.-17.9.2020, AIP Conference Proceedings 2309, 020021 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0034182>.

Lindroos, M, Laukkanen, A, Andersson, T, Vaara, J, Mäntylä, A, Frondelius, T, Forest, S. 2019. *Micromechanical modelling of plasticity and damage of martensitic steels in high-cycle fatigue conditions*.

Lindroos, M, Pinomaa, T., Andersson, T., Yaschuk, I., Laukkanen, A., Forest, S. 2019. *On the linking performance evaluation toolset to process-structure-properties mapping of selective laser melting 316L stainless steel using micromechanical approach with a length-scale dependent crystal plasticity*. In Euro PM2019 Congress and Exhibition, European Powder Metallurgy Association. 6 p.

Muhammad Amir, *Estimation of Material Properties Using Machine Learning*, Tampereen Yliopisto, Diplomityö 2020.

Mulari, L. *Projektien merkitys strategisessa hankinnassa*. Tampereen yliopisto, diplomityö 2021.

Mämmelä, J., *Technology value mapping (TVM): Method for Designing Technology Value Capture by Visually Modelling Product Properties and Behaviours*. Tampereen yliopisto, väitöskirja 2019.

Peltola, J. *Koneistettavan kappaleen mallipohjainen tuotemäärittely*. Diplomityö, TAU 2020.

Pulkkinen, A., Anttila, J-P., Leino, S-P. *Assessing the maturity and benefits of digital extended enterprise*, *Procedia Manufacturing*, Volume 38, 2019, Pp.1417-1426, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.146>.

Pulkkinen, A., Leino, S-P., Rantala, O., Kokkonen, P., Hemming B., Sirén M. *Toimitusketjun digitaalinen kaksonen*. Tutkimusrapotti. VTT. 2021.

Rantalainen, O. *Väsytyскоelaitteen suunnittelu*, Tampereen Yliopisto, Diplomityö, 2020

Santa-aho, S., *Korjataanko vai parannetaanko? Ainetta rikkomattomat menetelmät paljastavat puutteet toimitusketjussa*, Promaint - kunnossapidon ja tuotannon erikoislehti, 2021

TAMK tutkii koneenvalmistuspiirustusten korvaamista digitaalisella mallilla (2020). Tampereen korkeakouluyhteisö. Eurometalli 3/2020

TAU, TAMK, VTT. *ÄVE Tulokset 2019*

Uski, P., Pulkkinen, A., Hillman, L., Ellman, A.: *Issues on Introducing Model-Based Definition - Case of Manufacturing Ecosystem*. Part of the IFIP Advances in Information and Communication Technology book series (IFIPAICT, volume 594).

Weper, S. 2019. *Analysis and Implementation of Product Manufacturing Information at TAMK*. Thesis work 5/2019 (Tampere University of Applied Sciences)