

Ohjeistus inhimilliset tekijät huomioivien
digitaalisten kaksosten suunnitteluun ja
toteutukseen teollisuudessa

HumanDT Guideline

Maaliskuu 2026 (v1)

Kirjoittajat

Jesús M. López de Ipiña Peña [TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA)]

Paula Morella Avinzano [TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA)]

Ilkka Asikainen (Työterveyslaitos)

Marika Lehtola (Työterveyslaitos)



Tiivistelmä

Digitaalinen kaksonen (Digital Twin, DT) -teknologia on yleistymässä valmistavan teollisuuden alalla. Sen käyttöönotto liittyy ensisijaisesti vaativiin toimintoihin, kuten prosessien optimointiin ja tuotannonsuunnitteluun, energiatehokkuuden hallintaan, laadunvarmistukseen ja nollavirhestrategian toteuttamiseen, dynaamiseen prosessien uudelleenkonfigurointiin, ennakoivaan huoltoon sekä uusien liiketoimintamallien kehittämiseen. Työterveyden ja -turvallisuuden näkökulmasta DT-sovellukset ovat tähän asti painottuneet erityisesti dynaamiseen ja jatkuvaan riskien seurantaan ja arviointiin, turvallisuuden varmistamiseen ihminen–robotti-yhteistyöympäristöissä (HRC) sekä immersiiiviseen virtuaalikoulutukseen.

Industry 5.0 (I5.0) -paradigma asettaa ihmisen tuotantojärjestelmien keskiöön. Tämä edellyttää inhimillisten tekijöiden (HF) tietoista ja järjestelmällistä integrointia kehittyneiden teknologioiden, kuten digitaalisten kaksosten, suunnitteluun. Integrointi ei kuitenkaan ole suoraviivaista: se vaatii syvällistä ymmärrystä työntekijöiden todellisista rajoituksista, kyvykkyyksistä ja tarpeista, eli osa-alueesta, jota ei perinteisesti ole pidetty teollisten järjestelmien suunnittelun lähtökohtana. Aidosti ihmiskeskeisiin (Human-centric, HC) ratkaisuihin siirtyminen edellyttää uusia menetelmiä, monitieteisiä työkaluja sekä tiivistä yhteistyötä teknisten ja käyttäytymistieteiden välillä. Ihmisen asettaminen keskiöön on välttämätöntä, mutta haastaa omaksumaan uudenlaisia lähestymistapoja.

Tämän ohjeistuksen tavoitteena on tarjota käytännönläheisiä suosituksia turvallisten, eettisten ja ihmiskeskeisten digitaalisten kaksosten (Human-centric Digital Twins, HC-DT) suunnitteluun ja toteutukseen I5.0-periaatteiden mukaisesti.

Ohjeistus toimii johdantotason tietopakettina, joka tarjoaa alustavan kokonaiskuvan ihmiskeskeisten digitaalisten kaksosten suunnittelun keskeisistä tekijöistä. Se esittää peruskäsitteisiin pohjautuvan viitekehyksen, mutta ei voi kattaa kaikkia niitä haasteita, jotka liittyvät inhimillisten tekijöiden täysipainoiseen integrointiin tällaisiin järjestelmiin. Aidosti ihmiskeskeinen suunnittelu (Human-centric design, HCD) vaatii syvempää monitieteistä analyysia ja kehittyneitä työkaluja. Tämä ohjeistus tulee nähdä lähtökohtana — ei kokonaisratkaisuna.

Ohjeistus on HumanDT-hankkeen päätulos. Hankkeen toteuttivat vuosina 2024–2025 Fundación TECNALIA Research and Innovation (TECNALIA) ja Työterveyslaitos. Rahoituksen myönsivät Basque Institute for Occupational Safety and Health (OSALAN) ja Työsuojelurahasto (FWEF) SAFERA 2024 -haun puitteissa ("Health and safety implications of industrial digital twins and algorithmic management").

Asiakirja rakentuu kolmesta kokonaisuudesta:

1. **Digitaalisen kaksosten teknologian perusteet ja sovellukset**, jossa kuvataan digitaalisen kaksosen käsite ja sen keskeiset ominaisuudet.
2. **Inhimilliset tekijät ja digitaalinen kaksonen: kohti Industry 5.0 -visiota**, jossa esitellään HF- ja HCD-periaatteet sekä niiden soveltaminen I5.0-kontekstissa.

3. **Ihmiskeskeisten periaatteiden käytännön toteutus digitaalisten kaksosten suunnittelussa**, jossa annetaan ohjeita näiden näkökulmien soveltamiseksi aidosti ihmiskeskeisten digitaalisten kaksosten kehittämisessä.

Ohjeistusta täydentää laaja liiteosio, joka sisältää sanaston, ei-tyhjentävän listan digitaalisen kaksosen HCD:hen sovellettavista standardeista, oppaan laatimisessa käytetyt työkalut sekä koottuja käyttötapauksia, joissa valmistavan teollisuuden yritykset jakavat kokemuksia DT-tekniikan hyödyntämisestä teollisten prosessien tukena.

Tämä ohjeistus on ensisijaisesti suunnattu digitaalisen kaksosten -tekniikan suunnittelijoille ja soveltajille valmistavan teollisuuden ympäristöissä, joissa ihmiskeskeinen näkökulma tulee huomioida jo DT-suunnittelun alkuvaiheista lähtien. Lisäksi se soveltuu yrityksille, jotka ottavat käyttöön DT-ratkaisuja ja voivat hyödyntää ohjeistusta viitekehysinä kehittäessään ihmiskeskeisiä suunnittelukäytäntöjä. Ohjeistus palvelee myös muita sidosryhmiä, kuten työturvallisuus- ja työterveysammattilaisia, työterveys- ja työturvallisuuspalveluja, toimivaltaisia viranomaisia sekä tutkimusorganisaatioita, tarjoamalla jäseneltyä tukea DT-tekniikan turvalliseen, tehokkaaseen ja ihmiskeskeiseen käyttöön.



Johdanto

Digitaalinen kaksonen (DT) on mahdollistava teknologia teollisessa murroksessa, erityisesti valmistavan teollisuuden ympäristöissä. Sen sovellukset ulottuvat tuotannon optimoinnista organisaatiotason innovaatioihin. Työterveyden ja -turvallisuuden alueella sovellukset ovat vielä alkuvaiheessa ja ovat keskittyneet erityisesti työperäisten riskien dynaamiseen seurantaan ja arviointiin, turvallisuuden varmistamiseen robottien kanssa tehtävässä yhteistyössä sekä immersiiivisiin virtuaalikoulutusratkaisuihin.

Digitaaliset teknologiat, kuten digitaalinen kaksonen, voivat parantaa merkittävästi tuottavuutta ja turvallisuutta uusissa Industry 5.0 -ympäristöissä, mutta ne voivat samalla tuoda mukanaan uusia riskejä, jotka voivat hidastaa niiden käyttöönottoa. Yksi ehdotetuista strategioista digitaalisaation aiheuttamien työperäisten riskien ehkäisemiseksi ja lieventämiseksi on ihmiskeskeisen (HC) lähestymistavan omaksuminen jo digitaalisen järjestelmän suunnitteluvaiheessa ja huomioimalla sen koko elinkaari (HC by design).

Ihmiskeskeinen suunnittelu (HCD) asettaa ihmiset suunnitteluprosessin keskiöön ja pyrkii optimoimaan ihmisen ja koneen välisen vuorovaikutuksen, jotta ratkaisut vastaavat käyttäjien todellisia kyvykkyyksiä ja rajoituksia, säilyttävät heidän autonomiansa ja kontrollinsa ja vahvistavat ihmisen roolia teollisessa prosessissa.

HCD pyrkii minimoimaan työntekijöiden fyysisen ja henkisen kuormituksen, vähentämään inhimillisten virheiden ja toimintavaurioiden riskiä sekä lisäämään teollisten järjestelmien turvallisuutta ja tuottavuutta. Tässä yhteydessä suunnittelu perustuu työntekijöiden todellisiin tarpeisiin, ei pelkästään "koneen ehdoilla" toimimiseen. Tavoitteena on luoda tehokkaita ja kilpailukykyisiä valmistusympäristöjä, jotka edistävät samanaikaisesti työntekijöiden turvallisuutta ja hyvinvointia (Industry 5.0 -ympäristöt).

HCD:n ydin ja keskeinen voimavara ovat **inhimilliset tekijät (HF)**. HF juontaa juurensa yhteiskuntatieteistä ja pyrkii ymmärtämään ja parantamaan ihmisen ja järjestelmän välistä vuorovaikutusta. Vaikka HF on huomioitu teollisten järjestelmien suunnittelussa aloilla kuten ilmailu ja energia, sen rooli valmistavan teollisuuden suunnittelussa (Industry 4.0) on yhä rajallinen ja painottunut pääasiassa fyysiseen ergonomiaan.

Sekä HCD että siihen liittyvät HF ovat suunnittelijoille osin uusia ja niiden tuntemiseen, arviointiin ja käytännön toteutukseen liittyy teknisiä, organisatorisia ja kulttuurisia haasteita. Tästä syystä HCD-menetelmät (esim. ISO 9241-210) sisältävät kontekstuaalista tutkimusta, kognitiivista mallinnusta, iteratiivista prototypointia ja käytettävyydestä, jotta käyttöliittymät vastaavat käyttäjien

havaintokykyjä ja kognitiivisia valmiuksia. Tämä edellyttää moniammatillisten suunnittelutiimien hallintaa.

Valmistuksen digitaalinen kaksonen (ISO 23247) on monimutkainen digitaalinen järjestelmä, joka yhdistää laitteiston ja ohjelmiston ja tuottaa dynaamisen ja kytketyn digitaalisen esityksen prosessista. Järjestelmä pystyy seuraamaan, ennustamaan ja optimoimaan prosessin käyttäytymistä. Digitaalisten kaksosten teknologia keskittyy ensisijaisesti prosessin suorituskykyyn ja operatiiviseen tehokkuuteen. **Ihmiskeskeinen digitaalinen kaksonen (HC-DT)** lisää suunnitteluun uuden toiminnallisen tason, inhimillisten tekijöiden kerroksen, jonka tavoitteena on parantaa ihmisen vuorovaikutusta valmistusjärjestelmän kanssa ja helpottaa järjestelmän sopeutumista työntekijöiden kyvykkyyksiin.

Tässä yhteydessä tämän ohjeistuksen tarkoituksena on tarjota yleisiä periaatteita, menetelmällisiä suuntaviivoja ja käytännön suosituksia HCD- ja HF-periaatteiden soveltamiseen digitaalisten kaksosten suunnittelussa ja toteutuksessa, tavoitteena turvalliset, eettiset ja ihmiskeskeiset digitaaliset ratkaisut, jotka ovat linjassa Industry 5.0 -periaatteiden kanssa. Käytännössä ohjeistus pyrkii vastaamaan kolmeen keskeiseen kysymykseen suunnittelijan näkökulmasta:

1. Mikä on digitaalinen kaksonen valmistusympäristössä ja mitkä ovat sen keskeiset ominaisuudet?
2. Mitä ovat inhimilliset tekijät ja ihmiskeskeinen suunnittelu, ja miten näitä konsepteja sovelletaan uusien Industry 5.0 -järjestelmien kehittämisessä?
3. Miten nämä periaatteet voidaan integroida digitaalisten kaksosten ihmiskeskeiseen suunnitteluun?

Näitä teemoja käsitellään mahdollisimman kattavasti dokumentin kolmessa pääosiossa.

Tämä ohjeistus on luonteeltaan johdantotason asiakirja eikä voi kattaa kaikkia digitaalisten kaksosten ihmiskeskeiseen suunnitteluun liittyviä kysymyksiä. Monimutkaisten teollisten järjestelmien suunnittelussa suunnittelijan on todennäköisesti hyödynnettävä myös edistyneempiä menetelmiä.

Asiakirja koostuu kolmesta pääosiosista ja erillisestä liiteosiosista. Ensimmäinen osa esittelee digitaalisen kaksosen käsitteen ja sen sovellukset valmistavassa teollisuudessa. Toinen osa tarkastelee HF-pohjaista HCD-lähestymistapaa ja sen suhdetta Industry 5.0 -näkömykseen. Kolmas osa esittelee seulontamenetelmän, jonka avulla voidaan nopeasti tunnistaa digitaalisen kaksosen suunnitteluun vaikuttavat inhimilliset tekijät ja tarjota alustavia ohjeita niiden huomioimiseksi. Lopuksi liiteosio sisältää lisätyökaluja ja -resursseja, muun muassa käytännön esimerkkitapauksia DT-teknologian soveltamisesta eri teollisissa prosesseissa.

Tämä ohjeistus on tarkoitettu ensisijaisesti digitaalisen kaksonen -teknologian suunnittelijoille ja integraattoreille valmistavassa teollisuudessa, joiden tulee omaksua ihmiskeskeinen lähestymistapa jo suunnittelun alkuvaiheessa. Ohjeistus soveltuu myös yrityksille, jotka ottavat käyttöön DT-ratkaisuja ja voivat hyödyntää sitä viitekehyksenä toimintatapojensa kehittämiseen. Lisäksi ohjeistuksesta voivat hyötyä muut sidosryhmät, kuten turvallisuusalan ammattilaiset, työsuojelupalvelut, viranomaiset ja tutkimusorganisaatiot.

HumanDT-ohjeistus on SAFERA 2024 -projektin lopputulos. Projekti “Safe, Sustainable and Human-Centric design and implementation of Digital Twin technology to improve occupational health and safety in new Industry 5.0 manufacturing processes and workplaces (HumanDT)” toteutettiin TECNALIA Research and Innovation Foundationin (TECNALIA) ja Työterveyslaitoksen (FIOH) yhteistyönä.

Asiakirja keskittyy valmistavaan teollisuuteen, joka on Euroopan teollisuuden strateginen sektori. Digitaalisten kaksosten odotetaan olevan keskeinen ajuri teollisuuden sekä digitaalisen että vihreän siirtymän edistämässä kohti kiertotalouteen perustuvaa ja kilpailukykyistä taloutta. Ohjeistuksen lähestymistapaa voidaan kuitenkin soveltaa myös muihin digitaalisiin ratkaisuihin ja teollisuudenaloihin.

Ohjeistuksen päätavoitteena on edistää ihmiskeskeisten digitaalisten kaksosten käyttöönottoa valmistavassa teollisuudessa ja siten tukea tietoisempia, joustavampia ja yhteistyöhön perustuvia tuotantoprosesseja, jotka parantavat kilpailukykyä, turvallisuutta ja hyvinvointia. Ohjeistuksella on vahva teollinen kytkentä, sillä sitä on täydennetty yritysten kokemuksilla DT-teknologian käytöstä omien tuotantoprosessiensa kehittämässä.

Kiitokset

HumanDT-hanke on kehitetty yhteistyössä Fundación TECNALIA Research and Innovation (TECNALIA) -tutkimuslaitoksen ja Työterveyslaitoksen (FIOH) kanssa.

Hanke on saanut rahoitusta Baskimaan työturvallisuus- ja työterveysinstituutilta (OSALAN) sekä Työsuojelurahastolta (FWEF) osana SAFERA 2024 -rahoituskierrosta.

Lisäksi seuraavat yritykset ovat antaneet merkittävän panoksen HumanDT-hankkeeseen osallistumalla haastatteluihin, tarjoamalla tapausesimerkkejä sekä kommentoimalla ohjeistuksen loppuversiota:

- SIEMENS Industry Software, S.L.
- AVANZARE Advanced Materials
- ANTOLIN
- OPTIMITIVE
- ELECTROINGENIUM
- Fundacion TECNALIA Research and Innovation

Haluamme esittää syvimmän kiitoksemme kaikille tähän hankkeeseen osallistuneille organisaatioille.

Project partners



Project funders



Project collaborators



Project call



2024

Sisällysluettelo

KIRJOITTAJAT	2
TIIVISTELMÄ.....	3
JOHDANTO	5
KIITOKSET	8
SISÄLLYSLUETTELO	9
KUVAT	10
TAULUKOT.....	11
LYHENTEET.....	12
OHJEISTUKSEN TAVOITE.....	13
1. DIGITAL TWIN -TEKNOLOGIAN PERUSTEET JA SOVELLUKSET VALMISTAVASSA TEOLLISUUDESSA.....	14
1.1. DIGITAALISEN VASTINEEN TASOT: DIGITAALINEN MALLI, DIGITAALINEN VARJO JA DIGITAALINEN KAKSONEN	16
1.2. DIGITAALISEN KAKSOSEN HYÖDYT JA TOTEUTUKSEN ESTEET	17
1.3. DIGITAALISEN KAKSOSEN SOVELLUKSET VALMISTAVASSA TEOLLISUUDESSA	17
1.4. SIDOSRYHMIEN NÄKÖKULMA: DIGITAALISTEN KAKSOSTEN SUUNNITTELIJAT, INTEGROIJAT JA LOPPUKÄYTTÄJÄT	20
1.5. HAASTEET JA KÄYTTÖNOTTOSUOSITUKSET DIGITAALISILLE KAKSOISILLE VALMISTAVASSA TEOLLISUUDESSA	22
2. INHIMILLISET TEKIJÄT JA DIGITAALINEN KAKSONEN: KOHTI INDUSTRY 5.0 -VISIOTA 24	
2.1 HUMAN-CENTRED DESIGN (HCD)	24
2.2 INHIMILLISET TEKIJÄT (HUMAN FACTORS, HF).....	26
2.3 HF-RISKI	27
2.4 IHMISKESKEINEN SUUNNITTELU JA INHIMILLISET TEKIJÄT SUHTEESSA I5.0-PARADIGMAAN	27
3. IHMISKESKEISTEN PERIAATTEIDEN IMPLEMENTOINTI DIGITAALISTEN KAKSOSTEN SUUNNITTELUSSA.....	36
4. JOHTOPÄÄTÖKSET	43
LÄHTEET	44
LIITTEET	48
USE CASE No. 1: ADVANCES OF DIGITALIZATION ON INTERIOR AUTOMOTIVE MANUFACTURING	55
USE CASE No. 2: VIRTUAL REALITY AND HUMAN SIMULATION AT GENERAL MOTORS	60
USE CASE No. 4: REAL-TIME OPTIMIZATION OF VERTICAL CEMENT MILL	67
USE CASE No. 5: TOWARDS SAFER AND MORE SUSTAINABLE GRAPHENE OXIDE MANUFACTURING	72
LIITE 3. HUMANDT TYÖKALUT	79
1. HF TOOL	80
2. INHIMILLISTEN TEKIJÖIDEN TARKISTUSLISTA	82
3. RISKIMATRIISI	90
4. INHIMILLISIIN TEKIJÖIHIN LIITTYVIEN RISKIEN HALLINNAN TEKNISTEN STRATEGIOIDEN KOOSTE	91

Kuvat

Kuva 1. 5D Digitaalisen kaksosen käsitteellistäminen	15
Kuva 2. Erot Digitaalisen mallin, Digitaalisen varjon ja Digitaalisen kaksosen välillä ...	17
Kuva 3. Käsitteellinen viitekehys ihmiskeskeisten digitaalisten järjestelmien suunnitteluun (mukaillen EN ISO 9241-210)	25



Taulukot

Taulukko 1. DT määritelmät	14
Taulukko 2. DT teknologian sovellusalueet työturvallisuudessa	19
Taulukko 4. Esteet Digitaalisten kaksosten käyttöönotolle	20
Taulukko 5. Inhimillisten tekijöiden tarkistuslistan rakenne. Koko taulukko liitteessä 3.33	
Taulukko 6. Inhimillisiin tekijöihin liittyvien riskien hallinnan teknisten strategioiden kooste	41



Lyhenteet

AI	Tekoäly (Artificial Intelligence)
CEN	Euroopan standardointikomitea (European Committee for Standardization)
DT	Digitaalinen kaksonen (Digital Twin)
EC	Euroopan komissio (European Commission)
EU-OSHA	Euroopan työterveys- ja turvallisuusvirasto (European Agency for Safety and Health at Work)
GDPR	EU:n yleinen tietosuoja-asetus (General Data Protection Regulation)
HC	Ihmiskeskeinen (Human-centric)
HCbD	Human-centric by design
HCD	Human-centric design
HC-DT	Human-centric Digital Twin
HF	Inhimilliset tekijät (Human factors)
I5.0	Industry 5.0
ISO	Kansainvälinen standardisointijärjestö (International Standardization Organization)
OSH	Työterveys ja turvallisuus (Occupational Safety and Health)
SbD	Safe-by-Design
SSbD	Safe and Sustainable by Design
UNE	Spanish Association for Standardisation

Ohjeistuksen tavoite

Tämän ohjeistuksen tarkoituksena on tarjota rakenteistettua ohjausta ja käytännön suosituksia turvallisten, eettisten ja ihmiskeskeisen digitaalisten kaksosten (Human-centric Digital Twin, HC-DT) suunnitteluun ja toteutukseen, linjassa Industry 5.0:n periaatteiden ja arvojen kanssa.

Inhimilliset tekijät (Human Factors, HF) asetetaan tässä ohjeistuksessa keskeiseen rooliin osana ihmiskeskeistä suunnittelua (Human-centric design, HCD). Niiden huomiotta jättäminen DT-sovelluksissa voi tuoda mukanaan riskejä. Inhimillisten tekijöiden integrointi suunnitteluprosessiin alusta alkaen on tärkeää, jotta vältetään negatiiviset vaikutukset työntekijöiden turvallisuuteen, terveyteen ja hyvinvointiin, kun DT-teknologioita sovelletaan.

Tämä ohjeistus tarjoaa johdantotasaisen ja alustavan kokonaiskuvan ihmiskeskeisen digitaalisen kaksosen (HC-DT) suunnittelun keskeisistä periaatteista. Se esittää käsitteellisen ja menetelmällisen perustan, mutta ei kata kaikkia niitä monimutkaisia osa-alueita, jotka liittyvät inhimillisten tekijöiden täysipainoiseen huomioimiseen digitaalisten kaksosten suunnittelussa. Aidosti ihmiskeskeisten ratkaisujen saavuttaminen edellyttää syvempää monitieteistä analyysia ja edistyneitä menetelmiä, jotka ylittävät tämän dokumentin laajuuden. Tämän vuoksi ohjeistusta tulisi pitää lähtökohtana ja alustavana panoksena ihmiskeskeisen digitaalisen kaksosen suunnittelukäytäntöjen kehittämiseksi.

Asiakirja keskittyy valmistavaan teollisuuteen, joka on Euroopassa keskeinen toimiala ja jossa digitaalisten kaksosten odotetaan tukevan sekä digitaalista että vihreää siirtymää. Ehdotettua lähestymistapaa voidaan kuitenkin soveltaa myös muihin digitaalisiin ratkaisuihin ja teollisuudenaloihin.

1. Digital Twin -teknologian perusteet ja sovellukset valmistavassa teollisuudessa

Digital Twin (DT) ovat strategisia työkaluja operatiivisen tehokkuuden parantamiseen, ennakoivan huollon mahdollistamiseen, tuotteen elinkaaren optimointiin sekä kestävien ja ihmislähtöisten käytäntöjen edistämiseen. Vaikka suuret yritykset johtavat niiden käyttöönottoa, pk-yritykset osoittavat kasvavaa kiinnostusta, kun niille tarjotaan räätälöityjä viitekehyksiä ja ohjeita.

Tämä osio kokoaa yhteen DT:n peruskäsitteet valmistustavan teollisuuden alalla. Se pyrkii kuvaamaan käytännöllisellä ja yksinkertaisella tavalla, mitä DT on, mitä etuja se tarjoaa ja mitkä ovat sen sovellukset.

1.1 Digitaalinen kaksonen

Termin DT otti ensimmäisen kerran käyttöön Michael Grieves 2000-luvun alussa Michiganin yliopistossa Product Lifecycle Management (PLM) -esityksessä. Grieves ehdotti ajatusta digitaalisesta vastineesta fyysiselle tuotteelle elinkaaren hallinnan parantamiseksi.

Käsite sai jalansijaa, kun NASA otti sen käyttöön avaruusalusten simulointiin ja seurantaan, erityisesti Apollo-ohjelman aikana, ja myöhemmin virallistettiin vuoden 2012 tiekarttaan edistyneestä mallinnuksesta ja simulaatiosta.

Sen jälkeen termi on kehittynyt kattamaan kaksisuuntaisen tiedonvaihdon fyysisten ja virtuaalisten entiteettien välillä, mahdollistaen reaaliaikaisen synkronoinnin, ennakoivan analytiikan ja optimoinnin Industry 4.0 -konteksteissa.

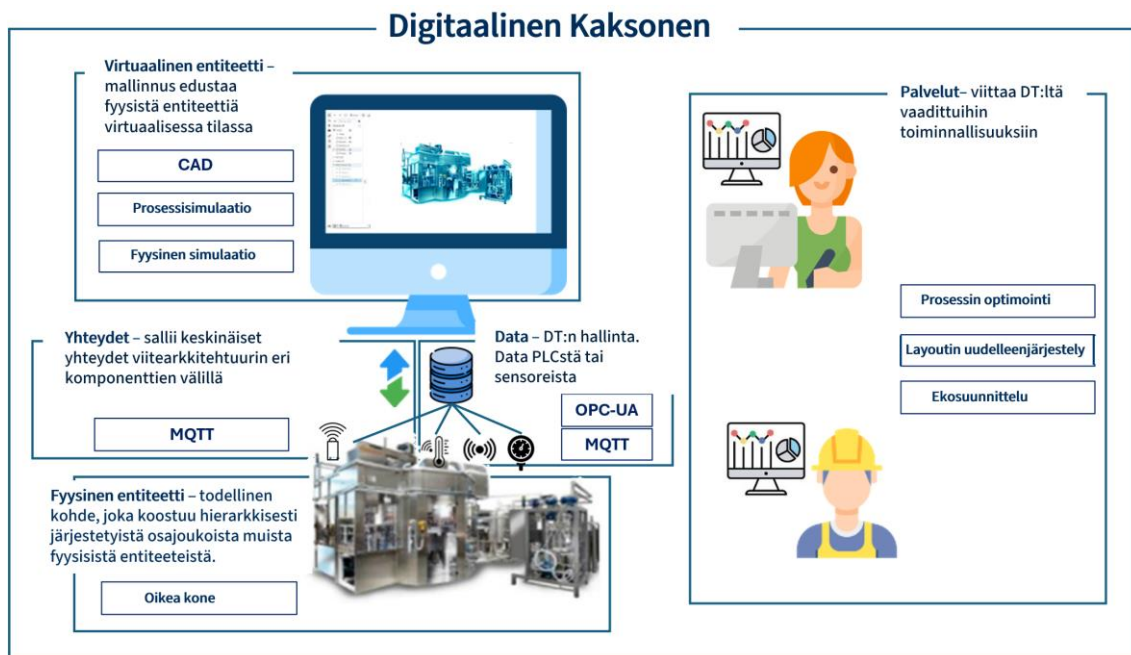
Vaikka niiden merkitys kasvaa, DT:n määrittely on edelleen monimutkainen käsite kirjallisuudessa esiintyvien tulkintojen monipuolisuuden vuoksi. Eri alat – erityisesti valmistava teollisuus – tarjoavat erilaisia määritelmiä ja näkökulmia. Taulukko 1 esittää kaksi DT-määritelmää, jotka on kehitetty vastaavista ISO-standardeista: toinen perustuu ISO/IEC 30173:ssa kuvattuun yleiseen lähestymistapaan [38], ja toinen johdettu ISO 23247-1:n [28] valmistussuuntautuneesta viitekehyksestä. Molempia määritelmiä pidetään merkityksellisinä tässä teoksessa. Lisäksi kuva 1 esittää DT:n käsitteellisen viitekehyksen valmistuksessa toisen standardin ehdottamana.

Taulukko 1. DT määritelmät

Standardi	Määritelmä
ISO 23247-1:2021 [28]	A DT is a digital model tailored for a specific use, that mirrors an observable manufacturing component and stays synchronized with its real-world counterpart, as stipulated in ISO 23247-1:2021.
ISO/IEC 30173:2023 [38]	DT on digitaalinen esitys fyysisestä asiantilasta, jossa datayhteydet pitävät virtuaaliset ja todelliset tilat linjassa sopivalla synkronointinopeudella. Digitaalinen kaksonen voi sisältää erilaisia ominaisuuksia, kuten yhteyden, integraation, analyysin, simuloinnin, visualisoinnin, optimoinnin ja yhteistyötoiminnot, kuten ISO/IEC 30173:2023 kuvataan.

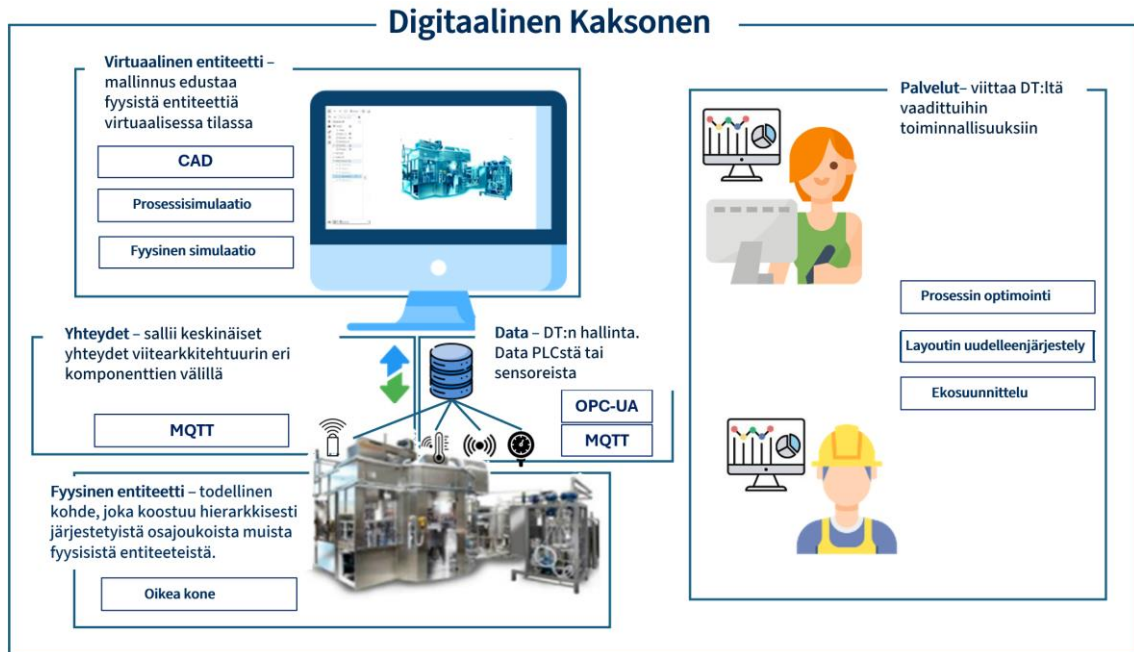
Perustuen kahteen standardipohjaiseen määritelmään ja Digital Twin Consortiumin [8] ehdottamaan määritelmään, ohjeistus tarjoaa tiiviin määritelmän DT-käsitteelle, joka esitetään alla.

Tämän määritelmän täyttämiseksi DT:n on sisällettävä seuraavat ulottuvuudet, joita kutsutaan 5D-käsitteellistämiseksi [54 [54] (ks. Palvelut – viittaa DT:ltä vaadittaviin toiminnallisuuksiin).



Kuva 1):

- Fyysinen entiteetti – todellinen entiteetti, jonka hierarkkinen koostumus rakentuu muiden fyysisten entiteettien osajoukoista.
- Virtuaalinen entiteetti – mallinnus fyysisen entiteetin esittämiseksi virtuaalitalassa.
- Data – DT:n hallinta.
- Yhteydet – mahdollistavat eri komponenttien yhdistämisen viitearkkitehtuurissa.
- Palvelut – viittaa DT:ltä vaadittaviin toiminnallisuuksiin.



Kuva 1. 5D Digitaalisen kaksosen käsitteellistäminen

Tätä käsitelmäärittelyä mukaillen työstökoneesta, kuten CNC-laitteesta, luotu DT on virtuaalinen esitys, joka peilaa todellisen koneen käyttäytymistä, tilaa ja suorituskykyä reaaliajassa toiminnan ja huollon optimoimiseksi. Se on rakennettu 5D-käsitteellisyuden viiden ulottuvuuden mukaan:

- Fyysinen entiteetti, joka viittaa itse koneeseen ja sen osiin.
- Virtuaalinen Entiteetti, jota edustaa 3D-malli sekä mekaanisen- ja prosessikäyttäytymisen simulaatiot.
- Data, mukaan lukien reaaliaikaiset anturilukemat ja historialliset suorituskykytietueet.
- Yhteydet, jotka mahdollistavat kaksisuuntaisen viestinnän valmistusjärjestelmien ja pilvialustojen kanssa; ja
- Palvelut, jotka tarjoavat toiminnallisuuden kuten reaaliaikaisen valvonnan, ennakoivan ylläpidon, prosessien optimoinnin ja operaattorikoulutuksen virtuaaliympäristöjen kautta.

Tämä käsitelmäärittely voi johtaa seuraavaan kysymykseen: Olenko toteuttanut tai toteutanko "oikeasti" Digitaalisen kaksosen? On erilaisia digitalisaation tasoja, jotka auttavat tunnistamaan, missä seisot tällä hetkellä ja mitä vielä puuttuu, jotta DT olisi täysin toteutettu.

1.1. Digitaalisen vastineen tasot: Digitaalinen malli, Digitaalinen varjo ja Digitaalinen kaksonen

Nämä kolme käsitettä kuvaavat fyysisten järjestelmien digitaalisen esityksen eri tasoja, ja ne määrittelevät yleisesti Grieves ja Vickers (2017) [20]], jotka formalisoivat DT-käsitteen.

Digitaalinen malli

Digitaalinen malli on staattinen tai dynaaminen digitaalinen esitys fyysisestä objektista tai järjestelmästä, mutta ilman automaattista tiedonvaihtoa fyysisten ja digitaalisten yksiköiden välillä. Päivitykset ovat manuaalisia.

Esimerkki: CAD-piirros koneesta.

Digitaalinen varjo

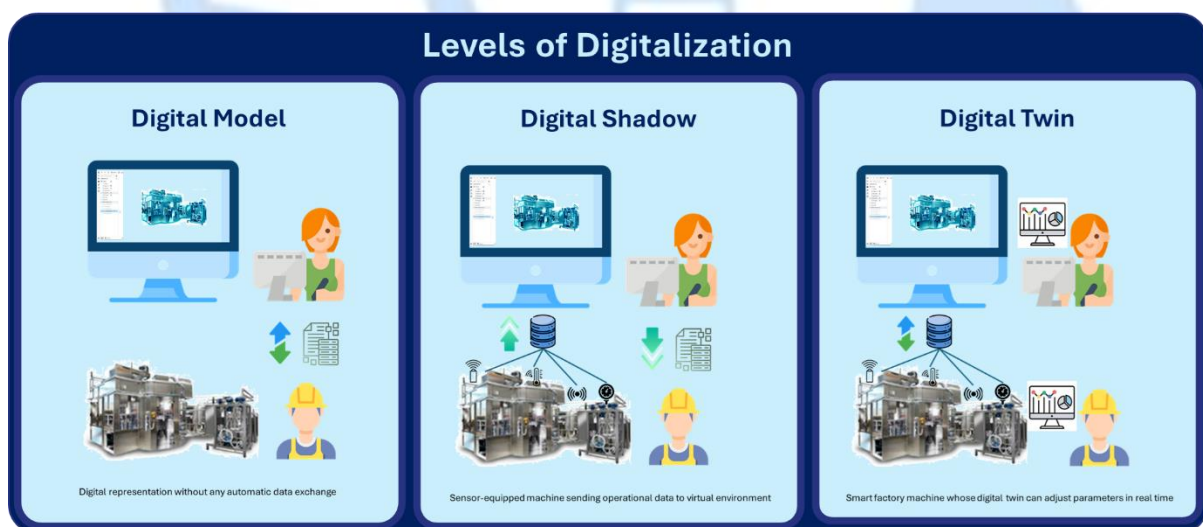
Digitaalinen varjo on digitaalinen esitys, joka vastaanottaa dataa fyysisestä järjestelmästä automaattisesti, mutta virtaus on yksisuuntainen (fyysinen → digitaalinen). Digitaalinen kokonaisuus heijastaa fyysisen järjestelmän tilaa, mutta ei voi vaikuttaa siihen.

Esimerkki: Anturilla varustettu kone, joka lähettää toimintatietoja valvontapaneeliin.

Digitaalinen kaksonen

DT on edistynein käsite: kaksisuuntainen yhteys fyysisen ja digitaalisen yksikön välillä. Data virtaa molempiin suuntiin, mahdollistaen simulaation, ennustamisen ja hallinnan. Digitaalinen kaksonen voi vaikuttaa fyysiseen järjestelmään ja päinvastoin.

Esimerkki: Smart factory tuotantolaite, jonka digitaalinen kaksonen voi säätää parametreja reaaliajassa ennakoivan analytiikan perusteella.



Kuva 2. Erot Digitaalisen mallin, Digitaalisen varjon ja Digitaalisen kaksonen välillä

1.2. Digitaalisen kaksonen hyödyt ja toteutuksen esteet

Koettuihin hyötyihin kuuluvat parantunut päätöksenteko, kustannusten vähentäminen, jäljitettävyyden ja reaaliaikainen simulointi, kun taas pääesteitä ovat tekninen monimutkaisuus, standardisoinnin puute, datan integrointiongelmien ja organisaation vastustus. Lisäksi kestävä kehitys sosiaalinen ulottuvuus on edelleen alituttu, mikä korostaa tarvetta osallistavammille lähestymistavoille, jotka ovat linjassa Industry 5.0 -konseptin kanssa.

Näiden haasteiden voittamiseksi suositellaan rakenteellisten menetelmien soveltamista, keskeisten sidosryhmien osallistamista ja monitieteisen yhteistyön edistämistä sekä tutkimusta adaptiivisista arkkitehtuureista, automatisoidusta mallinnuksesta ja vahvoista validointikehyksistä skaalautuvaa ja kestäväää käyttöönottoa varten.

1.3. Digitaalisen kaksosen sovellukset valmistavassa teollisuudessa

DT-teknologiasta on tullut kulmakivi siirtymässä kohti älykkäitä, kestäviä ja resilienttejä valmistusympäristöjä. Sen kyky yhdistää virtuaalimallit reaaliaikaiseen dataan fyysisistä järjestelmistä mahdollistaa laajan kirjon sovelluksia operatiivisesta optimoinnista organisaation innovaatioihin. Kestävyyden ja energiatehokkuuden alalla DT:tä käytetään energiatehokkuuden parantamiseen, päästöjen vähentämiseen ja resurssien käytön optimointiin. Useat sovellukset tähtäävät nettonollatuotantoon integroimalla modulaarisia arkkitehtuureja, jotka helpottavat pk-yritysten käyttöönottoa, kun taas työpaikkatason DT-mallit lisäävät tuottavuutta ja vähentävät energiankulutusta.

DT:llä on myös keskeinen rooli laadunvarmistuksessa ja Zero-Defect -valmistuksessa (ZDM). Käyttämällä simulaatioita suorituskyvyn kartoittamiseen ja vikojen ennakointiin ne tukevat strategioita, jotka vähentävät muutostarpeita ja parantavat jäljitettävyyttä. Viimeaikaiset menetelmät yhdistävät DT-teknologian syvään vahvistusoppimiseen, mahdollistaen adaptiivisen dynaamisen ajoituksen ja reaaliaikaisen vikojen ennustamisen. Nämä lähestymistavat vahvistavat prosessin kestävyttä ja tukevat jatkuvaa laadun parantamista.

Prosessien optimoinnissa ja suunnittelussa DT mahdollistaa hierarkkisen laitteiden valvonnan, layout-optimoinnin sekä simulaatioiden integroinnin MES-järjestelmiin reagoivuuden parantamiseksi. Niitä sovelletaan yhä enemmän joustavissa robottijärjestelmissä, jotka tukevat reaaliaikaista aikataulutusta ja massaräätälöintiä. Evoluutiiviset algoritmit ja moniagenttimallit laajentavat kykyjään mahdollistamalla poikkeamien havaitsemisen, pullonkaulan tunnistamisen ja optimoidun tehtävien kohdentamisen, jotka yhdessä parantavat tuottavuutta ja laatua monimutkaisissa valmistusympäristöissä.

DT vaikuttaa myös merkittävästi dynaamiseen järjestelmän uudelleenjärjestelyyn. Ne tukevat uudelleenkonfiguroitavien valmistusjärjestelmien suunnittelua ja simulointia, mahdollistaen vaihtoehtoisten uudelleenjärjestelyskenaarioiden arvioinnin ja varmistuen operatiivisen joustavuuden. Älykkään kokoonpanon ja ihmisen ja robotin yhteistyön aloilla DT parantaa sopeutumiskykyä ja tehokkuutta helpottamalla edistyneiden teknologioiden integrointia.

DT:n käyttöönotto vauhdittaa entisestään uusien liiketoimintamallien, kuten Manufacturing-as-a-Service (MaaS), syntyä. Nämä mallit edistävät hajautettuja ja kestäviä tuotantoekosysteemejä, mahdollistaen strategisten skenaarioiden simuloinnin ja parantaen toimitusketjun suunnittelua, mikä lopulta vahvistaa kilpailukykyä ja kestävyttä. Kaiken kaikkiaan DT-sovellukset kattavat kestävyuden, laadun, suunnittelun ja organisaatioinnovaation, edistäen tehokkuutta, jäljitettävyyttä ja laajempaa siirtymää Industry 5.0 -periaatteiden kanssa yhteensopiviin älytehtaisiin.

Vaikka DT-teknologia kehitty nopeasti valmistavassa teollisuudessa, sen soveltaminen työturvallisuuteen on yhä kehittymässä. Tieteellisen kirjallisuuden tarkastelu osoittaa, että suurin osa käyttöönotosta on laboratorio- tai pilottitasolla, ja harvat täysin teolliset toteutukset toteutuvat. Pääasialliset työturvallisuuteen liittyvät sovellukset ovat tähän mennessä keskittyneet dynaamiseen riskien seurantaan ja arviointiin, turvallisuuteen yhteistyörobottiympäristöissä sekä immersiiiviseen virtuaalikoulutukseen. Taulukko 2 tiivistää nämä DT-pohjaiset sovellukset OHS-alueella nykyisessä teknologian tilassa.



Taulukko 2. DT teknologian sovellusalueet työturvallisuudessa

Työturvallisuuden aihealue	DT-teknologian soveltaminen työturvallisuuteen
Turvallisuus	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dynaaminen turvallisuusriskien arviointi ▪ Reaaliaikainen vaarojen valvonta ▪ Tuki työturvallisuuteen liittyvään päätöksentekoon ▪ Turvallisuus yhteistyöympäristöissä robottien kanssa (HRC) ▪ Vaarallisten tilanteiden havaitseminen koneilla ja prosesseilla ▪ Työntekijöiden sijainti tuotantotilassa ▪ Riskien ja mahdollisten onnettomuuksien ennustaminen ▪ Syvälinen turvallisuuskoulutus tuotannon operaattoreille ▪ Virtuaalikoulutus vaarallisissa ympäristöissä ▪ Suojavarusteiden käytön seuranta ▪ Onnettomuuksien ja hätätilanteiden simulointi ▪ Turvallisten pohjaratkaisujen, koneiden ja prosessien suunnittelu ▪ Proaktiivinen riskien hallinta ja työturvallisuuden hallinta
Työhygienia	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dynaaminen ja reaaliaikainen hygieniariskien arviointi ▪ Reaaliaikainen päästöjen ja kemiallisten aineiden altistusten seuranta ▪ Ilman päästöjen, altistumisen ja epäpuhtauksien leviämisen simulointi ja ennustaminen työympäristöissä ▪ Ennakoivien vaarakarttojen kehittäminen ▪ Hälyttimien ja ilmanvaihtojärjestelmien hallinta
Ergonomia	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dynaaminen ja reaaliaikainen ergonominen riskinarviointi ▪ Ergonomisten vaarojen (fyysisten ja kognitiivisten) reaaliaikainen seuranta ▪ Jännityksen havaitseminen ▪ Fyysisen ja kognitiivisen väsymyksen arviointi

Odotettavissa olevien hyötyjen ja tunnistettujen esteiden osalta DT-teknologian käyttöönotolle työturvallisuuden alalla taulukot 3 ja 4 tiivistävät analysoitujen lähteiden tarjoaman tiedon. Kaikissa tapauksissa korostetaan työturvallisuuden, työntekijöiden hyvinvoinnin ja elämänlaadun parannuksia tärkeimpinä odotettuina hyötyinä, kun taas henkilötietojen turvallisuus, yksityisyys ja eettiset näkökohdat tunnistetaan DT-teknologian käyttöönoton kannalta merkittävimiksi esteiksi.

Taulukko 3. Odotetut työturvallisuushyödyt DT-teknologian käyttöönotosta

Odotetut hyödyt
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Parantaa työntekijöiden työturvallisuutta, hyvinvointia ja elämänlaatua ▪ Edistää ennakoivaa työturvallisuuden hallintaa perinteisen reaktiivisen työturvallisuuden hallinnan sijaan ▪ Tukee mahdollisten työturvallisuuspuutteiden havaitsemista ▪ Ehkäisee riskejä ja onnettomuuksia ▪ Mahdollistaa valmistusjärjestelmän dynaamisen mukautumisen työntekijöiden olosuhteisiin ja tarpeisiin ▪ Tuottaa turvallisempia, terveempiä, osallistavampia ja tuottavampia työpaikkoja ▪ Mahdollistaa reaaliaikaiset hälytykset työturvallisuuden hallintajärjestelmästä ▪ Vahvistaa työturvallisuuteen liittyvää päätöksentekoa ▪ Helpottaa sääntelyn noudattamisen seuranta ▪ Optimoii koneiden, prosessien ja työasemien suunnittelun ▪ Vähentää Inhimillisten virheiden mahdollisuutta ▪ Vähentää tarvetta työntekijöiden läsnäoloon vaarallisilla alueilla ▪ Parantaa työturvallisuus-koulutusten tehokkuutta ▪ Vähentää turvallisuustyön kustannuksia

Taulukko 3. Esteet Digitaalisten kaksosten käyttöönotolle

Käyttöönoton esteet
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Henkilötietojen turvallisuus ja yksityisyys ▪ Kohtuuttoman valvottu olosuhde työntekijöille ▪ Läpinäkyvyys ja etiikka tekoälyn käytössä ▪ Toteutuskustannukset (laitteet, koulutus, henkilöstö, ylläpito) ▪ Monimutkainen teknologinen toteutus ▪ Merkittävä digitaalinen infrastruktuuri vaaditaan ▪ Korkeat digitaaliset taidot, joita työntekijöiltä vaaditaan ▪ Muutoksen hyväksyminen työntekijöiden keskuudessa ▪ Rajoitettu standardisointi ▪ Merkittävä haaste pk-yrityksille ▪ Erittäin rajallinen teknologinen kokemus työturvallisuuden sovellusalalla

1.4. Sidosryhmien näkökulma: digitaalisten kaksosten suunnittelijat, integroijat ja loppukäyttäjät

HumanDT-projektin haastattelut suunnittelijoiden, loppukäyttäjien ja viranomaisten kanssa syyskuun 2025 ja tammikuun 2026 välillä antoivat kattavan kuvan siitä, miten DT-teknologiaa tällä hetkellä sovelletaan ja miten sen käytön odotetaan kehittyvän. Kaikkien osallistujien keskuudessa vallitsi selkeä yksimielisyys siitä, että DT tukee jo monenlaisia sovelluksia ja että niiden käyttöönotto kasvaa tulevina vuosina. Haastattelut korostivat myös käyttäjälähtöisten suunnittelumenetelmien merkitystä, jossa yhteistyö loppukäyttäjien kanssa koko kehitys- ja toteutusprosessin ajan katsotaan olennaiseksi. Eettiset näkökohdat – erityisesti tietosuojan liittyvät – mainittiin johdonmukaisesti keskeisenä osana DT-järjestelmän suunnittelua.

Tulokset osoittavat, että DT:tä otetaan käyttöön laajalla tuote- ja palveluiden kirjolla. Haastateltavat kuvasivat sovelluksia vesihuollosta, energian varastoinnista ja sähköntuotannosta kulutustuotteisiin, terveydenhuollon diagnostiikkaan, siviili-

infrastruktuuriin ja rakennusautomaatioon. Niitä käytetään laajasti myös valmistuksessa ja teollisissa prosesseissa. Tämä monimuotoisuus havainnollistaa DT:n poikkisektoreista merkitystä, vaikka niiden soveltuvuus erittäin manuaalisissa tai matalan automaation tuotantoympäristöissä saattaa olla rajallisempaa.

Osallistujat tunnistivat useita DT-teknologiaan liittyviä hyötyjä. Kannattavuus nousi ensisijaiseksi ajuriksi. Loppukäyttäjäorganisaatioiden edustavat korostivat sitä, että DT auttaa vähentämään toimintakustannuksia ja maksimoimaan tuotantolaitosten suorituskyvyn. Myös parantunutta päätöksentekoa korostettiin: DT tarjoaa dataa ja tukee sen visuaalista hahmottamista, mikä tukee operatiivisia ja strategisia valintoja. Haastateltavat korostivat merkittäviä hyötyjä tilannetietoisuuden rakentumisessa reaaliaikaisen tilojen ja koneiden seurannan kautta. Tämä taas vähentää seisokkiaikaa ja parantaa prosessien vakautta ja ennakoitavuutta. Ennakoiva huolto mainittiin toistuvasti vahvana hyötynä. Se mahdollistaa poikkeamien varhaisen havaitsemisen ja tukee vikojen tunnistamista. Kykyä testata uusia tuotantoratkaisuja virtuaaliympäristöissä pidettiin tärkeänä innovatiivisten kokeilujen mahdollistajana. Etuja havaittiin myös työturvallisuudessa – kuten lämpökarttojen käyttö ihmisten ja trukkien törmäysriskien havaitsemiseksi – sekä ergonomiassa, jossa tekoälyavusteinen palaute auttaa työntekijöitä omaksumaan turvallisempia asentoja. Selkein työturvallisuuteen liittyvä teema oli kuitenkin stressin väheneminen DT-teknologian työtä tukevien ominaisuuksien vuoksi.

Haastattelujen toistuva teema oli tiiviin yhteistyön merkitys suunnittelijoiden ja loppukäyttäjien välillä. Monet yritykset käyttävät ihmiskeskeisiä suunnitteluperiaatteita, jotkut jopa noudattavat nimenomaan ISO 9241-210 -standardia, edistäen iteratiivisia kehityssyklejä ja jatkuvaa kehitystä kenttäpalautteen perusteella. Suunnittelijat korostivat, että loppukäyttäjien tarpeiden ymmärtäminen on ratkaisevan tärkeää tehokkaiden DT-ratkaisujen räätälöinnissä. He kuitenkin tunnistivat myös, että uusia teknologioita usein vastustetaan. Tämän voittaminen vaatii käytännön näyttöä siitä, että DT-ratkaisut todella auttavat ratkaisemaan päivittäisiä työn haasteita. Toimijoiden luottamuksen voittaminen on välttämätöntä, ja DT-sovellusten suunnitteluprosessin toteuttaminen yhteistyössä on keskeisessä roolissa tämän saavuttamisessa.



Suunnittelijat korostivat, että loppukäyttäjien tarpeiden ymmärtäminen on ratkaisevan tärkeää tehokkaiden DT-ratkaisujen räätälöinnissä.

Haastattelut paljastivat myös, että DT-järjestelmien käyttöliittymänäkymät ovat tyypillisesti räätälöityjä käyttäjäryhmien mukaisesti. Käyttötarpeiden moninaisuus vahvistaa tarvetta rajapinnoille, jotka on mukautettu erilaisiin rooleihin ja tehtäviin. Operaattorit hyödyntävät enimmäkseen tuotantoon liittyviä tietoja, huoltohenkilöstö tuotantolaitteisiin liittyvää tietoa, esimiehet käyttävät hallintanäkymiä ja ylin johto saa näkyville keskeisiä tunnuslukuja tuotannosta. Haastateltavat korostivat, että käytettävyys, käyttöliittymän näkymän merkityksellisyys ja esityksen selkeys ovat kriittisiä vaatimuksia, jotta DT-työkalut tukevat tehokkaasti jokaista käyttäjäryhmää.

Eettiset näkökohdat nousivat merkittäväksi ulottuvuudeksi DT-implementoinnissa. Suunnittelijat seuraavat johdonmukaisesti loppukäyttäjien yksityisyyden suojalle aiheutuvia riskejä ja GDPR:n noudattamista, erityisesti silloin, kun henkilötietoja voidaan kerätä järjestelmän käytön aikana. Monet kehittäjät tukevat asiakkaita sopivien tiedonkeruukäytäntöjen määrittelyssä ja henkilötietojen käsittelyn rajaamisessa. Rutiininomaiset riskianalyysit, jotka kattavat tietoturvan ja yksityisyyden, integroidaan yleisesti DT:n suunnitteluprosessiin varmistamaan, että eettiset vaatimukset täyttyvät koko järjestelmän elinkaaren ajan.

Kaiken kaikkiaan haastattelut paljastavat nopeasti kasvavan ja yhä kypsyvän DT-sovellusten ekosysteemin, jossa teknologian hyödyt, kuten kannattavuus, päätöksenteko, tilannetietoisuus, ennakointi ja turvallisuus, yhdistyvät tarpeeseen huomioida käyttäjälähtöisyys ja eettiset näkökulmat. Yrityskentältä kootut näkemykset tarjoavat selkeän kuvan sekä DT-teknologian käyttöönoton mahdollisuuksista, että käytännön haasteista eri teollisissa konteksteissa.

1.5. Haasteet ja käyttöönottosuositukset digitaalisille kaksoisille valmistavassa teollisuudessa

DT-teknologiaa voidaan pitää keskeisenä mahdollistajana Industry 5.0:n periaatteiden, erityisesti ihmiskeskeisen strategian, toteuttamisessa. Lisäksi digitaalinen kaksonen (DT) edistää teollisuuden resilienssiä ja kestävyyttä hyödyntämällä teknologioita, kuten lohkoketjua, IoT:tä, selitettävää tekoälyä ja hajautettuja arkkitehtuureja. Nämä vahvistavat turvallisuutta, jäljitettävyyttä, tietosuojaa ja energiatehokkuutta. Esimerkiksi Decentralized Autonomous Manufacturing (DAM) -paradigma ja lohkoketjuun perustuvat älysovimukset mahdollistavat turvallisemmat ja joustavammat prosessit, vähentävät yksittäisiin vikapisteisiin liittyviä riskejä ja parantavat tuotannon elastisuutta.

Kuitenkin merkittäviä haasteita on edelleen olemassa, kuten:

- Puuttuvat riittävän hienojakoiset mallit inhimillisten tekijöiden (HF) kuvaamiseen (kognitiivinen kuormitus, väsymys, tunteet).
- Yksityisyysriskit ja GDPR-vaatimustenmukaisuus, erityisesti henkilökohtaisten tietojen keräämisessä wearables-laitteiden kautta.
- Tekninen monimutkaisuus DT:n integroimisessa olemassa oleviin järjestelmiin ja yhteentoimivuuden varmistamisessa.
- Organisatorinen muutosvastarinta prosessien ja roolien uudelleenmäärittelyssä.

Näiden haasteiden ratkaisemiseksi esitetään useita suosituksia:

- Adaptiiviset menetelmät HC-DT:n suunnitteluun.
- Explainable ja turvalliset algoritmit läpinäkyvyyden ja luottamuksen varmistamiseksi.
- Vahvat sääntelykehykset, jotka integroivat Safe and Sustainable by Design (SSbD) -periaatteet.

- Monialaiset yhteistyöstrategiat, jotka yhdistävät suunnittelijat, operaattorit, ergonomian asiantuntijat ja sääntelyviranomaiset.
- Tutkimus resiliienttien arkkitehtuurien, automatisoidun mallinnuksen ja validointijärjestelmien kehittämiseksi skaalautuvaa käyttöönottoa varten.

Nämä suositukset ja I5.0-periaatteiden tuominen DT-teknologiaan tähtäävät hyötyihin, kuten:

- Parempaan päätöksentekoon reaaliaikaisen datan avulla.
- Kustannusten vähentämiseen ja tuotteen elinkaaren optimointiin.
- Kehittyneeseen jäljitettävyyteen ja simulointiin monimutkaisissa skenaarioissa.
- Työhyvinvoinnin parantamiseen ihmisen ja koneen yhteistyön sekä älykkään ergonomian kautta.

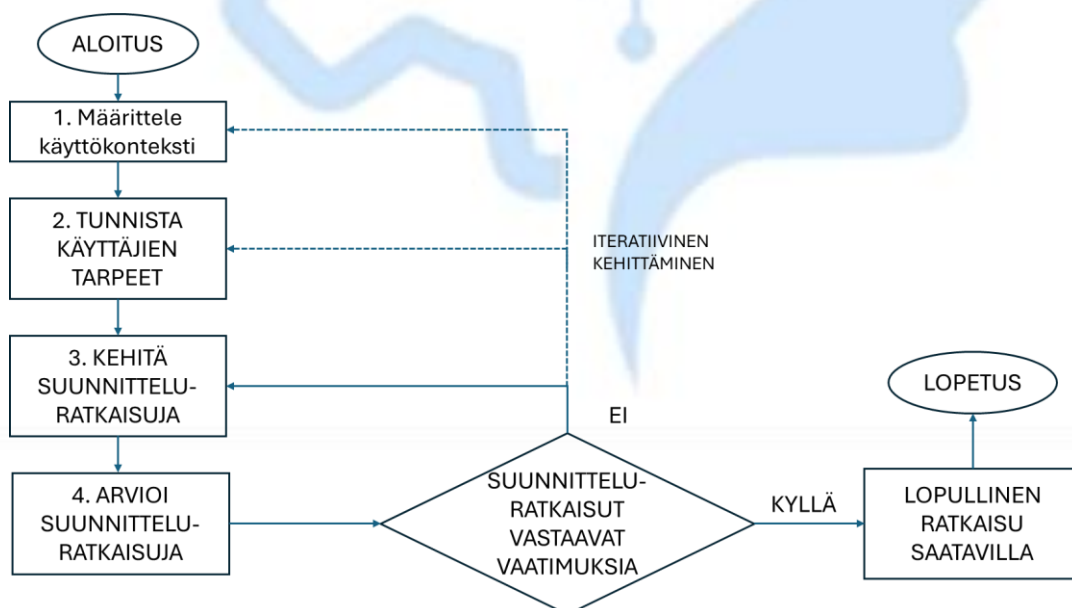
Yhteenvetona DT:t ovat keskeisiä edettäessä kohti älykkäitä tehtaita, jotka priorisoivat ihmisen ja koneen yhteistyötä, kestävyyttä ja resilienssiä, vahvistaen siirtymää kohti I5.0:aa.

2. Inhimilliset tekijät ja digitaalinen kaksonen: kohti Industry 5.0 -visiota

2.1 Human-centred design (HCD)

Ihmiskeskeinen suunnittelu (Human-Centred Design, HCD) on käytännöllinen tapa kehittää tuotteita ja järjestelmiä lähtemällä liikkeelle ihmisistä – heidän tarpeistaan, tehtävistään ja todellisista toimintaympäristöistään. ISO 9241-210 -standardin [27] mukaan HCD:n tavoitteena on tehdä järjestelmistä käyttökelpoisia, hyödyllisiä ja turvallisia keskittymällä käyttäjiin koko suunnittelu- ja kehitysprosessin ajan. Lähestymistapa korostaa sitä, että suunnittelun perustana on ymmärrys siitä, mitä ihmiset todella tekevät, millaisissa olosuhteissa he työskentelevät ja millaisiin haasteisiin he törmäävät – sen sijaan, että oletettaisiin heidän tarpeensa. Standardi tuo esiin, että ihmiskeskeinen lähestymistapa parantaa järjestelmän vaikuttavuutta, tehokkuutta, käyttäjätyytyväisyyttä ja kokonaisvaltaista hyvinvointia.

HCD:n ydinajatus on perustaa suunnittelu selkeään ja eksplisiittiseen ymmärrykseen käyttäjistä, heidän tehtävistään ja toimintaympäristöstään sekä osallistaa käyttäjiä jatkuvasti suunnittelun edetessä. ISO 9241-210:2019 [27] määrittelee keskeiset prosessivaiheet (Kuva 3): (1) käyttötilanteen ymmärtäminen ja määrittely, (2) käyttäjävaatimusten määrittely, (3) suunnitteluratkaisujen tuottaminen ja (4) ratkaisujen arviointi käyttäjien kanssa. Tämä sykli on iteratiivinen, mikä tarkoittaa, että suunnittelijat luovat varhaisia prototyyppisiä, keräävät palautetta ja tarkentavat konseptia vaiheittain. Standardi korostaa myös moniammatillista yhteistyötä, jonka avulla varmistetaan perusteellinen keskittyminen inhimillisiin tekijöihin (HF). Tämä tarkoittaa suunnittelun, tekniikan, ergonomian ja toimialakohtaisen asiantuntemuksen yhdistämistä, jotta ratkaisu soveltuu käyttäjille kaikilla tasoilla.



Kuva 3. Käsitteellinen viitekehys ihmiskeskeisten digitaalisten järjestelmien suunnitteluun (mukaillen EN ISO 9241-210)

Vaikka HCD on erittäin arvokas teollisissa ympäristöissä, lähestymistapa on tarkoituksellisen laaja ja sovellettavissa laajasti erilaisiin yhteyksiin. Human-centric (HC) -lähestymistavan teoreettiset perustat kietoutuvat 'design thinking' -ajatteluun, joka korostaa tiiviin loppukäyttäjyhteistyön hyötyjä tuotteiden ja palvelujen suunnitteluprosesseissa eri aloilla [5], [41], [42]. Tutkimukset valmistavassa teollisuudessa ja digitaalisessa muutoksessa osoittavat, että HC-menetelmät johtavat parempaan käytettävyyteen, korkeampaan tuottavuuteen ja sujuvampaan uusien työkalujen käyttöönottoon [45]. Lähestymistavan keskiössä ei ole teknologia ensin, vaan ihminen ensin, ja sen tavoitteena on varmistaa, että digitaaliset työkalut, fyysiset tuotteet ja hybridijärjestelmät mukautuvat ihmisen kyvykkyyksiin ja rajoituksiin.

HCD tarjoaa yleisen lähestymistavan, joka soveltuu myös digitaalisten kaksosten (DT) suunnitteluun. Se kannustaa suunnittelijoita työskentelemään loppukäyttäjien kanssa, ymmärtämään käyttötilannetta sekä niitä tehtäviä, joita suunnittelun tulee tukea, ja kehittämään alustavia luonnoksia, joita tarkennetaan iteratiivisesti yhteistyössä käyttäjien kanssa. Kuitenkin tämän yhteistyön tarkempi sisältö jää pitkälti määrittelemättä – täsmällinen toteutustapa jää suunnitteluprosessista vastaavien tahojen harkittavaksi.

HF-lähestymistapa paikkaa aukon tarjoamalla vankan ja testatun perustan sille sisällölle, jota suunnittelu yhteistyössä voidaan hyödyntää. Vastauksena vaatimukseen "monialaisesta" tiimien osallistumisesta HF-työkalu kokoaa näkökulmia eri tieteenaloilta. Niiden hyödyntäminen on kuitenkin täysin mahdollista ilman syvällistä akateemista osaamista. Pohjimmiltaan ne ovat tekijöitä, jotka vaikuttavat onnistuneen työn edellytyksiin – aihe, jota jokainen ammattilainen voi peilata omaan työhönsä. Tutkimuksissa on todettu, että HF-työkalua on helppo käyttää [57].

Kun inhimillisiä tekijöitä (HF) tarkastellaan loppukäyttäjien näkökulmasta, suunnittelijat voivat nostaa esiin tekijöitä, jotka eivät todennäköisesti tulisi esille suunnittelijoiden ja käyttäjien välisessä vuorovaikutuksessa ilman rakennetta ja sisältöä, joka tukee käyttäjien työn sisällön ja siihen liittyvien HF-tekijöiden käsittelyä.

Kun digitaalisen kaksosen (DT) suunnittelussa tarkastellaan työprosesseja



Ihmiskeskeisen suunnittelun (HCD) tavoitteena on tehdä järjestelmistä käyttökelpoisia, hyödyllisiä ja turvallisia ylläpitämällä jatkuvaa käyttäjakeskeisyyttä koko suunnittelu- ja kehitysprosessin ajan. Se edellyttää, että suunnittelupäätökset perustuvat selkeään ja eksplisiittiseen ymmärrykseen käyttäjistä, heidän tehtävistään ja toimintaympäristöstään



tehtävätasolla niiden henkilöiden näkökulmasta, jotka vastaavat tehtävien onnistuneesta suorituksesta, DT-suunnittelijat pääsevät askeleen lähemmäs käyttäjien päivittäisiä haasteita. Kun tätä lähestymistapaa hyödynnetään DT-suunnitteluprosessin varhaisissa vaiheissa, suunnittelijoiden mahdollisuudet ymmärtää loppukäyttäjien tarpeita ja löytää niiden mukaisia suunnitteluratkaisuja kasvavat. HF-näkökulman soveltaminen riskianalysysvaiheessa auttaa vähentämään riskiä siitä, että DT-ratkaisu ei lopulta tue käyttäjiä heidän tavoitteidensa onnistuneessa saavuttamisessa.

2.2 Inhimilliset tekijät (Human Factors, HF)

Inhimilliset tekijät (HF) määritellään yleisesti tieteenalaksi, joka tutkii, miten ihmiset ovat vuorovaikutuksessa tehtäviensä, työkalujensa, teknologioidensa ja työympäristöjensä kanssa tavoitteena parantaa turvallisuutta, hyvinvointia ja koko järjestelmän suorituskykyä. HF tarkastelee työn fyysisiä, kognitiivisia ja organisatorisia ulottuvuuksia varmistaakseen, että järjestelmät suunnitellaan tukemaan ihmisen kyvykkyksiä ja minimoimaan virheiden mahdollisuus [23]. Tämä määritelmä on linjassa vakiintuneen HF-tutkimuksen kanssa turvallisuuskriittisillä aloilla, joissa tieteenala ymmärretään integroituna näkökulmana yksilöiden, tiimien ja organisaatioiden toiminnasta osana monimutkaisia järjestelmiä [21], [51].


Kansainvälisen ergonomiajärjestön (International Ergonomics Association, IEA) [61] mukaan inhimilliset tekijät (HF, toisinaan synonyyminä ergonomia, lyhennettynä myös HFE) ovat tieteenala, joka keskittyy ymmärtämään ihmisten ja muiden järjestelmän osien välisiä vuorovaikutuksia. Ammatillisena käytäntönä human factors -suunnittelu hyödyntää teoriaa, periaatteita, tutkimustietoa ja muita menetelmiä suunnittelussa ihmisen hyvinvoinnin ja koko järjestelmän suorituskyvyn optimoimiseksi. Yhdistyneen kuningaskunnan (UK) Health and Safety Executive (HSE) määrittelee HF:n ympäristöön, organisaatioon ja työtehtäviin liittyvien tekijöiden sekä yksilöllisten inhimillisten ominaisuuksien kokonaisuutena, joka vaikuttaa käyttäytymiseen työssä ja voi siten vaikuttaa terveyteen ja turvallisuuteen. Yhdysvaltain (US) Federal Aviation Administration (FAA) määrittelee HF:n monialaisena pyrkimyksenä tuottaa ja koota tietoa ihmisen kyvykkyyksistä ja rajoituksista sekä soveltaa tätä tietoa laitteisiin, järjestelmiin, tiloihin, menettelyihin, työtehtäviin, ympäristöihin, koulutukseen, miehitykseen ja henkilöstöjohtamiseen turvallisen, sujuvan ja tehokkaan suorituksen mahdollistamiseksi. HF:n keskeinen periaate on systeemijattelu: HF-asiantuntijat tarkastelevat yksilöiden ja heidän ympäristönsä (tai työjärjestelmänsä) eri elementtien muodostamaa vuorovaikutusverkostoa [61]. HF:n suunnittelu, käyttöönotto ja levittäminen edellyttävät monipuolista tietopohjaa. Se perustuu sekä perustieteisiin, kuten fysiologiaan, sosiologiaan ja psykologiaan, että soveltaviin tieteenaloihin, kuten teollisuustekniikkaan, liiketoimintaan ja johtamiseen [6].


Käytännössä inhimilliset tekijät (HF) (Kuva 4) ovat sellaisia työn ominaisuuksia, jotka voivat joko tukea tai estää ihmisten onnistumista työtehtävien turvallisessa ja sujuvassa suorittamisessa. HF tarkastelee työtä monitasoisena järjestelmänä. Sen sijaan, että huomio kohdistuisi vain yksilön suoritukseen, HF tarkastelee laajaa joukkoa vaikuttavia tekijöitä: itse työn ominaisuuksia, tiimin sisäistä viestintää ja koordinaatiota, organisaation tarjoamia resursseja sekä ympäröivää toimintaympäristöä. Organisaatioiden tueksi on kehitetty jäsenneltyjä työkaluja, jotka auttavat tekemään nämä elementit näkyviksi ja helpommin analysoitaviksi. Näiden työkalujen tarkoituksena on ohjata tunnistamaan tekijöitä, jotka vahvistavat tai heikentävät turvallisuutta, tehokkuutta ja hyvinvointia eri tasoilla – yksilön, työn, ryhmän ja organisaation tasolla. Ne on suunniteltu arjen käyttöön, jolloin HF voidaan integroida luonnolliseksi osaksi normaalia toimintaa sen sijaan, että se olisi vain asiantuntijoille varattu erityisalue [55], [57].

HF-lähestymistapaa on sovellettu laajasti eri sektoreilla, kuten ilmailussa, lennonvarmistuksessa, ydinenergia-alalla, meriliikenteessä ja rautatiealalla. Näillä aloilla HF:n avulla parannetaan tiedonkulkua, tiimien koordinaatiota, työn rakenteita sekä sitä, miten teknologia tukee ihmisen toimintaa vaativissa olosuhteissa. Tutkimus näillä alueilla osoittaa, että HF:n systemaattinen soveltaminen johtaa selkeämpiä työprosesseihin, parempaan viestintään, luotettavampaan päätöksentekoon sekä lisääntyneeseen kyvykkyyteen oppia ja sopeutua muuttuviin tilanteisiin. Se korostaa myös sellaisten työympäristöjen suunnittelun merkitystä, joissa osaamisen kehittäminen, palaute ja jatkuva parantaminen ovat sisäänrakennettuja osia arjen käytäntöjä [40].

Tuottamalla ymmärrystä niistä tekijöistä, jotka vaikuttavat ihmisten mahdollisuuksiin onnistua työssään, ja tarkastelemalla työtä dynaamisena, toisiinsa kytkeytyvien osien muodostamana järjestelmänä, HF tukee sellaisten ympäristöjen ja työkalujen suunnittelua, jotka mahdollistavat ihmisten toiminnan työssä – myös monimutkaisissa tai korkean riskin toimintaympäristöissä. Tämä kokonaisvaltainen näkökulma auttaa varmistamaan, että turvallisuus, tehokkuus ja hyvinvointi ovat sisäänrakennettuja järjestelmiin alusta alkaen sen sijaan, että ne lisättäisiin vasta jälkikäteen [6].

2.3 HF-riski

Tässä ohjeistuksessa kutsumme digitaalisen kaksosen (DT) suunnittelussa huomioimatta jäävää inhimillistä tekijää (HF) *HF-riskiksi*. HF-tekijöiden huomioiminen DT-suunnittelussa edellyttää aktiivista yhteistyötä niiden henkilöiden kanssa, jotka tulevat DT:tä hyödyntämään. Loppukäyttäjän näkökulman hyödyntäminen on olennaista,  ja voidaan ymmärtää, miten DT tukee työtehtävien turvallista ja sujuvaa suorittamista.

Inhimilliset tekijät (HF) käsittelevät työn fyysisiä, kognitiivisia ja organisatorisia ulottuvuuksia varmistaakseen, että järjestelmät suunnitellaan tavalla, joka tukee ihmisen kyvykkyyksiä ja minimoi virheiden mahdollisuuden. HF-tekijät edustavat työjärjestelmän ominaisuuksia, jotka voivat joko mahdollistaa tai estää henkilön kyvyn suorittaa tehtävät turvallisesti, tehokkaasti ja luotettavasti. Tässä ohjeistuksessa kutsutaan minkä tahansa relevantin HF-tekijän puuttumista tai riittämätöntä  huomioimista digitaalisen kaksosen (DT) suunnittelussa *HF-riskiksi*.

Loppukäyttäjien panos on välttämätön, jotta suunnittelijat voivat kohdistaa huomionsa niihin HF-tekijöihin, jotka nousevat esiin käyttötilanteesta ja toimintaympäristöstä.

2.4 Ihmiskeskeinen suunnittelu ja inhimilliset tekijät suhteessa I5.0-paradigmaan

Industry 5.0 asettaa ihmiset ja heidän hyvinvointinsa teollisen kehityksen keskiöön, korostaen järjestelmiä, joissa ihmiset ja teknologia toimivat rinnakkain yhteistyössä eikä keskenään kilpaillen [4]. Digitaaliset kaksoset (DT) näyttelevät tässä visiossa tärkeää roolia tarjoamalla virtuaalisia esityksiä prosesseista ja toimintaympäristöistä, mikä tukee operaattoreita ymmärtämään, ennakoimaan ja vaikuttamaan siihen, mitä

tuotantoympäristössä tapahtuu. Tämä on linjassa Industry 5.0 (I5.0) -tavoitteen kanssa kehittää ihmiskeskeisiä (HC), kestäviä ja resilienttejä tuotantojärjestelmiä, joissa teknologia tukee ihmisen päätöksentekoa ja vahvistaa tilannekuvaa [5].

HCD tarjoaa käytännöllisen perustan digitaalisten kaksosten (DT) muovaamiselle työkaluiksi, jotka aidosti tukevat valmistavassa teollisuudessa työskenteleviä operaattoreita. HCD-periaatteiden noudattaminen varmistaa, että DT perustuu selkeään ymmärrykseen operaattorien tehtävistä, työympäristöistä ja rajoitteista, ja että operaattorit osallistuvat sen kehittämiseen koko suunnitteluprosessin ajan. Vakiintuneiden HCD-standardien mukaan suunnittelutoimien tulisi sisältää käyttötilanteen määrittely, käyttäjävaatimusten tunnistaminen, ratkaisujen luominen sekä niiden iteratiivinen arviointi todellisten käyttäjien kanssa. DT-suunnittelussa tämä tarkoittaa sellaisten mallien ja käyttöliittymien kehittämistä, jotka ovat intuitiivisia tulkita, helppoja käyttää ja suoraan yhteydessä operaattorien päivittäisiin tehtäviin – sekä loppukäyttäjien näkökulman hyödyntämistä suunnitteluun liittyvien riskien hallinnassa.

HF vahvistaa tätä lähestymistapaa tarjoamalla systeemisen ymmärryksen siitä, miten yksilöt, tiimit, työtehtävät ja organisatoriset rakenteet vaikuttavat suoriutumiseen [55], [57]. HF-viitekehykset auttavat tunnistamaan, miten DT tulisi integroida työhön siten, että se vähentää kognitiivista kuormitusta, selkeyttää viestintää ja parantaa koordinaatiota. Turvallisuuskriittisille aloille kehitetyt HF-työkalut tarjoavat jäseneltyjä tapoja tarkastella tekijöitä, jotka tukevat tai heikentävät tehokasta operaattoritoimintaa – mukaan lukien työkuorma, menettelyjen selkeys, ergonominen soveltuvuus ja informaatiovirta. Kun näitä näkemyksiä sovelletaan DT:hen, ne auttavat varmistamaan, että digitaalinen kaksonen tukee – eikä monimutkaisista – operaattorin tehtävien suoritusta ja edistää turvallista ja vakaata järjestelmäkäyttäytymistä sekä normaaleissa olosuhteissa että häiriötilanteissa.

DT-ratkaisut istuvat jo luonnostaan Industry 5.0:n painotukseen tiivistä ihmisen ja teknologian yhteistyöstä. Ne tekevät monimutkaisista prosesseista läpinäkyvämpiä ja mahdollistavat operaattoreille skenaarioiden kokeilemisen, kehkeytyvien ongelmien ennakkoinnin sekä tuotantoparametrien säätämisen ennen ongelmien eskaloitumista. I5.0-keskusteluissa DT:t nostetaan esiin yhtenä teknologiana, joka voi edistää adaptiivisempaa ja ihmiskeskeisempää (HC) valmistusta parantamalla tilanaymmärrystä ja tukemalla operaattorien tietoperusteista päätöksentekoa. Kun DT muotoillaan HCD- ja HF-periaatteiden mukaisesti, niistä tulee välineitä, jotka laajentavat ihmisen toimintakykyä: ne auttavat operaattoreita pysymään vaihteluiden edellä, ylläpitämään järjestelmän resilienssiä ja ohjaamaan prosesseja tavoilla, jotka tukevat kestävyyttä ja vastuullisia tuotantotavoitteita [19].

Yhdessä HCD ja HF tarjoavat suunnan DT-ratkaisujen kehittämiseksi siten, että ne toteuttavat I5.0-vision teknologiasta, joka tukee operaattoreita enemmän kuin korvaa heidät [9]. Nämä lähestymistavat tarjoavat menetelmät ja näkökulmat, joita tarvitaan sellaisten DT-järjestelmien suunnitteluun, jotka sopivat todelliseen työhön, kunnioittavat ihmisen vahvuuksia ja rajoituksia sekä vahvistavat operaattorin kykyä hallita monimutkaisia teollisia järjestelmiä. Näin ne muuttavat I5.0-konseptin teknologisesta tavoitteesta käytännölliseksi lähestymistavaksi, jossa ihmiset pysyvät tulevaisuuden tehtaiden keskiössä ja toimijuutta vahvistetaan.

2.4 Inhimillisten tekijöiden työkalut ihmiskeskeiseen suunnitteluun

2.4.1 [Human Factors tool \(HF Tool\)](#)

Professori Anna-Maria Teperin kehittämä HF tool tarjoaa käytännöllisen tavan ymmärtää, miten ihmiset, heidän työnsä ja organisaationsa vaikuttavat päivittäiseen toimintaan ja turvallisuuteen [55]. Se on kokonaisvaltainen ja käytännönläheinen viitekehys, joka tukee ihmisen toiminnan sekä systeemisen turvallisuuden ymmärtämistä, analysointia ja parantamista monimutkaisissa ympäristöissä. Työkalun perusidea on yksinkertainen: työssä tapahtuvat ilmiöt – sekä onnistumiset että ongelmat – syntyvät harvoin vain yhdestä syystä. Sen sijaan ne ovat seurausta monien toisiinsa kytkeytyvien tekijöiden vaikutuksesta, yksilön osaamisesta aina tiimityöhön ja organisaation tarjoamaan tukeen.

HF tool auttaa työntekijöitä, esihenkilöitä ja johtoa tarkastelemaan näitä eri tasoja jäsennellyllä mutta helposti käytettävällä tavalla. Sitä on sovellettu useilla turvallisuuskriittisillä aloilla, kuten ilmailussa, ydinenergia-alalla, meriliikenteessä, rautatieoperaatioissa ja rakentamisessa, joissa se on auttanut organisaatioita siirtymään virheistä korostuneesta ajattelusta kohti ymmärrystä siitä, mikä saa asiat sujumaan hyvin. Työkalu tukee myös uudempaa Safety-II-ajattelua, joka korostaa ihmisen sopeutumiskykyä ja vahvuuksia.

Työkalun keskellä oleva teksti, ”muuttuvien ja monimutkaisten tilanteiden hallinta”, tiivistää sen keskeisen ajatuksen: inhimilliset tekijät mahdollistavat meidän kaikkien onnistumisen työssä. Työkalu sisältää jäsennellyt HF-kohteet, jotka kattavat eri tasot, ja sitä voidaan käyttää sekä onnistumisten että epäonnistumisten analysointiin operatiivisissa tilanteissa. HF-tekijät on järjestetty HF-työkalussa neljään nelikenttään (Kuva 4): 1) yksilön toimintaan ja ominaisuuksiin liittyvät tekijät, 2) työhön ja työtehtävien ominaisuuksiin liittyvät tekijät, 3) ryhmätason tekijät ja 4) organisaatiotason tekijät.

1) Yksilö (HF tool kohdat 1-12)

HF toolin ensimmäinen taso tarkastelee yksittäistä työntekijää. Tähän sisältyvät henkilön taidot, tieto, motivaatio, asenteet sekä yleinen valmius suoriutua tehtävistä. Sen sijaan että yksilöitä syytettäisiin virheistä, työkalu rohkaisee ymmärtämään, miten ihmisen suorituskky vaihtelee päivittäin ja miten tämä vaihtelu vaikuttaa työhön. Työkalu myös auttaa tunnistamaan tilanteet, joissa työntekijän vahvuudet – kuten hyvä ennakoitkyky tai ongelmanratkaisu – edistävät turvallista ja sujuvaa toimintaa, sekä tilanteet, joissa esimerkiksi epäselvät odotukset tai väsymys voivat heikentää suoriutumista.

2) Työ (HF tool kohdat 20-29)

Toinen taso keskittyy itse työhön: tehtäviin, työkaluihin, ohjeisiin ja olosuhteisiin, joissa työntekijät toimivat. HF-työkalu tarkastelee, miten työ on organisoitu, ovatko ohjeet selkeitä ja realistisia, miten tehtävät on jaettu sekä ovatko työntekijöiden käytettävissä tarvittavat resurssit. Työkalu auttaa tarkastelemaan ’todellista työtä’ (work-as-done), ei ainoastaan ’työtä kuten sen oletetaan olevan’ (work-as-imagined), sekä tunnistamaan kohdat, joissa menettelyt voivat olla liian monimutkaisia, ristiriitaisia tai huonosti linjassa työntekijöihin kohdistuvien vaatimusten kanssa. Tämä helpottaa työprosessien kuvaamista sekä tukee turvallisuutta ja tuloksellisuutta.

3) Ryhmä (HF tool kohdat 30-36)

Ryhmätaso tarkastelee sitä, miten ihmiset työskentelevät yhdessä. Viestintä, tiimityö, tiedon jakaminen ja luottamus vaikuttavat merkittävästi siihen, kuinka hyvin tiimi suoriutuu

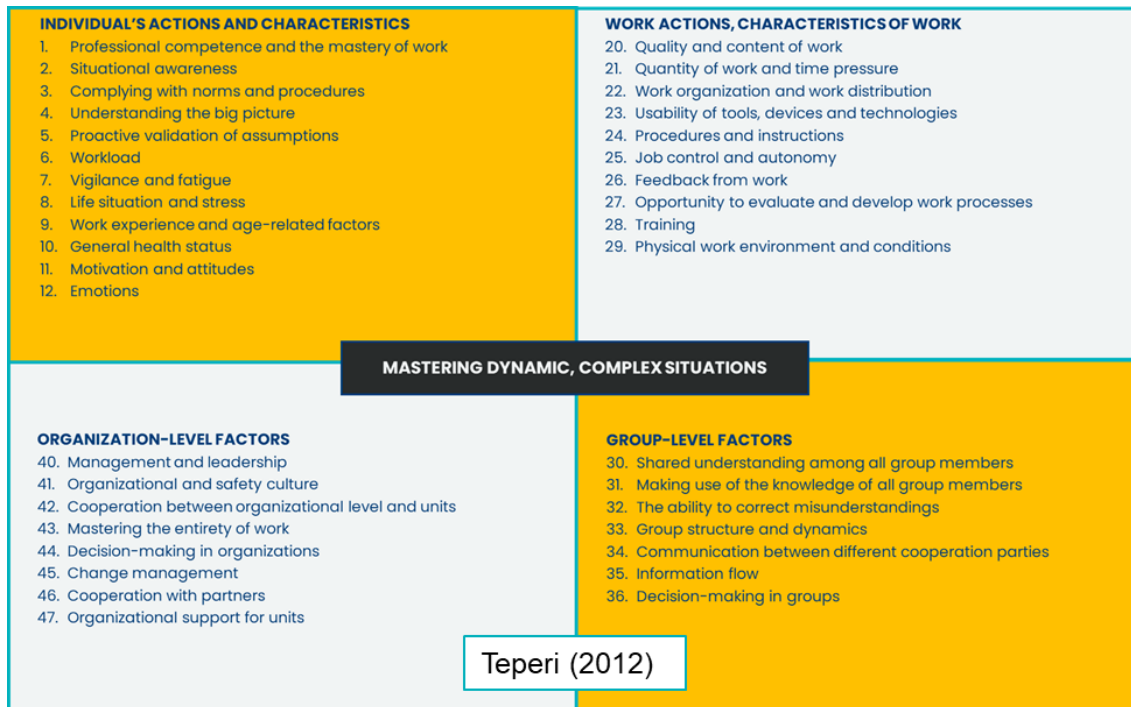
päivittäisistä tehtävistään ja odottamattomista tilanteista. HF tool auttaa tunnistamaan, onko tiimin jäsenillä yhteinen käsitys tavoitteistaan, sujuuko viestintä sujuvasti ja miten hyvin toimintaa koordinoidaan. Tällä tasolla tulee näkyväksi, miten tiimityö voi vahvistaa yhteisiä vahvuuksia – kuten kollektiivista ongelmanratkaisua – tai toisaalta synnyttää ongelmia, jos tieto ei kulje oikealle henkilölle oikeaan aikaan.

4) Organisaatio (HF tool kohdat 40-47)

Neljäs taso tarkastelee laajemmin sitä organisaatiota, jonka osana työ tapahtuu: johtamista, toimintaperiaatteita, rakenteita ja organisaatiokulttuuria. Tähän sisältyy muun muassa se, miten hyvin organisaatio tukee oppimista, tarjoaako johto riittävät resurssit ja miten turvallisuutta arvostetaan päivittäisissä päätöksissä. HF tool auttaa organisaatioita näkemään, miten ylimmän tason päätökset ja pitkäaikaiset käytännöt muovaavat sitä, mitä tapahtuu operatiivisella tasolla. Työkalu kiinnittää huomiota taustalla vaikuttaviin ilmiöihin – kuten ristiriitaisiin prioriteetteihin, heikkoihin turvallisuuskäytäntöihin tai rajallisiin oppimismahdollisuuksiin – jotka vaikuttavat työntekijöiden suoriutumiseen. Tämä organisatorinen näkökulma on keskeinen työkalun tavoitteelle tarkastella ihmisiä osana laajempaa järjestelmää sen sijaan, että heidät nähtäisiin irrallisina yksilöinä.

Kiteytetysti HF tool:

- Auttaa käyttäjiä hahmottamaan “kokonaiskuvan” sekä inhimillisen toiminnan systeemisen merkityksen operatiivisessa työssä.
- Jäsentää inhimilliset tekijät neljälle tasolle:
 - yksilö (individual)
 - työ (work)
 - ryhmä (group)
 - organisaatio (organization)
- Kehitettiin alun perin 2000 luvulla Suomen lennonvarmistuksen tarpeisiin.
- Laajasti käytössä turvallisuushavaintojen analysoinnissa ja proaktiivisessa turvallisuudenhallinnassa.
- On suunniteltu olemaan:
 - helppokäyttöinen operatiiviselle henkilöstölle (ei vain HF asiantuntijoille)
 - integroitavissa päivittäiseen turvallisuudenhallintaan
 - kokonaisvaltainen ja myönteisesti suuntautunut, keskittyen siihen, mikä saa työn sujumaan hyvin.



Kuva 4. HF tool [55], jota HumanDT-projekti käyttää inhimillisten tekijöiden (HF) tunnistamiseen, arviointiin ja integrointiin DT-suunnittelusykliin.

2.4.2 Inhimillisten tekijöiden tarkastuslista

Inhimillisten tekijöiden tarkastuslista on HumanDT-projektissa kehitetty työkalu, joka tukee DT-suunnittelussa esiintyvien HF-riskien arviointia silloin, kun jokin HF-tekijä uhkaa jäädä huomioimatta. Tarkastuslista on taulukkomuodossa ja perustuu HF toolin kohtiin (Sarake 1), kunkin kohdan lyhyestä sisältökuvauksesta (Sarake 2) sekä väittämästä, joka kuvaa esimerkinomaisesti riskin kyseisen HF-tekijän huomiotta jäämisestä DT-suunnittelussa (Sarake 3). Lisäksi tarkastuslistassa on useita lisäsarakeita dokumentointia varten: DT-suunnitteluun lopulta valitut HF-tekijät (Sarake 4), arvioidut alkuperäiset ja lopulliset riskitasot (Sarakkeet 5 ja 7) sekä suunnittelussa toteutetut riskienhallintatoimet (Sarake 6). Taulukko 5 sisältää esimerkin tarkastuslistasta, ja täydellinen versio löytyy liitteestä 3.

Inhimillisten tekijöiden tarkastuslistaa voivat hyödyntää sekä suunnittelijat että loppukäyttäjät itsenäisesti arvioidessaan digitaalisen kaksosen suunnittelua ja etsiessään mahdollisia parannuskohteita. Väittämät, jotka arvioidaan "kyllä"-vastauksiksi – eli arvioija havaitsee suunnittelussa potentiaalisen riskin tai heikkouden – tulisi käsitellä erityisellä huolellisuudella. Yksilöllisiin ominaisuuksiin liittyvät väittämät on tarkoituksenmukaisinta käsitellä tiiviissä yhteistyössä käyttäjien kanssa, ja käyttäjähaastattelut sekä vierailut käyttöpaikoilla auttavat ymmärtämään paikallisia olosuhteita. Työn ominaisuuksiin liittyviä väittämiä puolestaan kannattaa tarkastella yhdessä käyttäjäorganisaation esihenkilö- ja operatiivisen tason kanssa, jotta työn rakenteesta ja vaatimuksista saadaan mahdollisimman kattava kuva. Ryhmätekijöiden arviointi edellyttää yhteyden luomista digitaalista kaksosta käytävään ryhmään; ryhmäkeskustelut ja -haastattelut ovat tähän usein paras menetelmä. Organisaatiotekijät

tulisi arvioida tiiviissä yhteistyössä käyttäjäorganisaation johdon kanssa, jotta laajemmat rakenteelliset ja organisatoriset reunaehdot tulevat huomioituiksi.



Taulukko 4. Inhimillisten tekijöiden tarkistuslistan rakenne. Koko taulukko liitteessä 3.

Inhimillisten tekijöiden tarkistuslista							
N ^o	HF tool kohta	TÄSMENNYS	VÄITTÄMÄ	SOV.	ART*	TOIMENPITEET	JRT**
1. YKSILO	1	Ammattitaito, työn hallinnan taso	Tieto, taidot ja asiantuntemus, joita tietyssä työssä vaaditaan	DT haastaa käyttäjien taidot, tiedot ja kyvyt	Y/N		
	2	Tilannetietoisuus	Jatkuva prosessi, jossa havaitaan, ymmärretään ja projisoidaan sitä, mitä yksilön työympäristössä tapahtuu (huomio, havainnointi, muisti, päätöksenteko ja toiminta).	DT haastaa käyttäjien huomiokykyä ja muistia. DT haastaa käyttäjien ajan tasalla olevan ymmärryksen muodostumista siitä, mitä työympäristössä tapahtuu.			
	3	Normien ja toimintatapojen noudattaminen	Normit voivat olla virallisia ohjeita, kuten kirjalliset työohjeet, turvallisuusmääräykset tai toimialakohtaiset standardit, tai ne voivat olla epävirallisia käytäntöjä, jotka kehitetään työyhteisössä.	DT on ristiriidassa käyttäjiä ohjaavien normien ja menettelytapojen kanssa. DT on ristiriidassa käyttäjän työyhteisön vakiintuneiden käytäntöjen kanssa.			
	4	Kokonaisuuden ymmärtäminen	Ymmärrys järjestelmästä tai prosessista, jossa henkilö työskentelee. Ei hetki-hetkeltä rakentuva tilannetietoisuus vaan vakaa, pitkän aikavälin käsitys järjestelmän eri elementtien vuorovaikutuksesta.	DT sumentaa käyttäjän ymmärrystä työjärjestelmän tai prosessin kokonaiskuvasta			

Inhimillisten tekijöiden tarkastuslista digitaalisen kaksosen suunnittelijoille on tarkoitettu käytettäväksi silloin, kun arvioidaan valmistuskeskeisen digitaalisen kaksosen suunnittelua sen eri kypsyystasoilla. Tarkastuslistaa voidaan hyödyntää niin ensimmäisen version (mockupin) tarkastuksessa, käyttöönottoa edeltävässä arvioinnissa kuin jo toteutetun DT-ratkaisun jälkikäteisessä parantamisessa.

Ensimmäinen versio voi olla yksinkertainen visuaalinen, fyysinen, digitaalinen tai tekstimuotoinen kuvaus suunnitellusta DT-ratkaisusta. Ensimmäisen version muotoa ei ole ennalta määriteltä, ja luovat, mielikuvitusta hyödyntävät havainnollistukset ovat toivottavia. Sen päätarkoituksena on kuvata suunnittelun mahdollisuuksia ja tukea harkittua, toimintaympäristöön juurtuvaa pohdintaa tuotteen viimeistelyssä suunnittelijoiden ja loppukäyttäjien yhteistyönä. Ensimmäisen version kokoamiseen ei tulisi käyttää liikaa resursseja, jotta suuremmillekin suunnanmuutoksille ei synny tarpeetonta kynnystä. Sen sijaan se olisi hyvä laatia nopeasti ja luonnosmaisesti, jotta suunnitteluratkaisun keskeisistä piirteistä voidaan muodostaa yhteinen ymmärrys suunnitteluprosessin varhaisessa ja vielä hahmottomassa vaiheessa. Iteraatioita tulisi jatkaa, mikäli suunnittelun yleisistä linjoista ei saavuteta riittävää yksimielisyyttä. Inhimillisten tekijöiden tarkastuslistaa voidaan käyttää suunnittelun ensimmäisen version arviointiin, jolloin esiin nousevat erityisesti ne näkökohdat, jotka vaativat lisähuomiota. Arvioinnin tulisi johtaa jatkoiteraatioihin, jotta suunnitteluratkaisua voidaan parantaa ja sovittaa entistä paremmin käyttäjien tarpeisiin.

Ennen kuin suunnitteluratkaisu otetaan varsinaiseen käyttöön, siitä tulisi tehdä perusteellisempi ja tiukempi arviointi. Suunnittelun puutteiden tunnistaminen tässä vaiheessa mahdollistaa iteroinnin, joka edistää sujuvaa käyttöönottoa ja vähentää tarvetta väistämättä resursseja kuluttaville ja aikapaineisille jälkikäteen tehtäville muutoksille. Tällaiset muutokset voivat aiheuttaa myös häiriöitä ja vaikeuksia loppukäyttäjien toiminnassa. Inhimillisten tekijöiden tarkastuslistaa voidaan hyödyntää tarkemmalla tasolla, jotta suunnitteluratkaisusta saadaan kokonaisuutena kattava ja luotettava arvio.

Jälkikäteen tehtäville parannuksille on monia mahdollisia syitä. Riippumatta siitä, kuinka hyvin suunnitteluprosessi on toteutettu, ensimmäiset käyttökokemukset paljastavat usein tarpeita jatkokehittämiseksi. Myös muutokset esimerkiksi valmistuslaitteissa edellyttävät digitaalisen kaksosen päivittämistä ja suunnitelmallisia tarkistuksia. Inhimillisten tekijöiden tarkastuslistaa voidaan hyödyntää suurten uudistusten suunnittelussa sekä tilanteissa, joissa loppukäyttäjäorganisaatioiden työnkulkuun tuodaan uusia korkean riskin tehtäviä tai niihin liittyvää teknologiaa.

2.5 Kuinka käyttää HF toolia ja inhimillisten tekijöiden tarkastuslistaa DT-suunnittelussa?

HF toolin tarkoituksena on tarjota sanasto, jonka avulla voidaan kiinnittää huomiota digitaalisen kaksosen suunniteltuun käyttöön liittyviin inhimillisiin tekijöihin. Se voi ohjata huomiota seikkoihin, joita ei muutoin ehkä huomioitaisi suunnitteluprosessin aikana. HF toolia on tarkoitus käyttää osana yhteistyötä loppukäyttäjien kanssa suunnittelutavoitteiden määrittämiseksi. Seuraavat vaiheet tulisi toteuttaa:

1. Järjestä vierailu siihen toimintaympäristöön, jossa digitaalinen kaksonen tulee toimimaan. Kevyempänä vaihtoehtona voit järjestää tapaamisen niiden henkilöiden kanssa, jotka tulevat käyttämään digitaalista kaksosta sen käyttöönoton jälkeen.
2. Pyydä osallistujia kuvaamaan ne työtehtävät ja prosessit, joissa digitaalinen kaksonen tulee olemaan mukana. Keskity niihin tehtäviin ja prosesseihin, joita digitaalisen kaksosen on tarkoitus tukea.
3. Ohjeista kuvaamaan prosessi sellaisena kuin se tällä hetkellä etenee. Tavoittele yksityiskohtaista tietoa, jotta saat ymmärryksen prosessista niiden näkökulmasta, jotka osallistuvat siihen työnsä osana:
 - a) KUKA
 - b) tekee MITÄ
 - c) MILLE
4. Tukeudu HF tooliin ja esitä täsmentäviä kysymyksiä varmistaaksesi hyvän kokonaisymmärryksen prosessista inhimillisten tekijöiden näkökulmasta.
5. Pyydä osallistujia nimeämään kolme inhimillistä tekijää jokaisesta HF toolin neljästä sisältöalueesta (työ, yksilö, ryhmä, organisaatio), jotka on erityisen tärkeää huomioida digitaalisen kaksosen suunnittelussa.
6. Pyydä konkreettisia kuvauksia siitä, miten nämä inhimilliset tekijät tulisi huomioida lopullisessa suunnittelussa.
7. Täsmennä saatu tieto ja koostaa sen pohjalta konkreettiset suunnittelumäärittelyt.

Inhimillisten tekijöiden tarkastuslista helpottaa sellaisten riskien arviointia, jotka voivat syntyä, jos inhimilliset tekijät jätetään huomioimatta digitaalisen kaksosen kehittämisessä. Etene seuraavien vaiheiden mukaisesti:

1. Tee yhteistyötä loppukäyttäjien kanssa inhimillisten tekijöiden huomiotta jäämisen aiheuttamien riskien arvioimiseksi. Pyydä osallistujia käymään tarkastuslista läpi ja arvioimaan sarakkeen 3 väittämä.
2. Keskity ”Kyllä”-vastauksiin, sillä ne edustavat tekijöitä, jotka loppukäyttäjät kokevat ongelmallisiksi.
3. Esitä jatkokysymyksiä selventääksesi niitä osa-alueita, joita suunnitelmassa täytyy kehittää.
4. Arvioi riski riskiarviointimatriisin avulla.
5. Keskity väittämiin, jotka on arvioitu ”suureksi riskiksi”.
6. Iteroi suunnittelua ja toista arviointi, kunnes saavutetaan ”pieni riski” -taso.

3. Ihmiskeskeisten periaatteiden implementointi digitaalisten kaksosten suunnittelussa

EN ISO 9241-210 -standardissa esitettyä inhimilliskeskeisten (HC) vuorovaikutteisten digitaalisten järjestelmien suunnittelun käsitteellistä mallia on käytetty tässä ohjeistuksessa inhimilliskeskeisen digitaalisen kaksosen (HC-DT) suunnittelun yleisenä mallina (kuva 3). Käsitteellinen malli tarjoaa rakenteen, mutta jättää avoimeksi käytännön ratkaisut, joilla kunkin vaiheen tavoitteet saavutetaan.

Alla esitetty menetelmä soveltuu ensisijaisesti tämän standardin ehdottaman toimintasyklin vaiheisiin 1, 2 ja 3, kun kehitetään uutta inhimilliskeskeistä (HCD) tuotetta tai järjestelmää (kuva 3). Suunnittelun arviointivaihetta (vaihe 4) tulisi kuitenkin tarkastella kaikkien digitaalisen kaksosen suunnittelun eri väliversioiden ja lopullisen version osalta. Suunnittelun arviointi on olennainen osa HCD-prosessia. Laaja valikoima arviointimenetelmiä voidaan hyödyntää suunnitteluratkaisujen laadun ja soveltuvuuden arvioimiseksi (ks. ISO/TR 16982). EN ISO 9241-210:n ehdottamia menetelmiä ovat muun muassa käyttäjäpohjaiset testaukset, tarkasteluihin perustuva arviointi sekä pitkäaikainen seuranta.

Menetelmällisesti digitaalisen kaksosen suunnittelussa inhimillisten tekijöiden huomioimatta jättäminen on riskitekijä, joka tulee ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa, sillä sen sivuuttaminen voi vaikuttaa kielteisesti työntekijöiden turvallisuuteen, terveyteen ja hyvinvointiin sekä työn sujuvuuteen siinä valmistusprosessissa, jossa digitaalinen kaksonen toimii.

Tämän ohjeistuksen tämän osion tarkoituksena on tarjota seulontamenetelmä inhimillisten tekijöiden (HF) huomiotta jättämisen aiheutuvien riskien arvioimiseksi ja niiden käsittelyn integroimiseksi digitaalisen kaksosen suunnitteluprosessiin inhimilliskeskeisen suunnittelun (HCD) saavuttamiseksi. Tämän vuoksi ohjeistuksessa sovelletaan riskiperusteista suunnittelulähestymistapaa (Safe-by-design), hyödyntäen riskienhallinnan alalla laajalti tunnistettuja menetelmiä ja käytäntöjä. Safety-by-Design-konsepti (SbD), joka tunnetaan myös nimillä Safety Integration ja Prevention through Design, on laajasti tunnistettu lähestymistapa teollisten laitteiden, järjestelmien ja prosessien turvallisuussuunnittelussa. Kaikissa tapauksissa sillä tarkoitetaan vaarojen poistamista tai riskien minimoimista tuotteen suunnitteluprosessin varhaisissa vaiheissa. SbD on siten yleinen periaate, jota voidaan soveltaa minkä tahansa tuotteen suunnitteluun, kuten digitaaliseen kaksosteknologiaan perustuvaan valmistusjärjestelmään. Tämä lähestymistapa mahdollistaa inhimillisiin tekijöihin liittyvien riskien analysoinnin ja arvioinnin sekä riskien lieventämiseen tähtäävien suunnittelustrategioiden esittämisen inhimilliskeskeisen digitaalisen kaksosen (HC-DT) saavuttamiseksi.

Tämän ohjeistuksen tavoitteena on tarjota kevyt ja yksinkertainen tapa tuoda inhimilliset tekijät esiin digitaalisen kaksosen suunnitteluprosessin aikana. Välttääkseen suunnitteluprosessien monimutkaistamista ohjeistus hyödyntää kolmea vaihetta, jotka ovat jo valtaosassa DT-suunnitteluprosesseja mukana (kuva 5): 1) Keskustelut loppukäyttäjien kanssa suunnittelutavoitteiden määrittämiseksi ja olennaisen tiedon keräämiseksi (tiedonkeruu), 2) DT:n käyttöönottoon liittyvien riskien arviointi

(riskinarviointi) ja 3) Strategioiden tarjoaminen HF-riskin pienentämiseksi hyväksyttävälle tasolle (riskien vähentäminen).

Ohjeistus tarjoaa neljä menetelmällistä työkalua, jotka on esitetty liitteessä 3: HF tool ja inhimillisten tekijöiden tarkastuslista, 3×3-riskimatriisi ja inhimillisiin tekijöihin liittyvien riskien hallinnan teknisten strategioiden kooste, jotka kuvataan tässä osiossa. Näitä kaikkia työkaluja käytetään tässä osiossa esitetyn menetelmällisen lähestymistavan toteuttamiseen (kuva 5).

Keskeisten sidosryhmien tunnistaminen loppukäyttäjien joukosta sekä aktiivinen yhteistyö heidän kanssaan on edellytys näiden työkalujen käyttämiselle. Tämän saavuttamiseksi tulee hyödyntää loppukäyttäjäorganisaatioiden johdon tietämystä siitä, ketkä ovat keskeiset sidosryhmät, jotka tulevat käyttämään digitaalista kaksosta sen käyttöönoton jälkeen. HumanDT-projektin haastattelujen perusteella keskeisiä sidosryhmiä ovat tyypillisesti: a) operaattorit, b) kunnossapitohenkilöstö, c) johto ja d) työnjohtajat.

A Tässä kuvattu menetelmä on luonteeltaan johdantotasoinen ja täsmällinen toteutus tulee varmistaa operatiivinen ympäristö huomioiden.



Ohjeistus sisältää neljä menetelmällistä työkalua: 1) HF tool, 2) inhimillisten tekijöiden tarkastuslista, 3) riskimatriisi ja 4) inhimillisiin tekijöihin liittyvien riskien hallinnan teknisten strategioiden kooste. Näitä kaikkia työkaluja käytetään ohjeistuksessa esitetyn vaiheittaisen menetelmällisen lähestymistavan toteuttamiseen, jonka tavoitteena on integroida inhimilliset



3.1 Vaiheistettu lähestymistapa Inhimillisten tekijöiden implementointiin ihmiskeskeisessä digitaalisten kaksosten suunnitteluprosessissa

The three-step approach to integrating HF into a HC-DT consists of the following steps (Figure 5):

3.1.1 Vaihe 1: tiedonkeruu

Tämän vaiheen tavoitteena on kerätä olennaista tietoa sidosryhmiltä, jotta digitaalisen kaksosen käyttöympäristö voidaan määritellä mahdollisimman yksityiskohtaisesti ja jotta seuraavia prosessin vaiheita varten saadaan selkeää ja täsmällistä lähtötietoa. Tämä tieto voi perustua olemassa olevaan dokumentaatioon tai sitä voidaan hankkia haastattelujen, tapaamisten ja työpajojen kautta. Keskeiset mukaan otettavat sidosryhmät ovat DT:n loppukäyttäjäyrityksen johto, työnjohto, operaattorit ja kunnossapito.

Tässä vaiheessa:

1. Järjestä tapaaminen tai vierailu loppukäyttäjäyrityksen keskeisten sidosryhmien kanssa. Ennen tapaamista ohjeista heitä esittelemään se käyttöympäristö, jossa digitaalinen kaksonen tulee toimimaan.
2. HF-riskien kartoittamiseksi on suositeltavaa tehdä yhteistyötä eri roolien kanssa riskin luonteesta riippuen

3. Kun osallistajat ovat esitelleet käyttöympäristön omasta näkökulmastaan, esitä HumanDT-työkalut ja niiden käyttötapa (HF Tool, inhimillisten tekijöiden tarkistuslista, riskimatsiisi ja teknisten strategioiden koosta).
4. Pyydä osallistujia nimeämään tärkeimmät HF-työkalujen kohteet, jotka tulisi huomioida DT:n suunnittelussa.
5. Pyydä osallistujia selittämään, miten nämä tunnistetut HF-tekijät tulisi huomioida suunnittelussa.
6. Hyödynnä heidän näkemyksiään konkreettisten suunnitteluvaatimusten muodostamiseen.
7. Kerää kaikki muu olennainen tieto DT:n käyttöympäristön määrittelemiseksi.



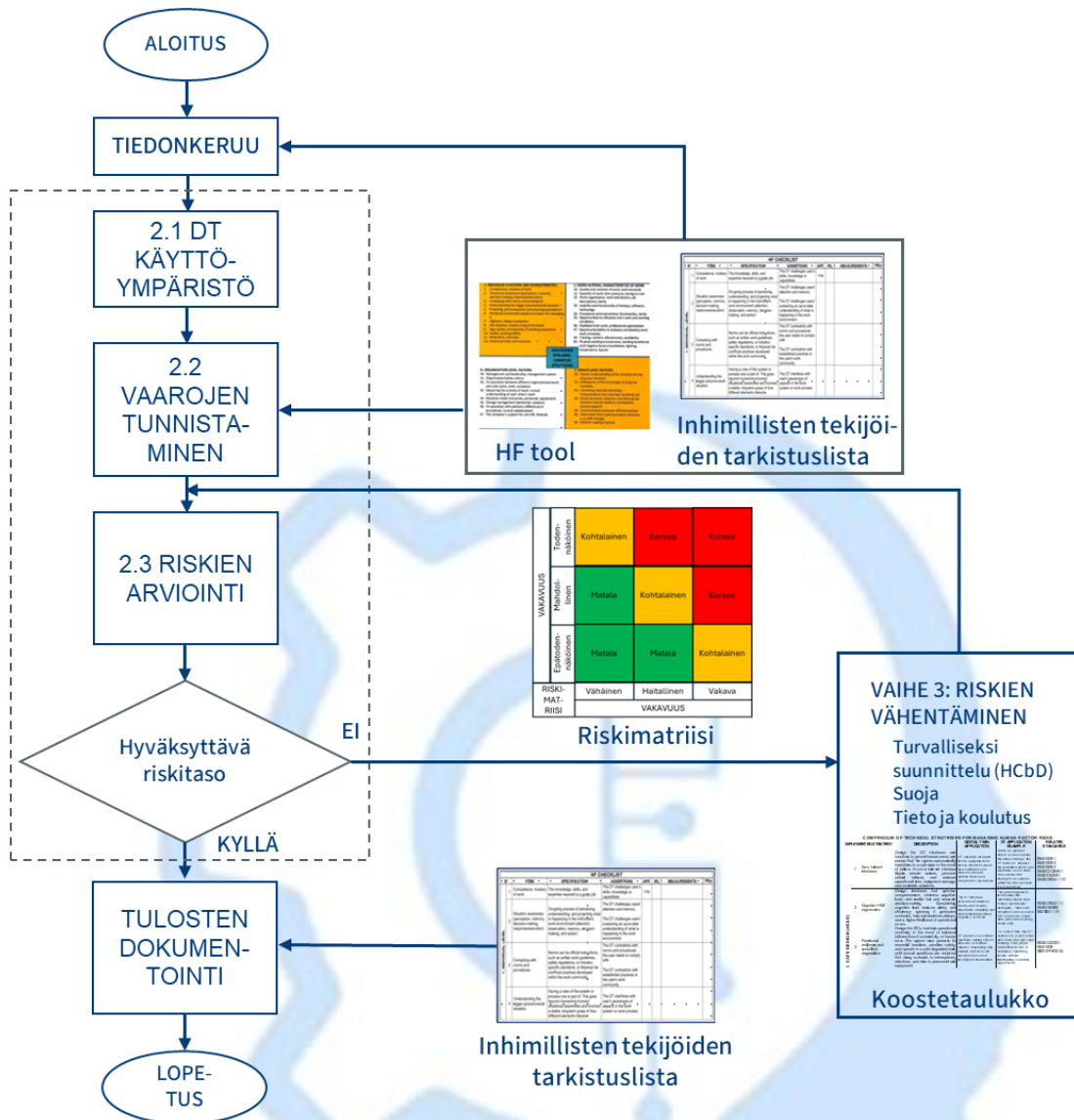


Figure. Step-by-step procedure for the evaluation and reduction of HF risks and their integration into the HC-DT design, using the four tools provided by the Guideline

3.1.2 Vaihe 2: riskiarviointi

Tämä vaihe sisältää seuraavat toiminnot: DT:n käyttökonteksti, vaarojen tunnistaminen, riskin arviointi ja riskin arviointi suhteessa hyväksyttävyyteen.

2.1 DT:n käyttökonteksti. Tässä vaiheessa määritellään suunniteltavan digitaalisen kaksosen ominaisuudet, käyttöympäristö, käyttötarkoitus ja odotetut käyttöolosuhteet sekä käyttäjien ominaisuudet ja odotettavissa oleva vaihtelu ihmisen ja järjestelmän vuorovaikutuksessa. Suunnittelija käy läpi edellisessä vaiheessa kerätyn tiedon ja päivittää digitaalisen kaksosen käyttökontekstin ensimmäisen version.

2.2 Vaarojen tunnistaminen. Tässä vaiheessa tarkastellaan järjestelmällisesti niitä vaaroja ja vaaratilanteita, joita voi syntyä, jos inhimilliset tekijät jätetään huomioimatta digitaalisen kaksosen suunnittelussa. Sekä HF toolia että inhimillisten tekijöiden

tarkastuslistaa käytetään tässä vaiheessa niiden vaarojen analysoimiseksi, vahvistamiseksi ja dokumentoimiseksi, jotka tulee lopulta huomioida DT:n suunnittelussa (merkitty tarkastuslistan soveltamissarakkeessa "Kyllä"). Analyysi kattaa kaikki digitaalisen kaksosen elinkaaren vaiheet (suunnittelu, asennus ja testaus, käyttö, kunnossapito ja säätäminen sekä käytöstä poisto) sekä suunnitellut käyttötilat.

2.3 Riskin arviointi. Tässä vaiheessa arvioidaan ja määritetään riskitaso kullekin edellisessä vaiheessa tunnistetulle vaaralle ja vaaratilanteelle. Prosessin helpottamiseksi ohjeistus ehdottaa ammatillisen harkinnan lisäksi 3×3-riskimatriisiin (EN 30010) käyttöä. Suunnittelija voi kuitenkin halutessaan käyttää myös mitä tahansa muuta riskinarviointityökalua, jota hän käyttää tavanomaisesti ja jonka kokee tarkoituksenmukaiseksi.

3×3-riskimatriisi (liite 3) on yksinkertainen, visuaalinen ja puolikvantitatiivinen työkalu, jonka avulla suunnittelija voi arvioida riskejä yhdistämällä kaksi muuttujaa: **todennäköisyyden (P)** ja **vaikutuksen vakavuuden (S)**. Matriisi tuottaa yhdeksän mahdollista yhdistelmää, jotka syntyvät risteyttämällä kolme todennäköisyystasoa (epätodennäköinen, mahdollinen, todennäköinen) kolmen vakavuustason kanssa (vähäinen, haitallinen, vakava). Riskit luokitellaan mataliksi, keskisuuriksi ja korkeiksi, ja ne merkitään matriisissa vastaavasti vihreällä, oranssilla ja punaisella. Korkeat riskit on käsiteltävä välittömästi, keskisuuret riskit edellyttävät kohtuullisten lieventämistoimenpiteiden toteuttamista ja matalat riskit hyväksytään yleensä ja niitä seurataan ajoittain. Tämä menetelmä helpottaa niiden riskien nopeaa hahmottamista, jotka vaativat ensisijaista huomiota (ks. IRL-sarake HF-tarkastuslistassa), ja yhdenmukaistaa päätöksentekoa.

3×3-matriisin tarjoaman yksinkertaisuuden ja tulosten nopean tulkittavuuden ansiosta arvioinnit ovat ketteriä ja helposti ymmärrettäviä, mikä on linjassa tämän ohjeistuksen ehdottaman seulontamenetelmän kanssa. Kolmiportainen riskiasteikko voi kuitenkin olla riittämätön monimutkaisten riskien käsittelyssä. Tällöin voidaan käyttää tarkempia riskimatriiseja (esim. 5×5) tai muita perusteellisempia riskinarviointimenetelmiä (ks. EN 30010).

Taulukko 5. Inhimillisiin tekijöihin liittyvien riskien hallinnan teknisten strategioiden kooste

Inhimillisiin tekijöihin liittyvien riskien hallinnan teknisten strategioiden kooste						
TOTEUTETTU STRATEGIA		KUVAUS	DIGITAALISEN KAKSOSEN SOVELLUS	DT SOVELLUKSEN ESIMERKKI	LIITTYVÄT STANDARDIT	
1. TURVALLISEKSI SUUNNITTELU (HCbD)	1	Virheensietoiset käyttöliittymät	Suunnittele DT:n käyttöliittymät ja toiminnot siten, että ne ehkäisevät inhimillisiä virheitä ja varmistavat, että järjestelmä siirtyy automaattisesti turvalliseen tilaan vikatilanteessa. Virheensietoinen käyttöliittymä estää vaaralliset toiminnot, ehkäisee kriittisiä vikatilanteita ja vähentää operatiivisia riskejä, laitevaurioita ja vältettävissä olevia onnettomuuksia.	DT validoi kaikki syötteet ennen niiden käsittelyä, estää virheelliset arvot ja ylläpitää turvallisia tiloja estääkseen toimintoja, jotka voisivat vaarantaa toiminnan.	Kun operaattori syöttää arvon, joka on sallitun alueen ulkopuolella, DT estää sen, näyttää sallitut rajat ja ylläpitää turvallisen tilan. Järjestelmä sallii myös muutoksen peruuttamisen ensimmäisten sekuntien aikana, mikäli sitä ei ole vahvistettu.	EN 61508-1 EN 61508-2 EN 61508-3 EN ISO 13849-1 EN IEC 62061 EN ISO 9241-110
	2	Kognitiivinen HMI-ergonomia	Suunnittele käyttöliittymät siten, että ne optimoivat ymmärrettävyyden, minimoivat kognitiivisen kuormituksen ja mahdollistavat nopean sekä tarkan päätöksenteon. Kognitiivisen kuormituksen huomioiminen varmistaa selkeyden ja tehokkuuden; sen laiminlyönti puolestaan aiheuttaa epäselvyyksiä, virheellisiä päätöksiä, viiveitä ja suuremman	DT-käyttöliittymä esittää tiedon selkeästi ja visuaalisesti jäsennehtynä, mikä mahdollistaa nopean ymmärtämisen ilman kognitiivista ylikuormitusta.	Paneeli jäsentää tiedon toiminnallisiin lohkoihin, jotka vähentävät toiminnallista epäselvyyttä. Taulukot on yksinkertaistettu, ja hakutyökalu on lisätty tiedon paikantamiseksi ilman visuaalisen kuorman kasvua.	EN ISO 9241-11 EN ISO 6385 ISO 9241-110

Suunnittelija tai suunnittelutiimi arvioi ammatillisen harkintansa perusteella kullekin HF-tarkastuslistassa tunnistetulle vaaralle todennäköisyys- (P) ja vakavuusarvot (S) ja kirjaa tuloksena saadun arvon IRL-sarakkeeseen. Tämän jälkeen suunnittelija arvioi tuloksen ja, mikäli IRL-arvo on keski-suuri tai korkea, hänen tulisi etsiä tarkoituksenmukaisia strategioita riskin pienentämiseksi matalalle tasolle.

Tässä vaiheessa 2 on tilanteen mukaan suositeltavaa osallistaa keskeisiä sidosryhmiä DT:n käyttökotekstin määrittelyyn, vaarojen tunnistamiseen, riskin arviointiin tai näitä aiheita koskevien suunnittelijan laatimien asiakirjojen läpikäyntiin. Helpottaaksesi aktiivista osallistumista, kertaa sidosryhmille inhimillisten tekijöiden tarkastuslistan ja riskimatriisin käyttö.

3.1.3 Vaihe 3: riskien hallinta

Suunnittelijan tueksi tässä vaiheessa ohjeistus tarjoaa yksinkertaisen työkalun, nimeltään inhimillisiin tekijöihin liittyvien riskien hallinnan teknisten strategioiden kooste (taulukko 6 ja liite 3). Tämä työkalu sisältää 32 taulukkomuotoista riskien vähentämisstrategiaa, jotka on luokiteltu kolmeen hierarkkiseen kategoriaan: turvallinen suunnittelu (9 strategiaa), suojaus (18 strategiaa) ja koulutus / informaatio (5 strategiaa). Kullekin strategialle (sarake 1) taulukko esittää: strategian teknisen yhteenvedon sen käyttöyhteydestä ja soveltamisalasta (sarake 2); ohjeistuksen sen toteuttamisesta ja integroimisesta DT-suunnitteluun (sarake 3); soveltavan esimerkin, joka havainnollistaa strategian käyttöä DT-skenaariossa (sarake 4); sekä ei-tyhjentävän joukon asiaankuuluvia standardeja ja viiteasiakirjoja (sarake 5), joita suunnittelija voi hyödyntää strategian soveltamisen tukena DT-kehitysprosessissa.

Suunnittelija voi käyttää koostetta yksinkertaisena työkaluna riskien vähentämisstrategioiden tunnistamiseen, valitsemiseen ja testaamiseen, kunnes riski saadaan hyväksyttävälle tasolle. Suunnittelijan tulee asettaa turvallisen suunnittelun strategiat etusijalle suojausstrategioihin nähden, ja nämä puolestaan koulutus- ja informaatiostrategioiden edelle, riskienhallintatoimenpiteiden yleisesti tunnustetun hierarkian mukaisesti.

Kun yksi tai useampi strategia on valittu HF-riskin vähentämiseksi, suunnittelija laskee uudelleen odotetun riskitason strategioiden toteuttamisen jälkeen. Mikäli uusi arvioitu riskitaso on hyväksyttävä (matala), tämä arvo dokumentoidaan HF-tarkastuslistaan (FRL) yhdessä valittujen strategioiden kanssa. Muussa tapauksessa suunnittelija toistaa prosessin iteratiivisesti ja testaa uusia strategioita, kunnes riski on hyväksyttävällä tasolla. Sama menettely suoritetaan kaikille muille HF-tekijöille, jotka on HF-tarkastuslistassa tunnistettu soveltuviksi DT-suunnitteluun.

Tässä vaiheessa 3 on tilanteen mukaan suositeltavaa osallistaa keskeisiä sidosryhmiä riskien vähentämiseen liittyviin toimiin tai suunnittelijan laatimien aiheeseen liittyvien asiakirjojen tarkastamiseen. Helpottaaksesi aktiivista osallistumista, kertaa sidosryhmille koostetyökalun käyttö.

4. Johtopäätökset

Digitaalisen kaksosen (DT) teknologia on edelleen kehittymässä oleva ratkaisu valmistavassa teollisuudessa, jossa sitä sovelletaan pääasiassa edistyneisiin toimintoihin, kuten prosessien optimointiin, tuotannon suunnitteluun, energiatehokkuuden hallintaan, laadunvarmistukseen, nollavirhestrategioihin, prosessien dynaamiseen uudelleenkonfigurointiin, ennakoivaan kunnossapitoon sekä innovatiivisiin liiketoimintamalleihin. Työturvallisuuden ja työterveyden (OSH) alueella DT-sovellukset ovat tähän asti keskittyneet pääasiassa dynaamiseen, reaaliaikaiseen riskien seurantaan ja arviointiin, turvallisuuden varmistamiseen ihmisen ja robotin yhteistoimintaympäristöissä (HRC) sekä immerstiivisen virtuaalikoulutuksen tukemiseen.

Industry 5.0 (I5.0) -paradigman esiinmarssi vahvistaa tarvetta asettaa ihminen teollisten järjestelmien ytimeen, mikä edellyttää inhimillisiin tekijöihin (HF) liittyvien näkökulmien eksplisiittistä integroimista kehittyneiden teknologioiden, kuten digitaalisten kaksosten, suunnitteluun. Tällainen integrointi ei kuitenkaan ole suoraviivaista: se vaatii työntekijöiden todellisten rajoitteiden, kyvykkyyksien ja toiminnallisten vaatimusten systemaattista ja näyttöön perustuvaa ymmärtämistä — aluetta, johon teollisten järjestelmien suunnittelukäytännöissä on perinteisesti kiinnitetty vain rajallista huomiota. Aidosti inhimilliskeskeisten (HC) ratkaisujen saavuttaminen edellyttääkin uusia menetelmällisiä viitekehyksiä, monitieteisiä työkaluja sekä tiivistä yhteistyötä insinööritieteiden, ergonomian ja käyttäytymistieteiden välillä. Tämä korostaa sitä, että vaikka ihmiskeskeisyys on Industry 5.0:n keskeinen periaate, sen käytännön toteutus ei ole itsestäänselvyys eikä automaattinen prosessi.

Tämä ohjeistus on tarkoitettu johdantotason aineistoksi, joka tarjoaa alustavan yleiskatsauksen ihmiskeskeisen digitaalisen kaksosen (HC-DT) suunnittelun keskeisiin osa-alueisiin. Vaikka se esittää alkuvaiheen käsitteellisen ja menetelmällisen viitekehyksen, se ei voi kattaa kaikkia niitä haasteita, jotka liittyvät inhimillisten tekijöiden tehokkaaseen integrointiin. Aidosti inhimilliskeskeisen suunnittelun (HCD) saavuttaminen edellyttää syvempää monitieteistä analyysiä ja kehittyneempiä työkaluja. Siksi tähän ohjeistukseen tulisi suhtautua alkuvaiheen kontribuutiona — perustavana askeleena oikeaan suuntaan — ei kuitenkaan täysin kattavana tai lopullisena ratkaisuna.

Ohjeen keskeisenä tavoitteena on edistää ihmiskeskeisten käytäntöjen omaksumista digitaalisten kaksosten ja muiden teollisten järjestelmien suunnittelussa, ja siten mahdollistaa aiempaa tietoisemmat, mukautuvammat ja yhteistyöhön perustuvat tuotantoympäristöt, jotka parantavat kilpailukykyä, turvallisuutta ja työntekijöiden hyvinvointia.

Lähteet

- [1] Agnusdei, G. P., Elia, V., & Gnoni, M. G. (2021). A classification proposal of digital twin applications in the safety domain. *Computers & Industrial Engineering*, 154, 107137. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107137>
- [2] ANSI/ISO. (2019). ISO 9241-210: Ergonomics of human–system interaction — Part 210: Human-centred design for interactive systems.
- [3] Armenteros-Cosme, P., Arias-González, M., Alonso-Rollán, S., Márquez-Sánchez, S., & Carrera, A. (2025). Advancements in artificial intelligence and machine learning for occupational risk prevention: A systematic review on predictive risk modeling and prevention strategies. *Sensors*, 25(17), 5419. <https://doi.org/10.3390/s25175419>
- [4] Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. European Commission.
- [5] Brown, T. (2009). *Change by design: How design thinking transforms organizations and inspires innovation*. HarperCollins.
- [6] Carayon, P., Schoofs Hundt, A., Karsh, B.-T., et al. (2006). Work system design for patient safety: The SEIPS model. *Quality & Safety in Health Care*, 15(Suppl 1), i50–i58.
- [7] Díaz Martínez, M. A., Román Salinas, R. V., Cervantes Zubirías, G., & Morales Rodríguez, M. A. (2025). Artificial intelligence and technologies applied to occupational ergonomics: The new era of scientific ergonomics 4.0. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 73(3), 274–288. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V73I3P121>
- [8] Digital Twin Consortium. (2026). Definition of a digital twin. <https://www.digitaltwinconsortium.org/initiatives/the-definition-of-a-digital-twin/>
- [9] EC. (2022). Recommendation (EU) 2022/2510. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32022H2510>
- [10] EU-OSHA. (2022a). Smart digital monitoring systems for OSH – Uses and challenges. <https://data.europa.eu/doi/10.2802/25469>
- [11] EU-OSHA. (2022b). Artificial intelligence for worker management – An overview. <https://data.europa.eu/doi/10.2802/76354>
- [12] EU-OSHA. (2022c). Cognitive automation – Implications for OSH. <https://data.europa.eu/doi/10.2802/979082>
- [13] EU-OSHA. (2023). Surveillance and monitoring of remote workers: Implications for OSH. <https://data.europa.eu/doi/10.2802/135794>
- [14] EU-OSHA. (2024). Digital technologies at work and psychosocial risks: Evidence and implications for occupational safety and health. <https://data.europa.eu/doi/10.2802/0488296>
- [15] EU-OSHA. (2024). Smart digital systems for improving worker safety and health: Overview of research and practices. <https://data.europa.eu/doi/10.2802/3725120>
- [16] EU-OSHA. (2024). Strategies for safety and health in an automated world. <https://data.europa.eu/doi/10.2802/275981>
- [17] EU-OSHA. (2025). Smart digital systems: Implementation guide for improving workers' safety and health. <https://data.europa.eu/doi/10.2802/4459602>
- [18] Eurostat. (2026). Businesses in the manufacturing sector – Statistics explained. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?oldid=667816>

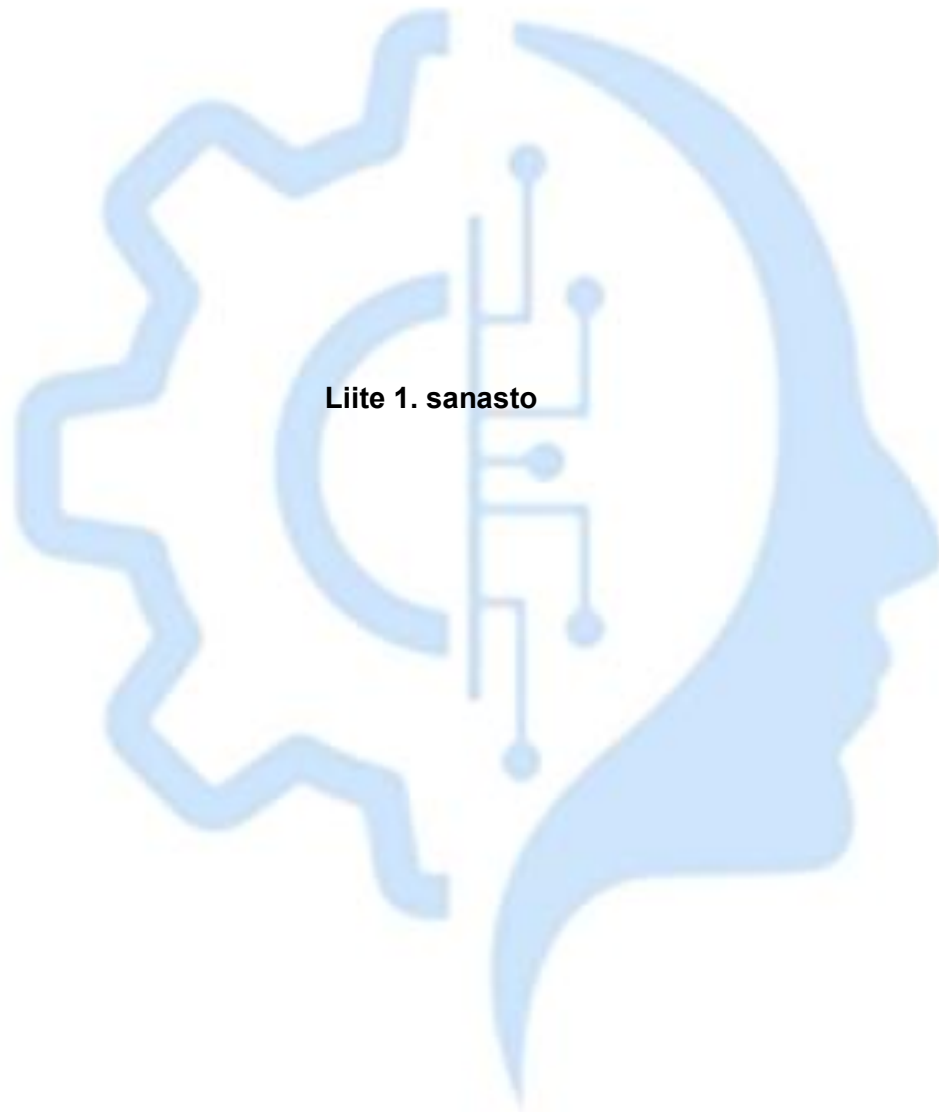
- [19] Grieves, M. (2014). Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. White Paper.
- [20] Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. En J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85–113). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.
- [21] Hollnagel, E. (2014). *Safety-I and Safety-II: The past and future of safety management*. Ashgate.
- [22] IEC. (2010). IEC 61508: Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. <https://www.iec.ch>
- [23] International Ergonomics Association. (2000). Definition and domains of ergonomics. Human Factors and Ergonomics Society. <https://www.hfes.org/about/what-is-human-factors-and-ergonomics/other-definitions-of-human-factors-and-ergonomics>
- [24] Issaili, O., Belhaj, N., & Sedqui, A. (2025). Digital twin for industrial workplace safety. In *Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development (AI2SD 2024)* (pp. 344–357).
- [25] International Organization for Standardization. (2015). ISO 9001: Quality management systems — Requirements. <https://www.iso.org/standard/62085.html>
- [26] International Organization for Standardization. (2016). ISO/TR 22100-3: Safety of machinery — Relationship with ISO 12100 — Part 3: Implementation of ergonomic principles in safety standards.
- [27] International Organization for Standardization. (2019). ISO 9241-210:2019 Ergonomics of human–system interaction — Part 210: Human-centred design for interactive systems. <https://www.iso.org/standard/77520.html>
- [28] International Organization for Standardization. ISO 23247-1: Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles. <https://www.iso.org/standard/75066.html>
- [29] International Organization for Standardization. (2021). ISO 23247-3: Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 3: Digital representation of manufacturing elements. <https://www.iso.org/standard/75068.html>
- [30] International Organization for Standardization. ISO 23247-4: Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 4: Information exchange. <https://www.iso.org/standard/75069.html>
- [31] International Organization for Standardization. ISO 13849-1: Safety of machinery — Safety-related parts of control systems — Part 1: General principles for design. <https://www.iso.org/standard/73481.html>
- [32] International Organization for Standardization. (2024). ISO/IEC 20924: Internet of Things (IoT) and digital twin — Vocabulary. <https://www.iso.org/standard/82794.html>
- [33] International Organization for Standardization. (2025). ISO/TR 23247-100: Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 100: Use case on management of semiconductor ingot growth process. <https://www.iso.org/standard/86745.html>
- [34] International Organization for Standardization. (n.d). ISO/DIS 23247-5: Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 5: Digital thread for digital twin [Under development].

- [35] International Organization for Standardization (n.d.). ISO/DIS 23247-6: Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 6: Digital twin composition [Under development].
- [36] International Organization for Standardization (n.d.). ISO/CD TR 23247-101: Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 101: Robotic welding process use case [Under development].
- [37] International Organization for Standardization (2022). ISO/IEC 27001: Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security management systems — Requirements. <https://www.iso.org/standard/27001.html>
- [38] International Organization for Standardization (2023). ISO/IEC 30173: Digital twin — Concepts and terminology. <https://www.iso.org/standard/82896.html>
- [39] Jiang, L., Zhang, J., & Wong, Y. D. (2024). Digital technology in occupational health of manufacturing industries: A systematic literature review. *Discover Applied Sciences*, 6, 631. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06349-4>
- [40] Juvonen, R., Hämäläinen, R. P., Saarinen, E., & Teperi, A.-M. (2025). Systems Intelligence and the HF Tool in foregrounding human factors in systemic safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 26(5), 608–629. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2025.2499486>
- [41] Liedtka, J. (2015). Linking design thinking with innovation outcomes through cognitive bias reduction. *Journal of Product Innovation Management*, 32(6), 925–938.
- [42] Liedtka, J. (2018). Why design thinking works. *Harvard Business Review*.
- [43] López de Ipiña, J. M., Aznar, G., Lopez, A., Olite, J., Koivisto, J., Bartolini, G., & Costa, A. (2021). Digital twins applied to the implementation of Safe-by-Design strategies... *Journal of Physics: Conference Series*, 1953, 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1953/1/012010>
- [44] Mollbach, E., & Magnus, A. (2020). COHeReNT: A HRN-based risk assessment method tailored to human-robot collaboration. *ESREL/PSAM Conference*. https://doi.org/10.3850/978-981-14-8593-0_5164-cd
- [45] Ngoc, H. N., Lasa, G., & Iriarte, I. (2022). Human-centred design in Industry 4.0: Case study review and opportunities for future research. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33, 35–76. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01796-x>
- [46] Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., et al. (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration. *BMJ*, 372, n160. <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>
- [47] Paiva Hippertt, M., Lazai Junior, M., Szejka, A. L., Canciglieri Junior, O., Rocha Loures, E., & Portela Santos, E. A. (2019). Towards safety level definition based on the HRN approach for industrial robots. *Procedia Manufacturing*, 38, 1481–1490. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.139>
- [48] Park, J.-S., Lee, D.-G., Jimenez, J. A., Lee, S.-J., & Kim, J.-W. (2023). Human-focused digital twin applications for occupational safety and health. *Applied Sciences*, 13(7), 4598. <https://doi.org/10.3390/app13074598>
- [49] Park, J., & Kang, D. (2024). Artificial intelligence and smart technologies in safety management: A comprehensive analysis across multiple industries. *Applied Sciences*, 14(24), 11934. <https://doi.org/10.3390/app142411934>
- [50] Piascik, B., Vickers, J., Lowry, D., Scotti, S., Stewart, J., & Calomino, A. (2012). *Materials, structures, mechanical systems, and manufacturing roadmap*. NASA.
- [51] Reason, J. (1997). *Managing the risks of organizational accidents*. Ashgate.

- [52] Scarborough, M. S. (2025). Electrical equipment task-based risk assessment: Using the hazard rating number method. *IEEE Industry Applications Magazine*, 31(3), 43–53. <https://doi.org/10.1109/MIAS.2025.3531722>
- [53] Steel, C. (1990). Risk estimation. *The Safety & Health Practitioner*, June, 20–21.
- [54] Tao, F., Liu, W., Hu, T., et al. (2019). Five-dimension digital twin model and its ten applications. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 25(1), 1–18.
- [55] Teperi, A.-M. (2012). Improving the mastery of human factors in a safety critical ATM organization (PhD thesis).
- [56] Teperi, A.-M. (2021). Applying human factors in the nuclear industry. In A.-M. Teperi & N. Gotcheva (Eds.), *Human factors in the nuclear industry* (pp. 25–54). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102845-2.00002-8>
- [57] Teperi, A.-M., Puro, V., Tiikkaja, M., & Ratilainen, H. (2018). Developing and implementing a human factors tool to improve safety management in the nuclear industry. Finnish Institute of Occupational Health.
- [58] UNE. (2012). UNE-EN ISO 12100: Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño.
- [59] UNE-CEN. (2022). UNE-CEN ISO/TR 22100-5: Seguridad de las máquinas. Parte 5: Implicaciones del aprendizaje automático de IA.
- [60] Wang, H., Lv, L., Li, X., Li, H., Leng, J., Zhang, Y., Thomson, V., Liu, G., Wen, X., Sun, C., & Luo, G. (2023). A safety management approach for Industry 5.0's human-centered manufacturing based on digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 66, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.11.013>
- [61] Wilson, J.R. (2000). *Fundamentals of Ergonomics in Theory and Practice*. Applied Ergonomics, 31, 557–567.
- [62] Zahid, A., Ferraro, A., Petrillo, A., & De Felice, F. (2025). Exploring the role of digital twin and industrial metaverse technologies in enhancing occupational health and safety in manufacturing. *Applied Sciences*, 15(15), 8268. <https://doi.org/10.3390/app15158268>
- [63] Zou, P. X. W., & Ma, S. (2025). How digital twin technology may improve safety management: A multi-industry perspective. *Safety Science*, 189, 106837. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.106837>







Liite 1. sanasto

Saavutettavuus (määritelmä mukailtu standardista EN ISO 9241-210:2019):

Tuotteen, palvelun, ympäristön, tilan tai järjestelmän käytettävyys mahdollisimman laajalle käyttäjäjoukolle ottaen huomioon erilaiset tarpeet, kyvyt ja ominaisuudet siten, että käyttäjät voivat saavuttaa heille tarkoitetut tavoitteet omassa käyttöyhteydessään. Tämä käyttöyhteys voi sisältää suoran vuorovaikutuksen tai apuvälineteknologioiden käytön.

Anonymisoitu data (mukailtu EN ISO/IEC 29100:2020):

Informaatio, joka on käsitelty siten, että henkilötunnisteet on poistettu, eikä tietoa voida enää yhdistää yksilöön, joka olisi tunnistettavissa.

Suostumus (mukailtu EN ISO/IEC 29100:2020):

Rekisteröidyn vapaaehtoinen, tietoon perustuva ja yksiselitteinen päätös sallia omien henkilötietojensa käsittely.

Digitaalinen kaksosen (määritelmä mukailtu ISO/IEC 30173:2023):

Fysikaalisen kohteen digitaalinen esitys, jossa tiedonsiirto pitää virtuaalisen ja todellisen tilan synkronoituna. Digitaalinen kaksosen voi sisältää erilaisia toiminnallisuuksia, kuten yhteydet, integraation, analytiikan, simuloinnin, visualisoinnin, optimoinnin ja yhteistyötoiminnot.

Digitaalinen kaksosen (määritelmä mukailtu ISO 23247-1:2021):

Tiettyyn käyttötarkoitukseen räätälöity digitaalinen malli, joka heijastaa havaittavaa valmistuskomponenttia ja pysyy synkronoituna sen todellisen vastineen kanssa.

Digitaalisen kaksosen järjestelmä (mukailtu ISO/IEC 30173:2023):

Järjestelmä, joka tuottaa digitaalisen kaksosen ominaisuudet fyysisten entiteettien, digitaalisten elementtien, tiedonvaihtomekanismien, mallien ja rajapintojen vuorovaikutuksen kautta siten, että dataoperaatiot pysyvät synkronoituna.

Ergonomia / Inhimilliset tekijät (mukailtu EN ISO 9241-210:2019):

Tieteellinen ja ammatillinen ala, joka tutkii ihmisen vuorovaikutusta järjestelmän muiden osien kanssa ja soveltaa tätä ymmärrystä ratkaisujen suunnitteluun hyvinvoinnin, turvallisuuden ja järjestelmän kokonaissuorituskyvyn parantamiseksi.

Ulkoisen kuormitus / Työstressi (mukailtu EN ISO 6385:2016):

Työjärjestelmän ulkoisten vaatimusten ja olosuhteiden kokonaisuus, joka vaikuttaa henkilön fyysiseen tai henkiseen kuormitukseen.

Vaaratekijä (mukailtu EN ISO 45001:2023):

Lähde, tilanne tai olosuhde, jolla on potentiaalia aiheuttaa haittaa, kuten loukkaantuminen tai terveystaitta.

Ihmiskeskeinen suunnittelu (myös human-centric design, mukailtu EN ISO 9241-210:2019):

Suunnittelulähestymistapa, joka asettaa etusijalle sen, miten ihmiset käyttävät järjestelmää, ja hyödyntää inhimillisten tekijöiden ja käytettävyyden periaatteita järjestelmän käytettävyyden parantamiseksi ja riskien vähentämiseksi. Käyttäjien tarpeiden ohella se huomioi myös kaikkien sidosryhmien vaikutukset.

Inhimilliset tekijät (mukailtu ISO/IEC TR 24028:2020):

Ympäristöön, organisaatioon ja työhön liittyvien tekijöiden sekä kognitiivisten ja inhimillisten ominaisuuksien kokonaisuus, joka muovaa yksilöiden ja organisaatioiden käyttäytymistä.

Vamma tai terveyshaitta (mukailtu EN ISO 45001:2023):

Mikä tahansa haitallinen vaikutus henkilön fyysiseen, henkiseen tai kognitiiviseen tilaan, mukaan lukien ammattitaudit, sairaudet ja kuolemantapaukset.

Vuorovaikutteinen järjestelmä (määritelmä mukailtu EN ISO 9241-210:2019):

Kokoonpano ihmisistä, laitteistoista, ohjelmistoista ja palveluista, joiden kanssa käyttäjät ovat vuorovaikutuksessa suorittaakseen määriteltyjä tavoitteita. Määritelmä sisältää myös järjestelmään liittyvän pakkauksen, dokumentaation ja tukiresurssit.

Valmistusprosessi (mukailtu ISO 23247-1:2021):

Toimintojen joukko tuotantoympäristössä, jossa muunnetaan tai siirretään materiaaleja, dataa, energiaa, ohjaussignaaleja tai muita elementtejä.

Työterveyteen ja -turvallisuuteen (OH&S) liittyvä riski (mukailtu EN ISO 45001:2023):

Työhön liittyvien vaarallisten tapahtumien tai altistusten todennäköisyyden ja niistä aiheutuvan loukkaantumisen tai terveyshaitan vakavuuden yhdistelmä.

Pseudonymisointi (mukailtu EN ISO/IEC 29100:2020):

Tekniikka, jossa tunnistettavissa oleva henkilötieto korvataan pseudonyymillä, jotta suora tunnistettavuus vähenee.

Henkilöä yksilöivä tieto (PII) (mukailtu EN ISO/IEC 29100:2020):

Kaikki tieto, joka joko suoraan identifioi henkilön tai voidaan yhdistää sellaiseen henkilöön, johon tieto liittyy.

Arkaluonteinen henkilöä yksilöivä tieto (SPII) (mukailtu EN ISO/IEC 29100:2020):

Henkilötieto, jota pidetään arkaluonteisena sen henkilökohtaisen luonteen tai yksilölle mahdollisesti merkittävän vaikutuksen vuoksi. Joissakin oikeudenkäyttöalueissa tähän sisältyvät tiedot esimerkiksi rodusta tai etnisestä alkuperästä, poliittisista tai uskonnollisista näkemyksistä, terveydestä, seksuaalisesta elämästä tai rikostaustasta.

Kuormitus / Sisäinen kuorma (mukailtu EN ISO 6385:2016):

Yksilön sisäinen reaktio ulkoiseen työkuormitukseen, johon vaikuttavat henkilökohtaiset ominaisuudet, kuten ikä, kehon koko, taidot sekä fyysiset ja kognitiiviset kyvykkyydet.

Käytettävyys (mukailtu EN ISO 9241-210:2019):

Se, missä määrin järjestelmä, tuote tai palvelu mahdollistaa käyttäjien tarkoitettujen tavoitteiden saavuttamisen tehokkaasti, tuloksellisesti ja tyytyväisesti määritellyssä käyttöyhteydessä. Termi kattaa myös käytettävyyden suunnittelun osaamisen ja menetelmät.

Käyttöliittymä (mukailtu EN ISO 9241-210:2019):

Kaikki järjestelmän komponentit — laitteisto tai ohjelmisto — jotka välittävät tietoa käyttäjille ja mahdollistavat järjestelmän ohjaamisen tehtävien suorittamiseksi.

Hyvinvointi (mukailtu EN ISO 6385:2016):

Kestävä sisäinen tila, joka syntyy työntekijän fyysisten ja kognitiivisten tarpeiden täyttymisestä ja edistää työn kokonaisvaltaista laatua.

Työympäristö (mukailtu EN ISO 6385:2016):

Fyysisten, kemiallisten, biologisten, organisatoristen, sosiaalisten ja kulttuuristen olosuhteiden kokonaisuus, joka ympäröi työntekijää.

Työuupumus (mukailtu EN ISO 6385:2016):

Ei-patologinen suorituskyvyn tai toimintakyvyn heikkeneminen, joka johtuu työhön liittyvästä kuormituksesta ja voi olla fyysistä, henkistä, paikallista tai yleistä.

Työprosessi (määritelmä mukailtu EN ISO 6385:2016):

Aika- ja paikkasidonnainen tapahtumasarja, jossa työntekijät, laitteet, materiaalit, energia ja informaatio ovat vuorovaikutuksessa työjärjestelmän sisällä.

Työjärjestelmä (määritelmä mukailtu EN ISO 6385:2016):

Kokoonpano yhdestä tai useammasta työntekijästä ja laitteesta, jotka toimivat yhdessä määritellyssä ympäristössä suorittaakseen työtehtävän.

Työntekijä / Operaattori (määritelmä mukailtu EN 16710-2:2025):

Henkilö, joka suorittaa yhden tai useampia toimintoja työjärjestelmässä tiettyjen tavoitteiden saavuttamiseksi.

Liite 2. Käyttökuvaukset (use case)



Use Case No. 1: Advances of Digitalization on Interior Automotive Manufacturing

1. Organization Overview

ANTOLIN is a leading global supplier in the automotive industry, specializing in the design, development, and manufacturing of interior components for vehicles Headquartered in Burgos, Spain. The company has a substantial global footprint, operating in 25 countries and employing over 20,000 people. ANTOLIN's mission is to be a premier provider of technological solutions for car interiors, emphasizing innovation and sustainability. Their activities focus on creating integrated solutions that enhance the user experience, utilizing environmentally friendly practices and lightweight materials to reduce CO2 emissions. Through these efforts, ANTOLIN aims to shape the future of vehicle interiors and contribute to a more sustainable automotive industry.

2. Context and Problem Statement

Just to illustrate the DT implementation we can set an use case up from the doors manufacturing business unit, where for the sake of the clearness we focus only in two core steps. In sort, the first step is to produce the part, afterwards lamination and assembly.

1) **Forming – Injection Moulding**

Plastic granules are melted in an injection moulding machine. The molten plastic is injected into precision moulds to form the door parts. After cooling, the parts are ejected and trimmed.

2) **Assembly – Lamination and Ultrasonic Welding**

Some parts can be processed in lamination machines so as to add value to the part. At the end, all parts are joined using ultrasonic welding. High-frequency vibrations generate localized heat, melting and fusing the contact surfaces. The process ensures strong, accurate, and clean joints without adhesives or screws.

Broad Pain

The everyday objective in a factory is to reach optimal productivity in every manufacturing process. Despite the operator's knowledge and the technology deployed in along the machines, all the standard KPIs such as OEE or TRS always have place for improvement. Perhaps someone, in the digital era can dreams that by a fully digitalized (lights-off) plant all the problems can disappear, nonetheless, reality tell us that this is far away from the reality in complex industrial processes such as the ANTOLIN's ones. So, the question is: how digitalization technologies can support industrial processes to overcome every day's issues to improve the KPIs?

Cross Company Solution: Digital Twin 5.0

ANTOLIN has human centric digitalization strategy. The industrial knowledge of the company relies on the wide mass of operators and engineers across the company. Therefore, the faster way to improve the manufacturing processes is by providing accurate and useful information in real time to the experts in the factories. Operators and engineers know perfectly how to solve every issue (if they are aware of it). Thence, the overall solution to our pain is a hybrid solution between industrial processes digitalization and human intelligence cooperation for problems solving and KPIs processes improvement.

Below sketch illustrates the process of the use case with some visualizations available in the DT System of ANTOLIN.

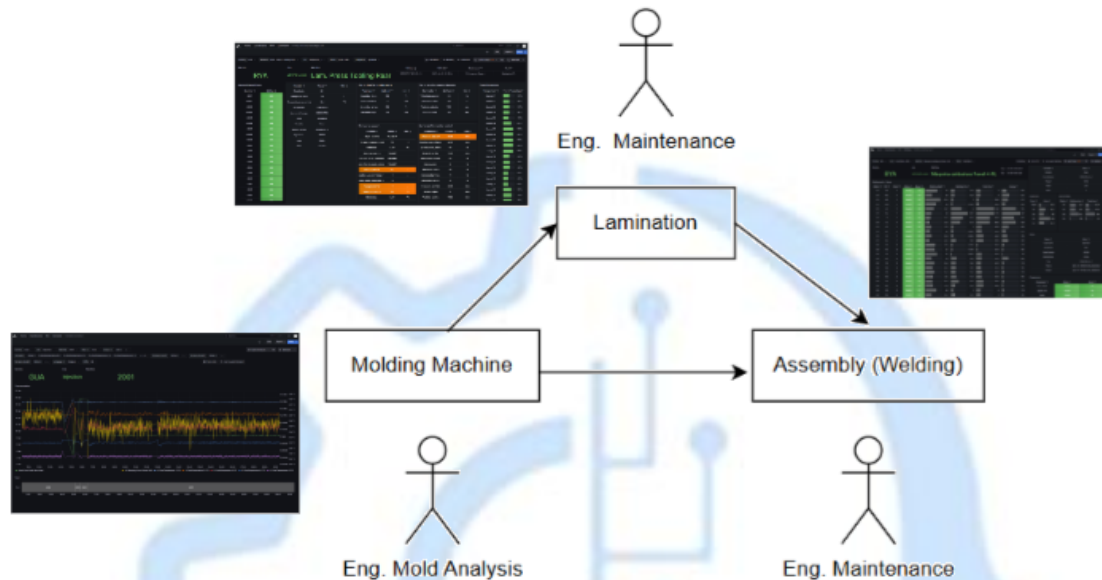


Figure 1. Process monitoring. Data is collected from all the machines involved in the manufacturing process and the most relevant information is projected in real time on the dashboards.

3. Digital Twin Solution Description

Digital Twin is the logical representation of physical assets. ANTOLIN is implementing the DT solution by means of several data components. Some of them on premise, in the factories and other ones on cloud. The first one is on hands of OT engineers whereas the second ones are managed by IT experts.

On the plants the key component is the Industrial EDGE. This artifact is responsible for data acquisition, and it is mainly used by OT engineers (the people who know the industrial reality). On cloud there are several components for the Industrial Big Data implementation among them the highlighted are:

- Data **storage** services such as blobs or databases
- **Microservices** where ETLs are implemented
- **AI / analytics** tools where data mining explorations, KPIs implementations and MLOPS processes are implemented
- **Visualization** tools where information served in near to real-time.

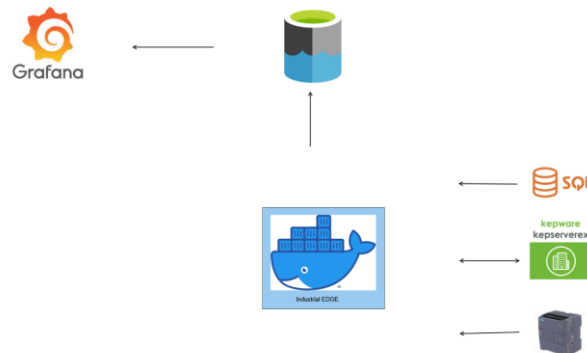


Figure 2 IIOT Data Flow.

Data is collected from several sources such as PLCs, MES, OPC and other. The Industrial EDGE is responsible of standardization and quality control. Once, data is well-formed, it is sent to cloud resources. On cloud repositories data is available for monitoring and analysis.

4. Benefits and Costs

Benefits:

- KPIs improvements by real time process monitoring, where the operator is aware of the state of the manufacturing process at any time.
- People engagement
- Process improvement

Costs:

- PLC machinery re-programming according to the standard of the company
- Industrial EDGE deployment (virtual machines or industrial PCs)
- Cloud resources: data storage and data processing
- Visualization tools
- Third IIOT providers.

5. Key Success Factors and Implementation Challenges

- **IT/OT integration:** everyone should lead its area of knowledge with no loss of understanding
- **Plant adoption:** usually plant pains are not related to digitalization processes, therefore this kind of technology is never a priority.
- **Impact:** It is very important to provide advances in the processes in a sort time, so as to catch the involvement of the plant in long terms.

6. Lessons Learned

We are at the beginning of the digital era in industry. Almost everything is pending to do.

7. Transferability and Scalability

The DT Strategy in ANTOLIN is in basis to standards and transversality, so as to apply the same solution across the five business units and more than one hundred manufacturing plants.

8. Contact Information

Grupo Antolín

Ramón Moreno

Data Intelligence Manager in Advanced Manufacturing at ANTOLIN.

Ctra. Madrid-Irún, Km. 244,8 (Apdo. 2069) 09007, Burgos

ramon.moreno@antolin.com





Use Case No. 2: Virtual Reality and Human Simulation at General Motors

Based on the Siemens Tecnomatix blog post: "Virtual Reality and Human Simulation at GM"

1. Organization Overview

Company: General Motors (GM)

Sector: Automotive Manufacturing.

Size/Scope: One of the world's largest automotive companies, with global operations. The case focuses on their Global Manufacturing Engineering team.

Relevant Mission: To optimize manufacturing processes to improve efficiency, quality, and crucially, the safety and ergonomics of their workers on assembly lines.

2. Context and Problem Statement

Operational Context: GM, as an automotive manufacturer, faces the constant challenge of designing and optimizing complex assembly lines for new vehicle models. Traditionally, this involved creating costly and time-consuming physical mock-ups to validate processes and ergonomics.

Specific Challenge/Need:

- Reduce worker injuries on assembly lines.
- Improve the quality of the final product.
- Increase manufacturing productivity.
- Minimize costs and time associated with process development, avoiding expensive changes in late production stages.
- Identify and resolve design and ergonomic issues at an early stage, before physical implementation.

3. Digital Twin Solution Description

Implemented DT Solution: GM has implemented a "Digital Twin" solution that combines Virtual Reality (VR) with Human Simulation software (specifically, Process Simulate Human, part of Siemens' Tecnomatix suite). This combination creates a digital twin of the manufacturing process and the human worker interacting with it.

Technologies Used:

- >Virtual Reality (VR): For complete immersion in the virtual manufacturing environment, allowing engineers and workers to "experience" the assembly line.
- >Human Simulation Software (Process Simulate Human): Used to analyze the movements, postures, forces, and reach of workers in the virtual environment, evaluating ergonomics and task feasibility.
- >3D Models: Of vehicles, tools, components, and the plant environment.

Integration into Workflows: The solution allows engineering and manufacturing teams to validate and optimize assembly processes in a virtual environment. This is done before

physical lines are built, enabling proactive identification and correction of design, efficiency, and ergonomic issues.

4. Benefits and Costs

Benefits Gained:

- Injury Reduction: Design of safer and more ergonomic processes for workers.
- Quality Improvement: Validation of processes to ensure the final product meets standards.
- Productivity Increase: Optimization of workflow and tasks.
- Cost Savings: By avoiding costly changes to the physical production line, the need for physical mock-ups, and rework.
- "Right the First Time" Design: Ability to design processes correctly from the outset.

Order of Magnitude of Costs: The blog post does not provide specific figures for incurred costs, but the mentioned benefits (injury reduction, quality improvement, productivity increase, savings from avoiding late changes) imply a significant return on investment.

5. Impact on Occupational Health and Safety (OHS)

Impact: The solution has a highly positive impact on occupational health and safety. In fact, one of the primary goals is injury reduction.

Improvements in Risk Prevention:

- Early identification of awkward or dangerous postures for workers.
- Analysis of repetitive movements and excessive forces.
- Detection of potential injury points (e.g., the blog mentions identifying potential shoulder injuries from overhead work).
- Proactive design of workstations and tasks that are inherently safer and more ergonomic.

Emergence of New Risks: The blog post does not mention the emergence of new risks because of implementing this technology.

6. Key Success Factors and Implementation Challenges

Key Success Factors:

- ➤ Interdisciplinary Collaboration: Close collaboration between manufacturing engineers, safety experts, and production personnel is fundamental.
- ➤ Commitment to Innovation: GM's willingness to adopt advanced technologies like VR and human simulation to transform its design processes.
- ➤ Visualization and Analysis Capability: The combination of VR immersion with the analytical capability of human simulation allows for deep understanding and problem-solving.
- Difficulties Encountered: In general, adopting new technologies can involve challenges such as staff training, data integration, and adapting to new workflows.

7. Lessons Learned

- Early Validation is Key: The ability to validate and optimize processes in a virtual environment before physical manufacturing is crucial for achieving "right the first time" design and avoiding costly errors.
- The Power of Hybrid Simulation: Combining the immersion of Virtual Reality with the detailed analysis of human simulation offers a very powerful tool for ergonomic and process optimization.
- Engage Stakeholders: Allowing engineers and workers themselves to experience the process in VR improves problem identification and acceptance of solutions.
- Reduced Reliance on Physical Mock-ups: Virtual tools can replace or significantly reduce the need for physical mock-ups, saving time and resources.

8. Transferability and Scalability

Replication Potential: Very high. The principles of using VR and human simulation for ergonomic and process optimization are applicable in any industry involving:

- Manual assembly or operational tasks.
- Human-robot interaction.
- Workstation design.
- Need to improve safety, quality, and productivity in manufacturing.
- Examples from other sectors: aerospace, heavy machinery, consumer goods, electronics, etc.
- Prerequisites/Adaptations:
 - Availability of accurate 3D CAD models of products and manufacturing environments.
 - Personnel trained in the use of simulation software and VR.
 - Hardware infrastructure for VR (headsets, workstations).
 - Adaptation would involve configuring simulation scenarios for the specific products and processes of each context.

9. References and Supporting Materials

The Siemens Tecnomatix blog post: "Virtual Reality and Human Simulation at GM" (previously provided link: [Virtual reality and human simulation at GM - Tecnomatix](#)).

10. Contact Information

Siemens Digital Industries Software

Mike Rouman

Senior Marketing Manager in the Digital Manufacturing business segment at Siemens Digital Industries Software.

<https://www.siemens.com/en-us/>

11. Visuals and Illustrations

The original blog post (to which reference is made) would contain images or videos illustrating the virtual reality environment, digital human representations, and Process Simulate Human interfaces. To view these illustrations, it would be necessary to visit the blog link.

Use Case No. 3: Optimization tool based on virtual environment scenarios

1. Organization Overview

TECNALIA is the largest applied research and technological development centre in Spain, a European benchmark and member of the Basque Research and Technology Alliance. One of TECNALIA's research areas focuses on the Digital Twin (DT) concept, developing methodologies for DT design and implementation as well as creating virtual environments aimed at improving industrial efficiency. These environments support tasks such as resource optimization and production scheduling.

2. Context and Problem Statement

The use case presented is part of the FABRICARE project, a nationally funded programme for research centres in which TECNALIA achieved recognition for Excellence in Advanced Manufacturing. This use case focuses on the virtual-environment component of a Digital Twin (DT) designed to improve optimization and scheduling performance in industrial processes. It addresses the production of assembled references resulting from a combination of injection and machining processes, as shown in the figure, where all resources, injection machines, machine tools, and AGVs, are variable.

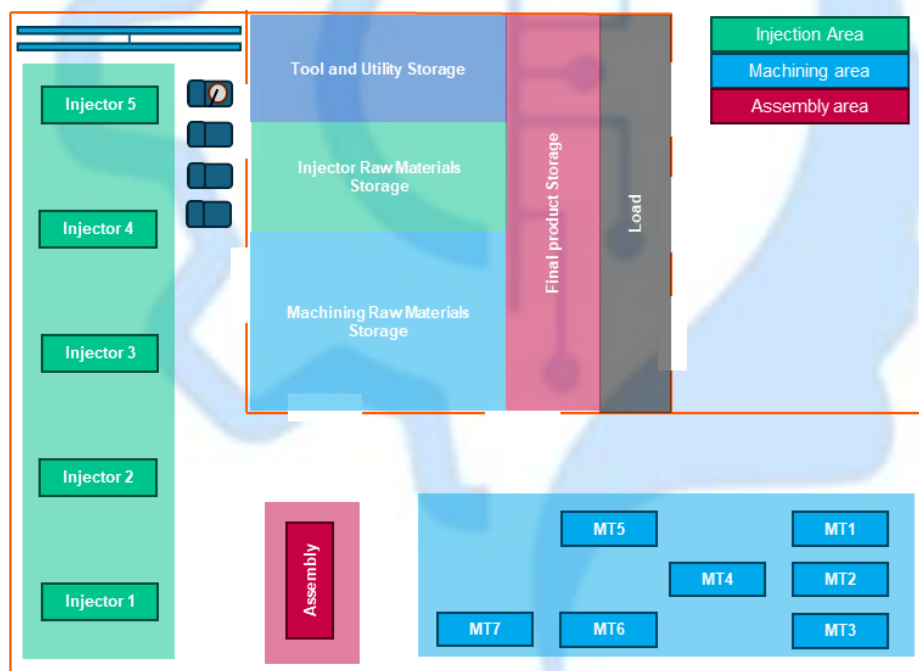


Figure 1. Use case process

The main challenge lies in the difficulty of defining virtual environments that accurately reflect real-world complexity, which is essential for developing optimization and scheduling tools capable of solving complex scenarios rather than simplified ones.

- With this in mind, the complexity of this use case can be characterized by the following parameters:
- Variability of references, both in quantity and type.
- Variability of machines, in terms of number and capabilities.

- Variability and flexibility of resources, including AGVs, AMRs, and operators.
- Mold and tooling changes.
- Warehouse layout constraints.
- Demand variability.
- Quality inspections and rework.

3. Digital Twin Solution Description

Considering the five dimensions of the Digital Twin (DT) presented in the Guideline, this solution is framed within the virtual-environment dimension, simulating the process described in Section 2 using FlexSim (simulation software) and connecting it with an optimization algorithm developed in Python. Together, these components form a desktop application for optimizing complex processes, which operates as follows:

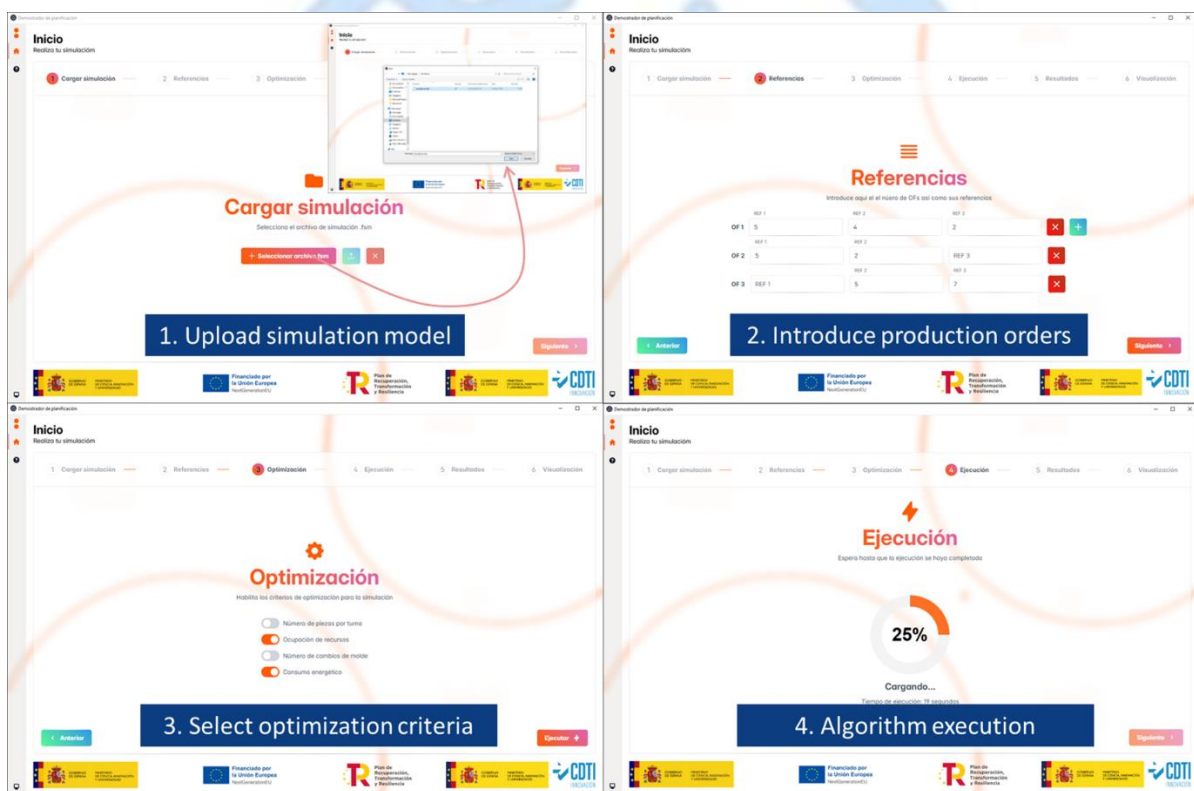
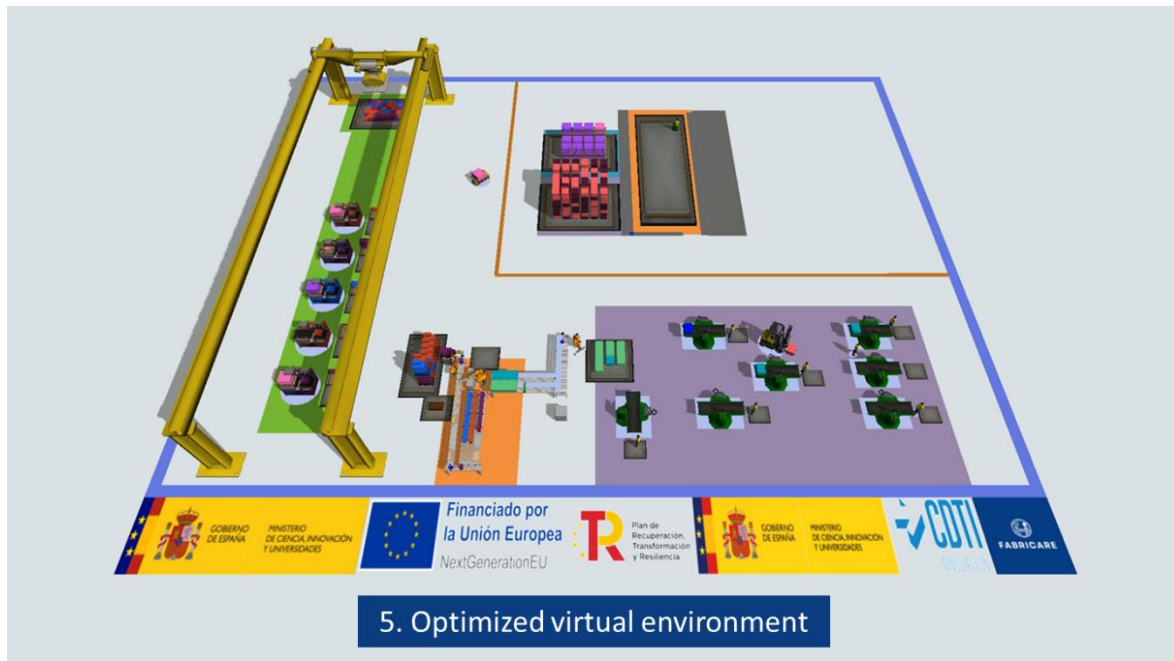


Figure 2. Optimization tool interface



Optimized virtual environment FlexSim

4. Benefits and Costs

Because this is a research project and the use case does not correspond to a real industrial environment, it is not possible to provide a quantitative assessment of the solution's benefits. However, it is considered that this type of solution can significantly enhance process efficiency and reduce costs, as the number of resources required for proper project execution is optimized.

5. Impact on Occupational Health and Safety (OHS)

Although it does not have direct positive impacts on OSH, the developed solution enables non-experts to use optimization algorithms. This can help reduce risk factors such as stress associated with adopting new technologies and resistance to change.

6. Key Success Factors and Implementation Challenges

For real implementations, it is essential to involve end users throughout the design and implementation phases to ensure proper and effective use of the application.

7. Lessons Learned

It is important to begin with a thorough and detailed description of the production process before starting the virtualization phase.

Involving users throughout the entire process is also crucial to ensure the usability and acceptance of the application.

8. Transferability and Scalability

This project is transferable and scalable to any context or sector, provided that the new process can be modelled in FlexSim.

9. References and Supporting Materials

More information about FABRICARE project:

- Aznar Lapuente, G., Morella Avinzano, P., del Agua, J., Borro, D., González, A., García García, R., & Lambán, M. P. (2025). Simplified five-dimensional modelling for the conception of digital twins: a use case for battery decommissioning process. In 11th Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC 2025), Bilbao, Spain.
- <https://www.tecnalia.com/proyectos/fabricacion-colaborativa-robotica-gemelos-digitales-fabricare>

10. Contact Information

TECNALIA Research & Innovation

Dra. Paula Morella Avinzano

Researcher in NEXT GENERATION FACTORIES

Parque Científico y Tecnológico de Bizkaia. Astondo Bidea, Edificio 700.

paula.morella@tecnalia.com

<https://www.tecnalia.com/>

11. Acknowledgment and disclaimer



This work was supported by the FABRICARE Project (CER-20231003), recognized as a CERVERA Network of Excellence, financed by Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades through Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación E.P.E.(CDTI), within the framework of the European Union's Resilience and Recovery Mechanism. This document reflects only the author's view, and CDTI is not responsible for any use that may be

made of the information it contains.

fabricare.es



Use Case No. 4: Real-time Optimization of vertical cement mill

1. Organization Overview

Founded in 2009, OPTIMITIVE is a software company dedicated to enhancing industrial efficiency and sustainability through Closed-Loop AI Optimization.

The company helps industrial organizations reduce energy consumption, improve production profitability, and meet regulatory and emissions-reduction targets. With a presence across seven major global regions, OPTIMITIVE operates in a wide variety of sectors, including cement, oil & gas, chemicals, power generation, pulp & paper, mining, glass, metals, and water treatment. Its technologies currently optimize more than 65 industrial facilities across diverse processes.

OPTIMITIVE is deeply committed to the global transformation of industrial operations, leveraging Artificial Intelligence to make processes more efficient and more sustainable—ultimately contributing to a better world.

The company envisions a future in which every complex industrial asset is complemented by an “Optimizer Brain”: a system capable of ensuring operational efficiency under any circumstances. In this future, Real-Time AI-Driven Optimization will be a key enabler of industrial excellence worldwide.

2. Context and Problem Statement

This use case is based on the needs of an international cement group which operates in several countries. The vertical raw mill is the first component in the cement production chain and is responsible for grinding and drying the raw material before being fed into the kiln. The vertical raw mill is the equipment used to crush and grind the raw material into small particles. The raw meal is fed onto a rotating table and crushed by the vertical pressure applied by the rollers. The small particles exit under the action of the current flow produced by an air exhauster fan. These particles go through a separator device which acts as a filter. The filtered particles are stored in silos ready to be fed into the kiln. The main energy consumption is caused by the motor of the rotating table.

Maximising the vertical raw mill throughput is targeted without compromising the quality of the final product and ensuring that the power limits of the different components are not exceeded. Vibrations must be kept within range and the operation maintained stable without interruptions.

3. Digital Twin Solution Description

OPTIMITIVE has developed a real-time optimization AI solution capable of collecting information from control systems, called OPTIBAT RTO (Real-Time Optimization). OPTIBAT enables the following:

- Use Artificial Intelligence to improve industrial processes
- Recommend optimal setpoints in real time
- Assist operators in open-loop mode and operate in closed-loop mode with autopilot
- Dynamically optimize KPIs while keeping constraints within their limits
- Be suitable for any type of equipment or process, regardless of the manufacturer
- Operate 24/7, 365 days a year—ideal for continuous processes

- Continuously improve through adaptation

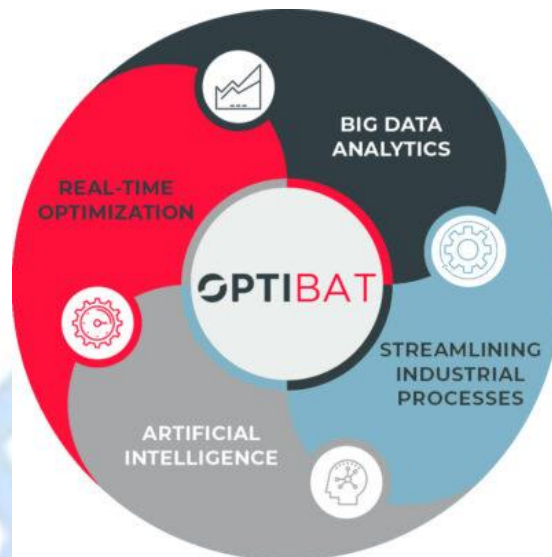


Figure 1. OPTIBAT® Solution

Regarding this use case, the OPTIBAT® Real-Time Optimization (RTO) installed in plant considerably increased production rates and improved system runnability, while maintaining product quality and operation standards. OPTIBAT® RTO is connected to the existing control system, continuously learning from plant operation data, and recommending in closed loop the optimum set points for the following operative variables:

- Product feed (variable to maximise)
- Separator speed
- Inlet temperature
- Water spray
- Grinding pressure
- Differential pressure

Constraints are strictly respected, including vibrations of the mill, thickness of grinding layer, quality of the final product, operating limits of the mill, production rates and process stability.

4. Benefits and Costs

Particularly in this use case, the results show a throughput increment of 6% plus a specific energy consumption reduction of 2%. Additionally, the stability of the mill improved by decreasing vibrations level around 6%.

In general, by integrating advanced real-time optimization technologies, the benefits show:

- Significant reductions in energy consumption, directly lowering operating costs and contributing to more sustainable production.
- Increases in production throughput, enabling higher output without compromising product quality or process stability.
- Substantial cost savings, derived from greater efficiency, reduced variability, and optimized use of existing assets.

- Thousands of tons of CO₂ emissions avoided every year per optimized asset, supporting compliance with environmental regulations and helping organizations advance their decarbonization strategies.

5. Impact on Occupational Health and Safety (OHS)

Operator stress due to the need of responding to instabilities of the process or excessive level of vibrations, was significantly reduced, since the optimizer takes care of maintaining operation stable and within operational limits.

6. Key Success Factors and Implementation Challenges

Run Factor above 70%. Run Factor is the % of time that the optimizer was working with respect to the time the Mill was operating. Energy Savings and Throughput increase above 1% were required.

7. Lessons Learned

Vibrations is a key stability factor in this kind of asset.

Autonomous operation is needed to get the acceptance of operators and plant staff.

8. Transferability and Scalability

This solution is transferable to Finishing Mills in cement production, and also to Mills in Mining.

9. Contact Information

OPTIMITIVE S.L.
Javier García Sedano
Founder & Director of OPTIMITIVE

Avda. Los Huetos 75, Edificio Azucarera, 01010 Vitoria-Gasteiz (Álava) – Spain

javierg@optimitive.com

[Optimitive - OPTIMITIVE](#)

10. Visuals and Illustrations



Figure 1. Vertical Cement Mill





Use Case No. 5: Towards safer and more sustainable graphene oxide manufacturing

1. Organization Overview

Founded in 2004, AVANZARE provides its customers with advanced, high-performance materials. AVANZARE's headquarters are located in the village of Navarrete, La Rioja (Spain). Our capabilities and 50.000 m² of full equipment production plants allow us to act in a wide range of possibilities, allowing us to have flexibility in dealing with our clients.

AVANZARE specializes in the development, production and commercialization of functional advanced materials for different applications, mainly plastics, rubber, and resin with international presence across different industries: automotive, aeronautics, safety equipment, footwear, painting, building, wire and cable sector, fabrics, packaging and paper, and more. The company possesses a robust capability in functionalities such as antistatic performance, electrical conductivity, thermal dissipation, flame retardancy and fire resistance, antibacterial properties, and hydrophobic behavior.

AVANZARE has extensive industrial expertise in the research and production of 2D nanomaterials and specializes in the production of different bulk graphene and graphene nanoplatelets grades for industrial purposes.

2. Context and Problem Statement

The dry graphene oxide (GO) manufactured by AVANZARE is refined and packaged using a four-stage semi-automatic process, carried out by an operator inside a front-extraction filtration cabin (Figure 1). The process includes grinding and vibratory sieving stages, to homogenize the particle size before packaging.



Figure 1. Filtration cabin in the manufacturing room, with the operator performing GO refining and packaging tasks inside.

GO is a black, 2D nanomaterial produced through the oxidation and exfoliation of graphite, characterized by micro- to nanoscale particles exhibiting a laminar morphology composed of one nanometer-thick layers. Due to the powdery characteristics of this nanomaterial, its handling during the refining/packaging process generates significant emissions of GO particles into the air, which can pose a health risk to workers if not properly controlled.

The filtration cabin represents the primary engineering measure for controlling occupational exposure in the process. The intake air enters the cabin from the manufacturing room through the open front section of the cabin, is driven by a 40 kW centrifugal fan to remove GO particles emitted by the process, then is filtered in two stages (cartridges + package) and finally returns to the manufacturing area again. This protective measure is complemented by the operator's use of appropriate PPEs.

In this context, AVANZARE's main need was to improve the dry GO refining/packaging process in order to prevent and control the risk of occupational exposure to inhaled GO, ensuring the safety, sustainability and competitiveness of the manufacturing process itself.

3. Digital Twin Solution Description

The European project SUNSHINE investigated the potential of DT technology to respond to the needs identified by AVANZARE, with the following specific objectives: 1) Online monitoring of GO particle emissions, 2) Real-time prediction and alert of occupational exposure risk, 3) Optimization of process energy consumption, and 4) Reduction of filter cleaning frequency. The DT pilot solution (TRL 5-6) was developed by TECNALIA and tested and validated jointly with AVANZARE at its manufacturing facilities.

DT architecture was structured into four domains, according to the reference model established by the ISO 23247 series of standards (Figure 2). The first domain represents the physical world (the manufacturing process and its elements), which connects and synchronizes with the virtual world (third domain) through the communications layer (second domain). The fourth domain is a services layer where the user can find information. Figure 2 and Table 1 specify these four domains and provide the general architecture of the DT.

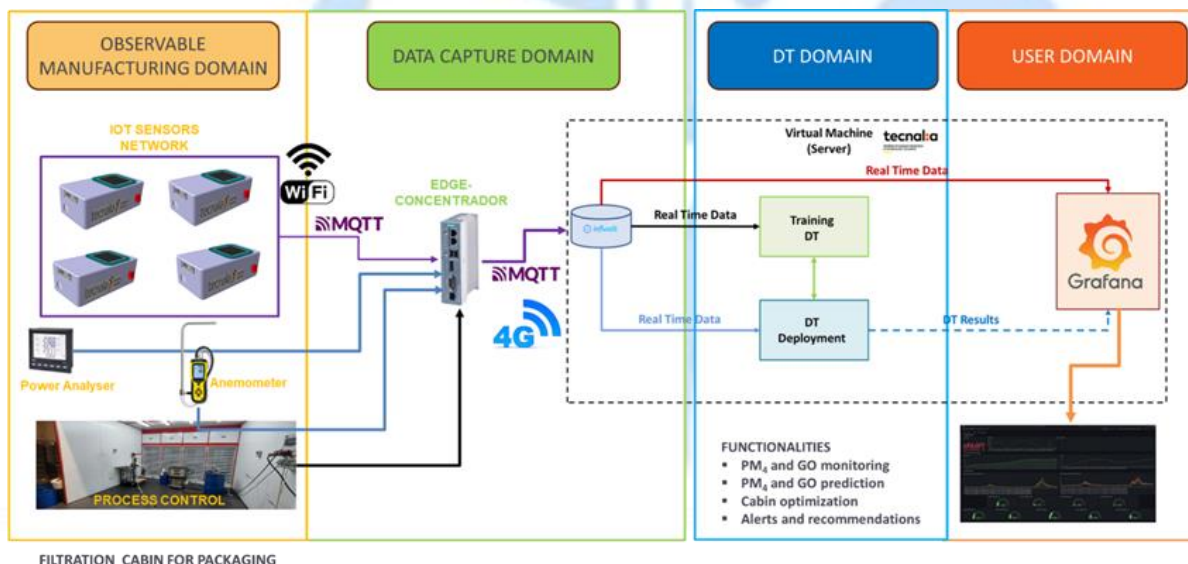


Figure 2. Building blocks and deployed architecture in AVANZARE according to ISO 23247 series.

Table 1. Architecture of the four-domain digital twin (ISO 23247) deployed in AVANZARE.

LAYER - DOMAIN (ISO 23247)	PROPOSED ARCHITECTURE FOR AVANZARE'S DIGITAL TWIN
LAYER 4 - DIGITAL TWIN USER DOMAIN	This domain is also deployed on the TECNALIA server and is accessible from anywhere within AVANZARE, via an access URL with different credential levels. The services offered by this domain are: 1) Real-time monitoring of parameters measured by sensors and process parameters of the cabin and indicators (Graphana); 2) Predictive alerts to prevent or reduce the risk of occupational inhalation exposure; 3) Optimization recommendations to modify the cabin ventilation speed and the frequency of filter cleaning (Figure 3).
LAYER 3 - DIGITAL TWIN DOMAIN	The purpose of the DT domain is to generate three results: 1) Real-time monitoring and 2) Prediction of particle concentration in the work environment, to reduce operator exposure, and 3) Optimization of the filtration cabin's energy consumption by controlling the extraction fan speed. This domain is responsible for the overall operation and management of the DT, including monitoring, digital modelling, prediction, and optimization management. The domain has two clearly differentiated operating environments (Virtual machine deployed on the TECNALIA server): one dedicated to training and generating models from historical data (Development) and another focused on the real-time execution of predictions and optimization suggestions (Production).
LAYER 2 - DATA COLLECTION AND DEVICE CONTROL DOMAIN	This domain consists of two main elements: 1) the Edge Concentrator, the computer responsible for capturing machine-level data and synchronizing it for transmission to the server database, and 2) the server hosting the database (InfluxDB) that aggregates each capture with its timestamp.
LAYER 1 – OBSERVABLE MANUFACTURING DOMAIN	This domain encompasses an industrial dry GO refining/packaging process carried out inside a filtration cabin. The elements monitored in the process are: 1) the concentration of particles (particle sensors), in order to reduce emissions and the occupational risk of inhalation exposure for operators; 2) the air velocity in the cabin filters (air velocity sensors), to improve system control; and 3) the energy consumption of the cabin (power analyser), to optimize the exhaust fan speed and activate/deactivate filter cleaning, and 4) the operating regime of the extraction cabin fan (process bus).

The DT-embedded models generated highly accurate and reliable results, underscoring the viability of this approach for real-time environmental monitoring and control. These results not only validate the performance of the developed DT but also confirm the feasibility of the optimized system to achieve an effective balance between operational efficiency and environmental and occupational safety.



Figure 3. User-Domain Mock-Up

4. Benefits and Costs

The pilot deployment of DT technology in AVANZARE has delivered the following technical and operational benefits:

- Real-time monitoring and prediction of airborne emissions and occupational inhalation exposures to GO
- Prevention and early warning of manufacturing events that could lead to occupational exposure above regulatory limit values
- Reduction of process energy consumption by automatically adjusting the extraction fan speed and cleaning cycles to the specific operational needs
- Prevention of potential operator health impacts and associated costs
- Support for regulatory compliance assurance
- Overall, a more robust, safer, sustainable, and competitively optimized manufacturing process.

The table below summarizes the main cost categories associated with the deployment and operation of the DT in the manufacturing process.

Initial Costs	Future operating costs
<ul style="list-style-type: none"> ▪ IoT sensors and associated hardware ▪ Predictive and optimization digital models ▪ Cloud resources: simulation, data analytics, and visualization ▪ Integration with existing manufacturing systems ▪ Initial staff training 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maintenance and replacement of IoT sensors ▪ Updating and maintaining the digital twin model ▪ Maintenance of software licenses and cloud service subscriptions ▪ Ongoing staff training

5. Impact on Occupational Health and Safety (OHS)

The principal OHS-related benefits—partially addressed earlier in Section 4—can be summarized as:

- Real-time hazard prediction and exposure modelling
- Early-warning of process deviations with OEL exceedance potential
- Digital traceability for regulatory compliance assurance
- Reduction of operator health risks through minimized exposure to hazardous environments and better control of emission sources.
- Lower HSE-related costs enabled by predictive analytics and fewer incident-derived losses.

Deploying a digital solution within an operator-involved manufacturing process may introduce potential adverse OHS impacts that require proactive prevention and/or mitigation. The following table summarizes these impacts along with preventive and mitigating actions that should be considered for any future commercial-scale implementation of DT in the plant.

Potential adverse OHS Impact		Recommended Prevention / Mitigation measures
1. OT/IT cybersecurity	Manipulation of process variables, data streams, or control logic with potential impact on the H&S of operators	- OT/IT network segmentation and industrial grade asset hardening (e.g. IEC 62443). - Robust access control (RBAC/MFA) and continuous security monitoring with anomaly detection.
2. Data privacy and ethical	Collection, processing or traceability of operator related personal/sensitive data; risk of undesirable surveillance.	- Privacy-by-Design implementation with data minimization and anonymization/pseudonymization. - Strict access governance and compliance with data protection frameworks (e.g. ISO 27701, GDPR).
3. Model related error	Incorrect predictions, drift, lack of calibration, algorithmic bias or misleading safety indicators.	- Formal verification & validation, periodic model re-calibration using real production data. - Systematic model performance audits and mandatory human supervision for safety critical decisions.
4. Operational complexity and cognitive overload	Increase in data density, alarms, dashboards and decision layers, elevating the risk of human error.	- Cognitive ergonomics driven design of HMI, reduction of non-essential information layers and alarm management strategy to prevent alarm fatigue (e.g. ISO 9241 series, ISO 6385, IEC 62682)
5. Operational skill degradation and DT over-reliance	Decay of manual diagnostic capability and excessive dependence on automated guidance.	- Continuous operator training using scenario-based simulations and non-DT manual diagnostic drills - Defined fallback operating procedures and operational resilience measures

6. Key Success Factors and Implementation Challenges

Among the key success factors in the implementation of the DT demonstrator (TRL 5-6), the following can be highlighted:

- Strategic leadership and commitment from AVANZARE's top management
- Adequate data infrastructure and high-quality data, supported by a technically feasible and reliable integration with the manufacturing process
- Internal capabilities and multidisciplinary collaboration
- Culture of innovation and adaptability to change
- High technical competence of the solution provider
- Progressive implementation of DT, starting with a pilot and scaling up the digital solution
- Adequate allocation of budget and resources (EC funding)

Furthermore, some of the challenges that have been identified to advance in the implementation of a definitive digital twin in the AVANZARE refining/packaging process are:

- Cybersecurity and IP protection risks
- Data-privacy, ethical and human-centric design constraints
- Operational complexity and cognitive overload
- Continuous digital training and workforce upskilling
- Need for sufficient funding to support implementation costs

7. Lessons Learned

Some lessons learned from the pilot deployment of the DT at AVANZARE include:

1. **Ensuring the quality, availability, and traceability of process data.** Data quality, stability, and reliability are critical; without robust data, a DT cannot be built or operated with confidence.
2. **Adopting a progressive DT implementation strategy based on pilot deployment and controlled scaling.** Pilot phases enable model validation, system integration, and risk reduction before extending the DT across the full manufacturing process.
3. **Considering integration and interoperability between the DT and the manufacturing process from the design stage.** An integration-oriented design allows the definition of clear functional interfaces and synchronization mechanisms, ensuring consistent and stable interaction between the DT and the physical process.
4. **Establishing multidisciplinary development teams** with hybrid technical competencies, built from internal resources and complemented by specialized external consultants. Such cross-domain expertise enables coherent DT design, reliable implementation and sustained operational performance of the digital twin
5. **Embedding regulatory and compliance requirements into the DT design.** Incorporating regulatory constraints - such as safety requirements in our case - from the design stage, ensures that the DT complies with industrial regulations without requiring later redesign.

8. Transferability and Scalability

The adoption of a progressive DT implementation strategy—based on pilot deployment followed by controlled scaling—provides a consistent approach for extending the developed DT solution to the GO manufacturing process as a whole.

Parametric DT calibration based on formulation recipes, has been identified as an approach for transferring the initially validated DT solution to other graphene-family products also manufactured by AVANZARE, thereby facilitating its implementation and minimizing associated costs.

In summary, DT technology provides a promising framework for achieving safer and more sustainable graphene-based material manufacturing processes.

9. References and Supporting Materials

The ISO 23247 series of standards on *Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing* has been used as a reference for the design of the DT's high-level architecture.

10. Contact Information

AVANZARE Advanced Materials
Dr. Julio Gomez Cordon
CEO
C/Encinillas 18-20, Navarrete, La Rioja (Spain)
julio@avanzare.es
<https://www.avanzarematerials.com/>

11. Acknowledgment and disclaimer



This work has been supported by EU-project SUNSHINE (Safe and sUstainable by desigN Strategies for Hlgh performance multi-component NanomatErials). The project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme, under grant agreement N° 952924. This document reflects only the author's view, and the Commission is not responsible for any use that may be made of the information it contains.
<https://www.h2020sunshine.eu/>, <https://cordis.europa.eu/project/id/952924/es>.



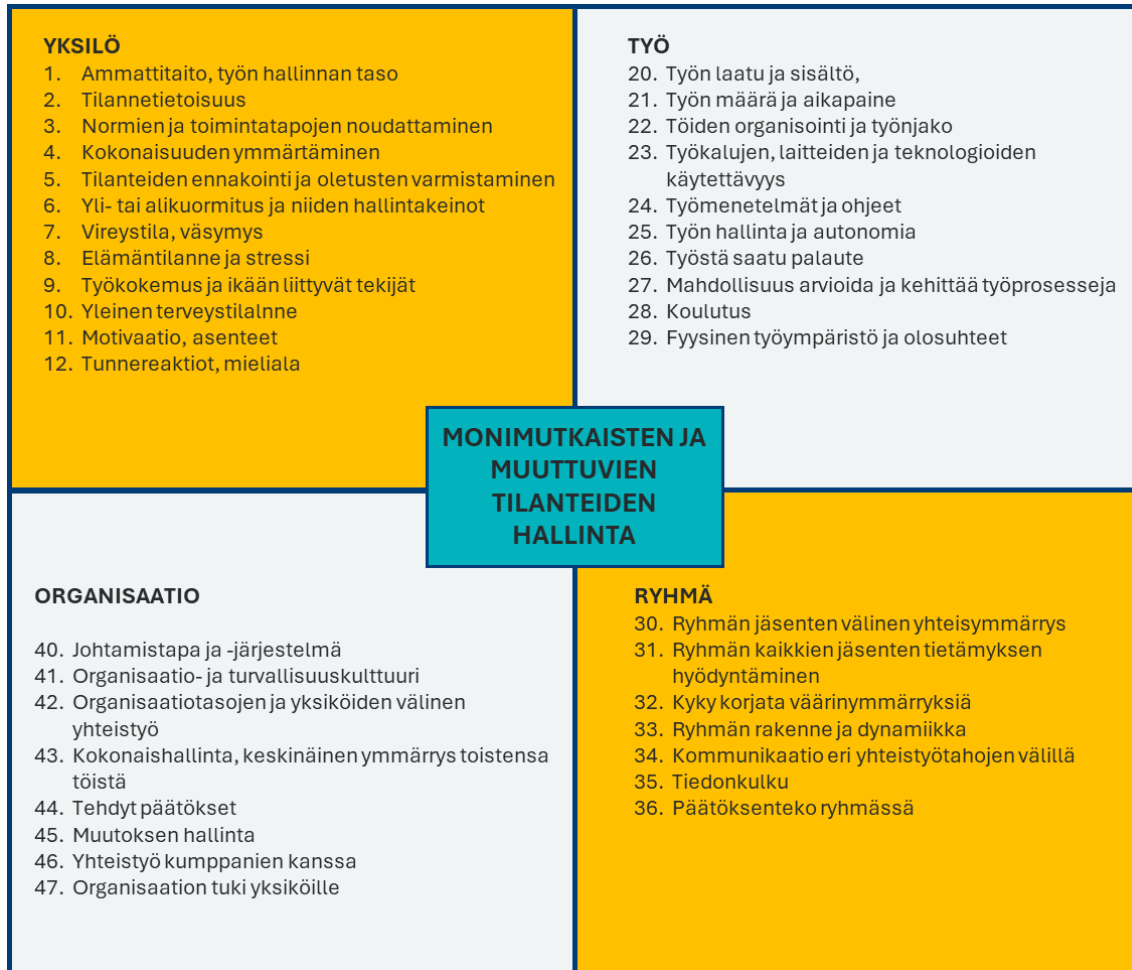
Liite 3. HumanDT työkalut

1. HF Tool

Professori Anna-Maria Teperin kehittämän **HF toolin** tavoitteena on auttaa ammattilaisia tunnistamaan, miten inhimilliset tekijät muovaavat päivittäistä työtä ja koko järjestelmän turvallisuutta. Sen keskeinen tarkoitus on tukea suunnittelijoita, insinöörejä ja turvallisuusasiantuntijoita siinä, että he tunnistavat, miten ihmiset ovat vuorovaikutuksessa tehtäviensä ja organisatorisen toimintaympäristönsä kanssa, jotta nämä näkökohdat voidaan tietoisesti sisällyttää järjestelmän kehittämiseen. Näin työkalu mahdollistaa inhimillisiin tekijöihin liittyvien haavoittuvuuksien varhaisen havaitsemisen ja tukee turvallisten ja luotettavien toimintaehtoien rakentamista. Se tarjoaa selkeän tavan tulkita, miten nämä tekijät vaikuttavat todelliseen operatiiviseen suorituskäyttöön ja missä mahdolliset heikkoudet tai vahvuudet voivat esiintyä.

HF toolia käytetään tyypillisesti projektien alkuvaiheissa tukemaan inhimilliskeskeisiä suunnitteluratkaisuja varmistamalla, että järjestelmän toiminnot vastaavat ihmisten kyvykkyyksiä ja operatiivisia realiteetteja. Sitä voidaan hyödyntää yhteistyötilanteissa — kuten haastatteluissa, työpajoissa tai monitieteisissä katselmoineissa — keräämään käytännön työntekijöiden tietoa, tunnistamaan suunnitellun ja todellisen työn välisiä eroja sekä havaitsemaan inhimillisiin tekijöihin liittyviä riskejä ennen järjestelmän käyttöönottoa. Inhimilliskeskeisten digitaalisten kaksosten kehittämisessä työkalu auttaa varmistamaan, että mallit ja simulaatiot heijastavat todellisia työolosuhteita, mikä parantaa käytettävyyttä, turvallisuutta ja järjestelmän toimintavarmuutta.

HF toolin toimintamenettely on jo kuvattu yksityiskohtaisesti tämän ohjeistuksen luvussa 2.



HF Tool

2. Inhimillisten tekijöiden tarkistuslista

Inhimillisten tekijöiden tarkistuslista							
N°	HF tool kohta	TÄSMENNYS	VÄITTÄMÄ	SOV.	ART*	TOIMENPITEET	JRT**
1. YKSILÖ	1	Ammattitaito, työn hallinnan taso	Tieto, taidot ja asiantuntemus, joita tietyssä työssä vaaditaan	DT haastaa käyttäjien taidot, tiedot ja kyvyt	Y/N		
	2	Tilannetietoisuus	Jatkuva prosessi, jossa havaitaan, ymmärretään ja projisoidaan sitä, mitä yksilön työympäristössä tapahtuu (huomio, havainnointi, muisti, päätöksenteko ja toiminta).	DT haastaa käyttäjien huomiokykyä ja muistia. DT haastaa käyttäjien ajan tasalla olevan ymmärryksen muodostumista siitä, mitä työympäristössä tapahtuu.			
	3	Normien ja toimintatapojen noudattaminen	Normit voivat olla virallisia ohjeita, kuten kirjalliset työohjeet, turvallisuusmääräykset tai toimialakohtaiset standardit, tai ne voivat olla epävirallisia käytäntöjä, jotka kehitetään työyhteisössä.	DT on ristiriidassa käyttäjä ohjaavien normien ja menettelytapojen kanssa. DT on ristiriidassa käyttäjän työyhteisön vakiintuneiden käytäntöjen kanssa.			
	4	Kokonaisuuden ymmärtäminen	Ymmärrys järjestelmästä tai prosessista, jossa henkilö työskentelee. Ei hetki-hetkeltä rakentuva tilannetietoisuus vaan vakaa, pitkän aikavälin käsitys järjestelmän eri elementtien vuorovaikutuksesta.	DT sumentaa käyttäjän ymmärrystä työjärjestelmän tai prosessin kokonaiskuvasta			

5	Tilanteiden ennakointi ja oletusten varmistaminen	Aktiivinen valmistautuminen siihen, mitä saattaa tapahtua, omien oletusten tarkastaminen ja sen varmistaminen, että olosuhteet ovat vastaavat oletuksia.	DT ei tue käyttäjän mahdollisuuksia ennakoida tulevia tapahtumia				
6	Yli- tai alikuormitus ja niiden hallintakeinot	Työn vaatimusten aiheuttaman yli- ja alikuormituksen hallinta	DT:n käyttö aiheuttata yli- tai alikuormitustat				
7	Vireystila, väsymys	Kyky ylläpitää tarkkaavaisuutta ja suorituskykyä.	DT haastaa käyttäjän valppauden ylläpitämistä tai aiheuttaa väsymystä.				
8	Elämäntilanne ja stressi	Yksilön elämäntilanne työn ulkopuolella ja sen vaikutukset työssä suoriutumiseen.	DT asettaa vaatimuksia, joita on vaikea täyttää väliaikaisesti heikentyneessä kognitiivisessa tilassa, esimerkiksi kun käyttäjä on haastavassa elämäntilanteessa.				
9	Työkokemus ja ikään liittyvät tekijät	Asiantuntemuksen, harkintakyvyn ja työnkulkujen hahmottamisen kehittyminen kokemuksen myötä. Havaintokyvyn, oppimisen ja kognitiivisten prosessien heikentyminen iän myötä.	DT haastaa käyttäjiä, joilla on rajallinen työkokemus tai havaitsemisen haasteita.				
10	Yleinen terveystilanne	Yksilön fyysinen ja henkinen tila suhteessa työtehtävän vaatimuksiin.	DT asettaa erityisiä vaatimuksia käyttäjän terveydelle tai työkyvylle.				

	11	Motivaatio, asenteet	Motivaatio ja asenteet ovat keskeisiä työhön sitoutumisen ja turvallisuuden ajureita. Motivaatio syntyy merkityksellisistä tavoitteista, palautteesta ja työn yhteensopivuudesta henkilökohtaisten arvojen kanssa. Asenteet voivat olla positiivisia tai negatiivisia.	DT:llä on ominaisuuksia tai toimintoja, jotka käyttäjät kokevat turhauttavina.				
	12	Tunnereaktiot, mieliala	Tunteet vaikuttavat päätöksentekoon, tarkkaavaisuuteen ja sosiaalisiin vuorovaikutuksiin. Ärtynisyys ja kärsimättömyys voivat kaventaa huomiota ja heikentää päätöksentekoa. Myönteinen mieliala voi tukea keskittymistä ja joustavuutta.	DT välittää tietoa, joka vaikuttaa käyttäjän tunnetilaan ja vaatii samanaikaisesti toimia.				
2. TYÖ	20	Työn laatu ja sisältö	Tehtävien merkityksellisyys, vaihtelu ja vaatimukset.	DT vaikuttaa käyttäjän työn laatuun, sisältöön tai vaatimuksiin.				
	21	Työn määrä ja aikapaine	Työmäärä ja vaadittujen tehtävien tai toimintojen määrä tietyn ajanjakson puitteissa.	DT aiheuttaa käyttäjille aikapainetta.				
	22	Töiden organisointi ja työnjako	Roolien, vastuiden ja tehtävien selkeys. Selkeät työkuvaukset ja selkeästi määritellyt vastuut tukevat työtyytyväisyyttä ja motivaatiota.	DT aiheuttaa muutoksia työn organisaatiossa, työnjaossa tai työkuvauksissa.				
	23	Työkalujen, laitteiden ja teknologioiden käytettävyys	Hyvin suunnitellut työkalut tukevat turvallisuutta ja tehokkuutta, kun taas huono suunnittelu tai vialliset laitteet voivat lisätä riskejä ja heikentää suorituskykyä.	DT:n mallintaman teknologian, laitteiden tai ohjelmistojen käytettävyydessä ja				

			toiminnallisuudessa on puutteita.				
24	Työmenetelmät ja ohjeet	Työohjeet ovat virallisia menettelytapoja ja ohjeita, jotka varmistavat turvallisuuden, laadun ja tehokkuuden. Vaikka selkeät ohjeet vähentävät riskejä ja standardoivat käytäntöjä, liiallinen byrokrania tai liian jäykät säännöt voivat luoda sokeita pisteitä ja vaikeuttaa sopeutumiskykyä.	DT aiheuttaa tarpeen tehdä muutoksia työmenetelmiin ja -ohjeisiin.				
25	Työn hallinta ja autonomia	Vaikutusvalta omaan työhön tarkoittaa sitä, kuinka paljon työntekijät voivat hallita omia tehtäviään, menetelmiään, aikataulujaan ja työolosuhteitaan.	DT asettaa käyttäjille rajoituksia vaikuttaa heidän työ- ja työolosuhteisiinsa.				
26	Työstä saatu palaute	Työstä saatu palaute lisää ammatillisen arvostuksen tunnetta ja tukee työssä kehittymistä.	DT voi heikentää käyttäjän mahdollisuuksia saada palautetta työstään tai ammatillista arvostusta.				
27	Mahdollisuus arvioida ja kehittää työprosesseja	Työntekijöiden mahdollisuudet analysoida, parantaa ja innovoida omassa työssään. Henkilöstön osallistaminen prosessien parantamiseen lisää omistajuutta, oppimista ja sopeutumiskykyä.	DT heikentää käyttäjien mahdollisuuksia arvioida ja kehittää omia työprosessejaan.				

	28	Koulutus	Koulutus on järjestelmällinen tapa kehittää tietoa, taitoja ja asenteita, jotka ovat välttämättömiä turvalliseen ja tehokkaaseen työhön. Tehokas koulutus vastaa todellisiin tarpeisiin, on räätälöityä ja sen vaikutus arvioidaan.	DT tai sen myötä uudistuvat työtehtävät vaativat koulutusta.				
	29	Fyysinen työympäristö ja olosuhteet	Fyysinen työympäristö kattaa ergonomiset, hygieeniset ja ympäristöolosuhteet, joissa työ tehdään – kuten ilmanvaihto, valaistus, lämpötila, melu ja pohjaratkaisu. Hyvin suunniteltu ympäristö tukee turvallisuutta, mukavuutta ja tuottavuutta.	DT ei ota riittävästi huomioon käyttäjien fyysistä työympäristöä				
3. RYHMÄ	30	Ryhmän jäsenten välinen yhteisymmärrys	Jokaisella ryhmän tai tiimin jäsenellä on johdonmukainen ja tarkka käsitys siitä, mitä tapahtuu ja mitä pitää tehdä. Se rakentuu selkeän viestinnän, yleisen terminologian ja tietojärjestelmien tehokkaan käytön kautta.	DT ei tue yhteisen ymmärryksen muodostamista meneillään olevasta tilanteesta asiaankuuluvien käyttäjien kesken.				
	31	Ryhmän kaikkien jäsenten tietämyksen hyödyntäminen	Monimutkaisessa työssä kukaan yksittäinen henkilö ei hallitse kaikkea, joten on tärkeää hyödyntää tiimin monipuolista asiantuntemusta. Tiimit, jotka tuntevat jokaisen jäsenen vahvuudet ja asiantuntemuksen, voivat ratkaista ongelmia tehokkaammin ja ennakoida tarpeita, jopa paineen alla.	DT ei tue kaikkien tarvittavien osapuolten tietämyksen hyödyntämistä.				

32	Kyky korjata väärinymmärryksiä	Kommunikaatio on väistämättä epätäydellistä, joten korjauksia tarvitaan säännöllisesti. Kyky tunnistaa ja korjata väärinkäsitykset on avainasemassa turvallisessa ja tuloksellisessa työssä.	DT ei salli viestien tai toimintojen uudelleenohjaamista tai korjaamista.				
33	Ryhmän rakenne ja dynamiikka	Kokoonpano, rakenne ja sosiaaliset suhteet ryhmän sisällä.	DT saattaa haitata tiimityötä.				
34	Kommunikaatio eri yhteistyötahojen välillä	Viestintä eri yhteistyösapuolten välillä on tärkeää sekä operatiivisen menestyksen että turvallisuuden kannalta.	DT ei mahdollista yhteistyötä kaikkien tarvittavien osapuolten kanssa.				
35	Tiedonkulku	Tehokas tiedonkulku on ratkaisevan tärkeää yhteisen tilannetietoisuuden ja toiminnan jatkuvuuden ylläpitämiseksi. Esimerkiksi tuotantoympäristöissä vuoronvaihdossa on annettava riittävästi aikaa lähteille ja saapuville työntekijöille vaihtaa kaikki olennaiset tiedot.	DT ei välitä kaikkea tarvittavaa tietoa. DT voi heikentää tiedon kulkua vuorosta toiseen.				
36	Päätöksenteko ryhmässä	Päätöksenteko ryhmässä tarkoittaa vaihtoehtojen, riskien arviointia ja yhteisten päätösten tekemistä.	DT ei tue yhteistä päätöksentekoa.				

4. ORGANISAATIO	40	Johtamistapa ja -järjestelmä	Johtaminen tarkoittaa resurssien suunnittelua, organisointia ja koordinoitua tiettyjen tavoitteiden tehokkaaksi saavuttamiseksi, kun taas johtajuus keskittyy ihmisten inspiroimiseen, ohjaamiseen ja motivoimiseen yhteisen vision suuntaan.	DT ei sisällä riittävästi olennaista tietoa johtamisen tueksi.				
	41	Organisaatio- ja turvallisuuskulttuuri	Jaetut arvot, uskomukset ja käyttäytyminen, joka vaikuttaa työn tekemisen tapoihin ja turvallisuustoimintaan.	DT ei sovi organisaation tyypillisiin toimintatapoihin.				
	42	Organisaatiotasojen ja yksiköiden välinen yhteistyö	Tehokas yhteistyö vaatii selkeää kommunikaatiota ja yhteisiä prosesseja.	DT ei huomioi jotakin organisaatiotasoa tai -yksikköä.				
	43	Kokonaishallinta, keskinäinen ymmärrys toistensa töistä	Työntekijöiden ja yksiköiden tulee ymmärtää paitsi omat roolinsa myös se, miten heidän työnsä sopii organisaatioon laajemmin.	DT ei tue käyttäjäkokonais kuvan muodostamisessa tuotannosta.				
	44	Organisaation päätöksenteko	Päätökset henkilöstöstä, laitteista ja investoinneista vaikuttavat pitkällä aikavälillä ja voivat tuoda mukanaan piileviä riskejä tai hyötyjä.	DT ei ole linjassa viimeaikaisten johdon päätösten kanssa.				
	45	Muutoksen hallinta	Miten organisaatio suunnittee ja toteuttaa muutoksia sekä sopeutuu niihin.	DT:n toteutuksen vaatimaa muutosten hallintaa ei oteta huomioon.				
	46	Yhteistyö kumppanien kanssa	Organisaation ulkopuoliset yhteistyökumppanit, kuten alihankkijat, toimittajat tai viranomaiset.	DT ei huomioi yhteistyötä jonkin kumppanin kanssa.				

	47 Organisaation tuki yksiköille	Muiden organisaation funktioiden tarjoama tuki.	DT:n vaatimaa tukea organisaation sisäisiltä yksiköiltä ei oteta huomioon.				
--	----------------------------------	---	--	--	--	--	--

*alkuperäinen riskitaso

**jäännösriskitaso riskinhallintatoimenpiteiden jälkeen



3. Riskimatriisi

Riskimatriisi on puolikvantitatiivinen menetelmä, joka käyttää kahta parametriä, todennäköisyyttä (P) ja vakavuutta (S), riskitason määrittämiseksi (EN 31010). Matriisin solut esitetään yleensä värikoodattuina kuvaamaan niitä riskitasoja, jotka syntyvät P- ja S-arvojen eri yhdistelmistä. Jokaiselle riskitasolle liittyy oma päätössääntönsä.

Tässä ohjeistuksessa esitetty 3 × 3 -riskimatriisi käyttää kolmea todennäköisyystasoa (epätodennäköinen, mahdollinen, todennäköinen) ja kolmea vakavuustasoa (vähäinen, haitallinen, vakava), mikä tuottaa yhdeksän mahdollista yhdistelmää. Nämä yhdistelmät ryhmitellään kolmeen riskikategoriaan: matala, keskiuuri ja korkea, ja merkitään vastaavasti vihreällä, oranssilla ja punaisella luokittelun helpottamiseksi. Matriisin päätöskriteeri on seuraava:

Korkeat riskit tulee poistaa viipymättä, sillä ne edellyttävät välitöntä riskien pienentämistä hyväksyttävän jäännösriskin saavuttamiseksi.

Keskisuuret riskit tulee käsitellä toteuttamalla sopivia ja suhteellisia riskienvähennystoimenpiteitä.

Matalat riskit ovat pääsääntöisesti hyväksyttäviä normaaleissa käyttöolosuhteissa ja niitä voidaan seurata määräjain, jotta voidaan varmistaa riskitason pysyminen muuttumattomana.

Riskimatriisityökalua on helppo käyttää ja se mahdollistaa riskien nopean luokittelun, minkä vuoksi sitä käytetään laajalti seulontatyökaluna prioriteettien määrittämiseen. Menetelmä sisältää kuitenkin merkittävän määrän subjektiivisuutta, elleivät sitä sovelta kokeneet arvioijat.

VAKAVUUS	Toden- näköinen	Kohtalainen	Korkea	Korkea
	Mahdol- linen	Matala	Kohtalainen	Korkea
	Epätoden- näköinen	Matala	Matala	Kohtalainen
RISKI- MAT- RIISI		Vähäinen	Haitallinen	Vakava
		VAKAVUUS		

Figure 2. Riskimatriisi

4. Inhimillisiin tekijöihin liittyvien riskien hallinnan teknisten strategioiden kooste

Inhimillisiin tekijöihin liittyvien riskien hallinnan teknisten strategioiden kooste						
TOTEUTETTU STRATEGIA		KUVAUS	DIGITAALISEN KAKSOSEN SOVELLUS	DT SOVELLUKSEN ESIMERKKI	LIITTYVÄT STANDARDIT	
1. TURVALLISEKSI SUUNNITTELU (HCbD)	1	Virheensietoiset käyttöliittymät	Suunnittele DT:n käyttöliittymät ja toiminnot siten, että ne ehkäisevät inhimillisiä virheitä ja varmistavat, että järjestelmä siirtyy automaattisesti turvalliseen tilaan vikatilanteessa. Virheensietoinen käyttöliittymä estää vaaralliset toiminnot, ehkäisee kriittisiä vikatilanteita ja vähentää operatiivisia riskejä, laitevaurioita ja vältettävissä olevia onnettomuuksia.	DT validoi kaikki syötteet ennen niiden käsittelyä, estää virheelliset arvot ja ylläpitää turvallisia tiloja estääkseen toimintoja, jotka voisivat vaarantaa toiminnan.	Kun operaattori syöttää arvon, joka on sallitun alueen ulkopuolella, DT estää sen, näyttää sallitut rajat ja ylläpitää turvallisen tilan. Järjestelmä sallii myös muutoksen peruuttamisen ensimmäisten sekuntien aikana, mikäli sitä ei ole vahvistettu.	EN 61508-1 EN 61508-2 EN 61508-3 EN ISO 13849-1 EN IEC 62061 EN ISO 9241-110
	2	Kognitiivinen HMI-ergonomia	Suunnittele käyttöliittymät siten, että ne optimoivat ymmärrettävyyden, minimoivat kognitiivisen kuormituksen ja mahdollistavat nopean sekä tarkan päätöksenteon. Kognitiivisen kuormituksen huomioiminen varmistaa selkeyden ja tehokkuuden; sen laiminlyönti puolestaan aiheuttaa epäselvyyksiä, virheellisiä päätöksiä, viiveitä ja suuremman todennäköisyyden operatiivisille virheille.	DT-käyttöliittymä esittää tiedon selkeästi ja visuaalisesti jäsennehtynä, mikä mahdollistaa nopean ymmärtämisen ilman kognitiivista ylikuormitusta.	Paneeli jäsentää tiedon toiminnallisiin lohkoihin, jotka vähentävät toiminnallista epäselvyyttä. Taulukot on yksinkertaistettu, ja hakutyökalu on lisätty tiedon paikantamiseksi ilman visuaalisen kuorman kasvua.	EN ISO 9241-11 EN ISO 6385 ISO 9241-110

3	Toiminnallinen resilienssi ja hallittu heikentyminen	<p>Suunnittele DT siten, että se pystyy ylläpitämään toiminnan jatkuvuuden teknisten vikojen, yhteyden katkeamisen tai inhimillisen virheen sattuessa. Järjestelmän tulee säilyttää olennaiset toiminnot, asettaa turvallisuus etusijalle ja toimia turvallisessa, heikentyneessä tilassa, kunnes normaalit olosuhteet palautuvat. Jos näin ei tehdä, seurauksena voivat olla keskeytykset, tietojen menetykset sekä henkilöstöön ja laitteisiin kohdistuvat riskit.</p>	<p>DT säilyttää olennaiset toiminnot sensori-, verkko- tai moduulivikojen aikana ja näyttää vain luotettavan datan, jotta päätöksiä ei tehdä puutteellisten tietojen perusteella.</p>	<p>Jos sensori vikaantuu, DT siirtyy turvalliseen tilaan ja näyttää viimeisen voimassa olevan mittausarvon. Jos pilviyhteys katkeaa, järjestelmä jatkaa toimintaa paikallisesti keskeyttämättä olennaista valvontaa.</p>	<p>EN ISO 22301 EN 61508 NIST SP 800-34</p>
4	Ihmisen ja robotin vuorovaikutus	<p>Varmista suunnitteluratkaisuilla, että ihmiset ja robotit — erityisesti kollaboraatirobotit yhteisissä työtiloissa — voivat työskennellä yhdessä turvallisesti, hallitusti ja tehokkaasti siten, että automaatio kunnioittaa ihmisen rajoja. Oikein toteutettu vuorovaikutus vähentää onnettomuuksia ja odottamattomia pysähdyksiä; sen laiminlyönti heikentää henkilöstön luottamusta ja lisää operatiivista riskiä.</p>	<p>DT sisältää visualisointeja ja hälytyksiä robotin liikkeistä ja riskialueista, mikä mahdollistaa turvallisen vuorovaikutuksen automaatiojärjestelmien kanssa.</p>	<p>DT näyttää robotin liikealueen ja antaa hälytyksen, kun operaattori astuu sille alueelle. Robotti hidastaa automaattisesti nopeuttaan, kun henkilö lähestyy.</p>	<p>EN ISO 10218-1 EN ISO 10218-2 ISO/TS 15066 EN ISO 13855 EN ISO 12100</p>

5	Loogiset lukitukset ja kaksinkertainen vahvistus	Integroi ohjausjärjestelmän suunnitteluun pakolliset loogiset ehdot ja useat vahvistukset, jotta vaarallisia toimintoja ei voida suorittaa ennen kuin kaikki edellytykset on varmistettu. Nämä lukitukset estävät vakavat virheet ja varmistavat, että kriittiset toiminnot toteutetaan hallitusti. Niiden puuttuminen lisää riskiä tahattomille muutoksille, prosessivirheille, turvallisuuspoikkeamille ja luvattomille toimenpiteille.	DT vaatii lisävahvistuksen korkean vaikutuksen toiminnoille, mikä vähentää tahattomien pysäytysten tai kokoonpanomuutosten todennäköisyyttä.	DT vaatii kaksoisvahvistuksen ennen tuotantolinjan pysäyttämistä. Etäpysäytys edellyttää kahden toisistaan riippumattoman roolin vahvistusta.	EN 61508 EN ISO 13849 -1 NIST SP 800-53 EN IEC 62443
6	Kontekstuaalinen tuki ja selitettävyyden varmistaminen	Tarjoa olennaista kontekstuaalista tietoa juuri silloin, kun operaattori sitä tarvitsee, ja varmista, että DT:n päätökset (laskelmat, suositukset, ennusteet, hälytykset) ovat tulkittavia ja selitettävissä. Hyvin suunniteltu informaation esittäminen ehkäisee väärintulkintoja ja vähentää inhimillisiä virheitä.	DT tarjoaa selkeät perustelut suosituksilleen, mikä parantaa käyttäjän ymmärrystä ja luottamusta.	Kun DT suosittelee toimenpidettä, se näyttää perusteluna käytetyt tiedot. Jos se ehdottaa nopeuden alentamista, se esittää suosituksen käynnistäneen trendin.	EN IEC/IEEE 82079-1 EN ISO 20607
7	Turvallisuusmerkinnät	Integroi standardoidut merkinnät, värit, piktogrammit ja koodit, jotka mahdollistavat henkilöstölle nopean, yhdenmukaisen ja yksiselitteisen tulkinnan. Asianmukainen merkintä estää tulkintavirheitä ja parantaa reagointinopeutta kriittisiin tiloihin.	DT käyttää standardoituja värejä ja symboleja ilmaistakseen tilat ja hälytykset, mikä minimoi väärintulkinnat paineen alla.	Toimintatilat noudattavat standardoitua koodausta: vihreä (normaali), keltainen (varoitus) ja punainen (kriittinen). Kriittiset hälytykset vilkkuvat punaisina välittömän	EN ISO 7010 EN ISO 3864

				priorisoinnin varmistamiseksi.	
8	Inhimilliskeskeinen suunnittelu (HCD)	Integroi käyttäjän (kyvykkyyksien, rajoitteiden, kontekstin, riskien, odotusten ja todellisten työolosuhteiden) perusteellinen ymmärrys koko DT:n elinkaaren ajaksi, jotta järjestelmä mukautuu ihmiseen. HCD vähentää tarpeetonta monimutkaisuutta, parantaa turvallisuutta ja hyväksyttävyyttä sekä ehkäisee sekavia käyttöliittymiä, käyttäjien vastustusta ja virheitä.	DT on suunniteltu ja validoitu todellisten käyttäjien kanssa, heidän tarpeensa huomioiden ja järjestelmän monimutkaisuutta vähentäen, jotta lopputuloksena on intuitiivinen ja turvallinen työkalu.	Kun operaattorit raportoivat heikosta tekstin luettavuudesta, DT kasvattaa kontrastia. Lisäksi yksi toimintoketju optimoidaan kenttätestien jälkeen kuudesta vaiheesta kolmeen.	EN ISO 9241-210 EN ISO 6385 EN ISO 9241-110
9	Ihmisen rooli ja autonomian taso	DT ilmoittaa, milloin sen antama suositus edellyttää operaattorin pakollista hyväksyntää ennen toimeenpanoa. Kun järjestelmä toimii tilassa, jossa automaatio hoitaa toiminnan mutta ihminen valvoo sitä (human on the loop), DT mahdollistaa toimenpiteen välittömän keskeyttämisen. Strategisen tason valvonnassa (human over the loop) DT selventää autonomian tason ja sen, milloin ihmisen on syytä puuttua kriittisiin päätöksiin.	DT viestii aktiivisen autonomiatason ja selventää, milloin operaattorin toimenpiteitä tarvitaan kriittisten päätösten tekemiseksi.	DT ilmoittaa, milloin sen antama suositus edellyttää operaattorin vahvistusta ennen toteutusta. Valvotussa automaattitilassa se mahdollistaa toiminnon välittömän pysäyttämisen.	EN ISO 13849-1 EN 61508 ISO/IEC 22989 NIST AI RMF 1.0

2. SUOJAUS	10	Turvallinen arkkitehtuuri ja vähimmän oikeuden periaate	Suunnittele DT järjestelmäarkkitehtuuri vähimmän oikeuden periaatteen mukaisesti siten, että kukin toimija — ihminen tai järjestelmä — pääsee käsiksi vain siihen tietoon, joka on välttämätöntä hänen tehtäviensä suorittamiseksi. Tämä vähentää virheitä, luvattomia pääsyjä ja toimintahäiriöitä. Periaatteen sivuuttaminen puolestaan lisää tietoturvaloukkausten, luvattomien muutosten ja tuotantoon kohdistuvien riskien todennäköisyyttä.	DT käyttää roolipohjaisia käyttöoikeuksia ja rajoittaa arkaluonteisia toimintoja siten, ettei yksikään luvaton käyttäjä voi tehdä muutoksia tai päästä käsiksi kriittisiin tietoihin.	DT sallii operaattorien tarkastella prosessidataa, mutta estää PLC-parametrien muutokset ilman asianmukaista hyväksyntää. Analyytikot voivat tarkastella KPI-mittareita, mutta he eivät voi viedä arkaluonteisia tietoja tai muokata reseptejä ilman virallista valtuutusta.	EN IEC 62443 EN ISO/IEC 27001 EN ISO/IEC 27002 NIST SP 800-207 NIST SP 800-53 NIST SP 800-82 EN 61508 EN ISO 13849-1 EN IEC 62061
	11	Hälytysjärjestelmän elinkaari	Varmista, että järjestelmän hälytykset ovat tarkoituksenmukaisia, priorisoituja ja oikein konfiguroituja, jotta päätöksenteko on nopeaa ja turvallista. Huonosti määritetyt hälytykset aiheuttavat kuormitusta, tarkkaavuuden heikkenemistä, viivästyneitä reaktioita ja suurta operatiivista riskiä.	DT luokittelee, priorisoi ja ryhmittelee hälytykset näyttääkseen vain olennaiset ilmoitukset ja tukeakseen operaattorin nopeaa reagointia.	DT yhdistää toistuvat hälytykset yhdeksi ilmoitukseksi ylikuormituksen estämiseksi. Suunnitellun kunnossapidon aikana se vaimentaa tilapäisesti tunnetut hälytykset melun vähentämiseksi.	EN IEC 62682
	12	Privacy and data protection	Varmista, että DT:n käsittelemä henkilötieto on suojattu jo lähtökohtaisesti soveltamalla oletusarvoisesti tietojen minimointia, anonymisointia tai pseudonymisointia sekä ottamalla käyttöön kontrollit, jotka estävät uudelleentunnistamisen. Tämä turvaa yksityisyyden, varmistaa	DT anonymisoi henkilötiedot ja rajoittaa pääsyn arkaluonteiseen tietoon varmistaen säädösten noudattamisen ja käyttäjien suojelun	Suorituskykytiedot esitetään vuorokohtaisesti koottuna ilman henkilötunnisteita. Ennustavissa malleissa käytetty historiallinen data	GDPR EN ISO/IEC 27701 ISO 31700-1 EN ISO/IEC 27001 EN ISO/IEC 27002

		säädösten noudattamisen ja ylläpitää henkilöstön luottamusta.		pseudonymisoidaan ja poistetaan määritellyn säilytysajan jälkeen.	
13	Vahva käyttöoikeuksien hallinta, jäljitettävyys ja tehtävien eriyttäminen	Varmista vahva tunnistautuminen, kattava toimintojen lokitus ja kriittisten tehtävien eriyttäminen eri rooleille, jotta virheet, väärinkäytökset tai luvattomat muutokset voidaan estää. Näiden toimenpiteiden laiminlyönti voi johtaa vakaviin vikoihin, jäljitettävyuden menetykseen ja vaatimustenmukaisuusriskien kasvuun.	DT kirjaa kaikki toiminnot lokiin, edellyttää vahvaa tunnistautumista ja eriyttää kriittiset toiminnot eri rooleille estääkseen luvattomat toimet ja tukeakseen jäljitettävyyttä.	Jokainen toimenpide kirjataan lokiin käyttäjän, aikaleiman ja syyn kera. Henkilö, joka kehittää muutoksen, ei voi ottaa sitä käyttöön, mikä varmistaa tehtävien eriyttämisen.	EN ISO/IEC 27001 EN ISO/IEC 27002 EN IEC 62443 NIST SP 800-53
14	OT-IT-salauksen käyttö	Suojaa DT:n tiedot ja järjestelmät käyttämällä salausta, turvallisia viestintäkanavia sekä kovennettuja laitteita ja konfiguraatioita, joista on poistettu tarpeettomat tai haavoittuvat palvelut. Näillä toimenpiteillä estetään tietojen sieppaus, manipulointi ja hyökkäykset, jotka voisivat vaarantaa teolliset prosessit.	DT suojaa teollisen viestinnän salauksella ja kovennetuilla konfiguraatioilla, jotka estävät ulkopuolisen pääsyn tai prosessien manipuloinnin.	DT:n ja OT-verkon välinen viestintä on salattu. Varmenteet kiertävät automaattisesti, ja turvattomat protokollat on poistettu käytöstä.	EN IEC 62443 EN ISO/IEC 27001 EN ISO/IEC 27002 NIST SP 800-125 NIST SP 800-52
16	Turvalliset varmuuskopiot, versiointi ja palautus	Varmista toiminnan jatkuvuus luotettavien varmuuskopioiden, versiohallinnan ja turvallisten palautusmekanismien avulla vikatilanteiden, inhimillisten virheiden tai kyberhyökkäysten sattuessa. Näin	DT tallentaa historiallisen konfiguraatiodatan eri versioina ja mahdollistaa nopean palauttamisen virheiden	Vikatilanteen jälkeen DT palauttaa edellisen konfiguraation menettämättä historiatietoja. Varmuuskopiot	EN ISO/IEC 27001 EN ISO/IEC 27002 EN IEC 62443-3-3 NIST SP 800-34 EN ISO 22301

		ehkäistään tietojen menetys, käyttökatkot ja peruuttamattomat virheet.	tai epäonnistuneiden päivitysten sattuessa.	validoidaan viikoittain testiympäristössä niiden eheyden varmistamiseksi.	
17	Fyysiset ja organisatoriset suojausmenetelmät	Estä pääsy vaarallisille alueille teknisten ja organisatoristen suojaustoimenpiteiden avulla. DT-integraatio mahdollistaa vaaravyöhykkeiden seurannan ja hallinnan, mikä parantaa operaattorien turvallisuutta.	DT valvoo turvallisuusolosuhteita robottisoluissa ja estää automaattiset toiminnot, kun havaitaan ihmisen läsnäolo tai avoimet suojalaitteet.	Jos valmistussolun suojattu ovi avataan, DT estää automaattiset toiminnot. Oven sulkemisen jälkeen järjestelmä pyytää varmennusta ennen automaation uudelleenkäyttöönnottoa.	EN ISO 10218-1 EN ISO 102018-2 ISO/TS 15066 EN ISO 14120 EN ISO 13857
18	Datanhallinta ja eettiset periaatteet	Sovella politiikkoja, rooleja ja kontrollimekanismeja, jotka varmistavat datan eheyden, laadun, jäljitettävyyden, yksityisyyden ja oikeudenmukaisuuden koko sen elinkaaren ajan. Periaatteiden, kuten minimoinnin, algoritmisen syrjimättömyyden ja työntekijöiden suojelun, sisällyttäminen ehkäisee puolueellisuutta, väärinkäyttöä sekä turvattomia tai epäoikeudenmukaisia päätöksiä.	DT valvoo datan käyttöä ja näyttää datalähteet sekä niihin liittyvät säännöt varmistaakseen päätöksenteon oikeudenmukaisuuden, läpinäkyvyyden ja puolueettomuuden.	Käyttöajat esitetään koottuna ilman yksilöiviä tietoja. DT näyttää datan kulkuketjun (data lineage) ennen kuin sen käyttö päätöksenteossa sallitaan.	EN ISO/IEC 38505-1 GDPR EN ISO/IEC 27018 IEEE 7000 IEE 7003 IEEE 7010
19	Kuormituksen ergonominen analyysi	Arvioi järjestelmällisesti tehtävien fyysiset, kognitiiviset ja emotionaaliset vaatimukset. Kuormituksen tasapainottaminen vähentää virheitä, väsymystä ja operatiivista stressiä; sen	DT havaitsee fyysisen tai kognitiivisen kuorman piikit ja suosittelee tehtävien uudelleenjakamista kyllästymisen ehkäisemiseksi ja	DT havaitsee, että operaattori käsittelee liian monta hälytystä ja jakaa kuormitusta uudelleen. Aikataulutaja tasapainottaa tehtävät,	ISO 10075 ISO 11228 ISO 6385

		<p>sivuuttaminen lisää läheltä piti -tilanteita ja heikentää työn laatua.</p>	<p>virheiden vähentämiseksi.</p>	<p>jotta vuorokuormitus pysyy kohtuullisena.</p>	
20	<p>Ihmisiin kohdistuvan muutoksen hallinta</p>	<p>Varmista, että kaikki DT-järjestelmään tehtävät muutokset, jotka vaikuttavat operaattorien työhön, arvioidaan, viestitään ja validoidaan etukäteen riskien, epäselvyyksien ja heikon sopeutumisen välttämiseksi.</p>	<p>DT ilmoittaa käyttäjille etukäteen kaikista päivityksistä, jotka vaikuttavat näkymiin tai informaatiovirtoihin, ja ohjaa muutokseen siirtymistä epäselvyyksien välttämiseksi.</p>	<p>Ennen näkymän päivittämistä DT ilmoittaa käyttäjille tulevista muutoksista ja esittää ennen-jälkeen-esikatselut siirtymän helpottamiseksi.</p>	<p>EN ISO/IEC 20000-1 EN ISO 9241 EN ISO 12100</p>
21	<p>Standardoitu tekninen dokumentaatio</p>	<p>Varmista, että käsikirjat, menettelyt ja käyttöohjeet noudattavat kansainvälisiä standardeja turvallista käyttöä koskevan tiedon esittämisestä. Puutteellinen dokumentaatio aiheuttaa virheitä, väärinkäyttöä ja vältettävissä olevia inhimillisiä erehdyksiä.</p>	<p>DT integroi käsikirjat ja menettelyohjeet siten, että ne ovat avattavissa suoraan jokaiselta näytöltä, mikä varmistaa välittömän pääsyn validoituihin ohjeisiin.</p>	<p>DT tarjoaa standardoidut ohjeet, jotka ovat avattavissa yhdellä napsautuksella. Koneeseen sijoitettu QR-koodi avaa vastaavan menettelyohjeen suoraan.</p>	<p>EN IEC/IEEE 82079-1 EN ISO 20607</p>
22	<p>Tekninen vuoronvaihto</p>	<p>Järjestelmällistä vuorojen välinen kriittisen operatiivisen tiedon siirto: prosessin tila, hälytykset, aktiiviset riskit, tehdyt päätökset, avoinna olevat tehtävät, poikkeamat ja kaikki turvallisuuteen tai suorituskykyyn vaikuttavat seikat. Rakenteinen vuoronvaihto varmistaa toiminnan jatkuvuuden ja ehkäisee</p>	<p>DT laatii automaattisesti yhteenvedon edellisen vuoron toiminnasta ja edellyttää saapuvan operaattorin kuittausta, jotta kriittistä tietoa ei pääse katoamaan.</p>	<p>Saapuva operaattori saa automaattisen yhteenvedon poikkeamista. Vuoronvaihtoon sisältyy digitaalinen tarkistuslista, joka edellyttää sähköistä allekirjoitusta.</p>	<p>EN ISO 11064 EN IEC 62832</p>

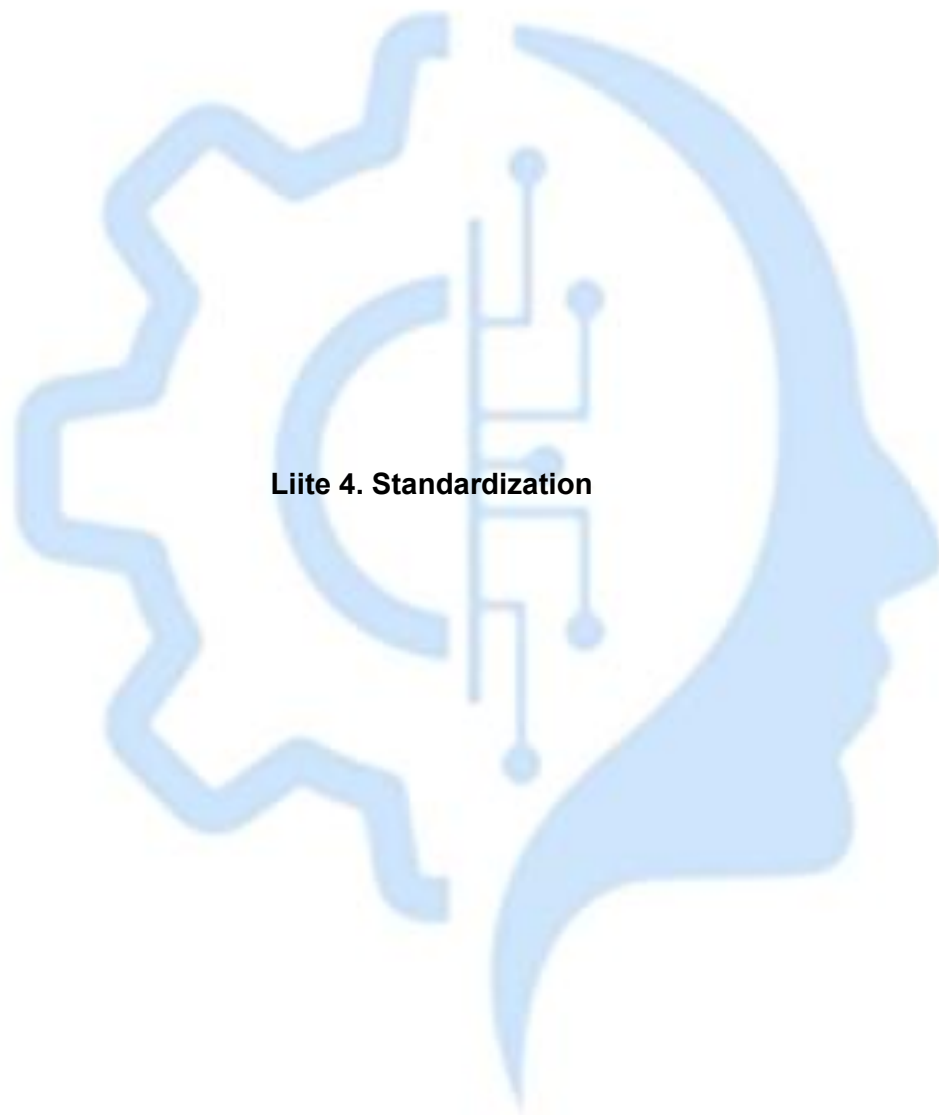
		turvallisuuden kannalta olennaisen tiedon katoamista.			
23	Käytettävyyden mittarit ja jatkuva palautteenkeruu	Määritä määrälliset ja laadulliset indikaattorit ihmisen ja järjestelmän välisen vuorovaikutuksen mittaamiseksi (tehokkuus, vaikuttavuus, kognitiivinen kuormitus, kitka). Nämä mittarit tukevat DT:n jatkuvaa parantamista.	DT analysoi käyttäjien navigointimalleja ja tunnistaa käytettävyyshaasteita, mikä mahdollistaa näyttöjen ja työkulkujen kehittämisen näyttöön perustuvalla tavalla.	Vaikeasti löydettävä kaavio siirretään päänäköymään. Uudistettu ratkaisu validoidaan A/B-testauksella, ja käyttöön otetaan versio, joka osoittautuu tehokkaimmaksi.	EN ISO 9241-11 ISO/IEC 25062 EN ISO 6385
24	Kattava riskienhallinta	Varmista, että tekniset ja inhimilliset riskit analysoidaan ja hallitaan siten, että päätöksenteko perustuu näyttöön eikä intuitioon tai tuotantopaineisiin. Riskien sivuuttaminen altistaa järjestelmän haavoittuvuuksille, jotka voivat johtaa vakaviin vikoihin ja onnettomuuksiin.	DT yhdistää teknisen ja inhimillisen datan näyttääkseen reaaliaikaiset riskit ja tukeakseen tietoon perustuvaa päätöksentekoa ennen häiriöiden syntymistä.	DT havaitsee lisääntyneet mikroseisahdukset ja ilmoittaa kehittyvästä riskistä. Se käyttää bow tie -visualisointia korostaakseen syitä ja aktiivisia suojauskeinoja.	EN ISO 31000 EN ISO 12100 EN IEC 61508
25	Vähittäinen muutosten käyttöönotto	Ota uudet toiminnot tai prosessit käyttöön hallitusti pilottivaiheiden kautta ja arvioi niiden inhimilliset, tekniset ja organisatoriset vaikutukset ennen täysimittaista käyttöönottoa.	DT tuo uudet toiminnot käyttöön vähitellen pilottiryhmien kautta ja kerää operatiivista palautetta ennen täysimittaista käyttöönottoa.	Uutta DT-toiminnallisuutta testataan ensin pilottitiimin kanssa ja sitä tarkennetaan ennen käyttöönottoa. Toiminto aktivoidaan feature-flageilla, ja se	ISO 10018

				voidaan poistaa käytöstä, jos se aiheuttaa epäselvyyttä.	
26	Roolit ja vastuut	Määrittele selkeästi, kuka on vastuussa, kuka hyväksyy, ketä on kuultava ja kenelle on tiedotettava kunkin tehtävän osalta, jotta vältetään epäselvyydet, puutteet ja koordinaatiovirheet.	DT tunnistaa, kuka suorittaa, kuka hyväksyy ja kuka valvoo kutakin toimenpidettä, mikä vähentää epäselvistä vastuista aiheutuvia virheitä.	Kun poikkeama havaitaan, DT näyttää automaattisesti vastuuhenkilön, hyväksyjän ja tiedotettavan tahon. Jokainen työnkulku sisältää selkeästi myös vuorojen ulkopuolisen eskaloitipolun.	EN ISO 9001
27	Turvallisuus-kulttuuri	Edistä organisatorista ympäristöä, jossa ihmiset kokevat psykologista turvallisuutta ilmoittaa poikkeamista, riskeistä tai huolenaiheista ilman pelkoa seuraamuksista. Proaktiivinen turvallisuuskulttuuri mahdollistaa riskien varhaisen havaitsemisen ja ehkäisee vakavia onnettomuuksia.	Tässä pyytämäsi suora ja selkeä suomennos leipätekstinä:	Kun operaattori raportoi ristiriitaisen mittausarvon, DT ohjaa asian kunnossapidon käsiteltäväksi. Läheltä piti -tilanteet kirjataan ilman yksilöiviä tietoja.	EN ISO 45001 .
3. TIETO JA	28 Osaamiseen perustuva koulutus	Tarjoo koulutusta, joka keskittyy todellisiin operatiivisiin taitoihin ja varmistaa, että kukin operaattori suorittaa vain sellaisia tehtäviä, joihin hän on päteväytynyt.	DT varmistaa, että jokaisella käyttäjällä on vaadittu koulutus ennen pääsyn sallimista kriittisiin tai edistyneisiin toimintoihin.	DT estää pääsyn edistyneisiin toimintoihin, kunnes se on varmistanut operaattorin voimassa olevan koulutuksen. Jos pätevyys on vanhentunut, edistyneet käyttöoikeudet poistetaan automaattisesti.	EN ISO 10015 EN ISO 10018

29	Digitaalisen kaksosen simulaatiokoulutus	Käytä digitaalista kaksosta turvallisena oppimisympäristönä, jossa voidaan harjoitella menettelyjä, ymmärtää prosesseja, ennakoita vikatilanteita ja kouluttaa toimintatapoja ilman, että operaattorit altistuvat todellisille riskeille.	DT tarjoaa simuloituja skenaarioita operatiivisten ja vikatilannemenettelyjen harjoitteluun, mikä vähentää virheitä todellisissa olosuhteissa.	Teknikko harjoittelee monimutkaiseen hälytykseen reagointia DT-simulaattorissa ilman vaikutusta tuotantoon. Kuukausittainen sähkökatkharjoitus suoritetaan ja kirjataan arviointia varten	EN ISO/IEC/IEEE 15288 IEEE 1730
30	Kyberturvallisuustie toisuus ja -koulutus	Kouluta työntekijöitä uhkista, haavoittuvuuksista ja hyvistä kyberturvallisuuskäytännöistä. Kyberturvallisuuskoulutus vähentää inhimillisiä virheitä, joita hyökkääjät voivat hyödyntää.	DT sisältää kontekstuaalisia muistutuksia ja koulutussisältöjä, jotka vahvistavat turvallisia toimintatapoja ja ehkäisevät tietämättömyydestä johtuvia riskialttiita toimintoja.	DT estää epäilyttävän tiedoston avaamisen ja näyttää tietoturvamuiutuksen. Se havaitsee myös luvattomat USB-laitteet ja ohjaa käyttäjää hyväksyntäprosessin läpi.	EN ISO/IEC 27001 EN ISO/IEC 27002 NIST SP 800-53 NIST SP 800-82 ENISA guidelines.
31	Käytettävyyden ja hälytysjärjestelmän elinkaaren koulutus	Kouluta operaattorit tulkitsemaan käyttöliittymiä, priorisoimaan hälytyksiä, ymmärtämään hälytysten merkityksiä, erottamaan eri vakavuustasot ja tekemään päätöksiä paineen alla ilman kognitiivista ylikuormitusta.	DT tarjoaa käytännön harjoituksia, joiden avulla käyttäjät voivat harjoitella hälytysten oikeaa tulkintaa ja priorisointia.	DT tarjoaa simulaatioita hälytysten priorisoinnin harjoitteluun. Kriittisen hälytyksen aikana se näyttää vaiheittaisen pikatoimintaoppaan.	IEC 62682 EN ISO 9241-11 EN ISO 9241-110
32	Tekninen kertauskoulutus ja pätevyyden arviointi	Päivitä osaamista säännöllisesti ja varmista pätevyydet määrällisten ja laadullisten indikaattorien avulla, jotta osaaminen säilyy ja virheet kriittisissä tilanteissa vähenevät.	DT havaitsee, milloin käyttäjä tarvitsee osaamisen kertauksen, ja ehdottaa päivitettyä koulutusta ennen kriittisten tehtävien suorittamista.	Jos käyttäjä ei ole käyttänyt tiettyä toimintoa kuukausiin, DT ehdottaa kertauskoulutusta. Ennen kriittisiä tehtäviä	EN ISO 10015

					järjestelmä pyytää lyhyen päivitys-mikro- oppitunnin suorittamista.	
--	--	--	--	--	--	--





Standardointi on olennaista DT-tekniikan ja ihmiskeskeisen digitaalisen kaksohen (HCDT) lähestymistavan turvalliselle ja tehokkaalle käyttöönnotolle. Standardointiorganisaatiot (ISO, IEC, CEN, CENELEC jne.) kehittävät parhaillaan viitekehysjä, jotka yhdenmukaistavat terminologiaa, arkkitehtuuria ja yhteentoimivuusvaatimuksia. Näin vähennetään pirstaleisuutta ja varmistetaan skaalautuvat ja turvalliset ekosysteemit. Digitaalinen kaksohen on monimutkainen digitaalinen järjestelmä. Alla on esitetty joukko standardeja, jäsenneltynä keskeisiin osa-alueisiin, jotka voivat olla sovellettavissa ihmiskeskeisen valmistuksen DT:n määrittelyyn, suunnitteluun, validointiin ja käyttöönnottoon.

ISO 23247 ja ISO 9241-210/110 muodostavat virallisen käsitteellisen perustan DT:n suunnittelulle ihmiskeskeisissä valmistusympäristöissä. Yhdessä ne luovat arkkitehtoniset, ergonomiset ja ihmisen ja järjestelmän vuorovaikutusta koskevat periaatteet, joiden avulla DT-ratkaisut ovat paitsi teknisesti yhteentoimivia myös käytettäviä, turvallisia ja johdonmukaisesti ihmisen kyvykkyyksien ja tarpeiden mukaisia koko niiden elinkaaren ajan.

1. Digital Twin for manufacturing
ISO 23247-1:2021 Automaatiojärjestelmät ja integraatio — Digitaalisen kaksohen viitekehys valmistukselle — Osa 1: Yleiskuva ja yleiset periaatteet
ISO 23247-2:2021 Automaatiojärjestelmät ja integraatio — Digitaalisen kaksohen viitekehys valmistukselle — Osa 2: Viitearkkitehtuuri
ISO 23247-3:2021 Automaatiojärjestelmät ja integraatio — Digitaalisen kaksohen viitekehys valmistukselle — Osa 3: Valmistuselementtien digitaalinen esitys
ISO 23247-4:2021 Automaatiojärjestelmät ja integraatio — Digitaalisen kaksohen viitekehys valmistukselle — Osa 4: Tiedonvaihto
ISO/FDIS 23247-5 (<i>Final Draft International Standard — valmisteilla</i>) Automaatiojärjestelmät ja integraatio — Digitaalisen kaksohen viitekehys valmistukselle — Osa 5: Digitaalinen lanka digitaalista kaksosta varten (valmisteilla)
ISO/DIS 23247-6 (<i>Draft International Standard — valmisteilla</i>) Automaatiojärjestelmät ja integraatio — Digitaalisen kaksohen viitekehys valmistukselle — Osa 6: Digitaalisen kaksohen koostaminen (valmisteilla)

ISO/TR 23247-100:2025

Automaatiojärjestelmät ja integraatio — Digitaalisen kaksosen viitekehys valmistukselle — Osa 100: Käyttötapaus puolijohdeainoksen kasvuprosessin hallinnasta

ISO/DTR 23247-101 (*Draft Technical Report — valmisteilla*)

Automaatiojärjestelmät ja integraatio — Digitaalisen kaksosen viitekehys valmistukselle — Osa 101: Käyttötapaus robottipohjaisten monikerros- ja monipalkoisten kaasusuojattujen metallikaarhitsuusprosessien hallinnasta (valmisteilla)

ISO/IEC 20924:2024

Esineiden internet (IoT) ja digitaalinen kaksonen — Sanasto

ISO/IEC 30173:2023

Digitaalinen kaksonen — Käsitteet ja terminologia

ISO/IEC 30188 (*vuosiluku riippuu lopullisesta julkaisusta*)

Digitaalinen kaksonen — Viitearkkitehtuuri

2. HCD, HF ja ergonomia

EN 16710-2:2016

Ergonomiamenetelmät — Osa 2: Työn analyysin menetelmä suunnittelun tueksi

EN ISO 6385:2016

Ergonomiset periaatteet työjärjestelmien suunnittelussa

EN ISO 9241-11

Ihmisen ja järjestelmän vuorovaikutuksen ergonomia — Osa 11: Käytettävyys: Määritelmät ja käsitteet

EN ISO 9241-110:2020

Ihmisen ja järjestelmän vuorovaikutuksen ergonomia — Osa 110: Vuorovaikutuksen periaatteet

EN ISO 9241-210:2019

Ihmisen ja järjestelmän vuorovaikutuksen ergonomia — Osa 210: Ihmiskeskeinen suunnittelu vuorovaikutteisille järjestelmille

EN ISO 10075-1:2017

Mielenterveyden kuormitukseen liittyvät ergonomiset periaatteet — Osa 1: Yleiset kysymykset sekä käsitteet, termit ja määritelmät

<p>EN ISO 11064-1:2000 Valvomokeskusten ergonominen suunnittelu — Osa 1: Valvomokeskusten suunnittelun periaatteet</p>
<p>EN ISO 26800:2011 Ergonomia — Yleinen lähestymistapa, periaatteet ja käsitteet</p>
<p>IEEE 7000-2021 IEEE-standardin mukainen malliprosessi järjestelmän suunnitteluun liittyvien eettisten huolenaiheiden käsittelemiseksi</p>
<p>IEEE 7010-2020 IEEE-suositeltu käytäntö autonomisten ja älykkäiden järjestelmien vaikutusten arviointiin ihmisen hyvinvointiin</p>
<p>ISO 6385:2016 Ergonomiset periaatteet työjärjestelmien suunnittelussa</p>
<p>ISO 11228-1:2021 Ergonomia — Manuaalinen käsittely — Osa 1: Nostaminen, laskeminen ja kantaminen</p>
<p>ISO 27500:2016 Ihmiskeskeinen organisaatio — Perustelut ja yleiset periaatteet</p>
<p>ISO 27501:2019 Ihmiskeskeinen organisaatio — Ohjeet johdolle</p>
<p>ISO 31700-1:2023 Kuluttajansuoja — Tietosuoja sisäänrakennettuna kulutustavaroissa ja -palveluissa — Osa 1: Yleiset vaatimukset</p>
<p>ISO/TR 22100-3:2016 Koneiden turvallisuus — Suhde standardiin ISO 12100 — Osa 3: Ergonomisten periaatteiden toteuttaminen turvallisuusstandardeissa</p>

3. Turvallisuus

<p>EN IEC 62061:2021 Koneiden turvallisuus — Turvallisuuteen liittyvien ohjausjärjestelmien toiminnallinen turvallisuus</p>
<p>EN 61508-1:2010 Sähköisten/elektronisten/ohjelmoitavien elektronisten turvallisuuteen liittyvien järjestelmien toiminnallinen turvallisuus — Osa 1: Yleiset vaatimukset</p>
<p>EN 61508-2:2010 Sähköisten/elektronisten/ohjelmoitavien elektronisten turvallisuuteen liittyvien järjestelmien</p>

<p>toiminnallinen turvallisuus — Osa 2: Vaatimukset sähköisille/elektronisille/ohjelmoitaville elektronisille turvallisuusjärjestelmille</p>
<p>EN 61508-3:2010 Sähköisten/elektronisten/ohjelmoitavien elektronisten turvallisuuteen liittyvien järjestelmien toiminnallinen turvallisuus — Osa 3: Ohjelmistovaatimukset</p>
<p>EN IEC/IEEE 82079-1:2020 Käyttöä koskevan tiedon (käyttöohjeiden) laadinta tuotteille — Osa 1: Periaatteet ja yleiset vaatimukset</p>
<p>EN ISO 3864-1:2011 Graafiset symbolit — Turvallisuusvärit ja turvallisuusmerkit — Osa 1: Turvallisuusmerkkien ja turvallisuusmerkintöjen suunnitteluperiaatteet</p>
<p>EN ISO 7010:2020 Graafiset symbolit — Turvallisuusvärit ja turvallisuusmerkit — Rekisteröidyt turvallisuusmerkit</p>
<p>EN ISO 10218-1:2011 Robottiikka — Turvallisuusvaatimukset — Osa 1: Teollisuusrobotit</p>
<p>EN ISO 10218-2:2025 Robottiikka — Turvallisuusvaatimukset — Osa 2: Robottisovellukset ja robottisolut</p>
<p>EN ISO 12100:2010 Koneiden turvallisuus — Suunnittelun yleiset periaatteet — Riskin arviointi ja riskin pienentäminen</p>
<p>EN ISO 13849-1:2023 Koneiden turvallisuus — Ohjausjärjestelmien turvallisuuteen liittyvät osat — Osa 1: Suunnittelun yleiset periaatteet</p>
<p>EN ISO 13855:2025 Koneiden turvallisuus — Suojalaitteiden sijoittaminen suhteessa ihmiskehon lähestymiseen</p>
<p>EN ISO 13857:2019 Koneiden turvallisuus — Turvaetäisyydet vaaravyöhykkeiden saavuttamisen estämiseksi ylä- ja alaraajoilla</p>
<p>EN ISO 14120:2015 Koneiden turvallisuus — Suojukset — Kiinteiden ja liikkuvien suojusten suunnittelun ja rakenteen yleiset vaatimukset</p>
<p>EN ISO 20607:2019 Koneiden turvallisuus — Käyttöohjekirja — Yleiset laadintaperiaatteet</p>
<p>ISO/IEC TR 24028:2020 Tietotekniikka — Tekoäly — Tekoälyn luotettavuuden yleiskatsaus</p>

ISO/TS 15066:2016
 Robotit ja robottijärjestelmät — Yhteistoimintarobotit

4. Tietoturva

IEC TS 62443-1-1:2009
 Teolliset tietoliikenneverkot — Verkkojen ja järjestelmien turvallisuus — Osa 1-1:
 Terminologia, käsitteet ja mallit

IEEE 1730-2022
 IEEE Recommended Practice for Distributed Simulation Engineering and Execution Process
 (DSEEP)

IEEE 7003-2024
 IEEE Standard for Algorithmic Bias Considerations

EN IEC 62682:2023
 Prosessiteollisuuden hälytysjärjestelmien hallinta

EN IEC 62832-1:2020
 Teollisuusprosessien mittaaminen, ohjaus ja automaatio — Digitaalisen tehtaan viitekehys — Osa 1:
 Yleiset periaatteet

EN ISO/IEC 22989:2023
 Tietotekniikka — Tekoäly — Käsitteet ja terminologia

EN ISO/IEC 27001:2023
 Tietoturva, kyberturvallisuus ja yksityisyyden suoja — Tietoturvallisuuden hallintajärjestelmät
 — Vaatimukset

EN ISO/IEC 27002:2022
 Tietoturva, kyberturvallisuus ja yksityisyyden suoja — Tietoturvallisuuden ohjaukseen

EN ISO/IEC 27018:2020
 Tietotekniikka — Turvallisuustekniikat — Käytäntöohjeet henkilötietojen (PII) suojaamisesta
 julkisissa pilvipalveluissa PII-käsittelijöinä toimiville palveluntarjoajille

EN ISO/IEC 27701:2021
 Turvallisuustekniikat — Laajennus standardeihin ISO/IEC 27001 ja ISO/IEC 27002
 yksityisyydensuojan hallintaan — Vaatimukset ja ohjeet

EN ISO/IEC 29100:2020
 Tietotekniikka — Turvallisuustekniikat — Tietosuojakehys

NIST SP 800-52 Rev. 2 (2019)
Guidelines for the Selection, Configuration, and Use of Transport Layer Security (TLS) Implementations

NIST SP 800-53 Rev. 5 (2020)
Security and Privacy Controls for Information Systems and Organizations

NIST SP 800-82 Rev. 3 (2023)
Guide to Operational Technology (OT) Security

NIST SP 800-125 (2011)
Guide to Security for Full Virtualization Technologies

NIST SP 800-207 (2020)
Zero Trust Architecture

ANSI/ISA-18.2-2016
Process Industries — Management of Alarm Systems

5. Riskien hallinta

ISO 31000:2018
Riskienhallinta — Ohjeet

EN 31010:2010
Riskienhallinta — Riskinarviointimenetelmät

EN ISO 22301:2019
Turvallisuus ja resilienssi — Toiminnan jatkuvuuden hallintajärjestelmät — Vaatimukset

NIST SP 800-34 Rev. 1:2010
Contingency Planning Guide for Federal Information Systems

EN ISO 9001:2015/A1:2024
Laadunhallintajärjestelmät — Vaatimukset

ISO 10018:2020
Laadunhallinta — Ohjeet henkilöstön sitouttamiseen

ISO/IEC/IEEE 15288:2023
Järjestelmä- ja ohjelmistotekniikka — Järjestelmän elinkaari prosessit

ISO/IEC 20000-1:2018
Tietotekniikka — Palvelunhallinta — Osa 1: Palvelunhallintajärjestelmän vaatimukset

EN ISO 45001:2023

Työterveys- ja työturvallisuusjohtamisjärjestelmät — Vaatimukset ja ohjeita soveltamiseen

6. Other

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2016/679, annettu 27 päivänä huhtikuuta 2016, luonnollisten henkilöiden suojelusta henkilötietojen käsittelyssä sekä näiden tietojen vapaasta liikkuvuudesta ja direktiivin 95/46/EY kumoamisesta (yleinen tietosuoja-asetus, GDPR)

ENISA Guidelines

ENISA-ohjeistukset (European Union Agency for Cybersecurity)

Saatavilla: <https://www.enisa.europa.eu/publications>



