

Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja • Yritykset • 2025:17

Suomen kvanttiteknologia- strategia 2025–2035

Suomen uusi kasvun moottori ja kestävä
tulevaisuuden rakentaja



Työ- ja elinkeinoministeriö
Arbets- och näringsministeriet

Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2025:17

Suomen kvanttiteknologia- strategia 2025–2035

Suomen uusi kasvun moottori ja kestävän
tulevaisuuden rakentaja

Kvanttiteknologiastrategiaa valmisteleva työryhmä

Työ- ja elinkeinoministeriö Helsinki 2025

Julkaisujen jakelu

Distribution av publikationer

**Valtioneuvoston
julkaisuarkisto Valto**

Publikations-
arkivet Valto

julkaisut.valtioneuvosto.fi

Työ- ja elinkeinoministeriö

CC BY-SA 4.0

ISBN pdf: 978-952-327-628-4

ISSN pdf: 1797-3562

Taitto: Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto

Helsinki 2025

Suomen kvanttiteknologiastrategia 2025–2035

Suomen uusi kasvun moottori ja kestävä tulevaisuuden rakentaja

Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2025:17**Julkaisija**

Työ- ja elinkeinoministeriö

Teema

Yritykset

Yhteisötekijä

Kvanttiteknologiastrategiaa valmisteleva työryhmä

Kieli

suomi

Sivumäärä

53

Tiivistelmä

Kvanttiteknologioiden kehityksen odotetaan mahdollistavan huomattavia kehitysaskelia mm. laskentatehossa, mittaamisessa ja tietoliikenteessä. Vaikutukset elinkeinoelämän eri alueilla sekä laajasti yhteiskunnassa voivat olla merkittäviä ja mahdollistaa uutta, kansainvälisesti kilpailukykyistä liiketoimintaa.

Suomessa on vahvaa osaamista, jota hyödyntäen Suomella on mahdollisuus olla maailman kärkijoukoissa kehittämässä kvanttiteknologioita ja niihin perustuvia sovelluksia. Pääministeri Orpon hallitus on sitoutunut turvaamaan edellytykset kvanttilaskennan laaja-alaiseen kehittämiseen ja hyödyntämiseen. Hallituksen tavoitteita tukien työ- ja elinkeinoministeriö asetti työryhmän kaudelle 1.5.2024–14.3.2025 valmistelemaan ehdotuksen kvanttiteknologiastrategiaksi.

Strategia asettaa kunnianhimoiset tavoitteet kehitettävän liiketoiminnan kasvulle ja Suomen menestymiselle kansainvälisessä kilpailussa investoinneista, yrityksistä ja osaajista. Tavoitteiden toteutumista tukevat tärkeimmät toimenpidekokonaisuudet ovat maailman kärkiluokan kvanttilaskenta- ja kvanttilaitteiden kehitystä tukeva infrastruktuuri, osaamisen vahvistaminen, pitkäjänteinen TKI-ohjelma, yritysten globaalien kasvun rahoitus sekä kansainvälinen yhteistyö. Strategia pyrkii varmistamaan, että Suomi ottaa johtavan roolin kvanttiteknologian kehittämisessä ja hyödyntämisessä vastuullisesti.

Sivua 51 on päivitetty 28.4.2025 ja aineisto korvaa aikaisemmin, 24.4.2025 julkaistun version.

Asiasanat

kvanttietokoneet, kvanttilaskenta, kvanttimekaniikka, tutkimus- ja kehittämistoiminta, innovaatiot, teknologiapolitiikka, innovaatiopolitiikka, yritykset

ISBN PDF

978-952-327-628-4

ISSN PDF

1797-3562

Julkaisun osoite<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-628-4>

Finland's kvantteknologistrategin 2025–2035 Finlands nya motor för tillväxt och byggare för en hållbar framtid

Arbets- och näringsministeriets publikationer 2025:17	Tema	Företag
Utgivare	Arbets- och näringsministeriet	
Utarbetad av	Arbetsgrupp för beredning av kvantteknikstrategin	
Språk	finska	Sidantal 53

Referat

Kvantteknikens utveckling förväntas möjliggöra betydande utvecklingssteg bl.a. inom datorkapacitet, mätning och datakommunikation. Effekterna inom näringslivets olika branscher och i samhället i allmänhet kan bli betydande och möjliggöra ny, internationellt konkurrenskraftig affärsverksamhet.

Finland har gedigen kompetens på området och en möjlighet att gå i täten för utvecklingen av kvantteknik och applikationer som bygger på den. Statsminister Orpos regering har förbundit sig att trygga förutsättningarna för en branschövergripande utveckling och användning av kvantberäkning. För att bereda ett förslag till en strategi för kvantteknik tillsatte arbets- och näringsministeriet en arbetsgrupp för perioden 1.5.2024–14.3.2025.

Strategin ställer upp ambitiösa mål för att utveckla ny affärsverksamhet och för att Finland ska vara framgångsrikt i den internationella konkurrensen om investeringar, företag och experter. De viktigaste åtgärdsområdena är att skapa en kvantberäkningsmiljö i världsklass, bygga infrastruktur som stöder utvecklingen av kvantenheter, stärka kompetensen, göra upp ett långsiktigt FoUI-program, säkerställa finansiering till företag för global tillväxt samt internationellt samarbete. Strategin mål är att säkerställa en ledande roll för Finland i utvecklingen och ett ansvarsfullt utnyttjande av kvanttekniken.

Sidan 51 har uppdaterats 28.4.2025, och materialet ersätter den version som publicerats 24.4.2025.

Nyckelord kvantdatorer, kvantberäkning, kvantmekanik, forsknings- och utvecklingsverksamhet, innovationer, teknologipolitik, innovationspolitik, företag

ISBN PDF 978-952-327-628-4 **ISSN PDF** 1797-3562

URN-adress <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-628-4>

Finland's Quantum Technology Strategy 2025–2035

A new engine of growth and builder for a sustainable future

Publications of the Ministry of Economic Affairs and Employment 2025:17	Subject	Enterprises
Publisher	Ministry of Economic Affairs and Employment of Finland	

Group author	Working group for the preparation of a quantum technology strategy		
Language	Finnish	Pages	53

Abstract

The development of quantum technologies is expected to enable considerable advances in computing power, measurement and telecommunications, for example. The impacts on different areas of business and society could be significant and contribute to new, internationally competitive business.

By utilising its strong expertise, Finland could become one of the top countries in the development of quantum technologies and their applications. The Government of Prime Minister Orpo is committed to supporting the broad-based development and use of quantum computing. The Ministry of Economic Affairs and Employment appointed a working group for the term of 1 May 2024–14 March 2025 to prepare a proposal for a quantum technology strategy.

The strategy sets ambitious targets for the growth of quantum business and Finland's success in attracting international investments, companies and experts. The strategy outlines key measures for Finland to achieve the objectives, including the creation of the world's leading environment for quantum computing, an infrastructure supporting the development of quantum devices, strengthening of skills and competence, a long-term RDI programme, funding for supporting global growth of companies, and international cooperation. The strategy aims to ensure that Finland can take a prominent role in the development and use of quantum technology in a responsible manner.

Page 51 were updated on 28 April 2025 and this version replaces the previous one published on 24 April 2025.

Keywords quantum computer, quantum computing, quantum mechanics, research and innovation, innovations, technology policy, innovation policy, companies

ISBN PDF	978-952-327-628-4	ISSN PDF	1797-3562
-----------------	-------------------	-----------------	-----------

URN address <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-628-4>

Sisältö

Esipuhe	7
1 Tausta	9
2 Johdanto	11
3 Tilannekuva – Suomi alan pioneeri ja haluttu yhteistyökumppani	14
3.1 Suomessa on maan kokoon nähden merkittävä kvanttiteknologia-ala	14
3.2 Kansainvälisessä kilpailussa pienellä maalla on omat vaikeutensa	19
3.3 Suomen on tunnistettava ja hyödynnettävä mahdollisuutensa	22
4 Visio 2035 ja tavoitteet – Kilpailukykyisesti kasvava, osaava ja luotettava Kvantti-Suomi	26
5 Ehdotetut toimenpiteet vuosien 2025–2030 tavoitteiden toteuttamiseksi	32
5.1 Kvanttiosaamiskeskus	33
5.2 Maailman kärkiluokan laskentainfrastruktuuri mahdollistaa kvanttilaskennan tehokkaan käytön ja ohjelmistokehityksen.....	35
5.3 Kilpailukykyinen infrastruktuuri kvanttilaitteiden ja -komponenttien kehityksen tukena.....	37
5.4 Kvanttiturvallisten salausmenetelmien käyttöönotto.....	38
5.5 Pitkäjänteinen kvanttialan TKI-ohjelma	41
5.6 Yritysten globaalin kasvun rahoitus ja tuki	44
5.7 Kansainvälinen yhteistyö sekä EU- ja kansainvälinen vaikuttaminen.....	46
5.8 Kansallinen koordinaatio, ennakointi, seuranta ja edunvalvonta.....	48
Liitteet	51
Liite 1. Julkiset panostukset Suomen kvanttiteknologia-alalle	51
Liite 2. Tausta-aineistoa aiheesta	53

ESIPUHE

Suomi on tullut tunnetuksi innovaatiokyvystään ja vahvasta osaamisestaan teknologian saralla. Meillä on monta esimerkkiä historiasta, jossa olemme tunnistaneeet uuden trendin aikaisessa vaiheessa ja ennakkoluulottomasti hypänneet mukaan uuden kehittämiseen.

Nyt meillä on taas tilaisuus olla maailman kärkijoukoissa uudessa teknologisessa murroksessa: kvanttiteknologiassa. Kvanttiteknologia tarjoaa lupauksen tehdä mahdollista mahdollista. Kvanttiteknologia lupaa ennennäkemätöntä hyppäystä laskentatehon kasvussa, tietoliikenteen turvallisuudessa sekä anturien kyvyssä mitata fysikaalisia suureita.

Näitä teknologisia kyvykkyksiä voidaan hyödyntää ratkaisujen kehittämisessä moniin globaaleihin haasteisiin. Esimerkiksi materiaalien suunnittelu (mm. uudet akkumateriaalit), lääkekehitys, ilmastonmuutoksen mallinnus ja ympäristön seuranta voivat olla alueita, joissa tullaan ottamaan harppauksia eteenpäin. Kvanttiteknologia voi myös vahvistaa Suomen kansallista turvallisuutta useilla tavoin sekä kyberturvallisuuden että puolustuksen saralla.

Suomen kvanttiteknologiastrategian tekeminen on ollut koko työryhmälle suuri ilo ja kunnia. Olemme tehneet tätä työtä koska uskomme, että Suomen tulee ottaa johtava rooli kvanttiteknologian kehittämisessä ja hyödyntämisessä. Samalla haluamme varmistaa, että kvanttiteknologiaa kehitetään ja käytetään vastuullisesti ja eettisesti. Haluan lämpimästi kiittää kaikkia työhömmme osallistuneita erinomaisesta ja innostuneesta työstä.

Kvanttiteknologia on yksi Suomen tulevaisuuden teollisuudenaloista. Meillä on kaikki edellytykset olla maailman johtavia maita tällä alalla. Olemme tiettyssä mielessä juuri nyt taitekohdassa: olemme päässeet erittäin vahvaan asemaan

kehityksen alkuvaiheessa mutta nyt panostuksien pitää kasvaa, jos haluamme olla jatkossakin hyötymässä tästä teknologiasta. Me uskomme, että nyt on aika asettaa kunnianhimoiset tavoitteet myös tulevaisuudelle ja jatkaa vahvoja panostuksia kvanttiteknologian tutkimukseen, kehittämiseen, osaamiseen, kaupallistamiseen ja sen hyödyntämiseen. Näin voimme luoda uutta kestäväää kasvua Suomelle ja koko maailmalle.

Työryhmän puheenjohtaja Antti Vasara
Toimitusjohtaja, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
huhtikuu 2025

1 Tausta

Hallitusohjelmassa kvanttilaskenta on tunnistettu yhdeksi avainteknologiosta, joiden tehokas hyödyntäminen luo uutta liiketoimintaa ja tukee yritysten kilpailukykyä. Hallitus on sitoutunut turvaamaan edellytykset kvanttilaskennan laajalaiseen hyödyntämiseen ja kehittämiseen. Nykyinen hallitus on päättänyt investoida kvanttietokoneen kehitykseen ja mm. Kvanttinovan kautta tapahtuvaan puolijohdeteknologian kehittämiseen.

Hallitusohjelman tavoitetta tukien työ- ja elinkeinoministeriö asetti työryhmän kaudelle 1.5.2024–14.3.2025 valmistelemaan ehdotuksen kvanttiteknologiastrategiaksi. Päämääränä on, että Suomeen syntyy merkittävä uusi teollisuudenala ja Suomi menestyy kansainvälisessä kilpailussa investoinneista, yrityksistä ja osaajista sekä kytkeytyy merkittävässä roolissa kansainväliseen tutkimus-, kehittämis- ja innovaatio (TKI)-yhteistyöhön. Strategiaehdotuksessa on esitetty visio ja tavoitteet Suomen kvanttiekosysteemin osaamisen, liiketoiminnan ja kilpailukyvyyn kehittämiseksi sekä toimenpiteet ja suuntaviivat Suomen kvanttiekosysteemin edelläkävijyyden tukemiseksi ja kvanttiteknologioiden hyödyntämiseksi elinkeinojen uudistamisessa.

Työryhmän puheenjohtajana on toiminut VTT:n toimitusjohtaja Antti Vasara ja varapuheenjohtajana teollisuusneuvos Maija Lönnqvist työ- ja elinkeinoministeriöstä. Työryhmän jäsenet: johtava asiantuntija Kaisa Kopra, LVM; Opetusneuvos Laura Taajamaa, OKM; Erityisasiantuntija Kalle Piirainen, PLM; Johtava asiantuntija Hanna-Miina Sihvonen, SM; Erityisasiantuntija Henri Loukusa, UM; Apulaiskyberturvallisuusjohtaja Stefan Lee (31.12.2024 saakka)/kyberturvallisuusjohtaja Rauli Paananen (1.1.–14.3.2025), Valtion kyberturvallisuusjohtajan toimisto; Head of Quantum Computing Campaign Outi Keski-Äijö, Business Finland; Johtava tiedeasiantuntija Anna Kalliomäki (31.12.2024 saakka)/johtaja Jussi Vauhkonen (1.1.–14.3.2025), Suomen Akatemia; Kvanttilippulaivan johtaja Peter Liljeröth, Aalto-yliopisto; Kehityspäällikkö Mikael Johansson, CSC – Tieteen tietotekniikan keskus Oy; Tutkimuspäällikkö Pekka Pursula, Teknologian tutkimuskeskus VTT; Head of External Relations Elsi-Mari Borrelli, Algorithmiq Oy; Government Relations Manager Milja Kalliosaari, IQM Oy; Chief Science Officer Janne Lehtinen, SemiQon Technologies Oy ja päällikkö, Ville Peltola, Teknologiateollisuus ry. Työryhmän sihteeristönä toimi työ- ja elinkeinoministeriöstä johtava asiantuntija Teija Palko ja

neuvotteleva virkamies Martti Myllylä, VTT:ltä Manager Relations, Microelectronics and Quantum, Jenny Hasu sekä työryhmän kutsumana Aalto-yliopistosta vanhempi akateeminen koordinaattori Minna Günes.

Strategian tilannekuvaa, visiota, tavoitteita ja toimenpiteitä on valmisteltu neljässä alatyöryhmässä: osaaminen, mahdollistajat, ekosysteemin kasvu sekä geopolitiikka ja turvallisuus. Alatyöryhmiin on osallistunut myös työryhmän ulkopuolisia henkilöitä.

Sidosryhmien näkemyksiä strategian valmisteluun on pyydetty valmistelun eri vaiheissa. Loppukäyttäjien kokemuksia ja näkemyksiä kerättiin 27.9.2024 järjestetyssä tilaisuudessa. Alaryhmien alustaviin visioihin, tavoitteisiin ja toimenpiteisiin pyydettiin sidosryhmien näkemyksiä 31.10.2024 järjestetyssä tilaisuudessa. Strategialuonnos oli lausuntokierroksella 6.2.–21.2.2024. Lausuntoja kertyi yhteensä yli 30 toimijalta.

2 Johdanto

Kvanttitekniikat hyödyntävät nanomittakaavassa tai äärimmäisen matalissa lämpötiloissa havaittavia kvantti-ilmiöitä, sekä kykyä hallita niitä. Kvanttitekniikat tarjoavat huomattavan harppauksen kyvyssämme ymmärtää ja hyödyntää maailmankaikkeuden perustana toimivaa käsitemaailmaa. Kvanttitekniikoiden odotetaan mahdollistavan suuria kehitysaskelia esimerkiksi tietojenkäsittelyssä, mittaamisessa ja viestinnässä, ja sitä kautta niillä voi olla merkittäviä vaikutuksia eri teollisuudenaloilla sekä yhteiskunnassa laajemmin. Tämän vuoksi EU, USA ja useat muut maat ovat määritelleet kvanttitekniikat taloudellisen turvallisuuden kannalta kriittisiksi tekniikoihin.

Maailmanlaajuisesti kvanttitekniikoihin panostetaan merkittäviä määriä resursseja. Valtaosa teknologisesti kehittyneistä valtioista sekä suuret globaalit yritykset ovat kehittämässä kvanttitekniikoihin perustuvia ratkaisuja, mikä osoittaa vahvaa luottamusta alan potentiaaliseen vaikutukseen jo lähitulevaisuudessa. Erityisesti Suomen kaltaisissa pienissä mutta innovatiivisissa maissa, joissa huippututkimuksen ja vahvan teollisuusperustan synergia voi edistää kansallista kehitystä ja globaalia johtoasemaa uusien huipputekniikoiden aloilla, kvanttitekniikat ja niiden hyödyntäminen voi tuoda merkittävää kasvua ja kilpailukykyä.

Kvantti-ilmiöt ja -ominaisuudet mahdollistavat uusia kyvykkyyksiä kolmella tekniikka-alueella:

Kvanttilaskenta (quantum computing): Kvanttilaskenta on tietojenkäsittelyn ala, joka hyödyntää kykyä ohjata ja hallita kvanttimekaanisia ilmiöitä. Kvanttitietokoneissa hyödynnetään eri tekniikoihin, kuten suprajohtavuutta, fotonikkaa, puolijohteita, ioniloukkuja tai neutraaleja atomeja. Kvanttilaskennan kehittäminen vaatii paitsi uudenlaista tekniikkaa, myös täysin uuden ohjelmistoarkkitehtuurin. Kvanttitietokoneissa informaatiota käsitellään kvanttibittien, kubittien, avulla, joiden todellinen tila on tiettyjen todennäköisyyksien summa, ei siis binäärisesti vain 1 tai 0. Tämän vuoksi eri tekniikoihin alustoihin nojaavien kvanttitietokoneiden informaation käsittelyyn tarvitaan kyseiseen tekniikka-arkkitehtuuriin soveltuva ei-binääristä (eli ei-klassista) konekieltä.

Kvanttilaskennan ennakoitaan mahdollistavan jopa monituhattukertaisen ja erikoistuneen laskentatehon nykyisiin supertietokoneisiin verrattuna ja sillä voidaan saavuttaa läpimurtoja eri aloilla, kuten logistiikassa, energia- ja kemianteollisuudessa,

rahoitusosalalla sekä ilmailussa. Erityisesti kvanttietokoneille soveltuvia ongelmia ovat molekyyli- ja materiaalimallinnus sekä erilaiset optimointiongelmat. Koneoppimisessa kvanttilaskenta tehostaa suurten opetusaineistojen käsittelyä. Kvanttisimulointi voi nopeuttaa uusien materiaalien ja lääkkeiden kehitystä tehostamalla potentiaalisten lähtömolekyylien tunnistamista. Kvanttilaskenta voi auttaa kehittämään ratkaisuja suuriin yhteiskunnallisiin haasteisiin, esim. terveydenhuollossa, energiantuotannossa ja ilmastomuutoksen tutkimuksessa.

Kvanttihiljyyttä, eli kvanttilaskennan suurempaa tehoa suhteessa klassisen laskennan tehoon, ei ole kuitenkaan vielä osoitettu millään sovellusalueella. Jotta kvanttilaskennan koko potentiaali murrosteknologiana voi toteutua, keskeisin haaste – skaalautuva virheenkorjaus – on ratkaistava. Kvanttietokoneet ovat yhä kehitysvaiheessa, ja niiden herkkyyks ympäristön häiriöille aiheuttaa virheitä laskennassa, mikä vaatii tehokkaita ratkaisuja luotettavan toiminnan takaamiseksi. Teknologia on kuitenkin edennyt merkittävästi, ja ensimmäisen konkreettisen kvanttilaskennan odotetaan toteutuvan lähivuosina. Tämän mahdollistaa virheentorjennysalgoritmit, jotka vähentävät kvanttijärjestelmien virheiden vaikutuksia perinteistä suurteholaskentaa hyödyntämällä. Tällainen hybridilähestymistapa avaa tien kvanttilaskennan ensimmäisiin käytännön sovelluksiin ja antaa mahdollisuuden ratkaista ongelmia, jotka ovat perinteisille laskentamenetelmille ylivoimaisia.

Kvanttilaskennan kaupalliset sovellukset seuraavat osoitettua kvanttilaskennan nopeasti. Odotettavissa on, että ensimmäiset rajatut kaupalliset sovellukset syntyvät seuraavan viiden vuoden aikana niillä sovellusalueilla, joissa kvanttilaskenta voidaan ensimmäisenä osoittaa. Kaupallinen sovellettavuus laajenee uusille sovelluksille sitä mukaa kun laitteisto- ja ohjelmistoteknologia kehittyy. Kvanttilaskennan sovellusten odotetaan moninkertaistuvan virheenkorjatun kvanttietokoneen kehittämisen myötä noin 10 vuoden aikajännteellä.

Kvanttihavainnointi (quantum sensing) ja -mittaus (quantum metrology):

Kvanttitekniikoihin perustuvien antureiden ennakoitua mahdollistavan jopa kiertoluokkia nykyteknologioita suurempaa tarkkuutta fyysikaalisten suureiden, kuten esimerkiksi heikkojen magneetti- ja sähkökenttien, lämpötilan, paineen ja kemiallisen koostumuksen mittaamiseen. Näitä ominaisuuksia voidaan hyödyntää monitorointi-, kuvantamis-, navigointi- ja tunnistuskäyttöön. Sovellusalueet ulottuvat perinteisestä valmistavasta teollisuudesta, ilmailu- ja puolustusteollisuuteen, mikroelektroniikka- ja puolijohdeteollisuudesta ympäristön monitorointiin. Tunnettuja kvanttimittaussovelluksia ovat atomikellot, magnetometrit, gravimetrit, interferometrit, lämpömittarit, kemialliset sensorit sekä erilaiset lääketieteelliset kuvantamislaitteet. Mikroelektroniikkaan perustuvien teknologioiden kanssa kvanttihavainnointia voidaan hyödyntää esimerkiksi sirusuunnittelussa ja tuotantoprosessien laadunvarmistuksessa.

Kvanttaviestintä (Quantum communication): Kvanttaviestinnässä hyödynnetään kvanttifysiikan lakeja erittäin turvallisen tiedonsiirron mahdollistamiseksi. Kvanttiavaintenjako (Quantum Key Distribution, QKD) esimerkiksi mahdollistaa viestintäkanavan salakuunteluyritysten havaitsemisen, mikä turvaa rahaliikennettä, sotilasviestintää ja suojaa henkilötietoja. Kvanttaviestintä luo pohjan myös maailmanlaajuiselle kvanttietokoneiden tai kvanttiantureiden hajautetulle viestintäverkolle, kvantti-internetille. Tämä kietoutuu yhteen kvanttilaskennan ja kvanttihavainnoinnin kanssa – näiden alueiden sovellukset tehostuvat entisestään hajautetun kvanttiverkon kautta. Kvantti-internet mahdollistaa esimerkiksi rinnakkaistetun kvanttilaskennan myötä vielä laajempien laskennallisten ongelmien ratkaisun kuin yksittäisillä kvanttietokoneilla. Kvanttiantureiden liittäminen yhteen kvantti-internetin kautta voi avata mullistavia sovelluksia laajan, hajautetun kvantti-anturiverkon tarkkuusmittauksille.

Investointikohteena kvanttilaskenta (kvanttietokoneet, algoritmit, ohjelmistot) on suurin alue maailmanlaajuisesti. Vuonna 2023 alan startupien \$ 1,4 miljardin investoinneista yli 90 prosenttia kohdistui kvanttilaskentaan¹. Liiketoimintapotentiaalin arvioidaan olevan suurinta myös kvanttilaskennassa. Vuonna 2035 kvanttitekniologioiden markkinan on arvioitu olevan \$ 40 mrd – \$ 90 mrd, mistä kvanttilaskennan osuus 70–80 prosenttia. Kvanttilaskennan arvoketjun sisällä investoinneista suurin osa kohdistuu laitteistojen kehitykseen ja reilu viidennes ohjelmistoihin ja palveluihin. Teknologian kypsyessä ohjelmistojen ja palvelujen osuus tulee kasvamaan.

Suurin taloudellinen hyöty tulee kvanttilaskennan sovellusten tuottamien liikevaihdon kasvun ja kustannussäästöjen kautta. Vuonna 2035 kvanttilaskennan potentiaalinen taloudellinen hyöty kemianteollisuudessa, biotieteissä, rahoituksessa sekä logistiikassa arvioidaan olevan 20–30 kertainen kvanttilaskennan liikevaihtoon nähden.

Kvanttihavainnointi- ja mittausteknologiat ovat teknologisesti kypsemmässä vaiheessa ja niitä on jo kaupallisesti hyödynnetty mm. lääketieteellisessä kuvantamisessa, GPS:n lisäksi kehittyneissä paikannusjärjestelmissä sekä puolustusalan sovelluksissa.

Panostamalla laajasti kvanttitekniologiaan – sisältäen laskennan, anturoinnin ja tietoliikenteen – ja sitä hyödyntävään TKI-toimintaan aloilla, joissa Suomessa on olemassa olevaa vahvaa perustutkimukseen perustuvaa osaamista, voimme tukea Suomen teollisuuden ja palveluliiketoimintojen uudistumista ja menestymistä kansainvälisessä kilpailussa.

1 McKinsey Quantum Technology Monitor (April 2024)

3 Tilannekuva – Suomi alan pioneeri ja haluttu yhteistyökumppani

3.1 Suomessa on maan kokoon nähden merkittävä kvanttiteknologia-ala

Suomeen on syntynyt maan kokoon suhteutettuna vahva kvanttitieteen ja -teknologian tutkimus- ja innovaatioyhteisö. Suomi on yksi harvoista maista maailmassa, jotka pystyvät tuottamaan kokonaisia kvanttietokoneita. Toimitusketjumme ovat vahvat. Kryogeniikkateollisuutemme on noussut globaalisti johtavaan asemaan. Suomella on merkittävä asema suprajohtavuuteen, fotonikkaan ja puolijohdteisiin perustuvissa kvanttitekniologioissa sekä kvanttilaskennan algoritmikehityksessä. Lisäksi meillä on tärkeä rooli eurooppalaisessa yhteistyössä, ja osaamisemme on noteerattu kansainvälisissä yhteistyöelimissä. Olimme esimerkiksi Euroopassa ensimmäisinä luomassa hybridilaskentaympäristön, joka yhdistää kvantti- ja super-tietokoneen. Suomi on luotettu yhteistyökumppani sekä eurooppalaisille että Euroopan ulkopuolisille maille, jotka jakavat Suomelle keskeiset arvot ja joille kvanttitekniologia on kriittisen tärkeä ala. Nykyinen ekosysteemi ja asema on saavutettu suhteellisen vaatimattomin panostuksin. Alan merkityksen kasvaessa maailmanlaajuisesti sekä turvallisuuden että talouden saralla, on näiden päälle hyvä rakentaa.

Yli 50 vuoden tutkimustoiminta on luonut perustan vahvalle osaamiselle ja yhteistyölle perustutkimuksen, soveltavan tutkimuksen ja teollisuuden kesken, minkä tuloksena syntyy myös startup-yrityksiä. Suomessa on vahva tutkimusperinne mm. kvanttitekniologian kannalta tärkeässä kylmäfysiikassa, suprajohtavissa tekniologioissa, puolijohdteknologiassa ja fotonikassa sekä kvanttimateriaalien, -laitteiden ja -algoritmien kehityksessä². Merkittävää osaamista on myös sirusuunnittelussa, mikro- ja nanoelektromekaanisissa järjestelmissä (MEMS/NEMS) ja anturitekniologioissa, optoelektronikassa sekä kehittyneiden puolijohdemateriaalien valmistuksessa³.

2 <https://instituteq.fi/about/>

3 <https://teknologiateollisuus.fi/wp-content/uploads/2024/09/Chips-from-the-North-Semiconductor-Strategy-for-Finland.pdf>

Akateemisen tutkimuksen korkeasta tasosta kertoo Suomen menestyminen EU:n ohjelmissa ja vahva osallistuminen eurooppalaiseen kvanttialan koordinaatioon. Myös korkeaan tieteelliseen laatuun perustuvaa kansallista kilpailtua rahoitusta on kohdentunut merkittävästi alalle. Vuonna 2023 Suomen kvanttiteknologia-alaan liittyvän tutkimustoiminnan vuositason kokonaisvolyymien yliopistoissa ja tutkimuslaitoksissa arvioitiin olevan 52 milj. € (pois lukien investoinnit tutkimusinfrastruktuuriin), josta vajaa puolet oli kilpailtua rahoitusta (liite 1).

Alan keskeisimpiä osaamiskeskittymiä on kvanttiteknologian kansallisen huippuyksikön⁴ lisäksi mm. vuodesta 2024 alkaen toiminut kansallinen kvanttilippulaiva⁵ sekä fotonikka⁶- ja AI⁷-lippulaivat, joissa tehdään osin myös kvanttialaa tukevaa tutkimusta ja kehittämistä. Koulutusjärjestelmä tuottaa tällä hetkellä alan tarvitsemia asiantuntijoita teollisuudelle ja korkeakouluille mm. fysiikan, matematiikan, tietotekniikan ja sähkötekniikan koulutusohjelmien kautta. Vuonna 2022 yliopistoissa ja VTT:llä työskenteli 550 alan huippuosaaajaa. Yliopistojen välinen yhteistyö sekä koulutukseen kytkeytyvä yritys yhteistyö on aktivoitunut vuodesta 2024 alkaen erityisesti kansallisen kvanttiteknologian tohtorikoulutuspilottin⁸ myötä. Alan toimijat käynnistivät jo vuonna 2021 kansallisen yhteistyöliittymän (InstituteQ⁹), joka pyrkii vahvistamaan alan koordinaatiota ja edunvalvontaa, ja jonka kautta edellä mainitut lippulaiva, tohtoripilotti sekä kvanttiyhteisön näkemys alan kasvua tukevista kehittämistoimista, kansallinen kvanttiagenda¹⁰ on valmisteltu.

Valtio on investoinut kvanttitieteen ja -teknologian tutkimukseen ja tutkimusinfrastruktuurin pitkäjänteiseen kehittämiseen jo 1990-luvun puolivälistä alkaen, erityisesti Suomen Akatemian huippuyksikkö- ja infrastruktuurirahoituksella. Liitteessä 1 kuvataan valtion panostuksia kvanttiteknologia-alalle. Viime vuosina valtio on osoittanut merkittävää lisärahoitusta erityisesti kvanttitietokoneisiin, suurteholaskentaan sekä kvanttiteknologioiden pilotointi- ja kehitysympäristöihin. Suomen ensimmäinen, viisikubittinen kvanttitietokone otettiin käyttöön vuonna 2022 ja 20-kubittinen vuonna 2023. Vuoden 2025 maaliskuussa VTT avasi 50-kubittisen kvanttitietokoneen tutkijoiden ja yritysten käyttöön. Sekä viisikubittinen Helmi-kvanttikone että VTT Q50 on yhdistetty CSC:n operoimaan

4 <https://qtf.fi/>

5 <https://instituteq.fi/fqf/>

6 <https://prein.fi/fi/>

7 <https://fcai.fi/>

8 <https://okm.fi/tohtorikoulutuspilotti>, <https://instituteq.fi/qdoc/>

9 <https://instituteq.fi/>

10 <https://instituteq.fi/finnish-quantum-agenda/>

yhteiseurooppalaiseen LUMI-supertietokoneeseen¹¹. Koneiden hankinta on tehty innovaatiokumppanuuden kautta kvanttietokoneita valmistavan suomalaisen yrityksen, IQM:n, kanssa. 300-kubitin kvanttietokoneen kehitykseen tavoitteena on valita toimittaja vuoden 2025 alkupuolella. Aalto-yliopisto on hankkimassa erillistä 20-kubitista kvanttietokoneita julkisella rahoituksella. Nämä VTT:n ja Aalto-yliopiston kvanttietokoneet operoivat osana Suomen kvanttilaskennan (FiQCI)-infrastruktuuria¹². Suomi on Euroopan johtava maa suprajohdettavien kvanttietokoneiden ja komponenttien tutkimuksessa ja kehityksessä sekä tutkimuslaitoksissa että yrityssectorilla.

Suomella on myös useita muita korkean tason yhteiskäyttöisiä infrastruktuureja, jotka tarjoavat erinomaiset puitteet alan tutkimus- ja kehittämistoiminnalle vahvistaen Suomen asemaa innovaatioiden edistäjänä, esimerkiksi: OtaNano¹³, joka sisältää Micronova-puhdistilat, kylmälaboratorion ja nanomikroskopiakeskuksen, sekä Jyväskylän yliopiston Nanotiedekeskuksen¹⁴ tutkimusinfrastruktuurit ja fotonikkaan keskittyvä FinnLight-infrastruktuuri¹⁵. Kvanttinova -pilotointi- ja kehittämisskeskukseen¹⁶ on suunnitteilla uusia puolijohdettavien pilottilinjoja EU:n, valtion, VTT:n, Espoon kaupungin sekä puolijohdettavuuden yhteisrahoituksella.

Mahdollistavat teknologiat, kuten kryogeeniset mittausjärjestelmät, kryojäähdyttimet, puolijohdekryoelektronikka ja laserit, sekä suprajohdettavat kvanttietokoneet ja kvanttietokoneiden laitteistot hallitsevat tällä hetkellä kvanttiteknologia-alan arvoketjua Suomessa. Kolme neljäsosaa investoinneista on suuntautunut laitekehitykseen. Algoritmikehityksellä on erityisen tärkeä rooli kvanttiteknologioiden kaupallistamisessa, sillä tehokkaat algoritmit mahdollistavat laitteistojen varhaisen käytön sovelluskohteissa ja siten arvonlisän kasvattamisen. Kvanttiyhödyn osoittaminen, joka on odotettavissa lähivuosina, tulee siirtämään alan arvoketjua voimakkaammin ohjelmistopuolelle. Arvioidaan, että vuonna 2030 laiteinvestointien osuus putoaa alle puoleen kaikista investoinneista.¹⁷ Ennen kvanttilaskennan hyödyn osoittamista sovelluskohteissa ala on julkisrahoitteisen tutkimus- ja kehittämistoiminnan hallitsema.

11 <https://www.lumi-supercomputer.eu/>

12 <https://fiqci.fi/>

13 <http://otanano.fi/>

14 <https://www.jyu.fi/fi/science/nsc/tutkimus>

15 <https://finnlight.fi/>

16 <https://www.enterespoo.fi/innovation-ecosystem/kvanttinova>

17 Quantum Market Insider

Suomalaiset kvanttilaskennan ohjelmistoyritykset ovat edelläkävijöitä tehokkaiden kvanttialgoritmien kehittämisessä mm. molekyylihallinnuksessa ja fysiikan ilmiöiden simuloinnissa. Nämä yritykset kuuluvat globaaliin eturintamaan ja luovat pohjaa kvanttilaskennan kilpailuedulle laitteistojen kehityksessä. Kvanttiohjelmistokenttä on laaja ja sillä on synergioita perinteisen ohjelmistopuolen osaamisen, ml. tekoälykehityksen ja suurteholaskennan, kanssa. Algoritmi- ja ohjelmistokehityksessä pääomien tarve on pienempi kuin laitteistokehityksessä, mikä on hyvä tunnistaa mahdollisuutena vähemmän pääomavaltaiselle maalle. Business Finlandin kvanttilaskenta-kampanja on vuodesta 2023 alkaen aktivoinut tutkijoita ja yrityksiä kehittämään kvanttilaskenta-algoritmeja, ohjelmistoja ja sovelluksia.

Euroopan suurteholaskennan yhteisyritys EuroHPC:n päätös sijoittaa seuraavan sukupolven supertietokone (LUMI-AI) sekä tekoälykeskus (AI Factory) Kajaaniin CSC:n datakeskukseen vahvistaa Suomen asemaa hybridilaskennan kehityksessä. LUMI AI Factory tulee sisältämään tehokkaan kvanttilaskenta-alustan, nostaa kokonaisuuden maailman johtavaksi suurteholaskentaa, tekoälyä ja kvanttilaskentaa yhdistäväksi laskentainfrastruktuuriksi. Eurooppalaisessa suurteholaskennan yhteistyössä hankitaan lisäksi eri teknologioihin pohjautuvia kvanttietokoneita. Toistaiseksi on tehty päätös kahdeksan kvanttietokoneen ja kahden kvanttisimulaattorin hankinnasta. Näiden kvanttietokoneiden käyttöajasta puolet tulee yleisesti eurooppalaisten tutkijoiden käyttöön. CSC ja VTT ovat mukana EuroHPC:n LUMI-Q -hankkeessa, jossa hankitaan Tšekkiin sijoitettava kvanttietokone. Eurooppalaisen yhteistyön kautta suomalaiset käyttäjät pääsevät käyttämään laajaa joukkoa erilaisia kvanttietokoneita.

Kvanttianturit ja mittausteknologiat erottuvat Suomessa historiallisesti vahvana osaamisalueena. Ultraherkkien antureiden lähitulevaisuuden kehitysalueita, joissa Suomella on erityisiä tutkimuksellisia ja teknologisia vahvuuksia, ovat magnetometrit, mikroaaltotaajuuden yksifotonidetektorit ja -laskurit sekä matalien lämpötilojen mittalaitteet ja säteilymittarit. Pidemmällä aikavälillä merkittäviä osaamisalueita ovat myös uudet, ultraherkät voima- ja gravitaatiomittarit, mikroaalto- ja optisten taajuuksien suprajohtavat magnetometrit, pimeään aineen detektorit sekä faasitransitiodetektorit. Kvanttimittaamisen sovellusalueet ulottuvat lääketieteellisestä kuvantamisesta puolustusteknologioihin (mm. häive- ja tunnistusteknologiat) ja biosensoreista kvanttilaskentaan (mm. yksifotonilaskurit).

Kuten taulukosta 1 havaitaan, maan kokoon nähden Suomen kvanttialan liiketoimintaekosysteemi on kooltaan merkittävä.

Taulukko 1. Kvanttitekniikka-alan liiketoimintaekosysteemin koko eräissä vertailumaissa. Lähteet: Crunchbase, Pitchbook, O. Ezratty, McKinsey State of Quantum Technology Report 2024.

Maa	Yritykset (lkm)	Työntekijät	Start-up rahoitus ¹ (M USD)	Myönnetyt patentit ²	Patentti-hakemukset ²	Myönnetyt ja haetut patentit ³
Suomi	11	500	240	23	22	72
Ruotsi	5	500+ ⁴	<10	16	18	48
Tanska	5	400	24	21	14	35
Saksa	32	1000+	360	145	103	331
Hollanti	14	600+	85	45	24	91

¹kumulatiivinen rahoitus, ²ilman ulkomaisia yrityksiä, ³ulkomaisten yritysten kanssa, ⁴luvussa mukana IBM

Suomi on hyvässä asemassa – kvanttitekniikan ensimmäisiä käyttäjiä ja hyödynnäjiä on sekä kvanttilaite- että kvanttiohjelmistoaloilla. Panostamalla laajasti kvanttitekniikkaan – sisältäen laskennan, anturoinnin ja tietoliikenteen – voimme luoda Suomeen merkittävää uutta liiketoimintaa. Panostamalla kvanttitekniikan hyödyntämiseen tähtäävään TKI-toimintaan aloilla, joissa Suomessa on olemassa olevaa vahvaa osaamista, voimme tukea Suomen elinkeinoelämän uudistumista ja menestymistä kansainvälisessä kilpailussa.

3.2 Kansainvälisessä kilpailussa pienellä maalla on omat vaikeutensa

Alan kansainvälisen merkityksen kasvaessa myös panostukset kasvavat. USA:n National Quantum Initiative Act vuonna 2018 käynnisti viimeaikaisen kehityksen, jota muut ovat kukin omista lähtökohdistaan pyrkineet seuraamaan.¹⁸ Tavoitteena on presidentinhallinnon koordinoima koko liittovaltion hallinnon kattava resurssien käyttöä yhdistävä kvantti-informaatiopolitiikka (QIS). Myös EU on aktivoitunut ja yksittäiset jäsenmaat Saksan ja Ranskan johdolla investoivat merkittävästi. Pienelle maalle resursointi kriittisen massan aikaansaamiseksi ei ole yhtä helppoa kuin suurille. Kehityksessä mukana pysyminen vaatii kansallista tahtotilaa ja kykyä saada aikaan ”vähemmällä enemmän”. Heikkoudet tulisi tunnistaa ja kääntää ne parhain päin.

18 <https://www.quantum.gov/about/>

Vaikka kvanttialaan on investoitu kymmeniä vuosia, kohdennettu kansallinen kvanttirahoitus on ollut Suomessa rajallista eikä alaan kohdennettuja pitkän aikavälin rahoitusohjelmia ole ollut ennen Suomen Akatemian rahoittamaa kvanttilippulaivaa. Tutkimusrahoitus on merkittävästi vähäisempää kuin esimerkiksi verrokkimaissa Ruotsissa ja Hollannissa¹⁹, ja rahoitus on jakautunut erillisiin projekteihin. Merkittävä osa alan julkisesta rahoituksesta on tullut vapaasti haettavista rahoitushauista, joiden tarkoitus on uudistaa tutkimusta, lisätä osaamista ja edistää nuorten tutkijoiden uria. Tämän ns. bottom up -rahoituksen lisäksi tulee tukea pitkjänteistä ja kunnianhimoista kvanttiteknologian TKI-toimintaa, laajentaa perustutkimuksesta syntyvää tietopohjaa, edistää teknologian laaja-alaista hyödyntämistä sekä käyttöönottoa loppukäyttäjyrityksissä.

Suomessa julkinen rahoitus on pitkälti kohdistunut resurssi-intensiiviseen laitteistojen kehitykseen sekä TKI-toimintaa mahdollistavien infrastruktuurien rahoitukseen. Julkiset investoinnit kvanttilaskennan algoritmi- ja ohjelmistokehitykseen ovat toisistaan olleet pieniä. Julkisen ja yksityisen rahoituksen niukkuus ja lyhytjänteisyys hidastavat kvanttialan yritysten kasvua ja innovaatioiden kehittämistä. Ennen kvanttilaskennan hyödyn osoittamista sovelluskohteissa, kvanttietokoneiden ja ohjelmistojen kysyntä on pääosin julkisrahoitteisten tutkimustoimijoiden varassa.

Yritysten kasvun kannalta kriittistä on löytää riittävän pitkjänteisiä sijoittajia, jotka ovat valmiita tukemaan liiketoiminnan skaalausta myös markkinoiden hitaan kehitysvaiheen yli siihen saakka, kun teollisten toimijoiden kysyntä lähtee kasvuun. Teollisuuden uudistumisen ja tuottavuuskasvun kannalta olennaista onkin se, miten teolliset loppukäyttäjät saadaan aktivoitua kvanttisovellusten ja -laskennan kehitykseen sekä toimimaan aikaisina hyödyntäjinä. Suomessa vain harvoilla riittävän suurilla yrityksillä on resursseja ja riskinotto kykyä panostaa kehitykseen, jonka tuotot ovat epävarmoja ja syntyvät pitkällä aikavälillä.

Kvanttiteknologian osaaminen yrityksissä sekä yhteiskunnassa tulee nostaa korkeammalle tasolle, jotta yrityksillä on valmiuksia hyödyntää kvanttiteknologioiden mahdollisuuksia teknologian kypsyydessä. Tietoisuus uudesta tutkimuksesta, innovaatioista ja niiden mahdollisuuksista on vähäistä. Alaan erikoistuneita koulutusohjelmia on vähän ja niiden painopiste on yliopistoissa koulutetun työvoiman tarpeessa. Alan kehitystä tukevia ja osaamista kasvattavia sisältöjä ei juuri ole tarjolla ammatillisen keskiasteen ja korkea-asteen koulutuksissa. Yrityksille suunnattujen orientoitujen koulutusten määrä on vähäistä. Kansallinen yhteistyö ja koordinaatio alan koulutuksessa ja tutkimuksessa on riittämätöntä. Kvanttilaskennan ohjelmisto- ja

19 McKinsey Quantum Technology Monitor (April 2024)

sovellusopetus on ohutta ja sen tarjonta painottuu pääasiassa alkeiskursseihin. Osaamisen laaja-alaisuus (fysiikka, matematiikka, kemia, materiaalitiede, datatieteet, tekoäly, ohjelmistotekniikka ja tietojenkäsittely, puolijohdeteknologiat, systeemi-integraatio jne.) sekä eri koulutustasojen läpileikkaavuus on kriittinen tekijä pienelle kansakunnalle. Myös osaajien saatavuus on pullonkaula, kuten myös asiantuntijoiden pysyvyys.

Suomi ei pienenä maana pysty kilpailemaan valtioneuvostoilla. Lupaavimmat yritykset voivat siirtyä ulkomaalaiseen omistukseen, mikäli kotimainen rahoitus ei riitä tukemaan niiden kasvua. On olemassa myös riski, että ilman riittävän nopeasti saavutettavia demonstraatioita kvanttiteknologian kaupallisista hyödyistä kiinnostus ja investoinnit saattavat hiipua. Resurssit tulisi osata keskittää toimintoihin, jotka edesauttavat kvanttituotteen saavuttamista mahdollisimman nopeasti sekä tämän esikehitysvaiheen jälkeisten kaupallisten mahdollisuuksien hyödyntämistä.

Kvanttiteknologian käyttöön Suomen etujen vastaisesti liittyy merkittäviä geopoliittisia ja turvallisuusriskejä. Strateginen kiinnostus liittyy siihen, että tehokkaan kvanttilaskennan avulla on joskus tulevaisuudessa mahdollista murtaa laajasti käytetyt julkisen avaimen menetelmiin perustuvat salausratkaisut, joita käytetään Internet-protokollista pankkipalveluihin sekä organisaatioiden ja yksilöiden väliseen viestintään. Riskiä voidaan kuitenkin pienentää ottamalla käyttöön kvanttiturvallisia salausten menetelmiä (ks. luku 3.3).

Suomi on jäänyt verrokkimaistaan jälkeen salausteknologioiden tuotteistamisessa ja kaupallistamisessa. Kiriäkseen verrokkimaitaan Suomella on edellytyksiä parantaa tuotesertifiointien saatavuutta ja elinkeinoelämän toimintaedellytyksiä lainsäädäntöä tarkentamalla. Suomi tulee rakentamaan kansallisen salausteknologisen laboratorion ja laajentaa salausteknologioiden koulutusohjelmaa ja muuta osaamisen kehittämistä.²⁰

Geopoliittisia ja turvallisuusriskejä voidaan tällä hetkellä tietyissä rajoissa hallita vientivalvonnalla ja yritysostojen seurannalla. Geopoliittisten blokkien muodostumisen takia tulevaisuudessa on entistä vaikeampaa luoda kansainvälisiä, kaikkia sitovia sääntöjä. Sääntely-ympäristön pirstaloituminen voi vaikeuttaa yritysten toimintaa, ja yhdenmukainen lähestymistapa sekä EU:ssa että samanmielisten maiden kesken muun muassa vientivalvonnassa on alan toimijoiden etu.

²⁰ Valtioneuvoston puolustusselonteko, Kyberturvallisuusstrategian toimeenpanosuunnitelma

3.3 Suomen on tunnistettava ja hyödynnettävä mahdollisuutensa

Suomalaiset ovat historiallisesti osoittaneet kykynsä tunnistaa ja hyödyntää uusien teknologioiden tarjoamat mahdollisuudet. 2020-luvulla kvanttiteknologiat tarjoavat tällaisen lupaavan tilaisuuden. Vaikka emme osaa kaikkea ennakoida, on selvää, että kvanttitasan ilmiöiden valjastamisen edetessä aukeavat uudet, laajat sovellusalueet. Kvanttilaskenta-, kommunikaatio- ja anturiteknologioiden sovellukset ovat jo nyt näkyvissä, mutta ne tuskin jäävät ainoiksi.

Suomen keskeinen kilpailuetu on hyvin toimiva kansallinen ekosysteemi, jossa yhteistyö korkeakoulujen, teollisuuden, päättäjien ja rahoittajien välillä toimii. Alan toimijoiden parissa on innostusta kehittämiseen. Niukemminkin resursseilla voidaan tavoitteellisesti ja riittävän koordinoitusti toimien saada tuloksia aikaiseksi. Strategian johtoajatuksena on uusien kompetenssien kasvattaminen saavutettujen vahvuuksien varaan, uusia kasvu- ja kehitysmahdollisuuksia unohtamatta. Eurooppalainen johtoasema suprajohettavaan teknologiaan perustuvien kvanttitekoneiden valmistuksessa on hyvä lähtökohta ponnistaa eteenpäin teknologian kehitykseen joustavasti reagoiden. Laitteisto-osaamisen kasvattamisen ja kaupallistamisen lisäksi tavoitteena on luoda kehitysympäristö, joka tukee algoritmi- ja ohjelmistokehitystä. Tällä vahvistetaan globaalisti kilpailukykyisen osaamisen ja liiketoiminnan kasvattamista Suomeen ja pyritään siihen, että suomalaiset yritykset pääsevät hyödyntämään kvanttilaskentaa globaaleina edelläkävijöinä.

Kvanttiteknologioiden ja niiden sovellusten tutkimukseen ja kehittämiseen tarvitaan resursseja ja niihin kannattaa panostaa nyt. Tutkimus- ja innovaationeuvoston strategisten valintojen tunnistamisprosessissa olisi aiheellista kiinnittää huomiota alan mahdollisuuksiin. Julkisten ja yksityisten rahoittajien sitoutuminen kasvuun pitkäjänteisesti voi mahdollistaa kansainvälisesti kilpailukykyisen kvanttiteknologian keskittymän rakentumisen Suomeen. Valtio on sitoutunut kasvattamaan t&k-rahoitusta pitkäjänteisesti, mikä antaa mahdollisuuden myös kohdentaa t&k-rahoitusta valittujen osaamisalojen pitkäjänteiseen kasvattamiseen.

Julkinen valta voi harkitusti panostaa myös kaupallistamista tukevaan innovaatio-rahoitukseen tilanteessa, jossa markkinaosuuksia ollaan jakamassa. Investoimalla ja mahdollistamalla pääsyn korkeatasoiseen kotimaiseen ja kansainväliseen yhteiskäyttöiseen TKI-ympäristöön valtio voi mahdollistaa pienten yritysten toimimisen ja liiketoiminnan aloituksen ilman kalliita investointeja. Tällaiset avoimen innovaation toimivat ekosysteemit ovat maailmalla harvinaisuus. Suomessa tällaisia infrastruktuureja ovat Micronovan puhdistilat laitteiston ja komponenttien kehitykseen ja kvanttitekoneet algoritmikehitykseen.

Yritysten globaali menestys edellyttää suuria investointeja. Alan kehittyessä ja ratkaisujen skaalautuessa yritysten liiketoimintamenestys edellyttää onnistumista kansainvälisessä pääomakilpailussa. Julkiset riskirahoittajat voivat edistää pitkäjänteisen kasvurahoituksen saatavuutta jakamalla riskiä yksityisten toimijoiden kanssa.

Kvanttiteknologia-alalla on jatkuva niukkuus parhaista osaajista. Toimivat, avoimet ekosysteemit houkuttelevat juuri heitä. Tohtoreiden lisäksi tarvetta on niin maisterikoulutuksen saaneille, DI/AMK-insinööreille, kuin mikromekaniikan ja elektroniikan osaajille, koneistuksen ammattilaisille, teknisille asiantuntijoille, teknisille myyjille, asiakkuuspäälliköille, sekä liiketoiminnan johtajille. Kvanttiteknologiatuntemus ja -osaaminen jo valmistumisvaiheessa tulisi olla tavoitteena.

Jatkuvan oppimisen ja täydennyskoulutuksen kanavat ovat Suomessa olemassa ja hyödynnettävissä. Uusien opetustapojen ja -sisältöjen tuominen alemmille koulutusasteille on mahdollista, sillä aineenopettajien osaaminen on yleisesti ottaen korkeatasoista. Korkea-asteen koulutuksen rakenteita tulee tarkastella vastavasti. Suomella on mahdollisuus hyödyntää pienen maan ketteryyttä monella saralla, esimerkiksi uudelleen kouluttamalla nopeasti osaajia kvanttialalle, ja tehdä koulutuksesta kansainvälinen kilpailuetu. Yhdenmukainen lähestymistapa myös tutkimusturvallisuudessa on alan toimijoiden etu ja edellytys kansainväliselle yhteistyölle akateemisessa tutkimuksessa ja luotettavien arvoverkostojen rakentamisessa.

Suomessa valmistetaan jo nyt laadukkaita komponentteja, joilla on kansainvälistä kysyntää. Kvanttitietokoneen toimivuus edellyttää kubittien virhekorjausta, jota voidaan toteuttaa sekä laitteisto- että algoritmikehityksen avulla. Komponenttien kehitystyössä kubittien valmistusmateriaalit ovatkin keskeinen tutkimus- ja kehitysalue. Suomi on johtavassa asemassa kryogeniikassa, mutta aseman ylläpito vaatii edelleen tutkimusta ja kehittämistä. Myös fotonikkaan perustuvissa ratkaisuissa Suomella on mahdollisuus nousta keskeiseksi tekijäksi.

Suomella on hyvät mahdollisuudet ottaa merkittävä asema kvanttilaskennassa, kvanttiturvallisessa tietoliikenteessä sekä kvanttimitausteknologioita hyödyntävissä sovelluksissa. NATO-liittolaisten kautta voi avautua markkinakanava puolustusalan ratkaisuille. Puolustusosalalla markkina on toistaiseksi kasvava ja avautumassa uusille kaksikäyttötuotteita tarjoaville toimijoille.

Suomessa on ohjelmistoalan kärkiosaamista ja siten mahdollisuus olla vahvasti mukana myös kehityksen eri osa-alueilla – laskentasovelluksissa, sovellusten kehittämistä ja operointia tukevista väli- (middleware) sekä laskennan laatua parantavissa tukiohjelmistoissa (mm. virheenkorjaus). Sovellukset ja tukiohjelmistot ovat

hyvin kaupallistettavissa. Kvanttilaskennan menestys riippuu siitä, kuinka tehokkaasti ohjelmistot pystyvät hyödyntämään kvanttilaitteistoa sekä mahdollistamaan tehokkaan hybridilaskennan, jossa yhdistyy kvanttilaskenta, suurteholaskenta ja tekoäly. Kvanttilaskentaosaajien ja tekoälytutkijoiden yhteistyön vahvistaminen voi nopeuttaa suomalaisten kvanttialgoritmi- ja ohjelmistoyritysten kehitystä. Alan kasvun kannalta oleellista on toimijoiden pääsy globaalisti huipputasoihin kansainvälisiin laskentainfrastruktuureihin.

Vaikka suuri osa huomiosta kohdistuu tällä hetkellä kvanttilaskentaan, Suomessa on vahvaa osaamista myös kommunikaatio- sekä mittaus- ja havainnointitekologioissa. Suomessa on esimerkiksi lääketieteelliseen aivokuvantamiseen käytettävien magneettikenttäanturien toimitusketju. On todennäköistä, että näille aloille nousee uusia kaupallisia mahdollisuuksia.

Kvanttiturvallisten salausteknologioiden käyttöönotto ja kriittisen datan suojaaminen edelläkävijänä EU-maiden joukossa lisäävät Suomen luotettavuutta yhteistyökumppanina. Kvanttiturvallinen tietoliikenneinfrastruktuuri mahdollistaa tätä vaativien IT-ratkaisujen pystyttämisen Suomeen ja niissä tapahtuvan arkaluontoisien datan käsittelyn sekä laite-, ohjelmisto ja palveluratkaisujen tuotekehityksen ja viennin. Suomen kyberturvallisuusstrategiassa 2024–2035²¹ on määritelty tavoitteet ja strategiset kehittämistoimet, joilla vastataan kvanttilaskennan kehittymisen mukanaan tuomiin turvallisuusuhkiin. Suomi on marraskuussa 2024 yhdessä 17 muun EU:n jäsenmaan kanssa julkistanut yhteisen lausuman sitoutumisestaan kvanttiturvallisten salausmenetelmien (PQC) käyttöönottoon nykyisiin salausmenetelmiin yhdistettynä, varautuen myös ”harvest now, decrypt later” -hyökkäykseen, joissa salattua tietoa kerätään, odottaen salauksen murtamiseen kykenevien kvanttikoneiden kehittymistä. Lausumassa suositellaan käynnistämään valmistautuminen välittömästi uhkien ja suojattavien kohteiden analysoinnilla, tiekartan valmistelulla ja siirtymän resurssoinnin suunnittelulla.²²

Kvanttilaskennan kestävien salaustuotteiden kasvava kysyntä on myös liiketoimintamahdollisuus, mikä peräänkuuluttaa panostuksia tutkimukseen, kehitykseen ja innovointiin, sekä aktiivista osallistumista alan standardisointiin. Yhdysvaltain

21 https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/165860/VNK_2024_11.pdf?sequence=1&isAllowed=y

22 https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Crypto/PQC-joint-statement.pdf?__blob=publicationFile&v=4

standardisointi- ja teknologiainstituutti (NIST) on julkaissut ensimmäiset kvanttiturvallisen kryptografian standardit vuonna 2024 ja alan kehityksen ennakoidaan olevan nopeaa.

Standardien kehityksessä mukana olevilla on parhaat mahdollisuudet menestyä kaupallisessa kilpailussa ja siksi suomalaistoimijoiden aktiivinen osallistuminen EU- ja kansainvälisen tason standardointityöhön ja sääntelyyn on tärkeää. Vaikuttamisessa on pyrittävä aikaansaamaan mahdollisimman yhtäläiset mahdollisuudet eri toimijoille sekä EU-tasolla että laajemmin samanmielisten maiden keskuudessa. Suomalaisten toimijoiden osallistumista kansainväliseen yhteistyöhön on tärkeää edistää. Pienillä ja keskisuurilla yrityksillä ei välttämättä ole resursseja osallistua kansainväliseen standardointityöhön ja ennakoivaan vaikuttamiseen, mutta kansallisen koordinoivan tahon avulla nekin voivat tuoda näkemyksiään helpommin esiin.

4 Visio 2035 ja tavoitteet – Kilpailukykyisesti kasvava, osaava ja luotettava Kvantti-Suomi

Vision mukaan kvanttiteknologia-alalla on merkittävä rooli Suomen elinkeinoelämässä vuonna 2035. Ala kasvaa globaaleja markkinoita nopeammin ja Suomi on kilpailukykyinen ja kansainvälisesti luotettava toimija. Useilla eri toimialoilla kvanttiteknologioita hyödyntämällä on saavutettu kilpailuetua ja parannettu tuottavuutta. Kuva 3 kiteyttää strategian vision, taloudelliset tavoitteet sekä tärkeimmät tekijät tavoitteiden saavuttamisen kannalta (luvussa 5 kuvattavat toimenpiteet).

Vision tavoitteet on laskettu suuntaa antavasti periaatteilla: Liikevaihto kasvaa 5 % globaalien markkinoiden arvioitua kasvua (25 %/v) nopeammin. Liikevaihdon suhde työpaikkoihin on oletettu pysyvän melko samana kuin v.2023. Sijoitusten arvo vuonna 2023 on keskiarvo vuosien 2021–2023 yksityisistä sijoituksista ja vuoden 2035 arvo perustuu Tesin arvioihin. Lähde: Business Finland, Tesi, Finnish Quantum Agenda (2023).

Kuvio 2. Suomen kvanttiteknologiastrategia kiteytettynä.

2023

130 M€ kvanttialan liikevaihto

50 M€ yksityiset sijoitukset

460 elinkeinoelämän työpaikat

Kilpailuedut

Vahva tutkimusperinne

Yli 50 vuoden tutkimusperinne kylmäfysiikassa, suprajohtavuudessa ja fotonikassa luo vankan perustan kvanttiteknologian kehitykselle ja innovaatiolle.

Hyvin toimiva kansallinen ekosysteemi

Toimiva yhteistyö tutkimusorganisaatioiden, teollisuuden ja rahoittajien välillä mahdollistaa osaamisen tehokkaan hyödyntämisen.

Kvanttiteknologia ja kryogeniikka

Suomella on johtava asema suprajohtavassa teknologiassa ja kryogeniikassa sekä merkittävä ja nouseva rooli fotonikassa ja puolijohdeissa.

Ohjelmistokehitys ja algoritmit

Suomalaiset kvanttiohjelmistoyritykset ovat globaaleja edelläkävijöitä

Laite- ja komponenttivalmistus

Suomessa valmistetaan kvanttiteknologian komponentteja, joilla on kansainvälistä kysyntää. Suomi on yksi harvoista maista, joka pystyy valmistamaan kokonaisia kvanttietokoneita.

Suomen kvanttiteknologiastrategia

Visio 2035 ja tavoitteet



2035

3,0 mrd. € kvanttialan liikevaihto

400 M€ yksityiset sijoitukset

10 000 elinkeinoelämän työpaikat

Menestyksen tekijät

Kilpailukykyinen TKI-ympäristö

1000 loogisen kubitin kvanttietokone
Maailman kärkitason HPC+AI+QC laskentaympäristö
Laite- ja ohjelmistokehityksen TKI-infrastruktuuri

Osaamisen vahvistaminen

Monipuoliset opintopolut kvanttialan osaajien kouluttamiseen

Pitkäjänteinen kvanttialan TKI-ohjelma

Pitkäjänteinen rahoitus kvanttiteknologioiden tutkimukseen sekä niiden sovellusten kehittämiseen ja käyttöönottoon.

Yritysten globaalien kasvun rahoitus ja tuki

Riskirahoitus alkaville ja skaalausvaiheen kasvuyrityksille
Korkean arvonlisän investointien houkuttelu.

Kansainvälinen yhteistyö ja vaikuttaminen

Suomalaiset toimijat integroituvat kansainvälisiin markkinoihin ja verkostoihin.

Kansallinen koordinaatio ja yhteistyö

Resurssit koordinaatioon ja tilannekuvan seurantaan

Seuraavassa kuvataan tarkemmin tavoitetilaa, johon strategialla pyritään vuoteen 2035 mennessä:

Suomessa on kasvava ja globaalisti kilpailukykyinen kvanttialan teollisuus

- Kvanttitietokoneita, -antureita ja -kommunikaatiolaitteita sekä niiden komponentteja myyvät yritykset ovat kriittinen osa globaalia arvoketjua ja markkinajohtajia omilla liiketoiminta-aloillaan.
- Suomessa on maailman johtava kvanttiohjelmistoala, joka tukee ratkaisujen syntymistä kvanttilaskentaa hyödyntävissä yrityksissä.

Kvanttitekologioita hyödynnetään laaja-alaisesti ja vaikuttavasti elinkeinoelämässä ja yhteiskunnassa

- Kvanttilaskennan ohjelmisto- ja hyödyntämisoosaamista on lähdetty kehittämään jo aikaisessa vaiheessa ennen virhekorjattujen kvanttitietokoneiden markkinoille tuloa. Tämän ansiosta kvanttihyöty valituissa sovelluksissa on saavutettu jo varhain ja teknologisen kehityksen mahdollistettua laajemman hyödyntämisen Suomeen on syntynyt nopeasti kansantaloudellisesti merkittävää, kvanttitekologiaa hyödyntävää teollisuus- ja palveluliiketoimintaa. Suomessa toimivat eri alojen yritykset käyttävät kvanttitekologiaa liiketoiminnassaan globaaleina edelläkävijöinä. Tämä on synnyttänyt täysin uusia, tuottavuutta parantavia ja kilpailukykyä synnyttäviä ratkaisuja.
- Kvanttitekologioiden mahdollisuuksia hyödynnetään laajasti kansallisen turvallisuuden ja varautumisen turvaamiseksi ja puolustusteollisen perustan vahvistamiseksi. Pääsy kvantti-infrastruktuuriin ja -laskentaan vahvistaa eri toimialojen vaikuttavuutta, kuten mahdollistaa kriittisten turvallisuus- ja tilannekuvapalvelujen ajantasaisuutta ja luotettavuutta esimerkiksi äärimmäisissä säätilanteissa.

Maailman kärkiluokan tutkimus tukee kvanttialan kasvua

- Korkeatasoinen perustutkimus tarjoaa pohjan maailman kärkitason kvanttitieteen ja -teknologian tutkimukselle. Monitieteiset yhteistyöprojektit sekä tutkijakoulutus ovat arkipäivää.
- Suomalainen kvanttiosaaminen on kansainvälisesti tunnistettua, arvostettua sekä vahvasti esillä elinkeinoelämässä ja koko yhteiskunnassa.

Suomi on luotettava kumppani kansainvälisessä yhteistyössä

- Suomi ja suomalainen kvanttialan ekosysteemi ovat luotettavia kumppaneita valitsemassaan kansainvälisessä kvanttiteknologia-yhteistyössä ja aktiivisesti määrittävät alan vastuullista kehitystä.
- Kvanttiteknologia-alan toimintojen sijoittaminen Suomeen on houkuttelevaa ennustettavan ja turvallisen toimintaympäristön takia. Tutkimusturvallisuuden varmistamiseksi Suomessa on toimiva yhteistyö eri hallinnonalojen ja toimijatasojen välillä.

Vahva osaaminen kvanttiteknologioissa

- Kvanttialan formaali sekä uudelleen- ja täydennyskoulutus muodostavat yhtenäisen ja kattavan kokonaisuuden, jossa oppiminen etenee loogisesti eri koulutusasteiden välillä. Yritykset osallistuvat kvanttialan osaajapoolin kasvattamiseen yhteistyössä korkeakoulujen ja tutkimuslaitosten kanssa.
- Suomi houkuttelee kansainvälisiä huippuosaajia maailmanluokan kvanttiekosysteemin ansiosta.

Kansainvälisesti houkutteleva TKI-ympäristö

- Suomi tunnetaan kvanttialan osaamisestaan, infrastruktuuristaan ja toimivasta rahoitusympäristöstään parhaana TKI-ympäristönä uusille kvanttiteknologiayrityksille. Suomeen on sijoittunut useita kansainvälisiä alan yrityksiä, ja valtio on vahvasti sitoutunut tukemaan kvanttiteknologia-alan yritysten syntyä ja kasvua.
- Suomalaisen kvanttietokonekehityksen tuloksena Suomessa on maailman kärkeä oleva kvanttietokone, jossa on tuhat loogista kubittia (noin 50 000–1 000 000 fyysistä kubittia).
- Suurteholaskennan ja tekoälylaskennan infrastruktuuriin kytketty suomalainen kvanttilaskennan laite- ja ohjelmistoinfrastruktuuri on maailman ehdotonta kärkeä. Suomella on lisäksi sopimuksiin perustuva yhteistyöverkosto valittujen kumppanimaiden infrastruktuuri- ja kvanttilaskentapalveluiden tarjoajien kanssa, johon Suomi tarjoaa vastavuoroisesti Euroopan edistyneimmät ratkaisut esimerkiksi suprajohdavioiden ja piipohjaisten kvanttietokoneiden osalta.

- Suomeen on sijoitettu useita keskeisiä yhteiseurooppalaisia laite- ja systeemikehityksen infrastruktuureja esim. mittausteknologian palveluita, kvanttisirujen pilottituotannon valmistuslinjoja sekä korkean arvonlisän tuotantoyksiköitä mikroelektroniikkateknologioille, jotka tukevat kvanttiteknologioita.
- Pitkäjänteinen rahoitusmalli varmistaa, että TKI-ympäristöt ovat ajantasaisia ja kilpailukykyisiä.
- Kotimaisten kvanttilaskennan infrastruktuuri- ja ohjelmistoratkaisuiden sijoittuminen turvallisuusuhat huomioiviin ympäristöihin sekä toimijoiden luotettavuuden varmistaminen kehitys- ja järjestelmien elinkaaren aikana tuovat suomalaisille ratkaisuille kilpailuetua.

EU- ja kansainvälinen vaikuttaminen

- Samanmielisten maiden kesken muodostettu yhdenmukainen lähestymistapa teknologiaturvallisuuteen ja teknologiavuotoon liittyvien riskien hallinnassa muun muassa vientivalvonnassa on alan toimijoiden etu. Suomi osallistuu keskeisillä kansainvälisillä foorumeilla kvanttiteknologiasta käytävään keskusteluun ja on vaikuttanut kansallisia etujaan suojellen EU- ja kansainvälisen tason päätöksiin tuloksellisesti ja määrätietoisesti.
- Suomalaistoimijat osallistuvat aktiivisesti EU- ja kansainvälisen tason standardien muodostamiseen kvanttiteknologiassa mahdollisimman laajan markkina-alueen luomiseksi suomalaisille tuotteille. Suomalaistoimijoiden työtä ohjaa kansallinen standardointistrategia, jossa kvanttiteknologia on tunnistettu yhdeksi keskeiseksi teknologia-alueeksi.

Riskienhallinta

- Suomi on edelläkävijämaana siirtynyt kvanttiturvalliisiin salausratkaisuihin ja varautunut kvanttiteknologioiden tuomiin turvallisuushaasteisiin yhteiskunnan eri sektoreilla. Yhteiskunnan kriittisten toimintojen kannalta olennainen infrastruktuuri on suojattu ja tehty kvanttilaskennan kestäväksi.
- Uskottavan riskienhallinnan ja yhteistyön ansiosta Suomi näyttäytyy luotettavana TKI-yhteistyön kumppanina. Riskienhallinnassa käytetään tarkoituksenmukaisesti erilaisia taloudellisen turvallisuuden keinoja. Kvanttiteknologian vientivalvonta on toteutettu EU- ja samanmielisten maiden keskuudessa mahdollisimman samankaltaisesti. Tutkimuksen turvallisuutta on parannettu vahvoilla kansallisilla toimilla.

- Kansallisen turvallisuuden strategiassa kvanttiteknologia tunnistetaan yhdeksi sekä kansallista turvallisuutta toisaalta parantavaksi että sitä toisaalta uhkaavaksi murrosteknologiaksi.
- Kansallisesti eri viranomaisten kesken on jaettu tilannekuva teknologian riskeistä ja mahdollisuuksista, jotta vaikuttavaa ja mahdollistavaa kvanttiteknologiapoliitikkaa voidaan edistää määrätietoisesti. Julkisen ja yksityisen sektorin toimijoiden välillä käydään jatkuvaa vuoropuhelua, jonka avulla voidaan jakaa tietoa ja varautua paremmin geopolittisen tilanteen muutoksiin.

5 Ehdotetut toimenpiteet vuosien 2025–2030 tavoitteiden toteuttamiseksi

Edellä kuvatun vision toteutuminen edellyttää tutkimus- ja koulutusorganisaatioiden, yritysten, teollisuuden, edunvalvontaorganisaatioiden, rahoittajien ja lainsäätäjien välistä yhteistyötä. Julkisilla toimenpiteillä tulee kannustaa kunnianhimoiseen TKI-toimintaan ja uusien teknologioiden käyttöönottoon.

Strategian perimmäisenä tavoitteena on suomalaisen kvanttiteknologiaekosysteemin kaupallinen ja tieteellinen menestys ja sitä kautta laaja yhteiskunnallinen vaikuttavuus. Markkina on globaali ja tavoitteena tulee olla globaali kilpailukyky. Viime kädessä onnistumisesta vastaavat alan yritykset. Tarkastelujaksolla markkinatilanne kehittyy ja uusia syntyviä markkinoita jaetaan. Vain globaalisti kilpailukykyinen toimija menestyy. Tässä esikaupallisessa vaiheessa julkisen sektorin toimilla on tavanomaista suurempi rooli teknologioiden kehittämisen, käyttöönoton ja soveltamisen mahdollistajana.

Osaamisen kehittämistä tavoitellaan laaja-alaisesti. Työvoiman saatavuus on alalla keskeinen haaste. Valtiot ja yritykset kilpailevat kansainvälisesti parhaista osaajista, joista on lähtökohtaisesti uusien kriittisten teknologioiden tapauksessa aina pula.

Seuraavassa esitämme kahdeksan toimenpid kokonaisuutta, joita ehdotamme käynnistettäväksi vuosien 2025 ja 2026 aikana. Ehdotamme toimenpiteille välitavoitteita, joita seurataan tulevana vuosina, jotta näemme, että olemme oikealla polulla vuoden 2035 vision saavuttamiseksi. Tulevana vuosina tullaan tarvitsemaan vielä muita toimenpiteitä ehdotettujen lisäksi, mutta nämä pitää päättää myöhemmin saavutettujen tulosten ja muuttuneen markkinatilanteen ymmärryksen pohjalta.

Osa toimenpiteistä edellyttää lisäresursseja hallinnonalojen nykyisiin resursseihin ja valtiontalouden kehykseen nähden. Mahdollisista lisärahoitustarpeista päätetään osana julkisen talouden suunnitelmaa ja talousarviota koskevia menettelyjä.

5.1 Kvanttiosaamiskeskus

Käynnistetään verkostomainen Kvanttiosaamiskeskus, joka mahdollistaa kvantti-tekniikan oppimiseen liittyvien aktiviteettien kansallisen koordinoinnin eli eri toimijoiden tuottaman opetuksen ja koulutuksen mahdollisimman tehokkaan ja harmonisen yhteensovittamisen, yhteisen suunnittelun ja kehittämisen, sekä ohjaamisen ja neuvonnan, yhteydenpidon, seurannan ja tiedonvälityksen. Koordinoinnissa otetaan huomioon opintopolkujen eri vaiheet ja tasot: perusopetus, toisen asteen opetus, ammatillinen opetus sekä korkeakoulut. Monipuolisten ja pedagogisesti linjakkaiden opintopolkujen päämääränä on tuottaa riittävästi osaajia kvanttialalle. Lisäksi keskus tukee täydennyskoulutusmoduulien kehittämistä eri koulutusasteiden opettajille, julkisille toimijoille sekä yrityksille kansallisella tasolla. Kvanttiosaamiskeskus edistää kansainvälisiä kvanttialan harjoittelu-/vaihto-ohjelmia sekä kvanttiosaamisen laaja-alaistamista yhteiskunnassa.

Taulukko 2. Kvanttiosaamiskeskus

Toimenpide	2027 välitavoite	2030 välitavoite
<p>Kvanttitekniikka-osaamisen vahvistaminen perus-, tutkinto- ja jatko-opetuksessa eri osaamisaloilla (fyysiikka, matematiikka, kemiantekniikka, materiaalitieteet, ICT, puolijohdetekniikka, elektroniikka, mikro- ja nanomekaniikka, prosessitekniikka, jne.) sekä opettajankoulutuksessa.</p> <p>Vastuutahot: korkeakoulut</p> <p>Muut toimijat: InstituteQ (koordinoija)</p>	<p>Korkeakoulujen toisiaan täydentävä ja lisäarvoa tuottava kvanttitekniikan sekä sitä tukevan koulutuksen tarjoama on näkyvää ja opintopolut määriteltäviä. Korkeakouluista valmistuvat hyödyntävät eri yliopistojen opetustarjontaa.</p> <p>Ammattikorkeakouluihin on käynnistynyt uusia sisältöjä. Osaamistarpeiden määrittelytyö on käynnistynyt yhteistyössä ammatillisten oppilaitosten kanssa.</p> <p>Opettajankoulutuksen sekä ammatillisen opettajankoulutuksen LUMA(TE)-sisällöt tarjoavat ajantasaista ja päivittyvää pedagogista materiaalia kvanttitekniikan opetukseen.</p>	<p>Korkeakoulujen kurssikokouksista on mahdollista muodostaa yhtenäisiä kvanttitekniikkaosaamiseen keskittyviä tutkintoja.</p> <p>Kvanttitekniikan opetus on laajentunut kaikkiin keskeisiin suomalaisiin ammattikorkeakouluihin ja se sisältyy aiheena myös useiden ammatillisten tutkintojen perusteisiin.</p>

Toimenpide	2027 välitavoite	2030 välitavoite
<p>5-vuotinen maisteri-tohtori-polku, joka johtaa joko kaksi- vuotiseen maisteri- tutkintoon tai viisi- vuotiseen väitöskirjaan.</p> <p>Vastuutahot: korkea- koulut</p>	<p>Maisteri-tohtori-polku on käynnistynyt ja sillä opiskelee vähintään 100 opiskelijaa. Ohjelma hyötyy tohtori- koulutuspilottissa muodostuneista käytännöistä.</p>	<p>Maisteri-tohtoripolusta valmistuvat ensimmäiset tohtorit (vähintään 30 % sisäänotosta). Ohjelmaan on vuosittainen haku, jossa on yhteensä 120 aloituspaikkaa yliopistoissa.</p>
<p>Täydennyskoulutus- kokonaisuudet ml. avoin korkeakoulu osana opintopolkua kansallisen ja kansainvälisen työvoiman uudelleen kouluttamiseksi kvanttialalle.</p> <p>Kvanttiosaamisen laaja-alaistaminen yhteiskunnassa yleisen osaamistason nostamiseen tähtäävien toimien avulla.</p> <p>Vastuutahot: korkea- koulut, InstituteQ</p>	<p>Kvanttitekologiaan keskittyvä täydennyskoulutus on käynnissä. Useita yrityksille ja LUMA(TE)-opettajille suunnattuja täydennyskoulutusmoduuleita on saatavilla sekä korkeakoulujen (esim. FiTech-verkostoyliopisto) että kaupallisten toimijoiden kautta.</p> <p>Kvanttialan yleistä osaamista tukevia sisältöjä ja materiaaleja on tarjolla kotimaisilla kielillä, ja niitä tuotetaan suunnitelmallisesti osana alan koulutuksen kehittämistä.</p>	<p>Yritysten ja julkisten toimijoiden kvanttialan täydennyskoulutusta on tarjolla jatkuvaluontoisesti ja sitä hyödyntää vuosittain vähintään 350 yritystä tai julkista toimijaa. Koulutukset ovat mahdollistaneet 3500 osaajan kouluttautumisen ja heistä 80 % on työllistynyt kvanttialalle. Yritykset ennakoivat aktiivisesti osaamistarvettaan ja tekevät yhteistyötä korkeakoulujen kanssa.</p> <p>Kvanttiosaaminen on osa LUMA(TE)-kasvatusta kaikilla koulutusasteilla.</p>
<p>Kansainväliset tutkijanvaihto-, yhteistyö- ja harjoitteluohjelmat, joiden kautta houkuttelee kansainvälisiä huippuosaajia Suomeen kvanttialalle. Lisätään näkyvyyttä hyödyntäen tehokkaasti olemassa olevia keinoja ja kanavia. Vahvistetaan ekosysteemin yhteistä markkinointia.</p> <p>Vastuutahot: korkea- koulut</p>	<p>Kvanttiteknologian liikkuvuusohjelman malli on luotu yhteistyössä korkeakoulujen ja yritysten kanssa, kuitenkin huomioiden geopolitiikan asetamat reunaehdot.</p> <p>Pilottia ja osaajavälitystä markkinoidaan kansainvälisesti.</p>	<p>Kansainvälinen liikkuvuusohjelma ja osaajavälitys toimii tehokkaasti, ja vähintään 1200 kansainvälistä huippuosaajaa on työllistynyt tätä kautta alalle Suomeen ja 200 ulkomaille.</p>

5.2 Maailman kärkiluokan laskentainfrastruktuuri mahdollistaa kvanttilaskennan tehokkaan käytön ja ohjelmistokehityksen

Varmistetaan yritysten, tutkijoiden ja opiskelijoiden pääsy eri teknologioihin perustuviin maailman kärkeä oleviin kvanttikoneisiin sekä mahdollistetaan suurteholaskentaa (HPC), tekoälyä (AI) ja kvanttilaskentaa (QC) yhdistävän hybridilaskennan kehitys. Kilpailukykyinen tutkimus- ja kehitysinfrastruktuuri on paitsi välttämätön alan kehittymiselle, myös kilpailuetu. Kohtuuhintainen laskenta-aika tehokkaimpiin kvanttietokoneisiin houkuttelee alan parhaita osaajia ja ohjelmistokehityksen yrityksiä Suomeen.

Suomi sitoutuu teknologiatiekarttaan tuhannen virhekorjatun loogisen kubitin (teknologian mukaan noin 50 000–1 000 000 fyysisen kubitin) koneen kehittämiseen vuoteen 2035 mennessä. Laitteistokehitykseen tehtyjen panostusten täysimääräinen hyödyntäminen edellyttää tukea myös laitteiston käytölle. Kansallista kvanttilaskentainfrastruktuuria edistetään rahoitusmallilla, joka kannustaa sen käyttöönottoon sekä jatkokehitys että tuotantokäyttö huomioiden. Kansainvälisen yhteistyön ja mahdollisten hankintojen kautta varmistetaan pääsy sellaisiin teknologioihin perustuviin kvanttietokoneisiin, joita ei ole sijoitettu Suomeen. Tämä tukee sekä kvanttietokoneen että algoritmi- ja ohjelmistoliiketoiminnan kasvua arvoketjussa, sekä varmistaa ja tukee parhaimpien kvanttietokoneiden laskenta-ajan saatavuuden Suomessa toimiville yrityksille.

Tuhannen virhekorjatun kubitin kvanttietokoneen saavuttaminen tulee mahdolliseksi kubittien valmistusprosessien merkittävän kehittymisen sekä virheenlievennys- ja korjausalgoritmien myötä. Tämä edellyttää panostuksia sekä laitteiden että ohjelmistojen tutkimukseen ja kehitykseen. Tällainen laskentainfrastruktuuri asemoi Suomen kvanttilaskennan kehityksen kärkimaihin ja mahdollistaa yksinomaan klassisen laskennan ulottumattomissa olevia ratkaisuja. Tätä kautta voidaan laskennallisesti mallintaa ennennäkemättömällä tarkkuudella ja luotettavuudella esim. uusia lääkkeitä, kemiallisia prosesseja, sekä materiaaleja kuten aurinkokennoja ja akkuja.

Kilpailukykyisen laskentainfrastruktuurin ylläpitämiseksi tarvitaan toimintamalli, joka mahdollistaa suomalaisten ohjelmistotutkijoiden ja -yritysten kustannustehokkaan osallistumisen HPC+AI+QC-ohjelmistopinon jatkuvaan kehitykseen kansallisen kvanttilaskentainfrastruktuurin puitteissa. Tavoitteena on luoda maailman paras kehitysympäristö sekä kaupallisten että avoimen lähdekoodin toteutuksille, tukiohjelmistoille ja kvanttilaskentaa hyödyntäville sovelluksille. Myös kaupallisiin ohjelmistoihin on investoitava ja panostettava jatkuvasti.

Taulukko 3. Laskentainfrastruktuuri

Toimenpide	2027 välitavoite	2030 välitavoite
<p>Suomi sitoutuu jatka- maan investointeja kohti 1000 loogisen kubitin virhesietoista kvanttietokonetta ja sen tukiohjelmistojä.</p> <p>Vastuutaho: TEM</p> <p>Muut toimijat: VTT, Aalto-yliopisto, CSC, FiQCI</p>	<p>Tehokkaiden virheenlieven- nysalgoritmien kautta osoitetaan kvanttihyödyn mahdollisuus ensimmäisillä sovellusaloilla.</p> <p>Noin 300–400 fyysisen kubitin kvanttietokone (2-kubitti operaatioiden virheet alle 0,03 %) on toiminnassa.</p>	<p>Tehokkaat virheenkorjaus- ja virheenlievennysalgoritmit mahdollistavat kvanttihyödyn osoittamisen monella eri sovel- lusalalla.</p> <p>Maailman kärkeä olevat ohjel- mistokokonaisuudet mahdol- listavat kvanttietokoneen tehokkaan käytön laajasti eri sovellusaloilla.</p> <p>Virhekorjattu kymmenien loogi- sen, eli tuhansien fyysisen, kubitin kvanttietokone on toiminnassa.</p>
<p>Pystytetään maail- man houkuttele- vin HPC+AI+QC- hybridilaskenta- ja mallinnympä- ristö, joka on help- pokäyttöinen ja kohtuuhintainen kor- keakouluille, tutkimus- laitoksille ja yrityksille sekä mahdollistaa yri- tysten datan luotta- muksellisen käytön.</p> <p>Määritellään jatku- va prosessi ajanta- saisen hybridilasken- taympäristön kehit- tämiseen ja ohjel- mistojen hankintaan sekä allokoidaan tar- vittavat resurssit.</p> <p>Ohjelmistopinoa kehi- tetään jatkuvasti suomalaisten kvantti- ohjelmistotutkijoiden ja -yritysten toimesta.</p> <p>Vastuutahot: TEM, CSC, VTT, OKM, FiQCI</p>	<p>Käytössä on mekanismi, jonka kautta voidaan allo- koida kvanttikoneaikaa korkeakouluille, tutkimus- laitoksille ja yrityksille sekä tätä tukeva rahoitusmalli. Käytössä on keskitetty rat- kaisu suurien resurssien ja- koa varten.</p> <p>Tekoälyn, suurteholas- kennan ja kvanttilaskennan tehokkaassa hybridilas- kentaympäristössä eri teknologiaratkai- suihin perustuvia kvant- tietokoneita sekä ko- konaisuutta tukeva, maailman kärkiluokan ohjelmisto on liitetty suo- malaiseen suurteholas- kentainfrastruktuuriin. Hankinnat toteutettu, joilla käytössä oleviin kvant- tikoneisiin päivitetään tar- vittavat maailmanluokan ohjelmistot.</p>	<p>Suomessa on laskentateholtaan maailman top 5 HPC+AI+QC infrastruktuuri, joka tukee teolli- suuden uudistumista ja globaalia kilpailukykyä sekä houkuttelee investointeja Suomeen.</p> <p>Suomen kvanttiekosysteemin toimijoilla on kustannustehokas pääsy kaikkiin merkittäviin eri teknologioihin perustuviin kvanttietokoneisiin, jotka on liitetty kansalliseen tekoäly- ja suurteholaskentainfrastruktuuriin.</p> <p>Suomalaiset toimijat hyödyntävät aktiivisesti kansainvälisten kvant- tilaskentainfrastruktuurien, ku- ten EuroHPC-kvanttikoneiden käyttökiintiöitä.</p> <p>Laskenta- ja mallinnympäristö on mahdollistanut uusien suo- malaisten algoritmi- ja ohjel- mistoratkaisujen luomisen ja kaupallistamisen laajasti koko kvanttilaskennan ohjelmisto- portfoliossa.</p> <p>Hybridilaskentaympäristöllä on 300 vuosittaista yrityskäyttäjää.</p>

Toimenpide	2027 välitavoite	2030 välitavoite
<p>Käyttöönoton kannustin- ja tukikokonaisuus, joka ohjaa uusia toimijoita käyttämään kvanttilaskentaa.</p> <p>Vastuutahot: TEM, VM, VTT, CSC, Business Finland, FiQCI</p>	<p>Selvitetty käytössä ja valmisteilla olevien t&k-verovähennysten soveltuvuus kvantti- ja suurteholaskennan käyttöönoton kannusteeksi.</p> <p>Käytössä on laaja käyttäjätukiohjelma, joka madaltaa kynnystä kvanttilaskennan käyttöönottoon sekä opastaa teknologian tehokkaaseen käyttöön.</p>	<p>Toimenpiteiden vaikutusta on arvioitu ja mahdolliset muutostarpeet huomioitu ja toteutettu.</p>

5.3 Kilpailukykyinen infrastruktuuri kvanttilaitteiden ja -komponenttien kehityksen tukena

Rahoitetaan pitkäjänteisesti yhteiskäyttöisiä tutkimus- ja teknologiainfrastruktuureja, jotka mahdollistavat keskeisten kvanttiteknologioiden (ml. kvanttilaskennan ja -viestinnän) komponenttien ja kvanttiantureiden, tutkimuksen, kehityksen, pilottoinnin, testauksen, karakterisoinnin ja valmistuksen. Huolehditaan yhteistyössä selkeästä teollis- ja tekijänoikeuksien puitteesta, mikä tukee kehitettyjen teknologioiden laajaa hyödyntämistä ja kaupallistamista. Yritysten mahdollisuus hyödyntää infrastruktuuria TKI- ja pilottituotantovaiheessa tukee uusien startup-yritysten kasvua ilman valtavia investointeja omaan infrastruktuuriin. Infrastruktuuri on vetovoimatekijä, joka houkuttelee uusia kvanttiteknologian yrityksiä Suomeen.

Suomen sitoutuminen 1000 loogisen kubitin kvanttietokoneen kehittämiseen tukee suomalaisen kvanttilaite ja -komponenttiteollisuuden kehitystä. Tavoitteena on, että huomattava osa 1000 loogisen kubitin kvanttietokoneesta kehitetään ja valmistetaan Suomessa.

Taulukko 4. Kvanttilaitteiden- ja komponenttien TKI-toimintaa tukeva infrastruktuuri

Toimenpide	2027 välitavoite	2030 välitavoite
<p>Kvanttilaitteiden yhteiskäyttöisen TKI-infrastruktuurin päivittäminen ja kansainvälisen kilpailuvuon vahvistaminen hyödyntäen mm. kansallista tutkimusinfrastruktuurirahoitusta sekä, EURA-MET, EU:n sirusäädös- ja Quantum Act rahoitusta.</p> <p>Vastuutahot: TEM, VTT, korkeakoulut</p>	<p>Nykyisen infrastruktuurin²³ pitkäjänteinen ylläpito- ja kehittämissuunnitelma on vahvistettu yhteistyössä yliopistojen ja tutkimuslaitosten kanssa.</p> <p>EU:n sirusäädös -rahoitusta hyödyntävät suprajohtavien ja piipohjaisten sirujen pilottilinjat aloittavat toimintansa Suomessa.</p> <p>Perustettu kansallinen karakterisointi ja testausalusta tai -verkosto, joka mahdollistaa helpon pääsyn yhteiskäyttöiseen infrastruktuuriin. Alusta kytkeytyy keskeisiin eurooppalaisiin mittaus- ja testausverkostoihin (mm. EURA-MET).</p>	<p>Infrastruktuurit ovat ajantasaista pitkäjänteisen rahoituksen ansiosta.</p> <p>Kansallisten infrastruktuurien käyttöaste on kohonnut 20 % vuoden 2024 tilanteesta ja kasvusta > 30 % tulee yrityksiltä.</p> <p>Yrityksiä on kasvanut niin, että infrastruktuurit saavat myös merkittävästi yritysrahoitusta julkisen rahoituksen lisäksi.</p>
<p>Käyttöönoton kannustin- ja tukikokonaisuus, joka kannustaa uusia yrityksiä kehittämään kvanttilaitteita</p> <p>Vastuutahot: TEM, Business Finland</p>	<p>Infrastruktuurien käyttöä tuetaan yrityksille T&K-käyttöön tarjottavilla tuilla</p>	<p>Pääsy infroihiin on mahdollistanut kunnianhimoista tuotekehitystä, kuten esim. QPU-teknologiaa ja uusia kvanttilaitteita, ja synnyttänyt uusia yrityksiä</p>

5.4 Kvanttiturvallisten salausmenetelmien käyttöönotto

Varmistetaan kvanttiturvallisten (Post Quantum Cryptography, PQC) salausmenetelmien käyttöönotolla ja soveltuvin osin kvanttiavaintenvaihtoteknologioihin (Quantum Key Distribution, QKD) perustuvilla ratkaisulla, että yhteiskunnan kriittisten toimintojen kannalta olennainen infrastruktuuri, tietoliikenneyhteydet ja tietovarannot, on suojattu ja tehty kvanttilaskennan muodostaman uhan kestäviksi sekä

23 <https://www.lumi-supercomputer.eu/>, <https://fiqci.fi/>, <http://otanano.fi/>, <https://www.jyu.fi/fi/science/nsc/tutkimus>, <https://finnlight.fi/>

julkisella että yksityisellä puolella. Kvanttiturvallinen tietoliikenneinfrastruktuuri mahdollistaa tätä vaativien IT-ratkaisujen rakentamisen Suomeen ja niissä tapahtuvan arkaluontoisen datan käsittelyn sekä laite-, ohjelmisto ja palveluratkaisujen tuotekehityksen ja viennin.

Suomi osallistuu aktiivisesti kansainväliseen standardien valmisteluun ja implementoi muodostuvat standardit nopeasti osaksi kansallisia ohjeita ja määräyksiä, kuten esimerkiksi kryptografiset vahvuusvaatimukset turvaluokitellulle tiedolle. Testilaboratorioilla, testausmenetelmien kehittämällä sekä riittävällä määrällä testaajia tuetaan testausinfrastruktuurin rakentamista siten, että viranomaisilla on mahdollisuus varmistua suojattavan tiedon salaukseen käytettävien salaustuotteiden kvanttikestävyydestä. Luotettavan tietoliikenneinfrastruktuurin maana sekä salausteknologioiden ja turvallisen kvanttikommunikaation kehitystyön kautta Suomi voi sertifioida ja kaupallistaa ratkaisujaan ja suomalaiset yritykset menestyvät salaustuotemarkkinoilla.

Suomessa on samanaikaisesti kvanttiteknologisen kehityksen kanssa vahvistettava salausteknologista kyvykkyyttä myös kyberturvallisuusalan yrityksiä laajemmin eri teollisuudenaloilla, sekä muissa salausratkaisuja käyttävissä organisaatioissa. Sen lisäksi, että Suomen strategisena tavoitteena on olla omavarainen ja kvanttiuhkaan varautunut valtio 2030-luvun alkupuolella, keskeistä on toimialan kaupan ja viennin vahvistaminen.

Tämä edellyttää kotimaisten kvantinkestävien salaus- ja todennusratkaisujen edelleen kehittämistä ja salausteknologisen osaamisen vahvistamista tuotannon, tutkimuksen, laskennan, takaisinmallinnuksen ja organisoitumisen osa-alueilla. Jotta taloudellisesti kannattava ja kilpailukykyinen toiminta on mahdollista, kehitetään kansallista sääntelyä, nopeutetaan viranomaisvetoisia arviointeja, perustetaan kansallinen salausteknologinen laboratorio, jonka osana tarvittavat arviointi- ja hyväksyntäviranomaiskyvykkyudet ja turvallisuusviranomaiskyvykkyudet.

Taulukko 5. Kvanttiturvallisten salausmenetelmien käyttöönotto

Toimenpide	2027 välitavoite	2030 välitavoite
<p>Kvanttiturvallisten salaus- ja digitaalisten allekirjoitusratkaisujen (PQC) käyttöönotto</p> <p>Vastuutahot: LVM, VM, PLM, TEM, Traficom, Valtori, PV, HVK</p> <p>Muut tahot: inventaario ja riskienhallintatoimet hallinnonaloittain, korkeakoulut</p>	<p>Kriittisten infrastruktuurien, mm. tietovarantojen ja julkisten ja kaupallisten tietoliikenneyhteyksien, suojaaminen ja tekeminen kvanttilaskennan kestäväksi on käynnistetty.</p> <p>Yhteiskunnan toiminnan kannalta kriittiset organisaatiot ovat tunnistaneet sensitiivisimmät tiedot ja kvanttiturvallisuuden kannalta kriittiset tietojärjestelmät sekä päivittäneet riskienhallintasuunnitelmat kvanttiuhkien osalta. Tehdyn inventaarion perusteella on muodostettu Suomen tiekartta kvanttiturvallisen salauksen käyttöön.</p> <p>Ohjeistusta organisaatioille ja tilannekuvaa kvanttiturvallisiksi todetuista salaustuotteista ylläpidetään aktiivisesti Kyberturvallisuuskeskuksessa.</p> <p>Kannustin ja/tai tukivaihtoehtoja yksityisen sektorin kvanttiturvallisuussiirtymän tukemiseksi on selvitetty.</p>	<p>Suomen kriittiset tietovarannot ja tietoliikenneyhteydet on suojattu kvanttilaskennan kestäviksi.</p> <p>Suomeen rakennettua kvantti-infrastruktuuria hyödynnetään turvallisuuden varmistamiseen esimerkiksi salausratkaisuiden testauksessa tai takaisinmallinnuksessa sekä viranomaisten että yhteiskunnan kriittisten toimijoiden tarpeiden mukaisesti.</p> <p>Suomen salaustuotearviointi-kyvykkyyttä on rakennettu kyberturvallisuusstrategian mukaisesti. Kyberturvallisuudesta vastaavien viranomaisten lisäksi salaustuotearviointiosaamista on laajennettu arviointilaitoksiin ja tietoturvaloihin, jotta myös yksityisen sektorin tietoliikenneinfrastruktuuri täyttää vaatimukset.</p>

Toimenpide	2027 välitavoite	2030 välitavoite
<p>Kvanttiavaintenvaihtoon (QKD) perustuvien tuotteiden ja palvelujen tutkimus ja kehittäminen</p> <p>Vastuutaho: TEM, LVM</p> <p>Muut toimijat: VTT, Traficom, CSC</p> <p>Viranomaisverkkoja koskeva kokonaisuus</p> <p>Vastuutahot: PLM, SM, VM</p> <p>Muut toimijat: Erillisverkot</p>	<p>Kvanttialan TKI-ohjelmalla tuetaan (kts. toimenpide 5.5) QKD-ratkaisujen tutkimusta ja vahvistetaan alan korkealuokkaista tutkimusta Suomessa.</p> <p>EuroQCI-ohjelman kansallinen kehitys- ja kokeilu ympäristö mahdollistaa uuden sukupolven QKD-tuotteiden ja -palvelujen kehittämisen kvanttiturvalliseen kommunikaatioon ja osaltaan tukee siirtymää kvanttiturvalliseen tietoliikenteeseen.</p> <p>Suomalaisia tutkijoita ja yrityksiä osallistuu aktiivisesti kvantti-internetiä koskevaan kansainväliseen yhteistyöhön kuten Quantum Internet Alliance (QIA) toimintaan.</p> <p>Koulutus QKD-mahdollisuuksista ja tärkeydestä on aloitettu.</p>	<p>Kvanttiavaintenvaihtoa hyödyntäviä tietoliikenneyhteyksiä on otettu käyttöön rajatuissa käyttötapa- pauksissa. Näiden rinnalla jatketaan QKD-ratkaisuihin liittyvää tutkimusta ja yhteistyötä kansainvälisten toimijoiden kanssa sekä turvallisuuden varmistavan standardoinnin edistämistä.</p> <p>Suomeen on syntynyt kvanttiavaintenvaihdon kehitys- ja innovointityön kautta kvanttiteknologioita ja ICT-osaamista yhdistävä ekosysteemi ja kansainvälistä liiketoimintaa turvallisen kvanttikommunikaation saralla.</p> <p>Kvanttilaskennan uhalta suojattu QKD-infrastruktuuri tukee kvantti-internetin kehitystä.</p>

5.5 Pitkäjänteinen kvanttialan TKI-ohjelma

Valmistellaan laaja-alainen kvanttiteknologian TKI-ohjelma tai pitkäjänteinen proaktiivinen toimenpidekokonaisuus, jolla kohdennetaan rahoitusta ennakoitavasti ja pitkäjänteisesti kvanttiteknologioiden ja niiden sovellusten kehittämiseen Suomessa maailmanluokan mittakaavaan.

Toimenpiteillään Business Finland kannustaa tutkimusorganisaatioita ja yrityksiä pitkäjänteiseen TKI-yhteistyöhön kansallisesti ja kansainvälisesti, sekä yrityksiä pitkäjänteiseen TKI-toimintaan ja sen tuloksia hyödyntävän kansainvälisen liiketoiminnan kasvattamiseen. Ohjelman TKI-rahoituksella vahvistetaan myös kvanttiteknologia-alan tieteellistä osaamis pohjaa ja tuetaan osallistumista EU- ja kansainvälisiin hankkeisiin.

Suomen Akatemia kohdentaa tutkimusrahoitusta vertaisarvioinnin perusteella korkeatasoiseen tieteelliseen tutkimukseen ja tukee siten osaamispohjan vahvistamista ja tutkimusympäristöjen kehittymistä kansainvälisesti houkutteleviksi. Akatemian kilpailullinen rahoitus luo erityisesti edellytyksiä leventää ja vahvistaa kvanttiteetien ja -teknologian tutkimuksellisia kärkiä.

Business Finland ja Suomen Akatemia edistävät yhteistyössä hankkeista sekä käynnissä olevista lippulaivoista saadun osaamisen ja tulosten hyödyntämistä yrityksissä ja yhteiskunnassa, tavoitteena vahvistaa tutkimuksesta kumpuavaa laajaa taloudellista, sosiaalista ja yhteiskunnallista vaikuttavuutta kestävästi.

TKI-ohjelma verkottaa ja kannustaa teknologiakehittäjiä ja -tutkijoita yhteistyöhön loppukäyttäjien kanssa. Kvanttitekniologioiden TKI-ohjelma toimii vahvana signaalina kansainvälisille toimijoille sijoittaa tutkimus- ja kehittämistoimintaansa Suomeen. Ulkomaisia yrityksiä houkutellessaan Suomeen tekemään tutkimusta ja korkean arvonlisän valmistusta Invest-in palveluilla, osaavalla työvoimalla ja toimivalla tutkimus- ja kehitysinfrastruktuurilla. Business Finland, työ- ja elinkeinoministeriö ja ulkoministeriö edistävät palveluillaan vientiä, vahvistavat suomalaisen osaamisen tunnettuutta ja Suomea osaavana ja luotettavana kumppanina.

Taulukko 6. Pitkäjänteinen kvanttialan TKI-ohjelma

Toimenpide	2027 välitavoite	2030 välitavoite
<p>TKI-ohjelma, joka mahdollistaa tieteellisen osaamispohjan kehittämisen, kvanttitekniologian laajan soveltamisen ja tekniologian kypsyyden kasvattamisen, sisältäen kansainvälisen yhteistyön ulottuvuuden.</p> <p>Vastuutahot: TEM, Business Finland</p>	<p>Kvanttitekniologian pitkäjänteinen TKI-ohjelma/toimenpidekokonaisuus on käynnissä. Sen pitkäjänteinen rahoitusmekanismi mahdollistaa monivuotisen rahoituksen usealle merkittävälle kärkisovellusalojen hankkeelle, jotka vievät tutkimusta kohti merkittäviä kaupallisia sovelluksia.</p>	<p>Useita sovelluksia kaupallistettu menestyksekkäästi teollisille markkinoille.</p>

Toimenpide	2027 välitavoite	2030 välitavoite
<p>Business Finlandin rahoitus tutkimus-organisaatioiden ja yritysten yhteiseen tutkimukseen, joka tukee kvanttialan ekosysteemin kasvua pitkäjärjestyksellä.</p> <p>Rahoituskriteerien soveltaminen pitkän kehityskaaren omaavan teknologian kehitystarpeisiin myös aloilla, joilla soveltavia yrityksiä on vielä vähän.</p> <p>Vastuutahot: TEM, Business Finland</p>	<p>Vähintään 5 uutta julkisen ja yksityisen sektorin yhteisrahoitteista hanketta on alkamassa.</p>	<p>Yritysyhteistyöhön liittyvä ekosysteemi on laajentunut uusille vertikaaleille ja synnyttää uusia sovelluksia.</p> <p>Suomalaiset kvanttialan yritykset tarjoavat edelläkävijäratkaisuja kansainvälisillä markkinoilla.</p>
<p>Business Finlandin ja Suomen Akatemian yhteistyö osaamisen ja tutkimustulosten hyödyntämisen edistämiseksi.</p> <p>Vastuutahot: Business Finland, Suomen Akatemia</p>	<p>Suomen Akatemian rahoittama kvanttilippulaiva ja Business Finlandin kvanttiteknologiaan kohdistuva proaktiivinen toimenpidekokonaisuus ovat käynnistäneet yhteisiä toimenpiteitä.</p>	<p>Yhteistoiminta on vakiinutettu ja yhteistoiminnan vaikuttavuudesta on saatu ensimmäisiä tuloksia.</p>
<p>Loppukäyttäjäyritysten lisäämiseen tähtäävät toimet. Kvantti-ekosysteemi yhdessä Business Finlandin ja InstituteQ:n kanssa luo puitteet, jolla kvanttietoisuus loppukäyttäjäyrityksille lisääntyy.</p> <p>Vastuutahot: TEM, Business Finland</p>	<p>15 loppukäyttäjäyritystä on investoinut kvanttiteknologian tutkimukseen ja käyttöönottoon.</p>	<p>50 loppukäyttäjäyritystä on investoinut kvanttiteknologian tutkimukseen ja käyttöönottoon.</p> <p>Yksityiset investoinnit kvanttiteknologioiden t&k-toimintaan ovat vähintään kaksinkertaiset verrattuna julkiseen rahoitukseen.</p>

Toimenpide	2027 välitavoite	2030 välitavoite
<p>Kasvua tukevat investin-toiminnot</p> <p>Vastuutahot: TEM, Business Finland</p>	<p>Suomeen on sijoittunut Investin -toimien ansiosta 5 uutta kansainvälistä toimijaa, jotka ovat investoineet Suomeen yhteensä 20 M€ ja luoneet 60 uutta työpaikkaa.</p>	<p>Suomeen on sijoittunut Investin -toimien ansiosta 15 uutta kansainvälistä toimijaa, jotka ovat investoineet Suomeen yhteensä 100 M€ ja luoneet 300 uutta työpaikkaa.</p> <p>Investoinneista 3 on merkittävän kansainvälisen yrityksen investointeja.</p>
<p>Ulkoministeriö edistää Suomen kvantti-ekosysteemin vientiä ja tekee tunnetuksi alan osaamista tavoitteellisesti ja kohdistetusti yhteistyössä Business Finlandin TKI-ohjelman ja muiden Team Finland-toimijoiden kanssa.</p> <p>Vastuutahot: UM, TEM, Business Finland, Team Finland -verkosto.</p>	<p>Suomalainen kvanttiekosysteemi on tunnettu maailmanlaajuisesti – Pohjoismaissa, EU:ssa ja kaikissa keskeisissä EU:n ulkopuolisissa kumppanimaissa.</p>	<p>Suomalaisten kvanttialan yritysten vienti on kasvanut merkittävästi fokusmaihin.</p>

5.6 Yritysten globaalin kasvun rahoitus ja tuki

Yritysten menestyminen globaalissa kilpailussa edellyttää pärjäämistä kilpailussa kansainvälisestä rahoituksesta. Kilpaillut pääomat hakeutuvat sinne, missä on korkeimmat tuotto-odotukset. Kvanttitekniikan alalla globaaleille markkinoille tähtäävät yritykset tarvitsevat kasvun tueksi pitkäjänteistä riskirahoitusta. Globaaleilla markkinoilla on huolehdittava myös siitä, että yrityksillä on riittävä osaaminen ja keinot suojata ja hyödyntää aineettomia oikeuksiaan.

Valtion pääomasijoitusyhtiö Tesin tavoitteena on luoda yhdessä muiden toimijoiden kanssa Suomeen uusia tulevaisuuden kasvualoja, joista kvanttitekniikka-ala on yksi merkittävimmistä. Jatkossa Tesillä on mahdollisuus sijoittaa entistä suurempia summia lupaavimpiin kansainvälisesti kilpailukykyisiin teollisiin ja huipputeknologiayhtiöihin joko suoraan tai välillisesti rahastojen kautta. Tavoitteena

on mahdollistaa pääomaintensiivisten syväteknologiayritysten kehittyminen ja skaalausvaiheen kasvu pidemmälle kotimaisessa ankkuriomistuksessa. Tesi toimii vähemmistösjöittäjana ja sen tavoitteena on myös kanavoida yksityistä ja EU-rahaa suomalaisille yrityksille sekä kehittää suomalaista rahastokenttää suurempaan kokoluokkaan, jotta jatkossa suomalaiset rahastoyhtiöt voisivat skaalata syväteknologiayrityksiä suuremmiksi.

Finnvera rahoittaa kvanttiteknologia-alan yritysten liiketoimintaa ja teknologiaa investoinneista ja pilottitoimituksista alkaen jakaen riskiä markkinaehtoisten rahoittajien kanssa. Finnveralla on valmius edistää rahoitusratkaisujen toteutumista takaamalla jopa 80 % kaupallisten vieraan pääoman rahoittajien rahoituksesta sekä tarvittaessa myös suurin lainoin riskin jaon toteutuessa muulla tavoin, mikäli takauksesta huolimatta tarvittava kokonaisrahoitus elinkelpoisille yrityksille ei muuten järjesty.

Investointiavustuksilla tai verohelpotuksilla kannustetaan koti- ja ulkomaisia yrityksiä korkean arvonlisän teollisiin investointeihin.

Taulukko 7. Yritysten globaalien kasvun rahoitus ja tuki

Toimenpide	2027 välitavoite	2030 välitavoite
Tesi-rahoitus kvantti-tekniologian alkavan ja skaalaavan vaiheen rahoitukseen Vastuutahot: TEM, Tesi	400 M€ kerättyä yksityistä rahoitusta (kumulatiivisesti) Suomessa toimiville kvanttialan startup- ja growth-up-yrityksille	1,6 MRD € kerättyä yksityistä rahoitusta (kumulatiivisesti) Suomessa toimiville kvanttialan startup- ja growth-up-yrityksille Uusia alan startup-yrityksiä syntynyt kumulatiivisesti 50.
Yritysinvestointien houkuttelu korkean arvonlisän teollisiin investointeihin esim. verohelpotusten kautta. Vastuutaho: TEM	Selvitetty vaihtoehtoisten investointikannusteiden soveltuvuutta kvanttiteknologian laitteiden ja tilojen hankintaan.	Investointikannuste on käytössä ja sen vaikuttavuutta on alkuvaiheen kokemusten perusteella arvioitu.

5.7 Kansainvälinen yhteistyö sekä EU- ja kansainvälinen vaikuttaminen

Vaikutetaan kvanttiteknoologiaan liittyvään EU-tason ja kansainväliseen sääntelyyn, standardointiin ja sektorin toimintaedellytyksiin suomalaisen kvanttiekosysteemin kasvua ja kehittymistä tukevalla tavalla. Vaikuttamisen päämäärä on, että suomalaiset toimijat integroituvat kansainvälisiin markkinoihin ja kehittävät molemmin puolin hyödyllisiä yhteistyösuhteita samanmielisten maiden toimijoiden kesken. Vaikuttamisessa voidaan hyödyntää niin Team Finland Knowledge -verkostoa, Suomen suurlähetystöjä maailmalla kuin tiivistä yhteistyötä yrityskentän kanssa. EU-ohjelmien rahoitusmahdollisuuksia pyritään hyödyntämään täysimääräisesti.

Rajallisten resurssien vuoksi yhteistyötä tiivistetään erityisesti samanmielisten maiden kanssa, jotka jakavat Suomelle keskeiset arvot ja intressit. EU-jäsenmaiden ja Pohjoismaiden lisäksi kvanttiteknologian puitteissa tehtävä yhteistyö edistää myös yleisemmin kahdenvälistä kumppanuutta esimerkiksi Yhdysvaltojen, Kanadan, Japanin, Etelä-Korean, Australian ja Iso-Britannian kanssa. Suomalaisen kvanttiteknologiatoimijoiden kilpailukykyä vahvistetaan ja ylläpidetään lähtökohtaisesti kaikissa kumppanuuksissa.

Taulukko 8. Kansainvälinen yhteistyö sekä EU- ja kansainvälinen vaikuttaminen.

Toimenpide	2027 välitavoite	2030 välitavoite
<p>Suomi osallistuu aktiivisesti kvanttisektoria muokkaavaan EU- ja kansainväliseen yhteistyöhön esimerkiksi vientivalvontaan, tutkimusturvallisuuteen, standardointiin, toimitusketjuturvallisuuteen ja TKI-rahoitukseen liittyvään kansainväliseen yhteistyöhön tuoden esille Suomen kyvykkyyksiä ja muovaten yhteistyötä kansallisten etujen pohjalta.</p> <p>Kansallisten ja EU tavoitteiden ja -toimien yhteensovittamista edistetään määrätietoisesti. Yhteensovittaminen on pitkäjänteistä ja tällä huolehditaan, että kansallista vastinrahoitusta on riittävästi EU toimien varalle</p> <p>Vastuutahot: TEM, UM, OKM, LVM, Business Finland, Suomen Akatemia, Traficom</p>	<p>Suomeen ohjautuva EU:n rahoituksen määrä kvanttitekniikan osalta on kasvanut merkittävästi edelliseen ohjelmakautteen verrattuna.</p> <p>EU Quantum Chips Planin toimeenpanoa tukevaa kvanttisirulinjojen rahoitusta onnistutaan kotiuttamaan. Suomalaisilla toimijoilla on vahva rooli Quantum Planin toteutuksessa.</p> <p>Vientivalvontaneuvottelukunnan yhteydessä on syvennetty julkisen ja yksityisen sektorin vuoropuhelua vientivalvontaan liittyvissä kysymyksissä.</p> <p>TKI-rahoitustoiminnassa huomioidaan kattavasti tutkimusturvallisuus.</p> <p>Kvanttitekniikkaan tarvittavien komponenttien valmistamisen ja toimitusketjujen osalta voidaan varmistua siitä, että ne on tuotettu maanosissa ja yrityksissä, joissa kansallinen turvallisuus voidaan huomioida.</p>	<p>EU-ohjelmat tukevat kvanttitekniikan kehitystä Suomelle edullisella tavalla.</p> <p>Vientivalvonnassa on EU-tasolla yhdenmukainen lähestymistapa kvanttitekniikkaan.</p> <p>Tutkimusturvallisuuden näkökulma huomioidaan ja toteutuu poikkihallinnollisesti ja TKI-toiminnassa.</p> <p>Suomalaistoimijat ovat edustettuina eurooppalaisissa kvanttitekniikka-alan toimitusketjussa.</p> <p>Suomalaisella kvanttitekniikalla pystytään vastaamaan markkinoiden tarpeisiin tuotantovolyymien kasvaessa.</p>

Toimenpide	2027 välitavoite	2030 välitavoite
<p>Suomi valitsee yhteistyökumppaninsa huomioiden tutkimuksellisia, kaupallisia ja ulko- ja turvallisuuspoliittisia intressejä.</p> <p>Vastuutaho TEM, UM, OKM</p>	<p>Kansallista vastinrahoitusta kohdennetaan valikoituun EU- ja kansainväliseen yhteistyöhön.</p>	<p>Tutkimus- ja kaupallinen yhteistyö valittujen kumppanimaiden kanssa on syventynyt merkittävästi.</p>
<p>Suomi vaikuttaa aktiivisesti kansainvälisten standardien kehitykseen. Kansallinen kvanttiteknologia-alan standardointityötä koordinoiva taho tukee myös pk-yritysten osallistumismahdollisuuksia kansainväliseen standardointityöhön.</p> <p>Vastuutahot: TEM, LVM, VTT, Traficom, standardointijärjestöt, yritykset</p>	<p>Kansallisessa standardointistrategiassa on huomioitu kvanttiteknologia ja muut varhaisen kehitysvaiheen teknologiat erityispiirteineen.</p> <p>Suomi osallistuu kvanttiteknologiaan liittyvän standardoinnin kehittämiseen aktiivisesti osana virallisten organisaatioiden yhteistyöryhmiä sekä tukemalla avointa standardointityötä.</p>	<p>Suomi on vaikuttanut keskeisesti alan standardien muodostumiseen.</p>

5.8 Kansallinen koordinaatio, ennakointi, seuranta ja edunvalvonta

Organisoidaan ja resursoidaan alan kansallinen koordinaatio, seuranta, ja edunvalvonta verkostomaisena toimintana. Koordinaation kautta toteutetaan kansallinen osaamiskeskus, mahdollistetaan toimialan yhteisen tilannekuvan muodostaminen, yhteisten viestien ja tavoitteiden systemaattinen edistäminen, sekä alan keskeisimpien tapahtumien tehokas toteutus. Koordinaatio mahdollistaa myös tehokkaan pääsyn kansallisiin ja kansainvälisiin asiantuntija- ja yhteistyöverkostoihin niin akateemisella, hallinnollisella kuin yrityssectorilla. Koordinaatioresurssit kohdennetaan suoraan julkisten toimijoiden budjetteihin.

Taulukko 9. Kansallinen koordinaatio

Toimenpide	2027 välitavoite	2030 välitavoite
<p>Kansallisen kvantti-instituutin laajennus ja resursointi ulottumaan kaikkiin alalla toimiviin yliopistoihin ja tutkimuslaitoksiin.</p> <p>Vastuutahot: TEM, InstituteQ, korkeakoulut</p>	<p>Toiminta on laajentunut koskemaan 75 % kansallisista yliopistoista ja tutkimuslaitoksista, joissa tehdään alaan liittyvää tutkimusta ja opetusta.</p> <p>Edunvalvonta ja mahdollista toiminta kattavat laajasti tutkimuksen, koulutuksen, infrastruktuurit ja innovaatioekosysteemin sekä kansainvälisen yhteistyön implementoinnin erityisesti eurooppalaisen kvantti-deklaraation puitteissa.</p>	<p>Toiminta kattaa kaikki kansalliset yliopistot ja tutkimuslaitokset, joissa tehdään alaan liittyvää tutkimusta ja opetusta.</p>
<p>Alan toimijoiden, teknologisen kehityksen ja rahoituksen seuranta kansallisesti ja kansainvälisesti</p> <p>Teknologisen ja markkinoiden kehityksen ennakointi</p> <p>Vastuutaho TEM, OKM, UM</p> <p>Muut toimijat: Business Finland, VTT, Suomen Akatemia, CSC, InstituteQ</p>	<p>Kansallisen kvanttiekosysteemin (tutkimusorganisaatiot, yritykset), työvoiman, koulutuksen ja investointien seurantaan sekä raportointiin on olemassa yhteisesti hyväksytty prosessi ja mittaristo, joilla alan keskeisiä operatioita seurataan systemaattisesti.</p> <p>Kansainvälisen kvanttialan julkisrahoituksen seuranta on käynnissä ja tietoa jaetaan aktiivisesti kansallisen ekosysteemin toimijoille.</p> <p>Tutkimusalojen painopisteiden, teknologiaennakoinnin ja yritysten tarvekartoituksen pohjalta on luotu ennakointi- ja seurantatietoa hyödyntävä kansallinen ennakointimalli ("kvanttisää"), jota hyödynnetään strategian toimenpiteiden kohdentamisessa.</p>	<p>Kansallinen kvantti-koordinaatio tuottaa ajantasaista tilannekuvaa alan toimijoiden ja julkisen päätöksenteon tueksi.</p> <p>Kansallinen kvantti-teollisuuskatsaus tuottaa yritysten käyttöön kohdennettua ja ajantasaista dataa kilpailu- ja asiakassegmenteistä vähintään kaksi kertaa vuodessa.</p>

Toimenpide	2027 välitavoite	2030 välitavoite
<p>Julkishallinnon yhteisen tilannekuvan ylläpito kvantti-teknoologiaan liittyvistä geopoliittisista ja turvallisuusnäkökohdista.</p> <p>Vastuutahot: TEM, UM, PLM, SM, LVM, OKM</p> <p>Muut toimijat: Business Finland, Suomen Akatemia, VTT, Traficom</p>	<p>Tilannekuvan ylläpitämiseen on verkosto, jonka kesken tietoa jaetaan sekä julkishallinnon sisällä että vuoropuhelussa julkisen ja yksityisen sektorin välillä.</p>	<p>Suomalaistoimijat pystyvät varautumaan geopoliittisen tilanteen muutoksiin ja on olemassa kanavat, joiden kautta tukea toiminnan organisointiin ja päätöksentekoon on saatavilla.</p>
<p>Toimialan tunnettuuskampanjat, osaamisen ja mahdollisuuksien markkinointi kansallisesti ja kansainvälisesti.</p> <p>Vastuutaho: InstituteQ</p> <p>Muut toimijat: OKM, Business Finland, Teknologiateollisuus, Team Finland -verkosto</p>	<p>Vuosittain yksi kansallinen (suomi/ruotsi) ja yksi kansainvälinen tunnettuuskampanja kohdennettuna yrityksille, toinen nuorille aikuisille ja opiskelijoille, kolmas AMK- ja lukio-opettajille.</p> <p>Näkyminen ja mukanaolo muiden kriittisten teknologioiden kampanjoissa esim. Teknologiateollisuuden foorumeita hyödyntäen.</p>	<p>Suomi on houkutteleva maa kvanttialan osaajille. Tunnettuuskampanjat ovat nostaneet osallistujamääriä kansainvälisen yhteistyön ohjelmissa. Uusia yrityksiä on asettunut / syntynyt Suomeen.</p>

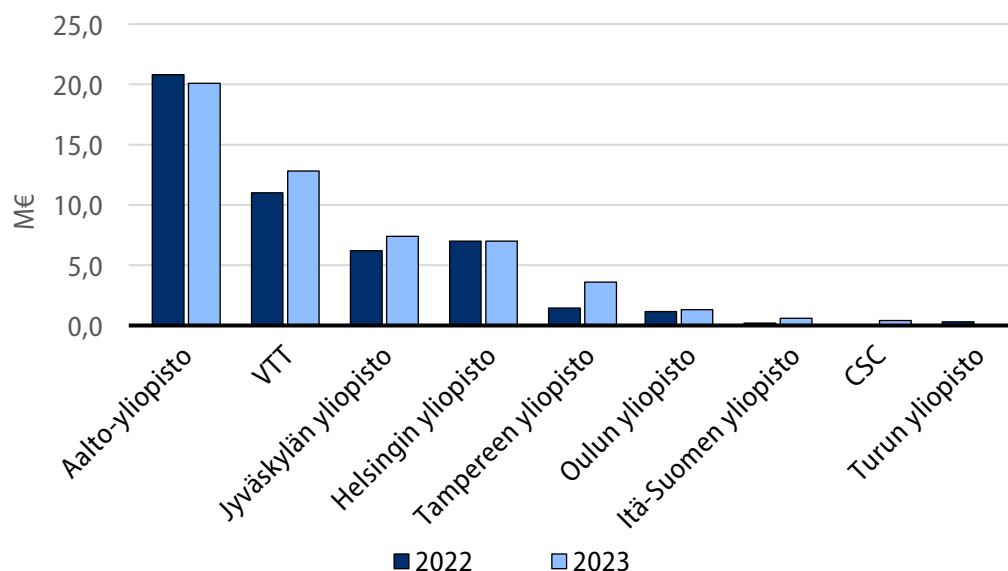
Liitteet

Liite 1. Julkiset panostukset Suomen kvanttiteknologia-alalle

Kokonaisvaltaisen arvion laatiminen julkisista panostuksista nimenomaan kvanttiteknologia-alalle ei ole aivan yksinkertaista ja niinpä määrää joudutaan arvioimaan. Ohessa kuvataan eräitä keskeisiä julkisen sektorin panostuksia.

Vuonna 2023 Suomen kvanttiteknologia-alaan liittyvän tutkimustoiminnan vuositasoinen kokonaisvolyymi yliopistoissa ja tutkimuslaitoksissa arvioitiin olevan 52 milj. euroa (luku ei pidä sisällään investointeja infrastruktuuriin). Tästä hieman yli 20 % oli Suomen Akatemian kilpailtua tutkimusrahoitusta, 17 % EU:n kilpailtua rahoitusta, ja 8 % Business Finlandin myöntämää TKI-rahoitusta.

Kuvio 3. Kvanttialan tutkimuksen volyyymi Suomessa v. 2022 ja 2023



Suomen Akatemia on myöntänyt vuosina 2020–2024 kvanttiaihepiirin tutkimukseen ja tutkimusympäristöille yhteensä noin 56 milj. euroa. Business Finland on rahoittanut kvanttialan TKI-toimintaa yhteensä 28 milj. eurolla vuosina 2020–2024. Tästä 11,2 milj. euroa on kohdennettu kvanttilaskenta-algoritmien, ohjelmistojen ja sovellusten t&k-toimintaan kvanttilaskentakampanjan kautta vuosina 2023–2024. Viime vuosina valtio on osoittanut merkittäviä lisäresursseja erityisesti kvanttietokoneisiin:

- 20,7 milj. euroa vuosille 2020–2024 VTT:lle 50-kubittisen kvanttietokoneen hankintaan ja kehitykseen (välitavoitteina 5- ja 20-kubittiset koneet)
- 70 milj. euroa vuosille 2024–2027 VTT:lle kvanttietokoneen skaalaamiseen 300 kubittiin
- 3 milj. euroa vuosille 2022–2025 Aalto-yliopistolle 20-kubittisen kvanttietokoneen hankintaan.
- 17,5 milj. euroa vuosille 2025–2032 CSC:n operoimalle LUMI AI Factoryn yhteyteen tulevalle LUMI-IQ kvanttilaskentaympäristölle (kokonaiskustannus 40 milj. euroa).

Kvanttinova -pilotointi- ja kehittämiskeskukseen hallitus on myöntänyt 79 miljoonaa euroa vuosille 2024–2027 yhteiskäyttöisten laitteiden hankintaan ja käyttöönottoon ja tähän on myönnetty myös EU:n sirusäädöksen rahoitusta.

Liite 2. Tausta-aineistoa aiheesta

InstituteQ: Finnish Quantum Agenda (2023). <https://instituteq.fi/wp-content/uploads/2023/02/FQA-February-2023.pdf>

Johansson, M.: Kvanttdatorer (2024). <https://www.sls.fi/publications/kvanttdatorer/>

Jyväskylän yliopisto: Kvanttilaskennan aakkoset -kurssikokonaisuus. <https://www.jyu.fi/fi/it/esittely/kvanttilaskennan-aakkoset>

OECD: A quantum technologies policy primer (2025). https://www.oecd.org/en/publications/a-quantum-technologies-policy-primer_fd1153c3-en.html

SITRA: Finland in the Race for Quantum Advantage (2024). <https://www.sitra.fi/en/publications/finland-in-the-race-for-quantum-advantage/>

Suomalainen tiedeakatemia: Tiedeisku kvanttiteknologiasta (2023). <https://acadsci.fi/tiede-ja-paatoksenteko-kategoria/tuore-tiedeisku-purkaa-kvanttiteknologian-merkitysta-ja-mahdollisuuksia/>

VTT: Kvanttilaskenta: Käytännön matkaopas kvanttilaskentaan (2025). <https://www.vttresearch.com/fi/syvenny-aiheeseen/kvanttilaskenta-kaytannon-matkaopas-tulevaisuuteen>

WEF: Embracing the Quantum Economy: A Pathway for Business Leaders (2025). <https://www.weforum.org/publications/embracing-the-quantum-economy-a-pathway-for-business-leaders/>

Verkkajulkaisu
ISSN 1797-3562
ISBN 978-952-327-628-4

Sähköinen versio: julkaisut.valtioneuvosto.fi