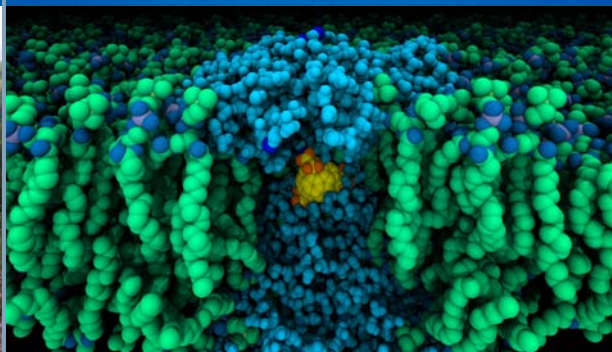


Suomen Akatemian julkaisu 2/11

# Nanovisio 2020



SUOMEN AKATEMIA  
TIETEEN RAHOITTAJA JA ASiantuntija

# NANOVISIO 2020

# SUOMEN AKATEMIA LYHYESTI

Suomen Akatemia rahoittaa korkealatuista tieteellistä tutkimusta, toimii tieteen ja tiedepolitiikan asiantuntijana sekä vahvistaa tieteen ja tutkimustyön asemaa. Toiminta kattaa kaikki tieteen- ja tutkimuksen alat.

Suomen Akatemian kehittämistoimien pääpaino on tutkijoiden uramahdollisuuksien monipuolisessa kehittämisessä, korkeatasoisten tutkimusympäristöjen edellytysten luomisessa ja kansainvälisten mahdollisuuksien hyödyntämisessä kaikilla tutkimuksen, tutkimusrahoituksen ja tiedepolitiikan alueilla.

Akatemialla on käytössään useita erilaisia tutkimusrahoitusmuotoja eri tarkoituksiin. Suomen Akatemian tutkimusrahoituksella edistetään kansainvälistä tutkimusyhteistyötä, sukupuolten tasa-arvoa ja rohkaistaan erityisesti tutkijanaisia hakemaan tutkimusvirkoja sekä tutkimusrahoitusta.

Suomen Akatemia rahoittaa tutkimusta vuosittain yli 340 miljoonalla eurolla. Se on noin 15 prosenttia Suomen valtion tutkimusrahoituksesta.

Akatemian rahoittamissa tutkimushankkeissa tehdään vuosittain noin 3000 tutkijatyövuotta yliopistoissa ja tutkimuslaitoksissa.

Akatemian rahoittama monipuolinen ja korkeatasoinen tieteellinen tutkimus tuottaa uutta tietoa ja uusia osaajia. Akatemia kuuluu opetusministeriön hallinnonalaan ja saa rahoituksensa valtion budjettivaroista.

Lisää tietoa Suomen Akatemiasta on verkkosivuilla osoitteessa [www.aka.fi](http://www.aka.fi).

Kannen kuvat:

1. Jaakko Uusitalo, Aalto-yliopisto: Laskennallisesti simuloitu vesiliukoisen fullereenijohdannaisen aiheuttama vesihuokonen lipidikaksoiskerroksessa. Lipidikaksoiskerros on osa solukalvoa ja tällaisia kaksoiskerroksia käytetään laskennallisessa tutkimuksessa solukalvon yksinkertaistettuina malleina.
2. Pixmac

Taitto: DTPage Oy

ISSN 0358-9153

ISBN 978-951-715-803-9 (pdf)

# SISÄLTÖ

Esipuhe.....	8
Tiivistelmä.....	9
Visio: Nanotiede ja -teknologia Suomessa vuonna 2020 .....	10
1 Johdanto .....	11
2 Nanotieteen keihäänkärjet 2005.....	13
3 Toimintaympäristön muutokset 2005–2010.....	14
3.1 Kotimaassa.....	14
3.2 Muualla maailmassa.....	19
4 Suomalainen nanotieteen ja -teknologian tutkimus 2010.....	23
4.1 Nanotutkimuksen keskittymät .....	23
4.2 Turvallisuustutkimus .....	28
4.3 Laskennallinen näkökulma nanotieteeseen.....	29
5 Visio 2020 .....	30
5.1 Nanotiede ja -teknologia Suomessa 2020.....	30
5.2 Tutkijoiden visio .....	32
5.3 Koulutusvisio .....	34
6 Johtopäätökset.....	36
Viitteet.....	38

# Kuvailulehti

<b>Julkaisija</b>	Suomen Akatemia		<b>Päivämäärä</b>	Toukokuu 2011
<b>Tekijä(t)</b>	Työryhmä			
<b>Julkaisun nimi</b>	Nanovisio 2020			
<b>Tiivistelmä</b>	<p>Suomen Akatemian nanotieteen tutkimusohjelman (FinNano, 2006–2010) päättyessä ohjelman arviointi toteutettiin kahdessa vaiheessa. Ensimmäisenä osuutena Akatemia, Tekes ja opetus- ja kulttuuriministeriö yhdessä arvioivat samanaikaisten ja rahoittajien välillä koordinoitujen ohjelmien vaikutuksia suomalaiselle nanotutkimusyhteisölle. Gaia Consulting Oy:n tekemä arviointi valmistui lokakuussa 2010. Tätä arviointia täydentämään päätettiin toteuttaa rajattu analyysi toimintaympäristön muutoksesta ohjelmakauden aikana sekä ennakoitiselvitys suomalaisen nanotieteen tutkimuksen tueksi. Ennakointityön kantavaksi kysymykseksi päätettiin ”Nanotieteen keihäänkärjet 2005 vs. tilanne tänään ja huomenna”.</p> <p>Raportissa esitetään katsaus nanotutkimuksen kansalliseen ja kansainväliseen toimintaympäristöön, suomalaisen nanotieteen keihäänkärkitutkimukseen, mukaan lukien uudet merkitykseltään kasvavaksi nähdyt alat, sekä esitetään johtoryhmän ja tutkijoiden näkemyksiin perustuva visio siitä, millaiseksi suomalaisen nanotutkimuksen asema voi kehittyä vuoteen 2020.</p> <p>Johtopäätöksissä todetaan, että nanotieteen ja -teknologian tutkimus on vuoden 2005 jälkeen kehittynyt nopeasti ja Suomessakin laajentunut merkittävästi. Valtiovallan kohdennetun tutkimusrahoituksen myötävaikutuksella on syntynyt suomalainen nanobrändi, johon kuuluu korkeatasoisen tutkimuksen lisäksi nanotutkimuksen infrastruktuuri. Panostus on kehittänyt kansainvälistymistä ja luonut pohjaa tulevaisuuden poikkitieteelliselle tutkimukselle. Nano nähdään yhtenä tärkeistä mahdollistaista tutkimusaloista (”enabling technology”). Potentiaalın hyödyntäminen ei ole kuitenkaan vielä aivan ilmeistä.</p> <p>Tarkastelukauden muutoksista voidaan päätellä, että kehitys jatkuu nopeana. Tutkimusalat lähentyvät, ymmärrys lisääntyy ja tämän myötä tulee uusia avauksia. Uusien avustusten tunnistaminen ja ennakoiminen on tärkeää ja tutkimuksen yleisistä edellytyksistä on pidettävä huolta. Nanohiukkasten ja -materiaalien terveys- ja ympäristövaikutusten huomioon ottaminen jo tutkimus- ja kehitysvaiheessa tulee todennäköisesti korostumaan.</p> <p>Visiona nähdään, että vuonna 2020 nanoteknologiat ovat vakiintuneet laajalti osaksi arkipäivää ja niille ominainen poikkitieteellinen tutkimustapa on hyvin kehittynyt. Nanotieteiden koulutus on tullut luonnolliseksi osaksi mm. luonnontieteiden, tekniikan ja lääketieteen koulutusta. Nanotutkimukselle ominainen tasapainoilu tieteen ja teknologian välimaastossa on johtanut luontevaan tasapainoon tutkijalähtöisen ja strategisesti ohjatun tutkimuksen välillä. Suomalaisen tutkimustiedon pohjalta on syntynyt uusia sovelluksia hyödynnettäväksi. Onnistuneen kansalaisviestinnän ansiosta ihmiset käyttävät vuonna 2020 päivittäin nanoteknologiaa hyödyntäviä tai sisältäviä tuotteita ja ovat tietoisia siitä, minkälaiseen käyttöön sisältyy riskejä ja minkälaiseen ei. Nanoteknologioiden hyödyntämisen ylisäättely on onnistuttu välttämään.</p>			
<b>Asiasanat</b>	nanotiede, nanoteknologia, nanotutkimus, nanoturvallisuus, tutkimusohjelmat			
<b>Julkaisusarjan nimi ja numero</b>	Suomen Akatemian julkaisuja 2/11			
<b>ISSN</b>	0358-9153			
<b>ISBN</b>	Painetulle kirjalle annettu tunnus	Pdf-versiolle annettu tunnus		
		978-951-715-803-9		
<b>Sivumäärä</b>				
<b>Julkaisun jakaja</b>	Suomen Akatemia, PL 99, 00501 Helsinki, <a href="mailto:viestinta@aka.fi">viestinta@aka.fi</a>			
<b>Julkaisun kustantaja</b>	Suomen Akatemia			
<b>Painopaikka ja -aika</b>				
<b>Muut tiedot</b>	<a href="http://www.aka.fi/julkaisut">www.aka.fi/julkaisut</a>			

## Description

<b>Publisher</b>	Academy of Finland	Date	May 2011
<b>Author(s)</b>	Working group		
<b>Title</b>	Nanovisio 2020		
<b>Abstract</b>	<p>At the end of the Academy of Finland's Nanoscience Research Programme (FinNano, 2006–2010) the program evaluation was carried out in two stages. The first step was a joint evaluation launched jointly by the Academy of Finland, Tekes and the Ministry of Education and Culture. The scope of this evaluation was the effect of simultaneous and coordinated programs of these partners on Finnish nanotechnology research community. The assessment made by Gaia Consulting Oy's was completed in October 2010. It was then agreed to complement the assessment by an analysis of the change of research environment during the program period and a limited forecast to support nanoscience research. The overarching issue was decided as "Nanoscience spearheads in 2005 vs. the situation today and tomorrow."</p> <p>This report provides an overview of the national and international environment of nanoscience and nanotechnology research, the Finnish nanoscience spearheads, including emerging important sectors, and presents the views of the steering committee and researchers on a vision of how Finnish nanotechnology research could develop up to 2020.</p> <p>It is concluded that nanoscience and technology research has evolved rapidly and expanded significantly since 2005, also in Finland. Targeted government funding has helped to create a Finnish nano brand, including nano-research infrastructure in addition to high quality research. Internationalization has developed and these efforts have created the basis for future cross-disciplinary research. Nanotechnology is seen as one of the important enabling technologies. Realising the potential, however, is not yet obvious.</p> <p>From the development during the review period it can be concluded that rapid development will continue. Areas of research converge, understanding will increase and there will be new openings. Prediction and identification of such openings is important, and the general conditions of research must be taken care of. Taking the health and environmental impact of nanoparticles and nanomaterials into account in research and development is likely to become more important than today.</p> <p>The vision presented in the report predicts that in 2020 nanotechnologies are widely established as part of everyday life and their interdisciplinary research approach is well developed. Nanoscience education has become a natural part of the, e.g., science, engineering and medical education. The characteristic of nanoscience – balancing science and technology – has led to a natural balance between investigator-driven research and strategically guided research. New applications based on Finnish research have emerged. Thanks to successful communication, in 2020 people utilize nanotechnology-based or nanotechnology-containing products and applications being aware of what kind of use is risky and what kind is not. Overregulation of exploitation of nanotechnologies has successfully been avoided.</p>		
<b>Key words</b>	nanoscience, nanotechnology, nano-research, nanosafety, research programmes		
<b>Name and number of series</b>	Publication of the Academy of Finland 2/11		
<b>ISSN</b>	0358-9153		
<b>ISBN</b>	Print	Pdf	978-951-715-803-9
<b>Number of pages</b>			
<b>Distributed by</b>	Academy of Finland, POB 99, FI-00501 Helsinki, <a href="mailto:viestinta@aka.fi">viestinta@aka.fi</a>		
<b>Published by</b>	Academy of Finland		
<b>Place and date of printing</b>			
<b>Other information</b>	<a href="http://www.aka.fi/publications">www.aka.fi/publications</a>		

# ESIPUHE

Suomen Akatemian FinNano-tutkimusohjelman ollessa päättymässä ohjelman johtoryhmä keskusteli tavasta, jolla ohjelman loppuarviointi voitaisiin tarkoituksenmukaisesti toteuttaa. Ohjelma oli osa kansallista nanotieteen ja -teknologian kehittämisohjelmaa, johon Akatemian tutkimusohjelman lisäksi kuuluivat Tekesin teknologiaohjelma sekä opetus- ja kulttuuriministeriön (OKM) hankerahat nanotutkimuksen infrastruktuureille. Vuonna 2009 Akademia, Tekes ja OKM päättivät toteuttaa yhteisen arvioinnin erityisesti nanotutkimukseen kohdistetun panostuksen vaikuttavuuden näkökulmasta. Moniin Akatemiaa kiinnostaviin tutkimusohjelmien arvioinnin kysymyksiin saatiin vastaukset tässä Gaia Consulting Oy:n vuonna 2010 toteuttamassa arvioinnissa. Yhteisarviointia täydentämään päätettiin toteuttaa pienimuotoinen ennakointihanke, jonka tavoitteena oli kartoittaa näkemyksiä nanotieteen ja -teknologian kehittymisestä Suomessa. Tämä dokumentti on tehdyn ennakointityön loppuraportti.

Tutkimusohjelman johtoryhmään kuuluivat ohjelman päättyessä professori Heli Jantunen (Oulun yliopisto, puheenjohtaja), professori Jaana Bamford (Jyväskylän yliopisto, varapuheenjohtaja), professori Johanna Myllyharju (Oulun yliopisto), professori Heikki Tenhu (Helsingin yliopisto), opetusneuvos Erja Heikkinen (OKM), professori Jorma Jokiniemi (VTT ja Itä-Suomen yliopisto), vanhempi asiantuntija Eeva-Liisa Lakomaa (Vaisala Oyj), teknologia-asiantuntija Markku Lämsä (Tekes) ja akatemiaprofessori Kari Rissanen (Jyväskylän yliopisto). Ennakointi-

hankkeen toteuttamiseen kutsuttiin asiantuntijaryhmä, johon johtoryhmän jäsenistä kuuluivat Heli Jantunen, Jaana Bamford, Erja Heikkinen ja Markku Lämsä ja lisäksi kutsuttuina asiantuntijoina erikoistutkija Jukka Ahtiainen (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto), professori Markku Leskelä (Helsingin yliopisto), teknologiapäällikkö Pia Qvintus-Leino (VTT) sekä professori Ilpo Vattulainen (Tampereen teknillinen yliopisto). Työryhmän sihteerinä toimi ohjelmapäällikkö Anssi Mälkki Suomen Akatemiasta. Työryhmä kokoontui itsenäisesti kolme kertaa sekä yhden kerran yhdessä ohjelman johtoryhmän kanssa.

Työn määrittelyn täsmentämisestä alkanut prosessi saatiin tavoiteaikataulussa päätökseen ja toivomme, että tutkijayhteisö sekä tutkijoita lähellä olevat toimijat löytävät lopputuloksena syntyneestä raportista näkökulmia työnsä tueksi, erityisesti paikallisesti tehtävän tutkimustyön sijoittamiseen laajempaan kontekstiin ja katsauksena elämäämme välttämättä vaikuttavan (nanotiede)poliittiseen toimintaympäristöön. Esitämme myös näkemyksen siitä, millaiseksi nanotutkimuksen ja -teknologian asema Suomessa voi sopivissa olosuhteissa kehittyä.

Helsingissä 18.3.2011

Heli Jantunen

professori, Oulun yliopisto  
Visio 2020 -työryhmän ja  
FinNano-johtoryhmän puheenjohtaja  
Suomen Akademia, Luonnontieteen ja  
tekniikan tutkimuksen toimikunta



# TIIVISTELMÄ

Suomen Akatemian nanotieteen tutkimusohjelman (FinNano, 2006–2010) päättyessä ohjelman johtoryhmä päätti toteuttaa ohjelma-arvioinnin kahdessa vaiheessa. Ensimmäisenä osuutena Akatemia, Tekes ja opetus- ja kulttuuriministeriö yhdessä arvioivat samanaikaisten ja rahoittajien välillä koordinoitujen ohjelmien vaikutuksia suomalaiselle nanotutkimusyhteisölle. Gaia Consulting Oy:n tekemä arviointi valmistui lokakuussa 2010. Tätä arviointia täydentämään päätettiin toteuttaa rajattu analyysi toimintaympäristön muutoksesta ohjelmakauden aikana sekä ennakoitiselvitys suomalaisen nanotieteen tutkimuksen tueksi. Ennakointityön kantavaksi kysymykseksi päätettiin ”Nanotieteen keihäänkärjet 2005 vs. tilanne tänään ja huomenna”.

Raportissa esitetään katsaus nanotutkimuksen kansalliseen ja kansainväliseen toimintaympäristöön, suomalaisen nanotieteen keihäänkärkitutkimuksen muutoksiin vuoden 2005 jälkeen, mukaan lukien uudet merkitykseltään kasvaviksi nähdyt alat, sekä esitetään johtoryhmän ja tutkijoiden näkemyksiin perustuva visio siitä, millaiseksi suomalaisen nanotutkimuksen asema voi kehittyä vuoteen 2020.

Johtopäätöksissä todetaan, että nanotieteen tutkimus on vuoden 2005 jälkeen kehittynyt nopeasti ja Suomessakin nanotieteen ja -teknologian tutkimus ja koulutus on kehittynyt ja laajentunut merkittävästi. Valtiovallan kohdennetun tutkimusrahoituksen myötävaikutuksella on syntynyt suomalainen nanobrändi, johon kuuluvat korkeatasoisen tutkimuksen lisäksi hyvin tiedossa ja käytössä oleva nanotutkimuksen infrastruktuuri. Panostus on myös kehittänyt selvästi kansainvälistymistä ja luonut pohjaa tulevaisuuden poikkitieteelliselle tutkimukselle uu-

della tavalla. Nano nähdään (edelleen) yhtenä tärkeistä mahdollistavista tutkimusaloista (”enabling technology”), jolla on potentiaalia mm. lähes kaikkien strategisen huippuosaamisen keskustusten kannalta. Potentiaalinen hyödyntäminen ei ole kuitenkaan vielä aivan ilmeistä.

Tarkastellun viiden vuoden muutoksista voidaan yleisesti päätellä, että kehitys jatkuu nopeana. Tutkimusalat lähentyvät ja ymmärrys lisääntyy ja tämän myötä tulee uusia avauksia. Uusien avausten tunnistaminen ja ennakoiminen on tärkeää, erityisesti pienelle maalle kuten Suomi, ja tutkimuksen yleisistä edellytyksistä on pidettävä huolta. Nanohiukkasten ja -materiaalien terveys- ja ympäristövaikutusten huomioon ottaminen jo tutkimus- ja kehitysvaiheessa tulee todennäköisesti korostumaan.

Visiona nähdään, että vuonna 2020 nanoteknologiat ja niiden tutkimus ovat vakiintuneet laajalti osaksi arkipäivää, ja niille ominainen poikkitieteellinen tutkimustapa on hyvin kehittynyt. Nanotieteiden koulutus on integroitunut luonnolliseksi osaksi mm. luonnontieteiden, tekniikan ja lääketieteen koulutusta. Nanotutkimukselle ominainen tasapainoilu tieteen ja teknologian välimaastossa on myös vuoteen 2020 mennessä johtanut luontevaan tasapainoon tutkijalähtöisen (bottom-up) ja strategisesti ohjatun (top-down) tutkimuksen välillä. Suomalaisen tutkimustiedon pohjalta on syntynyt uusia sovelluksia hyödynnettäväksi. Onnistuneen kansalaisviestinnän ansiosta ihmiset käyttävät vuonna 2020 päivittäin nanoteknologiaa hyödyntäviä tai sisältäviä tuotteita ja ovat tietoisia siitä, minkälaiseen käyttöön sisältyy riskejä ja minkälaiseen ei. Tieto perustuu tutkimukseen ja vielä vuonna 2010 huolena ollut ylisäätely on onnistuttu välttämään.



# VISIO: NANOTIEDE JA -TEKNOLOGIA SUOMESSA VUONNA 2020

Nanoteknologiat ja niiden tutkimus ovat vakiintuneet laajalti osaksi arkipäivää, ja niille ominainen poikkitieteellinen tutkimustapa on hyvin kehittynyt. Nanotieteiden koulutus on integroitunut luonnolliseksi osaksi mm. luonnontieteiden, tekniikan ja lääketieteen koulutusta ja siten lähes kaikki alan opiskelijat kasvavat sisään nanotieteen poikkitieteelliseen ajatteluun opintojensa aikana. Tämän lisäksi nanotiede on tärkeä oppiala pääainekoulutuksessa.

Nanotutkimukselle ominainen tasapainoilu tieteen ja teknologian välimaastossa on vuoteen 2020 mennessä johtanut luontevaan tasapainoon tutkijalähtöisen (bottom-up) ja strategisesti ohjatun (top-down) tutkimuksen välillä. Suomalaisen tutkimustiedon pohjalta on syntynyt uusia sovelluksia hyödynnettäväksi.

Onnistuneen kansalaisviestinnän ansiosta ihmiset käyttävät päivittäin nanoteknologiaa hyödyntäviä tai sisältäviä tuotteita ollen tietoisia siitä, mihin sisältyy riskejä ja mihin ei. Tieto perustuu tutkimukseen ja vielä vuonna 2010 huolena ollut ylisäättely on onnistuttu välttämään.

Visiota, sen perusteita ja vision toteutumisen edellytyksiä käsitellään laajemmin luvussa 5.1

# I JOHDANTO

Suomen Akatemia rahoitti vuosina 2007–2010 nanotieteen tutkimusta FinNano-tutkimusohjelmansa kautta 15 tutkimuskonsortiossa yhteensä 9,45 miljoonalla eurolla. Hankkeissa on työskennellyt tutkijoita 53 tutkimusryhmästä. Akatemian käytännön mukaan tutkimusohjelma arvioidaan sen päättyessä.

Nanotieteen ja -teknologian tutkimusta ovat vuosina 2005–2010 rahoittaneet erityisillä määrärahoilla Suomen Akatemian lisäksi myös Tekes ja opetus- ja kulttuuriministeriö, jotka yhdessä teettivät arvioinnin samanaikaisten ja rahoittajien välillä koordinoitujen ohjelmien vaikutuksista suomalaiselle nanotutkimusyhteisölle. Gaia Consulting Oy:n tekemä arviointi valmistui lokakuussa 2010.

Mainitun yhteisarvioinnin kattaessa pääosan Akatemian ohjelma-arvioinnissa selvitettävistä kysymyksistä Suomen Akatemian FinNano-ohjelman johtoryhmä päätti, että erillistä tieteellisten tulosten arviointia ei FinNanosta järjestetä. Sen sijaan päätettiin toteuttaa rajattu analyysi toimintaympäristön muutoksesta ohjelmakauden aikana sekä ennakoitiselvitys (”mini-foresight”) suomalaisen nanotieteen tutkimuksen tueksi. Ennakointityön kantavaksi kysymykseksi päätettiin ”Nanotieteen keihäänkärjet 2005 vs. tilanne tänään ja huomenna”.

## **Nanotieteen keihäänkärjet 2005**

Opetusministeriö asetti 27.4.2005 nanotieteen osaamisen kehittämiseksi työryhmän, jonka tehtäväksi annettiin edistää nanotieteen ja -teknologian tutkimusta ja opetusta yliopistoissa sekä laatia ehdotus nanotieteen ja -teknologian kehittämisohjelmasta yliopistoissa vuosina 2007–2009. Tehtäväksiannon mukaan työryhmän tuli ottaa kehittämisohjelmassa huomioon valtioneuvoston julkisen tutkimusjärjestelmän kehittämistä koskevan periaatepäätöksen linjaukset sekä tarkoituksenmukaisella tavalla ammattikorkeakoulujen rooli nanotieteessä ja -teknologiassa.

Toimeksiantonsa mukaisesti työryhmä selvitti suomalaisen nanotutkimuksen tilan ja tason vuonna 2005 sekä teki lukuisia esityksiä tutkimuksen ja opetuksen kehittämiseksi. Työn tulokset on esitetty raportissa ”Nanotieteen keihäänkärjet Suomessa” [OPM 2005]. Tämän työn kannalta tärkeimmät löydökset on esitetty luvussa 2.

## **FinNano-ohjelmien ja OKM:n nanorahoituksen yhteisarviointi 2010**

Yhteisarvioinnin kohteiksi täsmennettiin Tekesin ja Akatemian FinNano-tutkimusohjelmat ja opetusministeriön nanotieteen hankerahoitus 2007–2009 sekä jälkiarviointi Akatemian ja Tekesin vuosina 1996–1999 toteuttamasta Nanoteknologian ohjelmasta.

Arvioinnin tavoitteena oli tuottaa suosituksia innovaatiopolitiikan ja Teke-sin ohjelmapirosessin kehittämiseen, hallinnonalojen välisen rahoittajayhteistyön vahvistamiseen ja alan tutkimus-, kehitys- ja innovaatio toiminnan strategiseen kehittämiseen. Tavoitteena oli myös selvittää julkisen t&k&i-rahoittajien yhteisvaikutus nanotieteiden ja nanoteknologian kehittymiseen Suomessa ja sen vaikutukset kansainväliseen asemaan.

Arvioinnin mukaan nano-ohjelmat olivat mahdollistaneet poikkitieteellisten näkemysten kehittymisen sekä sellaisten tutkimusryhmien muodostumi-

sen, joita ei olisi voitu muodostaa muilla rahoitusjärjestelyillä. Ohjelmat ja niiden välinen yhteistyö ovat jopa pitäneet suomalaisen nanosektorin hengissä, arvioissa todettiin.

Suomen Akatemian FinNano-tutkimusohjelmaa arviointi piti keskeisenä rahoituksen lähteenä suomalaiselle nanotieteen tutkimukselle. Ohjelmassa rahoitettiin useamman ryhmän muodostamia konsortioita, mikä edisti monitieteisen tutkimusyhteistyön ja laajempien tutkimussuunnitelmien toteutumista. Yksittäisten ryhmien saaman rahoituksen todettiin kuitenkin jääneen pieneksi.

## 2 NANOTIETEEN KEIHÄÄNKÄRJET 2005

Keihäänkärkityöryhmä pyrki työssään löytämään Suomessa vuonna 2005 olemassa olleet tutkimuskeskittymät. Opetus- ja kulttuuriministeriön tavoite oli kohdentaa nanotieteen ja -teknologian tutkimuksen edistämiseen käytettäväksi varatut erityismäärärahat siten, että ne tukisivat olemassa olevaa kriittisen massan ylittävissä toimintaympäristöissä tehtyä tutkimusta, eivätkä kuluisi tutkimusympäristön luomiseen. Raporttiin on määritetty tällaiset keskittymät sekä lisäksi koottu katsaus nanotieteen ja -teknologian tutkimuksen toimintaympäristöstä maailmanlaajuisesti (kansainvälinen viitekehys) ja erityisesti kotimaisen tutkimuksen tilasta vuonna 2005.

Jo vuonna 2005 nanotieteen ja teknologian tutkimusta tehtiin laajasti luonnontieteellistä tutkimusta tekevissä yliopistoissa ja tutkimuslaitoksissa. Raportissa mainitaan Helsingin, Joensuun, Jyväskylän, Turun ja Oulun yliopistot, Teknillinen korkeakoulu, Tampereen teknillinen yliopisto, VTT sekä Åbo Akademi. Tutkimusaloina mainitaan tuolloin nanorakenteet, mikro- ja nanoelektroniikka (sekä niihin liittyvät erityisalat), ohutkalvotekniikat, optoelektroniikka/fotoniikka, nanoputket ja fullereenit, sekä kemian nanotiedettä ja -teknologiaa sivuavat alat, erityisinä esi-

merkkeinä supramolekyylikemia ja polymeerinanokemia. Aloja tutkittiin myös teoreettisin ja laskennallisin menetelmin. Jo tällöin nähtiin, että osaa biotieteen tutkimuksesta voidaan pitää nanotieteenä tai -teknologiana niiden poikkitieteellisten lähestymistapojen tai sovellusten kautta. Raportissa pyrittiin kuitenkin erottamaan biotieteellisestä tutkimuksesta bionanotiede ja -teknologia, joka aidosti hyödyntää nanomittakaavan ominaisuuksia uudella tavalla. Tällaisina mainittiin itsejärjestymisen ja spesifin tunnistus, nanobiomateriaalit sekä eräät biokemian, molekyylibiologian, virologian ja solubiologian tutkimussuunnat.

Raportissa identifioitiin kolme kansallista nanotieteen keihäänkärkeä. Nämä olivat 1) pääkaupunkiseudun tutkimuskeskittymä, jossa Teknillinen korkeakoulu (TKK), Valtion teknillinen tutkimuslaitos (VTT) ja Helsingin yliopisto (HY) kehittivät yhteistyötään Helsinki-Nano -konsortiossa [HelsinkiNano 2005], 2) Jyväskylän yliopiston (JY) monitieteinen NanoScience Center sekä 3) Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) johtama nanofotoniikan konsortio, johon kuuluivat myös Joensuun yliopisto (JoY) sekä Oulun yliopiston (OY) tutkimusryhmiä.

# 3 TOIMINTAYMPÄRISTÖN MUUTOKSET 2005–2010

Seuraavassa pyritään kokoamaan yhteen tärkeimpiä tutkimusohjelmakaudella 2005–2010 tapahtuneita toimintaympäristön muutoksia. Kansainvälinen kehitys on luonnollisesti vaikuttanut voimakkaasti Suomessa tapahtuneisiin muutoksiin, joten alla käytetty jako eri otsikoiden alle ei ole täysin yksikäsitteinen. Kotimaisten toimenpiteiden voidaan kuitenkin ajatella vaikuttavan välitömämmin siihen, miten nanoalan tutkimus kehittyy, joten jako on perusteltavissa.

## 3.1 Kotimaassa

Kotimaisen toimintaympäristön muutokselle voidaan nähdä kaksi ajuria. Suomen Akatemian, Tekesin ja opetus- ja kulttuuriministeriön nanotieteen ja -teknologian tutkimukselle kohdentama erityisrahoitus on varmasti muuttanut myös niiden tutkimusryhmien toimintaympäristöä, jotka eivät ole suoraan saaneet rahoitusta. Suomen Akatemian FinNano-tutkimusohjelmassa rahoitettiin vuosina 2007–2010 nanotieteen 15 tutkimuskonsortiota yhteensä 9,45 miljoonalla eurolla. Hankkeissa on työskennellyt tutkijoita 53 tutkimusryhmästä. Tekesin FinNano-ohjelmassa rahoitettiin alan tutkimus- ja kehitystoimintaa yhteensä noin 40 miljoonalla eurolla. Ohjelmassa oli mukana 58 tutkimusprojektia ja 54 yritysprojektia. Lisäksi opetus- ja kulttuuriministeriö kohdensi vuosina 2005–2009 yhteensä lähes 31 miljoonaa euroa nanotieteen infrastruktuurien kehittämiseen.

Kohdennetun tutkimusrahoituksen lisäksi tutkimuksen yleinen toimintaympäristö on erityisesti viime vuosina toteutettujen hallintoon kohdistuneiden

toimenpiteiden (kuten yliopistojen oikeudellisen aseman muuttuminen) johdosta muuttumassa. Nanoalalla tapahtunut ja tapahtuva hyvinkin nopea kehitys on sekä sisäinen että ulkoinen ajuri tutkimuksen toimintaedellytyksille ja sen suuntaamiselle.

Gaian tekemässä arvioinnissa [Gaia 2010] todettiin kohdennetun rahoituksen merkityksen olleen merkittävä (lainaus raportin suomenkielisestä tiivistelmästä):

*Ensinnäkin ohjelmat ovat olleet käytännössä ainoita nanotieteen ja -teknologian koordinoituja kansallisia rahoituslähteitä. Rahoituksen kannalta niiden vaikutus on siis ollut sektorilla valtava. Rahoitus on kiihdyttänyt tuotekehitystä ja tarjonnut tutkijoille mahdollisuuden lisätä kyseisen aihealueen tietämystään. Joissain tapauksissa ohjelmien rahoitusjärjestelyt ovat toimineet ponnahduslautana lisärahoituksen saamiseen, joka taas on vahvistanut tutkimusryhmien toimintaa entisestään.*

*Ohjelmat ovat myös yhdistäneet tutkimuksen ja liiketoiminnan tiiviimmäksi kuin mitä se oli ennen ohjelmien aloitusta. Voidaan jopa sanoa, että nano-ohjelmat ovat pitäneet suomalaisen nanosektorin hengissä. Tämä taas herättää kysymyksen siitä, mitä tapahtuu kun ohjelmat päättyvät. Nano-ohjelmat ovat mahdollistaneet poikkitieteellisten näkemysten kehittymisen sekä sellaisten tutkimusryhmien muodostumisen, joita ei olisi ollut mahdollista muodostaa muilla rahoitusjärjestelyillä. Jää nähtäväksi mihin suuntaan ala näiden projektien jälkeen kehittyy. Arvioijien näkökulmasta poikkitieteelliset ja ennakkoluulottomat uudet projektit ovat yksi avain Suomen*

*menestymiselle. Nano-ohjelmat ovat onnistuneet tukemaan tätä ajattelutapaa ansiokkaasti.*

*Ohjelmat ovat lisänneet nanotieteiden ja -teknologian tunnettuutta. Etenkin Tekesin rahoituksen avulla on saavutettu paljon, kun tutkimustuloksia on voitu esitellä ja tarjota teollisuuden käyttöön. Suomen Akatemian rahoitus on toisaalta tukenut tutkijoita paljon ja auttanut näitä saamaan lisärahoitusta toisista rahoituslähteistä.*

Suomen Akatemia on FinNano-ohjelmakauden aikana rahoittanut nanotieteen tutkimusta ohjelman lisäksi yleisten tutkimusmäärärahojen kautta noin 10 miljoonalla eurolla vuosittain. Summa vastaa tutkimusohjelman kohdennettua rahoitusta ja nelivuotisella ohjelmakaudella tämä rahoitus on yhteensä neljä kertaa ohjelman volyymin suuruinen. Tämä voidaan nähdä indikaationa nanotieteen kilpailukyvyistä ja vahvistaa edelleen käsitystä ohjelman ajankohtaisuudesta. Samalla voidaan sanoa, että toisinaan esitetty huoli nanotieteen tutkimuksen tulevaisuudesta ohjelman päättyessä ei välttämättä ole vakava: Suomen Akatemian tutkimusohjelmasta riippumaton rahoitus nanotieteen ja -teknologian tutkimukselle on ollut varsin vakaa ja ohjelmaan verrattuna volyymiltaan merkittävää, eikä ole nähtävissä, että se olisi tulevaisuudessakaan vähenemässä.

### **Opetus- ja kulttuuriministeriön näkökulma**

Nanotieteen ja -teknologian ohjelmien käynnistysvalmistelujen ja -päätösten jälkeen Suomen tiede- ja tutkimuspolitiikkaa on johdonmukaisesti Matti Vanhasen II sekä Mari Kiviniemen I hallitusohjelmissa koottu innovaatiopolitiikaksi, joka kattaa sekä julkiset että yksityiset tutkimusympäristöt. Valtioneuvosto teki periaatepäätöksen julkisen tutkimusjär-

jestelmän rakenteellisesta kehittämisestä 2005 ja sektoritutkimuksen kehittämisestä 2007. Lisäksi pääministerijohtoinen Tutkimus- ja innovaationeuvosto (aiemmin Tiede- ja teknologianeuvosto) julkaisi 2006 ja 2010 linjaraportit ja 2008 linjaukset, jotka tukevat kokonaisvaltaista innovaatiopolitiikan kehitystä.

Suomen innovaatiojärjestelmän kansainvälinen arviointi [Evaluation 2009] julkistettiin 2009. Samana vuonna ilmestyi Suomen Akatemian toimittama Tieteen tila ja taso -arviointi [SA 2009]. Pääviesti arvioinneista oli samansuuntainen: suomalainen tutkimuskenttä on pirstaleinen, organisaatioilla ei ole selkeitä profiileita ja rahoitus pilkkoutuu liian pieniin ja päällekkäisiin kohteisiin.

Korkeakoulujen uudenaikaistaminen ja rakenteellinen kehittäminen on mahdollistanut yksittäisten korkeakoulujen osallistumisen kansalliseen ja kansainväliseen yhteistyöhön ja työnjakoon aiempaa kilpailukykyisemmin. Yliopistot ovat muuttuneet valtion virastoista itsenäisiksi oikeushenkilöiksi, ja sekä yliopisto- että ammattikorkeakoulusektoreilla on tehostettu toimintaa karsimalla päällekkäisyyksiä, lopettamalla vetovoimattomia koulutusyksiköitä ja täsmentämällä organisaatioiden välistä työnjakoa. Korkeakoulujen uudet strategiat keskittyvät profiilin ja prioriteettien valitsemiseen. Kansainvälisyys toimintatapana on kaikille korkeakouluille haaste. Ennakoitavan ja läpinäkyvän tutkijanuran mahdollisuuksien kehittäminen koskee koko tutkimusjärjestelmää. Yliopistot uudistavat tutkijankoulutuksen rakenteita ja kehittävät arviointeihin pohjaavia vakinaistamismenettelyitä. Korkeakoulujen ohjausta ja rahoitusta uudistetaan kokonaisvaltaisempaan suuntaan pois yksityiskohdista ja korvamerkinnoista.

Entistä autonomisempien yliopistojen toiminnalta odotetaan valintoihin

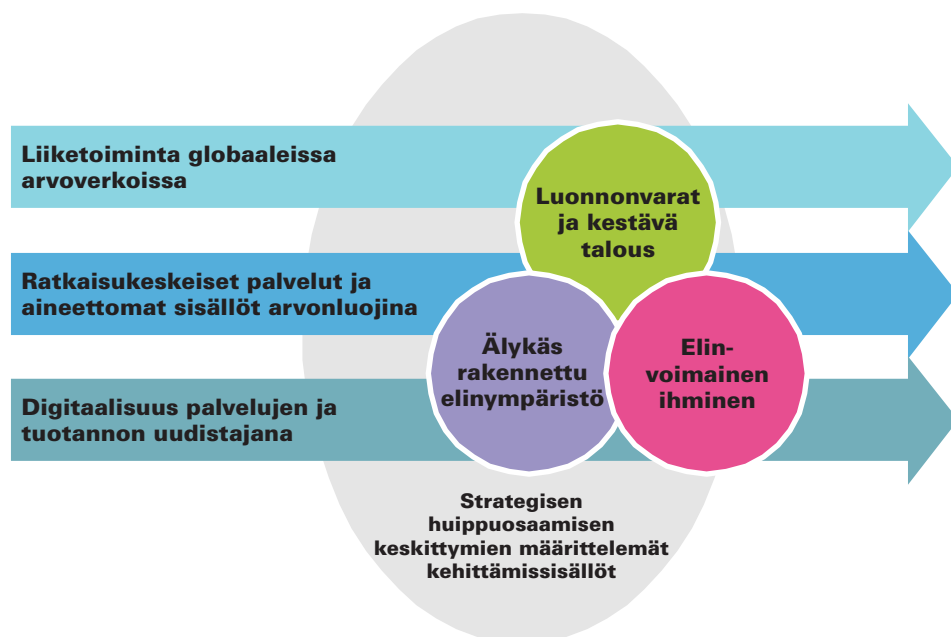
perustuvaa laadun ja vaikuttavuuden vahvistumista. Korkeakoulujen keskinäisen yhteistyön ja työnjaon lisäksi on selkeytettävä rooleja myös sektoritutkimuslaitosten kanssa. Sektoritutkimuskentän rakenteellinen kehittäminen on lähes kaikkien ministeriöiden vastuulla. Suurimmat edistysaskeleet sektoritutkimuskentän uudistamisessa on saavutettu hallinnonalojen sisällä.

Erityisesti laite- ja aineistointensiivisillä aloilla on välttämätöntä kansallisesti koordinoita tutkimuksen infrastruktuuriympäristöä ja julkisin varoin kerättyjen tutkimusaineistojen vapaata käyttöä. Kansallinen infrastruktuuritiekartta on tehty [OPM 2009] ja tiedonjakamisen periaatteita ja käytänteitä valmistellaan. Nanoalan koordinoitua on aloitettu ko-koamalla laiterekisteri [Nanocentre Finland 2009].

### **Tekesin näkökulma**

Tekes uusii määrävälein (3–4 vuotta) sisältölinjauksensa, jotka sisältävät perustellun näkemyksen lähivuosien tärkeim-

mistä tutkimus-, kehitys- ja innovaatio-toiminnan sisällöllisistä valinnoista. Tekes työstää linjaukset tiiviissä yhteistyössä elinkeinoelämän, järjestöjen ja julkisten toimijoiden kanssa. Tekesin tuoreet sisältölinjaukset julkistettiin maaliskuussa 2011. Sisältöteemoihin liittyvät valinnat ovat luonnonvarat ja kestävä talous, älykäs rakennettu elinympäristö ja elinvoimainen ihminen. Lisäksi poikkileikkaavina teemoina ovat liiketoiminta globaaleissa arververkoissa, ratkaisukeskeiset palvelut ja aineettomat sisällöt arvonluojina sekä digitaalisuus palvelujen ja tuotannon uudistajana. Materiaalien ja nanoteknologian sovellusosaaminen on mukana teemojen toteuttamisesta edellyttävissä osaamisissa. Tekes tarttuu teemoihin ohjelmilla sekä osallistamalla strategisen huippuosaamisen keskittymien kehittämiseen ja rahoittamiseen. Kokonaisuuteen kuuluvat lisäksi tutkimus-, kehitys- ja innovaatio-toimintaan kannustavat aktivointihankkeet sekä valitut kansainväliset yhteistyömuodot.



**Kuva 1.** Tekesin strategian sisällölliset painopisteet v. 2011.



Tekes on ollut mukana nanoteknologian kehittämisessä 1990-luvulta lähtien. Kehitys nopeutui vuonna 2005 Tekesin FinNano-ohjelman käynnistyessä. Vuonna 2009 päättyneessä ohjelmassa Tekes rahoitti alan t&k-toimintaa yhteensä noin 40 miljoonalla eurolla. Ohjelmassa oli mukana 58 tutkimusprojektiä (kokonaiskustannukset 33.0 M€) ja 54 yritysprojektiä (kokonaiskustannukset 43.3 M€). Ohjelman aikana nanoteknologiaa hyödyntävien yritysten lukumäärä kolminkertaistui ja vuonna 2009 yritysten määrä oli 200.

Suomen kansallinen vahvuus – myös nanoteknologian alalla – on yksityisten ja julkisten toimijoiden yhteistyö, josta nanoalueelta ovat hyvinä esimerkkeinä avoimeen innovaatiotoimintaa perustuvat yritysveroiset Tekeshankkeet: Nokian ja Aalto-yliopiston ”Nanosystems” ja UPM Kymmene Oyj:n, VTT:n ja Aalto-yliopiston ”Suomen Nanoselluloosakeskus”. FinNano-ohjelmassa kehitettiin uusia toimintatapoja toimijoiden väliseen yhteistyöhön. Erityisen hyödyllisinä pidettiin temaatista visiotyötä, jossa samalla sovellusalalla työskentelevät tutkijat ja teollisuuden edustajat yhdessä kartoittivat tulevaisuuden toiminnan mahdollisuuksia. Kansainvälisellä yhteistyöllä oli myös tärkeä rooli FinNano-ohjelmassa. Erityisesti panostettiin Eurooppa yhteistyöhön MNT ERA-NET:in [MNT 2004] puitteissa sekä rakennettiin nanoteknologia-yhteistyöpuitteet Kiinan ja Venäjän kanssa.

Tekes jatkaa nanoteknologiahankkeiden rahoittamista sovelluslähtöisesti mutta ei erillisenä ohjelmalla. Tekesin Toiminnalliset materiaalit -ohjelma (2007–2013) tarjoaa yhden toteuttamis-ympäristön nanoteknologian hankkeille. Kiinan ja Venäjän kanssa rakennettua nanoteknologian yhteistyötä tullaan

kehittämään edelleen vuonna 2011 ”Nanoyhteistyöllä Kiinaan ja Venäjälle – Nanotech Finland”-hankkeessa. Erityisesti pyritään vauhdittamaan pk-yritysten globaalia kasvua. Hankkeen kesto on kolme vuotta ja se toteutetaan yhteistyössä muiden suomalaisten innovaatio-toimijoiden kanssa.

### **Strategisen huippuosaamisen keskittymät (SHOK:it)**

Valtioneuvoston periaatepäätöksessä julkisen tutkimusjärjestelmän rakenteellisesta kehittämisestä keväällä 2005 todettiin, että Suomen kansallisena pyrkimyksenä on kestävä ja tasapainoinen yhteiskunnallinen ja taloudellinen kehitys. Tämän periaatepäätöksen pohjalta aloitettiin valmistelutyö, jonka pohjalta marraskuuhun 2010 mennessä on muodostettu kuusi Strategisen huippuosaamisen keskittymää (SHOK). SHOK:it toimivat yhtiömuotoisina ja niiden osakkaat laativat keskittymän tutkimusstrategian ja päättävät sen toteuttamisesta. Osakkaina on teollisuutta, tutkimuslaitoksia ja yliopistoja. Myös tahot, jotka eivät ole osakkaita, voivat osallistua keskittymän tutkimusohjelmiin ja hankkeisiin. Keskittymän tutkimustyö tehdään virtuaalisessa tutkimusorganisaatiossa, joka voi muodostua maantieteellisesti eri paikoissa olevista yksiköistä.

Nanotiede ja -teknologia on poikkeileikkaava tutkimusala, jota sellaisenaan ei ole nimeltä mainittuina otsikkotason painopisteenä SHOK:ien strategioissa. Monikäyttöisen luonteensa vuoksi voidaan kuitenkin nähdä, että nanoskaalan ilmiöiden hyödyntämisen potentiaali on suuri useimpien SHOK:ien alalla. Tätä kirjoitettaessa on kuitenkin vielä aikaista arvioida mikä on SHOK-tutkimuksen rooli nanotieteen tulevaisuuteen.

## SHOKIT: Case Metsäklusteri

Innovaatioyritys Metsäklusteri Oy perustettiin maaliskuussa 2007 tehtävään käynnistää strategisen huippuosaamisen keskittymän tutkimusohjelmat ja kanavoida niille yksityistä ja julkista rahoitusta. Perustamalla Metsäklusteri Oy käynnistettiin Suomen ensimmäisen strategisen huippuosaamisen keskittymän (SHOK) toiminta. Metsäklusteri Oy:n omistavat joukko metsäklusterin yrityksiä, VTT, Metsäntutkimuslaitos (Metla) sekä 8 yliopistoa. Metsäklusteri Oy:n tehtävänä on tutkimus- ja innovaatioohjelmien käynnistäminen sekä tutkimusrahoituksen kanavointi valituille painopistealueille. Yritys vastaa klusterin strategisen huippuosaamisen keskittymän toiminnasta ja johtaa keskittymän tutkimushankkeita. Tavoitteena on, että strategisesta huippuosaamisen keskittymästä (SHOK) tulee kansainvälisesti vahvin alan innovaatioympäristö.

Metsäklusterin rahoituksella tehdään nanoselluloosaan liittyvää tutkimusta Efftech (Intelligent, resource efficient, production processes) -ohjelmassa. Ohjelman kesto on viisi vuotta. Ensimmäinen kahden vuoden jakso päättyi kesäkuussa 2010 ja jatkuu nyt jakautuneena kahteen osaluueeseen "Value through Intensive and Efficient Fibre Supply" (EffFibre), volyymi 11 M€ ja "Efficient Networking towards Novel Products and Processes" (EffNet), volyymi 15 M€.

Muista Suomen huippuosaamisen keskittymistä (CLEEN Oy/ Energia ja ympäristö, TIVIT Oy / tieto- ja viestintäteollisuus ja -palvelut, SalWe Oy / terveys ja hyvinvointi, FIMECC Oy / metallituotteet ja koneenrakennus, RYM Oy / rakennettu ympäristö) nanoteknologiaa sivuavilla tutkimusaloilla toimii tällä hetkellä lähinnä vain FIMECC Oy läpimurto materiaaleja kehittävän ohjelmansa kautta.

## Koulutus

Nanotieteiden koulutusta on kehitetty kaikissa nanotiedettä tekevissä yliopistoissa siten, että opetus on integroitu poikkitieteellisesti muuhun opetukseen. Tavoitteena on, että opiskelijat kasvavat pääaineesta riippumatta nanotieteen poikkitieteelliseen toimintamalliin opintojensa aikana. Pääkaupunkiseudulla Aalto-yliopisto ja Helsingin yliopisto ovat jatkaneet yhteistä Nanotieteen kursssia, jonka osanottajamäärät ovat olleet kasvussa. Jyväskylän yliopistossa on panostettu koordinoitusti nanotieteiden

koulutukseen. Jyväskylässä kehitetään nanotieteiden koulutusta aina lukiosta tohtorikoulutukseen saakka. Nanotieteiden kandidaattiopintopaketit ja kansainvälinen maisterikoulutusohjelma on luotu kaikille luonnontieteiden, fysiikan, kemian ja biologian, aloille. Tämän lisäksi Jyväskylän yliopisto koordinoi nanotieteiden tohtorinkoulutusta kansallisessa nanotieteiden tohtoriohjelmassa. Jyväskylän yliopiston opettajankoulutuslaitoksella on myös havaittu tarve opettaa nanotietettä jo yleissivistävässä koulutuksessa.

## Hallintoa tukeva työ

Nanoteknologian sääntelyyn liittyvät kysymykset ovat poikkihallinnollisia. Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriö kutsui syksyllä 2009 kokoon ryhmän, joka koostui alan asiantuntijoista eri hallinnonalojen laitoksissa ja keskeisissä ministeriöissä. Ryhmä kokoontui vuosina 2009–2010 keskustelufoorumina neljä kertaa. Ryhmässä todettiin tarve valmistella Suomen kannalta olennaisia näkemyksiä nanoteknologiaan sekä koota eri hallinnonalojen rooleja kuvaava kartoitus alan viranomaisista ja lainsäädännöstä Suomessa. Ryhmä on ollut jatkumoa vuosina 2007–2010 toimineelle opetus- ja kulttuuriministeriön vetämälle kansalliselle nanotieteen yhteistyöfoorumille.

Nanoteknologia nähdään osana yhteiskunnan kehitystä. Sen hallinnolliset vastuut ja turvallisuuskysymykset jakautuvat poikkihallinnollisesti. Luotettava riskinarvio ja hallinta innovaatioita tukevat ovat kynnyskysymyksiä. Toisaalta myös informaation keruu palvelee rationaalista lähestymistapaa. Nanomateriaalien jäljitettävyyteen, merkintäohjeistukseen ja rekisteröintiin liittyvät kysymykset ovat useaa hallinnon alaa koskevia.

Suomessa kansallinen kehitys on vahvasti EU-sidonnaista, koska useimmilla lainsäädännön aloilla sääntely pohjautuu EU-sääntelyyn. Työryhmän näkemyksen mukaan Suomen tulisi mahdollisimman laajasti pyrkiä soveltamaan EU-pohjaista nanostrategiaa ja osallistua sen kehitykseen.

## 3.2 Muualla maailmassa

Nanoalan ennakointi- ja arviointityötä on tehty ja tehdään valtavasti, useimpien teknologioiden ja kaupallistamisen näkökulmasta. Tätä työtä varten käytettyä taustamateriaalia on listattu viiteluettelossa [mm. BMBF 2007; PCAST 2010; VINNOVA 2010].

Poliittisella tasolla rahoituksen painopiste on siirtynyt tutkimuksesta sovelluksien hyödyntämiseen ja kaupallistamiseen. Tästä seuraa:

- kansallisen koordinaation tarpeen voimistuminen perusteettomien päällekkäisyyksien poistamiseksi sekä työnjaosta ja yhteistyöstä sopimiseksi
- rahoituksen kohdentaminen niille (kansallisille vahvuus) alueille, joissa soveltamiselle on parhaat edellytykset (osaaminen, kilpailukykyiset soveltajat)

Viimeaikaisissa selvityksissä välittyy selkeä trendi rahoittajanäkökulman painopisteen siirtymisestä tutkimuksesta tulosten hyödyntämiseen ja kaupallistamiseen. Nanotieteen ja -teknologioiden perustutkimukseen katsotaan investoidun paljon ja odotukset hyödyllisten sovellusten suhteen ovat korkealla. Hyödyllisyydessä on nähtävissä vähintään kaksi kriteeriä: nanoteknologian sovellusten potentiaali suurten yhteiskunnallisten haasteiden ratkaisemisessa (”grand challenges”) ja uusien teknologioiden tuoma teollisuuden kilpailukyyn parantaminen ja sen myötä (kansallinen) taloudellinen hyvinvointi. Molemmat ovat julkisen rahoittajan näkökulmasta ymmärrettäviä ja hyväksyttäviä perusteluja.

Perustutkimuksen rahoitusta ei esitetä vähennettäväksi – sen merkitys uusien mahdollisuuksien luovana toimintana tunnustetaan. Selvityksissä ei arvioida sitä, mikä on realistinen odotusarvo perustutkimuksen ja tuloksista johdetun kaupallisen tuotteen väliselle aikaviiveelle.

Toinen selvityksistä välittävä selkeä viesti on tutkimuksen fokuksien välttämättömyys. Myös suuret maat, kuten Yhdysvallat, näkevät, että resurssien hyödyntämistä on parannettava: perusteettomiin päällekkäisiin aktiviteetteihin

ei nähdä olevan varaa. Viesti on osoitettu erityisesti (rahoitus)hallinnolle, mutta koskee viime kädessä myös tutkijoita rahoituksen koordinaation mahdollisesti tarkentuessa.

Tulevaisuuden kiinnostuksen kohteet ovat otsikkotasolla useissa lähteissä samankaltaiset (esimerkkeinä Nobelin fysiikan palkinnon kohteena 2010 ollut grafeeni, metamateriaalit, yms.), joten näillä aloilla kansainvälinen kilpailu lie-nee kovaa jatkossakin.

Säädösympäristön haasteet, turvallisuustutkimus.

- Nanohiukkasten ja nanomateriaale- ja sisältävien tuotteiden sääntelyssä on vielä lukuisia avoimia kysymyksiä. Näiden nähdään olevan nanoteknologian hyödyntämisen ja näin kilpailukyvyyn kehittymisen esteenä.

Sovellusten kehittämisen rinnalla tärkeäksi keskustelun aiheeksi on noussut nanoteknologioiden turvallisuus. Nanotutkimuksen eettisistä ja turvallisuusky-symyksistä on toki keskusteltu vilkkaasti aiemminkin (esim. Nanologue [Nanologue 2007]), mutta nyt kun tuotteita on jo kuluttajamarkkinoilla ja hyödyntämisen mahdollisuudet jatkuvasti kasvavat, ovat yritykset ja sen myötä viranomaiset nostaneet asian tärkeysjärjestyksessä aiempaa ylemmäs. Teollinen hyödyntäjä pyrkii minimoimaan riskit erityisesti harkitessaan investointeja. Nykytilanteessa, jossa nanotuotteita koskeva sääntely on periaatteessa olemassa (vrt. REACH<sup>1</sup> Euroopassa), mutta sen tulkinta käytännössä perin vaikeaa, nähdään, että tilanne luo yrityksille investointeja ja uusien teknologioiden käyttöönottoa estävän riskin.

Kansainvälisen kilpailukyvyyn nimissä säädösympäristön tulisi olla maailmanlaajuinen tai ainakin maailmanlaajuisesti yhteensopiva. Näin mm. EU:n komissiossa on nähty, että panostuksella yhteiseurooppalaiseen säädösympäristön kehittämiseen voidaan saada teknologian hyödyntämiseen hyvä vipuvaikutus. Tutkijoiden kannalta tämä saattaa vaikuttaa eurooppalaisen yhteisrahoituksen saatavuuteen: ellei tutkimusrahoitusta erikseen lisätä, sen kohdentaminen turvallisuusaiheisiin vähentää rahoitusta muualla.

### EU:n tutkimuspainotukset

Eurooppalainen tutkimusalue ja korkeakoulutusalue (ERA ja EHEA) ovat Euroopan komission strategia tavoitteita Euroopan osaamiseen perustuvan kilpailukyvyyn kasvattamiseksi. Uudistettu EU2020-strategia [KOM 2010] sekä komission Innovaatiounioni-tiedonanto [KOM 2010-INNO] linjaavat osaamisen siirtoa liikkuvuuden suunnitelmallistamiseksi ja toimia tutkimuksen vaikuttavuuden lisäämiseksi Euroopassa. Nanoteknologia on tunnistettu ”Key Enabling Technology”-määritelmän täyttäväksi tutkimusalueksi ja sen tutkimus on ollut yksi EU:n seitsemännen puiteohjelman (2007–2013) erityisteemoista. Tuleva tutkimusohjelma (2014-) on raporttia kirjoitettaessa valmisteluvaiheessa, eikä sen rakenteesta tai teemoista ole tehty päätöksiä.

### EU: hallintoa tukeva työ

Euroopan Komission tutkimuksen pääosasto (DG RTD) kutsui helmikuussa 2009 kokoon työryhmän ”High Level Group of EU Member States and FP7 Associated States on Nanoscience and

<sup>1</sup> Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals; Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus N:o 1907/2006 kemikaalien rekisteröinnistä, arvioinnista, lupamenettelyistä ja rajoituksista

Nanotechnologies ” (jatkossa ”HLG”). HLG toimii keskustelufoorumina EU:n jäsenvaltioiden ja tutkimuksen puiteohjelman liitännäisjäsenten välillä nanotieteen ja nanoteknologioiden tutkimuksessa. HLG konsultoi komissiota sen valmistellessa päivitystä EU:n nanoteknologian vuoteen 2009 päättyneelle strategialle [KOM 2004] ja tuo epävirallisesti, mutta samalla kootusti esille jäsenvaltioiden ja liitännäisjäsenten näkökantoja valmisteluun.

EU:n nanotieteen ja -tekniikan strategian päivitys nähdään tarpeelliseksi, koska toimintaympäristö on muuttunut: tutkimustietoa on enemmän ja sitä voidaan enenevässä määrin hyödyntää. Komissiossa nähdään, että hyödyntämistä on stimuloitava kilpailukyyn parantamiseksi. Samanaikaisesti kilpailukyky alkavat rajoittaa nanomateriaalien ja -hiukkasten käyttöä koskevien säädösten ja lainsäädännön puutteet. Eräissä jäsenmaissa ovat kuluttajat jo kyseenalaistaneet saatavilla olevat tiedot tuotteiden turvallisuudesta, mikä voi tulla hyödyntämisen esteeksi ja johtaa pahimmillaan koko termin ”nano” leimaamiseen.

Strategian päivitystä valmistellaan läheisessä yhteistyössä myös EU:n ulkopuolisten toimijoiden kanssa, joista erikseen mainittakoon jäljempänä kuvatut OECD:n työryhmät.

Nanostrategian päivityksen lisäksi HLG:ssä on keskusteltu aktiivisesti tavoista, joilla nanoteknologioiden turvallisuuteen liittyvien säädösten pohjaksi tarvittavaa tutkimustietoa voidaan täydentää. Nanomateriaalien moninaisuus ja toistaiseksi huonosti tunnetut terveys- ja ympäristövaikutusmekanismit edellyttävät laajaa tutkimusta, jonka rahoitus ja organisointi ovat vielä auki. Yhteistyöstä tutkimuksen puiteohjelman (NMP-osio) ja jäsenvaltioiden oman rahoituksen välillä neuvotellaan.

Suomen näkyvyys eurooppalaisessa nanoturvallisuuden tutkimuksessa on vahva. Helmikuussa 2010 Euroopan komissio myönsi Työterveyslaitokselle EU:n rahoittaman nanomateriaalien turvallisuutta edistävien hankkeiden yhteenliittymän eli NanoSafety Clusterin koordinaation. Klusteriin kuuluu noin 30 tutkimusprojektia, joissa toimii useita satoja tutkijoita ja EU:n rahoitusosuus näille projekteille on yhteensä 112 miljoonaa euroa.

Hallinnollisesti nanotiede ja -teknologia ovat EU-tasolla esillä huomattavasti laajemmin kuin vuonna 2005. Tutkimusvetoisesta vaiheesta on siirrytty kauteen, jossa monet hyödyntävät osapuolet sekä erityisesti kuluttajien turvallisuudesta vastaavat pääosastot ovat aktivoituneet ja komission sisäisen koordinaation tarve on kasvanut huomattavasti.

### **EU: Kemikaaliasetus REACH**

REACH-asetuksen toimeenpanoa varten on perustettu toimivaltaisten viranomaisten alaryhmä, joka käsittelee kemikaalilainsäädännön soveltamista nanomateriaaleihin. Vuonna 2010 on ryhmässä laadittu teknisiä ohjeistoja materiaalien identifioimiseksi, niiden turvallisuusarvioinnin tietovaatimuksista ja itse turvallisuusarviointiin. EU:n komissio (DG Environment ja DG Enterprises and Industry) ohjaa tätä hallinnollista työtä mutta on myös erittäin aktiivinen OECD:n nanoturvallisuushankkeessa, jonka katsotaan tällä hetkellä tuottavan relevantin globaalin tiedon viranomais-ten, tutkijoiden ja teollisuuden yhteistyönä.

Asiaa käsitellään EU:ssa lisäksi DG Sanco:ssa (DG for Health and Consumers), jolla on myös tuoteturvallisuuteen liittyviä hankkeita sekä komission erillisissä tieteellisissä komiteoissa (Scientific

Committee on Health and Environmental Risks (SCHER), Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR)).

## OECD

Kansainvälisenä foorumina nanoturvallisuudessa toimii OECD, jolla on eri komiteoiden alaisina kaksi nanomateriaaleja koskevaa työryhmää (Working Party on Manufactured Nanomaterials (WPMN) ja Working Party on Nanotechnology (WPN)). Nanoteknologiaa käsitellään myös Working Party on Biotechnology -työryhmässä. OECD:n tuore innovaatiostrategian [OECD 2010] keskeinen teema on vihreä kasvu. Tämä näkyy myös OECD-komiteoiden ja niiden alaisten rakenteiden suunnitelmissa selkeästi.

OECD:n Working Party on Manufactured Nanomaterials (WPMN) -ryhmässä keskitytään erityisesti testiohjeiden sovellettavuuden parantamiseen ja ohjeistamiseen, perustietopakettien hankintaan testaamalla tietyt edustavat nanomateriaalit (14 kpl) sekä riskinarvioinnin kehittämiseen. Suomi (Turvallisuus ja kemikaalivirasto, Tukes) osallistuu aktiivisesti tähän työhön ja vastaa mm. nanomateriaalien ympäristökohtalon arvioinnin ohjeistamisesta. Tärkein lähiajan tavoite on saada laadittua ohjeistot kemikaalitestiohjeiden soveltamiseen nanomateriaalien testaamiseksi, sekä mahdollisten uusien testiohjeiden laatiminen. Lisäksi yhteistyö OECD:n Working Party on Nanotechnology (WPN) kanssa pyritään löytämään synergioita nanoteknologian hyödyntämisessä terveyden ja ympäristön suojelemisessa.

## 4 SUOMALAINEN NANOTIETEEN JA -TEKNOLOGIAN TUTKIMUS 2010

Vuoden 2005 Keihäänkärkiraportissa kansallisiksi keihäänkärkialoiksi nimettiin nanomateriaalit, nanoelektroniikka ja -fotoniikka sekä nanobioteknologia. Nykytilanteen selvittämiseksi raportissa mainittujen tutkimuskeskittymien edustajille lähetettiin raportin kuvaus tutkimuksen painopistealueista vuonna 2005. Vastaajia pyydettiin kommentoimaan missä määrin tutkimuskohteet ovat muuttuneet ja erityisesti minkä uusien alojen tai tutkimuskohteiden nähdään nousseen ja/tai nousevan aiempien rinnalle. Kokonaiskuvan täydentämiseksi kysely lähetettiin myös muille kuin keihäänkärkiyksiköiden nanotieteen tutkijasta tekeville tutkimusyksiköille.

Viisi vuotta on suhteellisen lyhyt aika tutkimusympäristöjen ja tutkimuksen painotusten muutoksia tarkasteltaessa. Nanotiede ja -teknologia kehittyvät kuitenkin poikkeuksellisen nopeasti, joten kysely nähtiin työryhmässä mielekkäänä.

Seuraavassa tarkastellaan nanotieteen ja -teknologian tutkimuksen painopisteitä Suomessa syksyllä 2010. Jaottelu paikkakunnittain on vuoden 2005 raportin mukainen, lisätynä valtakunnallisen VTT:n osuudella. Lisäksi käsitellään erikseen läpileikkaavat, kaikkia yksiköitä koskevat aktiviteetit: koulutus, nanoturvallisuus ja laskennallinen nanotiede.

### 4.1 Nanotutkimuksen keskittymät

#### Helsingin seutu

Toimijoiden laajasta tutkimuskentästä oli poimittu erityiset keihäänkärkialueet, joita yhdistää nanotieteen ja nanoteknologian käyttäminen toiminnallisten materiaalien ja systeemien aikaansaamiseksi ja eri kampusalueiden vahvuuksien yh-

distäminen: 1) nanoelektroniikka ja -fotoniikka, 2) ohutkalvotutkimus, 3) integroidut bionanosysteemit, 4) nanohiukaset ja nanoputket, sekä 5) teoreettinen ja laskennallinen tutkimus.

Kampusalueiden vahvuuksien yhdistäminen näkyy nykyisin voimakkaimmin koulutuksessa: Vuonna 2005 käynnistetty TKK:n ja Helsingin yliopiston monitieteinen luentosarja Nanoscience I–IV jatkuu edelleen ja luennoimiseen osallistui professoreja neljältä kampukselta. Kurssilla on suuri ja tasainen suosio: noin 80 opiskelijaa johdantokurssilla Nanoscience I ja noin 30–40 syventävillä kursseilla II–IV. Kurssit ovat aidosti poikkitieteellisiä ja houkuttelevat opiskelijoita kaikilta kampuksilta. Kurssin lisäksi osapuolet osallistuivat eri tutkijakouluihin, esim. kansalliseen nanotieteen tohtoriohjelmaan.

Nanotiedettä Helsingin seudulla tekevien ryhmien lukumäärä on suuri. Culminatumin vuonna 2010 tekemässä selvityksessä [Culminatum 2010] on Aalto-yliopistolta nimetty 40, Helsingin yliopistosta 20 ja VTT:stä yhdeksän pääkaupunkiseudulla toimivaa nanotiedettä tai -teknologiaa tutkivaa ryhmää. Lisäksi on yksittäisiä ryhmiä Mittatekniikan keskukselta, Työterveyslaitoksesta, Suomen ympäristökeskukselta ja Ilmatieteen laitoksesta.

#### *Helsingin yliopisto*

Culminatumin selvityksessä mainitaan 20 nanotutkimusta tekevää ryhmää ja näiden aihepiirit ovat varsin samoilla vahvuusalueilla kuin vuonna 2005. Keihäänkärkialojen lisäksi tutkimusaloina ovat farmasia (lääkeaineiden kuljetus ja annostelu) sekä proteiinien ja virusten tutkimus.



## Aalto-yliopisto

Aalto-yliopistosta on Culminatumin selvityksessä mainittu 40 nanoteknologian tutkimusta tekevää ryhmää. Aihealueet ovat karkeasti ottaen samoja kuin vuonna 2005, kuitenkin niin, että tutkimus on laajentunut sekä laadullisesti uusille aloille että määrällisesti.

Nousevina aloina Helsingin yliopiston ja Aalto-yliopiston vastauksissa mainitaan:

- nanotekniikan sovellusten (erityisesti materiaalien tutkimuksen) suuntautuminen energiateknologiaan,
- hiilen nanorakenteet, erityisesti grafeeni ja sen sovellutukset,
- nanokomposiitit, kuten selluloosan nanokuituihin tai grafeeniin perustuvat uudet materiaalit,
- nanorakenteiset polymeerit – itseorganisoituvat polymeerit ja nanopinnoitteet,
- biomimetikka keskeisenä tulevaisuuden materiaalitieteen haarana,
- ALD-pinnoitteet ohutkalvotutkimuksen osana ja
- plasmoniikka.

## Jyväskylä

Jyväskylän yliopistossa nanotiede ja nanoteknologia käsittävät vuonna 2010 14 professorin johtaman 110 tutkijan monitieteisen (biologia, fysiikka, kemia) tutkimuskonsortion, tutkijankoulutuksen ja kansainvälisen maisteriohjelman. Toimintaympäristönä on lokakuussa 2004 valmistunut Jyväskylä NanoScience Center (NSC). Vahvaan perustutkimukseen painottuva fokus ei ole merkittävästi muuttunut ja kirjataan vuonna 2010 'atomi- ja molekyyli-tason funktionaalisina rakenteina ja niiden toimintana'.

Tutkimusaktiiviteetti yleisellä tasolla on nousussa fysiikan ja kemian sekä fysiikan ja biologian rajapinnoilla. NSC:n tunnetuimpia tutkimusaloja ovat: 1) teo-

reettinen ja laskennallinen nanorakenteiden fysiikka, 2) supramolekyylikemia, 3) passivoitujen atomiklustereiden kemia ja spektroskopia, 4) nanotomografia, 5) nanorakenteiden elektroniikka ja termiset ominaisuudet, 6) epälineaariseen spektroskopiaan perustuva molekyyli-dynamiikka ja mikroskopia sekä 7) poikkitieteellinen solu- ja molekyyli-biologia.

- Merkitykseltään nousevina nähdään
- funktionalisoidut metalli- ja puolijohdenanopartikkelit ja niiden käyttö optiikan, elektroniikan, aurinkoenergian ja lääketieteen sovelluksissa (synergia TTY),
  - hiiliperustainen nanotiede, sisältäen fullereenin, hiilinanoputket, grafeenin sekä näistä johdettavat hybridimateriaalit (mm. HYBTONITE™, CNT paper,...),
  - funktionalisoidut supramolekyyli-rakenteet ja itsejärjestäytyvät systeemit,
  - molekulaarinen solu- ja virustutkimus yhdistettynä biofysiikkaan sekä
  - ultranopeisiin laserpulsseihin perustuva mikroskopia ja uudet epälineaariset mittaumenetelmät (synergia TTY ja UEF/Joensuu).

## Tampere-Joensuu / Fotoniikka

Tampereen teknillisen yliopiston ja Itä-Suomen yliopiston (Joensuu) yhteistyö fotonikan tutkimuksessa jatkuu. Vuonna 2005 mainitut alat (ohutkalvotekniikat, nanopainotekniikka, korkean hyötysuhteen diffraktiohilat ja orgaaniset valokennot) nähdään edelleen vahvoina. Valmistusmenetelmät ovat kehittyneet ja niitä voidaan yhdistellä ja näin tuottaa monipuolisempia rakenteita. Esimerkkinä Tampereella on siirretty nanopainotekniikoiden kehittämisestä niiden käyttöön valmistusmenetelminä ja Joensuussa timanttikaiverruksen ja femtosekuntiablaation yhdistäminen.

Nousevina tutkimuskohteina nähdään

- plasmonit ja metamateriaalit: optisten vasteiden räätälöinti ja paikalliskenttien vahvistaminen haluttuun tarkoituksen, esimerkiksi valon polarisatiota muokkaavat rakenteet tai optisia kenttiä lokaalisti vahvistavat tai muuten muokkaavat materiaalit,
- fotonikan materiaalit ja rakenteet, esimerkkeinä metalli-hybridimateriaalit tai dna:lla ”rakennetut” materiaalit ja näiden yhdistäminen mikro- ja nanorakenteisiin sekä muiden kuin orgaanisten molekyylien käyttö biologisina merkkiaineina, hiilinanomateriaalit (grafeeni, grafiitti, nanotimantti), nanopartikkeleiden valmistus ja sovellusten hakeminen biologisina merkkiaineina, uusina valonlähteinä ja sensoreina,
- aurinkokennot: orgaaniset laajan spektrin LEDit ja orgaaniset/polymeriset aurinkokennot, väriaineherkistetyt aurinkokennot sekä
- ultranopeiden pulssien eteneminen nanorakenteissa.

## Oulu

Oulun yliopiston aiemman vahvuusalueen – nanorakenteiden integroinnin – rinnalle on noussut useita uusia tutkimusalueita lääketieteen, luonnontieteen ja tekniikan aloilta. Niille on oleellista poikkitieteellisyys tukien yliopiston painoaloja (biotieteet ja terveys, informaatioteknologia, ja ympäristö, luonnonvarat ja materiaalit):

- nanomateriaalien tutkimus, käsittäen sähkökeraamit, katalyytit ja hiilinanoputket, on tuottanut läpimurtoja sovellusalueinaan painettava elektronikka, anturit, fotonikka ja lääketieteen tekniikka ja biotekniikka,
- materiaalien toiminnallisuuden syvälinen tutkimus elektronispektroskopian ja NMR -tekniikan avulla,

- hiilinanoputkien kasvatuksen ja modifioinnin hallinta,
- nanopartikkelien tutkimus katalyyteinä ja painettavan elektronikan musteissa, sekä
- ohutkalvotekniikoiden käyttäminen nanopartikkelien ja -rakenteiden valmistuksessa.

Nanoteknologian integrointia hyödyntämällä kehitetään mm. uusia kuvantamistekniikoita ja kudosterapiaa, painettuja antureita ja toimilaitteita, sekä tietoliikenne- ja energiatekniikan ratkaisuja.

## Turku

Turussa tehtiin jo 2005 monella osaluueella korkeatasoista nanotutkimusta, sekä Åbo Akademiassa että Turun yliopistossa. Kansainvälisesti vahvoja alueita on useita, esimerkkeinä valokennojen tutkimus, bionanotiede ja painettu elektronikka. Nanopartikkelien käyttö in vitro diagnostiikassa on vahva tutkimusala TY:n biotekniikan osastolla. Biomateriaalitieteet ovat myös edelleen vahvuusalueena BioCity Turun ja lääketieteellisen tiedekunnan profiloivana tutkimusohjelmalla ja Turun yliopistollisen keskussairaalan painopistealueena. Turun kauppakorkeakoulu on liittynyt Turun yliopistoon ja tämä mahdollistaa entistä tiiviimmän yhteistyön tutkittaessa esim. tulosten kaupallistamista. Suomen Akatemia valitsi Åbo Akademin Funktionaalisten materiaalien tutkimusyksikön Akatemian huippuyksiköksi vuosille 2008–2013.

Nousevina aloina Turussa nähdään:

- bionanotiede, esimerkkeinä uudet nanopartikkelipohjaiset kuvantamis- ja täsmälääkitysratkaisut sekä materiaalipintojen modifiointi bioyhteensopivuuden lisäämiseksi sekä nanometrikokoluokan täyteaineiden lisääminen yhdistelmämaterialiin,

- nanokokoluokan biokuvantaminen, jota on vahvistettu hankkimalla uutta laitteistoa sekä
- tutkimusmetodologisesti nanomekaaninen materiaalien koestus, joka on tullut merkittäväksi osaksi alan tutkimusta vuoden 2005 jälkeen.

### Tampere / bionanoteknologia

Vuonna 2005 vahvuusalueeksi tunnistettu biosensoreiden tutkimus jatkuu vahvana. Nanorakenteita hyödynnetään myös molekyyliantureissa, mm. pintaherkkään fluoresenssin ja/tai plasmoniikkaan perustuvissa antureissa sekä MEMS-resonaattoreihin ja AFM-teknologiaan perustuvissa antureissa. Lisäksi Tampereella on vahvaa tutkimusta biomolekyylien (proteiinit, DNA) kohdennetussa muokkauksessa ja käytössä nanobioteknologian rakenteissa ja toiminnallisten pintojen valmistuksessa ja analyysissä esim. avidiini-teknologian avulla. Kokeellisen tutkimuksen rinnalla on vahva mallintamisaktiviteetti, joka keskittyy nanoskaalassa biosysteemien ominaisuuksien tutkimiseen ja hyödyntämiseen sekä atomaarista mallintamista että systeemibiologista lähestymistapaa hyödyntäen.

- Erityinen kasvualue on tamperelaisen (TaY, TTY ja VTT) yhteistyön ja siitä nousevan tutkimuksen kehittyminen, joka hyödyntää dna-teknologian, biologian, bioantureiden, biomateriaalien sekä kudosteknologian osaamista.
- Näistä alueista on noussut esille nanoskaalan rakenteiden merkitys biologisten ilmiöiden ymmärtämisessä ja biologisten systeemien hyödyntämisessä sekä nanolaitteiden ja nanorakenteiden suunnittelussa.

### Kuopio ja Joensuu

Itä-Suomen yliopisto on monialainen tiedeyliopisto, joka profiloituu kansainvälisesti kilpailukykyisten tiede- ja kou-

lutusalojensa kautta. Itä-Suomen yliopiston aloittaessa toimintansa 2010 yhdeksi painoalaksi valittiin uudet teknologiat ja materiaalit. Strategiaa täsmennettiin valitsemalla 13 kärkihanketta koko yliopistosta, joista viisi keskittyy uusiin teknologioihin ja materiaaleihin. Kärkihankkeiden vahvuus on niiden mahdollistamat laajat, poikkitieteelliset yhteistyöverkostot yliopiston ryhmien välillä. Itä-Suomen yliopiston korkealaatuinen luonnontieteellinen perustutkimus on lähtökohtana uusien teknologioiden ja sovellusten kehittämisessä bio-, informaatio-, materiaali- ja nanotieteissä.

Nanomateriaaleihin liittyvää tutkimusta tehdään mm. lääkeannostelussa, regeneratiivisessa lääketieteessä ja uusituvan energian sovelluksissa. Materiaalitieteen osaamisen lisäksi tutkimus käsittelee farmasiaan, biokuvantamiseen sekä soluihin liittyvän asiantuntemuksen, mikä mahdollistaa kehitettävien materiaalien nopean soveltuvuuskartoituksen *in vitro* ja *in vivo*.

### Teknologian tutkimuskeskus VTT

VTT:lla nanoteknologia näkyy valtakunnallisesti noin sadan tutkijan toimenkuvassa. VTT:n nanomateriaalitutkimus koostuu seuraavista pääalueista: nanopartikkeleiden tuotto ja funktionalisointi, nanorakenteiden pinnoitteiden ja komposiittimateriaalien kehitys sekä nanoturvallisuus. Sovellusalueita ovat erityisesti biomateriaalit, funktionaaliset pinnat, energiatekniikan materiaalit, materiaalit vaativiin käyttöolosuhteisiin kone- ja laiterakennuksessa, sensoritekнологia sekä elektroniikan komponentit.

Nousevina tutkimuskohteina nähdään:

- biologisten nanomateriaalien kehitys ja soveltaminen, erityisesti nanoselloosa ja yhdistelmä-DNA tekniikan avulla tuotetut proteiimirakenteet, sovelluskohteena esimerkiksi funktio-

- naaliset materiaalit ja hybridi / komposiittimateriaalit,
- uusien hybridimateriaalien kehittäminen, hyödyntäen myös biomimeettistä inspiraatiota, tavoitteena nanoskaalan hallittu rakenteen järjestäytyminen ja monimateriaaliratkaisut.

- nanopartikkeleiden pinnoitus ja muu pinnan funktionalisointi, sovelluksina mm. akkuteknologia, musteet, katalyyttiset sovellukset, magneettiset komposiitit, palonsuojaus ja veden puhdistus,

## Nanoteknologian kehittämisen aikaskaalat: Case ALD

Atomikerroskasvatus (Atomic Layer Deposition, ALD) on Suomessa 1970-luvulla kehitetty ohutkalvojen kasvatusmenetelmä. Prosessin periaate esitettiin jo 1950-luvulla, mutta valmistusprosessiksi se kehitettiin vasta yli 20 vuotta myöhemmin. Käytännöllisenä tavoitteena ja sovelluskohteena oli tällöin tehdä hyviä kalvoja elektrolumiinoivia ohutkalvonäyttöjä varten.

Suomalainen kehitystyö tapahtui pääosin Lohja Elektroniiikan suojissa ja Espoossa on valmistettu näyttöjä 1980-luvulta lähtien. Valmistajana on Planar Systems Oy. 1980-luvun lopulla perustettiin Mikrokemia Oy, jonka toimialaan kuului ALD-tutkimuslaitteiden rakentaminen, ALD:n soveltaminen katalyytteihin sekä ohutkalvoja hyödyntävien aurinkokennojen tutkimus.

1990-luvun jälkipuolella mikroelektroniikassa tarvittiin uusia materiaaleja, rakenteet kehittyvät tasomaisista kolmiulotteisiksi ja kolmiulotteisuus edellytti uusia valmistusmenetelmiä. ALD-teknologia on ainoa menetelmä, joilla voidaan valmistaa ohuita, korkealaatuisia pinnan muotoa tarkasti seuraavia kalvoja ja näin siitä muodostui alalle tärkeä perusteknologia.

Suomeen Mikrokemian toimesta syntynyt ALD-laitteiden valmistus siirrettiin 2000-luvulla yrityskauppojen seurauksena lähemmäs asiakkaita USA:ssa ja Aasiassa ja Suomeen jäi

vain tutkimus- ja kehitystoimintaa. Mikroelektroniikan sovelluksiin tarkoitettujen laitteiden tuotannon siirtyessä pois Suomesta havaittiin, että laitteiden valmistamiseen on tarvetta myös mikroelektroniikkateollisuuden ulkopuolella. Koska Suomessa oli paljon ALD-osamista, uusien yritysten (Beneq Oy, Picosun Oy) perustaminen nopealla aikataululla oli mahdollista. Molemmat yritykset ovat sittemmin kasvaneet voimakkaasti yhdessä teknologian kasvun ja uusille alueille levittäytymisen myötä. ALD-teknologiaa otetaan käyttöön enenevässä määrin ja kasvavia alueita ovat mm. optiikka, aurinkokennot, MEMS:it ja erilaiset suojapinnoitteet.

ALD-teknologia oli 1970-luvulla selvästi aikaansa edellä. Määrätietoinen alan kehittäminen alkoi kantaa hedelmää 1990- ja 2000-luvuilla ja kasvu jatkuu edelleen voimakkaana. Laitevalmistajia lienee maailmanlaajuisesti tällä hetkellä lähes 20 ja sovellusalueita tulee jatkuvasti lisää. ALD on myös tieteellisesti kasvanut merkittäväksi alaksi ja vuosittaisten julkaisujen määrä ylittää tuhannen. Suomi on edelleen vahva vaikuttaja alalla yhdessä Korean ja USA:n kanssa, samanaikaisesti kun monet muut maat kuten Saksa, Iso-Britannia, Alankomaat kasvavat voimakkaasti. Suomessa vahvoja alueita ovat tutkimus ja laitevalmistus. ALD-teknologiaa hyödyntävää teollisuutta on Suomessa vähän.

- in-situ muodostuvien nanorakenteiden kehittäminen, sovelluskohteina mm. korkean lämpötilan, kulumisen ja/tai aggressiivisen kemiallisen ympäristön suojapinnoitteet tai erikois-komposiitit,
- proteiinien ja muiden biomolekyylien yhdistäminen nanoelektroniikan komponentteihin: sovelluskohteina mm. integroidut, kompaktit biosensorit sekä
- grafeeniin perustuvat sovellukset: CVD-prosessilla voidaan tuottaa toistettavasti laajoja pinta-aloja hyvälaatuista grafeenia nanoelektroniikka-, sensori- ja näyttösovelluksiin.

FinNano-teknologiaohjelman aikana käynnissä olleiden tutkimushankkeiden ja toimialakohtaisten strategiatyöryhmien työn jatkumona käynnistyi Suomen nanoselluloosakeskus, jonka osapuolina toimivat VTT, UPM ja Aalto-yliopisto. Toiminta käynnistettiin helmikuussa 2008. Keskus tähtää nanoselluloosan teollisen mittakaavan valmistusprosessin kehittämiseen ja selluloosapohjaisten raaka-aineiden laajempaan hyödyntämiseen. Tavoitteena on sekä parantaa alan teollisuuden olemassa olevien tuotteiden kilpailukykyä, että kehittää teollisuudella täysin uudenlaisia kuitupohjaisia lisäarvotuotteita.

## 4.2 Turvallisuustutkimus

Kuten luvussa 3.2 todettiin, nanoteknologioiden turvallisuus on sovellusten kehittämisen rinnalla noussut tärkeäksi keskustelun aiheeksi. Aiempi puhe nanohiukkasista yleensä on muuttunut spesifimmäksi eli nyt tarkastellaan eri nanohiukkasia erikseen ja ymmärretään että nanohiukkasten mahdollinen vaarallisuus riippuu paljolti hiukkastyypistä.

Työterveyslaitoksella on kehitetty nanoteknologian turvallisuustutkimusohjelma, osaksi yhteistyössä Helsingin yliopiston kanssa. Ohjelma on sisältänyt teollisesti tuotettujen nanohiukkasten karakterisointia, altistumisen arviointia, terveyshaittojen ja niiden mekanismien tutkimusta sekä haittoihin liittyvää riskinarviointia ja tietoon perustuvaa nanoteknologioiden riskien hallintaa. Työterveyslaitos koordinoi lukuisia eurooppalaisia nanoturvallisuuden yhteistutkimushankkeita.

VTT:n tutkimuksessa nanoturvallisuus sisältää tutkimusaktiiviteetit nanohiukkasten muodostumiseksi, uusien mitaus- ja karakterisointimenetelmien kehittämiseksi sekä hiukkasten reagoinnin ja kulkeutumismekanismit vuorovaikutuksessa kudosmateriaalien kanssa. Koska VTT tutkii ja kehittää prosesseja sekä menetelmiä nanomateriaalien valmistukseen on sillä hyvät lähtökohdat ymmärtää tuotettujen materiaalien ominaisuuksia myös turvallisuusnäkökulmasta sekä arvioida niiden mahdollisesti aiheuttamia riskejä ja tarpeita suojautumiselle.

Itä-Suomen yliopiston Joensuun kampuksella on tutkittu nanomateriaalien vaikutuksia ja kohtaloa vesiympäristössä ja Kuopion kampuksella nanopartikkeleiden mittaamiseen liittyviä kysymyksiä. Suomen ympäristökeskuksen laboratoriossa kehitetään menetelmiä nanomateriaalien ja partikkelien havaitsemiseksi vesiympäristössä.

Ympäristöturvallisuustutkimus on selvästi laajenemassa ainakin nanomateriaalien ympäristökohtalon ja mahdollisten eliövaikutusten kohdalla. Tähän kenttään liittyen vireillä on 2010 useita yhteistyöhankkeita mm. Suomen ympäristökeskuksen, VTT:n ja Metsäklusterin välillä. Nämä kohdentuvat erityisesti uusiin kansallisestikin merkittäviin haasteisiin ja mahdollisuuksiin, kuten nanoselluun ja sen eri sovelluksiin.

### 4.3 Laskennallinen näkökulma nanotieteeseen

---

Laskennallinen nanotiede – mallinnusta ja simulointia hyväkseen käyttävä nanomittakaavan ilmiöiden tutkimus – on yksi niistä akseleista, joilla tieteenalat ovat metodisesti lähentyneet toisiaan. Tieteenalojen välisen yhteistyön lisäksi nanotiede sitoo toisiinsa kokeellisen, laskennallisen ja teoreettisen tutkimuksen osaamista. Erityisesti menetelmäpuolen yhteistyön kehittyminen on ollut huomattavaa 10 viime vuoden aikana. Kehitystä on ajanut pitkälti nanotieteen tutkimusongelmien haastavuus, mikä korostaa tarvetta yhdistää osaamista yli perinteisten tutkimusalojen rajojen. Tieteen kansainvälisen kärkitutkimuksen tasolla on kokeellisen tutkimuksen yhdistäminen teoreettiseen mallintamiseen kokenut huomattavia edistysaskelia. Kokeellisesti varmistetaan laskennan ennustukset tai laskennallisesti selitetään kokeellisia tuloksia. Konkreettisesti tämä on tullut vahvasti esille etenkin materiaali- ja biotieteissä.

Nanotieteen alueella on valtakunnallinen tohtoriohjelma NGS-NANO ja laskennallista nanotieteeseen liittyvää tutkijakoulutusta on myös muiden teemojen ympärille rakentuneissa tutkijakouluissa. Lisäksi CSC on järjestänyt vuosittain useita kursseja laskennallisen nanotieteen menetelmistä ja ohjelmistoista. Tulevaisuutta ajatellen tulisi pohdita, missä määrin tieteenalojen metodisen lähentymisen tulisi näkyä tohtorikoulutuksessa niin, että yhteiset (laskennalliset) menetelmät opittaisiin jo riittävän varhaisessa vaiheessa ja mielellään poikkitieteellisessä kontekstissa.

CSC:n palveluiden käytössä nanotiede on vakiinnuttanut asemansa, erityisesti raskaan laskennan puolella. Viiden viime vuoden aikana nanotieteen tarvitsemien palvelujen profiili on pysynyt samana ja laskentakäytön huippu on pitkälti nanotiedettä. CSC:n Grand Challenge -projekteissa nanotiede on merkittävässä roolissa: yhdeksän hanketta 20:stä edusti nanotiedettä 2009. Tutkijoiden ilmoittamien tutkimusalaluokitusten mukaan CSC:n laskentakapasiteetin käytöstä vuositasona jopa puolet on nanotiedettä.

## 5 VISIO 2020

Edellä on tarkasteltu nanotieteen ja -teknologian tutkimuksen toimintaympäristöä ja tilaa vuonna 2010. Tämän tulevaisuuteen katsovan luvun ensimmäinen osa käsittelee toimintaympäristöä ja sen pohjana ovat visiotyöryhmältä ja Akatemian FinNano-tutkimusohjelman johtoryhmältä kootut näkemykset vuoden 2020 mahdollisesta tilanteesta. Tutkijanäkökulmaa varten tutkimusohjelman hankejohtajia, nanotieteen akatemiaprofessoreita ja akatemiattutkijoita, Akatemian huippuyksiköiden johtajia ja nanotieteiden ja -teknologian alalla työskenteleviä FiDiPro-tutkijoita pyydettiin sähköpostilla yhteensä korkeintaan yhden sivun vastaus kahteen kysymykseen:

- ”Jos koko maailma olisi käytettävissäsi ilman hankalia rajoituksia, mitä haluaisit tehdä nanotieteessä vuonna 2020?” ja
- ”Mitä ovat esteet, jotka estävät sinua tekemästä sitä mitä haluaisit?”

Kolmantena vision elementtinä esitellään näkemys suomalaisesta nanotieteen ja -teknologian koulutuksesta vuonna 2020, perustuen Jyväskylän yliopistossa tehtyyn työhön.

### 5.1 Nanotiede ja -teknologia Suomessa 2020

Nanotieteen ja -teknologian tilaan vuoden 2020 Suomessa vaikuttavat samat asiat, joita on tarkasteltu luvussa 3 viiden viimeisen vuoden osalta. Riippuvuus muun maailman tapahtumista ilmeni korostetusti vuoden 2008 syksyllä liikkeelle lähteneen taluskriisin yhteydessä. Vähemmän dramaattisesti kytkeytyminen koko maailmaan on läsnä myös tutkimuksessa. Kiina ja muut niin sanotut BRIC-maat (Brasilia, Venäjä, Intia)

panostavat merkittävästi korkean teknologian kehittämiseen, joista nanoteknologia on ollut selkeä painopiste ja pysynee sellaisena. Kuten Suomessa – ja laajemmin Euroopan tasolla – on viime aikoina keskusteltu, tutkimustulosten vieminen kehitys- ja kaupallistamistoimenpitein avoimille markkinoille edellyttää yrittäjyyden, rahoittajien ja tutkimusympäristöjen vuorovaikutusta, joka toistaiseksi toimii parhaiten Yhdysvalloissa. Kilpailu ei tulevaisuudessa ainakaan vähene.

Nanotieteelle ja -teknologioille erityisiä kysymyksiä ovat: missä nanotutkimuksen tuloksilla saavutetaan paras lisäarvo ja toisaalta miten nanoteknologioiden mielikuva suuren yleisön keskuudessa ja käytön sääntely kehittyvät. Nanotuotteen, esimerkkinä vaikkapa tavalla 2010–2011 suositut suomalaiset nanopohjasukset, lisäarvo myyjän kannalta on uudessa asiakkaalle mielenkiintoisessa lopputuotteen ominaisuudessa. Nano-brändi syntyy siitä, että ominaisuus perustuu riittävässä määrin nanomittakaavassa tapahtuviin ilmiöihin tai rakenteisiin ja tämä tuodaan positiivisena asiana esille. Toisaalta nano saattaa luoda negatiivisen mielikuvan hyvinkin vähäisen ”nano-osuuden” ansiosta, kuten on käynyt joissain kosmetiikkaa ja lääkeaineita koskevissa tapauksissa. Tällöin on useimmiten kysymys siitä, että riskejä ei tunneta niin hyvin, että turvallisuus voitaisiin vakuuttavasti taata.

Visiomme mukaan yllä kuvattu nano-leima tai -brändi on vuoteen 2020 mennessä muuttunut neutraaliksi tai hävinnyt: jo nyt esimerkiksi painettavan elektroniikan ja ftoniikan nanosovellukset ovat käytössä tai tulossa käyttöön ilman erityistä nano-leimaa. Nanoturvalisuuteen liittyvää epätietoisuutta ja pelkoja on riittävään tutkimustietoon



perustuvan sääntelyn ja onnistuneen kansalaisviestinnän avulla onnistuttu merkittävästi vähentämään. Nanoskaalan ilmiöitä ja teknologiaa hyödyntävät tuotteet ovat laajassa käytössä ja tutkimus- ja koulutusympäristöissä monitieteinen, eri tieteenalaja lähentävä toimintamalli on luonteva toimintatapa.

Koulutuksessa nanotutkimus on jo nyt lähentänyt esimerkiksi luonnontieteitä, bio- ja lääketieteitä ja tekniikkaa ja tämä kehitys jatkuu. Visiossamme vuonna 2020 jo lukiossa annetaan opiskelijoille perustiedot siitä, mistä nanotieteessä ja -teknologioissa on kysymys. Mahdollinen kehityssuunta on, että koulutuksen painottuminen varhaiseen erikoistumiseen vähenee. Malli, jossa korostetaan opiskelijoiden hyviä ja riittävän laaja-alaisia perustietoja voi tarjota monipuolisemman pohjan jatkovalinnoille nopeasti muuttuvassa tutkimusympäristössä. Koulutusohjelmien suhteen tehtävien valintojen vaikutukset näkyvät noin yhden opiskelijasukupolven kuluttua, eli nyt tehtävien päätösten tulokset noin vuonna 2020.

Pienen toimijan – kuten Suomi – elinehto on oikea liittoutuminen ja oimien erikoisosaamisen alueiden tunnistaminen ja hyödyntäminen. Suomalainen osaaminen nykyisillä nanotutkimuksen keihäänkärkialoillemme on hyvää kansainvälisestä tasoa, tutkijat ovat kansainvälisesti verkottuneita ja seuraavat mitä maailmalla tapahtuu. Useilla keihäänkärkialoilla tutkimusta tehdään jo nyt sekä akateemisen, tutkijalähtöisen perustutkimuksen että tarvehakuisen, sovellusten kehittämisen lähtökohdista. Vuonna 2020 nyt nousemassa olevat uudet keihäänkärkialat eri puolella Suomea ovat vahvistuneet tarjoten kansainvälisesti toimivia tutkimusryhmiä ja sovellusten kannalta mielenkiintoisia aiheita.

Tutkimusaiheista terveys- ja biotieteiden nanotutkimus on Suomessa

fysiikkaan, kemiaan ja materiaalitieteisiin verrattuna vielä pientä. Bio-osaaminen on maassamme merkittävää, joten bio-nano-tutkimuksella on potentiaalia kehittyä vuoteen 2020 mennessä selvästi nykyistä merkittävämmäksi, myös uusia sovelluksia luovana tutkimusalueena.

Voimakkaasti kilpaillussa toimintaympäristössä on hyvin mahdollista, että Suomessakin pohditaan nykyistä enemmän tutkimuksen tuottamaa lisäarvoa ja siinä yhteydessä tutkijalähtöisen (bottom-up) ja esimerkiksi tutkimusrahoittajien tai ministeriöiden asettamilla perusteilla ohjatun (top-down) tutkimuksen oikeaa suhdetta. Merkittävä ohjatun tutkimuksen lisääntyminen tutkijalähtöisen ”vapaan” tutkimuksen kustannuksella sisältää riskin siitä, että tilanteiden muuttuessa valmius vastata uusiin haasteisiin voi olla heikko. Visiossamme nanotutkimukselle ominainen tasapainoilu tieteen ja teknologian välimaastossa on vuoteen 2020 mennessä johtanut luontevaan tasapainoon myös tutkijalähtöisen ja strategisesti ohjatun rahoituksen välillä. Strategiselle rahoitukselle valittavat alat valitaan huolelliseen analyysiin ja ennakkoinnin pohjalta.

Kansalaisten näkemys nanoon on herkkä asia. ”Nano” yhdistetään joskus myös asioihin, joissa yhteyttä ei välttämättä ole tai nanon osuus on merkityksetön. Nanohiukkasten turvallisuus ihmisille ja ympäristölle on tärkeä alue, mutta täyttä tietoa terveys- ja ympäristövaikutuksista ei liene käytettävissä edes vuonna 2020. Pahimmassa tapauksessa kaikki nanotuotteet, ja sen mukana tutkimus, voidaan leimata vaaralliseksi. Oikea viestintä, joka sisältää viimeisimmän tutkimustiedon, epävarmuuksien avoimen myöntämisen ja samanaikaisesti asioiden asettamisen oikeaan kontekstiin ja mittasuhteisiin on erittäin tärkeää. Turvallisuuteen liittyvä tutkimus on tiedon tuottajana avainasemassa ja uskom-

me, että aloitteet turvallisuustutkimuksen kansainvälisestä yhteistyöstä johtavat kaikille osapuolille järkevään työnjarkoon ja toimintamalliin.

Säätelyn merkitys nanotuotteiden ja -sovellusten tulevaisuuteen on huomattava. Mikäli varovaisuusperiaatetta korostetaan liikaa, voidaan seurauksena sortua ylisäätelyyn, joka vaikeuttaa kaupallisten toimijoiden lisäksi myös tutkijoiden elämää. Säätely tapahtuu EU-Suomessa pitkälti EU:n direktiivien pohjalta, joten Suomen aktiivisuus turvallisuustutkimuksen kansainvälisessä yhteistyössä on eduksi ja aktiivista toimintaa on syytä jatkaa. Visiossamme uskomme, että sekä lainsäätäjät että kaupalliset toimijat ovat oppineet aiemista virheistä muilla aloilla, eikä toimintaympäristön tulehduttavia ylilyönnejä tapahdu.

## 5.2 Tutkijoiden visio

Kyselyyn haastateltavia oli yhteensä 54, joista 24 vastasi kysymyksiin. Lähes 50 prosentin vastausprosenttia voidaan pitää hyvänä. Seuraavassa on koottu yhteenveto vastauksista. Alkuperäinen kysely lähetettiin lukuisien ei-suomenkielisten vastaanottajien vuoksi englannin kielellä ja suurin osa myös vastasi englanniksi.

**”Jos koko maailma olisi käytettävissä ilman hankalia rajoituksia, mitä haluaisit tehdä nanotieteessä vuonna 2020?”**

Nanotieteen ja -teknologian tutkimuksesta merkittävä osuus liittyy uusiin materiaaleihin, myös Suomessa, joten ei ole yllättävää, että vastanneista kolmannes on maininnut vuoden 2020 visiossaan materiaalien tutkimuksen. Yksittäisistä sovelluskohteista yleisimmin maini-

taan energiaan liittyvät sovellukset: kuusi vastaajaa mainitsee tämän. Terveysteen liittyvinä kysymyksiinä mainitaan lääkeaineiden annostelu, sairauksien tunnistaminen sekä terveysriskien kartoittaminen, jotka kaikki ovat jo tänään tutkimuskohteita. Kvantti-ilmiöiden ja nanomekaanisen ympäristön yhdistäminen erityisesti tietojenkäsittelyn sovelluksiin mainitaan myös. Akatemiattutkijoiden vastauksissa on hahmoteltu laajempia linjoja kun taas professorien vastaukset ovat spesifimpiä.

Vuoden 2020 nähdään joissakin vastauksissa olevan kaukana, mutta toisaalta useissa tapauksissa vastaaja on varsin ilmeisesti pyrkinyt pikemminkin ennakoimaan oman alansa kehittymistä. Tällaisia visioita voidaan pitää jopa konservatiivisina, lineaariseen kehitykseen pohjaavina. Piirre on ymmärrettävä, sillä hyvin harvoin on kymmenenkään vuoden aikana luonnontieteiden tutkimuksen alalla tapahtunut täysin mullistavia ja ennakkoimattomia muutoksia. Nanoala kehittyy erittäin nopeasti, mutta lineaarinen ajattelu voi silti olla lähellä totuutta.

Erityisinä poimintoina tulevaisuuden visioista voidaan mainita biomimeettikan nousu materiaaleissa ja prosesseissa (esimerkkinä fotosynteesin jäljittelemine), kehittyneiden nanorakenteiden valmistaminen ja itseorganisoiutuvuus, sekä syvemmän ymmärryksen kehittyminen: *”kysymys ei enää ole ”Miksi x tapahtuu rakenteessamme y”, vaan ”Miltainen nanorakenne y tarvitaan, jotta x tapahtuu”. Tähän tarvitaan lisää ymmärrystä (nano)rakenteen ja sen toiminnallisuuden välille.”*

*”Haaveeni on kuitenkin tehdä (koko) solusta mesoskooppinen malli, jolla sen toimintaa pystyy analysoimaan hyvin yksityiskohtaisesti ja kuvaamaan kontrolloituja solutason mittauksia, mikä yhdistelmä tuottaa tarkkaa tietoa solun*

*toimintojen (tai vaikkapa virusinfektion) mekanismeista. Nykyinen tieto on suu-  
relta osalta kvalitatiivista eivätkä atomi-  
tason mallit riitä koko solun kuvaami-  
seen vielä silloinkaan.”*

*”So far, the field I’m working, i.e.,  
‘molecular electronics’ has involved  
mainly developing the methods rather  
than devices themselves. I would like to  
see this to change; meaning that I would  
like to be constructing, developing and  
studying real electrical devices utilizing  
molecular self-assembly in 2020. Even  
maybe full molecular circuits.”*

*“Creating nanomaterials, -structures,  
and -devices with desired combination of  
novel properties; using “atom-by-atom”  
approach including predictive first-prin-  
ciples and multiscale analysis, and ad-  
vanced technological methods.”*

**”Mitä ovat esteet, jotka estävät sinua  
tekemästä sitä mitä haluaisit?”**

Toisessa kysymyksessä haastateltavia pyydettiin mainitsemaan tärkeimmät tekijät, jotka estävät heitä pääsemästä edellisessä kysymyksessä esitettyyn visioon. Kyselyssä ei rajattu sitä, minkä luonteisia esteitä haettiin. Suurin osa vastaajista mainitsi ainoastaan toimintaympäristöön (rahoitus, hallinto, politiikka) liittyviä esteitä ja vain muutama (neljä vastaajaa) piti tutkimuksellisia haasteita rajoittavimpina.

Ylivoimaisesti yleisimpänä rajoitteenä pidetään pitkäjänteisen tutkimusrahoituksen puutetta: puolet vastanneista (12/24) mainitsee tämän. Niiden osalta, jotka asettivat esteet tärkeysjärjestykseen, kahdeksan mainitsee tämän tärkeimpänä. Rahoituksen jakautuminen pieniin lyhytaikaisiin projekteihin sekä jatkuva projektiluontoisen rahoituksen hakeminen, jonka saaminen mainitaan

epävarmaksi ja ennakoimattomaksi, on vastausten perusteella ilmeinen ongelma työssä, jossa tavoitteet ovat kaukana tulevaisuudessa. Riittävän suuren, kriittisen massan ylittävän tutkimusryhmän rahoituksen ylläpitämistä pidetään ongelmana.

Toiseksi suurin vastauksista esiin nouseva ryhmä liittyy rahoituksen hallintoon ja poliittiseen päätöksentekoon (policy). Ongelmina mainitaan rahoituksen suuntautumisen lyhytjänteisyys, sitoutumattomuus perustutkimuksen riittävään tukemiseen tai tietoon ja osaamisen perustuvan yhteiskunnan kehittämiseen yleensä sekä toimivan infrastruktuuripolitiikan puute. Hallintoon käytetyn työajan lisääntyminen viime vuosina mainitaan myös.

Suurimman osan yllä mainituista ongelmista voidaan katsoa kuvastavan teollisen perustutkimuksen tekemisen tämän hetkistä tilannetta Suomessa. Rahoitukseen ja hallintoon liittyviä asioita ei kuitenkaan voida pitää erityisesti ja ainoastaan nanotieteen tutkimukseen liittyvinä.

Nanotieteen ja -teknologian tutkimukseen erityisesti liittyvistä haasteista mainitaan monitieteisyys ja siihen liittyvä tarvittavien kompetenssien kokoaminen. Eri alojen osaamisen saaminen kiinteästi samaan tutkimusryhmään nähtäisiin hyödyllisenä ja tämänkaltaisen tutkimusalojen ja -ryhmien välisen yhteistyön esteitä tulisi selvittää ja mahdollisuuksien mukaan purkaa.

Henkilöresurssit mainitaan kahdessa yhteydessä: toisaalta mainitaan yleisesti pitkäjänteisen tutkimuksen resursointi henkilöstönäkökulmasta ja toisaalta mainitaan, että kun jatkokoulutushanke päättyy ja henkilö osaa asiansa, hän usein lähtee ryhmästä. Varsinaista sopivien henkilöiden saatavuutta ei vastauksissa kuitenkaan mainita ongelmana ja erityisesti suuremmissa tutkimusryhmis-

sä yksittäisen tutkijan siirtyminen muualle ei yleensä liene ongelma.

Professorien ja akatemiaturkijoiden vastauksissa erottuu erilainen näkökulma: professorit vastaavat tähän kysymykseen yleisemmällä tasolla ja vastauksista välittyy vastuu tutkimusryhmän tai yksikön tulevaisuudesta kun taas akatemiaturkijat ovat useammin huolissaan oman uransa jatkamahdollisuuksista ja kovasta kilpailusta. Parissa vastauksessa otetaan erittäin suorasanaisesti kantaa rahoitukseen ja virkoihin liittyvään päätöksentekoon, joita pidetään päättävässä asemassa olevien omia aloja ja tutkijoita suosivina.

Lopuksi on syytä mainita, että tähän kysymykseen saatiin myös vastauksia, joissa nähdään, että lähtökohtaisesti kaikki on mahdollista. ”*Tutkimuksen osalta en näe rajoitteita. Miltei mikä tahansa on mahdollista kun tavoite on selvä ja työ sitä kohti on määrätietoista. Tuloksia tulee kun työtä tarkastellaan selkein väliajoin ja suunnitelmaan tarkistetaan tarvittaessa. Viime kädessä tällainen toimintamalli johtaa myös riittävän rahoituksen saamiseen.*” Toisessa vastauksessa puolestaan esitetään hyvin selkeästi hahmoteltu ja realistinen suunnitelma visio-osuudessa esitetyn työn tarvitsemista resursseista ja samalla todetaan, että näillä reunaehdoilla työn varmasti tulee joku tekemään. Tulevaisuuden luo uskoa se, että positiivisimmat vastaukset ovat akatemiaturkijoilta.

*“Most projects are in general quite small, about one researcher per year. Therefore several external projects are required for a typical research group. The university’s support is not adequate e.g. for post-doc researchers.”*

*“The research aimed is multidisciplinary and requires researchers from different disciplines. Still today it is difficult to collect a multidisciplinary group. Most*

*of the researchers are PhD students and it is difficult to make PhD on electrical engineering at Department of Chemistry. Collaboration with foreign universities is often slow (companies are better in this sense) and therefore it is useful to have multidisciplinary skills in own group.”*

*“There are no fundamental constraints. All limitations are of financial and/or political character.”*

### 5.3 Koulutusvisio

Yliopistot, tutkimuskeskukset ja yksityinen sektori tarvitsevat tulevaisuudessa enenevässä määrin osaajia, jotka hallitsevat laaja-alaisesti luonnontiedettä ja pystyvät käyttämään ja yhdistämään tietoa ja tekniikoita usealta eri luonnontieteen alalta. Myös paine teknologian nopeaan kehittymiseen tutkimuksesta tuotteisiin muuttaa ja lisää yleisesti tutkijoiden, insinöörien ja lääkäreiden koulutustarvetta. Nanoteknologia vaikuttaa myös ihmisten arkiseen toimintaan useammilla aloilla ja laajemmin kuin nykyisin, mikä aiheuttaa tarpeen opetella "nanotiedelukutaitoa" jo yleissivistävässä koulutuksessa.

Perusluonnontieteiden osaamisen ja erityisesti korkeamman koulutuksen kiinnostus on ollut jo useamman vuosikymmenen ajan lievässä laskusuhdanteessa lähes kaikissa läntisen Euroopan maissa. Sekä teknologian kehityksen että akateemisen tutkimuksen kannalta on ensiarvoisen tärkeää taata tulevaisuudessa yliopistoon hakeutuvan lahjakkuuksia, joilla on vahva poikkitieteellinen kiinnostus luonnontieteitä kohtaan. Nanotieteiden tutkimus, joka pohjautuu perusluonnontieteiden yhdistämiseen mittakaavan kautta, on antanut uutta kiinnostusta luonnontieteiden koulutukseen ja pystyy vastaamaan tähän tulevaisuuden haasteeseen.

Vuonna 2020 luonnontieteen ja teknologian opiskelua siivitetään integroi-

malla opetukseen modernien teknisten saavutusten tutkimuksia jo lukiotasolla. Tällaisia aiheita löytyy nanotieteen ja -teknologian piiristä runsaasti. Tavoite on lisätä luonnontieteiden oppimista ja valintaa tulevaisuuden opiskelu- ja työpaikkoina. Opettajiksi valmistuvien koulutuksessa ja opettajien täydennyskoulutuksessa jatkuvuus, elinikäinen oppiminen, yhteydet tiedeyhteisöön ja kansainväliset kontaktit lisääntyvät.

Alempaan korkeakoulututkintoon tähtäävät opiskelijat saavat kandidaatin aineopintotiedot pääaineestaan ja vahvat sivuainekokonaisuudet kahdesta muusta aineestaan sekä tutustuvat nanotieteiden perusteisiin laboratoriotyöskentelyn ja luento-opetuksen kautta. Nanotieteeseen suuntautuvasta koulutusohjelmasta valmistuneilla kandidaateilla on valmiudet jatkaa nanotieteiden, fysiikan, kemian, biologian tai tekniikan syventäviin opintoihin. Nanotieteeseen suuntautuvassa maisterikoulutuksessa olevat opiskelijat hankkivat syventävät tiedot vähintään pääaineestaan ja vahvistavat sivuaineosaamistaan. Opinnäytetyöt teh-

dään poikkitieteellisissä projekteissa. Nanotieteen alalta valmistunut maisteri hallitsee nanotieteisiin liittyvät keskeiset teoriat ja niiden merkityksen omalle erikoistumisalalle sekä osaa soveltaa osaamista tieteellisten ja teknologisten ongelmien ratkaisussa ja koesuunnittelussa. Kansainvälinen nanotieteiden maisterin-koulutusohjelma on vakiinnuttanut paikkansa ja tasokkaita hakijoita ohjelmaan saadaan sekä Suomesta että ulkomailta.

Nanotieteiden tohtorin koulutusohjelmassa poikkitieteellinen väitöskirjaan liittyvä tutkimus tehdään kansainvälisessä ympäristössä ja kaikki koulutuksessa olevat opiskelijat saavat kansainvälistä tutkijakokemusta sekä konferenssien että ulkomaille suuntautuvien laboratoriovierailuiden kautta. Nanotieteistä väitelleillä tohtoreilla on laaja osaaminen, joten tohtoritutkinnon jälkeen hän voi suuntautua luontevasti tutkimustehtäviin joko akateemiselle tai yksityiselle sektorille. Hänellä on myös valmiudet toimia kouluttajana ja/tai asiantuntijana eri organisaatioissa.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Selvityksen tarkoituksena on ollut tunnistaa trendejä ja signaaleja, joiden perusteella voitaisiin viimeisimmän viiden vuoden perusteella arvioida suomalaisen nanotutkimuksen toimintaympäristöä ja tilaa tulevaisuudessa.

Nanotieteen tutkimus on vuoden 2005 jälkeen kehittynyt nopeasti: maailmanlaajuisesti tutkimukseen on panostettu valtavasti rahaa ja henkilöresursseja eikä tälle panostukselle ole vielä näkyvissä loppua. Ala on erittäin kilpailtu ja tutkimuksen painopistealueet ovat pitkälti samat riippumatta siitä, minkä maan strategiaa luetaan. Yhteinen piirre tuoreissa strategioissa on se, että nanotieteen ja -tekniologian painopiste on vuoden 2005 jälkeen selkeästi siirtynyt kohti kaupallisten sovellusten tavoitetta. Tutkimusinvestointien halutaan tuottavan lisäarvoa liike-elämälle ja yhteiskunnalle. Samanlaisesti tieteellisistä lähtökohdista tehtävän perustutkimuksen arvo tunnustetaan, eikä sitä ehdoteta vähennettäväksi.

Suomessakin nanotieteen ja -tekniologian tutkimus ja koulutus on kehittynyt ja laajentunut. Tutkimuksen määrällistä lisääntymistä ei tässä selvityksessä suoranaisesti selvitetty, mutta kuvaavana esimerkkinä voidaan mainita Jyväskylän yliopiston Nanoscience Centerin resursien lisäys kymmenestä neljääntoista professoriin ja 80:stä 110 tutkijaan. Vastaavaa kasvua on tapahtunut muuallakin. Nanotutkimuksen monipuolistuminen ja eri alojen (fysiikka, kemia, bio- ja lääketieteet) lähentyminen jatkuu edelleen. Opetusta on kehitetty poikkitieteelliseen suuntaan, mikä on tarjonnut opiskelijoille uusia näkökulmia tieteenalasta riippumatta. Nanotieteen tuoma monitieteinen ajattelutapa ja sen myötä uudet toimintamallit kehittävät tutkimusta ja koulutusta edelleen.

Suomen Akatemia, Tekes ja opetus- ja kulttuuriministeriö ovat kohdennetulla rahoituksella tukeneet nanotieteen ja -tekniologian tutkimusta voimakkaasti. Valtiovallan kohdennetun tutkimusrahoituksen myötävaikutuksella on syntynyt suomalainen nanobrändi, johon kuuluvat korkeatasoisen tutkimuksen lisäksi hyvin tiedossa ja käytössä oleva nanotutkimuksen infrastruktuuri. Panostus on myös kehittänyt selvästi kansainvälistymistä ja luonut pohjaa tulevaisuuden poikkitieteelliselle tutkimukselle uudella tavalla. Tekesin tutkimusohjelman kontribuutio tässä Nanotech Finland -brändin kehittämisessä on ollut merkittävä. Myös useat Finland Distinguished Professor (FiDiPro)-ohjelman tutkijat ja Strategisen huippuosaamisen keskittymät (SHOK:it) linkittyvät nanotieteen ja -tekniologian tutkimukseen.

Vuoden 2005 keihäänkärjet ja keihäänkärkialat ovat vahvistuneet mutta tarkastelukaudella on kehittynyt myös uusia lupaavia tutkimusryhmiä eri puolille Suomea, ja tämä tarjoaa mielenkiintoisia näkökohtia sovellusten kannalta (kuvantaminen, komposiitit (nanoselluloosa, muut nanotäytteen), painettava elektroniikka, täsmälääkitys, jne.). Samoin nanoturvallisuustutkimuksella on mahdollisuus muodostua suomalaisittain ja pohjoismaisesti merkittäväksi alaksi.

Nano nähdään (edelleen) yhtenä tärkeistä mahdollistavista tutkimusaloista ("enabling technology"), jolla on potentiaalia mm. lähes kaikkien strategisen huippuosaamisen keskustusten kannalta. Potentiaalinen hyödyntäminen ei ole kuitenkaan vielä aivan ilmeistä. Tutkimusteollisuudessa on viime vuosina muuttunut lyhytjänteisemmäksi, ja trendi on ollut, että ns. "blue sky"-tutkimusta tehdään suomalaisissa yrityksissä huomatta-

van vähän. Pääosin keskitytään välttämättömien ja näköpiirissä olevien konkreettisten tarpeiden täyttämiseen. Kenelle tällaisessa toimintaympäristössä lankeaa rooli nanotieteen soveltajana?

Työryhmä on visiossaan kuitenkin optimistinen sen suhteen, että nanotutkimukselle ominainen tasapainoilu tieteen ja teknologian välimaastossa johtaa pidemmällä tähtäyksellä luontevaan tasapainoon myös tutkijalähtöisen ja strategisesti ohjatun rahoituksen välillä. Strategiselle rahoitukselle valittavat alat valitaan huolelliseen analyysiin ja ennakoimiseen pohjalta.

Tutkimusalojen muutos voidaan nähdä evolutiivisena: Suomessa vahva materiaalitieteen ja sen lähellä olevien tutkimusalojen osaaminen on pysynyt ja pysyy luonnollisesti näkyvänä osana myös nanotutkimusta. Uusina avauksina hiilipohjaiset nanomateriaalit ovat vuoden 2005 jälkeen nousseet esille ja ne ovat erilaisissa rooleissa myös keihäänkärkiyksiköiden tutkimusohjelmissa. Energiaan liittyvät sovellukset mainitaan useissa yhteyksissä.

Kysyttäessä tutkijoiden visiota pidemmälle aikavälille (vuoteen 2020) ei selvityksessä noussut ilmeisiä trendejä. Tämä on ymmärrettävää nopeasti kehittyvällä alalla: suuria linjoja – kuten perusilmiöiden ymmärryksen merkittävää paranemista – voidaan ennakoida, mutta yksityiskohtien tai sovellusalueiden ennakoiminen kymmenen vuoden päähän on parhaimmillaankin arvaamista.

Selvityksen kyselyssä kävi selkeästi ilmi, että tutkimusympäristöjen toimintaedellytyksissä on parantamista. Rahoitusta pidetään lyhytjännitteisenä, hallinnon kuormittavuus on lisääntynyt ja tutkijanuran kehittämisessä on edelleen töitä. Nämä viestit nousivat tutkijoiden vastauksissa yli muiden. Samanaikaisesti on todettava, että mainitut ongelmina

nähdyt asiat eivät ole erityisesti nanotutkimukseen liittyviä erikoispiirteitä, vaan koskevat pitkäjänteistä perustutkimusta yleisemminkin.

Yhteenvetona alussa esitettyihin kysymyksiin voitaisiin vastata seuraavasti:

- Voidaanko muutoksista päätellä jotain tulevaisuudesta?

Muutoksista voidaan päätellä varmasti, että kehitys jatkuu nopeana. Tutkimusalat lähentyvät toisiaan ja ymmärrys lisääntyy ja tämän myötä tulee varmasti uusia avauksia. Uusien avausten tunnistaminen ja ennakoiminen on tärkeää. Nanohiukkasten ja -materiaalien terveys- ja ympäristövaikutusten huomioon ottaminen jo tutkimus- ja kehitysvaiheessa tulee todennäköisesti korostumaan.

- Onko Suomessa noussut tai nousemassa uusia aloja ja/tai keihäänkärkiä, jotka haastavat vuoden 2005 keihäänkärjet?

Tutkimus on laajentunut sekä tutkittavien aiheiden osalta että määrällisesti. Täysin uusia laaja-alaisia haastajia ei kuitenkaan ole nähtävissä: vuoden 2005 keihäänkärkialat ovat edelleen voimakkaita ja uusien avausten osalta kehittymispotentiaali on vielä osoittamatta.

- Ovatko keihäänkärkialat Suomessa edelleen keihäänkärkiä, ovatko ne vastanneet haasteisiin ja mikä on valmius vastata haasteisiin jatkossa?

Keihäänkärkialat ovat vahvistuneet ja ovat edelleen kansallisia keihäänkärkiä. Tutkimus on laajentunut ja elänyt kansainvälisen kehityksen mukana ja näin voidaan sanoa, että haasteisiin on vastattu. Erityisen tärkeää olisi, että sekä tunnistettujen keihäänkärkien että tunnistettavien uusien avausten kehittymismahdollisuuksista pidetään huolta.



# VIITTEET

- [BMBF 2010] Nano-Initiative – Action Plan 2010 (DE), Federal Ministry of Education and Research (BMBF), 2007.
- [Culminatium 2010] HelsinkiNano – Nanotechnology Research in Helsinki Region 2010, Culminatium Innovation Oy Ltd, 2010.
- [Evaluation 2009] Evaluation of the Finnish National Innovation System, Taloustieto Oy, 2009. Raportti saatavissa osoitteesta [www.evaluation.fi](http://www.evaluation.fi).
- [Gaija 2010] From Spearheads to Hunting, Evaluation of Nano Programmes in Finland, Tekes Programme Report 6 /2010.
- [HelsinkiNano 2005] HelsinkiNano-hankkeen loppuraportti, Technopolis ventures, 2005.
- [KOM 2004] KOMISSIION TIEDONANTO: Tavoitteena eurooppalainen nanoteknologia-strategia, KOM(2004) 338
- [KOM 2010-2020] Komission tiedonanto: Eurooppa 2020, Älykkään, kestävä ja osallistavan kasvun strategia, KOM(2010) 2020
- [KOM 2010-INNO] Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions: Europe 2020 Flagship Initiative, Innovation Union; SEC(2010) 1161
- [MNT 2004] <http://www.mnt-era.net/MNT/>, viitattu 18.3.2011
- [Nanocenter Finland 2009] <http://www.nanocentrefinland.fi/>, viitattu 18.3.2011
- [Nanologue 2007] <http://www.nanologue.net/index.php>, viitattu 18.3.2011
- [OECD 2010] The OECD Innovation Strategy: Getting a Head Start on Tomorrow, OECD 2010.
- [OPM 2005] Nanotieteen keihäänkärjet Suomessa. OPM 2005:39.
- [OPM 2009] Kansallisen tason tutkimusinfrastruktuurit - Nykytila ja tiekartta. Opetusministeriön julkaisuja 2009:1
- [PCAST 2010] Report to the president and congress on the third assessment of the national nanotechnology initiative (US), The President's Council of Advisors on Science and Technology (PCAST), 2010
- [SA 2009] Suomen tieteen tila ja taso 2009; Suomen Akatemian julkaisuja 9/09.
- [VINNOVA 2010] Nationell strategi för nanoteknik (SE), VINNOVA VP-2010:01.

Nanovisio 2020 -raportissa esitetään katsaus nanotutkimuksen kansalliseen ja kansainväliseen toimintaympäristöön ja suomalaisen nanotieteen keihäänkärkitutkimukseen sekä kuvaillaan alan asiantuntijoiden ja tutkijoiden visio siitä, millaiseksi suomalaisen nanotutkimuksen asema voi kehittyä vuoteen 2020 mennessä. Suomeen on tähän mennessä jo kehittynyt korkeatasoista nanotutkimusta ja alan tutkimuksen infrastruktuuri. Visiona nähdään, että vuonna 2020 nanotiede ja -teknologiat sovelluksineen ovat vakiintuneet laajalti osaksi arkipäivää ja nanotutkimukselle ominainen poikkitieteellinen tutkimustapa on hyvin kehittynyt.



SUOMEN AKATEMIA

Vilhonvuorenkatu 6 • PL 99, 00501 Helsinki  
Puhelin (09) 774 881 • Fax (09) 7748 8299  
[www.aka.fi](http://www.aka.fi) • [viestinta@aka.fi](mailto:viestinta@aka.fi)