

# Nanoteknologia ja ympäristönsuojelu

**Susanna Suomalainen**  
**Tero Hakkarainen**





# Nanoteknologia ja ympäristönsuojelu

**Susanna Suomalainen**  
**Tero Hakkarainen**

Helsinki 2008

YMPÄRISTÖMINISTERIÖ



YMPÄRISTÖMINISTERIÖ  
MILJÖMINISTERIET  
MINISTRY OF THE ENVIRONMENT

YMPÄRISTÖMINISTERIÖN RAPORTTEJA 11 | 2008  
Ympäristöministeriö  
Ympäristönsuojeluosasto

Taitto: Marjatta Naukkarinen

Julkaisu on saatavana vain internetistä:  
[www.ymparisto.fi](http://www.ymparisto.fi) > Ympäristöministeriö  
> Julkaisut > Ympäristöministeriön raportteja -sarja

ISBN 978-952-11-3060-1 (PDF)  
ISSN 1796-170X (verkkojulkaisu)

## ESIPUHE

Tämän selvityksen ovat tehneet ympäristöministeriön ympäristönsuojeluosaston ja Suomen ympäristökeskuksen kemikaaliyksikön harjoittelijat vuonna 2007. Selvityksen laativat MMM Susanna Suomalainen sekä LuK, kauppatieteiden ylioppilas Tero Hakkarainen. Erikoistutkija Jukka Ahtiainen, yksikönpäällikkö Kaija Kallio-Mannila ja kemisti Tero Eklin Suomen ympäristökeskuksesta ovat osallistuneet selvityksen viimeistelyyn.

Selvityksen teemana on nanoteknologia. Nanoteknologiaa pidetään yhtenä tulevaisuuden lupaavimmista tutkimus- ja kehitysaloista, jonka varaan lasketaan suuria toiveita monen eri alan suunnalta. Nanoteknologiaan liittyy kuitenkin paljon epävarmuustekijöitä, joita on tutkittava tarkemmin. Tässä selvityksessä kuvataan nanoteknologian tällä hetkellä tapahtuvaa toimintaa ja tulevaisuuden näkymiä. Erityistä huomiota kiinnitetään nanoteknologiaan mahdollisesti liittyvien riskien tutkimukseen ja siihen liittyviin tarpeisiin.

Selvityksen ei ole tarkoitus kattaa koko nanoteknologian tutkimuskenttää tai antaa yksityiskohtaista kuvaa eri tutkimusaloista ja niiden sovelluksista, koska alalla tapahtuvan huiman kehityksen vuoksi se ei olisi mahdollistakaan. Sen sijaan selvityksen tarkoituksena on tuoda esiin sellaista tietoa, joka kannustaa avoimeen keskusteluun nanoteknologiasektorin, viranomaisten ja kuluttajien välillä.



## SISÄLLYS

<b>Esipuhe</b> .....	3
Nanoteknologiaan liittyvää termistöä .....	7
Käytetyt lyhenteet ja termit .....	7
<b>1 Johdanto</b> .....	11
<b>2 Nanoteknologia ja nano käsitteenä</b> .....	12
2.1 Miksi nano on tärkeä .....	15
2.2 Miten nano poikkeaa bulkkimateriaalista .....	16
<b>3 Nanoteknologian hyödyistä ja sovelluksista</b> .....	17
3.1 Nanoteknologian hyödyistä .....	18
3.1.1 Energian tuotanto ja varastointi .....	19
3.1.2 Veden, ilman ja maaperän laatu .....	19
3.1.3 Energiatehokkuus .....	20
3.2 Tuotesovelluksia .....	20
3.2.1 Elektroniikka .....	21
3.2.2 Autot .....	21
3.2.3 Kodinkoneet ja työkalut .....	21
3.2.4 Vaatteet .....	22
3.2.5 Urheiluvälineet .....	22
3.2.6 Hygieniatuotteet ja terveys .....	22
3.2.7 Elintarvikkeet .....	23
<b>4 Nanoteknologian ympäristöriskejä</b> .....	24
4.1 Ympäristökäyttäytyminen ja myrkyllisyysmekanismit .....	24
4.1.1 Hajoaminen .....	25
4.1.2 Fysikaaliset ja kemialliset vaikutukset myrkyllisyyteen .....	25
4.1.3 Oksidatiivinen stressi vaikutusmekanismina .....	26
4.1.4 Muut vaikutusmekanismit .....	27
4.1.5 Kertyminen, säilyminen ja poistuminen eliöstä .....	27
4.2 Vaikutukset ympäristöön ja eliöstöön .....	29
4.2.1 Maaperä .....	29
4.2.2 Ilma .....	30
4.2.3 Vesi .....	31
<b>5 Riskien hallinta</b> .....	33
5.1 Asennoituminen riskitutkimukseen .....	33
5.2 Riskien arviointi .....	34
5.3 Riskien hallinnan kehitysnäkymät .....	37

<b>6</b>	<b>Nanoteknologia Suomessa ja maailmalla</b>	38
6.1	Suomi	38
6.2	<b>Euroopan Unioni</b>	41
6.2.1	Nanoteknologia puiteohjelmissa	41
6.2.2	NanoScience Europe	42
6.2.3	EU-SCHENIHR	42
6.2.4	ETPIS	42
6.3	<b>EU-maat</b>	42
6.3.1	Iso-Britannia	42
6.3.2	Saksa	43
6.3.3	Tanska	43
6.4	<b>Nanoteknologian tutkimus EU:n ulkopuolella</b>	43
6.4.1	USA	43
6.4.2	Japani	44
6.4.3	OECD	44
6.4.3.1	<i>Hanke 1: Tietokannan kehittäminen terveyden ja ympäristön turvallisuuden tutkimuksesta</i>	44
6.4.3.2	<i>Hanke 2: Tutkimus-strategiat (EHS) nanomateriaaleille</i>	44
6.4.3.3	<i>Hanke 3: Turvallisuustestaus edustavalle otokselle nanomateriaaleista</i>	45
6.4.3.4	<i>Hanke 4: Tuotetut nanomateriaalit ja testausohjeet</i>	45
6.4.3.6	<i>Hanke 6: Yhteistyö ja riskinarviointi</i>	45
<b>7</b>	<b>Johtopäätökset</b>	46
	<b>Lähteet</b>	48
	<b>Kuvailulehdet</b>	50



## Nanoteknologiaan liittyvää termistöä

Nano	<b>SI-järjestelmän kerrannaisyksikön</b> etuliite, joka tarkoittaa miljardisosaa.
Nanometri (nm)	Pituuden yksikkö, millimetrin miljoonasosa (10 <sup>-9</sup> m).
Nanoteknologia	Tuotanto, jossa käytetään rakenteita ja laitteita, joissa yksi tai useampi dimensio on kooltaan ≤100 nm.
Nanotiede	Nanomittakaavassa olevien rakenteiden manipuloinnin ja ilmiöiden tutkimista, jossa ominaisuudet poikkeavat merkittävästi suuremmissa mittakaavassa olevien rakenteiden ominaisuuksista.
Nanopartikkeli	Partikkeli, jossa yksi tai useampi dimensio on kooltaan ≤100 nm.
Nanomateriaali	Materiaali, jossa yksi tai useampi ulkoinen tai sisäinen dimensio esiintyy nanomittakaavassa ja joka voi tuottaa uudenlaisia ominaisuuksia verrattuna samaan materiaaliin suuremmissa mittakaavassa.
Nanomittakaava	Yksi tai useampi dimensio kooltaan ≤100 nm.
PM0.1	Hyvin pieni hiukkanen, jonka halkaisija on maksimissaan 0,1 mikrometriä (100 nm).
PM2.5	Pienhiukkanen, jonka halkaisija on maksimissaan 2,5 mikrometriä. Pienhiukkanen sisältää hyvin pieniä hiukkasia.
PM10	Hiukkanen, jonka halkaisija on maksimissaan 10 mikrometriä. Yhdistelmä hyvin pieniä hiukkasia, pienhiukkasia ja karkeita hiukkasia (karkeiden hiukkasten halkaisija 2,5 – 10 mikrometriä).

## Käytetyt lyhenteet ja termit

ALD	Atomic Layer Deposition. Menetelmä, jolla kasvatetaan ohutkalvoja kontrolloidusti atomikerros kerrallaan.
BIAC	Business and Industry Advisory Committee. Elinkeinoelämän neuvoo-antava organisaatio OECD:ssä, OECD-maiden yhteistyöelin teollisuuden kanssa.
CHP	Combined heat and power. Yhdistetty lämmön- ja sähkön-tuotanto.
Bulkki-	Bulkkimateriaaleilla ja -tuotteilla tarkoitetaan aineen nanokokoluokkaa suurempia esiintymismuotoja, kuten esimerkiksi suurempia partikkeleita.
DEFRA	Department for Environment, Food and Rural Affairs. Yhdistyneen kuningaskunnan ympäristöasioista vastaava viranomainen.
Dendriittisolu	Eri kudoserakenteissa esiintyvä solutyyppejä, joka osallistuu mm. antigeenin sitomiseen ja sen kuljettamiseen imukudokseen.
Distaalinen	Lääketieteellinen termi, joka tarkoittaa kaukana (kauempana) keskustasta sijaitseva, etäisempi.
DND	Direct Nanoparticle Deposition. Eräs pinnoitusmenetelmä kuten ALD.
EHS	“Environmental, health and safety”. Lyhenne tarkoittaa yleisesti ympäristön ja eliöiden kuntoa ja turvallisuutta.

<b>EPA</b>	Environmental Protection Agency. Yhdysvaltojen ympäristöasioista vastaava viranomainen.
<b>ERA</b>	European Research Area. Euroopan tutkimusalue.
<b>ERA-NET</b>	European Research Area Networks. Euroopan maiden kansallisia ja alueellisia tutkimus- ja teknologiaohjelmaverkostoja.
<b>FMNT</b>	Finnish Micro & Nano Technology Network. Suomalainen yhteistyöverkosto alan yrityksille ja organisaatioille.
<b>GSH</b>	Glutationi, mitokondrion eräs entsyymi, joka suojaa ROS:ta.
<b>GSSG</b>	GSH:n hapettunut muoto.
<b><i>In silico</i></b>	Tutkimustekniikka, jossa käytetään tietokoneavusteista mallitusta (simulointia).
<b><i>In vitro</i></b>	Tutkimustekniikka, jossa koe suoritetaan koeputkessa, lasimaljassa tai kuoppalevyillä käyttäen soluja, organelleja tai molekyylibiologian menetelmiä (ei kokonaisia organismeja)
<b><i>In vivo</i></b>	Tutkimustekniikka, jossa koe tehdään elävässä organismissa. Kalat, linnut, hiiret ja rotat ovat usein käytettyjä koeläimiä.
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization. Kansainvälinen standardointiorganisaatio.
<b>LED</b>	Light Emitting Diode. Pieni valoa tuottava diodi.
<b>Makrofaagi</b>	Solu, joka on erikoistunut ottamaan sisäänsä elimistössä löytyviä sille vieraita aineita, myrkkyyjä tai bakteereja. Sisäänotto tapahtuu ns. fagosytoosin avulla ympäröimällä vieras aine kalvomateriaalilla.
<b>MBE</b>	Molecular Beam Epitaxy. Menetelmä, jolla kasvatetaan yhtenäistä kidettä.
<b>MWNT</b>	Multi Wall Nano Tube. Useampiseinäinen hiilinanoputki.
<b>NNI</b>	National Nanotechnology Initiative. Yhdysvaltojen liittovaltion virasto, jolle on keskitetty nanoteknologian tutkimuksen koordinointi.
<b>NOEL</b>	No Observed Effect Limit. Suurin pitoisuus, jonka ei ole havaittu aiheuttavan testieliölle tilastollisesti merkittävässä määrin vaikutuksia.
<b>OECD</b>	Organization for Economic Cooperation and Development. Taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestö.
<b>OEL</b>	Organic Electroluminescent. Elektroluminenssi näyttö
<b>OLED</b>	Organic Light Emitting Diode. Käytetään ohuissa näyttöissä.
<b>PNEC</b>	Predicted No Effect Concentration. Aineen suurin pitoisuus, jolla ei todennäköisesti ole haittavaikutuksia ympäristössä.
<b>ppb</b>	Parts per billion.
<b>ppm</b>	Parts per million. Suhteellinen pitoisuusmitta (1 000 ppm = 1 ‰, 10 000 = 1 ‰), jota käytetään yleisesti ympäristömyrkkyyden mittaamisessa.
<b>REACH</b>	Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals. EU:n uusi kemikaaliasetus.
<b>ROS</b>	Reactive Oxygen Species. Reaktiivisia happiyhdisteitä, kuten esimerkiksi superoksidi O <sub>2</sub> <sup>-</sup> .

<b>SCENIHR</b>	Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks. Euroopan komission alainen tieteellinen komitea.
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Piidioksidi.
<b>SWNT</b>	Single Wall Nano Tube. Yksiseinäinen hiilinanoputki.
<b>TD<sub>10</sub></b>	Syöpäriskin arvioinnissa käytetty mittari. Annos, joka aiheuttaa syövän 10 prosentille koe-eläimistä.
<b>TGD</b>	Technical Guidance Document. Tekninen ohjeistus.
<b>THF</b>	Tetrahydrofuraani, yleisesti käytetty orgaaninen liuotin.
<b>TiO<sub>2</sub></b>	Titaanidioksidi.
<b>TSCA</b>	Toxic Substances Control Act. Yhdysvalloissa voimassa oleva laki, jonka kautta säädellään kemikaalien sekä nanomateriaalien käyttöä.
<b>UNEP</b>	United Nations Environment Programme. YK:n ympäristöohjelma, jossa myös nanomateriaalit on huomioitu.
<b>UV-valo</b>	Sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on ultravioletialueella. Säteily pystyy aiheuttamaan DNA-vaurioita. Suurin lähde on aurinko.
<b>Vesikkeli</b>	Solussa sijaitseva pieni rakkula, jonka erottaa solulimasta vähintään yksi kalvokerros. Vesikkelit kuljettavat, säilyttävät ja hajottavat solujen sisäisten prosessien tuotteita tai jätteitä.
<b>VTT</b>	Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Pohjois-Euroopan suurin soveltavaa tutkimusta tekevä organisaatio, puolueeton asiantuntijataho.
<b>WPMN</b>	Working Party on Manufactured Nanomaterials. OECD:n jäsenmaiden välinen työryhmä nanoteknologian turvallisuuden hyväksi.
<b>WWC</b>	Woodrow Wilson International Center for Scholars. Yhdysvaltalainen järjestö, joka tukee tutkimusta.
<b>ZnO</b>	Sinkkioksidi.



# 1 Johdanto

Tämän selvityksen tarkoituksena on kartoittaa yleisellä tasolla nanoteknologian tutkimusta, nanoteknologian sovelluksia sekä niihin liittyviä riskejä. Tarkastelu keskittyy terveys- ja ympäristöriskien hallintaan liittyviin kysymyksiin. Selvityksessä pohditaan lyhyesti sitä, millaisia haasteita nanoteknologian kehitys tuo tämän sääntelyä ajatellen.

Vaikka nanoteknologian ja -materiaalien käyttö on muutaman viime vuoden aikana lisääntynyt voimakkaasti, tiedetään niiden terveys- ja ympäristövaikutuksista hyvin vähän verrattuna siihen, kuinka paljon nanoteknologian tutkimus- ja kehitystyöhön investoidaan. Käytettyjen materiaalien lyhytaikaisia vaikutuksia on tutkittu jonkin verran, mutta pitkäaikaisten vaikutusten tutkimusta ei ole tehty juuri ollenkaan. Sen vuoksi nanoteknologian riskien selvittäminen ja vaikutusten tutkiminen on hyvin tärkeää. Uusia materiaaleja kehitetään jatkuvasti ja ne pääsevät nykyisin ilman suurempaa sääntelyä tuotantoon ja kuluttajamarkkinoille.

Selvityksen tarkoituksena ei ole antaa täydellisen kattavaa kuvaa nanoteknologian tutkimus- ja kehitystyöstä sekä sovelluksista, vaan tarjota yleisluontoinen kuvaus nanoteknologiasta. Selvityksen kattavuuden osalta yleisluontoiseen kuvaukseen on päädytty siitä syystä, että nanoteknologian tutkimus- ja kehityskenttä sekä mahdolliset sovellukset ovat niin laaja-alaisia ja nopeasti kehittyviä, että täydellistä kuvausta nanoteknologia-alasta on lähes mahdotonta tehdä.

## 2 Nanoteknologia ja nano käsitteenä

Nanotiede on suhteellisen nuori poikkitieteellinen tieteenala, jonka tutkimuskohteena ovat kemialliset, fysikaaliset ja biotieteelliset ilmiöt, jotka tapahtuvat tai ilmenevät nanometrimittaluokassa. Nanoteknologia on atomitason kokoisten rakenteiden teknologiaa. Yksi nanometri (nm) on kooltaan miljoonasosa millimetriä eli metrin miljardisosa ja vastaa leveydeltään suurin piirtein noin kymmentä atomia; vertailun vuoksi voidaan todeta, että yhden DNA-molekyylin koko on noin 2,5 nm, punasolun 7 000 nm ja hiuksen runsaat 80 000 nm. Nanoteknologiassa yhdistyvät muun muassa fysiikan, kemian, biologian ja lääketieteen tieteenalat ja siksi nanoteknologiasta voisikin yksikön sijaan käyttää termiä nanoteknologiat. USA:ssa on kansallisessa nanoteknologiahankkeessa määritelty nanoteknologialle ja -tieteelle kolme ehtoa, jotka niiden on täytettävä:

1) Atomi-, molekyyli- tai makromolekyyalitasolla tapahtuvaa tutkimusta tai teknologiakehitystä, jossa tutkittavien kohteiden koko on suuruusluokaltaan 1 – 100 nanometriä.

2) Tutkimuksen tai kehityksen kautta luodaan, ja niiden yhteydessä käytetään, laitteita, rakenteita ja systeemejä, joilla on pienen tai pienehkön kokonsa ansiosta uudentyyppisiä ominaisuuksia ja toimintoja.

3) Rakenteita voidaan hallita tai käsitellä atomitasolla.

(UNEP 2007, Helsinki NANO 2005, The Royal Society and The Royal Academy of Engineering 2004.)

Nanomateriaalit, -prosessit ja -tuotteet voidaan jakaa viiteen eri ryhmään niiden ominaisuuksien perusteella. Ensimmäisen ryhmän muodostavat luonnollisissa prosesseissa syntyvät tai luonnossa esiintyvät nanomittakaavan kokoiset partikkelit. Tällaisia nanopartikkeleita syntyy esimerkiksi palamisprosessin yhteydessä. Myös useimmat virukset ovat nanopartikkelien kokoisia. Tyypillisesti tämän ryhmän nanopartikkeleita ei kuitenkaan lueta kuuluvaksi nanoteknologian piiriin, sillä niitä ei ole tietoisesti suunniteltu ja valmistettu. (Davies 2007.) Nanopartikkelissa vähintään yksi ulkoinen tai sisäinen rakenne esiintyy nanomittakaavassa (dimensioltaan alle 100 nanometriä). Kun partikkelin halkaisija on alle 100 nanometriä, puhutaan myös hyvin hienoista hiukkasista (*ultrafine particles*). Näitä hienoja hiukkasia esiintyy esimerkiksi ilmansaasteissa ja muodoltaan kyseiset partikkelit ovat usein pallomaisia. (Stone 2007.) Englanninkielinen terminologia auttaa selvittämään eroa luonnollisesti syntyneiden nanopartikkeleiden ja teollisesti valmistettujen nanopartikkeleiden välillä. Luonnollisesti syntyneisiin nanopartikkeleihin viitataan, kun käytetään termiä "*ultrafine particles*", "*background nanoparticles*" tai useimmiten pelkästään "*nanoparticles*". Vaikka termillä "*nanoparticles*" voidaan periaatteessa viitata myös tarkoituksenmukaisesti valmistettuihin nanopartikkeleihin, käytetään näistä synteettisistä nanopartikkeleista yleisimmin nimitystä "*engineered nanoparticles*" sekaannuksen välttämiseksi. (K. Savolainen, Työterveyslaitos, henkilökohtainen tiedonanto 18.9.2007.)

Vaikka luonnollisesti syntyneet nanopartikkelit eivät kuulu nanoteknologian piiriin, voivat ne kuitenkin auttaa ymmärtämään kyseisen mittaluokan mukaisten partikkelien käyttäytymistä.

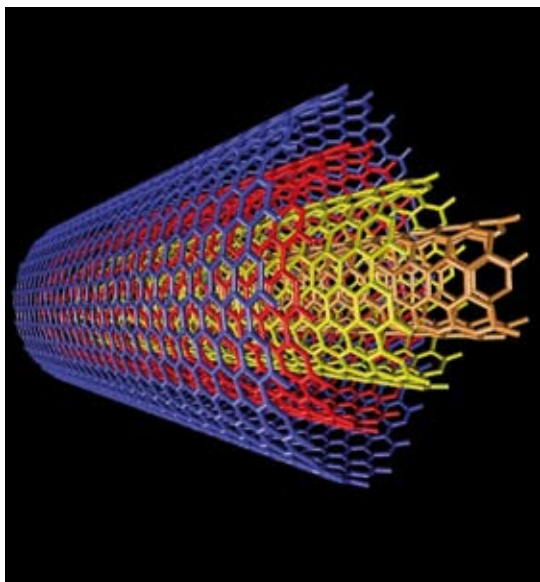
Toisen ryhmän muodostavat sellaiset nanopartikkelit, jotka syntyvät ihmistoiminnan satunnaisena sivutuotteena. Tällaisia nanopartikkeleita esiintyy muun muassa autojen pakokaasupäästöissä. Vaikka tämän ryhmän nanopartikkeleilla voi esiintyä samankaltaisia vaikutuksia terveyteen ja ympäristöön mitä tarkoituksenmukaisesti valmistetuilla nanopartikkeleilla (eli synteettisillä nanopartikkeleilla), ei niitä ensimmäisen ryhmän tavoin lasketa kuuluvaksi nanoteknologian piiriin.

Kolmannen ryhmän muodostavat nanovalmistusprosessit, joita usein, joskaan ei aina, käytetään nanomateriaalien valmistukseen. Tähän ryhmään kuuluvat uudentyyppiset mikroskoopit ja uudenlaiset tavat käsitellä äärettömän pieniä määriä materiaalia, jotka mahdollistavat aineiden ja rakenteiden käsittelyn atomi atomilta. Kyseisiä nanovalmistusprosesseja käytetään muun muassa erilaisten sensoreiden, elektronisten komponenttien ja suodattimien valmistuksessa.

Neljänten ryhmään kuuluvat tarkoituksenmukaisesti valmistetut nanomateriaalit, jotka voivat vaihdella koostumukseltaan ja muodoltaan. (Davies 2007.) Nämä tarkoituksenmukaisesti valmistetut nanomateriaalit voidaan jakaa edelleen neljään luokkaan, jotka kuvataan seuraavaksi.

## 1. Hiileen perustuvat materiaalit

Nämä nanomateriaalit koostuvat pääasiassa hiilestä. Yleisimmät muodot ovat ontot pallot ja putket. Palloja kutsutaan fullereeneiksi ja putkia nanoputkiksi. Mahdollisia sovelluksia ovat pinnoitteet, kevyemmät ja vahvemmat materiaalit, yhdisteiden kuljetus eliöissä sekä sovellukset elektroniikkateollisuudessa. (EPA 2007.) Kuvassa 1 esitellään moniseinäinen nanoputki (MWNT, Multi Wall Nano Tube).

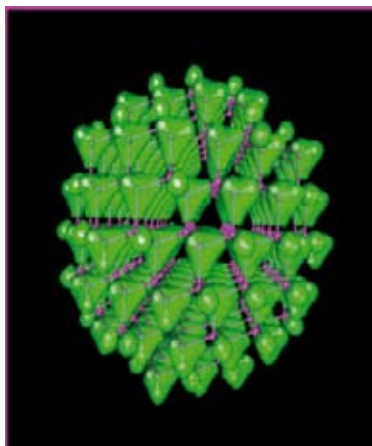


Kuva 1. Moniseinäinen nanoputki

Lähde: Alain Rochefort, Center for Research on Computation and its Applications (CERCA).

## 2. Metalleihin perustuvat materiaalit

Nämä yhdisteet sisältävät muun muassa nanokokoisina partikkeleina hopeaa, kultaa ja metallien oksideja. Koko vaihtelee muutamista nanometreistä muutamiin satoihin. Ryhmään kuuluvat myös kvanttipisteet (*quantum dots*). Kvanttipisteet ovat tiiviisti pakattuja puolijohdekiteitä. Muuttamalla kvanttipisteiden kokoa muuttuvat myös niiden optiset ominaisuudet. Tätä ominaisuutta käytetään hyödyksi esimerkiksi eräissä värjäyssovelluksissa (mm. nHalo). (EPA 2007.)

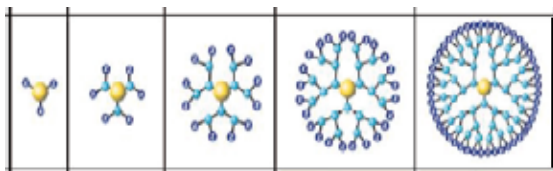


Kuva 2. Gallium-quanttipiste (465 atomia)

Lähde: Li-Wang Wang, A New Model of Quantum Dots: Rethinking the Electronics, Lawrence Berkeley National Laboratory.

## 3. Dendrimeerit

Nämä nanomateriaalit ovat nanokokoisia polymeerejä, jotka on rakennettu haaroituvista yksiköistä. Dendrimeerin pinnalla on lukuisia ketjun päitä, jotka voidaan muokata suorittamaan tiettyä kemiallista funktiota. Dendrimeerejä voidaan käyttää reaktioiden katalysoinnissa ja lääkeaineiden kuljettimina. (EPA 2007.)



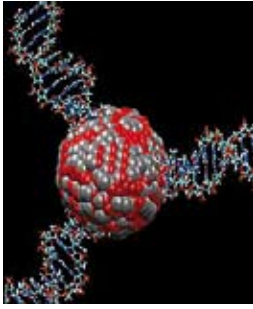
Kuva 3. Dendrimeerien kokoa pystytään kontrolloimaan tarkasti kasvattamalla uusia kerroksia

Lähde: Dendritic Nanotechnologies Inc.

## 4. Komposiitit

Komposiiteilla tarkoitetaan nanopartikkelien yhteydessä partikkeleita, jotka on yhdistetty toisten nanopartikkelien tai kookkaampien materiaalien kanssa. Tällaisia yhdisteitä voidaan käyttää lukuisissa sovelluksissa, kuten autonossissa, pakkaus- tarvikkeissa ja jääkiekkomailoissa. Komposiiteilla voidaan vaikuttaa mekaanisiin, lämpö-, suojaus- ja syttymisominaisuuksiin. (EPA 2007.)





Kuva 4. Keskellä on titaanimolekyyli, johon on liitetty DNA-pätkä. Tämänkaltaisia materiaaleja voidaan tulevaisuudessa käyttää sairauksien hoidossa  
Lähde: Argonne National Laboratory, Center for Nanoscale Materials.

Viidennen ryhmän muodostavat nanotuotteet eli tuotteet, jotka sisältävät nanomateriaalia. Tällä hetkellä nanoteknologiaa sisältäviä tuotteita on markkinoilla yli 500.<sup>1</sup> Lisäksi vuonna 2005 teollisessa käytössä arvioitiin olevan yli 600 nanoteknistä komponenttia ja puolijohdevalmistetta. (Davies 2007.) Nanomittakaavan rakenteita tai molekyyliä sisältäviä tuotteita tai komponentteja on jo useilla aloilla: autoteollisuus, elektroniikka, kemian teollisuus, valoteollisuus, biotieteet sekä ympäristötekniikka (UBA 2006). Sellaisten nanotuotteiden määrää, kuten lääketieteessä käytettävät laitteet, keraamiset ja teolliset suodattimet, jotka eivät ole kuluttajahyödykkeitä, ei pystytä arvioimaan tarkasti, mutta niitä on ilmeisesti satoja (Davies 2007).

Kuten edellä voidaan huomata, on "nano" käsitteenä hyvin monimuotoinen ja moniselitteinen, mikä vaikeuttaa yhdenmukaisen ja helposti ymmärrettävän termistön kokoamista (Davies 2007). Lisäksi luonnollisesti syntyneet nanopartikkelit ja teollisesti valmistetut nanopartikkelit voivat aiheuttaa sekaannusta. Nanoteknologia liittyy kuitenkin tarkoituksenmukaisesti valmistettujen, synteettisten, nanopartikkeleiden tutkimiseen ja kehittämiseen. Lisäksi tulee kiinnittää huomiota, että synteettisistä nanopartikkeleista puhuttaessa tulisi mainita selkeästi, mistä nanopartikkelista on kyse (esim. titaanidioksidin nanopartikkelit, hopean nanopartikkelit jne.), eikä puhua nanopartikkeleista yleisellä tasolla. Tämä johtuu siitä, että synteettisiä nanopartikkeleita on olemassa satoja erilaisia ja yhdellä nanomittakaavassa olevalla aineellakin voi olla useita eri muotoja. Näin ollen nanopartikkeleiden yleistäminen, esimerkiksi riskeistä puhuttaessa, voi aiheuttaa sekaannusta, sillä osa nanopartikkeleista voi olla täysin haitattomia, kun taas joidenkin käyttö voidaan mahdollisesti joutua jopa kieltämään niiden haitallisuuden takia. (K. Savolainen, Työterveyslaitos, henkilökohmainen tiedonanto 6.9.2007.)

## 2.1

### Miksi nano on tärkeä

Kun partikkeleita pienennetään nanokokoluokkaan, saattavat materiaalin pinnan ominaisuudet tulla tärkeämmiksi kuin itse materiaalin ominaisuudet. Arvokkaista aineista kuten platinasta voidaan valmistaa halvempia katalyytteja, kun vaikutuspinta-alaa suhteessa tilavuuteen kasvatetaan. Toisaalta halvoista aineista voi tulla hyvin arvokkaita nanokokoisina, koska nanokokoisissa kappaleissa kvanttimekaniikan ominaisuudet saattavat tulla dominoiviksi. Näin on käynyt Piidioksidin ( $\text{SiO}_2$ ) kohdalla, jolla saadaan jo pienillä määrillä suojattua naarmuille ja kulumiselle herkkiä pintoja. Tekniikka toimii myös joustavilla pinnoilla kuten vaatteissa. Nanomateriaalien avulla voidaan parantaa materiaalien ominaisuuksia tai jopa lisätä uusia ominaisuuksia

<sup>1</sup> Woodrow Wilson International Center for Scholars on laatinut listan markkinoilla olevista, nanoteknologiaa sisältävistä tai siihen perustuvista, tuotteista. Listan löytää osoitteesta <http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/> [viitattu 4.2.2008].

tuotteisiin. Tuotteiden ja prosessien miniatyrisointi säästää energiaa ja materiaaleja. Nanoteknologian avulla toivotaan voitavan kehittää sellaisia sovelluksia, joilla parannettaisiin ympäristötilaa sekä edistettäisiin ihmisten hyvinvointia.

## 2.2

### **Miten nano poikkeaa bulkkimateriaalista**

Nanoteknologia on yksi tulevaisuuden "lupaavimmista" tutkimus- ja kehitysaloista, jonka varaan lasketaan suuria toivoja. Nanoteknologian avulla uskotaan voitavan parantaa erilaisten aineiden ja yhdisteiden optisia, elektromagneettisia ja mekaanisia ominaisuuksia, jotka ovat mahdollisia nanopartikkeleiden ainutlaatuisen käyttäytymisen ansiosta. (Chen 2007.) Partikkeleiden pieni koko ja suuri pinta-ala/massa-suhde vaikuttavat aineiden käyttäytymiseen. Pinta-alan merkitys on tärkeä, sillä biologiset molekyylit voivat reagoida vain sellaisten atomien kanssa partikkelissa, joihin niillä on pääsy eli atomien kanssa, jotka ovat partikkelin pinnalla. Reaktion laajuus nanopartikkelin ja sitä ympäröivän nesteiden välillä riippuu niiden rajapinnan laajuudesta eli nanopartikkeliannoksen kokonaispinta-alasta. Mitä pienemmäksi partikkelin säde tulee, sitä suuremmaksi pinta-alan osuus kasvaa. Tällöin atomien suhteellinen osuus partikkelin pinta-alasta kasvaa verrattuna tavanomaisiin partikkeleihin, joka mahdollistaa suuremman reaktiivisuuden. Partikkelin pinta-alaa ja pinnalla olevien atomien määrää tavanomaisen partikkelin ja nanopartikkelin välillä voidaan verrata seuraavan esimerkin avulla. Kun tavanomaisen partikkelin läpimitta on esimerkiksi 100 mikrometriä (100 000 nm), on sen pinta-ala 0,03 m<sup>2</sup>/g. Atomien prosentuaalinen osuus partikkelin pinnalla on 0,001 %. Vertailtava nanopartikkeli on läpimitaltaan 10 nanometriä. Sen pinta-ala on 286 m<sup>2</sup>/g, mutta verrattuna tavanomaiseen partikkeliin, nanopartikkelissa atomien osuus pinnalla on 10,5 prosenttia. (Stone 2007.)

Uudentyyppisten rakenteiden ja materiaalien valmistaminen on mahdollista sen vuoksi, että tutkittaessa jo tuntemiemme materiaalien rakennetta nanomittakaavassa, niiden ominaisuudet (fysikaaliskemialliset ja biologiset) muuttuvat. Nanomittakaavassa olevien rakenteiden valmistukseen käytetään kahta erilaista menetelmää, "bottom up" ja "top down". Edellinen menetelmä on yleisemmin käytössä ja siinä orgaanisia tai epäorgaanisia molekyylirakenteita kasvatetaan atomi atomilta tai molekyyli molekyyliltä ja tavoitteena on tähän menetelmään pohjautuen aikaansaada rakenteiden itseorganisoituvaa kasvua. Jälkimmäisessä menetelmässä olemassa olevia ja tunnettuja mikro- ja makrotason rakenteita muunnetaan nanomittakaavaan; näitä miniatyrisoituja rakenteita käytetään muun muassa nanoelektroniikan yhteydessä. (Helsinki NANO 2005.)

### 3 Nanoteknologian hyödyistä ja sovelluksista

Koska nanoteknologia mahdollistaa rakenteiden ja molekyylien käsittelyn, pystytään nanoteknologian avulla hyödyntämään nanopartikkelien ainutlaatuisia ominaisuuksia ja rakentamaan siten tiettyyn tarkoitukseen kohdistettuja materiaaleja. Nanoteknologiasovelluksia käytetään jo hyvin laajasti esimerkiksi biotekniikassa, lääketieteellisyydessä, kemian teollisuudessa sekä huipputekniikkaa edustavassa teollisuudessa. Tällä hetkellä maailmanlaajuisilla markkinoilla on yli 10 000 yritystä, jotka työskentelevät nanotuotteiden parissa ja nanoteknologiatuotteita olisi tutkittavana ja kehitettävänä yli 50 000. Nanoteknologian sovellusten määrän oletetaan kasvavan tulevaisuudessa huomattavasti, sillä tutkimus- ja kehittämistyötä tehdään usealla alalla. (Chen 2007.)

Vuosien 2004 – 2006 aikana nanoteknologian ja -tieteen maailmanlaajuiset menot yksityinen ja julkinen sektori yhteenlaskettuna olivat runsaat 24 miljardia euroa. Euroopan osuudeksi tuosta summasta lukeutui yli neljännes. (Euroopan komissio 2007a.) Vuonna 2005 nanoteknologiaa sisältävien tuotteiden markkina-arvo vastasi yli 30 miljardia dollaria, joka ylitti kaksinkertaisesti vuoden 2004 tuoton. Nanoteknologisten sovellusten ja tuotteiden markkina-arvon ennustetaan kuitenkin kasvavan räjähdysmäisesti vuoteen 2014 mennessä. Tällöin niiden tuottojen oletetaan olevan arvoltaan noin 2,6 biljoonaa dollaria, joka vastaisi noin 15 prosenttia koko teollisesti tuotettujen tavaroiden markkina-arvosta. (Lux Research 2006.) Maantieteellisesti nanoteknologian tutkimus ja rahoitus on keskittynyt pitkälti OECD-maihin; USA:lla, EU:lla ja Japanilla on lähes samansuuruinen osuus investoinneista, mutta halukkaita alalle tulijoita on myös kasvavan talouskehityksen maissa, kuten Brasiliassa ja Taiwanissa. On huomattava, että kolmen suurimman maan välillä rahoitusosuudet (julkinen ja yksityinen) ja henkilöä kohden lasketut panokset nanoteknologian tutkimuksessa eroavat. USA:ssa ja Japanissa yksityisen sektorin rahoitusosuus oli vuonna 2005 huomattavasti EU:ta suurempi ja vastaavasti Japanissa henkilöä kohti laskettu julkisen sektorin panostus oli 6,2 euroa USA:n 3,7 euroon ja EU:n 2,9 euroon verrattuna. (Helsinki NANO 2005.)

Nanoteknologisten sovellusten kehittymistä seuraavan kymmenen vuoden sisällä on tarkasteltu NanoRoadMap (NRM) -projektin (suomeksi Nanotiekartta) avulla. NRM on Euroopan komission kuudennen puiteohjelman kautta rahoittama hanke, joka alkoi vuonna 2004 ja jonka loppuraportti ilmestyi vuoden 2006 alkupuolella. Projektin tarkoituksena oli tarkastella nanoteknologian kehitystä kolmella eri sektorilla – materiaalit, terveys ja lääkintäjärjestelmät, energia – vuoteen 2015 mennessä. Jokaisen sektorin sisällä tarkasteltiin neljää eri aihealuetta, joten yhteensä tutkittavia kohteita oli 12. Nanotiekartan kokoamiseen osallistui yli 200 asiantuntijaa yhdeksästä eri maasta (Saksa, Italia, Ranska, Hollanti, Espanja, Iso-Britannia, Suomi (VTT asiantuntijaorganisaationa), Tsekki ja Israel). Jotta nanoteknologian kehitysnäkymistä saataisiin tarpeeksi kattava, kerättiin tutkimusmateriaalia ja tietoa maailmanlaajui-

sesti. (NRM Project.) Tiekartan yhteenvedo nanoteknologian kehittämisestä kuvataan taulukossa 1.

Taulukko 1. Nanoteknologisten sovellusten kehittyminen (Lähde: NRM Project).

↓	<b>Ensimmäinen sukupolvi ~2001: Passiiviset nanorakenteet</b> Ensimmäisen sukupolven nanomateriaalit ovat pinnoitteita, nanorakenteisia metalleja, polymeerejä, komposiitteja ja katalyyttejä. Näissä tuotteissa perustutkimus on jo pitkällä ja tuotteita on tuotannossa suuremmissa mittakaavoissa.
↓	<b>Toinen sukupolvi ~Nyt: Aktiiviset nanorakenteet</b> Toisen sukupolven materiaaleja ovat transistorit, vahvistimet, kohdenneut lääkkeet, mukautuvat rakenteet, sensorit, polttokennot, aurinkokennot, nanokomposiitit ja metallit. Näitä tuotteita kehitellään parhaillaan ja niitä alkaa vähitellen tulla markkinoille.
↓	<b>Kolmas sukupolvi ~2010: 3D nanojärjestelmät ja nanojärjestelmien järjestelmät</b> Sukupolven ennustetaan sisältävän kolmiulotteisia verkostoja, uudenlaista terapiaa ja lääkkeiden kuljetusta sekä uudenlaisia kokoonpano tekniikoita.
○	<b>Neljäs sukupolvi ~2015: Molekulaariset nanojärjestelmät:</b> Materiaalit suunnitellaan molekyyleitään ja ne ovat itsestään rakentuvia.

3.1

## Nanoteknologian hyödyistä

Nanoteknologian avulla uskotaan voitavan esimerkiksi vähentää raaka-aineiden ja energian kulutusta koko tuotannon ja tuotteen elinkaaren ajalta, jolloin päästöt alenevat ja energiantarve pienenee. Nanopartikkelit voidaan suunnitella ja kehittää tiettyyn tarkoitukseen siten, että niiden pinnassa tapahtuu kemiallisia tai biologisia reaktioita, joita voidaan hyödyntää tiettyjen toimien yhteydessä. Nanopartikkeleiden avulla voidaan rakentaa esimerkiksi päästöjen mittausrakenteita, jotka ovat perinteisiä laitteita jopa tuhansia tai miljoonia kertoja herkempiä. Nanotekniikan myötä voidaan myös parantaa veden laatua, olipa kyseessä sitten suolan poistaminen merivedestä tai jäteveden puhdistaminen. Nanosuodattamisella on varsinkin kehitysmaita ajatellen merkittävä rooli puhtaan juomaveden tuottamiseksi. Nanotekniikan avulla voidaan myös puhdistaa auton pakokaasupäästöjä; tietyillä jalometallin nanopartikkeleilla pystytään hapettamaan myrkyllistä häkää ja muuttamaan se hiilidioksidiksi. Nanopartikkeleilla voidaan kehittää itsestään puhdistuvia ikkunalaseja, likaa hylkiviä tai antibakteerisia kankaita. (UNEP 2007, UBA 2006.)

Brittiläinen konsulttiyhtiö Oakdene Hollins (2007) on tehnyt DEFRA:lle (Department for Environment, Food and Rural Affairs) tutkimuksen ympäristölle hyödyllisten nanoteknologioiden sovellutuksista kartoittaen mahdollisuuksia erityisesti Iso-Britanniassa. Tutkimuksessa on tarkasteltu 15 eri sovellutusmahdollisuutta, jotka jakaantuvat kolmeen eri osa-alueeseen: energian tuotanto ja varastointi, veden, ilman ja maaperän laatu sekä energiatehokkuus.

Seuraavassa tarkastellaan, millaisia nanoteknologian sovellusmahdollisuuksia edellä lueteltujen osa-alueiden sisällä mahdollisesti olisi. Tässä yhteydessä on kuitenkin hyvä ottaa huomioon, että nanoteknologian todellisia ympäristöhyötyjä on vaikea vielä arvioida, sillä monet sovellutuksista ovat vasta innovaation asteella. Voikin olla, että kehityksen edetessä nanoteknologian ympäristöhyödyt jäävät oletettua vähäisemmiksi, kun esimerkiksi jokin toinen uusi teknologia osoittautuu nanao tehokkaammaksi. Toisaalta nanoteknologia saattaa tuoda toisenlaisia hyötyjä, kuten esimerkiksi kustannussäästöjä, mutta itse ympäristöhyötynäkölmat voivat jäädä toissijaiseksi tai niillä on vain vähäistä vaikutusta. Toki päinvastainenkin kehitys on mahdollista eli yhtäläillä nanoteknologia voi osoittautua oletettua tehokkaammaksi ja ympäristöhyödyt voivat olla moninkertaisia odotuksiin verrattuna. On siis olennaista huomioida, että nanoteknologian ympäristöhyötyihin liittyy monta vaikuttavaa tekijää. Tutkimuksen ollessa vasta alkuvaiheessa hyötyjen suuruutta ja mahdollisia haittoja on vaikea arvioida. (Oakdene Hollins 2007.)

### 3.1.1

#### Energian tuotanto ja varastointi

Energian tuotantoon ja varastointiin kehitettävillä nanoteknologisilla sovellutuksilla pyritään vähentämään riippuvuutta fossiilisista polttoaineista. Vaihtoehtoisilla energian tuotannon raaka-aineilla voidaan tehostaa paitsi energian tuotannon varmuutta ja energiaomavaraisuutta myös parantaa ympäristön tilaa. Fossiilisten polttoaineiden korvaamisen uusilla energian tuotantoteknologioilla toivotaan edistävän vähäpäästöisten tai kokonaan hiilidioksidivapaiden energian tuotantomuotojen kehittämistä. Lisäksi fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen alentaa niiden polttoon liittyvien haitallisten aineiden, kuten rikkioksidin ja typen oksidien, määrää ilmakehässä. (Oakdene Hollins 2007.)

Nanoteknologisten sovellutusten avulla voitaisiin mahdollisesti parantaa perinteisten akkujen tehokkuutta. Tehostettuja akkuja voitaisiin käyttää esimerkiksi hybridiajoneuvoissa ja uusiutuvan energian varavoimana. Nanoteknologiasta toivotaan olevan apua myös superkondensaattoreiden kehittämisessä, jotka tarjoaisivat uudenlaisen tavan tuotetun energian varastoinniseksi. Aurinkoenergian yhteydessä nanoteknologisten sovellusten toivotaan tuottavan ratkaisuja siihen, kuinka nykyisten pitkälle kehitettyjen aurinkokennojen taloudellisuutta tai tehokkuutta voitaisiin edelleen parantaa. Lämpöenergiaan liittyen nanoteknologisten sovellusten avulla toivotaan voitavan tehostaa lämmön talteenottoa ja jalostamista sähköksi, joka palvelisi siten CHP (combined heat and power) –laitoksia. Nanoteknologiaa toivotaan voitavan hyödyntää vetyenergian tuotannon ja varastoinnin yhteydessä. Vety on energian vaihtoehtoinen kantoaine, jonka tuottaminen vaatii vedyn varastointiin soveltuvan materiaalin kehittämistä. Kyseisessä materiaalissa nanoteknologiaa voitaisiin mahdollisesti käyttää joko koottuina rakenteina tai kasvattamalla sen avulla vetyä imevän materiaalin pinta-alaa. Kestävän vetytalouden aikaansaaminen vaatii vedyn varastoinnin lisäksi kestävän vedyn tuotantomenetelmän. Tämä voitaisiin mahdollisesti saavuttaa hyödyntämällä uusia nanostrukturoituja rakenteita, jotka käyttävät valoa veden halkaisemiseen. Toinen vaihtoehto olisi käyttää uusiutuvaa energiaa ja nanostrukturoituja sähkökatalyytteja. Nanomittakaavan katalyyteilla on olennainen merkitys myös polttokennojen kehittämisessä. Polttokennojen ollessa osana kestävää vetytaloutta tai perustuen hiilivetyyn, voidaan vähentää ajoneuvojen päästöjä. CHP-laitosten yhteydessä polttokennoilla voidaan pienentää lämmön- ja sähköntuotantoon liittyviä päästöjä. (Oakdene Hollins 2007.)

### 3.1.2

#### Veden, ilman ja maaperän laatu

Veden, ilman ja maaperän laadun parantamiseksi tarkoitettut nanoteknologiset sovellukset on tarkoitettu suunnattavaksi erityisesti alueellisten ja paikallisten ympäristöolosuhteiden tarkkailuun ja kehittämiseen. Sovelluksilla voitaisiin poistaa tai vähentää esimerkiksi johonkin prosessiin liittyviä ympäristölle haitallisia ja myrkyllisiä yhdisteitä. Vastaavasti voitaisiin pyrkiä poistamaan ympäristöön jo päässeiden haitallisten aineiden kertymää. (Oakdene Hollins 2007.)

Erityisen herkäät ympäristösensarit ovat sellaisia, joissa nanoteknologiaa voitaisiin soveltaa. Mikäli sensoreita käytettäisiin esimerkiksi lannoituksen yhteydessä, voitaisiin lannoitemääriä tarkentaa, jolloin liiallista lannoitusta vältettäisiin. Näin ollen maatalouden typen oksidipäästöjä saataisiin pienennettyä. Maanparannuksessa toimivan ja kustannustehokkaan menetelmän kehittäminen on olennaista. Nanoteknologiaa hyödyntäviä suodattamisteknologioita, joiden tarkoituksena on saada poistettua tai alennettua ilmassa ja maaperässä olevia haitallisten aineiden pitoisuuksia, ollaan kehittämässä. Lisäksi kehitetään kokeellisia nanosuodattimia, joiden

tarkoituksena on puhdistaa teollisuuslaitosten ja kotitalouksien saastunutta vettä. (Oakdene Hollins 2007.)

Nanoteknologiaa voidaan käyttää myös lannoite- ja kasvinsuojeluaineissa. Maatalouden käyttöön kehitettävistä nanoteknologisista sovellutuksista pyritään lääketieteellisuuden täsmälääkityksen tavoin rakentamaan tiettyyn tarkoitukseen kohdennettuja tai tietyissä olosuhteissa aktivoituvia. Tällä tavoin halutaan vähentää ravinne- ja torjunta-aineiden liiallista käyttöä maanviljelyssä, jolloin myös esimerkiksi vesistöön huuhtoutuvien ravinne- ja torjunta-aineiden määrä pienenee. (Oakdene Hollins 2007.)

Vedenpuhdistuksessa nanoteknologiasta toivotaan löytyvän ratkaisu vesimäärän lisäämiseksi alueilla, joilla puhtaasta vedestä on pulaa. Käänteisessä osmoosissa voitaisiin hyödyntää nanohuokoisia kalvoja. Jos suodattimen pinta-alaa on kasvatettu nanokokoisilla huokoisilla, saadaan suodattimien avulla poistettua vedestä tehokkaasti epäpuhtauksia. (Oakdene Hollins 2007.)

### 3.1.3

#### **Energiatehokkuus**

Energiatehokkuuden lisäämisellä voitaisiin vähentää energian hukkakäyttöä ja liiallista kulutusta, jolloin saataisiin alennettua energian käytöstä aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen määrää. Lämmöneristyksessä, valaistuksessa, polttoaineiden kehittämisessä, materiaalien rakenteiden sekä kokonaan uusien materiaalien suunnittelussa voitaisiin hyödyntää nanoteknologiaa. Lämmöneristys on merkittävä tekijä energiankulutuksen suhteen, sillä useat rakennukset ovat puutteellisesti eristettyjä, jolloin osa lämpöenergiasta menee hukkaan. Erityisesti sellaiset rakennukset, joissa ulkoseinänä ei käytetä rakoseinää, tarvitsisivat kunnollisen ja helposti sovellettavan lämmöneristystavan. Nanoteknologiaa hyödyntäviä lämmöneristyspinnoitteita voitaisiin hyödyntää myös ikkunalaseissa. Valaistuksessa LED-valot korvaavat perinteiset valkohehkuiset valonlähteet. Polttoaineteollisuudessa voitaisiin mahdollisesti kehittää sellaisia nanopartikkeleita sisältäviä polttoaineen lisäaineita, jotka vähentäisivät dieselkäyttöisten autojen pakokaasu- ja hiukkaspäästöjä. Lentokoneiden turbiinimoottoreissa voitaisiin käyttää nanomateriaaleja, jotka lisääisivät moottorin lapojen kuumuuskestävyyttä. Tällöin moottoria voitaisiin käyttää kuumemmalla, joka nostaisi moottorin tehokkuutta kokonaisuudessaan. (Oakdene Hollins 2007.)

Uusilla nanoteknologiaa hyödyntävillä erittäin vahvoilla komposiittimateriaaleilla saadaan materiaalien ja rakenteiden painoa laskettua. Esimerkiksi liikenteen kasvihuonekaasupäästöt voivat laskea, kun ajoneuvojen massa tulee uusien materiaalien ja ajoneuvon pakattavien tavaroiden kevenemisen myötä pienemmäksi. Nanoteknologia mahdollistaa myös kokonaan uusien materiaalien kehittämisen, joilla voi olla ympäristöhyötyjä. Erilaiset voiteluaineet ja jäänmuodostumista lentokoneiden moottoreissa ja siivissä estävät pinnoitemateriaalit ovat vain eräitä esimerkkejä mahdollisista sovellutuksista. (Oakdene Hollins 2007.)

### 3.2

#### **Tuotesovelluksia**

Kuluttajatuotemarkkinoilla nanoteknologiaa hyödyntäviä materiaaleja ja tuotteita on lukuisia. Esimerkiksi kosmetiikassa, elektronisissa laitteissa ja vaatteissa voidaan käyttää nanomittakaavassa olevia materiaaleja. Tällä hetkellä nanoteknologiaan ei ole kohdistettua lainsäädäntöä ja esimerkiksi valmistajien ei ole pakko merkitä tuotteisiin, sisältävätkö ne nanomateriaaleja vai ei. Ilman merkintävelvoitetta kuluttajan on lähes mahdotonta tietää, ovatko tuoteselosteessa luetellut aineet tai yhdisteet nanomittakaavassa vai eivät. (K. Savolainen, Työterveyslaitos, henkilökohtainen

tiedonanto 6.9.2007.) Toisinaan valmistajat voivat myös väittää tuotteissa olevan nanopartikkeleita, vaikka todellisuudessa nämä "nanopartikkelit" ovat ioneja tai mikrometrikokoluokkaa.

### 3.2.1

#### Elektroniikka

Viime vuosien aikana kaikenlainen elektroniikka, etenkin tietotekniikka, on kehittynyt huomattavasti. Osittain tämän kehityksen on mahdollistanut nanoteknologian käyttöönotto. Tietokoneet, digitaalikamerat, pelikonsolit, kännykät ja erilaiset musiikkisoittimet ovat pienentyneet ja samalla tulleet entistä tehokkaammiksi. Tämä on vaatinut komponenttien käsittelyä nanometriä tarkkuudella. Nanoteknologiaa käytetään erityisesti näiden laitteiden tiedontallennusosissa sekä prosessoreissa. Esimerkiksi hyvin pienten mp<sub>3</sub>-soittimien flash-muisteissa hyödynnetään nanoteknologiaa ja elektronien tunneloitumista. Markkinoille on tullut tulostimiin tarkoitettu valokuvapaperi. Paperin valmistuksessa käytetty nanoteknologia mahdollistaa suuremman tarkkuuden ja kestävyuden saavuttamisen. Todennäköisesti on olemassa myös muita erikoispapereita, joissa on hyödynnetty nanokokoluokan teknologiaa joko partikkeleina tai rakenteina. (The Project on Emerging Nanotechnologies.)

Kuluttajan altistuminen nanopartikkeleille elektroniikkatuotteista on epätodennäköistä. Tuotteiden hävitys voi kuitenkin aiheuttaa ympäristöriskejä.

### 3.2.2

#### Autot

Autojen valmistuksessa nanokokoisia partikkeleita hyödynnetään jo laajalti. Nanokomposiittimateriaalien avulla autojen korirakenteet saadaan kevyemmiksi ja samalla kestävämmiksi. Autoissa voidaan käyttää alkeenerusteisia nanokomposiittimateriaaleja sekä nanoputkia. Automaaleista voidaan nanomateriaalien avulla tehdä auton pintaa naarmuilta suojaavia. Lisäksi löytyy lukuisia erilaisia pinnoitteita, jotka ovat likaa tai vettä hylkiviä sekä muodostavat ikkunoihin heijastuksia estäviä kalvoja.

### 3.2.3

#### Kodinkoneet ja työkalut

Pesukoneissa ja jääkaapeissa saattaa olla mainosten mukaan hopeananopartikkeleita. Hopeaionien luvataan pitävän vaatteet ja ruuat bakteerittomina.

Erilaisissa akullisissa työkaluissa on saatettu hyödyntää nanoteknologiaa akun rakenteessa. Paljon muitakin yksittäisiä tuotteita löytyy. Ilmanpuhdistimissa saattaa olla TiO<sub>2</sub>-suodatin, jonka avulla pitäisi ilmasta poistaa myrkyllisiä kaasuja, kuten formaldehydiä, bentseeniä ja ammoniakkaa. Jos laite toimii luvatussa tavalla, voidaan sillä mahdollisesti parantaa ilmanlaatua niin saastuneiden kaupunkien kuin tehtaiden ilmanpuhdistuksen yhteydessä.

Nanokokoista teknologiaa käytetään lisäksi uusien tehokkaiden LED (Light Emitting Diode) -valojen valmistuksessa. LED-valot ovat korvanneet monissa paikoissa tavalliset hehkulamput ja loisteputket.

Moniin kodin esineisiin saa halutessaan antibakteerisen hopeapinnoitteen. Ovenkahvoja ja ruokailuvälineitä saa nanokokoisilla hopeapartikkeleilla pinnoitettuna. Hopeasovelluksia on lukuisia tyynyistä kelloihin ja pesuaineisiin. Samoin kodintekstiileihin ja huonekaluihin on mahdollista lisätä likaa hylkivä tai antibakteerinen pinnoite. Pinnoitteena saattaa hyvin olla Nano-Tex, joka voidaan lisätä tekstiiliin suihkuttamalla tai kastamalla.

Nanomateriaaleja ja -partikkeleja voidaan käyttää tuhoaiorjunnassa ja niillä voidaan korvata myrkyllisiä lisä- ja säilöntäaineita sekä kemikaaleja (esimerkiksi puunkyllästysaineet) (UNEP 2007; UBA 2006).

Maaleissa ja puunkäsittelyaineissa on käytetty nanopartikkeleita antamaan kestävyttä ja muita arvostettuja ominaisuuksia. Myös ikkunoita voidaan käsitellä nanopartikkeleilla, jotta saadaan aikaan itsestään puhdistuva pinta.

#### 3.2.4

### Vaatteet

Vaateteollisuudessa nanoteknologia ja -partikkelit on otettu innostuneesti vastaan. Markkinoille on tullut erilaisia likaa hylkiviä, bakteereita tappavia, säänkestäviä ja "terveysvaikutteisia" vaatteita ja tekstiilejä. Erilaisilla päällysteillä ja pinnoitteilla saadaan kankaasta vettähylkivä säilyttäen samalla kankaan hengittävät ominaisuudet. Toisenlainen nanopartikkelien käyttökohde voivat olla "hajuttomat" alusvaatteet ja sukat. Vaate- ja tekstiiliteollisuuden yhteydessä yleisimpiä vaikuttavia partikkeleita, jotka esiintyvät nanomittakaavassa ovat hopea, palladium ja titaanidioksidi (TiO<sub>2</sub>). Lisäksi voidaan käsitellä kuituja (Nano-Tex:ssa lisätty nanokokoisia karvoja).

#### 3.2.5

### Urheiluvälineet

Urheiluvälineissä nanoteknologian kaupallistaminen ja pääsy kuluttajamarkkinoille on pisimmällä heti elektroniikan jälkeen. Samaiset tuotteet, joissa käytetään paljon hiilikuituja, ovat potentiaalisia parannuskohteita nanoputkien tai fullereenien avulla. Nanoputkien avulla välineiden keveyttä ja samalla kestävyttä voidaan parantaa. Muun muassa tennismailoja ja suksia voidaan vahvistaa nanoputkien avulla. Suksi-voiteet, jääkiekkomailat, lumilaudat, polkupyörät ja kalastusvälineet ovat esimerkkejä urheiluvälineistä, jotka voivat kaikki hyötyä nanopartikkelien käytöstä. Yleensä vahvisteena käytettävät nanoputket on kiinnitetty epoksihartsiin, joten niiden leviäminen ympäristöön ei ole todennäköistä merkittävässä määrin.

#### 3.2.6

### Hygieniatuotteet ja terveys

Kosmetiikasta löytyy kaikkein laajin valikoima erilaisia nanopartikkeleita. Joukosta löytyy TiO<sub>2</sub>, ZnO, fullereenit, hiilen nanorakenteita, piioksidia, kultaa, sinkkiä, titaania, keratiinia ja erilaisia kuljettimia (mm. liposomit) sekä kiteitä. Titaanidioksidia (TiO<sub>2</sub>) ja sinkkioksidia (ZnO) on jo vuosikymmeniä käytetty aurinkovoiteissa UV-säteilyn absorboijana. Viime vuosien myötä niiden kiteiden kokoa on pienennetty nanokokoluokkaan. Useat kosmetiikkavalmistajat sisältävät nanoliposomeja, jotka tehostavat hoitavien aineiden vaikutusta kuljettamalla "tehoaineet" syvemmälle ihoon (Maynard 2006b).

Markkinoilta löytyy esimerkiksi hammastahna, jonka on tarkoitus suojata vaurioituneita hampaita. Kalsiumfosfaatin ja proteiinien avulla toimivan hammastahnan on todettu aiheuttavan toivottua mineralisaatiota hammasanalogin pinnalle.

Lääketieteessä voidaan kehittää täsmälääkkeitä, jotka nanopartikkeleiden pienen koon ansiosta läpäisevät esimerkiksi aivoverinesteen, johon perinteiset lääkkeet eivät pysty. Näin voidaan tehostaa lääkityksen vaikutusta. (UNEP 2007, UBA 2006.)



## Elintarvikkeet

Rajanveto elintarvikkeiden tarkoituksellisesti tuotettujen nanopartikkelien ja ruuan luonnollisten lisäaineiden välillä on vaikeaa. Markkinoille on tullut eräitä funktionaalisia elintarvikkeita, joissa hyödynnetään esimerkiksi misellejä. Nämä ovat pieniä rasvahapoista muodostuneita palloja, jotka pystyvät läpäisemään solukalvon. Misellejä on soluissa luonnostaan, joten kyseessä ei ole varsinaisesti uusi materiaali. Misellien avulla on tarkoituksena parantaa vitamiinien ynnä muiden yhdisteiden imeytymistä elimistöön. Nanopartikkelien väitetään parantavan useiden vitamiini- ja terveystuotteiden ominaisuuksia. Välillä valmistajat voivat kuitenkin syyllistyä ylilyönteihin lupauksissaan tuotteen ominaisuuksista. Yhdysvalloissa on saatavilla juoma, joka sisältää pelkästään vettä ja nanohopeaa. Väittämän mukaan juoman tarkoituksena on auttaa elimistöä immuunipuolustuksessa bakteereita vastaan. On kuitenkin syytä huomata, että vaikutukset elimistön omalle immuunijärjestelmälle ja suoliston normaalille bakteerikasvustolle ovat mahdollisia huolenaiheita, jos juoma todellakin tuhoaa bakteereita.

Elintarvikepakkauksiin voidaan lisätä nanomateriaaleja, jotka ilmoittavat bakteereista tai ruuan pilaantumisesta. Pakkauksista saadaan nanoteknologian avulla vahvempia, jolloin pakkausmateriaalin tarve pienenee. (UNEP 2007, UBA 2006.)

## 4 Nanoteknologian ympäristöriskejä

Nanomittakaavassa olevien tuotteiden ja komponenttien innovaatioissa sekä niiden hyödyntämisessä näyttäisi olevan lähes rajattomat mahdollisuudet. Nanoteknologiaa voidaan soveltaa monella eri tieteenalalla ja nanoteknologialla on mahdollista saavuttaa hyvin radikaalejakin hyötyjä. Voidaan myös olettaa, että edellä kuvatut sovellukset edustavat todennäköisesti vain murto-osaa nanoteknologian mahdollisista sovelluksista. On kuitenkin otettava huomioon, että nanoteknologiaan voi liittyä riskejä ja haittavaikutuksia.

### 4.1

#### **Ympäristökäyttäytyminen ja myrkyllisyysmekanismit**

Nanoteknologiaan voi liittyä huomattavia riskejä, joita ei tunneta, koska niistä ei ole käytännön kokemusta. Nanopartikkeleiden uudentyypisten ominaisuuksien uudentyypisiä vaikutuksia voidaan tarkastella niin ympäristökohtalon kuin biologisten vasteiden kannalta. Ympäristökohtalolla tarkoitetaan sitä, kuinka nanopartikkelit reagoivat ympäristössä ja mitä niille tapahtuu (esim. hajoaminen, kertyminen jne.). Nanopartikkelit ovat erittäin reaktiivisia, niillä on suuri pinta-ala niiden painoon nähden ja lisäksi ne pystyvät pienen kokonsa ansiosta läpäisemään solukalvoja. Nämä ominaisuudet puoltavat aiemmin esitettyjen uusien innovaatioiden kehittämistä, mutta toisaalta ne aiheuttavat ennalta arvaamattomia ja ennestään tuntemattomia riskejä. (UNEP 2007, Nanoscience 2004.) Uudenlaisia fyysisiä ja kemiallisia vuorovaikutuksia saattaa syntyä ja näiden vuorovaikutusten seurauksena nanomateriaalilla voi olla hyvinkin erilaiset ominaisuudet verrattuna vastaaviin bulkkimateriaaleihin. On mahdollista, että toivottujen ominaisuuksien lisäksi syntyy ympäristölle tai terveydelle haitallisia tai jopa myrkyllisiä vaikutuksia.

Tämän hetkinen tietämys nanomateriaalien käyttäytymisestä eliöissä ja ympäristössä on vähäistä. Nisäkkäistä eri tutkimuksissa on käytetty enimmäkseen rottia ja jyrsijöitä ihmisen analogeina. Muiden eliöiden tutkimus on jäänyt vähemmälle. Testiohjeet, joita on käytetty nanomateriaalien vaikutusten arviointiin, ovat olleet hyvinkin erilaisia, ja saadut tulokset saattavat riippua testiolosuhteista (esim. hie-man eri menetelmät ja annostukset). Koska nanomateriaalien vaikutuksia ei tunneta riittävästi, saattaa käyttöön päästä yhdisteitä, joiden ympäristökäyttäytymisestä ja mahdollisista vaikutuksista ei ole tietoja. Testausmenetelmien laatu ja yhdenmukaisuus on tärkeää, jotta voidaan luotettavasti arvioida nanomateriaalien riskejä ja siten taata turvallinen valmistus sekä käyttö.

Nanomittakaavassa olevien materiaalien skaala ulottuu orgaanisista ja epäorgaanisista yksittäisistä nanopartikkeleista nanoputkiin, nanokolloideihin, nanokerrokseen ja fullereeneihin. Ympäristö- ja terveysriskien kannalta olennaisin kysymys on se, missä muodossa nanomittakaavaa olevat rakenteet tai molekyylit esiintyvät eli ovatko ne kiinteänä osana (matriisina) vai vapaassa muodossa. Erityisesti vapaana

oleviin nanomittakaavan partikkeleihin oletetaan liittyvän haitallisia vaikutuksia. Sitä vastoin kiinteiden nanopartikkeleiden haitallisuudesta ei ole näyttöä, mutta ne tulisi huomioida nanomateriaaleja sisältävän tuotteen loppusijoituksessa.<sup>2</sup> (UBA 2006, Nanoscience 2004.)

#### 4.1.1

### Hajoaminen

Osa nanopartikkeleista saattaa hajota biologisesti, kuten muutkin biohajoavat orgaaniset molekyylit. Monet nanomateriaalit valmistetaan kuitenkin ei-biologisesti hajoavista aineista (mm. metallien oksidit). Yhdessä alustavassa tutkimuksessa on saatu viitteitä, että puuta lahottava sieni pystyisi hajottamaan fullereeneja (EPA 2007). Nanopartikkelien hajoamisesta luonnon oloissa ei ole riittävästi tutkimustietoa.

#### 4.1.2

### Fysikaaliset ja kemialliset vaikutukset myrkyllisyyteen

Epätavalliset fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet aiheutuvat nanomateriaalien pienestä koosta, kemiallisesta koostumuksesta, pinnan rakenteesta, partikkelin muodosta ja niiden yhteenliittymisestä (agglomeraatio) tai pysymisestä yksittäisinä partikkeleina. Pieni partikkelikoko tarkoittaa suurta pinta-alaa suhteessa partikkelin massaan ja tilavuuteen. Materiaalin vuorovaikutus ympäristönsä kanssa tapahtuu partikkelin pinnalla, joten pinta-alan kasvu lisää partikkelien reaktiivisuutta. Reaktiivisuuden kasvua hyödynnetäänkin teollisesti katalyyteissä. On mahdollista, että pinta-alan määrä olisi annoskokoja määritettäessä massaa ja tilavuutta tärkeämpi mitta. (Nel ym. 2006.)

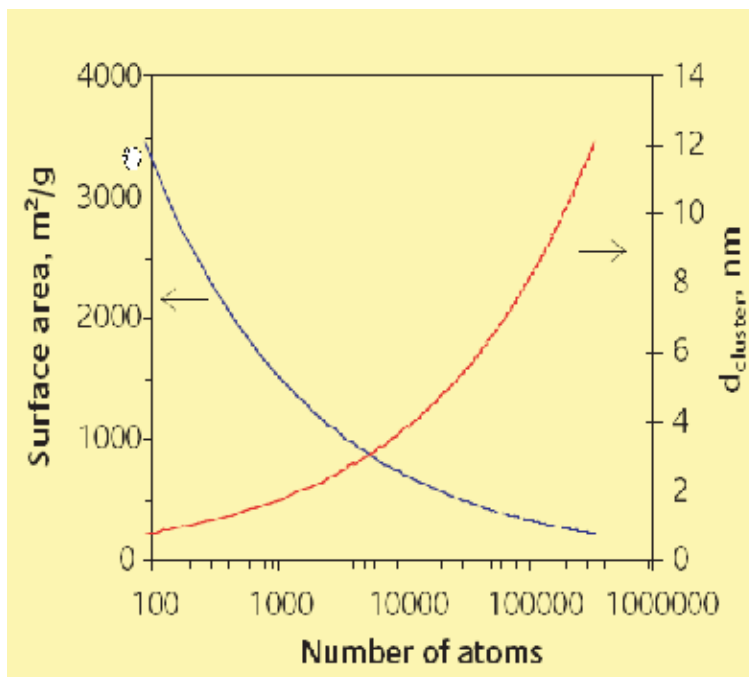
Vaikutuksista soluihin on muutamia tutkimustuloksia, mutta pitää muistaa, että suunnitellut nanomateriaalit on hyvin moninainen joukko eri yhdisteitä. Toisin sanoen tutkimusten tuloksia pitää hyvin varovasti yleistää tutkimattomiin nanomateriaaleihin. Partikkelien pieni koko, joka on yksittäisten atomien ja bulkkituotteiden välissä, voi johtaa normaalia suurempaan biosaatavuuteen. Myös vuorovaikutus biologisen kudoksen kanssa luultavasti lisääntyy. On hyvin mahdollista, että nanokokoiset partikkelit aiheuttavat soluissa haitallisen vasteen toisin kuin vastaava partikkeli suurempikokoisena bulkkimateriaalina. (Nel ym. 2006.)

On olemassa ristiriitaisia tutkimustuloksia joistain tutkituista nanomateriaaleista. Esimerkiksi fullereenin on todettu eräissä tutkimuksissa olevan ärsyttävä, kun taas toisaalla väitetään, että yleisesti käytetty testausmenetelmä on tehnyt fullereenista toksisen. Yleensä fullereenit on tehty vesiliukoiseksi THF:n (tetrahydrofuraanin) avulla. Ilmeisesti THF vaikuttaa fullereenin pinnan rakenteeseen tai siitä jää jäämiä fullereenien sisälle. Tämän mukaan fullereeni luonnollisimmassa muodossaan olisi suhteellisen haitaton yhdiste. (Levi ym. 2006.) Yleisesti hiilipohjaiset nanomateriaalit, kuten nanoputket ja fullereenit, tehdään usein liukoiseksi orgaanisilla liuottimilla, joilla voi itsessään olla toksisia vaikutuksia. Ilman liuotinta nanopartikkelit saattavat kasautua suuremmiksi komplekseiksi, joilla on erilaiset ekotoksikologiset vaikutukset. (Handy & Shaw 2007.)

Käytetyt testausmenetelmät voivat siis vaikuttaa tutkimustuloksiin. Tarkastellaan asiaa esimerkin kautta. Koejärjestelyssä asetettiin TiO<sub>2</sub>-nanopartikkeleita jyräjoiden keuhkoihin. Tällöin havaittiin tulehdusvaste, joka on voimakkaampi kuin isommilla partikkeleilla annoksen massan ollessa vakio. Toisaalta, jos annoskoko määritetään

<sup>2</sup> Nanopartikkeleiden loppusijoituksesta ja siihen liittyvästä hallinnoinnista saa lisätietoa raportista Breggin, L. K. & Pendergrass, J. 2007. Where does the nano go? End-of-life regulation of nanotechnologies. Woodrow Wilson International Center for Scholars, Project on Emerging Nanotechnologies. Saatavilla sähköisesti: <http://www.nanotechproject.org/reports>

partikkelien pinta-alan mukaan, ovat nanokokoiset ja suuremmat partikkelit samalla annos-vaste-käyrällä. (Kuva 5, Nel ym. 2006.)



Kuva 5. Pallomaisten hiilinanopartikkelien kokoja ja pinta-ala.

#### 4.1.3

### Oksidatiivinen stressi vaikutusmekanismina

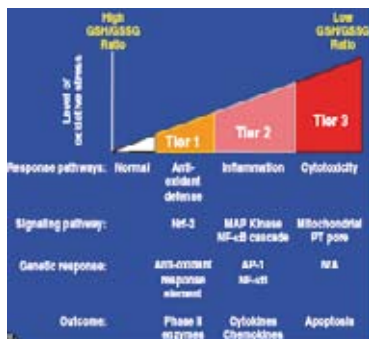
Tällä hetkellä vallitsevan teorian mukaan pääosa nanomateriaalien haitallisista vaikutuksista eliöihin johtuu oksidatiivisesta stressistä. Kliiniset ja kokeelliset tutkimukset ovat osoittaneet, että pieni koko, laaja pinta-ala sekä kyky tuottaa reaktiivisia happiyhdisteitä (*Reactive Oxygen Species*, ROS) ovat osallisia nanopartikkelien kyvyssä aiheuttaa keuhkovaurioita. (Nel ym. 2006.)

Näyttäisikin siltä, että partikkelin koko ja pinta-ala ovat erittäin oleellisia toksikologisesta näkökulmasta. Koon pieneneminen saattaa vaikuttaa partikkelien ominaisuuksiin, kuten jo edellä on todettu. Pienessä kokoluokassa epäjatkuvien kiderakenteiden määrä saattaa lisääntyä, mikä lisää partikkelin rakenteellisten vikojen määrää ja häiritsee rakenteen elektronikonfiguraatiota. Tämä saattaa mahdollistaa erilaisten epätoivottujen pintaryhmien, jotka voivat toimia reaktiivisina kohtina, liittymisen partikkeliin. Yhdenkomponentin materiaalit, kuten myös siirtymämetalleja pinnallaan sisältävät materiaalit, voivat muodostaa tällaisia reaktiivisia kohtia. On mahdollista, että nämä aktiiviset kohdat tuottavat superoksidgeja (mm. O<sub>2</sub><sup>-</sup>), jotka voivat tuottaa lisää ROS-yhdisteitä. Esimerkiksi hiilinanoputket, joissa on metallieppäpuhtauksia, voivat voimistaa kemiallisia muutoksia nanomateriaalin ympäristössä. (Nel ym. 2006.)

Ainakin keuhkoissa on havaittu suora yhteys nanopartikkelien pinta-alan ja ROS:n tuotantokyvyn välillä. ROS-yhdisteiltä suojautumisessa solujen mitokondriot ovat avainasemassa. Mitokondrioissa syntyy luonnollisesti vähäisiä määriä ROS-yhdisteitä. Näitä ROS-yhdisteitä neutraloidaan antioksidanteilla, kuten glutationilla (GSH). Oksidatiivisella stressillä tarkoitetaan tilaa, jossa GSH:ta kuluu ja sen hapettunutta vastinetta (GSSG) kertyy. (Nel ym. 2006.)

Oksidatiivisesta stressistä on kehitetty hierarkkinen teoria, jossa solun tuottaman vasteen voimakkuus on riippuvainen GSH/GSSG-suhteesta. Solu reagoi GSH/GSSG

-suhteen laskuun joko puolustavilla tai vahingoittavilla strategioilla riippuen oksidatiivisen stressin voimakkuudesta. Voimakkaimmillaan oksidatiivinen stressi voi laukaista solun apoptoosin (ohjelmoitu solukuolema), jota säädellään mitokondrioiden kautta. On huomioitava, että eräät nanopartikkelit ohjautuvat soluissa suoraan mitokondrioihin. (Nel ym. 2006.)



Kuva 6. Hierarkkinen malli oksidatiivisen stressin voimakkuudesta ja vaikutuksista.

#### 4.1.4

### Muut vaikutusmekanismit

Edellä mainitun lisäksi on mahdollista, että nanomateriaalien uudet ominaisuudet voivat johtaa aivan uudenlaisiin toksisuusmekanismeihin. Tähän mennessä vain rajoitettu määrä nanomateriaaleista on osoittautunut toksisiksi kudostutkimuksissa ja eläinkokeissa. Täytyy kuitenkin muistaa, että nanomateriaalit käyttäytyvät hyvin yksilöllisesti. Esimerkiksi saman aineen erikokoiset partikkelit voivat olla ominaisuuksiltaan hyvin erilaiset. Nanomateriaalien ympäristöterveys-vaikutuksia on tutkittu tähän mennessä vähän, joten on vielä liian varhaista tehdä mitään johtopäätöksiä.

On mahdollista, että uusia vaikutusreittejä ilmenee. Nanomateriaalin tai -partikkelien sisäänottoa kudokseen tai soluun ei välttämättä edes tarvita, koska monet nanomateriaalit on suunniteltu hyvin reaktiivisiksi. Nanomateriaalit saattavat aiheuttaa muutoksia epiteelin rakenteessa tai toiminnassa ja näin aiheuttaa haitallisia reaktioita. (EU-SCENIHR 2007.)

Yleensä testauksen kohde on altistettu suhteellisen suurille annoksille tutkittavaa ainetta. Suurilla annoksilla saadaan varmemmin tuloksia. Riippuen annoksen koosta tutkimukset saattavat antaa ristiriitaisia tuloksia tutkittavan aineen toksisuudesta. (Nel ym. 2006.)

#### 4.1.5

### Kertyminen, säilyminen ja poistuminen eliöstä

Organismille vieraiden partikkelien poisto tapahtuu eläimissä makrofaagien avulla. Nanopartikkelien poistumista kehosta ei ole tutkittu riittävästi. Partikkelien poistamista keuhkoista on kuitenkin tutkittu enemmän.

Partikkelien jakautuminen kehossa on vahvasti riippuvainen pinnan rakenteesta. Esimerkiksi polymetyylimetakrylaatti nanopartikkelien pinnoitus erilaisilla pintaaktiivisilla aineilla ja konsentraatioilla aiheuttaa merkittäviä muutoksia partikkelien jakautumiseen eri ruumiinosiin. Tätä voidaan tulevaisuudessa mahdollisesti hyödyntää kohdennetuissa lääkkeissä, jolloin vaikuttava aine saadaan juuri oikeaan elimeen. (Hoet ym. 2004.) Esimerkiksi psyykelääkkeissä on yleensä ollut ongelmana, että vaikuttava aine jakautuu koko kehoon ja aivoveriестeen ylitys on ongelmallista. Nanopartikkelien oletetaan pystyvän ylittämään aivoveriестeen joko passiivisesti diffundoitumalla tai aktiivisesti kantajan avustuksella.

Tarkastellaan partikkelien jakautumista kehossa esimerkin kautta. Tutkimuksessa annosteltiin suun kautta nanokokoisia polystyreeni-partikkeleita. Noin 7 % (koko n. 50 nm) ja 4 % (koko n. 100 nm) partikkeleista löytyi maksasta, pernasta, verestä ja luuytimestä. Yli 100 nm partikkelit eivät saavuttaneet luuydintä ja yli 300 nm partikkelit jäivät puuttumaan verestä. Loput poistuivat ulosteen mukana. (Hoet ym. 2004.)

## Keuhkot

Ultrahienot partikkelit (koko alle 100 nm) päätyvät hengitettäessä pääasiassa keuhkojen keuhkorakkuloihin (alveoli). Tätä kokoluokkaa suuremmat partikkelit suodattetaan ja poistetaan hengitettävästä ilmasta ennen alveoleja. Ennen alveoleja partikkelien tunkeutumismahdollisuudet elimistöön ovat vähäiset. (Hoet ym. 2004.)

Istuttamalla hiilipölyä (carbon black) ja TiO<sub>2</sub>-nanopartikkeleita rottien keuhkoihin on havaittu tulehdusvaste ja oksidatiivista stressiä, joihin myös distaaliset elimet osallistuvat. Lisäksi nanoputket ovat osoittaneet toksisuuden merkkejä keuhkoissa. Muutamissa *in vivo* -tutkimuksissa nanoputkien istuttaminen suurina annoksina jyrksijöiden keuhkoihin on aiheuttanut kroonista keuhkotulehdusta, kasvaimien muodostumista ja arpeutumista. Nanoputkien on ehdotettu säilyvyydeltään ja vaikutuskiltaan olevan asbestin kaltaisia. (Nel ym. 2006.)

Partikkelien poistumiseen keuhkoista vaikuttaa massan lisäksi niiden koko ja pinta-ala. Titaanioksidilla on suoritettu tutkimus, jossa seurattiin erikokoisten partikkelien poistumista keuhkokudoksesta. Ultrahienot (noin 20 nm) partikkelit poistuivat kudoksesta huomattavasti hitaammin kuin hienot (noin 200 nm) partikkelit. Kaiken lisäksi ultrahienot partikkelit osoittivat suurempaa kulkeutumista imusolmukkeisiin. (Hoet ym. 2004.)

Suurin osa pallomaisista partikkeleista, jotka pääsevät keuhkojen alveoleihin, pystytään poistamaan niin kauan kuin poistomekanismi on vahingoittumaton. Organismille vieraat nanokokoiset partikkelit pystytään poistamaan keuhkoista makrofaagien avulla niin kauan kuin partikkelit eivät ole vahingoittaneet makrofaagien toimintaa. (Hoet ym. 2004.) Yläraja poistettavien partikkelien koolle on makrofaagin koko, joka vaihtelee eläimillä 10 – 20 mikrometrin välillä (Krombach ym. 1997). Pallomaiset nanopartikkelit siis pystytään poistamaan ainakin keuhkojen alveoleista. Suuremmat partikkelit poistuvat pieniä hitaammin. Ongelmaksi muodostuvat kuidut ja muut ei-pallomaiset partikkelit, sillä nanokokoiset kuidut (mm. nanoputket) voivat kulkeutua hengityksen mukana alveoleihin, vaikka ne olisivat pituudeltaan yli 100 nm. Kuitumaiset nanopartikkelit saattavat pahimmillaan jopa estää makrofaagin liikkumisen ja siten säilyä kehossa hyvin pitkään ja ärsyttää kudosta. (Hoet ym. 2004.) Kuitujen poiston nopeus ja onnistuminen on riippuvainen kuidun pituudesta. Mitä pidempi kuitu, sitä hitaammin se poistuu keuhkoista. Varsinkin makrofaageja pidempien kuitujen poistuminen saattaa jopa estyä. Hitaampi kuitujen poisto kuormittaa kudosta ja kasvattaa haitallisten vasteiden todennäköisyyttä. Ongelmaa hie-man helpottaa, jos kuidut hajoavat pienemmiksi partikkeleiksi, jolloin niiden kuljetus helpottuu. (Hoet ym. 2004.)

## Ruansulatuselimistö

Tutkimustieto nanopartikkelien sisäännotosta ruansulatuksen kautta on vähäistä. Tiedetään kuitenkin, että varatut nanopartikkelit (mm. karboksyloitu polystyreeni) osoittavat huonoa imeytymiskykyä. Myöskään iridiumpartikkeleiden ei havaittu imeytyvän. Samalla tavoin positiivisesti varatut lateksipartikkelit juutuivat suoliston negatiivisesti varattuun limakerrokseen. Toisaalta karboksyloidut (negatiivinen varaus) lateksipartikkelit läpäisivät kyseisen esteen. Limakerroksen jälkeen partikkelit voivat kulkeutua joko imusuonistoon tai hiussuonistoon. Partikkelien pääsemisestä

imusuonistoon ollaan yleensä huolestuneita, koska se voisi vaikuttaa suoraan immuniteettiin. (Hoet ym. 2004.)

Erinäisiä *in vivo* -kokeita nanopartikkeleiden imeytymisestä on suoritettu. Eräässä kokeessa rotille syötettiin polystyreenipalloja päivittäin 10 päivän ajan (annos 1,25 mg/kg). 50 nm partikkeleista 34 % imeytyi ja 100 nm partikkeleista 26 % imeytyi. (Hoet ym. 2004.) Imeytymistä ruuansulatuksen kautta näyttäisi siis tapahtuvan merkittävästi. Imeytymiseen vaikuttaa ainakin partikkelin koko ja pinnan rakenne, kuten varausjakauma.

Toisessa kokeessa vesiliukoisia fullereeneja annettiin rotille. Fullereeneista 98 % poistui ulosteen mukana. Niistä kahdesta prosentista, jotka imeytyivät rottiin, oli 90 prosenttia jäljellä vielä viikon kuluttua. Lisäksi fullereeneista yli 70 % oli kerääntynyt maksaan. (Nel ym. 2006.)

## Iho

Terve iho suojaa elimistöä hyvin ympäristön erikokoisilta partikkeleilta. Vahingoittuneen tai venytetyn ihon nanokokoiset partikkelit pystyvät kuitenkin läpäisemään. On väitetty, että kaikilla yksilöillä löytyy sellaista ihoa, jonka nanopartikkelit saattavat läpäistä. (Hoet ym. 2004.) Venytettyyn ihoon on havaittu jopa mikrometrin mittaisten fluorihelmien pystyvän imeytymään verinahkaan (dermis) (Nel ym. 2006). Ilman venytystäkin 50 nm ja 1 µm kokoisia liposomeja ja ei-ionisia vesikkeleitä on havaittu ainakin ihon orvaskesissä (epidermis) vuorovaikutuksessa solujen membraanien kanssa (Hoet ym. 2004).

Verinahkaan imeydyttyään partikkelit saattavat mahdollisesti kulkeutua imusolmukkeisiin, joissa makrofaagit ja dendriittisolut erikoistuvat. Seurauksena voi olla erinäisiä vaikutuksia immuunijärjestelmään. Todennäköisyyttä, jolla immuunijärjestelmään aiheutuu häiriö nanopartikkelien johdosta, ei tiedetä. Tiedetään kuitenkin, että palokaasut ja muut ympäristön pienhiukkaset vaikuttavat dendriittisoluihin, mikä saattaa johtaa immuunijärjestelmän ylireagointiin ympäristön allergeenejä vastaan. (Nel ym. 2006.) Toisin sanoen allergiset reaktiot voimistuvat.

Ihon suojaeroksen läpäisy on riippuvainen partikkelin koosta ja sen rakenteesta. Usein mainitaan, että iho antaa hyvän suojan erilaisia partikkeleita vastaan. Ei pidä kuitenkaan yliarvioida ihon suojausominaisuuksia. Vaikka tutkittava partikkeli ei läpäisisikään ihoa, voi siitä lohjeta partikkeleita, jotka pystyvät läpäisyyn. Lisäksi alle 100 nm halkaisijaltaan olevien kuitujen vaikutuksesta ihoon ei tiedetä paljoakaan. (Hoet ym. 2004.)

### 4.2

## Vaikutukset ympäristöön ja eliöstöön

Nanopartikkeleita voi päästä ympäristöön (ilmaan, veteen ja maaperään) ja sen eliöstöön nanomateriaalien valmistuksen ja tuotannon yhteydessä, nanomateriaalin tai -tuotteen käytön myötä sekä käytöstä poistamisen yhteydessä. Myös nanomateriaalin tai -tuotteen tahaton käyttö on eräs päästölähde. (Stone 2007.)

### 4.2.1

#### Maaperä

Nanomateriaalien käyttäytyminen maaperässä riippuu todennäköisesti materiaalin fysikaalisista ja kemiallisista ominaisuuksista. On mahdollista, että partikkelien suuri pinta-ala pidättää (sorbtiio) nanopartikkelit maahan, jolloin nanopartikkelit ovat kulkeutumattomia. Toisaalta nanopartikkelien pieni koko saattaa mahdollistaa partikkelien kulkeutumisen pidemmälle kuin suuremmilla partikkeleilla. (EPA 2007.)

Maaperän laatu (mm. savi, hiekka) ja ympäristö voivat myös vaikuttaa nanopartikkelin liikkumiseen maassa. Esimerkiksi mineraalikolloidien liikkeeseen maassa ja sedimentissä vaikuttaa vahvasti partikkelien varaus. Fotoreaktioiden kautta nanopartikkelit voivat muuntaa maapartikkelien pintaa. Nanomateriaalien reaktioiden ja vaikutusten tutkiminen luonnollisessa ympäristössä on hankalaa, koska maassa on usein luonnostaan samanlaisia ja kokoisia partikkeleita (mm. rautaoksidi). (EPA 2007.)

## Kasvit

Nanopartikkelien vaikutusta kasvien toimintaan ei ole tutkittu kovinkaan paljon. *In vitro* -testejä on suoritettu muutamia. Nanomateriaalien vaikutusta kasveihin luonnollisessa maaperässä on tuskin tutkittu ollenkaan. Laboratorio-olosuhteissa kasveilla on havaittu, että nanomateriaalit vaikuttavat kasvien toimintaan jopa ilman nanomateriaalien kulkeutumista kasvin sisään. Kasvatusliemen alumiininanopartikkelien (koko 13 nm) havaittiin hidastavan kasvien juurien kasvua. (EPA 2007.) Suuremmilla, 200 – 300 nm, partikkeleilla vastaavaa vaikutusta juuriin ei havaittu. Kokeessa käytetty alumiinin konsentraatio oli 2 g/l. Kokeen suorittaja epäili, että alumiinipartikkelit reagoivat juuriepiteelin kanssa ja olisivat siten vaikuttaneet kasviin. Toinen esitetty näkökanta oli, että pienempien partikkelien suurempi pinta-ala kasvatti alumiinin liukoisuutta kasvatusalustaan ja suurempi liunneen alumiinin määrä olisi hidastanut kasvua. (EU-SCENIHR 2007.)

### 4.2.2

## Ilma

Hengitettävien hiukkasten (PM<sub>10</sub>) ja pienhiukkasten (PM<sub>2,5</sub>) tiedetään olevan haitallisia ihmisten terveydelle. Haitallisuus on riippuvainen hiukkasten fysikaalisista ominaisuuksista ja siitä, mistä materiaalista ne koostuvat. Yleisesti voidaan kuitenkin todeta, että altistumisen tapahduttua hengityksen kautta, hiukkaset voivat heikentää keuhkojen toimintaa, aiheuttaa astmakohtauksia ja syöpää ja pahimmillaan altistuminen voi johtaa kuolemaan. Esimerkiksi USA:n ympäristövirasto on tutkimuksissaan todennut, että vuosittain kymmenentuhannet ihmiset kuolevat altistuttuaan hyvin hienoille hiukkasille. (Stone 2007, Maynard ym. 2006, Moore 2006.)

Hengitettävistä hiukkasista ja pienhiukkasista olevaa tutkimustietoa voidaan hyödyntää nanopartikkelien kulkeutumisessa. Jotta voitaisiin ymmärtää partikkelien käyttäytymistä ja kulkeutumista ilmassa, on tärkeää ymmärtää seuraavat prosessit: diffuusio, kasaantuminen, märkä- ja kuivalaskeuma sekä painovoiman vaikutus. On mahdollista, että nanopartikkelien pintarakenne estää kasautumista ja täten käyttäytyminen eroaa pienhiukkasista. Eroja voi olla myös uusien ja vanhojen nanopartikkelien käyttäytymisessä. (EPA 2007.)

Ilmassa olevat partikkelit voidaan jakaa koon ja käyttäytymisen perusteella kolmeen ryhmään. Pienet partikkelit (halkaisija alle 80 nm) ovat ilmassa lyhytikäisiä, koska ne kasautuvat nopeasti suuremmiksi partikkeleiksi. Suuriin (yli 2000 nm) hiukkasiin painovoima vaikuttaa voimakkaammin. Keskikokoiset (80 – 2000 nm) hiukkaset pysyvät ilmassa pisimpään (päivistä viikkoihin) ja ne poistuvat ilmasta märkä- tai kuivalaskeumana. (EPA 2007.)

On olemassa monia nanopartikkeleita, jotka ovat fotoaktiivisia. Tällä hetkellä ei ole tutkimustietoa näiden materiaalien mahdollisesta hajoamisesta valon vaikutuksesta ilmassa. Nanopartikkelit voivat myös absorboida toisia yhdisteitä tai molekyyliä. Tämän vaikutusta ilmakehämekemiaan ei tunneta riittävästi. (EPA 2007.)



## Vesi

Vedessä nanopartikkelien käyttäytymiseen vaikuttavat partikkelien liukoisuus, vuorovaikutus luonnollisten ja ihmisperäisten kemikaalien kanssa, sekä biologiset ja elottomat prosessit. Suuri pinta-ala voi johtaa partikkelien kiinnittymiseen (sorbtio) sedimenttiin. Nanopartikkelit voivat siis fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksiensa perusteella päätyä joko veteen tai sedimenttiin. (EPA 2007.)

Partikkelien ollessa lähellä vedenpintaa, kosteassa maassa tai vesipisaroissa, altistuvat ne valolle. Silloin voi partikkelista riippuen tapahtua fotoreaktioita, jotka saattavat muuttaa partikkelin fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia. Veteen liukenemattomat nanopartikkelit, kuten fullereenit, saattavat muodostaa veden kanssa kolloidin, jonka konsentraatio voi olla enintään 100 ppm. Tähän vaikuttaa veden pH ja ionivahvuus. Meren pintakerroksessa esiintyy lipidejä, hiilihydraatteja, proteiininkaltaisia yhdisteitä sekä humusta, joiden mukana nanopartikkelit voivat kulkeutua hyvinkin kauas. (EPA 2007.)

Puolijohdeet, kuten titaanidioksidi ( $\text{TiO}_2$ ) ja sinkkioksidi ( $\text{ZnO}$ ), ovat osoittautuneet nanokoossa tehokkaiksi katalyyteiksi halogenoitujen yhdisteiden pelkistämässä ja epäpuhtauksien hapettamisessa. Tämä tapahtuu fotokatalyysina, jota käytetään vedenpuhdistuksessa. (EPA 2007.)

## Kalat ja muut vesieläimet

Nanopartikkelien passiivisessa diffuusiassa kiduksien ja ruuansulatuksen kautta elimistöön partikkelin massa ja halkaisija ovat oleellisia ominaisuuksia. Nämä ominaisuudet ovat tärkeitä niin vesieliöissä kuin maaeliöissäkin. Neutraalin partikkelin moolimassan ollessa 600 – 900 g/mol diffuusio on vähäistä, mutta yhä mitattavissa. Joidenkin nanopartikkelien massa sopii kyseiselle välille. 60 hiilen fullereenit ( $\text{C}_{60}$ ) ovat painoltaan 720 g/mol. Suuremmat 84 hiilen fullereenit painavat jo yli 1000 g/mol, joten niillä diffuusiota ei tapahdu. Myös halkaisija vaikuttaa diffuusiioon kidusten ja ruuansulatuksen läpi. Diffuusion absoluuttiseksi rajaksi on määritetty 0,95 – 1,5 nm. (EPA 2007.) Esimerkiksi nanoputket ja pienet kvanttipisteet alittavat tämän rajan.

Seuraavaksi esitellään muutamia tutkimuksia nanopartikkelien vaikutuksista kaloissa ja vesikirpuissa (*Daphnia*). Vesikirpuilla on tutkittu  $\text{TiO}_2$ :n ja fullereenien vaikutuksia. Vesikirppuja altistettiin 48 tuntia  $\text{TiO}_2$ :lle (partikkelit 10 – 20 nm). LC50 (pitoisuus, jossa puolet eliöistä kuolee) pitoisuudeksi määritettiin 5,5 ppm (5,5 mg/l). Yli 100 nm partikkelien poistaminen ei vaikuttanut konsentraatioon, joten yli 100 nm  $\text{TiO}_2$ -partikkelit eivät olleet toksisia. (EPA 2007.)  $\text{TiO}_2$  ja mustahiili kulkeutuvat vesikirpussa puolessa tunnissa altistumisesta ruuansulatukseen ja lisäksi havaintoja  $\text{TiO}_2$ -partikkeleista löytyy myös muista ruumiinosista, mikä viittaa vaihtoehtoiseen sisäänottomekanismiin, jota ei vielä tunneta (EU-SCENIHR 2007).

Samalla testattiin myös fullereenien toksisuutta. Altistamisaika oli sama 48 tuntia. LC50 fullereeneille, jotka olivat vedessä kolloidisessa muodossa (10 – 20 nm), oli 460 ppb (0,46 mg/l). Yli 100 nm partikkelien poistaminen kasvatti tappavaa pitoisuutta 7,9 ppm (7,9 mg/l). Lisäksi fullereenit vaikuttivat vesikirppujen käyttäytymiseen. (EPA 2007.) Eräässä toisessa tutkimuksessa vesikirppuja altistettiin fullereeneille 21 päivää pitoisuuksilla 2,5 ja 5 ppm. Tuloksena havaittiin alentunut jälkeläisten tuotanto sekä muutoksia käytöksessä. (EU-SCENIHR 2007.)

Lateksinanopartikkeleilla tehdyssä tutkimuksessa havaittiin veteen suspendoitujen partikkelien kulkeutuneen kaikkiin japanintappajakalan (*Oryzias latipes*, medaka fish) elimiin (UNEP 2007).

## Levät

Ympäristössä aineet eivät välttämättä pysy niissä paikoissa, joihin ne on alun perin tarkoitettu. Esimerkiksi aurinkovoiteita, jotka sisältävät nanokokoisia TiO<sub>2</sub>-partikkeleita, käytetään pääsääntöisesti iholla. Ihon antaman suojan partikkeleita vastaan on todettu olevan kohtalaisen hyvä. Laboratorio-oloissa on testattu TiO<sub>2</sub>-partikkelien käyttäytymistä, kun ne vapautetaan veteen (näin voi käydä esimerkiksi uudessa tai peseytyessä). TiO<sub>2</sub>-partikkelien havaittiin inhiboivan sini- ja piilevien kasvua. (UNEP 2007, EU-SCENIHR 2007.)

## Muut mikro-organismit

On olemassa viitteitä, että nanomateriaalit voivat tehokkaasti inhiboida gram-negatiivisten ja -positiivisten bakteerien kasvua. Esimerkiksi joissakin bakteereissa (*Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*) fullereenien on havaittu inhiboivan kasvua ja soluhengitystä. Hopeananopartikkelien on todettu kerääntyvän *E. coli*n membraanille ja aiheuttavan siihen kuoppia, jotka muuttavat solun permeabiliteettia (läpäisevyyttä), mikä johtaa lopulta solun kuolemaan. (EU-SCENIHR 2007.)

# 5 Riskien hallinta

## 5.1

### **Asennoituminen riskitutkimukseen**

Nanoteknologiaan liittyy edellä esitetyn tutkimustiedon perusteella useita haitallisia ja jopa hälyttäviä ominaisuuksia, jotka herättävät huolta nanomateriaalien ja hiukkasten turvallisuudesta. Kuinka näitä riskejä tulisi sitten hallita? Maynard ym. (2006) toteavat, että riskien suhteen tiedostetaan yleisesti se tosiasia, että käytännössä osa nanopartikkeleista voi osoittautua haitallisiksi sekä ihmisille että ympäristölle. Riskien olemassaolo tunnustetaan, mutta ongelmana on kuitenkin se, että riskitutkimuksella ei ole samanlaista prioriteettia mitä tutkimus- ja kehitystyöllä. Liiketaloudelliset näkökohdat menevät usein riskitutkimuksen edelle, vaikka nanoteknologi- an tulevaisuuden ja menestymisen kannalta tarvittaisiin nimenomaan strategista ja kohdistettua riskitutkimusta. Ilman perusteellista riskitutkimusta ihmisten luottamus nanoteknologiaan vähenee ja investointihalukkuus nanoteknologian tutkimus- ja kehitystyöhön hiipuu. Tämä vaikutus moninkertaistuu, jos nanoteknologian valmistuksessa ja käytössä altistumisen yhteydessä aiheutuu odottamattomia sairauksia tai haittavaikutuksia, joita ei alun perin ollut tutkittu huolellisesti ennen valmistusprosessien tai nanomateriaalien käyttöönottoa. (Maynard ym. 2006.)

Jos nanoteknologian haittoihin ja riskeihin ei kiinnitetä riittävästi huomiota ja keskitytään liiaksi sen tuomiin etuihin, on vaarana, että nanoteknologiasta tulee jälleen yksi varoittava esimerkki asbestin, DDT:n ja geenimuuntelun rinnalle. Kaikkia näitä on niiden kehittämisen, markkinoille tulon ja vielä käytön aikanakin pidetty lupaavina keksintöinä, mutta myöhemmin ne ovat käytännössä osoittautuneet joko ympäristölle ja ihmisille vaarallisiksi tai eettisesti epäilyttäviksi. (mm. Balbus ym. 2005, Parr 2005.)

Kun luvussa 3 nanotutkimuksen kehittymisestä ja investoinneista todettiin, että tutkimus- ja kehityssectorilla ennustetaan huikeaa kehitystä vajaan kymmenen vuoden sisällä, on riskitutkimuksen osalta asia hieman toisin. Nanoteknologian riskitutkimukseen suunnattavat investoinnit edustavat vain murto-osaa tutkimus- ja kehitystyöhön kohdennettaviin varoihin verrattuna. Esimerkiksi vuonna 2005 nanoteknologiaan liittyvien riskien ja haittavaikutusten tutkimukseen kulutettiin vain hieman yli 45 miljoonaa dollaria vuodessa, mikäli USA:n ja EU:n rahoitukset lasketaan yhteen (Service 2005). Suomessa on tällä hetkellä meneillään kaksi nanoteknologian turvallisuuteen keskittyvää tutkimusta, joiden rahoitus on 900 000 euroa, kun kaiken kaikkiaan nanoteknologian tutkimus- ja kehitysrahoitus Suomessa on noin 70 – 80 miljoonaa euroa (K. Savolainen, Työterveyslaitos, henkilökohtainen tiedonanto 6.9.2007).

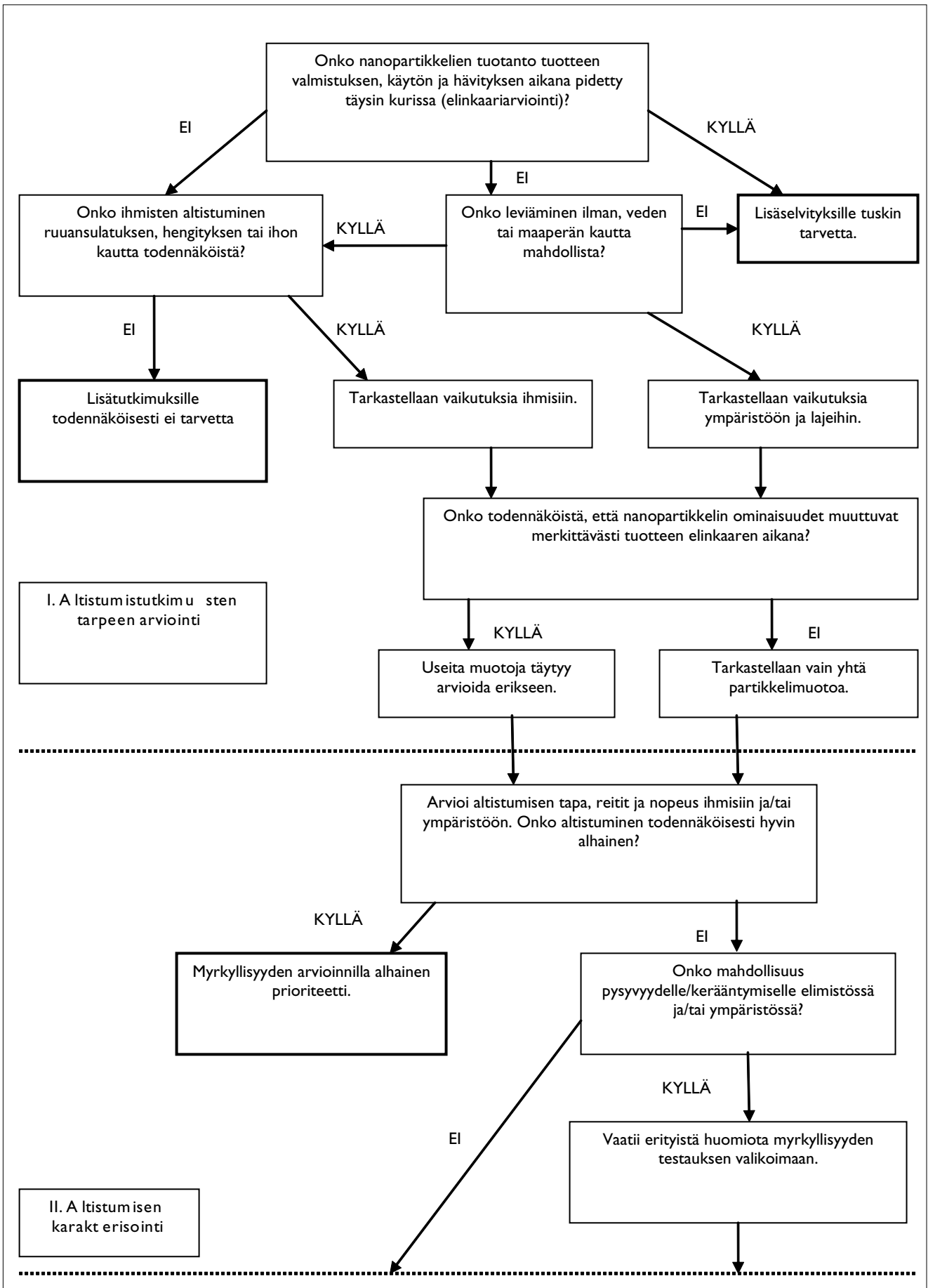
## Riskien arviointi

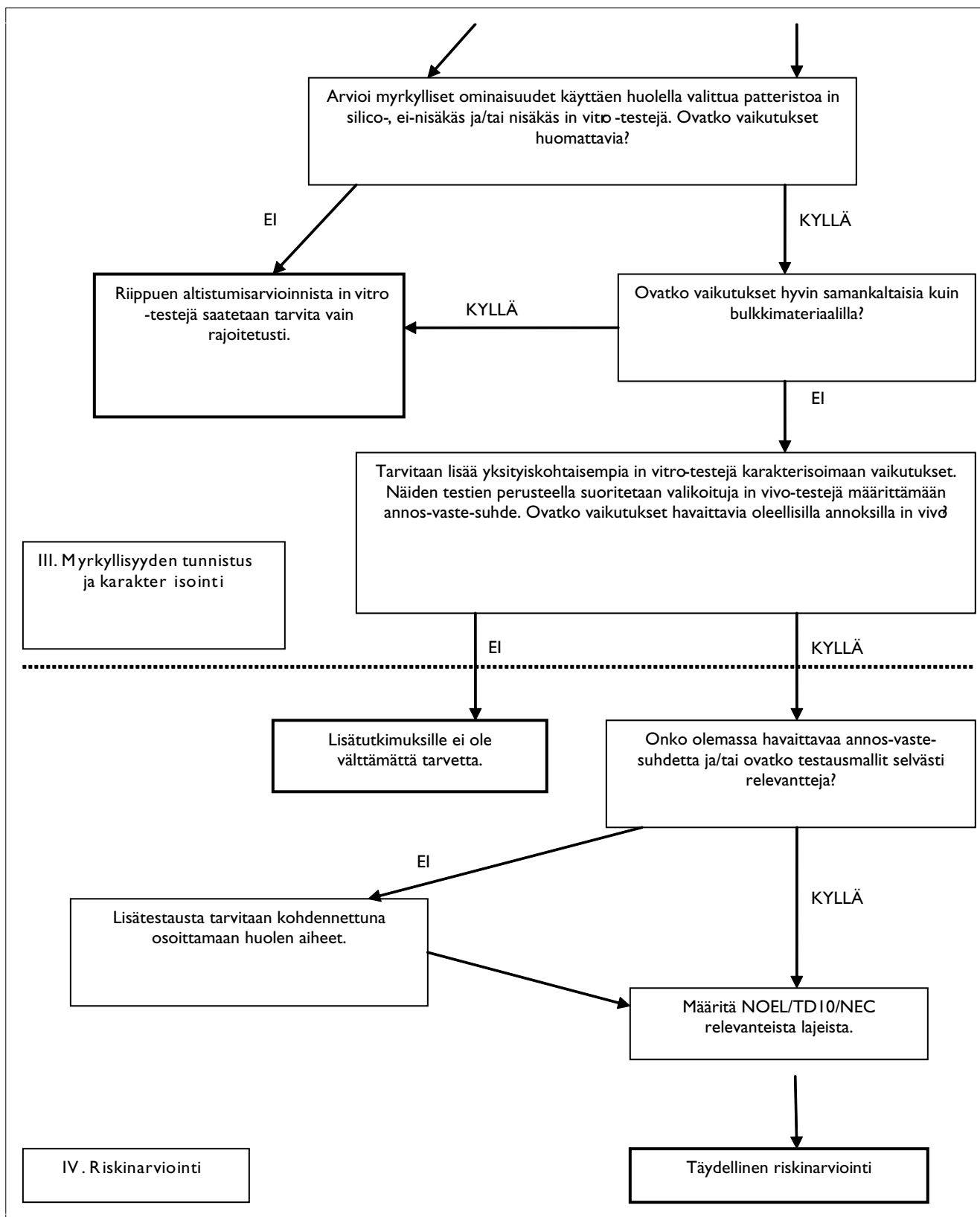
Luonnossa esiintyvien nanomittakaavan partikkeleiden haittavaikutustutkimusta ei voida suoraan soveltaa prosessoitujen nanopartikkelien tutkimukseen, sillä ”rakennetut” nanopartikkelit ovat ekosysteemille ennestään tuntemattomia. Näin ollen ekosysteemien ja eliöiden ei ole tarvinnut kehittää puolustusmekanismeja tällaisten aineiden varalle, jolloin ei voida ennustaa, mitä tapahtuu pitkällä aikavälillä. Kun lisäksi prosessoitujen nanopartikkeleiden sovelluskohteet ovat laaja-alaisia, vaativat ne erilaistettuja riskianalyyssejä. Prosessoituihin nanopartikkeleihin ja niiden aiheuttamiin ympäristö- ja terveysriskeihin vaikuttaa se, missä muodossa ne pääsevät kosketuksiin ihmisten ja ympäristön kanssa. Riskien arvioimiseksi voidaan esittää seuraavanlaisia kysymyksiä: 1) Kuinka vakaita ja kestäviä nanorakenteet ovat? 2) Hajoavatko tai kertyvätkö ne elimistöön tai ekosysteemiin? 3) Ovatko ne vesiliukoisia? 4) Onko niillä yhteisvaikutuksia muiden nanopartikkeleiden, kemikaalien tai pintamateriaalien kanssa? 5) Pilaantuvatko ne ajan myötä ja kuinka niiden ominaisuudet muuttuvat pilaantumisen yhteydessä? (UBA 2006, Moore 2006.)

Haittavaikutusten mittaamisen ja riskien arvioinnin nanoteknologian osalta hankalaksi tekee se, että perinteiset mittarit eivät usein ole riittävän kattavia kuvaamaan nanopartikkeleiden vaikutuksia johtuen niiden ainutlaatuisista ominaisuuksista (EU-SCENIHR 2007).

EU-SCENIHR on antanut ehdotuksen nanomateriaalien riskien arviointia varten. Keväällä 2007 julkaistussa ohjeistuksessa (TGD, Technical Guidance Document) annetaan seuraava malli (kuva 7), jonka avulla voi alustavasti arvioida tarvittavan lisätutkimuksen tarpeen ja laadun. (EU-SCENIHR 2007.)

ISO (International Organization for Standardization) on perustanut erityisesti nanoteknologiaan suuntautuvan teknisen komitean (2004), ISO/TC229, jonka tarkoituksena on kehittää standardeja nimeämiseen, terminologiaan ja mittaukseen. Tarkoituksena on myös tuottaa suosituksia testausmenetelmiä, mallinnusta ja simulaatioita varten. Samankaltaista standardien ja yhtenäisen termistön kehitystä toteutetaan useissa laitoksissa. USA:n NNI (National Nanotechnology Initiative) ja Iso-Britannia ainakin ovat päätyneet yhteistyöhön ISO:n kanssa. On toivottavaa, että yhteinen terminologia ja nomenklatuuri saadaan aikaiseksi mahdollisimman pikaisesti, mikä helpottaisi kansainvälistä yhteistyötä. ([www.iso.org](http://www.iso.org))





Kuva 7. Malli, jolla nanopartikkeleiden aiheuttamia riskejä ihmisille ja ympäristölle voidaan alustavasti arvioida (Lähde:EU-SCHENIHR 2007).

## **Riskien hallinnan kehitysnäkymät**

Nanopartikkeleista aiheutuvien päästöjen seuranta on lähes mahdotonta tällä hetkellä, sillä vaaditaan vuosien työ ennen kuin tutkimus- ja havaintomenetelmät ovat tarpeeksi kehittyneitä nanopartikkeleiden seurantaan (K. Savolainen, Työterveyslaitos, henkilökohtainen tiedonanto 6.9.2007). Menetelmien, jotka mittaavat altistumista ilmassa ja vedessä esiintyville nanopartikkeleille, voidaan odottaa kehitettäväksi seuraavien 3 – 10 vuoden aikana. Teollisesti valmistettujen nanopartikkeleiden toksisuutta mittaavien menetelmien kehittämisen ja niiden laillistamisen arvioidaan tapahtuvan seuraavien 5 – 15 vuoden kuluessa. Seuraavan 10 vuoden kuluessa voidaan kehittää malleja, jotka ennustavat teollisesti valmistettujen nanopartikkeleiden vaikutukset ympäristöön ja ihmisten terveyteen. (Maynard ym. 2006.)

## 6 Nanoteknologia Suomessa ja maailmalla

Suomessa nanoteknologian tutkimusta tehdään tällä hetkellä yliopistoissa, VTT:llä sekä Tekesissä ja Akatemian rahoittamissa projekteissa. Yksityispuolellakin suoritetaan tutkimustyötä, mutta yhteistyössä lähes aina jonkin yliopiston tai Tekesin kanssa. Monissa muissa maissa alan tutkimusta koordinoimaan on perustettu oma organisaationsa (Yhdysvallat ja Japani) tai sitten koko vastuu on annettu yksittäiselle toimijalle (Iso-Britannia). Tutkimuksen sirpaloituminen on noussut toisinaan esille esimerkiksi eurooppalaisen nanotutkimuksen kentällä. Tiedon sirpaloituminen pelkästään EU:n yksittäisen jäsenvaltion sisällä voi hidastaa kehitystä. Useissa valtionhallinnon yksiköissä saatetaan tehdä päällekkäisiä selvityksiä ja tutkimuksia, koska tiedottaminen ja koordinaatio yksiköiden välillä ei toimi riittävästi. Ratkaisuksi on ehdotettu, että kaikkien nanoteknologiaan liittyvien hankkeiden ja projektien koordinointi keskitettäisiin yksittäiselle viranomaiselle, mikä mahdollistaisi tehokkaamman koordinoinnin ja nanoteknologian turvallisen käytön valvonnan.

Seuraavassa esitellään nanoteknologian tutkimustilannetta sekä Suomessa että muualla maailmassa. Tässä tarkastellaan yksittäisiä valtioita ja kansainvälisiä yhteisöjä ja yhteistyöverkostoja.

### 6.1

#### **Suomi**

Suomesta löytyy esimerkkejä koko nanoteknologian innovaatioketjusta aina perustutkimuksesta kypsään liiketoimintaa (Nanotieteen kehittämisyöryhmä 2005). Tekesin konsulttityhtiöllä teettämän selvityksen mukaan Suomessa toimi vuonna 2006 134 nanoteknologiaa hyödyntävää yritystä. Näistä 45:llä oli olemassa markkinoilla tuotteita, jotka sisälsivät nanopartikkeleita. Selvityksessä yritykset jaotellaan neljään ryhmään tuotekehityksen edistymisen perusteella: visio, tutkimus, tuotekehitys sekä kaupallinen tuote. Edeltävään vuoteen, 2005, verrattuna yritysten määrä kasvoi lähes kaikissa tuotekehityksen vaiheissa. Muutamalla alalla kasvua ei ollut, mutta yhdelläkään alalla tai tuotekehitysvaiheessa yritysten määrä ei laskenut. (Koponen ym. 2006.)

Suomessa on vakiintunutta nanoteknologiaan liittyvää liiketoimintaa elektroniikka- ja optoelektroniikkateollisuudessa (mm. Atomic Layer Deposition (ALD) -pinnoitteet, laserit, sensorit), kemian teollisuudessa (mm. TiO<sub>2</sub>:n tuotanto, johtavat polymeerit) sekä diagnostiikkateollisuudessa (mm. bioaktiivisilla molekyyileillä pinnoitetut nanopartikkelit). Jo useat yritykset hyödyntävät tuotteissaan tai niiden valmistuksessa nanoteknologiaa tavalla tai toisella.

Elektroniikkateollisuudessa on muodostunut vahvoja tuotantoketjuja ja klustereita. Elektroniikka-alan yrityksiä kiinnostavat muun muassa nanosensorit, kehittyneemmät laser-teknologiat, integroitu optiikka, painettava elektroniikka, molekyyli- ja



nanoelektroniikka sekä uuden sukupolven massamuistilaitteet (esim. flash-muistit). (Nanotieteen kehittämistyöryhmä 2005.)

Kemianteollisuus on jo jonkin aikaa panostanut nanoteknologiaan. Asemansa vahvistaneen liiketoiminnan (mm. TiO<sub>2</sub>-nanopartikkelien valmistus, johtavat polymeerit) lisäksi alan yrityksillä on nanokatalyytteihin, -komposiitteihin ja -entsyymeihin liittyvää tutkimus-, kehitys- ja liiketoimintaa. (Nanotieteen kehittämistyöryhmä 2005.) Nanoteknologisten pinnoitteiden valmistajia on useita ja tuotteet vaihtelevat pelkästään teollisuuden käyttöön tarkoitetuista tuotteista myös kuluttajille suunnattuihin. Luultavasti juuri pinnoitteet tulevat olemaan tulevaisuudessa niin maailmalla kuin Suomessakin nanoteknologian suurin aluevaltaus. Pinnoitteet antavat niin monipuoliset materiaalien ominaisuuksien muokkausmahdollisuudet, että sovelluksien synnylle on melkein vain mielikuvitus rajana.

Paperi- ja metsäteollisuus on ollut aktiivisesti mukana kehittämässä nanokokoluokan teknologiaan perustuvia tuotteita. Metsäteollisuudella on lukuisia yhtymäkohtia muihin teollisuuden aloihin, kuten kemianteollisuuteen (paperikemikaalit, ym.) ja elektroniikkateollisuuteen (mm. sensorit, tuotannonohjaus). Erityisiä kiinnostuksen kohteita ovat muun muassa painettava elektroniikka sekä tuotantoprosessien kehittäminen (esim. kestävät ja funktionaaliset pinnoitteet). (Nanotieteen kehittämistyöryhmä 2005.) Esimerkiksi erilaisten paperilaatujen valmistuksessa on saatettu hyödyntää nanoteknologiaa. Paperikoneiden seisokkeja lyhentämään on kehitetty nanoteknologiaan perustuvia pinnoitteita, joiden avulla koneet saadaan nopeammin uudelleen käyttöön.

Urheiluvälineiden valmistajat ovat ensimmäisten joukossa ottaneet nanoteknologian käyttöönsä. Monissa urheiluvälineissä kevyiden ja kestävien nanomateriaalien käyttö on jo arkipäivää. Turvallisuuden kannalta kuluttajalle ei pitäisi aiheutua suurta haittaa kyseisistä välineistä (mm. tennismailloja, jääkiekkomailloja, kävelysauvoja), sillä nanomateriaalit on sidottuna kiinteään matriisiin ja niiden vapautuminen ympäristöön on epätodennäköistä normaalissa käytössä.

Osa lääketieteellisyys- ja biotekniikka-alan yrityksistä hyödyntää tutkimuksessaan ja valmistuksessaan nanokokoluokan teknologiaa. Kyseessä saattavat olla entsyymien ja reagenssien yhdistäminen nanoratkaisuihin, biosensorit, täsmälääkkeet tai pinnoitteet. Suuri osa yrityksistä on pieniä tai keskisuuria tuotekehitysyrityksiä. (Nanotieteen kehittämistyöryhmä 2005.) Diagnostiikassa nanoteknologia on vakiintunut osaksi yritysten liiketoimintaa. Pitää muistaa, että lääketieteessä ja biotekniikassa nanokokoluokan ilmiöiden hyväksikäyttö ja partikkelien käyttö ei ole uusi asia. Alalla on jo pidempään pyritty kehittämään funktionaalisia yhdisteitä, jotka vaikuttavat elimistöön, eliöihin ja biologisiin prosesseihin.

Metalliteollisuudessa nanoteknologiasovellukset ja -tutkimus liittyvät lähinnä pintakemian muokkaukseen. Tavoitteena on usein parempi kulutuksen ja korroosion kestävyys, pienempi kitka, funktionaalinen pinta tai keraamisten komposiittien tuottaminen. Suomen metalliteollisuuden korkea jalostusaste sekä erinomainen erikoisosaaminen (mm. ALD- ja Direct Nanoparticle Deposition (DND) -tekniikat) luovat hyvät edellytykset nanoteknologian hyödyntämiselle metalliteollisuudessa. (Nanotieteen kehittämistyöryhmä 2005.) Näillä näkymin ALD-tekniikoilla on hurjasti kasvupotentiaalia. Suomessa ALD-laitteita valmistaa ja käyttää jo useampi yritys. Metalliteollisuuden ja elektroniikkateollisuuden kiinnostus nanoteknologiaa kohtaan on vahva, sillä nanoteknologia tarjoaa lukuisia parannusmahdollisuuksia nykyisiin tuotteisiin ja avaa aivan uusia kehityspolkuja.

### **Hankkeita ja osaamiskeskittymiä**

Tekes ja Suomen Akatemia ovat yhdistäneet voimansa FinNano -hankkeessa. Tekesillä nanoteknologiaan liittyvää toimintaa voi esiintyä myös muissa teknologiaohjelmissa.

Tekesin FinNano -ohjelman kestoksi on määritelty vuodet 2005 – 2010. Vuoden 2007 puoliväliin mennessä ohjelmassa on ollut kaikkiaan 48 yritys- ja tutkimusprojektia. Kokonaisbudjetiksi on määritetty 70 miljoonaa euroa, josta 47 miljoonaa euroa tulee Tekesiltä.<sup>3</sup>

Suomen Akatemian Nanotieteen tutkimusohjelmaa (FinNano) toteutetaan vuosien 2006 – 2010 aikana. Tutkimusohjelmaan kuuluu 10 suomalaista konsortiohanketta ja lisäksi viisi kansainvälisesti rahoitettua suomalais-eurooppalaista yhteishanketta. Suomalaisen hankkeiden kokonaisrahoitus on 9,45 miljoonaa euroa. Akatemia osallistuu Nanotieteen tutkimusohjelman lisäksi EU:n kuudennessa puiteohjelmassa rahoitetun ERA-NET-projektin NanoSci-ERA:n toimintaan.<sup>4</sup>

Tekesin ja Suomen Akatemian lisäksi myös Sitra tukee yrityksiä. Sitralla ei ole omaa erillistä ohjelmaa nanoteknologialle, mutta nanoteknologiayritykset voivat osallistua käynnissä oleviin ohjelmiin. Esimerkiksi Terveystieteiden ja Ympäristö -ohjelmat ovat mahdollisia osallistumiskohteita yrityksille.

Finnish Micro and Nano Technology Network (FMNT) on yhteistyöverkosto suomalaisille yrityksille ja organisaatioille, jotka hyödyntävät mikro- ja nanoteknologiaa sekä uusia materiaaleja. Järjestö on mukana kehittämässä Pohjoismaista yhteistyömallia alallaan. FMNT:n tavoitteena on yhdistää suomalaisten yritysten ja yhteisöjen mikro- ja nanoteknologiayhteisö osaksi eurooppalaisia ja globaaleja verkostoja. (FMNT.)

Valtioneuvosto on perustanut määräaikaisen erityisohjelman, osaamiskeskusohjelman (OSKE), jossa kansallisesti tärkeät painopistealat ovat toiminta- ja kehittämiskohdeina. Osaamiskeskusohjelman perustana on alueiden kehittämislaki, jossa paikallisia, alueellisia ja kansallisia voimavaroja suunnataan huippuosaamisen kehittämiseen. Osaamiskeskusohjelma käynnistettiin ensimmäisen kerran vuonna 1994 ja nyt meillä on kolmas ohjelmakausi, joka toteutetaan vuosien 2007 – 2013 aikana. Kolmas ohjelmakausi noudattaa uusittua, klusteriperustaista, toimintamallia. Ohjelmassa on 13 kansallista osaamisklustera, joissa kussakin on 4 – 7 alueellista osaamiskeskusta. Osaamiskeskusten tehtävänä on kansainvälisesti korkeatasoisen tiedon ja osaamisen hyödyntäminen yritystoiminnan, työpaikkojen luomisen ja aluekehityksen voimavarana. Nanoteknologia on yksi osaamisklustereista ja sillä on seitsemän osaamiskeskusta. (OSKE.) Nanoteknologian osaamiskeskukset ja niiden erikoistumisalat kuvataan taulukossa 2.

Taulukko 2. Osaamiskeskuksia, joissa nanoteknologia- ja tiede on yksi keskusten toimintasektoreista (OSKE).

Osaamiskeskus	Erikoistumisala
Jyväskylän seutu	Funktionaaliset ja itsejärjestäytyvät nanorakenteet
Kokkolan seutu	Kemian teolliset sovellukset
Mikkelin seutu	Ohutkalvopinnoitteet ja muovikomposiitit
Oulun seutu	Monitekniset integroidut mikro- ja nanoteknologian tuotteet
Pohjois-Karjala	Fotoniikka, materiaali- ja tarkkuusteknologiat
Tampereen seutu	Fotoniikka ja kehittyneet materiaalit
Uusimaa	Nano- ja mikrojärjestelmät ja kansainvälinen liiketoiminta

<sup>3</sup> Lisätietoa Tekesin FinNano -ohjelmasta Tekesin Internet-sivuilta osoitteesta: <http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/NANO/fi/etusivu.html>

<sup>4</sup> Lisätietoa Suomen Akatemian FinNano -ohjelmasta Akatemian Internet-sivuilta osoitteesta: <http://www.aka.fi/index.asp?id=8439acc13aea4376a0f423ce4150e1a2&data=1,00308B787886459385F296A5AFD4FA74,08156FFD8955459C846469BCC052BCBB>

## Jyväskylän seutu

Jyväskylän seudulla nanoteknologian tutkimus- ja kehitystoiminta sekä koulutus on merkittävää. Nanoteknologia toimialana työllistää vajaat 300 henkilöä ja nanoteknologiaa hyödyntäviä yrityksiä on alueella kuusi. (OSKE.) Jyväskylän yliopistolla toimii nanoteknologian osaamiskeskittymä, Nanoscience Center (NSC). NSC tarjoaa opiskelijoille nanotieteiden koulutusta kansainvälisessä maisteriohjelmassa ja tutkijakoulussa. Yritysyhteistyössä on mukana monia suuria suomalaisia yrityksiä, mm. Nokia, UPM-Kymmene, M-Real, StoraEnso, Metso, Vaisala ja Planar. Tutkimusyhteistyötä tehdään Helsingin yliopiston, VTT:n sekä yritysten ja ulkomaisten yliopistojen kanssa. (Jyväskylän yliopisto.)

## Uusimaa

Espoossa Otaniemen kampusalueella toimii Suomen johtava mikro- ja nanotieteen tutkimuskeskus, Micronova. Tutkimuskeskus on VTT:n ja TKK:n yhdessä koordinoima. Laitos harjoittaa mikro- ja nanojärjestelmien suunnittelua, kehittämistä ja valmistusta. Micronovassa on yli 300 tutkijaa VTT:ltä, TKK:lta ja yrityksistä, mutta kaikki eivät tietenkään toimi nanoteknologian parissa. Yhteistyötä on monien nanoteknologiaa hyödyntävien yritysten kanssa. Micronovasta löytyy muun muassa Skandinavian suurin puhdastila. (Micronova.)

Vuonna 2003 perustettiin Lohjan Nanoharju -hanke tukemaan Länsi-Uudenmaan nanoteknologia-yrityksiä. Hankkeen tuloksena syntyi Nanoharju -yrityskeskittymä (<http://www.nanoharju.fi>). Yritysklusteri on keskittynyt erityisesti nanomateriaalien hyödyntämiseen.

6.2

## Euroopan unioni

Euroopan komissio ilmaisi huolensa nanoteknologian alan tutkimus- ja kehitystoiminnan sirpaloitumisesta jo vuonna 2004 tiedonannossaan ”Tavoitteena eurooppalainen nanoteknologiastategia”. Verrattuna Yhdysvaltoihin ja Japaniin nanoteknologian tutkimus on hyvin hajanaista ja päällekkäisyyksiä syntyy koordinaation vähäisyyden vuoksi.

6.2.1

### Nanoteknologia puiteohjelmissa

Puiteohjelmat ovat EU:n rahoittamia Euroopan alueella tehtävää tutkimus- ja kehitystoimintaa tukevia instrumentteja. Ensimmäisen kerran puiteohjelma käynnistettiin vuonna 1984. Puiteohjelmien tarkoituksena on edistää eurooppalaisen monialaisen tutkimusyhteistyön kehittymistä. (Euroopan komissio 2007.) Vuosina 2002 – 2006 käynnissä olleessa kuudennessa puiteohjelmassa nanoteknologia oli yksi niistä tutkimuksen painopistealueista, joita ohjelmalla tuettiin. Tämän puiteohjelman kokonaisrahoitus oli 17,5 miljardia euroa, josta nanoteknologian tutkimukseen oli osoitettu 1,3 miljardia euroa. (European Commission 2002.) Seurauksena perustettiin Nanoforum, jonka tarkoituksena on kehittää Euroopan tutkimus- ja kommunikointiverkostoja. (IRSST 2006.)

Seitsemäs puiteohjelma on laajin tähän mennessä toteutetuista puiteohjelmista. Tämä puiteohjelma kattaa vuodet 2007 – 2013 ja sen kokonaisbudjetti on 53,2 miljardia euroa. Tästä summasta nanoteknologian tutkimukseen suunnatun rahoituksen osuus on 3,5 miljardia euroa puiteohjelmakauden ajalle. (Euroopan komissio 2007b).

#### 6.2.2

### NanoScience Europe

NanoScience Europe (NanoSci-ERA) on 17 kansallisen tutkimuslaitoksen yhteenliittymä. Jäsenlaitoksia on 12 maasta Euroopan tutkimusalueelta (European Research Area, ERA). Suomesta Suomen Akatemia on mukana tässä yhteistyössä. Yhteenliittymän tarkoituksena on koordinoida kansallisen nanoteknologian perustutkimuksen suuntaa. NanoSci-ERA perustettiin vuonna 2005 EU:n kuudennen puiteohjelman ERA-NET järjestelmän alaisuuteen. Yhteenliittymällä on suunnitelmia toteuttaa 24 miljoonan euron eurooppalainen nanotieteen yhteishaku vuonna 2008 yhteistyössä seitsemännen puiteohjelman kanssa. (NanoScience Europe.)

#### 6.2.3

### EU-SCENIHR

Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (EU-SCENIHR) on perustanut työryhmän valmistelemaan ohjeistusta (Technical Guidance Document, TGD), miten nanomateriaalit tulisi huomioida.

#### 6.2.4

### ETPIS

ETPIS:n (European Technology Platform for Industrial Safety) tarkoituksena on kehittää teollisuuden turvallisuutta ja kilpailukykyä koordinoimalla tutkimusta. Agen daan kuuluu myös nanoteknologian vaikutus työsuojeluun. (ETPIS.)

#### 6.3

### EU-maat

#### 6.3.1

### Iso-Britannia

Nanomateriaalien tutkimus perustuu osittain hallinnon omaan tutkimukseen sekä yhteistyöhön teollisuuden kanssa. Yhteistyöohjelma on Voluntary Reporting Scheme for Engineered Nanoscale Materials. Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA) vastaa ohjelman toteutuksesta. Ohjelma perustettiin syyskuussa 2006 ja se on alun perin tarkoitettu kaksivuotiseksi. Kahden vuosineljänneksen aikana vain kuusi jäsentä on saatu mukaan ohjelmaan ja näistä kaksi on yliopistoja. Ongelmina uskotaan olleen ohjelmaan liittymisen aikaa vievyys ja vaaditun aineiston laatu, joka saattoi vaatia yrityksiä käyttämään ulkopuolista työvoimaa. Eräät yritykset myös pelkäsivät negatiivista julkisuutta. European Nanotechnology Trade Alliance on tarjoutunut välittämään tietoja yritysten ja DEFRA:n välillä anonyymisti. (DEFRA.)

Iso-Britannian hallitus painostaa teollisuutta itse kehittämään "hyvän toimintatavan" nanoteknologian valmistamiselle, käytölle ja hävittämiseksi. Vastuu nanoteknologian turvallisuuden tutkimuksesta on jaettu valtion ja elinkeinoelämän kesken.

Isossa-Britanniassa on koettu, että vuoden 2004 jälkeen se on menettänyt johtavan asemansa nanoteknologien vastuullisessa kehittämisessä. Paikalliset tutkijat uskovat monitieteisen tutkimuskeskuksen, joka ohjaa projekteja sekä kansainvälistä yhteistyötä, perustamisen olevan paras keino täyttää tietotarpeet. Tutkimuskeskus toimisi myös asiantuntijatiedon lähteenä yrityksille. Lisäksi toivotaan, että hallitus perustaisi tutkimusohjelman tarkastelemaan nanoteknologian eettisiä ja sosiaalisia näkökohtia. (The Royal Society & The Royal Academy of Engineering 2006.)

### 6.3.2

#### Saksa

BAuA (Federal Institute for Occupational Safety and Health), UBA (Federal Environment Agency) ja BfR (Federal Institute of Risk Assessment) ovat yhdistäneet voimansa yhteiseen tutkimusstrategiaan, joka keskittyy erityisesti nanomateriaalien terveys- ja ympäristöriskeihin. Saksa käyttää Euroopan maista eniten resursseja nanoteknologian tutkimukseen. Saksa on mukana myös OECD:n WPMN:ssa (Working Party on Manufactured Nanomaterials).

### 6.3.3

#### Tanska

Vuonna 2005 Tanskassa perustettiin tutkimusryhmä selvittämään terveysriskejä, jotka liittyvät nanopartikkelien valmistukseen ja käyttöön. REACH:n (Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals) puutteet nanomateriaalien kohdalla on havaittu ja säätelyn tarvetta tutkitaan. Tanskan ympäristönsuojeluvirasto (Danish EPA, Environment Protection Agency) on aloittanut yhteistyön teollisuuden kanssa selvittäessään nanomateriaalien käyttöä paikallisessa tuotteiden valmistuksessa.

### 6.4

## Nanoteknologian tutkimus EU:n ulkopuolella

### 6.4.1

#### USA

Nanomateriaalien valvonta on tällä hetkellä pääasiassa TSCA:n (Toxic Substances Control Act) lainsäädännön alaisena. Kyseisen lain perusteella EPA (Environmental Protection Agency) valvoo kemikaalien ja nanomateriaalien ympäristövaikutuksia. Laki velvoittaa aineiden tuottajat toimittamaan EPA:lle sen vaatimat tiedot kyseisistä aineista. Erotuksena REACH:iin on, että vain uudet markkinoille tulevat aineet ovat rekisteröinnin alaisia.

Valtio tutkii itsenäisesti nanomateriaaleja sekä niiden vaikutuksia ympäristöön ja ihmisiin. Jotta tutkimus ja turvallisuuden varmistaminen sujuisi nopeammin ja kohtuullisilla kustannuksilla, on perustettu yhteistyöohjelma hallinnon ja teollisuuden välille, Nanoscale Materials Stewardship Program. Ohjelma perustuu vapaaehtoiseen tietojen jakamiseen tutkittavista yhdisteistä. Yhteistyöohjelma on tarkoitettu kaikille sidosryhmille, jotka ovat tekemisissä nanomateriaalien kanssa. Hanke aloitettiin vuoden 2006 lopulla.

Lisäksi liittovaltion virastojen ja eri yksiköiden tutkimustyötä koordinoimaan ja kehittämään on perustettu vuonna 2001 National Nanotechnology Initiative (NNI). Nanoteknologian tutkimukseen ohjattu budjettirahoitus kanavoidaan NNI:n kautta. NNI:n kautta tutkimukseen käytettiin hieman yli miljardia dollaria vuonna 2006. Lisäksi osavaltiot suuntaavat alalle omaa rahoitusta 300 miljoonaa dollaria. Tästä summasta arvioidaan, että 4 % käytettiin 2006 EHS (Environment, Health & Safety) -tutkimukseen. Arvio vuoden 2007 EHS-tutkimuksen rahoituksesta on lähes 46 miljoonaa dollaria.

Yksityissektori käytti vastaavasti vuonna 2004 noin 1,5 miljardia dollaria nanoteknologisten tuotteiden tutkimukseen. Täytyy kuitenkin muistaa, että luvussa on mukana kaikki työ, mikä jollain tavalla liittyy nanoteknologiaan. Liittovaltio on sitoutunut alaan omalla nanoteknologiailla, joka kattaa vuodet 2005 – 2008. Valtion virastoille kohdennetaan näiden vuosien kuluessa varoja 3,7 miljardia dollaria. Tämä

kaksinkertaistaa nanoteknologian rahoituksen vuoteen 2008 mennessä. Luvuissa ei ole kuitenkaan puolustusalan menoja, joiden arvioidaan vastaavaan noin kolmanneksestä alan tutkimuksesta.

Vuoden 2006 marraskuusta lähtien EPA on ryhtynyt valvomaan hopeananopartikkeleita sisältävien tuotteiden käyttöä. Valmistajan on todistettava, ettei kyseinen tuote aiheuta ympäristöhaittoja.

#### 6.4.2

### Japani

Japanilla ei ole minkäänlaista yhteistyöohjelmaa hallinnon ja teollisuuden välillä. Valtio kuitenkin panostaa nanoteknologian tutkimukseen ja riskien arviointiin. Panostus nanoteknologiaan on kasvanut vuoden 2001 400 miljoonasta dollarista 800 miljoonaan dollariin jo vuonna 2003. Samalla yksityinen sektori investoi 830 miljoonaa dollaria vuonna 2003. (IRSST 2006.) Rahoituksen oli määrä kasvaa 20 % vuosivauhdilla. Aasian maista Japani panostaa rahallisesti eniten nanoteknologian tutkimukseen. EHS-tutkimuksen osuutta kokonaisrahoituksesta ei tunneta.

#### 6.4.3

### OECD

OECD on perustanut syyskuussa 2006 työryhmän "Working Party on Manufactured Nanomaterials" (WPMN). Työryhmän toimialaan kuuluu kansainvälisen yhteistyön koordinointi tarkoituksellisesti tuotettujen nanomateriaalien terveys- ja ympäristöriskien arvioimisessa. Yhteistyötä tehdään tiiviisti ISO:n kanssa. Tehtävälueina ovat 1. määritelmät ja standardit, 2. testimenetelmät ja riskinarviointi sekä 3. tiedonvaihto ja yhteistyö eri toimijoiden välillä. Nämä tehtävät on jaettu alun perin kuuteen alahankkeeseen, jotka esitellään seuraavassa lyhyesti. (OECD 2006.)

#### 6.4.3.1

### Hanke 1: Tietokannan kehittäminen terveyden ja ympäristön turvallisuuden tutkimuksesta

Tarkoituksena on kehittää tietokanta tutkimusprojekteista, jotka ovat suunnitteilla, meneillään tai päättyneet. Tavoitteena on auttaa tutkimusryhmiä löytämään yhteistyömahdollisuuksia sekä välttää hankkeiden päällekkäisyyksiä. Tietokannan rakenne on päätetty ja EPA (Environmental Protection Agency) Yhdysvalloista on suostunut tietokannan testaajaksi. Lähtökohtana on WWC:n (Woodrow Wilson International Center for Scholars) olemassa oleva tietokanta.

#### 6.4.3.2

### Hanke 2: Tutkimus-strategiat (EHS) nanomateriaaleille

Tarkoituksena on tunnistaa ja priorisoida tutkimustarpeita ja luoda tarkoituksenmukainen lähivuosien EHS (Environment, Health & Safety) –tutkimusstrategia nanomateriaaleille. Aluksi tarkoituksena on tunnistaa tutkimustarpeet, jotta turvallisuusnäkökohta tulee riittävästi huomioitua kansallisissa tutkimusstrategioissa ja -ohjelmissa. Alustavaa listaa tutkimusteemoista, jotka ovat kansallisesti esillä, on alettu valmistella. Hanke on tiiviisti linkitetty tietokanta-hankkeen kehittämiseen. Tavoitteena on saada kiireellisimmät lyhyen aikavälin tutkimusprioriteetit selville marraskuuhun 2007 mennessä.

#### 6.4.3.3

### **Hanke 3: Turvallisuustestaus edustavalle otokselle nanomateriaaleista**

Hankkeen tavoitteena on organisoida edustavien/tyypillisten nanomateriaalien testaus hyväksytyillä testausohjeilla tai –menetelmillä. Edustavalla otoksella tarkoitetaan nanomateriaaleja, jotka ovat kaupallistettu tai lähellä kaupallistamista. Edustavien nanomateriaalien ja testausohjeiden listaa valmistellaan. Testaus tulee vaatimaan paljon resursseja, joten päällekkäisyyksien välttämiseksi tutkimusprojekteissa tiivistä yhteistyötä toivotaan. Yhteistyötä teollisuuden kanssa hoidetaan BIAC:n (Business and Industry Advisory Committee) kautta. Liittyy hankkeeseen neljä.

#### 6.4.3.4

### **Hanke 4: Tuotetut nanomateriaalit ja testausohjeet**

Hankkeen tarkoituksena on tutkia, mitkä nykyisistä kemikaalien testausohjeista sopivat nanomateriaaleille, ja selvittää mahdollisen testausohjeiden muuttamisen tarpeen. Tarkoituksena on myös valmistella uusia OECD:n testausohjeita, kun sellaisia testaustarpeita ilmenee, joihin nykyiset testausohjeet eivät sovellu. Vain harvat OECD:n testausohjeet ovat relevantteja. Tällä hetkellä on meneillään relevanteiksi todettujen testausohjeiden priorisointityö.

#### 6.4.3.5

### **Hanke 5: Yhteistyöhankkeet**

Useat OECD:n jäsenet ovat kehittäneet nanomateriaaleihin keskittyneitä yhteistyöhankkeita teollisuuden kanssa. Hankkeen tarkoituksena on kuvata vapaaehtoisia raportointimenettelyjä ja ympäristö- ja terveysyhteistyöhankkeita teollisuuden, viranomaisten ja muiden toimijoiden kesken. Tavoitteena on luoda hyvän toimintakäytännön ohjeistoja nanomateriaaleja käyttäville teollisuudenaloille ja -prosesseille. Kanada on suurelta osin vastuussa hankkeen etenemisestä.

#### 6.4.3.6

### **Hanke 6: Yhteistyö ja riskinarviointi**

Tavoitteena on arvioida ja kehittää nanomateriaaleille riskinarviointiohjeistuksia. Tällä hetkellä pääpaino on nykyisten kemikaaleille tarkoitettujen riskinarviointimenetelmien soveltuvuuden määrittämisessä nanomateriaaleille. Hankkeen tehtävänä on myös tuottaa suosituksia WPMN:lle, miten nykyisen riskinarvioinnin puutteita voitaisiin paikata.

## 7 Johtopäätökset

Nanoteknologian tarjoamien uudentyypisten aineiden ja materiaalien ominaisuuksien odotetaan tarjoavan lukuisia soveltamismahdollisuuksia eri tieteenaloilla. Lääketiede, elektroniikkateollisuus ja ympäristöteknologia ovat eräitä esimerkkejä niistä aloista, joilla nanoteknologian uskotaan olevan ratkaisevassa asemassa uusien keksintöjen ja jopa tieteellisten läpimurtojen osalta. Nanoteknologiaa sisältäviä materiaaleja ja nanomittakaavan rakenteita omaavia tuotteita on tällä hetkellä markkinoilla jo useita satoja ja kiivas tutkimus- ja kehitystyö tuottaa koko ajan uusia sovelluksia. Vaikka nanoteknologialla uskotaan voitavan saavuttaa suuria hyötyjä niin taloudelliselta, sosiaaliselta kuin ympäristönsuojelunäkökulmasta katsottuna, liittyy siihen useita tekijöitä, jotka jättävät avoimeksi todelliset hyödyt.

Avoimet kysymykset liittyvät nanoteknologian riskeihin ja niiden hallintaan. Tämän selvityksen perusteella voidaan todeta, että tällä hetkellä nanoteknologian terveysvaikutuksia ja mekanismeja on tutkittu eniten. Sen sijaan nanoteknologian ympäristölle aiheuttamien haittavaikutusten tutkimus on vielä pitkälti alkutekijöissään. Tässä yhteydessä olisikin ensiarvoisen tärkeää, että nanoteknologiaan liitettävät hyötynäkökulmat eivät ohittaisi riskien kartoitusta ja mahdollisten haittojen selvittämistä, sillä seuraukset liian myöhäisestä ennakoimisesta ja varautumisesta riskien hallinnassa voivat olla arvaamattomia. Riskien hallinnan merkitys korostuu etenkin sen takia, että nanoteknologiassa kyseessä on aineiden uudentyypisten ominaisuuksien, rakenteiden ja jopa kokonaan uusien materiaalien soveltaminen erilaisilla tieteenaloilla. Uudet ominaisuudet tuovat mukanaan uudet riskit.

Jotta tällaiselta puutteelta hyötyjen ja haittojen tasapuolisen kartoituksen suhteen vältyttäisiin, tarvittaisiin avointa sosioekonomista näkemystä ja erityisesti avointa viestintää niin valmistajien, lainsäätäjien kuin kuluttajien välillä. Avoin keskustelu varmistaa sen, että jokainen osapuoli tietää, missä nanoteknologiassa edetään ja mistä on kyse sekä millaisia hyöty- ja haittanäkökulmia kyseisen teknologian käyttöön liittyy. Mahdollisten haittojen pikainen arviointi ja avoin tiedottaminen kasvattaa erityisesti kuluttajien luottamusta nanoteknologian turvallisuuteen. Riskien kartoitus palvelee tässä mielessä myös teollisuutta ja nanoteknologian tutkimusta yleisesti. Riskien ennakointi ja varautuminen hyvissä ajoin estävät sen, ettei nanoteknologia koe samaa kohtaloa kuin esimerkiksi asbesti- ja geenimuunnellut tuotteet. Asbestia käytettiin paloturvallisuuden edistämiseksi, kunnes tutkimukset osoittivat sen aiheuttavan vakavia terveydellisiä haittoja. Asbestin parissa työskennelleet ja sille altistuneet ovat saaneet erilaisia keuhkosairauksia ja pahimmillaan asbesti on aiheuttanut pahanlaatuisia kasvaimia, mesoteliomaa ja keuhkosityöpää. Geenimuunnellut tuotteet eivät ole saavuttaneet jalansijaa markkinoilla, sillä niiden turvallisuutta ei ole voitu aukottomasti todistaa. Molemmissa esimerkeissä kyseiset tuotteet olivat jo päässeet markkinoille tai ne olivat markkinoilletulon kynnyksellä, kun niiden riskejä vasta alettiin kartoittaa.



Tässä selvityksessä on voitu todeta, että tällä hetkellä riskitutkimus on suhteellisen vähäistä verrattuna nanoteknologian tutkimus- ja kehitystyöhön. Kuitenkin samaan aikaan tiedostetaan, että nanoteknologian uudenlaiset ominaisuudet, joilla voidaan saavuttaa hyötyjä, voivat aiheuttaa myös uudenlaisia, ennalta arvaamattomia haittoja, mikäli riskien tutkimukseen ja hallintaan ei kiinnitetä riittävästi huomiota. Tilannetta voitaneenkin kuvata seuraavalla, varsin monimutkaisella, toteamuksella: "Tiedetään, ettei kaikkea tiedetä, muttei tiedetä, mitä pitäisi tietää." Moni kysymys on tällä hetkellä avoimena, kun mietitään, miten pitäisi edetä, jotta nanoteknologian riskit osattaisiin tunnistaa ajoissa ja voitaisiin varmistaa, että nanoteknologian käytöstä ei aiheudu haittaa ihmisille, eliöille tai ympäristölle. Voimmeko olettaa, että Euroopassa REACH:n menettelyt ottavat huomioon riittävästi nanoteknologian käytön vai soveltuvatko se laisinkaan nanoteknologian riskien hallintaan? Millaisia lainsäädännöllisiä velvoitteita muissa maissa käytetään vai pitäisikö mahdollisesti laatia nanoteknologian kehitystä ja käyttöä ohjaavaa järjestelmää globaalilla tasolla? Testausmenetelmät ja ohjeistus: pitäisikö nykyisiä menetelmiä ja ohjeita muuttaa nanoteknologialle soveltuviksi vai tarvittaisiinko kokonaan uusia testiohjeita ja -menetelmiä?

Yksinkertaisia vastauksia ei välttämättä ole olemassa edellä esitettyihin kysymyksiin, mutta sen ei pitäisi olla esteenä perinpohjaisen ja ennakoivan riskien hallinnan kehittämiseksi. Taloudelliset tekijät – riskien hallinnan kustannukset – saattavat monen mielestä olla liian keskeisessä asemassa ja monet haluaisivat kustannusten sijaan keskittyä nanoteknologian tuottoihin. Mutta tällöin saatettaisiin tehdä liian suuri uhraus kuluttajien turvallisuuden ja ympäristön ehdoilla. Hyvissä ajoin hoidettu riskien hallinta palvelee paitsi eri sidosryhmien ja asianomaisten turvallisuutta myös parantaa nanoteknologian tuottomahdollisuuksia, kun mahdolliset riskitekijät osataan ehkäistä jo varhain ja välttämään tilanteelta, jossa jo aiheutettuja haittoja pitäisi ryhtyä korjaamaan. Jälkikäteen haittojen korjaaminen on yleensä kalliimpaa ja antaa huonon julkisuuskuvan.

Jotta nanoteknologia voisi lunastaa lupauksensa suurten mahdollisuuksien ja hyötyjen suhteen, on tutkimuksen oltava kokonaisvaltaista ja siihen on ryhdyttävä mitä pikimmiten. Yhteistyötä eri maiden ja erilaisten organisaatioiden ja järjestöjen välillä tarvitaan tiedonkulun ja tietotaidon siirtämiseksi. Koordinoitu tiedonkeruu on järkevää, jotta välttyttäisiin päällekkäiseltä työltä. Nanoteknologia on huomisen lupaus, mutta työtä tuon lupauksen lunastamiseksi on ryhdyttävä tekemään jo tänään.

## Lähteet

- Argonne National Laboratory. <http://nano.anl.gov/> [viitattu 10.10.2007]
- Balbus, J., Denison, R., Florini, K. & Walsh, S. 2005. Getting Nanotechnology Right the First Time. Saatavilla sähköisesti: [http://www.environmentaldefense.org/documents/4816\\_nanotechstatementNAS.pdf](http://www.environmentaldefense.org/documents/4816_nanotechstatementNAS.pdf)
- Chen, F. F. 2007. Tutorial IIIB. 3rd International Symposium on Nanotechnology, Occupational and Environmental Health. Taiwan.
- Davies, J. C. 2007. EPA and Nanotechnology: Oversight for the 21st Century. Woodrow Wilson International Center for Scholars, Project on Emerging Nanotechnologies. Saatavilla sähköisesti: <http://www.nanotechproject.org/reports>
- DEFRA. <http://www.defra.gov.uk/environment/nanotech/index.htm> [23.10.2007]
- Dendritic Nanotechnologies Inc. <http://dnanotech.com/dendrimerOverview.pdf> [viitattu 10.10.2007]
- EPA. 2007. U.S. Environmental Protection Agency Nanotechnology White Paper, EPA 100/B-07/001, February 2007. Saatavilla sähköisesti: <http://es.epa.gov/ncer/nano/publications/whitepaper12022005.pdf>
- ETPIS. <http://www.industrialsafety-tp.org/tps.aspx> [viitattu 23.10.2007]
- Euroopan komissio. 2007a. Komission tiedonanto neuvostolle, Euroopan parlamentille ja Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle. Nanotiede ja nanoteknologia: Toimintasuunnitelma Euroopalle 2005 – 2009. Ensimmäinen täytäntöönpanokertomus 2005 – 2007. Saatavilla sähköisesti: <http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/96290481FI6.pdf>
- Euroopan komissio. 2007b. Mitä Euroopassa tutkitaan. Seitsemäs puiteohjelma (PO7). Eurooppalaisen tutkimuksen nostaminen johtoasemaan. Saatavilla sähköisesti: [http://ec.europa.eu/research/fp7/pdf/fp7-brochure\\_fi.pdf](http://ec.europa.eu/research/fp7/pdf/fp7-brochure_fi.pdf)
- European Commission. 2002. The Sixth Framework Programme in brief. Saatavilla sähköisesti: [http://ec.europa.eu/research/fp6/pdf/fp6-in-brief\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/fp6/pdf/fp6-in-brief_en.pdf)
- EU-SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly-Identified Health Risks). 2007. Opinion on the Appropriateness of the Risk Assessment Methodology in Accordance with the Technical Guidance Documents for New and Existing Substances for Assessing the Risks of Nanomaterials. Saatavilla sähköisesti: [http://ec.europa.eu/health/ph\\_risk/committees/04\\_scenihhr/docs/scenihhr\\_o\\_010.pdf](http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihhr/docs/scenihhr_o_010.pdf)
- FMNT. <http://www.fmnt.fi>
- Handy D. R. & Shaw B. J. 2007. Learned Discourses: Ecotoxicity of Nanomaterials to Fish: Challenges for Ecotoxicity Testing. Integrated Environmental Assessment and Management 2007, Vol. 3, pp. 458 – 467.
- Helsinki NANO. Mitä on nanoteknologia? <http://www.helsinkinano.fi/nanoteknologia.htm> [päivitetty 15.07.2005].
- Helsinki NANO. 2005. HelsinkiNano –hankkeen loppuraportti. Saatavilla sähköisesti: <http://helsinkinano.tkk.fi/HelsinkiNano%20loppuraportti.pdf>
- Hoet P. H.M., Brüske-Hohlfeld I. & Salata O. V. 2004. Nanoparticles – known and unknown risks. Journal of Nanobiotechnology 2004, Vol. 2, No. 12.
- Jyväskylän yliopisto. Nanoscience Center. [http://www.jyu.fi/science/muut\\_yksikot/nsc/en](http://www.jyu.fi/science/muut_yksikot/nsc/en) [päivitetty 26.9.2007]
- Koponen, P., Juvonen, L. & Crawley, T. (Spinverse Consulting). 2006. Nanotechnology in Finnish Industry 2006 Survey Results. Saatavilla sähköisesti: [http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/NANO/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta\\_ ja\\_aktivointi/Aihealuerhyhmat/Nanotechnology\\_in\\_Finnish\\_Industry\\_2006\\_Public.pdf](http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/NANO/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ ja_aktivointi/Aihealuerhyhmat/Nanotechnology_in_Finnish_Industry_2006_Public.pdf)
- Krombach F., Münzing S., Allmeling A. M., Gerlach J. T., Behr J. & Dörger M. 1997. Cell Size of Alveolar Macrophages: An Interspecies Comparison. Environment Health Perspectives 1997, Vol. 105, Supplement 5: Particle Toxicity, pp. 1261 – 1263.
- Levi, N., Hantgan R. R., Lively M. O., Carroll D. L. & Prasad G. L. 2006. C60 -fullerenes: detection of intracellular photoluminescence and lack of cytotoxic effects. Journal of Nanobiotechnology 2006, Vol. 4, No. 14.
- Lux Research. 2004. Press Release 24.10.2004: Revenue from nanotechnology-enabled products to equal IT and telecom by 2014, exceed biotech by 10 times. Saatavilla sähköisesti: [http://www.luxresearchinc.com/press/RELEASE\\_SizingReport.pdf](http://www.luxresearchinc.com/press/RELEASE_SizingReport.pdf)
- Maynard, A. D. 2006b. Nanotechnology: assessing the risks. Nanotoday 2006, Vol. 1, No. 2, pp. 22 – 33. Saatavilla sähköisesti: [www.nanotoday.com](http://www.nanotoday.com)
- Maynard, A. D., Aitken, R. J., Butz, T., Colvin, V., Donaldson, K., Oberdörster, G., Philbert, M. A., Ryan, J., Seaton, A., Stone, V., Tinkle, S. S., Tran, L., Walker, N. J. & Warheit, D. B. 2006. Safe handling of nanotechnology. Nature 2006, Vol. 444, No. 16, pp. 267 – 269.
- Micronova <http://www.micronova.fi/index.html> [päivitetty 28.9.2007]
- Moore, M. N. 2006. Do nanoparticles present ecotoxicological risks for the health of the aquatic environment? Environment International (2006) 32, pp. 967 – 976.
- NanoScience Europe. <http://www.nanoscience-europe.org> [viitattu 18.10.2007]
- Nel A., Xia T., Mädler L. & Li N. 2006. Toxic Potential of Materials at the Nanolevel. Science 2006. Vol. 311, No. 5761, pp. 622 – 627.
- NRM Project. <http://www.nanoroadmap.it/> [päivitetty 24.3.2006]

- Oakdene Hollins. 2007. Environmentally Beneficial Nanotechnologies. Barriers and Opportunities. A Report for the Department for Environment, Food and Rural Affairs. Saatavilla sähköisesti: <http://www.defra.gov.uk/environment/nanotech/policy/index.htm>
- OECD 2006. Manufactured nanomaterials: work programme 2006-2007. 40th Joint Meeting of the Chemicals Committee and the Working Party on Chemicals, Pesticides and Biotechnology. ENV/JA(2006)49, Organization for Economic Co-operation and Development, Paris
- OSKE (Osaamiskeskusohjelma). <http://www.oske.net/> [viitattu 12.10.2007]
- Parr, D. 2005. Will nanotechnology make the world a better place? Trends in Biotechnology 2005, Vol. 23, No. 8, pp. 395 – 398.
- Stone, V. 2007. Investigating the Effects of Nanoparticles on the Environment. Tutorial IIB. 3rd International Symposium on Nanotechnology, Occupational and Environmental Health. Taiwan. Project on Emerging Nanotechnologies. <http://www.nanotechproject.org/>
- The Royal Society & The Royal Academy of Engineering. 2004. Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. Saatavilla sähköisesti: <http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm>
- The Royal Society & The Royal Academy of Engineering. 2006. Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. Two-year preview of progress on Government actions: Joint academies' response to the Council for Science and Technology's call for evidence. RS policy document 35/06.
- UBA (Umweltbundesamt, the Federal Environment Agency). 2006. Background Paper "Nanotechnology: Opportunities and Risks for Humans and the Environment". Saatavilla sähköisesti: <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse-e/hintergrund/nanotechnology.pdf>
- UNEP. 2007. GEO Year Book 2007. An Overview of Our Changing Environment. Emerging Challenges – Nanotechnology and the Environment, pp. 61 – 70. Saatavilla sähköisesti: [http://www.unep.org/geo/yearbook/yb2007/PDF/GYB2007\\_English\\_Full.pdf](http://www.unep.org/geo/yearbook/yb2007/PDF/GYB2007_English_Full.pdf)

## KUVAILULEHTI

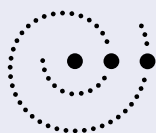
<i>Julkaisija</i>	Ympäristöministeriö Ympäristönsuojeluosasto			<i>Julkaisuaika</i> Helmikuu 2008
<i>Tekijä(t)</i>	Susanna Suomalainen ja Tero Hakkarainen			
<i>Julkaisun nimi</i>	<b>Nanoteknologia ja ympäristönsuojelu</b>			
<i>Julkaisusarjan nimi ja numero</i>	Ympäristöministeriön raportteja 11/2008			
<i>Julkaisun teema</i>				
<i>Julkaisun osat/ muut saman projektin tuottamat julkaisut</i>				
<i>Tiivistelmä</i>	<p>Nanoteknologiaa pidetään yhtenä tulevaisuuden lupaavimmista tutkimus- ja kehitysaloista, jonka varaan lasketaan suuria toiveita monen eri alan suunnalta. Nanoteknologiaan liittyy kuitenkin paljon epävarmuustekijöitä, joita on tutkittava tarkemmin. Tässä selvityksessä kuvataan nanoteknologiassa tällä hetkellä tapahtuvaa toimintaa ja tulevaisuuden näkymiä. Erityistä huomiota kiinnitetään nanoteknologiaan mahdollisesti liittyvien riskien tutkimukseen ja siihen liittyviin tarpeisiin.</p> <p>Selvityksen tarkoituksena on kartoittaa yleisellä tasolla nanoteknologian tutkimusta, nanoteknologian sovelluksia sekä niihin liittyviä riskejä. Tarkastelu keskittyy terveys- ja ympäristöriskien hallintaan liittyviin kysymyksiin. Selvityksessä pohditaan lyhyesti sitä, millaisia haasteita nanoteknologian kehitys tuo tämän sääntelyä ajatellen. Selvityksen tarkoituksena ei ole antaa täydellisen kattavaa kuvaa nanoteknologian tutkimus- ja kehitystyöstä sekä sovelluksista, vaan tarjota yleisluontoinen kuvaus nanoteknologiasta.</p> <p>Tämän selvityksen yhteydessä voidaan todeta, että ainakin tällä hetkellä riskitutkimus on suhteellisen vähäistä verrattuna nanoteknologian tutkimus- ja kehitystyöhön. Kuitenkin samaan aikaan tiedostetaan, että nanoteknologian samaiset uudenlaiset ominaisuudet, joilla voidaan saavuttaa hyötyjä, voivat aiheuttaa myös uudenlaisia, ennalta arvaamattomia haittoja, mikäli riskien tutkimukseen ja hallintaan ei kiinnitetä riittävästi huomiota. Ennakoivaan ja kokonaisvaltaisesti riskit kartoittavaan tutkimustyöhön onkin ryhdyttävä. Riskien hallinnassa on kuitenkin monia avoimena olevia kysymyksiä, jotka vaatisivat vastauksia mitä pikimmiten, jotta suunta eri maissa ja globaalisti harjoitettavalle riskitutkimukselle saataisiin selville. Yhteistyötä tarvitaan tietotaidon siirtämiseksi ja päällekkäisen työn välttämiseksi.</p>			
<i>Asiasanat</i>	Nanoteknologia, ympäristö-, terveys- ja turvallisuusnäkökulmat, riskien hallinta			
<i>Rahoittaja/ toimeksiantaja</i>	Ympäristöministeriö			
	ISBN (nid.)	ISBN 978-952-11-3060-1 (PDF)	ISSN (pain.)	ISSN 1796-170X (verkkokoj.)
	<i>Sivuja</i> 51	<i>Kieli</i> Suomi	<i>Luottamuksellisuus</i> Julkinen	<i>Hinta (sis.alv 8 %)</i>
<i>Julkaisun myynti/ jakaja</i>				
<i>Julkaisun kustantaja</i>				
<i>Painopaikka ja -aika</i>				

## PRESENTATIONSBLAD

Utgivare	Miljöministeriet Miljövårdsavdelningen	Datum Februari 2008		
Författare	Susanna Suomalainen och Tero Hakkarainen			
Publikationens titel	<b>Nanoteknologia ja ympäristönsuojelu</b> (Nanoteknologi och miljövård)			
Publikationsserie och nummer	Miljöministeriets rapporter I I/2008			
Publikationens tema				
Publikationens delar/ andra publikationer inom samma projekt				
Sammandrag	<p>Nanoteknologi är ett av de mest lovande forsknings- och utvecklingsområdena, och det finns stora förväntningar på nanoteknologin inom många olika branscher. Ändå finns det många osäkerhetsfaktorer som behöver utforskas mer ingående. I utredningen beskrivs den nuvarande verksamheten och framtidsperspektiven inom nanoteknologin. Man beaktar särskilt forskningen av nanoteknologins eventuella risker och behoven i anknytning till dessa.</p> <p>Utredningens syfte är att på en allmän nivå kartlägga forskningen inom nanoteknologin, tillämpningar av nanoteknologin och eventuella framtida risker. Utredningen fokuserar på frågor i anslutning till hälso- och miljöriskhantering. Utredningen försöker inte ge en heltäckande bild av forsknings- och utvecklingsarbetet eller tillämpningar inom området, utan ger en mer allmän bild av nanoteknologin.</p> <p>På basis av utredningen kan man konstatera att riskforskningen åtminstone för tillfället är relativt obetydlig i förhållande till FoU-arbetet inom nanoteknologin. Samtidigt är man dock medveten om att samma egenskaper hos nanoteknologin med vilka man nå fördelar, också kan ge upphov till nya, oförutsebara olägenheter om man inte tar tillräckligt hänsyn till forskningen och hanteringen av risker. Därför bör man påbörja forskning som kartlägger riskerna på ett föregripande och helhetsbetonat sätt. När det gäller riskhanteringen finns det dock många öppna frågor som fordrar svar så snabbt som möjligt för att klarlägga inriktningen på den riskforskning som bedrivs i olika länder och globalt. Mer samarbete behövs för att överföra kunskaper och för att undvika överlappande arbete.</p>			
Nyckelord	Nanoteknologi, miljö-, hälso- och säkerhetsaspekter, riskhantering			
Finansiär/ uppdragsgivare	Miljöministeriet			
	ISBN (hft.)	ISBN 978-952-11-3060-1 (PDF)	ISSN (print)	ISSN 1796-170X (online)
	Sidantal 51	Språk Finska	Offentlighet Offentlig	Pris (inneh. moms 8 %)
Beställningar/ distribution				
Förläggare				
Tryckeri/tryckningsort och -år	Presentationsblad			

Nanoteknologian tarjoamien uudentyypisten aineiden ja materiaalien ominaisuuksien odotetaan tarjoavan lukuisia soveltamismahdollisuuksia eri tieteenaloilla. Lääketiede, elektroniikkateollisuus ja ympäristöteknologia ovat eräitä esimerkkejä niistä aloista, joilla nanoteknologian uskotaan olevan ratkaisevassa asemassa uusien keksintöjen ja jopa tieteellisten läpimurtojen osalta. Nanoteknologiaa sisältäviä materiaaleja ja nanomittakaavan rakenteita omaavia tuotteita on tällä hetkellä markkinoilla jo useita satoja ja kiiwas tutkimus- ja kehitystyö tuottaa koko ajan uusia sovelluksia. Vaikka nanoteknologialla uskotaan voitavan saavuttaa suuria hyötyjä niin taloudelliselta, sosiaaliselta kuin ympäristönsuojelunäkökulmasta katsottuna, liittyy siihen useita tekijöitä, jotka jättävät avoimeksi todelliset hyödyt.

Avoimet kysymykset liittyvät nanoteknologian riskeihin ja niiden hallintaan. Tämän selvityksen perusteella voidaan todeta, että tällä hetkellä nanoteknologian terveysvaikutuksia ja mekanismeja on tutkittu eniten. Sen sijaan nanoteknologian ympäristölle aiheuttamien haittavaikutusten tutkimus on vielä pitkälti alkutekijöissään. Tässä yhteydessä olisikin ensiarvoisen tärkeää, että nanoteknologiaan liitettävät hyötynäkökulmat eivät ohittaisi riskien kartoitusta ja mahdollisten haittojen selvittämistä, sillä seuraukset liian myöhäisestä ennakoimisesta ja varautumisesta riskien hallinnassa voivat olla arvaamattomia.



YMPÄRISTÖMINISTERIÖ  
MILJÖMINISTERIET  
MINISTRY OF THE ENVIRONMENT