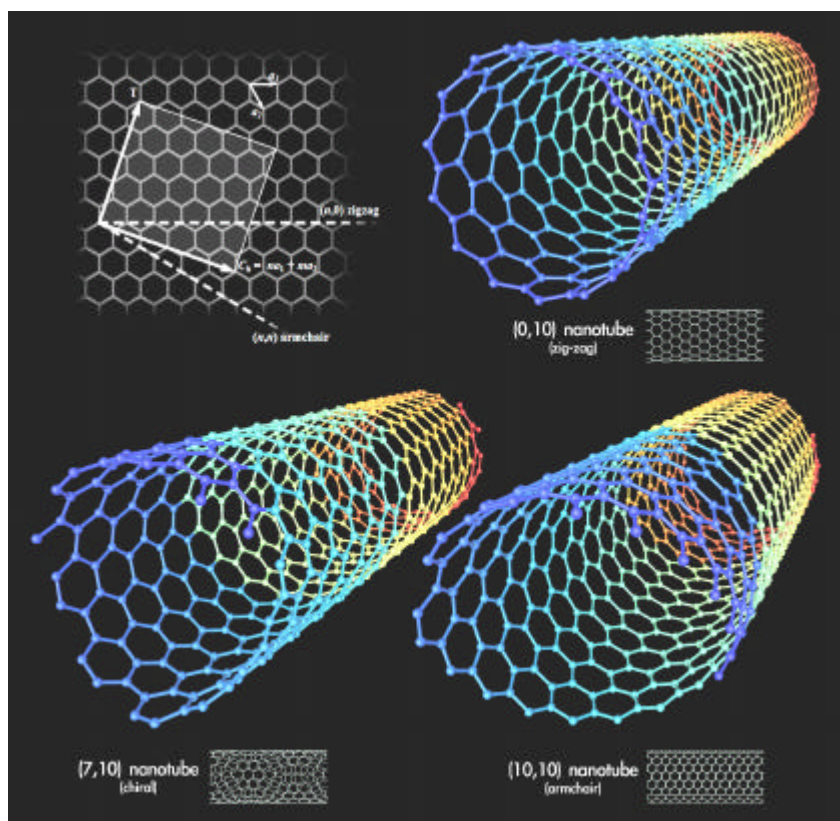


NANOMATERIAALIEN MAHDOLLISUUDET JA RISKIT

Esiselvitys



Kuva esittää nanotekniikan yhtä kärki-innovaatiota hiilinanoputkea

TULEVAISUUSVALIOKUNTA
TEKNOLOGIAN ARVIOINTEJA 26

NANOMATERIAALIEN MAHDOLLISUUDET JA RISKIT

Esiselvitys

Merja Itävaara, Markus Linder, Esko Kauppinen

Tulevaisuusvaliokunta / Nanoteknologia-ohjausryhmä:

Kansanedustajat *Marjo Matikainen-Kallström (pj.), Mikko Alatalo (vpj.), Marko Asell, Tarja Filatov, Toimi Kankaanniemi, Oiva Kaltiokumpu, Johanna Karimäki, Merja Kyllönen, Reijo Laitinen, Marja Tiura, Markku Uusipaavalniemi, Anne-Mari Virolainen, Pertti Virtanen*

Tulevaisuusvaliokunta
00102 Eduskunta

www.eduskunta.fi

Helsinki 2008

ISBN 978-951-53-3051-2 (nid.)
ISBN 978-951-53-3052-9 (PDF)

Esipuhe

Nanoteknologia on kiehtova, uusia ulottuvuuksia avaava tieteenhaara, jonka soveltamiselle ei tunnu löytyvän rajoja. Jo nyt sitä käytetään esimerkiksi teknologia- ja energiateollisuudessa, lääketieteessä, ruokatuotannossa sekä arkea helpottavissa ratkaisuissa hyvin monipuolisesti. Sen onkin ennustettu aiheuttavan tieteellisen vallankumouksen monilla aloilla.

Ihmisen aikaansaamia pienhiukkasia on ympäristössämme jo nyt runsaasti. Tuhansia vuosia on käytössämme ollut hiilimusta, väriaine, joka koostuu erittäin pienistä partikkeleista. Väriä käytetään edelleen muun muassa kumin, muovin ja kankaiden värjäykseen. Toinen yleinen esimerkki on ilmassa olevat saasteet, jotka lisääntyvät koko ajan.

Voidaan sanoa, että nanoteknologia on uusi nimitys vanhalle, jo pitkään toimineelle pienhiukkastutkimukselle. Nyt ala kehittyy kiihtyvällä vauhdilla ja uusia innovaatioita, kuten nanoputket, fullereenit ja nanonuput, on syntynyt viime vuosikymmeninä useita. Sovellutusten määrä voidaan laskea varmasti sadoissa, jopa tuhansissa.

Nanoteknologia onkin geneerinen tieteenala, jota käytetään muiden tieteenalojen kehittämiseen. Esimerkiksi nanohiukkasen kyvystä kuljettaa mukanaan toista ainetta tulee merkittävä vasta silloin, kun lääketiede käyttää tätä ominaisuutta täsmälääkitykseen syövän hoidossa.

Näiden pienäkin pienempien hiukkasten aiheuttamat riskit on seikka, johon on enenevässä määrin kiinnitettävä huomiota. Miten ne vaikuttavat ihmisten ja eläinten elimistöön tai yhtä hyvin kasveihin? Miten ihmiset, jotka altistuvat niille esim. valmistusprosessin aikana, niihin reagoivat? Eniten nanohiukkasia kulkeutuu ihmiseen hengityksen kautta.

Nanotekniikkaa koskevia lakeja ja direktiivejä ei ole. Euroopan unionin uusi kemikaaliasetus REACH ei edes tunne sanaa nano, eikä kansallisia säännöksiä tiettävästi ole missään. Nyt myös EU:ssa on herätty riskien arviointiin, lähinnä elintarviketeollisuudessa. EU:n elintarvikeviranomaisen, EFSA, laatii parhaillaan arviota nanoteknologian turvallisuudesta elintarvikkeissa.

Nanoteknologian yleistyessä on myös turvallisuuskysymyksiä koskevien vastausten oltava valmiina. Avoimuudella ja läpinäkyvyydellä saavutetaan ihmisten luottamus nanoteknologian hyödyllisyyteen ja turvallisuuteen. Tulevalla lainsäädännöllä on oltava ohjaava mutta ei sitova vaikutus.

Tämän esiselvityksen tarkoituksena on toimia lähtölaukauksena nanotekniikan saloihin, herätellä kansanedustajien kiinnostusta aiheeseen ja antaa haasteita tulevalle työskentelylle sekä mahdollisesti pohjaa uudelle lainsäädännölle.

Marjo Matikainen-Kallström
Arviointihankkeen ohjausryhmän puheenjohtaja

Kiitämme seuraavia asiantuntijoita keskusteluista ja tiedonannoista nanoteknologioiden laajaan aihealueeseen liittyen. Erityiset kiitokset Osmo Kuuselle raportin kieliasun tarkistuksesta.

Prof. Kai Savolainen, Työterveyslaitos
Teknologia-asiantuntija Markku Lämsä, Tekes
Toht. Jukka Ahtiainen, Suomen Ympäristökeskus
Johtava tutkija Pirkko Forssell, VTT
Erikoistutkija, tiiminvetäjä Marja Smolander, VTT
Tutkija Anu Kapanen, VTT

SISÄLLYSLUETTELO

1. TIIVISTELMÄ	1
2. JOHDANTO	2
3. MÄÄRITELMÄ	3
4. MITÄ ON NANOTEKNIikka?	3
5. NANOTUOTTEIDEN SOVELLUSALUEET	4
5.1. NANOMATERIAALIT	4
5.2. ENERGIA	5
5.3. ELEKTRONIikka	6
5.4. NANOBIOOTEKNIikka	6
5.4.1. Nanobiotekniikka lääketieteessä.....	6
5.4.2. Nanobiotekniikka sensoreissa.....	7
5.5. ELINTARVIKESOVELLUKSET	7
5.6. BIOHAJOAVAT PAKKAUKSET.....	8
6. NANOMATERIAALIT JA TURVALLISUUS	8
6.1. ALTISTUMISREITIT	10
6.1.1. Hengitysteiden kautta altistuminen.....	11
6.1.2. Miten ihon kautta altistuminen tapahtuu?.....	12
6.1.3. Suun kautta altistuminen.....	13
6.1.4. KULUTTAJIEN ALTISTUMINEN	13
6.1.5. YMPÄRISTÖN ALTISTUMINEN JA IHMISEN ALTISTUMINEN YMPÄRISTÖN KAUTTA	13
7. LAINSÄÄDÄNTÖ	15
7.1. NANOMATERIAALIT JA REACH.....	15
7.2. <i>IN VITRO</i> TESTIT JA <i>IN VIVO</i> TESTIT?.....	15
7.3. NANOMATERIAALIEN STANDARDISOINTITILANNE.....	16
8. TUTKIMUS, KEHITYS JA KOULUTUS	17
LIITE: NANOTEKNOLOGIOITA KEHITTÄVIÄ TUTKIMUSLAITOKSIA JA YLIOPISTOJA	20
VIITTEET	22

1. TIIVISTELMÄ

Nanotekniikoiksi kutsutaan tekniikoita, joissa hyödynnetään nanomittaisia 0.1 nm-100 nm partikkeleita tavoitteena tuottaa uusia materiaaleja, rakenteita tai laitteistoja. Nanotekniikoilla voidaan tuottaa mm. kestävydeltään, keveydeltään tai sähkönjohtavuudeltaan parempia tuotteita. Nanotekniikka mahdollistaa uusia tuotteita. Se myös tuo uusia ominaisuuksia jo olemassa oleviin tuotteisiin.

Nanotekniikoita hyödynnetään jo lähes kaikilla tärkeimmillä teknologian ja teollisuuden aloilla. Keskeisimpiä sovellusalueita ovat elektroniikka, energiatekniikka ja biotekniikka. Erityisesti lääketieteelliset sovellukset vaikuttavat lupaavilta. Myös elintarvikkeissa ja pakkauksissa hyödynnetään nanoteknologioita.

Nanotekniikan yleisen tarkastelun ohella esiselvityksessä paneudutaan erityisesti nanotekniikan turvallisuuskysymyksiin. Nanomateriaalien lisääntynyt hyödyntäminen viime vuosina on herättänyt viranomaiset, tutkijat ja teollisuuden huomaamaan myös käytön riskit. Uusien teknologioiden kestävä kehittäminen vaatii, että nanomateriaalien ominaisuudet, vaikutukset ja riskit sekä ihmiseen että ympäristöön tunnetaan. Teollisesti tuotetut nanomateriaalit ja erityisesti niiden sisältämät nanopartikkelit ovat riski työntekijöille ja mahdollisesti myös kuluttajille.

On tärkeää löytää vastauksia seuraaviin kysymyksiin: Mitkä ovat altistumlähteet? Vapautuvatko nanohiukkaset ilmaan, veteen tai maaperään nanoteknologian käyttämistä nanomateriaaleista? Miten teollisesti tuotetut nanohiukkaset käyttäytyvät ilmassa, maaperässä ja biologisessa ympäristössä? Miten paljon altistumista esiintyy? Miten riskejä arvioidaan ja miten voidaan haitalliset vaikutukset estää? Kuinka suuret ovat nanoteknologian nanohiukkaspäästöt verrattuna muihin luonnon ja ihmisen toiminnan aiheuttamiin nanohiukkasten päästöihin? Mikä on mahdollisten riskien suuruus suhteessa luonnon ja ihmisen kehittämien muiden prosessien nanohiukkaspäästöjen aiheuttamiin riskeihin? Nämä kysymykset ovat aivan keskeisiä ja niihin ei useimpiin ole vielä vastauksia kuin osittain. Näihin kysymyksiin vastaaminen on kuitenkin edellytys nanoteknologioihin perustuvien tuotteiden turvallisen tuotannon, kuluttamisen ja materiaalien kierrätyksen takaamiseksi.

Yksittäisten nanohiukkasten vapautuminen ilmakehään, vesistöön tai maaperään nanomateriaaleja hyödyntävistä tuotteista on epätodennäköistä. Todennäköisin vapautuminen ja mahdollinen altistuminen tapahtuu teollisessa tuotannossa kohderyhmän ollessa valmistusprosessin työntekijät. Nanohiukkasten vapauduttua ilmakehään on niille altistumisen mittaaminen haasteellista pienen koon johdosta. Toistaiseksi ei ole olemassa pieniä, edullisia jatkuvatoimisia laitteistoja, joilla työntekijöiden henkilökohtaista altistumista voitaisiin mitata. Kehitystyötä tarvitaan laitteistojen kehittämiseen, joilla voidaan karakterisoida erilaisten kemiallisesti toisistaan poikkeavien hiukkasten esiintymistä, hiukkasten kokojakaamaa, muotoa sekä partikkelien määrää.

Nanohiukkasten biologiset vaikutukset ovat monimutkaiset. Myös tutkimusmenetelmiä vaikutusmekanismien tutkimiseen joudutaan kehittämään, koska kemikaalitestauksessa käytettäviä standardoituja testimenetelmiä voidaan vain osittain hyödyntää nanomateriaalien erilaisten ominaisuuksien vuoksi.

2. JOHDANTO

Tämän esiselvityksen tavoitteena on valaista ja muodostaa yleiskäsitys nanoteknologioiden tutkimuksen ja kehitystyön laajasta kentästä. Erityisesti tarkastelussa kiinnitetään huomiota nanotekniikkaan liittyviin turvallisuuskysymyksiin.

Tekesin ja Suomen Akatemian kansallisessa nanoteknologia-tutkimusohjelmassa, FinNano, rahoitetaan nanoteknologioihin liittyviä tutkimushankkeita 70 miljoonalla eurolla vuosina 2005-2010. Pääasialliset fokusalueet ovat nanorakenteiset materiaalit, nanosensorit, nanoelektroniikka ja nanoanturit. Spinverse Consulting Oy:n tekemän selvityksen mukaan jopa 135 suomalaista yritystä osallistuu nanoteknologioiden kehittämiseen.

Monenlaisia nanomateriaaleja on jo kaupallisessa tuotannossa. Niitä käytetään yleisesti komposiitteina, pinnoitteina tai muina komponentteina antamaan tuotteelle parempia ominaisuuksia. Turvallisuuden kannalta ongelmallisena esimerkkinä mainittakoon titaanidioksidi, jota hyödynnetään paljon kosmetiikkateollisuudessa mm. aurinkosuojavoiteissa, itsestään puhdistuvissa ikkunoissa, maaleissa, mutta myös lääkeaineiden ja vitamiinien kapselointiaineena. Titaanidioksidi on valokatalyyttinen ja hajottaa myös orgaanista ainesta.

Yhtenä nanotekniikan keskeisenä kehityskohteena mainittakoon nanosensorit ja nanorakenteiset optiset laitteet. Painettava elektroniikka voi mahdollistaa kertakäyttöiset kuitupohjaiset sensorit. Tällaisia sensoreita voisi hyödyntää mm. ns. älykkäissä pakkauksissa ja pinnoitteissa. Ne voivat tunnistaa mm. pilaantuneen elintarvikkeen, joka voidaan sitten poistaa tuotantoketjusta tai myynnistä. Muita sensorisovelluksia ovat mm. seinämateriaalien pinnoitteissa kosteuden tunnistaminen kosteusvaurioiden tunnistamiseksi, pakkausten tunnistaminen ja laadun valvonta. Sovellusalueeseen liittyy erilaisten suojaavien ja kaasuja läpäisevien tai läpäisemättömien kalvojen kehittäminen. Nanokuituinen selluloosa tai tärkkelys voi antaa tuotteelle lisäominaisuuksia kuten paremman kestävyuden, estää erilaisia kaasuja läpäisemästä tuotetta. Se soveltuu myös tuotteen värin säätelyyn.

Nanoteknologia elektroniikassa mahdollistaa yhä pienempien elektronisten laitteiden kehittämisen. Lääketieteeseen sovellettuna potilaan tilaa voidaan jatkuvasti seurata tällaisilla laitteilla. Potilaat voivat tehdä itse biosiruilla diagnostisia testejä tai saada välittömästi ammattilaisten tekemien testien tulokset.

Nanotekniikoiden turvallinen käyttö edellyttää, että niiden vaikutuksia arvioidaan ihmisiin ja ympäristöön. Nanomateriaalien erikokoiset hiukkaset voivat tuottaa positiivisten vaikutusten ohella myös negatiivisia. On varauduttava siihen, että ne voivat aiheuttaa ennalta arvaamattomia reaktioita ihmisen kehossa.

Tämän vuoksi turvallisuuskäsitteet tulee ottaa erityisesti huomioon. Tässä esiselvityksessä korostetaan erityisesti turvallisuuteen liittyvää kehitystyötä ja sen asettamia haasteita menetelmien standardoinnille. Voidaan ennakoita, että nanomateriaalien tuotannolle ja materiaalien kierrätykselle tullaan asettamaan lainsäädännöllisiä velvoitteita ja standardeja. Niiden avulla saadaan laaja-alainen julkinen hyväksyntä näille tuotteille ja poistetaan uhkakuvia ja pelkoja, jotka nyt liittyvät nanotuotteiden käyttöön.

3. MÄÄRITELMÄ

Monet tahot ovat esittäneet määritelmiä nanoteknologialle. Virallista määritelmää ei vielä ole. Oheinen määritelmä on yhdistelmä useista määritelmistä, joka on esitetty OECD:ssä.

Nanoteknologia hyödyntää hallituissa olosuhteissa tuotettuja alle 100 nm materiaalien rakenneosia (kiteet, hiukkaset, proteiinit jne.), jotka antavat **kullekin materiaalille tyypillisen** tuon kokoiselle ja **geometriselle rakenteelle** ominaisen **fysikaalisen, kemiallisen tai biologisen ominaisuuden**.

4. MITÄ ON NANOTEKNIikka?

Nanometri on mittayksiköinä metrin miljardiosa, siis millimetrin miljoonasosa, ja mikrometrin tuhannesosa. Ihmisen hiuksen paksuus on noin 100 mikrometriä, eli noin 100 000 nanometriä. Ihminen tuntee sormillaan kiinteän aineen osasia esim. jauheita joiden koko on luokkaa 10 mikronia, siis 10 000 nanometriä.

Keskeisiä nanotekniikoiden sovellusalueita ovat elektroniikka, energia ja biotekniikka. Biologisten elementtien yhdistäminen nanomateriaaleihin on luonut oman tieteen haaransa, nanobiotekniikan. Myös muita materiaalitekniikan alueita on, jotka liittyvät erilaisiin muihin materiaalitekniikoihin ja materiaalisovelluksiin.

Nanotekniikan sovellusalueet voidaan jakaa seuraaviin pääkehitysalueisiin:

- a) elektroniikka, optoelektroniikka
- b) energia
- c) biotekniikka
- d) muut materiaalitekniikat

Nanotekniikoiksi kutsutaan pääasiassa tekniikoita, jotka hyödyntävät kooltaan nanometrillä aina 100 nanometrillä kokoisia aineen rakenneosia, joita ovat mm. aineen atomien tai molekyylien järjestyneet osat eli kiteet tai hiukkaset. Pyrkimyksenä on saada materiaalille uusia toimintoja sekä parantaa aineen ominaisuuksia sen teollisia sovelluksia varten. Kyseisiä ominaisuuksia ovat mm. lujuus, keveys, lämmön ja sähköjohtavuus, taipuvuus, kemiallinen reaktiivisuus, pinnan liukkaus jne.

Nanotekniikka ei ole vain yksi tekniikan alue vaan se tarkoittaa laajaa, useiden eri teknologioiden aluetta. Näitä yhdistää se, että tuotteiden ominaisuudet perustuvat pienten nanomittakaavan rakenneosien antamiin erityisiin ominaisuuksiin, jotka ovat erilaisia kuin aineen yli 100 nanometrillä rakenteosien aikaansaamat ominaisuudet. Perinteiset materiaalit koostuvat aineen rakenneosista, jotka ovat suurempia kuin 1 mikrometri. Esimerkiksi teräksen rakenneosien, kiteiden, koko on kymmeniä mikrometrejä.

Varhaisimmat huomiot nanohiukkasten aikaansaamasta uusista ominaisuuksista lienevät 1960-luvulta, jolloin muun muassa kuuluisa fyysikko Ryogo Kubo osoitti metallipartikkelien saavan erityisiä sähköisiä ominaisuuksia nanomittakaavassa (Kubo, 1962). Tämän jälkeen 1970 pystyttiin ensimmäistä kertaa kuvaamaan kiteisen aineen atomit läpivalaisuelektronimikroskoopilla. 1980-luvulla kehitettiin tunnelointi- ja atomivoimamikroskoopit, joiden erotuskyky tutkia aineiden pintoja oli atomitasolla

(Binning et al., 1986). Varsinaisen sysäyksen nanoteknologioiden kehitykseen antoivat fullereenien (Kroto et al., 1985) ja nanohiiliputkien keksiminen (Iijima, 1991).

5. NANOTUOTTEIDEN SOVELLUSALUEET

Nanoteknologioissa nähdään tulevaisuudessa suuria kehitysnäkymiä erityisesti energian siirtotekniikoiden, energian varastoinnin, elektroniikan ja ICT:n alueilla. Myös materiaalitieteiden, ja biotekniikan alueet ovat keskeisiä kehitysalueita. Ympäristösovelluksista on mainittu ympäristövaurioiden korjaaminen ja erityisesti pilaantuneiden vesien puhdistusteknologiat.

5.1. Nanomateriaalit

Nanomateriaalit voivat olla koostumukseltaan epäorgaanisia tai orgaanisia materiaaleja. Nanokokoluokan rakenneosilla saadaan materiaaleihin uusia ominaisuuksia, materiaalit voivat olla myös useiden materiaalien seoksia eli komposiitteja. Nanopartikkelit ovat mikroskooppisen pieniä ja ne voivat olla kemiallisilta ja fysikaalisilta ominaisuuksiltaan hyvin erilaisia riippuen materiaalista. Myös samasta materiaalista peräisin olevat nanopartikkelit voivat olla ominaisuuksiltaan erilaiset riippuen partikkelin koosta, pinta-alasta ja niiden muodosta. Esimerkkinä mainittakoon maaleissa käytettävä titaanidioksidi, joka on värittään valkoinen, kun hiukkasten koko on 300 nanometriä. Aurinkosuojavoiteissa käytettävä ns. nanotitaanidioksidi on väritöntä, koska sen hiukkaskoko on noin 50 nanometriä, eli pienempi kuin näkyvän valon aallonpituus.

Myös nanomateriaalien käyttäytyminen biologisessa ympäristössä vaihtelee riippuen nanomateriaalista ja sen muodostavien partikkelien koosta ja muodosta. Nanopartikkeleita voi olla myös seoksena materiaaleissa, joiden partikkelikoko muutoin on huomattavasti suurempi. Miksi hiukkaskoko saa aikaan fysikaalisesti ja kemiallisesti erilaisia ominaisuuksia, on vielä epäselvää.

Ohessa on esitetty OECD:n nanotyöryhmän keräämä lista kaupallisista nanomateriaaleista, jotka ovat yleisesti käytössä.

- Fullereenit (C60)
- Yksiseinäiset hiilinanoputket
- Moniseinäiset hiilinanoputket
- Hopean nanopartikkelit
- Rauta- ja rautaoksidin nanopartikkelit
- Hiilimusta
- Titaanidioksidi
- Alumiinioksidi
- Sinkkioksidi
- Piidioksidi
- Polystyreeni

- Dendrimeerit
- Nanosavi

Tavalliset materiaalit kuten hiili ja pii saavat nanorakenteina aivan uusia ominaisuuksia kuten erityisiä kestävyysominaisuuksia, kemiallista reaktiivisuutta, sähkönjohtavuutta ja muita ominaisuuksia, joita ei samoilla materiaaleilla ole mikro- ja makromittakaavassa (Aitken ym., 2004). Markkinoilla mainitaan olevan jo yli 300 tuotetta, jotka sisältävät nanomateriaaleja (Maynard ym., 2006). Kaupallisia sovellusalueita löytyy elektroniikasta, optoelektronikasta, biolääketieteessä, kosmetiikassa, energiassa, katalyytti- ja materiaalisovelluksissa. Eräs teollisia sovellusalueita on lämpöön perustuva pinnoitus. Pinnoitemateriaali, tavallisesti metalli höyrystetään kaasuliekillä ja saatetaan ohueksi pinnoitteeksi korroosiokestävyyden lisäämiseksi. Joissakin muissa prosesseissa nanopartikkelit voivat muodostua prosessin ei-toivottuna sivutuotteena, kuten esim. dieselmoottoreiden käytöstä muodostuvat hiukkaset (Aitken ym., 2004).

5.2. Energia

Nanoteknologioita ja uusia nanomateriaaleja kehitetään aktiivisesti energiasovelluksiin, joita ovat mm. **aurinkokennot, akut, paristot ja superkapasitaattorit energian varastointiin, vedyn varastointijärjestelmät, pienet polttokennot, hiilidioksidin talteenotto- ja varastointimenetelmät ja paremmat lämmöneristysmateriaalit.**

Moniseinäisiä hiilen nanoputkia on kehitetty 1980-luvun lopulta lähtien litiumioniparistoihin, jotka ovat jo kaupallisessa tuotannossa. Matkapuhelimet, kannettavat tietokoneet, kamerat ja musiikkisoihtimet tarvitsevat tehokkaita energian varastointitekniikoita, myös lupaavat uudet aurinkokennoratkaisut perustuvat niin ikään nanomateriaalien hyödyntämiseen.

Titaanidioksidin nanohiukkasiin perustuva aurinkokenno voi olla tuotantokustannuksiltaan riittävän halpa mahdollistamaan aurinkoenergian laajamuotoisen käytön. Myös hiilen nanoputkia käytetään parantamaan muihin nanomateriaaleihin perustuvia kennoratkaisuja, ja fullereeni-nanoputkiyhdistelmä on lupaava materiaali halpaan, taipuisaan muoviaurinkokennoon.

Polttokennoissa käytetään metallinanohiukkasia katalyytteinä, ja hiilen nanomateriaaleja (hiilimusta, grafiitti ja nanoputket) katalyyttihiukkasten kantajina ja varauksen kuljettajina. Erittäin nopeasti energiaa varastoivia ja luovuttavia ns. superkapasitaattoreita kehitetään akun rinnalle ja myös sen korvaajaksi tulevaisuuden autokonsepteissa, joissa energia tuotetaan polttokennoilla ja varastoidaan kapasitaattoriin. Japanissa kaikilla merkittävillä auton valmistajilla on laajat kehityshankkeet tällä alueella. **Hiilen nanoputket ovat lupaavin materiaali tehokkaan superkapasitaattorin kehityksessä.** Vedyn tuotto auringon valolla vedestä sekä tuotetun vedyn varastointi hyödyntää niin ikään titaanidioksidin nanohiukkasia ja nanokokoluokan metallihydridimateriaaleja.

5.3. Elektroniikka

Nanomateriaalien tutkimus ja kehitys on volyymiltaan laajin ja tieteelliseltä tasoltaan korkein nimenomaan elektroniikassa, koska moderni integroitu elektroniikka pitkälti perustuu materiaalien hallittuun tuottoon haluttuihin rakenteisiin ja koostumuksiin. Mm. tietokoneen emolevy, suoritin ja muistipiiri kaikki sisältävät useita rakenteeltaan ja ulkomuodoltaan erittäin täsmällisesti hallittuja nanokokoluokan kerrosrakenteita (mikropiirejä) ja nanomateriaaleja, joiden kerrosten leveys on alle 100 nanometriä ja paksuus ohuimmillaan luokkaa yksi nanometri. Tietokoneiden tehon jatkuva kasvu perustuu nimenomaan mikropiirien rakenteen jatkuvaan pienentämiseen. Nyt olemme kuitenkin tulleet tilanteeseen, jossa emme enää voi paljon pienentää tällä käytetyistä materiaaleista tehtyjen mikropiirien rakenteita ilman että piirin toiminta vaikeutuu. Tämän vuoksi on etsittävä uusia materiaaleja tulevaisuuden entistä tehokkaampien mikropiirien rakentamiseksi. Hiilen nanomateriaalit, erityisesti **hiilen nanoputket**, ovat lupaavin uusi materiaali niin **muisti- kuin suoritinpiirien materiaaliksi**.

Suomessa Teknillisessä Korkeakoulussa (TKK:ssa) keksitty **hiilen nanonuppu** voi olla vielä hiilen nanoputkea parempi materiaali tulevaisuuden elektroniikan sovelluksiin. Nanonuppu yhdistää hiilen nanoputken ja fullereenin, eli pallohiilen yhdistelmä-rakenteeksi (Nasibulin ym., 2007).

5.4. Nanobiotekniikka

Biologiset prosessit voidaan selittää eri molekyylien vuorovaikutuksena. Nanotekniikan kannalta on kiinnostavaa, että monet näistä keskeisistä molekyyleistä (kuten proteiinit ja DNA) ovat kooltaan nanometrinen luokkaa. Voidaan siis sanoa, että vuorovaikutukset nanokokoisten rakenneosien välillä ovat keskeisiä biologiassa. Tämä tarjoaa uusia mahdollisuuksia nanomateriaalien (kuten hiilen nanoputkien tai metallisten nanopartikkelien) käyttöön biologiassa ja myös biologisten komponenttien käyttöön nanoteknologiassa. Keskeinen ajatus **nanobiotekniikassa** on, että **biologisia ja ei-biologisia nanomittaisia rakennekomponentteja voidaan kytkeä toiminnallisesti toisiinsa**. Biologinen elementti voi olla esimerkiksi entsyymi (proteiini), joka voidaan kytkeä nanopartikkelin optiseen tai sähköiseen ominaisuuteen. Näin voidaan suoraan havaita biologisia tapahtumia sähköisinä tai optisina signaaleina, tai vastaavasti ohjata biologisia toimintoja sähköisesti tai optisesti. Toinen lähestymistapa on käyttää biomolekyylien ominaisuuksia tunnistamaan täsmällisesti muita molekyyliä erilaisten nanomateriaalien yhdistelmien aikaansaamiseksi. Voidaan esimerkiksi käyttää biomolekyyliä hiilen nanoputkien yhdistämiseen toiseen nanomateriaaliin (Niemeyer ja Mirlkin, 2004).

5.4.1. Nanobiotekniikka lääketieteessä

Nanotekniikka avaa myös uusia mahdollisuuksia lääketieteessä. Esimerkkinä voidaan mainita uudet mahdollisuudet lääkkeiden annostelussa ja syövän hoidossa (Kreuter ym. 2002). Uusia terapiamuotoja avautuu, kun voidaan käyttää nanomateriaalien ominaisuuksia uudella tavalla. Esimerkiksi tietyt metalliset nanopartikkelit ja hiilen nanoputket lämpenevät, kun ne absorboivat valoa sellaisissa aallonpituuksissa, joissa

ei ole vaikutusta biologiseen materiaaliin kuten kudokseen. Syöpäkudosta voidaan tuhota ohjaamalla tällaisia nanopartikkeleita ja -putkia siihen ja sitten lämmittämällä säteilyn avulla. Nanopartikkeleiden ja -putkien ohjaus syöpäkudokseen tapahtuu joko niiden pintaominaisuuksien avulla tai kiinnittämällä syöpäsoluja tunnistavia vasta-aineita nanopartikkeleihin. Vastaavasti voidaan käyttää nanopartikkeleita ja -putkia kuvantamiseen, esimerkiksi syövän paikantamisessa (Oberdörster ym., 2005).

5.4.2. Nanobiotekniikka sensoreissa

Sensorilla tarkoitetaan anturia, jolla voidaan tunnistaa tiettyjä yhdisteitä ja jolla saadaan tietoa tunnistettavien yhdisteiden pitoisuudesta. Vaikka nykyisillä tekniikoilla kyetään laboratorioissa analysoimaan hyvin tarkasti erilaisia yhdisteitä, niin nopeille, pienikokoisille, kertakäyttöisille sensoreille olisi paljon sovelluksia. Käyttökohteita löytyy esimerkiksi terveydentilan seurannassa, ympäristöanalytiikassa, lainvalvonnassa jne. Toisaalta myös tutkimustyössä ja keskuslaboratorioissa on tarve hyvin isojen näytesarjojen analysoimiseen. Nanotekniikka tarjoaa useita mahdollisuuksia täysin uusien sensoritekniikkojen kehittämiseen (Niemeyer ja Mirkin, 2004).

5.5. Elintarvikesovellukset

Elintarvike- ja pakkaussektoreille kehitettävät nanoteknologioihin perustuvat sovellukset suuntautuvat laadun valvontaan sekä suojaamaan tuotteen ominaisuuksia ja laatua (Chau ym., 2007).

Terveyttä edistävien elintarvikkeiden kehittämisessä bioaktiivisilla yhdisteillä on merkittävä rooli. Bioaktiiviset aineet kuten antioksidantit, monitydyttämättömät rasvahapot ja peptidit ovat sangen reaktiivisia ja epästabiileja, minkä vuoksi ne täytyy suojata elintarvikkeiden muilta komponenteilta ja ympäristön vaikutuksilta, jotta ne eivät muuttuisi tai hajoaisi. Tähän tarkoitukseen on kehitetty erilaisia **kapselointimateriaaleja ja -tekniikoita**. Kapseloinnissa käytettyjen aineiden imeytymisen edistämiseksi käytetään nanokokoisia partikkeleita, jolloin niiden imeytyminen on nopeampaa ja tehokkaampaa (Sanguansri ja Augustin, 2006).

Rasvaliukoiset aineet liukenevat huonosti veteen, mutta jos ne hajotetaan pieniksi hiukkasiksi, joiden koko on keskimäärin 5-100 nm, ne sekoittuvat vesiliuokseen (Weiss et al., 2006). Näin muodostetuissa nanoemulsioissa on kaksi toisiinsa liukenematonta osaa. Nanoemulsiot voivat olla kirkkaita ja läpikuultavia, vaikka liuos sisältäisi 30 % rasvoja (Anonyymi, 2005). Nanoemulsioiden valmistuksessa teollisessa tuotannossa käytetään suurpainehomogenisaattoreita ja mikrofluidisaattoreita, joilla saadaan tyypillisesti 100-500 nm pisarakokoisia emulsioita. (Weiss ym., 2006).

Myös elintarvikkeiden suurista molekyyleistä, kuten proteiineista ja polysakkarideista voidaan muodostaa nanokokoisia hiukkasia. Maidon proteiinista kaseiinista voidaan tuottaa kaseiinihiukkasia, joiden on todettu suojaavan D-vitamiinia UV-säteilyltä (Semo ym., 2007).

Elintarvikkeiden päällysteenä voidaan käyttää myös ns. **'syötäviä kalvoja'**, jotka koostuvat useimmiten proteiineista, rasvoista tai hiilihydraateista. Näitä kalvoja

käytetään eristämään tuote ja estämään kosteuden, rasvan tai happitilan muutokset tuotteessa (Forssell ym., 2007).

5.6. Biohajoavat pakkaukset

Biohajoavien materiaalien kehitystyö käynnistyi 1990-luvulla. Sen tavoitteena oli kehittää perinteisiä muoveja korvaavia materiaaleja, mikä osoittautui vaikeaksi haasteeksi (Itävaara ja Karjomaa, 1998). Toistaiseksi kaupallisia tuotteita tällä sektorilla on vielä sängen vähän. Ensimmäisiä markkinoille tulleita sovellusalueita ovat olleet kompostoitavat pussit, joita käytetään biojätteiden erilliskeräämiseen (Itävaara ja Vikman, 1996). Syynä tähän hitaaseen kehitykseen on ollut, että useimmat biopolymeerit hajoavat liian nopeasti, eivätkä täytä tuotteelle asetettuja kestävyys- ja/tai kosteudensietovaatimuksia. Kauppakassina käytettävän muovikassin kestävyysvaatimukset ovat moninkertaiset verrattuna kompostipussiin.

Nanomateriaaleilla oletetaan saavutettavan biomateriaalien kestävyden lisääntymistä, jolloin myös voitaneen vähentää perinteisten täyteaineiden määrää. Nanokomposiittirakenteiden odotetaan tuovan myös biohajoaviin materiaaleihin parempia ominaisuuksia. Eräänä sovellusalueena on myös nanopartikkelien koosta riippuvainen valonsironta. On myös mahdollista tuottaa uusia väriainekeskuksia.

6. NANOMATERIAALIT JA TURVALLISUUS

Nanomateriaalien turvallisuuskysymykset ovat viime aikoina nousseet erityisen keskustelun kohteeksi. Teollisesti tuotettujen nanomateriaalien riskeistä ei vielä toistaiseksi ole riittävästi tietoa. Nanomateriaalien kestävä tuotannon turvaamiseksi on kuitenkin ensiarvoisen tärkeää, että ihmisen mutta myös ympäristön altistumista arvioidaan ja riskinarviointimenetelmiä kehitetään (Tsuji ym., 2006).

Hyvässä muistissa on vielä mm. asbestista aiheutuneet terveyshaitat, jotka vasta vuosien päästä ilmenivät lisääntyneenä syöpäriskinä. Haitallisuus liittyy erityisesti kuitujen pituuteen, leveyteen, kemiaan sekä siihen, että ne eivät poistu elimistöstä.

Myös pienhiukkasten aiheuttamista terveysriskeistä on viime vuosina saatu paljon tietoa ja ilmatilassa esiintyvien suurten hiukkaspitoisuuksien tiedetään aiheuttavan lisääntynyttä riskiä sairastua keuhkosityöpään. Kuitumaisten nanomittaisten partikkelien riskejä tulisi erityisen huolellisesti tutkia seuraavien vuosien aikana (Maynard ym., 2006).

Onko nanomateriaalien pienhiukkasilla vastaavia terveysriskejä kuin asbestilla tai muilla pienhiukkasilla? Miten altistumista pitäisi tutkia? Millaisia vaikutuksia eri materiaaleilla voi olla, vai onko lainkaan vaikutusta? Näihin useisiin viimeaikoina esitettyihin kysymyksiin ei ole vielä vastauksia.

Nanomateriaalien erityiset ominaisuudet kuten molekyyli-tason mekaaniset, optiset, sähköiset ja magneettiset ominaisuudet asettavat myös erityisen haasteen ymmärtää, arvioida ja hallita potentiaaliset haitalliset vaikutukset ihmisen terveyteen (Hood, 2004). Materiaalien uusien ominaisuuksien vuoksi ne voivat olla nanokokoisina voimakkaita hapettimia tai muulla tavoin reaktiivisia biologisessa ympäristössä verrattuna saman materiaalin suurempikokoisiin partikkeleihin. Näiden ominaisuuksien tunnistaminen varhaisessa vaiheessa on myös tärkeää riskejä arvioitaessa ja poistettaessa.

Viimeaikaiset tutkimukset kuitenkin viittaavat siihen, että kaupallisesti tuotettujen nanomateriaalien vaikutukset soluviljelmiin ja eläimiin liittyvät läheisesti seuraaviin ominaisuuksiin: **hiukkasen koko, pinta-ala, pintakemia, liukoisuus** ja todennäköisesti myös **muoto** vaikuttavat siihen, onko niillä haitallisia ominaisuuksia. Myös **sama materiaali erikokoisina hiukkasina voi olla vaikutuksiltaan täysin erilainen** (Oberdörster ym., 2005). Kyse on myös annosmäärästä, joka on aivan olennainen osa vaikutuksia arvioitaessa.

Yleistyksiä toksisuudesta tai riskittömyydestä ei voida kuitenkaan tehdä samankokoisille hiukkasille, koska materiaalien kemiallinen rakenne ja ominaisuudet ovat erilaiset.

Nykyisessä kemikaalilainsäädännössä käytetyt testimenetelmät perustuvat suurelta osin siihen, että kemikaali voidaan saattaa liukoiseen muotoon tai se on vesiliukoinen. Nanopartikkelit ovat fysikaalisilta ominaisuuksiltaan kiinteitä partikkeleita, joiden kemialliset ominaisuudet johtuvat niiden pinta-kemiasta, -alasta ja muodosta sekä koosta. Lisäksi niiden kulkeutuminen soluihin tapahtuu eri mekanismeilla kuin vesi- ja rasvaliukoisten yhdisteiden, jotka voivat kulkeutua soluun juuri kyseisten ominaisuuksiensa vuoksi.

Nanomateriaaleilla tehdyt terveystutkimukset perustuvat pitkälti eläinkokeisiin, joissa eläimen, esimerkiksi rotan, hengitystiet altistetaan nanopartikkeleille. Nanopartikkelien on todettu aiheuttavan tulehdustilan keuhkoissa sekä kudosaaurioita ja keuhkosityöpää (Howard, 2006). Titaanidioksidilla (TiO_2) ja kvartsilla tehdyt kokeet ovat osoittaneet partikkelikoon monimutkaisten mekanismien vaikutukset keuhkotoksisuuteen. Yleensä myrkyllisyys kasvaa hiukaskoon pienentyessä (Tsuji ym., 2006).

Kaikkien materiaalien vaikutukset ovat erilaiset, jopa saman materiaalin erikokoiset hiukkaset voivat olla toiminnallisesti erilaisia biologisessa ympäristössä. Nanohiukkasten erilaisten ominaisuuksien vuoksi myös niiden mekanismit ja reaktiivisuus voivat vaihdella, mikä tekee turvallisuustestaukset hyvin haastaviksi. Rotilla tehdyissä tutkimuksissa on myös saatu alustavasti viitteitä siitä, että nanohiukkaset voivat kulkeutua solukalvojen läpi ja siirtyä elimistöön eri elimiin kuten sydämeen, maksaan ja aivoihin. Nanomateriaalien tunkeutuminen keuhkoepiteelisolujen läpi mahdollistaa niiden pääsyn verenkiertoon ja siirtymisen sydämeen, maksaan sekä kaikkiin muihinkin elimiin (Kreyling ja Semmler-Behnke, 2007).

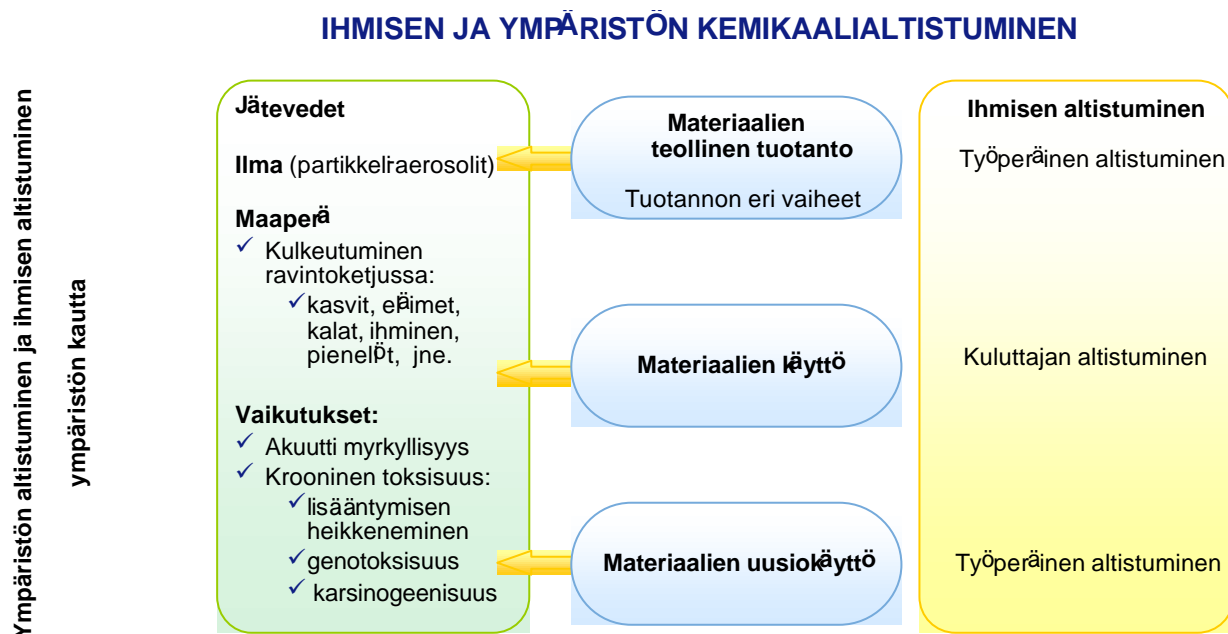
Nanoelintarvikkeille ei ole olemassa lainsäädäntöä, eikä tuotteissa tarvitse käyttää mitään erityisiä merkintöjä. EU:ssa suunnitellaan kuitenkin säädöksiä, miten nanoteknologioita tulisi soveltaa elintarvikkeissa. Nanohiukkaset voivat läpäistä soluja

ja kulkeutua soluseinien läpi ja lopulta verenkierron mukana eri elimiin kuten muunkin tyyppiset nanopartikkelit (Chau et al., 2007).

6.1. Altistumisreitit

Miten ja missä ihmisten altistuminen nanomateriaaleille sitten tapahtuu? Mitkä ovat ne **pitoisuudet** kullekin materiaalille, jotka saavat aikaan haitallisen fysiologisen vaikutuksen, joka voi johtaa sairastumiseen?

Altistumlähteiden selvittäminen, sekä altistumisen voimakkuuden (hiukkaspitoisuuden) eli annosvasteen selvittäminen ovat keskeisiä tekijöitä.



Kuva 1. Ihmisen ja ympäristön altistumisreitit materiaalien tuotannossa

Koska kyseessä on niinkin pienet hiukkaset kuin joidenkin satojen tai alle sadan nanometrin hiukkaskokoisten partikkelien määrittäminen ilmatilasta, on todettu että luotettavien analysaattoreiden puute rajoittaa altistumisen arviointia. Erilaisia tutkimusmenetelmiä ja laitteistoja on saatavilla, mutta tarvitaan vielä lisää laitekehitystä jatkuvatoimisten, hinnaltaan edullisten ja henkilökohtaista altistumista mittaavien analysaattorien kehittämiseksi.

Suurin altistumisriski on yleensä arvioitu tapahtuvan työympäristössä. Toistaiseksi ei ole olemassa kansainvälisesti hyväksyttyä menetelmäohjetta altistumisen mittaamiseksi. Kansainvälinen Standardisointikomitea (ISO) on kehittämässä menetelmäohjetta nanopartikkeleille altistumisen mittaamiseksi työympäristössä.

Ihmisen altistuminen nanomateriaaleille ja kemikaaleille voi tapahtua usealla eri tavalla. Pääasiallinen altistuminen tapahtuu **hengitysteiden**, mutta myös **ihon** ja **suun** kautta (Schneider ym., 2007).

Miten altistumista tulisi mitata? Mitä altistumisesta seuraa? Tunkeutuuko materiaali syvemmälle kudokseen? Kulkeutuvatko nanopartikkelit elimistössä ja mitkä ovat kulkeutumismekanismit ja reitit? **Millaisia vuorovaikutuksia nanomateriaalilla ja biologisella ympäristöllä on?** Tapahtuuko nanomateriaalien kertymistä elimistöön ja mitkä ovat pitkäaikaisvaikutukset?

Ihminen voi altistua nanomateriaaleille teollisuudessa useissa tuotannon eri vaiheissa, aina raaka-aineiden käsittelystä valmistusprosessin eri vaiheisiin. Erityisen suuri riski on todettu liittyvän nestemäisiin nanomateriaaleihin, kun ne joutuvat yhteyteen ihon kanssa tai kaasumaiseen muotoon höyrystyvien nanohiukkasten pääsyyn työskentelytiloihin. Altistumista voi myös tapahtua prosessilaitteistojen puhdistamisen yhteydessä tai jätteiden käsittelyn yhteydessä. Toistaiseksi ei ole vielä virallisia ohjeistuksia suojavaatetuksesta, jota tulisi käyttää nanomateriaaleille ihoaltistuksen estämiseksi (Howard, 2006).

Materiaalien kierrätyksessä eli uusiokäytössä altistumista voi myös tapahtua. Myös kuluttaja voi altistua nanomateriaaleille käytön aikana. Tarkkaa tietoa ei ole kuitenkaan saatavilla, miten paljon altistumista tapahtuu, ja OECD on keräämässä tietoa ihmisten altistumistavoista ja reiteistä. Tärkeää on myös selvittää altistumisannostus.

On kuitenkin huomattava, että monet luonnon prosessit (mm. metsäpalot, tulivuorenpurkaukset) sekä monet ihmisen kehittämät tekniikat ja prosessit (jotka eivät tuota ja hyödynnä nanomateriaaleja), kuten autot, lentokoneet, voimalaitokset, metallien rikastamot, öljyjalostamot jne. tuottavat erittäin suuria määriä nanohiukkasia, joita vapautuu päästöinä ilmakehään, vesistöihin ja maaperään. Kun arvioidaan teollisesti tuotettujen nanomateriaalien mahdollisia terveys- ja muita haittoja, on ne suhteutettava luonnon ja ihmisen kehittämien muiden tekniikoiden ja prosessien nanohiukkaspäästöjen vastaaviin haittoihin.

6.1.1. Hengitysteiden kautta altistuminen

Työperäinen altistuminen tapahtuu pääasiassa ilman kautta leviävien nanopartikkelien kautta ja tämän vuoksi hengitysteiden kautta altistumista on tutkittu enemmän kuin muita altistumistapoja (Oberdörster ym., 2005). Hengitettyjen partikkelien toksisuuden on todettu joillakin materiaaleilla lisääntyvän hiukkaskoon pienentyessä (Tsuji ym., 2006).

Miten sitten nanohiukkaset käyttäytyvät ilmatilassa? Altistumisen vaikutus liittyy myös suoraan nanomateriaalien kemiallisiin ja fysikaalisiin ominaisuuksiin ja tapahtuviin muutoksiin niiden vapauduttua ilmatilaan. Hiilinanoputkilla tehdyissä kokeissa niiden todettiin pyrkivän takertumaan toisiinsa, jolloin ne muodostivat suurempia hiukkasia, eivätkä levinneet ilmatilassa (Maynard ym., 2004). Jos sen sijaan fysikokemiallisilta ominaisuuksiltaan n. 100 nm kokoiset hiilinanopartikkelit joutuisivat hengitysteihin (suuri pinta-ala, suuri pinta-aktiivisuus, epätavallinen muoto, pieni koko) ne olisivat sangen haitallisia. Eri materiaaleista peräisin olevat nanohiukkaset käyttäytyvät eri tavoin. Altistumista arvioitaessa on äärimmäisen tärkeää huomioida myös nanohiukkasten käyttäytyminen niiden vapauduttua.

Altistumisen arviointi on perustunut perinteisesti ilmaan levinneiden hiukkasten massan ja kemiallisten ominaisuuksien määrittämiseen. Näiden suureiden määrittäminen on todettu riittämättömäksi ja lisää mitattavia ominaisuuksia tarvitaan, kuten hiukkasmäärän ja -kokojakauman analysointi (Brouwer ym., 2004). Kokojakauman määrittäminen antaisi tietoa myös tietyistä lähteistä olevien hiukkasten erottamiseen taustan hiukkasista (Kuhlbusch ym., 2004).

Titaanidioksidi ja hiilinanoputket ovat olleet tutkituimpia nanomateriaaleja.

Nanomateriaalien kulkeutuminen elimistössä luo lääketieteen puolella uusia innovaatioita, toisaalta on otettava huomioon mahdolliset haitalliset vaikutukset. Hiilinanoputkien on todettu rottakokeissa kulkeutuvan keuhkoista sydämeen, sekä muihin sisäelimiin kuten maksaan ja aivoihin (Howard, 2006). Toksikologisessa tutkimuksessa ja riskinarvioinnissa annosvaste on tärkeä mittari eli millä pitoisuudella saadaan haitallinen vaikutus aikaan. **Annostus nostetaan testeissä aina myös sellaiselle tasolle, jossa saadaan haitallinen vaikutus.** Tämän vuoksi onkin tärkeää tutkia, millä pitoisuudella saadaan biologisia vaikutuksia testieläimissä. Uudet tutkimusmenetelmät, kuten 'toksikogenomiikka' mahdollistavat molekyyllitasolla vaikutusten selvittämisen. 'Toksikogenomiikka' perustuu geeni- ja proteiinitasolla tapahtuvien muutosten tunnistamiseen ennen kuin laajempia tunnistettavia rakenteellisia muutoksia ja vaikutuksia on todettu.

Millaisille pitoisuuksille todellisessa elämässä ihmiset ja ympäristö altistuvat?

Tapahtuuko biokertymistä, jolloin vaikutukset tapahtuvat vasta pitkän toistuvan altistuksen seurauksena? Tapahtuuko biomuuntumista, jolloin materiaalin vaikutukset ja ominaisuudet voivat muuttua täysin erilaisiksi biologisten mekanismien vaikutuksesta? Leviävätkö nanopartikkelit elimistössä ja ympäristössä ja erittyvätkö ne elimistöstä pois?

6.1.2. Miten ihon kautta altistuminen tapahtuu?

Ihon kautta altistuminen voi tapahtua tahattomasti tai tietoisena valintana. Tahattomasti altistuminen tapahtuu pääasiassa teollisen tuotannon eri vaiheissa suorana ihokosketuksena nanomateriaalien kanssa. **Suurin osa ihon kautta altistumisesta tapahtuu kuitenkin erilaisten iholle levitettävien voiteiden välityksellä.** Titaanidioksidi (TiO_2) ja sinkkioksidi (ZnO) ovat yleisimpiä nanomateriaaleja, joita käytetään yleisesti ihovoiteissa kuten auringonsuojavoiteissa estämään UV valon tunkeutumista ihoon.

Nanomateriaalien tunkeutumisesta ihon läpi on vielä hyvin vähän tietoa. Huolenaiheina on ihon läpi tunkeutumisen lisäksi se, aiheutuuko näiden aineiden pitkäaikaisesta käytöstä myrkyllisiä vaikutuksia? Tunkeutuvatko pienet nanohiukkaset ihosta syvemmälle kudoksiin ja kulkeutuvatko kehossa eteenpäin?

Titaanidioksidi voi esiintyä kiteisyydeltään erilaisissa muodoissa (anataasi, rutile, amorfinen). Anataasi-titaanidioksidi on puolijohde ja se absorboi UV-alueella valon säteitä, mutta toisaalta voi muodostaa haitallisia superoksidi- ja hydroksyyli-radikaaleja, jotka ovat bakteereja tappavia ja geenivirheitä aiheuttavia (Maness ym., 1999; Nakagawa ym., 1997). Anataasi-titaanidioksidi-partikkelin pinnoittaminen pii-, alumiini- ja zirkoniumoksideilla poistaa reaktiivisista happiradikaaleista aiheutuvat ongelmat UV-säteilyn yhteydessä (Mills and Le Hunte,

1997). Teollisessa tuotannossa käytettävän pinnoituksen tulisi estää titaanidioksidin reaktiivisuus, mutta eräiden viimeaikaisten tutkimusten mukaan eräitä kaupallisia aurinkosuoja-voiteita säteilytettäessä saatiin muodostumaan reaktiivisia happiradikaaleja (Brezova ym. 2005). Näiden **happiradikaalien biologiset vaikutukset** iholla vaativat lisätutkimuksia. Titaanidioksidin tunkeutuminen ihon päänäkökerroksen läpi on tutkittu vapaaehtoisilla henkilöillä. Tutkimuksissa on todettu titaanidioksidin tunkeutuvan ihon läpi erityisesti rasvaemulsiona erityisesti karvatuppien kautta (Tinkle ym., 2003; Toll ym., 2004). Mitkä näiden nanohiukkasten biologiset vaikutukset ovat ja onko niitä, ovat selvittämättä?

Valon vaikutuksesta aktivoitua myrkyvaikutusta titaanidioksidin läsnä ollessa eli **ns. valotoksisuus** on esitetty myös erääksi tulevaisuudessa selvitettäväksi tutkimuskohteeksi (Tsuji ym., 2006).

6.1.3. Suun kautta altistuminen

Suun kautta altistuminen voi tapahtua samanaikaisesti kuin hengitysteiden kautta altistuminen. Suun kautta altistumista ei juurikaan ole tässä yhteydessä tutkittu, koska elintarvikkeita koskee eri lainsäädäntö kuin kemikaaleja, eli ne eivät kuulu REACHin eli uuden kemikaalilainsäädännön alaisuuteen. Elintarvikkeiden osalta on tiedostettu myös tarve tarkastella nanopartikkelien vaikutuksia ihmisen elimistössä.

6.1.4. Kuluttajien altistuminen

Vaikeammin havaittava, tutkittava ja lähes huomiotta jäänyt alue lienee kuluttajien altistuminen. Mikäli nanohiukkasia irtoaa tuotteesta käytön aikana, voi kuluttaja altistua nanohiukkasille. Altistumiseen vaikuttaa se, missä muodossa nanomateriaali on kyseisessä tuotteessa. Pitoisuudet ovat kuitenkin todennäköisesti huomattavasti pienempiä kuin työperäisessä altistumisessa. Tämä sektori vaatii kuitenkin lisäselvitystä.

6.1.5. Ympäristön altistuminen ja ihmisen altistuminen ympäristön kautta

Materiaalien kierrätys ja uusiokäyttö sekä jätteiden käsittely voivat myös altistaa nanohiukkasille. Lisäksi tuotantoprosesseista ja materiaalien käytöstä aiheutuu vaikutuksia ympäristöön. Kulkeutuminen voi tapahtua hiukkas-aerosoleina ilman kautta ja jätevesien kautta, jolloin vaikutukset voivat esiintyä sekä vesistöissä että maaperässä.

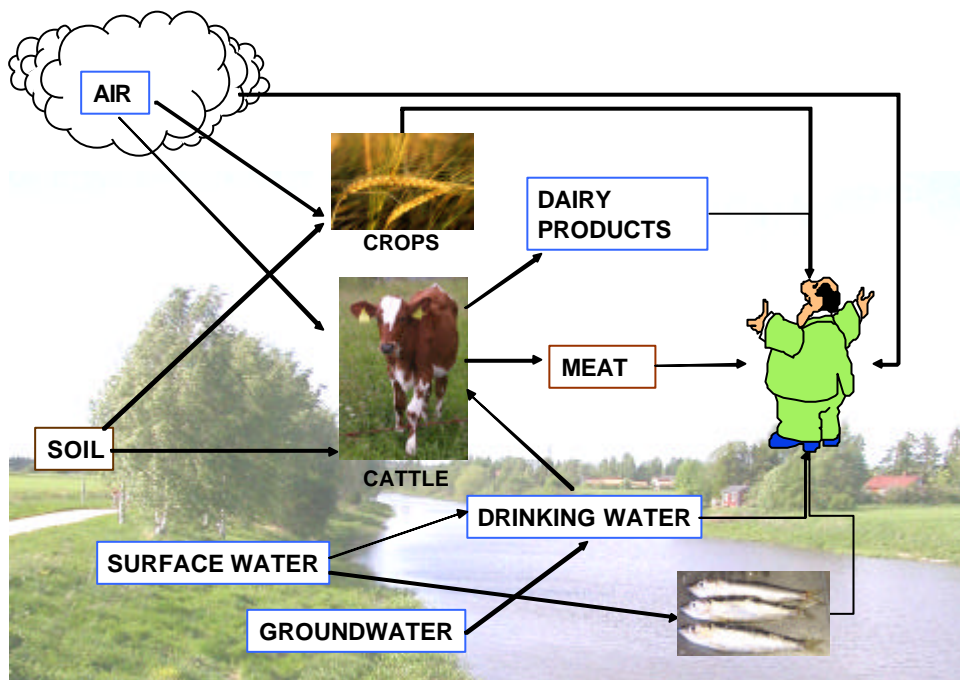
Kotitalouksien ja teollisuuden jätevedet sisältävät pesuaineita ja erilaisia kemikaaleja jotka ohjataan jäteveden puhdistamoille. Niissä suurin osa orgaanisesta aineksesta hajoaa biologisessa prosessissa hapen läsnä ollessa hiilidioksidiksi ja vedeksi. Hajoamaton tai hitaasti hajoava orgaaninen aines kulkeutuu mereen tai sitoutuu lietteeseen. Aktiivilieteprosessissa hajoamisen aikana muodostuu runsaasti lietettä, joka on hajoamisessa muodostuvaa mikrobibiomassaa. Myös nanomateriaalien

kulkeutuminen ympäristöön oletettavasti tapahtuu pääasiassa tätä reittiä. Tästä ei tosin vielä ole olemassa tutkimustietoa.

Lietteen hyötykäyttö ja orgaanisen aineksen palauttaminen maanperään on erittäin tärkeää sekä jätteiden käsittelyn että maaperän terveyden näkökulmasta. Orgaanisen aineksen lisäys vähentää eroosiota, maanvyörymiä sekä edistää maaperän pieneliöiden toimintaa, jotka vapauttavat ravinteet kasvien käyttöön. Vuosittain muodostuvat lietemäärät ovat Euroopassa n. 9 milj. tonnia ja Suomessa n. 150.000 tonnia.

Jätevesien käsittelyä ja loppusijoitusta säätelevät EU:n säädökset sekä kansallinen lainsäädäntö. Lietedirektiivi 86/278/ETY ja valtioneuvoston päätös puhdistamolietteiden hyötykäytöstä maanviljelyksessä (282/1994) asettavat raja-arvoja raskasmetalleille, mutta myös orgaanisille haitta-aineille on EU-tasolla ehdotettu raja-arvoja. Lietteiden hyötykäyttöä säätelevät useat direktiivit, kuten biojätedirektiivi (Working Document on sludge, 3rd draft).

Ympäristöön kohdistuvat vaikutukset voivat vaikuttaa kasvien, eläinten ja muiden eliöiden kautta myös ihmiseen ns. ravintoketjussa kulkeutumisen johdosta. Nanomateriaalien vaikutukset ympäristöön ovat vielä lähes täysin tuntemattomat, mutta OECD:n nanoteknologioiden turvallisuuteen liittyvät työryhmät ovat kehittämässä menetelmiä, tavoitteena arvioida nanomateriaalien kulkeutumisreittejä ympäristöön. Jätevedenpuhdistusprosessit ovat eräs tarkasteltava reitti.



Kuva 2. Ihmisen altistumisreitit (Landis and Yu, 1995, Technical Guidance document (TGD)).

7. LAINSÄÄDÄNTÖ

REACH, uusi kemikaalilainsäädäntö edellyttää kemikaalien rekisteröintiä, arviointia ja hyväksyntää. Vain rekisteröidyt kemikaalit saa toimittaa markkinoille. Myös kemikaalien käyttötavat tulee olla rekisteröityjä. Tällä tavoin REACH tulee vaikuttamaan sekä kemikaalien toimittajiin, ostajiin että käyttäjiin. Toistaiseksi on arvioitu, että rekisteröintiin tulee noin 30.000 - 70.000 kemikaalia.

Kemikaalien hyväksyttävyyden edellyttää, että niiden vaikutukset on tutkittu sekä ihmiseen että ympäristöön. REACHiin liittyvä kemikaalien rekisteröinti perustuu tuotantovolyymeihin ja erityiseen riskinarviointiprosessiin, joka sisältää sekä ihmistä ympäristöaltistumisen tutkimisen. Nämä tiedot sisältävät myös tiedot kemikaalien biohajoavuudesta ja biokertyvyydestä ympäristössä sekä myrkylliset vaikutukset ihmisiin ja ympäristöön.

Kemikaalien turvallista käyttöä ohjataan erilaisin ohjeistuksin, kuten käyttöturvallisuustiedottein.

7.1. Nanomateriaalit ja REACH

REACH ei toistaiseksi määrittele erillisiä testausvaatimuksia nanomateriaaleille. Ihmisen ja ympäristön terveyteen liittyvä tiedon puute nanomateriaalien turvallisuuteen liittyen on kuitenkin tiedostettu ja tulevaisuudessa REACH tulee varmasti ottamaan kantaa nano materiaalien riskeihin.

EU:n tutkimuskeskus, Joint Research Centre (JRC) on ottanut keskeisen roolin REACHin menetelmäohjeiden kehittämisen koordinoinnissa ja on myös keskeisessä roolissa nanomateriaalien turvallisuuteen liittyvissä tutkimusasioissa.

Nanomateriaaleihin liittyviä tutkimustarpeita selvittäessä on myös tiedostettu, että nykyiset kemikaalitestauksessa käytetyt tutkimusmenetelmät eivät välttämättä sellaisenaan sovellu nanomateriaalien testaamiseen.

Fysikokemiallinen karakterisointi on todettu aivan keskeiseksi ennen biologisia testejä. Nanomateriaalien karakterisointiin liittyvät erityisesti hiukkasten koon, kokojakauman, muodon ja morfologian (kiteisyys, huokoskoko, pinnan rosoisuus), liukoisuuden, kemiallisen koostumuksen, pintakemian ja pintavarauksen määrittäminen.

7.2. *in vitro* testit ja *in vivo* testit?

REACH on erityisesti ottanut kantaa **eläinkokeiden (*in vivo* testit)** vähentämiseen uusien nopeampien eläinkokeita korvaavien seulontatestien kehittämiseen (***in vitro* "nesteessä" testit**). *In vitro* testit tuovat myös kemikaalien testaukseen taloudellista säästöä teollisuudelle.

In vitro testeissä hyödynnetään usein viljeltyjä ihmisen tai eläinten solulinjoja, esim. ihon epiteelisoluja. Testin tavoitteena on simuloida biologisessa altistuksessa tapahtuvia biokemiallisia reaktioita tai etsiä akuutille myrkyllisyydelle annosvastetta eli sellaista pitoisuutta, jossa puolet soluista kuolee (ns. LC 50 arvo).

In vitro testejä ovat myös erilaiset bakteeri- ja hiivasolusensoritestit, kuten SOS chromotesti, Ames-testi ja valobakteeritesti, joilla voidaan tutkia kemikaalin akuuttia myrkyllisyyttä, vaikutusta perimään eli genotoksisuutta tai mutageenisuutta.

Eläinkokeiden vähentämiseksi kehitystyö vaihtoehtoisten toksisuustestien kehittämiseksi on käynnissä. Matemaattisia malleja pyritään soveltamaan kuten QSAR (Quantitative structure activity relationship) menetelmiä, jotka perustuvat tunnettujen kemiallisten rakenteiden toksisuuteen ja biohajoavuuteen, sekä kemikaalien luokitteluun myrkyllisiksi rakenneominaisuuksien mukaan. Luonto on kuitenkin paljon monimutkaisempi ja usein nämä mallit eivät yksinään riitä, vaan on tehtävä myös muita biologisia testejä, sillä usein jo pienikin rakenteen muutos voi antaa aivan toisenlaisen vasteen.

Myös 'toksikogenomiikka' eli uudenlaisten biosirutekniikoiden hyödyntäminen myrkyllisyyden arvioinnissa tekee tuloaan. Toksikogenomiikassa voidaan saada tietoa haitallisista vaikutuksista ennen kuin ne varsinaisesti vielä ilmenevät solutasolla. On kuitenkin myös todettu, että ilman eläinkokeita ei nanomateriaalien vaikutuksia ja mekanismeja kyetä selvittämään (ENV/CHEM/NANO(2007)20).

Ympäristötoksisuustesteissä on perinteisesti hyödynnetty useita eritasoisia organismeja, esim. kalatestit, vesikirpputesti, änkyrimatotesti, kasvitestit ja mikrobitestit. Näiden ja muiden ympäristötoksikologiassa yleisesti käytettyjen testien soveltuvuutta nanomateriaalien ympäristötoksikologiseen testaukseen tulisi selvittää. Testien valinnassa on otettava huomioon, millaiseen ympäristöön nanomateriaalit joutuvat. Toistaiseksi tutkimustuloksia nanomateriaalien vaikutuksista ympäristöön on sängen vähän.

7.3. Nanomateriaalien standardisointitilanne

Testimenetelmien standardointi on tärkeää, jotta materiaalien testaus tehdään luotettavilla, kansainvälisesti hyväksytyillä ja päteväksi todetuilla testeillä. Testien validointiin liittyy myös laboratorioiden väliset vertailutestaukset eli ns. rengastestit, joissa selvitetään samoilla näytteillä ja menetelmillä saatuja eroja tutkimustuloksissa, sekä hajontaa tutkimustulosten välillä kyseisillä menetelmillä.

Tutkimus tuottaa hyvin paljon tutkimustietoa, joka ei ole tuotettu standarditesteillä. Näiden tulosten vertailu muihin menetelmiin saattaa olla vaikeaa ja tutkimukset kyllä antavat hyödyllistä tietoa, joka on kuitenkin validoitava standarditestein tilastollisen luotettavuuden arvioimiseksi.

Komissio on antanut toimeksiannon CENille (European Standardization Organization) käynnistää nanoteknologiaan ja sen turvallisuuteen liittyviä työryhmiä, tavoitteena uusien standardien luominen. Myös ISO:ssa (International Standardization

Organization) ja OECD:ssä on käynnistynyt aihealueeseen liittyvä työ. CENELEC (European committee for Electrotechnical Standardization) ja ETSI (The European Telecommunications Standards Institute) ovat myös saaneet toimeksiannon komissiolta aiheeseen liittyen.

Huhtikuussa 2007 komissio on kehottanut edellä mainittuja organisaatioita suunnittelemaan standardointiohjelman. Siinä on myös tavoitteena tarkistaa nykystandardeja tai kehittää uusia terveyden, turvallisuuden ja ympäristönsuojelun alalla. Toimeksiannossa on mainittu myös, että eurooppalaiset standardit on kehitettävä yhteistyössä kansainvälisten standardien kanssa eli ISO:n kanssa. ISO:n puheenjohtajaksi on tullut USA:n edustaja, ja kansainvälinen yhteistyö tällä sektorilla näyttää vahvalta.

Työ eri standardisointijärjestöissä on osittain päällekkäistä, mutta menetelmät harmonisoidaan yhteisissä kokouksissa. OECD:n testimenetelmät ja työryhmät ovat olleet keskeisessä roolissa uudessa kemikaalilainsäädännössä REACHissä sekä ihmis- ja ympäristöriskien arvioinnissa.

8. TUTKIMUS, KEHITYS JA KOULUTUS

Nanotiede ja -teknologiat haastavat tulevaisuudessa entistä enemmän perinteiset koulutusjärjestelmät, koska niissä korostuu monitieteisyys. Kansantalouden kannalta on myös ensiarvoisen tärkeää saada tutkimuksen ja kehitystoiminnan infrastruktuurit ja verkostot toimimaan mahdollisimman tehokkaasti. Vain näin voi syntyä teollisesti kilpailukykyisiä nanotuotteita.

Materiaaliosaaminen ja nanomateriaalien tutkimuksen eettisen puolen huomioonottaminen ovat erityisen tärkeitä koko alan kehitykselle ja hyväksyttävyydelle. Sekä ihmisiin että ympäristöön liittyvät turvallisuusnäkökohdat huomioiva koulutus on ehdoton edellytys koko tieteenalan menestykselle.

Komissiossa on tiedostettu koulutuksen tarve ja merkitys. Muun muassa Erasmus Mundus -ohjelmassa tuettiin nanotieteisiin perustuvien maisteriohjelmien kehittämistä. Euroopan komissiolla on merkittävä rooli nanotieteen ja -teknologian kehittämisessä, toisaalta poliittisena päättäjänä ja toisaalta tutkimus- ja innovointitoiminnan rahoittajana. Komissio on laatinut Nanotieteen ja -teknologian toimintasuunnitelman vuosille 2005-2009 (KOM(2005) 243).

Toimintasuunnitelmassa todetaan kansainvälisen kilpailun kiristymisen asettavan Euroopalle erityisiä haasteita. Ongelmiksi nimettiin eollisten investointien vähyys, johtavien tieteiden välisten tutkimusinfrastruktuurien puute sekä tutkimuksen päällekkäisyys ja pirstaleisuus. Haasteita on myös koulutuksen kehittämisessä, tutkimuksen edistämisessä jne. Toimintaa tulisi erityisesti vahvistaa kiinnittämällä huomiota tieteidenvälisten infrastruktuurien kehittämiseen, nanoteknologian turvallisuuteen ja tehokkaaseen käyttöön. Erityisesti tulisi korostaa tutkijoiden eettistä vastuuta.

Nanotieteen ja -teknologian maailmanlaajuiset tutkimusmenot, niin julkiset kuin yksityisetkin olivat kaudella 2004-2006 noin 24 miljardia euroa. Euroopan osuus oli yli neljännes. Komissio rahoittaa suoraan kyseisistä menoista noin prosentin. Seitsemännessä puiteohjelmassa tavoitteena on kaksinkertaistaa rahoitus. Todettakoon kuitenkin, että EU:n käyttämä luokittelu nanotutkimukselle on väljä, siis EU:n raportoimalla nanotutkimusrahoituksella rahoitetaan paljon muutakin kuin raportin alussa esitetyn määritelmän mukaista nanotutkimusta.

Euroopan t&k:n ja teollisen innovoinnin tulevaisuuden kehitys riippuu keskeisesti monitieteellisen huippuosaamisen infrastruktuureista ja toiminnan riittävästä kriittisestä massasta. Komissio on kuudennessa puiteohjelmassa tukenut tutkimusinfrastruktuureja 40 miljoonalla eurolla. Tutkimusinfrastruktuurien strategiafoorumi (ESFRI) on määritellyt 35 hanketta, mukaan luettuna yleiseurooppalainen nanorakenteiden ja nanoelektronikan tutkimusinfrastruktuuri. Parhailtaan tällaista huippuosaamisen verkostoa kehitetään nanobioteknologiaan liittyen. Myös koulutusohjelmia on kehitetty nanotieteen ja -teknologian maisterintutkintojen suorittamiseen. Suomessa mm. Teknillinen korkeakoulu järjestää nanotekniikan ja -tieteen opetusta yhdessä Helsingin ja Jyväskylän yliopistojen kanssa.

Nanoteknologioiden mahdollisia terveys- ja ympäristövaikutuksia koskevaa tutkimustoimintaa on lisätty. Viidennessä ja kuudennessa puiteohjelmassa oli osoitettu noin 28 miljoonaa euroa hankkeisiin, jotka liittyivät erityisesti nanotieteen ja -teknologioiden ympäristö- ja terveysnäkökohtiin. Tähän aihealueeseen liittyvä tutkimus lisääntyy vielä merkittävästi seitsemännessä puiteohjelmassa.

Kuudennessa puiteohjelmassa tuettuja kansallisia verkostoja ovat mm:

- Nanoscience Europe
- Mikro- ja nanoteknologia (MNT ERA-NET)
- Material Science and Technology (MATERA)
- Tiede- ja teknologiayhteistyöhön liittyen hallitusten väliset Cost-verkostot.

Seitsemännessä puiteohjelmassa osaamisen integrointiin tähtäävä infrastruktuurien kehittäminen tulee jatkumaan mm. Yhteistyön erityisohjelmassa.

Vuosina 2007—2013 tullaan toteuttamaan kilpailukyvyyn ja innovoinnin puiteohjelma, jossa tuetaan teollisuuden innovointia kolmella erityisohjelmalla (Älykäs energiahuolto Euroopassa, Tieto- ja viestintätekniikkapolitiikan tukiohjelma, Yrittäjien innovointiohjelma). Niillä on merkitystä myös nanotieteeseen ja -teknologiaan perustuvalla innovoinnille.

Suomessa on myös käynnistymässä Nanoteknologian klusteriohjelma (2007-2013), jonka tavoitteena on kerätä eri alueilla sijaitsevien osaamiskeskusten toimijat yhteistyöhön. Ohjelman tavoitteena on painottua erityisesti nano- ja mikroteknologioihin sekä niiden kautta kehitettäviin uusiin materiaaleihin. OSKE-toiminta keskittyy verkottumiseen, siis pääasiassa käynnistämään sekä kansallisia että EU-tasoisia tutkimushankkeita. Sen sijaan varsinaista tutkimustoimintaa OSKE ei rahoita.

Riittävän tutkimuslaitekannan hankkiminen ja ylläpito ovat olennaisia Suomen nanotieteen, -tutkimuksen ja -tuotekehityksen kannalta. Suomessa ei ole selvää

rahoitusinstrumenttia nanotekniikan vaatimien kalliiden laitteiden jatkuvaan hankintaan ja ylläpitoon. Alan johtavat tutkijat joutuvat käyttämään kohtuuttoman paljon työaika laitehankintojen rahoituksen etsimiseen. Suuriin hankintoihin on ollut vaikea saada rahoitusta, vaikka tutkimusrahoitusta on lisätty. Rahoituksen kasvu on suuntautunut lähinnä henkilöstön palkkaukseen ja yritysten tuotekehitystukeen, ei kalliiden laitehankintojen rahoitukseen.

LIITE: Nanoteknologiaita kehittäviä tutkimuslaitoksia ja yliopistoja

Lähde: Tekesin Small and Huge, Nanotech Finland selvityksestä

Helsinki

University of Helsinki

- Biocentrum Helsinki
- Institute of Biotechnology
- Finnish Genome Centrum
- Technomedicum
- Neuroscience Center

The Helsinki University of Technology

- Micronova, Centre for Micro and Nanotechnology
- The Center for New Materials

VTT Technical Research Centre of Finland

The Finnish Institute of Occupational Health

CSC-Scientific Computing Ltd.

The Centre for Metrology and Accreditation

Mikes

Turku

The University of Turku and Åbo Academy University

- Nanoscience and nanotechnology in Turku
- Turku Centre for Biotechnology
- Biocity Turku
- Functional Foods Forum

Tampere

The University of Tampere

- The Regea Institute for Regenerative Medicine
- Institute of Medical Technology
- Tampere University of Technology
- Optoelectronics Research Centre, ORC
- Institute of Biomaterials
- Institute of Materials Chemistry

Jyväskylä

The University of Jyväskylä

- Nanoscience Center

Kuopio

The University of Kuopio

- T A.I. Virtanen Institute for Molecular Sciences
- Mediteknia
- Kuopio University Neuroscience Centre

Oulu

The University of Oulu

Micro- and Nanotechnology Centre

Lappeenranta

Lappeenranta University of Technology

National programme

- Tekes, Finnano technology programme www.tekes.fi/finnano
- The Academy of Finland, FinNano research programme www.aka.fi/finnano
- Centre of Expertise programme, nanotechnology Cluster Programme www.oske.net

Opetusministeriön julkaisu Nanotieteen keihäänkärjet Suomessa, Opetusministeriön työryhmämuistioita ja selvityksiä 2005:39, ISBN 952-485-049-4 antaa myös hyvän kuvan Suomessa käynnissä olevasta tutkimuksesta.

www.minedu.fi/julkaisut/index.html.

VIIITTEET

Aitken, R. J., Creely, K. S. ja Tran, C. L. 2004. Nanoparticles: An occupational hygiene review. - Research Report 27 4, 102 sivua. ISBN 0 7176 2908 2.

Anonyymi 2005. New developments in transparent emulsion technology: The potential of the NanoSolve® technology – clinical study demonstrates high availability of coenzyme Q₀ and vitamin E. – *Innovations in Food Technology* 11, 136-137.

Binning, G., Rohrer, H., Gerber, Ch ja Weibel, E., 1982. Surface studies by scanning tunneling Microscopy – *Physical Review Letters* 49, 1, 57-61.

Brezova, V., Gabcova, S., Dvoranova, D. ja Stasko, A. 2005. Reactive oxygen species produced upon photoexcitation of sunscreens containing titanium dioxide (an EPR study). – *J. Photochem. Photobiol. B* 79, 121-134.

Brouwer, D. H., Gijsbers, J. H. J. ja Lurvink, M. W. M. 2004. Personal exposure to ultrafine particles in the nano workplace: Exploring sampling techniques and strategies. – *Ann. Occup. Hyg.* 48, 439-453.

Chau, C.-F., Wu, S.-H ja Yen, G.-C., 2007. The development of regulations for food nanotechnology. – *Trends in Food Science and Technology* 18, 269-280.

ENV/CHEM/NANO(2007)20. 2007. Working party on Manufactured Nanomaterial. – Draft list of representative manufactured nanomaterials and draft list of endpoints (including alternative methods,) 22 sivua. In OECD, SG3 meeting 2-4 October 2007 Ispra.

Forssell, P., Partanen, R., Smolander, M. ja Kaukovirta-Norja, A. 2007. Nanoteknologiasta tulevaisuuden kilpailuetu elintarvikesektorille? – *Kehittyvä elintarvike* 4, 46-47.

Hood, E. 2004. Nanotechnology: Looking as we leap. – *Env. Health Perspect* 112, A741-A749.

Howard, J. 2006. Approaches to safe nanotechnology: An information Exchange with NIOSH. Department of Health and Human Services. Centers for disease control and prevention. National Institute for Occupational Safety and Health. www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/safenano/

Iijima, S. (1991). Helical Micro-tubules of Graphitic Carbon – *Nature*, 345, 56-58.

Itävaara, M. ja Vikman, M. 1996. An overview of methods for biodegradability testing of biopolymers and packaging materials. - *Journal of Environmental Polymer Degradation* 4 (1) 29-36.

Itävaara, M. ja Karjomaa, S. 1998. Mitä ovat tämän päivän kompostoituvat pakkaukset? *Pakkaus*, 33 (6) 42-44

JRC Envisages activities on nanotechnology – Discussion Paper, January 2007.

Komission tiedonanto neuvostolle, Euroopan parlamentin ja Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle.

Nanotiede ja nanoteknologia: toimintasuunnitelma Euroopalle 2005-2009. Ensimmäinen täytäntöönpanokertomus 2005-2007. Bryssel 6.9.2007 (KOM (2007) 505 lopullinen).

Kreuter, J., Shamenkov, D., Petrov, V., Range, P., Cychutek, K., KochBrandt, C. 2002. Apolipoprotein-mediated transport of nanoparticle-bound drugs across the blood-brain barrier. – *J. Drug Target* 10, 317-325.

Kreyling, W.G. ja Semmler-Behnke, M. 2007. Brain and heart: key targets of nanoparticles.- EuroNanosh 2007, European Nanosh Conference – nanotechnologies: A critical area in Occupational Safety and Health, sivu 32.

Kroto, H.W., Heath, J.R., O'Brien, S.C., Curl, R.F. ja Smalley, R.E. 1985. 'C60:Buckminsterfullerene'. – *Nature* 318, 162-163.

Kubo R. 1962. Electronic Properties of Metallic Fine Particles. I – *Journal of the Physical Society of Japan*, 17, 6, 975-986.

Kuhlbusch, T. A. J., Neumann, S. ja Fissan, H. (2004). Number size distribution, mass concentration, and particle composition of PM1, PM2.5 and PM10 in bag filling areas of carbon black production. – *J. Occup. Environ. Hyg.* 1, 660-671.

Landis and Yu, 1995, Technical Guidance document (TGD).

Maness, P. C., Smolisnki, S., Blake, D. M., Huang, Z., Wolfrum, E. J. ja Jacoby, W. A, 1999. Bactericidal activity of photocatalytic TiO₂ reaction: Toward an understanding of its killing mechanism. – *Appl. Environ Microbiol.* 65, 4094-4098.

Maynard, D., Aitken, R.J., Butz, T., Colvin, V., Donaldson, K., Oberdörster, G., Philbert, J., Seaton, A., Stone, V., Tinkle, S.S., Tran, L., Walker, N.J. ja Warheit, D. B. 2006. Safe handling of nanotechnology. – *Nature* 444, 16, 267-269.

Mills, A. ja Le Hunte, S. 1997. An overview of semiconductor photocatalysis. – *J. Photochem. Photobiol. A.* 108, 1-35.

Nakagawa, Y. Wakuri, S., Sakamoto, K. ja Tanaka, N. 1997. The photogenotoxicity of titanium dioxide particles. – *Mutation Res.* 394, 125-132.

Nasibulin, A. G., Pikhitsa, P. V., Jiang, H., Brown, D. P., Krashennnikov, A. V., Anisimov, A. S., Queipo, P., Moisala, A., Gonzalez, D., Lientschnig, G., Hassanien, A., Shandakov, S. D., Lolli, G., Resasco, D. E., Choi, M., Tománek, D. ja Kauppinen, E. I. 2007. A novel hybrid carbon material. - *Nature Nanotechnology* 2, 156-161. 10.1038/nnano.2007.37

Niemeyer, C.M. ja Mirlkin, C.A. 2004. Nanobiotechnology. Concepts – *Applications and Perspectives*. ISBN 3-52-30658-7, 469 sivua

Oberdörster, G., Oberdörster, E. ja Oberdörster, J. 2005. Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles – *J. Environ Health Perspect.* 13, 823-840.

Sanguansri, P. ja Augustin, M.A. 2006. Nanoscale materials development- a food industry perspective. – *Trends in Food Science & Technology* 17, 547-556.

- Schneider, T. 2007. Evaluation and control of occupational health risks from nanoparticles. – *TemaNord* 2007:581. 96 sivua.
- Semo, E., Kesselman, E. Danino, D. ja Livney, Y. 2007. Casein micelle as a natural nano-capsular vehicle for nutraceuticals. – *Food Hydrocolloids* 21, 936-942.
- Siegrist, M., Cousin, M.-E., Kastelholz, H. ja Wiek, A. 2007. Public acceptance of nanotechnology foods and food packaging; The influence of affect and trust. – *Appetite*, www.sciencedirect.com
- Sorrentino, A., Gorrasi, G ja Vittoria, V., 2007. Potential perspectives of bionanocomposites for food packaging applications. – *Trends in Food Science & Technology* 18:84-95.
- Tinkle, S. S., Antonini, J. M., Rich, B. A., Roberts, J. R., Salmen, R., DePree, K. ja Adkins, E. J. 2003. Skin as a route of exposure and sensitization in chronic beryllium disease. – *Env. Health Perspect* 111, 1202-1208.
- Toll, R., Jacobi, U., Richter, H., Lademann, J., Schaefer, H. ja Blumepeytavii, U. 2004. Penetration profile of microspheres in follicular targeting of terminal hair follicles. – *J. Invest Dermatol.* 123, 168-176.
- Tsuji, J. S., Maynard, A. D., Howard, P. C., James, J. T., Lam, C-W, Warheit, D. B. ja Santamaria, A. B. 2006. Research strategies for safety evaluation of nanomaterials, Part IV: Risk Assessment of nanoparticles. – *Toxicological Sciences* 89, 1, 42-50.
- Tuominen, J., Kylmä, J., Kapanen, A., Venelampi, O., Itävaara M., ja Seppälä, J. 2002. Biodegradation of Lactic Acid Based Polymers under Controlled Composting Conditions and Evaluation of the Ecotoxicological Impact. – *Biomacromolecules* 3, 445-455.
- Vikman, M., Kapanen, A. ja Itävaara, M. 2006. Orgaaniset haitta-aineet jätevesilietteissä. – *Vesitalous* 3, 7-10.
- Weiss, J., Takhistov, P. ja McClements, D. J., 2006. Functional materials in food nanotechnology. – *Journal of Food Science* 71, (9), R107-R116.

Eduskunnan tulevaisuusvaliokunta
Teknologian arviointeja 26

ISBN 978-951-53-3051-2 (nid.)
ISBN 978-951-53-3052-9 (PDF)