

Keskusteluaiheita – Discussion papers

No. 1072

Christopher Palmberg

NANOTEKNOLOGIASTAKO SEURAAVA YLEIS- KÄYTTÖINEN TEKNOLOGIA? – HAVAINTOJA SUOMEN NÄKÖKULMASTA*

* Tämä työpaperi liittyy Tekes:in ja Teknologiateollisuuden 100-vuotissäätiön rahoittamaan 'Nanoteknologia ja Suomen teollisuuden uudistuminen (NANOREF)'-tutkimusprojektiin. Haluamme kiittää tutkimusta varten saamastamme rahoituksesta. Haluan kiittää myös Pekka Ylä-Anttilaa ja Terttu Luukkosta kommentteista.

PALMBERG, Christopher, NANOTEKNOLOGIASTAKO SEURAAVA YLEISKÄYTTÖINEN TEKNOLOGIA? – HAVAINTOJA SUOMEN NÄKÖKULMASTA. Helsinki: ETLA, Elinkeinoelämän Tutkimuslaitos, The Research Institute of the Finnish Economy, 2007, 25 s. (Keskusteluaiheita, Discussion Papers ISSN 0781-6847; No. 1072).

TIIVISTELMÄ: Tuskin mihinkään muuhun teknologian kehittämiseen on sijoitettu maailmanlaajuisesti niin lyhyessä ajassa yhtä paljon julkisia varoja kuin nanoteknologiaan. Nanoteknologialla tarkoitetaan yleensä toiminnallisesti uudentyyppeihin materiaaleihin ja nanomittakaavan (1-100nm) rakenteisiin perustuvien komponenttien ja laitteiden suunnitteleminen sekä valmistamista erilaisiin sovelluksiin. Nanoteknologia nähdään geneerisenä, yleiskäyttöisenä teknologiana, jolla uskotaan olevan potentiaalia uudistaa useita teollisuuden aloja ja siten merkittävästi edistää eri maiden pitkän aikavälin tuottavuus- ja talouskasvua. Nanoteknologia on kuitenkin vielä elinkaarensa alkuvaiheessa. On epäselvää millä tavalla ja mihin suuntaan se kehittyy, varsinkin kaupallisesti. Suomessa satsataan myös suhteellisen paljon julkisia t&k-varoja nanoteknologiaan. Yritystoimintaa on jonkin verran, mutta kehitys on vielä vahvasti tiedevetoinen. Tiedepohjaisuus näkyy varsinkin nanoteknologijulkaisujen voimakkaana kasvuna. Tässä työpaperissa pohditaan millä tavoilla nanoteknologia voisi kehittyä yleiskäyttöiseksi teknologiaksi, sekä minkälaisia haasteita ja mahdollisuuksia nanoteknologian kehittämiseen liittyy Suomessa teknologian siirron näkökulmasta.

AVAINSANAT: yleiskäyttöinen teknologia, nanoteknologia, Suomi, teknologia siirto

JEL-koodit: O40, O33, O38

SISÄLLYS

1. JOHDANTO	1
2. NANOTEKNOLOGIAN MÄÄRITELMÄ	3
3. YLEISKÄYTTÖISET TEKNOLOGIAT, TUOTTAVUUS JA TALOUSKASVU	4
4. VOIKO NANOTEKNOLOGIASTA TULLA YLEISKÄYTTÖINEN TEKNOLOGIA?	7
5. SUOMALAISET PANOSTUKSET NANOTEKNOLOGIAAN	11
6. NANOTEKNOLOGIAN SIIRTO SUOMESSA – ALUSTAVIA HAVAINTOJA	14
7. YHTEENVETO	20
KIRJALLISUUS	23
LIITE	25

1. JOHDANTO

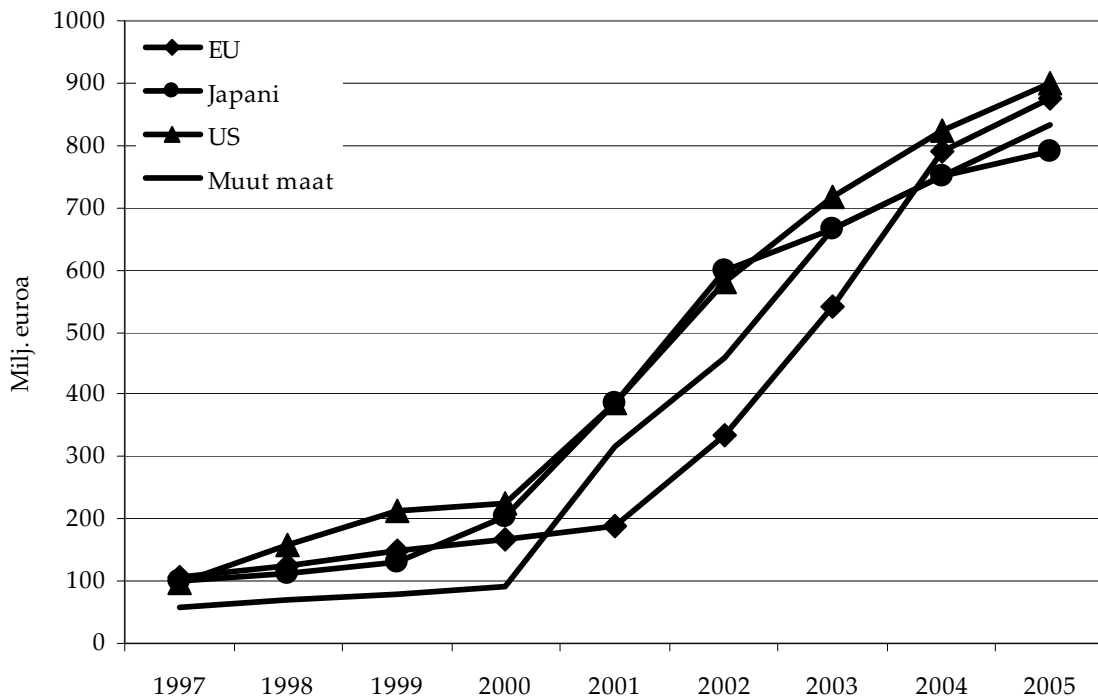
Teknologisen muutoksen taustalla on yleensä joukko pieniä parannusinnovaatioita jo olemassa oleviin tuotteisiin tai prosesseihin, jotka voivat olla hyvinkin tärkeitä yritysten tuottavuuden, kilpailukyvyn ja talouskasvun kehitykselle (Rosenberg, 1982). Pidemmällä aikavälillä tuottavuus- ja kasvukehitys kuitenkin määrättyy yritysten ja maiden kyvystä omaksua, ja taloudellisesti hyödyntää täysin uudentyyppisiä läpimurto-innovaatioita ja näihin liittyviä nk. yleiskäyttöisiä teknologioita. Yleiskäyttöisille teknologioille on ominaista, että ne kehittyvät nopeasti tiettyjen avainkeksintöjen pohjalta, leviävät monille sektoreille ja erilaisiin käyttötarkoituksiin, sekä luovat ja edellyttävät täydentäviä innovaatioita (Helpman et al., 1998; Lipsey et al., 2005; Koski, 2006).

Nykyajan taloushistoriassa varsinkin sähködynamo ja tietokone ovat hyviä esimerkkejä avainkeksinnöistä, joiden pohjalta on syntynyt yleiskäyttöisiä teknologioita. Sähködynamo loi perustan sähköistämiseksi ja tietokone vaikutti puolestaan keskeisesti informaatio- ja kommunikaation teknologian (ICT) kehittymiseen. ICT on tällä hetkellä vallitsevin yleiskäyttöinen teknologia ja jotkut tunnistavat myös uudessa bioteknologiassa vastaavanlaisia piirteitä (Lipsey et al., 2005). Tässä huomio kohdistuu kuitenkin nanoteknologiaan.

Nanoteknologia on tällä hetkellä luultavasti nopeimmin kehittyvä teknologia-ala, johon on kohdistunut hyvin lyhyessä ajassa erittäin mittavia julkisia t&k- investointeja maailmanlaajuisesti (Kuvio 1 alla). Viimeaikaiset nanoteknologiainvestoinnit ovat jo sinällään mielenkiintoinen tiede- ja innovaatiopoliittinen ilmiö ja nanoteknologiasta povataan julkisessa keskustelussa seuraavaa ICT:n kaltaista yleiskäyttöistä teknologiaa.

Tuottavuuden ja talouskasvun näkökulmasta nanoteknologian ominaispiirteet – sekä tähän teknologiaan kohdistuvat odotukset – herättävät kuitenkin joukon tärkeitä kysymyksiä, varsinkin pienen Suomen kaltaisen maan kannalta. Miten nanoteknologia voidaan jäsentää taloustieteellisestä näkökulmasta ja tätä kautta ottaa huomioon sen ominaispiirteet politiikkakeskustelussa? Missä määrin ja miten nanoteknologia todellakin voisi kehittyä ICT- aikakauden jälkeiseksi yleiskäyttöiseksi teknologiaksi? Jos näin kävisi, miten Suomi on tällä hetkellä asemoitunut kentälle; millä eväillä ja millä tavoin meidän kannattaisi lähestyä nanoteknologian kaupallistamista? Onko nanoteknologia uhka vai mahdollisuus Suomen perinteisesti vahvojen toimialojen ja yritysten kilpailukyvyille?

Kuvio 1. Julkiset T&K- investoinnit nanoteknologiaan



Lähde: PCAST (2005)

Yllämainitut kysymykset ovat osittain pitkälle tulevaisuuteen tähtääviä ja niihin on vaikea vastata muutoin kuin spekulatiivisesti. Tässä työpaperissa pyritään kuitenkin konkretisoimaan nanoteknologiaa taloustieteellisen käsitteistön avulla ja varsinkin tuottavuus- ja talouskasvun näkökulmasta. Keskustelun jäsentämiseksi toinen osio paneutuu tarkemmin nanoteknologian määritelmään. Kolmannessa osiossa päähuomio siirtyy talusteoreettiseen keskusteluun yleiskäyttöisistä teknologioista sekä erilaisiin rinnakkaiskäsitteisiin, joiden avulla nanoteknologiaa voidaan jäsentää ja liittää tuottavuus- ja talouskasvukeskusteluun. Neljännessä osiossa pohditaan, mikäli nanoteknologia voisi kehittyä yleiskäyttöiseksi teknologiaksi. Viidennessä ja kuudennessa osiossa käsitellään nanoteknologian kehittämistä, mahdollisuuksia ja siirtämistä julkisesta tutkimussektorista yrityksiin Suomessa. Seitsemäs osio on yhteen vetävä, jossa nostetaan myös esiin joitakin haasteita suomalaisen innovaatiopolitiikan näkökulmasta.

2. NANOTEKNOLOGIAN MÄÄRITELMÄ

ICT:n, bio- ja nanoteknologian kaltaisten laajojen teknologia-alojen määrittely on käytännössä hyvin hankalaa. Teknologian varhaisen kehitysvaiheen takia monet ovat myös sitä mieltä, että nanoteknologia on pelkästään uusi nimitys fysiikan ja kemiaan välimaastossa jo kauan tehdyille tutkimukselle. Nanoteknologian määritelmästä käydään osittain kiivas-takin keskustelua luonnontieteilijöiden piirissä, mutta innovaatiopolitiikassa se on jo suhteellisen vakiintunut käsite. Tällöin viitataan yleisesti yhdysvaltalaisen julkisen Nano-technology Initiative-aloitteen käyttämään määritelmään. Tämän mukaan nanoteknologia on *”tutkimusta ja teknologiakehitystä, jossa operoidaan atomien ja molekyylien 1-100 nanometrin mittayksikkötasolla, ja jonka avulla hallitusti luodaan uusia rakenteita, laitteita tai järjestelmiä, joilla on uusia ominaisuuksia pienen kokonsa takia”*. Yksi nanometri on miljardisosa metristä tai miljoonasosa millimetristä. Perspektiivin saamiseksi voidaan ottaa vertailuksi ihmisen hius, jonka paksuus on noin 80 000 nanometriä. (Lämsä, 2004; OPM, 2005; Ratner ja Ratner, 2003)

Nanoteknologiassa on siis kysymys erittäin pienikokoisiin rakenteisiin paneutuvas-ta t&k-toiminnasta. Tämä pienuus on samalla myös nanoteknologian keskeisin ominais-piirre. Nanometrin mittatasolla normaalit klassisen fysiikan lait eivät enää aina päde, jol-loin siirrytään kvanttifysiikan puolelle. Tästä johtuen perinteiset materiaalit saavat täysin uudenlaisia kemiallisia, optisia, elektronisia tai magneettisia ominaisuuksia. Nämä omi-naisuudet vuorostaan mahdollistavat lukuisia täysin uusia teollisia sovelluksia tai paran-kuksia olemassa oleviin tuotteisiin ja prosesseihin.

Esimerkiksi lääketieteellisyydessä mahdollisia sovelluksia ovat miniatyyrikokoiset diagnostiikkajärjestelmät, joita voidaan istuttaa elimistöön sairauksien varhaista havaitsemista varten. Tietotekniikassa voidaan kehittää näyttöjä ja tallennusvälineitä, joilla on erittäin suuri tallennuskapasiteetti. Näin saatetaan ylläpitää elektroniikasta tunnettua nk. Mooren lakia jonka mukaan mikroprosessorien hintavakioitu informaatiokäsittelyka-pasiteetti kaksinkertaistuu noin puolentoista vuoden välein. Nanoteknologia voi myös ol-la merkittävä perinteisen teollisuuden uudistaja. Esimerkiksi on mahdollista kehittää li-kaantumattomia tai energiatehokkaita pintamateriaaleja rakennusteollisuuden käyttöön (esim. ikkunoita ja kaakeleita), vettä hylkiviä ja erityispuhtaita tekstiilejä, monitoiminnal-

lista paperia (esim. elektroninen paperi), tai erittäin tehokkaita aurinkokennoja ja muita energiateknologiaratkaisuja (Hall, 2005).

Maailmanmarkkinoille on jo ilmestynyt nanoteknologiaan pohjautuvia tuotteita (kts. esim. <http://www.nanovip.com>). Nanoteknologia on kuitenkin vielä vahvasti tiedeve-toinen ja varhaisessa kehitysvaiheessa. Tästä syystä puhutaankin usein nanotieteistä, jol-loin tarkoitetaan fysiikan, kemian ja biologian välimastossa tehtävää monitieteellistä tut-kimusta. Monitieteellinen lähestymistapa on myös aiheuttanut sen, että nanomittakaavan ilmiöitä hyödyntävien sovellusten saavuttamiseksi ratkaisua on haettu kahdesta eri suun-nasta, eli joko miniatyrisoimalla olemassa olevia materiaaleja 'ylhäältä alas' tai kasvatta-malla uusia materiaaleja atomi atomilta ja molekyyli molekyyliltä 'alhaalta ylös'.

'Ylhäältä alas'-lähestymistavassa luodaan esimerkiksi litografialla, elektronisuihkul-la, leimaamisella tai muulla vastaavalla perinteisellä tekniikalla nanometritason rakentei-ta. Kyseiset tekniikat ovat jo nyt laajamittaisessa teollisessa käytössä. 'Alhaalta ylös'-lähestymistapa poikkeaa jo selvästi perinteisistä tekniikoista ja vaatii uudenalaista osaa-mista, uusia instrumentteja, laitteita ja tutkimustiloja. Nämä tekniikat ovat nyt vasta kehit-teillä, mutta eräs mielenkiintoinen ratkaisu on itseorganisoituvuus, jossa lähtöatomit ja -molekyylit järjestäytyvät itse suuremmiksi molekyyleiksi, ja nämä puolestaan voivat jär-jestäytyä edelleen rakenteiksi jne.

Tässä luvussa keskitytään taloustieteelliseen näkökulmaan, eikä tarkemmin paneu-duta siihen tärkeään teknologian arvioimiseen liittyvään eettiseen keskusteluun mitä na-noteknologiaan myös liittyy (kts. esim. Langlasi et al. (2004)). Kyseinen keskustelu poh-jautuu suurelta osin Eric Drexlerin vuonna 1990 julkaisemaan kirjaan "Engines of Creati-on – The Coming Era of Nanotechnology". Kirjassaan Drexler maalailee utopistista ske-naariota, jossa molekyylireaktioiden tuottamat rakenteet sisältävät sisäänrakennettuna it-sekorjautumiskyvyn, joka on totuttu yhdistämään ainoastaan eläviin organismeihin.

3. YLEISKÄYTTÖISET TEKNOLOGIAT, TUOTTAVUUS JA TALOUS-KASVU

Taloustieteissä on jo kauan korostettu uusien mullistavien teknologioiden merkitystä tuot-tavuuden ja talouskasvun kehitykselle pitkällä aikavälillä. Schumpeterilaisessa viitekehi-kossa viitataan luovaan tuhoon, eli uuden teknologian kykyyn samalla sekä hävittää ole-

massa olevia että luoda uusia taloudellisia rakenteita (Schumpeter, 1942). Tätä sivuavassa nk. evolutionaarisessa traditiossa puhutaan uusista teknis-taloudellista järjestelmistä tai paradigmoista, jotka läpäisevät ja muuttavat talouden perusrakenteita, organisaatioita ja toimintatapoja (Freeman ja Louca, 2001). Viimeisin käsite tässä keskustelussa on 'yleiskäyttöinen teknologia' ("general purpose technology"), jota sovelletaan tässä työpaperissa.

Yleiskäyttöiset teknologiat-käsitteistön taustalla on suhteellisen sofistikoitunut teoriakehikko, joka on sopusoinnussa uuden kasvuteorian kanssa. Yleiskäyttöisiin teknologioihin liittyvässä otetaan kuitenkin paremmin huomioon teknologisen muutoksen laadulliset erot. Koulutus ja t&k-investoinnit ovat olennaisen tärkeitä tuottavuuskehitykselle samalla tavalla kun uudessa kasvuteoriassa. Teknologia-ulottuvuus on selvemmin esillä, koska uuden yleiskäyttöisen teknologian odotetaan ohjaavan näitä investointeja tiettyihin avainteknologioihin edellisten avainteknologioiden kustannuksella. Uuden yleiskäyttöisen teknologian menestyminen ja makrotaloudelliset vaikutukset ilmenevät tyypillisesti vasta viiveellä silloin, kun uusien avainteknologioiden tueksi on syntynyt täydentäviä teknologioita, organisaatioita ja instituutioita, jotka myötävaikuttavat sen laajamittaiseen leviämiseen, eli diffuusioon (Helpman, 1998; Verspagen, 2005).

Yllämainituilla teoriakehikoilla on paljon yhtymäkohtia keskenään. Kirjallisuudessa käydään kuitenkin vilkasta keskustelua muun muassa yleiskäyttöisten teknologioiden leviämisenopeudesta ja vaikutuksista. Lipsey et al. (2005) kyseenalaistavat eri mallien oletuksen siitä, että 'uusi' yleiskäyttöinen teknologia aina syrjäyttää 'vanhan' vallitsevan teknologian. Joskus taloudessa esiintyy samanaikaisesta useita, myös toisiaan tukevia, yleiskäyttöisiä teknologioita. Esimerkkejä tästä voisivat olla ICT:n kytkeytyminen bioinformaatiotieteen kautta bioteknologiaan, tai nanoteknologian kytkeytyminen bioteknologiaan (Hermans ja Kulvik, 2005). Lisäksi on väärin olettaa, että uusi yleiskäyttöinen teknologia aina kiihdyttää tuottavuuden kasvuvauhtia. Sen merkitys voi myös ilmetä jo olemassa olevien teknologioiden tuottavuusvaikutusten ylläpitäjänä.

Nanoteknologian analysoimiseen yllämainittu kirjallisuus kuitenkin tuo erilaisia mielenkiintoisia näkökulmia. Jos nanoteknologiaa voisi todellakin luonnehtia tulevaisuuden yleiskäyttöiseksi teknologiaksi, kyseinen kirjallisuus tarjoaa suhteellisen vankan teoriakehikon, jonka avulla voidaan käydä jonkintasoista keskustelua nanoteknologian potentiaalisista taloudellisista vaikutuksista ja politiikkahaasteista. Tässä suhteessa kyseinen

teoriakehikko ja siihen liittyvä käsiteistö on selvästi konkreettisempi kuin viittaukset esim. muutoksiin teknis-taloudellisissa järjestelmissä tai paradigmoissa. Varsinkin Jovanovic ja Rousseau (2005), Lipsey et al. (2005) käyvät pitkää keskustelua tyypillisen yleiskäyttöisen teknologian ominaispiirteistä ja tunnistuskriteereistä (Laatikko 1).

Laatikko 1. Yleiskäyttöisen teknologian neljä tunnistuskriteeriä

- Runsaat taloudelliset kehittymismahdollisuudet
- Laaja soveltuvuus monilla eri toimialoilla taloudessa
- Laaja soveltuvuus monentyyppisissä erilaisissa käyttötarkoituksissa
- Kyky generoida, ja samalla se myös vaatii erilaisia täydentäviä innovaatioita

Yleiskäyttöisen teknologian ensimmäinen tunnistuskriteeri on sen tarjoamat *runsaat taloudelliset kehittymismahdollisuudet*. Toisin sanoen, teknologialla tulisi olla paljon tieteellisteknologista potentiaalia, joka kustannustehokkaasti selvästi parantaa tuotteiden tai prosessien suorituskykyä yli ajan. Tämä kriteeri on olennainen teknologian diffuusion kannalta. Suorituskyvyn parantumisen myötä kyseinen teknologia haastaa olemassa olevia ratkaisuja, ja sen käyttöönottokynnys alenee. Runsaat taloudelliset kehittymismahdollisuudet luovat myös kannusteita täydentävien teknologioiden ja organisaatioiden kehittämiseksi.

Toinen ja kolmas tunnistuskriteeri liittyy nimenomaan yleiskäyttöisen teknologian diffuusion laajuuteen. Kyseisen teknologian tulisi olla sekä soveltavissa *monilla eri toimialoilla* ja *monentyyppisissä erilaisissa käyttötarkoituksissa*. Sähkövalo on hyvä esimerkki teknologiasta jotka käytetään kaikkialla. Sähkövalolla on kuitenkin ainoastaan yksi käyttötarkoitus, eli tuottaa valoa tehtaissa, toimistorakennuksissa, kodeissa jne. Sähkövalo ei siis tämän logiikan mukaan yllä yleiskäyttöiseksi teknologiaksi. Toisaalta on helppo tunnistaa tietokone tällaiseksi teknologiaksi, sillä tietokoneella voidaan automatisoida merkittävä osa erityyppisiä teollisia prosesseja, joita hyödynnetään hyvin laajasti monilla eri toimialoilla.

Neljäs yleiskäyttöisen teknologian tunnistuskriteeri korostaa *täydentävien innovaatioiden merkitystä* teknologian diffuusiosta. Erilaisten toimintojen ulkoisvaikutusten takia uuden teknologian laajempi käyttöönotto ja diffuusio vaativat useita täydentäviä teknologioita, organisaatioita ja instituutioita tuekseen. Näitä voivat olla esimerkiksi prosessitek-

nologiat, jotka mahdollistavat teollisen tuotannon suuremmalla mittakaavalla. Yhtäläilla ne saattavat vaatia uudenlaisten yritysten ansaintamallien kehittämistä, uusia tapoja markkinoida tuotteita tai organisoida alihankintaketjuja. Ne voivat myös vaatia muutoksia koko talouden tasolla esim. viranomaissäätelyssä tai muuntyyppisissä instituutioissa.

4. VOIKO NANOTEKNOLOGIASTA TULLA YLEISKÄYTTÖINEN TEKNOLOGIA?

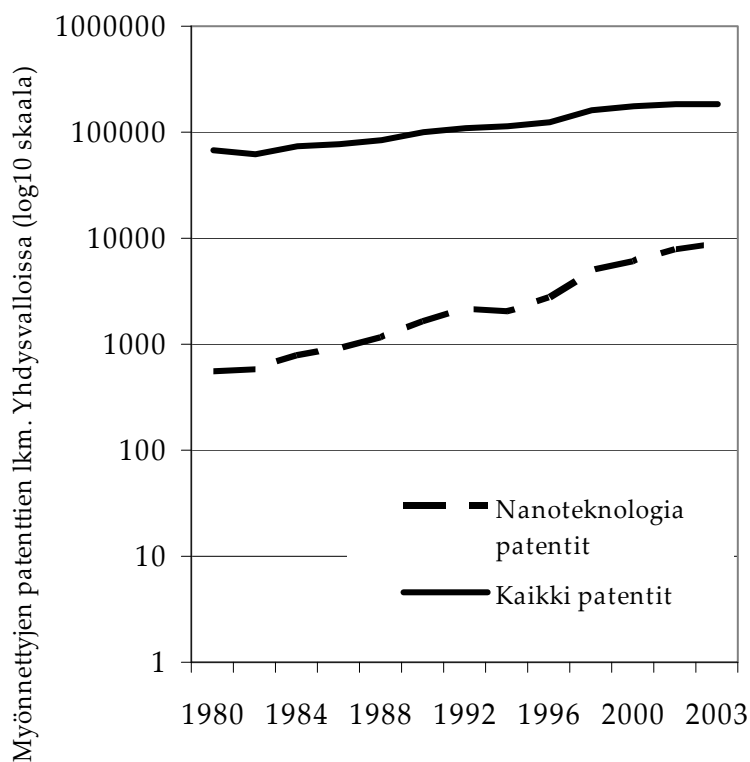
On selvää, että eri teknologioiden laadullisten erojen ja merkitysten arvioiminen on suhteellista ja pitkälti myös riippuvainen historiallisista kontekstistaan. Nanoteknologian kohdalla lähtökohta taloustieteelliselle pohdinnalle on erityisen haastava, koska sen kehitys on vielä alkuvaiheessa tiettyjen 1980-luvulla syntyneiden tutkimusta ja teknologiakehitystä mahdollistavien keksintöjen jälkeen. Toisaalta varhainen vaihe tarjoaa myös mahdollisuuden kehityksen tarkasteluun reaaliaikaisesti. On hyvin mahdollista, että nanoteknologian tunnistaminen hankaloituu entisestään sen laajemman leviämisen myötä. Missä määrin nanoteknologia nykymuodossaan täyttää edellä mainitut yleiskäyttöisten teknologian neljä tunnistuskriteeriä?

Ensimmäinen kriteeri koskee kyseisen teknologian tarjoamia *runsaita taloudellisia kehittymismahdollisuuksia*. Tulevaisuuden taloudellisten kehittymismahdollisuuksien arvioiminen on luonnollisesti vaikeata. Innovaatiotoiminnan kannalta patentoiminen voi kuitenkin olla jonkinlainen indikaattori keksijöiden ja yritysten taloudellisista odotuksista, jotka kohdistuvat tiettyyn teknologiaan. Patentoiminen on kallista ja sillä pyritään yleensä suojaamaan sellaisia teknologioita, joiden tuotto-odotukset ovat keskitasoa korkeampia. Patenttiaineistoja on saatavilla pitkinä aikasarjoina ja hyvin tarkalla teknologiatasolla, ja niitä käytetään laajasti teknologisen muutoksen ja innovaatiotoiminnan mittaamiseen (kts. esim. Moed et al. (2004)).

Huang et al. (2004) tarkastelevat nanoteknologian kehitystä yhdysvaltalaisella patenttiaineistolla, jonka oletetaan parhaiten kuvaavan kehittyneiden yritysten sekä maiden t&k- ja innovaatiotoimintaa. Erilaisten hakusanojen avulla he identifioivat jopa 70 039 myönnettyjä nanoteknologiapatenttia vuosina 1976-2003. Jopa suhteutettuna yhdysvaltalaisen patenttien kokonaislukumäärään, tämä on jo merkittävää toimintaa, vaikka kokonaislukuihin kannattaa suhtautua hyvin varauksellisesti, koska – kuten tiedetään – ha-

kusanat tuottavat myös sellaisia patenteja, joilla on aika etäinen suhde nanoteknologiaan. Nanoteknologiapatenttien lukumäärän kasvu ylittää kokonaispatentoimisen tarkastelu-ajanjaksona, ja se heijastaa näin myös julkisten t&k-investointien vastaavaa kehitystä (Kuvio 2). Tämä kasvu selittyy pitkälti varsinkin yhdysvaltalaisen elektroniikka-alan tutkijoiden lisääntyvällä aktiivisuudella. Japanilaiset ja saksalaiset tutkijat ja keksijät ovat myös aktiivisia

Kuvio 2. Nanoteknologian ja muiden alojen patentoiminen Yhdysvalloissa (USPTO)



Lähde: Huang et al. (2004)

Yhdysvaltain julkinen Nanotechnology Initiative on merkittävästi vaikuttanut nanoteknologiapatenttien vuoden 1997 jälkeiseen voimakkaaseen kasvuun, ja tämä ohjelma korostaa vielä selvemmin yhdysvaltalaisen dominoivaa asemaa (Huang et al. (2005)). On myös mielenkiintoista huomata, että nanoteknologian patentoiminen suurelta osin noudattaa bioteknologian kehitystä.

Bioteknologiapatenttien voimakas kasvu tapahtui noin 13 vuotta tiettyjen geenitekniologiaan liittyvien peruskeksintöjen jälkeen. Nanoteknologian kannalta ehkä merkittävimmät peruskeksinnöt liittyvät mikroskopiaan, joka mahdollistaa nanometritason ilmiöiden rutiininomaisen tutkimuksen (esim. pyyhkäisyelektroniikka- ja atomivoimamikroskoopi). Jos vertailulähtökohdaksi otetaan nämä 1980-luvun puolivälissä syntyneet nanoteknologian peruskeksinnöt mikroskopiassa, havaitaan samanlainen aikaviive peruskeksinnöistä patentoinnin voimakkaan kasvuun (Zucker ja Darby, 2005). Toisin sanoen, nanoteknologia todellakin näyttää olevan teknologia, jonka taloudellinen merkitys kasvaa nopeasti. Lisäksi sen kehityskulku näyttää tältä osin noudattavan bioteknologian tarinaa, jossa taloudelliset mahdollisuudet syntyvät pitkällä viiveellä.

Monipuolisten taloudellisten kehitysmahdollisuuksien lisäksi yleiskäyttöisen teknologian pitäisi olla *sovellettavissa monilla eri toimialoilla ja monentyyppisiin erilaisiin käyttötarkoituksiin*. Nämä molemmat kriteerit kuvaavat itse asiassa nanoteknologia jo nyt varsin hyvin. Nanoteknologia on tällä hetkellä perusluonteeltaan uusi atomi- ja molekyylytason prosessiteknologia, joka voi mahdollistaa laajan joukon uusia tuotteita ja merkittäviä parannuksia jo olemassa oleviin. Lähtökohtaisesti se soveltuu teoriassa melkein päälle millä tahansa teolliselle toimialalle ja käyttötarkoitukseen, jolla voidaan manipuloida materiaaleja nanometritasolla (Ratner ja Ratner, 2003). Nanoteknologia täydentää myös muita merkittäviä teknologioita, kuten ICT ja bioteknologia, ja voi vaikuttaa myös tätä kautta moniin toimialoihin (Grodal ja Grid, 2006).

Nanoteknologian laajan soveltuvuuden ja diffuusion kannalta keskeinen kysymys on kuitenkin se, milloin ja millä tavalla 'alhaalta ylös'-lähestymistapa lyö itsensä läpi ja on toteutettavissa turvallisesti, hallitusti ja taloudellisesti järkevällä tavalla. Tällä hetkellä 'ylhäältä alas'-lähestymistapa on realistisin teollisen mittakaavan saavuttamisen näkökulmasta. 'Alhaalta ylös'-lähestymistapa on vahvasti perustutkimuksellinen ja taloudellisesti vielä mahdottoman kallis toteuttaa teollisessa mittakaavassa, mutta lienee se, jolla odotetaan merkittävimpiä teknologisia ja myös taloudellisia läpimurtoja pidemmällä aikavälillä. Yksi merkittävä 'alhaalta ylös'-lähestymistavan kehittämistä tukeva kannustin elektronikkateollisuudessa on pyrkimys tukea Mooren lakia mikroprosessorien hintavakioidusta informaatiokapasiteetin kaksinkertaistumisesta puolentoista vuoden välein (Ratner ja Ratner, 2003).

Nanoteknologian laajamittaisen soveltuvuuden arvioiminen kannattaa jälleen myös suhteuttaa bioteknologiaan ja ICT:hen. Freeman (2003) korostaa tässä yhteydessä, että bioteknologian laajemman diffuusion yksi pullonkaula on sen huonompi hyväksyttävyyys, ei pelkästään kuluttajien ja poliittisten päättäjien keskuudessa, vaan myös yrityksissä. Lisäksi bioteknologia ei ole vielä selvästi kyennyt osoittamaan taloudellisia hyötyjä esimerkiksi tuotannossa. ICT:n kehitys eroaa tästä merkittävästi. ICT on hyvin laajasti hyväksytty teknologia, jolle annetaan myös julkisesti merkittävä rooli yhteiskunnan kehittäjänä esimerkiksi erilaisissa tieto- ja osaamisyhteiskuntastrategioissa. Lisäksi ICT:n taloudelliset hyödyt on dokumentoitu lukuisissa empiirisissä tutkimuksissa (kts. esim. Maliranta ja Rouvinen, 2006). Tässä vaiheessa on vielä epäselvää, missä määrin nanoteknologian kehittäjät pystyvät välttämään bioteknologian diffuusioon liittyvät pullonkaulat, samalla aikaa aikaansaaden sitä myönteistä kehitystä ja hyväksyttävyyttä, mikä on ollut tunnunomaista ICT:lle varsinkin 1990-luvulta lähtien.

Yleiskäyttöisen teknologian neljäs tunnistuskriteeri korostaa *täydentävien teknologisten, organisatoristen tai institutionaalisten innovaatioiden merkitystä* teknologian diffuusiossa ja ulkoisvaikutusten mahdollistajina. Koska tämäntyyppiset innovaatiot yleensä syntyvät yleiskäyttöisen teknologian avainkeksintöjen vanavedessä niiden identifioiminen ja arvioiminen on erityisen vaikeata nanoteknologian kohdalla, joka on vielä varhaisessa kehitysvaiheessa. Viitaten taas nanoteknologiakehityksen peruslähtökohtiin, 'ylhäältä alas'-lähestymistapa on jo nyt synnyttänyt täydentäviä teknologisia innovaatioita liittyen lähinnä litografiaan, elektrosuihke-, leima- tai muunlaisiin tuotantotekniikoihin varsinkin elektroniikka-alalla, jolla näitä käytetään laajasti (Hall, 2005).

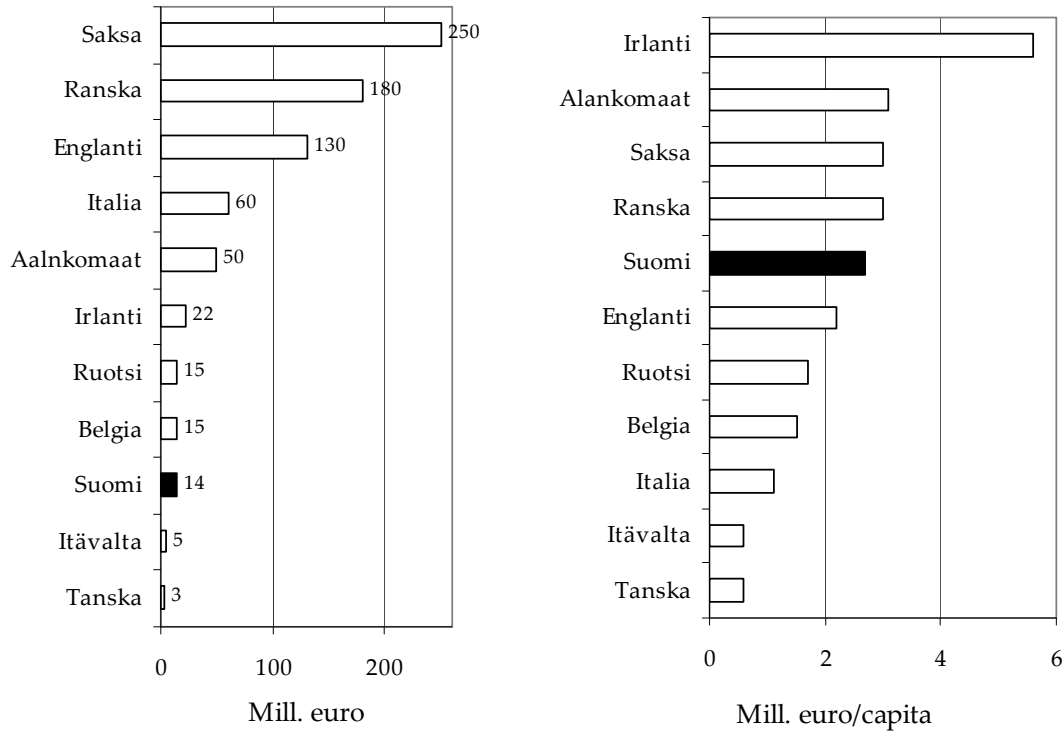
Ratner ja Ratner (2003):n mielestä nanoteknologian diffuusioon voi vaikuttaa myönteisesti myös se tosiasia, että sitä tyypillisesti sovelletaan olemassa olevien materiaalien, tuotantoprosessien ja tuotteiden ominaisuuksien parantamiseen. Näin kuluttajien on helppompaa omaksua sitä soveltavat tuotteet. ICT on ollut luonteeltaan erilainen, koska sillä yleensä luodaan täysin uudenlaisia tuotteita tai palveluita (esim. tietokone, kännykkä, Internet-pohjaiset palvelut), joiden omaksumiseen menee enemmän aika. Tämän neljännen yleiskäyttöisen teknologian tunnistuskriteerin arvioimiseen pitäisi kuitenkin sisällyttää myös erilaiset eettiset näkökulmat ja turvallisuusriskit liittyen esim. nanopartikkeleiden käyttäytymiseen ihmiskehossa tai atomien manipuloimiseen 'alhaalta ylös'-skenaariossa.

5. SUOMALAISET PANOSTUKSET NANOTEKNOLOGIAAN

Edellisestä keskustelusta huomaamme, että nanoteknologiasta saattaa kehittyä tärkeä 2000-luvun yleiskäyttöinen teknologia. Taloustieteellisen tutkimuksen kautta tiedämme myös, että sellaisenaan nanoteknologialla voi olla merkittävä vaikutus pitkän aikavälin tuottavuus- ja kasvukehitykseen, kunhan kyseinen teknologia leviää laajemmin talouden eri sektoreille ja toimialoille. Vaikka nanoteknologia on vielä varsin varhaisessa kehitysvaiheessa ja sen kaupallistamisväylät ovat vasta muotoutumassa, on selvää että myös Suomessa siihen kannattaa paneutua.

Suomessa nanoteknologian tutkimus- ja kehitystoimintaa ruvettiin rahoittamaan julkisin varoin 1990-luvun lopussa Tekesin NANO-teknologiaohjelman avulla. Nanometritason ilmiöitä on tutkittu ja sovellettu Suomessa jo paljon varhaisemmin mikroelektronikassa, lääkealalla ja diagnostiikassa. Vuonna 2005 nanoteknologia nostettiin kuitenkin vielä selvemmin esiin innovaatiopolitiikassa nk. FinNano-teknologiaohjelman lanseeraamisen yhteydessä, ja nanoteknologia on nyt myös Tekes:in yksi strateginen painopistealue. Suomen Akatemia on myös suuntautumassa nanoteknologiaan samannimisen, vuonna 2006 käynnistetyn tiedeohjelman kautta. Lisäksi opetusministeriö on päättänyt tukea alan koulutusta ja infrastruktuurin kehittämistä vuonna 2007 alkavalla ohjelmalla. Yhteenlaskettuna nanoteknologiaan tullaan näin vuoteen 2010 mennessä investoimaan julkisia varoja arvioiltaan jo noin 100 miljoonaa euroa (Lämsä et al., 2006).

Kuvio 3. Julkiset t&k-investoinnit nanoteknologiaan eräissä Euroopan maissa vuonna 2003



Lähde: Lämsä (2005), EU (2004)

Maailmanlaajuisesti julkisiin nanoteknologiainvestointeihin verrattuna Suomi on luonnollisesti aika mitätön toimija. Suomen tähänastisten investointien osuus maailman julkisista nanoteknologiaturkimusmenoista on kuitenkin arviolta 0.64 prosenttia. Suhteutettuna väkilukuun Suomi pääsee samalla viivalla huomattavasti isompien maiden, kuten Ranskan, Saksan ja Englannin kanssa (Kuvio 3).

Suomen aktivoituminen näkyy myös erityisen hyvin nanotieteisiin liittyvien julkaisujen nopeana kasvuna 1990-luvun alusta lähtien (kts. Liite). Väkilukuun suhteutettuna pärjäämme julkaisuvolyymillä mitattuna varsin hyvin myös verrattuna moniin muihin, huomattavasti isompiin maihin (Taulukko 1). Toisaalta patentoimisessa kehitys on vielä varsin vaatimatonta. Nämä luvut perustuvat julkaisu- ja patenttitietokantahakuihin, joissa tunnustetaan nanoteknologia-aiheisia julkaisuja saksalaisen Fraunhofer Gesellschaft Institutin kehittämän hakusana-algoritmin avulla (kts. tarkemmin Palmberg ja Nikulainen (2006)). Kyseinen algoritmi on tällä hetkellä yleisesti hyväksytty nanoteknologiaan keskittyvässä teknologia- ja innovaatiotutkimuksessa (esim. Noyons et al., 2003; Heinze, 2004).

Taulukko 1. Nanoteknologia julkaisut ja patentit eräissä eurooppalaisissa maissa

	Kokonaisluvut		Per capita ('000)	
	Julkaisut	Keksinnöt (patentti perheet)	Julkaisut	Keksinnöt (patentti perheet)
Yhdysvallat	83907	13609	0.29	0.05
Saksa	32136	3846	0.39	0.05
Korea	9722	2550	0.2	0.05
Sveitsi	6477	627	0.88	0.08
Alankomaat	5282	493	0.32	0.03
Ruotsi	4300	287	0.48	0.03
Suomi	2925	118	0.56	0.02
Tanska	2046	115	0.38	0.02

Lähde: Palmberg ja Nikulainen (2006)

Nanoteknologiasta on turha odottaa vastaavanlaista menestystä kuin ICT – yleiskäyttöisenä teknologiana – on Suomelle tuonut. Kysymyksessä on monessa mielessä hyvin erityyppinen teknologia kuin ICT. Nanoteknologia on esimerkiksi lähtökohtaisesti tiedeveitoisempi verrattuna varsinkin Suomen kannalta tärkeään langattomaan telekommunikaatioalaan, jossa t&k-toiminnan sovellushakuisuus korostuu standardien takia (Palmberg ja Martikainen, 2005). Tiedeveitoisuutensa takia nanoteknologiaa voisi osittain rinnastaa bioteknologiaan, niin kuin on jo aiemmin vihjattu. Toisaalta nanoteknologiaa voidaan kuitenkin myös selvemmin lähestyä sovelluskeskeisesti koska se on ainakin lähtökohtaisesti monikäyttöisempi kuin bioteknologia.

Perinteisten alojen korkea teknologiaosaaminen ja kansainvälinen kilpailukyky yhdistettynä joidenkin tieteenalojemme huippuosaamiseen voisivat olla Suomen kilpailuetuja nanoteknologiassa. Nanotieteiden ja -teknologian hyödyntäminen, varsinkin perinteisten suuryritysten olemassa olevien prosessien ja tuotteiden uudistumiseen, voisi olla se suunta, mihin nanoteknologiaa kannattaisi kehittää Suomessa. Maassamme tarvitaan nanoteknologiaan pohjautuvaa yrittäjyyttä, jolloin sen alkuvaiheen kehittämiseen ja kaupallistamiseen liittyvät ongelmat ja riskit eivät heikentäisi perinteisten suuryritysten aluikiinnostusta alaa kohtaa. Erityisen tärkeitä olisi kyetä paremmin hyödyntämään alan kasvavaa tutkimustoimintaa kaupallisesti perinteisten suuryritysten keskuudessa. Teknologian siirron kannalta voidaankin kysyä mihin suomalaiset nanoteknologiapanostukset ovat tässä vaiheessa kohdentuneet, missä määrin ne edistävät tutkija-yritysyhteistyötä sekä missä määrin nanoteknologia tuo mukanaan aidosti uusia haasteita?

6. NANOTEKNOLOGIAN SIIRTO SUOMESSA – ALUSTAVIA HAVAIN- TOJA

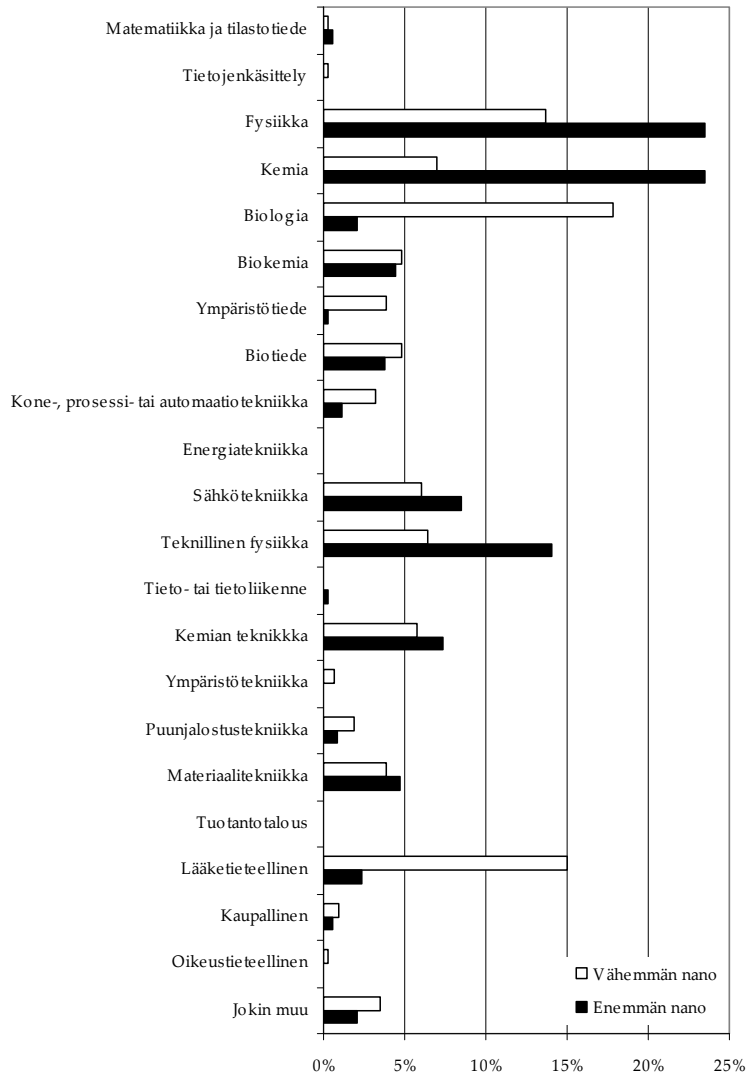
Suomen nanoteknologiakehityksestä on vielä varsin niukasti tietoa ja sen taloustieteellinen analyysi on vasta alkamassa. Olemassa olevan tiedon ja analyysien pohjalta voimme kuitenkin valottaa joitakin suuntaviivoja ja haasteita innovaatiopolitiikalle perustuen vuoden 2006 syksyllä Etlatieto Oy:ssä tehtyyn laajaan kyselyyn (kts. tarkemmin Palmberg et al., (2007)). Kyselyn kohdejoukoksi valittiin suomalaiset tutkijat ja keksijät, joiden nimi on esiintynyt yllämainituissa nanoteknologia-aiheisissa tieteellisissä julkaisuissa tai patenttihakemuksissa. Kyselyn vastausprosentti on korkea, 60 prosenttia, joka vastaa 603 tutkijaa ja keksijää 1002 henkilön kokonaispopulaatiosta. 485 näistä toimii tutkijoina joko yliopistoissa (n=378) tai tutkimuslaitoksissa (n=107) (pääosin Suomessa) ja 87 toimii yrityksissä, 31 toimii jossain muualla. Kyselyn fokuksena oli nanoteknologian siirto tutkimussektorista yrityksiin sekä tähän liittyvät haasteet. Kysely tarjoaa näin ainutlaatuisen aineiston analysoida suomalaisten nanoteknologiapanostusten suuntautumista mikrota-solla, tutkijoiden ja keksijöiden aktiivisuutta nanoteknologian siirrossa sekä tähän liittyviä erityishaasteita ja mahdollisuuksia.

Yleisesti ottaen 52 prosenttia vastaajista todella koki tekevänsä suoraan nanotekno-logiaan liittyvää tutkimusta tai kehitystyötä. Kyselyn pohjalta voi myös eritellä osajoukon, jota käyttämämme määritelmän mukaan voidaan pitää erityisen vahvasti nanoteknologi-aan suuntautuneena. 47 prosenttia kaikista, ja peräti 72 prosenttia enemmän nanotekno-logiaan suuntautuneista, oli hakenut rahoitusta Tekesin tai Suomen Akatemia FinNano-ohjelmista. Tältä osin vaikuttaa siis siltä, että FinNano-ohjelmat ovat saavuttaneet sen kohdejoukon tutkijoiden ja keksijöiden parissa, jolle ne suunniteltiin.

Teknologian siirron kannalta tutkijoiden ja keksijöiden taustakoulutus antaa hyvän kuvan alan luonteesta. Kuvion 4 mukaan perinteinen fysiikka ja kemia ovat nanoteknolo-giatutkijoiden ja keksijöiden yleisimmät koulutusalat varsinkin niillä, jotka ovat enemmän nanoteknologiaan suuntautuneita. Biologia ja lääketiede ovat myös tärkeitä koulutusaloja niiden tutkijoiden ja keksijöiden keskuudessa, joiden tutkimustyö liittyy nanoteknologi-aan löyhemmin. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että nanoteknologian ydin Suomessa ke-hittyy fysiikan ja kemian välimaastossa. Biologialähtöisillä koulutusaloilla on myös tärkeä nanoteknologiaa tukeva rooli, ja bioteknologian ja nanoteknologian kytkeytyminen toi-

siinsa tulee myös tässä hyvin esiin. Tohtorintason koulutus on 78 prosentilla kaikista vastaajista, joten kyselyn piirissä on tutkijauralla jo varsin pitkälle edenneitä henkilöitä.

Kuvio 4. Tutkijoiden ja keksijöiden koulutustausta



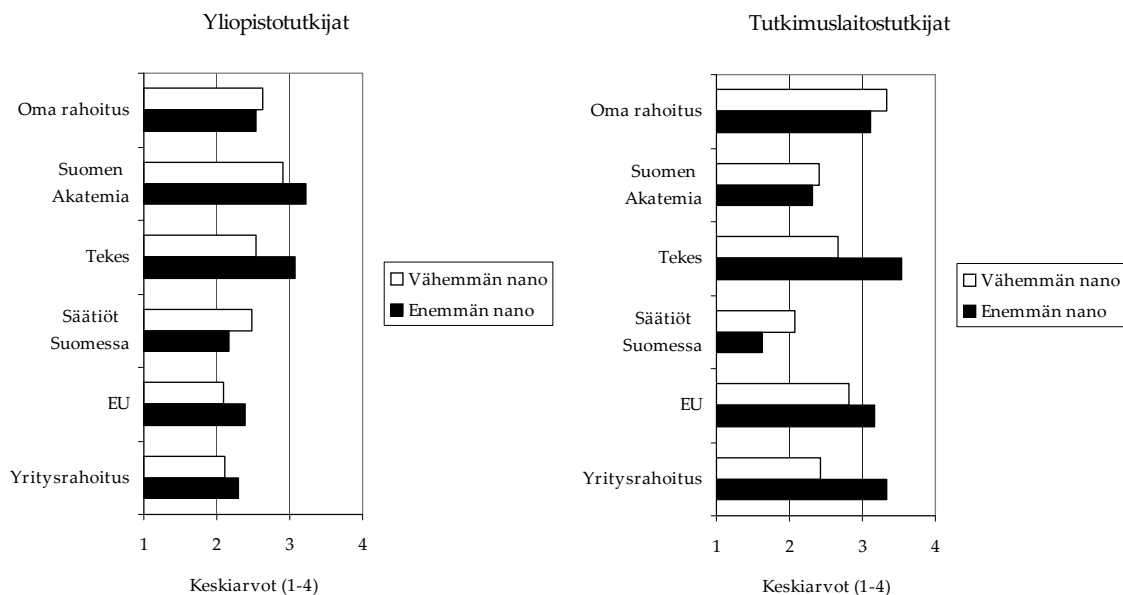
Lähde: Palmberg et al. (2007)

Koulutustaustan lisäksi tutkimusryhmien luonne on tärkeä taustavaikuttaja, kun puhutaan teknologian siirron mahdollisuuksista ja haasteista julkisen tutkimusektorin tutkijoiden näkökulmasta, johon siirrytään alla olevissa kuvioissa (tällöin havaintojen lukumäärä siis tippuu 485:teen). Vaikuttaa siltä, että varsinkin selvemmin nanoteknologiaan suuntautuvat tutkimusryhmät ovat kooltaan suurempia ja poikkitieteellinen lähestymis-

tapa tutkimusongelmiin on yleisempää. Rahoitusrakenteissa on kuitenkin selvempiä eroja (Kuvio 5). Oman budjettirahoituksen ohella Suomen Akatemian ja Tekesin merkitys tutkimuksen rahoittajana korostuu muihin lähteisiin verrattuna, ja erityisesti tutkimuslaitoksissa. Lisäksi suoran yritysrahoituksen tärkeys näkyy selvemmin. Kautta linjan huomataan myös muiden kyselyn kysymysten kautta, että vahvimmin nanoteknologiaan suuntautuneiden tutkimusryhmien saama yritysrahoitus koetaan tutkimustyön kannalta suhteellisesti tärkeämpänä.

Vaikuttaa siis alustavasti siltä, että erityisesti Tekes:in aktivoituminen alalla näkyy yritysrahoituksen lisääntymisenä tutkimusryhmissä. Näin varhaisessa vaiheessa on kuitenkin vaikeata arvioida mikä on yritysten aktiivisuus ja niiden vaikutus nanoteknologian kehittämiseen. Jo kyselyn suunnittelussa otettiin huomioon myös se mahdollisuus, että vastaajilla saattaa olla vahva kannustin ilmoittautua nanoteknologia-aktiiviseksi esim. rahoituksen varmistamiseksi. On myös hyvä pitää mielessä, että nanoteknologian määrittelyminen kyselyn kautta on hankalaa.

Kuvio 5. Tutkijaryhmien rahoitusrakenne

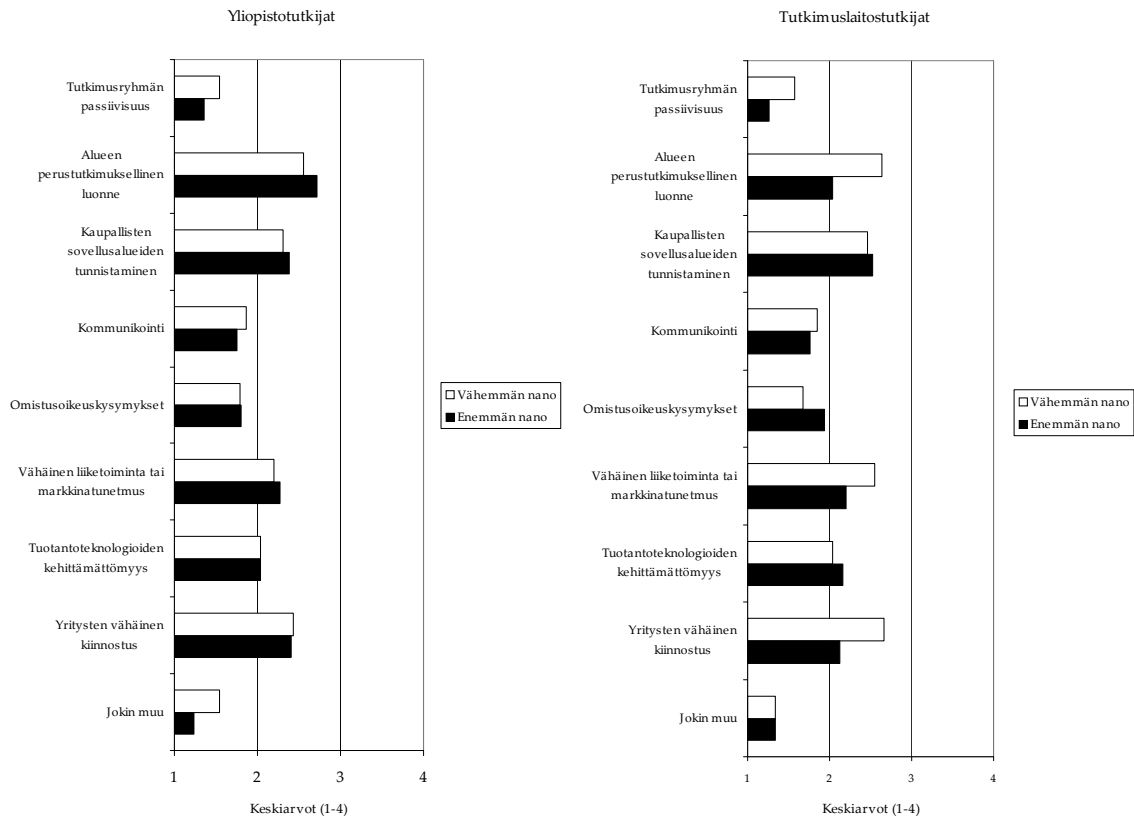


Lähde: Palmberg et al. (2007)

Teknologian siirron suurimmat haasteet ilmenevät selvimmän tutkijoiden ja yritysten välisessä yhteistyössä, jossa vastaajien erilaiset taustat, kannustimet ja roolit nousevat

esille. Kuviossa 6 tarkastellaan tutkijoiden kokemia haasteita tutkimusryhmien ja tutkimusalan ominaisuuksien, käytännön yhteistyön sekä yritysten teknologiatason ja suuntautumisen kautta.

Kuvio 6. Tutkijoiden kokemat haasteet kanssakäymisessä yritysten kanssa



Lähde: Palmberg et al. (2007)

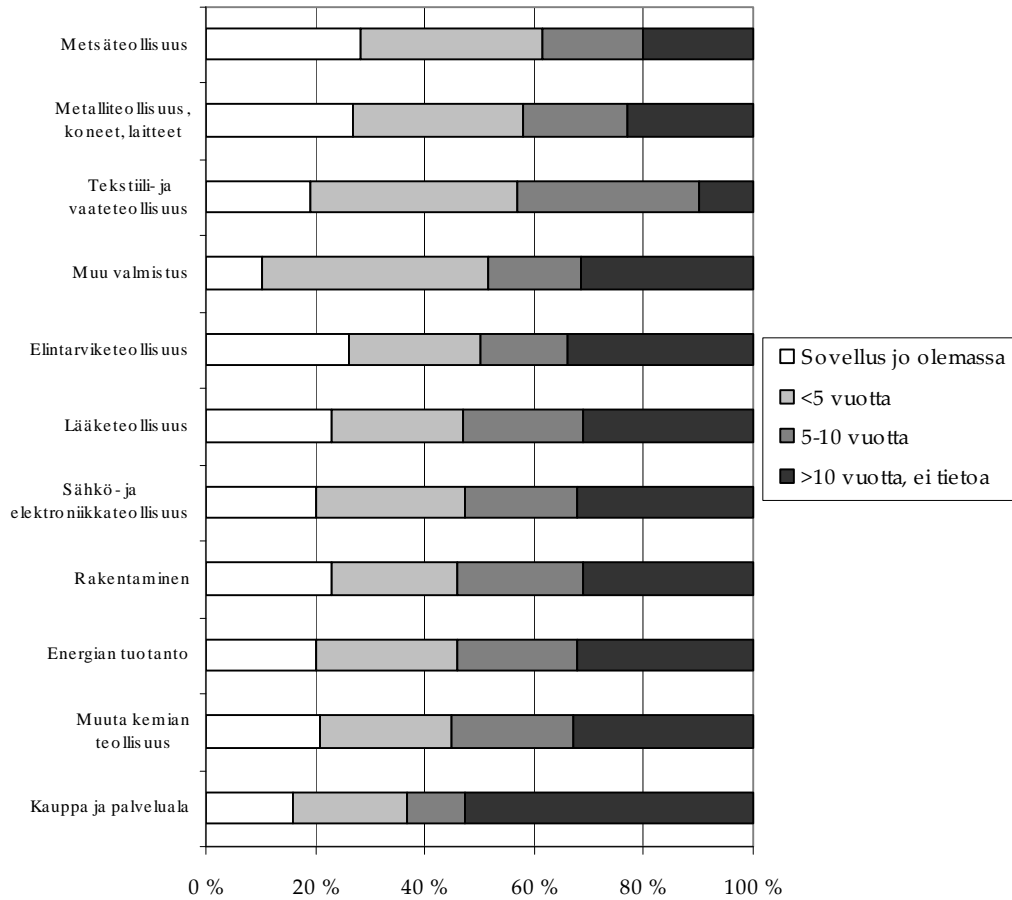
Selvästi suurimmat haasteet liittyvät nimenomaan nanoteknologian varhaiseen kehitysvaiheeseen ja tiedevetoisuuteen. Tutkijoiden mielestä alan perustutkimuksellinen luonne sekä kaupallisten sovellusten identifioiminen haittaavat tutkimustiedon ja tulosten siirtämistä yrityksille. Toisaalta liiketoiminta- ja markkinaosaamisen puute tunnustetaan myös ongelmaksi. Ehkä huolestuttavinta on se, että tutkijoiden mielestä yritykset eivät ainakaan vielä vaikuta kovin kiinnostuneilta nanoteknologian soveltamisesta. Näiden kaikkien kohdalla huomataan kuitenkin, että aktiivisemmin nanoteknologiaan suuntautuneiden tutkijoiden kohdalla nämä haasteet korostuvat suhteellisesti vähemmän. Voi olla, että FinNano-ohjelmien avulla on osittain pystytty edistämään tutkijoiden ja yritysten yhteisymmärrystä alaa kohtaan.

Nanoteknologian menestyksekkään kaupallistumisen kannalta on tärkeitä, että se jo varhaisessa vaiheessa suuntautuu aloille, joilla Suomessa on kansainvälisesti kilpailukyistä osaamista ja menestyviä veturiyrityksiä. Bioteknologian yksi ongelma on ollut sen kytkeytyminen lääketieteeseen, jossa Suomella ei juuri ole vahvaa teollista taustaa ja bioteknologian keksintöjen kaupallistajia (Luukkonen ja Palmberg, 2007). Perustutkimuksen korkean tason ylläpitäminen on välttämätöntä nanoteknologian hyödyntämisen kannalta. Mutta on myös tärkeitä tiukan kansainvälisen kilpailutilanteen takia pyrkiä suuntaamaan nanotieteen ja -tekniikan kehitystä sellaisille toimialoille, joille sen kehittäminen ja kaupallistamisajat ovat Suomen näkökulmasta lyhyempiä.

Kun tarkastellaan sovellusaloja, huomataan tässä vaiheessa eniten kaupallisia sovellusmahdollisuuksia elektroniikka-, metalli ja konealoilla, sekä kemianteollisuudessa (kts. Palmberg et al. (2007)). Lääketieteellisyys nousee mielenkiintoisella tavalla esiin, ja on ilmeisesti myös seurausta siitä, että kyselyyn vastanneiden joukossa on paljon henkilöitä joilla on lääketieteellinen koulutus. Tärkeä tähän havaintoon liittyvä kysymys on miten nanoteknologian kytkeytyminen bioteknologiaan vaikuttaa biolääkealan kehitykseen Suomessa. Nanoteknologia voisi ehkä avata uusia kaupallistamispolkuja. Nanoteknologian kaupallistamisessa sekä yritystoiminnassa että innovaatiopolitiikassa pitäisi kuitenkin myös ottaa huomioon ja välttää bioteknologian kehittämiseen liittyviä sudenkuoppia.

Kuviossa 7 esitetään nanoteknologia-alan tutkijoiden näkemys soveltamisaloista. Lisäksi kuviossa näkyvät toimialoittain tutkijoiden arviot siitä, miten nopeasti heidän oma tutkimuksensa voisi saavuttaa ensimmäisiä kaupallisia sovelluksia.

Kuvio 7. Tutkijoiden näkemys sovellusaloista ja kaupallistamisajoista



Lähde: Palmberg et al. (2007)

Vaikka alan tutkijat pääosin tunnistavat nanoteknologian soveltamisalueet korkean teknologian toimialoilla, on mielenkiintoista huomata, että kaupallistamisaikojen suhteen tilanne vaikuttaa toisenlaiselta. Niiden tutkijoiden mukaan, joiden mielestä perinteisemmät toimialat kuten metsä-, metalli- ja koneteollisuus, tekstiili- ja vaate-, sekä elintarvike- teollisuus soveltuisivat suomalaiselle nanoteknologialle paremmin, kaupallistamisajat ovat huomattavasti lyhyempiä. Toisin sanoin, vaikuttaa siltä, että monet perinteiset alat voivat tarjota korkean teknologian aloja nopeamman kaupallistamiskanavan suomalaiselle nanoteknologialle. Lääketeollisuus on tässä ääriesimerkki pitkistä kaupallistamisajoista, jotka aiheutuvat alan säätelystä ja vaatimuksista selvittää kliinisillä kokeilla uusien lääke- aineiden terveysvaikutuksia (Palmberg, 2006). Tiedämme myös, että monet perinteiset alat Suomessa jo ovat – vähäisistä t&k-panostuksistaan huolimatta – varsin edistyneitä korkean teknologian käyttäjiä (Palmberg, 2001).

7. YHTEENVETO

Tässä työpaperissa pohditaan, millä tavoilla nanoteknologia voisi kehittyä yleiskäyttöiseksi teknologiaksi sekä minkälaisia haasteita ja mahdollisuuksia siihen liittyy Suomen näkökulmasta. Kyseinen teknologia-ala on vielä varsin varhaisessa kehitysvaiheessa ja sen analysoiminen on siksi osittain spekulatiivista. Taloustieteen avulla voidaan kuitenkin jossain määrin konkretisoida, mistä nanoteknologiassa on kysymys ja miten se saattaa vaikuttaa yritysten, toimialojen ja maiden tuottavuuteen ja kasvukehitykseen sekä myös analysoida sen kehityspiirteitä. Yksi keskeinen kysymys, mihin tässä työpaperissa paneudutaan, on se missä määrin ja millä tavalla nanoteknologiasta todellakin voisi kehittyä yleiskäyttöinen teknologia, usein oletetaan että se voisi täten nousta ICT:n kaltaiseksi pitkän aikavälin tuottavuus- ja kasvugeneraattoriksi maailmantaloudessa.

Nanoteknologia tarjoaa kieltämättä runsaasti taloudellisia kehitysmahdollisuuksia ja se on sovellettavissa monilla eri toimialoilla ja moneen eri käyttötarkoitukseen. Nanoteknologia vaatii, ja on osittain jo luonutkin, täydentäviä innovaatioita. Toisaalta sen laajamittaisempi leviäminen tulee vielä vaatimaan uudenlaisia organisaatioita, regulaatioita, pohdintaa turvallisuusriskeistä sekä tärkeiden eettisten kysymysten ratkaisemista. Tässä vaiheessa voi kuitenkin suhteellisen luotettavasti arvioida, että nanoteknologia yltänee – ainakin joissain muodossa – yleiskäyttöiseksi teknologiaksi 2000-luvulla ja se tulee näin jossain vaiheessa vaikuttamaan kansantalouden tuottavuus- ja kasvukehitykseen.

Nanoteknologiaan investoidaan tällä hetkellä runsaasti julkisia t&k-varoja ja monet merkittävät monikansalliset yritykset ovat myös aktivoituneet alalla. Millä eväillä Suomi voi osallistua tähän kehitykseen, miten nanoteknologia voisi kehittyä ja kaupallistua Suomessa ja minkälaisen aseman voimme saavuttaa tällä tutkimisvetoisella alalla kansainvälisesti? Edellä on todettu, että nanoteknologiasta on turha odottaa ICT:n kaltaista menestystä. ICT on lähihistoriassa ehkä selvin esimerkki yleiskäyttöisestä teknologiasta, joka on myös keskeisesti edistänyt Suomen tuottavuus- ja kasvukehitystä. ICT on kuitenkin luonteeltaan varsin erilainen teknologia, johon Suomi pääsi osalliseksi pitkälti Nokian ansioista siinä vaiheessa kun avainteknologiat oli jo kehitetty ja GSM-standardi levisi maailmalle. On hyvin epätodennäköistä että vastaavanlainen kehitys voisi toistua Suomessa. Bioteknologiasta on joskus povattu ICT:n kaltaista menestystä. Bioteknologia on tiedevetoisempi ja tästä syystä luonteeltaan samantyyppinen kun nanoteknologia. Bioteknologian suurin haaste Suomessa

on kuitenkin riskirahoituksen ja teollistajien puute, varsinkin lääketieteellisyydessä, mihin suomalainen bioteknologian ehkä selvimmin on kytkeytynyt.

Suomi on luonnollisesti maailmalla melko pieni toimija nanoteknologiassa. Suhteutettuna väkilukuun suomalainen nanoteknologia on kuitenkin noussut t&k -panostusten kautta suhteellisen merkittäväksi uudeksi tiede- ja teknologia-alaksi. Julkisten nanoteknologia-panosten ja -tieteellisten julkaisujen suhteellisella määrällä mitattuna Suomi yltää jo samalle tasolle kuin moni muu isompi eurooppalainen maa. Kaupallistamisen kannalta yksi olennainen kysymys on se, miten olemassa olevat perinteiset yritykset voisivat hyötyä suomalaisesta nanotieteestä.

Tuoreen kyselyaineiston valossa näyttää alustavasti siltä, että FinNano-ohjelmat ovat aktivoineet alan tutkijoita ja myös edistäneet heidän kanssakäymistään yritysten kanssa, vaikka tarvitsemme vielä syvällisempiä tutkimuksia ohjelmien vaikuttavuuden selvittämiseksi. Suurin haaste teknologian siirrossa liittyy nanoteknologian varhaiseen kehitysvaiheeseen ja tiedevetoisuuteen, vaikka Suomessa löytyy myös esimerkkejä jo pitkälle kehittyneistä kaupallistamispoluista. Tällä hetkellä vaikuttaa siltä, että nanotiede ja -teknologia ovat suuntautumassa korkean teknologian toimialoille kuten elektroniikka-, lääke- ja kemianteollisuus. Monilla perinteisemmällä aloilla kaupallistamisajat saattavat kuitenkin kyselyn mukaan olla Suomessa nopeampia.

Nanoteknologian varhaisen kehitysvaiheen takia on vielä vaikeata tuottaa pitkälle meneviä suosituksia innovaatiopolitiikalle. Tarvitaan tarkempia analyysejä kehityksestä ja nanoteknologian kytkeytymisestä Suomen yrityspopulaatioon, vahvoihin toimialoihin ja klustereihin. Tässä voidaan kuitenkin listata joukko tärkeitä kysymyksiä, joihin myös Etlatieto Oy/ETLA:ssa käynnissä oleva taloustieteellinen tutkimus voi tuoda täsmennyksiä ja osittaisia vastauksia:

- Miten nanoteknologia eroaa ICT:stä ja bioteknologiasta, miten mahdolliset eroavuudet tulisi ottaa huomioon alan rahoituksen, ohjelmakäytännön organisoimisessa ja innovaatiopolitiikassa laajemmin?
- Miten muissa pienissä avotalouksissa (esim. Hollannissa, Itävallassa, Sveitsissä, Tanskassa tai Ruotsissa) lähestytään nanoteknologiaa, mitä voimme oppia muiden maiden nanoteknologiaan kohdistuvasta innovaatiopolitiikasta?

- Miten paljon t&k-rahoitusta tulisi ohjata nanotieteellisen perustutkimukseen, missä vaiheessa yritykset pitäisi pyrkiä kytkemään perustutkimukseen?
- Missä määrin nanoteknologia tuo mukanaan aidosti uusia haasteita teknologian siirron näkökulmasta, missä määrin nanoteknologia pelkästään on uusi nimi `vanhalle' fysiikan ja kemian välimastoon sijoittuvalle tutkimukselle?
- Mille toimialoille nanoteknologian t&k-toimintaa tulisi yrittää suunnata, voisiko nanoteknologia olla perinteisten toimialojen merkittävä uudistuja Suomessa?
- Minkälainen aseman nanoteknologian arvoketjussa Suomella voisi olla globaalitaloudessa?

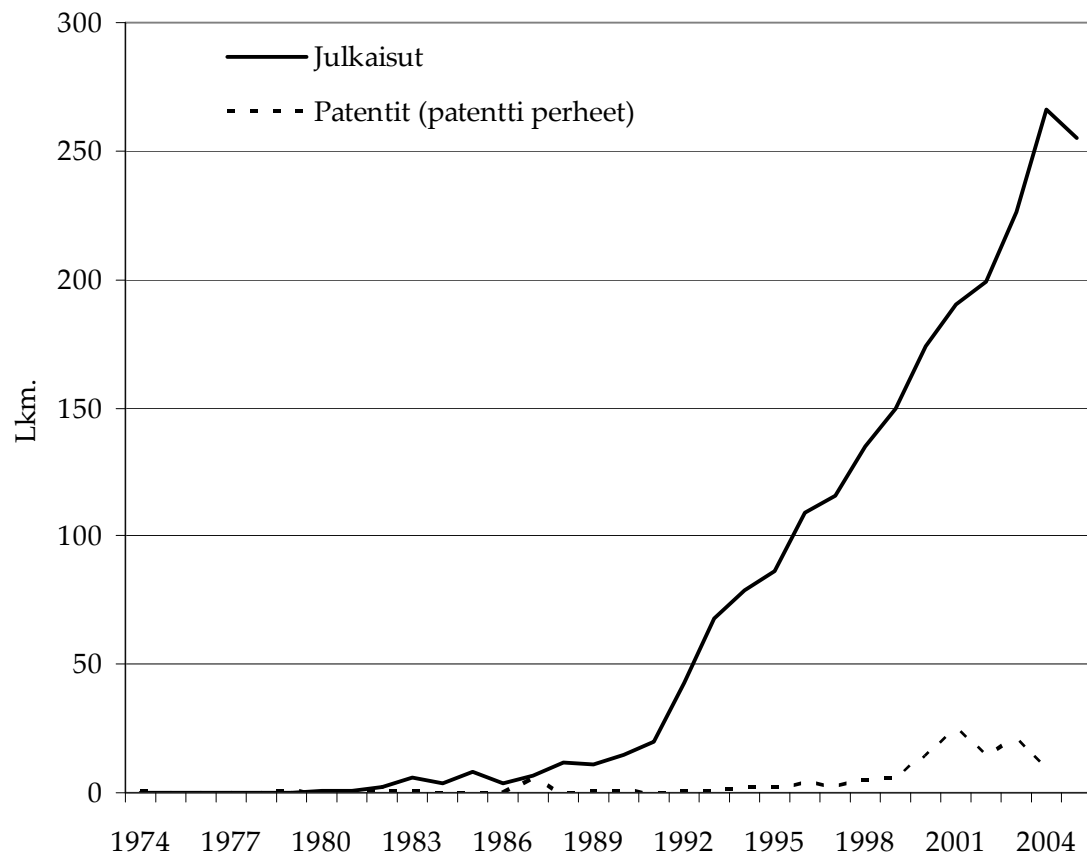
KIRJALLISUUS

- Bresnahan, T ja Trajtenberg, M. 1995. General Purpose Technologies "Engines of Growth?". *NBER Working Papers* 4148.
- Darby, M ja Zucker, L. 2003. Grilichesian Breakthroughs: Inventions of Methods of Inventing and Firm Entry in Nanotechnology, *NBER Working Papers* 9825.
- Drexler, E. 1990. *Engines of creation – The coming era of nanotechnology*. London: First Estate Limited.
- EU. 2004. Towards a European strategy for nanotechnology. European Commission Communication.
- Freeman, C. 2003. Policies for Developing New Technologies, *SPRU Working Paper series*.
- Freeman, C ja Louca, F. 2002. *As times go by: from industrial revolutions to the information revolution*. Oxford University Press.
- Grodal, S ja Thoma, G. 2006 Cross Pollination in Science and Technology: The Emergence of the Nanobio Subfield, unpublished manuscript
- Hall, J. 2005. *Nanofuture – what's next for nanotechnology?* New York: Prometheus Books.
- Heinze, T. 2004. Nanoscience and Nanotechnology in Europe: Analysis of Publications and Patent Applications including Comparisons with the United States, *Nanotechnology, Law and Business* 1, 4/2004, 427-445.
- Helpman, E (ed.). 1998. *General Purpose Technologies and Economic Growth*. Cambridge: MIT Press.
- Hermans, R ja Kulvik, M. 2006. *Sustainable biotechnology development – New insights into Finland*. Helsinki: Taloustieto Oy.
- Huang, H. Chen, C ja Roco, M. 2004. International Nanotechnology Development in 2003: Country, Institution, and Technology Field Analysis Based on USPTO Patent Database, *Journal of Nanoparticle Research*, 6(4), 325-354.
- Huang, Z, Chen, H, Yan, L ja Roco, M. 2005. Longitudinal nanotechnology development (1991-2002): National Science Foundation funding and impact on patents. *Journal of Nanoparticle Research*, 7, 343-376.
- Jovanovic, B ja Rousseau, P. 2005. General Purpose Technologies, *NBER Working Papers* 11093,
- Koski, H. 2005. Teknologian diffuusio ja talouskasvu. Teoksessa Hyytinen, A ja Rouvinen, P (toim.) *Mistä talouskasvu syntyy?*, ETLA B: 214.
- Langlais, R, Bruun, H, Hukkinen, J ja H. Fogelberg. 2004. Anticipate the Social Dimensions of Nanotechnology, *VEST: Journal for Science and Technology Studies*, Vol. 17, no. 3-4: 23-35.
- Lipsey, R, Carlaw, K ja Bekar, C. 2005. *Economic Transformations – General purpose technologies and long term economic growth*. Oxford University Press.
- Luukkonen, T ja Palmberg, C. Ilmestyy 2007. Living up to the expectations set by ICT? The case of biotechnology commercialization in Finland. *Technology Analysis and Strategic Management*.
- Lämsä, M. 2005. Nanoteknologia. Tiede ja Teknologia 2004. Helsinki: Tilastokeskus.
- Lämsä, M, Palmberg, C, Nikulainen, T, Koponen, P ja Juvonen, L. 2006. Nanotechnology: The Potential to Drive Future Economic Growth. *Kemia-Kemi*, vol. 32, 6.
- Maliranta, M ja Rouvinen, P. 2006. Informational mobility and productivity: Finnish evidence. *Economics of innovation and New Technology*, vol. 15:6, 605-616.

- Marinova, D ja McAleer, M. 2003. Nanotechnology strength indicators: international rankings based on US patents, *Nanotechnology*, Vol. 14
- Moed, H, Glänzel, W ja Schmoch, U (toim.). 2004. *Handbook of quantitative science and technology research – The use of publication and patent statistics in studies of S&T systems*. Dodrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Noyons, E, Buter, R, van Raan, R, Schmoch, U, Heinze, T, Hinze, S and Rangnow, R. 2003. Mapping Excellence in Science and Technology across Europe, Nanoscience and Nanotechnology, Brussels
- OPM. 2005. *Nanotieteen keihäänkärjet Suomessa*. Opetusministeriön selvityksiä 2005:39.
- Palmberg, C. 2001. Sectoral patterns of innovation and competence requirements – The case of low-tech industries. *Sitra Report Series 8*.
- Palmberg, C. 2006. The sources and success of innovations – Determinants of commercialization and break-even times. *Technovation*, 26.
- Palmberg, C ja Nikulainen, T. 2006. Industrial renewal and growth through nanotechnology – An overview with focus on Finland. *ETLA Keskusteluaiheita*, no. 1020.
- Palmberg, C, Pajarinen, M ja Nikulainen, T. 2007. Transferring science-based technologies to industry – Does nanotechnology make a difference? *ETLA Keskusteluaiheita*, no. 1064.
- PCAST. 2005. The national nanotechnology initiative at five years: Assessment and recommendations of the national nanotechnology advisory board.
- Ratner, M ja Ratner, D. 2003. *Nanotechnology – A gentle introduction to the next big idea*. New Jersey: Prentice Hill.
- Rosenberg, N. 1982. *Inside the black box*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Schumpeter, J. 1942. *Capitalism, socialism and democracy* (english translation from 1976). New York: Harper and Brothers.
- Verspagen, B, 2005. Innovation and Economic Growth. Teoksessa Fagerberg, J, Mowery, D ja Nelson, R (toim.) *The Oxford Handbook of Innovation*. Oxford University Press.
- Zucker, L and Darby, M. 2005. Socio-economic Impact of Nanoscale Science: Initial Results and NanoBank, *NBER Working Papers* 11181.

LIITE

Suomalaiset nanoteknologiajulkaisut (tieteelliset julkaisut) ja patentit (patentti perheet)
1974-2004



Lähde: Palmberg ja Nikulainen (2006)

ELINKEINOELÄMÄN TUTKIMUSLAITOS (ETLA)
THE RESEARCH INSTITUTE OF THE FINNISH ECONOMY
LÖNNROTINKATU 4 B, FIN-00120 HELSINKI

Puh./Tel. (09) 609 900
Int. 358-9-609 900
<http://www.etla.fi>

Telefax (09) 601753
Int. 358-9-601 753

KESKUSTELUAIHEITA - DISCUSSION PAPERS ISSN 0781-6847

Julkaisut ovat saatavissa elektronisessa muodossa internet-osoitteessa:
<http://www.etla.fi/finnish/research/publications/searchengine>

- No 1039 HANNU HERNESNIEMI – ESA VIITAMO, Pääomasijoitukset ympäristöalalla ja tilastollisen seurannan kehittäminen. 22.09.2006. 42 s.
- No 1040 MARKKU KOTILAINEN, Finland's Experiences and Challenges in the Euro Zone. 20.09.2006. 34 p.
- No 1041 HANNU PIEKKOLA, Tax Cuts and Employment: Evidence from Finnish Linked Employer-Employee Data. 23.10.2006. 32 p.
- No 1042 ELAD HARISON – HELI KOSKI, Innovative Software Business Strategies: Evidence from Finnish Firms. 02.10.2006. 28 p.
- No 1043 VILLE KAITILA – REIJO MANKINEN – NUUTTI NIKULA, Yksityisten palvelualojen kansainvälinen tuottavuusvertailu. 13.10.2006. 50 s.
- No 1044 SAMI NAPARI, Perhevapaiden palkkavaikutukset: Katsaus kirjallisuuteen. 09.10.2006. 18 s.
- No 1045 MIKA PAJARINEN – PETRI ROUVINEN – PEKKA YLÄ-ANTTILA, T&K:n verokannustimien mahdollisia vaikutuksia suomalaisten yrityskyselyjen valossa. 13.10.2006. 29 s.
- No 1046 LAURA VALKONEN, Verokannustimet innovaatiopolitiikan välineenä – Katsaus verokannustimien käyttöön OECD-maissa. 13.10.2006. 26 s.
- No 1047 ALBERTO DI MININ – CHRISTOPHER PALMBERG, A Case for Non-Globalisation? – The Organisation of R&D in the Wireless Telecommunications Industry. 23.10.2006. 28 p.
- No 1048 TUOMO NIKULAINEN – RAINE HERMANS – MARTTI KULVIK, Patent Citations Indicating Present Value of the Biotechnology Business. 25.10.2006. 21 p.
- No 1049 TOMI KYYYRÄ – MIKA MALIRANTA, The Micro-Level Dynamics of Declining Labour Share: Lessons from the Finnish Great Leap. 02.11.2006. 35 p.
- No 1050 KARI E.O. ALHO, Structural Reforms in the EU and The Political Myopia in Economic Policies. 03.11.2006. 30 p.
- No 1051 MIKKO KETOKIVI, When Does Co-Location of Manufacturing and R&D Matter? 03.11.2006. 22 p.
- No 1052 MIKA PAJARINEN – PETRI ROUVINEN – PEKKA YLÄ-ANTTILA, Uusyrittäjien kasvuhakuisuus. 03.11.2006. 77 s.
- No 1053 RAIMO LOVIO, Sijainti seuraa strategiaa: Kokonaiskuva suomalaisten monikansallisten yritysten globaalien karttojen muutoksista 2000 – 2005. 03.11.2006. 30 s.

- No 1054 KARI E.O. ALHO – NUUTTI NIKULA, Productivity, Employment and Taxes – Evidence on the Potential Trade-offs and Impacts in the EU. 10.11.2006. 24 p.
- No 1055 JUSTIN BYMA – AIJA LEIPONEN, Can't Block, Must Run: Small Firms and Appropriability. 11.11.2006. 30 p.
- No 1056 AIJA LEIPONEN, Competing Through Cooperation: Standard Setting in Wireless Telecommunications. 11.11.2006. 30 p.
- No 1057 TERTTU LUUKKONEN – MARI MAUNULA, Riskirahoituksen merkitys biotekniikka-alalla – Pääomasijoittajien vertailu yritysten näkökulmasta. 14.11.2006. 50 s.
- No 1058 VESA KANNIAINEN, Yrittäjyyden ja yritysten verokannustimet. 08.12.2006. 28 s.
- No 1059 JYRKI ALI-YRKKÖ, Ulkoistus ja toimintojen siirrot Suomesta ulkomaille – Katsaus 2000-luvun alun tilanteesta. 11.12.2006. 24 s.
- No 1060 OLLI-PEKKA RUUSKANEN, Time Use during the Parental Leave and the Return to Employment. 30.12.2006. 32 p.
- No 1061 VILLE KAITILA – NUUTTI NIKULA – JUDIT KARSAI, Suomalaiset yritykset Tšekin, Slovakian, Unkarin ja Slovenian markkinoilla. 18.12.2006. 90 s.
- No 1062 NIKU MÄÄTTÄNEN – PANU POUTVAARA, Should Old-age Benefits be Earnings Tested? 18.12.2006. 24 p.
- No 1063 AIJA LEIPONEN – CONSTANCE E. HELFAT, When Does Distributed Innovation Activity Make Sense? Location, Decentralization, and Innovation Success, 20.12.2006. 32 p.
- No 1064 CHRISTOPHER PALMBERG – MIKA PAJARINEN – TUOMO NIKULAINEN, Transferring Science-Based Technologies to Industry – Does Nanotechnology make a Difference? 04.01.2007. 64 p.
- No 1065 NIKU MÄÄTTÄNEN – MIKA MALIRANTA, T&K-toiminnan verokannustimet ja yritysdynamiikka. 04.01.2007. 23 s.
- No 1066 TARMO VALKONEN, Tutkimus- ja tuotekehitysinvestointien verotuki. 11.01.2007. 24 s.
- No 1067 TERTTU LUUKKONEN – MARI MAUNULA, Non-financial Value-added of Venture Capital: A Comparative Study of Different Venture Capital Investors. 18.01.2007. 26 p.
- No 1068 MARKKU MAULA, Verokannustimet yksityishenkilöiden riskipääomasijoitusten aktivoinnissa. 22.01.2007. 40 s.
- No 1069 OLAVI RANTALA, Palvelualojen kilpailu ja hinnanmuodostus kansainvälisessä vertailussa. 22.01.2007. 40 s.
- No 1070
- No 1071
- No 1072 CHRISTOPHER PALMBERG, Nanoteknologiastako seuraava yleiskäyttöinen teknologia? – Havaintoja Suomen näkökulmasta. 08.02.2007. 25 s.

Elinkeinoelämän Tutkimuslaitoksen julkaisemat "Keskusteluaiheet" ovat raportteja alustavista tutkimustuloksista ja väliraportteja tekeillä olevista tutkimuksista. Tässä sarjassa julkaistuja monisteita on mahdollista ostaa Taloustieto Oy:stä kopiointi- ja toimituskuluja vastaavaan hintaan.

Papers in this series are reports on preliminary research results and on studies in progress. They are sold by Taloustieto Oy for a nominal fee covering copying and postage costs.