

# Sähköpurje, Aurinkoa ja vettä

Sähköpurjekolumni 17.1.2008

Aurinko, vesi ja ravinteet ovat elämän perusedellytykset. Missä vain on niitä kolmea, elämä rönsyilee, jos yksikin puuttuu, on autiota. Aurinkoa ja vettä käytetään myös tämän numeron artikkelissa "Sähköpurje, aurinkovoimasatelliitit ja energiantuotanto", joka julkaistiin alunperin Arkhimedes-lehdessä viime kesänä.

Sähköpurjeilla voitaisiin hakea asteroideilta vettä, josta tehtäisiin kiertoradalla rakettipolttoainetta (vetyä ja happea). Jos jäisiä asteroideja on lähellä Maata, rahoitus kannattaisi perinteisemmälläkin tekniikalla. Joka tapauksessa näin välttyttäisiin laukaisemasta polttoainetta Maasta, mikä tekisi avaruustoiminnasta halvempaa. Tätä infrastuktuuria voisi käyttää

moneen tarkoitukseen, mutta erityisesti aurinkovoimasatelliittien rakentamiseen. Aurinkovoimasatelliitit ovat nykyisellään noin sata kertaa liian kalliita, näin saataisiin hinnasta pois parhaimmillaan kaksi kolmasosaa. Alennusprosentti ei siis vielä riitä, lisäksi pitää halventaa kiertoradalle nousemista. Yksityiset laukaisufirmat uskovat että nykyinen 5000 euron kilohinta halpenee tekijällä kymmenen jos palvelut tilataan heiltä ja volyymi on riittävän iso. Näiden parannusten jälkeen satelliittisähkö olisi siis enää kolme kertaa kalliimpaa kuin sähkö nykyisin.

Fissio, fuusio, maanpäällinen aurinkovoima ja aurinkovoimasatelliitti. Siinä ovat tulevaisuuden energiavaihtoehdot. Aurinkovoimasatelliitin pääkustannus on laukaisu, mutta kun laite on radallaan, se on kuin voimaverkkoinsoörin unel-

ma: tasainen teho yöt ja päivät, vuoden ympäri.

Jos kisa käydään aurinkovoiman versioiden välillä, pohjoinen Suomi tulee olemaan se maa jossa satelliittisähkö voisi olla ensimmäisenä kilpailukykyistä. Suomen kannattaisi havahtua aurinkovoimasatelliitteihin myös siksi että niitä on toistaiseksi kaavailtu vain geostationariselle radalle. Pohjoisten alueiden kannalta hyviä, nykyisten paikannussatelliittien tyyppisiä ratoja ei ole suunnitelmissa näkynyt, joten asia odottaa tekijäänsä.

*Pekka Janhunen*

## Sähköpurje Aurinkovoimasatelliitit ja energiantuotanto

Tässä pohditaan, miten kirjoittajan tekemää sähköpurjeksintöä voitaisiin käyttää aurinkokunnan tutkimiseen ja hyödyntämiseen, erityisesti aurinkovoimasatelliittien saattamiseen hinnaltaan kilpailukykyiseksi energiantuotantomuodoksi.

### SÄHKÖPURJE

Sähköpurje on suomalainen propulsiokeksintö [1,2], jossa valjastetaan aurinkotuuli (nopeus 300-800 km/s) avaruusaluksen työntövoiman lähteeksi. Sähköpurjealus pyörii hitaasti ja siitä on kelattuna ulos suurehko määrä (50-100 kpl) pitkiä (~ 20 km), johtavia liekoja (tethers). Aluksessa oleva aurinkosähköllä toimiva elektronitykki pitää aluksen ja lieat korkeassa positiivisessa potentiaalissa, jolloin lieat hylkivät aurinko-

tuulen protoneja ja poikkeuttavat niitä radoiltaan. Protonivirtauksesta välittyvän voimavaikutus liekoihin ja alukseen. Lieat on valmistettu esim. nelinkertaisesta ohuesta (20  $\mu\text{m}$ ) metallilangasta. Moninkertaisuus takaa sen, että koko lieka ei katkea, jos mikrometeoroidi katkaisee yksittäisen lankasäikeen. Ohjausta varten kunkin liean ja aluksen välissä on säätövastus eli potentiometri, jonka arvoa muuttamalla voidaan säätää liean potentiaalia yksilöllisesti. Koska aurinkotuulen liekaan kohdistama voima riippuu liean potentiaalista, säätö vaikuttaa liean kokemaan työntövoimaan, mistä saadaan keino aluksen ohjaamiseen. Työntövoiman suuruutta voidaan säätää elektronitykin jännitettä tai virtaa muuttamalla. Työntövoiman suuntaa voidaan säätää rajatusti kääntämällä lieko-

jen pyörimistasoa suhteessa aurinkotuuleen. Aurinkotuuliplasmasta siirtyy lankoihin jatkuva elektronivirta, mutta koska hiukkastiheys on matala, plasma on erittäin törmäyksetöntä ja hiukkaset liikkuvat ballistisesti, jolloin niiden on vaikea osua ohuisiin lankoihin. Tästä syystä tarvittava elektronitykin teho on melko vaatimaton (~ 500 W). Erityisen mukavaa on, että tykin tehontarve skaalautuu Auringosta mitatun etäisyyden  $r$  funktiona samoin kuin aurinkopaneelin tuottama tehokin eli  $1/r^2$ , koska aurinkotuulen plasmatiheys pienenee kuten  $1/r^2$  ja elektronivirta on verrannollinen siihen.

Perussähköpurje tuottaa 0.1-0.2 N työntövoiman, mikä antaa 100 kg painoiselle alukselle 1-2  $\text{mm/s}^2$  kiihtyvyyden. Vuodessa tämä kiihtyvyys muuttaa aluksen

liiketilaa 30-60 km/s, mikä on jo erinomainen saavutus. Nopeus 50 km/s vastaa 10 AU:ta vuodessa, eli matka Neptunukseen kestäisi kolme vuotta ja Plutoon vähän kauemmin. Sähköpurjelaitteisto (lieat, elektronytkki

sähköjärjestelmineen ja aurinkopaneelit) painaa n. 50 kg tai jopa alle, joten muulle hyötykuormalle (johon sisältyy aluksen runko) jää tilaa tässä esimerkissä 50 kg. Työntövoimaa voidaan kasvattaa lisäämällä liekojen lukumäärää, kasvattamalla niiden pituutta tai nostamalla elektronytkin tehoa. Lisäksi saattaa olla mahdollista käyttää osa sähkötehosta tykin elektronisuihkun radiotaajuiseen modulointiin, millä voidaan ehkä lämmittää liekojen ympärillä kieppuvaa vangittua elektroni-populaatiota. Lämmitys laajentaa elektroni-pilveä eli nk. Debye-pituus kasvaa. Tällöin liean sähkökenttä tunkeutuu kauemmas ympäröivään aurinkotuuliplasmaan, minkä vuoksi liean purjepinta-ala ja työntövoima kasvavat. Elektroni-lämmityksen mallintaminen on varsin hankalaa, mutta sen testaaminen avaruudessa olisi suoraviivaista. Tämän vuoksi sähköpurjeen testimissio kannattaisi rakentaa mahdollisimman pian. Kunhan sähköpurjetekniikka opitaan hallitsemaan kunnolla, näillä keinoilla sen työntövoima voitaisiin periaatteessa kasvattaa noin satakertaiseksi edellä kuvastusta, eli muutama kymmeneen newtoniin, ennenkuin nykyisten materiaalien myötölujuus ja johtavuus tulevat ongelmaksi. Materiaalifysiikan edistyminen hiilinanoputkiliekojen teolliseen valmistukseen asti voisi mahdollisesti nostaa työntövoiman ylärajaa vielä tästäkin.

## PURJEHDUS AURINKOTUULESSA

Sähköpurjeella voidaan luovia spiraalimaista rataa pitkin aurinkokunnassa sisään- tai ulospäin kohtalaisella hyötykuormalla. Matka-ajat ovat silloin samaa luokkaa kuin perinteisillä menetelmillä, mutta kustannus pienempi, koska polttoainetta ei tarvita ja laitteisto on kevyt. Toisaalta, jos hyötykuorma valitaan pieneksi, voidaan lentää radiaalisesti ulospäin suurella nopeudella, tosin ilman pysähtymis- tai paluumahdollisuutta. Sähköpurjeen ehkä tärkein rajoitus on, että se ei juurikaan toimi Maan magnetosfäärin sisällä, koska siellä ei ole aurinkotuulta.

Sähköpurjeen käytännön toteutukseen liittyy teknisesti jossain määrin haastavia osia, kuten monilankaisen liean luotettava puolaaminen sekä pitkien liekojen teollinen valmistus. Toisaalta nämä tekniset kysymykset saattavat ratketa helpostikin; emme tiedä ennen kuin insinööriyöhön on toden teolla ryhdytty. Joka tapauksessa monien mielestä 1-ulotteisiin liekoihin perustuva sähköpurje on helpompi toteuttaa kuin 2-ulotteiseen pintaan perustuva perinteinen Auringon säteilypaineeseen perustuva aurinkopurje. Aurinkopurje täytyy sitä paitsi rakentaa vain muutaman sadan nanometrin paksuisesta kalvosta ollakseen kilpailukykyinen sähköpurjeen kanssa.

Jos sähköpurje pystytään rakentamaan, se näyttäisi tuovan aurinkokunnan ulkososat ja heliopausin takana odottavan tähtienvälisen avaruuden pienten tutkimusluotainten ulottuville siten, että matka-ajat ovat samaa luokkaa kuin nykyluotainten lennoissa sisäaurinkokuntaan ja sisemmille jättiläisplaneetoille. Myös lennot sisäaurinkokunnassa tulisivat entistä halvemmiksi, vaikka matka-ajat eivät juuri muutukaan. Lisäksi voitaisiin lentää tutkimaan Aurinkoa lähietäisyydeltä tai rakentaa luotaimia, jotka leijuvat Maan ja Auringon välissä ennustaen avaruussäätä nykyistä tarkemmin ja pitemmällä varoitusaajalla.

## POLTTOAINETEHDAS KORKEALLA KIERTORADALLA

Sähköpurjeen sovellukset eivät pääty tähän, koska se pystyy myös kuljettamaan paljon itseään painavampia hyötykuormia, jos aikaa annetaan riittävästi ja jos matkan vaatima "delta-v" (kiihtyvyyden itseisarvon aikaintegraali) on kohtuullinen. Sadan kilon painoinen sähköpurjealus voisi rahdata 2 tonnia hyötykuormaa asteroidilta korkealle Maan kiertoradalle noin neljässä vuodessa. Hyötykuormaksi kannattaa ottaa asteroidilta vesijäätä ja rakentaa korkealle Maan kiertoradalle vastaanottopiste, jossa aurinkoenergialla toimiva vettä elektrolyyttisesti hajottava polttoainetehtas tuottaa nestemäistä vetyä ja happea eli rakettipolttoainetta. Emme vielä tiedä, mitkä asteroidit sisältävät jäätä tai kuinka kauas pitää mennä, jotta tavoitetaan lähin sellainen. Sähköpurje pystyy noutamaan kuorman tarvittaessa vaikka Marsin radan takaa, jossa lähes varmasti jo on jäisiä kappaleita.

Asteroideja on paljon ja sovellustamme varten riittää yksikin jääpitoinen kappale, vaikka epätyypillinen ja pienikin. Vähintään kilometrin kokoisia kappaleita on asteroidien joukossa puolisen miljoonaa. Jo yksi sellainen, jonka vesipitoisuus on 1%, sisältää 10 miljoonaa tonnia vettä. (Jäätä sisältävät kappaleet ovat todennäköisesti vanhoja komeettaytimiä, mutta emme tässä välitä kappaleiden alkuperästä vaan sanomme niitäkin asteroideiksi.)

Veden louhiminen jäiseltä asteroidilta vaatii vain hieman lämmitystä ja syntyvän vesihöyryn keräämistä tankkiin tai pussiin, jonka seinämiin sen annetaan tiivistyä tai härmistyä. Korkealla kiertoradalla oleva elektrolyyttinen polttoainetehtas ei sekään ole monimutkainen. Esimerkiksi 100 kW aurinkopaneelilla (sama suuruusluokka kuin Kansainvälisellä avaruusasemalla) voidaan tuottaa vuodessa yli 150 tonnia polttoainetta. Kylmien nestepolttoaineiden varastointi aurinkosuojien takana ei ole iso ongelma, koska tehdas sijaitsee kaukana Maasta ja sen lämpösäteilystä.

Visaisin pulma polttoainetehtaassa on veden taloudellinen siirto asteroidilta Maan kiertoradalle. Siirto voidaan tehdä vetyä polttavalla raketilla, silloin tosin matkalla kuluu todennäköisesti suurin osa valmistetusta polttoaineesta (osuus riippuu eksponentiaalisesti siitä, miten suuren delta-v:n takana jääpitoinen asteroidi sijaitsee). Jos siirto tehdään ionimoottorilla, ajoainetta tarvitaan vähemmän, mutta ionimoottoriin sopivimmat jalokaasumaiset ajoaineet, jotka eivät sedimentoidu aluksen pintoihin, valitettavasti puuttuvat ilmakehättömiltä asteroideilta. Terminen vetyä ajoaineena käytävä fissioraketti olisi vielä yksi vaihtoehto. Sen ns. ominaisimpulssi on vedyn kevyen molekyyllipainon takia noin kaksinkertainen kemialliseen rakettiin verrattuna, jolloin ajoainetta kuluu vähemmän. Mutta vety pitää valmistaa asteroidivedestä elektrolyysin avulla ja 89% veden massasta on happea, joka jouduttaisiin fissioversiossa hylkäämään avaruuteen, kun taas kemiallisessa versiossa se otetaan talteen. Tästä syystä ainakaan tavallinen kiinteää ydinpolttoainetta käyttävä fissioraketti ei olisi tässä sovelluksessa kemiallista rakettia parempi.

Sähköpurje näyttäisi siis ratkaisevan nämä logistiikkaongelmat. Siinä ei tarvita lainkaan ajoainetta ja sen hyötykuorma voi olla suuruusluokkaa 20 kertaa painavampi kuin Maasta laukaistava alus, jos edestakainen matka-aika on 5 vuotta ja kohde sijaitsee Marsin radan etäisyydellä.

Polttoainetehtaan asiakkaaksi tarvitaan uudelleenkäytettävä versio nestevetäjä polttavasta kantoraketin kolmannesta vaiheesta, mikä vaatii kohtuullisessa määrin uutta insinööriä, koska pitkä käyttöikä on nyt tärkeä suunnittelutavoite. Tämän jälkeen meillä on infrastruktuuri, jolla pystytään siirtelemään hyötykuormia radalta toiselle laukaisematta polttoainetta Maasta. Esimerkiksi laukaistaessa tonnin painoinen viestintäsateelliitti geostationariselle (GEO) radalle joudutaan nykyään ensin nostamaan kolmen tonnin massa matalalle kiertoradalle. Massasta 2/3 on polttoainetta, joka kuluu vietäessä varsinainen hyötykuorma GEO-radalle. Polttoainetehtäskonseptissa kantoraketti nostaa vain yhden tonnin massan matalalle kiertoradalle, josta uudelleenkäytettävä, asteroidipolttoaineella tankattu yhteysalus käy noutamassa sen GEO-radalle ja palaa itse (tai käydään hakemassa) polttoainetehtäälle tankattavaksi ja odottamaan seuraavaa tehtävää.

Polttoainetehtaan avulla sähköpurjeen tehokkuus saadaan käyttöön niissäkin sovelluksissa, joissa tarvitaan impulsiivista työntövoimaa (mm. laskeutuminen suurten kappaleiden pinnalle), suuria hyötykuormia (esim. miehitetty Mars-lento) tai halutaan operoida Maan kiertoradalla, joka on magnetosfäärin sisällä (lähes kaikki kaupallinen avaruustoiminta). Näin ollen, vaikka sähköpurje tuottaa vain heikkoa työntövoimaa eikä toimi Maan magnetosfäärin sisällä, sen hyödyt tuntuvat itse asiassa kaikessa avaruustoiminnassa.

### AURINKOVOIMASATELLIITIT

Aurinkovoimasatelliitti on tapa tuottaa kaupallista sähköenergiaa. Geostationarisella tai muulla radalla oleva aurinkovoimasatelliitti lähettää isoilla aurinkopaneeleilla keräämänsä sähkötehon Maahan muutaman GHz:n mikroalloilla noin kymmenen neliökilometrin kokoiseen antennikenttään [3]. Siirtoketjun

hyötysuhde aurinkokennon DC-tehosta maanpäällisen verkon AC-tehoksi on noin 50% ja yhden satelliitin tuottama teho gigawattiluokassa. Mikroaaltokelan tehotehoisuus on valittu turvallisen matalaksi niin, että esim. lintu voi lentää sen läpi tuntematta tarvetta laskeutua jäähtytelmään. Toisaalta mikroaaltokela levenee pitkällä siirtomatalla, minkä takia vastaanottavan antennikentän on oltava melko iso. Näistä ehdoista seuraa yksiköteholle luonnollinen GW-suuruusluokka, mikä sopii hyvin sähköntuotannolle, joskin se hankaloittaa pienten demonstraatiolaitosten rakentamista.

Viemällä aurinkopaneelit avaruuteen saavutetaan kaksi tärkeää etua verrattuna maanpäälliseen asennukseen. Ensimmäkin avaruudessa ei ole yötä, pilviä eikä talvea, joten voimalla tuottaa jatkuvaa sähkötehoa eikä energian varastointiongelmaa ole. Toiseksi avaruudessa voidaan käyttää konsentraattorityypisiä keräimiä, joiden pinta-alasta suurin osa on kevytrakenteista parabolihajastinta tai Fresnel-linssiä, jolloin kallista aurinkokennon puolijohdetta tarvitaan paljon vähemmän. Maanpäällisissä paneeleissa konsentraattorikeräimiä ei yleensä kannata käyttää, koska ne eivät tuota pilvisellä säällä sähköä lainkaan, vaativat aurinkoa seuraavan kääntömekanismin sekä tukirakenteita tuulikuorman takia. Jos aurinkokennon valmistuskustannukset alenevat merkittävästi nykyisestä (vähintään kertaluvulla), jälkimmäinen etu putoaa pois, mutta ensimmäinen etu eli energian varastointiongelman poistuminen jää jäljelle joka tapauksessa.

Voidaan arvioida, että käyttämällä nykyistä avaruustekniikkaa (laukaisukustannus matalalle kiertoradalle 5000 euro/kg kertakäyttöisellä raketilla ja siirto GEO-radalle kolminkertaiseen hintaan), aurinkovoimasatelliitteilla tuotettu sähköteho olisi noin 100 kertaa kalliimpaa kuin ydinsähkö. Hinnasta valtaosa muodostuu laukaisukustannuksista, joten siihen voidaan vaikuttaa yhtäältä halventamalla laukaisun kilohintaa ja toisaalta vähentämällä laukaistavaa massaa.

Usein arvioidaan, että siirtymällä uudelleenkäytettäviin kantoraketteihin (esim. Kistler K-1-projekti), laukaisukustannusta matalalle kiertoradalle voidaan vähentää tekijällä 10-50 nykyisestä, eli tasolle

100-500 euro/kg. Uudelleenkäytettävien kantorakettien tekniikka tunnetaan hyvin ja niiden käytännön toteutus odottaa oikeastaan vain hieman nykyistä suurempaa tilausta, ts. kaupallista tarvetta laukaista hyötykuormia nykyistä tiheämmin. Jos uudelleenkäytettävyydellä voidaan vähentää kustannuksia noin paljon, miksi sitten NASA:n avaruussukkula on käytännössä jopa kalliimpi laukausysteemi kuin kertakäyttöiset raketit? Sukkula tarvitsee aina miehistön, koska sitä suunniteltaessa 1970-luvulla tietotekniikka ei vielä aivan mahdollistanut lentokoneomaisen aluksen automaattista ohjausta. Miehistön läsnäolo jokaisella lennolla tekee testaamisen ja rajojen kokeilemisen vaikeaksi ja jäykistää projektin hallintaa. Toinen syy sukkelan kalleuteen on että sen kahdesta vaiheesta vain ylempi eli massaltaan pienempi on uudelleenkäytettävä. Sukkulasta haluttiin tehdä siis halpa avaruusalus, maksoi mitä maksoi.

Uudelleenkäytettävä kantorakettijärjestelmä ei kuitenkaan yksinään välttämättä aivan riitä tuomaan aurinkovoimasatelliittien hintaa kilpailukykyiselle tasolle. Lisäksi olisi hyvä vähentää laukaistavaa massaa. Edellä esitellyn polttoainetehtaan avulla saataisiin GEO-radalla laukaisumassasta pois maksimissaan tekiä 2-3. Toinen, edellisen kanssa multiplikaatiivinen tapa vähentää laukaistavaa massaa on rakentaa aurinkovoimasatelliitit osittain (esim. tukirakenteiden osalta) asteroideilta peräisin olevista raaka-aineista. Raaka-aineiden tuonti on mahdollista samalla sähköpurjetekniikalla, mitä käytetään polttoaineenkin tuotantoon. Lisäksi sopivia metallipitoisia asteroideja on tarjolla lähellä Maata. Sopivan tuotantotehtaan rakentaminen kiertoradalle on toki suuri yksittäinen investointi, joka kuitenkin saattaa hyvinkin olla kannattava, jos tavoitteena on globaali aurinkovoimasatelliitteihin perustuva energiatalous. Laukaistavaa massaa voidaan tietysti periaatteessa pienentää myös parantamalla aurinkovoimasatelliitin teho/painosuhdetta.

Aurinkovoimasatelliittien nykyisen satakertaisen hintaeron kurominen umpeen on siis haaste, mutta se saattaa hyvinkin onnistua tai jopa ylittyä. Numeerisesti suurin hinnan pudotus tulee todennäköisesti uudelleenkäytettävän kanto-

rakettijärjestelmän myötä, mutta myös asteroidiresursseihin perustuva polttoainetehtas ja materiaalitehtas saattavat vaikuttaa hintatavoitteen saavuttamiseen. Kuten yllä on selostettu, sähköpurje on tekniikka, joka näyttäisi tekevän asteroidipohjaisesta polttoainetehtaasta ja myös asteroidien materiaalien hausta taloudellisia. Voiko pieniin muuttaman tonnin kantaviin sähköpurjealuksiin perustuva polttoainetuotanto skaalautua palvelemaan suurimittaista aurinkovoimasatelliittien rakentamista, on kysymys, jota on toistaiseksi kuitenkin pidettävä avoimena. Jos sähköpurjelaiaston koko kasvaa suureksi, esiin voi nousta lennonjohto- ja avaruusromuongelmia, joita ei ole vielä kunnolla kartoitettu. Toisaalta laivaston koko kasvaisi maltillisemmin, jos sähköpurjeen työntövoima pystyttäisiin kasvattamaan satakertaiseksi, kuten edellä on spekuloitu.

Tällä hetkellä ei vielä tiedetä, onko Kuun napa-alueiden pysyvän varjon kraattereissa polttoainetuotantoon riittävää määrää vesijäätä. Jos jäätä on riittävästi, taloudellinen polttoainetehtas voisi ehkä perustua Kuun resursseihin asteroidien sijasta, kuten usein on ehdotettu. Polttoainetehtaan toteutuksessa ei silloin tarvittaisi sähköpurjeen tapaista vielä kehitteillä olevaa propulsiotekniikkaa. Kuun tärkein etu on ajallisesti lyhyt siirtomatka, haitta puolestaan painovoima joka edellyttää kemiallisen raketin käyttöä nousussa ja laskussa (noin puolet tehtävästä polttoaineesta kuluisi siihen) ja kasvattaa pinnan infrastruktuurien kuten aurinkopaneelien ja louhijan massaa ja toimituskuluja perille. Myös napa-alueiden kuu-

perän kylmyys voi aiheuttaa päänvaivaa suunnittelijoille.

Edellä esitetty polttoainetehtaan käyttötapa ei ole ainoa mahdollinen. Jos laukaisukustannukset halpenevat riittävästi, siirrot GEO-radalle kannattaa ehkä jatkossakin hoitaa Maasta tuodulla polttoaineella. Mutta silloinkin, jos päädytään käyttämään aurinkovoimasatelliittien rakentamisessa apuna asteroidipohjaisia materiaaleja (mikä on onnistuessaan tapa vähentää kustannuksia periaatteessa rajattomasti), polttoainetehtasta tarvitaan, kun tuodaan materiaaleja GEO-radalle. Jos tuonti tapahtuu kemiallisella raketilla, sen polttoaine on saatava asteroideilta, ja jos sähköpurjeella, kuorman pysäyttämiseen GEO-radalle tarvitaan kemiallista polttoainetta, koska GEO-rata on magnetosfäärin sisällä, missä sähköpurje ei anna työntövoimaa.

#### YHTEENVETO

Sähköpurjetta, polttoainetehtasta ja aurinkovoimasatelliitteja kannattaa tutkia tarkemmin ja asteroidien sekä Kuun jäätilanne on tarpeen selvittää. Jos sähköpurje saadaan toimimaan, sillä on joka tapauksessa suuri merkitys aurinkokunnan perustutkimuksen kannalta. Esimerkiksi juuri asteroidien jääkartoitus voitaisiin toteuttaa sen avulla. Sähköpurje näyttäisi mahdollistavan myös avaruus toimintaa kautta linjan halventavan polttoainetehtaan, vaikka menetelmän skaalautuvuus hyvin suuriin polttoainemääriin onkin toistaiseksi hieman epäselvä. Toisaalta jos jäätä sisältäviä kappaleita löy-

detään melko läheltä Maan rataa tai jos Kuussa osoittautuu olevan hyödynnettävissä olevaa jäätä, taloudellisen polttoainetehtaan voi toteuttaa myös uudelleenkäytettävillä kemiallisillaraketeilla. Jälkimmäisen konseptin etuna on varma skaalautuvuus.

Jos laukaisukustannukset alenevat riittävästi, kilpailukykyisiä aurinkovoimasatelliitteja voi rakentaa suoraankin, mutta polttoainetehtas vähentäisi mahdollisesti kustannuksia. Teknisesti haastavin, mutta onnistuessaan halvimpaan lopputulokseen johtava tapa, on käyttää rakentamisessa apuna asteroidi- tai kuupohjaisia materiaaleja. Näiden materiaalien tuonnissa halutulle Maan kiertoradalle polttoainetehtas näyttää olevan lähes välttämätön. Jos ja kun aurinkovoimasatelliitit saadaan riittävän halvoiksi, avautuu mahdollisuus ympäristöstävälliseen, halpaan ja haluttaessa nykyistä laajempaan globaaliin sähköenergian tuotantoon ilman energian varastointiongelmia.

*Pekka Janhunen*

#### VIITTEET

- [1] Janhunen, P., Electric sail for spacecraft propulsion, J. Prop. Power, 20, 763-764, 2004.  
[2] Janhunen, P. and A. Sandroos, Simulation study of solar wind push on a charged wire: basis of solar wind electric sail propulsion, Ann. Geophys., 25, 755-767, 2007.

[3] <http://www.ursi.org/WP/SupportingDocument1.pdf>

## Breaking news: Tuija Pulkkinen EGU:n presidentiksi!



Ilmatieteen laitoksen tiedote 7.5.2008:

Ilmatieteen laitoksen Tuija Pulkkinen valittiin Euroopan Geotieteiden Unionin presidentiksi viime syksynä järjestetyssä jäsenäänestyksessä. Pulkkinen on EGU:n ensimmäinen suomalainen presidentti. Viimeiset neljä vuotta Tuija Pulkkinen on toiminut EGU:n aurinkokunnan tutkimuksen jaoston presidenttinä ja siinä ominaisuudessa myös järjestön neuvoston jäsenenä.

- Uusi tehtävä on haastava, sillä geotieteiden merkitys yhteiskunnassa kasvaa koko ajan. EGU:n piirissä tehtävä tieteellinen työ voi vaikuttaa positiivisesti moniin päivänpolttaviin kysymyksiin, joita ovat mm. energiaratkaisut tai ilmastonmuutoksen vaikutukset. Haasteena on tuoda tieto riittävän ymmärrettävässä muodossa myös tiedeyhteisön ulkopuolelle. Onkin erittäin mielenkiintoista päästä näkemään läheltä eri tieteenalaja ja vaikuttamaan niiden kehitykseen, Tuija Pulkkinen toteaa.