

strateginen TUTKIMUS

Ilmastoystävällinen,
perusteltu ja kestävä H2-
siirtymä
(JustH2Transit)



Tilannekuvaraportti 2024



SUOMEN AKATEMIA

1. Tiivistelmä

Nopea irtautuminen fossiilisista polttoaineista on saanut aikaan yhteiskunnallisen murroksen energiajärjestelmän muuttuessa. Uuden järjestelmän keskeiseksi osaksi on nousemassa puhdas vety.

Vetyyn liittyvä tämänhetkinen tutkimus on teknologiapainotteista. Sitäkin tarvitaan lisää järjestelmän pullonkaulojen ohittamiseksi uusien läpimurtoratkaisujen avulla. Uudet teknologiat mahdollistavat kuitenkin resurssien aivan uudenlaisen käytön. Tarvitaan kokonaiskuva yhteiskuntamme muuttumisesta koko vetyarvoketjun mitalta (uusiutuvan energian ja vedyn tuotanto, varastointi, siirto ja käyttö). Lisäksi tarvitaan ymmärrys siitä, miten murros toteutetaan kestävästi niin ympäristön, talouden kuin sosiaalisen oikeudenmukaisuuden näkökulmista.

JustH₂Transit-hankkeessa kokonaiskuvaa ovat luomassa energiateknologian asiantuntijat, materiaalitekniikan osaajat, kemistit, fyysikot, yhteiskunta- ja taloustieteilijät, ihmismaantieteilijät sekä johtamisen ja bio- ja kiertotalouden ammattilaiset. Tieteidenvälistä ja monitieteistä keskustelua tukevat hankkeen koordinaattori ja vuorovaikutusvastaava.

Tutkimuksen suuntaamiseksi haastatellaan asianomistajia. Vuoropuhelua käydään teollisuuden, päättäjien ja yleisön kanssa. Sen tavoitteena on tietoisuuden lisääminen, päätöksenteossa tukeminen, osallistumismahdollisuuksien helpottaminen sekä siirtymän kestävyteen ja oikeudenmukaisuuteen vaikuttaminen.

2. Yhteiskunnallinen haaste

Ilmastokriisiin ja nykyisiin ilmastopolitiikan tavoitteisiin vastaaminen edellyttää irtautumista fossiilisista polttoaineista. Siirtymän onnistuminen nopealla aikataululla edellyttää poliittista ja sosiaalista hyväksyttävyyttä ja oikeudenmukaisuutta. JustH₂Transit tutkii, millainen energiajärjestelmä toteuttaa oikeudenmukaista vihreää murrosta muuttuvassa toimintaympäristössä.

Eryteisesti vedyn nykyistä laajamittaisemmasta käytöstä on tulossa uuden järjestelmän välttämätön osatekijä. Vedyn tuotanto, jakelu ja käyttö jatkojalostuksessa (esimerkiksi metanoli, ammoniakki, sähköiset polttoaineet) tulevat linkittämään aiempaa tiiviimmin toisiinsa paitsi energiajärjestelmän eri osia myös yhteiskunnan eri sektoreita. Tämä tulee lisäämään yhteiskuntamme sisäisiä riippuvuuksia mutta mahdollisesti myös alueiden ja ihmisryhmien välisiä eroja.

Vetyyn liittyvä arvoketju koostuu vedyn tuotannosta, kuljetuksesta, varastoinnista ja käytöstä. Vedyn tuotantoon liittyvät olennaisesti puhdas

primäärienergian tuotanto sekä vesivarat. Maan- ja vesienkäytön kysymysten kautta osaksi vetyarvoketjua asettuvat monet sosiaaliset arvot.

Hankkeessa tuotetaan tietopohja sille, että siirtyminen kestävyysmurrokselle välttämättömään vetytalouteen voitaisiin toteuttaa ilmaston, luonnon kantokyvyn, teknologian ja talouden näkökulmasta kestäväällä tavalla. Murroksen keskellä elävien ihmisten ja yhteisöjen näkökulmasta tämän tavan on oltava oikeudenmukainen.

Hankkeessa pyritään vaikuttamaan konkreettisesti siihen, että

- tieto tunnistetuista järjestelmätason **pullonkauloista** välittyy tahoille, jotka vastaavat uuden järjestelmän mahdollistamisesta, suunnittelusta ja toteutuksesta
- pullonkaulojen ohittamisen tai poistamisen mahdollistava uusi tieteellinen tieto siirtyy **läpimurtoratkaisujen** kehittäjille ja kaupallistajille
- bio-, kierto- ja vetytalouden liittymäpisteet, hankauskohdat ja sisäiset riippuvuudet **materiaali- ja energiavirtojen** käytön osalta saadaan Suomen tasolla näitä virtoja hallinnoivien tahojen tietoon
- vedyn käyttöä edellyttävän energiainfrastruktuurin mahdollistajille ja suunnittelijoille välittyy tieto hankkeiden **oikeudenmukaisuudesta** koskien rakentamisen vaikutuksia, haittoja ja hyötyjä vaihtoehtoisissa skenaarioissa. Tämä auttaa heitä parhaassa tapauksessa ennaltaehkäisemään tai ainakin minimoimaan eriarvoisuuden kasvua.

2.1 Järjestelmän ja teknologioiden pullonkaulat

JustH₂Transit-tutkijat arvioivat vetytalouden etenemisen tämänhetkisistä pullonkauloista tärkeimmäksi vetyhankkeiden kannattavuuden. Sitä heikentävät inflaatio, korkotasojen ja materiaalien hinnan nousu. Yhtä tärkeänä esteenä nähdään investointiympäristö, jonka Euroopassa tekee epävakaaksi se, että esim. REDIII-direktiivin vaatimukset ja tavoitteet astuvat voimaan vasta vuodesta 2030 eteenpäin. Epävarmuutta liittyy myös uusiutuvan energian hintaan ja saatavuuteen.

Säätelyllä voidaan vaikuttaa markkinoiden syntymiseen joko tuotantoa tai kysyntää vauhdittamalla. Tämänhetkisessä tilanteessa kumpakaan ei näytä syntyvän, koska toista ei vielä ole (ns. muna-kana-ongelma). Fossiilisiin raaka-aineisiin perustuvat vaihtoehdot ovat puhtaaseen vetyyn pohjaavia tuotteita halvempia, eikä puhtaan vedyn avulla valmistettuja tuotteita ole vielä yleisesti tarjolla korkeampaan hintaan, ts. niiden premiokauppa ei ole vielä lähtenyt käyntiin.

Hankkeessa muun muassa tarkastellaan, mitä eri lopputuotteet puhtaan vedyn avulla valmistettuina maksaisivat verrattuna fossiilisiin kilpailijoihinsa. Näin pyritään hahmottamaan preemiokaupalle otollisimmat lopputuotteet, joissa puhtauden lisähinta asiakkaalle pystytään pitämään mahdollisimman matalana. Sääntelyn avulla voitaisiin ainakin alussa pyrkiä tukemaan markkinoiden imua ja sen kautta rajallisen resurssin eli puhtaan vedyn kanavoitumista näihin tuotteisiin.

Myös vedyn käyttötekniikoiden kehittyminen ja uuden infrastruktuurin rakentaminen voivat toimia vahvoina ajureina siirtymässä.

Tekninen pullonkaula tällä hetkellä on komponenttipula: elektrolyysierävalmistajien tuotantokapasiteetti on puutteellinen.

Alkielektrolyysi teknologiana tunnetaan, mutta PEM-elektrolyysereihin tarvittavan iridiumin määrä on rajallinen, eikä SOEC-teknologiaa ole vielä kehitetty riittävän pitkälle esimerkiksi sen joustokyvyn osalta. Lisäksi ei tiedetä, millaisia katalyyttejä kannattaisi käyttää vaihtoehtoisissa vedyntuotantotavoissa, kuten metaanipyrolyysissä ja aurinkovedyssä.

Vedyn siirtoon ja varastointiin tarvittavien putkien ja säiliöiden materiaalikestävyyteen liittyy epävarmuuksia niissä paineissa, etäisyyksillä ja aikajäniteillä, joita kaavaillaan toteutettaviksi. Paineistuksen tuottavat kompressorit puolestaan ovat kalliita. Puhtaan vedyn valmistamiseen tarvitaan lisäksi suuri määrä uusiutuvan sähkön tuotantolaitoksia ja niiden rakentamista tukevaa sähköverkkoinfrastruktuuria.

Vetyä käytetään kemiallisissa synteeseissä sekä metallien pelkistämisessä ja prosessoinnissa. Prosesseihin liittyy materiaalitekniisiä kysymyksiä, jotka ratkaisemalla voidaan pidentää laitteistojen elinikää ja siten liiketoiminnan kannattavuutta.

Merenkulun polttoaineena vetyä käytetään ammoniakkin muodossa. Sen polttoteknologia tunnetaan, mutta materiaalipuolella on kysymysmerkkejä.

2.2 Lämpimurtoratkaisut

Materiaalien kestävyys ja käytettävyys määrittävät monien teknologioiden eliniän. Pidempi elinikä puolestaan tarkoittaa suurempaa hyötysuhdetta ja alhaisempaa elinkaarikustannusta. Siksi hankkeessa keskitytään erityisesti sellaisen materiaalitekniisen uuden tiedon tuottamiseen, jonka avulla teknologioista voidaan tehdä kestävämpiä. Kaikkein otollisimpia innovaatioita olisivat sellaiset, joiden avulla voidaan auttaa useampia teknologioita.

Materiaalitekniisiä pullonkaloja, joiden väistämiseen tai poistamiseen hankkeessa haettavilla innovaatioilla pyritään, odotetaan löytyvän niin vedyn valmistamisen, siirron ja varastoinnin kuin käytönkin piiristä.

Systeemitasolla hankkeen on kuitenkin lähdettävä sen selvittämisestä, millaiseen mittakaavaan pyritään. Millaista teollista tuotantoa puhtaan vedyn avulla pyritään pitämään käynnissä? Miten järjestelmään tuodaan sen

tarvitsema jousto? Millaista vedyn tuotanto-, varastointi-, siirto- ja käyttökapasiteettia kokonaisuudessaan tavoitellaan?

Kapasiteettiymmärryksen rinnalla tarvitaan näkemys siitä, miten paljon energiaa vedyn tuottamiseen tarvitaan ja miten se voidaan toteuttaa. Kun kaikki nämä elementit on suhteutettu toisiinsa ja arvoitettu, tiedetään myös, millä kohdin arvoketjua erityisen arvokkaita innovaatioita voidaan tehdä.

2.3 Materiaali- ja energiavirrat

Suomelle tärkeällä paperiteollisuudella on paljon materiaalivirtoja, joiden avulla pystytään valmistamaan fossiilisia materiaaleja korvaavia tuotteita esimerkiksi akkuteollisuudessa. Joissain näistä valmistusprosesseista syntyy samalla vetyä, tällä hetkellä ainakin jo laboratoriomittakaavassa. Kun vetyä tuotetaan metaanipyrolyysin avulla, syntyy puolestaan kiinteää hiiltä, joka voidaan jälleen käyttää eri teollisuudenaloilla korvaamassa esimerkiksi grafeenia.

Puhtaan vedyn lopputuotemarkkina Suomessa näyttää alussa syntyvän synteettisten polttoaineiden ympärille, joiden varastointiin, jakeluun ja käyttöön on olemassa oleva infrastruktuuri. Niidenkin tuottamisessa tarvitaan paperiteollisuuden sivuvirtaa, biopohjaista hiilidioksidia. Elektrolyysissä syntyvä lämpö taas voidaan hyödyntää joko erilaisissa teollisissa prosesseissa tai kaukolämpönä.

Kuten näistä esimerkeistä käy ilmi, bio-, kierto- ja vetytalouteen liittyvillä materiaali- ja energiavirroilla on monta omistajaa ja hallinnoijaa, jotka ovat jo liittyneet toisiinsa erilaisin, usein liiketaloudellisin, sitein.

Hankkeessa halutaan tuottaa kaikille osapuolille kokonaisnäkemys siitä, millä eri tavoin eri toimijat voivat korvata fossiilista hiiltä biopohjaisella ilman että ”kaadetaan sama puu useaan kertaan”. Sen pohjalta pystytään haluttaessa määrittämään, missä tuotantolaitosten kannattaa sijaita ja mitä raaka-aineita kannattaa kuljettaa paikasta toiseen.

2.4 Siirtymän oikeudenmukaisuus

Keskusteluun vetytalouden vaikutuksista, niin myönteisistä kuin kielteisistä, ei lähdetä tyhjiöstä. Vihreä siirtymä tulee todennäköisesti vaikuttamaan alueisiin, joihin jo aiemmat kehityskulut ovat vaikuttaneet (esim. metsätalous, kaivosteollisuus ja tuulivoimarakentaminen). Vetyhankkeidenkin vaikutuspiiriin tulevat ihmiset saattavat kysyä, miksi juuri heidän täytyy jälleen joustaa yhteiseksi hyväksi.

Kaikista vedyn arvoketjun vaiheista tulee joitain kielteisiä vaikutuksia, jotka voivat jakautua sosiaalisesti ja alueellisesti epätasa-arvoisesti. Jos syntyville haitoille saadaan rakennettua kompensatiomenettelyt, hankkeiden hyväksyttävyyys omalle alueelle saattaa helpottua. Toisaalta voi syntyä epäoikeudenmukaisuuden kokemus alueille, joille hankkeita ei voida

sijoittaa. Tällöin vetytalouden arvoketjuun liittyvä liiketoiminta ja työpaikat jäävät syntymättä.

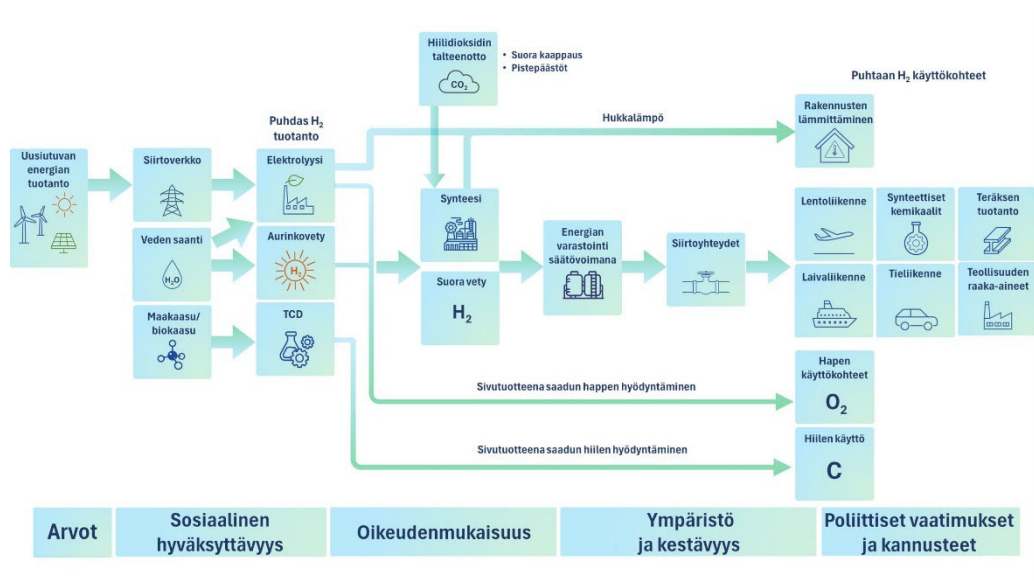
Uusi teollisuus voi tullessaan polarisoida myös paikallisyhteisöä. Jos esimerkiksi työpaikat ovat miesvoittoisia, on mietittävä myös, mistä naiset voivat saada töitä ja lapset päivähoidon ja kouluja.

Jako-oikeudenmukaisuuden lisäksi (kenelle hyödyt ja haitat jakautuvat) hankkeessa pyritään tunnustamaan oikeudenmukaisuuteen (recognition justice): tunnustamaan esimerkiksi syrjäseutujen asukkaiden oikeudet paikallisen ympäristön käyttöön tai sen mahdollistamaan talouskasvuun. Sen lisäksi on huomioitava menettelyihin ja päätöksentekoon keskittyvä oikeudenmukaisuus (procedural justice). Lisäksi tutkimuksessa käytetään toteutuneita epäoikeudenmukaisuuksia korjaavaa hyvittävän oikeudenmukaisuuden käsitettä.

Oikeudenmukaisuuden lisäksi toinen keskeinen tutkimusta sisäisesti ohjaava käsite on resilienssi. Sillä tarkoitetaan, että hankkeessa haetaan vastauksia ja vaihtoehtoja, jotka vahvistavat yhteiskuntamme energiasektorin, yhteisöjen ja alueiden kriisinsietoa, joustavuutta ja palautumiskykyä.

3. Tutkimuksen nykytila (state of the art)

Tulevaisuuden integroituneessa järjestelmässä vety tulee olemaan olennainen osa paitsi energiajärjestelmää myös liikennettä ja teollisia prosesseja. Vetyä käytetään eri sektoreilla joko suoraan vetynä tai erilaisina vedystä tehtyinä energiankantajina ja teollisuuden raaka-aineina. Tämä kytkee eri sektorit, erityisesti raskaan prosessiteollisuuden sekä tie-, meri- ja lentoliikenteen, osaksi vetyarvoverkkoa. (Kuva 1.)



Kuva 1. Vetyarvoketju.

Aiemmassa tutkimuksessa vetysiirtymän kokonaisvaltainen tarkastelu on jäänyt vähälle huomiolle. Laajojen kokonaisuuksien hahmottamiseen

tarvitaan monitieteistä tutkimuspohjaista tietoa ja ymmärrystä. JustH₂Transit-hanke on suunniteltu tuottamaan sellaista koko vetyarvoketjun kattamassa toimintaympäristössä.

Vedyn ja sen jatkojalosteiden käyttöön eri tarkoituksissa liittyvät olennaisesti taloudelliset kysymykset, markkinoiden synty sekä kestävyysnäkökulmat, oikeudenmukaisuus mukaan lukien. Kaikkia käyttötarkoituksia ei ole laajamittaisesti eli teollisessa mittakaavassa vielä missään toteutettu. Niihin liittyy siksi merkittävä tarve ymmärtää paremmin vedyn roolia murroksessa. Samalla on parannettava ratkaisujen toteutettavuutta ja kestävyyttä.

Tutkimuksessa on tähän asti keskitytty erityisesti teknisiin näkökulmiin. Niihin liittyen tarvitaan edelleen paljon tutkimusta, ja JustH₂Transit-hankkeella on erittäin hyvät mahdollisuudet tuottaa huippuluokan tieteellisiä tuloksia ja kehittää teknologioita monitieteisen tutkimusryhmän avulla.

Ennakoimme tieteellisiä läpimurtoja esimerkiksi uusien katalyyttien kehittämisen muodossa (aurinkovety) sekä toiminnan luotettavuutta ja turvallisuutta varmistavien materiaaliratkaisujen kohdalla. Odotamme pystyvämme tuottamaan suuntaviivoja vetyhaurastumisen välttämiseen (teräsmäärittelyt, vetyä kestävät materiaalit).

Odotamme myös, että vetysiirtymään liittyvän sosio-teknisen prosessin nykytila-analyysissä tehdään läpimurtoja. Sama koskee ymmärrystä siitä, miten siirtymää voidaan ohjata kohti ilmastoneutraaliutta, kestävyyttä ja sosiaalista oikeudenmukaisuutta. Tämä tapahtuu sidosryhmäyhteistyön, yhteiskehittämisen ja vetyekosysteemien tukemisen avulla.

4. Monitieteinen yhteistyö

Suomen energiajärjestelmä on yhteiskuntamme selkäranka. Siksi on tärkeää pystyä muodostamaan kokonaisvaltainen ymmärrys vedyn roolista ja merkityksestä energiamurrokselle. Erityisesti on ymmärrettävä vedyn merkitys suhteessa muutoksiin uusiutuvan energian tuotantokapasiteetissa.

JustH₂Transit yhdistää neljä merkittävää suomalaista tutkimusorganisaatiota, joilla on vahvaa osaamista perus- ja soveltavassa tutkimuksessa liittyen koko vetyarvoketjuun (Oulun yliopisto, VTT, LUKE ja LUT-yliopisto).

JustH₂Transit-projektin tutkijoilla on kattava asiantuntemus mahdollistavista teknologioista (energiajärjestelmät, fysiikka, kemia, materiaalitiede), vetyhankkeiden vaikutuksista (ympäristöteknologia ja -tieteet, yhteiskuntatieteet, taloustiede) ja yhteiskunnasta (yhteiskuntatieteet, ihmismaantiede, johtaminen) sekä aiempaa kokemusta monialaisista siirtymävaiheista (bio- ja kiertotalous). Hankkeen vuorovaikutusvastaavana toimivalla Akordilla puolestaan on todennetut

näytöt neuvottelevien ongelmanratkaisuprosessien rakentamisesta ympäristökiistoissa.

Energiajärjestelmän uudistamiseen liittyvä vety tulee integroimaan sähkö-, lämpö- ja kaasuverkkoja. Vedyn mahdollistamat teolliset symbioosit samalla nivovat energiajärjestelmää aiempaa tiiviimmin kiinni teollisuuden prosesseihin, liikenteeseen ja myös ruuan tuotantoon (esim. vihreät lannoitteet, P2X-proteiinit).

Koska JustH2Transit-hankkeen päätavoitteena on auttaa tekemään tarvittu järjestelmätason muutos ilmastoneutraalisti, oikeudenmukaisesti ja kestävästi, luontevia keskustelumahdollisuuksia syntyy paitsi JUST ENERGY -ohjelman sisällä myös JUST TRANSITION -ohjelman projektien ja kaikkien sellaisten STN-ohjelmien kanssa, joissa keskeistä on tapahtumassa olevan murroksen kestävyys ja oikeudenmukaisuus (esim. FOOD, IMPRES).

Pyrkiessään muodostamaan energiajärjestelmän murroksesta mahdollisimman kokonaisvaltaista kuvaa JustH2Transit-hanke tuottaa malleja mahdollisista tulevaisuuden kehityskuluista. Näihin skenaarioihin voi olla muilla hankkeilla sekä tuotavaa että kotiin vietävää.

Eryteisesti JUST ENERGY -ohjelman muissa hankkeissa tehtävä työ rikastaa JustH2Transitin luomaa kokonaiskuvaa energiajärjestelmästä. JUST TRANSITION -ohjelman hankkeiden puolestaan odotetaan syventävän JustH2Transitin tutkijoiden ymmärrystä muotoutumassa olevan uuden järjestelmän yhteiskunnallisista vaikutuksista. Molempien ohjelmien hankkeilla on joitain keskeisiä yhteisiä peruskäsitteitä, kuten oikeudenmukaisuus ja resilienssi. Hankkeiden välisellä vuoropuhelulla näistä teemoista pystytään todennäköisesti vahvistamaan kaikkien osaamista.

5. Vuorovaikutus ja vaikuttavuuden edistäminen

JustH2Transit-hanke levittää ajantasaista tieteeseen perustuvaa tietoa sekä käy vuoropuhelua teollisuuden, päättäjien ja yleisön kanssa.

Vuoropuhelulla on neljä tavoitetta:

- lisätä tietoisuutta ja levittää tietoa
- tukea tiedon avulla
- auttaa osallistumaan
- vaikuttaa.

JustH2Transit on verkostojensa kautta yhteydessä sidosryhmiin yhteiskunnan eri osa-alueilla: teollisuuteen, kansallisiin

vetyekosysteemeihin, julkiseen sektoriin (ministeriöt ja kansalliset viranomaiset, maakunnat ja alueelliset viranomaiset, kunnat, korkeakoulut ja tieteelliset foorumit myös kansainvälisissä verkostoissa), kolmanteen sektoriin sekä suoraan suureen yleisöön, kuten maan- ja metsänomistajiin.

Suomen tasolla esimerkiksi Hydrogen Research Forum Finland on tärkeä tieteellinen foorumi, jonka kautta Suomen keskeiset tutkimus- ja koulutustoimijat voivat yhdessä toimia keskustelukumppanina kansallisen päätöksenteon tukena. Euroopan tasolla vetytutkimus-, kehittämis- ja innovaatiotoiminnat liittyvät etenkin Clean Hydrogen Partnershipin toimintaan. Tämän lisäksi CETP, Processes4Planet sekä Horizon Europe tukevat laajemmin tällaista toimintaa.

Jatkuva vuorovaikutus sidosryhmien kanssa varmistetaan hankkeen tutkijoiden, vuorovaikutusvastaavan ja koordinaattorin yhteistyönä, mikä helpottaa monialaisia keskusteluja tieteenalojen ja eri toimijoiden välillä.

Hankkeen tavoitteena on luoda jatkuva kaksisuuntainen vuoropuhelu tiedon tuottajien ja tiedon soveltajien sekä suuren yleisön välille Vetyvaikutusfoorumin (Hydrogen Impact Forum, H2IF) muodossa. Tarkoituksena on luoda foorumista uusi toimintamalli, jossa tieteellinen tieto siirtyy välittömästi toimijoille, murroksen hyväksyttävyyttä lisääntyy myös paikallisella tasolla ja sidosryhmien osallistuminen heitä koskevaan poliittiseen päätöksentekoon helpottuu.