

Niukkuus ei ole maaperän vaan ilmakehän hiilivarannoissa: Taloustieteen Nobel 2018 William Nordhausille

Matti Liski

1. Ensimmäiset askeleet

Oslo yliopiston taloustieteen laitoksen professori Michael Hoel vieraili MIT:ssa vuonna 1976. Silloin hänellä oli mahdollisuus kuulla yhden William Nordhausin ensimmäisistä ilmasto-ongelmaa käsittelevistä esityksistä. Hoelin mukaan MIT:n tutkimus keskittyi tuolloin voimakkaasti kasvun rajat -teemaan. Rooman klubin ensimmäinen raportti oli julkaistu vuonna 1972, ja öljykriisi oli alkanut vuonna 1973. Vuonna 1974 Robert Solow piti Richard T. Ely luennon, jossa käsiteltiin luonnonvarojen taloustiedettä (Solow 1974).

Nordhaus oivalsi varhain, että fossiilisten polttoaineiden riittävyys ei taidakaan olla ongelman ydin. Varantoihin sitoutunut hiili ei käytön myötä häviä, vaan siirtyy maaperästä maapallon hiilenkiertoon aiheuttaen kasvihuoneilmaston. Kuinka suuri määrä hiiltä voidaan varastoida hiilenkiertoon ilman, että tästä ai-

heutuu merkittäviä ongelmia? Jos hiilivarasto ilmakehässä on rajallinen, niin niukkuus on ilmakehässä eikä niinkään maaperän energia-varannoissa. Michael Hoelin mukaan Nordhaus esitti tämän ajatuksen ensimmäiseksi MIT:n seminaarissa. Ensimmäinen julkaisu hiilidioksidipäästöistä ilmestyi *American Economic Review*ssa vuonna 1977 (Nordhaus 1977).¹

Tuossa ensimmäisessä julkaisussa Nordhaus muotoili avainkysymyksen seuraavaan muotoon: "Kuinka paljon lämpötila nousee pitkällä aikavälillä, jos hiilen pitoisuus ilmakehässä tuplataan suhteessa teollistumista edeltävään aikaan". Paras ennuste tuolloin oli noin 3 celsiusastetta. Useissa viimeaikaisissa tutkimuksissa ilmiön kvantifiointi alkaa samalla

¹ Nordhausin ensimmäinen työpaperi aiheesta on vuodelta 1975.

kysymyksellä, johon vastaus on edelleenkin lähellä tuota 3 celsiusasteen lukua.

Nordhausin ensimmäinen tutkimus oli askel kohti integroitua arviointimallia (*integrated assessment model*, IAM). Malli on integroitu, koska se sisältää ilmastonmuutoksen ja talouden kuvauksen tavoitteena mallintaa ilmiön syy ja seuraus. Se on arviointimalli, koska lopullinen pyrkimys on kvantifioida ilmiön taloudellinen merkitys. Sen avulla voidaan laskea haittaveron taso ja aikapolku.

Ensimmäinen tutkimus ei vielä arvioinut haittoja, mutta loi pohjan ilmastonmuutoksen syntymekanismiin mallintamiselle. Mekanismissa, joka ei ole lainkaan triviaali, on keskeistä hiilen globaali kiertäminen ja siinä tapahtuvat muutokset energiasektorin päästöjen vuoksi. Päästöt synnyttävät impulssivasteen, jonka seurauksena hiili siirtyy hitaasti sen eri varantojen välillä globaalissa järjestelmässä. Ilmakehän hiilivarannot ovat tärkeimmät kasvihuoneilmiön kannalta, mutta esimerkiksi merien varannot ovat olennaisia, koska varantojen välinen diffuusio määrittelee hiilen elinkaaren ilmakehässä. Tämä diffuusio prosessi ja sen yhteys energiasektoriin oli Nordhausin työn ensimmäinen askel.

Diffuusiomalli voidaan yhdistää kasvumalliin, jossa energiasektorin päästöt syntyvät taloudellisista valinnoista. Tällä mallilla Nordhaus tutki, kuinka hiilivarannot voidaan pitää tavoitetasolla minimikustannuksin. Kysymys on melkein sama, johon tutkijat ovat nyt vuoden 2015 Pariisin ilmastopöytäkirjan jälkeen palanneet. Pariisissa nimittäin määriteltiin kahden celsiusasteen lämpeneminen hyväksyttäväksi rajaksi, mikä epäsuorasti määrittelee jäljellä olevan hiilibudjetin.

Nyt voidaankin palata kasvun rajoihin, joka oli kuuma teema MIT:ssä vuonna 1976.

Nordhausin malli nimittäin vastaa periaatteessa samaan kysymykseen resurssiniukkuuden ja talouskasvun välisestä yhteydestä. Niukkuus ei ole maaperän vaan ilmakehän hiilivarannoissa. Nordhausin ensimmäisissä laskelmissa hiilibudjetti oli juuri tuo aiemmin mainittu kaksi kertaa nykyinen taso, siis tuolloin vuoteen 1970 mennessä historiallisesti saavutettu päästöjen kumulatiivinen taso.

Ilmastopolitiikasta tulee talouspolitiikkaa, kun hiilibudjetin mukainen niukkuus hinnoitellaan taloudellisten instrumenttien avulla. Mikä on hiiliveron taso, joka tulisi toimenpanna hiilibudjetin saavuttamiseksi? Nordhausin ensimmäisissä laskelmissa vero kehittyi hyvin maltillisesti, muutamasta dollarisentistä ensimmäisinä vuosikymmeninä kohti lähelle 100 dollaria per hiilidioksiditonni vuosisadan loppua kohden. Tämä on ollut kantava teema hänen politiikkasuosituksissa: maltillinen lähtötaso yhdistettynä politiikan asteittaiseen kiristymiseen vuosien myötä.

Tässä on oikeastaan koko ilmastopolitiikan ydin: kuinka ilmaston hiilivarantojen niukkuus tulisi hinnoitella? Vaikka kysymys kuulostaa samalta kuin öljyvarantojen niukkuuden hinnoittelu, niin hinnoitteluongelma on perustavalla tavalla erilainen. Maaperän luonnonvarojen omistusoikeudet ovat hyvin määriteltyjä, joten ei ole mitään periaatteellista estettä sille, että markkinat hinnoittelevat niukkuuden tehokkaasti. Tästä syystä luonnonvarat eivät esimerkiksi lopu yllättäen. Ilmakehän omistusoikeudet ovat tunnetusti puutteelliset, eikä niukkuutta täten tulla koskaan hinnoittelemaan markkinoilla ilman politiikkatoimia. Tästä syystä Nordhaus osui varhaisella tutkimuksellaan siihen osaan kasvun rajat -tutkimusta, joka on edelleenkin aidosti tutkijoita haastava.

2. Integroitu arviointimalli

Yllä kuvattu varhainen malli sopii kuvaamaan hiilen kiertoon liittyvän dynamiikan, mikä on keskeistä, jos halutaan määrittää tietyn hiilibudjetin saavuttava hinta päästöille. Mutta perustavampi ja vaikeampi kysymys on se, miten ilmastonmuutos oikeasti vaikuttaa talouteen. Optimaalinen politiikka noudattaa Pigoun ajatusta häittaverosta, jossa vero tänään on yhtä kuin tämän hetken päästöistä aiheutuvat kaikki tulevat haitat rahassa mitattuna. Periaate on yksinkertainen, mutta ilmastomuutokseen sovellettuna haastava. Ensinnäkin haitat syntyvät lämpötilan noususta, eivät niinkään hiilen määrästä suoraan. Lämpötilan ja hiilen määrän yhteys on huomattavasti ymmärretty kuin hiilenkierto. Toisekseen lämpötilan vaikutus talouteen on spekulatiivisten arvioiden varassa. Kolmanneksi haitat syntyvät hyvin pitkällä viipeellä. Niiden muuttaminen nykypäivän rahaksi ei ole helppoa, koska rahoitusmarkkinoilta ei löydy vertailukorkoja riittävän pitkälle tulevaisuuteen.

Nordhausin (1994) kontribuutio oli integroitu arviointimalli, joka on yleisen tasapainon työkalu ilmastonmuutoksen kustannusten arviointiin. Siinä haitat syntyvät lämpötilan noususta, joten malli sisältää eksplisiittisesti globaalin energiabudjetin, joka yhdistää hiilen määrän lisäyksen ja lämpötilan nousun. Keskeinen parametri on ilmastoherkkyys, joka kertoo, kuinka lämpötila nousee, kun hiilen määrä vaikka tuplataan ilmakehässä. Tämä parametri on huonosti tunnettu, eikä sitä oikeastaan ole mahdollista oppia lyhyellä aikavälillä (Roe ja Baker 2007). Nordhausin parametrisointi olettaa (edelleen) noin 3 celsiusasteen lämpenemisen hiilen määrän tuplaamisesta,

mutta luonnontieteilijöiden arviot ilmastoherkyydestä vaihtelevat paljon.

Seuraava elementti Nordhausin integroidussa arviointimallissa on lämpötilan vaikutus tuotantoon. Tämä askel yhdistää molemmat tämän vuoden talousnobelistit William Nordhausin ja Paul Romerin. Molemmat tutkivat pitkän aikavälin tuottavuuskasvun lähteitä. Nordhausin tapauksessa ilmastonmuutos vaikuttaa negatiivisesti kokonaistuottavuuteen. Jos lämpötilan nousu on epävarmaa, niin siitä aiheutuvat haitat ovat kertaluokkaa vaikeampia arvioida. Nordhausin peruskalibrointi olettaa, että 3 celsiusasteen noususta seuraa 2,7 % kokonaistuotannon menetys (Nordhaus 2008). Tämä on luonnollisesti villi arvaus.

Optimaalinen vero tänään (hetkellä 0) on yhtä kuin päästöjen E_0 lisäyksen kaikki tulevat haitat rahaksi muutettuna

$$vero_0 = \frac{-1}{u'_0(c_0)} \sum_{t=1}^{\infty} \sum_{\tau=1}^t u'_t(c_t) \frac{\partial Y_t}{\partial T_t} \frac{\partial T_t}{\partial CO_{2,\tau}} \frac{\partial CO_{2,\tau}}{\partial E_0}$$

missä $\frac{\partial CO_{2,\tau}}{\partial E_0}$ on muutos hiilivarannoissa (hiilenkiertomallin mukaan), $\frac{\partial T_t}{\partial CO_{2,\tau}}$ on lämpötilavaste, $\frac{\partial Y_t}{\partial T_t}$ on muutos tuotannossa, $u'_t(c_t)$ on nykyarvoinen hyötymuutos ja $u'_0(c_0)^{-1}$ muuttaa koko hyvinvointimuutoksen rahaksi. Veroa kutsutaan myös hiilen sosiaaliseksi kustannukseksi (*social cost of carbon*, SCC). Tuosta yhtälöstä hiiliveroa laskemaan!

Nordhausin DICE-malli (*Dynamic Integrated model of Climate and Economy*) vuodelta 1994 on edelleenkin pohja lukuisille vastaaville malleille, joita esimerkiksi IPCC:n raporteissa käytetään. Mallit ovat keskeisiä työkaluja, kun arvioidaan päästöjen ja ilmasto-ongelman kehittymistä yli vuosikymmenien. Niiden avulla voidaan johdonmukaisesti arvioida vaihtoehtoisten politiikkatoimenpiteiden vaikutuk-

sia, parametrivalintojen merkitystä ja vaikkapa epävarmuuden vaikutusta.

Keskeisin politiikkamuuttuja on lopulta yllä kuvattu veron taso ja sen kehittyminen tulevaisuudessa. Nordhausin perusviesti on säilynyt samana 1970-luvulta: veron taso tulisi olla maltillinen ja sen tulisi asteittain kiristyä vuosisadan loppua kohden. Vero olisi noin 10 euroa per CO₂-tonni (tai 35 dollaria per CO-tonni) ja vuosisadan lopulla jo noin 50 euroa per CO₂-tonni (Nordhaus, 2007). Veron aika on tärkeä politiikkamuuttuja, koska ilmastonmuutosta torjutaan pääomarakenteita muuttamalla. Asumiseen, liikkumiseen ja energiantuotantoon liittyvän pääoman sopeutus vie vuosikymmeniä – hiiliveron aika on määrää pääomakannan sopeuttamisvauhdin.

3. Kritiikki ja viimeaikainen tutkimus

Integroiduissa arviointimalleissa joudutaan tekemään lukuisia spekulatiivisia oletuksia, joista ehkä kaikkein spekulatiivisin on haittojen kvantifiointi. Nordhaus (2012) on itse todennut seuraavasti: *“Estimating impacts has been the most difficult part of all climate science.”* Joidenkin mielestä malleilla ei taas ole mitään arvoa. Esimerkiksi Pindyck (2012) on sanonut, että *“[IAMs] can tell us nothing about the most important driver of the SCC, the possibility of a catastrophic climate outcome.”*

Itse olen argumentoinut, että asia on oikeastaan päinvastoin kuin mitä Pindyck tototaa. Nordhausin lähestymistapa voidaan hyvin tulkita malliksi päätöksentekotilanteesta, jossa haitta on subjektiivinen arvio tulevasta ilmastomuutoksen seurauksista, joita ei tänään havaita (Gerlagh ja Liski 2018). Koska ilmasto-

ongelma on luonteelta sellainen, että oppiminen vie vuosikymmeniä, niin käsityksemme ongelman luonteesta ei tule muuttamaan suuresti tulevina vuosina (elleivät katastrofaaliset seuraukset realisoidu). Tästä syystä Nordhausin politiikkasuositus ei suuresti muutu: hiiliveron tulisi kehittyä talouden kasvuvauhdin mukaisesti. Subjektiivinen käsityksemme haittoista asettaa veron tason, mutta aika on seuraava pitkäälle Nordhausin mallin mekanismeista.

Viimeaikainen tutkimus on integroinut Nordhausin työn osaksi tavanomaista makrotaloudellista mallia, jossa ilmasto vaikuttaa kokonaistuottavuuteen, kuten tekniseen kehitykseen, ja jossa energiasektorin valinnat tuottavat sekä päästöt että niiden vähennykset tavalla, joka voidaan tulkita hajautettuna kilpailutasapainona (Goloso ym. 2014). Keskitien mallilla voidaan paremmin tutkia ilmastopoliitiikan toteutusta (instrumentteja), energiasektorin teknologiavalintojen vaikutusta ja esimerkiksi epävarmuuden merkitystä päätöksenteolle. Ilmastomuutoksen talous on näin lähempänä keskitien taloustiedettä. □

Lähteet

- Gerlagh, R. ja Liski, M. (2018), “Carbon prices for the next hundred years”, *The Economic Journal* 128: 728-757.
- Goloso, M., Hassler, J., Krusell, P. and Tsyvinski, A. (2014), “Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium”, *Econometrica* 82: 41-88.
- Nordhaus, W. (1975), “Can We Control Carbon Dioxide?” IASA Working Paper 75-063.
- Nordhaus, W. (1977), “Economic Growth and Climate: The Case of Carbon Dioxide”, *American Economic Review Papers and Proceedings* 67: 341-346.

- Nordhaus, W. (1994a), *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*, MIT Press.
- Nordhaus, W. D. (2007). “A review of the stern review on the economics of climate change”, *Journal of Economic Literature* 45: 686–702.
- Nordhaus, W. (2008), *A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies*, Yale University Press.
- Nordhaus, W. (2012), “Integrated Economic and Climate Modeling”, Keynote Address 19th Annual Conference of European Association of Environmental and Resource Economists will be held in Prague on June 27-30, 2012.
- Pindyck, R. (2013). “Climate change policy: what do the models tell us?”, *Journal of Economic Literature* 51: 860–872
- Roe, G. ja Baker, M. (2007), “Why is climate sensitivity so unpredictable?”, *Science* 318(5850): 629–632.
- Solow, R. (1974), “The economics of resources or the resources of economics”, *American Economic Review Papers and Proceedings* 64: 1–14.