



<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>

Oppiaine	Kansantaloustiede	Päivämäärä	13.1.2012
Tekijä	Mikko Sandt	Matrikkelinumero	
		Sivumäärä	56 s.
Otsikko	Luonnonvarojen niukkuus ja markkinat		
Ohjaajat	VTT Hannu Salonen, VTT Juha Virrankoski		

Tiivistelmä

Luonnonvarojen niukkuus on aiheuttanut huolia kestävän kehityksen ja jatkuvan talouskasvun yhteensovittamisesta. Talouskasvu on riippuvaista energiantuotannosta, joka taas on pitkälti riippuvaista rajallisista, uusiutumattomista fossiilisista polttoaineista, joista tunnetuimpia ovat öljy, maakaasu ja kivihiihi. Yksinkertaisimmillaan luonnonvaran käyttöaika vuosissa saadaan, kun suhteutetaan tunnetut reservit vuosittaiseen tuotantoon tai kulutukseen. Taloustieteen valtavirrassa on kuitenkin muodostunut kehittyneempiä tapoja tarkastella luonnonvarojen niukkuutta markkinoiden näkökulmasta.

Tutkielmassa tarkastellaan empiirisesti, miten markkinat ovat kyenneet vastaamaan luonnonvarojen niukkuuden aiheuttamiin haasteisiin. Tutkielman pohjalla olevan mikroteoreettisen viitekehityksen perusteella markkinat vastaavat luonnonvarojen niukkuuteen substituutiolla, etsinnällä ja teknologisella kehityksellä. Tässä tutkielmassa pyritään empiirisesti valottamaan näiden mekanismien toimintaa fossiilisten polttoaineiden osalta. Aineistona käytetään energiayhtiöiden ja -ministeriöiden julkaisemia tilastollisia aineistoja, joiden avulla pyritään havainnoimaan fossiilisten polttoaineiden niukkuuden historiallista kehitystä. Tarkastelun kohteena ovat muun muassa öljy- ja maakaasureservien kasvu ja menetelmät, jotka parantavat luonnonvarojen esiintymien talteenottotehokkuutta. Tämän lisäksi tarkastellaan konventionaalisten öljy- ja maakaasureservien epäkonventionaalisia substituutteja.

Tutkielman johtopäätökseksi esitetään, että fossiilisten polttoaineiden suhteellisen niukkuuden kasvun sijaan suhteellinen niukkuus on vähentynyt huolimatta luonnonvarojen absoluuttisten määrien vääjäämättömästä vähenemisestä. Öljy- ja maakaasureservit ovat kasvaneet tasaisesti vuosikymmenien ajan samalla kun tuotanto on noussut. Teknologinen kehitys on mahdollistanut epäkonventionaalisten substituuttien käyttöönoton ja etsintä on johtanut mittavien esiintymien löytymiseen. Myönteinen kehitys on kuitenkin riippuvaista suotuisista institutionaalisista tekijöistä, jotka tehostavat markkinoiden toimintaa. Samoin huomioidaan, että tarpeeksi pitkällä aikavälillä on välttämätöntä siirtyä uusiutuviin substituutteihin, joiden käyttöönottoon vaikuttavat suotuisat markkinaolosuhteet ja teknologinen kehitys.

Asiasanat	ympäristötalous, luonnonvarat, fossiiliset polttoaineet, mikrotaloustiede, kestävä kehitys, energia
Muita tietoja	



Turun yliopisto
University of Turku

LUONNONVAROJEN NIUKKUUS JA MARKKINAT

Kansantaloustiede,
pro gradu -tutkielma

Laatija:
Mikko Sandt

Ohjaajat:
VTT Hannu Salonen
VTT Juha Virrankoski

13.1.2012
Turku



Turun kauppakorkeakoulu • Turku School of Economics

Sisällys

1	JOHDANTO	5
2	NIUKKUUDEN MITTAAMINEN	8
2.1	Niukkuuden indikaattorit	9
3	MARKKINAT JA NIUKKUUS TEORIASSA	12
3.1	Taloudellinen tehokkuus	12
3.2	Optimaalinen louhinta	14
3.3	Hotelling-sääntö	16
3.4	Markkinamekanismit niukkuuden lieventäjinä	17
3.4.1	Substituutio	17
3.4.2	Etsintä	17
3.4.3	Teknologinen kehitys	18
4	TALOUSKASVU JA KESTÄVÄ KEHITYS	19
4.1	Kestävän kehityksen määrittely	19
4.2	Kestävä kehitys historiassa	20
4.3	Uusmalthusilaisuus	22
5	NIUKKUUDEN EMPIIRINEN TARKASTELU	24
5.1	Fossiiliset polttoaineet	24
5.1.1	Reserveistä yleisesti	26
5.1.2	Energiasta yleisesti	26
5.2	Öljyn reservikasvu	27
5.3	Talteenottotehokkuus	30
5.4	Öljyn epäkonventionaaliset substituutit: öljyhiekka ja öljyliuske	32
5.4.1	Öljyhiekkavarannot	33
5.4.2	Öljyliuske	34
5.5	Öljyn hinta	35
5.6	Maakaasu	36
5.6.1	Maakaasureservit	37
5.6.2	Epäkonventionaaliset maakaasuvarat	39
5.6.3	Tiiviiden olosuhteiden kaasu	41
5.6.4	Liuskekaasu	41
5.6.5	Hiilikerrosten metaani	42
5.7	Rajoituksia	43

6	UUSIUTUVAT SUBSTITUUTIT	44
7	POLIITTINEN ULOTTUVUUS.....	48
8	LOPUKSI	51
	LÄHTEET	54

Kuvioluettelo

Kuvio 1	Tuotannon optimaalinen taso saavutetaan tasolla X*	13
Kuvio 2	Energianlähteet kulutuksen mukaan (BP Statistical Review 2011).....	24
Kuvio 3	Tunnettujen reservien (ilmoitettu miljardeissa barreleissa) kasvua kuvaava käyrä vuodesta 1980 vuoteen 2010 (BP Statistical Review 2011)....	29
Kuvio 4	Öljyn reaali- ja nimellishinta 1861–2008. Realihinta ilmoitettu vuoden 2008 dollareissa (BP Statistical Review 2011)	36
Kuvio 5	Maailmanlaajuiset tunnetut maakaasureservit, biljoonissa kuutiometreissä (BP Statistical Review 2011)	38
Kuvio 6	Tunnetut konventionaaliset maakaasureservit Yhdysvalloissa, miljardeissa kuutiometreissä (Energy Information Administration 2010c)	39
Kuvio 7	Tunnetut hiilikerrosten metaanin reservit Yhdysvalloissa, miljardeissa kuutiometreissä (Energy Information Administration 2010b)	43

Taulukkoluetelo

Taulukko 1	Epäkonventionaalisten maakaasuvarojen jakauma (mukaellen Perry & Lee 2007, 3); kuutiojalat muutettu (biljooniksi) kuutiometreiksi	40
------------	--	----

1 JOHDANTO

Ympäristökysymykset ovat viimeisen kahden vuosikymmenen aikana nousseet poliittiseen keskiöön. Kun kylmän sodan aikana ympäristökysymykset joutuivat pitkälti väistymään idän ja lännen välisen ideologisen kamppailun tieltä, on tämän aikakauden päättyminen merkinnyt ympäristökysymysten merkityksen kasvua. Tähän kehitykseen ovat osaltaan vaikuttaneet Hallitustenvälisen ilmastomuutospaneelin (IPCC) varoitukset ilmaston oletetusta lämpenemisestä. Viime aikoina koetut luonnonkatastrofit ovat olleet omiaan lisäämään huolta ihmisen vaikutuksesta ympäristöön. Osa huolesta kohdistuu nykyisen talouskasvun odotettuihin vaikutuksiin tulevien sukupolvien kasvuedellytyksiin. Huoli seuraa kasvun kuluttavasta luonteesta; ihmisen elintason huima nousu viimeisen kahdensadan vuoden aikana on ollut riippuvaista luonnonvarojen laajamittaisesta hyödyntämisestä. Osa luonnonvaroista poistuu käytön myötä lopullisesti kierrosta, kun taas osa luonnonvaroista on uusiutuvia, mutta näidenkin uusiutumismuutos asettaa rajoituksia sille, miten laajamittaisesti talouskasvu voi perustua uusiutuviin luonnonvaroihin.

Jatkuvaan talouskasvuun tähtäävä politiikka on nostanut kysymyksiä luonnonvarojen riittävydestä. Onko jatkuva kasvu mahdollista, kun tarpeeksi pitkällä aikavälillä kaikki luonnonvarat ovat äärellisiä? Skeptinen suhtautuminen jatkuvan talouskasvun ja luonnonvarojen riittävyden yhteensovittamiseen on johtanut vaatimukseen kiinnittää huomio talouskasvun sijasta kestäväan kehitykseen. Karkeasti ottaen kestävä kehitys voidaan määritellä kasvuksi, joka ei vähennä tulevien sukupolvien kasvuedellytyksiä. Tällaisen kehityksen kuvaamiseen on kehitetty monia luonnonvarojen tilaa kuvaavia määreitä, joista osa on pyritty sisällyttämään poliittiseen päätöksentekoon. Esimerkiksi Genuine Progress -indikaattoria (GPI) on markkinoitu vaihtoehtona bruttokansantuotteen (BKT) käyttämiselle talouspoliittisen päätöksenteon kulmakivenä. GPI yhdistää taloudellista hyvinvointia kuvaavia määreitä kestäväan kehitystä kuvaaviin määreisiin. Jos GPI korvaisi BKT:n keskeisen aseman, tulisi kestävä kehitys automaattisesti huomioiduksi talouspoliittisessa päätöksenteossa.

Kestävän kehityksen määrittely ei kuitenkaan ole ongelmaton. Monen niukkuusindikaattorin antama kuva jättää huomioimatta markkinoiden dynaamisen luonteen. Yksinkertaisimmillaan luonnonvaran käyttöaika (riittävyys vuosissa) saadaan, kun suhteutetaan nykyiset reservit (esimerkiksi metsissä oleva hakkuukelpoinen puusto) luonnonvaran käyttöön (esimerkiksi vuosittainen puun tuotanto tai kulutus). Tällaisiin suhdelukuihin perustuvat mallit antavat selkeästi riittämättömän kuvan resurssien todellisesta niukkuudesta, sillä niukkuus aiheuttaa välittömiä vastareaktioita markkinoilla, mitkä taas heijastuvat takaisin niukkuuteen. Esimerkiksi öljyn hinnan nousu rohkaisee öljyntuottajia etsimään uusia esiintymiä, parantamaan tuotantomenetelmiä ja etsimään öljylle substituutteja.

Tämän tutkielman tarkoituksena on tarkastella, miten hyvin markkinaehtoiset mekanismit – substituutio, etsintä ja teknologinen kehitys – ovat kyenneet lieventämään luonnonvarojen niukkuutta ja tästä niukkuudesta aiheutuvia ongelmia. Antavatko staattiset indikaattorit realistisen kuvan taloudellisen toiminnan vaikutuksesta luonnonvarojen riittävyyteen, vai aliarvioivatko nämä indikaattorit niitä markkinamekanismeja, jotka mahdollisesti kykenisivät lieventämään luonnonvarojen niukkuuteen liittyviä ongelmia? Voidaan argumentoida, että jos näissä indikaattoreissa ei huomioida markkinamekanismeja, niihin perustuvat ennustukset ovat harhaanjohtavia ja tällöin niiden käyttö politiikkavälineinä olisi kyseenalaista. Pahimmassa tapauksessa väärä tapa määritellä kestävä kehitys voisi vahingoittaa niitä markkinamekanismeja, jotka parhaiten kykenisivät tällaisen kehityksen takaaamaan. Toisaalta jos markkinamekanismit ovat olleet riittämättömiä lieventämään niukkuudesta aiheutuvia ongelmia, tulisi tämän näkyä niukkojen luonnonvarojen ehtymisenä, sillä luonnonvarojen allokointi on merkittävässä määrin jätetty markkinavoimille.

Koska tämän tutkielman puitteissa ei mitenkään ole mahdollista käsitellä kaikkia luonnonvaroja, on tarkastelun kohteeksi valittu luonnonvarat, joita käytetään ensisijaisesti energian tuottamiseksi. Vielä tarkemmin tarkastelu on rajattu lähinnä fossiilisiin polttoaineisiin: öljyyn, maakaasuun ja näiden johdannaisiin. Moderni huoli kestävästä kehityksestä on pitkälti fossiilisten polttoaineiden hintoihin vaikuttaneiden energiakriisien (1973 ja 1979) seurausta. Kaikki toiminta on riippuvaista energiasta, joten myös pitkän aikavälin talouskasvu on riippuvaista jatkuvasta energiantuotannosta. Näin ollen kestävä kehitys liittyy läheisesti energian riittävyyteen, vaikka käsite on huomattavasti laajempi.

Teoreettisen referenssipisteen ongelman tarkastelulle tarjoaa neoklassisen mikroteorian käsitys yritysten voitonmaksimoinnista niukkuuden vallitessa. Tällainen toiminta on riippuvaista informaatiosta resurssien suhteellisista niukkuuksista, kun taas tämän informaation välittäjinä toimivat hinnat. Resurssien tehokas, vaihtoehtoiskustannukset huomioiva allokointi on nimenomaan hintainformaation mahdollistamaa toimintaa. Markkinoilla tapahtuvaan hinnanmuodostukseen puuttuminen voi aiheuttaa merkittäviä vääristymiä. Esimerkiksi öljyn kulutustuet saavat kuluttajat pitämään öljyä halvempänä kuin mitä sen todellinen resurssikustannus on. Tällaisessa tapauksessa markkinoilla toimivat osapuolet saavat väärää informaatiota resurssien suhteellisista niukkuuksista ja öljyn kulutus nousee korkeammalle kuin sen ”pitäisi”. Toisaalta verotuksella ja tukiaisilla voidaan myös tietoisesti pyrkiä esimerkiksi vähentämään kulutuksesta aiheutuvia saasteita.

Hyvin toimivien markkinamekanismien kautta avautuu pääasiassa kolme väylää lieventää luonnonvarojen niukkuuteen liittyviä ongelmia: substituutio, etsintä, ja teknologia (tutkimus ja kehitys). Suhteelliseen niukkuuden aiheuttama hinnannousu

kannustaa toisaalta kuluttajia konservoimaan, toisaalta yrityksiä allokoimaan resursseja etsintätoimintaan, mikä saattaa johtaa uusin käsityksiin luonnonvarojen todellisesta tilasta. Uusi teknologia puolestaan voi parantaa niitä keinoja, joilla luonnonvaroja hyödynnetään. Esimerkiksi korkeampi talteenottotehokkuus mahdollistaa suuremmat reservit. Substituutio taas tarjoaa keinon siirtyä yhden luonnonvaran käytöstä toisen, läheisen substituutin käyttöön, kun siitä tulee taloudellisesti kannattavaa. Esimerkiksi konventionaalisen öljyn hinnan nousu on viime aikoina lisännyt mielenkiintoa öljyhiekasta erotettavaa bitumia kohtaan. Nämä markkinamekanismit toimivat myös ristikkäin, esimerkiksi kun teknologinen kehitys mahdollistaa siirtymisen uusiutuvaan substituuettiin.

Luonnonvarojen niukkuutta on tutkittu aiemminkin. 1972 julkaistu kirja *Kasvun rajat* pyrki tietokonesimulaatioiden avulla kuvaamaan luonnonvarojen tulevaa kehitystä vuosikymmenien päähän tulevaisuuteen. Tämä runsaasti huomiota herättänyt kirja oli ennustuksissaan hyvin pessimistinen. Yleisesti ottaen taloustieteelliset analyysit ovat olleet optimistisempia tulevaisuuden suhteen. Nämä optimistisemmat tutkimukset päättyivät pohjaksi vuonna 2001 julkaistulle kirjalle *The skeptical environmentalist*, jonka tarjoama kuva tulevaisuudesta oli huomattavasti myönteisempi. Eräs huomattava piirre on tulosten nopea vanhentuminen. Onkin mielenkiintoista, että *Kasvun rajat* päivitettiin sekä 1990- että 2000-luvun alussa, jotta huomattavissa määrin pieleen menneet ennustukset voitiin taas korjata kahden- tai kolmenkymmenen vuoden päähän. Tässä tutkielmassa pyritäänkin antamaan mahdollisimman ajankohtainen kuva fossiilisten polttoaineiden niukkuudesta ilman kunnianhimoisia simulointeja tulevasta kehityksestä. Useat tutkielman lähteinä käytetyt tilastolliset aineistot ovat vuodelta 2011.

Tutkielma on rakenteeltaan seuraavanlainen. Toisessa luvussa lähdetään muodostamaan taustaa tutkielman aihepiirille esittelemällä indikaattoreita, joilla niukkuutta voidaan kuvailla. Kolmannessa luvussa esitellään neoklassisessa teoriassa yleisesti esiintyvä mikroteoreettinen viitekehys, jonka puitteissa taloudellisten toimijoiden oletetaan niukkuuden vallitessa toimivan. Neljännessä luvussa tarkastellaan sitä, miten ajatus talouskasvun ja kestäväen kehityksen yhteensovittamattomuudesta muotoutui lähihistoriassa. Viidennessä luvussa tarkastellaan empiiristä aineistoa siitä, miten markkinamekanismit ovat kyenneet lieventämään luonnonvarojen niukkuutta. Tämä empiirinen osio on tutkielman varsinainen ydin. Kuudennessa luvussa pohditaan lyhyesti uusiutuvia substituutiomahdollisuuksia ja seitsemännessä luvussa politiikan vaikutusta markkinamekanismien toimintaan ja luonnonvarojen niukkuuteen. Tutkielma päättyy yhteenvetoon.

2 NIUKKUUDEN MITTAAMINEN

Taloudellisen hyödyntämisen kannalta niukkuus on suhteellinen käsite. Auringosta saapuvaa energiaa on runsaasti, monta kertaa yli ihmiskunnan energiatarpeiden, mutta tämän energian teollinen hyödyntäminen on toistaiseksi laajalti ihmiskunnan ulottumattomissa. Toisaalta fysiokelpoista uraania on hyvin vähän verrattuna kivihiileen, mutta pienestä määrästä uraania saadaan huomattavasti enemmän energiaa kuin samasta määrästä kivihiiiltä.

Taloudelliselta kannalta ei sinänsä olla kiinnostuneita siitä, milloin jokin luonnonvara on hyödynnetty loppuun, vaan siitä, milloin sen hyödyntäminen ei enää ole taloudellisesti kannattavaa. Näin ollen luonnonvaran hyödyntämistä koskevat taloudelliset rajoitteet tulevat vastaan ennen fyysisiä rajoitteita; vaikka jokin määrä olisi teknisesti louhittavissa, tämän määrän louhinta ei välttämättä ole taloudellisesti kannattavaa. Esimerkiksi on hyvin epätodennäköistä, että öljy tulee koskaan loppumaan, vaikka sen käytöstä tullaan aikanaan luopumaan. Koska taloudelliset rajoitteet saattavat asettaa suurempia esteitä luonnonvaran hyödyntämiselle kuin fyysiset rajoitteet (muistaen kuitenkin, että taloudelliset rajoitteet perustuvat fyysisille rajoitteille), voitaisiin ajatella, että taloustieteen maalaama kuva luonnonvarojen riittävydestä olisi jopa haikeampi kuin staattinen kuva, joka saadaan, kun yksinkertaisesti suhteutetaan tunnetut reservit vuosittaiseen tuotantoon. Taloustieteellinen näkökulma on kuitenkin dynamisempi. Luonnonvaran kallistuminen niukkuuden kasvun seurauksena johtaa markkinataloudessa ”automaattisesti” vastareaktioihin. Niukkuus muodostaa kannustimia, jotka ajavat yrityksiä kehittämään ratkaisuja, joista aikaisemmin ei osattu uneksiakaan. Näin ollen niukkuus voidaan nähdä jopa mahdollisesti hyödyllisenä seikkana erityisesti fossiilisten polttoaineiden tapauksessa, joita pidetään merkittävänä ympäristön saastuttajina. Toimiessaan ”oikein” markkinamekanismit mahdollistavat siirtymisen uusiutuvaan substituuttiin häiriöttä. Moni luonnonvarojen riittävyteen pessimistisesti suhtautuva suhtautuu myös näihin markkinamekanismeihin pessimistisesti, pitäen niitä lähinnä teoreettisina keinoina ratkaista niukkuuden aiheuttamia ongelmia (Meadows, Randers & Meadows 2005, 226–257). Peak oil -liikkeen kannattajat maalailevat fossiilisten polttoaineiden ehtymiseen liittyviä uhkakuvia, mutta samalla kannattavat siirtymistä vaihtoehtoiseen energiamuotoihin ennenaikaisesti, vedoten öljyvarojen rajallisuuteen (Koppelaar 2005, 52–53). Mutta jos markkinamekanismit toimivat kuten teoria ennustaa, nimenomaan tämä rajallisuus tulee johtamaan muiden energianlähteiden käyttöönottoon ilman minkäänlaista keskitettyä päätöstä sitten, kun siitä tulee taloudellisesti kannattavaa.

2.1 Niukkuuden indikaattorit

Jotta luonnonvarojen niukkuutta voitaisiin käsitellä, tarvitaan jokin indikaattori, joka kuvailisi luonnonvarojen niukkuutta mielekkäästi. Käyttäen Tom Tietenbergin laatimaa listaa hyväksi, hyvältä niukkuusindikaattorilta tulisi löytyä seuraavat ominaisuudet (Tietenberg 2003, 317):

Kaukokatseisuus (foresight): Hyvän indikaattorin ei tulisi keskittyä ainoastaan luonnonvaran niukkuuteen nykyhetkellä, vaan ottaa huomioon myös tulevat muutokset kysynnässä ja tarjonnassa, tuotantoteknologioissa ja niin edelleen. Näin ollen esimerkiksi pelkkiin tunnetuihin reserveihin ja nykyiseen tuotantoon perustuva niukkuusindikaattori ei ole riittävä.

Vertailtavuus (comparability): Hyvän indikaattorin tulisi mahdollistaa vertailujen tekemisen eri luonnonvarojen välillä. Tämä ominaisuus huomioisi myös mahdolliset substituuutit; jos yksi luonnonvara on korvattavissa substituutilla mutta toinen ei ole, on jälkimmäisen luonnonvaran tilanne niukkuuden kannalta vakavampi.

Laskettavuus (computability): Hyvän Indikaattorin tulisi perustua luotettavaan informaatioon ja sen tulisi olla helposti laskettavissa. Näin ollen hyvän indikaattorin ei tulisi vaatia informaatiota, joka on hyvin vaikeasti kerättävissä tai jota ei ole ollenkaan saatavilla. Tämä liittyy läheisesti edelliseen vaatimukseen indikaattorin vertailtavuudesta; jotta kahden luonnonvaran niukkuuden vertailu olisi mielekästä, tulisi molempien suureiden perustua luotettavaan informaatioon. Institutionaaliset tekijät voivat vaikuttaa informaation saatavuuteen.

Seuraavaksi esitellään muutamia esimerkkejä niukkuusindikaattoreista. Nämä indikaattorit jaetaan yleensä fyysisiin ja taloudellisiin indikaattoreihin.

Nykyiset reservit, nykyinen tuotanto: Fyysisistä indikaattoreista tunnetuimpia ovat aiemmin mainitut, yksinkertaiset reserves-to-use-suhdeluvut (RTU-suhde; myös reserves-to-production), jotka kertovat, milloin nykyisellä kulutuksella (tai tuotannolla) päädytään tilanteeseen, jossa luonnonvaran nykyiset, tunnetut reservit ovat käytetty loppuun. Reserves-to-use-suhde voidaan esittää seuraavasti:

$$RTU = \frac{(tunnetut\ reservit)}{(tuotanto\ vuodessa)}$$

Tällaisen indikaattorin antama kuva voisi päältäpäin vaikuttaa eteenpäinkatsovalta, mutta tosiasiasa indikaattori on staattinen. Se ei kykene minä tahansa hetkenä huomioimaan tulevaisuudessa tapahtuvaa reservikasvua tai muutoksia markkinaolosuhteissa, jotka seuraavat hupenevien reservien aiheuttamia muutoksia hinnoissa. Tästä johtuen tällaiset indikaattorit ovat käytännössä antaneet hyvin epätarkan kuvan luonnonvarojen riittävydestä. Kuten tullaan myöhemmin näkemään,

reservikasvu on historiallisesti ollut huomattavan vahva ilmiö. Indikaattorin hyvänä puolena pidetään sen yksinkertaisuudesta johtuvaa informaation saatavuutta: luotettavaa informaatiota sekä reserveista että niiden vuosittaisesta käytöstä on yleensä helposti saatavilla. Energiayhtiöt myös itse käyttävät reserves-to-use-suhdetta hyväkseen esimerkiksi tavoitellessaan suhteen pitämistä vakiona vuodesta toiseen. (Tietenkin jos tämä suhde kyettäisiin pitämään vakiona vuodesta toiseen, ei luonnonvara milloinkaan loppuisi.) On itsestään selvää, että reserves-to-use-suhde ei ole sovellettavissa uusiutuviin luonnonvaroihin. (Feygin & Satkin 2004, 57–60.)

Fyysisten niukkuusindikaattorien lisäksi on saatavilla myös taloudellisia indikaattoreita, joiden hyödyllisyys liittyy hintojen välittämään informaatioon:

Hinta: Tehokkaasti toimivilla kilpailullisilla markkinoilla luonnonvarojen suhteelliset, inflaatiokorjatut hinnat ovat hyvä niukkuuden indikaattori. Muutokset hinnassa heijastavat muutoksia kysynnässä ja tarjonnassa, joihin vaikuttavat reservien mahdollinen kasvu, substituutiomahdollisuudet ja muutokset tuotantokustannuksissa. Hinnat ovat myös läpinäkyvästi saatavilla ja ne ovat eteenpäinkatsovia. Tämän indikaattorin hyödyllisyys kuitenkin riippuu markkinoiden tehokkuudesta. Hintakontrollit, hintatukiaiset, verot, ulkoisvaikutukset ja omistusoikeuksia koskevat institutionaaliset säännöt vaikuttavat hintaan. Näiden vaikutusten seurauksena hinnat voivat välittää virheellisen kuvan luonnonvarojen suhteellisista niukkuuksista. Esimerkiksi polttoainetuki välittää moottoriajoneuvojen kuljettajille signaalin, että öljyn tarjonta on lisääntynyt, mikä johtaa öljyn liikakulutukseen. Samoin huomiota tulee kiinnittää menetelmään, jolla inflaation vaikutus luonnonvarojen hintoihin korjataan. Eri menetelmien käyttäminen voi antaa erilaisen kuvan reaalihintojen kehityksestä. (Brown & Field 1978, 232–233.)

Niukkuusvuokra: Samoin niukkuusvuokra, eli luonnonvaran hinnan ja sen tuotannon rajakustannusten erotus (eräänlainen niukkuuden mahdollistama monopolivoitto), välittää informaatiota luonnonvaran niukkuudesta, mutta tämäkin indikaattori menettää markkinahinnan tavoin voimaansa, kun markkinoilla esiintyy vääristymiä. Samoin niukkuusvuokran aleneminen voi johtua joko lisääntyneestä resurssin tarjonnasta, tai kohonneista kustannuksista. Niukkuusvuokra ei myöskään ole suure, joka olisi suoraan havainnoitavissa, sillä rajakustannukset eivät ole yleisesti saatavilla olevaa informaatiota kuten markkinahinnat ovat. (Brown & Field 1978, 234–239.)

Kustannukset: Rajakustannuksista saatavan informaation puutteesta johtuen rajakustannusten käyttö niukkuuden indikaattorina on pitkälti riippuvaista rajakustannusten mittaamisesta epäsuorien (”proxy”) menetelmien avulla. Luonnonvaran käydessä niukemmaksi sen louhintaan liittyvät kustannukset nousevat kun esimerkiksi joudutaan hyödyntämään heikompina pidettyjä esiintymiä tai

louhimaan syvemmältä. Yksi yleisesti käytetty menetelmä on kuvata kustannusten kasvua seuraavalla yhtälöllä:

$$c = \frac{\alpha L + \beta K}{Q},$$

missä c on reaaliset yksikkökustannukset, L on työvoima, K on pääoma ja Q on tuotanto. Parametrit kuvaavat työvoiman ja pääoman keskinäisiä painoja. Niukkuuden kohotessa c kasvaisi, kun tietyn määrän tuottamiseen vaadittavien panosten yhteenlaskettu kustannus kasvaisi. Samoin tuotantoteknologian parantuminen näkyisi yksikkökustannusten alenemisena. Tarpeeksi tarkan informaation saanti työvoimasta ja pääomasta ei kuitenkaan välttämättä ole mahdollista, sillä energiayhtiöt raportoivat näistä seikoista vaihtelevasti, mikä asettaa tämän yhtälön käytön kyseenalaiseksi vertailtavuuden suhteen. Samoin indikaattori ei välitä informaatiota tulevasta niukkuudesta, ainoastaan menneestä. On vielä mahdollista, että teknologinen kehitys piilottaa luonnonvaran hupenemisen. Teknologinen kehitys näkyisi yksikkökustannusten alenemisena vaikka luonnonvaran täydellinen loppuminen olisi aivan kulman takana. (Brown & Field 1978, 230–232.)

Rajasuureista myös etsintäkustannuksia voitaisiin käyttää niukkuuden indikaattorina. Esiintymien käydessä yhä harvemmiksi rajaetsintäkustannukset kohoaisivat, indikoiden väheneviä luonnonvaroja. Tästäkin suureesta on vaikea saada informaatiota, ja, kuten rajakustannusten kohdalla, myös etsintäkustannukset voivat teknologisen kehityksen seurauksena alentua vaikka luonnonvara olisi lähes loppuunkäytetty.

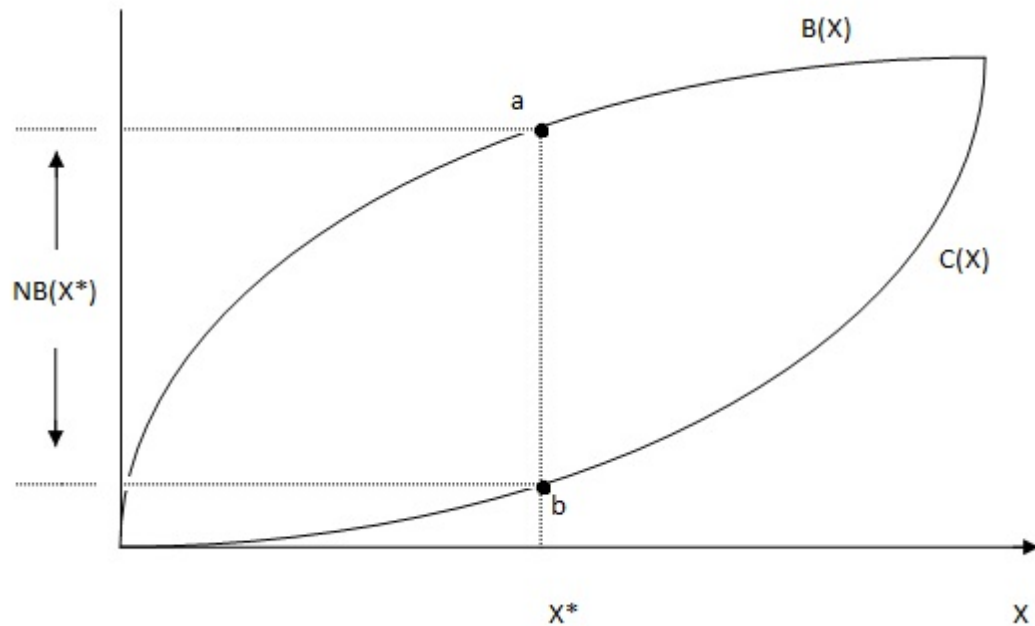
3 MARKKINAT JA NIUKKUUS TEORIASSA

Tämän luvun tarkoitus on esittää kirjallisuudessa usein esiintyvä yksinkertainen teoreettinen viitekehys, jonka puitteissa taloudellisten toimijoiden oletetaan toimivan. Tämä on lähinnä referenssipiste myöhemmälle empiirisille tarkastelulle. Tässä mielessä teoriaa ei tule nähdä itseisarvona vaan välineenä, jonka avulla voidaan ymmärtää niitä mekanismeja, joiden perusteella agentit toimivat. Todistukset voivat todistaa vain ja ainoastaan teorioiden sisäisen ristiriidattomuuden eivätkä mitään reaali maailmasta. Näin ollen sisäisesti ristiriidaton teoria voi olla ”totta”, vaikka reaali maailma ei käyttäytyisi sen mukaan. Monet oletukset yksilöiden ja firmojen voitonmaksimoinnin suhteen ovat aksiomaattisia: ne oletetaan tosiksi ilman mitään todistuksia.

3.1 Taloudellinen tehokkuus

Ennen kuin siirrymme tarkastelemaan niitä markkinamekanismeja, joiden avulla firmat pyrkivät ratkaisemaan niukkuudesta aiheutuvia ongelmia, on tarpeellista kerrata, miten markkinataloudessa toimiva firma käyttäytyy normaaleissa olosuhteissa. Tässä yhteydessä normaaleilla olosuhteilla viitataan talouteen, jossa vallitsee täydellinen kilpailu. Firmojen tavoitteen katsotaan koostuvan itsekkästä voitonmaksimoinnista eli optimoinnista, joka käytännössä tarkoittaa joko voittojen maksimointia tai kustannusten minimointia.

Luonnonvarojen käyttöä koskevan taloustieteellisen analyysin perustana on käsite tehokkuudesta. Taloustieteessä tehokkuuden tavoittelu yleensä viittaa toimintaan, jonka pyrkimyksenä on maksimoida jostakin toiminnasta koituvaa nettohyötyä. Esimerkiksi kun öljy-yhtiö pumppaa raakaöljyä maasta, tästä toiminnasta aiheutuu sekä tuottoja (öljyn myynnistä saatavat tuotot) että kustannuksia (toiminnan aiheuttamat pääoma- ja työntekijäkustannukset eli tuotannon tekijäkustannukset). Tuottojen ja kustannusten erotus, voitto, maksimoituu, kun tuottojen ja kustannusten välinen erotus on mahdollisimman suuri eli kun nettotuotto on mahdollisimman suuri. (Esimerkki tehottomuudesta olisi, jos firma kykenisi kasvattamaan voittoa, mutta ei jostain syystä suostuisi näin tekemään.) Tehokkuuden kasvun seurauksena talouden niukat voimavarat allokoitetaan jatkuvasti entistä tehokkaammin. Optimaalisen tuotantotason valitsemista voidaan kuvailla seuraavasti:



Kuvio 1 Tuotannon optimaalinen taso saavutetaan tasolla X^*

Kuviossa 1 sekä tuotot (B) että kustannukset (C) on ilmoitettu tuotannon (X) funktiona. Tuotannon tehokas taso on X^* eli taso, jossa tuottojen ja kustannusten välinen erotus on suurin. Tuotannon lisääminen (suhteessa tehokkaaseen tasoon) voisi vielä kasvattaa tuottoja, mutta tämä johtaisi myös vääjäämättä kustannusten kasvuun. Toisaalta tuotannon vähentäminen (suhteessa tehokkaaseen tasoon) vähentäisi sekä tuottoja että kustannuksia, mutta tuotot vähenisivät nopeampaa kuin kustannukset, alentaen nettotuottoja. Näin ollen yhtiön ei kannata poiketa tehokkaalta tasolta X^* . (Keohane & Olmstead 2007, 22–26.)

Tuotannon tehokas taso voidaan esittää myös rajasuureiden avulla. Kohta, jossa tuottojen ja kustannusten välinen erotus on suurin (X^*), on myös kohta, jossa näiden tuotto- ja kustannusfunktioiden derivaatat ovat yhtä suuria. Osittaisderivaattojen avulla voidaan esittää, miten tuotot ja kustannukset muuttuvat, kun tuotanto muuttuu (muiden tekijöiden pysyessä vakioina). MB on kokonaistuottokäyrän ensimmäinen derivaatta (marginal benefit; rajahyöty) tuotannon suhteen ja MC kokonaiskustannuskäyrän ensimmäinen derivaatta (marginal cost; rajakustannus) tuotannon suhteen:

$$\frac{\partial B}{\partial X} = MB, \quad \frac{\partial C}{\partial X} = MC$$

Tuotannon optimaalisella tasolla (X^*) pätee yhtäsuuruus:

$$MB = MC$$

Toisin sanoen, näiden kahden funktion derivaatat ovat yhtä suuria kohdassa, jossa käyrien tangenttien kulmakertoimet ovat yhtä suuria eli pisteissä a ja b (kuvio 1). Tämä

kohta on tismalleen samassa kohdassa missä tuottojen ja kustannusten erotus on suurin. Tämän rajasuureanalyysin perustana oleva intuitio on helposti ymmärrettävissä: kyseessä olevan yhtiön ei kannata lisätä luonnonvaran tuotantoa, jos tästä tuotannon lisäyksestä aiheutuu enemmän kustannuksia kuin tuottoja. Jälleen kerran yhtiön kannattaa pysytellä tehokkaalla tasolla X^* . (Perman, Ma, McGilvray & Common 1999, 116–124.)

Käyrien muoto voi olla monenlainen, mutta tässä yhteydessä esitetyt käyrät ovat kirjallisuudessa hyvin yleisiä, sillä niihin sisältyy muutamia mielekkäitä oletuksia. Ensinnäkin, ylläoleva kokonaistuottofunktio toteuttaa laskevien rajatuottojen lain eli mitä enemmän luonnonvaraa louhitaan, sitä vähemmän seuraavasta louhitusta yksiköstä saadaan hyötyä; tuotot kasvavat vaimenevasti. Tällainen kokonaistuottofunktio on konkaavi, kuten yllä, ja sen rajatuottokäyrä on laskeva. Kokonaiskustannusten taas ollessa kyseessä funktio on tyypillisesti konvekksi ja sen rajakustannuskäyrä on nouseva. Tässä tapauksessa kyse voi olla siitä, että mitä enemmän luonnonvaraa tuotetaan, sitä vaikeammaksi sen tuottaminen tulee. Tämä vaikeus taas kääntyy korkeammiksi kustannuksiksi. Kustannukset siis nousevat kiihtyvällä vauhdilla. (Keohane & Olmstead 2007, 11–26.)

On muistettava, että tehokkuus vaatii tietynlaista institutionaalista ympäristöä. Kannustimet, omistusoikeudet, oikeuslaitos, poliittinen järjestelmä, kulttuuri ja niin edelleen vaikuttavat yksilöiden ja yhtiöiden käyttäytymiseen.

3.2 Optimaalinen louhinta

Niukkuuden vallitessa tuottajat joutuvat tekemään päätöksiä siitä, miten allokoida tuotantoa eri periodeille. Jos esimerkiksi öljy-yhtiö päättää lisätä tuotantoa tänään, on tämä tuotanto pois huomista tuotannosta. Tämä voidaan nähdä nykytuotannon vaihtoehtoiskustannuksena, niukkuusvuokrana (scarcity rent) ja se koskee ainoastaan uusiutumattomia, yksityisessä omistuksessa olevia luonnonvaroja. Intertemporaalisia allokointipäätöksiä voidaan kuvata yksinkertaisella kahden periodin mallilla (Keohane & Olmstead 2007, 84–97), jossa tehokkuusehto voidaan esittää seuraavasti:

$$PV(MB_1 - MC_1) = PV(MB_2 - MC_2),$$

missä PV on nykyarvo, MB on rajahyöty ja MC on rajakustannus. Toisin sanoen, eri periodeille allokoitujen tuotantopäätösten nykyarvojen tulisi olla sama. Jos rajanettohyötyjen nykyarvot eivät olisi yhtä suuria, johtaisi arbitraasi tuotannon siirtämiseen yhdeltä periodilta toiselle kunnes yhtäsuuruus olisi voimassa.

Oletetaan molempien periodien kysynnän olevan muotoa $p_t = 10 - 0,5q_t$. Esimerkin yhtiötä edustaa jokin öljyntuotantoon erikoistunut yhtiö. Öljybarrelien kokonaismäärä oletetaan kahdeksikymmeneksi: nämä kaksikymmentä barrelia edustavat yhtiön hallussa olevia öljyreservejä, joita allokoidaan eri periodeille. Rajakustannus on tässä esimerkissä 3 € ja diskonttotekijä on 10 prosenttia.

Sijoitetaan kysyntäfunktio ja rajakustannukset ylläolevaan lausekkeeseen:

$$10 - 0,5q_1 - 3 = \frac{10 - 0,5q_2 - 3}{1 + 0,10}$$

$$7 - 0,5q_1 = \frac{7 - 0,5(20 - q_1)}{1,10}$$

$$7 - 0,5q_1 = \frac{0,5q_1 - 3}{1,10}$$

Saadaan optimaaliset määrät $q_1^* = 10,19$ barrelia ensimmäiselle periodille ja $q_2^* = 20 - q_1^* = 9,81$ barrelia toiselle periodille.

Mallista voidaan kiinnittää huomiota muutamiin seikkoihin. Ensinnäkin, diskonttotekijä, joka tässä on 10 prosenttia, vaikuttaa siihen, miten paljon tuotantoa kannattaa siirtää huomiseen. Jos diskonttotekijä on korkea, kannattaa öljyä pumpata suhteellisesti enemmän nyt ja siirtää tästä saadut tuotot korkoa tuottaviin arvopapereihin. Toiseksi, tuotannon rajakustannukset oletetaan vakioksi (3 €); öljyn tuottaminen yhä syvemältä ei lisää kustannuksia. Kolmanneksi, käänteisen kysyntäfunktion sijoittaminen lausekkeeseen rajahyödyn paikalle johtuu kilpailullisten markkinoiden ehdosta $MB = p$. Rajahyötyähän voidaan pitää rajamaksuhalukkuutena (marginal willingness to pay), jota tässä yhteydessä kuvataan käänteisellä kysyntäfunktiolla p_t .

Kysynnän oletettiin olevan muotoa $p_t = 10 - 0,5q_t$. Koska kyseessä on käänteinen kysyntäfunktio, voidaan siitä johtaa optimaalinen hinta edellä ratkaistujen optimaalisten määrien avulla:

$$p_1^* = 10 - 0,5(q_1^*) \approx 4,905\text{€}$$

$$p_2^* = 10 - 0,5(q_2^*) \approx 5,095\text{€}$$

Huomattava on, että tässä tapauksessa hinta ei ole yhtä suuri kuin rajakustannus (3 €), mikä poikkeaa perinteisistä kilpailullisia markkinoita koskevista oletuksista. Hinnan ja rajakustannuksen erotus onkin aiemmin mainittu niukkuusvuokra (scarcity rent). Tämä niukkuudesta johtuva lisä ei eliminoidu kilpailun seurauksena, sillä niukkuus tekee mahdottomaksi tuotannon lisäämisen siihen pisteeseen, jossa voitot nollautuvat.

3.3 Hotelling-sääntö

Hotellingin säännön mukaan niukkojen luonnonvarojen tuotannosta saatavien voittojen kehityksen tulisi pitkällä aikavälillä mukailla koron kehitystä. Sääntö voidaan esittää yhtälöllä:

$$\frac{P'(t)}{P(t)} = \delta,$$

tai

$$P'(t) = \delta P(t),$$

missä $P(t)$ on niukkuusvuokra eli aiemmin mainittu markkinahinnan ja rajakustannusten erotus ja δ diskonttoteleijä. Toisin sanoen niukkuusvuokran tulisi nousta diskonttoteleijän mukaan. Tämäkin on ymmärrettävissä arbitraasin avulla: jos luonnonvaran hintaa nousee nopeampaa kuin korko, yrityksiä astuu markkinoille, minkä seurauksena tarjonta kasvaa ja hinnat alenevat. Jos luonnonvaran hinta nousee hitaampaa kuin korko, yritykset jättävät markkinat ja hinta nousee tarjonnan supistuessa. (Markkinat oletetaan kilpailullisiksi; niille on vapaa pääsy ja poistuminen.) Säännössä korostuu luonnonvaran rooli pääomahöydykkeenä. Esimerkiksi maassa oleva öljy on pääomahöydyke, joka voidaan hyödyntää välittömästi, jolloin niukkuusvuokra voidaan nähdä vaihtoehtoiskustannuksena, tai jättää maahan, jotta siitä voitaisiin hyötyä niukkuusvuokran muodossa. (Perman ym. 1999, 204–207.)

Säännön kannalta oleellinen ehto on luonnonvaran yksityinen omistus. Jos kyseessä olisi niin sanottu yhteiskäyttöresurssi (common pool resource), niukkuusvuokra ei toimisi intertemporaalisen käytön säätelijänä kuten yksityisessä omistuksessa olevan resurssin tapauksessa. Jos yhteiskäyttöresurssin käyttäjä päättäisi säästää resurssia seuraavalle periodille hyötyäkseen odotettavissa olevasta hinnan noususta, voisi jonkun muun käyttäjän päinvastainen päätös tehdä tästä päätöksestä turhan.

Empiirinen aineisto on kuitenkin pääosin ristiriitaista Hotellingin säännön kanssa. Uusiutumattomien luonnonvarojen hinnat ovat joko laskeneet tai pysyneet vakioina, kun sääntö ennustaa eksponentiaalisesti kasvavia hintoja. (Krautkraemer 1998, 2067–2107.)

3.4 Markkinamekanismit niukkuuden lieventäjinä

3.4.1 *Substituutio*

Olisi teknisesti mahdollista korvata öljyn rooli polttoaineena esimerkiksi aurinkoenergialla, joka on käytännössä ehtymätön, uusiutuva luonnonvara. Tällöin aurinkoenergia olisi täydellinen substituutti polttoaineelle.

Substituution tekninen mahdollisuus ei kuitenkaan vielä takaa siirtymistä vaihtoehtoon, vaikka tämä vaihtoehto olisi uusiutuva luonnonvara. Jos maksuhalukkuus on alhaisempi kuin substituutin rajakustannus, ei siirtymistä substituuttiin tule tapahtumaan, sillä tällä rajakustannustasolla sille ei yksinkertaisesti ole kysyntää. (Tässä tietenkin tulee pitää mielessä, että rajakustannus ei todellisuudessa ole vakio vaan siihen voidaan vaikuttaa muun muassa teknologisella kehityksellä. Samoin voidaan kysyä, miten realistista on olettaa maksuhalukkuus muuttumattomaksi.) Jos maksuhalukkuus on kuitenkin korkeammalla tasolla kuin substituutin rajakustannus, tulee siirtyminen uusiutuvaan substituuttiin tapahtumaan kun substituutin rajakustannus on yhtä suuri kuin uusiutumattoman luonnonvaran rajakustannus. Tässä pisteessä uusiutumaton luonnonvara poistuu kokonaan käytöstä, hyvin todennäköisesti ennen kuin se tulee fyysisesti loppumaan. Uusiutumattoman luonnonvaran kokonaisrajakustannus (rajaniukkuusvuokra plus rajakustannus) ei tällöin ikinä tule ylittämään sitä tasoa, jolla substituutti on saatavilla, sillä tällöin substituutin käyttäminen olisi halvempaa eikä kukaan käyttäisi uusiutumattomaa luonnonvaraa. (Ks. esim. Tietenberg 2003, 134–140.)

Substituutiomahdollisuus myös kiihdyttää uusiutumattoman luonnonvaran käyttöä. Tämä johtuu siitä, että allokoidessaan luonnonvaran louhintaa eri periodeille, tuottaja pyrkii tasaamaan rajanettohyötyjen nykyarvot eri periodeille. Substituutiomahdollisuus kuitenkin tarkoittaa, että tietyn periodin jälkeen ei enää ole rationaalista tuottaa uusiutumattomaa luonnonvaraa. Tällöin uusiutumattoman resurssin louhinta jaetaan harvempiin periodeihin kuin ilman substituutiomahdollisuutta. Uusiutuvan substituutin olemassaolo siis vauhdittaa siirtymistä tähän substituuttiin.

3.4.2 *Etsintä*

Niukkuuden kasvu näkyy luonnonvaran niukkuusvuokran nousussa; nykyhetken tuotannon vaihtoehtoiskustannus nousee, kun eri periodeille allokoitavan luonnonvaran määrä vähenee. Tämän ”monopolivoiton” nousu taas kannustaa luonnonvarojen tuotantoon erikoistuneita firmoja lisäämään etsintäkustannuksia. Etsintätoimintaa taas tulee lisätä, kunnes etsinnän rajakustannukset ovat samalla tasolla kuin

rajaniukkuusvuokra. Tässä mielessä rajaniukkuusvuokra on kuten rajahyöty; jos tuotannon rajakustannus on alhaisempi kuin rajaniukkuusvuokra, kannattaa louhintaan erikoistuneen firman lisätä louhintaa. Onnistunut etsintä voisi johtaa rajakustannusten laskuun (tai ainakin niiden nousuvauhdin hidastumiseen)

Tästä johtuen niukkuuden kasvu esimerkiksi hupenevien reservien seurauksena johtaa siihen, että firmat ovat valmiimpia uhraamaan enemmän varoja uusien esiintymien etsintään kuin ennen. Etsintä ei tietenkään takaa täydellistä keinoa lieventää niukkuutta, sillä etsintään liittyy runsaasti epävarmuuksia. Äärimmäisessä tapauksessa luonnonvara on kokonaan kulutettu loppuun; tällöin etsintä voi aiheuttaa vain kustannuksia. Niukkuusindikaattorien käsittelyn yhteydessä tuli ilmi, että rajaetsintäkustannukset voisivat olla kelvollinen niukkuuden mittari, sillä oletettavasti rajaetsintäkustannukset kasvavat jonkin luonnonvaran käydessä niukemmaksi. Tällöin esimerkiksi jouduttaisiin kohdistamaan etsintätoimia syvemmälle maankuoreen, mikä vaatisi kehittyneempiä porausmenetelmiä ja suurempia energiamääriä. Tämä perustuu juuri olettamukseen, että rajaetsintäkustannukset ovat yhtä suuria rajaniukkuusvuokran kanssa (jälleen arbitraasin tulisi taata tämän yhtäsuuruuden säilymisen), mistä johtuen näiden kahden välisen kehityksen voidaan myös olettaa olevan sama. Ongelma kuitenkin on informaation puuttuminen, mikä esimerkiksi vaikeuttaa teorioiden paikkansapitävyyden selvittämistä. Oleellista kuitenkin on, että niukkuusvuokran nousun tulisi kannustaa firmoja hyväksymään suuremmat etsintäkustannukset, ja näin ollen tämän mekanismin tulisi toimia niukkuuden lieventäjänä, jos etsintätoiminnan seurauksena luonnonvaran reservit kasvavat, näkyen jälleen niukkuusvuokran alenemisena. (Lasserre 1985, 474–483.)

3.4.3 *Teknologinen kehitys*

Teknologinen kehitys vaikuttaa useiden väylien kautta niukkuuteen ja tämä mekanismi liittyy läheisesti sekä etsintään että substituutiomahdollisuuksiin. Teknologinen kehitys voi alentaa tuotannon kustannuksia, alentaa etsinnän kustannuksia, parantaa energiankäytön hyötysuhdetta, parantaa talteenottotehokkuutta (määrä, joka esiintymästä on teknisesti hyödynnettävissä nykyisissä markkinaolosuhteissa), tehdä substituutin käytön houkuttelevammaksi ja niin edelleen.

Teknologinen kehitys ei kuitenkaan välttämättä lievennä niukkuutta. Esimerkiksi tuotantokustannusten aleneminen voisi kiihdyttää luonnonvaran tuotantoa ja täten siirtymistä substituuttiin. Tarpeeksi nopea teknologinen kehitys voi myös alentaa tuotantokustannuksia vaikka jouduttaisiin hyödyntämään jatkuvasti heikompia, teknisesti haasteellisempia esiintymiä. Tällöin hinta saattaa laskea, vaikka tarjonnan hupeneminen asettaisi nousupaineita hinnalle. (Ks. esim. Tietenberg 2003, 139–140.)

4 TALOUSKASVU JA KESTÄVÄ KEHITYS

4.1 Kestävän kehityksen määrittelyminen

Karkeasti ottaen kestävä kehitys käsitetään kehitykseksi, joka ei ole poissa tulevilta sukupolvilta. Kestävän kehityksen määritelmäerot eivät kuitenkaan ole triviaaleja. Jos esimerkiksi politiikkaa tehdään jonkin kestävä kehityksen indikaattorin mukaan, vaikuttavat määritelmät siihen, millaisia politiikkaohjeita näistä indikaattoreista voidaan johtaa. Esimerkiksi Herman Dalyn mukaan (Daly 1974, 15–21) kestävä kehitys voidaan saavuttaa ainoastaan niin sanotussa steady state -taloudessa, jossa niin väestönkasvu kuin pääoman määräkin pysyvät vakioina. (Tällöin esimerkiksi investoinnit vastaavat pääoman kulumista.) Koska vapaassa ja kilpailullisessa yhteiskunnassa syntyvyyden ja pääoman pysyminen vakiotasolla olisi äärimmäisen epätodennäköistä, edellyttäisi steady state -talous merkittäviä yksilönvapauksien rajoituksia ja mahdollisesti demokratiasta luopumista. Tämä on kuitenkin äärimmäinen esimerkki kestävä kehityksen määritelmästä, mutta sen tarkoituksena on osoittaa, että määritelmäerot eivät ole triviaaleja.

Maltillisempaan kestävä kehityksen määritelmänä voidaan pitää YK:n Brundtlandin komission raportissa (World Commission on Environment and Development 1987, 43) esitettyä versiota: ”Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.” Tarpeiden (needs) määrittelyminen jätetään kuitenkin avoimeksi, ja näin ollen koko määritelmä jää hieman epäselväksi. Entä jos tulevien sukupolvien tarpeet (”...to meet *their own* needs”; kursivointi lisätty) ovat huomattavasti suuremmat kuin nykyisten? Tulisiko nykysukupolvien tällöin uhrata omaa hyvinvointiaan, jotta tulevat sukupolvet voisivat nauttia *korkeammasta* elintasosta kuin nykyinen sukupolvi? Taloustieteilijöille tunnetumpi kestävä kehityksen määritelmä on Robert Solowin vuonna 1991 pitämässä esitelmässään (Solow 1991, Perman ym. 1999, 55–57 mukaan) tarjoama versio: Kestävä kehitys on kehitystä, joka jättää tuleville sukupolville *mahdollisuuden* tulla vähintään yhtä hyvin toimeen kuin me tänään.

Lähes kaikenlainen uusiutumattomien luonnonvarojen käyttö on poissa tulevilta sukupolvilta. Esimerkiksi öljyn muodostumiseen johtavat biologiset ja geologiset prosessit ovat niin hitaita, että öljyä pidetään uusiutumattomana luonnonvarana. Uusiutumattomien luonnonvarojen hyödyntäminen sinänsä ei olisi ongelma kestävä kehityksen kannalta, jos tästä saadut tuotot investoitaisiin korkoa tuottaviin instrumentteihin tai kiinteään pääomaan, mutta tällöin oletetaan, että näiden ja luonnonvarojen välillä on täydellinen substituutiosuhde. Näin menetellään muun muassa Norjassa, jossa Pohjanmeren öljystä saadut tuotot investoidaan yhteiseen

rahastoon, jolla on tarkoitus pyrkiä lieventämään tulevaisuuden rahoitusongelmia. Nykyhetkenä tuotettu öljy on kuitenkin joka tapauksessa pois tulevilta sukupolvilta. Se, onko tämä ongelma tulevien sukupolvien energiantarpeiden kannalta, riippuu pitkälti substituutiomahdollisuuksista. Jos tämän päivän investoinnit tutkimukseen ja kehitykseen mahdollistavat tulevaisuudessa sellaisen energianlähteen hyödyntämisen, joka on taloudellisesti öljyä tehokkaampaa hyödyntää, jota on käytännössä rajattomasti saatavilla ja joka aiheuttaa huomattavasti vähemmän päästöjä, niin tämän päivän kulutus on pikemminkin edistänyt kestäväen kehityksen asiaa kuin heikentänyt sitä.

Substituutiomahdollisuuksista johtuen jonkin luonnonvaran käytön kuvaileminen tuhlailevana, tulevien sukupolvien kehitysmahdollisuuksia alentavana toimintana on harhaanjohtavaa (Meadows ym. 2005, 121). Jos esimerkiksi oletetaan, että maailmassa on tietty muuttumaton määrä öljyä, ja tämä määrä pyritäisiin jakamaan tasaisesti *kaikkien* tulevien sukupolvien kesken, lähestyisi jokaiselle sukupolvelle allokoitu öljymäärä nolaa tulevien sukupolvien määrän lähestyessä ääretöntä. Näin ollen kestäväen kehitystä ei tulisi pitää riippuvaisena jonkin tietyn luonnonvaran riittävydestä. Ongelma tietenkin on, että substituutiomahdollisuudet ovat usein teoreettisia. Tässä tutkielmassa pyritäänkin valottamaan niukkojen luonnonvarojen substituutiomahdollisuuksia.

4.2 Kestävä kehitys historiassa

Tässä luvussa käsitellään kestäväen kehityksen historiallisia taustoja niiltä osin, jotka ovat tämän tutkielman kannalta oleellisia. Huoli luonnonvarojen riittämättömyydestä ei ole uusi, vaan teollistumisen myötä ilmaantunut ilmiö. Ennen teollistumista ihmisen kyky vaikuttaa ympäristöön oli rajallinen ja näin ollen ihmisen ”ekologinen jalanjälki” oli hyvin pieni. Tämä johtui toisaalta teknologian tasosta, toisaalta pienistä populaatioista. (Poikkeuksia tietenkin oli, tunnetuimpien joukossa Pääsiäissaaren tapaus.) Teollistumisen myötä ihmisen suhde luontoon kuitenkin muuttui.

1800-luvun lopulla brittiläinen historioitsija Thomas Carlyle kutsui taloustiedettä ”synkäksi tieteeksi” (dismal science). Taloustieteen maine pessimistisenä tieteenä oli pitkälti seuraus Thomas Malthusin (1766–1834) ajatuksista. Malthus oli vuonna 1798 julkaistussa kirjassaan *An Essay on the Principle of Population* esittänyt, että jatkuva talouskasvu yhdistettynä populaation kasvuun ja viljelysmaan niukkuuteen johtaisivat elintason romahtamiseen. Tällainen pessimismi oli suhteellisen ennenkuulumatonta tuohon aikaan. 1700-luvun puolivälin jälkeen alkanut teollistuminen ja valistusaatteiden leviäminen olivat johtaneet optimistiseen suhtautumiseen ihmiskunnan kehityksen mahdollisuuksiin. Teollista vallankumousta edeltäneenä aikana elintason kehitys oli ollut hidasta ja ympäristön impositoimat paineet (taudit, satoihin vaikuttavat sääolot,

sodat) pitivät ihmispopulaatioiden koot maltillisina. Teollistumisen ja valistusaatteiden leviämisen myötä ihmisen suhde ympäristöön alettiin kuitenkin nähdä uudessa, optimistisemmässä valossa. Teollistumisen myötä ihmisen kyky muokata ympäristöä itselleen suotuisammaksi kasvoi merkittävästi. Tätä taustaa vasten Malthusin ajatukset tuntuivat radikaaleilta. (Perman ym. 1999, 3–4.)

Malthusin ajatusten taustalla oli oletus viljelykelpoisen maan niukkuudesta. Kun voitonmaksimointi edellyttää viljelyn aloittamista aina viljelykelpoisimmalta kaistaleelta, johtaisi tämä aikanaan siihen, että ajan myötä jouduttaisiin ottamaan käyttöön enemmän ja enemmän vähemmän viljelykelpoista maata. Tämä johtaisi maataloustuoton alenemiseen per maayksikkö, ainakin jos oletetaan teknologian tason pysyvän muuttumattomana. Kun tämä viljelykelpoisen alueen väheneminen yhdistetään kasvavaan ruoantarpeeseen, joka oli seurausta teollisuuden mahdollistamasta väestönkasvusta, romahtaisi elintaso hyvin alhaiselle tasolle. Tällöin väestö ei enää kasvaisi ja talous asettuisi vakaalle tasolle. (Perman ym. 1999, 3–4.)

Malthusin oletus alenevista tuotoista oli kuitenkin väärä. Teknologisen kehityksen seurauksena maataloustuotanto per maayksikkö kasvoi hurjasti, erityisesti toista maailmansotaa seuranneen vihreän vallankumouksen myötä. Nykyinen ongelma ei ole niinkään ruoantuotannon kykenemättömyys pysyä väestönkasvun tahdissa, vaan monien alueiden alhainen elintaso, vaikka ruoantuotannon tekniset ongelmat olisivat ratkaistavissa. Teknologisen kehityksen vaikutus on näkynyt vuosikymmenien ajan monien viljakasvien alenevissa hinnoissa ja tuottavuuden kasvussa. (Evenson & Gollin 2003, 758–762.) Ongelmana on pikemminkin maataloustukiaisten aiheuttama ylituotanto ja näistä tukiaisista johtuva maataloustuotannon keskittyminen pohjoisille alueille, joilla ei ole kannattavaa viljellä. Tämä entisestään syventää köyhien alueiden ongelmia, sillä esimerkiksi monet vientituotteiden puutteesta kärsivät Afrikan maat olisivat luonnonolojen ja kehitystasonsa puolesta sopivampia maataloustuotannolle kuin pohjoinen Eurooppa. Samoin liikalaiduntaminen, haitalliset kastelumenetelmät ja muut tekijät ovat johtaneet viljelykelpoisen maan huomattavaan heikkenemiseen joillakin alueilla. Pahimmassa tapauksessa tällaisen toiminnan tuloksena on ollut viljelymaan aavikoituminen. Nämäkin ongelmat olisivat teknisesti ratkaistavissa, sillä ongelmat johtuvat lähinnä institutionaalisista tekijöistä esimerkiksi epäselvyyksistä omistusoikeuksien suhteen tai yhteiskäyttöresursseihin liittyvistä haitallisista kannustimista, jotka ehkäisevät viljelijöitä kohtelemasta viljelemäänsä maata investointihyödykkeenä.

Maataloustuotannon korostaminen tässä luvussa johtuu maatalouden keskeisestä asemasta taloudessa aina meidän päiviimme saakka. (Huolimatta tuotantorakenteen keskittymisestä palveluihin ja teollisuustuotantoon kehittyneissä talouksissa, maatalous on yhä monilla köyhillä alueilla ensisijainen elinkeino.) Tästä historiallisesta keskeisyydestä johtuen talouskasvun ja niukkuuden ongelmat assosioitiin viljelysalan

niukkuuteen. (Nykyään energiantuotanto on samassa roolissa.) Maalle ei nähty substituutteja ja teknologisen kehityksen nähtiin lähinnä johtavan entistä nopeampaan viljelyskelpoisen alan hyödyntämiseen ja siten sen käyttöiän lyhenemiseen. Teknologinen kehitys on kuitenkin mahdollistanut ruoantuotannon kehittymisen siten, että nykyisillä menetelmillä seitsemän miljardin väestön ruokkiminen olisi teknisesti helppoa. Ongelmat ovatkin siten olleet lähinnä poliittisia ja institutionaalisia, eivät teknisiä. Tämä tulisi muistaa, kun lähdetään käsittelemään nykypäivän ongelmia. Se, että teknologinen kehitys voisi lieventää luonnonvarojen niukkuudesta aiheutuvia ongelmia ei vielä takaa, että tällainen mahdollisuus myös hyödynnettäisiin.

4.3 Uusmalthusilaisuus

Teknologinen kehitys näytti ratkaiseen maataloustuotannon ongelmat. Samoin väestönkasvu oli kehittyneissä talouksissa hidastunut. Tästä myönteistä kehityksestä huolimatta matlhusilaiset ideat ovat 1970-luvulta lähtien kasvattaneet suosiotaan. Vuonna 1972 julkaistu Rooman Klubin tilaama kirja *The Limits to Growth* (Kasvun rajat) maalasi tietokonesimuloinneissaan synkän kuvan ihmiskunnan tulevaisuudesta ellei radikaaleihin toimenpiteisiin ryhdyttäisi välittömästi. Kirjan käyttämän World3 -mallin mukaan kehitys tulisi tiensä päähän eksponentiaalisen kasvun, ilmansaasteiden ja/tai luonnonvarojen riittämättömyyden seurauksena (Meadows, Randers, Behrens & Meadows 1973). Vuotta myöhemmin Jom Kippur -sodan myötä alkanut ensimmäinen energiakriisi kiinnitti yleisön huomion niukkuudesta aiheutuviin ongelmiin, kun Lähi-idän öljyntuottajamaat leikkasivat öljyntuotantoaan estääkseen länsimaita tukemasta Israelia sen jouduttua Egyptin ja Syyrian hyökkäyksen kohteeksi. Tämä toimi nosti öljyn barrelihinnan nelinkertaiseksi vain muutamassa kuukaudessa, mikä johti muun muassa polttoaineen säännöstelyyn Yhdysvalloissa. Vuonna 1979 seurannut toinen energiakriisi ja 1980-luvun huoli otsonikerroksen heikkenemisestä vahvistivat entisestään uskoa luonnonvarojen riittämättömyyteen ja ympäristön tilan heikkenemiseen.

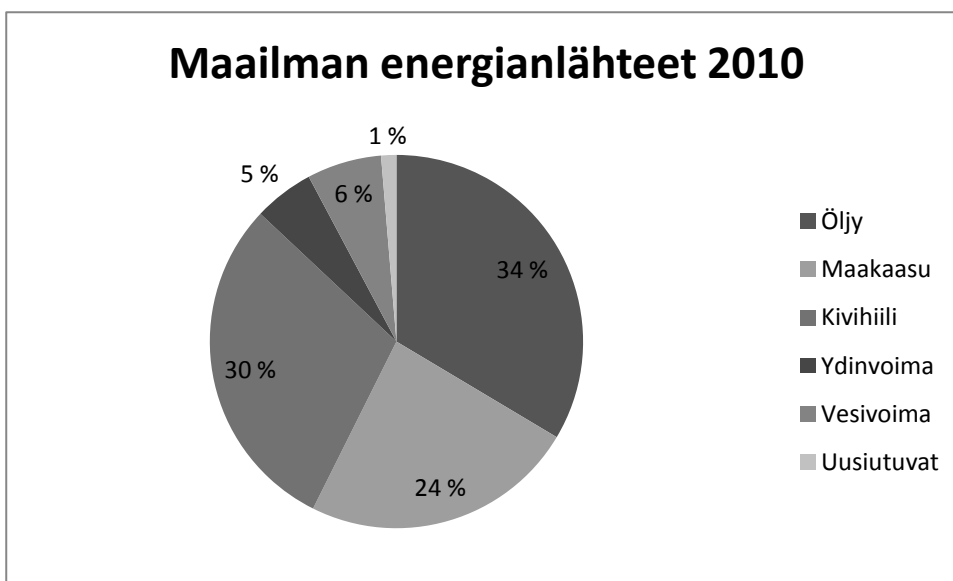
Kasvun rajat -kirjan ennustukset saivat osakseen merkittävää kritiikkiä erityisesti ekonomisteilta, jotka syyttivät kirjan simuloiteja epärealistisista oletuksista. Esimerkiksi saasteiden nähtiin lisääntyvän talouskasvun myötä, kun todellisuudessa joidenkin saasteiden kohdalla kehitys on kääntynyt laskuun kokonaistuotannon ylittäessä tietyn rajan. (Tämän voidaan kuvitella johtuvan lähinnä kahdesta tekijästä. Ensinnäkin, talouskasvu mahdollistaa teknologisen kehityksen ja siten tehokkaampien suodatinmenetelmien käyttöönoton ilman, että nämä menetelmät koituisivat liian haitallisiksi tuotannolle. Kehittyvät taloudet ovat esimerkiksi hiilidioksidipäästöjen suhteen vastustaneet länsimaiden vaatimuksia leikata päästöjä, sillä tämä saattaisi

merkittävästi haitata näiden talouksien kehittymistä länsimaiden tasolle. Toiseksi voidaan ajatella, että elintason noustessa ihmiset vaalivat enemmän ympäristön puhtautta, kun alhaisemmilla kehitystasoilla perustoimeentulon takaaminen on etusijalla.) Samoin luonnonvarojen suhteen oletettiin heikko tai olematon substituuatio; simuloinneissa lähinnä suhteutettiin tunnetut reservit vuosittaiseen tuotantoon, ottamatta huomioon siirtymistä substituuutteihin, hinnan kohoamisen aiheuttamaa kysynnän vähenemistä tai reservien kasvua. Tässä mielessä talous nähtiin staattisena, kykenemättömänä muuttumaan olosuhteiden muuttuessa. Etukäteen on tietenkin lähes mahdotonta arvioida, miten siirtyminen substituuutteihin tapahtuu, kun kaikista substituuatiomahdollisuuksista ei välttämättä edes tiedetä. Samoin on mahdotonta arvioida tarkasti, miten teknologinen kehitys tulee vaikuttamaan louhintakustannuksiin. 1970-luvun teknologialla esimerkiksi bitumin erottaminen öljyhiekasta olisi ollut niin kallista, että substituuatiomahdollisuutta pidettiin lähinnä tieteiskuvitelmana. On kuitenkin selvää, että näistä epävarmuuksista huolimatta kirjan oletukset, jotka olivat keskeisiä simulointien tarjoaman pessimistisen kuvan kannalta, olivat liian jyrkkiä, ja erityisesti tunnettujen reservien käyttäminen tulevaisuuden ennustamisen perustana on antanut harhaanjohtavan kuvan luonnonvarojen niukkuudesta. (On myös aiheellista pohtia vaihtoehtoa, että pessimistiset ennustukset ovat osittain johtaneet myönteiseen kehitykseen kiinnittämällä yleisön huomion esimerkiksi ilmansaasteisiin.) (Keohane & Olmstead 2007, 207–229.)

5 NIUKKUUDEN EMPIIRINEN TARKASTELU

5.1 Fossiiliset polttoaineet

Fossiiliset, hiilipohjaiset polttoaineet (kivihiili, öljy ja maakaasu) ovat muodostuneet miljoonia vuosia sitten kuolleiden eliöiden jäänteistä. Esimerkiksi maakaasun ajatellaan syntyneen, kun näiden orgaanisten jäänteiden hiilidisidokset hajosivat korkeapaineisessa ympäristössä maan alla. Fossiilisten polttoaineiden energiapotentiaali on ollut pitkään tiedossa, mutta teknologiset rajoitteet ovat pitäneet fossiiliset polttoaineet pitkälti ihmiskunnan ulottumattomissa ennen teollistumista. Fossiiliset polttoaineet ovat niiden saasteisuudesta huolimatta yhä hyvin laajalti käytössä johtuen niistä saatavasta energiatehokkuudesta. Maailmanlaajuisesti fossiiliset polttoaineet vastaavat yli 80 prosenttia kaikesta energiankulutuksesta. Ydinvoima, viidenneksi tärkein energianlähde, vastaa vain viittä prosenttia maailmanlaajuisesta energiankulutuksesta:



Kuvio 2 Energianlähteet kulutuksen mukaan (BP Statistical Review 2011)

Fossiiliset polttoaineet ovat käytännössä uusiutumattomia ja ainoastaan kivihiiltä on niin runsaasti, että siitä ei katsota aiheutuvan pulaa. Fossiilisten polttoaineiden ehkä merkittävin ongelma on niiden saasteisuus. Palamisreaktioiden seurauksena ilmakehään poistuu runsaasti muun muassa hiilidioksidia, joka vaikuttaa kasvihuoneilmiöön. (Ihmisten aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen vaikutus niin sanottuun ilmastonmuutokseen on huomattavasti kiistanalaisempi kysymys johtuen ihmisen minimaalisesta kontribuutiosta luonnolliseen hiilidioksidisykliin ja siitä, että hiilidioksidin vaikutuksen voimakkuutta kasvihuoneilmiöön ei tunneta.)

Ilmansaasteiden torjunta ja torjuntaan vaadittavien toimenpiteiden vaikutus fossiilisten polttoaineiden käyttöön ja sitä kautta kestäväan kehitykseen on tämän tutkielman aiheen ulkopuolella, mutta kysymys on merkittävä, sillä huoli ilmansaasteista vaikuttaa politiikkaan, jolla saattaa olla suurikin merkitys fossiilisten polttoaineiden käytölle. Esimerkiksi suuria alueita Alaskasta on suljettu luonnonsuojelualueiksi, vaikka niissä oletetaan olevan huomattavia määriä öljyä ja maakaasua (Energy Information Administration 2008). Samoin erinäiset pigou-verot voivat vaikuttaa suhteellisiin hintoihin.

Fossiilisten polttoaineiden valinta tämän tutkielman pohjaksi johtuu toisaalta niiden keskeisyydestä talouden energiantuotannolle ja toisaalta niiden rajallisuudesta. Pessimistit näkevät nimenomaan näissä kahdessa tekijässä siemenen tuleville ongelmille: jos kansantalouden toiminta ja kasvu on riippuvaista energiantuotannosta ja energiantuotanto on tällä hetkellä yli 80 prosenttisesti riippuvaista rajallisista fossiilisista polttoaineista, tulee kansantalouden tuleva kasvu olemaan riippuvaista näiden fossiilisten polttoaineiden reservien kehityksestä ja niiden substituutiomahdollisuuksista. Analysoitaessa fossiilisten polttoaineiden niukkuutta, huomiota tulee kiinnittää tekijöihin kuten talteenottotehokkuuden kehitykseen (kuinka suuri osa luonnonvaran alueellisesta esiintymästä on taloudellisesti hyödynnettävissä), talteenottotehokkuuteen läheisesti liittyvään reservien kasvuun ja substituutiomahdollisuuksiin. Koska fossiiliset polttoaineet ovat ehdottoman rajallisia, nousevat substituutiomahdollisuudet pitkällä aikavälillä kaikkein tärkeimmäksi näistä niukkuutta lieventävistä tekijöistä. (Kivihiili on rajattu tutkielman ulkopuolelle johtuen kivihiilivarantojen runsaudesta.)

Tässä luvussa käytetään pääsääntöisesti Yhdysvaltain energiaministeriön ja brittiläisen BP-energiayhtiön julkaisemaa aineistoa, jotka ovat julkisesti saatavissa muun muassa Excel-tiedostoina. Erityisesti BP:n vuosittain julkaisemat tilastolliset katsaukset (BP Statistical Review) ovat tässä tutkielmassa hyödynnettyjen lähteiden perusteella laajamittaisesti käytössä. (Mainittakoon, että korruption tutkimuslaitos Transparency on pitänyt BP:n toimintaa läpinäkyvänä (Transparency 2011).) Kun tarkastellaan kehitystä ajassa (tätä havainnollistetaan aineistojen perusteella laadittujen kuviodien avulla), turvaudutaan pääsääntöisesti yhden lähteen käyttöön, sillä eri aineistot saattavat antaa toisistaan poikkeavia arvoja mitattaville suureille. Tämä johtuu muun muassa poikkeavista metodologioista ja määritelmistä. Tätä tutkielmaa varten amerikkalaisten aineistojen kuutiojalat on muutettu kuutiometreiksi kertoimella 0,0283.

5.1.1 *Reserveistä yleisesti*

Reserveillä (reserves) viitataan siihen osuuteen luonnonvaran kokonaismäärästä, joka on joko nyt tai lähitulevaisuudessa hyödynnettävissä. Tällöin luonnonvarojen, jotka sijaitsevat esimerkiksi niin syvällä maan kuoressa, että niiden tuotanto ei milloinkaan tule olemaan taloudellisesti järkevää tai teknisesti mahdollista, ei katsota kuuluvan reserveihin. Esiintymä (reservoir) taas on geologinen kokonaisuus, jossa reservit sijaitsevat, ja siten aina reservejä suurempi käsite. Reservit kuvastavat esiintymien talteenotettavaa osaa. Kenttä (field) kuvaa paikkaa, jonne ihminen on rakentanut tuotantolaitoksia.

Reservit jaetaan pääsääntöisesti kolmeen ryhmään, joista ensimmäisestä on saatavilla eniten tietoa ja kolmannelta vähiten (Tietenberg 2003, 128–133):

Tunnetut reservit: Tähän ryhmään kuuluvat ne vielä hyödyntämättömät luonnonvarat, joiden sijainti tiedetään varmuudella tai lähes täydellisellä varmuudella ja jotka ovat tuotettavissa nykyisillä myyntihinnoilla ja tuotantokustannuksilla. Tunnetut reservit voidaan käsittää ”hyllyllä olevaksi inventaarioksi” viitaten varmuuteen, jolla tunnetut reservit ovat hyödynnettävissä nykyisessä markkinatilanteessa.

Todennäköiset reservit: Tähän ryhmään kuuluvat ne luonnonvarat, joiden kuvitellaan olevan olemassa perustuen geologisiin päätelmin tunnetuista reserveistä, mutta joiden olemassaoloa ei vielä ole lähdetty (tai kyetty) varmistamaan. Yksi syy tähän on, että nykyiset reservit ovat riittäviä tarpeeksi pitkälle tulevaisuuteen, eikä näin ollen ole vielä ilmaantunut tarvetta laajentaa reservejä, joiden kasvulla saattaisi olla hintaa alentavia vaikutuksia. Myös todennäköiset reservit ovat tuotettavissa nykyisin hinnoin ja kustannuksin. Todennäköisten reservien kuvitellaan yleensä sijaitsevan tunnettujen reservien läheisyydessä.

Mahdolliset reservit: Geologisiin arvioihin perustuvia reserveitä, jotka ovat mahdollisesti tuotettavissa (jos ne ovat olemassa) tuotantotekniikoiden parantuessa ja/tai luonnonvaran hinnan noustessa.

5.1.2 *Energiasta yleisesti*

Tässä alaluvussa käsitellään lyhyesti niukkuutta fysiikan pohjalta. Tarkoituksena on esittää ehdottomat tieteelliset rajat luonnonvarojen hyödyntämiselle energiantuotannossa. Taloudelliset rajoitteet perustuvat viime kädessä näille luonnon asettamille rajoituksille.

Energialla tarkoitetaan kappaleen tai systeemin kykyä tehdä työtä, joka voi olla kemiallista, biologista tai mekaanista. Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan energiaa ei voida tuhota tai luoda, mistä johtuen eristetyn systeemin¹ sisäenergia on muuttumaton. Näin ollen saattaisi vaikuttaa, että käytetty energia voitaisiin aina kierrättää, sillä energia ei käytön seurauksena katoa. Näin ei kuitenkaan ole, sillä energian käyttö nähdään yleisesti irreversiibelinä (peruuttamattomana; spontaani yhteen suuntaan) prosessina, koska energiaa työksi konvertoivien prosessien seurauksena energian haje eli työhön kelpaamattoman energian määrä (entropia) kasvaa muun muassa kitkan ja spontaanien virtauksien seurauksena. Tämä tunnetaan termodynamiikan toisena pääsääntönä: energia virtaa aina korkeamman lämpötilan omaavasta kappaleesta matalamman lämpötilan omaavaan kappaleeseen, mikä lisää energian hajetta (entropiaa). Tämä prosessi päättyy lämpötilaerojen tasaannuttua (eli kahden systeemin päädyttyä termiseen tasapainoon). Tässä tasapainossa ei enää tapahdu lämmön nettosiirtoa, jota voitaisiin hyödyntää työhön. Esimerkiksi auton moottori polttaa lokalisoituneessa muodossa olevaa energiaa (polttoainetta; alhainen entropia) ja poistaa osan siitä hyödyttömän lämpöenergian (”hukkalämpö”; korkea entropia) muodossa ympäristöön, jossa se hajaantuu, eikä näin ollen ole enää hyödynnettävissä työhön (tässä tapauksessa moottorin pyörittämiseen). Tästä kertaluonteisuudesta johtuen energian käytössä tulisi pyrkiä mahdollisimman korkeaan hyötysuhteeseen (hyötysuhde kertoo, miten suuri osa systeemiin syötetystä energiasta kyetään konvertoimaan hyödylliseksi työksi), sillä ”hukattu” energia ei enää ole saatavissa takaisin.² On kuitenkin huomattava, ettei maapallo kokonaisuudessaan ole eristetty järjestelmä, sillä maapallo vastaanottaa jatkuvasti energiaa auringon säteilyn muodossa. (Ks. esim. Schroeder 2000.)

5.2 Öljyn reservikasvu

Öljyn maailmanlaajuisen kokonaismäärän arvioidaan tällä hetkellä olevan noin 9-13 biljoonaa barrelia (vuosittaisen kulutuksen ollessa noin 30 miljardia barrelia). Tästä 30

¹ Eristetty systeemi (isolated system) ei voi vaihtaa energiaa tai ainetta muiden systeemien kanssa, kun taas suljettu systeemi (closed system) kykenee vaihtamaan energiaa, mutta ei ainetta, muiden systeemien kanssa.

² Toisen pääsäännön vieminen äärimmäisyyksin on johtanut ajatukseen niin sanotusta universumin lämpökuolemasta. Koska universumi on eristetty systeemi, tulee se jonakin päivänä olemaan tilassa, jossa kaikki energia on hyödyttömän lämpöenergian muodossa. Tällöin kaikki kemialliset, biologiset ja mekaaniset prosessit ovat pysähtyneet.

prosenttia koostuu konventionaalisesta raakaöljystä, 15 prosenttia koostuu raskasöljystä, 25 prosenttia koostuu hyvin raskaasta öljystä ja 30 prosenttia koostuu öljyhiekasta saatavasta bitumista (Highlighting heavy oil 2007). Konventionaalinen öljy on näistä kevyintä, vähiten tiheää, vähiten metalleja sisältävää ja viskositeetiltaan matalinta. Näin ollen sen tuottaminen on kaikkein taloudellisinta. Konventionaalisten öljyvarojen ehtyminen on johtanut raskaampien, epäkonventionaalisten öljyesiintymien hyödyntämiseen. On arvioitu, että tästä kokonaismäärästä on tällä hetkellä hyödynnettävissä noin 1,4 biljoonaa barrelia (RTU-suhde 46 vuotta). Tämä 1,4 biljoonaa barrelia on siis tämänhetkinen arvio maailman tunnetuista öljyreserveistä. (BP Statistical Review 2011.)

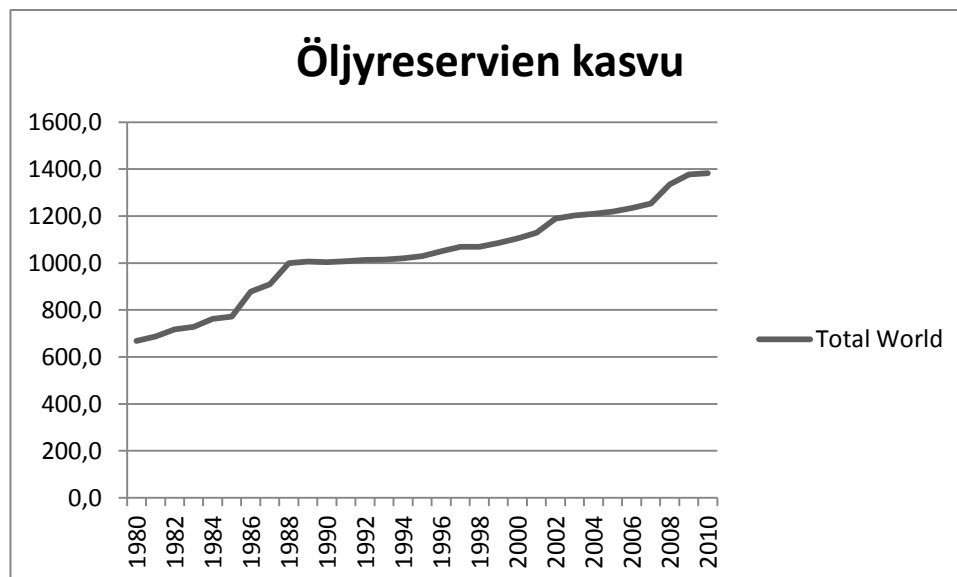
Arviot reservien suuruudesta ovat öljykentän tuotannon alkuvaiheessa yleensä hyvin maltillisia ja ovat siten osoittautuneet lähes aina alakanttisiksi. Tämä johtuu muun muassa rajoituksista käytettävissä olevan teknologian suhteen. Ilmoitetut reservit perustuvat lähes aina arvioihin, jopa hyvin tunnettujen reservien kohdalla. Nämä arviot taas saattavat erityisesti kentän tuotantokehityksen alkuvaiheessa perustua niukalle informaatiolle ja erilaisille peukalosääntöihin nojaaviin menetelmiin, joiden perusteella geologit tekevät arvioita reservien suuruudesta. Näin ollen on tietenkin mahdollista, että reservin koko saatettaisiin arvioidan myös yläkanttiin, mutta yleensä arviot ovat olleet huomattavasti alakanttiin. (Morehouse 1997, 9–10).

Reservien kasvusta käytetään yksinkertaisesti nimitystä ”reservikasvu” (reserve growth) tai ”Ultimate Recovery Appreciation” (URA). Ilmiö on merkittävä, sillä nykyään suuri osa öljyvarojen kasvusta johtuu olemassaolevien reservien laajenemisesta, ei niinkään uusien tuotantokelpoisten esiintymien löytämisestä. Esimerkiksi Yhdysvalloissa tunnettujen reservien laajeneminen on huomattavasti merkittävämpi reservejä lisäävä tekijä kuin uusien esiintymien löytyminen: vuosina 1977–1995 lisäykset tunnettuihin öljyreserveihin johtuivat 89 prosenttisesti reservikasvusta. (Tämä kuitenkin johtuu osittain poliittisista tekijöistä, jotka ovat rajoittaneet uusien esiintymien etsimistä.) Kokonaisuudessaan reservikasvu on ollut merkittävä ilmiö (Morehouse 1997, 9–10):

The historical record regarding ultimate recovery appreciation shows that the estimate of ultimate recovery increases over time for most reservoirs, the vast majority of fields, all regions, all countries, and the world. First publicly noted in 1960, it is a major source of both current and expected future oil and gas supplies.

This is well-illustrated by a comparison of the 1977 and 1993 EURs [Estimated Ultimate Recovery] of the 200 U.S. crude oil fields that had the largest 1977 proved reserves. While EUR had decreased for 23 percent of them by 1993, it had increased for the other 77 percent, and many times over for 32 percent of them.

Kuviossa 3 on kuvattu tunnettujen öljyreservien kasvua vuodesta 1980 lähtien. Vaikka kokonaisöljymäärä on vähentynyt vuosittaisen kulutuksen myötä, on nykyteknikalla ja nykyisissä markkinaolosuhteissa hyödynnettävien öljyreservien määrä kasvanut tasaisesti:



Kuvio 3 Tunnettujen reservien (ilmoitettu miljardeissa barreleissa) kasvua kuvaava käyrä vuodesta 1980 vuoteen 2010 (BP Statistical Review 2011)

Ilmiön merkittävyyttä voidaan havainnollistaa öljyn RTU-suhteen kehityksellä. Kun RTU-suhde oli vuonna 1973 31 vuotta, oli se vuonna 2003 40 vuotta (Watkins 2006, 508) huolimatta tuotannon nousemisesta tasolta 59 miljoonaa barrelia päivässä tasolle 80 miljoonaa barrelia päivässä. Vuonna 2010 RTU-suhde oli 46 vuotta ja päivittäinen tuotanto noin 82 miljoonaa barrelia (BP Statistical Review 2011). RTU-suhde on näin ollen noussut reservien kasvuun, ei tuotannon supistumisen, seurauksena.

Reservikasvun merkitys niukkuutta lieventävänä tekijänä on pitkälti riippuvaista siitä, miten nopeasta ilmiöstä on kyse. Jos reservikasvu olisi hyvin hidas prosessi, voisi tämä olla osoitus teknologisten ja geologisten rajoitusten yhteisvaikutuksesta, jotka jouduttaisiin ratkomaan ennen kuin reservikasvuun voitaisiin suhtautua varteenotettava niukkuutta lieventävänä tekijänä. Empiirisen aineiston pohjalta on yritetty rakentaa yhtälöitä, jotka kuvaisivat reaali maailmassa havaittua reservikasvua mutta nämä yritykset ovat kärsineet merkittävien poikkeustapausten aiheuttamasta huomattavasta varianssista, jonka mallintaminen on ollut haasteellista. Näistä kvantifiointiongelmista huolimatta on kyetty erittelemään kvalitatiivisia tekijöitä, jotka vaikuttavat reservikasvun vauhtiin. Reservikasvun vauhtia säätelevät muun muassa seuraavat tekijät (Morehouse 1997, 13):

Vallitsevat taloudelliset olosuhteet: Ceteris paribus, suotuisimpien markkinaolosuhteiden tulisi kiihdyttää reserveikasvua ja päinvastoin. Näin ollen

esimerkiksi kysynnän kasvu tai tarjonnan supistuminen voisivat aiheuttaa paineita, jotka ajavat firmoja laajentamaan olemassaolevia reservejä.

Kentän fyysinen kompleksisuus: Reservien todellisen koon selvittäminen vaatii sitä enemmän aikaa mitä monimutkaisempi kenttä geologiselta rakenteeltaan on. Yleisesti ottaen pienemmät kentät ovat helpommin kartoitettavissa kuin suuret kentät.

Teknologinen kehitys: Parannukset teknologiassa vaikuttavat eri mekanismien kautta reservikasvun vauhtiin. Esimerkiksi ilmiötä kiihdyttäviä tekijöitä ovat tekniikat, jotka parantavat talteenottotehokkuutta (ilmaisee sen osuuden esiintymän kokonaisuudesta, joka on hyödynnettävissä), alentavat talteenotosta aiheutuvia kustannuksia tai alentavat riskejä. Parempi teknologia myös mahdollistaa tarkempien mittausten tekemisen reservien todellisesta laajuudesta.

Firmojen riskipreferenssit: Reservien laajennukseen liittyy aina huomattavia epävarmuustekijöitä. Liian varovaisen firman hallinnassa olevat reservit saattavat kasvaa hitaasti suhteessa enemmän riskejä ottaviin firmoihin, mutta toisaalta maltillisten firmojen voidaan kuvitella säästävän kuluissa, jos riskejä ottavat firmat tulevat suorittaneeksi enemmän ”turhia” kaivauksia (joiden arvo ei tietenkään ole etukäteen tiedossa).

Paikallinen kvasifyysinen toimintaympäristö: Tähän kategoriaan kuuluvat niin ympäristölliset kuin institutionaalisetkin tekijät. Näitä ovat esimerkiksi ympäristön koostumus (lämpötila; kylmillä alueilla louhinta on teknisesti haastavampaa, samoin vedenalaisten alueiden tutkiminen ja hyödyntäminen), saatavissa oleva tuotantokalusto ja paikalliset palvelut, sijainti suhteessa operatiiviseen keskukseen ja infrastruktuuriin, jonka välityksellä louhittua luonnonvaraa voidaan kuljettaa pitkiäkin matkoja (näiden tekijöiden voidaan olettaa olevan paremmassa kunnossa kehittyneillä alueilla), paikallinen byrokratia ja niin edelleen.

5.3 Talteenottotehokkuus

Esiintymän kokonaisöljymäärää kuvataan käsitteellä *Original Oil In Place* (OOIP). Tämä on se alkuperäinen määrä, joka on maassa ennen tuotannon alkamista. Talteenottotehokkuus (recovery factor/efficiency) kuvastaa sitä osuutta OOIP:sta, joka on teknisesti mahdollista ottaa talteen. Tämä osuus määrää reservien koon, ja siten tekniikat, jotka parantavat talteenottotehokkuutta, myös kasvattavat reservejä ja siten lieventävät niukkuutta. Talteenottotehokkuus vaihtelee huomattavasti kentästä toiseen, riippuen varannon geologisen koostumuksen ja saatavilla olevan teknologian yhteisvaikutuksesta. Niukkoja resursseja allokoiva firma tekee päätöksiä muun muassa siitä, investoidako uusien vai nykyisten kenttien kehittämiseen. Ajan myötä, kun helposti hyödynnettävät ja suuret esiintymät on löydetty, tulee nykyisten kenttien

kehittäminen taloudellisesti houkuttelevammaksi kuin uusien esiintymien etsintä (varsinkin siinä ääritapauksessa, että uusia esiintymiä ei yksinkertaisesti enää ole jäljellä).

Koska alkuperäinen arvio talteenottotehokkuudesta perustuu arviohetken teknologiseen tasoon ja taloudellisiin olosuhteisiin, voidaan talteenottotehokkuuden parantumista pitää esimerkkinä teknologian roolista niukkuuden lieventäjänä tilanteessa, jossa alkuperäinen arvio on perustunut teknisiin (ei taloudellisiin) rajoitteisiin. Tuotannon alkuvaiheessa nojataan niin sanottuun ensisijaiseen prosessiin (primary process), jossa esiintymän nesteeseen liuennutta kaasua käytetään pumppaamisen apuna. Ensisijainen prosessi mahdollistaa yleensä noin 20 prosentin talteenottotehokkuuden (OOIP:sta). Tätä prosessia yleensä tehostetaan pumppaamalla kaasua tai vettä paineen säilyttämiseksi tuotannon ollessa käynnissä. Näillä toissijaisilla keinoilla talteenottotehokkuus voi saavuttaa noin 50 prosenttia OOIP:sta. Yli 60 prosentin talteenottotehokkuudet ovat toistaiseksi olleet erittäin harvinaisia. Esiintymän koostumus yleensä rajoittaa sovellettavissa olevaa talteenottoteknologiaa jollakin tavalla, joten etukäteen ei voida sanoa, miten korkealle talteenottotehokkuus tulee lopulta nousemaan. (Sandrea 2007, 1–8.)

Näin ollen suurin osa esiintymän öljystä jää yleensä maahan odottamaan joko suotuisampia markkinaolosuhteita tai kehittyneempää teknologiaa. Ensimmäinen arvio uuden kentän talteenottotehokkuudesta on yleensä aiemmin mainittu 20 prosenttia, mikä perustuu ensisijaisten prosessien hyödyntämiseen (Sandrea 2007, 29). Raskaimmat, viskositeetiltaan korkeammat öljyt vaativat yleensä tätä menetelmää tehokkaampia keinoja kuten kaasun pumppaamista esiintymään. Raskasöljyesiintymien talteenottotehokkuus jääkin kenttien eliniän alkuvaiheessa yleensä alle 20 prosenttiin. Tähän ryhmään kuuluvat muun muassa Albertan ja Orinocon mittavat öljyhiekkaesiintymät.

Maailmanlaajuiset (kaikki öljykentät käsittävät) arviot talteenottotehokkuudesta vaihtelevat 27 prosentista 40 prosenttiin. Tämän tutkielman kannalta oleellista on talteenottotehokkuuden kehitys; talteenottotehokkuuden pysyminen vakiotasolla tai heikkeneminen olisivat viitteitä teknologian kykenemättömyydestä kyetä käytännössä ratkaisemaan talteenottoon liittyviä haasteita. Vastaavasti jatkuvasti nousevaa talteenottotehokkuutta voitaisiin pitää merkinä teknologisesta kehityksestä (vaikka joissakin tapauksissa kyse voisi olla yksinkertaisesti tuotannon laajentumisen myötä ilmaantuneesta paremmasta informaatiosta koskien esiintymän geologista koostumusta).

Yhdysvalloissa talteenottotehokkuus oli noussut vuoden 1979 22 prosentista 35 prosenttiin vuonna 1999. Yhdysvaltain energiaministeriö odottaa seuraavan sukupolven teknologian mahdollistavan tulevaisuudessa jopa 61 prosentin talteenottotehokkuuden (Kuuskraa & Koperna 2006). Pohjanmeren (jossa toimivat brittiläiset ja norjalaiset öljy-yhtiöt) talteenottotehokkuus on maailman korkein tällä hetkellä, noin 46 prosenttia.

Mielenkiintoisesti Saudi-Arabian kokonaistalteenottotehokkuus (22 prosenttia) on huomattavasti alhaisempi kuin Yhdysvaltain, vaikka Saudi-Arabiassa on huomattavasti teknistä osaamista alalta. Tilanne voisi johtua Saudi-Arabian öljyvarojen runsaudesta: nykyisten reservien kehittäminen tulee houkuttelevammaksi ajan myötä, kun uusien reservien löytymistä hiipuu. Näin ollen Saudi-Arabian talteenottotehokkuuden voidaan olettaa kasvavan ajan myötä. Yhdysvallat onkin poikkeuksellinen muihin suuriin öljyntuottajamaihin nähden siinä mielessä, että sen mittavat öljyvarat ovat hupenemassa ellei paikalliseen politiikkaan tule muutoksia. Näin ollen paikalliset öljyntuottajat ovat joutuneet parantamaan talteenottotehokkuutta, kun öljyn etsintä on monilla potentiaalisesti hedelmällisillä alueilla kielletty. (Sandrea 2007, 2–4.)

Talteenottotehokkuuden parantamisella tulee tulevaisuudessakin olemaan suuri merkitys öljyvarojen kasvulle. Sandrean (2007, 5) mukaan ”one percent increase of global recovery efficiency would bring forth 88 Bbo of expanded conventional oil reserves, sufficient to replace three years of world production at current rates of 27 Bbo a year.” Tämän 88 miljardin barrelin tuottamiseen vaadittavat pääomamenot ovat noin 190 miljardia dollaria, mikä on noin 80 prosenttia siitä määrästä, joka maailmanlaajuisesti investoitiin etsintään ja tuotantoon (exploration and production) vuonna 2006. Öljyn hinnan suotuista kehitys tulisi tässä tapauksessa lisäämään kannustimia investoida talteenottomenetelmien tehostamiseen.

5.4 Öljyn epäkonventionaaliset substituutit: öljyhiekka ja öljyliuske

Öljyhiekasta (tar sands, oil sands) saatava bitumi on viskositeetiltaan korkeaa, raskasta öljyä, joka on muodostunut konventionaalaisesta raakaöljystä kevyimpien hiilivetyjen hajottua. Korkeasta viskositeetista johtuen bitumi ei virtaa, ellei sitä lämmitetä tai laimenneta. (Öljyhiekka itsessään koostuu hiekan, saven, veden ja bitumin sekoituksesta.) Johtuen sen kemiallisista ominaisuuksista ja sijainnista, ovat bitumin tuotantokustannukset olleet historiallisesti huomattavasti suurempia kuin perinteisen raakaöljyn. Tämän lisäksi bitumi pitää louhinnan jälkeen kyetä erottamaan öljyhiekasta, joka voidaan tehdä joko paikan päällä esimerkiksi käyttämällä höyryä bitumin erottamiseksi hiekasta tai erillisessä laitoksessa. Näistä teknisistä haasteista johtuen bitumi on pitkään nähty lähinnä teoreettisena substituuttina raakaöljylle.

Liuskeöljy (shale oil) on bitumin tavoin kivistä, öljyliuskeesta (oil shale), erotettava konventionaalisen raakaöljyn substituutti. Öljyliuskeen hyödyntäminen vaatii sen kuumentamista tarpeeksi korkeissa lämpötiloissa, jotta öljyliuskeesta sijaitsevasta kerogeenistä voidaan irrottaa nestemäistä liuskeöljyä. Myös öljyliuskeen tuotantokustannukset ovat olleet liian korkeita sen taloudelliseen hyödyntämiseen, mutta 2000-luvulla tilanne on muuttunut. Viimeaikainen raakaöljyn hinnankehitys ja

toisaalta tuotantotekniikoiden parantuminen ovat tehneet öljyhiekasta ja -liuskeesta käytännöllisemmän vaihtoehdon konventionaaliselle raakaöljylle.

5.4.1 Öljyhiikkavarannot

Öljyhiikkaa löytyy lähes kaikkialta maailmasta, mutta huomattavasti suurimmat esiintymät ovat Orinoco-joen läheisyydessä Venezuelassa ja Albertan provinssissa Kanadassa. Näiden lisäksi huomattavia, tällä hetkellä vaihtelevasti taloudellisesti kannattavia esiintymiä on muun muassa Yhdysvalloissa, Venäjällä ja Lähi-idässä.

Orinocon öljyvyöhyke (Orinoco Oil Belt Assessment Unit) on pinta-alaltaan noin 50 tuhannen neliökilometrin kokoinen alue, joka sijaitsee kooltaan suuremmissa, liitukauden (145–65 miljoonaa vuotta sitten) jälkeen muodostuneessa Itä-Venezuelan syvänteessä (East Venezuela Basin). Venezuelan kansallinen öljy-yhtiö *Petróleos de Venezuela, S.A. (PDVSA)* arvioi vuonna 1987 öljyvyöhykkeen kokonaisöljymäärän (OOIP) olevan 1,2 biljoonaa barrelia. PDVSA:n vuonna 2006 suorittama uusi arvio nosti tämän määrän 1,3 biljoonaa barelliin. Yhdysvaltain geologisen tutkimuskeskuksen (United States Geological Survey; USGS) tutkimuksessa alueen raskasöljyn talteenottotehokkuuden minimiarvioksi saatiin 15 prosenttia, keskimääräiseksi arvioksi 45 prosenttia ja maksimiarvioksi 70 prosenttia. Kuten aiemmin on tullut ilmi, talteenottotehokkuuden parantaminen riippuu sovellettavasta teknologiasta. Tässä esitetyt arviot perustuvat saatavilla olevan teknologian hyödyntämiseen. Näin ollen nykyteknologialla OOIP:sta olisi teknisesti talteenotettavissa keskimäärin noin 380–652 miljardia barellia, mikä nykykulutuksella (noin 100 miljoonaa barrelia päivässä) vastaa noin 10–20 vuoden tarpeita, jos kaikki öljyn kysyntä pyrittäisiin tyydyttämään tällä raskasöljyllä. (Schenk & Cook 2009, 1–4.)

Kanadassa sijaitsevan Albertan öljyhiikkaesiintymissä arvioidaan olevan noin 1,7 biljoonaa barrelia, mikä on hieman enemmän kuin maailman tunnetut öljyreservit yhteensä. Albertan esiintymä on samoin maailman suurin öljyhiikkaesiintymä. Tämä kokonaismäärä muodostuu pääosin kolmesta pienemmästä esiintymästä; Athabasca, Cold Laken ja Peace Riverin esiintymistä, joista Athabasca on selkeästi suurin. Tästä määrästä noin kymmenen prosenttia oli vuoden 2006 (vuonna 2006) hinnoin louhittavissa. (Vuonna 2006 öljyn barrelihinta oli 62 dollaria.) Pelkästään tämä reservi, eli noin 170 miljardia barrelia, riittää takaamaan Kanadalle maailman toiseksi suurimmat öljyreservit Saudi-Arabian jälkeen. Albertassa tuotettiin vuonna 2006 öljyhiekasta noin 1,25 miljoonaa barrelia päivässä, mikä on toistaiseksi huomattavasti vähemmän kuin konventionaalisen öljyn tuotanto, mutta määrä on ollut tasaisessa kasvussa, kun vuonna 2003 määrä oli vain 700 000 barrelia päivässä. Vuonna 2009 tämä määrä oli noussut 1,49 miljoonaa barelliin ja vuonna 2015 määrän oletetaan

olevan kolme miljoonaa barreliä. (Mainittakoon, että tällä tasolla tuotantoa riittäisi lähes 200 vuodeksi, mutta tuotanto tulee tietenkin kasvamaan.) Albertan öljyhiekkatuotanto kattoi vuonna 2006 lähes 50 prosenttia Kanadan öljyntuotannosta. Huomattavaa on, että vuodesta 1967 lähtien vain kolme prosenttia esiintymien bitumivarannoista on hyödynnetty. On myös huomioitava, että tämä reserviarvio perustuu hyvin maltilliselle arviolle talteenottotehokkuudesta, joka tulee todennäköisesti vielä nousemaan. (National Energy Board of Canada 2006, 1–28.)

Vuonna 2006 Albertan öljyhiekkoihin investoitiin 14 miljardia Kanadan dollaria. Tuolloin louhinnan katsottiin olevan taloudellisesti kannattavaa öljyn barrelihinnan ollessa 30–35 dollaria (National Energy Board of Canada 2006, 9). Myös hintakehitys tuotantokustannuksissa tulee huomioida; kasvavat työvoima- ja materiaalikustannukset nostavat sitä barrelihintaa, jolla louhinta on kannattavaa, kun taas teknologiat, jotka parantavat talteenottomenetelmiä, laskevat kannattavan barrelihinnan tasoa. Öljyn barrelihinta on myös kasvanut vuoden 2006 tasosta (\$50) yli sataan dollariin vuonna 2008, mutta kehitys ei viime aikoina ole ollut kovin vakaata. Albertan esiintymien kehittämistä avittavat myös geopolittiset tekijät. Kanadan ylivoimaisesti tärkein kauppakumppani Yhdysvallat on viime aikoina pyrkinyt vähentämään riippuvuuttaan lähi-itämaalaisesta öljystä, mikä on käytännössä tarkoittanut tuonnin lisäämistä Kanadasta. Kanada onkin tällä hetkellä Yhdysvaltain tärkein öljyn maahantuoja.

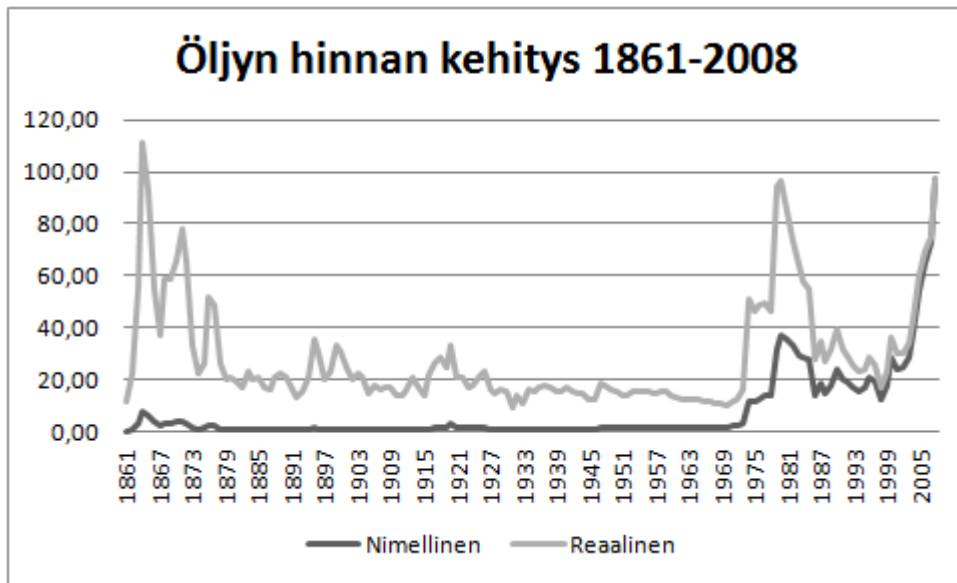
5.4.2 *Öljyliuske*

Maailmanlaajuiset öljyliuskevarat ovat samaa luokkaa kuin öljyhiekkavarat. Vuonna 2005 arviot öljyliuskevarojen suuruudesta vaihtelivat 2,8–3,3 biljoonan barrelin välillä. Suurimmat öljyliuskevarat löytyvät tällä hetkellä Yhdysvalloista: Koloradon, Utahin ja Wyomingin läpi kulkeva Green River -kerrostuma käsittää yli 60 prosenttia (1,5–1,8 biljoonaa barreliä) maailman öljyliuskevaroista. Yhdysvaltain energiaministeriön tilaaman tutkimuksen mukaan tästä määrästä noin 0,5–1,1 biljoonaa barreliä olisi hyödynnettävissä pitkällä aikavälillä (Bartis, LaTourrette, Dixon, Peterson & Cecchine 2005, 5–8). Kysynnän nykyisellä tasolla nämä määrät ovat huomattavia: ”If U.S. Oil Shale resources could be used to meet a quarter of that demand, 5 million barrels per day, the recoverable resource would last over 400 years” (Bartis ym. 2005, 9). Kun yhdysvaltalaisen öljyntuotannon katsotaan saavuttaneen huippunsa 1970-luvulla, olisi öljyliuskeen laajamittainen hyödyntäminen Yhdysvalloille väylä yhdeksi maailman johtavimmaksi öljyntuottajamaaksi. Kanadalaisen öljyhiekan tavoin öljyliuskeen etuna olisi myös se, että se mahdollistaisi riippuvuuden vähentämisen lähi-itämaalaisesta öljystä (Bartis ym. 2005, 30–31).

Huolimatta suotuisasta kehityksestä viime aikoina, epäkonventionaalisten öljyjen hyödyntämiseen liittyviä epävarmuustekijöitä on runsaasti. Ei ole mitään syytä odottaa, että öljyn hinta tulee pysyttelemään nykyisellä, historiallisesti poikkeuksellisen korkealla tasollaan. Öljyn barrelihinta oli ennen 2000-lukua pitkään 20 dollarin luokkaa; tällä tasolla ei öljyhiekan tai öljyliuskeen hyödyntäminen olisi taloudellisesti kannattavaa, ellei tuotantoteknologia kehity huomattavasti. Vuonna 2005 arvioitiin, että raakaöljyn barrelihinnan tulisi olla 70–95 dollaria, jotta öljyliuskeen tuottaminen olisi kannattavaa (Bartis ym. 2005, 15–16). Merkittävää on kuitenkin havainto siitä, että öljyhiekka ja öljyliuske ovat tosiasiallisesti nousseet käyttökelpoisiksi substituuteiksi konventionaaliselle öljylle. Vaikka lyhyellä tai keskipitkällä aikavälillä olisi mahdollista, että öljyn barrelihinta tippuisi niin paljon, että öljyhiekan hyödyntäminen kävisi kannattomammaksi (mikä sinällään olisi merkki niukkuuden lievenemisestä), osoittaa nykytilanne kuitenkin selkeästi sen, että konventionaalisen öljyn substitootit ovat suhteellisen vaivatta louhittavissa kun konventionaalisen öljyn tarjontatilanne huononee.

5.5 Öljyn hinta

Kuviossa 4 esitetään öljyn barrelihinnan historiallinen kehitys 1860-luvulta nykypäivään. Vaalea viiva osoittaa reaalihintaa (perusvuosi 2008) ja tumma nimellishinnan. Kuvion perusteella ei ole nähtävissä minkäänlaista öljyn hupenemiseen viittavaa trendiä. Jos öljyvarat olisivat hupenemassa kysynnän joko kasvaessa tai pysyessä vakiona, näkyisi tämä jatkuvasti nousevana hintana. (Tosin, kuten aiemmin on tuotu esiin, teknologinen kehitys voisi alentaa hintaa vaikka kysynnän ja tarjonnan lait asettaisivat nousupaineita hinnalle.) On huomattava, että aiemmin mainitut energiakriisit (1973 ja 1979) eivät olleet seurausta öljyn suhteellisen niukkuuden kasvusta vaan tietoisesta päätöksestä leikata tuotantoa. Näin ollen 1970-luvulta 1980-luvun puoliväliin kestänyt energiakriisi, joka toimi lähtöalustana huolille energian riittävyydestä, ei kertonut hupenevista energiavaroista.



Kuvio 4 Öljyn reaali- ja nimellishinta 1861–2008. Reaalihinta ilmoitettu vuoden 2008 dollareissa (BP Statistical Review 2011)

Loppuvuodesta 2003 öljyn barrelihinta lähti nousuun, kärjistyen vuoden 2008 heinäkuussa ennätyskorkeaan hintaan, 147 dollaria. Hinnannousu oli 500 prosenttia viidessä vuodessa. Johtuen hintakehityksen nopeasta luonteesta, periodiin viitataan kolmantena energiakriisinä. Kehitykseen on katsottu vaikuttaneen moni tekijä kuten terrorismi, hurrikaani Katriina, Lähi-idän kriisit ja Pohjois-Korean ydinasetestit. Ongelmaa syvensi OPECin haluttomuus, kyvyttömyys tai virhearvioinneista johtuva päätös olla lisäämättä tuotantoa, kun samanaikaisesti Aasian talouskasvu oli aiheuttanut lyhyessä ajassa nousupaineita öljyn hinnalle (Hamilton 2009, 215–283). Vasta vuoden 2008 finanssikriisiä seurannut pitkittynyt taantuma käänsi hintakehityksen laskuun.

5.6 Maakaasu

Maakaasu on väritöntä ja hajutonta kaasua, jonka kemialliset ominaisuudet tekevät siitä ihanteellisen energialähteen. Maakaasu koostuu tyypillisesti metaanista (70–90 prosenttia), mutta kaasussa saattaa olla huomattavia määriä etaania, propaania ja butaania (yhteensä tyypillisesti noin 0–20 prosenttia) sekä vähäisiä määriä muita yhdisteitä. Maakaasu jalostetaan energiankulutusta varten poistamalla siitä kaikki muut yhdisteet paitsi metaani. Pitkien matkojen kuljetusta ja säilöntää varten maakaasu muunnetaan tiivistämällä³ nesteytetyksi maakaasuksi (liquefied natural gas; LNG), sillä

³ Tiivistäminen tarkoittaa tässä kaasumaisen aineen muuttamista nesteeksi lämpötilaa ja/tai painetta laskemalla

tämä mahdollistaa huomattavasti suurempien määrien säilönnän. Etäisyyksien ollessa vain muutaman tuhannen kilometrin luokkaa maakaasu siirretään putkia myöten kaasuna. Etäisyyksien kasvaessa (erityisesti merten yli) kaasun tiivistäminen nesteeksi on kannattavampaa.

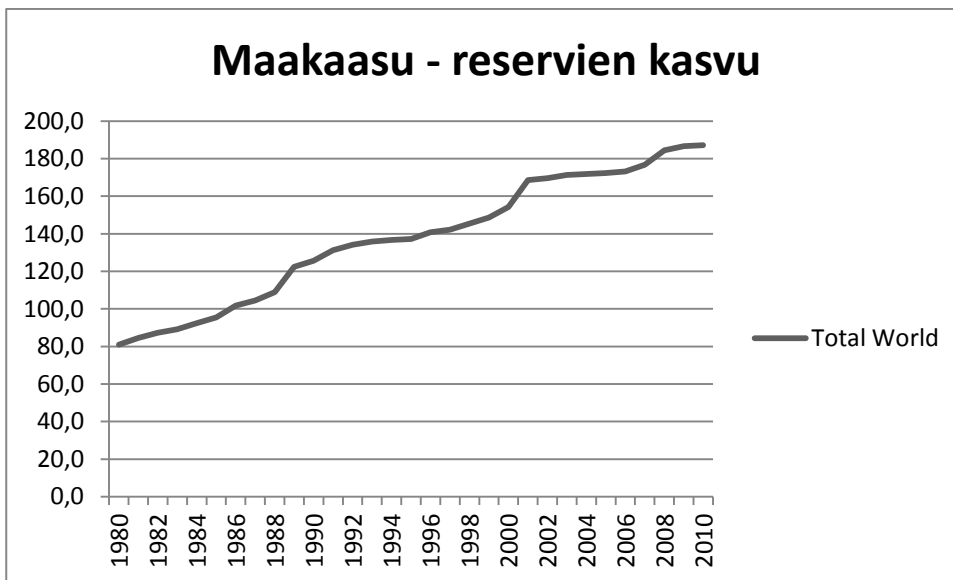
Muihin fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna maakaasua pidetään puhtaana, sillä sen polttaminen tuottaa huomattavasti vähemmän hiilidioksidia energiayksikköä kohden kuin öljyn (joka tuottaa neljäsosan enemmän hiilidioksidia) tai kivihiilen (joka tuottaa lähes puolet enemmän hiilidioksidia) polttaminen. Muiden päästöjen kohdalla erot ovat huomattavasti suurempia: hiilidioksidin ohella maakaasun palamistuotteena syntyy lähinnä vesihöyryä, kun öljyn ja kivihiilen polttaminen synnyttävät merkittäviä rikkidioksidipäästöjä (SO₂) ja typpioksidipäästöjä (NO_x), jotka ovat merkittäviä ilmansaasteita. Tästä suhteellisesta puhtaudesta huolimatta maakaasun käyttö energianlähteenä on kuitenkin huomattava hiilidioksidipäästöjen lähde, sillä sitä käytetään hyvin runsaasti.

Maakaasun osuus maailmanlaajuisesta energiankulutuksesta on 23 prosenttia. Tämä tarkoittaa noin kolmen biljoonan kuutiometrin edestä maakaasua vuosittain. Myös Yhdysvalloissa maakaasun osuus on noin neljännes energiankulutuksesta. Osuus on noussut tasaisesti ja sen oletetaan jatkavan nousua johtuen Yhdysvaltain potentiaalisesti huomattavista maakaasuvarannoista ja halusta luopua riippuvuudesta poliittisesti epävakaisiin öljyntuottajamaihin. (U.S. Energy Information Administration 2010a.)

Maakaasuvaroja lasketaan kuutiometreissä (m³). Huomattavaa on, että siinä missä raakaöljyn hinta määräytyy maailmanmarkkinoilla, maakaasun hinnoissa on huomattavia alueellisia eroja johtuen lähinnä eroista kuljetuskustannuksissa (Deutch 2011, 86–89).

5.6.1 Maakaasureservit

Tällä hetkellä tunnetut maailmanlaajuiset maakaasureservit ovat noin 190 biljoonaa kuutiometriä (RTU-suhde yli 60 vuotta). Kuten alla oleva kuvio osoittaa, reservit ovat olleet tasaisessa kasvussa mittausajankohtana (1980–2008):

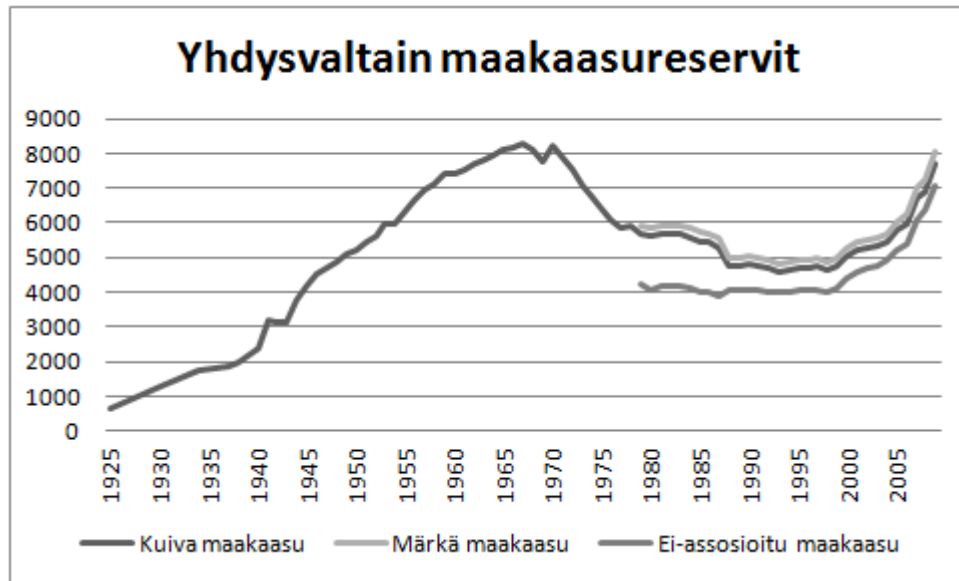


Kuvio 5 Maailmanlaajuiset tunnetut maakaasureservit, biljoonissa kuutiometreissä (BP Statistical Review 2011)

Näistä 190 biljoonasta kuutiometrissä neljännes on Venäjällä, noin 16 prosenttia Iranissa ja noin 13 prosenttia Qatarissa. Yhdysvalloissa on noin neljä prosenttia (noin seitsemän biljoona kuutiometriä) näistä reserveista ja Euroopan unionissa runsas prosentti. Paradoksaalisesti Yhdysvallat on maailman suurin maakaasun tuottaja: kun vuosittainen maakaasun tuotanto on tällä hetkellä hieman yli kolme biljoonaa kuutiometriä maailmanlaajuisesti, Yhdysvallat tuottaa tästä viidenneksen (noin 600 miljardia kuutiometriä), ohittaen Venäjän niukasti. Otettakoon huomioon, että tällä tuotantotahdilla USA:n maakaasureservit hupenisivat kymmenessä vuodessa, jos käytetään yksinkertaista ”aika ehtymiseen” -menetelmää. (Perry & Lee 2007.)

Reservien ei kuitenkaan oleteta pysyvän vakioina, kuten yllä oleva kuvio maailmanlaajuisen reservien kasvusta osoittaa. Kuvio 6 havainnollistaa, miten USA:n maakaasureservit kasvoivat 1920-luvulta tasaisesti 1970-luvulle. Tämän jälkeen reservit laskivat aina 1990-luvun loppuun saakka, kunnes kääntyivät taas nousuun. Tällä hetkellä USA:n maakaasureservit ovat korkeammalla tasolla kuin koskaan aikaisemmin. Tälle kehitykselle on muutamia selityksiä. 1970-luvulla maakaasuvarojen kuviteltiin olevan hupenemassa, mikä johti toimiin, joilla pyrittiin vähentämään maakaasun käyttöä ja etsintää. Tämä käsitys maakaasuvarojen tilasta osoittautui kuitenkin vääräksi. 2000-luvulla elpynyt kysyntä, talouskasvu ja kehittyvien talouksien nousu ovat asettaneet kysyntäpaineita maakaasulle, johtaan reservien kasvuun. Kuten öljyn kohdalla, myös maakaasuvarojen kasvun merkittävin tekijä on ollut nimenomaan reservikasvu, ei uusien esiintymien löytyminen. Huolimatta maakaasun kokonaistuotannon elpymisestä sitten 1980-luvun, kaivojen tuottavuus on laskenut 1970-luvun alun noin 450 biljoonasta kuutiojalasta kaivoa kohden per päivä noin 150 miljoonaan kuutiojalakaan

per päivä 1990-luvulla johtuen siirtymisestä kaivoihin, joiden talteenottotehokkuutta pidetään alhaisempana. (Schenk & Pollastro 2002.)



Kuvio 6 Tunnetut konventionaaliset maakaasureservit Yhdysvalloissa, miljardeissa kuutiometreissa (Energy Information Administration 2010c)

5.6.2 Epäkonventionaaliset maakaasuvarat

Konventionaalisten maakaasuesiintymien huetessa tuotanto tulee keskittymään yhä enemmän epäkonventionaalisiin maakaasuesiintymiin, jotka ovat substituutteja konventionaalille maakaasulle. Erityisesti Yhdysvalloissa epäkonventionaalisten maakaasukenttien kehitys on jo hyvässä vauhdissa; 80 prosenttia merkittävistä esiintymälöydöistä on epäkonventionaalisia. Ongelmat energiantoimituksissa, tulevaisuudessa mahdollisesti nousevat hinnat ja muut tekijät johtanevat tuotannon kasvuun myös Euroopassa, jossa on arvioitu olevan jonkin verran paikallisesti huomattavia epäkonventionaalisia maakaasuesiintymiä. Toistaiseksi Euroopan on kuitenkin kannattanut nojata Venäjältä tuotuun maakaasuun. Huomattavaa on, että muutama vuosikymmen sitten epäkonventionaaliset maakaasuvarat olivat teknisesti saavuttamattomissa, vaikka näiden varojen potentiaalisesta koosta oltiin tietoisia.

Epäkonventionaalisilla maakaasuvaroilla viitataan lähinnä hiilikerrostumien metaaniin (coalbed methane), liuskekaasuun (shale gas) ja tiiviiden olosuhteiden kaasuun (tight gas). Epäkonventionaalisten kaasujen tuotanto vaatii monimutkaisempia teknisiä toimenpiteitä kuin konventionaalisten kaasujen louhinta. Esimerkiksi monien esiintymien läpäisevyys (permeability), joka mittaa kiinteän aineen kykyä vastustaa nesteen virtausta, on yleensä alhainen. Arviot epäkonventionaalisten maakaasuvarojen kokonaismäärästä ovat mittavia, jopa tuhannen biljoonan kuutiometrin luokkaa. Arviot

ovat kuitenkin epäkonventionaalisten varojen kokonaismäärästä, eivät reserveistä, mutta näinkin suurien varojen ollessa kyseessä maltillinenkin talteenottotehokkuus mahdollistaisi mittavat epäkonventionaaliset maakaasureservit.

Seuraavassa taulukossa esitetään epäkonventionaalisten maakaasuvarojen (ei reservien) maailmanlaajuinen jakauma. Yhdysvaltain osalta arviot ovat kaikkein tarkimpia ja luotettavimpia johtuen korkeasta teknologian tasosta, pitkälle jatkuneesta kenttien kehittämisestä ja vapaammasta tiedonvälityksestä, mutta muun maailman ohalta arviot ovat maltillisempia, erityisesti entisen Neuvostoliiton alueen osalta. Luvut esitetään biljoonissa kuutiometreissä:

Taulukko 1 Epäkonventionaalisten maakaasuvarojen jakauma (mukaellen Perry & Lee 2007, 3); kuutiojalat muutettu (biljooniksi) kuutiometreiksi

Alue	Hiilikerrosten metaani	Liuske-kaasu	Tiivis kaasu	Yhteensä
Pohjois-Amerikka	84	108	38	230
Latinalainen Amerikka	2	58	36	96
Länsi-Eurooppa	4	15	10	29
Keski- ja Itä-Eurooppa	3	2	2	7
Entinen Neuvostoliitto	110	18	25	153
Lähi-itä ja Pohjois-Afrikka	-	71	23	94
Saharan eteläpuoleinen Afrikka	2	7	21	30
Keskusjohtoinen Aasia ja Kiina	34	98	10	142
Tyynimeri (OECD)	13	65	20	98
Muu Tyynenmeren Aasia	-	9	15	24
Etelä-Aasia	2	-	5	7
Maailma	254	451	205	910

Näidenkin lukujen suhteen tulisi muistaa, että etsinnän myötä maakaasuvarojen suuruus tulee muuttumaan. Esimerkiksi Yhdysvaltain liuskekaasuvarojen suuruus ja potentiaali energiantuotannolle on auennut vasta 2000-luvulla. Taulukon mukaisen nykytilanteen perusteella on myös odotettavissa, että Yhdysvaltain osuus maailmanlaajuisista maakaasureserveistä (tällä hetkellä aiemmin mainittu noin neljä prosenttia) tulee lähitulevaisuudessa nousemaan.

5.6.3 *Tiiviiden olosuhteiden kaasun*

Tiiviiden olosuhteiden kaasun esiintymät eroavat muista kaasun- ja öljyesiintymistä siinä, että nämä esiintymät ovat yleensä jatkuvia, eivät diskreettejä. Esiintymien läpäisevyys on hyvin alhainen ja kerrostumat koostuvat yleensä hiekkakivestä, jotka voivat olla useiden kilometrien syvyydessä. Näiden haasteiden vuoksi tiiviiden olosuhteiden kaasun tuotannon kehitys valottaa maakaasun osalta hyvin niitä mekanismeja, jotka ovat johtaneet aiemmin tuotantokelvottomina pidettyjen maakaasuesiintymien hyödyntämiseen. Suotuisien markkinaolosuhteiden lisäksi teknologinen kehitys on ajanut epäkonventionaalisten maakaasuesiintymien hyödyntämistä johtuen epäkonventionaalisten kaasulajien vaatimista korkeammista kustannuksista ja teknologian tasosta. Vuonna 2007 epäkonventionaalisen maakaasun osuus maakaasun kokonaistuotannosta oli Yhdysvalloissa noin kolmasosa, kun vielä 1970-luvulla tuotantoa ei käytännössä katsoen ollut ollenkaan. (Perry & Lee 2007, 11–14.)

Kuuskraa (2004, 15–20) demonstroi teknologisen kehityksen vaikutusta reservien kasvuun Koloradon Piceance-syvänteessä sijaitsevien maakaasuvarojen viimeaikaisella kehityksellä. Vaikka alueen kaasuvarojen massiivisuudesta ollaan oltu pitkään tietoisia, alueen mahdollista tuottavuutta on pidetty alhaisena johtuen sen hyödyntämisen teknisistä haasteista. Vielä 1990-luvun alussa kaivojen määrä alueella oli muutaman kymmenen luokkaa johtuen tekniikkaan liittyvistä ongelmista ja alhaisesta tuottavuudesta, mutta vuonna 2003 kaivoja oli alueella jo yli 484.

5.6.4 *Liuskekaasu*

Epäkonventionaalisia maakaasuvaroja on arvioitu olevan savikivestä saatavan liuskekaasun muodossa lähes tuhannen biljoonan kuutiometrin verran, josta lähes 200 biljoonaa kuutiometriä pidetään tällä hetkellä teknisesti hyödynnettävissä. Koska liuskekaasun louhinta on teknisesti haastavampaa kuin konventionaalisen maakaasun, edellyttää sen optimaalinen louhinta korkeampia energiahintoja. Liuskekaasun houkuttelevuutta lisää myös sen runsaus poliittisesti vakaassa lännessä, erityisesti Yhdysvalloissa ja Kanadassa. Myös Euroopan maakaasuvarojen on arveltu olevan huomattavia. Yhdysvalloissa liuskekaasun tuotanto on noussut 1990-luvulta lähtien merkittävästi ja erityisesti 2000-luvulla tuotanto on laajentunut vauhdilla. Kun vuonna 2000 liuskekaasun tuotanto oli noin 10 miljardia kuutiometriä vuodessa, oli tuotanto noussut lähes 20 miljardiin vuonna 2004. (Perry & Lee 2007, 17–21.)

Yhdysvaltain energiainisteriöllä on tietoja tunnetuista liuskekaasureserveistä vain vuosilta 2007–2009, mutta pelkästään tuona ajankohtana USA:n tunnetut

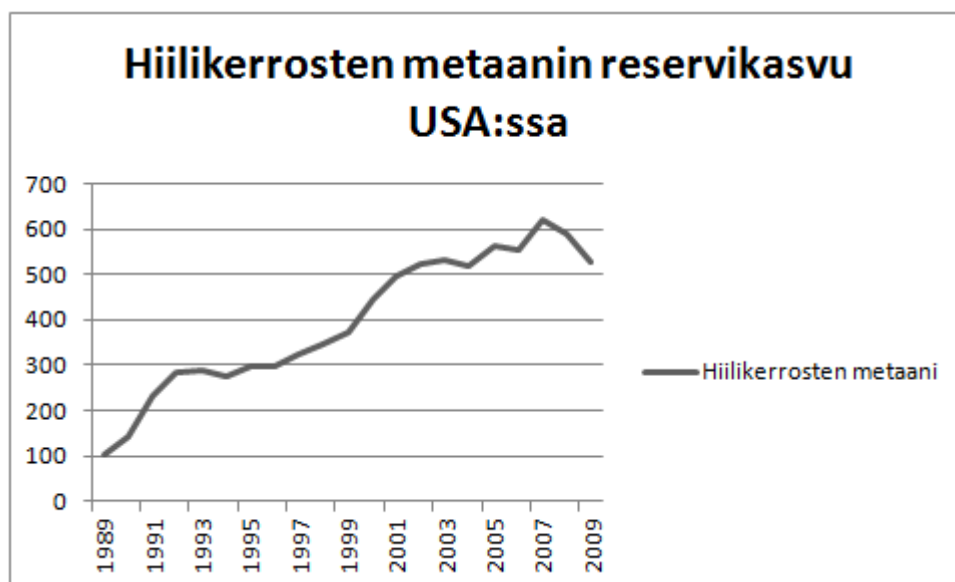
liuskekaasureservit ovat kolminkertaistuneet lähes kahteen biljoonaan kuutiometriin (Energy Information Administration 2010d). Kehitystä on auttanut tuotantokustannusten aleneminen siten, että liuskekaasun tuotantokustannukset ovat Yhdysvalloissa tällä hetkellä alhaisemmalla tasolla kuin uusiin konventionaalisiin maakaasukaivoihin liittyvät kustannukset (Deutch 2011, 82–84).

5.6.5 *Hiilikerrosten metaani*

Hiilikerroksissa sijaitsevan metaanin olemassaolosta ollaan oltu tietoisia niin pitkään kuin kivihiiliteollisuutta on ollut (metaani on aiheuttanut lukuisia kaivosturmia kivihiilen louhinnan yhteydessä), mutta metaanin laajamittainen hyödyntäminen tuli mahdolliseksi vasta 1980-luvun lopulla kehittyneiden louhintatekniikoiden myötä. Kuvio 7 havainnollistaa hiilikerrosten metaanin reservikasvua Yhdysvalloissa viimeisten kolmenkymmenen vuoden ajalta. Kasvu on ollut merkittävää, mihin on vaikuttanut myönteisesti eräiden vuosikymmeniä vaivanneiden teknisten ongelmien ratkaiseminen.

Hiilikerrostumissa metaani on adsorptoitunut⁴ kivihiilen pintaan. Tästä johtuen metaanin hyödyntäminen edellyttää esiintymän paineen laskemista, jotta kaasu saadaan irrotettua kivihiilestä. Toisen teknisen ongelman 1990-luvulle saakka muodosti veden läsnäolo hiiliesiintymissä, joka jouduttiin pumppaamaan pois ennen kaasun louhintaa. Tehostuneet menetelmät näiden ongelmien ratkaisemiseksi ovat johtaneet tuotannon ja reservien laajenemiseen. Yhdysvalloissa hiilikerrosten metaanin tuotanto on noussut lähes olemattomalta vuositasolta 1980-luvun lopulla yli 50 miljardiin kuutiometriin nykypäivänä. Myös maailmanlaajuisesti hiilikerrosten metaanin hyödyntämisen kasvupotentiaali on merkittävä, sillä maailmanlaajuiset kivihiilivarat ovat huomattavat; lähes jokaisessa maassa on jonkinlaisia kivihiilivarantoja ja siten hiilikerrosten metaania. (Perry & Lee 2007, 14–17.)

⁴ Kaasumaisen aineen kiinnittyminen kiinteän aineen pintaan.



Kuvio 7 Tunnetut hiilikerrosten metaanin reservit Yhdysvalloissa, miljardeissa kuutiometreissa (Energy Information Administration 2010b)

5.7 Rajoituksia

Edeltävissä alaluvuissa on käsitelty muun muassa reservien ja tuotannon kasvua sekä yleisellä tasolla (maailmanlaajuisten reservien kehitys, maailmanlaajuinen tuotanto) että spesifimmin. Pohjoisamerikkalaisten tapauksen suosiminen esimerkkeinä johtuu informaation saatavuudesta ja luotettavuudesta. Kuten luvussa 7 tullaan huomaamaan, ei-länsimaisten energiayhtiöiden raportointi on olematonta, satunnaista tai epäluotettavaa. Myös länsimaissa tuotetuissa tilastollisissa aineistoissa on välillä huomattaviakin eroja. Nämä erot johtuvat muun muassa reservien määrittelmästä, jotka saattavat vaihdella maasta toiseen. Reserveihin liittyy aina epävarmuuksia, joihin arvioita suorittavat geologit suhtautuvat eri tavoin. Nämä ongelmat ovat välttämättömiä, kun tarkastelun kohteisiin liittyy huomattavia epävarmuuksia erityisesti tulevaisuuden suhteen. Siksi tarkastelujen painopiste onkin ollut historiallinen.

Tarkkojen dollarilukujen käyttämisestä on tietoisesti pyritty välttämään niin usein kuin mahdollista, sillä vaikeuksia muodostuu, kun lähdetään vertailemaan hintoja eri periodeilla. Syyt hintojen vaihteluihin eivät aina ole yksiselitteisiä tai käytetyn ”kuivan” tilastollisen aineiston perusteella edes arvattavissa, ja varsinkin lyhyellä aikavälillä poikkeustapaukset saattavat antaa väärän kuvan tarkasteltavana olevan aiheen kehityksestä. Osittain tästä syystä ainoa merkittävä rahayksikköihin perustuva analyysi onkin alaluvussa 5.5, jossa tarkasteluajanjakso on yli sata vuotta.

6 UUSIUTUVAT SUBSTITUUTIT

Huolimatta siitä, että fossiilisia polttoaineita on hyvin runsaasti jäljellä, on näiden polttoaineiden niukkuus pitkällä aikavälillä fakta. Hiilipohjaisia organismeja polttoaineiksi hajottavat prosessit ovat ihmisen aikakäsityksen mukaan aivan liian hitaita kyetäkseen pysymään tuotannon tahdissa. Koska muutama sata vuotta on ihmishistoriassa häviävän pieni ajanjakso, tulisi millä tahansa kestävä kehityksen määreellä ihmisen energiatarpeiden tulla tyydytetyksi myös tämän ajanjakson jälkeen, kun fossiiliset polttoaineet on käytetty ”loppuun”. Yhtä lailla on fakta, että fossiilisia polttoaineita ei voida mitenkään mielekkäästi säästellä niin, että niistä riittäisi myös tuleville, satojen vuosien päästä ilmaantuville sukupolville. Tällöin energiankulutuksen tulisi romahtaa. Pitkällä aikavälillä siis ainoa mielekäs vaihtoehto on substituuttien löytäminen fossiilisille polttoaineille.

Fossiilisille polttoaineille esitetään yleensä vaihtoehdoksi uusiutuvia energianlähteitä ja ydinvoimaa. Uusiutuvia energianlähteitä ovat muun muassa tuuli- ja vesivoima, maalämpö ja aurinkovoima. Ydinvoima koostuu tällä hetkellä vain fissiosta mutta tulevaisuudessa mahdollisesti myös fuusiovoimasta. (Ydinvoimaa ei pidetä uusiutuvana, sillä uraanivarannot ovat rajallisia, mutta teknologiset läpimurrot ja fuusiovoima voivat tehdä ydinvoimasta käytännössä uusiutuvan energianlähteen.)

Uusiutuvat energianlähteet kattavat vain noin seitsemän prosenttia maailman energiankulutuksesta (ks. alaluku 5.1). Tämä luku ei ole erityisemmin muuttunut viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana, vaikka uusiutuvien energianlähteiden substituutiomahdollisuuksiin suhtauduttiin jo tuolloin optimistisesti. Substituution hitaus ei kuitenkaan ole johtunut siitä, etteikö uusiutuvien substituuttien teknologia olisi kehittynyt, vaan siitä, että fossiilisten polttoaineiden reservit ovat osoittautuneet luultua suuremmiksi. Näin ollen siirtyminen uusiutuviin substituutteihin on myös siirtynyt. Toisin sanoen, uusiutuvia substituutteja koskevat arviot eivät ole olleet liian optimistisia, vaan fossiilisia polttoaineita koskevat arviot ovat olleet liian pessimistisiä.

Aurinkovoima: Auringosta maahan saapuva energiamäärä on 3 845 000 eksajoulea (10^{18} joulea) vuodessa. (Vertailun vuoksi mainittakoon, että maailman energiankulutus vuonna 2010 oli hieman alle 500 eksajoulea.) Auringon energia on käytännössä myös rajatonta. Auringon energia pyritään hyödyntämään muun muassa aurinkokennoilla, jotka konvertoivat auringosta saapuvaa säteilyä sähköksi. (Tämä tapahtuu, kun sähkömagneettisen säteilyn välittäjähiukkaset, fotonit, saavat kennoissa sijaitsevat elektronit liikkeelle.) Näitä kennoja voidaan asentaa niin talojen katoille kuin erityisille voimala-alueillekin. Ekvaattorin alueita pidetään optimaalisimpina sijainteina kennoille johtuen siitä, että tämä alue vastaanottaa eniten auringon säteilyä. Toinen sijaintiin vaikuttava tekijä on kirkkaiden päivien lukumäärä. Alueilla, joilla on vähemmän

kirkkaita päiviä, täytyy pilvisiä päiviä varten varautua joko varastoimalla kirkkaiden päivien ylijäämää tai käyttämällä jotakin muuta energianlähdettä.

Aurinkovoima on yksi nopeimmiten kasvavista uusiutuvista energianlähteistä. Tällä hetkellä aurinkovoima ei kuitenkaan ole substituutti fossiilisille polttoaineille muuta kuin rajoitetusti. Aurinkokennojen tuotantokustannukset per watti saavuttivat hiljattain yhden dollarin rajan, kun sama luku oli vuonna 1970 150 dollaria ja vuonna 1990 4,5 dollaria. Samoin nykyiset kennot kykenevät hyödyntämään suuremman osan kennoille saapuvasta energiasta kuin ennen. Hinta per asennettu watti on tippunut kymmenessä vuodessa tasolta 10 dollaria per asennettu watti tasolle 7 dollaria per asennettu watti. Samoin asennettu kapasiteetti on lähes satakertaistunut, nousen tasolta 450 megawattia vuonna 1996 tasolle 40 000 megawattia vuoden 2010 lopulla. (BP Statistical Review 2011; U.S. Energy Information Administration 2010a.)

Tuuli- ja vesivoima: Aurinkovoiman tavoin tuulivoimalla olisi teknisesti mahdollista tyydyttää maailman energiatarpeet. Tuulivoimateollisuus on viime aikoina myös ollut nopeimmiten kasvavien energiasektorien joukossa. Nykyinen (2010) kapasiteetti on lähes 200 000 megawattia; kapasiteetti on kasvanut yli kymmenkertaiseksi vuodesta 2000, jolloin kapasiteetti oli 18 450 megawattia. On kuitenkin huomattava, että tuulivoiman tapauksessa sähköntuotanto ei milloinkaan ole kapasiteetin mukaista johtuen tuulen vaihtelevuudesta. Suurimmat ongelmat koskevatkin alueellisia eroja tuulivoimakkuuksissa ja tuulen vaihtelevuutta. Tämä rajoittaa huomattavasti niiden alueiden määrää, joilla tuulivoiman tuotanto on mielekästä. Jopa suhteellisen optimaalisilla alueilla tuulet saattavat vaihdella merkittävästi kaudesta toiseen. Tuulivoimalat vaativat myös huomattavasti tilaa, joten tuuliturbiineista aiheutuvat näkö- ja meluhaitat lisäävät poliittista vastustusta tuulivoimaloita kohtaan. (Archer & Jacobson 2005, 1–20; BP Statistical Review 2011.)

Vesivoima on uusiutuvista energianlähteistä selkeästi eniten käytössä. Vesivoiman maailmanlaajuinen kapasiteetti on lähes 800 000 megawattia. Vesivoimaa on historiallisesti käytetty muun muassa vesimyllyjen ja sahojen pyörittämiseen. Nykyään vesivoimaa muunnetaan sähköksi padoissa, vuorovesivoimaloissa, aaltovoimaloissa ja niin edelleen. Vesivoiman edut ovat alhaiset ylläpitokustannukset (vesivoimalat ovat lähes täysin immuuneja muutoksille polttoaineiden hinnoissa ja henkilöstökustannukset ovat alhaisia korkean automatisaation ansiosta), saasteiden alhainen määrä ja virtausten ennustettavuus. Haittoina pidetään muun muassa patojen rakentamisesta aiheutuvia ympäristötuhoja, jotka ovat olleet huomattavia erityisesti kehittyvissä talouksissa, ja vesivoiman hyödyntämisen rajoittumista niille alueille, joissa on vesivoiman tuotantoon sopivia vesialueita. (BP Statistical Review 2011.)

Geoterminen voima: Aurinkovoiman tavoin geoterminen voima on merkittävä potentiaalinen uusiutuvan energian lähde. Tämä johtuu luonnollisista hajoamisprosesseista maan kuoren sisällä, jotka tulevat jatkumaan ihmisen toiminnasta

riippumatta. Nämä prosessit käyttäytyvät ennakoitummin kuin esimerkiksi tuuli. Tekniseltä kannalta haaste on geotermisen lämmön sijainti syvällä maankuoressa. Tälle tasolle (2–3 kilometriä yleensä) poraaminen on kallista ja tämän jälkeen lämpö (joko korkealämpötilaisen veden tai höyryn muodossa) on saatava pinnalle siten, että prosessiin ei kulu liikaa energiaa. Aiemmin geotermiset voimalat ovat sijoittuneet mannerlaattojen liitoskohtien läheisyyteen, joissa geotermisen lämpö sijaitsee lähempänä pintaa kuin muualla. Tekninen kehitys on kuitenkin mahdollistanut voimaloiden sijoittamisen myös muille alueille. Samoin geotermisesti tuotettu energia on halventunut. Geotermisen voiman asennettu kapasiteetti on kasvanut tasolta 6000 megawattia vuonna 1990 tasolle 11 000 megawattia vuonna 2010. Yhdysvallat (3000 megawattia; 0,3 prosenttia kansallisesta energiantuotannosta) ja Filippiinit (2000 megawattia; 27 prosenttia kansallisesta energiantuotannosta) muodostavat noin puolet tästä kapasiteetista. Kasvu on siten ollut maltillista suhteessa muihin uusiutuviin energianlähteisiin. (Bertani 2007, 8–19; BP Statistical Review 2011.)

Geotermisten voimaloiden hyötysuhde (hyötysuhde kertoo, miten suuri osa syötetystä energiasta kyetään konvertoimaan työksi; loppu poistuu hukkalämmön muodossa ympäristöön) jää yleensä alhaiseksi, mutta päinvastoin kuin fossiilisten polttoaineiden tapauksessa, hukattu lämpö ei ole kustannus, sillä geotermistä voimaa on käytännössä loputtomasti saatavilla. Tästä huolimatta hyötysuhteen parantamisella tulee olemaan merkittävä rooli voimaloiden kannattavuuden kehittämisessä.

Fuusiovoima: Atomiydinten fuusioon perustuva energiantuotanto on käytännöllisesti katsoen vielä lastenkengissä, vaikka kehitystä on tapahtunut. Fuusioreaktorissa deuterium- ja/tai tritium-atomeja (jotka molemmat ovat vedyn isotooppeja) yhdistetään, jolloin vapautuu vapaita neutroneita, joiden kineettinen energia konvertoidaan lämpöenergiaksi. Päinvastoin kuin muiden uusiutuvien energianlähteiden kehitys, fuusiotutkimus ei ole näkynyt tieteellisissä läpimurroissa tai fuusiovoiman valjastamisessa hyötykäyttöön: kaupalliset reaktorit eivät nykytekniikalla ole lähimainkaan mahdollisia. Tekniseltä kannalta ongelma on se, että deuterium- ja tritium-atomit ovat positiivisesti varautuneita, joten ne hylkivät toisiaan (repulsiovoima). Jos nämä atomit saataisiin tarpeeksi lähelle toisiaan, atomitason hiukkasia yhdessä pitävä voima, vahva ydinvoima (myös vahva vuorovaikutus), voittaa sähkövarausten aiheuttaman repulsion. Vahva ydinvoima toimii kuitenkin vain hyvin lyhyillä etäisyyksillä, joten atomit tulisi pystyä saattamaan tarpeeksi lähelle toisiaan, jotta vahva ydinvoima vaikuttaisi. Tämä taas ainakin toistaiseksi vaatii huomattavia energiamääriä eli korkeaa lämpötilaa. Fuusioon vaadittava lämpötila taas muuttaa vedyn olomuodon plasmaksi, jota on hankala pitää koossa johtuen plasmassa olevien positiivisesti ja negatiivisesti varautuneiden hiukkasten energisyydestä. Näin ollen fuusiovoima on toistaiseksi vain teoreettinen mahdollisuus ratkaista tulevaisuuden energiatarpeet. Vaikka fuusiovoimaa ei lasketa uusiutuvaksi, olisi se sitä käytännössä

johtuen deuteriumin ja tritiumin runsaudesta. Esimerkiksi deuteriumia on lähes loputtomasti saatavilla maailman meristä. Polttoaineen runsauden lisäksi etuna on fuusiovoiman puhtaus: fuusioreaktio ei jätä jälkeensä radioaktiivisia hiukkasia ja ilmansaasteita syntyy hyvin vähän.

7 POLIITTINEN ULOTTUVUUS

Tässä luvussa käsitellään lyhyesti politiikan roolia. Koska tehokkaampien tuotantoteknologioiden adoptoinnin takana on yleensä voitontavoittelu, johtavat kilpailulliset markkinat ”automaattisesti” tällaisten teknologioiden hyödyntämiseen, kunhan ne on keksitty. Todellisuudessa kuitenkin useat poliittiset ja institutionaaliset rakenteet ehkäisevät markkinoita allokoimasta niukkoja resursseja parhaalla mahdollisella tavalla. Vääristymiä syntyy, kun esimerkiksi saasteverot eroavat maasta tai maanosasta toiseen. Energiasektorin toimijat saattavat voittohakuisten firmojen sijaan olla tehottomia valtionyhtiöitä, joiden asema on turvattu tehokkuudesta huolimatta: jatkuva tappiollisuus ei johdakaan markkinoilta poistumiseen. Suurin osa maailman öljyvaroista on valtiollisten energiamonopoliin käsissä. Monopolit ovat haitallisia vapaalle kilpailulle ja siten vaikuttavan negatiivisesti niiden tekniikoiden kehitykseen, jotka vaikuttavat esimerkiksi talteenottotehokkuuteen. Tästä huolimatta useat kansalliset monopolit altistuvat kilpailupaineille kansainvälisellä tasolla, jossa kansalliset monopolit kilpailevat sekä keskenään että yksityisessä omistuksessa olevien energiefirmojen kanssa. Näin ollen kansainvälisellä kaupalla on kilpailua edistäviä vaikutuksia. Öljynviejämaiden järjestö OPEC voidaan tässä tapauksessa nähdä yrityksenä vähentää näitä kansainvälisen kaupankäynnin aiheuttamia kilpailupaineita ja saattaa eri valtioiden öljyntuottajat yhden kartellin alaisuuteen. OPECin vaikutusvallan katsotaan kuitenkin vähentyneen sitten energiakriisien, joiden seurauksena länsimaat pyrkivät parantamaan muun muassa teollisuuden ja liikenteen energiatehokkuutta.

Monissa Afrikan maissa öljyvarat ovat olleet pikemminkin kirous kuin talouskasvun lähde, aiheuttaen sotia ja korruptiota. Arabimaat taas ovat olleet valmiita käyttämään öljyä poliittisena aseena, näkyvimmin juuri energiakriisien aikana. Samoin Venäjä on ajoittain keskeyttänyt kaasutoimitukset naapurimaihin. Maakaasun kuljetusreittien rakentamista voidaan käyttää politiikan välineenä. Yhdysvalloissa tällaiset energiantoimituksiin liittyvät epävarmuudet ovat innostaneet pyrkimyksiin irroittautua riippuvuudesta ulkomaisesta energiasta. Tavoite sinänsä on mahdoton, mutta ulkomaista energiariippuvuutta on pyritty lieventämään höllentämällä rajoituksia, jotka ovat estäneet luonnonsuojelun alueiksi katsottujen alueiden (lähinnä rannikkoalueet ja Alaska) kartoittamisen ja hyödyntämisen. Poliittiset paineet saattavat tätä kautta johtaa reservien kasvuun, kun aiemmin hyödyntämättömiä alueita valjastetaan energiantuotantoon. (Energy Information Administration 2008.) Myös Kanadan nousu maailman merkittävimmäksi öljyntuottajamaaksi on hyödyntänyt erityisesti tätä Yhdysvaltain pyrkimystä irroittautua ”poliittisesti epävakasta” öljystä. (Deutsch 2011, 82–93.)

Yksi merkittävä vääristymien lähde ovat energiankulutukset tuet. Monessa öljyntuottajamaassa kuluttajien kohtaama polttoaineen hinta on merkittävästi maailmanmarkkinahintaa alhaisemmalla tasolla. Tämä kiihdyttää energiankulutusta ja

siten nopeuttaa niukkojen fossiilisten polttoaineiden ehtymistä. Tällaisista tukiaisista on vaikea päästä eroon, kun kuluttajat ovat tottuneet maksamaan lähes olemattomia hintoja polttoaineesta. Edistystä voi kuitenkin tapahtua. Esimerkiksi Iran luopui polttoainetuista vuonna 2010, millä on ollut myönteisiä vaikutuksia; esimerkiksi valtiontalous on parantunut, kun budjetista ollaan kyetty karsimaan polttoainetukiaisiin normaalisti kohdennetut varat. Samoin polttoaineen kysyntä on laskenut. (The Economist 2011.) Tulevaisuudessa öljyvarojen ehtyminen yhdistettynä mahdollisiin valtiontaloudellisiin ongelmiin saattavat johtaa kehitykseen, jonka seurauksena polttoainetuista luovutaan yleisesti. Toivottavaa tietenkin on, että tällaiseen kehitykseen päädytään mahdollisimman pian. Muuten joillakin alueilla voidaan päätyä tilanteeseen, jossa jatkuvasti alhaiset polttoainehinnat luovat illuusion luonnonvarojen runsaudesta, ja tukiaisista luovutaan vasta kun energiavarat ovat ehtyneet. Tällaisessa tilanteessa siirtyminen substituuotteihin ei olisi enää häiriötöntä, vaan siirtymisen tulisi tapahtua verraten lyhyessä ajassa, mikä voi olla erityisen hankalaa, kun teollisuudessa ja liikenteessä käytettävissä olevat teknologiat pyörivät jo ehtyneellä luonnonvaralla.

Poliittiset ja institutionaaliset tekijät vaikuttavat myös tämän tutkielman pohjana käytettäviin arvioihin esiintymien ja reservien suuruuksista. Informaation saatavuus on riippuvaista energiayhtiöiden omasta raportoinnista, jonka luotettavuus vaihtelee maasta ja maanosasta toiseen. Kansainvälinen korruption tutkimuksen järjestö Transparency International on tutkinut öljy- ja kaasuyhtiöiden toiminnan ja raportoinnin läpinäkyvyyttä (Transparency 2011). Tämä tutkimus tarkastelee näiden energiayhtiöiden toimintaa kolmen ominaisuuden perusteella: yhtiöiden korruptionvastaisen toiminnan, tiedonannon organisaation sidosryhmistä ja raportoinnin siitä, miten suuri osa liikevaihdosta menee valtion kassaan, miten suuri osa yhtiön omaan toimintaan. Tutkimus koostui 44 öljy- ja kaasuyhtiöstä, jotka sijaitsivat 30 maassa. Otokseen kuuluvat yhtiöt käsittävät noin 60 prosenttia maailmanlaajuisista reserveista ja tuotannosta.

Tulosten mukaan länsimaiset, valtiosta riippumattomat öljy- ja kaasuyhtiöt ovat toiminnassaan olleet huomattavasti läpinäkyvämpiä kuin valtion joko kokonaan tai huomattavissa määrin hallitsevat yhtiöt. Tutkimuksessa huonoimmat pisteet menivät lähes poikkeuksetta lähi-itämaalaisille, kiinalaisille ja venäläisille yhtiöille. Esimerkiksi korruptionvastaisten ohjelmien suhteen parhaimman tuloksen sai brittiläinen BG Group (93 prosenttia parhaasta mahdollisesta tuloksesta) kun huonoin tulos päätyi venäläiselle Gazpromille (nolla prosenttia parhaasta mahdollisesta tuloksesta). Valtionyhtiöistä poikkeuksen muodosti norjalainen Statoil, joka pärjasi hyvin kaikissa vertailuissa. Huomattavaa on, että raportointi kolmannen ominaisuuden (siirrot valtioille) suhteen oli heikointa ja heikkoa jopa länsimaisten yhtiöiden keskuudessa.

Huolimatta useiden yhtiöiden huonosta sijoituksesta Transparencyn selvityksessä, on erityisesti aasialaisten ja eteläamerikkalaisten yhtiöiden raportointi parantunut sitten

vuoden 2008, jolloin Transparency viimeksi suoritti aiheesta selvityksen. Tutkimuksen tekijät uskovat, että raportointi tulee lähivuosinakin paranemaan.

8 LOPUKSI

Nyky-yhteiskunnan keskeisimmät energianlähteet ovat fossiilisia polttoaineita. Kemiallisten ominaisuuksiensa ja suhteellisen runsautensa ansiosta fossiiliset polttoaineet kattavat yli 80 prosenttia maailmanlaajuisesta energiankulutuksesta tänä päivänä. Nämä polttoaineet ovat kuitenkin syntyneet todella hitaiden prosessien seurauksena eivätkä näin ollen ole uusiutuvia. Kestävää kehitystä ei voida rakentaa niiden varaan. Johtuen uusiutuvien energianlähteiden suhteellisesta kalleudesta, maailmantalouden toiminta tulee kuitenkin lähitulevaisuudessa riippumaan fossiilisista polttoaineista.

Tässä tutkielmassa on tarkasteltu empiirisesti markkinoiden kykyä käsitellä luonnonvarojen niukkuuden aiheuttamia haasteita. Taustalla on vaikuttanut kysymys siitä, voidaanko kestävä kehitys sovittaa yhteen kasvavan energiantarpeen kanssa. Energia on tässä tutkielmassa nähty eräänlaisena edustajana jatkuvalle taloudelliselle toiminnalle, sillä mikään toiminta (työ) ei ole mahdollista ilman energiaa. Taloustieteen valtavirran mukaan markkinat vastaavat niukkuuteen teknologisella kehityksellä, substituutiolla ja kiihdyttämällä uusien esiintymien etsintää.

Sekä öljyn että maakaasun reservit ovat kasvaneet tasaisesti. Samalla teknologinen kehitys ja fossiilisten polttoaineiden hinnannousu ovat johtaneet liuskekaasun ja hiilikerrosten metaanin hyödyntämiseen viimeisten kahdenkymmenen vuoden aikana. Samoin öljyhiekasta saatava bitumi ja öljyliuskeesta saatava liuskeöljy ovat viime aikoina nousseet taloudellisiksi substituuteiksi perinteiselle raakaöljylle, vaikkakin toistaiseksi hyvin rajoitetusti. Näihin substituutiomahdollisuuksiin suhtauduttiin skeptisyydellä vielä muutama vuosikymmen sitten. Tällä hetkellä niiden taloudellinen hyödyntäminen on kuitenkin todellisuutta, mutta tämä tulee jatkossakin riippumaan öljyn barrelihinnan vaihtelusta, joka on viime aikoina ollut poikkeuksellista. Konventionaalisten öljy- ja kaasuesiintymien hupeneminen on myös johtanut täysin uusien, mittavien esiintymien paljastumiseen, joista merkittävimpiä ovat Albertan ja Orinocon öljyhiekkaesiintymät. Merkittävä osa reservikasvusta johtuu kuitenkin tunnettujen reservien laajenemisesta, kun markkinaolosuhteet ja teknologinen kehitys mahdollistavat entistä suuremman osuuden hyödyntämisen korkeamman talteenottotehokkuuden muodossa. Tämän ansiosta pienempi määrä arvokasta luonnonvaraa joudutaan jättämään maan alle. Varovaisimmatkin arviot fossiilisten polttoaineiden lopullisista kokonaismääristä ja talteenottotehokkuuksien tulevasta kehityksestä vihjaavat, että reservien kasvulle on vielä runsaasti tilaa. Staattiset RTU-suhteet eivät sovellu tulevan kehityksen indikaattoreiksi. Jos siirtyminen uusiutuviin substituuhteihin ei ollut ajankohtaista tai kiireellistä neljäkymmentä vuotta sitten, kun RTU-suhde oli 30 vuotta, ei se ole ajankohtaista nyt, kun RTU-suhde on 40 vuotta huolimatta energiankulutuksen kasvusta viimeisen neljäkymmenen vuoden aikana.

Markkinamekanismit kuitenkin vaativat tietynlaisen institutionaalisen ympäristön toimiakseen. Tälle ympäristölle ominaisin piirre on vapaa kilpailu. Kilpailu johtaa aleneviin kustannuksiin (tai hitaammin kasvaviin kustannuksiin) teknologisen kehityksen kautta, uusien esiintymien etsintään ja substituutiomahdollisuuksien hyödyntämiseen. Kestävän kehityksen tulisikin tällöin rakentua näitä mekanismeja rohkaisevalle institutionaaliselle pohjalle.

Samoin on kuitenkin huomioitu, että fossiiliset polttoaineet ovat ehdottoman rajallisia, eikä tulevaisuuden energiankulutusta voida rakentaa niiden varaan. Pitkällä aikavälillä kestävän kehityksen tulee rakentua uusiutuvien energianlähteiden laajamittaiseen hyödyntämiseen. Monet näistä energianlähteistä ovat vielä liian kalliita hyödynnettäviksi, mutta viime aikoina kehitys on ollut huomattavaa erityisesti uusiutuvilla energianlähteillä tuotetun sähkön hinnassa. Kehitys ei suoranaisesti ole näkynyt uusiutuvien energianlähteiden suhteellisen osuuden merkittävänä nousuna, mutta tämä on odotettavissa niin kauan kuin fossiiliset polttoaineet ovat yhä runsaasti saatavilla ja siten suhteellisesti halpoja. ”Hitaus” valjastaa uusiutuvia energianlähteitä käyttöön ei tällöin ole merkki markkinoiden epäonnistumisesta, vaan optimaalinen ratkaisu tilanteessa, jossa uusiutuva substituutti ei yksinkertaisesti ole taloudellisesti kannattava vaihtoehto.

Suurimmista uhkatekijöistä monet ovatkin poliittisia. Keskustelun kestävästä kehityksestä ja luonnonvarojen riittävydestä aiheuttaneet energiakriisit olivat seuraksia tietoisesta päätöksestä leikata öljyntuotantoa. Yhdysvallat on mahdollisesti saavuttanut ”öljyhuipun” tuotannossa, koska mittavat maa- ja merialueet Alaskassa ja Meksikon rannikolla ovat suljettu energiateollisuuden ulkopuolelle. Valtion omistamat energiayhtiöt ovat heikon ylläpidon seurauksena kyenneet tuottamaan vähemmän polttoainetta kuin mitä geologiset olosuhteet olisivat sallineet. Kun huomioidaan markkinamekanismien kyky vastata niukkuudesta aiheutuviin haasteisiin, tulisi valtioiden pyrkiä näiden mekanismien tehostamiseen ja oman roolinsa karsimiseen, ainakin jos suhteellisen halvan energian tuottaminen on tavoite. Näin ei kuitenkaan välttämättä ole: yhteiskunta saattaa tietoisesti valita ympäristönsuojelun halvan energiantuotannon kustannuksella. Tällöin on perusteltua korjata hintoja suuntaan, joka huomioi ympäristölle koituvat kustannukset.

On myös huomioitava, että niukkuuden aiheuttamat ongelmat energiantuotannossa saattavat lisätä poliittisia paineita energiantuotannon helpottamiseksi. Esimerkiksi Yhdysvalloissa korkea polttoaineen hinta ja riippuvuus lähi-itämaalaisten valtioiden öljyvaroista on lisännyt poliittista kannatusta luopua ympäristösäädöksistä, jotka ehkäisevät energiantuotantoa luonnonsuojelualueilla. Ei kuitenkaan ole takeita siitä, että tämä prosessi välttämättä tapahtuisi, tai että se tapahtuisi tarpeeksi nopeasti, jotta suurilta ongelmilta vältyttäisiin: erilaiset poliittiset järjestelmät reagoivat muutoksin eri nopeuksilla.

Kestävä kehitys käsittää tietenkin muutakin kuin pelkästään energiantuotannon riittävyyden pitkällä aikavälillä. Taloudellisen toiminnan jatkuminen on riippuvaista myös muista raaka-aineista ja toisaalta ympäristön kantokyvystä. Tässä tutkielmassa ei ole pyritty etsimään tyhjentäviä vastauksia näihin ongelmiin, eikä se olisi ollut mahdollistakaan. On itsestään selvää, että kattavan analyysin yhteiskunnan kyvystä kohdata kestävä kehityksen haasteet tulisi huomioida myös nämä tekijät.

LÄHTEET

- Archer, C.L. – Jacobson, M.Z. (2005) Evaluation of global wind power. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, 1–20.
- Bartis, J.T. – LaTourrette, T. – Dixon, L. – Peterson, D.J. – Cecchine, G. (2005) Oil shale development in the United States: Prospects and policy issues. RAND Corporation.
- Bertani, R. (2007) World geothermal generation in 2007. *GHC Bulletin*, September 2007.
- Brown, G. – Field, B. (1978) Implications of alternative measures of natural resource scarcity. *Journal of Political Economy*, Vol. 86 (2), 229–243.
- Daly, H.E. (1974) The economics of the steady state. *American Economic Review*, Vol. 64 (2), 15–21.
- Deutch, J. (2011) The good news about gas. *Foreign Affairs*, Vol. 90 (1), 82–93.
- Energy Information Administration (2008) Analysis of crude oil production in the arctic national wildlife refuge.
- Evenson, R. – Gollin, D. (2003) Assessing the impact of the green revolution, 1960 to 2000. *Science*, Vol. 300, May 2, 758–762.
- Feygin, M. – Satkin, R. (2004) The oil reserves-to-production ratio and its proper interpretation. *Natural Resources Research*, Vol. 13 (11), 57–60.
- Hamilton, J. (2009) Causes and consequences of the oil shock of 2007–2008. *Brookings Papers on Economic Activity*, Spring 2009.
- Highlighting heavy oil (2007) *Oilfield Review*, Vol. 18 (2).
- Keohane, N. – Olmstead, S. (2007) *Markets and the environment*. Island Press, Washington, DC.
- Koppelaar, R. (2005) World oil production & peaking outlook. Peak Oil Netherlands Foundation.
- Krautkraemer, J.A. (1998) Nonrenewable resource scarcity. *Journal of Economic Literature*, Vol. 36 (4).
- Kuuskräa, V.A. – Ammer, J. (2004) Tight gas sands development—How to dramatically improve recovery efficiency. *GasTIPS*, Winter 2004.
- Lasserre, P. (1985) Discovery costs as a measure of rent. *The Canadian Journal of Economics*, Vol. 18 (3), 474–483.
- Meadows, Dennis – Randers, J. – Behrens, W. – Meadows, Donella (1973) *Kasvun rajat*. Kustannusosakeyhtiö Tammi, Helsinki.

- Meadows, Dennis – Randers, J. – Meadows, Donella (2005) *Kasvun rajat – 30 vuotta myöhemmin*. Helsinki University Press.
- Morehouse, D. (1997) The intricate puzzle of oil and gas "reserves growth". *Energy Information Agency – Natural Gas Monthly*, July 1997, 7–20.
- National Energy Board of Canada (2006) Canada's oil sands: Opportunities and challenges to 2015.
- Perman, R. – Ma, Y. – McGilvray, J. – Common, M. (1999) *Natural resource & environmental economics*. 2. p. Financial Times – Prentice Hall, London.
- Perry, K. – Lee, J. (2007) Unconventional gas reservoirs—Tight gas, coal seams, and shales. National Petroleum Council Working Papers.
- Sandrea, I. – Sandrea, R. (2007) Global oil reserves – Recovery factors leave vast targets for EOR technologies. *Oil & Gas Journal*, 105 (41/42).
- Schenk, C.J. – Pollastro, P.M. (2002) Natural gas production in the United States. U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-113-01.
- Schenk, C.J. – Cook, T.A. et al. (2009) An estimate of recoverable heavy oil resources of the Orinoco oil belt, Venezuela. U.S. Geological Survey Fact Sheet 3028.
- Schroeder, D. (2000) *An introduction to thermal physics*. Addison Wesley Longman, San Francisco, CA.
- The Economist (2011) Economic jihad. 23.6.2011, 46–47.
- Tietenberg, T. (2003) *Environmental and natural resource economics*. 6. p. Addison Wesley, Boston, MA.
- Transparency (2011) Promoting revenue transparency – 2011 report on oil and gas companies.
- Watkins, G.C. (2006) Oil scarcity: What have the past three decades revealed? *Energy Policy*, Vol. 34, 508–514.
- World Commission on Environment and Development (1987) *Our Common Future*. Oxford University Press, Oxford.

Tilastoja

BP Statistical Review of World Energy – June 2011. <<http://www.bp.com/sectiongenericarticle800.do?categoryId=9037130&contentId=7068669>>, haettu 5.8.2011.

Energy Information Administration (2010a) Annual Energy Review 2010.

Energy Information Administration (2010b) Coalbed Methane Proved Reserves. <http://www.eia.gov/dnav/ng/ng_enr_coalbed_a_epg0_r51_bcf_a.htm>, haettu 5.10.2011.

Energy Information Administration (2010c) U.S. Natural Gas Reserves Summary as of Dec. 31. <http://www.eia.gov/dnav/ng/ng_enr_sum_dcu_nus_a.htm>, haettu 5.10.2011.

Energy Information Administration (2010d) Shale Natural Gas Proved Reserves. <http://www.eia.gov/dnav/ng/ng_enr_shalegas_a_EPG0_R5301_Bcf_a.htm>, haettu 5.10.2011.