



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Aapo Tommila

Nettoenergiatietojen käyttömahdollisuudet energiantuotantotapojen arvioinnissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

7.5.2019

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Aapo Tommila Nettoenergiatietojen käyttömahdollisuudet energiantuotantotapojen arvioinnissa 39 sivua + 2 liitettä 7.5.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine	-
Ohjaajat	Lehtori Tomi Hämäläinen Puheenjohtaja Esa Tommila, Nettoenergia ry
<p>Nettoenergia-ajattelu on Suomessa vielä melko tuntematon käsite. Nettoenergia ry on voittoa tavoittelematon yhdistys, jonka tarkoituksena on nettoenergia tietoisuuden levittäminen. Tämän insinööriyön tarkoituksena oli tuottaa yhdistykselle suomenkielinen katselmus nettoenergiasta ja EROI-luvusta, jotta nettoenergia-ajattelu olisi helpompaa omaksua ja nettoenergia-analyysin tekemisen vaatimukset olisivat paremmin selvillä. Aiheesta on olemassa runsaasti englanninkielistä materiaalia, mutta se on hyvin hajanaista ja kokonaisuu- den hahmottaminen vaatii paneutumista.</p> <p>Insinööriyössä käydään läpi nettoenergia-ajattelun perusteet, nettoenergia-analyysin tekeminen sekä käsitellään joitakin eri energiantuotantotavoille saatavilla olevia EROI-lukuja. Nettoenergia-analyysillä voidaan selvittää energialähteestä yhteiskunnan käyttöön saatavan energian määrä ja selvittää kuinka sen tuottamiseen vaadittavat energiapanokset vaikuttavat kokonaisuuteen. Perusteellisesti tehdystä vertailevasta nettoenergia-analyysistä voidaan helposti nähdä, mikä energiantuotantotapa on yhteiskunnan energiantarpeiden kannalta edullisin.</p> <p>Insinööriyötä tehdessä tutustuttiin suureen määrään aihetta käsitteleviä artikkeleita ja tutkimuksia. Lisäksi työtä tehdessä luettiin paljon energiapolitiikkaa ja -tekniikkaa käsitteleviä selvityksiä, jotta nettoenergia-analyysin tekemisen hyödyistä saataisiin muodostettua hyvä kokonaiskuva. Nettoenergia-analyysin voidaankin tulevaisuudessa olettaa olevan hyvä työkalu energiantuotantotapojen vertailuun, kun ilmastonmuutoksen ehkäisemiseksi tarvittavia päätöksiä tullaan tekemään. Insinööriyö toimii koosteena nettoenergia-ajattelusta, jossa nettoenergia-ajattelun tärkeimmät ominaisuudet ja hyödyt käyvät ilmi myös energiatekniikkaan perehtymättömälle henkilölle.</p>	
Avainsanat	energia, nettoenergia, EROI, ERoEI, LCA, elinkaariarviointi

Author Title Number of Pages Date	Aapo Tommila Usage of net energy data in assessment of energy production technologies 39 pages + 2 appendices 7 May 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Energy and environmental technology
Professional Major	-
Instructors	Senior Lecturer Tomi Hämäläinen Nettoenergia ry Chairman Esa Tommila
<p>Nettoenergia ry is non-profit organization which aims to provide information about technologies and solutions to combat climate change. As the concept of net energy is still foreign in Finland, the purpose of this Bachelor's thesis is to produce a review of net energy and EROI value in the Finnish language so that familiarization of the concept could be done with reasonable effort. There is much net energy material available in English, but the material is not very organized; thus, acquiring the needed information might pose a challenge and understanding the big picture requires some effort.</p> <p>The thesis discusses the basics of net energy concept, making of net energy analysis (NEA) and goes through some example EROIs of energy production processes. With net energy analysis one can determine the net energy yield available to society from the energy source and figure out how the energy inputs affect the entity. An in-depth comparative net energy analysis can define the most beneficial way of generating energy for society's energy needs/requirements. The making of the thesis consisted of reading large number of research papers and articles about net energy and EROI to indicate the most important features and flaws of net energy analysis. In addition, several studies on energy policy and technology were included in the work to provide a good overall picture of the benefits of making a net energy analysis.</p> <p>This Bachelor's thesis and the collection of reference material is the result of work done for Nettoenergia ry. As conclusion of the work done, net energy analysis can be expected to be a great tool for comparing energy production methods when decisions about how to prevent climate change are made. This Bachelor's thesis provides an overall view of net energy analysis, where the main features, benefits and flaws of net energy analysis are pointed out even to a person who is not familiar with basics of energy technology.</p>	
Keywords	energy, net energy, EROI, ERoEI, LCA, life cycle assessment

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Nettoenergia	2
2.1	Energia	2
2.2	Nettoenergia	4
2.3	Historiaa	6
3	Nettoenergia-analyysi	8
3.1	Nettoenergia-analyysin tekeminen	8
3.2	Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely	9
3.2.1	Järjestelmärajojen asettaminen	10
3.2.2	Toiminnallisen yksikön määrittäminen	13
3.3	Inventaarioanalyysi	13
3.4	Vaikutusarviointi	14
3.5	Tulosten tulkinta	15
3.6	Varastointi ja energian käyttäminen	16
4	EROI – Energy Returned on Invested	17
4.1	Energiapanostuksen tuottokerroin	17
4.2	Kaavat	18
4.3	Nettoenergiajyrkänne	19
4.4	EROI-luku ja yhteiskunta	21
5	Voimalat	22
5.1	Tulkinta	23
5.2	Kaasukombivoimala	23
5.3	Kivihiililauhdevoimavoimala	25
5.4	Tuulivoimala	25
5.5	Ydinvoimala	26
5.6	Aurinkopaneelit	27
5.7	Vesivoimala	29

5.8	Yhteenveto	30
6	Johtopäätökset	32
	Lähteet	35
	Liitteet	
	Liite 1. Nettoenergia-analyysin järjestelmädiagrammi	
	Liite 2. Laskennassa käytetyt Excel-taulukot	

Lyhenteet

CHP	<i>Combined Heat and Power.</i> Voimala joka tuottaa sähköä sekä lämpöä.
EROI	<i>Energy Returned on Invested.</i> Energiapanostuksen tuottokerroin.
ERoEI	<i>Energy Returned on Energy Invested.</i> Energiapanostuksen tuottokerroin.
HDI	<i>Human Development Index.</i> Yhteiskunnan kehitystä kuvaava indeksiluku.
IEA	<i>International Energy Agency.</i> Kansainvälinen energiajärjestö.
LCA	<i>Life Cycle Assessment.</i> Elinkaariarviointi.
LEI	<i>Lambert Energy Index.</i> Lambertin energiaindeksi.
NEA	<i>Net Energy Analysis.</i> Nettoenergia-analyysi.
VRE	<i>Variable Renewable Energy.</i> Vaihtelevan tuotannon uusiutuvat energianlähteet.

1 Johdanto

Yhteiskunnan toimivuus on vahvasti riippuvainen sen kyvystä tuottaa ja kuluttaa työn tekoon kykenevää energiaa tehokkaasti. Tämän energian tuottaminen on täysin riippuvainen energianlähteiden fysikaalisista ominaisuuksista, mutta energialähteitä arvioidaan ja vertaillaan keskenään useimmiten vain niiden taloudellisten arvojen perusteella. Nettoenergia-ajattelulla pyritään tuomaan esille eri primäärienergiälähteiden eroja käyttämällä ainoastaan fysikaalisia suureita, jotta energialähteiden vaikutusta yhteiskuntaan voitaisiin paremmin arvioida suuressa mittakaavassa.

Euroopan energiantuotannon odotetaan kaksinkertaistuvan nykyisestä vuoteen 2050 mennessä [1]. Samaan aikaan ilmastonmuutoksen hidastamiseksi energiantuotannon tulisi päästä eroon nykyisistä fossiilisia polttoaineita käyttävistä energialähteistä ja siirtyä käyttämään hiilidioksidineutraaleja energialähteitä vuoteen 2040 mennessä [2]. Suomessa tavoitteeksi on asetettu vieläkin tiukempi raja kivihielestä luopumiselle, vuosi 2030. Näin tiukka aikataulu asettaa jo pelkästään fossiilisten korvaamiselle massiivisia haasteita, puhumattakaan energiankulutuksen kasvamisen aiheuttamasta lisärakentamisen tarpeesta. Valtioneuvosto arvioi, että Suomen energiankokonaiskulutus kasvaisi noin 45 TWh vuoteen 2030 mennessä [3, s. 116]. Tekniset ratkaisut energiantuotannon uudistamiseen ovat olemassa. Niitä arvioidessa tulisi kuitenkin käyttää matemaattisia fysikaalisiin arvoihin perustuvia menetelmiä eikä tehdä valintaa vakaumuksien, aatteiden tai pelkästään taloudellisen kannattavuuden perusteella.

Tämän insinööriyön tilaajana toimii helsinkiläinen Nettoenergia ry, joka pyrkii edistämään ilmastonmuutoksen hillintään parhaiten vaikuttavien tekniikoiden ja ratkaisujen tunnettavuutta. Yhdistys kerää tietoa muun muassa ilmastonmuutoksesta, sen hillintäkeinoista, ilmasto-ohjelmista ja näihin vaikuttavista energiantuotantotekniikoista kotimaassa ja ulkomailla. Näistä yhdistys koostaa selvityksiä, laskelmia sekä valistusaineistoa ilmaston kannalta parhaiden keinojen ja tekniikoiden käytön lisäämiseksi. [4.]

Nettoenergia-ajattelu on vielä kohtalaisen tuntematonta aihe Suomessa ja suomenkielisen materiaalin määrä vähäistä. Kansainvälisesti nettoenergia-analyysejä ja aiheeseen

liittyviä artikkeleita on saatavilla runsaasti, mutta niissä käytetyt menetelmät ovat vaihtelevia ja aiheeseen tutustuminen niiden kautta voi olla hankalaa. Tämän työn tarkoituksena on käydä läpi verkossa saatavilla olevaa materiaalia ja koostaa siitä suomenkielinen kokonaisuus. Työssä käydään läpi nettoenergia-analyysin tekemisen perusteet, käsitellään sen tekemiseen sisältyviä ongelmia ja haasteita sekä tarkastellaan yleisemmille energiantuotantotavoille tehtyjä nettoenergia-analyysiesimerkkejä.

2 Nettoenergia

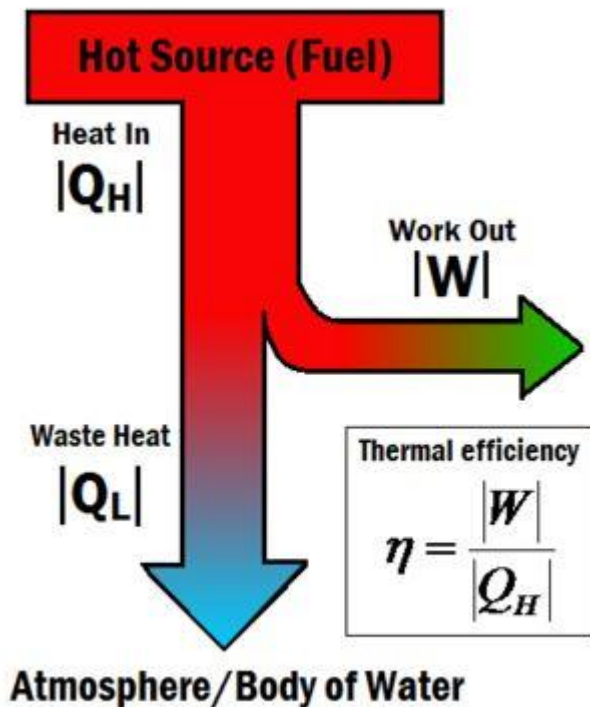
Tässä luvussa käydään läpi termodynamiikan pääsääntöjä sekä avataan nettoenergia-ajattelun peruseriaatteita ja historiaa. Koska fysiikan lait määrittelevät energiantuotannon mahdollisuudet, muutaman termodynamiikan peruseriaatteen ymmärtäminen on työn kannalta tarpeellista.

2.1 Energia

Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan energia on termodynaaminen ominaisuus eikä sitä voi luoda tai tuhota. Energiaa voidaan muuttaa muodosta toiseen, mutta suljetun systeemin kokonaisenergia säilyy aina samana. Termodynamiikan toinen pääsääntö vaatii, että energialla on laatu sekä määrä. Toinen pääsääntö määrittää myös termodynaamisen prosessin suunnan, niin että energian laatu heikkenee aina, jos prosessiin ei tuoda sen ulkopuolelta energiaa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että pöydälle jätetty kuuma kahvikuppi jäähtyy itsestään, mutta kylmä kahvi ei voi itsestään lämmitä. Vaikka nämä säännöt ovat olleet toiminnassa universumin synnystä asti ja William Rankine, Rudolph Clausius ja Lordi Kelvin julkaisivat ne jo 1850-luvulla, ei ikiliikkujan mahdottomuus ole vielä kukaan kaikille täysin selvää. [5, s. 2.]

Energian laatu määrittyy sen sisältämän eksergian mukaan. Eksergia on energian työhön kykenevä osa eli se osa, jota voidaan hyödyntää yhteiskunnan kannalta merkittävällä tavalla. Työhön kykenemätöntä energian osaa kutsutaan anergiaksi. Eksergian määrää energiassa voidaan kasvattaa lämpövoimakoneella (kuvassa 1), eli energian laatua voidaan parantaa. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan tällaiseen prosessiin täytyy kuitenkin syöttää enemmän energiaa kuin se tuottaa, koska osa energian

sisältämästä eksergiasta menetetään muunnosprosessissa. Tämä häviö ilmenee pääosin lämpönä, mutta esimerkiksi myös melu ja laitteiden värähtely ovat menetettyä eksergiaa. Lämpövoimakoneen hyötysuhde määrittelee, kuinka suuri osa lämmöstä meneetään. [5, s. 419–442.]



Kuva 1. Lämpövoimakoneen toiminta [6].

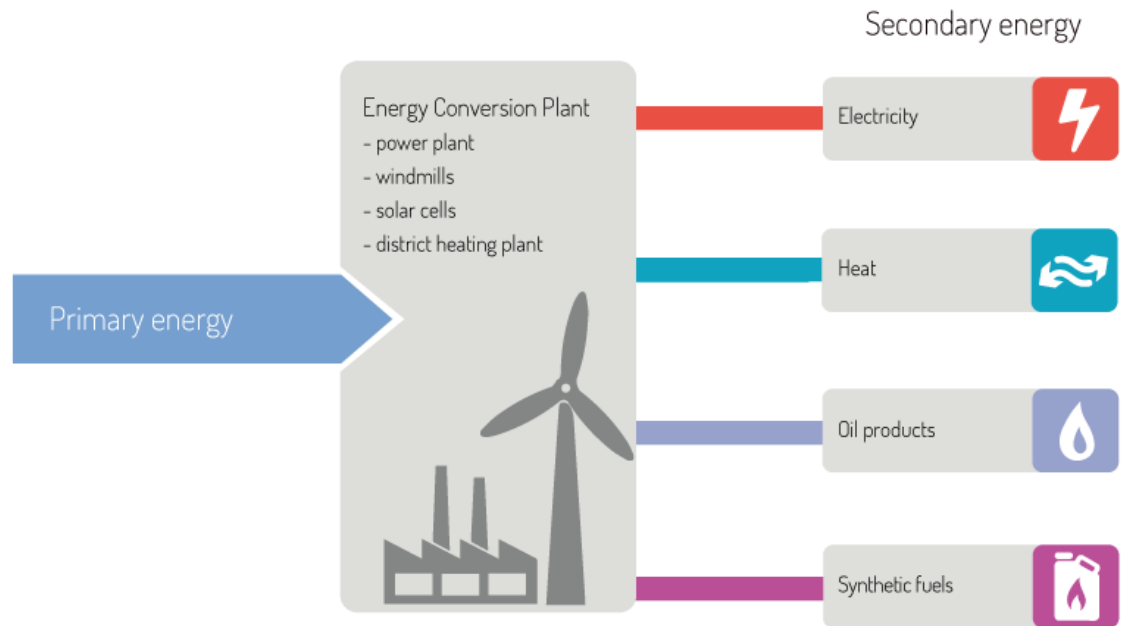
Eksergian ja energian käsitteitä ei tulisi sotkea keskenään eri energioita vertaillessa, eksergian määriteltessä energian potentiaalisen kyvyn tehdä työtä. Täysin eksergiasta koostuvia energioita ovat muun muassa potentiaalienergia, liike-energia ja sähköenergia. Edellä mainitut energiat voidaan lämmitystarkoituksessa muuttaa kokonaan lämmöksi, mutta lämpöenergiaa ei voida muuttaa työksi ilman häviöitä. Ilman ylimääräistä energiapanosta tällaiset muunnosprosessit toimivat ainoastaan toiseen suuntaan. [5, s. 419–442.]

Termodynamiikan lait koskevat myös uusiutuvia energiantuotantotapoja, vaikka niiden tuottamaa sähköenergiaa ei tuotetakaan lämpövoimakoneella. Myös mekaanisen tai säteilyenergian muuntamisessa sähköenergiaksi tapahtuu häviöitä.

2.2 Nettoenergia

Energialähteestä tuotetun ja tuottamiseen kuluvan energiapanoksen erotusta sanotaan nettoenergiaksi. Nettoenergiaa voisi käsitteellä verrata nettotalouteen: jotta yrityksen talous pysyy tuottavana, lopullisen tuloksen pitäisi olla positiivinen. Energiataloudessa tämä tuottavuus voi kuitenkin helposti hämärtyä, koska tuottavuutta arvioidaan yleensä ainoastaan taloudellisesti ja tarkasteltavan järjestelmän rajat voivat olla varsin epämääräiset. Energian euromääräinen hinta ei usein kuvaa sitä, kuinka paljon energian tuottamiseen on käytetty materiaaleja ja energiaa. Kaikkia energialähteen käytön vaatimien teknisten tukitoimien kustannuksia ei yleensä ole kohdistettu energialähteen tuottaman energian markkinahintaan. Myös energialähteiden verotus ja niihin kohdistuvat taloudelliset tuet eroavat usein merkittävästi toisistaan. Tällainen menettely mahdollistaa nimellisestikin tuottavat energialähteet, joiden tuottama energia ei kuitenkaan suuressa mittakaavassa riitä yhteiskunnan toiminnan ylläpitoon tai niiden käyttäminen vaatii yhteiskunnalle vähemmän merkityksellisistä toiminnoista luopumista.

Kaikki energiantuotantomenetelmät perustuvat primäärienergian muuntamiseen käytettävään muotoon. Primäärienergia määritellään energialähteiden sisältämäksi energiaksi jota ei ole prosessoitu, vaan se on luonnonmukaisessa muodossaan [7]. Primäärienergian lähteitä ovat muun muassa kivihiili, uraani, tuuli, maakaasu, aurinko ja biomassa. Jotta primäärienergiälähteiden sisältämää energiaa voidaan käyttää yhteiskunnassa, se tulee viedä läpi muunnosprosessista, jossa sen sisältämä eksergia muunnetaan käyttöön sopivaksi sekundäärienergiaksi kuten sähköksi (kuva 2). Riippumatta energialähteestä osa muunnosprosessiin syötetystä primäärienergiapanoksesta menetetään lämpönä, meluna tai painehäviöinä.



Kuva 2. Primäärienergian muuntaminen sekundäärienergiaksi [8].

Kokonaisuutena muunnosprosessit koostuvat useista eri osista, jotka kuluttavat energiaa sekä välittömästi että välillisesti. Energialähteen välittömästi kuluttamaksi energiaksi voidaan laitoksesta riippuen katsoa sen toiminnan ylläpitoon kulutettu sähkö- tai lämpöenergia. Energiaa kuluu kuitenkin myös välillisiin toimintoihin, kuten laitoksen ja sen vaatiman infrastruktuurin rakentamiseen sekä laitoksen kuluttamien tuotteiden ja palveluiden tuottamiseen.

Yksi tapa tunnistaa investoinnin arvoiset energialähteet on elinkaariarvioinnin (Life Cycle Assessment, NEA) tapainen nettoenergia-analyysi (Net Energy Analysis, LCA). Nettoenergia-analyysillä voidaan selvittää energialähteestä saatava nettoenergia, eli kuinka paljon energiaa jää käytettäväksi, kun energialähteen teknisenä elinaikanaan kuluttamat energiapanokset on vähennetty sen tuotosta. Hyvin tehdystä analyysistä voi helposti tunnistaa fysikaalisesti tehokkaimman tavan tuottaa energiaa. Analyysien tekoon liittyy kuitenkin vielä joitakin ongelmia ja virheellisiä käsityksiä.

Toisin kuin elinkaariarviointi, jonka tekeminen on määritelty standardeissa ISO-14040 ja ISO-14044, nettoenergia-analyysin tekemiseen ei ole vielä olemassa virallista määritelmää.

mää. Analyyseissä esiintyykin paljon erilaisia laskentamenetelmiä sekä erilaisia järjestelmärajauksia. Tästä johtuen useimmat analyysit eivät ole keskenään vertailukelpoisia, eikä joidenkin analyysien päätelmiä voida pitää ollenkaan luotettavina.

Yleisimmät nettoenergia-analyyseissä esiintyvät ongelmat liittyvät laskennassa käytettyjen yksiköiden ja järjestelmärajoiden määrittelyyn. Usein analyysijä tehdään investoidun pääoman perusteella ja näin analyysin tekoon on tietenkin helpompaa löytää lähdemateriaalia. Valuuttojen arvo ja energian hinta kuitenkin vaihtelee ajan sekä talousalueen mukaan ja pääoman käsittelyyn kohdistuu myös paljon taloudellisia ominaisuuksia kuten verotus, tuet ja korot. Näin ollen laskelmat eivät enää edusta fysikaalista näkemystä tai niihin syntyy merkittäviä virheitä. Toisinaan tutkimuksissa erilaiset energiat asetetaan saman arvoiseksi pelkän mitattavan yksikön perusteella. Kuten luvussa 2.1 todettiin, energian laatu määrittyy sen sisältämän eksergian mukaan, eli joule maakaasua on täysin eri asia kuin joule sähköä [9, s. 5].

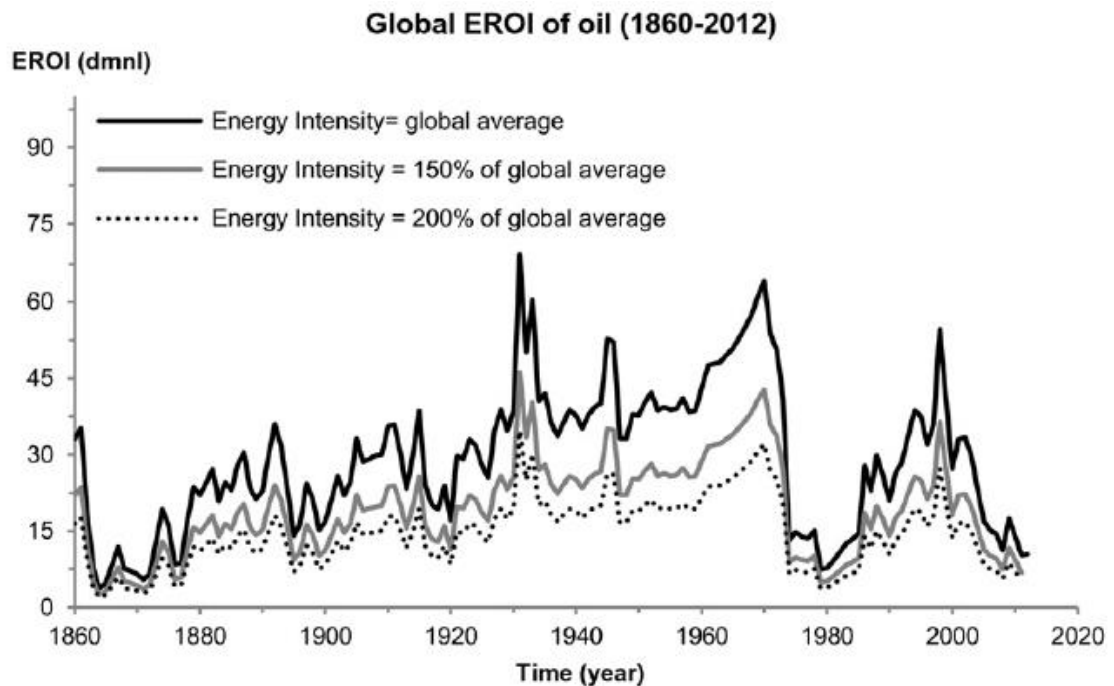
2.3 Historiaa

Ensimmäisiä mainintoja nettoenergia käsitteestä löytyy ympäristötieteitä käsittelevistä tutkimuksista 1970-luvun alkupuolelta. Howard Odum [10, s. 220] määrittelee nettoenergian seuraavasti: Energian todellinen arvo yhteiskunnalle on nettoenergia, joka jää käytettäväksi energian hankinta- ja jalostamiskustannuksien vähentämisen jälkeen. Biologiassa nettoenergia edustaa energiaa, jonka organismi voi käyttää kasvamiseen. Kasvi, joka tuottaa energiaa vain aineenvaihduntansa ylläpitoon ei voi kasvaa, koska kaikki tuotettu energia kuluu soluhengitykseen. Myöhemmin Charles Hall [11, s. 585–604] sovelsi nettoenergia-analyysiä kalakantojen vaellukseen puroissa. Nämä ja monet muut ajan tutkimukset loivat perustan nettoenergia-analyysille. [9, s. 3.]

1970-luvulla nettoenergia-analyysiä alettiin myös soveltaa teollisen tuotannon tutkimiseen Amerikassa ja Euroopassa. Tämän seurauksena julkistettiinkin useita kymmeniä tutkimuksia, ja nettoenergia-analyysien kehittyminen johti metodien normalisoinnin tarpeeseen. Asiaa tutkineet työryhmät eivät kuitenkaan saavuttaneet yhteisymmärrystä siitä, mitä nettoenergia-analyysiin tulisi sisällyttää [12]. [9, s. 3.]

1980-luvulla Hall ym. [13; 14; 15; 16] laajensivat nettoenergia-analyysin käyttöä ekologisista toiminnoista Yhdysvaltain energiantuotantotapoihin [9, s. 3–4]. Erityisesti näissä tutkimuksissa käsiteltiin öljyntuotannon tehokkuutta, johtuen edellisellä vuosikymmenellä koetusta öljykriisistä. Kiinnostus nettoenergia-analyysiä kohtaan kuitenkin hiipui öljykriisin vaikutusten unohduttua, eikä mainittavia tutkimuksia aiheesta juurikaan julkaistu ennen vuosituhannen vaihdetta.

Viime aikoina energiantuotannon rakenteita on pyritty uudistamaan ilmastokriisin seurauksena ja nettoenergia käsite on taas alkanut esiintyä yhä useammissa tieteellisissä artikkeleissa. Merkittävimpiä havaintoja nettoenergiasta 2000-luvun alkupuolelta on muun muassa öljy- ja maakaasutuotannon tehokkuuden merkittävä lasku Yhdysvalloissa tultaessa 1970-luvulta 1990-luvulle, sekä kattavampien selvitysten tekemä havainto kansainvälisen öljy- ja maakaasutuotannon tehokkuuden laskusta vuodesta 1990 vuoteen 2010, joka voidaan nähdä kuvasta 3 [17; 18; 19; 20; 21]. [9, s. 3.]



Kuva 3. Öljyn nettoenergiaa kuvaavan suhdeluvun EROI historiallinen kehitys [22, s. 157]. EROI-luku käsitellään tarkemmin luvussa 4.

3 Nettoenergia-analyysi

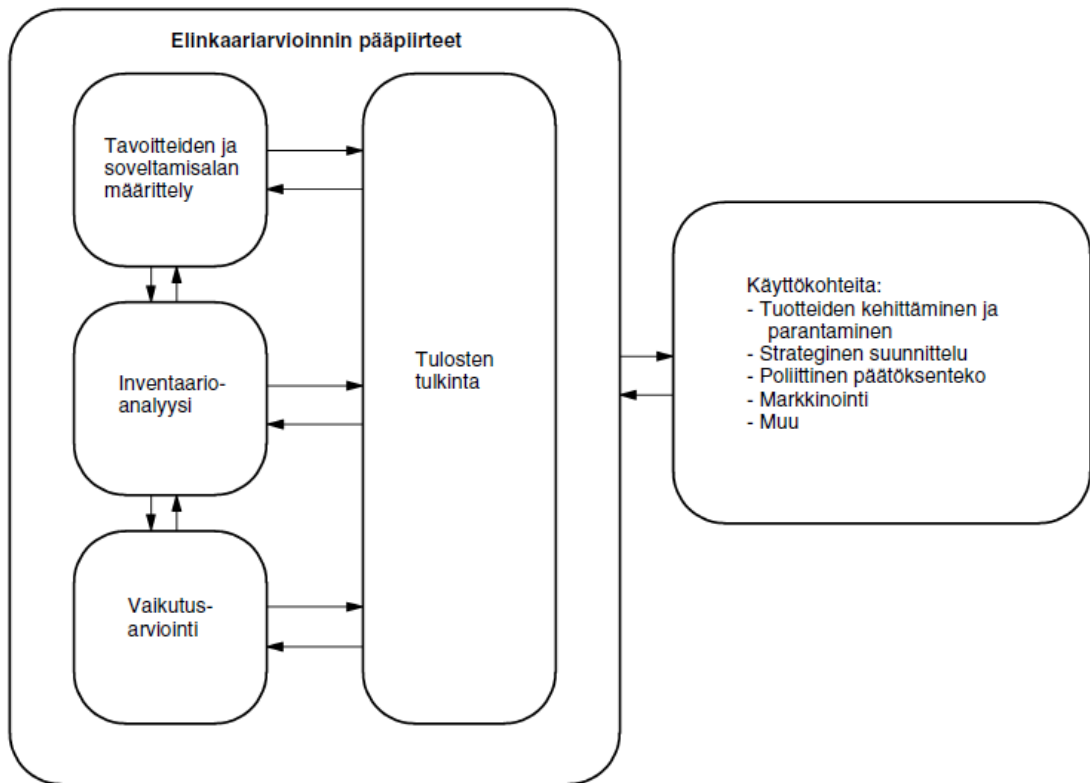
Tässä luvussa käydään läpi nettoenergia-analyysin tekemisen vaiheet sekä tarkastellaan analyysiä tehtäessä huomioon otettavia asioita ja analyysin tekemiseen kohdistuvia ongelmia.

3.1 Nettoenergia-analyysin tekeminen

Nettoenergia-analyysin tekeminen voi aluksi näyttää yksinkertaiselta: lasketaan vain kuinka paljon energiantuotantoprosessi kokonaisuudessaan kuluttaa energiaa ja kuinka paljon se tällä energiapanoksella sitten tuottaa energiaa yhteiskunnan käytettäväksi. Nettoenergia-analyysin yksityiskohdat ovat kuitenkin haasteellisia sen suhteen mitä analyysiin lopulta tulee laskea mukaan ja mitä jättää analyysin ulkopuolelle, miten verrataan polttoainetta kuluttamatonta energiantuotantoprosessia polttoainetta kuluttavaan, tai kuinka lasketaan massiivisen ydinvoimalan rakentamiseen vaadittu energia.

Seuraavaksi käsitelty nettoenergia-analyysin tekomenetelmä ei ole yleisesti käytetty, koska mitään yleistä sopimusta tai standardia analyysien tekemisestä ei ole tehty. Se on kuitenkin työtä varten tutkituista artikkeleista puolueettomin eikä anna kohtuutonta etua millekään energiantuotantotavalle. Menetelmä perustuu pitkälti jo ISO-standardoituun elinkaariarviointiin, joten sen tekemiseen on yleisesti hyväksytyjä menetelmiä. [9, s. 4.]

Standardoidussa elinkaariarvioinnissa on neljä vaihetta: tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely, inventaarioanalyysi, vaikutusarviointi ja tulosten tulkinta, joiden suhdetta toisiinsa havainnollistetaan kuvassa 4. Näitä samoja vaiheita voidaan helposti soveltaa myös nettoenergia-analyysin tekemiseen.



Kuva 4. Elinkaariarvion rakenne [23, s. 24].

3.2 Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely

Useissa nettoenergia-analyyseissä ei ole määritelty analyysin tavoitetta. Siksi jopa näennäisesti samaa asiaa tutkivat analyysit voivat päättyä täysin erilaisiin tuloksiin, vaikka tutkimuksissa käytetyt lähdemateriaalit olisivatkin samoja. Nettoenergia-analyysien tulokset esitetään usein matemaattisina dimensiottomina arvoina, joten niiden vertailu muihin analyysihin on mahdollista. Tässä on tärkeää muistaa luvussa 2.1 käsitelty eksergian käsite. Esimerkiksi maakaasuvoimalaa ei voi suoraan verrata aurinkopaneelien, koska niiden tuottama energia eroaa laadultaan. Aurinkopaneelien tuottaessa ainoastaan sähköä, ei niitä voida verrata maakaasuvoimalassa syntyvään lämpöenergiaan, vaan tarkasteluun on otettava ainoastaan laitoksen tuottama sähköenergia. Tarkastelua voidaan toki laajentaa ja ottaa huomioon myös maakaasuvoimalan tuottama kaukolämpö. Tällöin vastaava määrä kaukolämpöä tulisi kuitenkin tuottaa tarkastelun kohteena

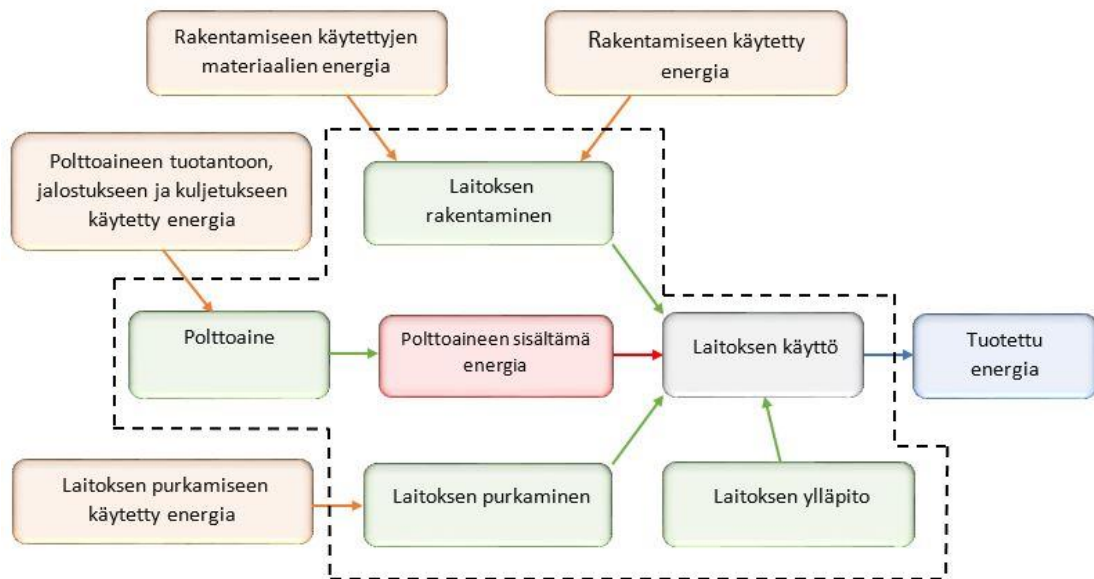
olevilla aurinkopaneeleilla, vaikkapa sähkökattilaa käyttäen. Koska kaukolämmön ja sähkön sisältämät eksergiat eroavat toisistaan merkittävästi, tällaisen analyysin toteuttaminen voisi olla hyvin monimutkaista. [9, s. 4.]

Nettoenergia-analyysin tekemiseksi tulisikin määritellä se, mihin kysymykseen analyysiltä halutaan vastaus, halutaanko analyysillä tutkia parasta tapaa tuottaa sähköä pohjoismaisissa olosuhteissa vai halutaanko selvittää puupellettien polton tehokkuutta CHP-laitoksessa. Riippuen tästä alkuasetelmasta voidaan päätyä erilaisiin lopputuloksiin. Tavoitteen määrittelyn mukaan voidaan sitten päättää, mitä asioita järjestelmärajojen sisälle asetetaan ja millaisia yksiköitä laskennassa käytetään. Vertailevissa tutkimuksissa saadaan yleensä parempia tuloksia, koska järjestelmäraajat asetetaan tasapuolisiksi. [9, s. 4–6.]

Analyysin tavoite riippuu hyvin usein artikkelin aiotusta lukijasta. Jos artikkeli kirjoitetaan esimerkiksi energia-alan asiantuntijalle, voidaan mahdollisesti käsitellä vain yhtä energialähdettä. Poliittiseen tarkoitukseen kirjoitetussa artikkelissa olisi hyvä asettaa kaikki energialähteet samalle viivalle, jotta asiaan vähemmän perehtynyt henkilökin voisi helposti tehdä oikeat johtopäätökset. [9, s. 5–6.]

3.2.1 Järjestelmärajojen asettaminen

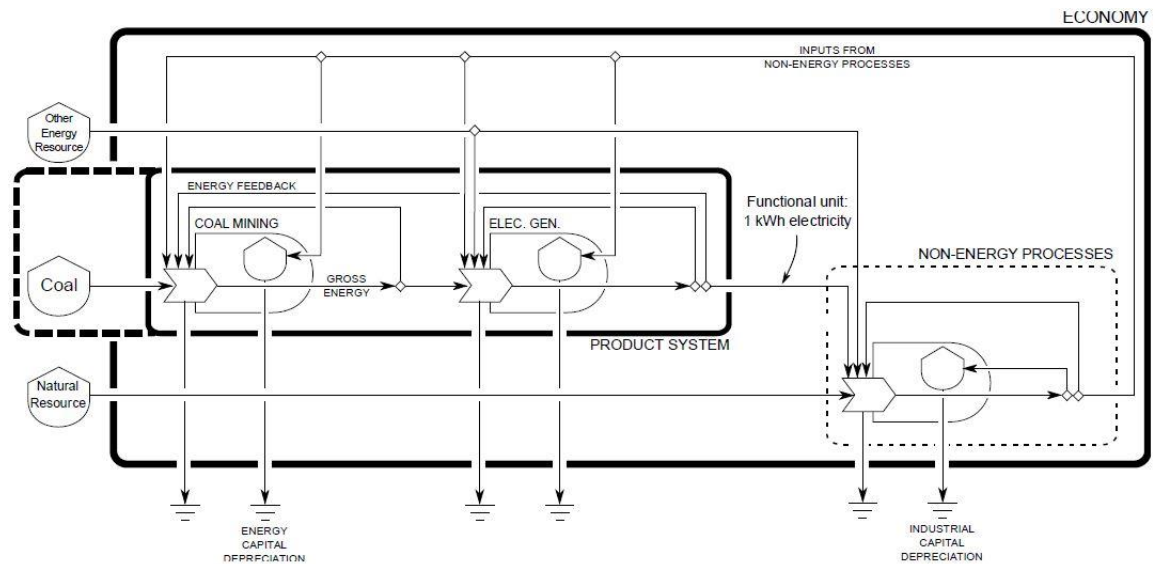
Termodynamiikan lakien mukaan kaiken materian tuottaminen vaatii lähtökohtaisesti energiaa. Prosessiketjua (kuva 5) seuraamalla voidaan selvittää, mitä lopullisen tuotteen valmistamiseksi vaaditaan. Jos tätä prosessiketjua sitten seurataan tarpeeksi pitkälle, päädytään tulokseen, jossa lopullisen tuotteen aikaansaaminen vaatii koko yhteiskunnan tuotannon huomioon ottamista. Tämä ei tietenkään ole teknisesti mitenkään mahdollista, eikä vertailun kannalta järkevää, yhteiskunnan sisältäessä kaikki vertailtavissa olevat tuotantomuodot.



Kuva 5. Nettoenergia-analyysin järjestelmärajojen asettaminen.

Järkevän järjestelmärajan muodostavatkin ainoastaan energiantuotantoprosessin toimintaa varten tuotetut materiaalit ja toiminnot. Rajojen sisälle lasketaan esimerkiksi voimalaitokseen käytetty teräs, mutta ei teräksentuotantoon vaadittua infrastruktuuria eikä laitoksia, koska tuotettua terästä käytetään myös muualla yhteiskunnassa. Samoin rajojen sisälle laskettaisiin polttoaineen tuottamiseen vaadittu kaivostoiminta ja esimerkiksi ydinpolttoaineen rikastamiseen vaaditut laitokset. Tosin rikastuslaitosten energiapanos tulisi jakaa tuotettonni kohtaisesti, polttoainetta kun tuotetaan useammille ydinvoimaloille. Kaivoksen tuottaessa polttoainetta vain sivutuotteena tulisi kaivostoiminnan kulut suhteuttaa kaivoksen primäärituotteen ja tuotetun polttoaineen määriin.

Kuva 6 havainnollistaa tällaista energiantuotantoprosessia. Energiantuotanto koostuu kokonaisuudessaan useammasta osaprosessista ja jokaisessa menetetään hieman energiaa. Järjestelmän alemmat prosessit kuluttavat myös osan tuotetusta energiasta, mutta vain järjestelmärajojen (kuvassa: product system) ylittävät energiavirrat otetaan huomioon nettoenergia-analyysissä. Nettoenergia-analyysiä varten järjestelmäraja on laajennettu katkoviivalla, niin että hiilen primäärienergia ei ylitä rajaa ennen kuin se poistuu järjestelmästä sähkönä [9, s. 6]. Vastaavan diagrammin laatimista voidaan selvyiden takia pitää suositeltavana kaikissa nettoenergia-analyyseissä. Esimerkkinä rajauksen vaihtoehtoista on liitteenä 1 oleva järjestelmädiagrammi.



Kuva 6. Nettoenergia-analyysin järjestelmädiagrammi sähköntuotannolle hiilivoimalla [9, s. 7].

Pääpiirteiltään nettoenergia-analyysiin laskettavat energiapanokset voidaan jakaa neljään ryhmään: laitoksen rakennus-, purku- ja ylläpitopanoksiin sekä polttoainepanoksiin. Tarkemmin nämä koostuvat esimerkiksi

- raaka-aineiden hankinnasta ja prosessoinnista
- materiaalin jakelusta ja kuljetuksesta
- prosessijätteiden ja tuotteiden hävittämisestä
- sähkön sekä lämmön tuotannosta ja käytöstä
- käyttöomaisuuden valmistuksesta ja käytöstä poistosta.

Tarkastelussa tulisi kiinnittää huomiota kustannusten vaikutuksista lopputulokseen, jolloin voidaan jättää huomiotta lopputuloksen kannalta merkityksettömiä kustannuksia. Tämä tulee kuitenkin tehdä harkintaa käyttäen ja kustannusten pois jättäminen tulee käydä ilmi selvästi. [23, s. 32.]

Järjestelmän toimintaan vaikuttavat myös rahoitus, lupakäytännöt, työvoimakustannukset ja muut energiantuotannon ulkopuoliset tekijät, joita ei voida suoraan esittää fysikaalisina suureina, vaan taloudellisina kustannuksina. Esimerkiksi ydinvoimalaitoksen diskonttauskorko tai rakentamiseen vaadittavien lupien saaminen eivät kuluta fysikaalista energiaa. Näin ollen niitä ei tulisi laskea nettoenergia-analyysiin, vaan ne voidaan ottaa huomioon taloudellisissa arvioissa.

3.2.2 Toiminnallisen yksikön määrittäminen

Murphyn ym. [9] mukaan toiminnallinen yksikkö määrittelee, miten nettoenergia-analyysissä tarkasteltavat asiat ilmaistaan yhtenäisellä fysikaalisella suureella. Elinkaariarvioinnista poiketen tässä käytetään fysikaalisia energian yksiköitä kuten wattituntia (Wh), joulea (J) tai öljybarrelia (bbl) riippuen analyysin soveltamisalasta. Esimerkiksi sähkön tuotantoa tarkastellessa on yksiköksi hyvä valita sähköä edustava wattitunti (Wh_e), jotta voimaloiden tuottamaa sähköenergiaa voidaan verrata suoraan niiden kuluttamaan energiapanokseen. Toisaalta jos tarkasteltavana asiana on öljyntuotanto, on luonnollista valita yksiköksi öljybarreli. Kaikkia myöhempiä analyysyjä tarkastellaan suhteessa toiminnalliseen yksikköön, ja tämän määrittäminen tarkasti onkin erittäin tärkeää, jotta analyysistä tulee vertailukelpoinen. [9, s. 7–8; 23, s. 22.]

Yksittäiselle energiantuotantotavalle nettoenergia-analyysiä tehtäessä toiminnalliseksi yksiköksi voidaan valita järjestelmän sisällä laadultaan mikä tahansa energia. Energiantuotantotapojen vertailuanalyysissä yksiköksi tulisi valita kuitenkin energia, joka on yhteinen kaikille vertailtaville tuotantotavoille. Valitulla yksiköllä arvioidaan energiantuotantotavalle kohdistuvia energiapanoksia, esimerkiksi rakentamiseen kulunutta betonia GJ/tonni tai polttoaineen kuljettamiseen kulunutta energiaa MJ/tkm. [24.]

3.3 Inventaarioanalyysi

Inventaarioanalyysi on nettoenergia-analyysin toinen merkittävä vaihe. Tässä vaiheessa lasketaan järjestelmärajoiden ylittävät materiaalit ja energiat sekä määritellään ne luvussa 3.2.2 valitulla yksiköllä määrälliseen muotoon. Järjestelmärajoiden sisälle menevät energiavirrat ovat energialähteeseen kohdistuvia panostuksia ja ulos tulevat virrat taas määrittävät energialähteen tuoton. Ulos suuntautuvista energiavirroista voidaan kuitenkin huomioida vain ne, joita voidaan hyödyntää valitun toiminnallisen yksikön tuottamiseen. Inventaarioanalyysin toteuttaminen vaatii toistuvia prosesseja ja kerätyn tiedon varmistamista sekä tiedon vertailua jo kerättyyn. Tietojen kerääminen voi myös vaikuttaa jo päätettyihin tavoitteisiin tai järjestelmärajoihin, saatavilla olevan tiedon puutteista tai laadusta johtuen. [9, s. 8; 23, s. 32.]

Inventaarioanalyysin tekemisessä ongelmaksi muodostuu joissakin tapauksissa tiedon valtava määrä ja sen keräämiseen kuluva aika. Inventaarioanalyysiä tehtäessä tulisikin ottaa huomioon lopputulokset ja skaalata kerättävä materiaali niihin. Yhden pultin valmistukseen kuluva energia ei juurikaan muuta ydinvoimalan energiatasetta, mutta neliömetrin kokoisen aurinkopaneelin tase voi muuttua merkittävästi.

Teollisuusprosessit tuottavat yleensä useampia lopputuotteita. Jos inventaarioanalyysi koskee vain yhtä näistä tuotteista, prosessin syötteet tulisi allokoida tarvittavien lopputuotteiden mukaan. Näin toimittaessa joudutaan tarkasteluun luomaan rajoja alueille, joissa niitä ei oikeassa maailmassa ole. Tämä on kuitenkin välttämätöntä, jotta energia-panokset saadaan allokoitua tasapuolisesti. [9, s. 9; 23, s. 34.]

Elinkaarianalyysijä varten on perustettu useita materiaalitietokantoja, joista materiaalien ja prosessien tietoja voi kerätä myös nettoenergia-analyysiä varten. Näistä tietokannoista suurin ja kattavin on sveitsiläinen EcoInvent. Kirjoitushetkellä vuoden kaupallinen lisenssi tietokantaan maksoi 3 800 € [25]. Tarjolla on myös ilmaisia tietokantoja kuten Open LCA. Näiden kattavuus ei kuitenkaan ole samaa tasoa maksullisten kanssa [25]. Elinkaarianalyysille kerättyjä tietokantoja käytettäessä on hyvä huomioida, että niiden alkuperäinen tarkoitus ei ole nettoenergia-analyysien tekeminen, joten tietoja voi joutua tulkitsemaan poikkeavalla tavalla.

3.4 Vaikutusarviointi

Vaikutusarvioinnissa nettoenergia-analyysi poikkeaa merkittävästi elinkaariarvioinnista. Elinkaariarvioinnin tarkastellessa kohteen vaikutuksia ympäristöön useiden eri vaikutusmekanismien kautta nettoenergia-analyysi tarkastelee ainoastaan energian kulutusta sen tuotantoon nähden. Nettoenergia-analyysissä vaikutusarviointi keskittyykin järjestelmärajojen ylittävien kustannusten summaamiseen ja toiminnalliseen yksikköön vertaamiseen. [9, s. 9.]

Vaikutusarviointia tehdessä lasketaan nettoenergia-analyysiä kuvaava suhdeluku vertaamalla energialähteen tuottoa tuotannon kuluttamaan energiaan. Laskemiseen vaadittavat kaavat ja laskentaprosessi esitellään tarkemmin luvussa 4.

Lähdemateriaalista riippuen energiapanokset edustavat usein energian eri muotoja, koska laadultaan erilaisia energioita ei voi suoraan vertailla toisiinsa. Vaikutusarvioinnissa joudutaan käyttämään laadunkorjauskertoimia, ja tämä on erityisen hankalaa, jos toiminnallisena yksikkönä on kokonaan eksergiaa edustava sähkö. Yleisesti elinkaariarvioinneissa laadunkorjauskertoimena käytetään komponenttien tuotantomaan sähköverkon hyötysuhdetta, jolla tuotantoon käytetty primäärienergia saadaan muutettua sähköksi. Eurooppalaiselle verkolle tämä hyötysuhde on noin 30 % ja vaihtelee verkkoon liitetyn energiantuotannon mukaan [26, s. 1614]. Laadunkorjauskertoimia käytettäessä voidaan aiheuttaa tahattomasti suuriakin muutoksia käytettäviin energiapanoksiin, joten niiden käyttämisessä tulisikin noudattaa erityistä huolellisuutta ja harkintaa. [9, s.10.]

Lähdemateriaalia valitessa tulisi myös kiinnittää huomiota tiedon vaikutuksesta analyysin tuloksiin. Tämä voidaan tehdä herkkyysoanalyysillä, jossa tutkitaan lähtötietojen muutoksen vaikutusta vaikutusarvioinnin tuloksiin. Näin toimiessa voidaan ainakin todeta mahdolliset merkittävät virheet, jotka syntyvät epätarkkojen lähdetietojen käytöstä. [23, s.18.]

Jos energiantuotantotapoja halutaan vertailla keskenään, ei ole kohtuullista eikä järkevää olettaa energiapanosten olevan eri tavoilla tuotettuja erilaisille energiantuotantotavoille. Esimerkiksi käytettävien materiaalien ei voida olettaa tulevan täysin kierrätyksestä, koska tämä ei ole mahdollista suuressa mittakaavassa ja olisi kuitenkin pois yhteiskunnan muusta kulutuksesta. Eikä energiapanoksena kulutetun sähkön voida olettaa tulevan kokonaan uusiutuvista energialähteistä ja näin ollen olevan merkityksetön energiataseen kannalta. Vaikka yksittäistapauksissa energiapanokset voisivatkin olla edellä mainituista lähteistä peräisin, näin laskettua tulosta ei voitaisi suoraan vertailla muihin energiantuotantotapoihin. [27.]

3.5 Tulosten tulkinta

Nettoenergia-analyysin viimeisessä vaiheessa tulkitaan analyysistä saadut tulokset, jotta voidaan varmistua siitä, että aluksi määritellyt tavoitteet on saavutettu valitulla soveltamisalalla. Tulosten tulkinnassa tulisi tarkastaa, että vaikutusarvioinnin tulokset perustuvat suhteelliseen lähestymistapaan ja ovat vertailtavissa muihin selvitettyihin tuloksiin.

3.6 Varastointi ja energian käyttäminen

Uusiutuvien ja vähäpäästöisten sähköntuotantotapojen kuten tuulen- ja aurinkovoiman tuotanto vaihtelee ja katkeilee väistämättä tuulien ja valon määrän mukaan. Tästä ne ovatkin saaneet nimekseen Variable Renewable Energy, VRE.

Koska pääosa yhteiskunnan kuluttamasta energiasta tulee tuottaa silloin, kun se kulutetaan ja kaikki sähköverkkoon syötetty energia tulee kuluttaa silloin, kun se tuotetaan, sähköntuotannon tai sen kulutuksen tulee joustaa. Sähköverkon tasapainottaminen vaatiikin säätövoimaa, joka voi reagoida tuotannossa tai kulutuksessa tapahtuviin muutoksiin. Perinteisesti säätövoimana ovat toimineet vesivoimalat ja fossiilisia polttoaineita käyttävät voimalat. Säätövoimaa tarvitaan nykyisin paljon lisää fossiilisten polttoaineiden korvautuessa VRE-tuotannolla, tällöin mahdollisuus tuottaa joustavaa säätövoimaa kuitenkin vähenee. Samanaikaisesti tuotannon vaihtelevuus kasvaa ja tasaista tehoa tuotavia ydinvoimaloitakin ajetaan paikoin alas. [28, s.32].

VRE-tuotannolla ei voidakaan suoraan tuottaa kaikkea yhteiskunnan vaatimaa energiaa ilman, että energia on mahdollista varastoida kulutuksen ja tuotannon väliseksi ajaksi. Erityisesti sähköenergian varastointi on osoittautunut haasteelliseksi, eikä kaupallisessa käytössä ole vielä juuri muuta kuin veden pumppaamiseen perustuvia ratkaisuja. Tällaisten varastoaltaiden rakentaminen Suomeen on kuitenkin erittäin rajallista, ellei mahdollonta tarvittavien korkeuserojen puuttuessa. Muitakin ratkaisuja sähkövarastointiin kehitetään jatkuvasti, mutta valtakunnanverkon kokoisen järjestelmän tasapainottamiseen näistä ei vielä ole [28, s.19]. Esimerkiksi Teslan Australiaan asentama massiivinen 129 MWh:n akkulaitos kykenisi ylläpitämään Suomen sähköverkkoa noin 50 sekuntia [29, s. 139].

Säätövoiman tarvetta voidaan korvata myös kysyntäjoustolla, eli vähentämällä verkon kulutusta väliaikaisesti tuotannon laskiessa. Kysyntäjoustopon kehitys on kuitenkin jäänyt uusiutuvien energialähteiden kehityksestä jälkeen, eikä sen voida olettaa vastaavan tuleviin haasteisiin verkontasapainotuksessa ainakaan lähiaikoina [30, s.41]. Toimiva esimerkki kysyntäjoustopon Suomessa löytyy kuumasinkityslaitoksesta, mutta sekin voi pudottaa sähkötehoaan vain 15 minuutin ajaksi [31].

4 EROI – Energy Returned on Invested

Tässä luvussa käsitellään nettoenergia-analyseissä usein käytettyä energiapanostuksen tuottokerrointa (Energy Returned on Invested, EROI), jolla energiantuotantotapojen tehokkuutta voidaan arvioida. Luvussa käydään läpi EROI-luvun laskentaan käytetyt kaavat, sekä tarkastellaan muutamia EROI-luvun ominaisuuksia.

4.1 Energiapanostuksen tuottokerroin

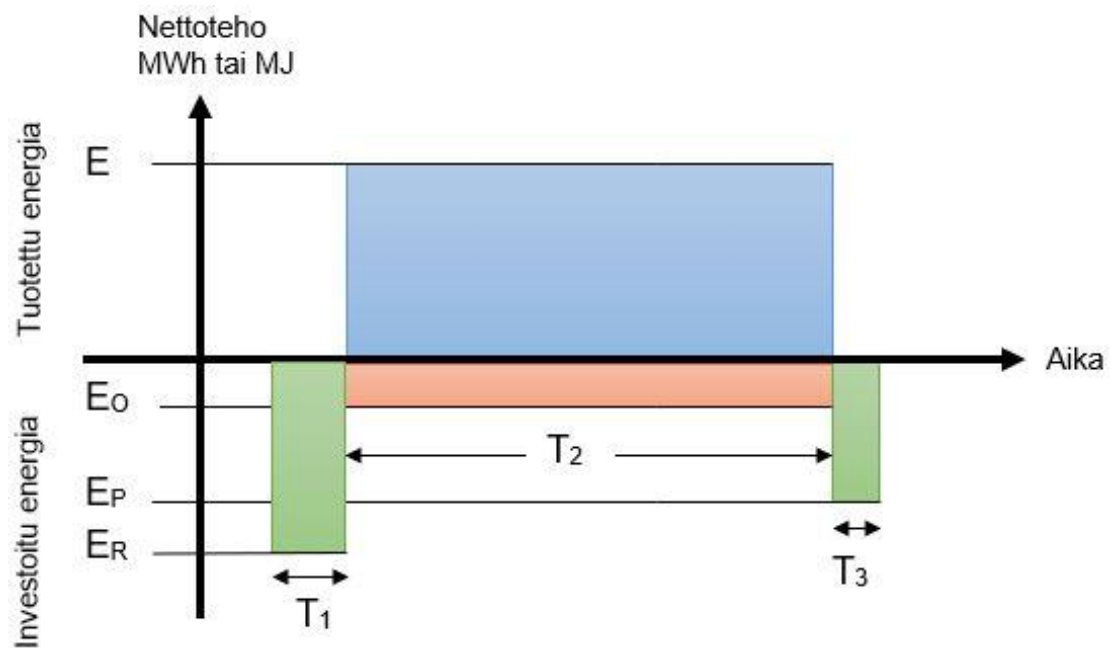
Charles Hall [11] käytti 1970-luvulla julkaistussa työssään nettoenergian kuvaamiseen EROI-lukua. Tästä käytetään usein myös nimitystä ERoEI (Energy Returned on Energy Invested). EROI-luku kuvaa energialähteestä saatavaa nettoenergiaa suhteessa prosessin toiminnan vaatimaan energiapanokseen. Jos erilaisille voimaloille laskettuihin EROI-arvoihin on sovellettu samoja laskentamenetelmiä ja järjestelmärajvoja, EROI-lukuja vertailemalla voidaan helposti nähdä kuinka tehokkaita tuotantoprosessit ovat suhteessa toisiinsa. Alla EROI-lukua havainnollistava kaavamuotoinen määritelmä, Osmo Soininvaaran sanavalinnoin [4]:

$$\begin{aligned} EROI &= \frac{\text{energiälähteen } \mathbf{tuotto}}{\text{tuotantoon } \mathbf{kuluva\ energia}} = \frac{\mathbf{nettoenergia} + \text{tuotantoon } \mathbf{kuluva\ energia}}{\text{tuotantoon } \mathbf{kuluva\ energia}} \\ &= \frac{\mathbf{nettoenergia}}{\text{tuotantoon } \mathbf{kuluva\ energia}} + 1 \end{aligned}$$

EROI-luku on hyvin yksinkertaista laskea, mutta laskennassa käytettävät arvot on kuitenkin hyvin hankalaa ja työlästä saada tarkoiksi. Laskemiseen käytettyjä metodeja ei ole vielä virallisesti määritelty missään. Tämä on johtanut useiden erilaisten laskentatapojen ja järjestelmärajojen käyttämiseen. Tämä vuorostaan on johtanut monilla aloilla hyvin erilaisiin EROI-lukuihin, joita ei voida suoraan vertailla keskenään. Epäsuoraa vertailua voidaan tietenkin tehdä, kunhan laskentaan vaikuttavat tekijät ymmärretään tarpeeksi hyvin.

Nettoenergia-analyysin tekemisessä käytetään tarpeen mukaan erilaisia tasealueita. Energiapanoksiksi ei lasketa ainoastaan prosessissa käytetyn polttoaineen tuotantoon kuluva energiaa, vaan siihen pyritään laskemaan kaikki prosessin aikaansaamiseksi

kulutettu energia, kuten laitoksen rakentaminen, laitosta tukeva infrastruktuuri, laitoksen aiheuttamien ympäristövahinkojen korjaaminen sekä laitoksen purkaminen. Kuva 7 havainnollistaa näitten energiapanosten ja tuotoksen suhdetta. Laitoksen rakentamiseen kulunut aika (T_1), jolloin kuluu energiaa (E_R). Myös laitoksen teknisen eliniän aikana (T_2) kuluu energiaa (E_O), samaan aikaan laitos tuottaa energiaa (E). Lopulta laitoksen purkaminen kuluttaa energiaa (E_P), sen purkamisen kuluvan ajan (T_3). Tästä yhteiskunnan käyttöön saama nettoenergia on vaaka-akselin yläpuolisen alueen pinta-ala vähennettynä alapuolisten alueiden pinta-aloilla. [32, s.99.]



Kuva 7. EROI-luvussa huomioon otettavat energiapanokset sekä tuotos [32, s.99].

4.2 Kaavat

Kaavoissa käytetään Weißbachin ym. [33] käyttämiä merkintöjä, liitteenä 2 olevan taulukon tulkinnan helpottamiseksi. Energialähteen EROI-luku R saadaan kaavasta

$$R = \frac{E_R}{E_I} = \frac{\text{energiatuotos}}{\text{energiapanos}} \quad (1)$$

Kaavassa 1 osoittajana on energiatuotos (E_R), joka on laitoksen elinkaaren aikana tuotama energia. Jakajana kaavassa 1 on energiapanos (E_I), joka on energiantuotantoprosessiin sen elinkaaren aikana käytetty kokonaisenergiapanos. Tämän kokonaisenergiapanoksen laskeminen on yksi työläimpiä töitä nettoenergia-analyysin tekemisessä. Tätä varten tässä työssä hyödynnetään Weißbachin ym. [34] keräämiä kattavia tietoja elinkaarianalyyseissä käytettävistä materiaaleista, nämä tiedot löytyvät liitteestä 2. Energiapanos (E_I) lasketaan kaavalla

$$E_I = E_{fix} + P_I T \quad (2)$$

jossa kiinteät energiapanokset (E_{fix}) sisältää ajan myötä muuttumattomat rakennus- ja purkuenergiapanokset, ajan mukaan muuttuvat ylläpitokulut (P_I), kuten kunnossapito ja polttoaine sekä laitoksen tekninen käyttöikä (T). Voimalan elinkaaren aikana tuottama energia (E_R) saadaan, kun laitoksen käyttökertoimen mukaan laskettu teho (P) kerrotaan laitoksen teknisellä eliniällä (T). EROI-luku (R) voidaan laskea seuraavasta yhtälöstä

$$R = \frac{PT}{E_{fix} + P_I T} \quad (3)$$

Usein investoinneille halutaan laskea myös takaisinmaksuaika (T_a). Tämä saadaan laskettua aikaisemmista arvoista kaavalla

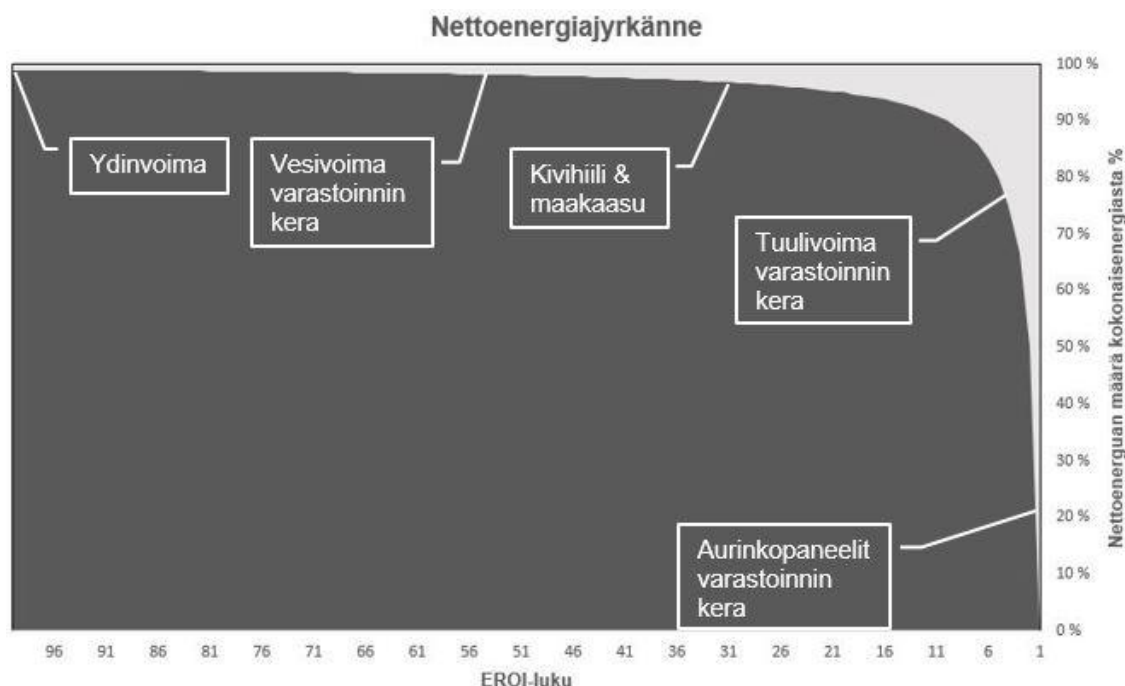
$$T_a = \frac{E_{fix}}{P - P_I} \quad (4)$$

[33, s. 3.]

4.3 Nettoenergiajyrkänne

Koska EROI-luku voidaan joskus ymmärtää hyötysuhteena, on hyvä havainnollistaa, kuinka nämä todellisuudessa eroavat toisistaan. Kuvasta 8 voidaan havaita EROI-luvun 50:1 palauttavan investoidusta energiasta käyttöön 98 prosenttia, eli energiantuotantoprosessi itsessään kuluttaa 2 prosenttia investoidusta energiasta. EROI-luku 5:1 taas

palauttaa investoidusta energiasta käyttöön 80 prosenttia, eli energiantuotantoprosessi kuluttaa 20 prosenttia investoidusta energiasta. Kuvassa 8 olevan käyrän muodosta nähdään, kuinka EROI-luvun muutos 50:1:stä 30:1:een vähentää hyödynnettävää energiaa 1,3 prosenttia, eli jokaisesta 30:1:een investoidusta energia yksiköstä saadaan edelleen hyödynnettyä 96,7 prosenttia. EROI-luvun muutos 5:1:stä 2:1:een vähentää hyödyksi saatavaa energiaa 30 prosenttia, eli investoidusta energiasta saadaan hyödynnettyä enää vain 50 prosenttia. [35, s. 154.]



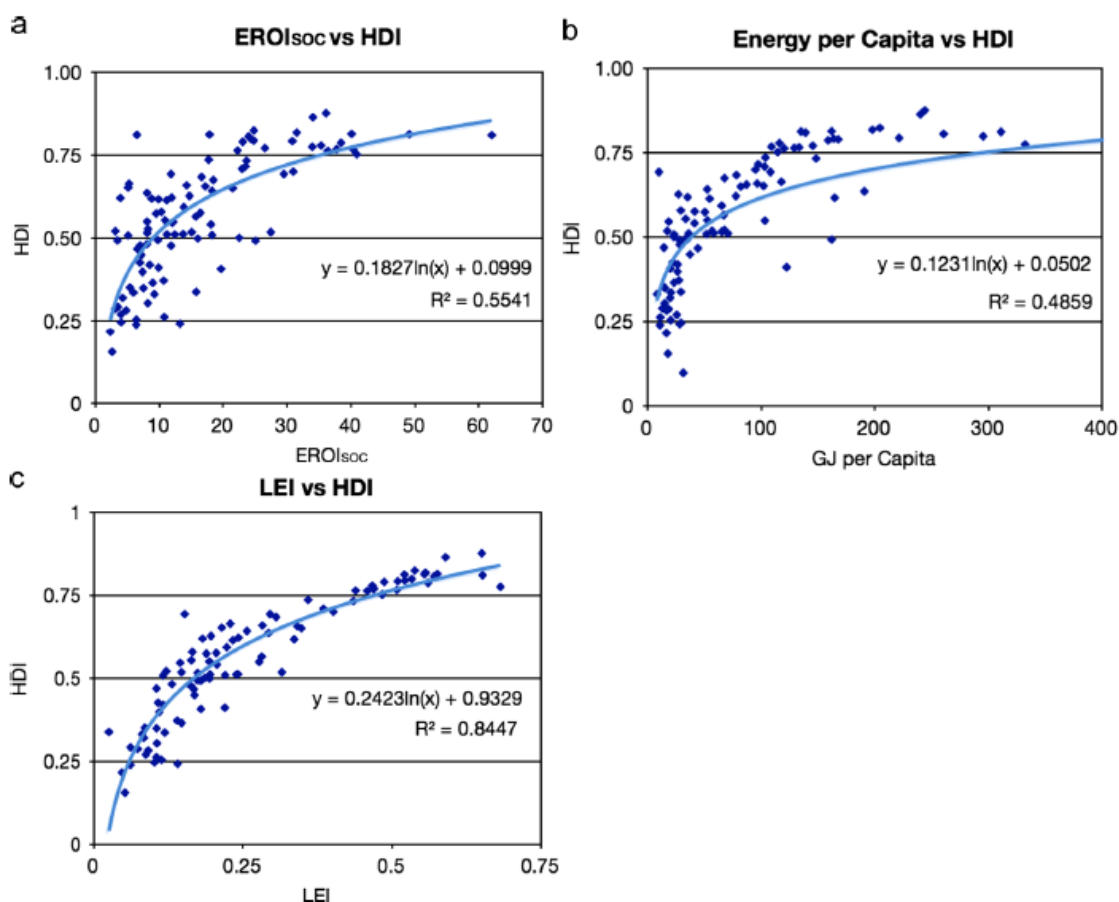
Kuva 8. Nettoenergiajyrkänne, hyödynnettävä energia tumman harmaalla, hukattu energia vaalean harmaalla [35, s. 154].

Näin ollen melko suuretkaan muutokset korkeissa EROI-luvuissa eivät välttämättä aiheuta suuria muutoksia yhteiskunnan toimintaan, kun taas lähempänä 1:1 jo muutaman desimaalin muutos voi tehdä energiantuotantoprosessista kannattamattoman. Myös laskentaan sisältyvät epävarmuudet vaikuttavat mataliin EROI-lukuihin huomattavasti enemmän kuin korkeisiin EROI-lukuihin. Näin voi käydä, kun energiantuotannossa ollaan siirtymässä enemmän energiaa kuluttaviin tuotantomuotoihin ja öljyn sekä maakaasun EROI-luvut alenevat. Yhteiskunnissa tulisikin huolehtia, ettei energiantuotanto joudu liian lähelle nettoenergiajyrkännettä. Korkeamman jalostusasteen tuotanto voi kärsiä, jos resursseja joudutaan käyttämään yhä enemmän energiantuotantoon. [35, s. 154.]

4.4 EROI-luku ja yhteiskunta

Kaikkien yhteiskunnan kuluttamien hyödykkeiden tai palveluiden tuottaminen kuluttaa energiaa jossakin muodossa. Yhteiskunnan hyvinvointi onkin pitkälti riippuvainen hyödynnettävissä olevasta energiasta, eikä primäärienergian jalostuksen tulisi kuluttaa siitä liiallista osuutta. Mitä enemmän ylimääräistä energiaa yhteiskunnalla on käytettävissä, sitä paremmin se menestyy vertailussa esimerkiksi YK:n luoman inhimillisen kehityksen indeksillä (Human Development Index, HDI) [36]. HDI-indeksi koostuu yhteiskunnassa odotettavissa olevasta elinajasta, lukutaidosta, yleisestä koulutustasosta sekä bruttokansantulosta, ja se voi saada arvon nolasta ykköseen. [35, s. 158.]

Yhteiskunnalle voidaan laskea sosiaalinen $EROI_{SOC}$ -luku, joka kuvastaa yhteiskunnan käyttämän energian ja sen bruttokansantulon yhteyttä. Tästä edelleen on kehitetty LEI-luku, joka ottaa paremmin huomioon energian laadun, määrän ja jakaantumisen yhteiskuntaan. Verrattaessa valtioiden $EROI_{SOC}$ -lukuja, LEI-lukuja tai yksinkertaisimmillaan yhteiskunnan kansalaistaan kohti käytettävissä olevaa energiaa HDI-lukuihin on havaittavissa yhteys, kuten kuvasta 9 voidaan nähdä. [35, s. 157–158.]



Kuva 9. Energiaylijäämän merkitys yhteiskuntien menestykseen. Kaavioiden pisteet edustavat YK:n jäsenmaita. [35, s. 158.]

Perinteisesti yhteiskunnan hyvinvointi-indeksien kasvun on nähty johtuvan sen taloudellisen tuloksen parantumisen seurauksena. EROI_{SOC}-luku ja energia kansalaista kohden näyttävät kuitenkin kuvaavan yhteiskunnan hyvinvointitasoa. Laadukkaan energian runsas saatavuus näyttääkin olevan vaatimuksena korkean elintason saavuttamiseksi. Suomen HDI-luvun ollessa 0,92 [37] EROI_{SOC}-luku tulisi olla vähintään 30:1 ja energia kansalaista kohden vähintään 200 GJ, jotta voitaisiin ylläpitää nykyisen kaltainen elintaso. [35, s. 164.]

5 Voimalat

Tässä luvussa käydään läpi eri voimaloiden EROI-lukuja sekä tarkastellaan energiantuotantotapojen ominaisuuksia nettoenergia-analyysin kannalta.

5.1 Tulkinta

Alla esitetyt EROI-luvut pohjautuvat Weißbachin ym. [33; 34] tekemään materiaaliin, joka on saatavilla verkosta. Materiaalia on kuitenkin muokattu suomalaisista voimaloista saaduilla luvuilla, siinä määrin kuin se on ollut mahdollista julkisesti saatavilla olevilla tiedoilla ja on ollut järkevää muuttamatta alkuperäisiä laskennan tuloksia. EROI-lukujen laskennassa käytetty laskentataulukko ja käytetyt arvot löytyvät työn liitteestä 2.

Voimaloista esitetään myös muissa nettoenergia-analyseissä esiintyneitä EROI-lukuja. Näistä on kuitenkin jätetty pois joitakin selkeästi muista poikkeavia arvoja, sekä useita tutkimuksia, joiden laskentametodeja tai järjestelmärajoja ei voitu lainkaan tarkastaa tai jos niiden havaittiin poikkeavan täysin tässä työssä esitellyistä. Esitettyjäkin arvoja ei voi suoraan verrata toisiinsa tutkimuksissa käytetyistä eri metodeista johtuen, mutta niistä voi kuitenkin saada käsityksen voimalatyypin EROI-luvun mittaluokasta.

Jotta EROI-luvut olisivat keskenään vertailukelpoisia, alla esitetyt luvut kuvaavat ainoastaan voimaloiden tuottamaan sähköä. Näin ollen voimaloiden tuottamaa lämpöenergiaa, jota voitaisiin hyödyntää esimerkiksi kaukolämpönä, ei oteta laskuissa huomioon. VRE-tuotannolle on myös laskettu erillinen luku, johon on arvioitu energian varastoinnin aiheuttamia kustannuksia. Tämä on tehty pumppuvoimalaa käyttämällä, koska muista varastointitekniikoista ei vielä ole saatavilla kattavia selvityksiä tai ne eivät sovellu sähkön pitkäaikaiseen varastointiin. [33, s.6.]

Kaikissa lasketuissa arvoissa on useita epävarmuuksia LCA-tietokannan puutteiden takia. Nämä puutteet kuitenkin vaikuttavat kaikkiin laskelmiin arviolta saman verran, joten EROI-lukujen verrannollisen virheen oletetaan olevan noin 10 %. [33, s.11.]

5.2 Kaasukombivoimala

Kaasukombivoimalan toimintaperiaatteen takia voimalan rakentamisen ja purkamisen vaikutus EROI-lukuun on minimaalinen suhteessa polttoaineen tuottamiseen vaadittuun energiapanokseen (taulukko 1). Energiapanos E_1 muodostuukin pääosin maakaasun

tuotanto-, jalostus- ja kuljetuskustannuksista [38 s.107]. Weißbach ym. käyttää esimerkissään Eurooppaan rakennettua 805 MW:n voimalaa, joten saatuja tuloksia voidaan soveltaa Suomeen melko hyvin kaasun alkuperän ollessa sama [33, s. 12].

Kaasukombivoimalan polttaessa biokaasua polttoainepanokset moninkertaistuvat energiantuotantoon kasvatetun maissin mädättämisen sekä erityisesti kasvattamisen vaatimien energiapanosten johdosta [39].

Taulukko 1. Kaasukombivoimalan EROI-luku [33, s. 12].

Nettoteho	805 MW
Huipunkäyttöaika	7 500 h
Voimalan arvioitu tekninen elinikä	35 a
Voimalan rakentaminen	470 TJ
Voimalan purkaminen	30 TJ
Voimalan ylläpito	255 TJ
Polttoaine (maakaasu)	26 100 TJ
Polttoaine (biokaasu)	201 000 TJ
EROI (maakaasu)	28:1
EROI (biokaasu)	3,5:1

Muista lähteistä [40; 41, s. 145] saatavat EROI-luvut maakaasulle vaihtelevat välillä 26–38:1. Maakaasun EROI-arvon voidaan kuitenkin odottaa alenevan tästä helposti hyödynnettävien lähteiden ehtyessä, ellei alalla tapahdu merkittäviä teknologisia uudistuksia. Tuotannosta lasketuista EROI-luvuista voidaan nähdä selkeästi aleneva suunta tultaessa 1990-luvulta 2000-luvulle [42, s. 1999; 43, s. 2091; 22, s.152].

Erityisesti biokaasulle ei työn kirjoitushetkellä ole saatavissa kovinkaan useita nettoenergia-analyysyjä. Biopolttoaineille, kuten bioetanolille, on kuitenkin tehty useita analyysejä [44, s. 4; 45, s. 1110], ja näissä EROI-luku vaihtelee välillä 0,6–6. Tutkimuksissa käytetyt menetit ja rajaukset vaihtelevat kuitenkin paljon. Biopohjaisten energioiden merkittävämpanä lopputulokseen vaikuttavana tekijänä voidaan pitää sitä, otetaanko prosessiin tarvittava biomass muun tuotannon sivuvirroista vai kasvatetaanko se energiantuotantotarkoitukseen. Sivuvirtojen määrittely onkin bioenergian ja -polttoaineiden tuotannossa hyvin kiistanalaista, saman määrittelyn vaikuttaessa myös lähteiden laskennallisiin päästöihin.

5.3 Kivihiililauhdevoimavoimala

Kivihiilellä tuotettavan sähkön polttoaineen tuotanto ja kuljetus muodostavat pääosan energiapanoksesta (taulukko 2). Kivihiilen kuljettamisen energiapanokset muodostavat tästä poikkeuksellisen suuren osan kuljetuksen vaatiman öljypohjaisen polttoaineen korkean jalostusasteen takia [46, s. 86]. Weißbach ym. [33, s. 19] eivät löytäneet kivihiilelle kuljetuksen vaatimia energiapanoksia, mutta arvioivat näiden alentavan EROI-lukua Saksassa 10–20 %. Koska Suomella ei ole omia kivihiilivarantoja, vaan kivihiili tuodaan suurimmaksi osaksi Venäjältä [47], voi kivihiilen EROI-luku olla Suomessa tätäkin alhaisempi.

Taulukko 2. Kivihiililauhdevoimalan EROI-luku [33, s.20].

Nettoteho	509 MW
Huipunkäyttöaika	7 500 h
Voimalan arvioitu tekninen elinikä	50 a
Voimalan rakentaminen	1 970 TJ
Voimalan purkaminen	91 TJ
Voimalan ylläpito	7 400 TJ
Polttoaine	14 500 TJ
EROI	29:1

Kivihiilivoimaloille esitetyt EROI-luvut muista lähteistä [40; 41, s. 145] vaihtelevat välillä 27–80:1. Toisin kuin maakaasun, kivihiilen EROI-luku näyttää nousevan ajan kanssa [22, s. 152]. Tämä johtunee louhinta- ja rahtaustekniikan kehittymisestä sekä maailman kivihiilivarantojen jäljellä olevasta suuresta määrästä.

5.4 Tuulivoimala

Tuulivoima on vielä verrattain uusi energiantuotantomuoto, joten siitä ei ole vielä saatavilla kovinkaan useita elinkaari- tai nettoenergia-analyysejä, eikä merelle rakennetusta tuulivoimasta löydetty yhtään tällaista. Tässä työssä esitetty EROI-luku on laskettu 1990-luvun lopulla markkinoille tulleelle, 1,5 MW:n Enercon E-66 turbiinille [33, s. 16]. Tuulivoimaloiden koko ja tuotto on kuitenkin kasvanut tästä huomattavasti [48], ja ainakin pienemmissä tuulivoimaloissa voidaan nähdä EROI-luvun kasvavan voimalan koon myötä

[49, s. 224]. Modernien tuulivoimaloiden EROI-luku voikin olla jonkin verran työssä esitettyä (taulukko 3) parempi.

Suomen olosuhteet ovat Saksaan verrattaessa tuulisemmat, joten tuulivoimaloiden huipunkäyttöaikana käytettiin arvoa 2780 h/a [50, s. 7].

Taulukko 3. Tuulivoimalan EROI-luku [33, s. 17].

Nettoteho	1,5 MW
Huipunkäyttöaika	2 780 h
Voimalan arvioitu tekninen elinikä	20 a
Voimalan rakentaminen	12,9 TJ
Voimalan purkaminen	Ei tiedossa, oletetaan minimaalisiksi.
Voimalan ylläpito	0,3 TJ
Polttoaine	0 TJ
EROI	23:1
EROI (pumppuvoimala varastoinnin kera)	4,4:1

Tuulivoiman EROI-lukuun vaikuttaa vahvasti käytetty voimalan huipunkäyttöaika, joka on vahvasti sidoksissa laitoksen sijaintiin. Muista lähteistä [40; 49, s. 225; 51, s. 66] saadut EROI-luvut tuulivoimalaitoksille vaihtelevat välillä 16–35:1.

5.5 Ydinvoimala

Kuten fossiilisia polttoaineita käyttävissä voimaloissa, polttoaineen tuotanto ja ylläpito muodostavat suuren osan myös ydinvoimaloiden energiapanoksista (taulukko 4). Ydinvoimalat ovat kuitenkin teknisesti huomattavasti vaativampia, ja niiden purkaminen vaatii paljon materiaalin loppusijoittamista. Tästä syystä myös laitoksen rakentaminen sekä purkaminen muodostavat merkittävät tekijät.

Säteilyturvakeskus on myöntänyt käyttöluvan Loviisassa toimivalle ydinvoimalaitokselle 50 vuoden ikään asti ja Olkiluodossa toimivalle 60 vuoden ikään asti. Koska ydinvoiman EROI-luku on niin korkea, tällä kymmenen vuoden erolla on lukuun hyvin pieni vaikutus. Toisaalta käyttöään jatkaminen 80 vuoteen ei myöskään merkittävästi nosta EROI-lukua, tämän lisäksi laitos vaatisi merkittäviä investointeja reaktoriastiaan, eikä niitä arvioida tässä työssä.

Taulukko 4. Ydinvoimalan EROI-luku [33, s. 21].

Nettoteho	1 340 MW
Huipunkäyttöaika	8 000 h
Voimalan arvioitu tekninen elinikä	60 a
Voimalan rakentaminen	4 050 TJ
Voimalan purkaminen	1 150 TJ
Voimalan ylläpito	6 900 TJ
Polttoaine (83 % sentrifugi)	18 800 TJ
Polttoaine (100 % sentrifugi)	9 650 TJ
EROI (83 % sentrifugi)	75:1
EROI (100 % sentrifugi)	105:1

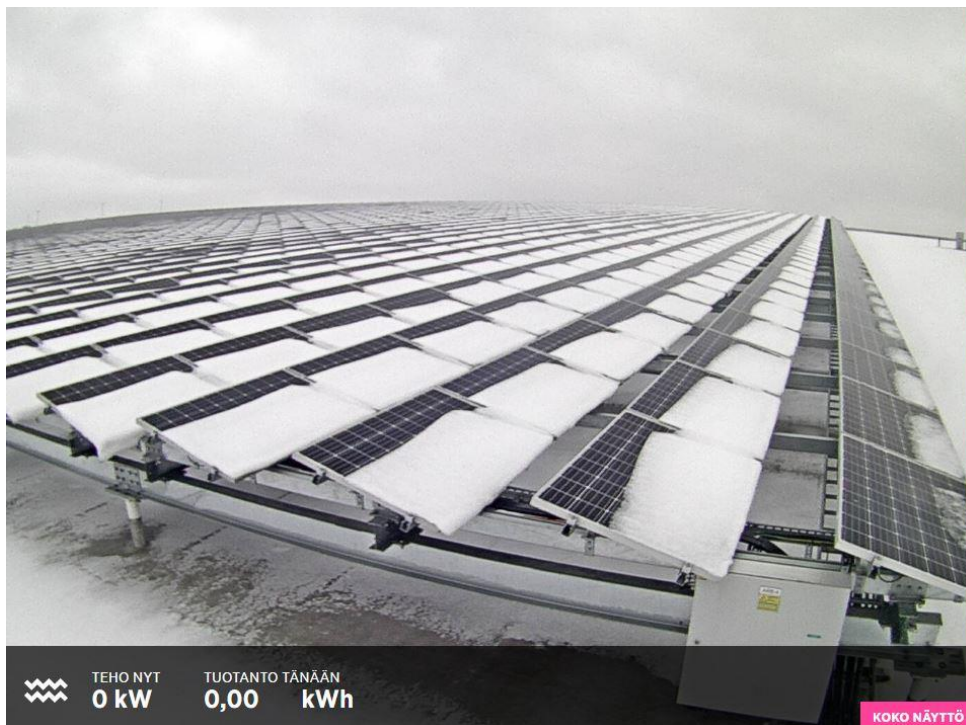
Ydinvoima on aurinkoenergian ohella yksi kiistellyimmistä aiheista nettoenergia-analyysissä. Muista lähteistä [40; 41, s. 145] saadut EROI-luvut vaihtelevatkin välillä 1–59:1. Vanhempiin mataliin EROI-lukuihin on vaikuttanut vahvasti kaasudiffuusiomenetelmän käyttäminen uraanin väkevöinnissä. Vanhanaikaista kaasudiffuusiomenetelmää ei kuitenkaan enää käytetä uraanin väkevöinnissä, joten nykyisten ydinvoimaloiden EROI-luku voidaan laskea sentrifugimenetelmää käyttäen [52].

5.6 Aurinkopaneelit

Aurinkopaneelit ovat EROI-lukujen suhteen ehkä tutkituin ja kiistellyin energiantuotantomuoto. Aurinkopaneeleista on kirjoitettu useita artikkeleita, joiden tekotapa ja niin ollen myös johtopäätökset ovat hyvin usein ristiriitaisia. Aurinkopaneelien tuotantoon kuluva energia on kuitenkin ollut monissa tutkimuksissa hyvin samankaltainen, 2 000–3 000 MJ/m². Positiivisia tuloksia on saatu usein aikaiseksi olettamalla aurinkopaneelien korvaavan olemassa olevan sähköverkon ja fossiiliset polttoaineet [53, s.8; 54, s. 580]. Negatiivisiin tuloksiin on taas päästy laajentamalla järjestelmän rajoja kohtuuttomasti ottamalla laskentaan mukaan investointi- ja työvoimakustannuksia, joita ei voida mitata fyysikaalisesti [55].

Nyky aikaisten aurinkopaneelien EROI-luvun laskennassa tärkeimmäksi tekijäksi nousee huipunkäyttöaika, joka jää Suomessa reilusti alle tuhanteen tuntiin ja silloinkin kohdistuu

pääosin kesäkaudelle [50, s. 7]. Työtä tehdessä aurinkopaneelien tuottoa seurattiin Helen Oy:n Kivikon voimalasta ja kuvasta 10 voidaankin nähdä Suomen aurinkopaneelien sähkön tuotantoon vaikuttavia tekijöitä.



Kuva 10. Helen Oy Kivikon aurinkovoimala 21.12.2018 [56].

Aurinkopaneelien energiapanoksista (taulukko 5) suurimman osan muodostaa piikiekkojen tuotanto. Niitä voidaan valmistaa muutamilla erilaisilla tekniikoilla. Käytetyn tekniikan mukaan myös paneelien hyötysuhdetta saadaan parannettua. Valmistustekniikoiden energiankulutus on kuitenkin yleensä tällöin korkeampi, eikä EROI-luku näin ollen aina parane.

Taulukko 5. 1 m²:n monikideaurinkopaneelin EROI-luku [33, s. 14].

Nettoteho	1 kWp
Huipunkäyttöaika	824 h (Etelä-Eurooppa 1750 h)
Paneelin arvioitu tekninen elinikä	25 a
Paneelin tuotanto	2102 MJ
Polttoaine	0 MJ
EROI	3,2:1 (Etelä-Eurooppa 7:1)
EROI (pumppuvoimala varastoinnin kera)	1,4:1

Kuten aikaisemmin mainittiin, aurinkopaneeleista löytyy lukuisia erilaisia EROI-lukuja. Suurin osa niistä sijoittuu välille 2,1–34 [40; 41, s. 145; 57]. Korkeimmat EROI-luvut on kuitenkin laskettu eteläisen Euroopan aurinkovyöhykkeelle sijoitetuille paneeleille ja yli 10:1 luvut koskevat ohutkalvopaneeleita (a:si, CdTe, CiGS). Ohutkalvopaneelien markkinaosuus vuonna 2017 oli kuitenkin vain 5 %, ja niiden tuotanto vaatii harvinaisia maametalleja kuten indiumia tai telluuria, joiden varannot ovat hyvin rajalliset [33, s. 13; 58].

Muista energiantuotantotavoista poiketen aurinkopaneelien EROI-luvun laskemiselle löytyy IEA:n (International Energy Agency) julkaisema ohjeistus [53]. Sen esimerkki laskelman arvot ovat hyvin samankaltaisia Weißbachin ym. [33] kanssa. Ohjeistuksessa esitetään kuitenkin erityisesti aurinkopaneeleille kohdistuva kerroin, jossa aurinkopaneelien oletetaan suoraan korvaavan osan sähköverkkoa. Tämä ei tietenkään vielä ole mahdollista kuin joidenkin kesämökkien tapauksessa. Kun kerroin jätetään pois, saadaan aurinkopaneeleille melkein sama EROI-luku kuin tässä työssä esitetty.

5.7 Vesivoimala

Kuten muissakin uusiutuviissa energialähteissä, vesivoiman energiapanos (taulukko 6) koostuu melkein pä pelkästään laitoksen rakentamisen aiheuttavista kuluista. Vesivoimaloista ei kuitenkaan löydy kovinkaan useita kattavia tutkimuksia mahdollisesti sen yleisesti hyväksytyn käytännöllisyyden takia. Weißbach ym. [33, s. 18] käyttävät esimerkisään jokeen rakennettua ohijuoksutusvoimalaa, joita suurin osa suomalaisista vesivoimaloistakin on. Koska vesivoiman rakentaminen on vahvasti maastonmuodoista riippuvainen, patoaltaan omaavan vesivoimalan EROI-luku voidaan arvioida olevan noin puolet ohijuoksutusvoimalan EROI-luvusta [59, s.60].

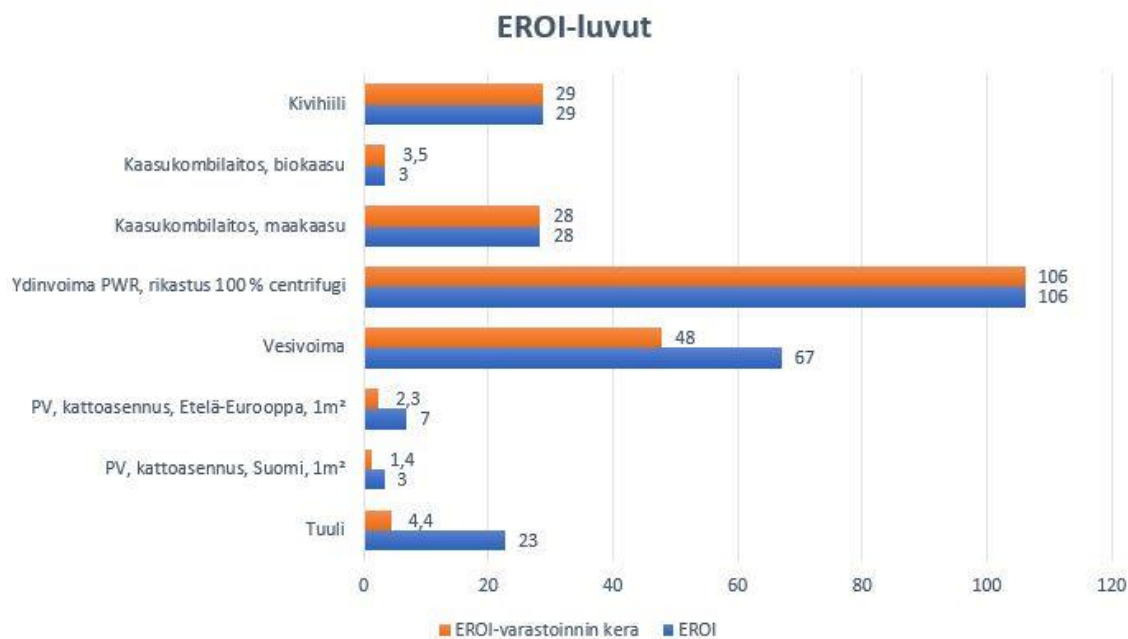
Taulukko 6. Vesivoimalan EROI-luku [33, s. 14].

Nettoteho	90 MW
Huipunkäyttöaika	4 100 h
Laitoksen arvioitu tekninen elinikä	100 a
Laitoksen rakentaminen	1 800 TJ
Laitoksen purkaminen	60 TJ
Laitoksen ylläpito	75 TJ
Polttoaine	0 TJ
EROI	67:1
EROI (pumppuvoimala varastoinnin kera)	48:1

Vesivoimalle ei löydetty muita vakavasti otettavia EROI-lukuja, ja lähteenä käytetyn Fernandon [59] tutkimuskin perustuu suurelta osin taloudellisista arvoista energiaksi muunnettuihin arvoihin. Näin ollen näitä ei voida pitää täysin todellisia energia-arvoja vastavina [33, s. 18.]

5.8 Yhteenveto

Luvussa 3 käsiteltiin nettoenergia-analyysien vertailtavuutta. Koska edellä esitellyt voimaloiden EROI-luvut perustuvat samaan materiaalipankkiin ja niiden laskemisessa on noudatettu samoja järjestelmärajoja, luvut ovat suoraan vertailtavissa toisiinsa. Näistä luvuista koostetusta pylväsdiagrammista (kuva 11) voi helposti nähdä erot perinteisiin ja uusiutuviin energialähteisiin perustuvien tuotantotapojen välillä.



Kuva 11. Voimaloiden EROI-luvut [34; liite 2].

Tuloksista voidaan nähdä kuinka VRE-tuotannon EROI-luvut jäävät kauas luvussa 4.4 todetusta hyvinvointiyhteiskunnan vaatimasta 30:1 EROI-luvusta. Näistä tuulivoimalla päästään jo melko lähelle tavoiteltavaa tasoa, uusimmilla turbiineilla tämä voi jopa ylittyä. Tuotannon vaihtelevan luonteen kannalta olisi kuitenkin otettava huomioon energian varastoitavuus, jolloin tuulivoiman EROI-luku laskee kauas tavoitellusta. Tuulivoimaa puolustetaan usein väitteellä, että jossain tuulee aina. Saksassa meneillään olevasta energiakäänteestä kerätyt tiedot näyttävät kuitenkin, että väite ei pidä paikkaansa [60].

Pienet EROI-luvut sisältävät myös korkeamman riskin käydä rasitteeksi yhteiskunnalle. Luvussa 4.3 käsitellyn nettoenergiajyrkänten takia luvuissa esiintyvät epävarmuudet vaikuttavat yhteiskunnan käyttöön saamaan nettoenergian määrään huomattavasti enemmän kuin korkeiden EROI-lukujen. Näin ollen liialliset panostukset kyseisiin energialähteisiin voivatkin aiheuttaa ongelmia yhteiskunnan toimintaan. Hall ym. [61, s. 45] esittää, että yhteiskunnan toiminnan vaatima pienin mahdollinen EROI-luku olisi 3:1. Tällainen yhteiskunta voisi kuitenkin tuottaa ainoastaan selviytymisen kannalta välttämättömät resurssit, joten kulttuurista, tieteestä, koulutuksesta sekä muista tuottamattomista toiminnoista jouduttaisiin luopumaan.

Tuloksista nähdään myös, että fossiilisiin polttoaineisiin perustuvat energiantuotantotavtaan eivät saavuta edellä mainittua hyvinvointiyhteiskunnan vaatimaa EROI-lukua. Suomessa ne tuottavat kuitenkin myös huomattavat määrät lämpöenergiaa kaukolämpöverkon tarpeisiin. Näin ollen niiden EROI-luvun voidaan katsoa olevan jopa kaksinkertainen, kun sitä vertaillaan yhteiskunnan toimintojen ylläpitämiseen vaadittavaan.

Nettoenergia-analyysin tulokset eivät tietenkään kerro suoraa vastausta energiantuotantotavan valintaan. Vaikka ydinvoima näyttäisikin muihin verrattuna olevan täysin ylivoimainen energiantuotantotapa, tulee kokonaisuutta arvioidessa ottaa huomioon ydinvoiman huono säädettävyys. Tämä estää ydinvoiman käyttämisen ainoana energiantuotantotapana.

6 Johtopäätökset

Insinööriyössä käsitelty kokonaisuus muuttui paljon työn kirjoittamisen edetessä, nopea aiheeseen tutustuminen ennen työn aloittamista antoi tekijälle liian yksinkertaisen kuvan nettoenergia-analyysin tekemisestä. Aluksi työssä oli tarkoituksena selvittää muun muassa hakkeen ja turpeen EROI-lukuja Suomessa, sekä huomioida paremmin CHP-laitoksissa tuotettu kaukolämpö. Tavoitteesta jouduttiin kuitenkin luopumaan, kun perusteellisen vertailukelpoisen analyysin tekemisen laajuus hahmottui paremmin. Työssä päädyttiinkin määrittelemään analyysin tekemisen vaatimuksia, joita voitaisiin myöhemmin käyttää nettoenergia-analyysien tekemisen pohjana. Sekä keskittyä esitellyissä EROI-luvuissa ainoastaan sähköntuotantoon. Tämä yritettiin tehdä niin, että energiatekniikka tuntematonkin henkilö voisi saada kattavan kuvan analyysin tekemisen hyödyistä.

Työtä tehdessä luettiin myös hyvin paljon energiapolitiikkaa, teknisiä ratkaisuja sekä energiauutisia käsitteleviä artikkeleita. Monet näistä artikkeleista loivat kokonaiskuvaa siitä, miksi nettoenergia-ajattelu on juuri nyt tärkeää.

Yksi tällainen kokonaisuuksien tarkastelua koskeva huomio oli Suomen sähköverkon tilaa seurattaessa tehty havainto maan rajojen yli kulkevista jatkuvista sähkövirroista. Useissa maissa energiapolitiikkaa tehdään hyvin pitkälti huomioiden pääosin kotimainen

tuotanto, sekä sisämarkkinoiden kapasiteetti. Näin toimittaessa VRE-tuotannolle ominainen tehon vaihtelu tasoitetaan usein tuontisähköllä, eikä tarvittavaa tehoreserviä välttämättä rakenneta. Kokonaisuutena Euroopan sähköverkko on kuitenkin yhdistymässä ja VRE-tuotanto lisääntyy jatkuvasti monissa maissa. Näin ollen ongelmia voikin aiheuttaa liian alhaisten EROI-lukujen omaavien energiantuotantotapojen yleistyminen suurella markkina-alueella.

Muutamissa maissa on jo koettu negatiivinen sähkönhinta, mikä viittaa vahvasti sähköverkon tehoepätasapainoon. Suomessa tilanne on vielä kohtalaisen hyvä ja jopa paranee Olkiluoto 3:n valmistuessa. Toisaalta tuontisähkön saatavuus saattaa hankaloitua tulevaisuudessa. Ruotsi on kuitenkin ajamassa omaa ydinvoiman tuotantoaan alas ja lisäämässä VRE-tuotantoaan, mikä väistämättä vaikuttaa vakaan säätövoiman saatavuuteen. Norjasta taas rakennetaan uusia siirtolinjoja Eurooppaan yhteensä 2,8 GW:n verran, josta sähköstä saadaan Suomea parempi hinta [62].

Vaikka positiivinen ajattelu onkin yleensä suotavaa, se ei saisi vaikuttaa tulevaisuutta koskeviin päätöksiin liikaa. Ihmisillä tuntuu olevan luonnostaan taipumusta ajatella, että fysiikan lait saattavat muuttua kannaltamme edullisemmiksi joskus lähitulevaisuudessa. Fysiikan lakien perusominaisuuksiin kuitenkin kuuluu, että ne eivät muutu ulkoisten vaikutusten takia.

Ilmastokriisin myötävaikutuksella on tästä huolimatta julkaistu joitakin tutkimuksia, joiden mukaan siirtyminen täysin uusiutuviin energiantuotantotapoihin on mahdollista jo muutamien vuosikymmenen kuluessa. Näissä tutkimuksissa sivuutetaan kuitenkin täysin useita vielä ratkaisemattomia ongelmia ja oletetaan niiden ratkeavan tekniikan kehityksen myötä. Tekniikan kehitys vie kuitenkin aikaa, ja usein kehitettyjen ratkaisujen tuominen yhteiskunnan käyttöön vie vielä pitempään. Nyt olisikin aika alkaa tarkastella jo käytävissämme olevia energiaratkaisuja ottaen huomioon vallitsevat fysiikan ja termodynamiikan lait.

Tämä ei tarkoita luopumista vähäpäästöisestä VRE-tuotannosta, vaan uusiutuvien tulisi joskus tulevaisuudessa olla pääasiallinen energiantuotantotapa. Tuuli- ja aurinkosähkön tuotannon ja oheisinfrastruktuurin kehitykseen tulisikin suunnata entistä enemmän resursseja, jotta niiden ongelmallisia EROI-lukuja saataisiin parannettua.

Nettoenergia-analyysi ei ole vielä nykyisessä muodossaan täysin valmis työkalu energiantuotantotapojen vertailuun, mutta siinä voidaan kuitenkin nähdä potentiaalia hyväksi työkaluksi kehittämisessä. Nykyisin energiantuotantotapoja vertaillaan pääosin niiden taloudellisen kannattavuuden tai elinkaariarvioinnilla niiden tuottamien päästöjen mukaan. Nettoenergia-analyysi tuo mukaan fysikaalisen näkökulman, joka täydentää näitä jo olemassa olevia työkaluja tuoden esiin joidenkin energiantuotantotapojen ongelmia ja hyviä puolia, joita muut analyysit eivät välttämättä näe. Tässä työssä käsiteltyä elinkaariarvointiin perustuvaa analyysiä voidaan pitää hyvänä tapana lähestyä asiaa, koska olemassa olevista standardeista voidaan ottaa paljon hyödyllisiä asioita. Nettoenergia-analyysin oikeaoppista tekemistä tärkeämpää olisi kuitenkin omaksua sille ominainen kriittinen, fysikaalisiin faktoihin perustuva ajattelu.

Lähteet

- 1 Raivio, Petri. 2018. Kaikki keinot käyttöön: EU haluaa nollata päästönsä vuoteen 2050 mennessä. Verkkoaineisto. Yle. <yle.fi/uutiset/3-10528876>. Luettu 28.11.2018.
- 2 Global Warming of 1.5 °C. 2018. Verkkoaineisto. IPCC. <ipcc.ch/sr15/> Luettu 28.11.2018.
- 3 Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. 2017. Helsinki. Työ- ja elinkeinoministeriö.
- 4 Tommila, Esa. 2019. Puheenjohtaja, Nettoenergia ry, Helsinki. Keskustelut keväällä 2019.
- 5 Cengel, Yunus, A. & Boles, Michael, A. 2011. Thermodynamics: An Engineering Approach Seventh Edition in SI Units. New York. McGraw-Hill.
- 6 Energy Education. 2018. Verkkoaineisto. University of Calgary. <energyeducation.ca/encyclopedia/Thermal_efficiency> Luettu 3.4.2019.
- 7 Glossary of Statistical Terms. 2001. Verkkoaineisto. OECD. <stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=2112> Luettu 19.3.2019.
- 8 Production of Secondary Energy. Verkkoaineisto. Energy Together. <e2g.dk/en/description-of-e2g/transformation-to-secondary-energy/#transformation-of-primary-energy> Luettu 3.4.2019.
- 9 Murphy, David J.; Carbajales-Dale, Michael & Moeller, Devin. 2016. Comparing Apples to Apples: Why the Net Energy Analysis Community Needs to Adopt the Life-Cycle Analysis Framework. MDPI.
- 10 Odum, Howard T. 1973. Energy, Ecology, and Economics. Ambio.
- 11 Hall, Charles, A.S. 1972. Migration and Metabolism in a Temperature Stream Ecosystem. Ecology.
- 12 Chapman, P. 1976. Energy Analysis: A Review of Methods and Applications. Omega.
- 13 Hall, Charles, A.S.; Cleveland, C.J. & Berger, M. 1981. Energy Return on Investment for United States Petroleum, Coal, and Uranium. Amsterdam. Elsevier.

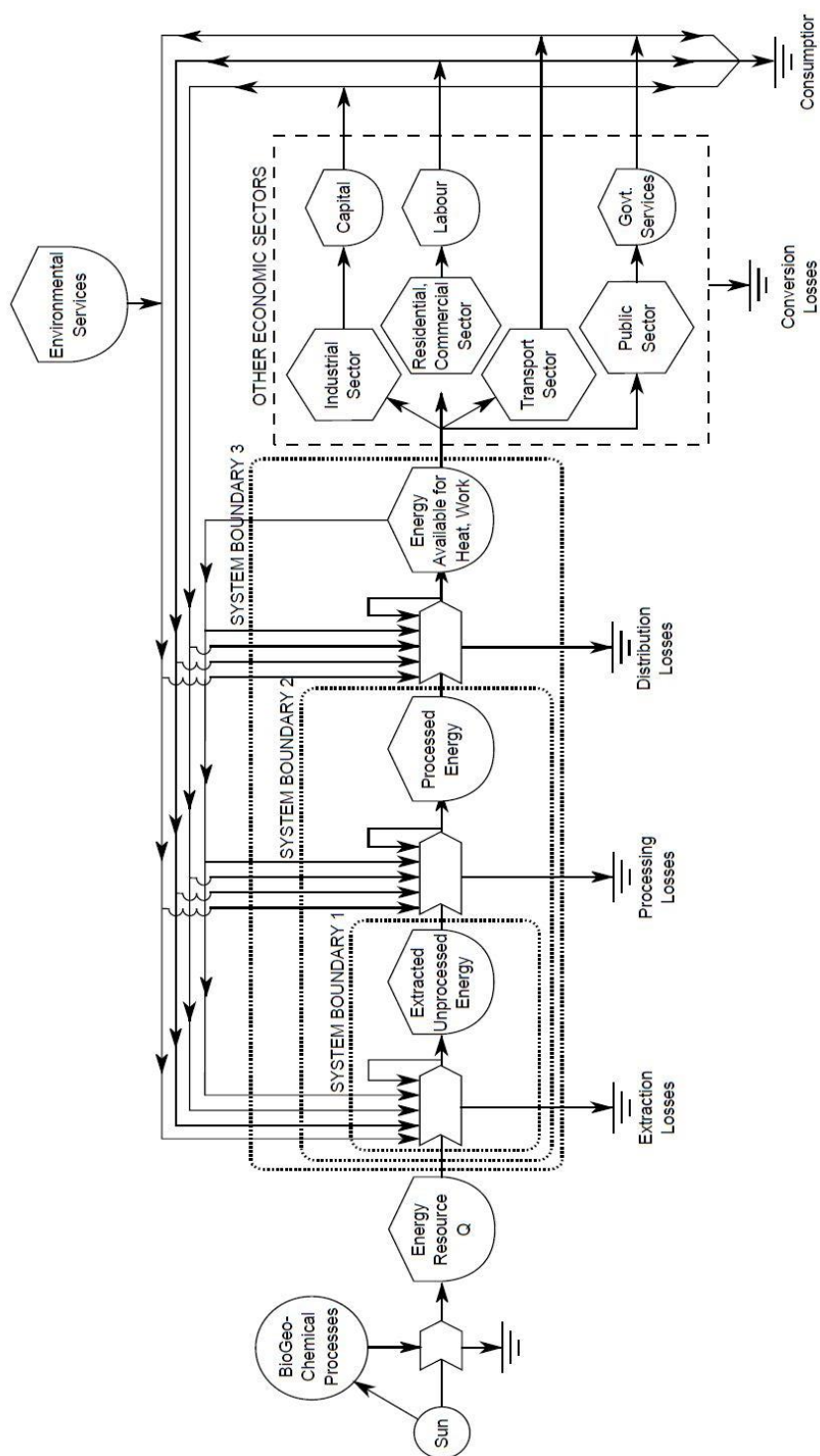
- 14 Hall, Charles, A.S. & Cleveland, C.J. 1981. Petroleum Drilling and Production in the United States: Yield per Effort and Net Energy Analysis. *Science*.
- 15 Cleveland, C.J.; Costanza, R.; Hall, C.A.S. & Kauffmann, R. 1984. Energy and the U.S. Economy: A Biophysical Perspective. *Science*.
- 16 Hall, C.A.S.; Cleveland, C.J. & Kaufmann, R. 1986. *Energy and Resource Quality: The Ecology of the Economic Process*. New York. John Wiley and Sons, Inc.
- 17 Cleveland, C.J. 2005. Net energy from the extraction of oil and gas in the United States. *Energy*.
- 18 Gagnon, N.; Hall, C.A.S. & Brinker, L. 2009. A Preliminary Investigation of the Energy Return on Energy Invested for Global Oil and Gas Extraction. *Energies*.
- 19 Brandt, A.R. 2011. Oil Depletion and the Energy Efficiency of Oil Production: The Case of California. *Sustainability*.
- 20 Grandell, L.; Hall, C.A.S. & Hook, M. 2011. Energy Return on Investment for Norwegian Oil and Gas from 1991 to 2008. *Sustainability*.
- 21 Guilford, M.C.; Hall, C.A.S.; O'Connor, P. & Cleveland, C.J. 2011. A New Long Term Assessment of Energy Return on Investment (EROI) for U.S. Oil and Gas Discovery and Production. *Sustainability*.
- 22 Court, Victor & Fizaine, Florian. 2017. Long-Term Estimates of the Energy-Return-on-Investment (EROI) of Coal, Oil, and Gas Global Productions. *Elsevier*.
- 23 SFS-EN ISO 14040, Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. 2006. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto.
- 24 Weißbach, D.; Czerski, K.; Gottlieb, S. & Hussein, A. 2018. Energy intensities, EROI (energy returned on invested), for electric energy sources.
- 25 Your source for LCA data sets. 2019. Verkkoaineisto. openLCA Nexus. <nexus.openlca.org/databases> Luettu 19.3.2019.
- 26 Fthenakis, V. & Kim, H. 2011. *Photovoltaics: Life-cycle analyses*. Elsevier.
- 27 Frischknecht, R.; Itten, R.; Sinha, P.; de Wild-Scholten, M.; Zhang, J.; Fthenakis, V.; Kim, H.C.; Raugei, M. & Stucki, M. 2015. *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems*. Paris. IEA.
- 28 Vesivoiman merkitys Suomen energijärjestelmälle. 2019. ÅF-Consult Oy.

- 29 Kauppi, Pekka. Kettunen, Jyrki. Laiho, Yrjö. Smolander, Heikki. Tommila, Esa & Luotonen, Jouni. 2019. Mega- ja negawatteja. Koskipeikkojen energiakirja. Silti.
- 30 Äijälä, Mikko & Kirikal, Lili. 2018. Kysyntäjousto tukevat valvontamenetelmät sähkön jakeluverkkotoiminnassa. Helsinki. Energiavirasto.
- 31 Laatikainen, Tuula. 2018. Nyt tulee sähkön kysyntäjousto myös käytännössä – suomalaisyrityksen 4 laitoksen sähköteho pudotetaan 15 minuutiksi tarvittaessa ilman haittoja. Verkkoaineisto. Tekniikka & Talous. <tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/nyt-tulee-sahkon-kysyntajousto-myos-kaytannossa-suomalaisyrityksen-4-laitoksen-sahkoteho-pudotetaan-15-minuutiksi-tarvittaessa-ilman-haittoja-6741678> Luettu 20.3.2019.
- 32 Partanen, Rauli & Suokko, Aki. 2017. Energian Aika: Avain talouskasvuun, hyvinvointiin ja ilmastonmuutokseen. Helsinki. WSOY.
- 33 Weißbach, D.; Ruprecht, G.; Huke, A.; Czerski, K.; Gottlieb, S. & Hussein, A. 2013. Energy intensities, EROIs, and energy payback time of electricity generating power plants.
- 34 Weißbach, D.; Ruprecht, G.; Huke, A.; Czerski, K.; Gottlieb, S. & Hussein, A. 2018. Google Docs taulukko, jonka pohjalta laskut on tehty. Verkkoaineisto. <docs.google.com/spreadsheets/d/1IBK3pntKdd3bo8oAAvjnpQvYaLZp1G-ieuS5GA5NGV4>
- 35 Lambert, Jessica G.; Charles, A.S.; Balogh, Stephen; Gupta, Ajay & Arnold, Michelle. 2013. Energy, EROI and quality of life. Next Generation Energy Initiative, Inc.
- 36 Human Development Index (HDI). 2018. Verkkoaineisto. United Nations Development Programme. <hdr.undp.org/en/content/human-development-index-hdi>. Luettu 14.12.2018.
- 37 Human Development Data (1997-2017). 2018. Verkkoaineisto. United Nations Development Programme. <hdr.undp.org/en/data> Luettu 14.12.2018.
- 38 Meier, P.J. 2002. Life cycle assessment of electricity generation systems and applications for climate change policy analysis. Wisconsin. Fusion Technology Institute.
- 39 Hundt, B. 2010. Energie- und Klimaeizienz von Biogasanlagen mit Biogasaufbereitung und -einspeisung unter Nutzung von Silomais - Untersuchungen am Beispiel der Biogasanlage der HSE AG in Darmstadt-Wixhausen. Schriftenreihe zur Bodenkunde, Landeskultur und Landschaftsökologie der Justus-Liebig-Universität Gießen.

- 40 Energy Return on Investment. 2017. Verkkoaineisto. World Nuclear Association. <world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/energy-return-on-investment.aspx> Luettu 21.1.2019.
- 41 Hall, Charles, A.S.; Lambert, Jessica, G. & Balogh, Stephen. 2014. EROI of different fuels and the implications for society. Elsevier.
- 42 Sell, Bryan; Murphy, David & Hall, Charles, A.S. 2011. Energy Return on Energy Invested for Tight Gas Wells in the Appalachian Basin, United States of America. Sustainability.
- 43 Freise, Jon. 2011. The EROI of Conventional Canadian Natural Gas Production. Sustainability.
- 44 Garza, Eric, L. 2011. The Energy Return on Invested of Biodiesel in Vermont. Burlington. University of Vermont.
- 45 Tredici, M.R.; Bassi, N.; Prussi, M.; Biondi, N.; Rodolfi, L.; Zittelli, Chini, G. & Sampietro, G. 2015. Energy balance of algal biomass production in a 1-ha "Green Wall Panel" plant: How to produce algal biomass in a closed reactor achieving a high Net Energy Ratio. Elsevier.
- 46 Spath, Pamela, L.; Mann, Margaret, K. & Kerr, Dawn, R. 1999. Life Cycle Assessment of Coal-fired Power Production. Colorado. National Renewable Energy Laboratory.
- 47 Tilastokeskuksen PX-Web-tietokannat, 004 – Energian tuonti ja vienti alkuperämaittain. 2017. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ene__ehk/?tablelist=true> Luettu 22.1.2019.
- 48 Tuulivoimatekniikka. Verkkoaineisto. Tuulivoimayhdistys. <tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka> Luettu 10.2.2019.
- 49 Kubizewski, Ida; Cleveland, Cutler, J. & Enres, Peter, K. 2009. Meta-analysis of net energy return for wind power systems. Elsevier.
- 50 Vakkilainen, Esa & Kivistö, Aija. 2017. Sähkön Tuotantokustannusvertailu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- 51 Garrett, Peter & Razdan, Priyanka. 2015. Life Cycle Assessment of Electricity Production from an Onshore V110-2.0 MW Wind Plant. Vestas.

- 52 Uranium Enrichment. 2019. Verkkoaineisto. World Nuclear Association. <world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment.aspx> Luettu 15.2.2019.
- 53 Raugei, M.; Frischknecht, R.; Olson, C.; Sinha, P. & Heath, G. 2016. Methodological guidelines on Net Energy Analysis of Photovoltaic Electricity. IEA.
- 54 Raugei, M.; Fullana-i-Palmer, P. & Fthenakis, V. 2012. The energy return on energy investment (EROI) of photovoltaics: Methodology and comparisons with fossil fuel life cycles. Energy Policy.
- 55 Ferroni, Ferruccio & Hopkirk, Robert, J. 2016. Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation. Elsevier.
- 56 Aurinkosähköä Kivikosta. 2018. Verkkoaineisto. Helen Oy. <helen.fi/aurinko/kodit/aurinkosahko/kivikko/> Luettu 21.12.2018.
- 57 Bhandari, Khagendra, P.; Collier, Jennifer, M.; Ellingson, Randy, J. & Apul, Defne, S. 2015. Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis. Elsevier.
- 58 Photovoltaics Report. 2019. Freiburg. Fraunhofer Institute for Solar Energy
- 59 Fernando, A.T.D. 2010. Embodied Energy Analysis of New Zealand Power Generation Systems. University of Canterbury.
- 60 Ziegler, Nikolai. 2017. COMPENDIUM for a sensible energy policy. Berlin. Vernunftkraft.
- 61 Hall, Charles, A.S.; Balogh, Stephen & Murphy, David, J.R. 2009. What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? MDPI.
- 62 Norlink & North Sea Link. Verkkoaineisto. Statnett. <statnett.no/en/our-projects/> Luettu 3.5.2019.
- 63 Murphy, D.J.; Hall, C.A.S.; Dale, M. & Cleveland, C. 2011. Order from Chaos: A Preliminary Protocol for Determining the EROI of Fuels. Sustainability.

Nettoenergia-analyysin järjestelmädiagrammi [63, s.1891]



Laskennassa käytetyt Excel-taulukot

Voimalaitos	power output [MW]	full-load [h]	P	E_fix	E_fix/P	Thereof	P_i	P_i/P	Thereof
Tuuli	1,5	2 780	15,0	12,94	0,86	8 %	0,01	0,10 %	0 %
PV, kattoasennus, Suomi, 1m ²	1	824	2,9	21	7,16	64 %	0,00	0,00 %	0 %
PV, maa-asennus, Suomi, 1m ²	1	824	2,9	22	7,40	67 %	0,00	0,00 %	0 %
PV, kattoasennus, Etelä-Eurooppa, 1m ²	1	1 750	6,2	21	3,37	64 %	0,00	0,00 %	0 %
PV, maa-asennus, Etelä-Eurooppa, 1m ²	1	1 750	6,2	22	3,48	67 %	0,00	0,00 %	0 %
Vesivoima	90	4 100	1 328,4	1 907	1,44	0 %	0,75	0,06 %	0 %
Ydinvoima PWR, rikastus 83% centrifugi, 17%	1 340	8 000	38 592,0	5 370	0,14	33 %	427,33	1,11 %	68 %
Ydinvoima PWR, rikastus 100 % centrifugi	1 340	8 000	38 592,0	5 370	0,14	33 %	274,33	0,71 %	50 %
Kaasukombilaitos, maakaasu	805	7 500	21 735,0	500	0,02	10 %	752,21	3,46 %	0 %
Kaasukombilaitos, biokaasu	805	7 500	21 735,0	500	0,02	10 %	6 217,21	28,57 %	60 %
Kivihilli	509	7 500	13 743,0	2 057	0,15	9 %	438,00	3,19 %	40 %

Voimalaitos	T [a]	R	T a	f 0	t s	R s	R f	T a,s	T a,f
Tuuli	20	23	10	1,5	0,027	4,8	4,4	50	55
PV, kattoasennus, Suomi, 1m ²	25	3,3	86	2	0,027	2,2	1,4	135	221
PV, maa-asennus, Suomi, 1m ²	25	3,2	89	2	0,027	2,2	1,3	138	227
PV, kattoasennus, Etelä-Eurooppa, 1m ²	25	7,0	40	2	0,027	3,3	2,3	90	130
PV, maa-asennus, Etelä-Eurooppa, 1m ²	25	6,7	42	2	0,027	3,3	2,3	91	133
Vesivoima	100	67	17	1,4	0,000	67	48	17	24
Ydinvoima PWR, rikastus 83% centrifugi, 17%	60	75	2	1	0,000	75	75	2	2
Ydinvoima PWR, rikastus 100 % centrifugi	60	106	2	1	0,000	106	106	2	2
Kaasukombilaitos, maakaasu	35	28	0,29	1	0,000	28	28	0,3	0,3
Kaasukombilaitos, biokaasu	35	3,5	0,39	1	0,000	3,5	3,5	0,4	0,4
Kivihilli	50	29	2	1	0,000	29	29	2	2

Material	Energy inventory [GJ/t]	Thereof electrical
Iron-containing metals		
Steel, unalloyed	20,00	11 %
Steel, unalloyed, galvanized	22,90	
Steel, low-alloyed	31,00	
Steel, low-alloyed, galvanized	35,20	
Steel, high alloyed	42,00	
electrical sheets	82,00	
Cast steel	61,80	
Cast iron	17,60	
steel for reinforced concrete	30,10	
V2A-steel	81,20	28,03 %
Stainless steel	23,99	12,31 %
steel, alloyed with chromium	24,50	23,24 %
Nonferrous metals		
Aluminium	86,00	73 %
Copper	40,00	62 %
Copper wire, 0.6 mm diameter	44,00	65 %
Copper wire, 0.06 mm diameter	46,26	67 %
Silver	3 000,00	40 %
Zinc	52,70	36 %
Indium	7 400,00	36 %
Cadmium	17,00	36 %
Selenium	225,00	34 %
Chromium	40,00	36 %
Ferrochromium	32,50	45 %
Manganese		
Nickel	40,00	36 %
Ferronickel	155,00	22 %
Molybdenum	180,00	34 %
Tantalum		
Titanium	194,40	53 %
Vanadium		
Lead		
Brass		
metallurgical-grade silicon	45,00	100 %
Synthetic materials		
Fibre glass	50,00	
EP resin	80,00	
UO resin	78,00	
EPDM	96,80	
FPM	177,20	
Rubber	117,00	
NBR	117,00	
PA	177,20	
PC+GF	91,00	
PE-LD	88,60	
PES	177,20	
PET	140,00	

Material	Energy inventory [GJ/t]	Thereof electrical
PET	140,00	
PMMA	91,00	
PTFE	177,20	
PUR	107,50	
PVA	177,20	
PVC	66,80	
PVC, rigid foam	66,80	
Foil extrusion	6,00	
Miscellaneous		
TetraPack	87,50	
Paper isolation sheets	79,20	
Wood	21,50	
Cotton	7,00	
Ethylene oxide	61,00	
Lacquer	125,00	
Vinyltoloul	58,00	
Grease/Fat	39,40	
Oil	39,40	
Electrical parts	100,00	
Electronical parts	235,00	
Concrete C20/25 (B25)	0,35	0 %
Concrete C25/30 (B25)	0,60	0 %
Concrete C30/37 (B35)	0,69	
Phenole compounds (Source: DLR)	120,00	
Cement	3,00	0 %
Concrete	3,00	0 %
Fuel oil, diesel oil	43,00	
Special alloy (70Al24Cu6Zn)	72,00	71,00 %
Special synthetic (70PVC21GFK9PE)	70,00	
Ammonia	40,00	10,00 %
Detergents	45,00	
Glass	13,00	
Argon as a byproduct (nitrogen capture)	0,50	
Argon as a standalone product	30,00	
Sulfur	10,00	
Material processing	kWh/t	GJ/t
Steel Processing (EAF)	500,00	1,8
Blast furnace		15
		16,8
	Kohlenstoff	Mangan
Stahl S235JR	0,00	1,40 %
Transportation demand	MJ/tkm	
Rail, 50% load	0,30	
Ship, large freighter, 50% load	0,40	
large truck, 50% load	2,40	

CCGT plant	Material amount [t]	Energy demand [GJ]	thereof electrical [GJ]
Construction gas			
Steel, unalloyed	49	980	107,8
Steel, low-alloyed	65	2015	
Steel, high-alloyed	11	462	
Chromium steel	49	1200,5	279,0
Chromium-nickel steel	68	5521,6	1 547,6
Miscellaneous		60	35,0
Cast iron	69	1214,4	
Construction steam			
Steel, unalloyed	122	2440	268,4
Steel, low-alloyed	3,5	108,5	
Steel, high-alloyed	1,5	63	
Chromium steel	30	735	170,8
Chromium-nickel steel	57	4628,4	1 297,2
Cast iron	87	1531,2	
Generators			
Steel, unalloyed	36	720	79,2
Steel, low-alloyed	242	7502	
Chromium steel	1	24,5	5,7
Chromium-nickel steel	9	730,8	204,8
Copper	46	1840	1 140,8
Synthetic materials	5	350	
Miscellaneous		50	
Miscellaneous			
Steel, unalloyed	3629	72580	7 983,8
Steel, low-alloyed	154	4774	
Steel, high-alloyed	960	40320	
Chromium steel	77	1886,5	438,4
Chromium-nickel steel	34	2760,8	773,8
Miscellaneous		1000	
Electrical Engineering			
Steel, unalloyed	362	7240	796,4
Cast iron	9	158,4	
Nonferrous metals	121	8712	6 185,5
Synthetic materials	8	560	
Miscellaneous		300	
Construction, building			
Steel, unalloyed	1645	32900	3 619,0
Nonferrous metals	2	144	102,2
Synthetic materials	40	2800	
Construction	19892	11935,2	
Decommission, FFE			
		30000	
One-time demand,		500495,6	50 071,1
Annual maintenance			
Nonferrous metals	2	144	
Synthetic materials	1	70	
Steel, unalloyed	100	2000	220
Addition (FFE),		5000	
Natural gas extraction		745000	
Biogas synthesis		6210000	3726000
Annual total, natural gas		752214	220,0
Annual total, biogas		6217214	3726220

Hard coal			
	Material amount	Energy demand	thereof electrical
Bau, Bautechnik			
Concrete, B25	285091	171054,6	
Steel, unalloyed	9773	195460	21500,6
Steel, low-alloyed	1375	42625	
Nonferrous metals	627	45144	32052,24
Construction			
Steel, low-alloyed	27156	841836	
Cast iron	521	9169,6	
Synthetic materials	806	56420	
Miscellaneous,		25000	5000
Rubber	63	7371	
Construction			
Steel, low-alloyed	916	28396	
Nonferrous metals	1037	74664	53011,44
Synthetic materials	515	36050	
Oil	113	4452,2	
Construction,			
Construction		64152	64152
Fuel oil	6500	279500	
Lubricants		14000	
Transportation,		71000	
Decommission		91000	
One-time energy		2057294,4	175716,28
Annual energy			
Fuel Oil		95000	
Operating materials		41500	
Transportation,		11200	
Coal supply,		290300	174180
Annual total		438000	174180

Source	Geuder/Piik		Seasonal		Required annual		0,027378508			
Generator type	Enercon E-66		Tower		Nacelle		Generator		Rotor blades	
E _i [TJ]	Grid connection	Basement	Tower		Nacelle		Generator		Miscellane	
Total	1,147	1,238	3,972		1,795		2,392		1,130	
Thereof electrical	0,193	0,086	0,362		0,046		0,317		0,010	
Percentage	9 %	10 %	31 %		14 %		18 %		9 %	
Materials	Amount [kg]	%	Net energy	Thereof	%	Sum [TJ]	Thereof			
Rotor blade										
Aluminium	50,	0,93 %	4 300	3 139		1,18 %				
Rubber	76,	1,41 %	8 892	0		2,43 %				
PA	80,	1,49 %	14 176	0		3,88 %				
PVC	150,	2,79 %	10 020	0		2,74 %				
Miscellaneous	169,	3,14 %	8 670	0		2,37 %				
Lacquers	170,	3,16 %	21 250	0		5,81 %				
PE	215,	3,99 %	19 049	0		5,21 %				
PVC, rigid foam	254,	4,72 %	16 967	0		4,64 %				
Hardener	525,	9,75 %	32 025	0		8,76 %				
EP resin	1515,	28,14 %	121 200	0		33,16 %				
Fibre glass	2 180,	40,49 %	109 000	0		29,82 %				
Sub-total	5 384,		365 549	3 139						
			Additional			3,00 %	0,377	0,003		
Generator										
Miscellaneous	489,	1,20 %	42 543,			1,96 %				
Copper wires	8 992,	22,10 %	395 648	258 970		18,19 %				
Steel, unalloyed	13 265,	32,60 %	265 300	29 183		12,20 %				
Electrical sheets	17 944,	44,10 %	1471 408	0		67,65 %				
Sub-total	40 690,		2 174 899,	288 152,6						
Nacelle										
			Production			10,00 %	2,392	0,317		
Aluminium	133	0,26 %	11 438	8 350		0,73 %				
Electronic parts	265	0,52 %	62 275	0		3,99 %				
Copper	332	0,65 %	13 280	8 234		0,85 %				
Lacquer	398	0,78 %	49 750	0		3,19 %				
Fibre glass	797	1,56 %	39 850	0		2,55 %				
Steel, low-alloyed,	1328	2,60 %	46 746	0		2,99 %				
Miscellaneous	1661	3,25 %	92 850	0		5,95 %				
UP resin	2060	4,03 %	160 680	0		10,29 %				
Cast steel	3654	7,15 %	225 817	0		14,47 %				
Steel, low alloyed	8992	17,60 %	278 752	0		17,86 %				
Steel, unalloyed	10626	20,80 %	212 520	23 377		13,62 %				
Cast iron	20845	40,80 %	366 872	0		23,50 %				
Sub-total	51 091,		1 560 829,7	39 960,54						
Tower (steel)										
			Production			15,00 %	1,795	0,046		
Lacquer	3789	2,49 %	473 625	0		13,71 %				
Steel, unalloyed,	5034	3,31 %	115 279	0		3,34 %				
Steel, unalloyed	143270	94,20 %	2 865 400	315 194		82,95 %				
Sub-total	152 093,		3 454 303,6	315 194,						
			Production			15,00 %	3,972	0,362		
Grid connection										
Miscellaneous	412	1,49 %	54 384			5,22 %				
PVC	596	2,15 %	39 813	0		3,82 %				
Steel, high-alloyed	596	2,15 %	25 032	0		2,40 %				
steel for reinforced	687	2,48 %	13 740	1511		1,32 %				
Steel, unalloyed,	687	2,48 %	15 732	0		1,51 %				
Oil	916	3,30 %	36 090	0		3,46 %				
Steel, low-alloyed	916	3,30 %	28 396	0		2,72 %				
Electrical parts	962	3,47 %	96 200	0		9,23 %				
Iron	962	3,47 %	19 240	2 116		1,85 %				
Electronical parts	1283	4,63 %	301 505	0		28,92 %				
Electrical sheets	1742	6,28 %	142 844	0		13,70 %				
Copper wires	5965	21,51 %	262 460	171 792		25,17 %				
lightweight concrete	12010	43,30 %	7 206	0		0,69 %				
Sub-total	27 734,		1 042 642,5	175 419,8						
			Production surcharge			10,00 %	1,147	0,193		
Basement										
PVC	690	0,11 %	46 092	0		3,92 %				
Steel, unalloyed	12185	1,98 %	243 700	26 807		20,72 %				
steel for reinforced										
concrete	27080	4,41 %	541 600	59 576		46,04 %				
Concrete	574754	93,50 %	344 852	0		29,32 %				
Sub-total	614 709,		1 176 244,4	86 383,						
			Excavation (basement)			62 125,	1,238	0,086		
Maintenance										
			200000							

	Material amount [t]	Energy	Thereof
Fixed demands			
Construction, building			
Concrete	744 056	446 434	0
Steel, unalloyed	64 829	1 296 580	142 624
Bitumen	912	0	
Copper	75	3 000	1 860
Polystyrol, rigid foam	31		
Roofing fabric	164		
Aluminium	130	11 180	8 161
Mineral rock wool	2 930		
Glass (thermal isolating)	55	715	
Construction, Engineering			
Steel, unalloyed	21 454	429 080	47 199
Cast metals (steel)	660	11 616	0
Forged metals (steel)	6 674	206 894	0
Turbine Oil	132	5 181	0
Oil	8	315	0
Oil for hydraulics	11	433	0
Oil for refrigerating machines	1	20	0
Miscellaneous			
Fuel oil, diesel oil	6 100	262 300	0
Electricity		1 022 400	1 022 400
Chemicals		24 000	0
Transportation		162 000	0
Electrical engineering		330 000	140 000
Decommission			
Disposal, radioactive materials		396 000	40000
Disposal, non-radioactive materials		231 000	0
Operational materials		142 000	0
Electricity		389 000	389 000
Total (fixed demands)		5 370 148	1 791 244
Running demands (per year)			
Maintenance			
Electricity		68 500	68 500
Operational materials		29 500	0
Chemicals		700	0
Operational gases		800	0
Maintenance, 50% of engineering construction		5 100	561
Maintenance, 75% of electrical engineering		4 150	1 868
Disposal of operation materials		3 500	0
Transportation		1 333	0
Fuel-related energy demand			
Extraction and Preparation		70 000	35 000
Conversion		29 000	
Fuel element production		12 750	2 600
Disposal		23 000	3 000
Sub-total		248 333	111 529
Enrichment A (83% centrifuge)		179 000	179 000
Enrichment B (100%)		26 000	26 000
Total (running demands) A		427 333	290 529
Total (running demands) B		274 333	137 529

Polycrystalline silicon (1m²)			
		Seasonal	2
Input			
	Energy demand [MJ]	Thereof electrical	Electrical energy demand [MJ]
Process			
Metallurgical-grade silicon (1.6 kg)	72	100 %	72
Siemens process	850	65 %	553
Wafer production	190	70 %	133
Cell production	180	75 %	135
Module production	480	80 %	384
sub-total	1 772	72 %	1 277
Construction of production plant	150	0 %	0
Installation Dach	180	40 %	72
Installation Field	250	70 %	175
Roof total	2 102	64 %	1 349
Field total	2 172	67 %	1 452
Output			
Efficiency	14,40 %		
Net module efficiency	13,20 %		
Performance factor	75,00 %		
Net efficiency	9,90 %		
Annual full-load hours, South Europa	1 750		
Lifetime [a]	25		
Annual full-load hours, South Germany	1 000		
Degradation linear 0,5%/a	0,9375		
Cumulative output, South Germany [kWh]	2 320		
Cumulative output, South Germany [MJ]	8 353		
Cumulative output, South Europe [kWh]	4 061		
Cumulative output, South Europe [MJ]	14 618		

Hydro	One-time costs
Preliminary Investigations and River Diversion	
Preliminary Investigations	7 000
Construction Materials of River Diversion	186 000
Other Processes of River Diversion	89 000
Power Plant Construction and Civil Works	
Earth Works and Hydraulics Construction	858 000
Powerhouse and Switchyard	607 000
Powerhouse and Switchyard Equipment	71 000
Taupo Gates	30 000
Plant Decommissioning and Land Reclamation	
Plant Decommissioning	43 000
Land Reclamation	16 000
Total	1 907 000
Plant Operation and Maintenance [GJ]	
Lifetime [a]	100
Annual Operation and Maintenance [GJ]	750