

Equation Chapter 2 Section 1

Sisältö

2.	UUSIUTUVA SÄHKÖENERGIA.....	2
2.1.	Sähkön tuotantomuotojen ympäristövaikutukset.....	2
2.2.	Uusiutuvan sähköenergian tuotannon kehitys.....	5
2.3.	Vesivoima.....	7
2.3.1.	Allasvesivoima eli säännöstelyvesivoima.....	7
2.3.2.	Vuorovesivoima.....	11
2.3.3.	Aaltovoima.....	12
2.4.	Aurinkoenergia.....	13
2.4.1.	Säteilyn intensiteetti.....	14
2.5.	Aurinkokeräimet.....	15
2.6.	Integroidut keräinjärjestelmät.....	15
2.7.	Aurinkosähköjärjestelmät.....	16
2.7.1.	Aurinkokenno.....	18
2.7.2.	Diodin toimintaperiaate.....	18
2.7.3.	Ideaalinen aurinkokenno.....	20
2.7.4.	Aurinkokennojen sarjaan- ja rinnankytkentä.....	22
2.7.5.	Reaalinen aurinkokenno.....	23
2.7.6.	Aurinkosähköjärjestelmät.....	24
2.7.7.	Aurinkosähköjärjestelmien hintakehitys.....	27
2.8.	Tuulienergia.....	28
2.1.	Tuulivoimalan osat.....	32
2.2.	Aerodynaamisen voiman tuotto lavoissa.....	34
2.3.	Tuulivoimaloiden luokittelu.....	39
2.4.	Geoenergia.....	44
2.5.	Bioenergia.....	48
2.6.	Polttokennot.....	49
2.7.	Energiavarastot.....	55

2. UUSIUTUVA SÄHKÖENERGIA

Tämän osion tavoitteena on antaa perustiedot eri sähköntuotantotapojen ominaispäästöistä ja sen jälkeen keskittyä erityisesti uusiutuvaan sähköenergian tuotantoon. Osiossa käsitellään uusiutuvaa sähköenergian tuotantoa ja erityisesti vesivoimaa, aurinkoenergia, tuulivoimaa, pienitehoisia vesivoimaratkaisuja, geotermistä energiaa, biomassaa sekä polttonkennoja. Lopussa on myös lyhyt katsaus energiavarastoihin. Tavoitteena on, että tämän jälkeen opiskelijalla on perustiedot erilaisista uusiutuvan sähköenergian tuotantomuodoista ja niiden toiminta-periaatteista.

Tämän osion teksti perustuu oppikirjan lukuun 4, sekä luvun 6 osiin: 6.1, 6.2.1, 6.2.2, 6.2-6.2.13, 6.3 (ei mekaniikan yksityiskohtia), 6.4, 6.5 sekä 6.6. Luvussa 6.6 liittyviin kemiallisten reaktioiden yksityiskohtia ei käsitellä tarkemmin. Järjestystä on oppikirjaan verrattuna muutettu niin, että kaikki vesivoimaan liittyvät aiheet on käsitelty luvussa 2.3 eli siihen on yhdistetty oppikirjan luku 4 sekä luku 6.3. Tekstiin on lisätty myös lukuisia linkkejä erilaisille www-sivuille. Ne on tarkoitettu oheislukemiseksi asiasta kiinnostuneille eikä niissä esitettyjä asioita edellytetä kurssin tentissä. Jos linkit eivät toimi niin ilmoitathan niistä kurssin opettajille.

2.1.Sähkön tuotantomuotojen ympäristövaikutukset

Tässä tekstissä ei ole tarkoituksena käsitellä ilmastonmuutosta ja hiilidioksidipäästöjä laajasti. Ilmastonmuutokseen liittyvää materiaalia löytyy runsaasti eri lähteistä, ja osa niistä liittyy myös eri maiden ja maanosien poliittisiin tavoitteisiin ja sitoumuksiin. Laajimmin koko kokonaisuutta käsittelee kansainvälinen ilmastopaneeli IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change, joka on YK:n alainen hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli. Sen työryhmän III vuonna 2014 julkaisema raportti [Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change](#) käsittelee myös eri sähköenergian tuotantomuotoja.

Raportin taulukossa sivulla 1335 on listattu elinkaaripäästöt ($\text{gCO}_2\text{eq/kWh}$) ja sivulla 538 on käyty lukuja laajemmin läpi. Raportissa mainitut elinkaaripäästöt löytyvät taulukosta 2.1. Sähköntuotannon päästöjä verrattaessa käytetään CO_2 päästöjen ekvivalentista määrää suhteessa tuotettuun energiaan ja vertailuarvot ovat tavallisimmin g/kWh tai kg/MWh .

Vesivoiman suuri vaihteluväli johtuu siitä, että projektit vaihtelevat keskenään suuresti. Vesivoimaan liittyvä fossiilisten polttoaineiden poltto ja sementin tuotanto vaihtelee raportin mukaan 3-40 gCO_2/kWh välillä ja metaanipäästöt orgaanisen aineen hajoamisesta vaihtelevat 20-2000 gCO_2/kWh . Eli vesialtaiden vaikutus voi olla todella suuri. Tuuli- ja aurinkovoiman osalta käyttökerroin taas vaikuttaa merkittävästi päästöihin.

Taulukko 2.1 Eri sähköntuottomuotojen hiilidioksidipäästöt gCO₂eq/kWh Joitakin termejä, Coal-PC (pulverized hard coal), CCGT (Combined Cycle Gas Turbine), CCS (carbon capture and storage), IGCC (integrated coal gasification combined cycle)

Table A.III.2 | Emissions of selected electricity supply technologies (gCO₂eq/kWh)

Options	Direct emissions	Infrastructure & supply chain emissions	Biogenic CO ₂ emissions and albedo effect	Methane emissions	Lifecycle emissions (incl. albedo effect)
	Min/Median/Max	Typical values			Min/Median/Max
Currently Commercially Available Technologies					
Coal—PC	670/760/870	9.6	0	47	740/820/910
Gas—Combined Cycle	350/370/490	1.6	0	91	410/490/650
Biomass—cofiring	n.a. ⁱ	–	–	–	620/740/890 ⁱⁱ
Biomass—dedicated	n.a. ⁱⁱ	210	27	0	130/230/420 ⁱⁱⁱ
Geothermal	0	45	0	0	6.0/38/79
Hydropower	0	19	0	88	1.0/24/2200
Nuclear	0	18	0	0	3.7/12/110
Concentrated Solar Power	0	29	0	0	8.8/27/63
Solar PV—rooftop	0	42	0	0	26/41/60
Solar PV—utility	0	66	0	0	18/48/180
Wind onshore	0	15	0	0	7.0/11/56
Wind offshore	0	17	0	0	8.0/12/35
Pre-commercial Technologies					
CCS—Coal—Oxyfuel	14/76/110	17	0	67	100/160/200
CCS—Coal—PC	95/120/140	28	0	68	190/220/250
CCS—Coal—IGCC	100/120/150	9.9	0	62	170/200/230
CCS—Gas—Combined Cycle	30/57/98	8.9	0	110	94/170/340
Ocean	0	17	0	0	5.6/17/28

Notes:

- ⁱ For a comprehensive discussion of methodological issues and underlying literature sources see Annex II, Section A.II.9.3. Note that input data are included in normal font type, output data resulting from data conversions are bolded, and intermediate outputs are italicized.
- ⁱⁱ Direct emissions from biomass combustion at the power plant are positive and significant, but should be seen in connection with the CO₂ absorbed by growing plants. They can be derived from the chemical carbon content of biomass and the power plant efficiency. For a comprehensive discussion see Chapter 11, Section 11.13. For co-firing, carbon content of coal and relative fuel shares need to be considered.
- ⁱⁱⁱ Indirect emissions for co-firing are based on relative fuel shares of biomass from dedicated energy crops and residues (5-20%) and coal (80-95%).
- ^{iv} Lifecycle emissions from biomass are for dedicated energy crops and crop residues. Lifecycle emissions of electricity based on other types of biomass are given in Chapter 11, Figure 7.6. For a comprehensive discussion see Chapter 11, Section 11.13.4. For a description of methodological issues see Annex II of this report.

Myös esim. Asdrubali et al.: ["Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization"](#) on tehnyt samankaltaisen katsauksen päästöihin ja päätynyt saman suuruusluokan lukuihin. Tässä työssä vesivoiman päästöt vaihtelevat välillä 2,2-74,8 gCO₂/kWh.

Vuoteen 2050 saakka ulottuvia arvioita on tehty eri skenaarioilla artikkelissa Pehl et al.: ["Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling"](#), jossa esimerkiksi CCS on otettu huomioon. Tämän artikkelin luvut toki eroavat jonkin verran IPCC:n luvuista.

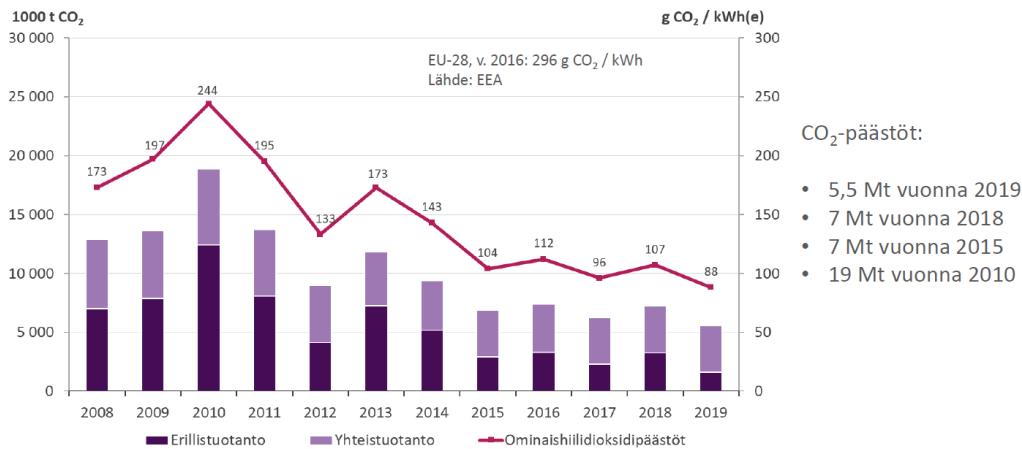
Usein pohditaan myös sitä, kuinka monta vuotta kuluu, jotta tuotanto korvaa valmistuksen aikaiset päästöt. IPCC listaa myös edellä mainitussa raportissaan sivulla 1333 tuotantolaitosten keskimääräiset eliniät, jotka löytyvät taulukosta 2.2. Jos näillä ja taulukon 2.1 (mediaani)

päästökertoimilla laskee vuosissa kuluneen ajan, jotta uusiutuvan laitoksen elinkaaren päästöt on korvattu, päädytään taulukon 2.3 lukuihin. Esimerkiksi kun tuulivoimalla korvataan kivihiiltä laskelma on seuraava: $11 \text{ gCO}_2/\text{kWh} * 25\text{a} / (820 \text{ gCO}_2/\text{kWh}) = 0,34$ eli erittäin lyhyt aika. Vastaavat laskelmat on tehty myös muille uusiutuville ja kun ne korvaavat myös kaasuturbiineja (CCGT).

Taulukko 2.2: taulukossa 2.3 käytettävät lähtöarvot, IPCC:n raportista		
	Käyttöajalle lasketut CO ₂ päästöt kg/MWh	Käyttöikä, vuosia
Hiili (PC)	820	40
CCGT	490	30
Ydinvoima	12	60
Tuuli (maalla)	11	25
PV, aurinkosähkö, isotehoinen	48	25
Vesivoima	24	50

Taulukko 2.3. Uusiutuvien tuotantotapojen käyttöaika vuosissa, jotta se korvaa hiilipohjaisen tuotannon		
Tuotantotapa	Hiili (PC)	CCGT
Tuuli (maalla)	0,34	0,56
PV, aurinkosähkö, isotehoinen	1,46	2,45
Vesivoima	1,46	2,45

Suomen sähköntuotannon CO₂ päästöjen tilanne löytyy mm. Fingridin päivittyvästä [tietokannasta](#). Esimerkiksi marraskuussa 2020 se oli keskiarvona 72 gCO₂/kWh. Suomen päästöjen kohtuullisen alhaiseen määrään vaikuttaa vesi- ja ydinvoiman suhteellisen suuri osuus (v. 2019 14 % ja 27 %) ja jatkossa myös tuulienergian osuus (v. 2019 7 %) alkaa olla merkittävä. [Energiateollisuus ry:n](#) ylläpitämän tilastotiedon mukaan Suomen sähköntuotannon hiilidioksidipäästöt ovat vähentyneet edelliset kymmenen vuotta vuoden 2010 huipun jälkeen kuten kuvasta 2.1 käy ilmi. Suurin syy on ollut hiilen käytön merkittävä vähentyminen.



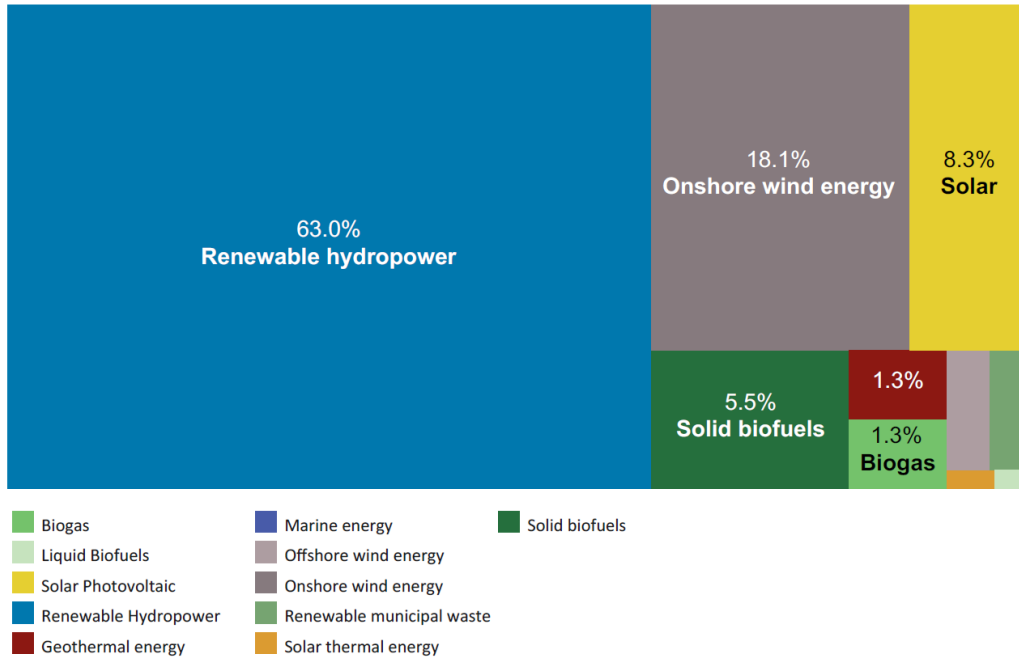
Kuva 2.1 Suomen sähköntuotannon CO₂ päästöt kymmenen vuoden ajalta.

2.2. Uusiutuvan sähköenergian tuotannon kehitys

Uusiutuva energian tuotanto on kasvanut merkittävästi viime vuosien aikana ja kasvu jatkuu merkittävänä. Tähän on vaikuttanut erilaiset kansainväliset ja kansalliset rajoitukset ja määräykset, joilla on asetettu rajoituksia hiilen ja öljyn käyttöön energiantuotannossa. Teknisen kehityksen ansiosta on myös niin, että monissa tapauksissa uusiutuvalla energialla tuotettu sähkö on jo hyvin kilpailukykyistä muihin vaihtoehtoihin verraten ja joissain tilanteissa se on myös halvin vaihtoehto.

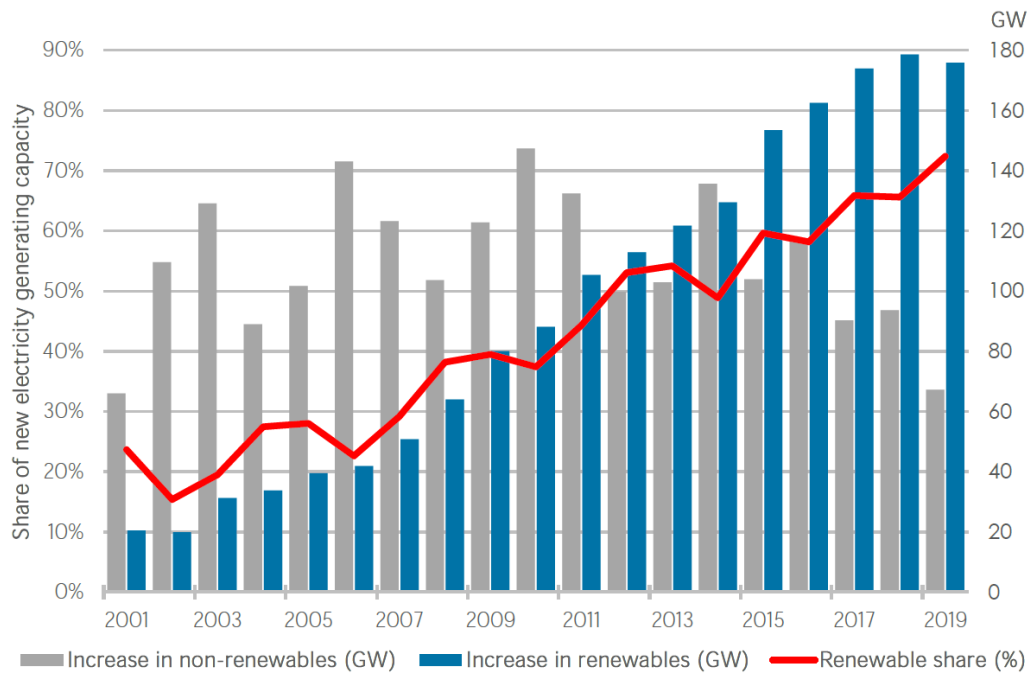
Maailmanlaajuinen organisaatio IRENA, International Renewable Energy, seuraa uusiutuvan energian tuotannon kehitystä ja ajantasaisen tilanteen löytää aina organisaation verkkosivulta linkin [Data & Statistics \(irena.org\)](https://www.irena.org/Data-Statistics) takaa. Eri valikoista voi valita eri tuotantomuotoja ja eri maantieteellisiä asioita kiinnostuksen mukaan. Erityisesti kannattaa seurata asennetun kapasiteetin (Installed capacity, MW, GW) ja tuotetun energian (Produced energy, GWh) kehittymistä eri vuosina. Asennettu kapasiteetti kertoo sen tehomäärän, joka asennetuilla laitteistoilla voidaan tuottaa sähköenergiaa maksimissaan ja silloin yleensä esimerkiksi tuuli- tai aurinko-olosuhteet ovat parhaimmillaan. Koska näin ei kuitenkaan käytännössä ole ympäri vuoden joka ajanhetkenä, niin tuotettu energia on pienempi kuin mitä tällä maksimiteholla pystyttäisiin tuottamaan.

IRENAn mukaan vuonna 2017 Suomen koko primäärienergian kulutuksesta uusiutuvien osuus on 36 %. Samana vuonna Suomen energian käytöstä 31 % oli sähköenergiaa.

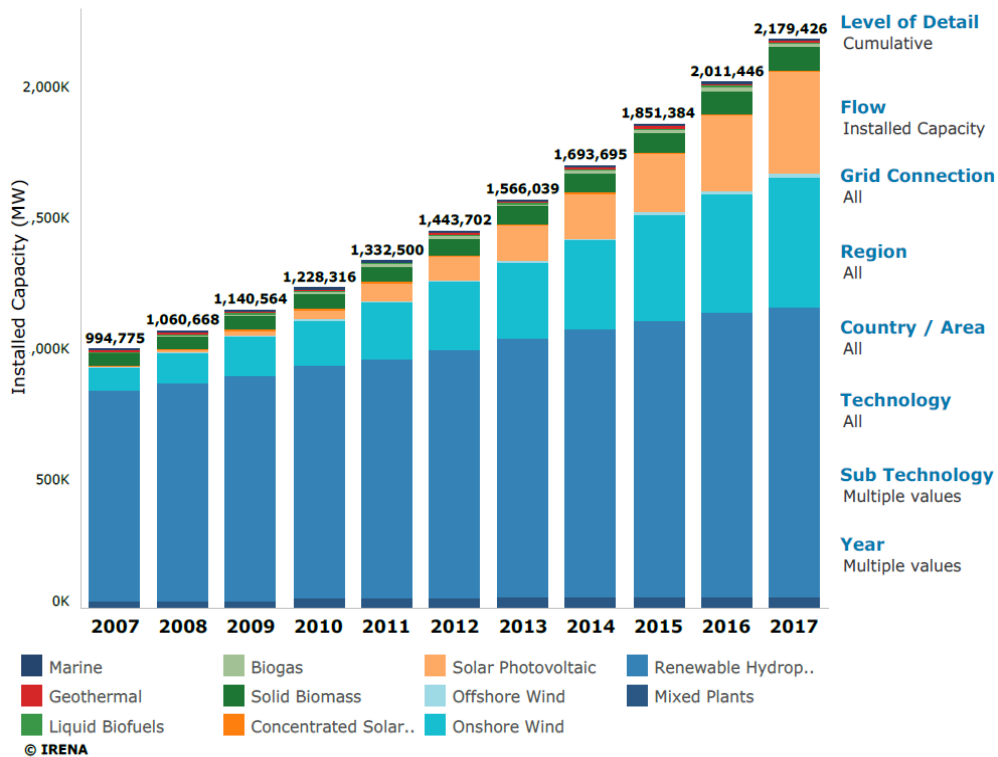


© IRENA

Kuva 2.2 Eri uusiutuvan energian tuotantomuotojen osuus koko maailman uusiutuvasta sähköenergiatuotannosta vuonna 2018.



Kuva 2.3 Koko maailmassa uusiutuvan sähköenergian tuotantokapasiteetin osuus on kasvanut koko ajan ja noin vuodesta 2011 lähtien se on ollut suurempi kuin ei-uusiutuvan.



Kuva 2.4 Eri uusiutuvan sähköenergian tuotantomuotojen asennetun kapasiteetin kehitys koko maailmassa.

2.3. Vesivoima

Vesivoiman hyödyntämisessä veden sisältämä potentiaali- tai liike-energia muutetaan voimalaitoksissa sähköenergiaksi. Periaatteessa kyseessä on hyvin samantapaisesta muunnoksesta kuin myöhemmin käsiteltävässä tuulivoimassakin. Veden tiheys on kuitenkin ilmaa merkittävästi suurempi, joten samankokoisilla laitteilla saavutettavat tehotasot ovat paljon suurempia. Lisäksi veden avulla energiaa voidaan varastoida järviin tai altaisiin. Ensimmäiset sähköä tuottava vesivoimala on rakennettu 1882 USA:ssa, Wisconsinissa ja sen teho oli vain 12,5 kW. Sähköntuotannon alku vesivoimalla olikin pääasiassa pieniä muutaman kuluttajan käyttöön rakennettuja voimaloita. Vesivoimaa toki on käytetty tätäkin ennen hyvin monenlaisissa mekaanisissa järjestelmissä, mm. myllyissä ja pumpuissa. Ensimmäisiä tietoja vesirattaan käyttämisestä löytyy jo ajalta 4000 ennen ajanlaskun alkua.

2.3.1. Allasvesivoima eli säännöstelyvesivoima

Allasvesivoima eli säännöstelyvesivoima on vesivoiman yleisin muoto ja sopii hyvin suuri-tehoiseen sähköenergian tuotantoon, ja maailman suurimmat voimalat ovatkin tämäntyyppisiä. USA:ssa 1942 käyttöön otettu Grand Coulee Dam -voimala, kuva 2.5, oli pitkään maailman suuri, mutta Amazonin alueelle Etelä-Amerikassa on toteutettu kolme suurta voimalaa ja sen jälkeen todennäköisesti pitkään suurimpana pysyvä on Kiinassa 2010 käyttöön otettu Kolmen rotkon pato (Three-Gorges Dam).

Taulukko 2.4: Maailman suurimmat vesivoimalaitokset

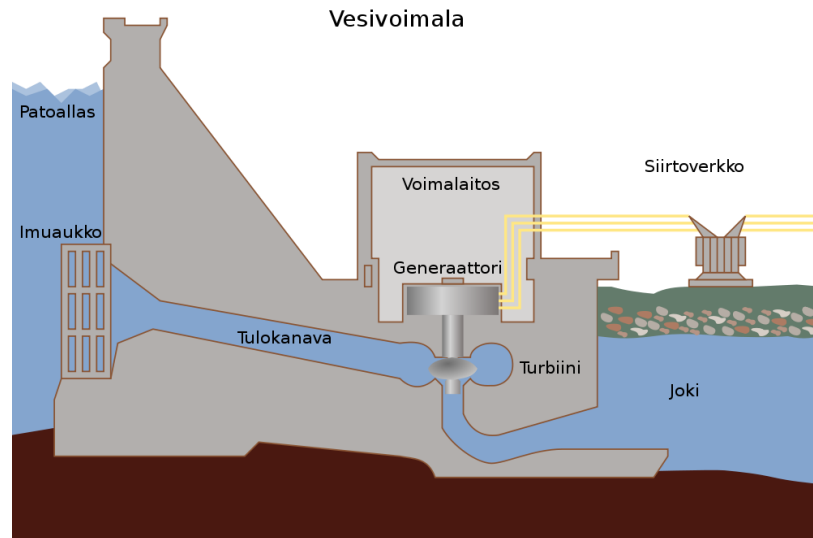
World's Largest Hydroelectric Power Plants			
Name of Dam	Location	Capacity (GW)	Year of Completion
Three-Gorges	China	22.5	2010
Itaipu	Brazil/Paraguay	14	1983
Guri	Venezuela	10	1986
Tucuruí	Brazil	8.37	1984
Grand Coulee	Washington	7.0	1942
Sayano-Shushenskaya	Russia	6.4	1989
Krasnoyarsk	Russia	6	1968
Churchill Falls	Canada	5.43	1971
La Grande 2	Canada	5.33	1979
Bratsk	Russia	4.5	1961



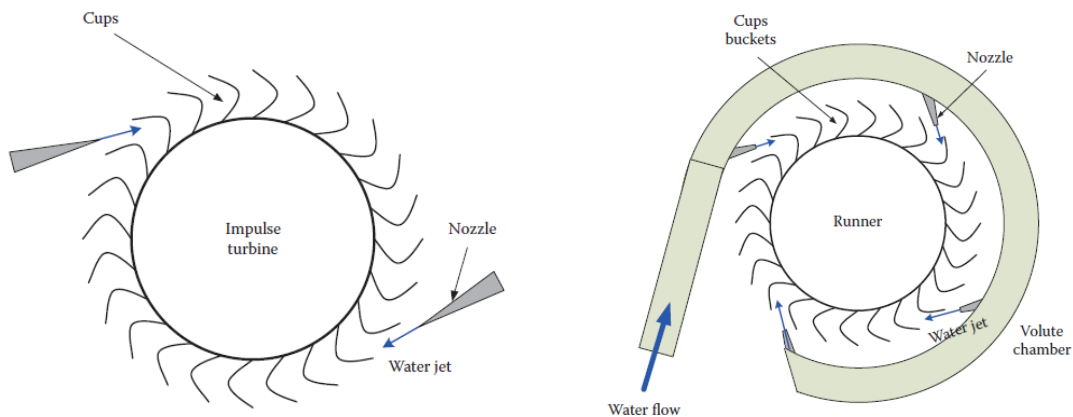
Kuva 2.5 Grand Coulee Dam ja siihen liittyvä tekojärvi USAssa lähellä Kanadan rajaa oli pitkään maailman suurin vesivoimalaitos (7 GW) ja se on rakennettu jo 1942. Padon korkeus on 170 m ja pituus 1,6 km.

Vesivoimalan yksinkertaistettu periaatekuva on esitetty kuvassa 2.6. Ylempänä olevan patoaltaan vesi johdetaan tulokanavaa pitkin turbiiniin, joka pyörittää generaattoria. Turbiinien toimintaperiaatteita on kaksi: impulssi- ja reaktioturbiini. Newtonin toinen laki (voima riippuu liikemäärän muutoksesta ja massan ollessa vakio kiihtyvyydestä) kuvaa impulssiturbiinin energiansiirtoa. Vesivirran paine (potentiaalienergia) muutetaan suuttimella liike-energiaksi. Kuvassa 2.6 suurinopeuksinen vesisuihku osuu turbiinin lavoissa oleviin kuppeihin, ja suihkun suunta muuttuu. Suihku aiheuttaa lapaan impulssivoiman, joka vaikuttaa tietyn matkan tehden työtä turbiiniin ja siten antaen sille energiaansa. Tarkempi matemaattinen analyysi on esitetty oppikirjan sivuilla 58-61 ja se jätetään tässä oheislukemiseksi asiasta kiinnostuneille. Optimitilanteessa koko vesisuihkun liike-energia muuttuu turbiinia pyörittäväksi voimaksi. Pelton-turbiini toimii impulssiperiaatteella ja se sopii pienille virtaamille ja suurille putouskorkeuksille.

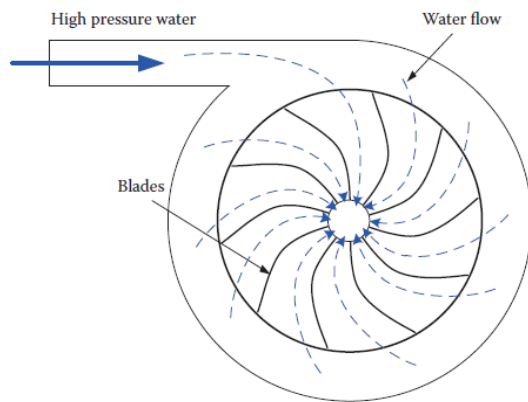
Toisin kuin impulssiturbiini, kuvan 2.8 reaktioturbiini on kokonaan veden täyttämä. Newtonin kolmas laki (voima ja vastavoima) kuvaa reaktioturbiinin energiansiirtoa. Vesivirran paine laskee sen vaikuttaessa turbiinin lapoihin ja luovuttaa energiaa turbiinille. Francis- ja Kaplan-turbiinit toimivat tällä periaatteella. Kaplan-turbiini soveltuu suurille virtaamille ja pienille pudotuskorkeuksille. Turbiinin juoksupyörä on potkurin tai aksiaalipumpun juoksupyörän muotoinen. Francis-turbiinit soveltuvat keskisuurille putouskorkeuksille, 20 m – 500 m. Niiden juoksupyörä muistuttaa keskipakopumpun juoksupyörää.



Kuva 2.6 Vesivoimalan yksinkertaistettu periaatekuva.



Kuva 2.7 Impulssiturbiinin toimintaperiaate ja impulssiperiaatteella toimiva Pelton-turbiini.



Kuva 2.8 Reaktiiturbiinin periaate ja siihen perustuva Francis- ja Kaplan turbiinien valokuvat.

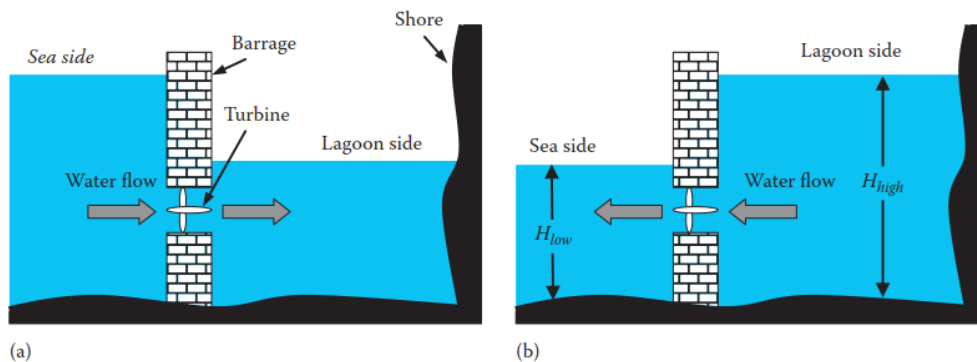
Suomessa vesivoimalaitosten tehot vaihtelevat alle yhdestä megawattista 170 megawattiin. Valtaosa Suomen vesivoimalaitoksista on joki- tai säännöstelyvoimalaitoksia. Vesivoimalla tuotettiin 1950-luvulla lähes 90 prosenttia maamme sähköstä. Muun sähköntuotannon lisäntyessä vesivoiman osuus kokonaistuotannosta on vuosien mittaan vähentynyt ja esimerkiksi vuonna 2018 vesivoiman osuus oli 19 %. Ensimmäinen voimalamme avattiin 22. syyskuuta 1891 Tampereella, ja rakentamisen tahti kiihtyi edelleen 1900-luvulle tultaessa. Suomen varsinainen sähköistäminen alkoi, kun Imatrankosken voimala valmistui 1929, kuva 2.9. Nykyään Suomessa on noin 250 vesivoimalaa ja niiden yhteinen kapasiteetti on noin 3,2 GW.



Kuva 2.9 Imatrankosken voimalaitoksen pato

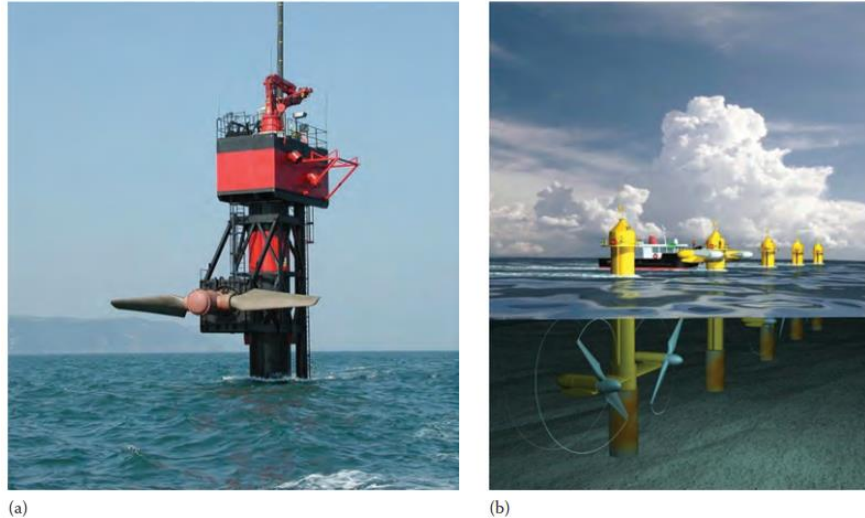
2.3.2. Vuorovesivoima

Valtamerien vuorovesi nostaa ja laskee vedenpintoja tavallisesti nolasta noin 1,3 metriin. Joillakin rannikoilla on vuoroveden nousuveden ja laskuveden välinen korkeusero useita metrejä. Tämä on mahdollista matalien rannikoiden suppeneissa lahdissa. Silloin vuoroveden nousut ja laskut aiheuttavat merivirtauksia kohti ja pois rannikolta.



Kuva 2.10 Vuorovesivoimalan toiminta nousu- ja laskuveden aikaan.

Vuorovesivoimaloita on kahdenlaisia. Vanhimmat voimalat (engl. tidal range power plant) vangitsevat kuvassa 2.10 esitetyllä tavalla nousuveden lahden suuhun rakennetun padon taakse tekoaltaaseen, joka jää padon taakse lahden pohjukkaan. Kun laskuveden aikana meriveden pinta laskee, voidaan altaassa oleva vettä päästää turbiinien läpi takaisin meteen. Uudempi vesi-voimala (engl. tidal stream power plant) toimii vain veden virtauksen eli veden liike-energian avulla. Periaate on siten sama kuin tuulivoimalalla.

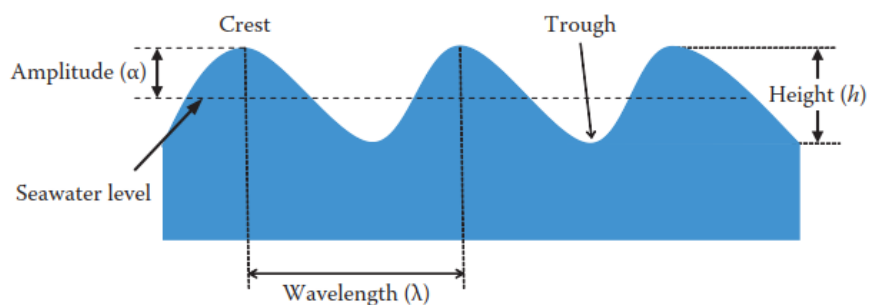


Kuva 2.11 Veden liike-energiaa voidaan muuttaa sähköksi saman tapaisella järjestelyllä kuin tuulivoimalassakin.

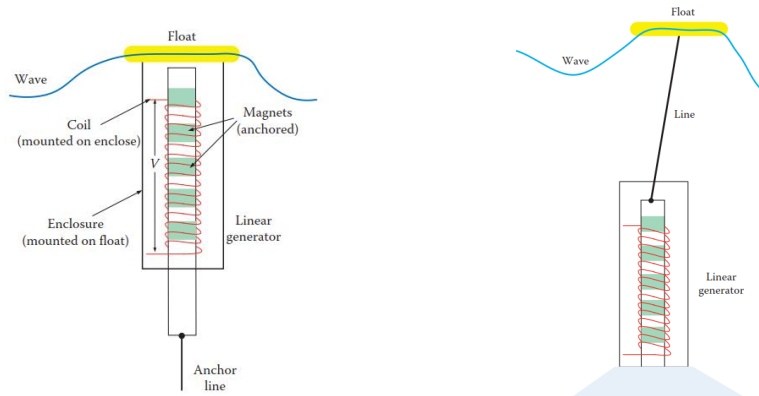
Vuorovesivoimaa tuottavat toistaiseksi vain muutamat laitokset. Niiden yhteinen tuotantoteho maailmassa oli vuonna 2015 noin 536 megawattia (MW), josta 90 % eli 494 MW tuotetaan Etelä-Korean Shiwan ja Ranskan La Rancen voimalassa. Kummatkin voimalat hyödyntävät meriveden virtauksen liike-energiaa samalla tavalla kuin jokivoimalaitokset, joissa on sääntelyssä apuna matala patoallas.

2.3.3. Aaltovoima

Tuuli nostaa vedenpinnalle aallokon, johon on sitoutunut osa tuulen liike-energiasta, kuva 2.12. Veden aaltoliike sisältää suhteellisen paljon energiaa, mutta toistaiseksi sen valjastaminen vesivoimaksi on ollut vaikeaa ja tehotonta. Portugalin pohjoisrannikolla on ollut toiminnassa kokeilu- luonteinen 21 MW:n pienvoimala vuodesta 2008 alkaen.[28]



Kuva 2.12 Aaltovoimassa käytetään hyväksi tuulen nostaman aallokon energiaa.



Kuva 2.13 Vedenpinnalla oleva poiju muttaa aallon liikkeen lineaarisella generaattorilla sähköenergiaksi. Generaattori voi olla kiinnitettyä poijuun tai meren pohjaan.



Kuva 2.14 Poijuun perustuvan aaltovoimalan koelaitos.

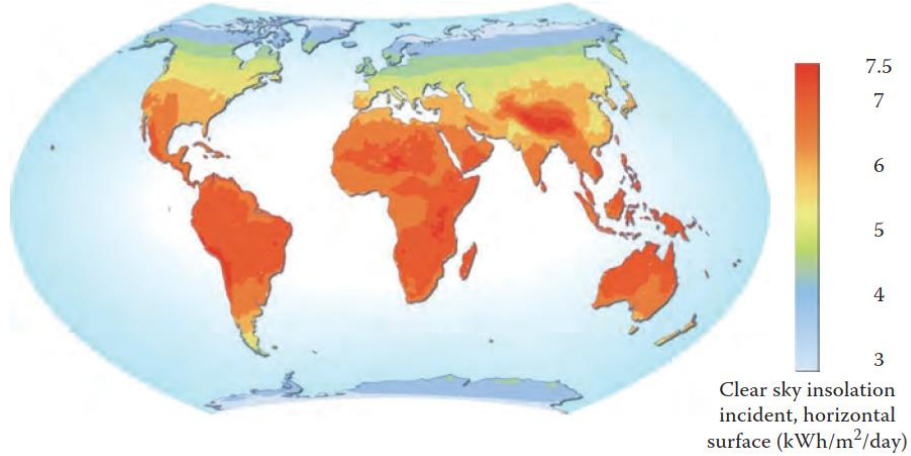
Suomessa aaltoenergiaa on tarjolla vain vähän. Siksi onkin hieman yllättävää, että täälläkin on asiaan tartuttu omalla kehitystyöllä. [Pingviiniksi](#) kutsutun aaltovoimalan teho on noin 0,5 MW ja ensimmäinen voimala on myyty Skotlantiin vuonna 2019.

2.4. Aurinkoenergia

Auringon säteily avaruudessa on jopa $1\,366\text{ W/m}^2$, mutta maan pinnalle siitä päätyy vain osa, paikasta ja ajasta riippuen 5-70 %, eli vaihtelu on erittäin suuri. Säteilyn vaimenemiseen on useita eri syitä. Ilmakehä absorboi säteilyä ja säteilyä myös heijastuu ilmassa olevista partikkeleista. Maan pinnalla säteilyn määrä riippuu vuoden ja vuorokauden ajasta sekä paikasta maapallolla. Suomessa auringon vuosittainen säteilyn määrä on n. $1\,000\text{ kWh/m}^2$. Vaikka vaihtelu on suurta niin on kuitenkin syytä huomata, että yhden tunnin aikana maapallon pinnalle tulee auringon säteilyenergiaa enemmän kuin koko ihmiskunta kuluttaa energiaa vuodessa

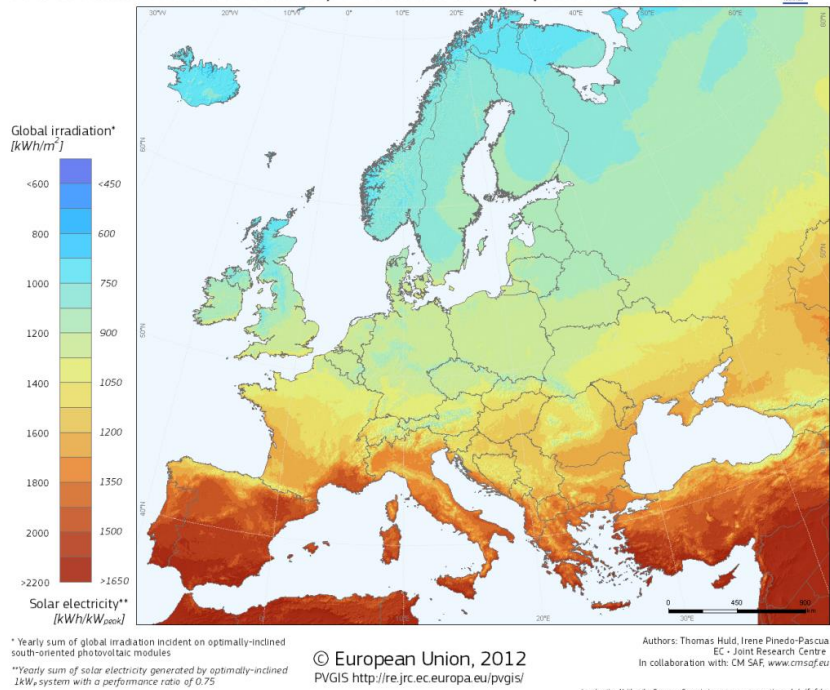
2.4.1. Säteilyn intensiteetti

Auringon säteilyn intensiteetti vaihtelee hyvin voimakkaasti. Suurimmillaan se on päiväntasaajan lähellä olevissa maissa keskipäivällä, kun taivas on kirkas.

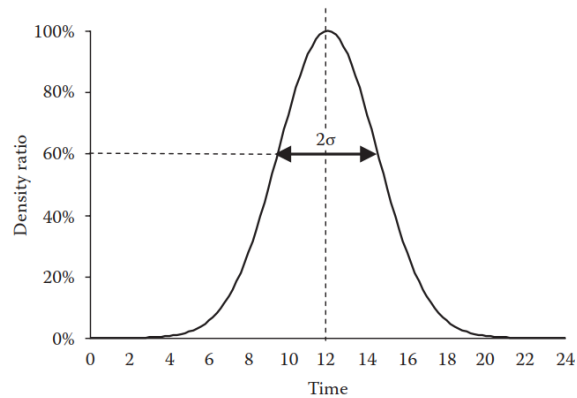


Kuva 2.15. Vuosittainen keskiarvoinen aurinkoenergian säteily maailmanlaajuisesti.

Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries



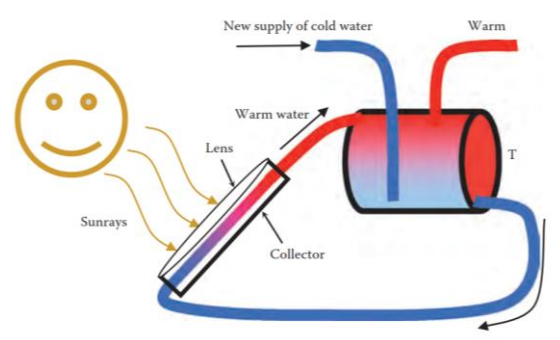
Kuva 2.16 Auringon säteilyn energiamäärä Euroopassa. Kuvasta on hyvä huomata, että Etelä-Suomen aurinko-olosuhteet vastaavat mm. Pohjois-Saksaa.



Kuva 2.17 Tyypillinen auringon säteilyn jakauma yhden vuorokauden aikana. Säteily on voimakkaimmillaan keskipäivän aikana.

2.5. Aurinkokeräimet

Etelä-Euroopassa ja yleensäkin päiväntasaajaa lähellä olevissa maissa hyvin perinteinen ja pitkään käytössä ollut tapaa lämmittää vettä on käyttää aurinkokeräimiä. Ne on asennettu tyypillisesti rakennusten katoille. Niissä vettä kierrätetään tummapintaisissa keräisimissä, jotta auringon säteilyn sisältämä energia absorboituisi niihin mahdollisimman hyvin ja lämmittäisi veden. Järjestelmään liittyy myös sopiva varaaja vedelle. Järjestelmä toimii usein painovoimaan perustuen eli niissä ei ole erillistä pumppua veden kiertoa varten.



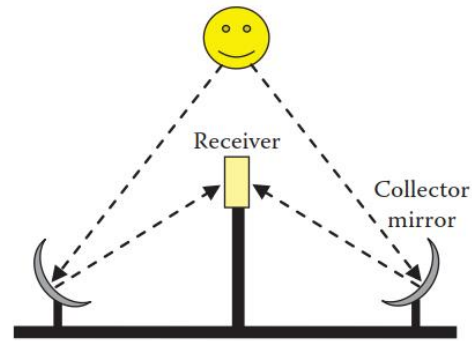
Kuva 2.18 Tyypillisesti rakennusten katolle asennettava aurinkokeräin ja periaatekuva sen toiminnasta.

2.6. Integroidut keräinjärjestelmät

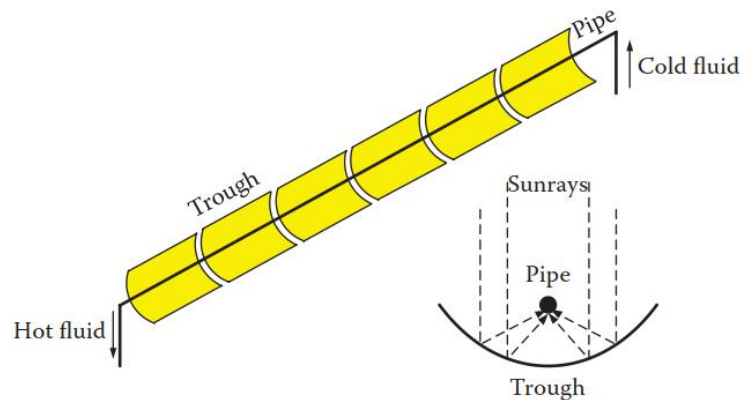
Isommissa järjestelmissä käytetään erilaisia peilirakenteita, joiden avulla auringon säteily kohdistetaan mahdollisimman hyvin yhteen pisteeseen. Näin voidaan saada aikaan hyvinkin korkeita lämpötiloja. Viimekädessä näissäkin lämmitetään tai höyrytetään vettä ja sitä käytetään sellaisenaan hyväksi tai esimerkiksi pyöritetään turbiinia ja tuotetaan sähköä generaattorilla.



(a)



(b)

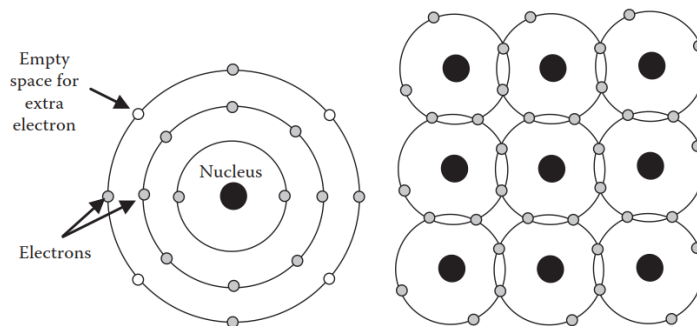


Kuva 2.19 Erilaisia peilirakenteita, joiden avulla auringon säteily voidaan kohdistaa yhteen pisteeseen ja lämmittää järjestelmässä kiertävää nestettä.

2.7. Aurinkosähköjärjestelmät

Valo koostuu fotoneista, joiden energia saadaan Planckin vakion ja taajuuden tulona. Aktiiviset aurinkosähköjärjestelmät perustuvat siihen, että tuo auringon säteilyn sisältämä energia saadaan muutettua suoraan sähköksi nk. valosähköisen ilmiön avulla. Sen havaitsi ensimmäisenä ranskalainen fyysikko Edmond Becquerel 1839 ja vähän myöhemmin Heinrich Hertz teki joitain uusia havaintoja 1887. He havaitsivat, että tietyt materiaalit pystyvät absorboimaan fotonien energian. Vuonna 1905 Albert Einstein kehitti valosähköilmiölle tarkan analyysin olettamalla, että valonsäde koostuu pienistä energiapaketeista, joita hän kutsui fotoneiksi tai kvanteiksi. Näihin havaintoihin perustuva aurinkokenno kehitettiin noin 1900-luvun puolivälissä Bellin laboratoriossa USA:ssa.

Aktiiviset aurinkosähköjärjestelmät perustuvat piipohjaisiin puolijohteisiin samaan tapaan kuin elektroniikan komponentit ja laitteet. Piissä on neljätoista elektronia, jotka ovat järjestäytyneet kolmelle energiatasolle kuvan 2.20 tapaan. Kiinteässä aineessa elektroneja kuvataan niiden energialla. Elektronit sijoittuvat energia-asteikolla tietyille energiaväleille, joita kutsutaan energiavöiksi. Korkein matalassa lämpötilassa täysi vyö on valenssivyö ja sillä olevat elektronit sitovat atomeja toisiinsa kiinni, eli ne ovat sidoselektroneja. Näin muodostuu aineen kiderakenne.



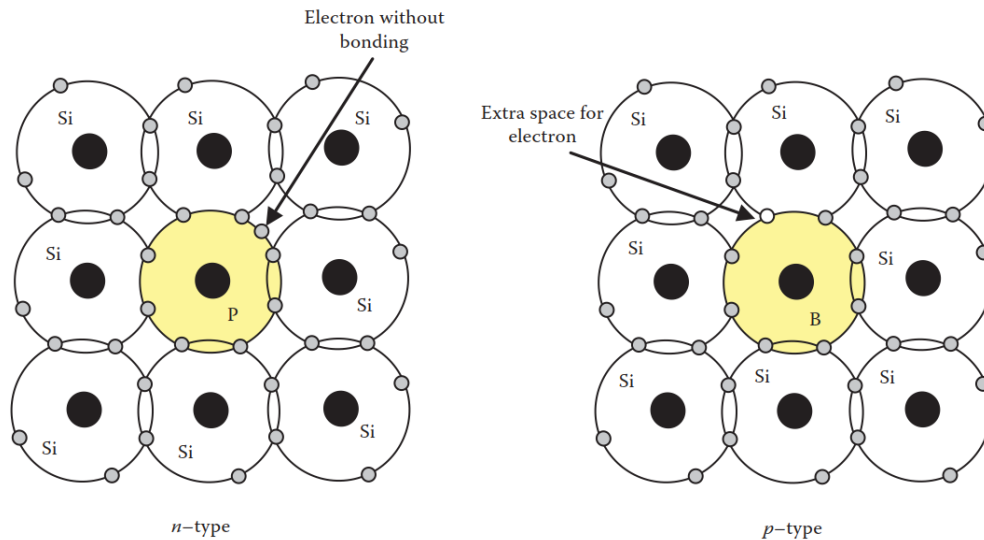
Kuva 2.20 Yksi pii-atomi ja useista pii-atomeista muodostuva kiderakenne.

Puolijohteissa ja eristeissä valenssivyö on yleensä täynnä eli kaikilla ulomman vyön paikoilla on elektroni. Tällaisella vyöllä elektroni ei kykene liikkumaan, koska nopeus nostaisi sen energiaa, mutta vapaita energiatiloja ei ole käytettävissä. Jos lämpövarähtely tai muu syy poistaa elektronin valenssivyöstä, jää vyöhön tyhjä paikka, jota kutsutaan aukoksi. Aukko on sähkövaraukseltaan positiivinen ja se kykenee liikkumaan ja kuljettamaan sähkövirtaa.

Elektroni pyrkii spontaanisti siirtymään alemmille energiatiloille eli vyökuvassa alaspäin. Jos elektroni siirtyy energia-asteikolla alempana olevan aukon tilalle, niin aukko nousee ylöspäin. Aukot siis pyrkivät spontaanisti kellumaan energia-asteikolla ylöspäin. Näin aukot sijaitsevat valenssivyön yläreunassa, kun taas elektronit ovat vyön alareunassa.

Piin sähköisiä ominaisuuksia voidaan muuttaa lisäämällä siihen epäpuhtauksia. N-tyyppin puolijohteessa piihin on lisätty esimerkiksi fosfori-atomeja, joilla on ylimääräinen elektroni uloimmalla valenssivyöllä, kuva 2.21. Näin kiderakenteeseen jää yksi ylimääräinen elektroni, joka voi liikkua. Vastaavasti p-tyyppin puolijohteessa piihin on lisätty esimerkiksi Booria, jolla on yksi elektroni vähemmän uloimmalla vyöllä. Näin materiaaliin jää vajuus elektroneista eli aukko, johon vapaa elektroni voi rekombinoitua. Kun n- ja p-tyyppin puolijohteet yhdistetään, saadaan komponentti nimeltään diodi. Liitoksessa n-tyyppin piin elektronit kulkevat kohti p-tyyppin aukkoja ja päinvastoin. Näin syntyy tyhjennysalue, jossa ei ole vapaita varauksenkuljettajia. Tämä sama p-n liitos on myös aurinkokennojen tärkein osa.

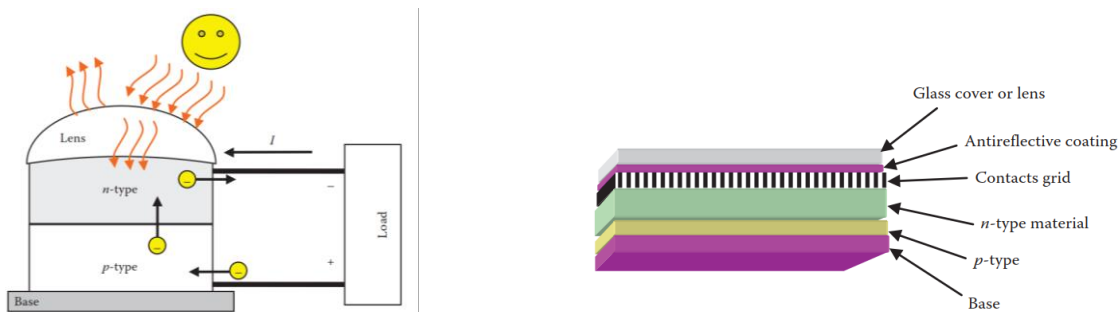
Kuvan 2.22 aurinkokenno muodostuu pohjalevyn päälle olevasta p-tyyppin puolijohteesta ja sen päällä olevasta n-tyyppin kerroksesta. Kaikkein päällimmäisenä on lasista tehty linssi, jonka tarkoituksena on ohjata valon säteet mahdollisimman hyvin puolijohteisiin. Samalla se suojaa rakennetta ympäristön vaikutuksilta. Valon osuessa rakenteeseen se irrottaa elektroneja ja kun kennon rinnalle on kytketty kuorman niin elektronit pääsevät kulkemaan kuorman kautta p-tyyppin alueelle ja sieltä takaisin n-alueelle. Näin syntyy virta, joka kulkee siis vastasuuntaan elektronien kulkua ja tämä johtuu aikoinaan tehdystä virran suunnan määrittelystä.



Kuva 2.21 Pii-kide, johon on lisätty a) fosforia (P), jolloin saadaan N-tyypin puolijohde ja b) Booria (B), jolloin tulos on P-tyypin puolijohde.

2.7.1. Aurinkokenno

Aurinkokennot voidaan jakaa tasapaksuihin levykennoihin (flat-plate photovoltaic, PV), joissa auringonvalo tuottaa suoraan sähköä sekä keskittäviin aurinkokennoihin (Concentrated PV), joissa auringonvalo keskitetään tai tiivistetään sähkön tuotantoa varten.



Kuva 2.22. Aurinkokennon periaate ja kennon keskeisimmät osat

2.7.2. Diodin toimintaperiaate

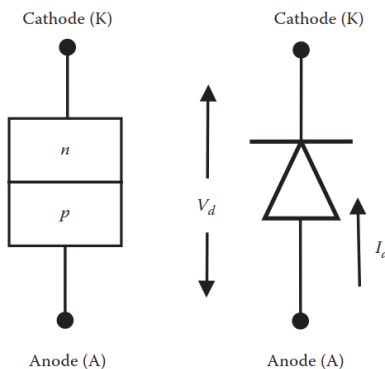
Ideallisen aurinkokennon toiminta voidaan selittää aiemmin kuvatun p-n liitoksen ja diodin toiminnan avulla. Kuvan 2.32 diodin piirrosmerkki kuvaa virran kulkusuuntaa sen läpi. Kun diodi kytketään kuvassa 2.24 esitetyllä tavalla osaksi virtapiiriä, jossa on vaihtojännitelähde, niin virta kulkee vain positiivisen jännitteen puoliskolla. Anodin positiivinen jännite vetää puoleensa n-alueen elektroneja ja vastaavasti katodin negatiivinen jännite vetää puoleensa p-alueen aukkoja. Näin komponentin läpi kulkee myötäsunnassa virta. Jos jännitteen napaisuus kääntyy niin anodin negatiivinen jännite vetää aukkoja kohti anodia ja katodin positiivinen jännite n-alueen elektroneja. Liitokseen syntyy tyhjennysalue, jossa ei ole vapaita varauksenkuljettajia ja ideallisen diodin läpi ei kulje virta. Käytännössä diodin läpi kulkee tällöin hyvin pieni estosuuntainen vuotovirta.

Diodin johtaessa sen yli jää noin 0,5-0,7 V:n jännite ja jännitehäviö kasvaa melko lineaarisesti virran kasvaessa, kuva 2.24. Diodin päästöjännitettä mallinnetaankin usein tuon kynnysjännitteen ja vastuksen yhdistelmänä ja tämä on käytännön sovelluksiin varsin riittävä. Saksalainen fyysikko Walter Schottky on kehittänyt tarkemman mallin, jossa diodin virran ja sen yli vaikuttavan jännitteen riippuvuus on eksponentiaalinen:

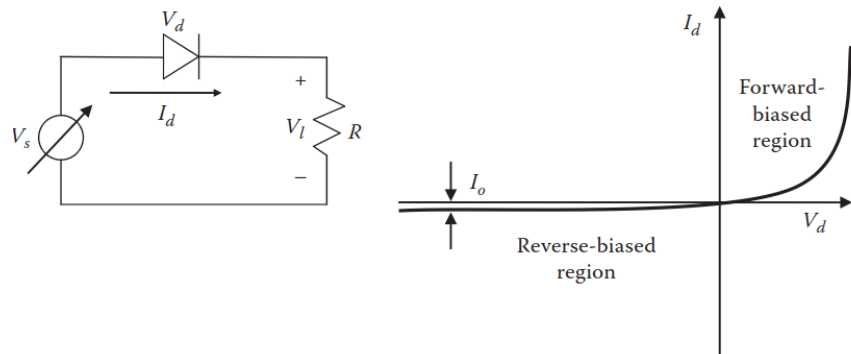
$$I_d = I_o \left(e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right)$$

$$V_T = \frac{kT}{q}$$
(2.1)

jossa I_o on diodin estosuuntainen vuotovirta, V_d on diodin yli oleva jännite, V_T on termien jännite kT/q , T on lämpötila kelvineissä, k on Boltzmanin vakio ($1,380 \cdot 10^{-23}$ J/K) ja q elektronin varaus ($1,602 \cdot 10^{-19}$ As).



Kuva 2.23 Diodi muodostuu P-N liitoksesta, jonka navat ovat anodi ja katodi. Oikeanpuoleisella piirrosmerkillä korostetaan sitä, että virta kulkee komponentin läpi vain yhteen suuntaan.



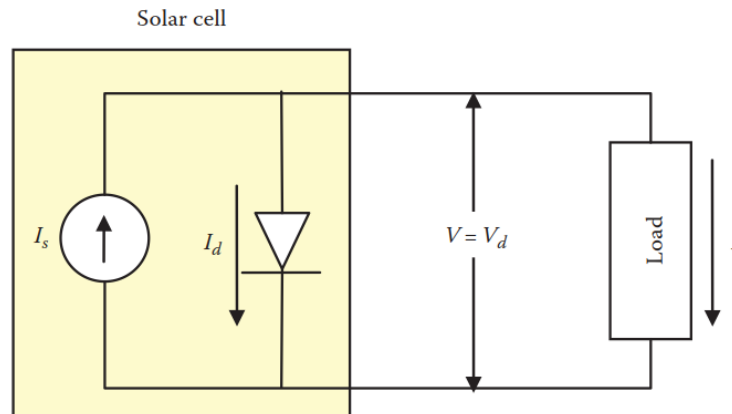
Kuva 2.24 Diodin sisältämässä virtapiirissä virta kulkee vain diodin päästösuuntaan. Diodi ei rajoita virtaa, vaan virran suuruus määräytyy jännitteen ja kuorman mukaan. Estosuunnassa diodin läpi kulkee hyvin pieni vuotovirta.

2.7.3. Ideaalinen aurinkokenno

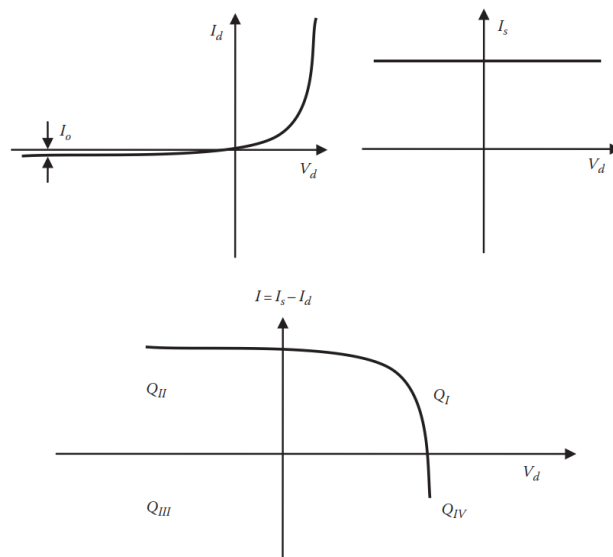
Ideaalisen aurinkokennon malli saadaan, kun edellinen diodin malli yhdistetään virtalähteeseen. Kuvan 2.25 virtalähde I_s kuvaa auringon säteilyn vaikutusta eli virta kasvaa auringon säteilyn kasvaessa. Aurinkokenno voidaan mallintaa virtalähteenä, jolloin kennon virta kuormaan on

$$I = I_s - I_d \quad (2.2)$$

Diodin päästöjännite määrää samalla myös kennon jännitteen, joka on noin 0,7 V eli verrattain pieni. Yhden aurinkokennon jännite ei käytännön sovelluksissa riitäkään ja sen vuoksi paneeleissa kennoja on kytketty sarjaan. Aurinkokenno toimii siten virtalähteenä, jonka lähtöjännite on rajoitettu diodin päästöjännitteen suuruiseksi. Kennon jännite nousee virran kasvaessa, kunnes saavutetaan diodin päästöjännite ja sen jälkeen virta on nolla. Tämän vuoksi kennosta saatava teho myös muuttuu koko ajan. Aurinkokennon jännite-virta -ominaiskäyrä on esitetty kuvassa 2.26.



Kuva 2.25 Ideaalisen aurinkokennon mallissa käytetään apuna auringon säteilyn määrästä riippuvaa virtalähdettä ja p-n rajapintaa kuvaavaa diodia.

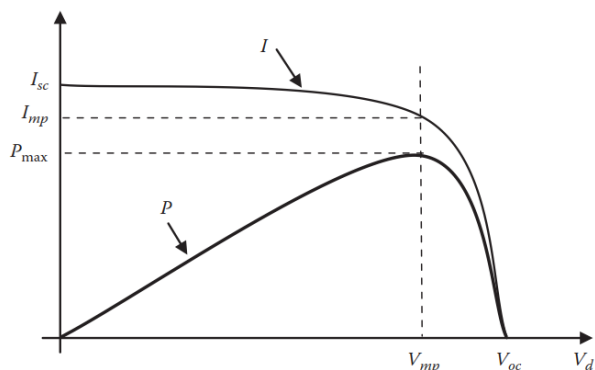


Kuva 2.26. Aurinkokennon jännite-virta ominaiskäyrästä.

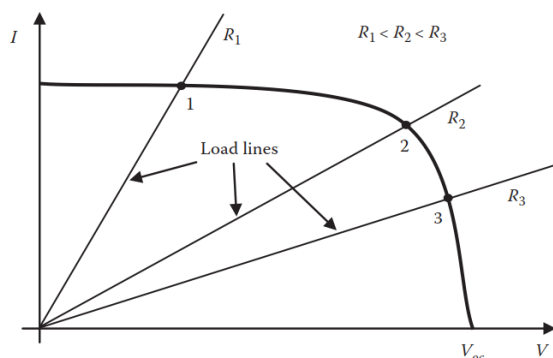
Aurinkokennon teho saadaan kertomalla jännite ja virta keskenään, jolloin

$$P = VI = V_d I_s - V_d I_o \left(e^{\frac{V_d}{V_r}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Aurinkokenno voidaan kytkeä oikosulkuun. Silloin sen jännite on nolla ja virta I_{sc} määräytyy auringon säteilyn mukaan. Kuormaa kuvaavan resistanssin ollessa vakio paneelin jännite nousee lineaarisesti virran kasvaessa. Tällöin myös paneelin jännite ja teho kasvavat. Jännitteen noustua lähelle diodin päästöjännitettä jännite alkaa rajoittumaan ja virran edelleen noustessa se rajoittuu avoimen piirin jännitteeksi V_{oc} , jolloin piirin virta on nolla, kuva 2.27. Pistettä, jossa kennosta saatava teho on suurin, kutsutaan maksimitehon pisteeksi (Maximum power point, MPP) ja sitä vastaa myös jännite V_{MP} ja I_{MP} , jotka ovat pienempiä kuin V_{oc} ja I_{sc} .



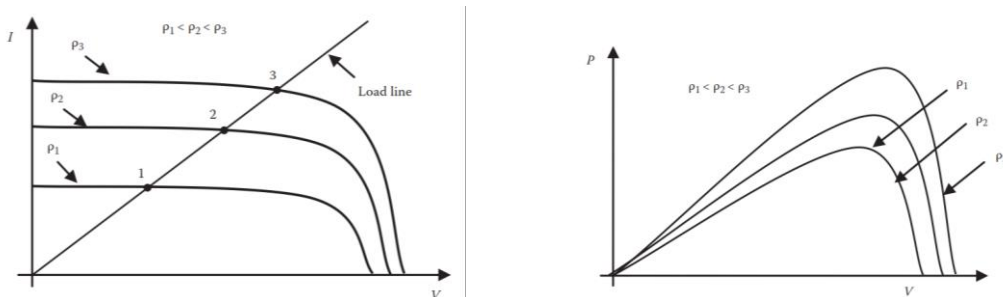
Kuva 2.27 Aurinkokennon virta-jännite sekä teho-jännite ominaiskäyrät ja maksimitehon piste.



Kuva 2.28 Aurinkokennon toimintapisteitä erikokoisilla kuormavastuksilla.

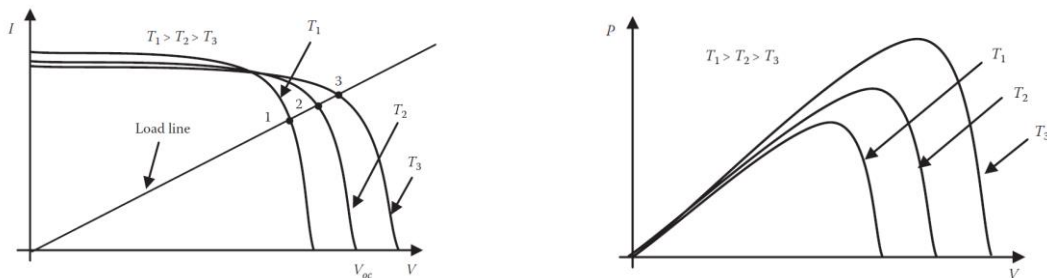
Aurinkokennon teholla on siis maksimipiste ja kennoa pitäisi käyttää tässä pisteessä, jotta auringon säteilystä saataisiin suurin hyöty. Jos kennon kuormaksi on kytketty vakiokokoinen resistanssi näin ei kuitenkaan tapahdu. Kuvassa 2.28 resistanssi R_1 on pienin ja siten myös jännite kyseisessä pisteessä on pienin. Vastukset R_2 ja R_3 ovat suurempia ja R_3 on jo niin suuri, että siitä aiheutuva jännite on suurempi kuin edellä mainittu maksimitehopisteen jännite. Tämän vuoksi virran arvo vastuksella R_3 on pienin näistä kolmesta.

Käytännön sovelluksessa kennoon tuleva auringon säteilyteho muuttuu koko ajan, kuva 2.29. Tämän vuoksi siis kennoon virta muuttuu ja jos sen kuormana oleva vastus on vakio, muuttuu myös kennoon jännite ja siitä saatava teho. Muuttuvan toimintapisteen vuoksi myös maksimitehon pisteen kohta muuttuu. Tästä seuraa se, että lähtötehon maksimoimiseksi myös kuorman olisi muututtava. Jos kuormana on vakioresistanssi niin tämä ei ole mahdollista. Käytännössä aurinkokennon kuormat eivät useinkaan ole resistansseja vaan eri tavoin säädettäviä teholähteitä. Säädettävä kuorma voidaan toteuttaa myöhemmin kurssissa käsiteltävillä tasasähkökatkoilla, joita käytetään tasajännitteen suuruuden muuttamiseen. Katkojan lisäksi järjestelmään tarvitaan algoritmi, joka seuraa koko ajan mittaamalla kennoon toimintapistettä ja säätää katkojan toimintaa niin, että se on maksimitehopisteen kohdalla (MPPT, maximum power point tracking).



Kuva 2.29. Auringon säteily vaikuttaa kennoon virtaan ja siten myös kennoon toimintapisteeseen ja siitä saatavaan tehoon.

Lämpötilan vaikuttaa merkittävästi aurinkokennon toimintaan kuten kuvassa 2.30 on havainnollistettu. Kasvava lämpötila pienentää kennoon avoimen piirin jännitettä, koska elektronien ja aukkojen liikkuvuus kasvaa lämpötilan kasvaessa ja samalla myös kennoon virta kasvaa. Jännitteen pienentyminen on kuitenkin merkittävämpää ja sen vuoksi lämpötilan kasvaessa kennoista saatava teho lähellä maksimitehon pistettä pienenee merkittävästi. Aurinkokennoa pitäisikin käyttää paikassa, jossa lämpötila on mahdollisimman matala ja auringon säteily suuri. Suomen kevättalvi täyttää nämä vaatimukset usein hyvin.



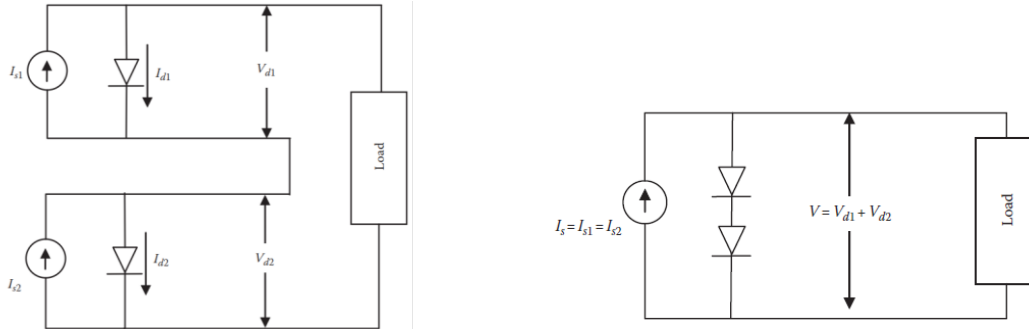
Kuva 2.30. Lämpötilan kasvaessa aurinkokennon avoimen piirin jännite pienenee ja samalla kennoista saatava teho pienenee.

2.7.4. Aurinkokennojen sarjaan- ja rinnankytkentä

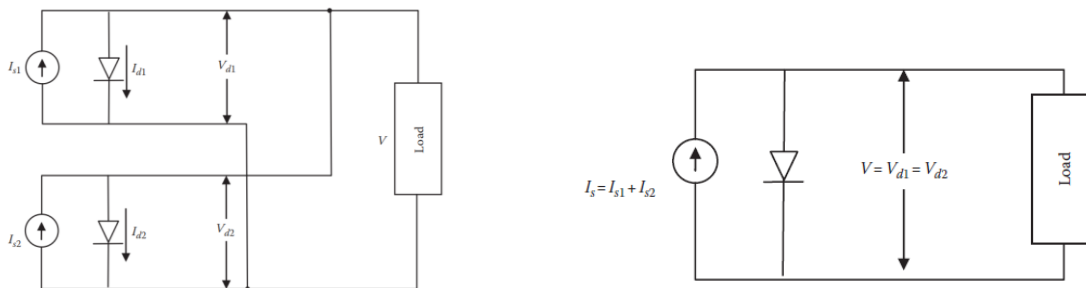
Kuten edellä todettiin, yhden aurinkokennon lähtöjännite on verrattain matala ja sitä suoraan käyttämällä järjestelmien hyötysuhde olisi erittäin huono. Sen vuoksi aurinkopaneeleissa yksittäisiä kennoja kytketäänkin sarjaan ja rinnan. Kuvan 2.31 sarjaankytkennän lähtöjännite on

kennojen jännitteiden summa. Haittapuolena on se, että kennojen läpi kulkevien virtojen on oltava sama. Siten pienimmän virran tuottava kenno määrää sarjaankytkennän virran. Yksittäisen kennojen likaantuminen tai varjostuma puista, lumesta tai muusta johtuen vaikuttaa siten useamman kennojen toimintaan.

Kennojen rinnankytkennässä paneelin jännite ei nouse, mutta virta on yksittäisten kennojen virran summa, kuva 2.32. Käytännössä aurinkopaneeleissa on kytketty sarjaan useita kymmeniäkin kennoja ja riippuen paneelin tehosta myös rinnankytkettyjä haaroja on useita.



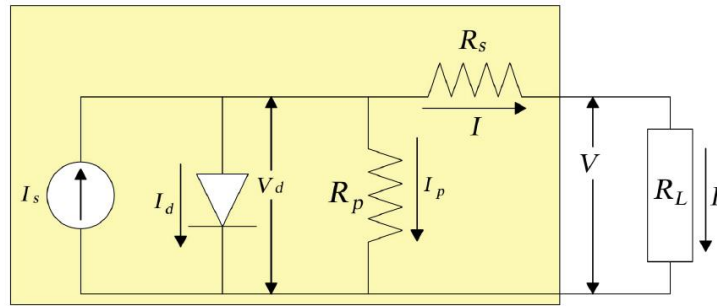
Kuva 2.31 Aurinkokennojen sarjaankytkennässä jännite on jännitteiden summa ja virta sarjaankytketyissä kennoissa on sama.



Kuva 2.32 Kennojen rinnankytkennässä virta suurenee, mutta paneelin jännite pysyy matalana.

2.7.5. Reaalinen aurinkokenno

Edellisessä tarkastelussa aurinkokenno oletettiin ideaaliseksi niin, että siinä ei ole häviöitä. Käytännössä näin ei ole. Kaupallisten kennojen hyötysuhde on tällä hetkellä tyypillisesti alle 20 %, mutta laboratorio-olosuhteissa parhaiden kennomateriaalien hyötysuhteeksi on saatu jopa 40-50 %. Häviöitä järjestelmässä on useita erilaisia. Säteilystä liittyvät häviöt, johtuvat heijastuksista kennojen pinnasta tai siitä, että osa fotoneista ei ole riittävän suurenergisiä irrottamaan elektroneja. Sähköiset häviöt aiheutuvat erilaisista resistiivisistä häviöistä johdotuksissa ja puolijohdemateriaalissa. Kuvan 2.33 sijaiskytkennässä ne on mallinnettu kahdella resistanssilla, joista toinen on rinnalla ja toinen sarjassa.



Kuva 2.33 Käytännössä aurinkokennossa on myös häviöitä ja resistiivisiä häviöitä voidaan kuvata sijaiskytkennässä vastuksilla.

Kun edellä kuvatut resistanssit otetaan mukaan aurinkokennon yhtälöihin, sen lähtövirta ja lähtöjännite ovat:

$$I = I_s - I_d - I_p \quad V = V_d - IR_s \quad (2.4)$$

Säteilyn hyötysuhde $\eta_{\text{irradiance}}$ kuvaa sitä kuinka suuri osa auringon säteilyn sisältämästä tehosta saadaan muutettua sähkötehoksi kennossa. Se ei ota huomioon kennon resistiivisiä häviöitä. Sähköisessä hyötysuhteessa η_e otetaan huomioon kennon resistiiviset häviöt.

$$\eta_{\text{irradiance}} = \frac{P_{se}}{P_s} = \frac{V_d I_s}{\rho A} \quad \eta_e = \frac{P_{out}}{P_{se}} = \frac{VI}{V_d I_s} \quad (2.5)$$

Kennon koko hyötysuhde auringon säteilystä kuormaan siirtyvään tehoon saadaan kertomalla edelliset hyötysuhteet keskenään.

$$\eta = \eta_{\text{irradiance}} \eta_e = \frac{P_{se}}{P_s} \frac{P_{out}}{P_{se}} = \frac{P_{out}}{P_s} = \frac{VI}{\rho A} \quad (2.6)$$

Edellisissä yhtälöissä P_s on aurinkokennoon tuleva auringon säteilyteho, P_{se} on siitä sähköksi muuttunut osa ja P_{out} on kuormaan siirtyvä teho. Auringon säteilyteho saadaan kertomalla säteilyn intensiteetti ρ (W/m^2) aurinkokennon pinta-alalla, jonka säteily kohtaa.

2.7.6. Aurinkosähköjärjestelmät

Aurinkopaneeleissa aurinkokennoja kytketään sarjaan ja rinnan tarvittavan tasajännitteen suuruuden ja järjestelmän tehotarpeen mukaan. Osassa järjestelmistä voidaan käyttää myös laitteistoja, joilla paneelien asentoa käännetään auringon liikkeen mukaan. Käytännössä näihin järjestelmiin liittyy kuitenkin mm. enemmän huoltotarpeita ja niiden hankintahinta on myös korkeampi. Suurimmassa osassa järjestelmistä paneelit onkin asennettu kiinteästi ja jos mahdollista niin kulmaan, joka on kyseisessä paikassa optimaalisin auringon liikkeeseen nähden. Paneelien asento olisi hyvä optimoida asennuspaikan mukaan ja tarkastelussa on laskettava arvioitu sähkön tuotto koko vuoden ajalta.



Module or panel



Array



System

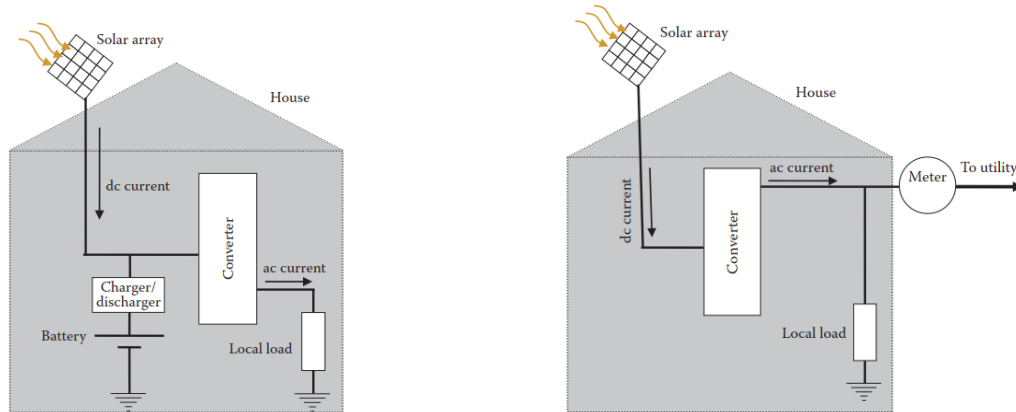


Kuva 2.34 Erilaisia aurinkosähköjärjestelmiä

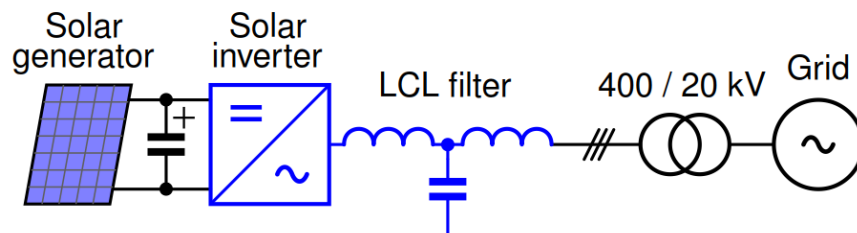
Aurinkosähköjärjestelmiä asennetaan varsin usein myös rakennuksiin, jolloin katto on oiva asennuspaikka. Jos rakennuksen sähkönkulutus on riittävän suuri järjestelmää ei tarvitse liittää sähköverkkoon, mutta silloin tarvitaan akusto, jota voidaan käyttää varastona tuotannon ollessa kulutusta suurempi ja päinvastoin. Jos alueella on sähköverkko, järjestelmät liitetään usein siihen, kuva 2.35. Tällöin ylijäämä voidaan myydä sinne ja toisaalta puuttuva sähköenergia ostaa sähköverkosta.

Koska aurinkopaneeli tuottaa tasasähköä, järjestelmässä tarvitaan erilaisia muunnoksia, jotka tehdään tehoelektronikan avulla. Paneelin jännite on voitu sovittaa akustolle sopivaksi, mutta

hyötysuhteen ja akun eliniän kannalta on parempi, jos järjestelmässä on akun lataamiseen oma tasasähkökatkoja. Lisäksi tarvitaan kuvan 2.36 vaihtosuuntaaja (inverter), joka muuttaa tasajännitteen vaihtosähköksi. Vaihtosuuntausta varten tasasähköpuolen jännite on nostettava 600-850 V, jos liittymä on kolmivaiheinen. Yksivaiheisissa liittymissä tarvittava jännite on pienempi. Vaihtosuuntaajan jälkeen tarvitaan myös alipäästösuodatin, jolla poistetaan vaihtosuuntaajan lähtöjännitteestä haitallisia yliaaltoja. Suodattimessa käytetään induktansseja ja kondensaattoreita esimerkiksi LCL-suodattimen muodossa. Aurinkosähköjärjestelmissä tarvittavia tehoelektronikkalaitteita käsitellään kurssilla myöhemmin.



Kuva 2.35 Aurinkopaneelit asennetaan usein katolle ja niissä voi olla mukana energian varastointia varten akusto ja järjestelmät liitetään usein myös sähköverkkoon.



Kuva 2.36 Aurinkopaneelin kytkentä sähköverkkoon vaihtosuuntaajan avulla. Järjestelmässä on myös yliaaltojen suodattamiseen käytetty LCL-suodatin.

Aurinkosähköjärjestelmän ollessa suuri siinä käytetään tuhansittain aurinkokennoja ja niistä rakennettuja paneeleja. Paneeleja kytketään myös yhteen ja niitä kutsutaan usein ketjuiksi ja englanniksi niitä kutsutaan nimellä "string". Yhdessä ketjussakin voi olla nk. ketjuvaihtosuuntaaja, mutta usein ketjuja kerätään yhteen ja käytetään kuvan 2.37 esittämään tapaan yhtä keskusvaihtosuuntaajaa. Markkinoilla olevien keskusvaihtosuuntaajien suurimmat tehot ovat jopa noin 2 MW.

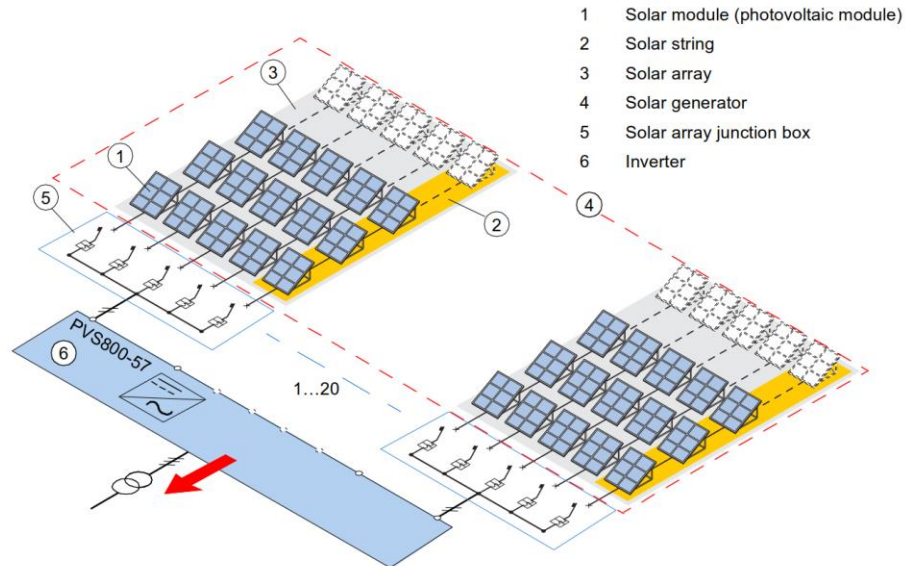
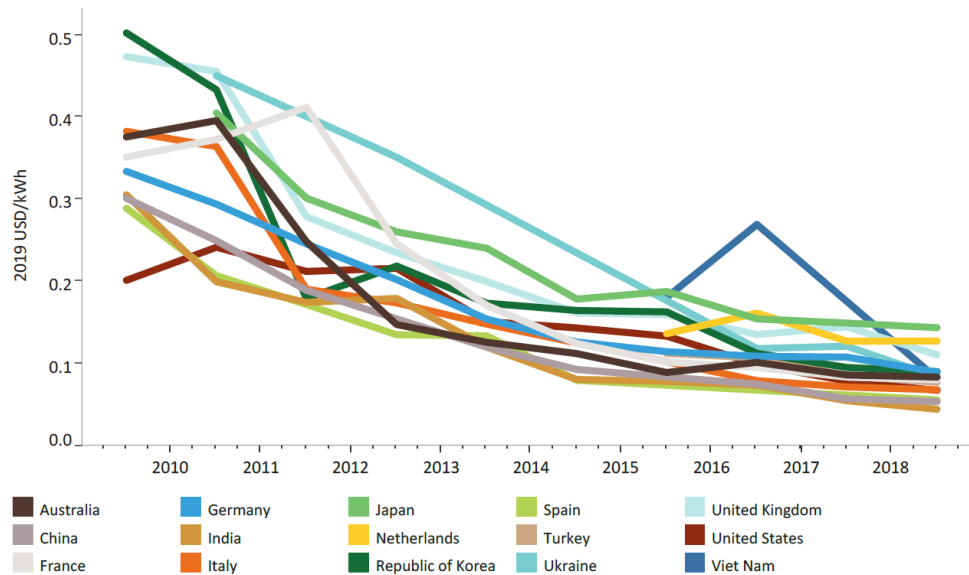


Figure: ABB

Kuva 2.37 Isotehoinen aurinkosähköjärjestelmä, jossa kytkentä sähköverkkoon on hoidettu yhdellä keskusvaihtosuuntaajalla.

2.7.7. Aurinkosähköjärjestelmien hintakehitys

Aurinkosähköjärjestelmien hinnassa keskeisin komponentti on paneelien hinta. Paneelien hintaan vaikuttaa erilaiset teknologiat, mutta ennen kaikkea valmistusmäärien kasvaminen. Paneelien hinnat ovat laskeneet merkittävästi kehityksen ansiosta. Järjestelmässä tarvitaan myös tehoelektroniikkaa ja myös tehoelektronikkalaitteiden hinta on laskenut samaan tapaan kuin muunkin elektroniikan. Kehitys näyttää jatkuvan. Järjestelmän hinta riippuu merkittävästi myös sen tehotasosta. Isotehoisten, sähköverkkoon kytkettyjen järjestelmien tuotetun sähköenergian hinta on kymmenessä vuodessa pudonnut noin kolmanteen osaan hieman tarkastelumaasta riippuen. Kuvassa olevat hinnat on laskettu koko järjestelmän käyttöajalle kaikki käyttökustannuksen huomioon ottaen.



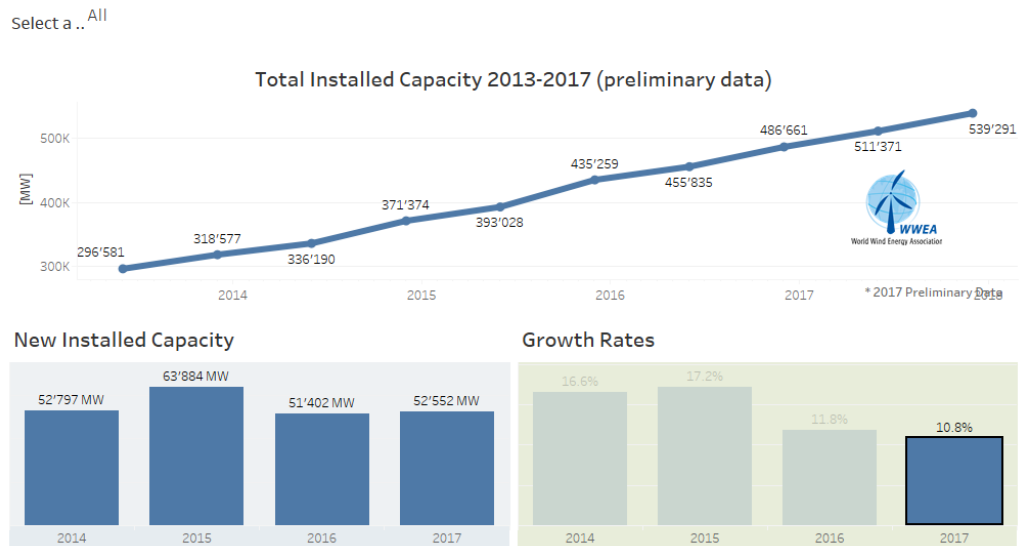
Kuva 2.38 Isotehoisten verkkoon kytkettyjen aurinkosähköjärjestelmien hintakehitys eri maissa. [Renewable Power Generation Costs in 2019 \(irena.org\)](https://www.irena.org/)

2.8. Tuulienergia

Tuulienergiaa on käytetty jo tuhansia vuosia erilaisin tavoin. Vanhimmat tiedot purjeiden käytöstä ovat noin 5000 vuoden takaa Egyptistä. Ensimmäisiä tuulimyllyjä on tietävästi rakennettu myös samoihin aikoihin Kiinassa. Tuulimyllyjä on käytetty veden pumppaamiseen kastelussa, mutta myös esimerkiksi maanpinnan kuivaamiseen Hollannissa. Myös jauhojen jauhaminen on ollut merkittävä asia.

Ensimmäisen nykymuotoisen tuuliturbiinin rakensi amerikkalainen Charles F. Brush vuonna 1888. Sen teho oli varsin vaatimaton, 12 kW, vaikka tarvittu mekaaninen rakenne olikin suuri. Nykyään tuulivoimaloiden tehot ovat noin 4 MW luokkaa ja suurimpien jopa 8 MW.

Maailmanlaajuiset investoinnit tuulivoimaloihin ovat kasvaneet merkittävästi ja tällä hetkellä asennetun tehon lisäys on vuosittain noin 50-60 GW. Parhaan ajantasaisen tiedon saa joko maailman energiayhdistyksen IEA [IEA – International Energy Agency](https://www.iea.org/) tai tuulienergiayhdistyksen verkkosivuilta [World Wind Energy Association \(wwindea.org\)](https://www.wwindea.org/).

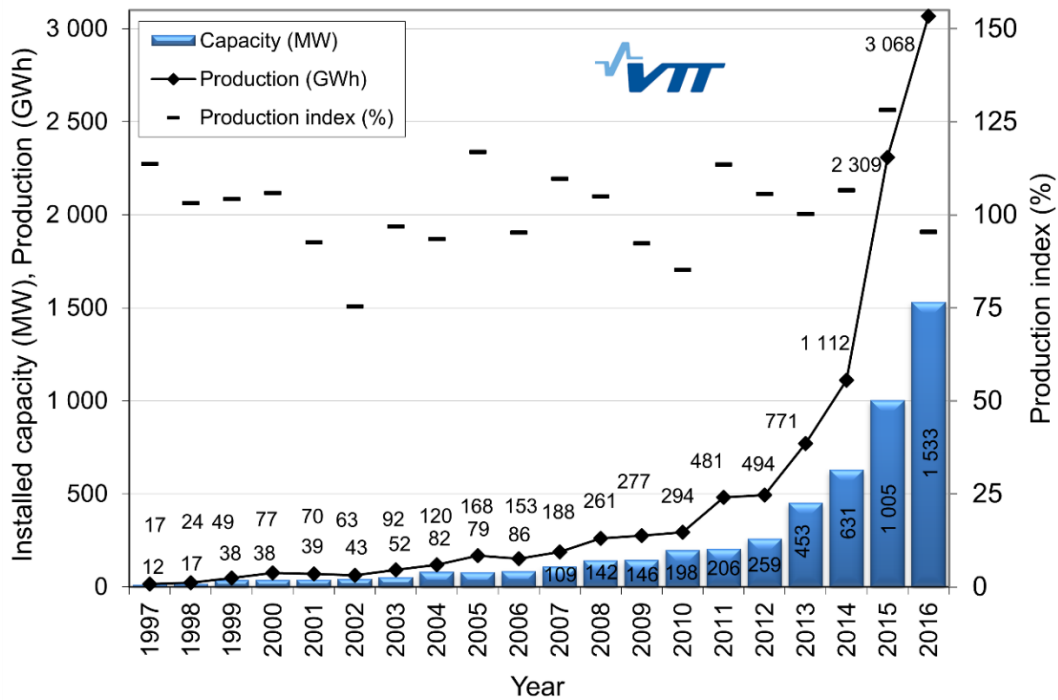


Kuva 2.39 Asennetun tuulivoimakapasiteetin kehitys maailmassa.

Taulukko 2.5. Maailman 16 suurinta tuulivoimamaata

Top 16 + rest of the World [MW]						
Country/Region	Total capacity end 2017	Added capacity 2017	Total capacity end 2016	Total capacity end 2015	Total capacity end 2014	Total capacity end 2013
China*	187730	19000	168730	148000	114763	91413
United States	88927	6894	82033	73867	65754	61108
Germany	56164	6145	50019	45192	40468	34658
Rest of the World*	48500	5600	42822	37522	32219	26493
India**	32879	4600	28279	24759	22465	20150
Spain	23026	6	23020	22987	22987	22959
United Kingdom	17852	3340	14512	13614	12440	10531
France	13760	1695	12065	10293	9296	8254
Brazil	12763	1963	10800	8715	5962	3399
Canada	12239	341	11898	11205	9694	7698
Italy*	9700	443	9257	8958	8663	8551
Turkey*	6981	900	6081	4718	3763	2958
Sweden*	6721	228	6493	6029	5425	4470
Poland*	6534	752	5782	5100	3834	3390
Denmark	5320	93	5227	5064	4883	4772
Portugal*	5316	0	5316	5050	4953	4724
Australia*	4879	553	4326	4186	3806	3049
Grand Total	539291	52552	486661	435259	371374	318577

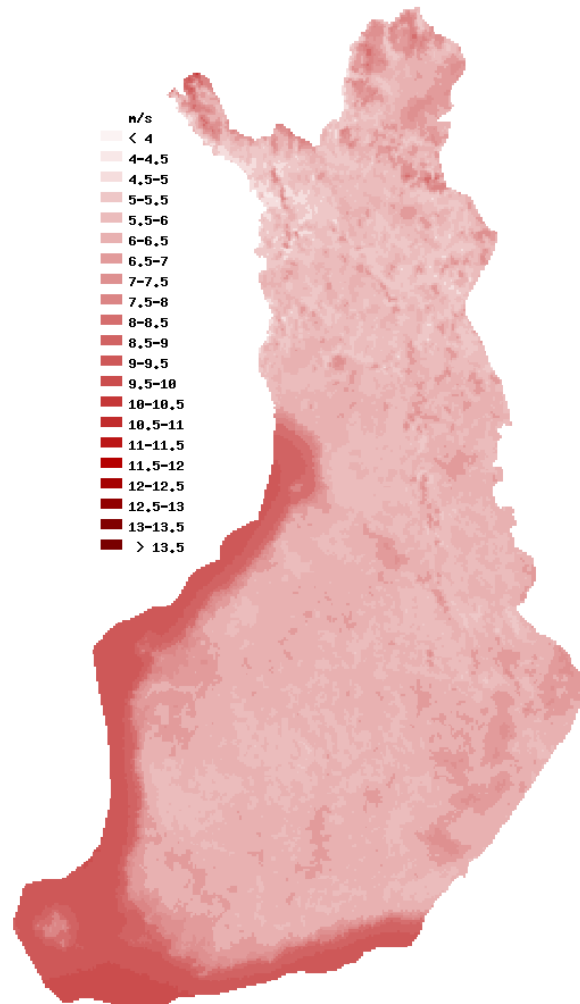
Suomessa tuulivoiman käyttöön liittyviä tilastoja ja tietoja käynnissä olevista hankkeista seuraa [Suomen Tuulivoimayhdistys \(STY\)](#). Aiemmin myös VTT on pitänyt yllä tilastoja, mutta organisaatiomuutosten jälkeen eivät enää tee niin.



Kuva 2.40 Tuulivoimatuotannon kehitys Suomessa

Suomen nykyisten tuulivoimaloiden sijaintipaikat löytyvät tästä kartasta, [Suomen tuulivoimapuistot - Etha Wind](#).

Tuulivoimainvestointeja suunniteltaessa on voimalan sijoituspaikalla suuri merkitys ja erityisesti paikan tuuliolosuhteilla. Suomen tilastoituja tuulisuustietoja löytyy tuuliatlaksesta <http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html>. Tuulivoiman kannalta parhaat rakennuspaikat ovat merellä tai rannikkoseudulla. Tämän lisäksi hyviä paikkoja löytyy myös mantereelta, varsinkin koreilta paikoilta ja mm. Lapin tuntureilta. Säämallilla on tarkasteltu Suomen tuuliolosuhteita eri korkeuksilta 50 metristä 400 metriin kautta koko maan 2,5 x 2,5 neliökilometrin alueilta. Rannikolla, saaristossa, tunturialueilla ja valituilla sisämaa-alueilla tuulen keskinopeus annetaan tarkemmalla 250x250 neliömetrin resoluutiolla.



Kuva 2.41 Tuulen keskinopeuden (m/s) jakauma 100 metrin korkeudella 2,5 x 2,5 neliökilometrin tarkkuudella.

Tuulivoiman tuotantoon liittyy joitain keskeisiä käsitteitä, jotka on hyvä tuntea. **Tuotanto roottorin pyyhkäisyypinta-ala kohti** (kWh/m^2) kertoo sen, kuinka paljon energiaa on tuotettu roottorin pinta-alaan nähden. Nyrkkisääntönä on, että voimala on tuottanut hyvin, mikäli vuosituotannosta laskettu luku on yli 1000 kWh/m^2 . **Huipunkäyttöaika** th (h) määritellään, koska tuulivoimaloiden energiantuotanto vaihtelee välillä 0 % - 100 % nimellistehosta. Th kuvaa sen ajan pituutta, joka kuluisi vuodessa tuotetun energian tuottamiseen, mikäli tuulivoimala toimisi koko ajan nimellistehollaan. Esimerkiksi 2500 tunnin huipunkäyttöaika merkitsee sitä, että laitos on tuottanut vuoden aikana energiamäärän, jonka laitos tuottaisi toimiessaan nimellistehollaan 2500 tuntia. Mikäli tuulivoimalan vuotuinen huipunkäyttöaika on yli 2400 tuntia, on laitos tuottanut hyvin. **Kapasiteettikerroin** CF kertoo huipunkäyttöajan suhteessa vuoden tunteihin ja se kuvaa siten oleellisesti samaa asiaa kuin huipunkäyttöaika. Kapasiteettikerroin on käytössä erityisesti englanninkielisessä kirjallisuudessa.

Tuotantoindeksi IL (%) on sääasemilla mitattujen tuulennopeushavaintojen perusteella laskettu tuotanto suhteessa pitkän aikavälin havainnoista laskettuun keskimääräiseen tuotantoon.

Suomen tuulivoimatilastoissa keskimääräinen tuotanto on tällä hetkellä laskettu vuosien 1987 - 2001 tuulennopeushavainnoista. Tuulennopeushavainnot muutetaan keskitehoksi käyttäen 1500 kW tuulivoimalaitoksen tehokäyrää ja huomioiden ilman tiheyden vaikutus tehon tuotantoon. Tuotantoindeksiä tarvitaan, kun halutaan selvittää, kuinka tuulinen jokin tietty ajanjakso oli suhteessa pitkän aikavälin keskimääräiseen tuulisuuteen. Asia on erityisen tärkeä tuulivoimainvestointien yhteydessä, jolloin on selvitettävä mikä on tuotantoennuste voimalahankkeen eliniän ylitse.

Tuulivoimalan toiminta perustuu siihen, että tuulen liike-energia saadaan voimalan lapojen avulla muutettua ensin pyöriväksi liikkeeksi ja sen jälkeen pyörivän generaattorin avulla sähkötehoksi. Tuulen liike-energia voidaan laskea yhtälöistä

$$KE = \frac{1}{2}mw^2 \quad KE = \frac{1}{2}A\delta tw^3 \quad (2.7)$$

joissa m on massa, w tuulen nopeus m/s, t aika ja δ ilman tiheys kg/m³. Tuulen massa on laskettu voimalan siipien pyyhkäisemän pinta-alan A , tuulen tiheyden, nopeuden ajan avulla. Ilman tiheys ei ole vakio vaan se riippuu ilman paineesta, lämpötilasta, suhteellisesta kosteudesta, paikan korkeudesta sekä maan vetovoimasta.

Tuulen teho on vastaavasti

$$P_{wind} = \frac{KE}{t} = \frac{1}{2}A\delta w^3 \quad (2.8)$$

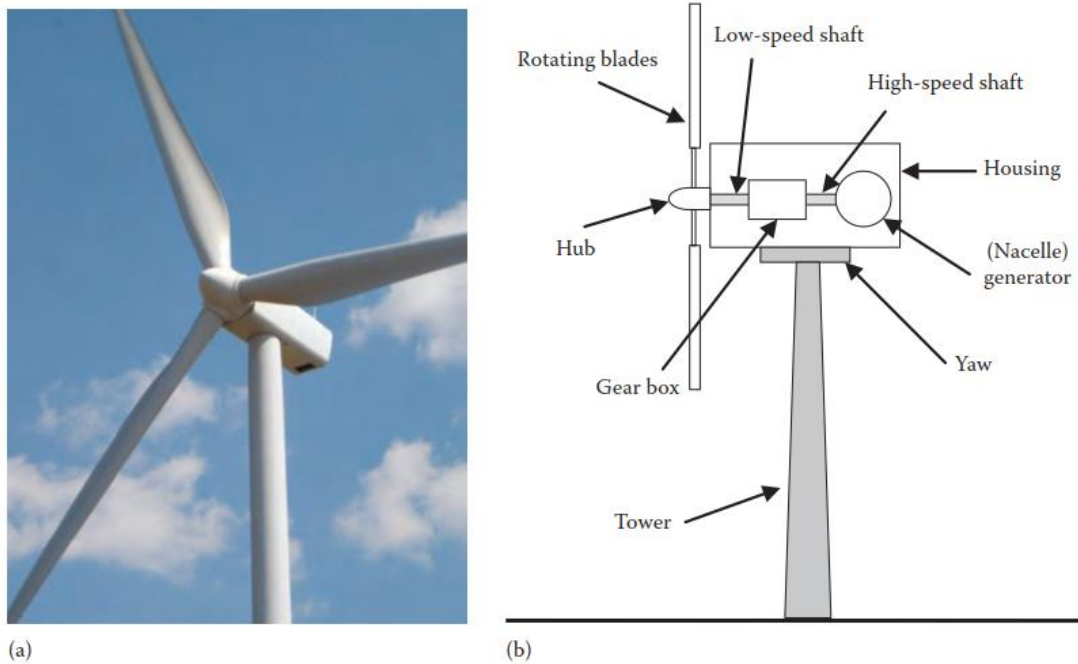
Yhtälöistä on hyvä huomata, että tuulen energia ja teho riippuvat tuulen nopeuden kolmannelle potenssista. Siten esimerkiksi 10 % nousu tuulen nopeudessa nostaa energiaa ja tehoa 33,1 % prosenttia. Tuulen nopeudella on siten erittäin suuri vaikutus tuotetun energian määrään. Tästä johtuu myös se, että voimalaa ei kannata käyttää, jos tuulen nopeus on hyvin alhainen, tyypillinen raja on noin 5 m/s.

2.1. Tuulivoimalan osat

Tuulivoimalan rakenneosat ovat suurimmaksi osaksi tuttuja olemassa olevien voimaloiden vuoksi. Tornin avulla voimalaitoksen siivet saadaan nostettua riittävän korkealle maasta. Suurten megawattiluokan voimaloiden tornin korkeus on jopa 250 m. Kuvan 2.42 naselli (nacelle) eli konehuone sijaitsee tuulivoimalan tornin yläosassa. Lavat on kiinnitetty nasellin etuosaan. Nasellissa sijaitsee mm. voimansiirto ja generaattori, jossa tuulen liike-energia muuttuu sähköksi. Naselli on kokoluokaltaan linja-auton tai junan veturin kokoinen ja se on laakeroitu torniin niin, että se pystyy kääntymään tuulen suunnan muuttuessa.

Pyörivät lavat on tavallisimmin tehty lasikuituvahvisteisesta polyesteristä tai puu-epoksi materiaaleista ja niiden pituudet vaihtelevat 5-20 metriin. Lavat muuttavat osan tuulen liike-

energiasta pyörivän liikkeen liike-energiaksi. Lapojen kulmaa suhteessa tuuleen kutsutaan lapakulmaksi ja sitä voidaan säätää, jotta lapoihin siirtyvä teho saadaan maksimoitua. Useimmissa voimaloissa on kolme lapaa. Lavat on kiinnitetty matalanopeuksiseen akseliin, jonka avulla pyöritetään vaihdelaatikkoa. Se nostaa generaattorin puolen kierrosnopeuden sähkögeneraattorille sopivampaan kierrosnopeuteen. Nykyään on myös voimaloita, joissa ei ole vaihdetta vaan niissä käytetään matalanopeuksista generaattoria, joka siis pyörii lapojen määrämällä nopeudella.



Kuva 2.42. Kolmilapaisen tuulivoimalan pääkomponentit

Wind Turbine

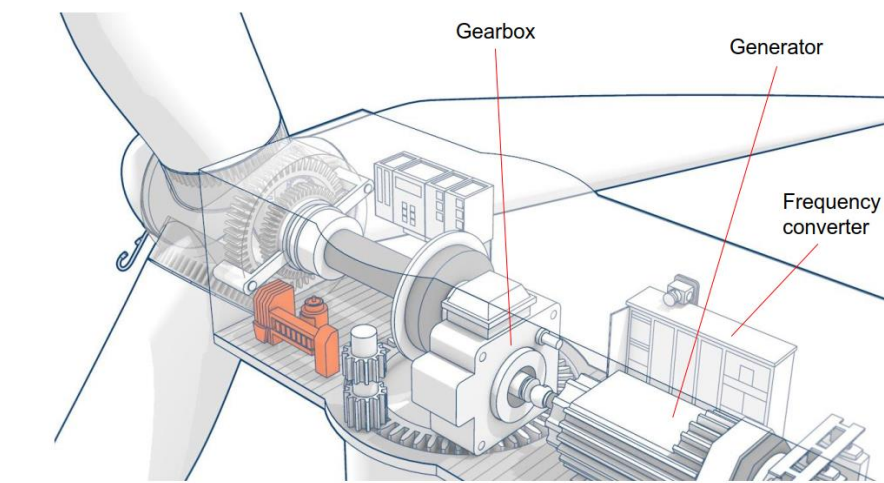
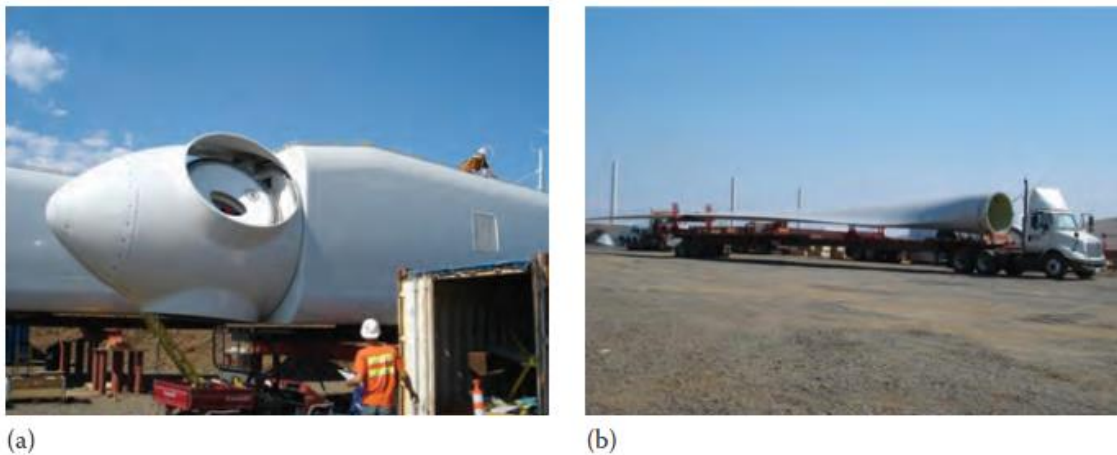


Figure: ABB (modified)

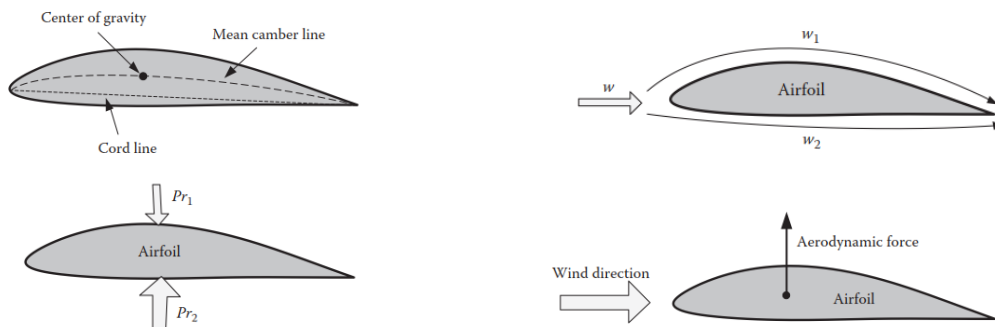
Kuva 2.43. Nykyaikaisen tuulivoimalan nasellissa on myös taajuusmuuttaja



Kuva 2.44. 1,8 MW tuulivoimalan naselli ja yksi lapa asennusvaiheessa.

2.2. Aerodynaamisen voiman tuotto lavoissa

Tuulivoimalan lapa muistuttaa hyvin paljon lentokoneen siipeä ja voiman tuotto kummassakin tapahtuu samalla periaatteella, vaikka tuulivoimalassa voima aiheuttaa voimalan rakenteen vuoksi pyörivän liikkeen. Lavan molemmat puolet kaareutuvat eri tavalla ja se näkyy hyvin siiven sivuprofiilista. Lavan ylemmän puolen kaarevuuden vuoksi, matka yläkautta siiven johtoreunasta jättöreunaan on pidempi kuin siiven alapuolella, kuva 2.45.

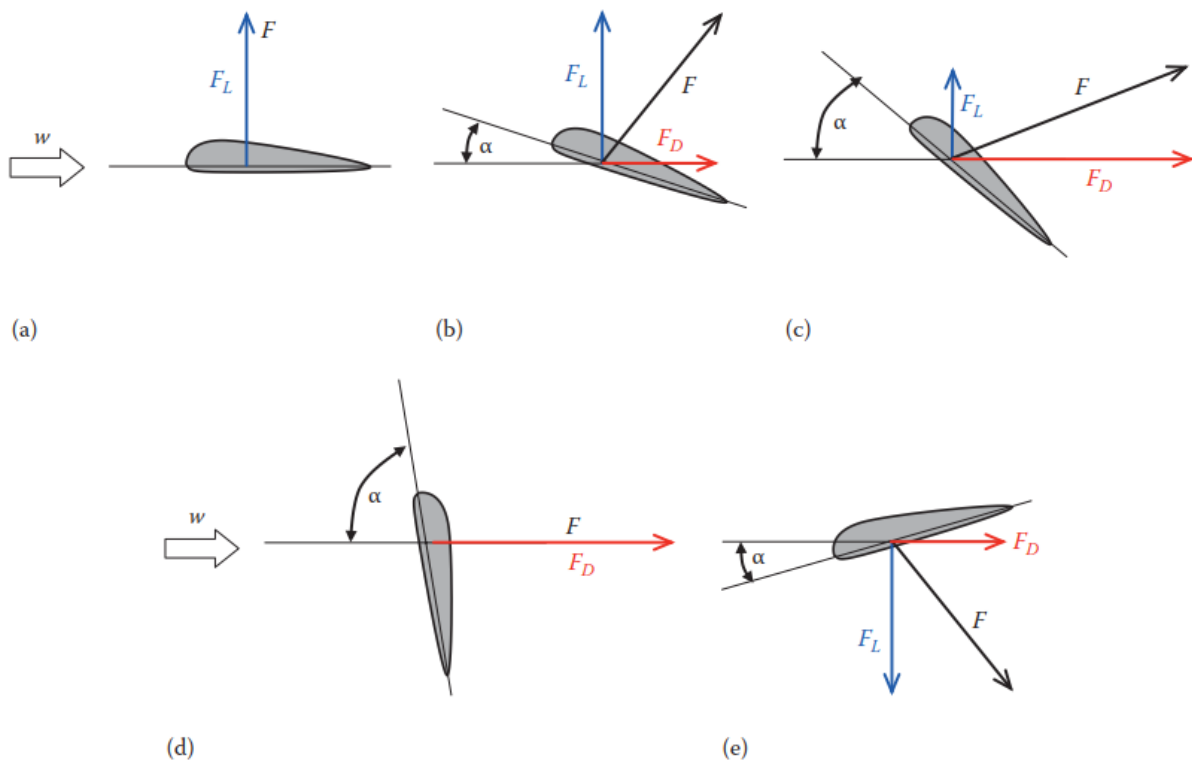


Kuva 2.45. Lavan sivuprofiilista nähdään kuinka kaareva lapa on ja miten kaarevuus on erilainen lavan ylä- ja alapuolella. Lavan massakeskipiste sijaitsee keskimääräisellä kaarevuussuoralla ja se on korkeammalla kuin johto- ja jättöreunan yhdistävä suora.

Tuulen kohdatessa lavan johtoreunan se jakaantuu kahteen osaan ja virtaa sekä ylä- että alapuolelta lapaan. Jos ilmavirtaus olisi laminaarinen, eli etureunaan tulevat ilmahiukkaset kohtaisivat suojanpuoleisessa reunassa kuljettuaan lavan ylä- ja alapuolta, niin ilmanpaine yläpuolella olisi pienempi kuin alapuolella. Näin ei kuitenkaan tarkkaan ottaen ole. Joka tapauksessa ilman nopeus siiven yläpuolella on suurempi kuin alapuolella ja sen vuoksi myös paine yläpuolella on pienempi. Tämä aiheuttaa aerodynaamisen nosteen, joka nostaa lentokoneen siipeä tai aiheuttaa tuulivoimalan pyörimisen. Oppikirjassa oleva selitys on hieman

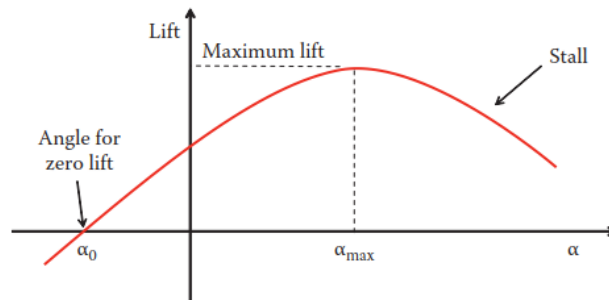
[virheellinen](#) niin kuin useassa muussakin lähteessä. Kiinnostuneet voivat tutustua mm. tähän [NASA](#)n materiaaliin nostovoiman synnystä.

Lavan tuottaman voiman suunta ja suuruus riippuu tuulen ja lavan kohtaamiskulmasta α . Tuulen kohdatessa lapa optimikulmassa voimassa on vain nostovoiman F_L osuus, kuva 2.46 a). Kulman kasvaessa työntövoiman F_D osuus kasvaa ja huonoimmillaan siipeen kohdistuu vain tämä voiman komponentti ja nostovoima on nolla, kuva 2.46 d). Myrskyn aikaan tuulivoimalan lavat käännetään tähän asentoon, jotta voimala ei pyöri. Huonona piirteenä tässä on se, että työntövoima taivuttaa siipiä taaksepäin ja rasittaa siten niitä merkittävästi. Kun kohtaamiskulmaa käännetään vastapäivään, saadaan nostovoiman suunta myös käännettyä, ja tällöin turbiinin pyörimissuunta muuttuu, kuva 2.46 e).



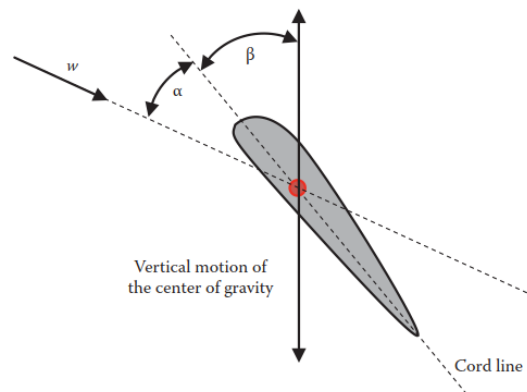
Kuva 2.46 Tuulen ja lavan kohtaamiskulman α kasvaessa nostovoimasta F_L osa muuttuu työntövoimaksi F_D ja sopivalla kulmalla jäljellä on vain työntövoima (d). Kohtaamiskulman ollessa negatiivinen voimien suunta muuttuu ja voimala pyöriin toiseen suuntaan (e).

Tuulivoimalan lavan tyypillinen nostovoiman riippuvuus kohtaamiskulmasta on esitetty kuvassa 2.47. Nostovoima on nolla negatiivisella kulmalla α_0 ja sitä käytetään siis myös myrskyssä. Kulman kasvaessa nostovoima kasvaa maksimipisteeseen α_{\max} saakka ja sen jälkeen nostovoima pienenee ja työntövoima kasvaa. Lentokoneissa tätä kutsutaan sakkaamiseksi.



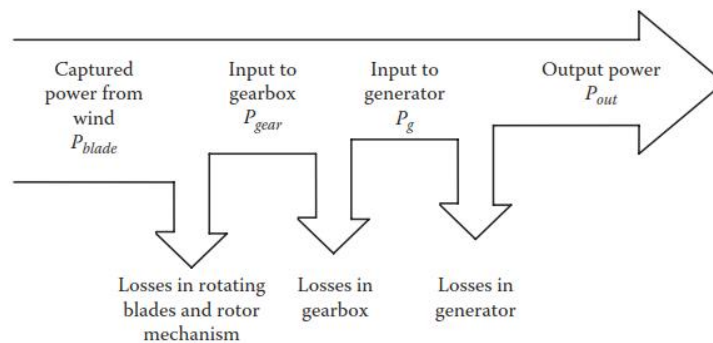
Kuva 2.47 Tuulivoimalan lavan nostovoima kohtaamiskulman α funktiona.

Tuulivoimalan säädössä käytetään kohtaamiskulman sijaan lapakulma β , joka on määritelty kuvassa 2.48. Tämä johtuu siitä, että tuulen suunta muuttuu koko ajan ja se olisi sen vuoksi mitattava. Lapakulma määritellään lavan jänteen ja massakeskipisteen kautta kulkevan suoran välillä. Suora vastaa massakeskipisteen liikkeen suuntaa. On syytä huomata, että lapakulma riippuu lavan geometriasta eikä tuulen suunnasta. Tuulen suunnan pysyessä vakiona lapakulman kasvu pienentää kohtaamiskulmaa ja päinvastoin. Lapakulman säätö on tuulivoimalan tärkein säätöparametri.



Kuva 2.48 Tuulen suunta, kohtaamiskulma α ja lapakulma β .

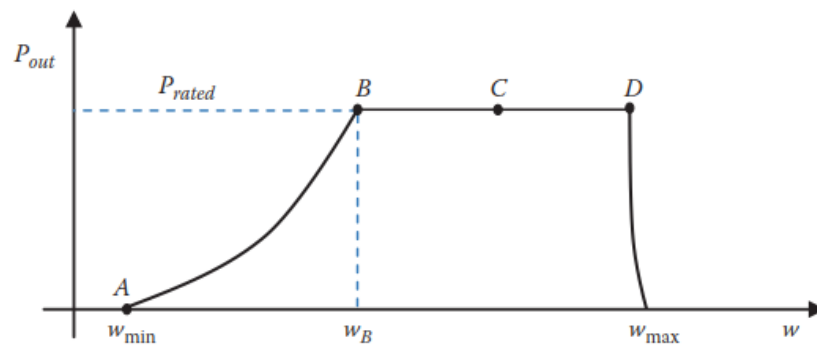
Kaikkea tuulivoimalan lapaan välittyvää tehoa ei saada muutetuksi sähköksi erilaisten häviöiden vuoksi. Osa häviöistä aiheutuu pyörivistä lavoista ja roottorista, osa vaihdelaatikosta. Myös sähkögeneraattorissa on häviöitä. Eri häviökomponentteja on havainnollistettu kuvassa 2.49.



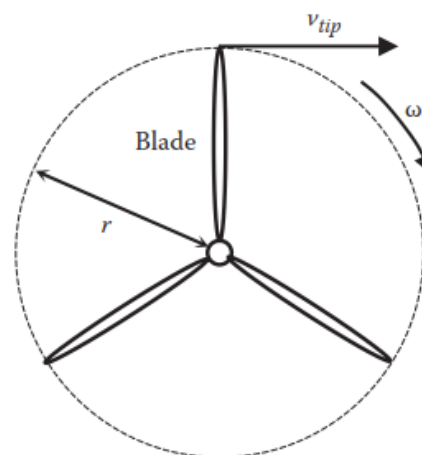
Kuva 2.49 Tuulivoimalan teho ja eri häviökomponentit

Kuten aiemmin todettiin, tuulen sisältämä energia ja teho kasvavat nopeuden kolmanteen potenssiin verrattuna. Tämän vuoksi myös tuulivoimalasta saatava sähköteho kasvaa samaan tapaan. Tuulen nopeuden ollessa alhainen myös voimalan tuottama teho on pieni. Kun tämä teho riittää juuri ja juuri kattamaan voimalaitoksen pyörimisestä aiheutuvat häviöt, tuulivoimalaa ei kannata pitää toiminnassa. Tuulivoimala käynnistetäänkin vasta kun tuulen nopeus ylittää asetellun miniminopeuden w_{\min} , joka on tyypillisesti 2-5 m/s. Tämän jälkeen teho kasvaa nopeasti tuulen nopeuden kasvaessa kuvassa 2.50 havainnollistetulla tavalla.

Tuulen nopeuden saavuttaessa nimellisarvonsa w_B voimalaitoksesta saatava teho on nimellinen. Voimalan komponentit on mitoitettu tämän tehon mukaan, ja ne kestävät sen aiheuttamat mekaaniset ja sähköiset rasitukset. Tuulen nopeuden edelleen kasvaessa voimalan tehon tuotto on rajoitettava kääntämällä lapoja epäedullisempaan kulmaan suhteessa tuuleen lapakulmaa kasvattamalla. Lopulta tuulen nopeus saavuttaa maksimiarvon w_{\max} , jossa lapakulmankaan kasvattaminen ei enää riitä vaan esimerkiksi siipeen kohdistuva työntövoiman komponentti on jo suuri. Voimala on sen mekaanisen kestävyysensä vuoksi pysäytettävä. Tuulivoimaloiden maksimituulen nopeus on tyypillisesti 25 m/s.



Kuva 2.50 Tuulivoimalan tehontuotto tuulen nopeuden funktiona



Kuva 2.51 Lapojen kärkinopeus

Lapojen kärkinopeus v_{tip} (m/s) riippuu lapojen pituudesta r ja kulmanopeudesta ω

$$v_{tip} = \omega r = 2\pi \frac{n}{60} r \quad (2.9)$$

jossa v_{tip} on kärjen nopeus m/s, ω siiven kulmanopeus (rad/s), n kierrosnopeus (r/min), r siiven pituus (m), w tuulen nopeus (m/s). Tämän perusteella määritellään myös nk. kärkinopeussuhde (tip speed ratio) suhteena

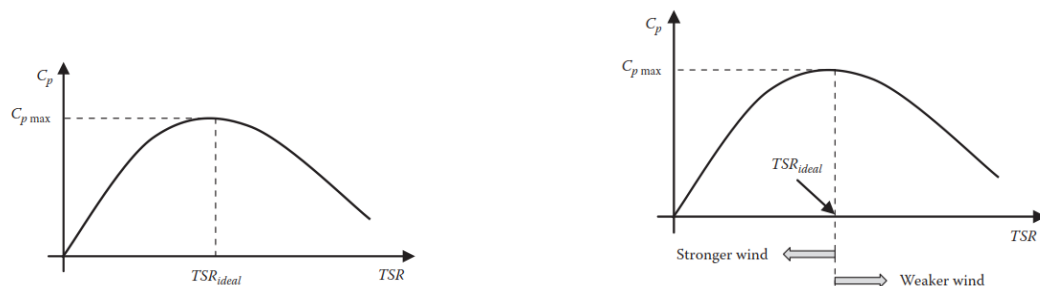
$$TSR = \frac{v_{tip}}{w} \quad (2.10)$$

Tämä nopeussuhde on oleellinen voimalan tehotuotannon kannalta. Nopeussuhteella on optimipiste, jossa voimalan tehontuotto on maksimissaan. Tämän selventämiseksi määritellään tehokkuuskerroin

$$C_p = \frac{P_{blade}}{P_{wind}} \quad (2.11)$$

joka on siis siipien ja tuulen tehon suhde. Ideaalitulanteessa tämä luku olisi yksi, mutta teoreettisesti se ei ole mahdollista. Tehokkuuskertoimen teoreettinen maksimiarvo on 0,5926 ja sitä sanotaan Betzin raja-arvoksi. Mikään nykyisistä turbiineista ei yllä tähän raja-arvoon saakka vaan parhaimmillaan se on 0,45 - 0,5. Tehokkuuskertoimen käyttäytyminen TSR:n funktiona on esitetty kuvassa 2.52 ja kuten siitä näkyy, riippuvuus on epälineaarinen.

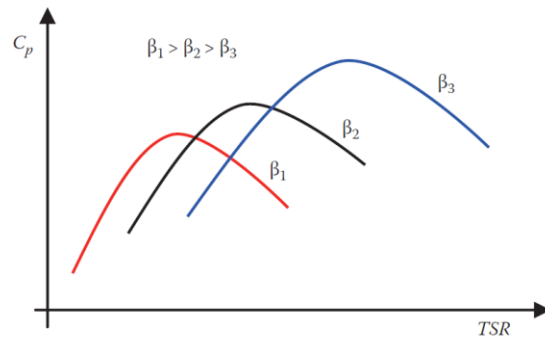
Jos voimalaitos on kytketty sähköverkkoon ilman tehoelektroniikkaa niin sähköverkon 50/60 Hz taajuus määrää generaattorin ja turbiinin pyörimisnopeuden ja ne ovat siis vakioita. Kun pyörimisnopeus pysyy vakiona ja tuulen nopeus kasvaa niin TSR:n arvo pienenee ja samalla tehon tuotto pienenee. Vastaavasti käy myös tuulen nopeuden heiketessä. Vanhoissa tuulivoimaloissa käy siis näin. Nykyaikaisessa tuulivoimalassa on taajuusmuuttaja generaattorin ja sähköverkon välissä ja silloin generaattorin nopeus voidaan säätää vastaamaan TSR:n optimipistettä.



Kuva 2.52 Tuuliturbiinin tehokkuuskertoimen riippuvuus kärkinopeussuhteesta

Voimalaitoksen tehokkuuskerrointa voidaan säätää nopeuden lisäksi myös lapakulmalla β . Lapakulmaa kasvattamalla tuulen kohtaamiskulma lavan kanssa ei enää ole yhtä optimaalinen ja tehontuotto pienenee kuvassa 2.53 esitetyllä tavalla.

Tuulen nopeuden kasvaessa tuulivoimalaan ja erityisesti sen lapoihin vaikuttava keskipakovoima kasvaa nopeuden neliöön verrannollisena. Kuten jo aiemmin todettiin, voimalaitos on pysäytettävä tuulen nopeuden ylittäessä noin 25 m/s. Tämä tehdään niin, että lapakulma käännetään asentoon, jossa nostovoima tai edellä käsitelty tehokkuuskerroin C_p on melkein nolla ja sen jälkeen kytketään mekaaniset jarrut päälle.



Kuva 2.53 Tehokkuuskertoimen riippuvuus napakulmasta β

2.3. Tuulivoimaloiden luokittelu

Tuulivoiman hyödyntämisellä on jo pitkä historia. Sen vuoksi on myös luonnollista, että on olemassa isohko joukko erilaisia ratkaisuja ja rakenteita tuulen energian hyödyntämiseksi. Myös sähkötekniset ratkaisut ovat parin viime vuosikymmenen aikana kehittyneet oleellisesti. Luokittelu tehdäänkin sen vuoksi usein mekaanisen rakenteen tai sähkötekniikan perusteella.

Suurin osa nykyaikaisista tuulivoimaloista on vaaka-akselisia ja kolmilapaisia kuvan Kuva 2.54 osoittamalla tavalla. Korkeasta tornista johtuen, turbiinin tuuliolosuhteet saadaan hyviksi eivätkä lähellä olevat rakenteet tai maastonmuodot ole niin ratkaisevia. Tämän lisäksi voimalan jokainen lapa osallistuu koko ajan voiman tuottoon toisin kuin mm. pystyakselisissa ratkaisuisissa. Nämä muodostavat samalla myös suurimmat haasteet. Tarvitaan kohtuullisen raskasrakenteinen torni, jotta se kestää painavan generaattorin ja myös lapojen aiheuttamat voimat. Turbiinissa on myös oltava kääntömekanismi, jolla se käännetään sopivaksi tuulen suunnan muuttuessa. Ison rakenteensa vuoksi voimalat myös näkyvät hyvin ympäristössä ja yhdessä mm. meluhaittojen ja välkynnän vuoksi voimaloiden rakentamista on vastustettu.



Kuva 2.54 Vaaka-akselisia tuulivoimaloita ja vaihdelaatikon ja jarrujen nosto

Myös pystyakselisia turbiineja käytetään jonkin verran ja varsinkin pienemmillä tehoilla ja erityisissä sovelluksissa. Niillä kaikilla ei välttämättä edes tavoitella sähkön tuotantoa vaan mm. kuvan 2.55 a) Savonius-roottoria on käytetty myös ilmastoinnissa. Pystyakseliset turbiinit sopivat hyvin paikkoihin, joissa tuulen suunta muuttuu jatkuvasti, koska niiden tehotuotto ei ole siitä riippuvainen. Sen lisäksi ne on helpompi asentaa ja huoltaa, koska ne sijaitsevat maan pinnan tasossa. Maanpinnalla myös tuulen nopeudet ovat alahaisemmat, että saatavilla oleva teho on pienempi.



Kuva 2.55 Erilaisia pystyakselisia tuuliturbiineja

Tuulivoimaloissa käytetty sähkötekniikka on kehittynyt ja muuttunut erittäin paljon. Vanhimmissa tuulivoimaloissa on käytetty epätahtikonetta (oikosulkukone) generaattorina ja se on kytketty muuntajan avulla valtakunnanverkkoon, kuva 2.56. Sähköverkon taajuus määrää generaattorin tahtinopeuden, mutta nimensä mukaisesti epätahtikone käy tästä hieman poikkeavalla nopeudella. Generaattorikäytössä nopeus on hieman tätä tahtinopeutta suurempi ja ero riippuu nk. jättämästä, johon koneen kuormitus vaikuttaa. Generaattorin ja tuulivoimalan pyörimisnopeus ei siis ole aivan vakio, mutta melkein. Tästä vakionopeudesta seuraa se, että tuulivoimalan pyörimisnopeutta ei voida asetella tuulen nopeuden mukaan optimipisteeseen ja siten osa tuulen sisältämästä energiasta menee hukkaan.

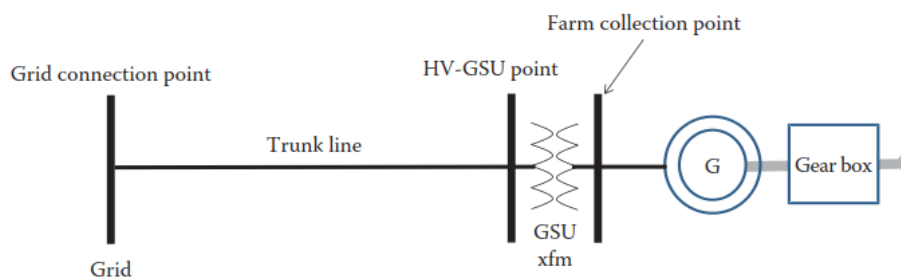
Epätahtikonetta kehittyneemmässä ja erittäin paljon käytetyssä ratkaisussa generaattorina käytetään nk. liukurengaskonetta, Kuva 2.57 2.57. Se on rakenteeltaan hyvin paljon epätahtikoneen kaltainen, mutta erona on roottorikäänitys. Epätahtikoneessa roottorissa on oikosuljettu käämitys, josta tulee myös koneen toinen nimi. Liukurengaskoneessa roottorikäänityksen kytkeydytään mekaanisten liukurenkaiden kautta. Sitä kautta roottorista saatava nk. jättämäteho voidaan tasasuunnata ja syöttää jarruvastukseen kuvan 2.57 tapaan. Tällöin koneen nopeutta voidaan säätää tahtinopeutta alhaisemmaksi 10-20 prosenttia.

Tuulivoimaloissa tavanomaisempi ratkaisu on se, että roottorikäänitykseen kytketään taajuusmuuttaja, jonka avulla tuo jättämäteho voidaan syöttää verkkoon tai verkosta voidaan syöttää tehoa roottoriin ja nostaa generaattorin nopeutta vähän tahtinopeutta suuremmaksi. Tällä tavoin generaattorin nopeutta voidaan säätää 10-20 % eli tuulivoimalan nopeutta voidaan

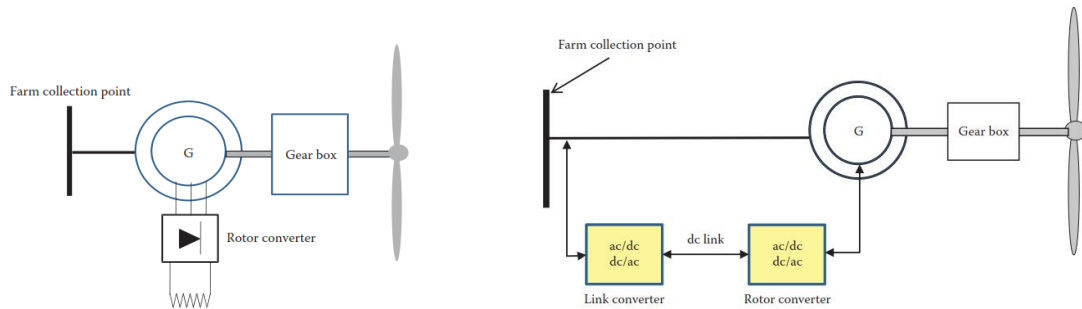
optimoida, jotta tuulesta saadaan mahdollisimman iso teho. Rajoittuneesta säätöalueesta johtuen voimalan nopeuden säätöalue on kuitenkin rajoittunut. Ratkaisun etuna on kuitenkin se, että tarvittavan taajuusmuuttajan tehomitoitus on vain noin 20 % koko generaattorin tehosta.

Kaikkein edistyneimmässä ratkaisussa generaattorin staattorin ja sähköverkon väliin kytketään taajuusmuuttaja, jonka kautta koko generaattorin teho syötetään sähköverkkoon. Näin generaattorin nopeutta voidaan säätää portaattomasti nolasta sen maksiminopeuteen saakka. Tässä tarvitaan kuitenkin koko teholle mitoitettu taajuusmuuttaja, joka on kalliimpi kuin liukurengasgeneraattorin tapauksessa. Kuvassa 2.58 on esimerkki tästä. Siinä myös generaattorin ja tuuliturbiinin välinen vaihdelaatikko on poistettu, mutta varsin usein myös näissä ratkaisuisa käytetään noin 1:40 välityssuhteen vaihdelaatikkoa. Vaihdelaatikkoa käytettäessä generaattorin pyörimisnopeus on huomattavasti suurempi kuin turbiinin. Tällöin saman tehon tuottamiseen tarvitaan pienempi vääntömomentti, koska pyörivässä liikkeessä teho on kulmanopeuden ja vääntömomentin tulo. Vääntömomentti taas on puolestaan voiman ja säteen tulo. Jos voimalaitoksessa ei ole vaihdelaatikkoa, turbiini ja generaattori pyörivät samalla hitaalla nopeudella. Sen vuoksi generaattorissa tarvitaan suuri vääntömomentti ja suuri säde. Hitaasti pyörivä generaattori on siten huomattavasti suurihalkaisijaisempi ja painavampi kuin nopeasti pyörivä generaattori.

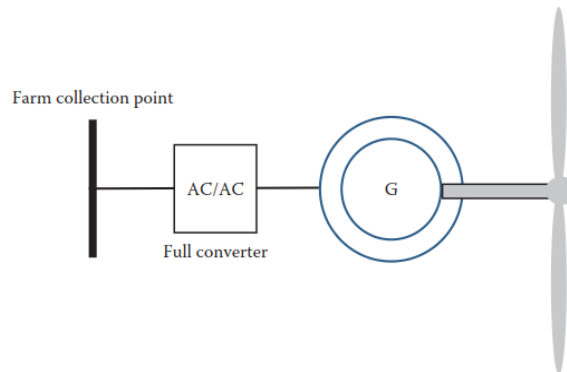
Tuulivoimaloissa on myös siirrytty paljolti käyttämään tahtikoneita generaattoreina. Niissä on perinteisesti roottorissa oma magnetoimiskäämi, johon on syötetty tasavirta. Se aiheuttaa omat vaateensa huollolle ja myös laitteisto on monimutkaisempi. Kestomagneettien kehityksen vuoksi niiden hinnat ovat laskeneet merkittävästi ja nykyään kestmagnetoidut tahtigeneraattorit ovat myös hyvin suosittuja.



Kuva 2.56 Perinteisessä tuulivoimalassa epätahtigeneraattori on kytketty suoraan muuntajan välityksellä sähköverkkoon.



Kuva 2.57 Tuulivoimalla, jossa käytetään liukurengaskonetta generaattorina. Roottorin liukurenkaiden kautta saatava teho voidaan syöttää vastuksiin tai sitten tehoelektronikan avulla sähköverkkoon.



Kuva 2.58 Tuulivoimalla, jossa generaattori on kytketty sähköverkkoon taajuusmuuttajan avulla. Jos generaattorin ja turbiinin välissä on vaihdelaatikko, niin generaattorin halkaisija ja paino on pienempi kuin kuvan ratkaisussa.

Varsinkaan isotehoisia tuulivoimaloita rakennetaan harvemmin yksitellen vaan useampi samalle alueella. Tähän vaikuttaa toki toteutuspaikka ja sen tuuliolosuhteet. Kuvan 2.59 tuulipuistoissa voimalaitosten sijoittaminen on tärkeää niin, että ne eivät varjosta toisiaan. Tässä on otettava huomioon vallitseva tuulen suunta ja lisäksi etäisyys voimaloiden välillä on oltava riittävä. Merelle tai etäisille paikoille rakennettaessa haasteeksi tulee myös riittävän siirtoverkon rakentaminen, koska maksitehot voivat olla hyvinkin suuria. Merellä myös asennus- ja huolto-olosuhteet ovat hankalimmat, vaikka tuuliolosuhteet ovatkin hyvät.



Kuva 2.59 Maalle sijoitettu tuulivoimapuisto



Kuva 2.60 Merelle sijoitettu tuulivoimapuisto Tanskassa

Tuulivoimaloiden koko on kasvanut merkittävästi viimeisen neljänkymmenen vuoden aikana. Ne olivat aluksi muutaman kymmenen kW:n kokoisia ja nykyään suurimmat myynnissä olevat voimalat ovat 6 MW ja roottoreiden halkaisija on kasvanut kymmenestä metristä 162 metriin ([Vestas](#)). Pohjanmerelle on parhaillaan rakenteilla [General Electricin](#) tekniikalla jopa 13 MW voimaloita, joiden roottorin halkaisija on 220 m. Kuvissa 2.61 ja 2.62 on kuvattu voimaloiden kehitystä vuonna 2009 kirjoitetussa katsauksessa ja jo silloin on nähty hyvin tuleva kehitys.

Future Concepts: Superconducting Direct-Drive Generators

High Temperature Superconductor (HTS), Operated at 30... 50 K

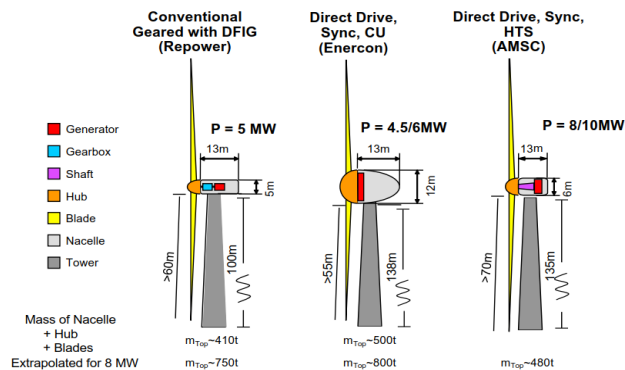


Figure (modified): D. McGahn, "Drivetrains: direct drive generators and high temperature superconductor based machines," MIT Windweek, 2009, <http://web.mit.edu/windenergy/windweek/Presentations/P7%20-%20McGahn.pdf>

Kuva 2.61 Tulevaisuuden tuulivoimaloiden konsepteja, korkean lämpötilan suprajohteet ja ilman vaihdelaatikkoa

Growth in Turbine Size

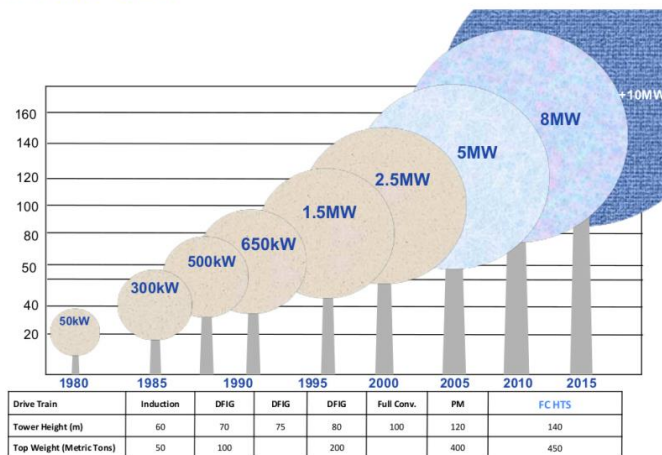


Figure (modified): D. McGahn, "Drivetrains: direct drive generators and high temperature superconductor based machines," MIT Windweek, 2009, <http://web.mit.edu/windenergy/windweek/Presentations/P7%20-%20McGahn.pdf>

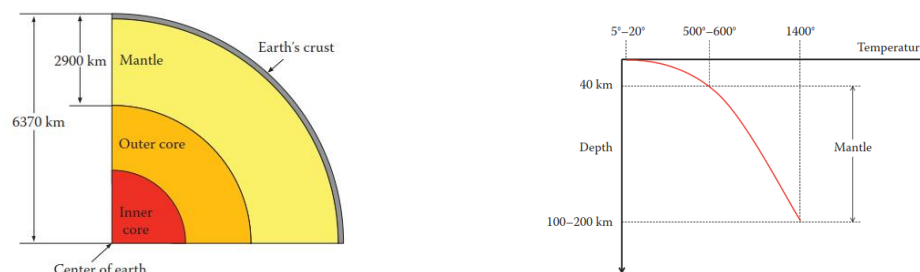
Kuva 2.62 Tuulivoimaloiden koko ja tekniikka on muuttunut merkittävästi vuosien kuluessa. **Induction**, induktio, epätahti, oikosulku, **DFIG** doubly fed induction generator, kaksoissyötetty induktiogeneraattori, liukurengaskone), **PM** permanent magnet, kestomagneettigeneraattori

Oppikirjassa on tässä kohtaa luku 6.3 Hydrokinetic systems, joka käsittelee pieniä vesivoimaloita, vuorovesivoimaloita ja aaltoenergiaa. Tässä suomenkielisessä tekstissä nämä asiat on käsitelty tämän toisen osion alussa samassa yhteydessä vesivoimaloiden kanssa.

2.4. Geoenergia

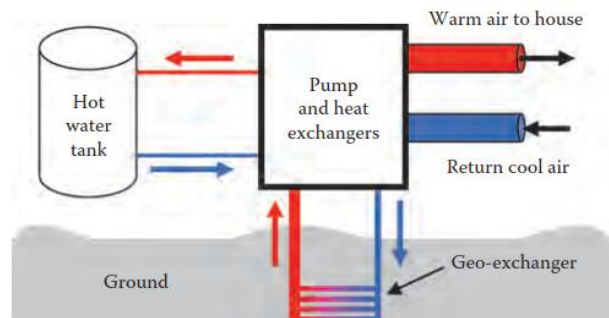
Maapallon säde on yli 6000 km ja päällimmäinen pintakerros on noin 600 km. Eri kerroksia ja lämpötilan kasvua on havainnollistettu kuvassa 2.63. Maapallon sisimmän osan lämpötila on noin 5500 °C. On hyvä huomata, että maapallon tilavuudesta yli 99 %:ssa lämpötila on korkeampi kuin 1000 °C eli geotermisen lämmön käytössä on suuri potentiaali. Geolämpövoimaloita on käytössä jo esimerkiksi Ranskassa ja Yhdysvalloissa. Islanti on suotuisan geologisen sijaintinsa ansiosta jo pitkään tuottanut kaiken tarvitsemansa lämmön ja puolet sähköstään geotermisellä energialla.

Hyvä yleinen teksti geotermisen energian eri muodoista löytyy mm. Helsingin yliopiston [seismologian instituutin](#) sivuilta. Etelä-Suomessa kallion lämpötila nousee noin 2 °C/100 m ja Itä- ja Pohjois-Suomessa alimmillaan 1,2 °C/100m.



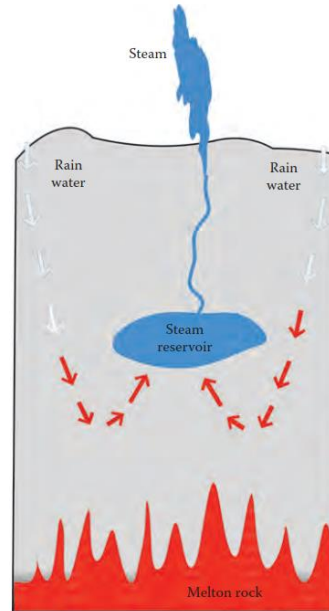
Kuva 2.63 Maapallon eri kerrosten paksuudet ja lämpötilan jakautuminen pintakerroksessa

Vain muutama metri maanpinnan alapuolella lämpötila on talvisin 10-20 °C enemmän kuin ilman lämpötila ja kesäisin saman verran alempi. Siten lämpöpumppuja on helppo soveltaa rakennusten lämmittämiseen talvella ja viilentämään kesäisin. Maalämpöpumppujärjestelmää on havainnollistettu kuvassa 2.64. Maassa kiertävässä putkistossa käytetään vettä ja useimmin pakkasen kestäviä liuoksia. Järjestelmään on myös helppo liittää varasto kuumaa vettä.

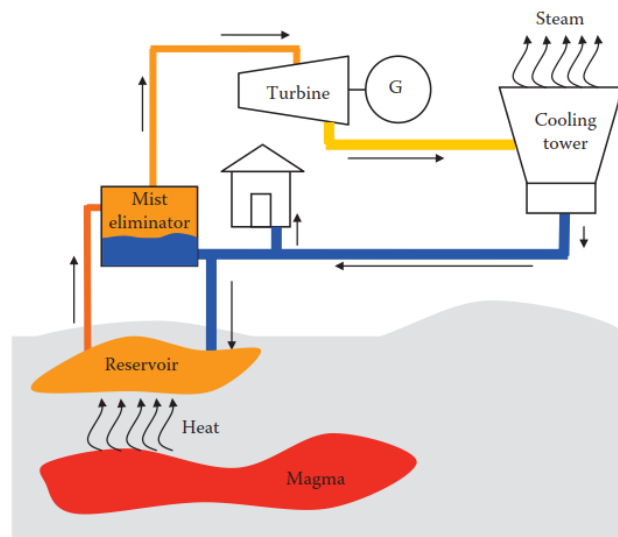


Kuva 2.64 Lämpöpumpun toimintaperiaate

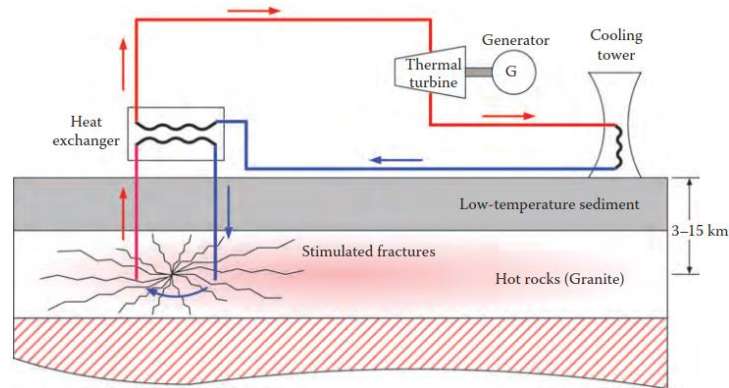
Sopivilla alueilla sadevesi pääsee tunkeutumaan syvällä maaperään tai erilaisia vulkaanisia alueita on lähellä maan pintaa. Tällöin maan sisään muodostuu vesivarastoja ja lämmitessään ne muuttuvat höyryksi ja purkautuvat kovalla paineella maan pinnalle. Näin syntyvää höyryä voidaan käyttää hyväksi turbiinin ja sähkögeneraattorin pyörittämiseen samaan tapaan kuin perinteisissä esim. hiilen poltton perustuvissa voimalaitoksissa. Turbiinin jälkeinen höyryn/veden lämpötila on vielä riittävän korkea mm. kaukolämmitykseen, jossa lähellä on sopivaa asutusta ja rakennuskantaa. Toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvissa 2.65 ja 2.66. Nämä sovellukset vaativat, että maaperästä löytyy tämäntyyppisiä varastoja. Yhä useammin maalämpöä tuotetaan kuitenkin niin, että maaperään pumpataan vettä, joka lämpiää kulkiessaan kallioiden halkeamissa ja se nostetaan sen jälkeen lämmenneenä maan pinnalle ja lämmönvaihtimen jälkeen siirretään turbiinin tuottamaan sähköä tai käytetään kaukolämpönä, kuva 2.67.



Kuva 2.65 Geotermisiä lämpövarastoja syntyy kun vesi tunkeutuu maaperään ja lämpenee. Paineen noustessa riittävästi höyry pääsee usein purkautumaan maanpinnalla.



Kuva 2.66 Maanalaiseen varastoon perustuvan voimalaitoksen periaatekuva

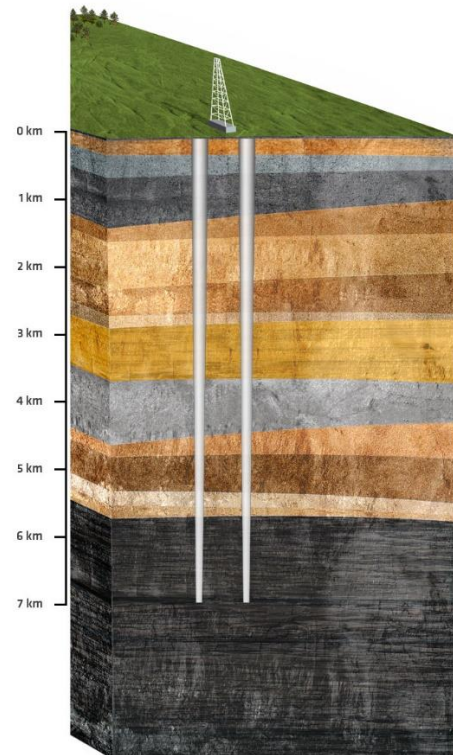


Kuva 2.67 Lämmön tuottoa voidaan tehostaa pumppaamalla maaperään kylmää vettä, joka lämmittyyään nostetaan ylös ja käytetään sähköntuotannossa ja kaukolämpönä.



Kuva 2.68 Pohjois-Kaliforniassa toimiva geoterminen voimalaitos

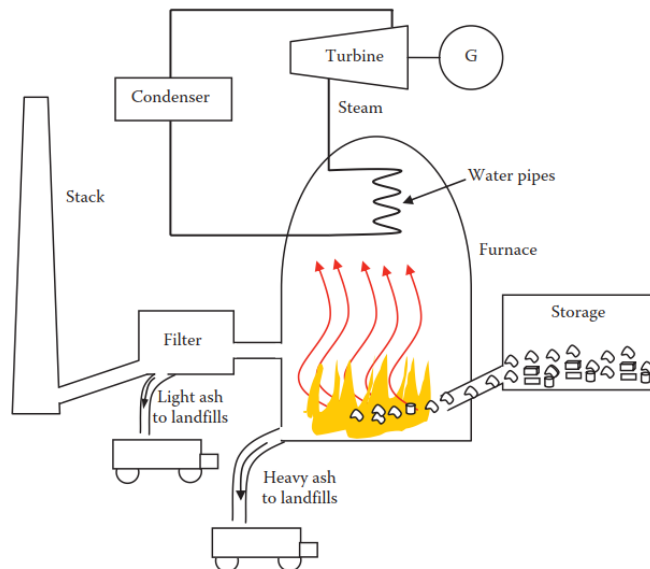
Energiayhtiö ST1 on rakentamassa Otaniemeen Suomeen ensimmäistä geotermistä lämpövoimalaitosta [Deep Heat](#). kuva 2.69. Siinä maaperään on porattu kaksi n. 6,5 kilometrin syvyistä reikää ja valmiina se tulee olemaan maailman syvin geoterminen laitos. Suomen maaperän vuoksi reiät ovat huomattavasti syvemmät esim. Keski-Euroopassa tarvittaviin verrattaessa. Toisesta reiästä pumpataan vettä alas kallioperään, jossa se kuumenee kallioperässä luontaisesti olevan lämmön vaikutuksesta. Kuuma vesi nousee ylös toisesta reiästä, ja syntynyt lämpö syötetään lämmönvaihtimen kautta kaukolämpöverkkoon. Tavoitteena on tuottaa 40 MW lämpöenergiaa käyttämällä kahta 2 MW pumppua eli laitoksen hyötysuhteeksi tulisi 91 %. Lämpö käytetään Espoon kaukolämpöverkossa.



Kuva 2.69 Otaniemeen toteutettavan geolämpövoimalan sijoituspaikka on olemassa olevan voimalaitoksen vieressä ja lämmön tuottoa varten on porattu kaksi noin 6,5 km syvää reikää.

2.5. Bioenergia

Erialaista polttamiseen käytettävään materiaalia on käytetty tulen keksimisestä saakka eri tavoin mm. ruuan valmistamisessa. Pääosin polttamisessa käytetään puuta ja nykyään yhä useammin myös poltettavaksi kelpaava sekajätettä. Suomessa on myös käytetty merkittävästi turvetta, mutta aivan viimeaikaiset verotuspäätökset ovat käytännössä lopettamassa turpeen polttamisen. Bioenergia sähköä tuotetaan hyvin samaan tapaan kuin monella muullakin polttoaineella eli kattilassa tuotetaan vesihöyryä, jolla pyöritetään turbiinia ja generaattoria. Samoin kuin geoenergiassa, myös biomassaa poltettaessa turbiinin jälkeinen vesi on riittävän kuumaa kaukolämmöksi. Tästä sähkön ja lämmön yhteistuotannosta käytetään usein lyhennettä CHP, (combined heat and power), ja se on Suomessa erittäin paljon kaupunkien hiilivoimaloissa käytetty toimintatapa. Näin voimalaitoksen hyötysuhdetta saadaan nostettua merkittävästi.



Kuva 2.70 Sähköenergian tuotanto bioenergiaa polttamalla

2.6. Polttokennot

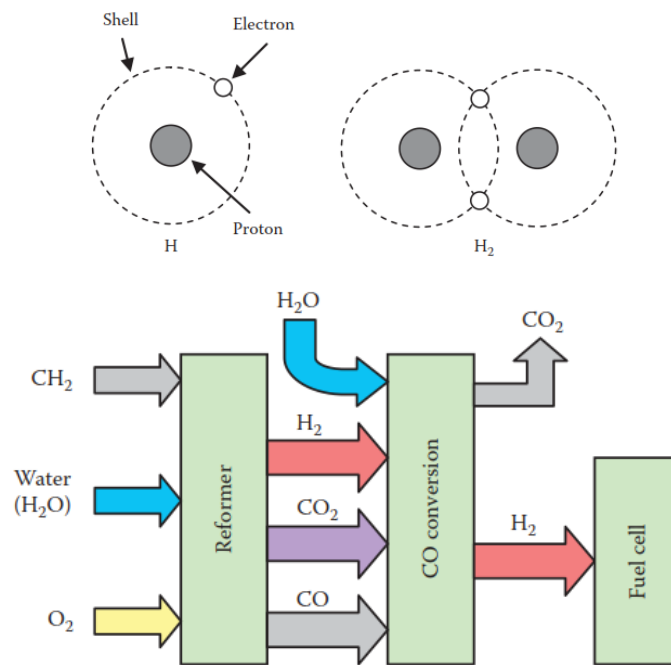
Niin kuin monella muullakin sähköenergian tuotantomuodolla, myös polttokennoilla on pitkä historia. Ensimmäiset polttokennot on kehitetty jo 1839, mutta tuolloin niiden käytännön soveltaminen lienee jäänyt vähäiseksi. Francis Bacon kehitti 1939 nikkielektrodeihin perustuvan ja paineistetun polttokennon, joka oli riittävän luotettava käytännön sovelluksiin. NASA käyttikin polttokennoja Apollo-ohjelmassaan 1960-luvulla ja on siitä lähtien kehittänyt merkittävästi polttokennotekniikkaa. Avaruussovellukset ovatkin tähän saakka olleet yksi merkittävimmistä polttokennojen sovellusalueista.

Polttokennot ovat sähkökemiallisia laitteita, jotka muuntavat polttoaineen kemiallisen energian suoraan sähköksi ja lämmöksi. Ne eivät nimensä mukaisesti kuitenkaan polta polttoainetta, mutta kennoon menee sisälle polttoainetta ja ilmaa tai happea, joilla saadaan aikaiseksi sähkövirta sekä tuotetaan lämpöä. Polttokennojen teho voi vaihdella mikrowateista megawatteihin. Ne koostuvat anodista, katodista ja niiden välissä olevasta elektrolyytistä. Kennotyypistä riippuen polttoaineena voivat toimia vety tai hiilivedyt. Vety polttoaineena tuottaa reaktiotuotteena vain vettä, mutta hiilivedyt tuottavat vettä sekä hiilidioksidia.

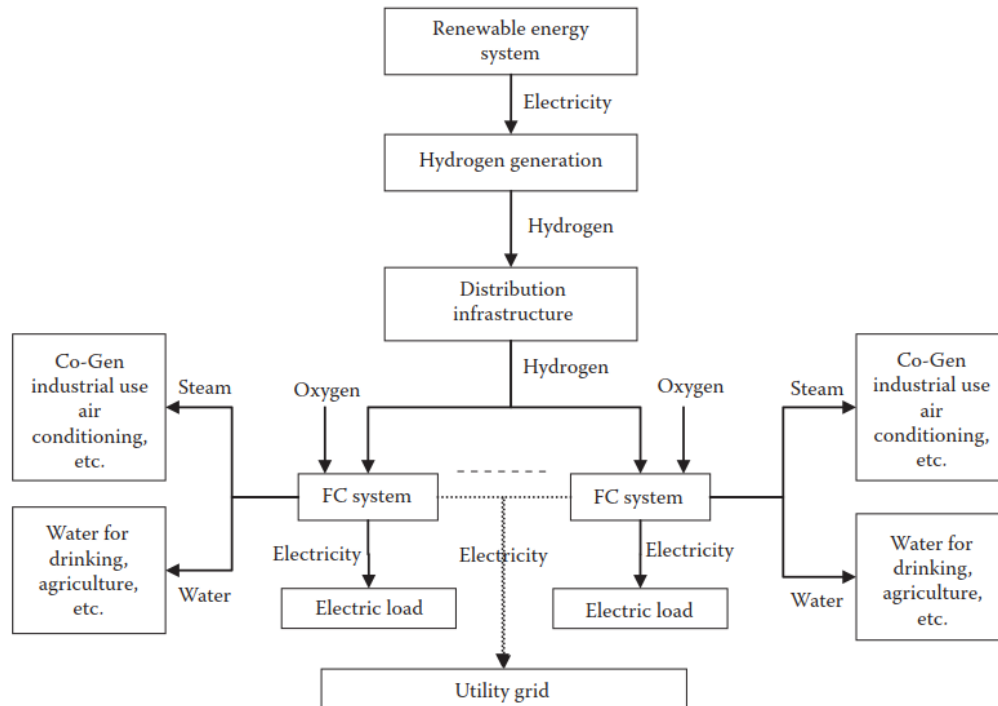
Useimmat polttokennot käyttävät vetyä ja happea sähkön tuottamiseen ja hapettumisen seurauksena syntyy sivutuotteena vettä. Osa polttokennoista voi käyttää polttoaineen suoraan metanolia eikä silloin tarvita erillistä reformointiprosessia vedyn tuottamiseen. Polttokennojen laajamittainen soveltaminen vaatii myös vedyn tuotantoketjun, josta nykyään käytetään usein nimitystä vetytalous. Vetytalouden ongelmana on mm. vedyn valmistus, varastointi ja kuljetus, taloudellisuutta ja turvallisuus. Vedyn haittapuolia ovat räjähdysalttius, vaikea varastoitavuus ja ennen kaikkea se, että se esiintyy maapallolla yhdisteinä, ja sen valmistaminen on energiaa vievä prosessi. Vety ei siis ole energianlähde vaan se soveltuu energian siirtoon samoin kuin sähkö.

Vedyn tulevaisuuden polttoaineena ratkaisee se, löytyykö taloudellista tapaa tuottaa, varastoida ja jakaa sitä energiakäyttöön. Kuvassa 2.71 esitetyssä reformoinnissa vetyä valmistetaan hiilivedyistä, vedestä ja hapesta. Toinen vaihtoehto olisi tuottaa vetyä uusiutuvalla energialla, tuulivoimalla tai auringolla. Tässä nk. elektrolyysissä vesi H_2O hajotetaan vedyksi ja hapeksi sähkövirran avulla. Vety voisi olla yksi energian varastointimuoto aurinkosähköön perustuvissa ratkaisuissa.

Vetyatomi on hyvin pieni ja se tunkeutuu diffuusion avulla teräkseen ja haurastuttaa sitä. Lisäksi vetysäiliöitä on vaikea saada täysin tiiviiksi, jolloin vuotohäviöt ainakin pitkäaikaisemmassa kaasumaisen vedyn varastoinnissa voivat tulla merkitseviksi, ellei varastointia hoideta asianmukaisesti. Vety voidaan myös nesteyttää riittävän matalissa lämpötiloissa. Vaihtoehtona vedyn suoralle polttoainekäytölle esimerkiksi autoissa on ehkä turvallisuuden vuoksi kannatettavampaa synteettisten fossiilisten polttoaineiden valmistus.



Kuva 2.71 Vety atomi ja vetymolekyyli. Vetyä voidaan tuottaa nk. reformoinnissa muista polttoaineista (hiilivedyistä) ja tällöin prosessissa vapautuu myös hiilidioksidia. Toinen vaihtoehto on hajottaa vettä elektrolyysin avulla suoraan vedyksi ja hapeksi.



Kuva 2.72 Vetyyn perustuvassa energiajärjestelmässä uusiutuvaa energiaa voidaan käyttää vedyn tuottamiseen ja vety voi toimia myös energiavarastona.

Polttokeinoja on hyvin erityyppisiä, vaikka niiden perustoimintaperiaate onkin sama. Polttokeinoerot ovat käytettyjen materiaalien suhteen toisistaan ja niissä vaadittavat lämpötilat ovat myös hyvin erilaisia, joillakin hyvin korkeitakin. Tämä vaikuttaa mm. tarvittaviin laitteistoihin itse polttokeino ympärillä, ja siihen miten nopeasti ne saadaan toimimaan. Tämän vuoksi kaikki polttokeino tyypit eivät sovi esimerkiksi kannettaviin pieniin laitteisiin, ja toiset taas sopivat hyvin useamman sadankin kilowatin tehon tuottamiseen. Taulukossa 2.6 on esitetty polttokeinojen päätyypit ja niiden keskeiset ominaisuudet.

Kennon anodin ja katodin välissä on elektrolyytti, joka on kaasutiivis ja näin ollen estää reaktioaineen ja hapettimen suoran sekoittumisen ja palamisen, mutta päästää anodin ja katodin välillä liikkuvat ionit läpi. Elektrolyytti voi olla joko kiinteässä tai nestemäisessä olomuodossa. Matalassa lämpötilassa toimivan polttokeino anodi ja katodi sisältävät yleensä katalyyttejä, jotka nopeuttavat reaktioita. Polttokeino nimetään usein elektrolyytin mukaan.

PEM (Proton exchange membrane)-polttokeino (kuva 2.73) ovat kehittyneet edelleen merkittävästi. Lyhenteestä käytetään myös nimitystä polymer electrolyte membrane. PEM-keino soveltuvat erityisesti liikennesovelluksiin, sillä niillä on korkea hyötysuhde myös osakuormilla sekä alhainen toimintalämpötila. Alhainen toimintalämpötila lyhentää käynnistysaikaa, joten keino soveltuvat myös lyhyen varavoimalaitoksiin, joiden on käynnistytävä nopeasti. Polttoaineena voidaan käyttää vetyä tai muita nestemäisiä hiilivetyjä. PEM-keinoissa käytetään katalyyttinä platinaa, minkä vuoksi keino ovat kalliita ja lisäksi platina ei saa olla yhteydessä hiilimonoksidiin (CO), mikä edelleen lisää koko järjestelmän kustannuksia.

Taulukko 2.6: Keskeisimpien polttokennotyyppien ominaisuudet

TABLE 6.2
Main Types of FCs and Their Operating Characteristics

Fuel Cell	Electrolyte	Anode Gas	Cathode Gas	Approximate Temperature (°C)	Typical Efficiency (%)
Proton exchange membrane (PEM)	Solid polymer membrane	Hydrogen	Pure or atmospheric oxygen	80	35–60
Alkaline (AFC)	Potassium hydroxide	Hydrogen	Pure oxygen	65–220	50–70
Phosphoric acid (PAFC)	Phosphorous	Hydrogen	Atmospheric oxygen	150–210	35–50
Solid oxide (SOFC)	Ceramic oxide	Hydrogen, methane	Atmospheric oxygen	600–1000	45–60
Molten carbonate (MCFC)	Alkali-carbonates	Hydrogen, methane	Atmospheric oxygen	600–650	40–55
Direct methanol (DMFC)	Solid polymer membrane	Methanol solution in water	Atmospheric oxygen	50–120	35–40

Alkaalipolttokennot (AFC, Alkaline fuel cell) ovat ensimmäisiä Baconin 1930-luvulla kehittämiä kennotyyppejä, joissa käytetään nestemäistä alkaaliliuosta elektrolyytinä (kaliumhydroksidi, KOH). Ne ovat luotettavia ja niillä on korkea hyötysuhde ja tästä syystä niitä käytetään erityisesti avaruussovelluksissa (esim. avaruussukkulat). Uusimmissa alkaalipolttokennoissa toimintalämpötila-alue on saatu laskettua jopa noin 23-70°C:seen. AFC:n haittana on muun muassa helposti myrkyttyvä elektrolyytti. Jo pienet CO- ja CO₂-pitoisuudet vaikuttavat kennon toimintaan ja aiheuttavat tiukkoja vaatimuksia polttoaineelle ja hapelle.

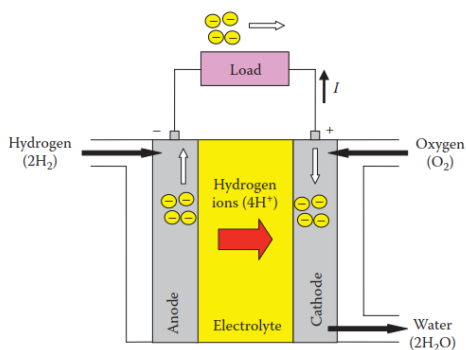
Fosforihappopolttokennot (PAFC, Phosphoric acid fuel cells) ovat ensimmäisen sukupolven polttokennoja, jossa elektrolyytti on H₃PO₄. Toimintalämpötila on huomattavasti korkeampi kuin PEM-kennoilla, joten ne sietävät paremmin CO:ta. PAFC-kennot ovat kuitenkin teho-painon ja –tilavuuden suhteen huonompia kuin muut polttokennot, eivätkä sovellu juuri liikuteltavaan käyttöön.

Sulakarbonaattipolttokennot (MCFC, Molten carbonate fuel cell) ovat korkealämpötilaisia kennoja. Korkea lämpötila mahdollistaa halvemmat katalyytit. Kennoa voidaan käyttää suoraan metaanilla tai biokaasulla ilman ulkoista reformeria. Sillä on korkea hyötysuhde ja se soveltuu parhaiten paikallaan oleviin ratkaisuihin, kuten voimalaitoksiin, varavoimaksi ja yhdistettyyn sähkön – ja lämmön tuotantoon.

Kiinteäoksidipolttokennojen (SOFC, Solid oxide fuel cell) elektrolyytti on nimensä mukaisesti kiinteä. Niiden saralla tehdään tällä hetkellä paljon kehitystyötä. SOFC-polttokennot toimivat korkeissa lämpötiloissa, mikä mahdollistaa halvemmat katalyytit samalla tavalla kuin

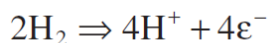
sulakarbonaattikennoilla. Myös SO-kennoja voidaan käyttää suurella valikoimalla muita polttoaineilta kuin vetyä. Korkea lämpötila mahdollistaa myös nopeat reaktiot, mutta pidemmän käynnistysajan. Koska polttokennosta vapautuu jätelämpöä, sähkön ja lämmön yhteistuotanto voi nostaa kokonaishyötysuhteen hyvin korkealle. SOFC soveltuu MCFC:n tavoin voimalaitoksiin, varavoimaksi ja yhdistettyyn sähkön – ja lämmön tuotantoon.

Metanolipolttokenno (DMFC, direct metanol fuel cell) käyttää suoraan metanolia (CH₃OH) ilman että sitä tarvitsee reformoida eli hajottaa vedyksi ja hiilioksidiksi ja -dioksidiksi. Tämän vuoksi se sopii hyvin kuluttajalaitteisiin kuten puhelimiin, viihdelaitteisiin, kannettaviin tietokoneisiin ja myös ajoneuvoihin. Metanoli on myrkyllinen alkoholi ja siten tutkimuksen tavoitteena on ollut turvallisemman (bio)etanolikennon kehittäminen.



Kuva 2.73 PEM-polttokennon periaatekuva ja toimiva polttokennosto, jossa useita kennoja on kytketty jännitteen nostamiseksi sarjaan. Yhden kennon tuottama jännite on noin voltin luokkaa.

PEM-polttokennon anodille johdetaan vetykaasua, joka katalyytin (esim. platina) vaikutuksesta hapettuu ja hajoaa vedyn neljäksi vetyioniksi ja neljäksi elektroniksi ϵ^- . Tämä nk. anodireaktio voidaan kuvata kemiallisella kaavalla



Vapautuneet elektronit kulkevat pienimmän resistanssin vuoksi polttokennoon kytkettyyn kuormaan ja sitä kautta toiselle elektrodille eli katodille. Vapautuneet vetyionit kulkevat membraanin ja elektrolyytin kautta katodille, jossa ne reagoivat ulkoa tuodun hapen ja kuorman kautta tulevien elektronien kanssa katodireaktiossa



jossa siis syntyy vettä. Koko kennon kemiallinen reaktio saadaan, kun nämä kaksi kaavaa yhdistetään, eli polttokenno yhdistää vetyä ja happea ja tuottaa veden lisäksi energiaa.



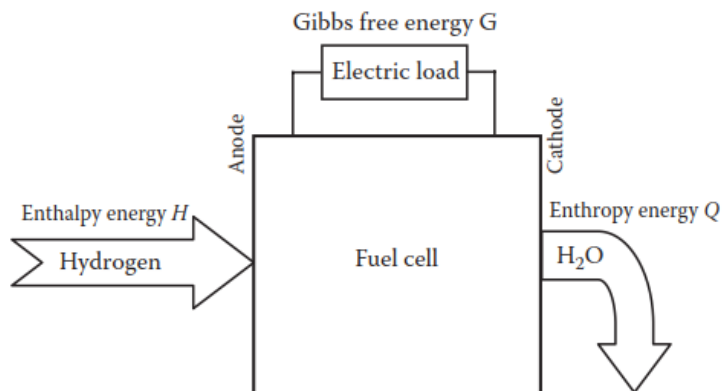
On hyvä muistaa, että vedyn tuottoprosesseissa tarvitaan vettä eli tämä kennosta vapautuva vesi voidaan käyttää uudelleen, jos vedyn tuotanto on polttokennon vieressä. Vettä voidaan käyttää myös esimerkiksi kasteluun.

Muiden taulukossa 2.6 esitettyjen polttokennojen kemialliset reaktiot ovat PEM-kennon tapaisia. Ne jätetään oheislukemiseksi ja yksityiskohdat löytyvät oppikirjan luvusta 6.6.2.

Polttokennot tuottavat toimiessaan sekä lämpöä että sähköä, joka on lähtöisin vedyn sisältämästä energiasta. Tämän prosessin ymmärtämiseksi tarvitaan termodynamiikan teorioita. Asiaa on havainnollistettu myös kuvassa 2.74. Amerikkalainen fyysikko ja kemisti Josiah Gibbs kehitti teorian 1800-luvun loppupuolella ja siksi vapautuvaa energiaa kutsutaan hänen nimellään. Kemiallisessa reaktiossa vapautuva energia G :

$$G = H - Q \quad (2.14)$$

jossa H on prosessin entalpia ja Q entropia. Polttokennon tapauksessa H voidaan ajatella vedyn sisältämäksi energiaksi ja Q katodilla veden muodostumiseen tarvittavaksi energiaksi.

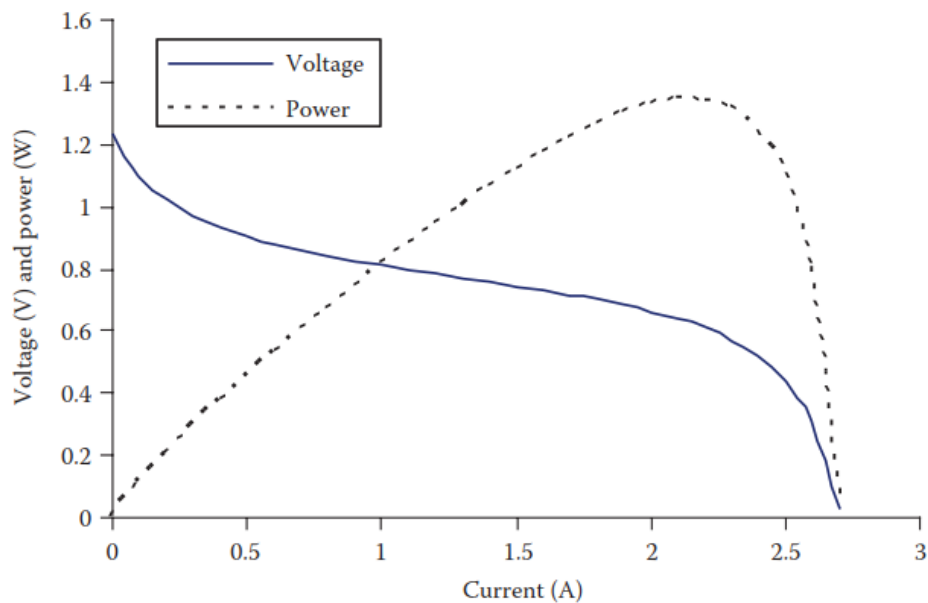


Kuva 2.74 Vedyn hapettumisessa vapautuva Gibbsin vapaa energia on käytettävissä ulkoisena sähköenergiana.

Polttokenno ei ole ideaalinen teholähde ja sen virrantiheyden (A/cm^2) kasvaessa erilaiset epäideaaliset häviöt aiheuttavat jännitteen alenemisen. Häviöitä voidaan havainnollistaa kuvan 2.75 mukaisella polarisaatiokäyrällä, jossa on kolme eri aluetta, joissa merkittävin häviömekanismi muuttuu. Aktivaatiohäviöt ovat vallitsevia, kun kennon virta on pieni ja syy on sähkökemiallisten reaktioiden hitaudessa. Virrantiheyden kasvaessa ohmiset häviöt johtuvat kennon osien sähköisistä vastuksista ja seurauksena on lineaarinen jännitteen alenema. Suurimmilla virrantiheyksillä elektrodien kemialliset reaktiot eivät ole tarpeeksi nopeita ja kennon jännite laskee huomattavasti. Aluetta kutsutaan massansiirtohäviöiden alueeksi, koska reaktioiden vaatimat katalyytit eivät ehdi siirtymään elektrodeilla riittävän nopeasti.

Polttokennoa ei pitäisi päästää tälle alueelle, koska silloin sen tuottama sähköenergia menee nollassa ja kenno tuottaa vain lämpöä.

Polttokennon toiminta-alueita on havainnollistettu kuvassa 2.75. Kuvaan on lisätty myös kennon tehokäyrä, jossa näkyy vastavanlainen maksimitehon piste kuin aurinkokennoissakin. Tämä olisi kennon optimaalisin käyttöpiste ja sen ylläpitäminen vaatii käytännössä tehoelektroniikkaa. Polttokennon toiminta muuttuu mm. lämpötilan ja käytetyn paineen vuoksi samantapaisesti kuin aurinkokennoillakin ja siten myös maksimitehon piste muuttuu. Esimerkiksi lämpötilan noustessa kennon häviöt pienenevät, koska elektrolyytin johtavuus paranee ja aktivaatiohäviöt pienenevät. Jos samalla kennon virrantiheys (virta) pysyy vakiona niin kennon jännite nousee lämpötilan kasvaessa.



Kuva 2.75 Polttokennon jännite-virta-ominaiskäyrä ja teho virran funktiona. Pienillä virran arvoilla jännite laskee aktivaatiohäviöiden vuoksi ja lineaarisella alueella kennon ohmiset häviöt pienentävät jännitettä. Virran ylittäessä kuvassa 2,5 A massansiirtohäviöt ovat merkittävimmät ja kennon tehontuotto romahtaa

2.7. Energiavarastot

Maan tai laajan alueen kattavassa sähköjärjestelmässä on käytetyn ja tuotetun sähkötehon oltava koko ajan yhtä suuri. Jos tuotettu teho on kulutusta pienempi niin sähköverkon 50/60 Hz taajuus alenee. Tämä johtuu siitä, että puuttuva energia otetaan järjestelmässä olevien pyöriä sähkögeneraattorien liike-energiasta. Tämän vuoksi niiden pyörimisnopeus laskee ja siten myös tuotetun sähkön taajuus pienenee. Vastaavasti ylituotannon aikana verkon taajuus nousee. Järjestelmän tilasta vastaava toimija, Suomessa Fingrid, valvoo koko ajan järjestelmän tilaa tuotannon määrää. Suomessa säätövoimana käytetään pääasiassa vesivoimaa.

Uusiutuvan energian tuotannon lisääntyessä myös tuotannon vaihtelut lisääntyvät. Uusiutuvan energian tuotanto on vaihtelevaa ja se riippuu suurelta osin sääolosuhteista. Tuotannon vaihdeltaessa tarvitaan, reservituotantoa tai varastoja, joihin ylituotannon energia varastoidaan. Kolmas vaihtoehto on kulutuksen säännöstely. Sähköenergia varastointiin on useita eri menetelmiä, mutta nimenomaan sähköverkon tarpeisiin riittävä suurten energiamäärien varastoiminen on edelleen haasteellista ja vaihtoehtoja on toistaiseksi vain vähän. Tunti- ja vuorokausivarastointiin on jo olemassa vaihtoehtoja mutta sähkön kausivarastoinnissa (kesä/talvi) ei taloudellisia vaihtoehtoja ole montaa.

Alessandro Volta kehitti akuston jo 1800, mutta energian laajamittainen ja taloudellinen varastointi on edelleen yksi tärkeimmistä avoimista kysymyksistä, vaikka akkuteknikka onkin kehittynyt hyvin paljon.

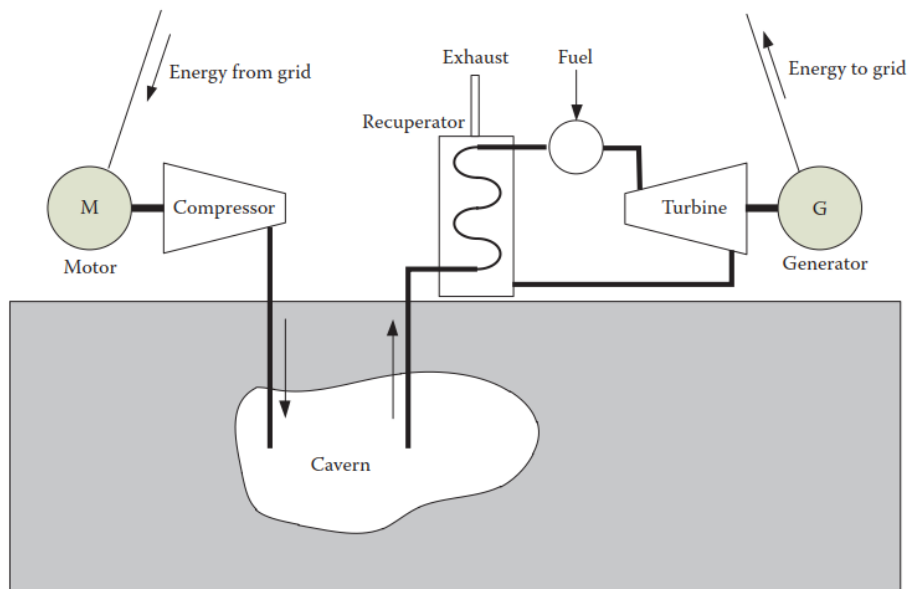
Sähköjärjestelmän tarpeita ajatellen erilaiset **vesivarastot** ovat edelleen tehokkain tapa energian varastointiin. Usein ne voivat olla erilaisia vesistöjen patoaltaita, mutta tarkoitukseen on myös rakennettu erityisiä varastoaltaita. Varastot ovat sitä tehokkaampia mitä suurempi korkeusero on ja myös korkealla vuoristoissa olevia järviä voi käyttää tarkoitukseen. Näissä sähköenergia tuotetaan samalla periaatteella kuin vesivoimaloissakin. Kun sähköstä on ylituotantoa, näiden varastojen generaattoreita voidaan käyttää moottoreita ja vettä pumpataan varastoon.



Kuva 2.76 Pumppuvesivoimalaitos, jossa vesiallasta käytetään energiavarastona.

Vesivarastoja vastaava iso varastointikyky saadaan käyttämällä **paineilmavarastoja**, nk. Compressed air energy storage, CAES. Niissä paineilmaa pumpataan esimerkiksi käytöstä poistettuun kaivokseen, joka on tiivistetty riittävän hyvin, kuva 2.77. Maailman ensimmäinen paineilmarasto toteutettiin vuonna 1978 Huntorfissa Saksassa. Varaston energia on 580 MWh ja teho 290 MW eli se voisi toimia maksimiteholla vain kaksi tuntia. Vuonna 1991 USAssa toteutettu McIntosh:in varasto on jo 2 860 MWh teho ollessa 110 MW eli maksimiteholla

toiminta-aika on jo noin vuorokausi. Näiden jälkeen maailmassa on toteutettu useitakin paineilmaparastoja.



Kuva 2.77 Paineilmavaraston periaate, kun varastona käytetään kaivosta

Vauhtipyöriä on käytetty energiavarastoina jo pitkään. Ne on usein yhdistetty johonkin laitteeseen osaksi sen rakennetta, ja siten tämäntyyppisten varastojen olemassaoloa ei aina tule huomanneeksi. Monissa varavoimalaitoksissa on myös varta vasten toteutettu hitausmassaan perustuvia varastoja esimerkiksi kuvan 2.78 tapaisesti. Alun perin niissä on käytetty normaaleja mekaanisia laakereita, mutta tekniikan kehittyttyä ja myös pyörimisnopeuksien kasvettua, vauhtipyörissä voidaan käyttää myös magneettisia laakereita. Niissä ei ole mekaanista kosketusta vaan pyörivä akseli leijuu magneettikentän aiheuttaman voiman ansiosta ja näin kitkahäviöt pienenevät eikä laakeri kulu mekaanisesti.

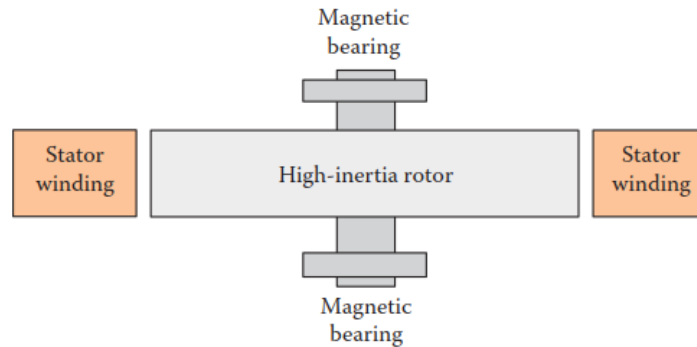
Vauhtipyörään varastoitunut energia on sen liike-energia E

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2.15)$$

jossa I on pyörivän osan hitausmassa kgm^2 ja ω kappaleen pyörimisnopeus rad/s . Jos kappale on sylinterin muotoinen ja sen massa on m (kg) ja säde r (m) niin kappaleen hitausmassa voidaan laskea helposti ja liike-energia on

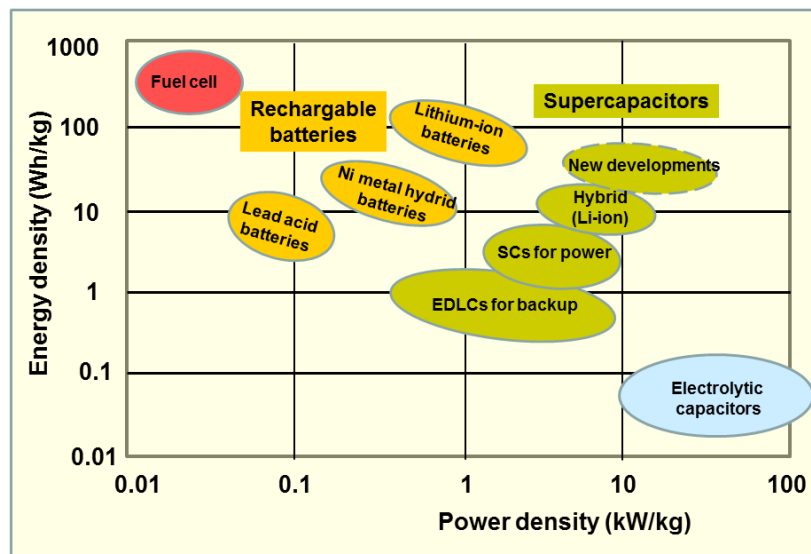
$$E = \frac{1}{4} m r^2 \omega^2 \quad (2.16)$$

Yhtälöstä näkee, että energiaa voi kasvattaa tehokkaimmin joko kasvattamalla sädettä tai pyörimisnopeutta. Tietenkin myös massan kasvattaminen auttaa.



Kuva 2.78 Vauhtipyörään perustuvan energiavaraston pääkomponentit magneettilaakereita käytettäessä.

Edelliset varastot perustuivat potentiaali- tai liike-energiaa. Sähköä voidaan varastoida myös sähkökentän avulla **kondensaattoreissa**. Tällöin varastoitu energia on $CU^2/2$ eli samaa muotoa kuin vauhtipyörissäkin. Normaleiden elektroniikassa ja sähkötekniikassa käytettävien kondensaattorien kapasitanssit ovat kuitenkin varsin pieniä, yleensä mikrofaradeja ja suurimmillaankin joissain elektrolyyttikondensaattoreissa joitakin kymmeniä millifaradeja. Tämän vuoksi kondensaattorit sopiva vain hyvin lyhytaikaiseksi varastoksi laitteiden tehollähteissä. Tämän vuoksi noin kahdenkymmenen viime vuoden aikana on kehitetty nk. **superkondensaattoreita**, jotka eroavat rakenteeltaan jonkin verran tavallisista kondensaattoreista. Niissä on käytetty materiaaleja, joilla kondensaattorin pinta-ala on saatu hyvin suureksi ja siten myös kapasitanssi suureksi. Hyvin tavanomainen kapasitanssi on esimerkiksi 3000 F, joka on siis merkittävästi suurempi kuin elektrolyyttikondensaattoreilla. Haittapuolena on se, että superkondensaattoreiden jännitekestoisuus on tyypillisesti 3-4 V johtuen käytetyistä elektrolyyteistä. Kuvassa 2.79 on esitetty varastojen energia- ja tehotiheyksiä ja nähdään että superkondensaattoreissa molemmat ovat korkeita.



Kuva 2.79 Erilaisten akkujen ja kondensaattorien teho- ja energiasuhteita.

Kondensaattoreissa energia varastoidaan sähkökentän avulla. Sama voidaan tehdä magneettikentän avulla, kun käytetään **induktansseja**, joiden energia on $LI^2/2$. Tässäkin siis riippuvuus induktanssista L ja virrasta I on samaa muotoa kuin aiemmin vauhtipyörässä ja kondensaattorissa. Koska tässä tapauksessa varastossa kulkee koko ajan suuri virta ovat induktanssin resistiiviset häviöt merkittäviä. Sen vuoksi induktanssiin perustuvissa varastoinnissa tavoitteena on käyttää suprajohteita, joissa käämityksen resistanssi saadaan mahdollisimman pieneksi. Haasteena on tarvittavat erittäin matalat lämpötilat. Yksi käynnissä olevan tutkimuksen tavoitteista onkin saavuttaa suprajohtavuus korkeammilla lämpötiloilla.

Akuissa energia varastoidaan sähkökemiallisessa muodossa akussa käytettyjen materiaalien kemiallisiin sidoksiin. Akkua ladattaessa sähköenergia muuttuu kemialliseksi energiaksi ja purettaessa takaisin sähköenergiaksi. Ensimmäiset akut olivat lyijyakkuja. Akkujen kehityksen tavoitteena on tuottaa akku, jonka energiatiheys on mahdollisimman suuri, häviöt pienet, itsepurkautuminen pientä, käyttöikä pitkä, ei muistiefektiä ja lisäksi turvallinen. Akuissa käytetäänkin lyijyn lisäksi hyvin erilaisia materiaaleja kuten NiCd, Ni-MH tai Li-ion ja ne eroavat ominaisuuksiltaan merkittävästi. Tässä tekstissä ei ole tarkoitus syventyä eri akkutekniikoihin tämän laajemmin.

Nykyään puhutaan myös paljon nk. **Power-to-X** -tekniikoista, (P2X). Niissä power tarkoittaa aina sähköenergiaa, joka yleensä on tuotettu uusiutuvilla tekniikoilla. Se muutetaan eri muotoihin, johon kirjain X viittaa. Power-to-gas-tekniologiasta: ylijäämä sähkö voidaan varastoida kaasunenergiaksi elektrolyysillä. Menetelmän haasteena on heikko hyötysuhde, mutta sillä on suuri varastointimahdollisuus, esimerkiksi Suomen kaasuverkoston varastointikapasiteetti on noin 150 000 MWh. Hyötysuhteellakaan ei ole välttämättä suurta merkitystä, jos sähköntuotanto on ylijäämäistä ja toinen vaihtoehto olisi säätää esimerkiksi tuulivoimaloiden tuotantoa pienemmäksi. Samalla tavalla voidaan tuottaa synteettisiä, fossiilisia polttoaineita. Raaka-aineiksi tarvitaan hiilidioksidia ilmasta, vetyä vedestä tai tyypeä ilmasta. Valmistusprosessi voidaan toteuttaa paikan päällä tuotetun aurinkosähkön tai tuulisähkön avulla. Lopputuotteet, kuten metaani, metanoli, dimetyylieetteri ja ammoniakki ovat polttoaineita, joita voidaan hyödyntää myös kemianteollisuudessa ja osaa polttomoottoreissa. Näissä tekniikoissa siis synteettisesti tuotettu polttoaine toimii energiavarastona.

Lähteet:

Mohamed A. El-Sharkawi, Electric Energy, An Introduction, 3rd Edition, CRC Press, ISBN 978-1-4665-0303-8

Useat tekstissä mainitut www-sivut