



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Alexi Einola

Pumppuvoimalaitosten kannattavuus Suomessa

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Kandidaatin tutkielma
Sähkö- ja energiatekniikka

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Aleksi Einola		
Tutkielman nimi:	Pumppuvoimalaitosten kannattavuus Suomessa		
Tutkinto:	Tekniikan kandidaatti		
Oppiaine:	Sähkö- ja energiatekniikka		
Työn ohjaaja:	Teemu Ovaska		
Valmistumisvuosi:	2025	Sivumäärä:	32

TIIVISTELMÄ:

Uusiutuvan energian yleistyessä Suomen energiajärjestelmässä tarvitaan rinnalle säätövoimaa ja energianvarastointiratkaisuja. Sähköverkon taajuuden on pysyttävä tasaisena, mutta uusiutuvan energian tuotanto on sääriippuvaista aiheuttaen epävakautta sähköverkon taajuuteen. Pumppuvoimalaitokset ovat kapasiteetiltaan maailman käytetyin energianvarastointimenetelmä, mutta Suomessa ei ole vielä yhtään itsenäistä laitosta käytössä. Niiden avulla voidaan varastoida ylimääräistä tuotettua sähköä ja käyttää sitä silloin, kun kulutus on suurta. Näin voitaisiin lisätä Suomen säätövoimakapasiteettia nykyisten ratkaisujen rinnalle, mikä parantaisi sähköjärjestelmän joustavuutta ja päästöttömyyttä.

Tutkielman tavoitteena oli tarkastella pumppuvoimalaitosten soveltuvuutta ja kannattavuutta Suomessa. Työssä käytiin läpi laitosten toimintaperiaatetta, rakennetta, eri toteutusvaihtoehtoja ja sen roolia uusiutuvan energian varastoinnissa. Ulkomaisten ja kotimaisten esimerkkien avulla havainnollistetaan pumppuvoimalaitosten toteutuksia sekä niiden tulevaisuuden näkymiä. Lopuksi esitetään faktoja pumppuvoimalaitosten taloudellisuudesta, ympäristöystävällisyydestä ja energian tuotannosta. Näiden pohjalta johtopäätöksissä arvioitiin pumppuvoimalaitosten kannattavuutta Suomessa ja vastataan tutkimuskysymyksiin.

Työssä esitetyn teorian pohjalta voidaan todeta, että pumppuvoimalaitokset voivat olla merkittävä osa Suomen sähköjärjestelmää, sillä ne tarjoavat tehokkaan ratkaisun uusiutuvan energian varastointiin. Käyttöönottoon liittyy haasteita, kuten sopivien sijaintien löytäminen ja korkeat investointikustannukset, mutta teknisiä ja rakenteellisia ratkaisuja on olemassa. Laitoksen kannattavuus Suomessa riippuu täysin toteutustavasta, ympäristövaikutusten arvioinnista ja suunnittelun tarkkuudesta. Hyvällä toteutuksella pumppuvoimalaitokset voivat tarjota pitkäaikaisen, kustannustehokkaan ja ympäristöystävällisen energianvarastointitavan Suomessa.

AVAINSANAT: Pumppuvoimalaitos, energiavarastointi, kannattavuusanalyysi, sähköjärjestelmä

Sisällys

1	Johdanto	6
2	Pumppuvoimalaitos	7
2.1	Yleistä	7
2.2	Keskeiset komponentit	9
2.2.1	Altaat	9
2.2.2	Vesitiet	10
2.2.3	Turbiinit ja pumput	10
2.3	Pumppuvoiman eri toteutusvaihtoehdot	11
3	Soveltuvuus Suomen sähköjärjestelmään	13
3.1	Suomen sähköjärjestelmä	13
3.2	Energiavarastoinnin tarve	15
3.3	Pumppuvoimalaitos Suomen sähköverkossa	16
4	Pumppuvoimalaitokset globaalisti ja Suomessa	17
4.1	Pumppuvoimalaitokset maailmalla	17
4.2	Projektit Suomessa	18
4.2.1	Hylätty projekti, Vaarunvuori	18
4.2.2	Ailangantunturi	19
4.2.3	Pyhäsalmi	20
5	Kannattavuus	22
5.1	Taloudellisuus	22
5.2	Ympäristöystävällisyys	24
5.3	Energian tuotanto	25
6	Johtopäätökset	27
7	Yhteenvedo	29
	Lähteet	30

Kuvat

Kuva 1. Energiavarastoinnin jakauma globaalisti. (Grönman ja muut, 2022, s.10)	7
Kuva 2. PHES-järjestelmän rakenne. (Barnes ja Levine, 2011, s.71)	9
Kuva 3. Suomen sähkötase 11.–17.3.2025 (Fingrid, n.d. -c)	13
Kuva 4. Ailangantunturin pumppuvoimalaitos (Kemijoki Oy, 2024-a)	19
Kuva 5. Vuoden 2024 viikoittaiset spot-hinnat (Nord Pool, n.d.)	24

Symbolit

E_p	Potentiaalienergia
g	Putoamiskiihtyvyys
h	Korkeusero
h_u	Putouskorkeus
m	Massa
P	Teho
\dot{Q}	Tilavuusvirtaus
η_t	Yksisuuntaisen turbiinin hyötysuhde
ρ	Veden tiheys

Lyhenteet

BESS	Akkuihin perustuva energian varastointijärjestelmä (<i>Battery Energy Storage System</i>)
CEP	Puhtaan energian paketti (<i>Clean Energy Package</i>)
GW	gigawatti
HVDC	Suurjännitetasavirta (<i>high-voltage direct current</i>)
Hz	hertsi
km	kilometri
km ²	neliökilometri
kV	kilovoltti
kW	kilowatti

m ³	kuutiometri
MW	megawatti
MWh	megawattitunti
PHES	Pumppuvoimalaitos (<i>Pumped Hydroelectric Energy Storage</i>)
PHS	Pumppuvoimalaitos (<i>Pumped Hydro Storage</i>)
ROI	Sijoitetun pääoman tuotto, (<i>Return On Investment</i>)
SPHES	Meri pumppuvoimalaitos (<i>Seawater Pumped Hydroelectric Energy Storage</i>)
UPHES	Maanalainen pumppuvoimalaitos (<i>Underground Pumped Hydroelectric Energy Storage System</i>)

1 Johdanto

Uusiutuvien energialähteiden suosion kasvaessa tarvitaan entistä tehokkaampia energian varastointimenetelmiä. Koska aurinko- ja tuulivoiman tuotanto on sääriippuvaista, tarvitaan niiden rinnalle energiavarastoja ja säätövoimaa sähköverkon vakauden ylläpitämiseksi. Pumppuvoimalaitokset ovat yksi keskeisimmistä energian varastointimenetelmistä maailmanlaajuisesti, mutta Suomessa ei ole vielä yhtäkään itsenäistä pumppuvoimalaitosta. Ilmastonmuutoksen torjunnan näkökulmasta pumppuvoimalaitokset voisivat tarjota tulevaisuudessa yhden mahdollisen ympäristöystävällisen säätövoiman muodon muiden ratkaisujen rinnalle.

Tämän tutkielman tavoitteena on arvioida pumppuvoimalaitosten kannattavuutta Suomessa kirjallisuuskatsauksen pohjalta. Tutkimus tarkastelee ensisijaisesti pumppuvoiman teknisiä ominaisuuksia, mutta ottaa huomioon myös taloudelliset näkökulmat.

Työssä pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Miten pumppuvoima voisi tukea Suomen sähköverkkoa?
- Millaisia haasteita sen käyttöönottoon liittyy?
- Onko pumppuvoimalaitos kannattava Suomessa?

Tutkielman toisessa luvussa käsitellään pumppuvoimalaitosten toimintaperiaatteita, keskeisiä komponentteja ja erilaisia toteutusvaihtoehtoja. Kolmannessa luvussa tarkastellaan Suomen sähköjärjestelmän nykytilaa, energiavarastoinnin tarvetta ja pumppuvoiman mahdollista roolia Suomen sähköverkossa. Neljännessä luvussa kerrotaan pumppuvoimalaitoksista maailmalla ja Suomessa olevista hankkeista. Viidennessä luvussa käydään läpi pumppuvoimalaitosten kannattavuutta taloudellisuuden, ympäristöystävällisyyden ja energian tuotannon näkökulmista. Näiden pohjalta luvussa kuusi esitetään johtopäätökset ja seitsemännessä luvussa yhteenveto työn keskeisistä havainnoista.

2 Pumppuvoimalaitos

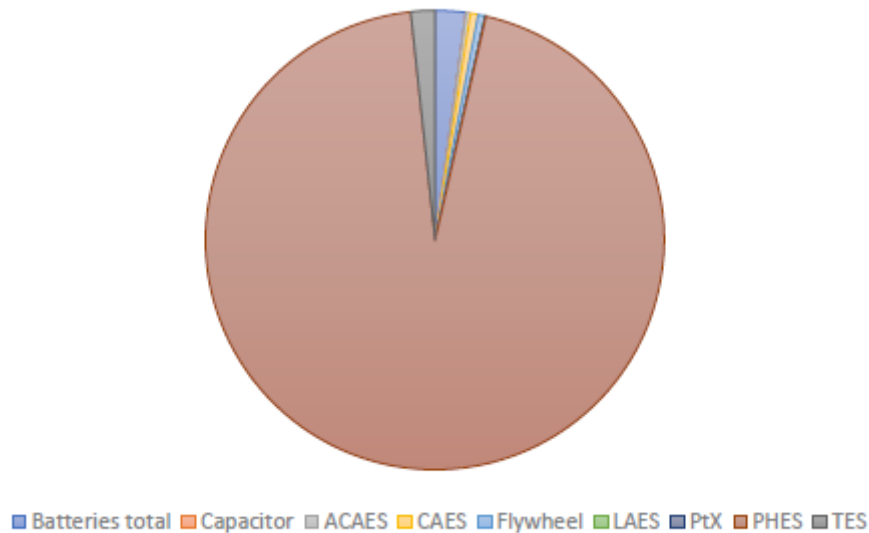
2.1 Yleistä

Rehmanin ja muiden (2015, s. 588) mukaan, pumppuvoimalaitos varastoi energiaa veden potentiaalienergiana, kun vettä pumpataan alemmasta altaasta ylempään altaaseen. Tässä tutkielmassa käytetään pumppuvoimalaitoksista englanninkielisen termin Pumped Hydroelectric Energy Storage lyhennettä PHES. Joissakin aineistoissa laitoksiin viitataan myös lyhenteellä PHS (*Pumped Hydro Storage*). Lyhenteiden taustalla olevat englanninkieliset termit tarkoittavat samaa sovellusta, mutta yhdenmukaisuuden vuoksi tässä työssä käytetään jatkossa ainoastaan lyhennettä PHES. Rehman ja muut (2015) toteavat, että tällaisessa järjestelmässä hyödynnetään matalan kulutuksen aikana edullista sähköä veden pumppaamiseen. Sähkön kysynnän ja hinnan ollessa korkea, vesi vapautetaan ylemmästä altaasta, minkä jälkeen se kulkee turbiinin läpi ja siihen kiinnitetty generaattori muuntaa liike-energian sähköksi (Rehman, S. ja muut, 2015, s. 588). Välimäki (2024) toteaa, että pumppuvoimalaitos kuluttaa enemmän sähköä kuin se tuottaa. Sen ensisijainen tarkoitus on kuitenkin tarjota nopeasti sähköä suuren kysynnän aikana. Hänen mukaansa sähköä saataisiin myös selvästi pidempään kuin sähköakuista.

European Energy Research Alliance (EERA, 2016) toteaa, että varastoitu energia on verrannollinen veden massaan ja pystysuoraan korkeuteen. Tämä perustuu potentiaalienergian kaavaan, joka esitetään yhtälössä 1 (Seppänen R. ja muut, 2013, s. 125). Yhtälössä E_p tarkoittaa potentiaalienergiaa, m massaa, g putoamiskiihtyvyyttä ja h korkeuseroa. Putoamiskiihtyvyys on vakio, mutta sen arvo voi hieman vaihdella maantieteellisen sijainnin mukaan. Tämän vuoksi potentiaalienergian suuruuteen vaikuttavat ensisijaisesti massa ja korkeusero. Mitä suurempi veden massa ja korkeusero altaiden välillä on, sitä enemmän potentiaalienergiaa varastoituu veteen.

$$E_p = mgh, \quad (1)$$

Energiavarastot jaetaan mekaanisiin, sähkökemiallisiin, kemiallisiin, sähkömagneettisiin ja termisiin varastoihin. PHES kuuluu näistä mekaanisiin varastoihin. Kuvan 1 mukaisesti maailman kaikista verkkoon kytketyistä energiavarastoista, suurin osa kuuluu PHES-laitoksiin, joiden osuus on yli 94 % globaalista energianvarastointikapasiteetista (Grönman ja muut, s. 8–10).



Kuva 1. Energiavarastoinnin jakauma globaalisti. (Grönman ja muut, 2022, s.10)

Hoff (2022, s. 88–91) kertoo pumppuvoimalaitosten eri käyttötarkoituksista ja niiden merkityksestä. Keskeisin käyttötarkoitus on suuren mittakaavan energiavarastointi. PHES on pääasiassa suunniteltu siirtämään suuria energiamääriä vuorokauden eri ajankohtien välillä sekä tasapainoittamaan viikoittaisia tai kuukausittaisia kuormitusvaihteluita. Toinen käyttötarkoitus on lyhytaikainen energian varastointi ja kantaverkkopalvelut. Vaikka useimmat pumppuvoimalaitokset on suunniteltu purkamaan energiaa useiden tuntien ajan, niitä voidaan silti hyödyntää lyhytaikaisissa kantaverkkopalveluissa. Hoffin (2022, s. 88–91) mukaan PHES-laitoksia voidaan hyödyntää kantaverkon taajuuden tasapainottamisessa myös nopealla aikavälillä. Näin ollen ne voivat toimia säätövoimana perinteisten vesivoimalaitosten tavoin. Jotkin laitostyytit soveltuvat paremmin nopeisiin säätömuutoksiin ja toiset soveltuvat paremmin hitaampiin säätötarpeisiin.

2.2 Keskeiset komponentit

2.2.1 Altaat

Barnesin ja Levinen (2011, s. 63) mukaan altailla on keskeinen merkitys PHES-järjestelmien toimivuuden kannalta. Ylä- ja ala-altaiksi kutsutut säiliöt toimivat järjestelmän energiavarastoina, jotka ovat kriittisiä teknisen suunnittelun näkökulmasta sekä myös sosiaalisten ja ympäristövaikutusten kannalta. Nämä voivat olla ratkaisevia tekijöitä uusille projekteille. Uusien altaiden rakentaminen on haastavaa, minkä vuoksi suositeltavaa on hyödyntää jo olemassa olevia säiliötä. Sopivien altaiden löytäminen on mahdollista, mutta uusien altaiden rakentaminen on todennäköisesti tarpeellista tulevaisuuden kannalta. (Barnes & Levine, 2011, s. 63)

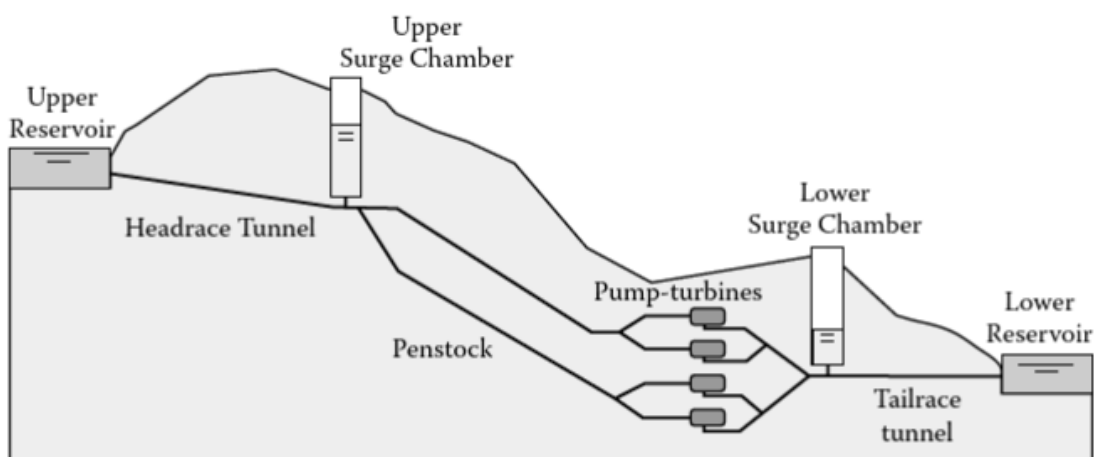
Barnes ja Levine (2011, s. 63–65) kertoo, että yläaltaita voidaan toteuttaa eri tavoin, esimerkiksi laaksoaltaana tai mäen laelle rakennettuina altaina. Laaksoallas toteutetaan rakentamalla pato poikittain jokilaaksoon siten, että vesi kertyy padon taakse. Mäen laelle rakennettu allas puolestaan toteutetaan rakentamalla penger kukkulan ympärille, jolloin vesi varastoituu sen sisälle. Yläaltaan suunnittelussa on myös otettava huomioon tulvariskit ja ylitäyttö. Barnes ja Levine (2011, s. 77) käsittelee myös maanalaisia pumppuvoimaloita (*Underground Pumped Hydroelectric Energy Storage System, UPHES*). Tällaisissa järjestelmissä ala-altaana käytetään maanalaista luolastoa tai vesistöä, kun taas yläallas voi olla pinnalle kaivettu tai pengerretty allas.

Ala-altaita voidaan sijoittaa olemassa oleviin altaisiin, jokiin tai jokilaaksoihin. Lisäksi vaihtoehtoisia sijoituspaikkoja ovat meret, järvet tai erilaiset maanalaiset rakenteet. (Barnes & Levine, 2011, s. 67). Maanalaisia rakenteita hyödynnetään UPHES-järjestelmissä, kuten edellä mainittiin. Tämän työn kannalta oleellimmat allasvaihtoehdot yläaltaiksi ovat kukkulan päällä oleva allas, korkeammalla oleva vesistö tai maan tasolla oleva pengerretty allas, joka soveltuu yläaltaaksi UPHES-järjestelmiin. Ala-altaiksi Suomessa sopivat järvet ja maanalaiset rakenteet, kuten vanhat kaivokset.

2.2.2 Vesitiet

Barnesin ja Levinen (2011, s. 67) mukaan pumppuvoimalaitoksen vesitiet koostuvat neljästä perusosasta. Nämä ovat yläkanava (*headworks*), tulokanava (*penstock*), alakanava (*tailrace*) sekä yksi tai kaksi painetasainta (*surge tanks*), jotka mahdollistavat veden liikkumisen ylä- ja ala-altaan välillä. Kuvassa 2 näkyy perinteisen, maanpäällisen pumppuvoimalaitoksen rakenne, jossa kuvataan vesikanavat.

Yläkanava yhdistää yläaltaan tulokanavaan ja toimii veden sisään tulona sähköntuotantotilassa sekä poistoreittinä pumppaustilassa. Koska putki on kaksisuuntainen, pyörteitä pitää välttää laitoksen tehokkuuden maksimoimiseksi. Tulokanava on päävesijohto yläaltaan ja turbiinikoneiston välillä. Niitä voi olla yksi tai useampi, ja ne voidaan sijoittaa joko maanpäälle tai alle. (Barnes ja Levine, s.67). Alakanava on vesireitti ala-altaan ja turbiinikoneiston välillä. Painetasaimia voidaan sijoittaa veden johto järjestelmän ylä- tai alapuolelle. Niiden tarkoituksena on vaimentaa painevaihteluita, suojata vesijohtoja, turbiinia ja pumppulaitteistoa. Lisäksi painetasain auttaa turbiinikoneiston kuormituksen säätelyssä. (Barnes ja Levine, 2011, s. 69).



Kuva 2. PHEP-järjestelmän rakenne. (Barnes ja Levine, 2011, s.71)

2.2.3 Turbiinit ja pumput

Barnes ja Levine (2011, s.71–74) jakavat turbiinit kahteen päätyyppiin: reaktioturbiineihin ja impulssiturbiineihin. He esittelevät neljä eri turbiinityyppiä, jotka

ovat Francis-turbiini, sekavirtausturbiini, Kaplan-turbiini ja Pelton-turbiini. Näistä Pelton-turbiini kuuluu impulssiturbiineihin, kun taas muut turbiinit voidaan luokitella reaktioturbiineihin. Tässä työssä käsitellään pääasiassa Pelton-, Kaplan- ja Francis-turbiineja, sillä ne ovat yleisimmät turbiinimallit.

Jotkin pumppuvoimalaitokset voivat käyttää impulssiturbiineja yhdessä erillisen keskipakopumpun kanssa. Impulssiturbiinien toiminta perustuu veden liike-energian hyödyntämiseen. Yläaltaasta tuleva vesi johdetaan suuttimen kautta, jolloin syntyy vahva ja tarkasti suunnattu vesisuihku. Tämä vesisuihku osuu turbiinin pyörään ja se siirtää veden liike-energian turbiiniin. Turbiinin pyöriessä samaan akseliin kytketty generaattori muuntaa liike-energian sähköksi. Pelton-turbiini toimii ainoastaan turbiinina, eikä se kykene pumppaamaan vettä. Tästä syystä se tarvitsee rinnalleen erillisen keskipakopumpun. (Barnes ja Levine, 2011, s. 71).

Suurin osa PHES-laitoksista hyödyntää reaktioturbiineja, jotka toimivat reaktiovoimien periaatteella. Reaktioturbiinien suuttimet on kiinnitetty spiraalikoteloon, joka ohjaa veden virtausta turbiiniin. Sähköntuotantotilassa vesi virtaa turbiinin läpi ja pyörittää sitä, kun taas pumppaustilassa turbiini toimii pumpun tavoin ja nostaa vettä yläaltaaseen. Reaktioturbiineihin kuuluvat Francis- ja Kaplan-turbiinit. Kaplan-turbiinit ovat aksiaalivirtausturbiineja, mikä tarkoittaa, että vesi liikkuu niiden läpi suoraan akselin suuntaisesti. Francis-turbiinit ovat radiaalivirtausturbiineja, joissa vesi virtaa sisään turbiinin kehältä ja poistuu keskeltä (Barnes ja Levine, 2011, s. 71–74).

2.3 Pumppuvoiman eri toteutusvaihtoehdot

Pumppuvoimalaitoksilla on erilaisia toteutusvaihtoehtoja, mutta niiden periaate on sama kuin perinteisillä pumppuvoimalaitoksilla. Perinteisen pumppuvoimalaitoksen rakenne on selitetty aikaisemmissa luvuissa, joten tässä alaluvussa perehdytään enemmän kahteen muuhun vaihtoehtoon. Papadakis ja muut (2022, s.25) esittelevät artikkelissaan, kaksi innovatiivista pumppuvoimalaitoksen toteutusvaihtoehtoa:

maalaisen pumppuvoimalaitoksen (UPHES) ja meripumppuvoimalaitoksen (*Seawater Pumped Hydroelectric Energy Storage*, SPHES). Tässä työssä käsitellään pääasiassa UPHES-järjestelmää ja perinteistä PHES-järjestelmää, sillä Suomessa on suunnitteilla juuri näitä laitostyyppisiä (EPV Energia Oy, n.d.; Kemijoki Oy, 2024-a).

Näiden kahden järjestelmän pääero perinteiseen pumppuvoimalaitokseen verrattuna on niiden ala-altaan rakenne. Maalaisessa pumppuvoimalaitoksessa ala-altaana toimivat hylätyt kaivokset tai louhokset, kun taas yläallas sijaitsee maan tasolla. Meripumppuvoimalaitoksissa ala-altaana toimii meri, mikä vähentää rakennuskustannuksia ja säästää aikaa. (Papadakis ja muut, 2022, s. 25)

3 Soveltuvuus Suomen sähköjärjestelmään

3.1 Suomen sähköjärjestelmä

Suomen sähköjärjestelmä koostuu voimalaitoksista, kantaverkosta, suurjännitteisistä jakeluverkoista, jakeluverkoista ja sähkönkuluttajista. Suomi kuuluu pohjoismaiseen synkronialueeseen, johon kuuluvat myös Ruotsi, Norja ja Itä-Tanska. Lisäksi Suomi on liitetty Viron sähköverkkoon tasasähköyhteyksillä. Pohjoismainen synkronialue on yhdistetty tasasähköyhteyksillä myös Keski-Euroopan sähköjärjestelmään. (Fingrid, n.d. -a).

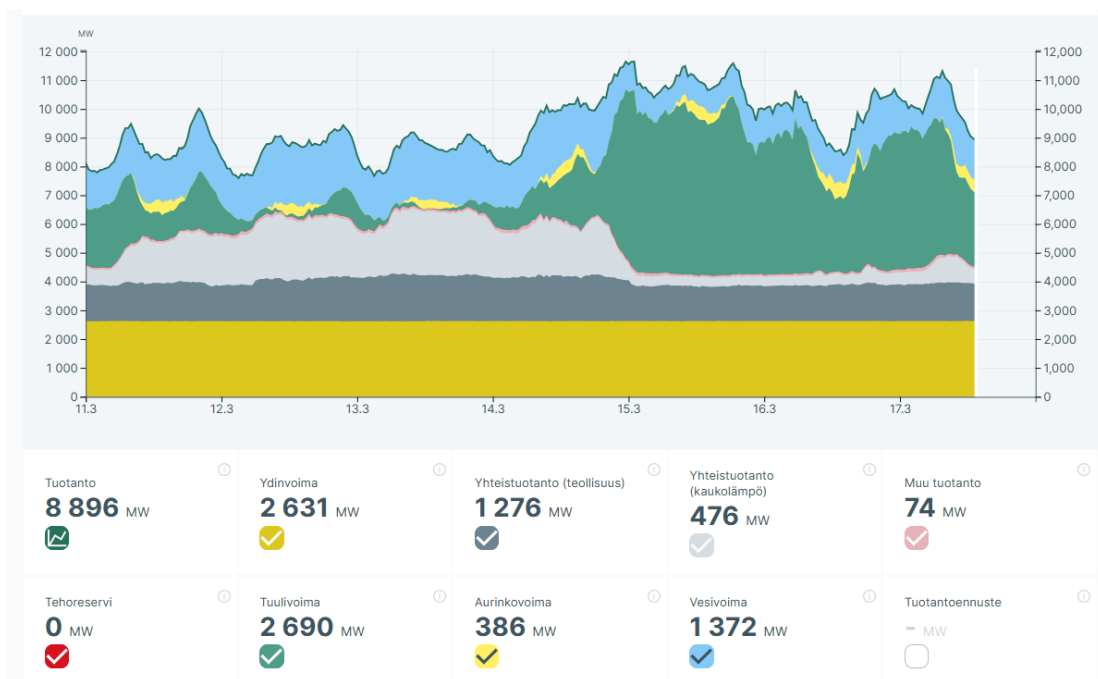
Fingrid vastaa Suomen kantaverkon valvonnasta, käytön suunnittelusta, tasepalvelusta, verkon ylläpidosta, rakentamisesta, kehittämisestä ja sähkömarkkinoiden toiminnan edistämisestä. Kantaverkko on suurjännitteinen verkko, johon on liitetty suurikokoiset voimalaitokset, tehtaot sekä jakeluverkot. Kantaverkkoon kuuluu 5 400 km:ä (kilometri) 400 kV:n (kilovoltti), 1 000 km:ä 220 kV:n ja 7 600 km:ä 110 kV:n voimajohtoja. Lisäksi kantaverkkoon kuuluu 320 km HVDC-kaapeleita (suurjännitetasavirta, *high-voltage direct current*) ja yli 120 sähköasemaa. Kantaverkko mahdollistaa sähköntuottajien ja kuluttajien välisen kaupan valtakunnallisella ja valtakunnan rajat ylittävällä tasolla. (Fingrid, n.d. -a)

Energiateollisuuden (n.d. -a) mukaan kantaverkosta haarautuvat suurjännitteiset jakeluverkot, jotka siirtävät sähköä alueellisesti. Jakeluverkot voivat liittyä kantaverkkoon suoraan tai suurjännitteisen jakeluverkon kautta. Suurjännitteiset jakeluverkot toimivat 110 kV:n jännitteellä, kun taas jakeluverkkojen jännitetasot ovat 0,4, 1, 10 tai 20 kV. Enintään 1 kV:n jännitettä kutsutaan pienjännitteeksi, keskijännitteeksi kutsutaan 1–35 kV ja suurjännitteeksi 110–400 kV.

Fingridin (n.d. -b) mukaan Suomen sähkönkulutus on kaikkien verkkoon kytkettyjen kuormien summa, ja se vaihtelee jatkuvasti vuodenajasta ja vuorokauden ajasta riippuen. Lisäksi sähköntuotannossa tapahtuu muutoksia lyhyellä ja pitkällä aikavälillä.

Sähkökulutuksen ja tuotannon hetkellinen tasapaino nähdään sähköverkon taajuudesta. Suomen sähköverkon taajuus pyritään pitämään 50 hertsissä (Hz). Kun kulutus on tuotantoa suurempi, taajuus laskee alle 50 Hz nimellisarvon, ja jos tuotanto on kulutusta suurempi, taajuus nousee yli 50 Hz. Suomen sähköverkon taajuuden vaihtelu sallitaan 49,9 ja 50,1 Hz välillä. Fingrid huolehtii kulutuksen ja tuotannon tasapainosta varmistuen näin sähköjärjestelmän vakauden.

Sähköntuotanto jakautuu eri energialähteisiin, jotka yhdessä muodostavat Suomen sähköntuotannon kokonaisuuden. Kuvassa 3 esitetään Suomen sähköntuotannon jakautuminen ajalta 11.–17.3.2025. Kuvaajasta nähdään, että ydinvoiman tuotanto pysyy koko viikon ajan täysin tasaisena, samoin kuin suurimmaksi osaksi yhteistuotanto. Merkittävästi tuotannossa vaihtelee vesivoima, aurinkovoima, tuulivoima ja kaukolämmön tuotanto. Erityisesti tuuli- ja aurinkovoima on vaihtelevaa, koska ne ovat riippuvaisia sääolosuhteista. Uusiutuvien energialähteiden rinnalle tarvitaan säätövoimaa, jota esimerkiksi vesivoima tarjoaa. Kuvaajasta nähdään, että vesivoiman käyttö kasvaa silloin, kun uusiutuvien energialähteiden tuotanto on alhaisimmillaan.



Kuva 3. Suomen sähköntuotanto 11.–17.3.2025 (Fingrid, n.d. -c)

3.2 Energiavarastoinnin tarve

Nykyisin energian varastoinnilla on tärkeä rooli energiateollisuudessa. Tällä hetkellä sähköverkon varastointikapasiteetti on suunniteltu keräämään energiaa hitaammin reagoivilta lämpövoimaloilta ja jakamaan sitä uudelleen tarpeen mukaan. Energiavarastointilaitosten rahoitus perustuu pääasiassa siihen, että sähköä ostetaan edulliseen hintaan ja myydään kalliimmalla. Ennen energian varastointia käytettiin pääasiassa suurten lämpövoimaloiden sähköntuotannon optimointiin eli tasaamaan perus- ja huippukuormitusta sekä ylläpitämään sähköverkon vakautta. Lisäksi sen avulla voitiin hyödyntää sähkön hintavaihteluita. Tulevaisuudessa energian varastointia tullaan käyttämään yhtenä monista keinoista, joilla uusiutuvan energian tuotannon ja sähkönkulutuksen välistä tasapainoa hallitaan. Energiavarastoinnin merkitys sähköntuotannossa kasvaa entisestään, kun uusiutuvien energian lähteiden osuus nousee. (Barnes ja Levine, 2011, s. 1)

Barnes ja Levine (2011, s. 2) toteavat, että tuuli- ja aurinkoenergia ovat täysin riippuvaisia säästä, mikä tarkoittaa, että niitä ei voida tuottaa tarpeen mukaan. Aurinkopaneelien kennot eivät kykene tuottamaan energiaa ilman auringonpaistetta, eikä tuulivoima tuota energiaa ilman tuulen aiheuttamaa liike-energiaa turbiiniin. Lisäksi huomattava määrä aurinkopaneeleja on asennettu koteihin, pienyrityksiin ja muihin kohteisiin, jotka tuottavat vain murto-osan energiatarpeesta. Tämä johtaa siihen, että sähköyhtiöt joutuvat hallita suuria määriä hajautettuja ja pienikokoisia energialähteitä. (Barnes ja Levine, 2011, s. 2)

Pohjolan Voiman (n.d.) mukaan Suomen sähköjärjestelmän tasapainon ylläpitämiseksi tarvitaan säätövoimaa, kulutuksen joustoa sekä laajamittaista energian varastointia. Koska sähköä ei vielä voida varastoida suuressa mittakaavassa, sitä on tuotettava jatkuvasti yhtä paljon kuin sitä kulutetaan. Pohjolan Voiman mukaan säätötarpeen arvioidaan kaksinkertaistuvan vuoteen 2030 mennessä. Laajamittainen energian varastointi toimii säätövoiman tavoin, vaikka se ei itse tuota energiaa, vaan ainoastaan varastoi ja vapauttaa sitä tarpeen mukaan.

3.3 Pumppuvoimalaitos Suomen sähköverkossa

Muljadin ja muut (2021, s. 12) kertovat, että perinteinen vesivoimala käyttää synkronigeneraattoreita sähkön tuottamiseen. Siihen kuuluu vähintään nopeudensäädin ja magnetointilaite. Nopeudensäädin säätelee taajuutta ja magnetointilaite säätelee jännitettä. Lisäksi järjestelmässä voi olla sähköverkon vakautusjärjestelmä, joka vaimentaa verkossa esiintyviä tehon vaihteluita. Näiden jälkeen synkronigeneraattori yhdistyy voimalaitoksen muuntajaan, joka on kytketty sähköverkkoon.

Papadakiksen ja muiden (2022, s. 4) mukaan pumppuvoimaloiden keskeisimmät tehtävät sähköverkon kannalta ovat sen vakauden ylläpitäminen ja kuorman tasapainotus. Pumppuvoimalaitokset tukevat sähköverkon kuorman tasapainoa siirtämällä sähköntuotantoa matalan kysynnän ajankohdista korkean kysynnän ajankohtiin, mikä parantaa verkon kokonaistehokkuutta. Lisäksi ne kykenevät reagoimaan nopeasti sähköntuotannon ja -kulutuksen vaihteluihin, mikä tukee sähköverkon vakautta ja vähentää sähkökatkojen tai laajempien verkon häiriöiden riskiä.

Valtaosa Suomen säätövoimasta tuotetaan vesivoimalla tai hankitaan muista Pohjoismaista, joissa on helposti säädettävää vesivoimatuotantoa (Energiateollisuus, n.d. -b) Jos Suomen sähköverkkoon rakennettaisiin oma pumppuvoimalaitos, sähköjärjestelmän omavaraisuus kasvaisi, eikä säätövoimaa tarvitsisi ostaa muilta Pohjoismailta. Tämä vähentäisi Suomen riippuvuutta tuontisähköstä ja vahvistaisi energiantuotannon itsenäisyyttä.

4 Pumppuvoimalaitokset globaalisti ja Suomessa

4.1 Pumppuvoimalaitokset maailmalla

Grönmanin ja muiden (2022, s. 9–10) mukaan kuvassa 1 esitetty maailmalaajuinen verkkoon kytkettyjen energiavarastojen kokonaiskapasiteetti on yhteensä 192 gigawattia (GW). PHES-laitokset muodostavat yli 94 % tästä kokonaiskapasiteetista, eli noin 180 gigawattia. Vertailun vuoksi International Renewable Energy Agency:n (IRENA, s. 3, 2024-a) mukaan maailman tuulivoimakapasiteetti oli vuonna 2023 noin 1 017 gigawattia. Näin ollen PHES-laitosten osuus vastaa noin 18 % tuulivoiman kokonaiskapasiteetista maailmanlaajuisesti.

U.S. Energy Information Administration (EIA, 2023) mukaan Kiinalla oli toukokuussa 2023 yhteensä 50 gigawattia toiminnassa olevaa pumppuvoimalaitoskapasiteettia. Tämä vastaa yli 30 % maailman PHES-kapasiteetista, joka on enemmän kuin millään muulla valtiolla. Tällä hetkellä Kiinassa on rakenteilla 89 gigawattia lisää pumppuvoimakapasiteettia. Lisäksi kehittäjät pyrkivät saamaan valtiolta lupia, maa- ja rahoitusta, jotta voitaisiin rakentaa vielä 276 gigawattia lisää PHES-kapasiteettia.

IRENA:n (s. 12, 2024-b) uusiutuvan energian kapasiteettitilastojen mukaan Kiinan jälkeen suurimmat pumppuvoimalaitoskapasiteetit löytyvät Yhdysvalloista ja Japanista. Japani on toiseksi suurin, ja sen varastointikapasiteetti oli vuonna 2023 noin 21 817 megawattia (MW). Kolmanneksi suurin kapasiteetti on Yhdysvalloissa ja se oli vuonna 2023 noin 16 744 megawattia. Euroopan kokonaiskapasiteetti oli vuonna 2023 noin 28 871 megawattia, josta suurimman osan muodostavat Saksa ja Italia. Saksan kapasiteetti on 5 423 megawattia ja Italian 4 039 megawattia.

International Hydropower Associationin (IHA, 2024) mukaan maailman suurin pumppuvoimalaitos sijaitsee Kiinassa. Fengningin pumppuvoimalaitos, joka sijaitsee Hebein maakunnassa, on teholtaan 3 600 megawattia. Hanke valmistui 11.8.2024, kun

voimalan viimeinen käännettävä turbiiniyksikkö otettiin käyttöön. Laitoksen turbiinikoneisto koostuu kahdestatoista pumpputurbiiniyksiköstä, joista jokainen on teholtaan 300 megawattia. Ne ovat käännettäviä pumpputurbiineja, joten ne toimivat turbiineina, että pumppuina. NS Energy (2020) -artikkelin mukaan Fengningin pumppuvoimalaitoksen turbiinit ovat tyypiltään Francis-turbiineja. Laitoksen altaiden välinen putoamiskorkeus on noin 425 metriä (Hopf, n.d.).

4.2 Projektit Suomessa

Suomessa on aiemmin suunniteltu useita pumppuvoimalaitoshankkeita, mutta niitä ei ole saatu toteutettua. Tällä hetkellä Suomessa on käynnissä useita projekteja, joista käydään läpi tässä kappaleessa kaksi, yhden aiemmin hylätyn projektin lisäksi.

4.2.1 Hylätty projekti, Vaarunvuori

Suomeen suunniteltiin jo 1970-luvulla ensimmäistä pumppuvoimalaitosta Korpilahden Vaarunvuorille. Vaarunvuoret sijaitsevat Jyväskylän eteläpuolella Päijänteen itärannalla. Pumppuvoimalan oli tarkoitus olla 500 megawatin kokoinen energiavarasto. Hanke kuitenkin päättyi ympäristönsuojelun takia. Vaikka Suomessa ei ole kovin suuria luontaisia korkeuseroja, Imatran Voima (nykyinen Fortum) oli alustavasti löytänyt sopivan paikan (MTV Uutiset, 2022).

MTV Uutisten mukaan (2022) Päijänteen ja yläaltaan välinen korkeusero olisi ollut yli sata metriä ja yläaltaan pinta olisi ollut noin 195 metriä merenpinnan yläpuolella. Hanketta alettiin aikanaan kehittämään Loviisaan valmistuvan ydinvoimalaitoksen takia. Ydinvoiman osuuden kasvaminen aiheutti suuren säätövoiman tarpeen. Imatran Voiman ideana oli, että pumppaukseen käytettäisiin öisin ja viikonloppuisin ydinvoimasähköä.

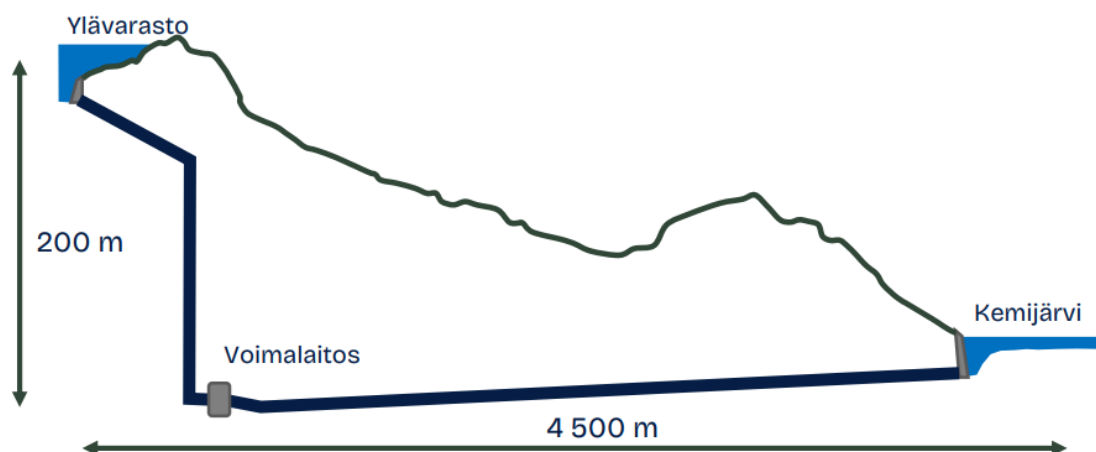
Hankkeen isoin haaste oli sen aiheuttama vahinko paikalliselle luonnolle. Keski-Suomessa olevat harvinaiset kasvilajit olisivat saattaneet kärsiä rakennustöistä. Entisen voimalainsinöörin mukaan vedenotto ja purkuaukon lähellä kasvoi harvinainen kasvilaji,

joka olisi voinut kärsiä vedenvaihtelusta. Luonnon vahingoittumisen pelko synnytti kansanliikkeen. Tästä huolimatta voimalalle annettiin rakennuslupa kymmeneksi vuodeksi vuonna 1982. Pumppuvoimalan toimintaperiaate herätti myös kysymyksiä, sillä se ei tuota energiaa, vaan se varastoi sitä. Kansanliikkeen vastustus ja ydinvoiman rakentamisen jäädyttäminen lykkäsi pumppuvoimalan rakentamista. 1990-luvun loppupuolella avautui sähkömarkkinat, jotka päättivät hankkeen lopullisesti (MTV Uutiset, 2022).

4.2.2 Ailangantunturi

Kemijoki Oy suunnittelee pumppuvoimalaitosta Kemijärven eteläosaan, Ailangantunturille. Kyseessä olisi perinteinen pumppuvoimalaitos, jossa käytetään pumpputurbiineja eli sama laitteisto toimii pumppuna ja turbiinina. Pumpputurbiiniyksikköjä olisi yhteensä kolme ja laitoksen teho olisi yhteensä 550 megawattia. Laitos olisi liitettävissä jo olemassa olevaan siirtoverkkoon, joka sijaitsee Pirttikosken sähköasemalla. Alustavan aikataulutuksen mukaan laitos voisi olla käyttövalmis vuoden 2032 lopussa (Kemijoki Oy, 2024-a).

Kemijoki Oy:n (2024-a) mukaan laitoksen putouskorkeus olisi noin 200 metriä. Järjestelmän alavarastona toimisi Kemijärvi ja ylävarastona Ailangantunturille rakennettu allas, joka olisi kooltaan noin yhden neliökilometrin (km^2). Vesitunnelin halkaisija olisi noin yhdeksän metriä. Kuvasta 4 nähdään että ylä- ja alavarastojen välinen etäisyys on noin 4500 metriä ja korkeus ero 200 metriä. Ylävaraston ja kallioon rakennetun voimalaitoksen välinen pudotus on pääasiassa vertikaalista, kun taas alavaraston ja voimalaitoksen välissä horisontaalista (Kemijoki Oy, 2024-a).



Kuva 4. Ailangantunturin pumppuvoimalaitos (Kemijoki Oy, 2024-a)

Kemijoki Oy (2024-a) tekee tällä hetkellä selvitystä Ailangantunturin pumppuvoimalaitoksen ympäristövaikutuksista. Laitoksen rakennuttaminen edellyttää vesivarastoja ja voimajohtoa, jotka peittävät alleen luontoa. Kemijoki Oy tutkii hankkeen vaikutuksia pintavesiin ja vesienhoitoon, maa- ja kallioperään sekä pohjavesiin, kalastoon ja kalastukseen, kasvillisuuteen, eläimistöön, alueen muihin luontoarvoihin sekä poronhoitoon. Hankkeen aikataulun mukaan ympäristövaikutusten arviointi saataisiin päätöksen kesän 2025 aikana (Kemijoki Oy, 2024-a).

Laitos toisi uusia työpaikkoja rakennusvaiheessa, sekä pysyviä työpaikkoja laitoksen operoimisessa ja kunnossapidossa. Ailangantunturin hankkeen rakentaminen kestäisi noin neljä vuotta, joka työllistäisi vuosittain yli 300 ihmistä. Suurin osa rakennustyöstä sopisi paikallisille maanrakennusalan yrittäjille. Pysyviä työpaikkoja laitos tarjoaisi huomattavasti vähemmän valmistumisen jälkeen (Kemijoki Oy, 2024-b).

4.2.3 Pyhäsalmi

Suunnitteilla oleva Pyhäsalmen pumppuvoimalaitos sijaitsisi Pyhäjärven kaupungissa Pyhäsalmen entisessä kaivoksessa. Tyypiltään se olisi UPHES-laitos ja sen teho olisi noin 75 megawattia, ja sen säätökapasiteetti olisi yhteensä noin 150 megawattia. Laitoksen

varastointikapasiteetin on arvioitu olevan noin 530 megawattituntia (MWh) ja kokonaishöytysuhteen olevan noin 77 % (EPV Energia Oy, n.d.).

Ylen (2024-a) mukaan EPV Energia Oy vetäytyi hankkeesta kustannusarvion noustua noin 250 miljoonaan euroon. Tällä hetkellä hankkeesta vastaa Sustainable Energy Solutions Sweden Holding (SENS), joka laajensi hankkeeseen UPHES-laitoksen lisäksi akkupohjaisen energian varastointijärjestelmän (*Battery Energy Storage System*, BESS). Cision News (2025) kertoo BESS-järjestelmän suunnitellun kapasiteetin kaksinkertaistuvan alkuperäisestä 85 megawattista 170 megawattiin.

EPV Energian (n.d.) mukaan Pyhäsalmen pumppuvoimalaitoksen painevesitunneli eli tulokanava olisi pituudeltaan noin 1,4 kilometriä. Kanavan alapäässä, ennen voimalaitoshallia, tunneli kääntyy vaakatasoon. Voimalaitoshallissa sijaitsisi kaikki mekaaniset ja sähköiset laitteistot eli turbiini, generaattori ja pumppu. Voimalaitoksen generaattori toimii pumppaustilassa myös moottorina, jolloin vesi pumpataan ylös samaa vesikanavaa pitkin. Laitoksen turbiini olisi tyypiltään Pelton-turbiini, jota käytetään yleensä suurilla putouskorkeuksilla. Ala-altaan tilavuudeksi arvioidaan louhimisen jälkeen noin 187 000 kuutiometriä (m³).

EPV Energian (n.d.) mukaan hanke olisi Suomen ainoa vesivoimalaitos, jolla ei olisi suoranaisia ympäristövaikutuksia. Laitoksessa on suljettu vesikierto, joten se ei ole yhteydessä luonnon vesistöihin eikä siten aiheuta haittaa veden ekosysteemille. Hanke aiheuttaisi merkittäviä päästövähennyksiä, kun pumppaukseen käytettäisiin ainoastaan uusiutuvia energiaa. Laitos auttaisi paikallistaloutta työllistämällä jopa 250 henkilöä rakentamisen aikana sekä 5–20 henkilöä pysyvästi laitoksen valmistuttua.

5 Kannattavuus

5.1 Taloudellisuus

Papadakiksen ja muiden (2022, s. 14) mukaan pumppuvoimalaitokset vaativat merkittäviä alkuinvestointeja. Laitoksien pääomakustannuksiin vaikuttavat asennettu teho, energiavarastointikapasiteetti ja sijaintikohtaiset olosuhteet. Tämä tekee laitoksien pääomakustannuksista erittäin riippuvaisia laitoksen sijoituspaikasta. Pääomakustannukset vaihtelevat tyypillisesti 1000–4000 \$/kW välillä, mikä vastaa tämän hetken valuuttakurssilla noin 880–3520 €/kW. Näihin kustannuksiin sisältyvät pumppujen, turbiinien, generaattoreiden, muuntajien sekä muun energian muuntamiseen ja siirtoon tarvittavan laitteiston rakentamis- ja asennuskustannukset sekä rakennustekniset työt (Papadakis ja muut, 2022, s. 14).

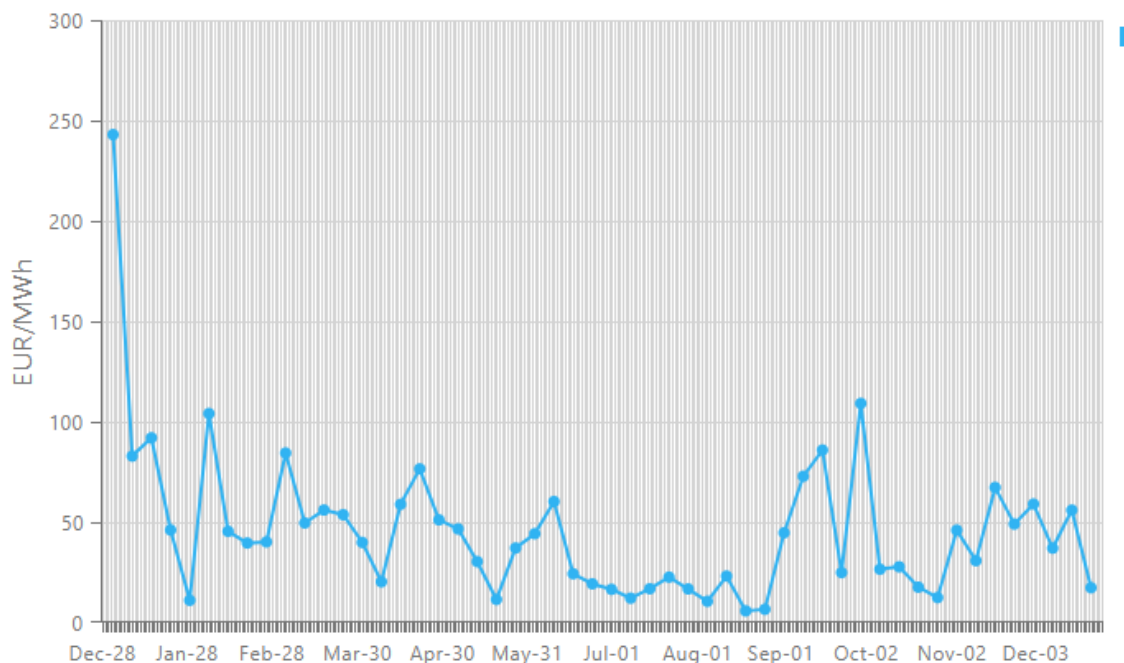
EU on myös rahoittanut useita tutkimus ja innovaatioprojekteja liittyen pumppuvoimalaitoksiin. Nämä projektit tähtäävät parantamaan tehokkuutta, joustavuutta ja ympäristöystävällisyyttä ja myös etsimään innovatiivisia konsepteja. (Papadakis ja muut, 2022, s. 11)

Nämä arviot ovat verrattavissa myös tässä tutkielmassa käsiteltyihin hankkeisiin. Esimerkiksi Pyhäsalmen pumppuvoimalaitoksen kustannusarvio on noin 250 miljoonaa euroa ja pumppuvoimalaitoksen teho on noin 75 MW. Laitoksen kustannus on siis noin 3333 €/kW, mikä sijoittuu Papadakiksen ja muiden esittämän pääomakustannusten arvioidulle vaihteluvälille.

Yksi pumppuvoimalaitosten merkittävistä taloudellisista haasteista on alkuperäisten kustannusarvioiden mahdollinen nousu, joka johtuu ennakoimattomista viivästyksistä ja odottamattomista paikkakohtaisista tekijöistä. Tämä voi johtaa myös pidempään toteutusaikaan. Pumppuvoimalaitoshankkeille on arvioitu 10–15 %:in riskivaraus, kun taas kustannusarvioiden tarkkuus vaihtelee -20 %:sta +25 %:iin (Papadakis ja muut, 2022, s. 14)

Papadakis ja muiden (2022, s. 17) mukaan sijoitetun pääoman tuotto (*Return On Investment*, ROI) ja takaisinmaksuaika ovat riippuvaisia useista tekijöistä, kuten alkuinvestointien määrästä, käyttö- ja huoltokustannuksista, energian markkinahinnoista ja järjestelmän tuottamista tuloista. Näitä tuloja muodostuu energian varastoinnista, sähköverkon tasapainottamisesta ja uusiutuvan energian integroinnin mahdollistamisesta. Pumppuvoimalaitosten pitkä 40–60 vuoden elinikä, ja suhteellisen alhaiset käyttö- ja huoltokustannukset auttavat lyhentämään takaisinmaksu aikaa ja parantavat sijoitetun pääoman tuottoa. Kuitenkin jokainen PHES-hanke on yksilöllinen ja hankekohtaiset olosuhteet vaikuttavat merkittävästi sijoitetun pääoman tuottoon ja takaisinmaksuaikaan (Papadakis ja muut, 2022, s. 17).

Sähkön hintavaihtelut vaikuttavat myös pumppuvoimaloiden taloudelliseen kannattavuuteen. Fortumin (n.d. -a) mukaan Nord Pool määrittää pörssisähkön hinnan Suomessa. Nord Pool on Euroopassa toimiva sähköpörssi, joka mahdollistaa sähkön ostamisen ja myymisen yli rajojen. Fortumin (n.d. -b) mukaan Nord Poolin sähkön spot-hinta tarkoittaa sähköpörssissä määräytyvää hintaa, riippuen kysynnästä ja tarjonnasta. Se määritellään erikseen seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille. Arviolta kesäkuussa 2025 siirrytään tunnin aikaväleistä vartin aikaväleihin. Suomessa pörssisähkön hinta määräytyy spot-hintojen perusteella. Spot-hinta muodostuu annettujen osto- ja myyntitarjousten leikkaamassa kohdassa eli kysynnän ja tarjonnan kohdatessa. Kuluttajan maksama pörssisähkön hinta ei ole kuitenkaan sama kuin spot-hinta, jolla sähkön myyjä on sen ostanut. Tämän lisäksi kuluttajan pörssisähkön hintaan tulee mukaan välityspalkkiot, verot ja sähkön siirtokustannukset. Nord Poolin sähkön spot-hinta toimii siis viitteenä Suomen sähköyhtiöiden pörssisähkön hinnoille (Fortum, n.d. -b). Kuvassa 5 esitetään vuoden 2024 viikoittaiset spot-hinnat. Voidaan huomata, että hinnanvaihtelut voivat olla suuria, mutta ajoittain ne voivat olla erittäin vähäisiä.



Kuva 5. Vuoden 2024 viikoittaiset spot-hinnat (Nord Pool, n.d.)

5.2 Ympäristöystävällisyys

Pumppuvoimalaitoksen ympäristöystävällisyyteen vaikuttaa merkittävästi sen järjestelmän tyyppi. Hoff (2022, s. 79–80) jakaa PHES-järjestelmät kahteen perustyyppiin, jotka ovat avoin järjestelmä ja suljettu järjestelmä. Avoimessa järjestelmässä toinen tai molemmat altaat ovat osa luonnollisia vesistöjä, kuten järviä, jokia tai meriä. Suljetussa systeemissä sekä ylä- ja ala-altaat ovat rakennettuja varastoja, joilla on hyvin pieni vaikutus paikalliseen ympäristöön.

Avoimen järjestelmän toteuttaminen vaatii laajan ympäristöanalyysin, arvioinnin sekä hyväksynnän viranomaisilta, ettei sillä olisi haitallista vaikutusta ympäristöön. Pumppuvoimalaitoksessa on säädeltävä vedenpinnan korkeutta sekä veden pumppaus- ja purkunopeutta, jotta varmistetaan ympäristön turvallisuus. Tämä pätee pääasiassa avoimen järjestelmän laitosta, sillä ne ovat osana luonnonvesistöjä. Suljetussa järjestelmässä veden pinnan korkeutta ei tarvitse säädellä yhtä paljon (Hoff, 2022, s. 79–80).

Pumppuvoimalaitoksen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt riippuvat täysin siitä, mitä energianlähdettä varastointiin käytetään. EPV Energian (n.d.) mukaan Pyhäsalmen pumppuvoimalaitoshankkeella saataisiin aikaan merkittäviä päästövähennyksiä, kun varastointiin käytettäisiin ainoastaan uusiutuvia energialähteitä. Tämä on ympäristöystävällisyyden kannalta positiivista, sillä uusiutuvalla energialla voidaan korvata fossiilisten polttoaineisiin perustuvaa säätövoimaa (EPV Energia Oy, n.d.).

5.3 Energian tuotanto

Hoffin (2022, s. 84) mukaan pumppuvoimalaitoksen turbiinin tuottama teho määräytyy lopulta veden tilavuuden ja voiman mukaan, jolla se työntää turbiinin lapoja pyörimisakselin ympäri. Yhtälössä 2 esitetään kaava, jonka avulla voidaan laskea turbiinin akselille kohdistuva mekaaninen teho. Tämä teho vastaa turbiinin tuottamaa kokonaisenergiaa, joka muunnetaan generaattorin avulla sähköenergiaksi. Yhtälössä ρ tarkoittaa veden tiheyttä, \dot{Q} tilavuusvirtaa, h_u putouskorkeutta ja η_t yksisuuntaisen turbiinin hyötysuhdetta. Tilavuusvirta kuvaa sitä, kuinka monta kuutiometriä vettä kulkee turbiinille sekunnissa. Turbiinin hyötysuhde ilmaisee sen, kuinka suuri osa veteen varastoituneesta energiasta siirtyy mekaaniseksi energiaksi turbiinin akselille. Hyötysuhde voi vaihdella tyypillisesti 70–95 % välillä riippuen turbiinin rakenteesta ja toimintaperiaatteesta (Hoff, 2022, s. 84).

$$P = \rho \dot{Q} g h_u \eta_t \quad (2)$$

Grönmanin ja muiden (2021, s. 10–11) mukaan pumppuvoimalaitokset muodostavat globaalisti suurimman energiavarastointikapasiteetin. Toiseksi käytetyin menetelmä on akkuteknologia ja kolmanneksi käytetyimmät ovat lämpövarastot. Vertailussa pumppuvoimalaitoksilla on isompi varastointikapasiteetti, kuin akuilla. Grönmanin ja muiden (2021, s. 13) esittämässä taulukossa käydään läpi eri energiavarastoteknologioiden ominaisuuksia. Akkujen kokonaishyötysuhteet vaihtelevat 50–98 % välillä, lämpövarastojen 50–90 % välillä ja pumppuvoimalaitosten 65–87 % välillä. Pumppuvoimalaitosten aiheuttamat päästöt ovat keskiarvoisesti alhaisemmat

kuin akuilla, mutta lämpövarastoilla on alhaisimmat päästöt näistä kolmesta. Lämpövarastojen elinikä on 20–40 vuotta, kun taas akkujen elinikä on 3–20 vuotta riippuen akun tyypistä. Näistä kolmesta vaihtoehdosta pumppuvoimalaitosten elinikä on pisin, joka on 30–60 vuotta. Grönmanin ja muut (2021, s. 15–16) kertovat, että pumppuvoimalaitosten kustannusten lasku ei ole odotettavissa tulevaisuudessa. Vertauksena taas akkuteknologioiden kustannusten lasku on odotettavissa tulevina vuosina.

Papadakis ja muiden (2022, s. 10–11) mukaan Euroopan unionissa uusiutuvan energian ja varastoinnin edistäminen on ollut keskeisessä poliittisessä roolissa. EU:n uusiutuvan energian direktiivi (2018/2001/EU) asetti uusiutuvan energian tavoitteen EU:lle, että vuoteen 2030 mennessä vähintään 32 % bruttoenergiankulutuksesta jäsenvaltioissa olisi uusiutuvaa energiaa. Euroopan unionilla on monimutkaisia sääntelyitä pumppuvoimalaitosten suhteen. Kuitenkin EU:lla on puhtaan energian paketti (CEP, *Clean Energy Package*), joka sisältää useita toimenpiteitä energiavarastojen kannustamiseen. Näihin toimenpiteisiin kuuluu esimerkiksi sääntelyesteiden poistaminen sekä selkeiden sääntöjen ja lakien luominen energian varastoinnista vastaaville toimijoille (Papadakis ja muut, 2022, s. 10–11).

6 Johtopäätökset

Tutkielmassa selvitettiin pumppuvoimalaitosten peruseriaate, rakenne ja erilaiset toteutusvaihtoehdot. Pumppuvoimalaitosten kokonaiskuvan arvioinnin kannalta keskeistä oli tarkastella myös Suomen sähköverkon toimintaa sekä esimerkkejä valmiista ja suunnitteilla olevista hankkeista. Tämän teorian pohjalta voidaan vastata esitettyihin tutkimuskysymyksiin.

Pumppuvoiman rooli Suomen sähköverkon tukemisessa voi olla merkittävä. Uusiutuvan energian osuuden kasvaessa tarvitaan tehokkaita ja ympäristöystävällisiä ratkaisuja energian varastointiin. Uusiutuvan energian tuotanto on sääriippuvaista, joten sen rinnalle tarvitaan energiavarastoja. Pumppuvoimalaitokset todettiin kirjallisuuden perusteella tehokkaaksi suuren mittakaavan energiavarastointi menetelmäksi, mikä tukee niiden käyttöä sähköverkon tasapainottamisessa.

Pumppuvoimalaitosten käyttöönottoon liittyy haasteita, mutta niihin on löydettävissä ratkaisuja. Sijainnin löytäminen on haasteellista Suomessa, sillä luontaiset korkeuserot ovat vähäisiä. Perinteisille pumppuvoimalaitoksille on kuitenkin löydettävissä sopivia sijainteja, kuten Ailangantunturi, ja Pyhäsalmen kaivos. Toinen haaste on korkea kokonaiskustannus. Takaisinmaksuaika riippuu useasta tekijästä, esimerkiksi se voi lyhentyä, jos laitokseen yhdistetään uusiutuvia energianlähteitä. Laitoksen ympäristöystävällisyys riippuu täysin sen koosta ja siitä perustuuko sen toiminta suljettuun vai avoimeen vesikiertoon. Suljetussa järjestelmässä vaikutus vesistöihin on lähes mitätön, mutta avoimissa järjestelmissä vaikutus voi olla suuri. Tämän vuoksi täytyy tehdä tarkka ja perusteellinen ympäristövaikutusten arviointi.

Pumppuvoiman kannattavuus Suomessa riippuu täysin sen toteutustavasta. Kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi myös Suomen sähkömarkkinan hinnanvaihtelu. Spot-hinnan vaihtelu voi olla ajoittain suurta, mutta välillä myös vähäisempää. Pumppuvoimalaitokset soveltuvat suuren mittakaavan energiavarastointiin, mikä mahdollistaisi varastoimaan energiaa pidemmäksi aikaa, jos hinnanvaihtelu on vähäistä.

Tuleva spot-hinnan päivittyminen vartin aikaväleihin voi vaikuttaa hinnanvaihteluun ja näin pumppuvoimalaitoksen kannattavuuteen negatiivisesti. Poliittiset määräykset voivat hankaloittaa myös laitosten toteutusta, sillä EU:lla on monimutkaisia sääntelyitä pumppuvoimalaitosten suhteen. Kilpailu muista energian varastointimuodoista vaikuttaa myös pumppuvoimalaitosten kannattavuuteen. Akkujen kustannusten ennustetaan laskevan tulevaisuudessa, mutta pumppuvoimalaitosten kustannukset arvioidaan pysyvän vakaana. Säättövoiman kasvava tarve tekee pumppuvoimalaitoksesta kannattavan varastointimuodon Suomen energiajärjestelmässä. Jos suunnittelu on tehty hyvin ja kaikki osa-alueet on otettu huomioon, pumppuvoimalaitos voi olla kannattava vaihtoehto Suomessa. Huolellinen ympäristövaikutusten arviointi, suunnittelu ja teknisten ratkaisujen valinta ovat olennaisia, jotta haitat luonnolle vähenevät, turvallisuus paranee, takaisinmaksuaika lyhenee ja energian tuotto maksimoituu.

7 Yhteenveto

Tutkielman tarkoituksena oli selvittää, onko pumppuvoimalaitos kannattava energianvarastointi menetelmä Suomessa. Keskeisiä selvitettäviä tarkastelukohteita olivat Suomen sähköverkon toiminta, pumppuvoimalaitoksen rakenne ja toimintaperiaate sekä esimerkit laitoshankkeista. Lopuksi analysoitiin kannattavuutta taloudellisesta, ympäristöllisestä ja energian tuotannon näkökulmasta. Tutkimuksen tarkoituksena oli vastata asetettuihin tutkimuskysymyksiin.

Tutkielman teoria ja kaavat pohjautui kirjallisuuskatsaukseen. Lähteinä käytettiin kirjallisuutta, tieteellisiä artikkeleita, uutislähteitä ja hankkeiden suunnitteludokumentteja. Näiden pohjalta käsiteltiin pumppuvoimalaitoksen toimintaa ja keskeisiä komponentteja, Suomen sähköjärjestelmää, hankkeiden toteutettavuutta ja kannattavuuden arviointi kriteerejä.

Työn näkökulmana oli selvittää pumppuvoimalaitosten kannattavuutta Suomessa sekä niiden mahdollista roolia sähköverkon tasapainottajana. Arviointi perustui pumppuvoimalaitoksen eri toteutusvaihtoehtoihin, kustannustietoihin sekä hylättyihin ja käynnissä oleviin hankkeisiin Suomessa.

Tutkielmassa esitetyn teorian perusteella voidaan todeta, että pumppuvoimalaitokset voisivat toimia Suomessa energianvarastointiratkaisuina. Niiden suuri varastointikapasiteetti, pitkä käyttöikä, kyky toimia säätövoimana sekä suhteellisen alhaiset käyttökustannukset tukevat niiden kannattavuutta. Kun energiavarastointiin käytetään uusiutuvaa energiaa, voidaan vähentää Suomen säätövoimasta vapautuvia päästöjä. Pumppuvoimalaitosten ympäristövaikutukset voivat olla vähäisiä, erityisesti suljetuissa järjestelmissä, kuten UPHES-laitoksissa. Kannattavuus riippuu kuitenkin pitkälti suunnittelun huolellisuudesta ja siitä, onko kaikki keskeiset osa-alueet huomioitu. Pumppuvoimalaitos voisi olla sopiva lisä Suomen energiajärjestelmään, sillä se on myös maailmalaajuisesti kapasiteetiltaan käytetyin energian varastointimenetelmä.

Lähteet

- Barnes, F., Levine, J. (2011). *Large Energy Storage Systems Handbook*. [rajattu pääsy]
- Cision News. (2025). *SENS doubles capacity of Finnish battery project to 170 MW*.
Noudettu 7.4.2025 osoitteesta <https://news.cision.com/sustainable-energy-solutions-sweden-holding-ab/r/sens-doubles-capacity-of-finnish-battery-project-to-170-mw,c4109489>
- Energiateollisuus. (n.d. -a) *Sähköverkot*. Noudettu 17.3.2025 osoitteesta <https://energia.fi/energiatietoa/energiaverkot/sahkoverkot/>
- Energiateollisuus. (n.d. -b) *Säätövoima*. Noudettu 18.3.2025 osoitteesta <https://energia.fi/energiatietoa/energiantuotanto/sahkontuotanto/saatovoima/>
- EPV Energia Oy. (n.d.). *Pyhäsalmen pumppuvoimalaitos – Suomen suurin yksittäinen säätöresurssi*. Noudettu 24.3.2025 osoitteesta https://oulunkauppakamari.fi/wp-content/uploads/2022/12/Pyhasalmen-pumppuvoimalaitos-Julkinen_AkiHakulinen.pdf
- European Energy Research Alliance (EERA). (2016). *Underground Pumped hydro storage*.
Noudettu 6.3.2025 osoitteesta [https://eera-energystorage.eu/component/attachments/?task=download&id=684:EERA Factsheet Underground-Pumped-Hydro-Energy-Storage not-final](https://eera-energystorage.eu/component/attachments/?task=download&id=684:EERA_Factsheet_Underground-Pumped-Hydro-Energy-Storage_not-final)
- Fingrid. (n.d. -a) *Suomen sähköjärjestelmä*. Noudettu 17.3.2025 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/suomen-sahkojarjestelma/>
- Fingrid. (n.d. -b) *Kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpito*. Noudettu 17.3.2025 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kulutuksen-ja-tuotannon-tasapainon-yllapito/>
- Fingrid. (n.d. -c) *Sähköjärjestelmän tila*. Noudettu 17.3.2025 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkojarjestelman-tila/>
- Fortum. (n.d. -a) *Nord Pool -sähköpörssi*. Noudettu 13.5.2025 osoitteesta <https://www.fortum.com/fi/kotiasiakkaille/sahkoa-kotiin/opas/nord-pool>
- Fortum. (n.d. -b) *Sähkön spot-hinta*. Noudettu 13.5.2025 osoitteesta <https://www.fortum.com/fi/kotiasiakkaille/sahkoa-kotiin/opas/spot-hinta>

- Nord Pool. (n.d.) *Day-ahead Prices*. Noudettu 13.5.2025 osoitteesta <https://data.nordpoolgroup.com/auction/day-ahead/prices?deliveryDate=latest¤cy=EUR&aggregation=WeeklyAggregate&deliveryAreas=FI>
- Grönman, A., Inkeri, E., Zhaurova, M., Luoranen, M., Tynjälä, T., Turunen-Saaresti, T., Breyer, C., Bogdanov D., Satymov R., & Pulkkinen S. (2022). *Etelä-Karjalan energiavarastoinnin tiekartta*. Noudettu 10.3.2025 osoitteesta <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-912-3>
- Hoff, C. M. (2022). *Energy Storage Technologies and Applications*. [rajattu pääsy]
- Hopf, D. (n.d.) *Fenging 2, China*. Noudettu 24.3.2025 osoitteesta <https://www.andritz.com/hydro-en/hydronews/hn32/fengning2-china>
- International Hydropower Association (IHA). (2024). *China's Fengning Station: World's Largest Pumped Hydro Power Plant Sets New Global Benchmark*. Noudettu 24.3.2025 osoitteesta <https://www.hydropower.org/news/chinas-fengning-station-worlds-largest-pumped-hydro-power-plant-sets-new-global-benchmark>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024 -a). *Renewable energy highlights*. Noudettu 23.3.2025 osoitteesta https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/Renewable_energy_highlights_FINAL_July_2024.pdf
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024 -b). *Renewable Capacity Statistics 2024*. Noudettu 23.3.2025 osoitteesta https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2024.pdf
- Kemijoki Oy (2024-a). *Pumppuvoimala Kemijärveen*. Noudettu 8.4.2025 osoitteesta https://www.sil.fi/site/assets/files/7735/sahkopaiva_2024_vihavainen_petri.pdf
- Kemijoki Oy (2024-b). *Ailangantunturin pumppuvoimalaitoksesta usein kysyttyä*. Noudettu 8.4.2025 osoitteesta <https://www.kemijoki.fi/toimintamme/pumppuvoimalaitokset/ailangantunturin-pumppuvoimalaitos/ailangantunturin-pumppuvoimalaitoksesta-usein-kysyttya/>

- MTV Uutiset (2022). *Vuosikymmeniä sitten Suomeen piti nousta ydinvoimalan tehoa vastaava pumppuvoimala – näin jättihanke kaatui*. Noudettu 6.3.2025 osoitteesta <https://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/vuosikymmenia-sitten-suomeen-piti-nousta-ydinvoimalan-tehoa-vastaava-pumppuvoimala-nain-jattihanke-kaatui/8602282>
- Muljadi, E., Nelms, R. M., Chartan, E., Robichaud, R., George, L. & Obermeyer, H. (2021). *Electrical Systems of Pumped Storage Hydropower Plants*. Noudettu 22.4.2025 osoitteesta <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/74721.pdf>
- NS Energy (2020). *Fengning Pumped Storage Power Plant*. Noudettu 24.3.2025 osoitteesta <https://www.nsenenergybusiness.com/projects/fengning-pumped-storage-power-plant/>
- Papadakis, N., Fafalakis, M., Katsaprakakis, D. (2023). *A Review of Pumped Hydro Storage Systems*. <https://doi.org/10.3390/en16114516>
- Pohjolan Voima. (n.d.) *Säätövoiman tarve kasvaa*. Noudettu 18.3.2025 osoitteesta <https://www.pohjolanvoima.fi/huomisen-energiaa/saatovoiman-tarve-kasvaa/>
- Rehman, S., Al-Hadhrami, L. & Alam, M. M. (2015). *Pumped hydro energy storage system: A technological review*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.040>
- Seppänen, R., Mannila L., Kervinen M., Parkkila I., Konttinen P., Karkela L., & Yli-Kokko T. (2013). *MAOL-taulukot*, s.125.
- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2023). *New pumped-storage capacity in China is helping to integrate growing wind and solar power*. Noudettu 23.3.2025 osoitteesta <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=57360>
- Välimäki, M. (2024). *Säätövoimaa pumppaamalla*. Noudettu 6.3.2025 osoitteesta <https://www.fingridlehti.fi/saatovoimaa-pumppaamalla/>
- Yle. (2024 -a). *Pyhäsalmen vanhan kaivoksen hyödyntäminen rytkähti eteenpäin – akkuvaraston ja pumppuvoimalan hankeyhtiöt myyty Ruotsiin*. Noudettu 7.4.2025 osoitteesta <https://yle.fi/a/74-20115399>
- Yle. (2024 -b). *”Järvi on meidän kaikkien helmi” – pumppuvoimalat huolettavat kemijärveläisiä, mutta verotulot kiinnostavat*. Noudettu 8.4.2025 osoitteesta <https://yle.fi/a/74-20124923>