PAINOVOIMAAN PERUSTUVAT ENERGIAVARASTOT

Gravity energy storage systems

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2022

Juha Jäkärä

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Aki Grönman

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Juha Jäkärä

Painovoimaan perustuvat energiavarastot

Kandidaatintyö 2022

30 sivua, 11 kuvaa ja 3 taulukkoa

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Aki Grönman

Avainsanat: Painovoima, Energiavarasto, Energiatehokkuus, PHES, ARES

Painovoimaa on hyödynnetty energian varastoinnissa yli sata vuotta. Energiaa on varastoitu pitkään pumppaamalla vettä korkeammalle, jolloin siihen varastoituu energiaa potentiaalienergiana. Energia voidaan vapauttaa antamalla veden virrata alas turbiinin tai juoksupyörän läpi. Nykyisin energia vapautetaan varastoista lähes yksinomaan sähköenergiana.

Painovoiman hyödyntämiseen sähköenergian varastoimisessa on alettu kehittää uusia keinoja. Teknologia on uusi, joten laitteistoja ei ole vielä kovin montaa erilaista. Uusimmat keinot liittyvät raskaiden kiinteiden punnusten liikuttamisessa ylös ja alas uusin tavoin. Eniten kehitystä tapahtuu erilaisten tornityyppisten varastojen saralla. Lisäksi eräs yritys kehittää varastoa, jossa raskasta vaunua liikutetaan pitkin mäen rinnettä.

Painovoimaan perustuvien energiavarastojen etuja ovat hyvä hyötysuhde, suuri kapasiteetti, lyhyt vasteaika, hyvä säädettävyys ja pitkä varastointiaika. Laitokset kuitenkin usein vaativat melko paljon pinta-alaa.

Muutamia pilottihankkeita on rakennettu ja ne ovat kytkettyinä paikallisiin sähköverkkoihin. Laitokset ovat toimineet odotetusti ja pystyneet tasapainottamaan sähköverkkoja. Laitosten avulla on saatu tietoa teknologian ja täysikokoisten laitosten kehittämistä varten. Alalla ei kuitenkaan ole kovin montaa toimijaa, joten tutkimusta on vielä paljon tehtävänä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Juha Jäkärä

Gravity energy storage systems

Bachelor's thesis 2022

30 pages, 11 figures and 3 tables

Examiner: Associate professor Aki Grönman

Keywords: Gravity, Energy storage, Energy efficiency, PHES, ARES

Gravity has been used in energy storages for over a hundred years. Energy has been stored by pumping water to a higher location and therefore energy has been stored as potential energy. Stored energy can be released by directing the water's backflow through a turbine or a flywheel. Nowadays such energy storages are mainly used to store electricity.

New technologies are being developed to utilize gravity more efficiently in energy storing. The technologies are rather new, so there aren't many operators in the field. Newest methods focus on moving heavy weights up and down by new means. Most development are put to tower style energy storages. In addition to those, there is one company which is developing a storage in which a heavy train car is moved along hill slope.

The advantages of gravity energy storages are that they have good efficiencies, scalable capacities, fast response times, great adjustability of delivered power and long storage durations. On the other hand, the plants require quite a bit of acreage.

Few pilot projects have been built and they are connected to local electrical grids. The facilities have worked as intended and have been able to balance the grids. The facilities have provided lots of data for developing the tech further and for developing full size storages. The industry is still quite new and there aren't lots of operators on the industry so there's a lot of research to do.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

d	halkaisija	[m]
E	energia	[Wh]
e	hyötysuhde	
ET	energiatehokkuusluku	[kWh/brm^2/a]
g	gravitaatiovakio	[m/s^2]
h	korkeus	[m]
m	massa	[kg]
P	teho	[W]
p	paine	[bar, Pa]
T	aika	[s]
V	tilavuus	[m^3]

Lyhenteet

ARES Kehittynyt raide-energiavarasto (engl. Advanced Rail Energy Storage)

CAES Paineistetun ilman energiavarasto (engl. Compressed Air Energy Storage)

LAES Nesteytetyn ilman energiavarasto (engl. Liquid Air Energy Storage)

PHES Pumpatun veden energiavarasto (engl. Pumped Hydro Energy Storage)

SMES Suprajohtava magneettinen energiavarasto (engl. Superconducting Magnetic Energy Storage)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto ... 7
2 Energian varastointi ... 8
2.1 Energian varastoinnin tarpeellisuus ... 8
2.2 Nykyiset menetelmät ... 9
3 Painovoimaan perustuvat energiavarastot ... 10
3.1 Erilaiset teknologiat ja toimijat ... 10
3.1.1 PHES ... 10
3.1.2 ARES ... 13
3.1.3 Tornit ... 14
3.2 Mahdollisuudet ... 17
3.2.1 PHES ... 17
3.2.2 ARES ... 17
3.2.3 Tornit ... 18
3.3 Haasteet ... 19
3.3.1 PHES ... 19
3.3.2 ARES ... 20
3.3.3 Tornit ... 20
4 Mahdollisuudet Etelä-Karjalassa ... 21
4.1 Potentiaalisia kohteita ... 21
4.2 Telkkälän kaivos ... 21
4.3 Kerrostalon yhteyteen rakennettava energiavarasto ... 23
4.3.1 Opiskelija-asunnon energiavarasto ... 23
5 Johtopäätökset ... 28
Lähteet ... 29

Kuvaluettelo

Kuva 1: Nykyisin käytössä olevien energiavarastotyyppien purkausaikoja ja kapasiteetteja.

Kuva 2: Kuva PHES:n pääkomponenteista ja virtauskanavista.

Kuva 3: Tietokoneella luotu kuva Heindl Energyn laitteistosta.

Kuva 4: ARES pilottihankkeen vaunu kuvattuna Tehachapissa.

Kuva 5: Energy Vault Ticinon tornin latauksen ja purkauksen vaiheet.

Kuva 6: Gravitricityn 250 kW prototyyppi Leithin satamassa, Edinburghissa.

Kuva 7: Kuva Telkkälän avolouhoksesta tyhjänä.

Kuva 8: Poikkileikkaus Telkkälän kaivoksesta.

Kuva 9: LOASin Seppo.

Kuva 10: Tornityyppisen energiavaraston kapasiteetteja.

Kuva 11: Tornityyppisen energiavaraston tehoja.

Taulukkoluettelo

Taulukko 1: Heindl Energyn laitoksen tunnuslukuja.

Taulukko 2: Tornityyppisen energiavaraston kapasiteetteja.

Taulukko 3: Tornityyppisen energiavaraston tehoja.

1 Johdanto

Tuulivoima ja aurinkovoima ovat uusiutuvia energialähteitä ja niiden katsotaan yleisesti olevan päästöttömiä. Ongelma kuitenkin on, että kummankin tuotanto riippuu täysin säästä. Tämän takia sähkön hinta ja saatavuus vaihtelevat näiden tuotantotapojen arvaamattomuuden takia suuresti. Tulevaisuudessa vaihtelua on vielä enemmän, sillä uusiutuvien osuutta aiotaan kasvattaa entisestään. Kulutus on harvoin suurimmillaan silloin, kun halpaa ja ekologisesti tuotettua sähkö saadaan eniten. Varsinkin talvisin kulutusta on paljon, eikä sähköä voida tuottaa uusiutuvilla yhtä paljon kuin kesällä, vaikka tarvetta olisi. Eikö olisikin kätevää, jos voisi varastoida halpaa energiaa ja käyttää sitä silloin kun sähkö on kallista?

Energiaa varastoidaan nykyisin monin eri metodein, mutta sähkön varastointi suuressa mittakaavassa aiheuttaa edelleen päänvaivaa. Energian varastointiin on perehdytty ennenkin ja uusia metodeja kehitetään jatkuvasti. Viime vuosina muutamat yritykset ovatkin alkaneet kehittää uudenlaisia painovoimaan perustuvia energiavarastoja, joiden toiminta ei ole monellekaan tuttua. Painovoiman hyödyntäminen energiavarastoissa ei kuitenkaan ole täysin ennenkuulumatonta. Esimerkiksi tekojärvistä moni on varmastikin kuullut jo aikaisemmin.

Kandidaatintyön tutkimuskysymyksinä ovat:

1. Minkälaisia ratkaisuja on kehitetty painovoiman hyödyntämiseksi energian varastoinnissa?
2. Mitä ominaisuuksia ratkaisuilla on ja mitkä ovat niiden edut ja haitat?

Tässä kandidaatintyössä kerrotaan kolmesta eri energiavarastotyypistä: pumpatun veden varastosta, raide-energiavarastosta ja tornimallisista energiavarastoista. Työssä esitellään kunkin varastotyypin toimintaperiaate, sekä tutustutaan tarkemmin niiden vahvuuksiin ja heikkouksiin. Haasteena on, ettei painovoimaan perustuvia energiavarastoja hyödynnetä kovinkaan paljon, joten tutkimustietoa on saatavissa rajoitetusti. Kaupallisten ratkaisuiden puutteen takia taloudellista vertailua nykyisin käytössä oleviin varastointikeinoihin ei ole voitu tehdä. Työssä tarkastellaan myös muutamia alalla toimivia yrityksiä ja niiden kehittämiä teknologioita. Lopuksi pohditaan energian varastointimahdollisuuksia painovoiman muodossa Etelä-Karjalan alueella.

2 Energian varastointi

Energiaa varastoidaan pääsääntöisesti primäärimuodossa, kuten öljynä. Sekundäärimuotoisen energian varastointiin on nykyisin käytössä useita erilaisia menetelmiä. Tutuimpia ovat erilaiset ajoneuvoissa käytettävät polttoainejalosteet, kuten bensiini, diesel tai bioetanoli. Suurin haaste energian varastoinnissa on saada sitä varastoitua johonkin muuhun muotoon kuin kiinteään, nestemäiseen tai kaasuun. Varastointimenetelmät voidaan pääsääntöisesti jakaa kolmeen eri kategoriaan: lämpöenergiavarastoihin, sähköenergiavarastoihin ja mekaanisiin energiavarastoihin. Osa sähköenergiavarastoista hyödyntää varastointimenetelmänä lämpöä tai kemiallisesti sitoutunutta energiaa, mutta järjestelmien sisältämä energia on vapautettavissa sähkönä. Esimerkki tällaisesta järjestelmästä on nesteytetyn ilman varasto (LAES), jossa ilmaa pidetään niin kovassa paineessa, että se on nestemäisessä olomuodossa. (Aneke & Wang. 2016. s. 353.)

2.1 Energian varastoinnin tarpeellisuus

Energian varastointi on järkevää ja sen avulla voidaan saavuttaa useita hyötyjä. Varastoinnin avulla voidaan energian tuotannosta ja kulutuksesta tehdä tehokkaampaa. Kun energiaa voidaan varastoida sekundäärimuodossa eli lämpönä ja sähkönä, saavutetaan säästöjä myös primäärienergian kulutuksessa. Samalla fossiilisten polttoaineiden kulutusta voidaan pienentää. Kuten tiedetään, johtaa tämä myös pienenpiin kasvihuonekaasupäästöihin.

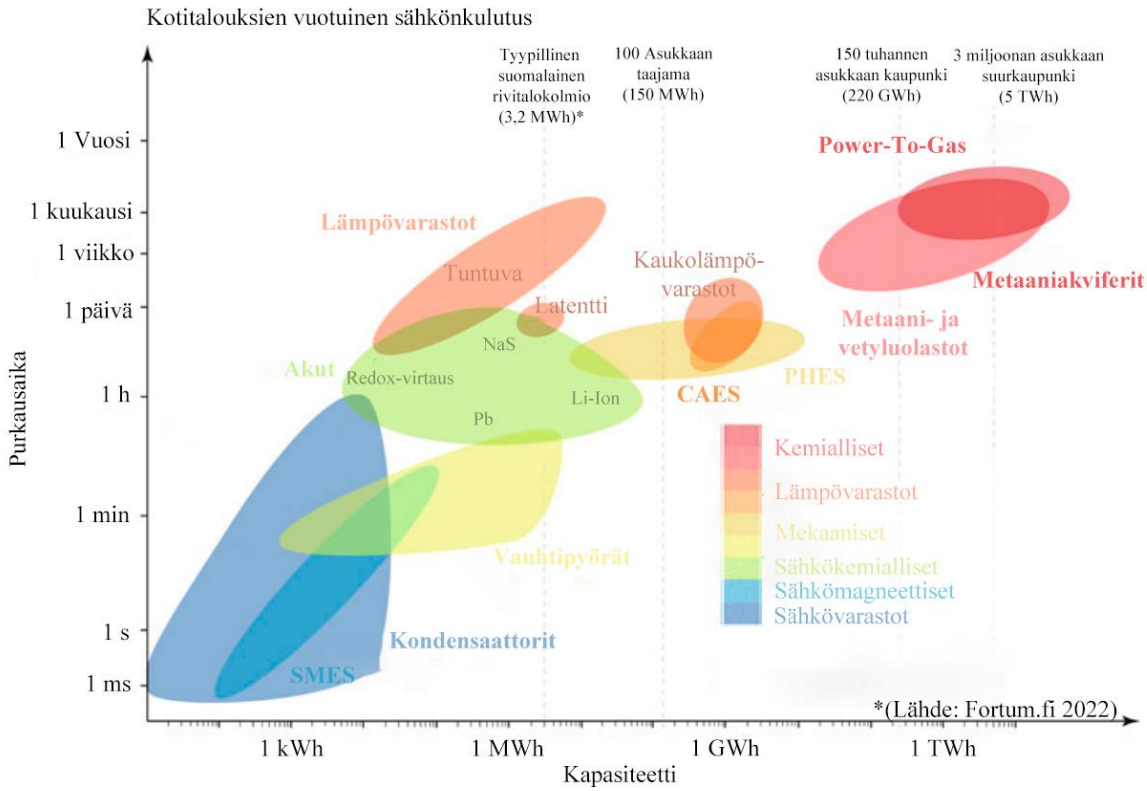
Varastoinnin avulla voidaan myös tehostaa uusiutuvien energianlähteiden hyödyntämistä. Esimerkiksi tuuli- ja aurinkosähkön arvaamaton tuotanto vaatii nykyisin tueksi runsaasti fossiilisia polttoaineita. Vaikka asennettu kapasiteetti riittäisikin kattamaan suuren osan sähköntarpeesta, epävarman tuotannon takia ei niiden varaan voida kovin suurta osaa tuotannosta laskea. Nimenomaan tuulettomina tai pilvisinä aikoina ei voida tuottaa sähköä. Tällaisina aikoina joudutaan tuotantoa korvaamaan esimerkiksi CHP-laitoksilla ja kaasuturbiineilla.

Energiaa varastoimalla voitaisiin täyttää näitä tuotannon aukkoja ilman, että tarvitsisi kalliita kaasuturbiineja käynnistää ja aiheuttaa lisää hiilidioksidipäästöjä. Samalla voitaisiin myös hyödyntää tuotantoa tehokkaammin lataamalla energiavarastoja silloin, kun tuotantoa on

ylimäärin tai energia on muuten halpaa. Varastoilla voitaisiin myös parantaa normaalin käytön aikana verkon tasapainoa mikrosähköverkoissa. (Aneke et al. 2016, 345–355.)

2.2 Nykyiset menetelmät

Energian varastointiin useita menetelmiä. Erilaisilla teknologioilla on hyvät ja huonot puolensa ja ne soveltuvat erilaisiin käyttötarkoituksiin. Erilaisilla teknologioilla voidaan saavuttaa hyvinkin erilaisia varastokapasiteetteja ja purkausaikoja. Kuvassa 1 on esitetty Saksassa käytettyjä varastomenetelmiä. Suurin haaste on kuitenkin saada varastoitua energia suoraan tai helposti hyödynnettävään muotoon kuten sähköksi, lämmöksi tai työksi. Nykyiset suurikapasiteettiset metodit ovat pumpatun veden varastot, power-to-gas ja lämpövarastot. Näistä lähinnä pumpatun veden varastot ja power-to-gas soveltuvat sähköenergian varastointiin ja voisivat tarjota suurelle asukasmäärälle sähköä. Akkuja löytyy suuremmissakin kapasiteeteissa, mutta ne vaativat paljon harvinaisia raaka-aineita. Nykyiset akut alkavat menettää merkittävästi kapasiteettiaan muutaman vuoden jälkeen, joten ne eivät ole esimerkiksi sähköntuotantolaitoksiin verrattuna kovin pitkäikäisiä.



Kuva 1. Saksassa käytettyjen energiavarastotyyppien purkausaikoja ja kapasiteetteja. (muokattu: Sterner & Stadler, 2019, s. 646.)

3 Painovoimaan perustuvat energiavarastot

Painovoimaan perustuvat energiavarastot hyödyntävät mekaanisen energian säilymislakia, joten ne kuuluvat mekaanisiin energiavarastoihin.

Potentiaalienergia kuvaa tarkasteltavan kappaleen tai systeemin paikasta riippuvaa energiaa. Potentiaalienergia kasvaa, kun massa siirretään poispäin nollatasosta. Koska tässä tapauksessa systeemin energiavarastointi perustuu painovoimaan, tarkoittaa tämä sitä, että kappaleen noustessa ylöspäin, siihen varastoitu energiamäärä kasvaa. Menetelmä on varsin nerokas, sillä painovoima on ns. konservatiivinen. Tämä tarkoittaa sitä, että kunhan massa nousee ylöspäin, varastoituu siihen nousun korkeuseron verran energiaa nousureitin suoruudesta riippumatta. (Hatakka & Saari & Sirviö & Viiri 2016, s. 102–103.)

Kun massaa nostetaan, tehdään työtä painovoimaa vastaan. Näin saadaan tehty työ varastoitua massan potentiaalienergiaksi. Energian säilyvyyden lain mukaan kasvaa massan potentiaalienergia yhtä paljon, kuin painovoimaa vastaan on tehty työtä. Todellisuudessa kaikkea massan nostamiseen käytettyä energiaa ei saada varastoitua systeemiin, sillä systeemiin vaikuttaa myös ei konservatiivisia voimia, kuten kitka. (Hatakka et al. 2016, s. 103–105.)

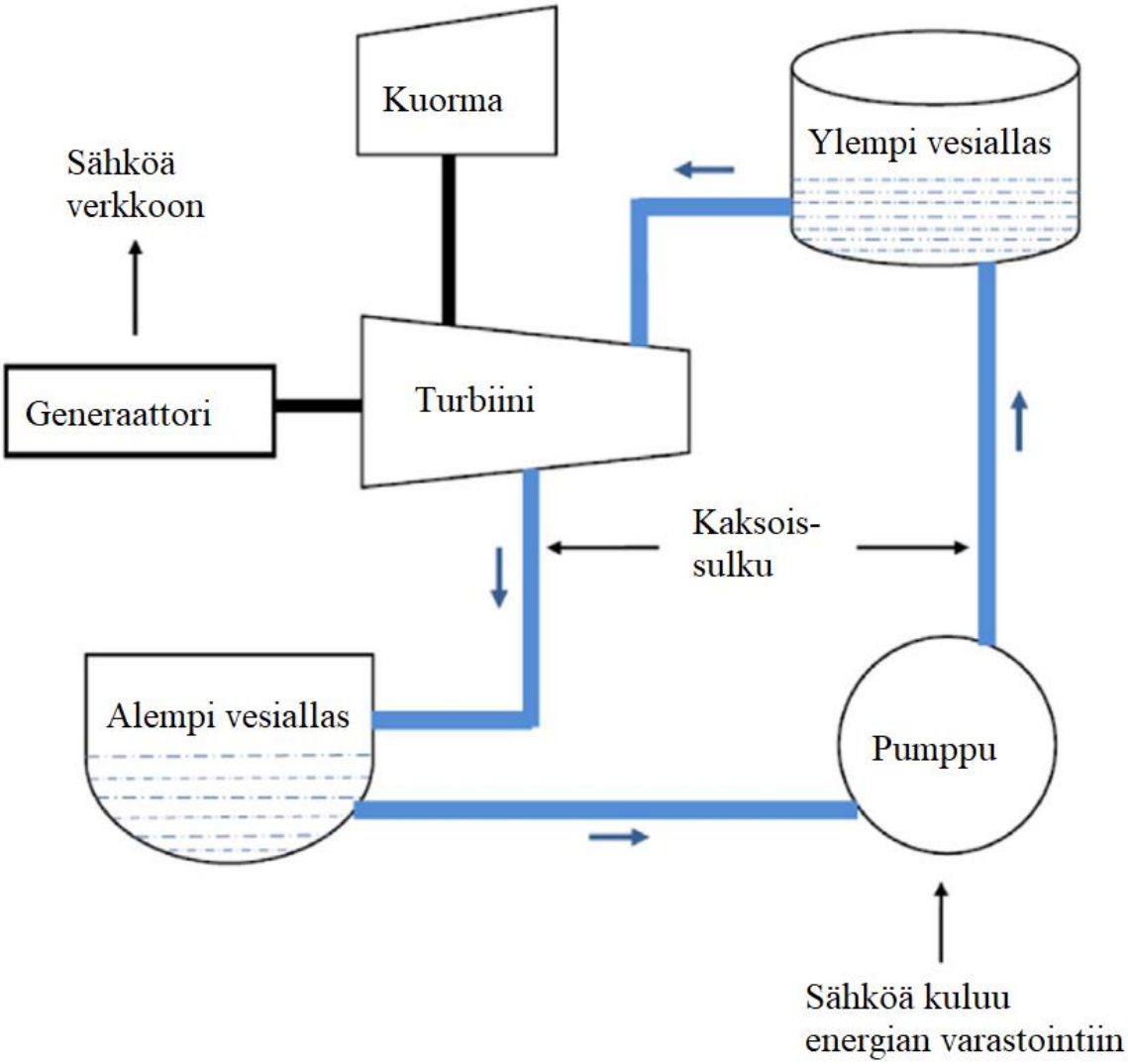
3.1 Erilaiset teknologiat ja toimijat

Tällä hetkellä uudenlaisia painovoimaan perustuvia energiavarastoja kehittää useampi yritys. Yritykset ovat kehittäneet erilaisia metodeja painovoiman valjastamiseen energian varastointiin. Kullakin tekniikalla on omat heikkoutensa ja vahvuutensa, mutta ne jakavat myös monia yhtäläisyyksiä. Kaikkia yhdistää sähköenergian varastointi potentiaalienergiaksi.

3.1.1 PHES

PHES tarkoittaa pumpatun veden energiavarastoa ja on laaja-alaisesti vakiintunut energiavarastotyyppi. Se on vanhimpia tunnettuja energian varastointikeinoja ja on ollut käytössä jo 1890-luvulta lähtien. Veden pumppausta voidaan hyödyntää sellaisten vesivoimaloiden yhteydessä, joissa tulo- ja poistoaltaan välillä on riittävästi korkeuseroa. Korkean kulutuksen aikana vettä lasketaan ylemmältä altaalta turbiinin kautta alemmalle. Kun kulutus on

vähäistä ja sähkö halvempaa, voidaan vettä pumpata takaisin yläsäiliöön. Kuvassa 2 on havainnollistettu laitoksen pääkomponentit ja virtauskanavat. (Rehman & Al-Hadrami & Alam 2015.)



Kuva 2. Kuva PHES:n pääkomponenteista ja virtauskanavista. (muokattu: Rehman, S. et al. 2015, s. 589.)

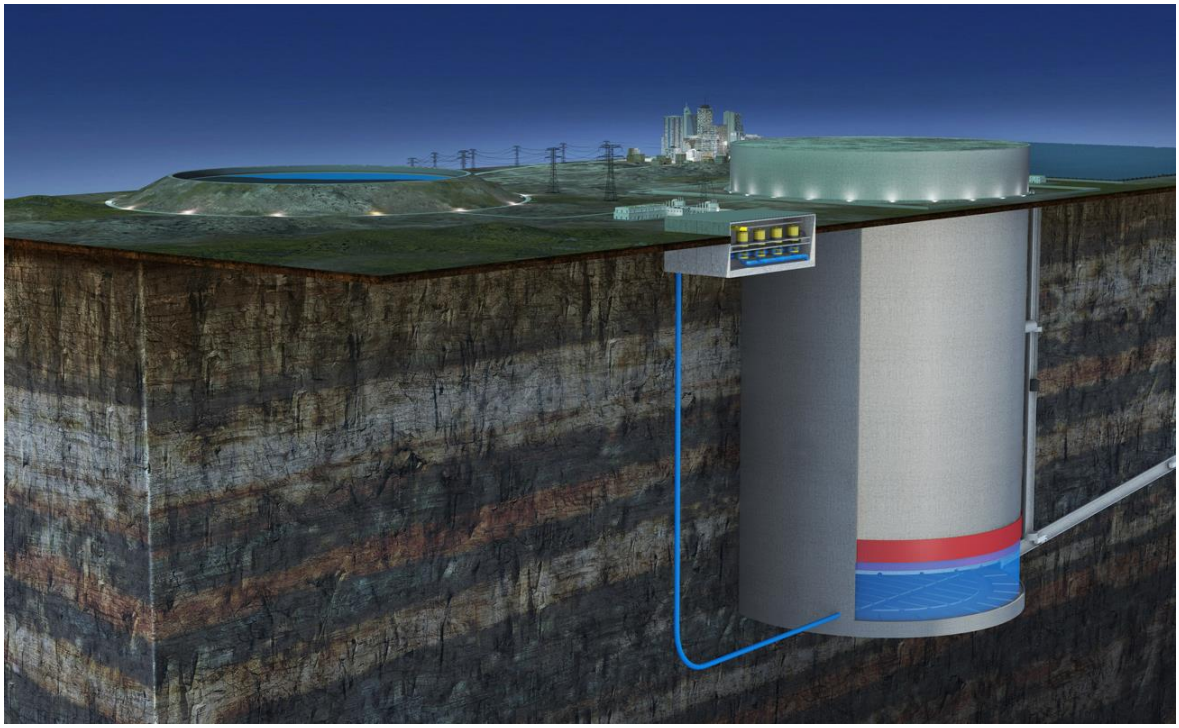
Pumpatun veden energiavarastoista on olemassa useita eri variaatioita. Laitoksen yhteyteen voidaan rakentaa esimerkiksi tuuli- tai aurinkovoimapuisto. Tällöin varasto saisi energiaa nesteen pumppaukseen suoraan omasta voimalastaan ja voisi tuottaa sähköä myös muuten kuin purkautumalla. Pumpatun veden varastoja voidaan rakentaa myös tavanomaisten

vesivoimaloiden yhteyteen. Tällaisessa järjestelyssä vettä pumpataan patoaltaan yläpuolelle tekojärveen, josta se voidaan laskea takaisin. On myös esitetty suunnitelmia maanalaisista varastoista. Niissä hyödynnettäisiin maanalaisia luolastoja altaina. Ideaa on tutkittu Yhdysvalloissa, mutta järjestelmä ei ole edennyt suunnittelupöytää pidemmälle. Euroopassa puolestaan on kehitetty muuttuvanopeuksista PHES:iä, jonka avulla voidaan varastoa purkamalla säätää verkon taajuutta kiinteänopeuksisia tehokkaammin. (Berrada & Loudiyi 2019 s. 14.)

Heindl Energy on saksalainen vuonna 2014 perustettu yritys, joka kehittää painovoimaan perustuvaa energiavarastoa. Yrityksen konsepti on eräänlainen hybridi pumpatun veden varaston ja tornivaraston välillä. Konseptia on havainnollistettu kuvassa 3. Perusidea laitteistossa on nostaa valtavaa kalliolohkaretta vesipumppujen avulla. Noustessa lohkareen potentiaalienergia kasvaa ja siihen varastoituu energiaa. Energia voidaan vapauttaa, kun veden annetaan virrata kanavia pitkin turbiinin läpi ulos altaaseen. Taulukossa 1 on esitettynä laitoksen toiminta-arvoja eri laitosko'oilla. (Heindl Energy 2022 a.)

Taulukko 1: Heindl Energyn laitoksen tunnuslukuja.

Kapasiteetti *E* [GWh]	1	3	8
Sylinterin halkaisija *d* [m]	150	200	250
Vesitilavuus *V* [1000 m^3]	1 340	2 380	5 990
Paine *p* [bar]	41	67	71



Kuva 3. Tietokoneella luotu kuva Heindl Energyn laitteistosta. (Heindl Energy 2022 a.)

3.1.2 ARES

Advanced Rail Energy Storage LLC eli ARES on perustettu Kaliforniassa vuonna 2010 ja on yksi alan vanhimmista toimijoista, joka kehittää omaa järjestelmäänsä. ARES on patentoinut menetelmänsä useassa eri maassa. Toimintaperiaate on samanlainen kuin PHES:issä, mutta veden pumppaamisen sijasta energiaa varastoidaan siirtämällä raskaita vaunuja mäkeä ylös ja vapautetaan tuomalla vaunuja hiljaa alaspäin. (ARES 2022 a.)

ARES on toteuttanut Kalifornian Tehachapissa pilottihankkeen vuonna 2013. Pilottihanke eteni kuten lopullinen laitosprojektikin, lupia ja rahoitusta myöden. Pilotissa on yksi kuvassa 4 esitetty vaunu, joka liikkuu normaalia junakiskoa pitkin mäkeä ylös ja alas. Sähkö siirtyy vaunun ja verkon välillä sivussa kulkevan kiskon kautta. Rata on 275 metriä pitkä ja rinne, jota pitkin kiskot on rakennettu, on kaltevuuskulmaltaan yhdeksän prosenttia. Vaunua nostetaan tuulivoiman avulla ylös ja alas tullessaan vaunun omat moottorit toimivatt generaattoreina ja vapauttavat energiaa verkkoon. Pilotti on toiminut odotetusti ja demonstroinut teknologian toimintaa erinomaisesti. (Sullivan & Cava & Brown & Peitzke & Kelly. 2016 s. 77–78.)

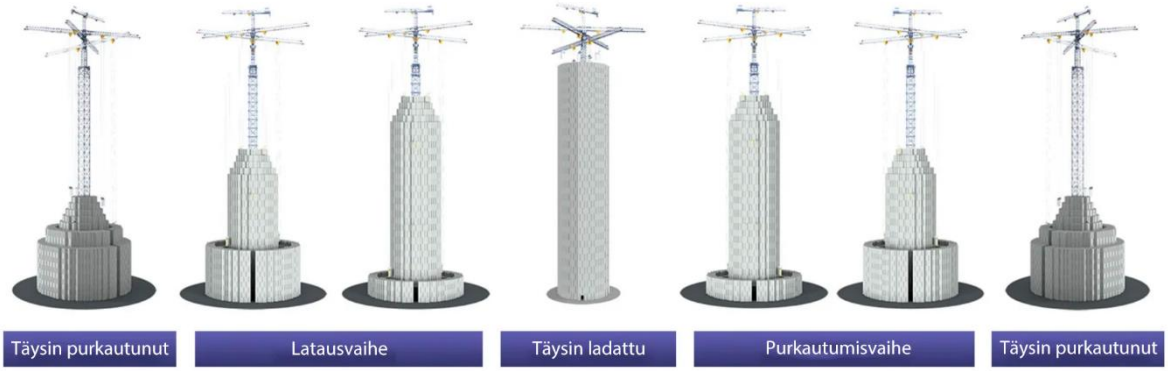
Kuva 4. ARES pilottihankkeen vaunu kuvattuna Tehachapissa. (Sullivan et al. 2016, s. 82.)

Tehachapin onnistuneen pilotin jälkeen yhtiö on alkanut suunnitella Nevadaan 50 megawatin yksikköä. Yksikköön on tarkoitus tulla yhteensä seitsemän vaunua, joista kaksi on motorisoituja ja loput viisi ovat painolastina. Yhteispainoksi vaunuille tulisi noin 860 tonnia. Kiskon pituudeksi on suunniteltu hieman yli yhdeksää kilometriä reilun seitsemän prosentin kallistuksessa, eli korkeuseroa radan päiden välille tulee 610 metriä. Pilotista poiketen sähkö siirretään tavanomaisia radan yläpuolella roikkuvia johtimia pitkin. Projekti on aloitettu vuonna 2017 ja on edelleen rakenteilla (ARES 2020 b). (Sullivan et al. 2016 s. 75–77.)

3.1.3 Tornit

Tornijärjestelmiä kehittää useampi eri yritys, joilla kullakin on omat metodinsa. Idea kaikissa on kuitenkin sama: nostetaan raskaita painoja ylös, ja annetaan niiden valua hitaasti alas. Varastoa ladatessa ylimääräsähkön avulla nostetaan paino ylös, jolloin sähkö varastoituu punnuksen potentiaalienergiana. Kun varaston sisältämää energiaa tarvitaan, punnusta lasketaan hiljalleen alas, jolloin potentiaalienergia voidaan muuttaa sähköksi verkkoon. (Berrada & Loudiyi 2019 s. 13–14.)

Energy Vault on vuonna 2017 perustettu sveitsiläinen, energiavarastoa kehittävä yritys. Sen kehittämässä järjestelmässä on keskellä korkea torni, jonka avulla kasataan ja lasketaan raskaita punnuksia tornin ympärille energiankäytön mukaan. Tornin ulkonäkö ja painojen sijainnit eri vaiheissa on esitetty kuvassa 5. Energy Vault on rakentanut vuonna 2018 pienen skaalan pilottitornin, ja myöhemmin kesällä 2020 Sveitsiin Ticinoon kaupallisessa käytössä olevan täysikokoisen yksikön. Sveitsin yksikön kapasiteetti on 35 MWh. Energy Vault on myös suunnitellut ”joustavuuskeskuksen” (engl. resiliency center), joka perustuu löyhästi prototyyppitorniin. Keskuksessa on useita painoja, jotka liikkuvat vaijereita pitkin ylös ja alas samoin kuin tornissa, mutta vaakasuunnassa painot liikkuvat kiskoja pitkin keskuksen reunalle, jossa ne lasketaan alas. Keskus on suunniteltu rakennettavaksi 10 MW yksiköissä, joita voidaan liittää toisiinsa. Moduuleja yhdistelemällä saadaan laitoksia, joiden kapasiteetti on jopa useita gigawatteja. (Energy Vault 2022.)



Kuva 5. Energy Vault Ticinon tornin latauksen ja purkauksen vaiheet. (muokattu: Energy Vault 2022.)

Gravitricity on toinen tornityyppisiä varastoja kehittävä yritys. Se on perustettu Iso-Britanniassa vuonna 2011. Yhtiön järjestelmän toimintaperiaate on erittäin yksinkertainen. Paino menee ylös. Paino tulee alas ilman sen suurempia systeemeitä. Järjestelmässä ei ole monimutkaisia torneja, sillä siinä käytetään vain muutamaa raskasta punnusta, jotka liikkuvat ainoastaan pystysuunnassa vaijereiden varassa. Yhtiö on rakentanut ensimmäisen pienen prototyyppinsä (kuva 6) Leithin satamaan Edinburghissa. Rakennelmassa on kaksi 25 tonnia painavaa punnusta, joita kannatellaan 15 metriä korkeassa kehikossa. Kapasiteettia sillä on 250 kilowattia. Sitä on käytetty käytetty erilaisiin koeajoihin ja laskennan todistamiseen

käytännössä. Saatua dataa käytetään tulevien projektien kehityksessä. Koeajojen jälkeen laitos on kytketty paikalliseen sähköverkkoon. Yrityksen seuraava askel on rakentaa manner-Eurooppaan 4–8 megawatin yksikkö. Yhtiö on tutkinut useita erilaisia kaivoskuiluja ja tällä hetkellä Tšekissä sijaitseva, yli kilometrin syvyyteen ulottuva Staříčin kaivos vaikuttaa lupaavalta. Lopullista päätöstä kohteesta ei ole vielä tehty, sillä projekti odottaa rahoituspäätöstä. (Gravitricity 2022 a.)

Kuva 6. Gravitricityn 250 kW prototyyppi Leithin satamassa, Edinburghissa. (Gravitricity 2022 a.)

3.2 Mahdollisuudet

Yhteisiä vahvuuksia painovoimaan perustuvilla energiavarastoilla on se, että niihin varastoitu energia ei purkaudu itsekseen, ellei laitteisto vaurioidu. Esimerkiksi termo- ja kemiallisten akkujen ominaisuuksiin kuuluu, että ne purkautuvat itsekseen ajan myötä. Painovoimaan perustuvat energiavarastot ovat usein suuria ja pystyvät varastoimaan paljon energiaa, eikä niiden käytöstä aiheudu päästöjä ympäristöön.

3.2.1 PHES

Veden pumppaaminen on toistaiseksi ollut ainoa järkevä tapa varastoida suuria määriä energiaa. Varastoilla on tyypillisesti korkea kokonaishyötysuhde, noin kahdeksankymmentä prosenttia. Vesivarastot ovat myös hyvin skaalautuvia ja niiden varastointikapasiteetit vaihtelevat paljon. Nykyisin suurimpien laitosten kapasiteetit ovat jopa useita kymmeniä gigawatteja. (Rehman et al. 2015 s. 589.)

Pumpatun veden varasto on helppo rakentaa jo olemassa olevan vesivoimalaitoksen yhteyteen, mikäli laitoksen yhteydessä on valmiiksi varastoallas tai tekojärvi, joka toimisi varaston ylempänä vesialtaana. Tällä tavoin säästetään huomattavasti rakennus- ja luvituskustannuksissa. (Rehman et al. 2015 s. 590.)

Heindl Energyn varastojärjestelmä tarjoaa vaadittuun pinta-alaan nähden tehokasta varastointia. Kapasiteetti kasvaa säteen suhteen neljänteen potenssiin, eli kun säde tuplaantuu, kapasiteetti 16-kertaistuu. Teknologia myös mahdollistaa suuren kapasiteetin laitosten rakentamisen ja laitoksesta onkin suunnitelmia kahdeksaan gigawattituntiin asti. (Heindl Energy 2022 a.)

3.2.2 ARES

Vaunujen siirtely mäellä kiskoja pitkin on huomattavasti helpompaa kuin veden pumppaaminen korkealle. Yksinkertaisuudesta on myös muita hyötyjä. Laitoksen rakentaminen ei vie läheskään yhtä kauan, eikä sen luvitusprosessi ole yhtä pitkä.

Vaunujärjestelmän maantieteelliset vaatimukset eivät ole yhtä tarkat kuin vesivarastojen, joten se voidaan sijoittaa helpommin ympäri maailmaa erilaisiin paikkoihin. Mikäli sopivaa

maastoa ei löydy, voidaan kärryille periaatteessa rakentaa sopivia mäkiä ja muita pinnanmuotoja esimerkiksi aroille.

Kärryihin ei vaadita kalliita turbiineita, eikä laitos tarvitse suuria patoaltaita energiavarastoksi, joten järjestelmä on myös vesivoimalaa edullisempi. Rakennelma ei vaadi monimutkaisia komponentteja, vaan voidaan rakentaa käytännössä täysin samoista materiaaleista ja komponenteista kuin normaalit junaradat ja junat vaunuineen. (ARES 2022 a.)

Vaunujärjestelmä on myös tehokkuudeltaan erinomainen ratkaisu. Järjestelmän kokonaishyötysuhde (lataus ja purku) on yli yhdeksänkymmentä prosenttia (ARES 2022 a). Tämä yhdistettynä erinomaiseen tehoskaalautuvuuteen muutamista megawateista aina useisiin gigawatteihin tekee vaunuista erinomaisen vaihtoehdon useaan eri kohteeseen. Laitteisto ei myöskään juuri kulu käytössä tai paikallaan varastoidessa, kuten akut. Tämän takia järjestelmän uskotaan kestävän useita vuosikymmeniä. (Sullivan et al. 2016 s. 74.)

3.2.3 Tornit

Monet PHES:n ja ARES:n ongelmat ovat helposti ratkaistavissa tornien avulla. Kuten ARES, tornit eivät vaadi suuria määriä vettä toimiakseen. Tämän lisäksi tornit eivät vaadi myöskään mäkistä maastoa, vaan ne rakennetaan tasaiselle maalle. PHES:n tavoin alalla on useita toimijoita, joten teknologian kehittäminen ei ole vain yhden yrityksen varassa, vaan toimivia, käytössä olevia prototyyppejä on rakennettu useampi.

Energy Vaultin tekniikka on todettu toimivaksi Sveitsin prototyypillä ja järjestelmää kehitetään jatkuvasti paremmaksi. Teknologian toiminta on suurimmaksi osaksi mekaanista, joten se ei ole altis tulipaloille, ja toiminta on varmaa myös erilaisten luonnonilmiöiden aikana. Laitosten rakentamisessa voidaan hyödyntää monenlaisia jätemateriaaleja, esimerkiksi tuhkaa, kaivostoiminnan hukkajakeita ja tuuliturbiinien siipiä. Tornit voidaan rakentaa lähes mihin tahansa. Torni ei vaadi erityistä maastoa, vaan suhteellisen tasainen alue riittää. Energy Vaultin joustavuuskeskuksen etuja ovat suuri energiatiheys sekä erinomainen modulaarisuus ja skaalautuvuus. Keskus pystyy tarjoamaan sähköä muutamista tunneista jopa vuorokausiin tarpeen mukaan. (Energy Vault 2022.)

Gravitricityn prototyypin avulla konsepti on todistettu toimivaksi. Järjestelmällä on saavutettu noin kahdeksankymmenen prosentin hyötysuhde ja alle sekunnin vasteaika nollasta täyteen tehoon. Laitos soveltuisi siis erinomaisesti nopeaan verkon heilahteluiden

kompensointiin. Energy Vaultin tavoin Gravitricityn laiteiston toiminta on turvallista, varmaa ja pitkäikäistä. Etuna Energy Vaultin systeemeihin nähden on, että Gravitricity aikoo rakentaa laitteistojaan maan alle jo olemassa oleviin käytöstä poistettuihin kaivoksiin, suojaan sääilmiöiltä ja katseilta. (Gravitricity 2022 b.)

3.3 Haasteet

Vaikka painovoimaisista energiavarastoista ei aiheudu käytön aikana päästöjä, vaativat ne usein suuria määriä pinta-alaa ja juuri tietylle teknologialle soveltuvia pinnanmuotoja. Sopivan paikan löytäminen vaatii resursseja ja tutkimusta. PHES:iä lukuun ottamatta teknologia on uutta ja tutkimusta on vielä tehtävänä. Tämän takia painovoimaan perustuvat energiavarastot ovat verrattain kalliita.

3.3.1 PHES

Vaikka veden pumppaaminen on idean tasolla yksinkertaista, ei se käytännössä kuitenkaan onnistu kaikkialla. PHES vaatii toimiakseen tietynlaisen alueen. Alueita ei ole kovin helppo löytää ja tutkimusta tehdään jatkuvasti, jotta löytyisi laitokselle sopivia alueita, jotka olisivat myös rakennusteknisesti ja rahallisesti kannattavia. On arvioitu, että ajan myötä kaupunkien ja taajamien laajetessa, sekä ympäristön muuttuessa varastoille sopivat sijainnit alkavat käymään entistä harvinaisemmiksi. On kuitenkin kehitetty tietokoneohjelmia, joiden avulla voidaan skannata maan pintaa ja tunnistaa soveltuvia alueita. (Rehman et al. 2015 s. 591.)

Verkon epävakaus voi myös aiheuttaa ongelmia yksiroottorisille varastolaitteistoille. Mikäli verkon energiantarve muuttuu äkisti, on veden virtaussuuntaa hankala muuttaa nopeasti tuotannosta kulutukseen tai toisinpäin. Ongelma on suurempi isoissa laitoksissa, joissa virtaa suuret määrät vettä. Tämä ei tietenkään ole yhtä suuri ongelma laitoksissa, joissa pumpuille ja turbiinille on omat akselinsa ja virtauskanavat. (Rehman et al. 2015 s. 590.)

Heindl Energyn laitos vaikuttaa paperilla lupaavalta, mutta kalliolohkareen tiivistäminen aiheuttaa haasteita. Laitoksen tiivisteen pitäisi kestää lähes sadan baarin paine. Samalla tiivisteen pitäisi kuitenkin mahdollistaa lohkareen liike ylös ja alas. Laitoksen louhintakustannusten takia ei ole järkevää rakentaa pieniä laitoksia, vaan kannattava laitoskoko alkaa gigawatin tasosta. Lisäksi haasteita konseptiin aiheuttaa geologia. Laitos vaatii tasaisen maa-alueen, jossa peruskallio olisi lähellä maan pintaa. Peruskallion tulisi olla ehjää ja vakaata kivilajia,

kuten graniittia. Laitoksia ei siis voi sijoittaa epävakaille alueille, kuten mannerlaattojen reunoille tai pehmeitä kivilajeja sisältäville alueille. (Heindl Energy 2022 c.)

Heindl Energy aloitti laitteiston kehittämisen, mutta yritykseltä loppui sittemmin rahat ja ajautui maksukyvyttömyyteen. Tässä kohtaa patentit ja muu yrityksen kehitystyö myytiin uudelle sijoittajafirmalle, New energy Let's Go:lle, joka pitää konseptin edelleen elossa. Uusi omistaja etsii uutta pääsijoittajaa, jonka avulla idea saisi uutta tuulta purjeisiin. (New Energy Let's Go, 2022.)

3.3.2 ARES

Ideana vaunun hilaaminen mäkeä ylös on erittäin yksinkertainen, mutta todellisuudessa projektien toteuttaminen vaatii vielä paljon. Teknologiaa ei ole toistaiseksi vielä lähtenyt toteuttamaan yksikään muu yritys kuin ARES. ARES on patentoinut omat järjestelmänsä melko laajasti ja se hidastaa muiden kilpailevien laitteistojen kehittämistä ja uusien toimijoiden aloittamista. Tämän takia teknologian kehittäminen ei innosta alalle uusia toimijoita ja useimmiten uuden yritykset alkavat kehittää omaa kilpailevaa järjestelmäänsä.

Teknologia ei ole päässyt pilottihanketta pidemmälle, sillä toistaiseksi ARES ei ole saanut Nevadan projektiaan valmiiksi. Yhtiön nettisivuille ei ole päivitetty projektin etenemisestä sitten vuoden 2020. Nettisivuille on kuitenkin päivitetty 2022 vuosiluvut alareunaan, mutta uusia uutisia ei ole tullut 2020 syksyn jälkeen. Myöskään mikään uutistoimisto ei ole tehnyt yhtiöstä juttuja ainakaan vuoteen. Toiminta vaikuttaisi siis hiipuneen.

3.3.3 Tornit

Suurin haaste teknologiassa on sen uutuus. Vanhin rakennelma on Energy Vaultin pilotti vuodelta 2018. Toisin kuin pumpatun veden varastoja, ei torneja ole ollut kaupallisessa käytössä kuin kaksi. 2020 valmistunut Energy Vaultin Sveitsin torni ja 2021 valmistunut Gravitricityn ratkaisu Leithin satamassa ovat toimineet verkossa hyvin, mutta suuremman kapasiteetin asentaminen vaatii vielä paljon tutkimista ja kehitystä. Energy Vaultin torni on rakenteeltaan ja toiminnaltaan monimutkainen. Gravitricityn puolestaan kapasiteetiltaan pieni. Valmistajat lupaavat pitkää ikää laitteilleen, mutta todelliset kokeet laitteistojen kestävyydestä käytössä ja sään armoilla ovat vielä tekemättä.

4 Mahdollisuudet Etelä-Karjalassa

Etelä-Karjala on maastoltaan monipuolista ja maastotyypit vaihtelevat paljon. Maakuntaa jakavat jääkauden aikana syntyneet reunamuodostumat, Salpausselkä I ja Salpausselkä II. Pohjoisosissa pinnanmuodot vaihtelevat paljon, mutta korkeuserot eivät ole kovin suuria. Maakunnan korkein kohta on Haukkavuori, joka kohoaa 172 metriin merenpinnasta ja viereisen Sarajärven pinnasta 80 metriä (Leino 2012). Maakunta tunnetaan myös järvistään, joita onkin sen pinta-alasta reilu viidesosa. Vesialueista merkittävimmät ovat Saimaa ja Vuoksi. (SLL n.d.)

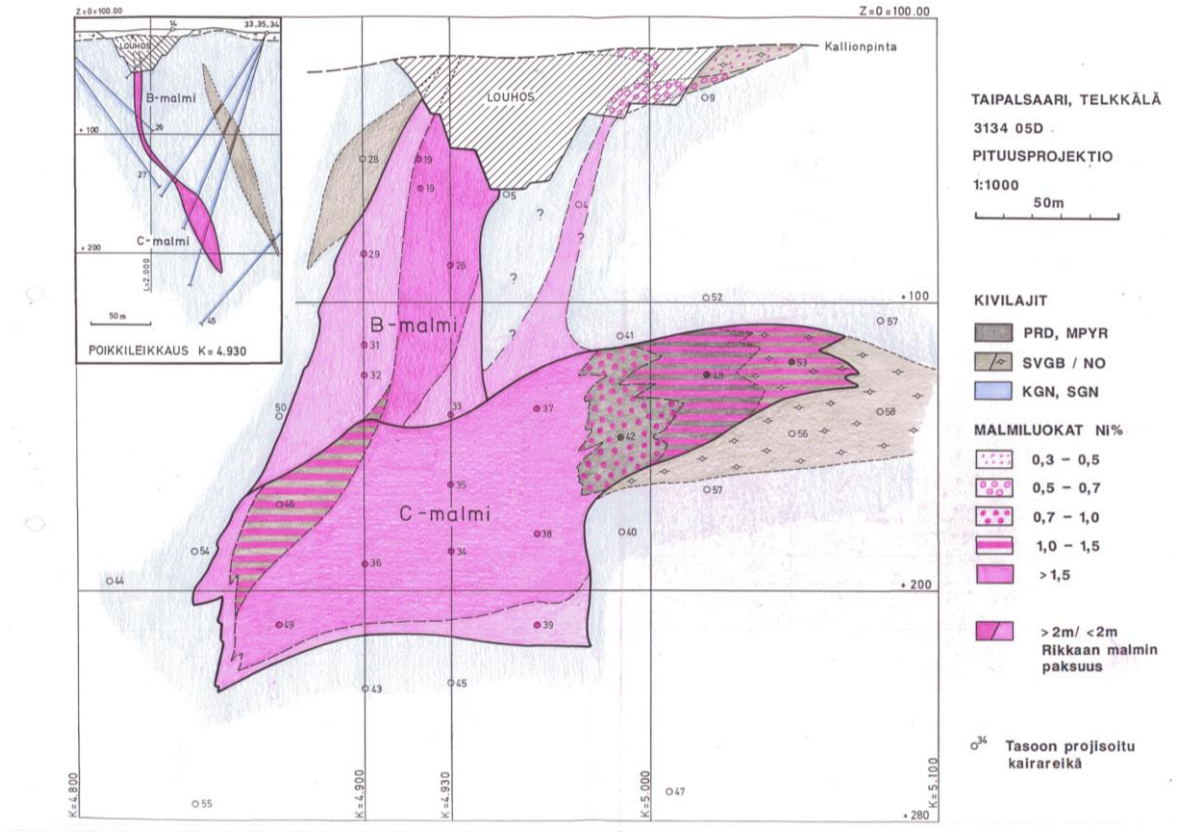
4.1 Potentiaalisia kohteita

Maakunnan maantiede aiheuttaa haasteita painovoiman hyödyntämiseen. Pienten korkeuserojen takia ARES:in kehittämää raide-energiavarastoa ei voida hyödyntää Etelä-Karjalassa. Laajojen vesialueiden hyödyntäminen pumpatun veden varastoina on haastavaa samasta syystä. Vuoksessa sijaitsevaan Imatran voimalaitokseen voisi periaatteessa rakentaa takaisinpumppausmahdollisuuden, mutta laitoksen yläpuolella joen pinnalla ei ole paljoa nousuvaraa. Kalliolohkareen alle pumpattu vesi voisi teoriassa toimia. Etelä-Karjalan peruskallio on eteläosissa nuorta rapakiveä ja pohjoisessa puolestaan on vanhempia kivilajeja, kuten gneissiä ja syväkiviä (SLL n.d.). Tämän takia eteläosat ovat huonoja vaihtoehtoja varastolle, mutta pohjoisosiin sen rakentaminen voisi maaperän puolesta onnistua. Kiinnostavimmat mahdollisuudet tarjoavat kaivokseen rakennettava punnusvarasto, sekä pienempi varasto kerrostalon yhteyteen.

4.2 Telkkälän kaivos

Outokumpu Oy louhi malmiesiintymän yläosan vuosina 1969 ja 1970. Kaivoksen alempi esiintymä löydettiin vuonna 1987 ja syvämalmi louhittiin vuosina 1988–1992. Kaivoksesta louhittiin lopulta kokonaisuudessaan hieman alle miljoona tonnia maa-ainesta. Avolouhoksen (kuva 7) kaivaukset ylsivät noin viidenkymmenen metrin syvyyteen. Syvämalmin louhinnassa kaivettu vinotunneli (kuva 8) yltää yli kahdensadan metrin syvyyteen ja on noin 1750 metriä pitkä. (Rissanen & Räsänen 2018.)

Kuva 7. Kuva Telkkälän avolouhoksesta tyhjänä. (Schönberg & Savolainen 2020.)



Kuva 8. Poikkileikkaus Telkkälän kaivoksesta. (Pöyry & Isomäki 1992.)

Kaivoksessa voitaisiin hyödyntää Gravitricityn kaivoksiin kehitettyä laitteistoa. Sijainniltaan kaivos olisi otollinen, sillä se on lähellä asutusta. Kaivos kuitenkin sijaitsee jokseenkin syrjässä, joten sinne rakennettu laitteisto voisi olla ja toimia häiriöttä. Haasteita kuitenkin järjestelmän rakentamiseen tuo kaivoksen nykytila. Se on nimittäin täynnä raskasmetallipitoista hapanta vettä (Rissanen 2018). Mikäli veden pumppaisi pois kaivoksesta, täyttyisi se oletettavasti kuitenkin uudestaan. Valtavien vesimäärien pumppaaminen tulisi kuitenkin niin kalliiksi, ettei laitoksen rakentamisessa päästäisi voiton puolelle. Vedellä täyttynyttä kaivosta ei myöskään voitaisi hyödyntää, sillä veden painoihin kohdistama noste vähentää merkittävästi laitoksen varastointikapasiteettia. Kohteena Telkkälän kaivos on siis vähintäänkin haastava. Suomessa on kuitenkin useita muita hylättyjä kaivoksia, joten ehkä niistä jotain voisi hyödyntää energian varastoinnissa.

4.3 Kerrostalon yhteyteen rakennettava energiavarasto

Gravitricityn Leithin sataman prototyyppi on todettu toimivaksi. Laitos kykenee tuottamaan täydellä teholla virtaa jopa alle sekunnissa, joten se soveltuisi hyvin huippukäytön tasaamiseen tai sähkökatkon ajaksi hätävirran tuottamiseen. Laitoksen hyvä hyötysuhde takaa myös varastoinnin kannattavuuden. Laitos on suhteellisen pienikokoinen ja voidaan rakentaa melkein mihin vain. Vastaavan rakennelman voisi liittää helposti kerrostalon yhteyteen. Kerrostalo on valmiiksi korkea rakennelma, minkä päätyyn varaston voisi liittää helposti. Prototyyppilaitoksen tuottama 250 kW teho riittäisi hyvin kokonaisen talon hetkellisen kulutuspiikin tasaamiseen. Jo rakennetun laitoksen kapasiteetti ei vain ole kovin suuri, joten sitä kehittämällä voisi laitoksesta saada hyödyllisemmän.

4.3.1 Opiskelija-asunnon energiavarasto

Lappeenrannan seudun opiskelija-asuntosäätiö LOAS omistaa Lappeenrannassa, Skinnarilan kaupunginosassa 2013 valmistuneen kerrostalon nimeltä LOAS Seppo (kuva 9). Talossa on 72 kappaletta 31m^2 kokoisia yksiöitä kahdeksassa kerroksessa. Talo on noin 27 metriä korkea. Sen energiatehokkuusluku on 100 kWh/brm^2 ja -luokka A. Lisäksi lämmitys hoituu kaukolämmöllä, joten sähköä rakennuksessa ei kulu lämmitykseen. Vuotuinen sähkönkulutus on laskennallisesti 82 285 kWh/a. Tämä tarkoittaa keskimäärin noin 225 kWh päivittäistä kulutusta. (LOAS 2013.)

Kuva 9. LOASin Seppo

Tornimalliseen energiavarastoon varastoitu energiamäärä voidaan laskea yhtälöllä 1 (Hunt & Nascimento & Zakeri & Jurasz & Dąbek & Paweł & Barbosa & Brandão & de Castro & Leal Filho & Riahi 2022). Taulukossa 2 ja kuvassa 10 on esitettynä laitosten kapasiteetteja.

$$E = m \cdot h \cdot g \cdot e \tag{1}$$

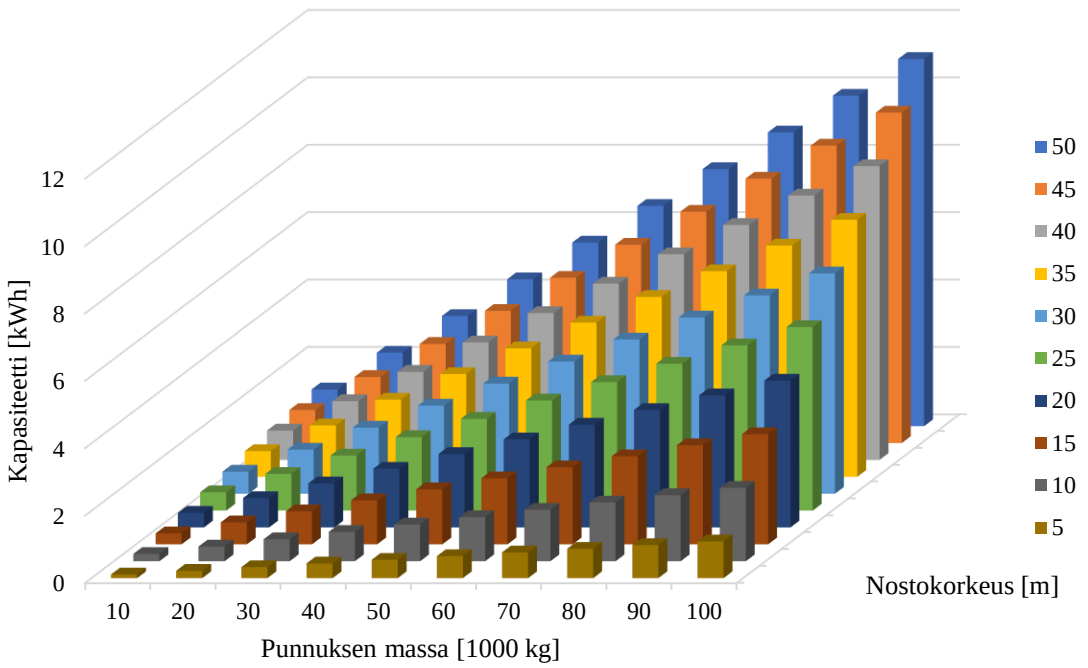
, jossa E on varastoitu energiamäärä [J], m on punnusten kokonaismassa [kg], h on nostokorkeus [m], g on gravitaatiovakio [m/s^2] ja e on laitteiston hyötysuhde, oletettu 80 %.

Mikäli varaston olisi tarkoitus olla talon ainoa energianlähde, olisi valittava nostokorkeus väliltä 35…50 metriä ja punnuksen paino väliltä 70…100 tonnia, jotta energiaa riittäisi vajaan tunnin käyttöön. Jos varastoa käytettäisiin tukena verkosta saatavalle sähkölle

huippukulutusaikoina, riittäisi selvästi pienempikin varasto. Alle 25 metrin nostokorkeudella tai alle 50 tonnin painoilla kapasiteetti jää niin pieneksi, ettei rakentaminen olisi järkevää.

Taulukko 2: Tornityyppisen energiavaraston kapasiteetteja.

Punnuksen massa [1000 kg]	Energiavaraston kapasiteetti [kWh]									
	Tornin korkeus [m]									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
10	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
20	0,2	0,4	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0	2,2
30	0,3	0,7	1,0	1,3	1,6	2,0	2,3	2,6	2,9	3,3
40	0,4	0,9	1,3	1,7	2,2	2,6	3,1	3,5	3,9	4,4
50	0,5	1,1	1,6	2,2	2,7	3,3	3,8	4,4	4,9	5,4
60	0,7	1,3	2,0	2,6	3,3	3,9	4,6	5,2	5,9	6,5
70	0,8	1,5	2,3	3,1	3,8	4,6	5,3	6,1	6,9	7,6
80	0,9	1,7	2,6	3,5	4,4	5,2	6,1	7,0	7,8	8,7
90	1,0	2,0	2,9	3,9	4,9	5,9	6,9	7,8	8,8	9,8
100	1,1	2,2	3,3	4,4	5,4	6,5	7,6	8,7	9,8	10,9



Kuva 10. Tornityyppisen energiavaraston kapasiteetteja.

Punnuksia voidaan laskea eri nopeuksilla tehontarpeen mukaan. Nopeutta voidaan säätää nopeastikin vastaamaan kulutusta. Laitoksen tuottama hetkellinen teho voidaan laskea yhtälöllä 2 (Hunt et al. 2022). Taulukossa 3 ja kuvassa 11 on esitettynä, minkälaista tehoa saadaan kunkin massaisella punnuksella eri nopeuksilla.

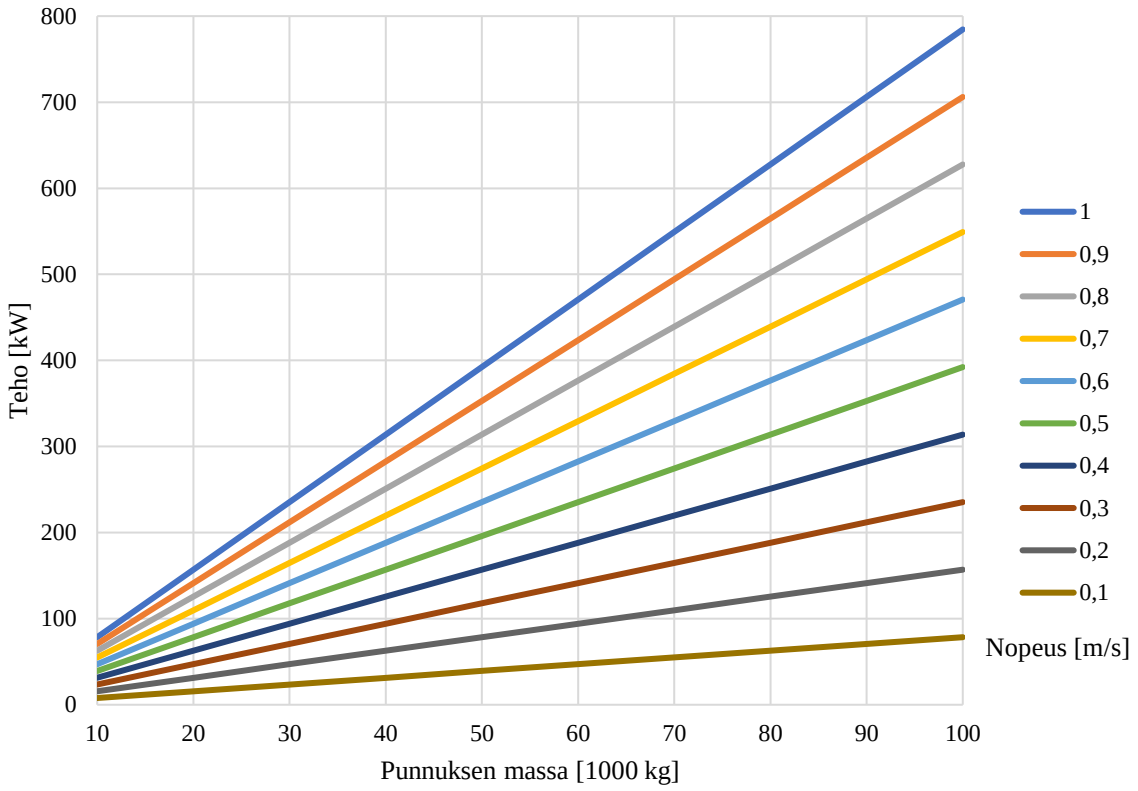
$$P = \frac{E}{T} \tag{2}$$

, jossa P on saatava teho [kW] ja T on aika, joka punnukselta kuluu varaston yläosasta alaosaan [s].

Saaduista arvoista voidaan huomata, että vaikka varaston kapasiteetti ei olisi kovin korkea, voidaan laitosta purkaa ja ladata suurellakin teholla. Laskemalla punnusta metri sekunnissa saavutetaan raskaimmilla painoilla lähes megawatin tehoja. Tietystikään tällä nopeudella varasto ei kestäisi kovin kauaa. Hitaasti laskemalla puolestaan saavutetaan jo kymmenen tonnin painolla kahdeksan kilowatin teho, joka riittäisi esimerkiksi yhden hybridiauton lataamiseen täydellä nopeudella (Webasto SE 2022).

Taulukko 3: Tornityyppisen energiavaraston tehoja.

Punnuksen massa [1000 kg]	Energiavaraston teho [kW]									
	Punnuksen nopeus [m/s]									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
10	8	16	24	31	39	47	55	63	71	78
20	16	31	47	63	78	94	110	126	141	157
30	24	47	71	94	118	141	165	188	212	235
40	31	63	94	126	157	188	220	251	282	314
50	39	78	118	157	196	235	275	314	353	392
60	47	94	141	188	235	282	330	377	424	471
70	55	110	165	220	275	330	384	439	494	549
80	63	126	188	251	314	377	439	502	565	628
90	71	141	212	282	353	424	494	565	635	706
100	78	157	235	314	392	471	549	628	706	785



Kuva 11. Tornityyppisen energiavaraston tehoja.

Käsitelty tornimallinen energiavarasto on helposti skaalautuva ja siitä voidaan rakentaa tarpeen mukaan sopivan kokoinen yksikkö. Suuren kulutuksen aikana varaston kapasiteetti osoittautuu kuitenkin liian pieneksi ollakseen talon ainoa virtalähde pitkäaikaisessa käytössä, mutta järjestelmällä voisi hyvin tasata huippukäyttöaikojen kulutus- ja hintapiikkejä. Suuremmat laitokset olisivat mahdollisia rakentaa, mutta Sepon sijainnin takia, ei niille olisi aivan talon vieressä tilaa. Lähistöllä on kuitenkin paljon tyhjää tilaa, jonne voisi rakentaa suuremman laitoksen tai useamman pienemmän. Useita pieniä voisi myös sijoittaa usean muun talon yhteyteen, jolloin niiden hyöty koko verkon tasapainottamisessa ja talon sähkönkulutuksen tasaamisessa vastaisi tai olisi jopa tehokkaampaa kuin yhden suuren.

5 Johtopäätökset

Energian varastointi avaa monia uusia mahdollisuuksia ihmiskunnan energiatehokkuuden parantamiseen. Tehokkailla varastointimenetelmillä voidaan hyödyntää paremmin uusiutuvia energialähteitä. Nykyiset keinot eivät ole soveltuvia suurien kapasiteettien varastointiin, mutta riittävät yksittäisten asukkaiden energiatarpeen tyydyttämiseen. Vaaditaan kuitenkin paljon enemmän kapasiteettia, jotta varastoinnista tulee tehokasta suuressa mittakaavassa.

Tällä hetkellä ainoat yli Gigawatin kapasiteetin varastointiin soveltuvat metodit ovat power-to-gas, lämpövarastot ja pumpatun veden varastot. Näistä ainoastaan pumpatun veden varaston sisältämä energia voidaan vapauttaa helposti sähköksi. Veden varastoon pumppaaminen perustuukin painovoimaan. Ongelmana varastossa on kuitenkin sen vaatima pinta-ala.

Gravitricityn ja Energy Vaultin pilottihankkeet ovat osoittaneet teknologiat toimiviksi. Niillä on samoja hyviä ominaisuuksia kuin pumpatun veden varastolla, mutta ne voidaan rakentaa lähes mihin tahansa. Tämän ansiosta niitä voidaan hyödyntää huomattavasti laajemmin kuin pumpatun veden varastoja. Laitokset ovat toimineet odotetusti verkkoon kytkettyinä ja kyenneet tasapainottamaan sähköverkkoa nopeastikin säätöä vaativissa tilanteissa. Painovoimaan perustuvien energiavarastojen tärkeimpiä ominaisuuksia onkin nopea säätökyky, jonka avulla voitaisiin välttää sähkökatkoksia ja jännitteenvaihteluita sähköverkoissa. Tulevaisuus näyttää laitosten osalta hyvältä ja suuren kapasiteetin laitoksia on jo suunnitteilla.

Painovoimaan perustuvat energiavarastot ovat pääsääntöisesti erittäin turvallisia. Laitteistot eivät vaadi harvinaisia maametalleja ja ovatkin periaatteeltaan varsin yksinkertaisia. Ne perustuvat lähinnä mekaniikkaan, eikä niistä aiheudu kemiallista vaaraa. Mikäli jotain kuitenkin sattuu hajoamaan laitteistossa, ovat vaikutukset lähinnä laitoksen näkökulmasta paikallisia, eikä ulkopuolelle aiheudu vaaraa. Ne toimivat luotettavasti erilaisissa sääolosuhteissa. Esimerkiksi lämpötila ei vaikuta juurikaan kapasiteettiin eikä lataus- tai purkauskykyyn.

Potentiaalia painovoimassa piilee energian varastoinnin suhteen runsaasti. Riittävällä varastointikapasiteetilla voitaisiin hankkiutua eroon kalliista säätövoimasta ja hoitaa kaikki tarvittava peruskuorman ylittävä kulutus varastoidulla energialla. Samalla vältyttäisiin korkeilta hintapiikeiltä ja pienennettäisiin huomattavasti ihmiskunnan hiilijalanjälkeä. Painovoima on saatavilla kaikkialla, enää tarvitsee vain hyödyntää se.

Lähteet

Aneke, M. & Wang, M. (2016) Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. *Applied energy*. 179350–377.

ARES North America, 2022 a, GravityLine, [Verkkoaineisto], [Viitattu 7.9.2022] Saatavissa: https://aresnorthamerica.com/gravityline/

ARES North America, 2022 b, Nevada Project, [Verkkoaineisto], [Viitattu 8.9.2022] Saatavissa: https://aresnorthamerica.com/nevada-project/

Berrada, A. & Loudiyi, K. (2019) Gravity energy storage. St. Louis, Missouri: Elsevier.

Energy Vault Inc., 2022, [Verkkoaineisto], [Viitattu 4.10.2022], Saatavissa: https://www.energyvault.com/gravity

Fortum Oyj, 07.01.2019, Sähkönkulutus yksiössä, kaksiossa ja omakotitalossa, [Verkkoaineisto], [Viitattu: 29.8.2022], Saatavissa: https://yhdessa.fortum.fi/sahkonkulutus

Gravitricity Ltd., 2022 a, Projects, [Verkkoaineisto], [Viitattu 7.10.2022], Saatavissa: https://gravitricity.com/projects/

Gravitricity Ltd., 2022 b, Projects, [Verkkoaineisto], [Viitattu 8.10.2022], Saatavissa: https://gravitricity.com/technology/

Guney, M. S. & Tepe, Y. (2017) Classification and assessment of energy storage systems. Renewable & sustainable energy reviews. 751187–1197.

Hatakka, J & Saari, H & Sirviö, J & Viiri, J. (2005) *Physica. 4, Liikkeen lait*. Helsinki: WSOY.

Heindl Energy GmbH, 2022 a, Basic Concept, [Verkkoaineisto], [Viitattu 6.10.2022], Saatavissa: https://heindl-energy.com/technical-concept/basic-concept/

Heindl Energy GmbH, 2022 b, About Us, [Verkkoaineisto], [Viitattu 7.10.2022], Saatavissa: https://heindl-energy.com/technical-concept/

Heindl Energy GmbH, 2022 c, About Us, [Verkkoaineisto], [Viitattu 7.10.2022], Saatavissa: https://heindl-energy.com/technical-concept/engineering-challenges/

Hunt, J. D. et al. (2022) Lift Energy Storage Technology: A solution for decentralized urban energy storage. Energy (Oxford). 254124102–.

Leino Harri, 3.9.2012, *Vain 800 metrin polku johdattaa tähän maisemaan: Haukkavuori, Rautjärvi*. [Blogi], [Viitattu 13.10.2022], Saatavissa: https://retkipaikka.fi/haukkavuori-rautjarvi/

LOAS (Lappeenrannan seudun opiskelija-asuntosäätiö), 14.5.2013, *Energiatodistus LOASin Seppo*, [Verkkoaineisto], [Viitattu 14.10.2022], Saatavissa: https://www.loas.fi/media/126/download?attachment

New Energy Let's go, 2022, Home, [Verkkoaineisto] [Viitattu: 7.10.2022] Saatavissa: https://n-e-l-g.de/

Pöyry H. & Isomäki O, 14.10.1992, *Telkkälän malmin louhinta*, [Verkkoaineisto], Saatavissa: https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/001_3134_hop_opi_92.pdf

Rehman, S. et al. (2015) Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable & sustainable energy reviews*. 44586–598.

Rissanen J. & Räsänen J., 3.7.2018, Kaivostutkijat, *Telkkälän kaivos*, [Blogi], [Viitattu 14.10.2022], Saatavissa: https://kaivostutkijat.blogaaja.fi/telkkalan-kaivos/

Schönberg K. & Savolainen M., 20.7.2020, *Mies lähetti kaivosyhtiölle kivinäytteen pihapiiristään ja osti palkkiorahoilla mopon – talo meni alta, kun kaivos lopulta rakennettiin*, [Verkkoaineisto], [Viitattu 14.10.2022], Saatavissa: https://yle.fi/uutiset/3-11454097

Sterner, M. & Stadler, I. (2019) *Handbook of Energy Storage Demand, Technologies, Integration*. 1st ed. 2019. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Sullivan, S. et al. (2016) 'Advanced Rail Energy Storage: Green Energy Storage for Green Energy', *Storing Energy - With Special Reference to Renewable Energy Sources*. Elsevier. pp. 69–86.

Suomen Luonnnonsuojeluliitto, n.d., Etelä-Karajalan luonto, [Verkkoaineisto] [Viitattu 13.10.2022] Saatavissa: https://www.sll.fi/etela-karjala/etela-karjalan-luonto/

Webasto SE, 27.10.2022, Valintataulukko eri automerkeille, [Verkkoaineisto] [Viitattu 3.11.2022] Saatavilla: https://webastolataus.fi/autot/