

Eeva Sivula

## **HIILINEUTRAALIN ENERGIAN VARASTOINTI**

Power-to-X ja muut sovellukset

# **HIILINEUTRAALIN ENERGIAN VARASTOINTI**

Power-to-X ja muut sovellukset

Eeva Sivula  
Opinnäytetyö  
Syksy 2019  
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma

---

Tekijä: Eeva Sivula

Opinnäytetyön nimi: Hiilineutraalin energian varastointi

Title of thesis: Carbon Neutral Energy Storage

Työn ohjaaja: Veli-Matti Mäkelä

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2019

Sivumäärä: 25

---

Opinnäytetyö tehtiin osana SMARTrenew-hanketta, jossa Oulun ammattikorkeakoulu on yhteistyökumppanina. Hankkeessa pyritään parantamaan pohjoisten haja-asutusalueiden energiavarmuutta uusiutuvan energian, energianvarastoinnin ja älykkäiden energiaratkaisujen keinoin kartoittamalla ja jakamalla hankepartnereiden tietotaitoa ja hyviä käytäntöjä aiheeseen liittyen. Tämän työn tarkoituksena oli koota jo olemassa olevia ja kehitteillä olevia tekniikoita. Kirjallisuuskatsauksessa esitellään hiilineutraaleja energiantuotantotapoja, joilla voidaan vaikuttaa ilmaston lämpenemiseen.

Power-to-x-menetelmä perustuu aurinko- tai tuulienergian varastointiin kemiallisiin sidoksiin. Soletair ja Lappeenrannan teknillisen korkeakoulu ovat kehittäneet kokeellisen pilottilaitoksen, jolla pystytään hyödyntämään teollisuudesta muodostuvien savukaasujen hiilidioksidipäästöjä. Tekniikalla tuotettujen polttoaineiden etuna on hiilen kiertokulun jatkaminen eli tuotettuun polttoaineeseen käytetään jo ilmakehässä olevaa hiiltä. Tällä tekniikalla pystytään tuottamaan muun muassa metaania, metanolia, dimetyylieetteriä sekä ammoniakkaa, joita voidaan käyttää liikenteen polttoaineena, voimalaitosten energianlähteenä sekä kemianprosesseissa.

Energian kulutuksesta syntyvien päästöjen määrästä yksi neljännes muodostuu kiinteistöjen lämmityksestä. Suomessa jo toiminnassa olevien maalämpökaivojen käyttö on osoittautunut hyväksi ja toimivaksi järjestelmäksi. Jotta maalämpöjärjestelmää pystytään hyödyntämään tehokkaammin, on kehitelty entistä tehokkaampia menetelmiä. Nykyiset käytössä olevat järjestelmät vaativat varsinkin isoille kiinteistökomplekseille lämpökaivokentän, jotta riittävä lämpöteho saadaan koko kiinteistölle. Uudella QHeatin kehitteillä olevalla syvälämpöjärjestelmän yhdellä kaivolla voidaan lämmitellä jopa 10 000 kerrosneliötä. Koekaivaukset suoritetaan Espoon Koskelan tehdasalueella. Keski-Euroopassa sekä Tanskassa ja Ruotsissa on käytössä lämpöenergian varastointijärjestelmistä (TES) erilaisia variaatioita, joilla lämmitetty vesi varastoidaan joko kokonaan tai osittain maaperään. Kiinteistöjen lämmitystekniikoiden kehitys kohti hiilineutraalia ilmastoa on jo hyvässä vauhdissa. Suurimpana energiankuluttajana on teollisuus, johon Power-to-X -tekniikalla pystyttäisiin vaikuttamaan.

---

Asiasanat: Power-to-X, hiilineutraali, maalämpö

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	3
SISÄLLYS.....	4
1 JOHDANTO.....	5
2 POWER-TO-X.....	6
3 SOLETAIR.....	8
3.1 Uusiutuva energia.....	9
3.2 Vetytuotanto.....	9
3.3 Suora ilman talteenotto (DAC).....	10
3.4 Hiili-vetynteesi.....	11
4 KAUSILÄMPÖENERGIAN VARASTOINTIJÄRJESTEMÄT.....	13
4.1 Vesi täyteaineena (TTES ja PTES).....	14
4.2 Vesi-soratäyteaineena (WGTES).....	15
4.3 Paineistetun lämpöenergian varastointi (CHEST).....	15
5 UUSIUTUVAN ENERGIAN KOKEELLISIA LAITOKSIA.....	18
5.1 Power-to-gas.....	18
5.1.1 Siemens.....	18
5.1.2 Wombat.....	19
5.1.3 Wärtsilä, LUT-yliopisto ja NPPD.....	20
5.2 Kausilämpöenergian varastointi - QHeat.....	21
6 YHTEENVETO.....	24
LÄHTEET.....	25

# 1 JOHDANTO

Euroopan unionin maat ovat sitoutuneet vuoden 2015 Pariisin ilmastosopimuksen mukaisesti pienentämään energiantuotannosta syntyviä päästöjä. Ilmastosopimuksen tavoitteena on hillitä ilmaston lämpenemistä ja kehittää toimia joilla lämpeneminen saataisiin rajattua alle 1,5 asteeseen. Uusilla energiantuotantomenetelmillä pyritään kasvihuonekaasujen päästömääriä hillitsemään ja näin pitämään ne mahdollisimman alhaisella tasolla. Ilmastosopimuksen tavoitteena on, että vuoden 2050 jälkeen päästöt ja hiilinielut saavuttaisivat tasapainotilan. (1.)

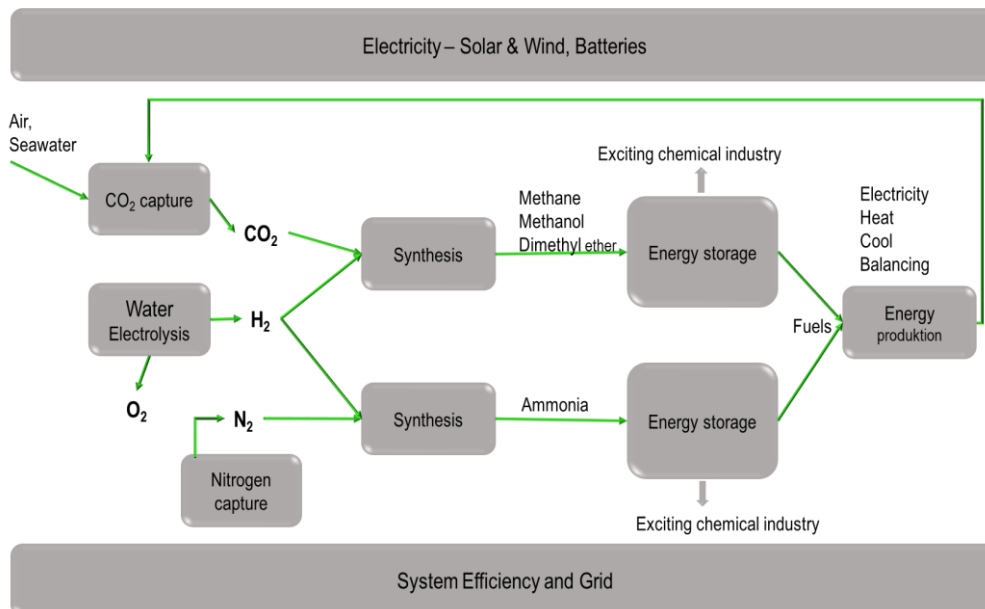
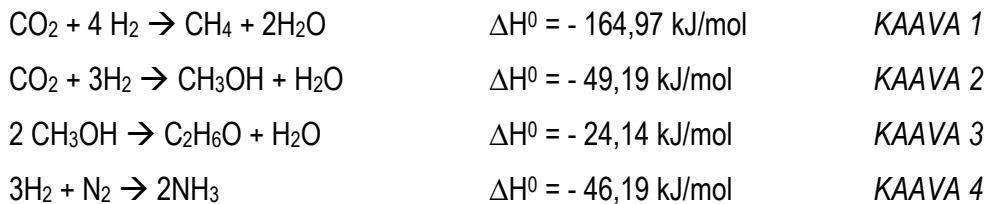
Opinnäytetyö tehtiin osana SMARTrenew-hanketta, jossa pyritään parantamaan pohjoisten haja-asutusalueiden energiavarmuutta uusiutuvan energian, energian varastoinnin ja älykkäiden energiaratkaisujen keinoin. Hankkeen tarkoituksena on yhdistää jo olemassa olevaa tietoa ja hyödyntää hankkeen partnereiden tietotaitoa. Hankkeessa on toimijoita Suomesta, Irlannista, Pohjois-Irlannista, Islannista, Färsearilta ja Norjasta. Tämä opinnäytetyö käsittelee hiilivapaata energiantuotantoa, jossa hyödynnetään aurinkoenergiaa, hiilidioksidia ja vetyä. Työn tarkoituksena on selvittää mahdollisuuksia auringosta saatavan energian varastointiin talven varalle. Kun sähkön suora varastointi on mahdotonta, saatu energia on varastoitava muita keinoja käyttäen. Nämä mahdolliset keinot ovat erilaisten kemiallisten reaktioiden muodostaminen.

Työ on kirjallisuuskatsaus, joka keskittyy Power-to-X-projektiin ja sen mahdollistaviin vaihtoehtoihin hillitä maapallon kasvihuonekaasujen tuottoa. Power-to-X -projektin tarkoituksena on tuottaa energia hiilidioksidivapaasti eli sitomalla jo ilmassa oleva hiili uusiokäyttöön. Pääpiirteissään prosessissa aurinkoenergialla vedestä elektrolyysin avulla saadaan vetykaasua ja happea. Elektrolyysistä saatu vetykaasu syntetisoidaan hiilidioksidin kanssa, jolloin saadaan tuotettua metanolia. Kun ilmakehästä saatavaa tyyppiä syntetisoidaan vedyn kanssa, saadaan ammoniakkaa. Näitä saatuja polttoaineita voidaan käyttää esimerkiksi lämmöntuotannossa, jäähdytyksessä sekä sähköntuotannossa.

Auringosta ja maaperästä saatava päästövapaata lämpöenergiaa pystytään jo nykytekniikalla varastoimaan ”keruualtaisiin”, jotka ovat osittain tai kokonaan maanalaisia. Tässä työssä selvitetään myös näiden vaihtoehtoisten energian varastointimenetelmien periaatteita ja kehitteillä olevia laitteita.

## 2 POWER-TO-X

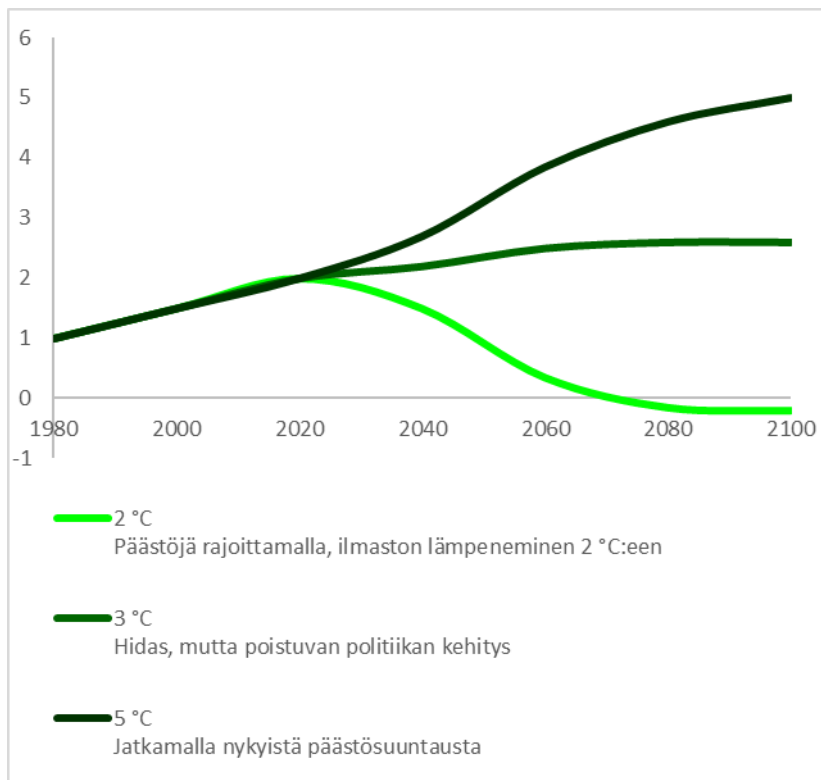
Power-to-X-tekniikan tavoitteena on valmistaa hiilivapaata energiaa käyttäen ilmasta saatavaa hiilidioksidia, typpeä sekä vedestä saatavaa vetyä. Näiden raaka-aineiden ja aurinkoenergian välillä synteetillä pystytään tuottamaan fossiilisia polttoaineita korvaavia polttoaineita. Tekniikan perustana on varastoida auringosta saatavaa energiaa kemiallisiin reaktiotuotteisiin. Synteettisesti valmistettua metaania, metanolia ja dimetyylieetteriä voidaan käyttää energiantuotannon polttoaineina. Hiili-vety-yhdisteiden lisäksi tuotettua ammoniakkia voidaan hyödyntää kemianteollisuudessa. (kuva 1.) (2.) Power-to-X-tekniikan tavoitteena on luoda yhdisteitä, joiden reaktiot ovat endotermisiä eli reaktioon sitoutuu energiaa. Kaavojen 1–4 mukaisesti kemiallisiin sidoksiin varastoitu energia saadaan vapautettua käyttökohteen mukaan kemiallisessa reaktiossa, jossa tuotettu yhdiste on lähtöaineena.



KUVA 1. LUT:n ja VTT:n kehittämä menetelmä hiilidioksidin talteenottotekniikasta ja kemiallisista synteeseistä

Lappeenrannan yliopisto (LUT) ja Turun yliopiston Suomen tulevaisuuden tutkimuskeskus (FFRC) yhteistyössä VTT:n kanssa perustivat nelivuotisen tutkimushankkeen vuonna 2014, NeoCarbon Energy Project, jonka tarkoituksena oli tutkia ja kehittää prosessi synteettisten polttoaineiden tuotantoon.

Energian tuotantoon liittyvien kasvihuonekaasujen vähennyspyrkimyksistä huolimatta, vuotuiset päästöt ovat kaksinkertaistuneet 1970-luvulta lähtien. Fossiilisten polttoaineiden määrä globaalista energiankäytöstä on 80 %, jolla se oli jo 1990-luvulla. Nykyiset sitoumukset vaativat EU:ta rakentamaan päästövapaan energiajärjestelmän valmiiksi vuoteen 2050 mennessä. Uusiutuvan energiajärjestelmän avulla voidaan rajoittaa ilmaston vuotuisen lämpeneminen 2 °C:seen (kuva 2). (3; 4; 5.)

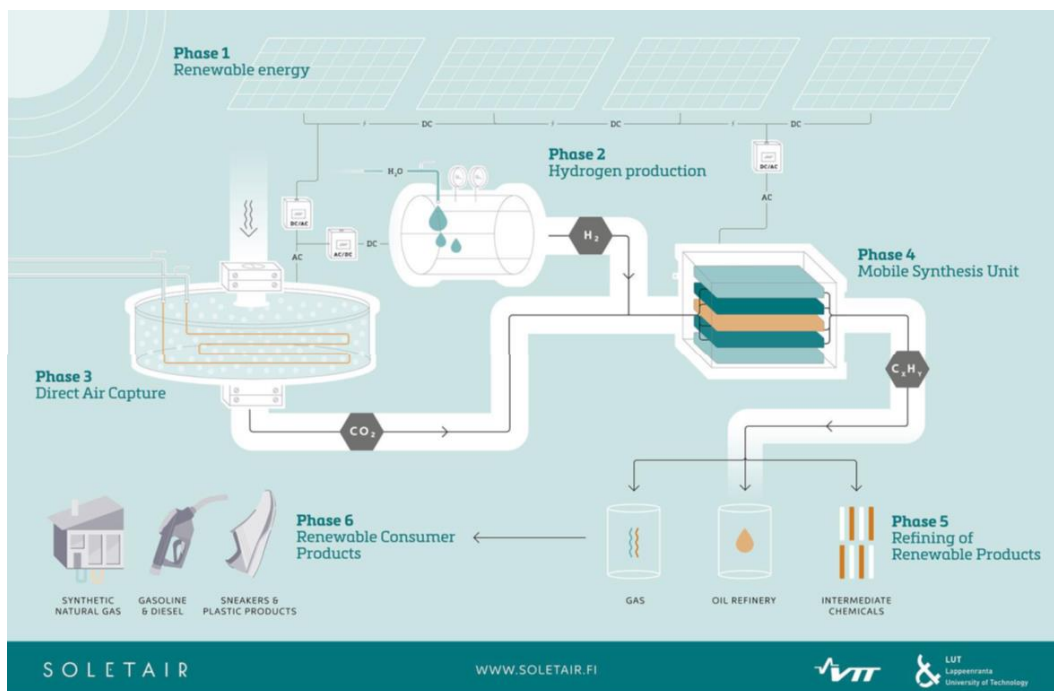


KUVA 2. NeoCarbon Energy-projektin tulevaisuuden arviot ilmaston lämpenemisestä. (4.)

### 3 SOLETAIR

Soletair on Lappeenrannan yliopiston (LUT) ja valtion tutkimuslaitoksen (VTT) yhteishanke. He ovat yhteistyönä kehittäneet Power-to-X -pilottitehtaan, joka kykenee tuottamaan hiilivetyjä ilmasta ja vedestä käyttäen aurinkoenergiaa energialähteenä (kuva 3.). Pilottitehtaan tuotteilla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita sekä hyödyntää kemianprosesseissa

Pilottilaitoksessa raaka-aineina käytettävä hiilidioksidi on erotettu ilmasta. Tarvittava vety irrotetaan vesimolekyylistä elektrolyysillä, johon kuluva energia saadaan aurinkoenergiasta. Lopuksi hiilidioksidi ja vety yhdistetään hiilivedyiksi synteesisreaktorissa, korkeassa paineessa ja lämpötilassa. Pilottitehdas koostuu aurinkopaneeleista sekä kolmesta liikuteltavasta säiliöyksiköstä. Säiliöyksiköitä ovat vetytuotannon elektrolysaattori, hiilidioksidin talteenotto ja tehostetut synteesisreaktorit hiilivedyjen tuotantoon. (6.)

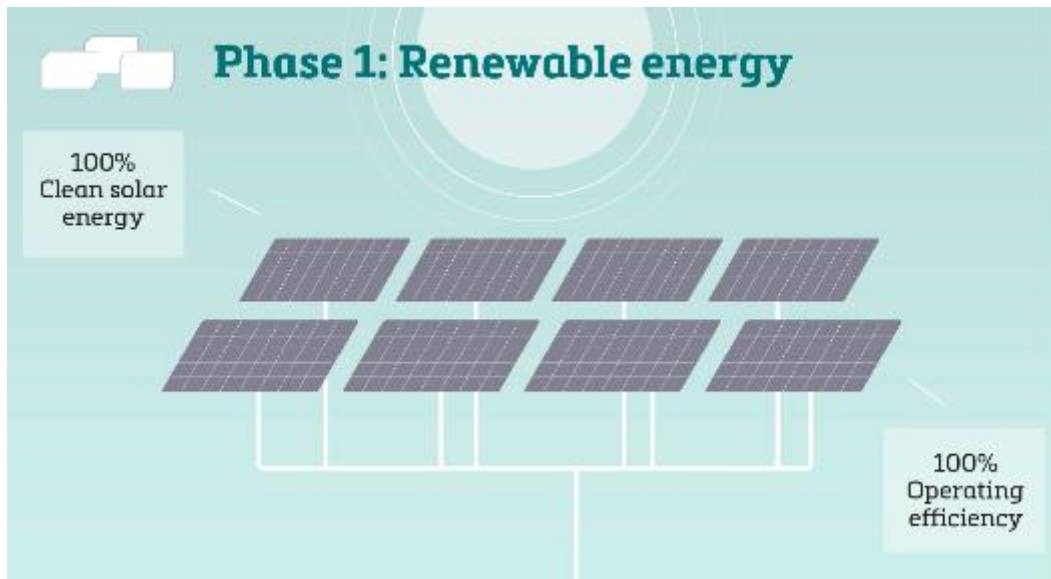


KUVA 3. Soletairin kehittämän prosessin prosessikaavio (6)



### 3.1 Uusiutuva energia

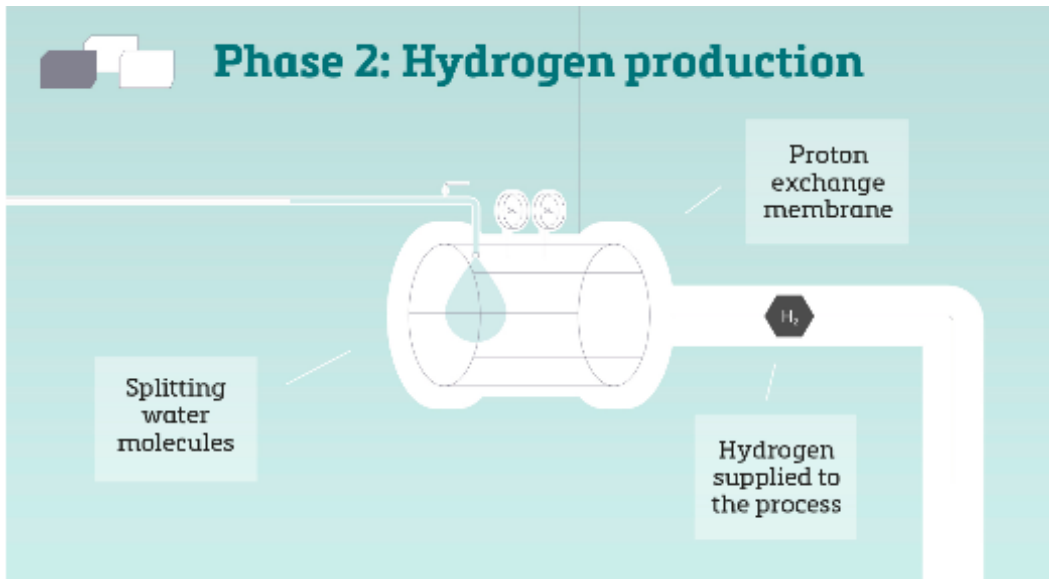
Soletair-tuotantojärjestelmän energialähteenä käytetään aurinkosähköä, jota tarvitaan eniten vetyyksikölle. Aurinkosähkön tuotantolaitos koostuu useammalla tavalla asennetuista aurinkokeräimistä. Kokoonpano sisältää seiniin ja katoille asennettuja aurinkokeräimiä sekä auringon valoa seuraavia 2-aksiaalisia ja manuaalisesti suunnattaviin aurinkokeräinyksiköihin. Asennettujen paneelien kokonaisteho on 206,5 kWp. Järjestelmän kaikki paneelit on asennettu 15°:n kaltevuuteen. Paneelien kokonaispinta-ala on noin 1500 m<sup>2</sup>, ja se sisältää yhteensä 827 paneelia. (7.)



KUVA 4. Soletair käyttää energialähteenään aurinkosähköä (7)

### 3.2 Vetytuotanto

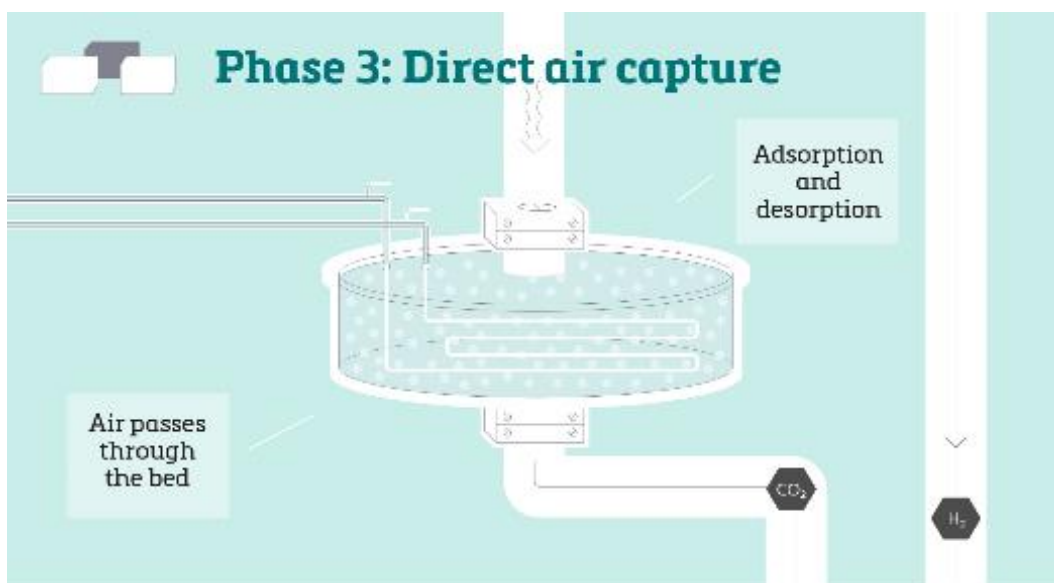
Laitoksessa vety tuotetaan elektrolyyysiprosessilla, jossa vesi paineistetaan protonin vaihtokalvolle. Kalvolla vesimolekyylit hajoaa, jolloin saadaan puhdasta vetykaasua sekä happea. Tuotettu vetykaasu voidaan varastoida säiliöihin tai käyttää prosessissa kierrätetyn hiilidioksidin kanssa uusiutuvien polttoaineiden ja kemikaalien tuotantoon (kuva 5). Vetykaasua voidaan myös käyttää kemiallisen energian varastointiin ja muuttaa sähköksi polttokennoissa. Polttokennojen käytössä on kuitenkin suuri energian muuntohäviö, joten se ei ole kovin kannattavaa. (7.)



KUVA 5. Vetyä tuotetaan elektrolyysiprosessilla (7)

### 3.3 Suora ilman talteenotto (DAC)

Prosessin hiililähteenä toimii ilma. Menetelmässä kerätään ilmassa oleva sitoutunut hiili adsorptio/desorptiomenetelmällä, jossa käytetään kiinteitä amiinisorbentteja, joka on esitelty kuvassa 6. Suorassa ilmanottoyksikössä käytetyt sorbentit ovat amiinifunktionalisoituja pallostyreenihelmiä. Menetelmä toimii siten että kerätty ilma johdetaan patjarakenteeseen, jossa hiilidioksidi reagoi hartsisissa olevan amiinin kanssa ja vesi adsorboituu. Ilman  $N_2$  ja  $O_2$  kulkevat hartsipatjan lävitse imeytymättä. (7.)



KUVA 6. Hiilidioksidikaappari kerää ilmassa olevan  $CO_2$ :n talteen (7)

Kiinnittyneet hiilidioksidimolekyylit poistetaan patjasta tyhjiön ja kuumennuksen avulla. Tyhjiön avulla saadaan patjassa oleva ylimääräinen ilma poistettua, jolloin jäljelle jää vain kiinnittynyt hiilidioksidi ja vesi. Desorption aikaansaamiseksi hartsipatjaa kuumennetaan 80 °C:seen, jolloin kiinnittyneet CO<sub>2</sub>- ja H<sub>2</sub>O-molekyylit irtoavat ja ne voidaan kerätä talteen. CO<sub>2</sub>:n talteen saamista tehostetaan patjan imuroinnilla. Kiinnittyneet vesimolekyylit poistetaan ilmajäähdytteisen lämmönsiirtimen kautta. Soletairin käyttämä ilmanottojärjestelmä on modulaarinen, joten se on helppo liittää osana Power-to-X systeemiin ja sen suunniteltu tuotantomäärä hiilidioksidia on 3800 g/päivä.

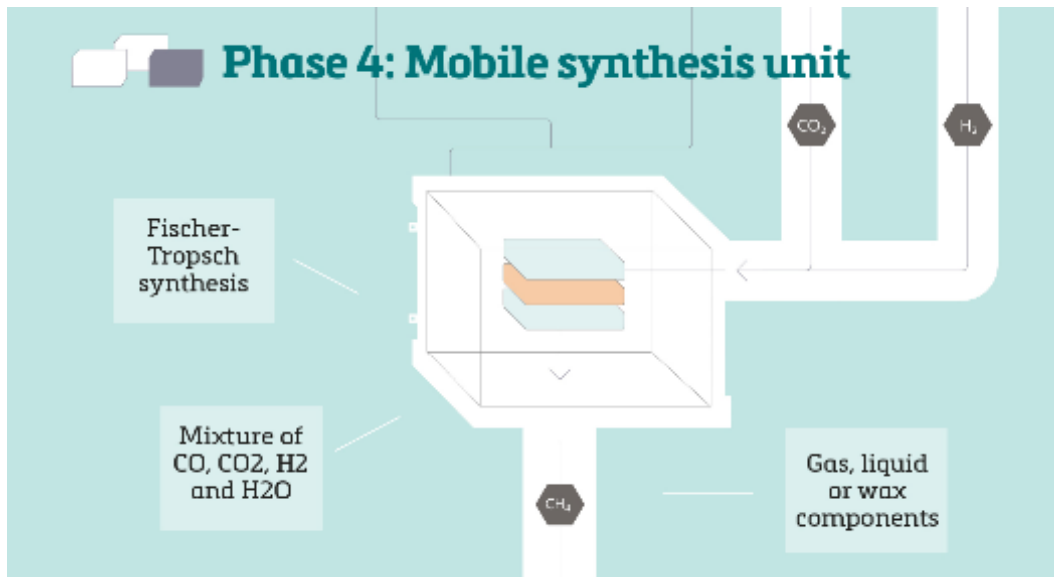
### 3.4 Hiili-vetysynteesi

Fisher-Tropsch-synteesi tuottaa fossiilisten polttoaineita korvaavia nesteitä ja kaasuja sekä vahakomponentteja kaavan 1 mukaisesti. Tällä hetkellä Soletair toimii kahdella linjalla ja linjat on räätälöity joko maakaasun tai neste- ja vahakomponenttien tuotantoon. Synteettistä maakaasua eli metaania tuotetaan CO<sub>2</sub>:sta ja H<sub>2</sub>:stä Sabatier-reaktiolla, kuvan 7 mukaisessa yksikössä. Sabatier-reaktiossa hiilidioksidi ja vety muutetaan korkean lämpötilan ja nikkelikatalyytin avulla metaaniksi ja vedeksi. (7.)



$$\Delta H^0 = -164,97 \text{ kJ/mol}$$

KAAVA 1



KUVA 7. Fisher-Tropsch-synteesissä tapahtuva Sabatier-reaktio (7)

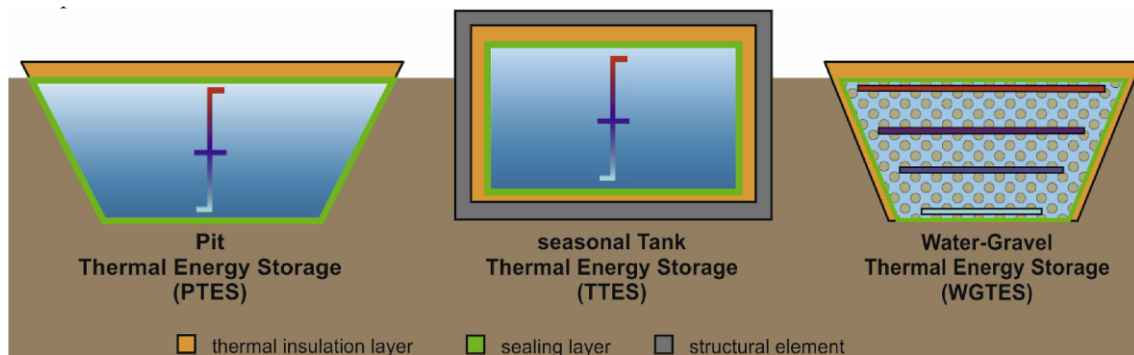
Synteesi jakautuu kahteen päävaiheeseen. Ensin hiilidioksidi muutetaan hiilimonoksidiksi (CO) vesikaasuvaihtoreaktiolla (rWGS), jossa CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> ja H<sub>2</sub>O:n kaasuseos tasapainotetaan 800 °C:n lämpötilassa jalometallikatalyytin avulla. Reaktio tapahtuu samassa paineessa kuin Fischer-Tropsch-synteesi, jolla vältetään paine-ero prosessivaiheiden välillä. Toisessa vaiheessa muodostuneet hiilimonoksidi ja vety reagoivat keskenään Fisher-Tropsch-reaktorissa muodostaen metaania. Kehitetyllä reaktiolla pystytään tuottamaan laaja valikoima tuotteita kevyistä hiilikaasuista nestemäisiin komponentteihin. Prosessin tuotteilla voidaan korvata aiemmin fossiililla raaka-aineilla tuotettuja komponentteja esimerkiksi dieselin ja kiinteämpien vahakomponentteihin valmistukseen.

(7.)

## 4 KAUSILÄMPÖENERGIAN VARASTOINTIJÄRJESTEMÄT

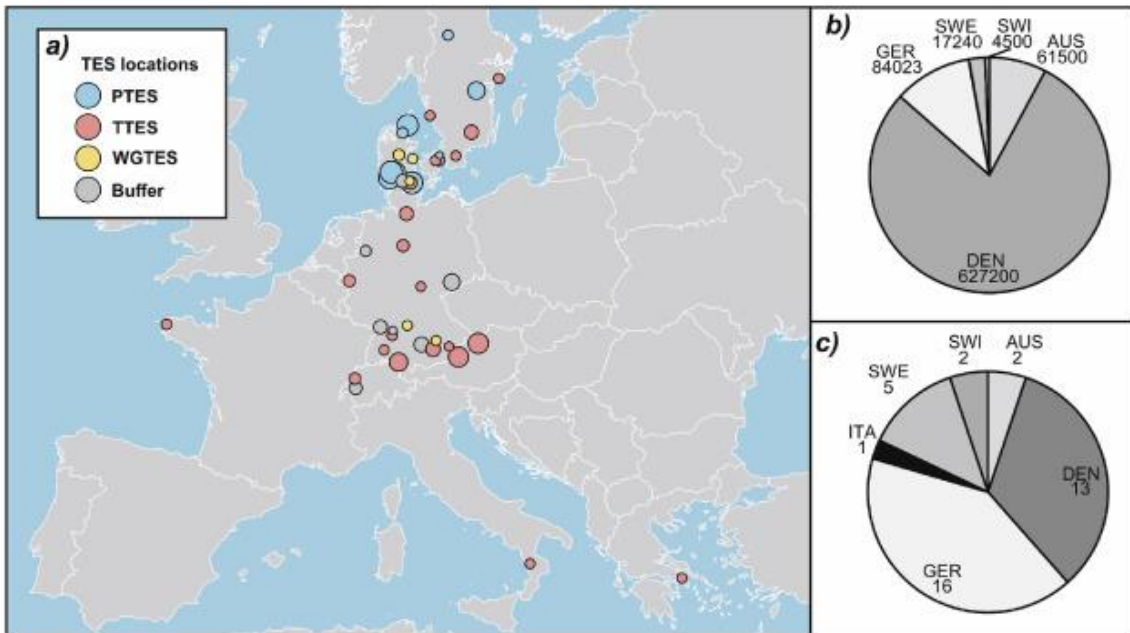
Nykyään maailmanlaajuisesti tilojen lämmitys ja lämpimän käyttöveden tuotanto ovat suurimpia fossiilisten polttoaineiden kulutuskohteita. Lämpöenergian varastointijärjestelmät (TES) tarjoavat mahdollisuuden kerätä lämpöenergiaa talteen ja käyttää sitä fossiilisten polttoaineiden korvaajana.

Tunnetuimpia kausiluoteisten TES-varianttityyppejä ovat vesikerrosvarastot (ATES), porausreiän varastot (BTES), luolavarastot (CTES), kaivovarastot (PTES) ja kausittaisen lämmön varastot (TTES). ATES, BTES ja CTES ovat geometrisiä sovelluksia, joissa käytetään luonnollista maaperää. Suljettujen kausittaisen TES-tekniikoiden etuna on niiden sijoittaminen lähelle lämmityskohdetta. Suljetut tekniikat jaetaan vesipohjaiseen tekniikkaan ja monikomponenttiseen täytemateriaalia käyttävään tekniikkaan (kuva 8). Ainoastaan täysin vesipohjaisia tekniikoita ovat TTES tai PTES. Nämä rakennelmat ovat joko rakennettuja altaita, jotka ovat osittain tai kokonaan irrallaan maaperästä tai suljettuja vesitäytteisiä kaivoja (PTES), joissa ei ole erillisiä mekanismeja lämmön vakauttamiseksi. Kaikki sovellukset, joissa on monikomponenttinen täyttömateriaali, luokitellaan vesi-sora-lämpöenergian varastointijärjestelmiksi (WGTES).



KUVA 8 Suljetut kausiluonteiset lämmönvarastointijärjestelmät (8)

Vuonna 1978 Ruotsin Studsvikiin rakennettiin ensimmäinen suljettu 800 m<sup>3</sup>:n lämpöenergian varastointijärjestelmä PTES, Pitt thermal Energy Storage. Myöhemmin Saksan Stuttgartiin ja Sveitsin Vaulruziin rakennettiin WGTES-varastoita. Kuvan 9 mukaisesti kausittaisen lämpöenergian varastointipaikkojen jakauma vaihtelee maantieteellisesti Euroopassa. Varastointia käytetään pääosin Ruotsissa, Tanskassa ja Saksassa sekä Itävallassa. (8.)



KUVA 9. a) Kausittaiset lämpöenergiavarastot Euroopassa, b) Maakohtaisesti tilavuudet (m<sup>3</sup>) c) Asennetut varastot lukumäärinä (8)

Tanskassa varastointitilavuudet ovat suurimpia, kun taas lämpöenergiavarastoja lukumäärällisesti on Saksassa saman verran. Etelä-Saksan lämpövarastot ovat pääosin kausittaisen lämpöenergian varastoja. Tanskan varastot ovat pääosin kaivorakenteisia.

#### 4.1 Vesi täyteaineena (TTES ja PTES)

TTES ja PTES ovat lämpöenergiavarastointitekniikoita, jotka ovat joko kokonaan tai osittain maanalainen tuettu rakennelma. Vesitäytteisten varastoiden täyteaineen etuja ovat sen luonnollisuus, vaarattomuus ja sitä on saatavilla lähes kaikkialta. Veden termodynaamisten ominaisuuksien vuoksi vesi on parempi täyteaine kuin vesi-soratäyte. Lämpötila-alueella 0 °C – 100 °C veden varastointikapasiteetti on noin 1,16 kWh/m<sup>3</sup>K (4,18 MJ/m<sup>3</sup>K) ja maaperän tai sorapedillä, jonka huokoisuus on 45 %, 0,33 kWh/m<sup>3</sup>K (1,2 MJ/m<sup>3</sup>K). Lämpötila-alueella 35 °C – 60 °C:n varastointikapasiteetit ovat vedelle 60–80 kWh/m<sup>3</sup>, maa-ainekselle 15–30 kWh/m<sup>3</sup> ja sora-vesiseokselle 30–50 kWh/m<sup>3</sup>. Tästäkin syystä vesi on paras lämmön varastoija. TTES- ja PTES-varastoissa vesi toimii varastointivälineenä ja lämmönvarastojana, kun taas WGTES vaatii lämmönsiirtimen, jolla pystytään hallitsemaan tasaista lämmönsiirtoa vesi-soramatriisissa. (8.)

## 4.2 Vesi-soratäyteaineena (WGTES)

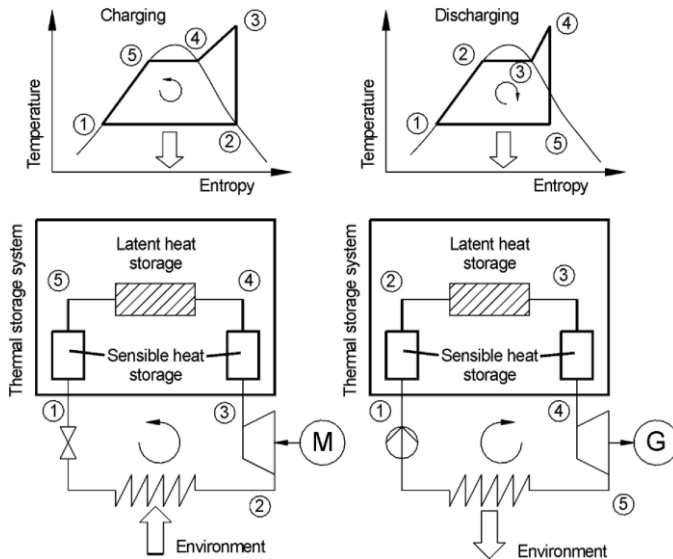
Vesi-soratäytteellä (WGTES) oleva varasto koostuu kiinteästä ja nestemäisestä faasista. Kiinteä faasi koostuu hiekasta, sorasta tai näiden erilaisia seoksista. Täyteaineena käytettävän maa-aineen homogeenisuus mahdollistaa korkeamman vesipitoisuuden ja sitä kautta paremman varastointikapasiteetin kuin lajittelemattoman maa-aineksen käyttö. Vesi-soraseos koostuu karkeasta sorasta, jonka keskimääräinen halkaisija on 16–32 mm. Huokoisuudella 0,43 kaksifaasijärjestelmän keskimääräinen tiheys on  $1,928 \text{ kg/m}^3$  ja lämpökapasiteetti  $0,83 \text{ kWh/m}^3\text{K}$  ( $2,98 \text{ J/m}^3\text{K}$ ). Lämmönjohtavuus oli  $2,4 \text{ W/mK}$ , mikä on neljä kertaa suurempi kuin veden lämmönjohtavuus ( $0,6 \text{ W/mK}$ ). WGTES:n lämpökapasiteetti on alhaisempi kuin vesitäyteen järjestelmän, mikä johtuu sora- tai maaperäosista. WGTES:n ja vesitäyteen järjestelmien (TTES, PTES) vertailu voidaan tehdä veden ekvivalenteilla. WGTES:ssä käytetty sora vähentää veden määrää, mutta samalla myötävaikuttaa järjestelmään omalla lämpökapasiteetilla. Varastointikapasiteetin vertaamiseksi laitteisiin, jotka on täytetty vain vedellä, syntyvä lämpökapasiteetti ilmaistaan vesi ekvivalenttimäärinä. Esimerkiksi Stuttgartin  $1\,050 \text{ m}^3$ :n WGTES-varasto sisältää  $355 \text{ m}^3$  vettä ja  $960 \text{ m}^3$  soraa, samaa kapasiteettia vastaava TTES:n tai PTES:n vesitilavuus on  $725 \text{ m}^3$ . (8.)

Vaikka WGTES:n lämmön varastointikapasiteetti on heikompi kuin vesitäyteen, sen rakenne tarjoaa sijoitettavuudellaan etuja. Ne voidaan asentaa pintaan itsekantavina ja kuormittavina kappaleina, minkä takia seinien ei tarvitse olla kantavia ja kattorakenteen ei tarvitse olla niin monimutkainen kuin vesitäyteen varastoissa. WGTES rakenteen ansioista se sallii yläpinnan käytön esimerkiksi pihapiirin leikkipaikkoihin, ja sen takia ne ovat suositeltavia alueille, joilla asukasluku on tiheämpi. Rakenteen huollon kannalta kuitenkin on suotavaa, että varasto on sijoitettu esimerkiksi puutarhaan tai muulle avonaiselle piha-alueelle. Järjestelmän etuna on myös sisään rakennettu lämmönsiirrin, joka voidaan integroida suoraan lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmään. (8.)

## 4.3 Paineistetun lämpöenergian varastointi (CHEST)

CHEST (Compressed Heat Energy Storage) on yksi PTES-variaatio, jossa käytetään vettä tai muuta orgaanista väliainetta lämmön siirtämiseksi lämmönvarastointiyksikköön. Tässä menetelmässä energianlähteinä ovat maakuoren sisäinen lämpö, tuulivoima sekä aurinkoenergia. CHEST:llä energian varastointi tehdään veden eri olomuotoja hyödyntäen. Maaperästä kerätty lämmin

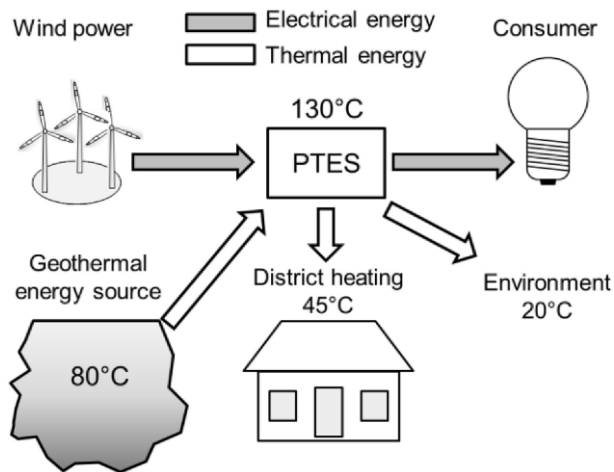
vesi paineistetaan lämpöpumpulla varastosäiliöön. Menetelmä perustuu mekaanisen energian välivarastointiin, joka tarjoaa korkean varastointitehokkuuden, mutta pienen varastointitiheyden. Varastointiprosessissa hyödynnetään veden ominaisuuksia (kuva 10.). Lämpöpumpun aiheuttama paineen nousu nostaa höyryn lämpötilan haluttuun varastointilämpötilaan (350–400 °C, 100 bar). Lämpöpumpun tarvitsema sähköenergia saadaan tuulivoimasta tai aurinkosähköstä. Purkuvaiheessa varastoitu höyry puretaan turbiinille, josta generaattori muuntaa lämpöenergian sähköksi.



KUVA 10 T-s-kaavio ja CHEST- kaavio perustoiminnasta; latausprosessi (vas) ja purkuprosessi (oik)

Turbiinista poistuvan lauhteen lämpötila on riittävän korkea lämmittääkseen kaukolämpöverkossa kiertävää lämmitysvettä oikeaan lämpötilaan. Kuvassa 11 on esimerkki CHET-järjestelmästä alhaisen geotermisen energialähteen kanssa, jonka sähköenergia saadaan tuulivoimasta. Latauksen aikana geotermisen lämpö varastoidaan, kun sen lämpötila on nostettu lämpöpumpulla haluttuun lämpötilaan. Kuvassa 11 olevassa prosessissa lämpötila on 130 °C, joka on alhaisempi kuin ensisijaisesti sähkön varastointiin suunnitelluissa prosesseissa. Purkuvaiheessa varastoidusta energiasta saadaan lämpö- ja sähköenergiaa kulutuskohteille. (9.)





KUVA 11. PTES yhdistetyssä lämpö- ja sähköjärjestelmässä, joka käyttää geotermisen energialähteen lämpöä ja tuulivoimasta saatua sähköä

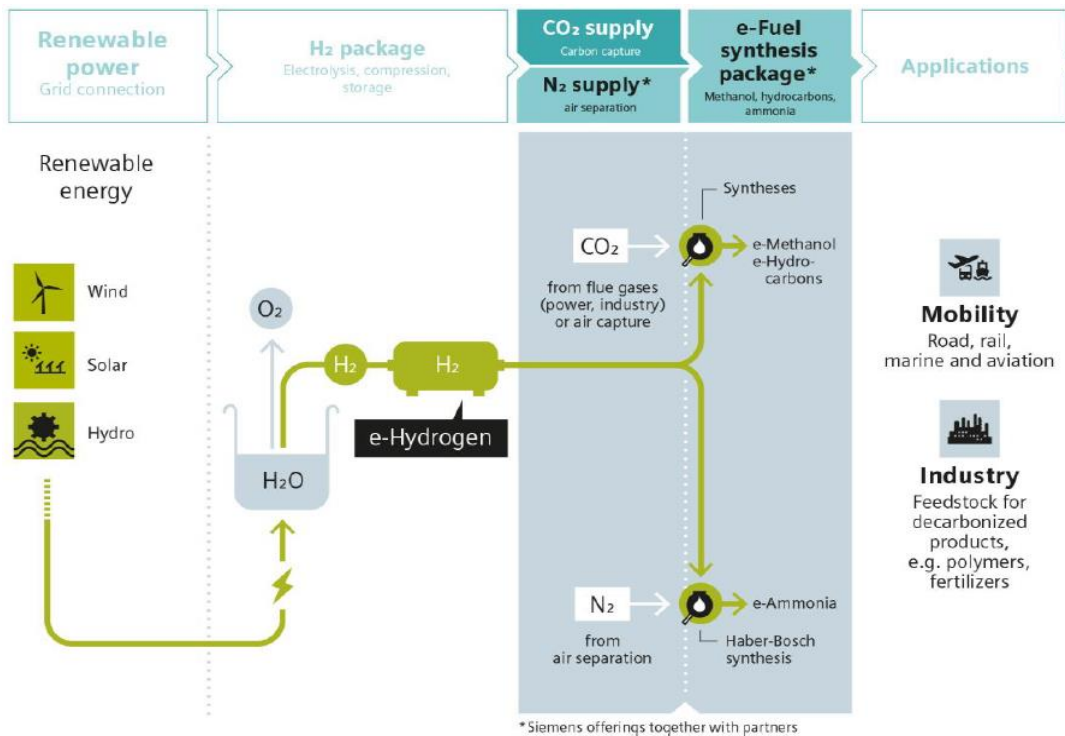
## 5 UUSIUTUVAN ENERGIAN KOKEELLISIA LAITOKSIA

### 5.1 Power-to-gas

#### 5.1.1 Siemens

Siemens on yksi suurimmista Power-to-X-moduulien tuottajista. Se tarjoaa yhteistyökumppaniensa kanssa asiakkailleen Power-to-X-menetelmän laitteet voimanlähteestä aina valmiin uusiutuvan polttoaineen tuotantolaitteistoihin saakka. Voimanlähteenä ovat tuuliturbiinit, aurinkokeräimet tai vesivoima. Vedyn tuotantolaitteistoon kuuluu elektrolysaattori ja vedyn välivarasto. Jos vety halutaan käyttää uudelleen sähkön tuotantoon, laitteistoon on saatavilla vedyn pidempiaikainen varastointimahdollisuus, vetykaasuturbiini, polttokenno sekä energian varastointijärjestelmä. Uusiutuvien polttoaineiden tuotantoon tarvittavan hiilen keräämiseen Siemens on kehittänyt ja patentoinut PostCap™-tekniikan, jolla savukaasuissa oleva hiilidioksidi kerätään talteen. Hiilidioksidin talteenotto tapahtuu absorboimalla savukaasussa oleva hiilidioksidi aminohapposuolaan. Tällä tekniikalla pystytään poistamaan jopa 90 prosenttia hiilidioksidin määrästä savukaasussa. Tähän patentoituun rakenteeseen kuuluu myös metanolin synteasilaitteistot (kuva 12).

Siemens pyrkii kehittämään tuotteitaan asiakastarpeiden mukaan ja siksi toimii ja kehittää laitteistoja tiiviissä yhteistyössä muiden toimijoiden kanssa. Tällä hetkellä Hassfurtin kaupungissa, Saksassa, on rakenteilla pilottitehdas, joka on tarkoitus saada käyntiin vuoteen 2021 mennessä. Tavoitteena on muuntaa jo tuotetun e-vedyn osat e-metanoliksi käyttäen uutta synteessimenetelmää. Järjestelmä toimii 1,25 megawatin elektrolysaattorilla. Tässä hankkeessa Siemensin kanssa yhteistyötä tekevät Münchenin teknillinen yliopisto ja Erlangen Nübergin yliopistot. Hankkeen rahoittajana toimii Saksan talous- ja energiaministeriö. Ammoniakkisynteesi vedystä ja typestä on kehitetty Haber-Bosch-prosessi, joka on ollut toiminnassa jo pidempään. (10.)



KUVA 12. Siemensin tarjoama Power-to-X-järjestelmä (10.)

### 5.1.2 Wombat

Saksa on yksi edelläkävijämaa uusiutuvan energian tuotannossa. Saksa tuotti 30 % sähköstään uusiutuvan energian avulla jo vuonna 2016. Tuotetusta sähköstä noin 50 GW koostui tuulienergiasta, noin 7 GW bioenergiasta ja 40 GW aurinkoenergiasta. Näiden tuotantotapojen haittana on kuitenkin alueellinen ja vuoden aikaan liittyvä saatavuus. Jotta energian saanti pystytään turvaamaan ympärivuotisesti ja laaja-alaisesti, energian varastointia alettiin kehittämään. Nykyisiä jakeluverkkoja, kuten lämpö-, sähkö- ja kaasuverkkoa, pystytään hyödyntämään uusiutuvan energian jakeluun. Power-to-Gas on yksi lähestymistapa, joka yhdistää energia- ja kaasusektorit molempiin suuntiin. Aiemmin suunta on ollut vain kaasusta energiaksi, mutta uudella menetelmällä suunta olisi myös päinvastainen eli sähköstä kaasuksi. Lounais-Saksassa Baden-Württembergissä on jo pitkään kehitelty Power-to-Gas-menetelmää, jossa energia varastoidaan vetyä tai metaanina. (11.)

Saksalainen projekti Wombat on ensimmäinen Power-to-gas (PtG) hanke, jossa tutkijat pyrkivät yhdistämään sähkö- ja kaasuverkon. Hankkeen tarkoituksena on hyödyntää uusiutuvista lähteistä syntyvä ylijäämä sähköenergia vedyn tuotantoon. Saatu vety syntetisoidaan hiilidioksidin kanssa

biokaasulaitoksessa, jolloin saadaan metaania. Saatu metaani pystytään hyödyntämään energiantuotannon polttoaineena. Projekti perustuu kaasulaitokseen, joka yhdistää sähkö- ja kaasuverkon elektrolyysin ja metaanin avulla. PtG-pilottitehdas Werlteessä on maailman ensimmäinen teollisuusmittakaavan sovellus.

Energie Speicher ja Pohjois-Saksan energiayhtiö EWE:n käynnistivät hankkeen Emslandissa sijaitsevalla biometaanilaitoksella. Vuonna 2011 uuden kaasulaitoksen rakentamisesta biometaanilaitoksen yhteyteen tehtiin päätös, jonka mukaan laitokselta tuleva hiilidioksidi hyödynnetään metaanin tuotantoon. Vuonna 2013 laitos aloitti säännöllisen toimintansa. Kuvassa 13 on tutkimushankkeen kaasutehdas, joka käyttää raaka-aineenaan biometaanilaitokselta syntyvää hiilidioksidia. Laitosten yhteistoiminta parantaa Power-to-Gas/biokaasulaitoksen kokonaistehokkuutta. (12.)



KUVA 13. WOMBAT-tutkimushankkeen e-kaasutehdas

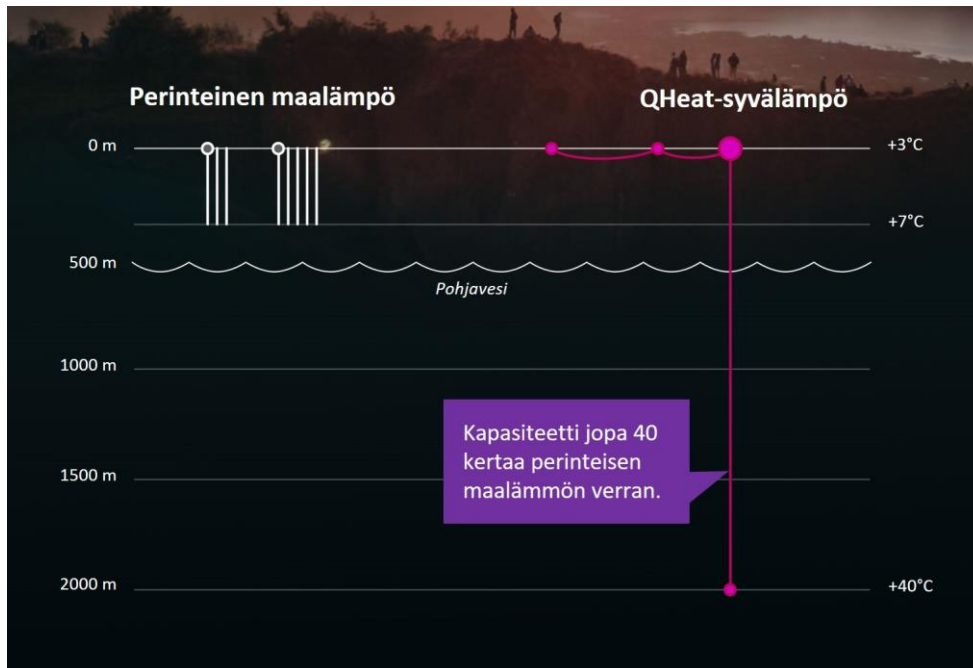
### 5.1.3 Wärtsilä, LUT-yliopisto ja NPPD

Wärtsilä, LUT-yliopisto ja Yhdysvaltojen Nebraskan osavaltion suurin sähköyhtiö NPPD (Nebraska Public Power District) ovat sopineet yhteistyöhankkeen synteettisten polttoaineiden käyttöä koskevan liiketoimintamallin kehittämiseksi. Hankkeessa tarkastellaan Wärtsilän moottoreiden kykyä polttaa eri polttoaineita. Testien perusteella pyritään osoittamaan, että on mahdollista muuttaa vety

metanoliksi hiilidioksidin avulla ja käyttää sitä polttoaineena sähköntuotannossa. Yhteistyö mahdollistaa NPPD:n teollisen mittakaavan pilottihankkeen, jossa hyödynnetään Wärtsilän kattavaa osaamista hiilivapaan energian tuotannossa. LUT-yliopiston kannalta yhteistyö on merkittävä Power to X-tekniikan kehittämisessä. (13.)

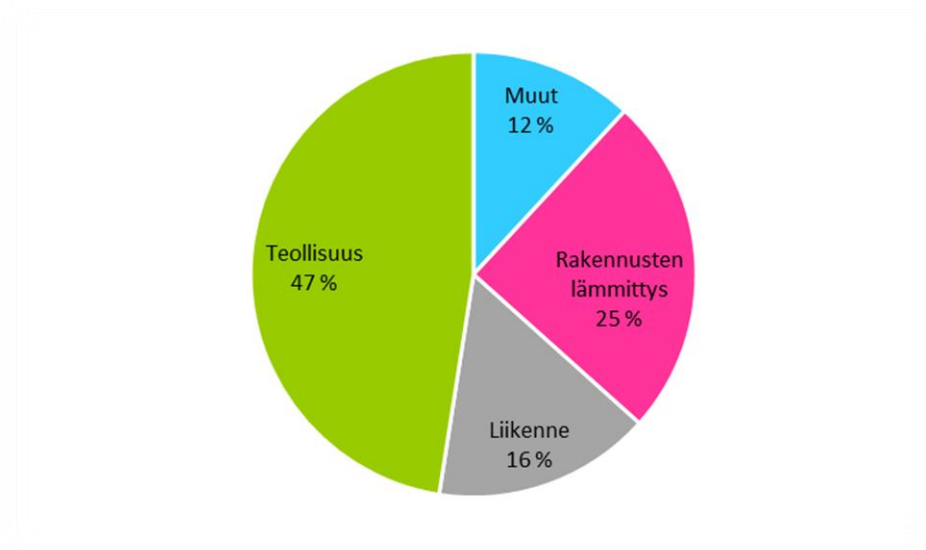
## 5.2 Kausilämpöenergian varastointi - QHeat

Quantitative Heat Oy eli QHeat on kahden energia- ja rakennusalan asiantuntijan vuonna 2018 perustama startup-yritys, joka on kehittänyt uuden QHeat-syvälämpöjärjestelmän. QHeat toteuttaa yhdessä NREP:n kanssa maailman ensimmäisen energiaa kausivarastoivan syvälämpökaivon Espooseen. NREP on vuonna 2005 perustettu pohjoismaiden johtava kiinteistösijoittaja ja -kehittäjä. Pilottihankkeen tarkoituksena on kehittää lähes päästötön energiaratkaisu suuriin kiinteistöihin. Tavoitteena on tuottaa jopa 40-kertainen määrä lämpöenergiaa verrattuna perinteiseen maalämpötekniikkaan. QHeatin kehittämä syvälämpökaivo ulottuu noin 2000 metrin syvyyteen. Syvälämpökaivosta saatavalla lämpöteholla voidaan lämmittää ja jäähdyttää suuria kiinteistökokonaisuuksia. Yrityksen arvioiden mukaan yhden kaivon vuotuinen lämpökapasiteetti on noin 1500 megawattituntia, jolla pystytään lämmittämään noin 10 000 kerrosneliometriä. Lämpökaivon kapasiteetti vastaa noin 35-40:tä perinteistä maalämpökaivoa, jotka ulottuvat noin 300–400 metriin. QHeatin kehittämä lämpökaivo ulottuu pohjaveden alapuolelle noin 2000 metriin, jossa lämpötila on +40°C, kun perinteinen maalämpökaivo ulottuu maakerrokseen, jossa lämpötila on noin +7 °C (kuva 14). (14.)



KUVA 14. QHeat:n syvälämpökaivon kapasiteetti on noin 40 kertainen perinteiseen maalämpöön verrattuna.

Suomen energiankulutuksesta yksi neljännes menee rakennusten lämmitykseen (kuva 15.), jolloin tällä tekniikalla päästäisiin Suomen tavoitteeseen, joka on vähentää päästöjä 39 prosenttia vuoteen 2030 vuoden 2005 tasosta. Hankkeessa arvion mukaan syvälämmön kaltaisten lämmitysjärjestelmien laajentamisella edes 5 prosenttiin kiinteistökannasta vuotuinen hiilidioksidipäästö laskisi puoli miljoonaa tonnia, jolloin se olisi neljä prosenttia Suomen päästötavoitteista. (14;15.)



KUVA 3. Energian loppukäyttö sektoreittain 2018 (15)

QHeatin syvälämpöteknologia on patentoitu ja testattu yhteistyössä suomalaisten asiantuntijoiden kanssa. QHeat toimii yhteistyössä Business Finlandin ja Smart Otaniemi -hankkeen kanssa. Qheatin kehittämä tekniikka sopii hyvin kaupunkialueille ja tiheille asuinalueille, sillä syvälämpökaivo vaatii vain muutaman neliömetrin alueen lisäksi 30 metrin suoja-alueen suurien kaivokenttien sijaan. Syvälämpökaivon porausreiän halkaisija on ylhäältä noin 300 mm ja pohjalta noin 180 millimetriä. Porausreikä pinnoitetaan betonikuorella, jolloin maaperässä virtaava pohjavesi ei pääse sekoittumaan kaivoveteen. Porausreikään asennettavan putken sisällä ylöspäin virtaavan veden lähtölämpötila on noin 40 °C, mutta jäähtyessään ylös saatava lämpö on noin 20–25-asteista. Putken ulkopintaa pitkin virtaa palautuva 2–5-asteinen vesi (kuva 15.). Lämpökaivon rakenteella estetään veden liiallinen jäähtyminen ylös tullessa. Tavallisessa maalämpökaivossa käytettävässä u-putkessa lämmin vesi pääsisi liikaa jäähtymään ja aiheuttaisi näin suuren lämpöhäviön. (14; 16.)



*KUVA 4. QHeatin käyttämä koaksiaaliputki, joita on käytetty jo aikaisemmin kylmien öljykaivojen lämmitykseen 400-asteisella höyryllä. (16)*

## 6 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli tutustua Power-to-X-menetelmään sekä muihin hiilivapaan energiantuotannon menetelmiin sekä energian varastointiin. Työssä perehdyttiin jo olemassa oleviin tekniikoihin sekä kehitteillä oleviin menetelmiin. Suomi on muun Euroopan kanssa sitoutunut toteuttamaan Pariisin sopimukseen kirjattua tavoitetta hillitä ilmaston lämpenemistä, siten että lämpeneminen saataisiin rajoitettua 1,5 °C:seen. Lisäksi tavoitteeksi on asetettu päästöjen ja hiilinielujen tasapainotilan saavuttaminen vuoteen 2050 mennessä. Jotta sopimukseen kirjatut tavoitteet saavutetaan, on kehitystä tapahduttava maailmanlaajuisesti yhteistyössä.

Suomen pyrkimys irti kivihillen käytöstä voimalaitostoiminnassa edesauttaa Suomessa jo kehitteillä olevan maakaasun tuotannon Power-to-X-menetelmän yleistymistä. Soletairin kehittämä prosessi on selkeästi tulevaisuuden tekniikkaa, jolla saataisiin prosessiteollisuudesta ilmakehään vapautuvaa hiilidioksidia vähennettyä. Vaikka savukaasuja puhdistetaan ennen ilmakehään pääsyä, niiden sisältämä hiilidioksidia pystyttäisiin hyödyntämään laitoksen omaan energiantuotantoon. Tällä hetkellä tekniikka on kuitenkin hyvin uutta ja kehitysvaiheessa olevaa, mutta tulevaisuudessa sen avulla pystyttäisiin hallitsemaan kasvihuonekaasujen määrää ilmakehässä. Siemens on suurista toimijoista ensimmäinen, joka on pystynyt tarjoamaan jo valmiita moduuleita kehitteillä oleviin tuotantoprosesseihin. Siemens kehittää asiakkaiden kanssa yhteistyössä heille sopivia laitteistoja, jotka täyttävät prosessille asetetut tavoitteet.

TES-menetelmiä on kuitenkin jo käytössä Euroopan maissa ja jopa pohjoismaista Ruotsissa, joten Suomen pohjoisen sijainnin perusteella tekniikka olisi hyvin käytettävissä myös Suomessa. Varsinkin Etelä-Suomen tiheillä asuinalueilla maaperään sijoitettavat lämpöenergiavarastot mahdollistaisivat hiilineutraalimman lämmitysmuodon asuinrakennuksille. Tulevaisuutta ajatellen, on tärkeää ymmärtää myös hiilineutraalin energian tuotantoa. Vaikka kivihillestä luovuttaisiin, tällä hetkellä käytössä olevat uusiutuvat energianlähteet, kuten hake ja turve, muodostavat myös päästöjä ilmakehään. Jotta päästöjä pystyttäisiin hallitsemaan paremmin, kehitystä on tapahduttava savupiipuista tulevien kaasujen suhteen. Kehitteillä olevan hiilidioksidikaapparin avulla ja sen ympärillä olevaa tekniikkaa hyödyntäen pystyttäisiin tehostamaan saatavan energian määrää.



## LÄHTEET

1. Pariisin ilmastopöytäkirja 2019. Ympäristöministeriö. Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/FI/Ymparisto/Ilmasto\\_ja\\_ilma/Ilmastonmuutoksen\\_hillitseminen/Kansainvaliset\\_ilmasto-neuvottelut/Pariisin\\_ilmastopöytäkirja](https://www.ymparisto.fi/FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Kansainvaliset_ilmasto-neuvottelut/Pariisin_ilmastopöytäkirja). Hakupäivä 22.10.2019
2. Power-to-x (P2X) – Mitä se tarkoittaa ja miten se mullistaa energian- ja ruoantuotannon Lappeenrannan yliopisto. Saatavissa: [https://www.lut.fi/uutiset/-/asset\\_publisher/h33vOeufOQWn/content/power-to-x-p2x-%E2%80%93-mita-se-tarκοittaa-ja-miten-se-mullistaa-energia-ja-ruoantuotannon](https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/power-to-x-p2x-%E2%80%93-mita-se-tarκοittaa-ja-miten-se-mullistaa-energia-ja-ruoantuotannon) Hakupäivä 10.9.2019
3. Vázquez, Vidal Vázquez – Koponen, Joonas – Ruuskanen, Vesa – Bajamundi, Cyril – Kosonen, Antti – Simell, Pekka – Ahola, Jero – Frilund, Cristian – Elfving, Jere – Reinikainen, Matti – Heikkinen, Niko – Kauppinen, Juho – Piermartin, Paolo. Power-to-x technology using renewable electricity and carbon dioxide from ambient air: Soletair proof-of-concept and improved process concept. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982018305213?via%3DIihub> Hakupäivä 4.10.2019
4. Neo-Carbon energy-project. Saatavissa: <http://www.neocarbonenergy.fi/about/> Hakupäivä 10.9.2019
5. Power-to-X elää yhä – Wärtsilä etsii startupeja apuun uusiutuvasta sähköstä tehtävän polttoaineen kehittämiseen. Tekniikka & Talous. Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/power-to-x-elaa-ymha-wartsila-etsii-startupeja-apuun-uusiutuvasta-sahkosta-tehtavan-polttoaineen-kehittamiseen-6742227> Hakupäivä 10.9.2019
6. Fuel from the air, Pilot plant. Soletair. Saatavissa: <http://www.neocarbonenergy.fi/wp-content/uploads/2017/06/Process-FINAL.pdf> Hakupäivä 10.9.2019
7. Technical specifications. Soletair. Saatavissa: <https://soletair.fi/technical-specifications/hydrogen-production/> Hakupäivä 10.9.2019

8. Bott, Christoph – Dressel, Ingo – Bayer, Peter. State-of-technology review of water based closed seasonal thermal energy storage systems. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119304411> Elsevier. Hakupäivä 30.9.2019
9. Steinmann, Wolf-Dieter – Bauer, Dan – Jockenhöfer, Henning – Johnson, Maike. Pumped thermal energy storage (PTES) as smart sector-coupling technology for heat and electricity. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219311879> Hakupäivä 1.10.2019
10. Davis Lisa. Power-to-X: The crucial business on the way to a carbon-free world. Siemens. CEO Gas and Power. Saatavissa: <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/topics/power-to-x.html> Hakupäivä 12.11.2019
11. McKenna, R.C. – Bchini, Q. – Weunand, J.M.– Michaelis, J. – König, S. – Köppel, W. – Fichtner, W. The future role of Power-to-Gas in the energy transition: Regional and local techno-economic analyses in Baden-Württemberg. Elsevier. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917317312> Hakupäivä 22.10.2019
12. World's first industrial power-to-gas plant. Energie Speicher. 6.10.2016. Saatavissa: [https://forschung-energiespeicher.info/en/project-showcase/versorgungsnetze/projekt-einzelansicht/110/Weltweit\\_erste\\_industrielle\\_Power\\_to\\_Gas\\_Anlage/](https://forschung-energiespeicher.info/en/project-showcase/versorgungsnetze/projekt-einzelansicht/110/Weltweit_erste_industrielle_Power_to_Gas_Anlage/) Hakupäivä 22.10.2019
13. Wärtsilä, LUT-yliopisto ja Nebraskan sähköyhtiö kehittävät liiketoimintamallia vaihtoehdoille polttoaineille. Saatavissa: [https://www.lut.fi/uutiset/-/asset\\_publisher/h33vOeufOQWn/content/wartsila-lut-yliopisto-ja-nebraskan-sahkoyhtio-kehittavat-liiketoimintamallia-vaihtoehdoille-polttoaineille](https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/wartsila-lut-yliopisto-ja-nebraskan-sahkoyhtio-kehittavat-liiketoimintamallia-vaihtoehdoille-polttoaineille) Hakupäivä 22.10.2019
14. QHeat. QHeat ja NREP rakentavat maailman ensimmäisen energiaa varastoivan syvälämpökaivon Espooseen. Saatavissa: <https://www.qheat.fi/fi/qheat-ja-nrep-rakentavat-syvalampokaivon-espooseen/> Hakupäivä 11.11.2019

15. Tilastokeskus. 2018 vuoden 4. vuosineljännes. Liitekuvio 14. Energian loppukäyttö sektoreittain 2018. 28.03.2019. Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/ehk/2017/04/ehk\\_2017\\_04\\_2018-03-28\\_kuv\\_014\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/ehk/2017/04/ehk_2017_04_2018-03-28_kuv_014_fi.html) Hakupäivä 12.11.2019
16. Huusko, Maria 2019. Kehä III:n varteen Espooseen alettiin porata kahden kilometrin syvistä reikää. Helsingin Sanomat. Rakennuslehti. Saatavissa: <https://www.hs.fi/kaupunki/art-2000006244958.html> Hakupäivä 11.11.2019