

---

*Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi  
Naistenlahti 3 voimalaitokselta –  
Esiselvitys*

---



## Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	4
2	Naistenlahti 3.....	5
3	Hiilidioksidin talteenotto.....	7
3.1	Talteenotto polton jälkeen .....	7
3.1.1	Absorptio.....	7
3.1.2	Adsorptio .....	9
3.1.3	Membraanierotus .....	10
3.1.4	Tislaus .....	11
3.1.5	Hydraattierotus.....	11
3.1.6	Kemiallinen erotus.....	11
3.2	Talteenotto happipoltolla .....	11
3.2.1	Chemical Looping Combustion .....	13
3.3	Direct-air-capture .....	13
3.4	Teknologiatoimittajat.....	13
3.4.1	Kanfa.....	14
3.4.2	Ionada.....	15
3.4.3	CarbonReUse .....	18
4	Paineistus ja nesteytys.....	21
5	Kuljetus .....	23
5.1	Putkikuljetus .....	23
5.2	Laivakuljetus .....	25
5.3	Rekka- ja junakuljetus .....	26
6	Välivarastointi .....	27
7	Varastointi .....	30
7.1	Projektit.....	30
7.1.1	Northern Lights .....	31
7.1.2	Barents Blue ja Polaris .....	33
7.1.3	BASRECCS.....	33
7.1.4	Acorn.....	33
7.1.5	Greensand.....	34
7.1.6	Northern Endurance Partnership.....	34
7.1.7	Porthos.....	34
7.1.8	Bifrost.....	35
7.1.9	Sleipner ja Snøhvit .....	35
8	Kannattavuuslaskenta .....	36

8.1	Kanfa.....	36
8.1.1	Hiilidioksidin talteenottokustannus .....	37
8.1.2	Jätkikäsittelyketjun arvotus .....	38
8.1.3	Hiilidioksidipäästövähennemän arvotus .....	39
8.2	CarbonReUse.....	42
8.2.1	Hiilidioksidin talteenottokustannus .....	42
8.2.2	Jätkikäsittelyketjun arvotus .....	44
8.2.3	Hiilidioksidipäästövähennemän arvotus .....	44
9	Hiilidioksidin hyötykäyttö.....	47
9.1	Metanointi .....	47
9.2	Muut biologiset prosessit.....	49
9.2.1	Metanoli.....	49
9.2.2	Yksisoluproteiinit.....	49
9.2.3	Biopolymeerit .....	50
9.2.4	Ektoiini.....	51
9.2.5	Lipidit .....	51
9.3	Vanadiinin tuotanto .....	51
9.4	Hiilidioksidin hyötykäyttö yhteenveto.....	52
10	Regulaatioympäristö .....	53
11	Yhteenveto.....	54
	Lähdeluettelo .....	55
	Liitteet.....	59

## 1 Johdanto

Ilmastonmuutos on suurimpia ihmiskunnan kohtaamia ongelmia kautta historian. Fossiilisten polttoaineiden käyttö ihmiskunnan pääasiallisena energialähteenä on vapauttanut ilmakehään valtavia määriä hiilidioksidia, joka nostaa maapallon ilmakehän lämpötilaa kasvihuoneilmiön kautta.

Tampereen Sähkölaitoksen tavoitteena on, että sen energiantuotanto on hiilineutraalia vuonna 2030 mennessä. Päästäkseen lähemmäksi tätä tavoitetta, Tampereen Sähkölaitos on korvaa fossiilisia polttoaineita käyttänyttä energiantuotantoaan hiilineutraaleja polttoaineita käyttävillä tuotantoprosesseilla. Tästä esimerkkinä on uusi Naistenlahti 3 -biovoimalaitos.

Tässä esiselvitystyössä Tampereen Sähkölaitos ja Q Power tutkivat mahdollisuuksia tehdä Naistenlahti 3 -biovoimalaitoksesta hiilinegatiivinen, joka on mahdollista ottamalla voimalaitoksen energiantuotannosta syntyvä bioperäinen hiilidioksidi talteen ja varastoimalla se pysyvästi.

Työssä käydään läpi eri talteenottoteknologioita ja niiden soveltuvuutta käytettäväksi Naistenlahti 3 -biovoimalaitoksella, kehitteillä olevia hiilidioksidin varastointiprojekteja, hiilidioksidin kuljetusteknologioita ja talteenottoon sekä varastointiin liittyvä lainsäädäntö. Saatavilla olevien talteenottoteknologioiden kannattavuuden arvioimista varten tehtiin Excel -laskuri. Naistenlahti 3:n hiilidioksidipäästöistä tehtiin arvio, sillä laitoksesta ei työn tekemisen aikana ollut vielä dataa käytettävissä. Työssä käydään läpi myös hiilidioksidin hyötykäyttökohteita.

## 2 Naistenlahti 3

Naistenlahti 3:en hiilidioksidipäästöjä arvioidaan Naistenlahti 2:en toteutuneiden polttoainekulutusten perusteella. Laskennassa on käytetty vuosien 2020 ja 2021 polttoainekulutuksia. Naistenlahti 2:en käyttämät polttoainemäärät on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Naistenlahti 2:en vuosien 2020 ja 2021 polttoainekulutukset (T. Vanha-Jaakkola, henkilökohtainen tiedonanto, 16.3.2022).

Vuosi	Turve	Metsäbiomassa	Muu puu	Maakaasu	Kevyt polttoöljy	Yhteensä	Yksikkö
2020	645 354	350 509	19 580	4 329	1 460	1 021 232	MWh
	2 323 276	1 261 831	70 489	15 585	5 256	3 676 437	GJ
2021	585 959	346 476	24 751	5 068	1 315	963 568	MWh
	2 109 452	1 247 312	89 102	18 245	4 733	3 468 844	GJ

Vuosien 2020 ja 2021 keskiarvolliseksi kokonaispolttoainekulutukseksi saadaan 992 400 MWh (3 572 641 GJ).

Naistenlahti 2:en polttoaineteho on noin 193 MW ja uuden Naistenlahti 3:en polttoaineteho noin 210 MW (T. Vanha-Jaakkola, henkilökohtainen tiedonanto, 16.3.2022) ja niiden välinen suhde on noin 1,1. Nyt Naistenlahti 3:en vuosittainen kokonaispolttoainekulutus voidaan arvioida kertomalla Naistenlahti 2:en vuosittainen kokonaispolttoainekulutus Naistenlahti 3:en ja 2:en polttoainetehojen suhteella.

Naistenlahti 3:en vuosittaisen kokonaispolttoainekulutuksen arvioidaan olevan 1 079 814 MWh (3 887 329 GJ).

Naistenlahti 3:en on suunniteltu käyttävän seuraavia polttoaineita:

- Metsäbiomassa
- Sahanpuru ja kuori
- Turve (Käyttö loppuu 2024 mennessä, jää varapolttoaineeksi)
- Kierrätyspuu
- SRF (Max. 10 % pa-tehosta)
- Maakaasu (Käynnistys- ja tukipolttoaine)
- Kevyt polttoöljy (Käynnistys- ja tukipolttoaine)

Oletetaan seuraavanlainen skenaario: turve on jo poistunut käytöstä polttoaineena Naistenlahti 3:lla, maakaasua sekä kevyttä polttoöljyä käytetään samassa suhteessa vuosittaisesta polttoainekulutuksesta kuin Naistenlahti 2:lla ja SRF:n osuus käytetystä polttoaineen määrästä on 10 %. Loppu osuus käytetystä polttoaineesta on metsäbiomassaa, sahanpurua, puunkuorta ja kierrätyspuuta, joiden kaikkien päästökerroin on sama: 0,112 t/GJ (Tilastokeskus 2022). Polttoaineiden päästökertoimet on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Käytettyjen polttoaineiden päästökertoimet (Tilastokeskus 2022).

Polttoaine	CO <sub>2</sub> päästökerroin [t/GJ]
<b>Metsätähdehake</b>	0,112
<b>Kuori</b>	0,112
<b>Sahanpuru</b>	0,112
<b>Kierrätyspuu</b>	0,112
<b>SRF</b>	0,0318
<b>Maakaasu</b>	0,05534
<b>Kevyt polttoöljy, rikitön</b>	0,0702

Naistenlahti 2 käytti keskimäärin 3 572 641 GJ polttoaineita vuodessa. Tästä määrästä kevyttä polttoöljyä oli keskimäärin 4 995 GJ ja maakaasua 16 915 GJ. Suhteessa kokonaispolttoainekulutukseen polttoöljyä käytettiin noin 0,14 % ja maakaasua noin 0,47 %.

SRF:n osuuden oletettiin olevan 10 % käytetystä polttoaineesta, jolloin SRF:n, maakaasun ja polttoöljyn yhteenlaskettu osuus käytetystä polttoaineesta on 10,61 %. Tällöin puupolttoaineiden osuudeksi jää 89,39 %.

Naistenlahti 3:en arvioitiin käyttävän vuodessa 3 887 329 GJ polttoaineita. Edellisessä kappaleessa määriteltyjen polttoaineiden suhteellisten osuuksien perusteella Naistenlahti 3:en vuosittaisten hiilidioksidipäästöjen arvioidaan olevan 402 942 t<sub>CO2</sub>. Laskennassa käytetään pyöristettyä arvoa 400 000 t<sub>CO2</sub>. Polttoaineiden osuudet sekä näiden määrien tuottamat hiilidioksidipäästömäärät on esitelty taulukossa 3.

Taulukko 3. Naistenlahti 3:n arvioitu polttoainekohtainen vuosittainen polttoaineiden kulutus sekä niistä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt.

Polttoaine	Vuosikulutus [GJ]	CO <sub>2</sub> päästöt [t]
<b>Puupolttoaineet</b>	3 474 884	389 187
<b>SRF</b>	388 733	12 362
<b>Maakaasu</b>	18 270	1 011
<b>Kevyt polttoöljy</b>	5 442	382
<b>Yhteensä</b>	<b>3 887 329</b>	<b>402 942</b>

### 3 Hiilidioksidin talteenotto

Energiantuotannon polttoprosesseista syntyvä hiilidioksidi voidaan ottaa talteen kolmella eri tavalla:

- Talteenotto ennen polttoa
- Happipoltto
- Talteenotto polton jälkeen

Tässä selvitystyössä tehtävä tarkastelu keskittyy pääasiassa talteenottoon polton jälkeen, sillä se on yksinkertaisin toteuttaa jälkiasennuksena. Happipolttua tarkastellaan matalammalla tasolla, sillä sen käyttöönotto voimalaitoksen rakentamisen jälkeen johtaisi muutoksiin voimalaitoksen prosessisuunnittelussa. Talteenottoa ennen polttoa ei tarkastella tässä selvitystyössä ollenkaan, sillä se koskee vain kaasumaisia polttoaineita käyttäviä voimalaitoksia. Työssä myös esitellään lyhyesti hiilidioksidin talteenotto suoraan ilmasta, eli "direct-air-capture (DAC)", vertailukohdaksi muille talteenottoteknologioille.

#### 3.1 Talteenotto polton jälkeen

Talteenotossa polton jälkeen hiilidioksidi erotetaan polttoprosessista syntyvästä savukaasusta, joka koostuu pääasiassa hiilidioksidista ja typestä.

Erotus polton jälkeen on otollinen vaihtoehto hankkeille, joissa hiilidioksidin talteenotto lisätään voimalaitoskokonaisuuteen jälkiasennuksena. Tällöin voimalaitoksen prosessiin ei tarvitse tehdä muutoksia. Savukaasu vain johdetaan erilliseen prosessiin sen sijaan, että se vapautettaisiin ilmakehään (Leung et al. 2014).

Hiilidioksidin erotus savukaasusta on mahdollista useilla eri teknologioilla:

- Absorptio
- Adsorptio
- Membraanierotus
- Tislaus
- Hydraattierotus
- Kemiallinen erotus

##### 3.1.1 Absorptio

Absorptio on erotusteknologioista kypsä. Siinä hiilidioksidi erotetaan savukaasuvirrasta liuottamalla se absorbanttiin, minkä jälkeen hiilidioksidi vapautetaan puhtaaksi kaasuvirraksi prosessin toisessa osassa. Samalla absorbantti regeneroituu ja se voidaan kierrättää takaisin prosessin alkuun. Absorptiolla voidaan saavuttaa korkea talteenottotehokkuus, jopa yli 90 % (Leung et al. 2014). Absorption teknologinen valmiustaso on 9, eli se on kaupallisessa käytössä teollisuudessa (Vaz Jr. et al. 2022). Absorptio on tällä hetkellä ainoa kaupallisesti saatavilla oleva suorituskykyinen teollisen kokoluokan teknologia hiilidioksidin talteenottoon polton jälkeen.

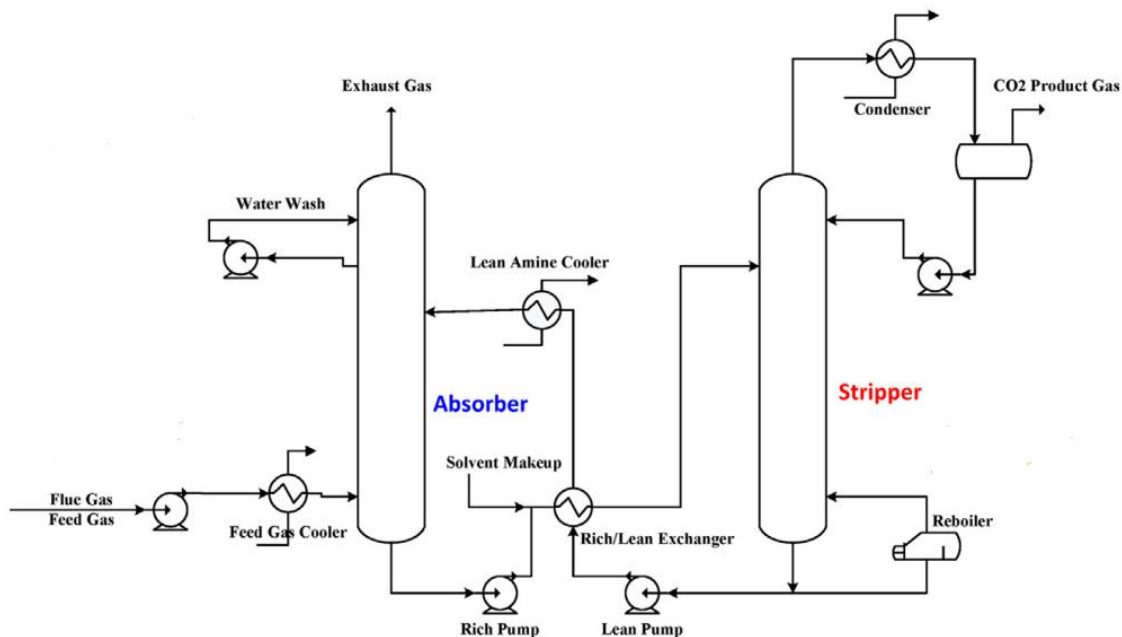
Absorptioon perustuvat erotusteknologiat kykenevät käsittelemään teollisen mittakaavan savukaasuvirtoja (Vaz Jr. Et al. 2022) ja saatavilla olevat absorbantit ovat halpoja sekä soveltuvia korkean lämpötilan käyttökohteisiin (Font-Palma et al. 2021). Toisaalta absorptioerotuksen haittapuolia ovat absorbanttien kuluminen, korroosio, mahdolliset ympäristö- ja terveyshaitat ja absorbanttien huono regenerointikyky (Vaz Jr. Et al. 2022). Absorbanttien mahdollinen korrosoiva vaikutus on prosessitekniinen ongelma, joka ratkaistaan prosessia suunniteltaessa sopivilla laite- ja materiaalivalinnoilla. Loppukäyttäjälle tämä näkyy pääasiassa ylimääräisinä kustannuksina.

Tyypillinen absorptioprosessi alkaa epäpuhtauksista puhdistetun savukaasun syötöllä absorptiokolonnin alapäähän, mistä se virtaa kolonnin ylöspäin absorbanttivirtaa vasten. Savukaasun sisältämä hiilidioksidi liukenee absorbantiin ja hiilidioksidista vapaa savukaasu poistuu kolonnin yläpäästä (Liang et al. 2015).

Hiilidioksidipitoinen absorbanti virtaa absorptiokolonnin alapäästä lämmönvaihtimen läpi, missä se kuumenee. Kuumennettu hiilidioksidipitoinen absorbanti johdetaan desorptiokolonnin yläpäähän, mistä hiilidioksidipitoinen absorbanti virtaa desorptiokolonnin alaspäin, samalla vapauttaen liuenneen hiilidioksidin kaasumaiseen muotoon (Liang et al. 2015).

Nyt regeneroitunut absorbanti virtaa desorptiokolonnin alapäästä aikaisemmin mainittuun lämmönvaihtimeen vapauttamaan lämpönsä absorptiokolonnilta tulevaan hiilidioksidipitoiseen absorbanttivirtaan. Lämmönvaihtimen jälkeen regeneroitu absorbanti johdetaan vielä jäähdyttimen läpi, minkä jälkeen se virtaa absorptiokolonniin uudelleen käytettäväksi (Liang et al. 2015).

Desorptiokolonnissa erottunut kaasumainen hiilidioksidivirta virtaa desorptiokolonnin yläpäästä ulos lauhduttimeen, missä hiilidioksidivirran sisältämä vesi kondensoidaan ja palautetaan desorptiokolonnin absorbanttikiertoon. Nyt jäljelle jäänyt kuivattu hiilidioksidivirta voidaan johtaa prosessista ulos jatkokäsittelyä varten. Kuvassa 1 näkyy tyypillisen amiiniabsorptioprosessin virtauskaavio (Liang et al. 2015).



Kuva 1. Tyypillisen amiiniabsorptioprosessin virtauskaavio (Liang et al. 2015).

Hiilidioksidin talteenottoon on tutkittu useita eri absorbanteja, esim. amiinit, kuuma kaliumkarbonaatti, jäähdytetty ammoniakki ja ioniset nesteet, mutta amiineja pidetään kuitenkin ylivoimaisesti parhaiten tunnettuna absorbanttina käytettäväksi hiilidioksidin talteenotossa (Liang et al. 2015). Myös vettä voidaan käyttää absorbanttina hiilidioksidin talteenotossa.

Vaikka amiinit ovatkin hyvin tunnettu ja laajimmassa käytössä oleva absorbanti hiilidioksidin talteenotossa, niidenkin käytössä on omat ongelmansa. Amiinit itsessään voivat aiheuttaa korroosiota absorptiolaitteistolle, mutta myös tietyt amiiniin liuenneet tyypilliset savukaasujen



ainesosat, kuten kloridit sekä rikki- ja typpioksidit, voivat aiheuttaa korroosiota. Korrosiivinen vaikutus aiheuttaa lisähaasteita laitteiston suunnittelulle sekä käytölle.

Amiineilla on myös taipumus rappeutua pitkällä aikavälillä ja rappeutumisesta syntyvät hajoamistuotteet voivat olla esim. ihmisille haitallisia vapautuessaan laitteiston käyttöympäristöön. Amiinien rappeutuminen aiheuttaa myös amiinikatoa, jolloin kulunut amiini täytyy korvata uudella liuoksella. Tämä aiheuttaa prosessin käytölle lisäkustannuksia (Liang et al. 2015). Rappeutumisen seurauksena syntyvät hajoamistuotteet voivat myös aiheuttaa prosessin toiminnalle ongelmallisia ilmiöitä, kuten prosessipintojen likaantumista sekä vaahoamista (Isogai & Nakagaki 2022).

Amiinien rappeutuminen tapahtuu pääasiassa niiden hapettumisen ja korkeiden lämpötilojen seurauksena. Hapettumisen saa aikaan savukaasun sisältämien oksidanttien liukeneminen amiiniliuokseen. Korkeita lämpötiloja esiintyy pääasiassa desorptiokolonnissa. Hiilidioksidin läsnäolo kiihdyttää korkeiden lämpötilojen rapauttavaa vaikutusta amiineille (Isogai & Nakagaki 2022).

### 3.1.2 Adsorptio

Adsorptiossa hiilidioksidi sidotaan savukaasusta kiinteän adsorbantin pintaan. Adsorboitu hiilidioksidi saadaan kerättyä talteen muuttamalla adsorbantin sisältävän systeemin painetta tai lämpötilaa (Leung et al. 2014).

Adsorption teknologinen valmisaste on 9 eli se on normaalissa kaupallisessa käytössä. Adsorptiota käytetään hiilidioksidin erotukseen pääasiassa maakaasun ja etanolin tuotantoprosesseissa (Vaz Jr. et al. 2022). Adsorptio soveltuu myös hiilidioksidin erotukseen voimalaitoksen savukaasuista, mutta pääasiassa vain pienen kokoluokan (<100 tonnia savukaasua per päivä) ja matalan erotustehokkuuden (<40 %) kohteissa. Siirryttäessä suurempaan kokoluokkaan tai erotustehokkuuteen adsorptio häviää ekonomisuudessaan absorptiolle. Pääsyyinä tälle on adsorption vaatima savukaasun kuivaus, joka kasvattaa talteenoton kustannuksia (Zanco et al. 2021).

Adsorptioerotuksen etuja ovat prosessin yksinkertaisuus, nesteettömyys, regeneroinnin alhainen energiakustannus ja se, ettei prosessi käytä korroosiota aiheuttavia aineita. Haittapuolena adsorptiossa on sen alhainen erotustehokkuus, adsorbanttien alhainen selektiivisyys ja sopimattomuus suurien kaasuvolyymien käsittelyyn.

Yleisiä adsorbantteja ovat esim. aktiivihiili ja zeoliitit. Adsorbanttien tärkeimpiä ominaisuuksia ovat korkea ominaispinta-ala, korkea selektiivisyys ja korkea regenerointikyky (Leung et al. 2014).

Adsorptioprosessin tyyppi riippuu siitä, mitä olosuhdetta muuttamalla adsorbantin regenerointia hallitaan. Mikäli adsorbantti regeneroidaan muuttamalla painetta, teknologiaa kutsutaan PSA:ksi (Pressure Swing Adsorption).

PSA:ssa adsorbantti sitoo reagoivan aineen pintaansa, samalla päästäen heikosti reagoivat ainesosat kulkemaan lävitsensä. Adsorbantti regeneroidaan erottamalla reagoivut aine adsorbantista alhaisessa paineessa (Gibson et al. 2016). PSA:lla voidaan päästä jopa 85 %:in erotustehokkuuteen (Leung et al. 2014). Hiilidioksidia erotettaessa savukaasusta käytettäisiin VPSA (Vacuum Pressure-Swing Adsorption) prosessia, missä savukaasun paineistamisen sijaan regenerointiin tarvittava paine-ero saataisiin aikaan regeneroimalla adsorbantti ilmanpainetta alhaisemmassa paineessa (Gibson et al. 2016).

Adsorbantti voidaan regeneroida myös lämpötilan muutoksilla, jolloin teknologiaa kutsutaan TSA:ksi (Temperature Swing Adsorption).

TSA:ssa adsorptio ja desorptio perustuu paine-eron sijasta lämpötilaeroon. Selektiivinen adsorptio tapahtuu matalassa lämpötilassa ja vastaavasti desorptio tapahtuu nostamalla nopeasti adsorbantin lämpötilaa. Tällöin adsorboitunut aine vapautuu adsorbantista kaasuna ja regeneroitunut adsorbantti voidaan käyttää uudelleen prosessin ensimmäisessä osassa (Gibson et al. 2016). TSA:n regenerointiaika on pidempi kuin PSA:n ja sillä voidaan päästä 80 %:in erotustehokkuuteen (Leung et al. 2014).

ESA (Electric-Swing Adsorption) käyttää TSA:n tapaan lämpötilaeroa adsorption ja desorption aikaan saamiseksi. Poiketen TSA:sta lämpötilan vaihtelu saadaan aikaan ESA:ssa sähkövirran avulla. Talteenotettavan aineen sitouduttua adsorbantin pintaan, adsorbantin lämpötila korotetaan johtamalla sen läpi sähkövirta (Gibson et al. 2016).

### 3.1.3 Membraanierotus

Hiilidioksidin membraanierotus perustuu käytettävän erotuskalvon kykyyn päästää lävitsensä vain hiilidioksidimolekyylit, samalla kun savukaasun muut jakeet jäävät membraanin toiselle puolelle (Leung et al. 2014).

Membraanierotuksen teknologinen valmiustaso on 6-7. Se on kohtuu uusi teknologia, mutta sitä pidetään lupaavana vaihtoehtona amiiniabsorptioon perustuvalle hiilidioksidin talteenotolle. Hiilidioksidin talteenottoon tarkoitettavat membraanit ovat osin jo demonstraatiovaiheessa, mutta suurilta osin ne ovat kuitenkin vielä kehitysvaiheessa (Vaz Jr. et al. 2022).

Membraani koostuu hyvin ohuesta toiminnallisesta osasta, joka erottelee hiilidioksidin muista kaasuista. Ohuen membraanin jälkeen on paksumpi ei-aktiivinen osa, jolla on hyvä läpäisevyys ja alhaiset materiaalikustannukset. Paksumman membraaniosan tarkoituksena on tuoda erotuskalvolle rakenteellista kestävyyttä (Leung et al. 2014).

Membraanierotuksella voidaan saavuttaa hyvä erotustehokkuus, jopa 88 %, mutta teknologian haasteina ovat erotuksen matalat ainevuot ja membraanin rappeutuminen. Teknologian suorituskykyyn vaikuttaa paljon savukaasun hiilidioksidipitoisuus ja paine (Leung et al. 2014).

Korkean erotustehokkuuden lisäksi membraanierotuksen etuja ovat sen matala energiankulutus ja operointikustannukset, pieni pinta-alavaatimus, skaalautuvuus ja yksinkertainen integrointi olemassa oleviin prosesseihin. Kaupallisia vaihtoehtoja hiilidioksidin talteenottoon savukaasuista on kuitenkin rajallisesti saatavilla. Kaupallisesti saatavien membraanien suorituskyky on kuitenkin vertailukelpoista amiinierotuksen kanssa, mutta tämä pätee vain uuden membraanin suorituskykyyn. Käyttöajan lisääntyessä membraanien taipumus rappeutua savukaasun prosessiolosuhteissa suorituskyky laskee amiinierotuksen alapuolelle (Kárászová et al. 2020).

Membraanierotukseen on kiinnitetty kirjallisuudessa ja tutkimuksessa runsaasti huomioita, mutta se ei vielä tällä hetkellä ole varteenotettava vaihtoehto hiilidioksidin talteenottoon teollisessa mittakaavassa. Membraanien kehittyminen kaupalliseksi ratkaisuksi riippuu pääasiassa siitä, saadaanko tässä alaluvussa käsitellyt ongelmat ratkaistua. Vaikka membraanit eivät ole vielä kilpailukykyinen teknologia yksinään, niitä voidaan silti käyttää yhdistettynä muihin talteenottoteknologioihin parantamaan niiden suorituskykyä.

#### 3.1.4 Tislaus

Hiilidioksidi voidaan erottaa savukaasusta myös tislaamalla. Tislaus tapahtuu matalassa lämpötilassa ja korkeassa paineessa. Menetelmä muistuttaa tavanomaista nesteiden tislausta paitsi siltä osin, että nesteen sijasta tislataan kaasua (Leung et al. 2014).

Tislausta käytettäessä hiilidioksidin erotukseen, savukaasu jäädytetään hiilidioksidin härmistymislämpötilan alapuolelle (-100 – -135 °C), minkä jälkeen kiinteä hiilidioksidi poistetaan prosessista ja paineistetaan 100-200 bar paineeseen (Leung et al. 2014).

Käyttämällä tislausta hiilidioksidin erotukseen savukaasuista voidaan päästä jopa 95 %:in erotustehokkuuteen ja se kuluttaa sähköenergiaa noin 600-660 kWh/t<sub>CO2</sub> (Leung et al. 2014).

Vaikka tislaus on itsessään kypsä teknologia, sen soveltaminen hiilidioksidin talteenottoon on vielä varhaisessa kehitysasteessa, sillä sen käytännön ratkaisut ovat rajoittuneet tähän asti vain laboratoriomittakaavan hankkeisiin (Font-Palma et al. 2021) ja täten se ei tällä hetkellä sovellu Tampereen Sähkölaitoksen käyttötarkoituksiin.

#### 3.1.5 Hydraattierotus

Hydraattierotuksessa hyödynnetään hiilidioksidin kykyä muodostaa hydraatteja paremmin, kuin voimalaitosten savukaasujen tyypillisesti sisältämät muut kaasut, kuten typpi. Hydraattierotuksessa savukaasu altistetaan vedelle korkeassa paineessa, jolloin muodostuu hydraatteja. Hiilidioksidi sitoutuu näihin hydraatteihin ja samalla erottuen savukaasusta (Leung et al. 2014). Teknologian alhaisen kehitysasteen vuoksi se ei tällä hetkellä sovellu Tampereen Sähkölaitoksen käyttöön.

#### 3.1.6 Kemiallinen erotus

Kemiallinen erotuksessa hiilidioksidi erotetaan savukaasusta kemiallisella reaktiolla, missä hiilidioksidi muodostaa jotain arvokkaampaa lopputuotetta, yleensä karbonaatteja. Tällä tavoin voitaisiin tuottaa lisäarvoa teollisuuden ja maatalouden tuotantoketjuihin, samalla kun kehitettäisiin kestävämpiä tuotantomenetelmiä. Esimerkkinä tästä on sementtiteollisuus, missä sementin sekaan voitaisiin sekoittaa biohiiltä edistämään hiilidioksidin absorboitumista betonimassaan ja karbonaattien muodostumista, samalla parantaen betonin lujuusominaisuuksia. Teknologia on kuitenkin vasta tutkimusvaiheessa (Vaz Jr. et al. 2022), joten se ei tällä hetkellä sovellu Tampereen Sähkölaitoksen käyttöön.

### 3.2 Talteenotto happipoltolla

Happipoltto (oxy-fuel combustion) kehitettiin alun perin tuottamaan hiilidioksidia tehostettua öljyporausta (EOR; enhanced oil recovery) varten. Menetelmään on kuitenkin kiinnitetty laajasti huomiota sen käytettävyydestä myös ilmastonmuutoksenvastaisessa hiilidioksidin talteenotossa (Yadav & Mondal 2022).

Happipoltossa hiilidioksidi otetaan talteen korvaamalla polttoprosessissa käytetty ilma puhtaalla hapella. Tällöin polttoprosessiin ei päädy ilman sisältämää typpeä. Tämä johtaa siihen, että syntyvä savukaasu koostuu pääasiassa hiilidioksidista ja vesihöyrystä (Yadav & Mondal 2022). Tätä savukaasua kierrätetään polttoprosessissa, jotta savukaasusta puuttuvan typen tilavuusvirta saataisiin korvattua. Näin saadaan varmistettua, että prosessissa kiertää tarpeeksi kaasua kantamaan lämpö kattilan läpi (Wall et al. 2009). Prosessista poistetusta savukaasusta saadaan lähes puhdas hiilidioksidivirta, kun vesihöyry kondensoidaan savukaasusta (Yadav & Mondal 2022).

Tigges et al. (2009) arvioivat sähköntuotantokapasiteetiltaan 820 MW<sub>e</sub>:in suuruisen superkriittisen hiilivoimalan muuttamista ilmapolttoon perustuvasta prosessista happipoltton

mahdollistavaan prosessiin. Jälkiasennuksella ei todettu olevan merkittäviä vaikutuksia voimalaitoksen höyrykiertoon. Happipolton jälkiasennus ei myöskään poistaisi mahdollisuutta ajaa voimalaitosta ilmapoltolla ja ajotapaa voidaan vaihtaa nopeasti (Tigges et al. 2009).

Kierrätettävä savukaasu on mahdollista johtaa takaisin kattilaan useammasta pisteestä savukaasukanavassa. Kuumen savukaasun kierrätys savukaasukanavasta ennen suodatusta ja puhdistusta on termodynaamisesti tehokkain ratkaisu. Tämän ratkaisun haasteeksi kuitenkin muodostuu suodattamattoman ja puhdistamattoman savukaasun erodoiva sekä korrosoiva vaikutus kattilalaitteistolle (Tigges et al. 2009).

Happipolttoprosessin jälkiasennukselle otollisempi ratkaisu on kierrättää kylmää, puhdistettua ja kuivattua savukaasua. Tällöin välttytään eroosiolta ja korroosiolta, sillä savukaasu sisältäisi pääasiassa vain hiilidioksidia ja kattilan laitteisto kelpaisi käytettäväksi sellaisenaan jälkiasennetussa happipolttoprosessissa. Kylmä savukaasu täytyy kuitenkin esilämmittää vähintään kastepisteen yläpuolelle. Tämä voidaan saavuttaa kierrättämällä pieni määrä kuumaa savukaasua kylmän savukaasun lämmittämiseen (Tigges et al. 2009).

Savukaasun kierrätyksen lisäksi polttoprosessiin täytyisi lisätä DeSOx-laitteisto, mikä poistaisi savukaasuvirrasta korrosiiviset rikkioksidit ja estäisi niiden kertymisen polttoprosessiin. Savukaasulle asennettaisiin myös kuivain poistamaan vesi, jotteivat vesi ja hiilidioksidi muodostaisi korrosiivisia karbonaatteja (Tigges et al. 2009).

Kuivaimen jälkeen savukaasuvirta jaetaan kahdeksi kaasuvirraksi, joista toinen johdetaan kierrätettäväksi kattilassa ja toinen poistetaan lähes puhtaana hiilidioksidivirtana prosessista (Tigges et al. 2009).

Happipolton jälkiasennus asettaisi korkeat vaatimukset polttoprosessin laitteistojen tiiveydelle. Käytettävien kaasuvirtojen korkeat hiilidioksidipitoisuudet synnyttävät riskin sille, että hiilidioksidia pääsee vuotamaan kattilalaitoksen sisätiloihin aiheuttaen tukehtumisvaaran työntekijöille. Myös polttoaineen syöttöjärjestelmälle asettuu korkeat tiiveysvaatimukset, ettei kattilan polttoprosessiin pääse polttoaineen syötön mukana ilmaa (Tigges et al. 2009).

Tavanomaiseen voimalaitokseen verrattuna happipolttoa hyödyntävä voimalaitos tarvitsee laitoskokonaisuuteensa kaksi toiminnallista yksikköä lisää: hapentuottolaitoksen (ASU; Air Separation Unit) ja hiilidioksidin käsittelylaitoksen (CPU; Carbon dioxide Purification and compression Unit) (Yadav & Mondal 2022).

Toteuttamiskelpoisimpana ASU-teknologiana pidetään matalassa lämpötilassa tapahtuvaa tislausta (CAS; Cryogenic Air Separation). Menetelmää voidaan hyödyntää teollisen kokoluokan laitoksissa, joiden hapentuottokapasiteetti on yli 150 t<sub>02</sub>/d. CAS:illa voidaan tuottaa puhtausasteeltaan jopa 99,5% happea. Prosessi kuitenkin kuluttaa runsaasti energiaa ja syö 10-40% voimalaitoksen voimantuotannosta. Hapentuotantoon suhteutettuna laitoksen energiankulutus on noin 350 kWh/t<sub>02</sub>, mutta mikäli hapen puhtaudeksi riittää 95%, voidaan tuotannon energiankulutusta laskea noin 200 kWh/t<sub>02</sub>. ASU-laitos veisi noin 14% happipolttoa hyödyntävän voimalaitoksen pääomainvestoinnista. Koska kyseessä on kypsä teknologia, on todennäköistä, että se ei kehity enää paljoa tulevaisuudessa (Yadav & Mondal 2022).

Tarvittava happi voidaan tuottaa myös membraanierotuksen avulla, joka on yksinkertaisempi ja halvempi teknologia CAS:iin verrattuna. Teknologian toiminta perustuu membraanien kykyyn päästää lävitsensä vain happimolekyylit, kun taas ilman muut ainesosat, pääasiassa typpi, eivät pääse membraanista läpi. Pienen kokoluokan membraanilaitos (500 kg<sub>02</sub>/d) on energiankulutukseltaan noin 60% ja investointikustannuksiltaan noin 35% pienempi, kuin CAS:ia hyödyntävä ASU. Membraanierotus ei ole kuitenkaan vielä teknologisesti

kypsyysasteeltaan siinä pisteessä, että sitä voitaisiin käyttää hapen teollisen mittakaavan valmistuksessa. Esteenä laajamittaiselle käytölle ovat membraanien epästabiilius voimantuotannon haastavissa prosessiolosuhteissa, sekä suorituskäytävien membraanien harvinaisuus. Membraanierotuksen kehitystyö keskittyykin juuri prosessiolosuhteiden sietokyvyn ja suorituskäytävien parantamiseen (Yadav & Mondal 2022).

Koska happipolton käyttö Naistenlahti 3:lla vaatisi muutoksia voimalaitoksen keskeisiin prosesseihin, ei sitä pidetä käyttökelpoisena talteenottoteknologiana Tampereen Sähkölaitoksen käyttöön.

### 3.2.1 Chemical Looping Combustion

Chemical looping combustion (CLC) on samankaltainen prosessi happipolton kanssa sen suhteen, että siinä käytetään puhdasta happea polttoaineen hapettamiseen. CLC:ssä happi tuodaan polttoprosessiin metallioksiidiin sitoutuneena. Polttoprosessissa metallioksiidi pelkistyy, samalla vapauttaen hapen. Vapautunut happi hapettaa polttoaineen, muodostaen hiilidioksidia ja vettä. Pelkistynyt metalli viedään polttoprosessista erilliseen prosessiin, missä se hapetetaan uudestaan ja kierrätetään takaisin polttoprosessiin (Leung et al. 2014).

CLC:tä pidetään lupaavana teknologiana hiilidioksidin talteenottoa varten (Leung et al. 2014). Teollisen mittakaavan ratkaisun puuttumisen vuoksi se ei kuitenkaan tällä hetkellä sovellu Tampereen Sähkölaitoksen käyttöön. Teknologian käyttö vaatisi myös muutoksia voimalaitoksen keskeisiin prosesseihin.

### 3.3 Direct-air-capture

Hiilidioksidia voidaan ottaa myös talteen suoraan ilmakehästä sen sijaan, että se erotettaisiin teollisista prosesseista syntyvistä savukaasuista. Tällöin kyseessä on direct-air-capture (DAC)-prosessi.

DAC:issa voidaan käyttää samoja teknologioita kuin talteenotossa savukaasuistakin, mutta kiinteää adsorbanttia tai nestemäistä absorbanttia käyttäviä prosesseja pidetään todennäköisimpinä vaihtoehtoina suuren kokoluokan DAC -prosesseille (Keith et al. 2018).

IEA (2022b) arvioi DAC:in talteenottokustannusten olevan 100-1 000 \$<sub>2022</sub>/t<sub>CO2</sub> (93,96-939,6 €<sub>2022</sub>/t<sub>CO2</sub>). Keith et al. (2018) arvioivat DAC:in elinkaaren ajalta lasketun tuotantokustannuksen olevan 94-232 \$<sub>2018</sub>/t<sub>CO2</sub> (100,86-248,93 €<sub>2022</sub>/t<sub>CO2</sub>).

### 3.4 Teknologiatoimittajat

Eri teknologioiden oleelliset tiedot on koottu taulukkoon 4.

Taulukko 4. Esiteltävien teknologioiden oleelliset tiedot.

	Kanfa	CarbonReUse
CAPEX [€/t]	270	400
Talteenotto-%	< 95	79,5
Sähkönkulutus [kWh/t]	216	830
Lämmönkulutus [kWh/t]	880	0
Lämmöntuotanto [kWh/t]	880	0
Tilatarve [m <sup>2</sup> @400 000 t/a]	6 400	16 380
Absorbantti	Amiini	Vesi

### 3.4.1 Kanfa

Kanfan amiiniabsorptioon perustuva hiilidioksidin talteenottoteknologia voidaan koostaa kolmeksi erilaiseksi kokoonpanoksi. Kaikilla kolmella kokoonpanovaihtoehdolla on omat etunsa ja haittansa, riippuen käyttökohteesta. Yleisenä etuna Kanfan talteenottoteknologiassa on se, että prosessi tuottaa hiilidioksidin suoraan nesteytettyyn muotoon.

Kokoonpano 1 koostuu pelkästä hiilidioksidin talteenotosta, jonka ominaissähköntarve on noin 80 kWh/t<sub>CO2</sub> ja ominaislämmöntarve noin 880 kWh/t<sub>CO2</sub>. Osa prosessiin käytetystä lämmöstä voidaan ottaa talteen, jolloin prosessin ominaislämmöntuotanto on noin 200 kWh/t<sub>CO2</sub>.

Mikäli käyttökohteessa on mahdollisuus käyttää hyödyksi enemmän lämpöä, kokoonpanoon voidaan asentaa lämpöpumppu. Tällöin kyseessä on kokoonpano 2. Lämpöpumppu mahdollistaa kaiken prosessiin käytetyn lämmön talteenoton, jolloin prosessin ominaislämmöntuotanto on sama kuin sen ominaislämmönkäyttö, eli 880 kWh/t<sub>CO2</sub>. Prosessin nettolämmönkäyttö on siis tällöin 0 kWh/t<sub>CO2</sub>. Lämpöpumpun lisäys kokoonpanoon nostaa prosessin ominaissähkönkulutusta 216 kWh/t<sub>CO2</sub>:iin. Kokoonpano 2 on siis sopiva käyttökohteisiin, joissa halutaan maksimoida lämmön talteenotto prosessista eikä korottunut sähkönkulutus ole este kokoonpanon käytölle.

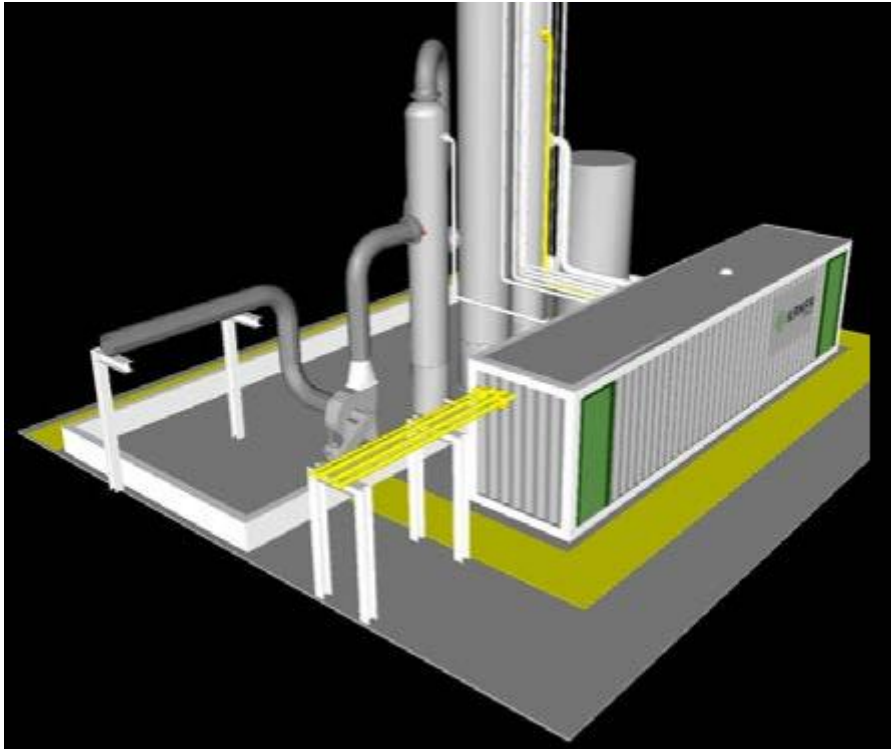
Käyttökohteissa, joissa ei ole mahdollisuuksia käyttää hukkalämpöä lainkaan, voidaan sen lämpötehoa laskea asentamalla kokoonpanoon LVC (Lean Vapor Compression) -laitteisto. LVC-laitteisto haihduttaa desorptiokolonnista tulevan regeneroidun amiiniliuoksen, samalla vapauttaen sen latentin lämmön hyödynnettäväksi. Höyrystynyt liuos johdetaan takaisin desorptiokolonniin, missä sen nyt hyödynnettävissä oleva lämpöenergia käytetään hyödyksi prosessissa. LVC-laitteistoa käytettäessä käytetään nimitystä kokoonpano 3, jonka ominaissähkönkulutus on noin 208 kWh/t<sub>CO2</sub> ja ominaislämmönkulutus 680 kWh/t<sub>CO2</sub> ja ominaislämmöntuotanto 0 kWh/t<sub>CO2</sub>.

Kaikkien kolmen kokoonpanon energiankulutukset on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Kanfan kokoonpanojen 1-3:n energiankulutukset.

	Kokoonpano 1	Kokoonpano 2	Kokoonpano 3	Yksikkö
<b>Sähkönkulutus</b>	80	216	208	kWh/t <sub>CO2</sub>
<b>Lämmönkulutus</b>	880	880	680	
<b>Lämmöntuotanto</b>	200	880	0	

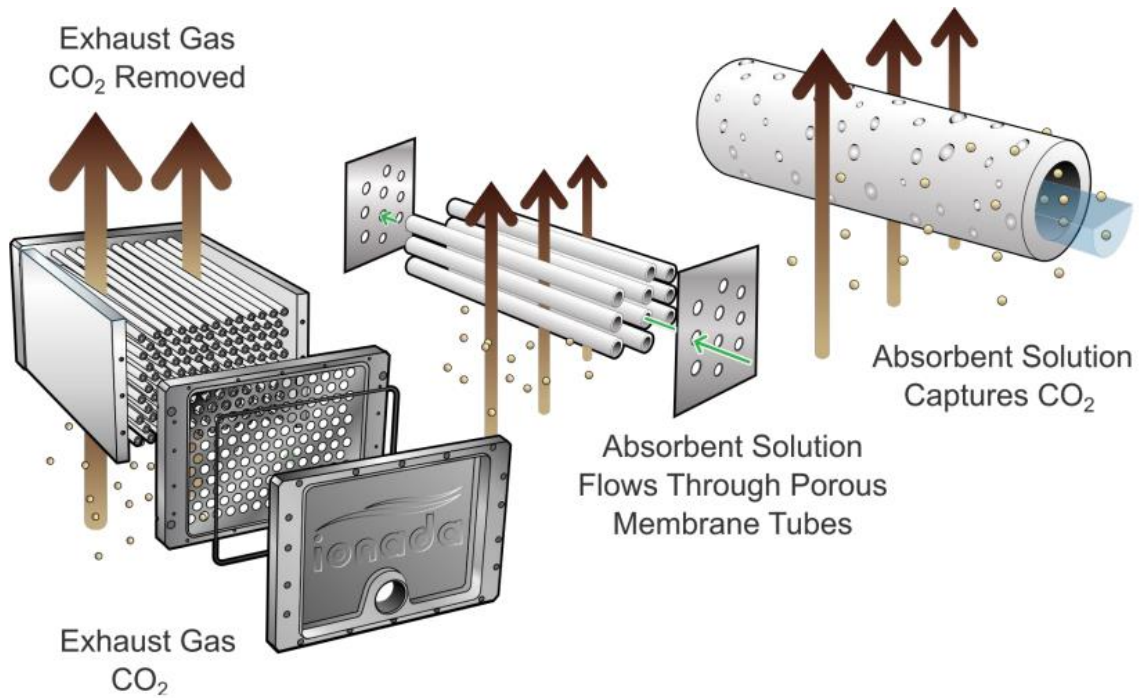
Kanfa tarjoaa talteenottoteknologiaansa 400 000 t<sub>CO2</sub>/a kapasiteettiin asti, joten se soveltuu Tampereen Sähkölaitoksen käyttöön. Kanfan hiilidioksidin talteenoton tehokkuus on parhaimmillaan jopa 95 %. Kanfan talteenottoteknologian investointikustannukset ovat noin 270 €/t<sub>CO2</sub> (ei sisällä mahdollista lämpöpumppu- tai LVC-investointia, näiden investointikustannusvaikutuksesta ei saatu tietoa toimittajalta). Kuvassa 2 on esitetty Kanfan 10 000 t<sub>CO2</sub>/a laitteisto, jonka ulkomitat ovat noin 10m x 16m, eli sen viemä pinta-ala on 160m<sup>2</sup>. Tampereen Sähkölaitoksen tapauksessa laitoksen tulisi olla noin 40 kertainen kapasiteetiltansa.



Kuva 2. Kanfan 10 000 t<sub>CO2</sub>/a laitoksen laitteistokuva.

#### 3.4.2 Ionada

Ionadan hiilidioksidin talteenottoteknologia koostuu absorptio- ja membraanierotuksen yhdistelmästä. Teknologia perustuu membraaneina toimiviin huokoisiin keraamiputkiin, joiden läpi virtaa jäädytettyä amiiniliuosta. Putket kulkevat savukaasukanavan läpi kohtisuoraan savukaasun virtaussuuntaan nähden. Savukaasun virratessa huokoisten putkien läpi, hiilidioksidi absorboituu putkistossa virtaavaan amiiniliuokseen. Teknologian toimintaperiaate on kuvattu yleisesti kuvassa 3.

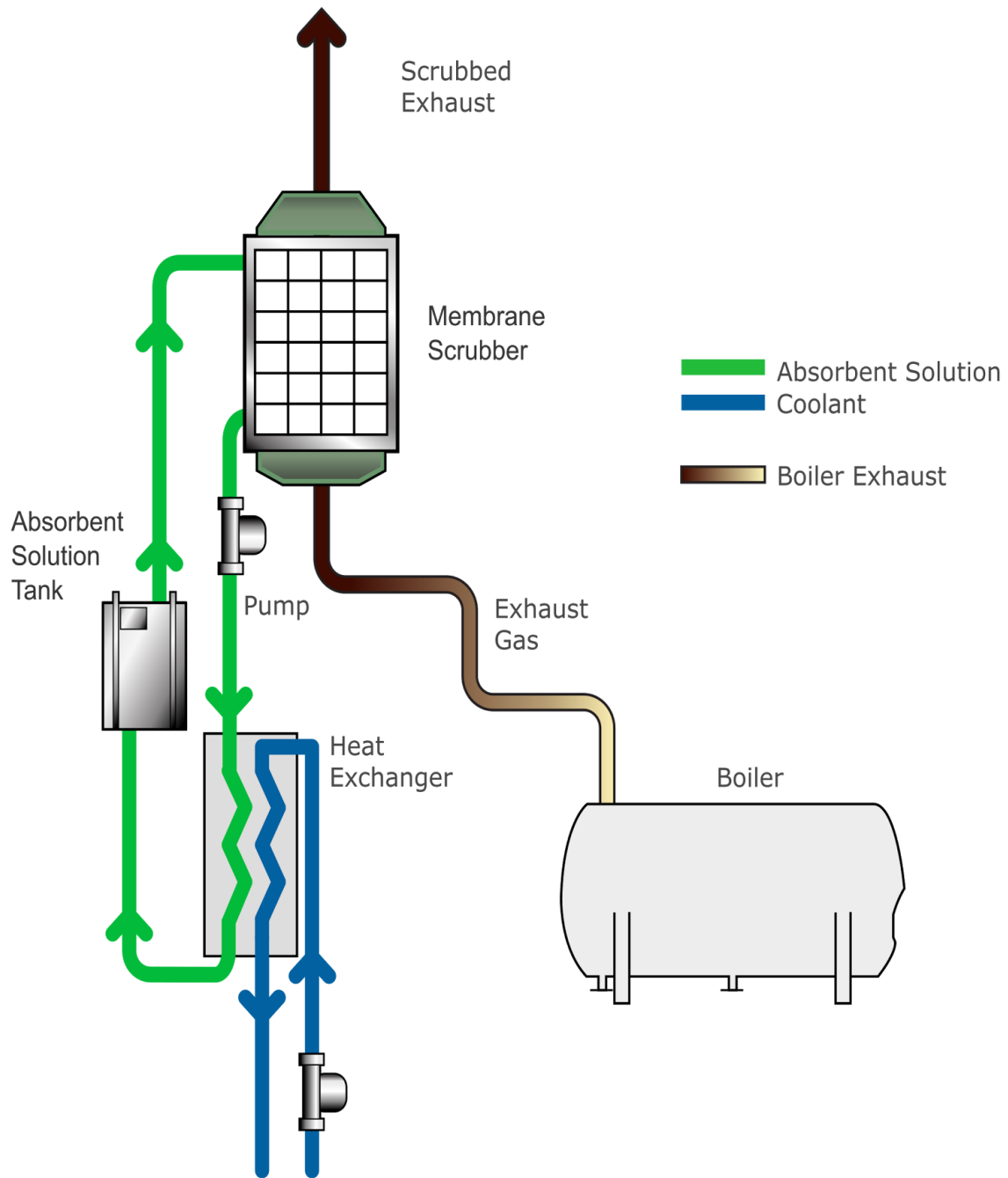


Kuva 3. Ionadan membraanipesurin toimintaperiaate.

Tavanomaisen absorptioprosessin tavoin tiilidioksidi vapautetaan absorbantista kohottamalla sen lämpötilaa. Tämän jälkeen amiiniliuos kiertää prosessin läpi uudestaan, kuljettuaan ensin jäähdyttimen läpi.

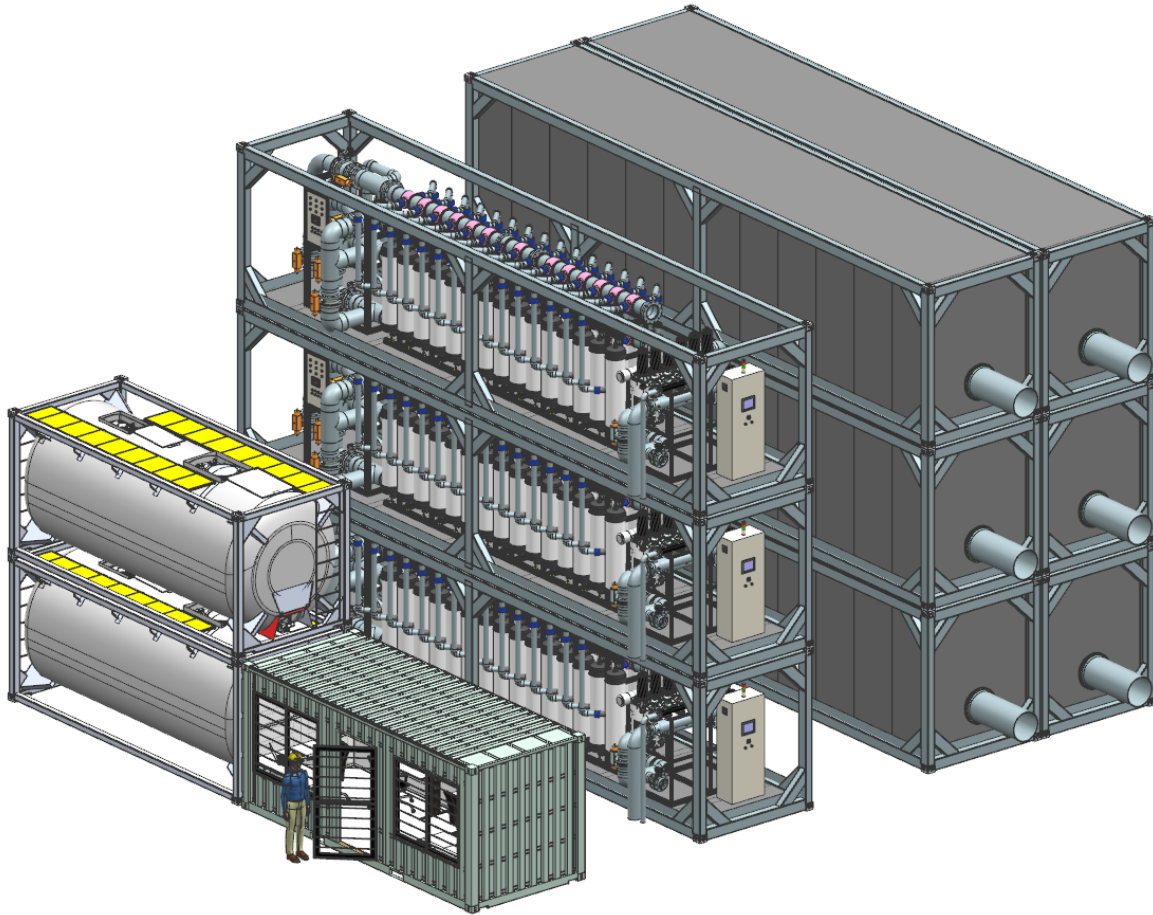
Etuna Ionadan talteenottoteknologiassa tavanomaiseen amiinipesuun verrattuna on se, että savukaasu ja amiiniliuos eivät sekoitu prosessissa lainkaan, vaan amiiniliuos kiertää prosessia suljetussa kierrossa. Tällöin prosessissa ei synny läheskään yhtä suuria määriä jätelietejaetta kuin perinteisissä amiiniprosesseissa. Membraaniteknologiaa hyödyntämällä prosessilaitteiston koko on saatu myös huomattavan kompaktiksi. Prosessin virtauskaavio on esitettyinä kuvassa 4.





Kuva 4. Ionadan hiilidioksidin talteenottoteknologian virtauskaavio.

Ionada tarjoaa talteenottoteknologiaansa 100 000  $t_{CO_2}/a$  kokoluokassa, joten teknologia soveltuu Tampereen Sähkölaitoksen käyttötarkoituksiin. Ionadan 100 000  $t_{CO_2}/a$  laitteisto on esitetty kuvassa 5. Kuvassa näkyvän laitteistokokonaisuuden ulkomitat ovat noin 12m x 15m, eli sen viemä pinta-ala on noin 180 m<sup>2</sup>. Tampereen Sähkölaitoksen tapauksessa laitteiston kapasiteetin tulisi olla noin neljä kertaa suurempi.



Kuva 5. Ionadan 100 000 t<sub>CO2</sub>/a laitoksen laitteistokuva.

### 3.4.3 CarbonReUse

CarbonReUse:n teknologia perustuu absorptioon, mutta amiinien sijaan prosessi käyttää absorbanttinaan pelkästään vettä. Talteenotto prosessi koostuu kuudesta pääosiosta:

1. Savukaasupesuri
2. Erotusmembraani
3. Absorptiokolonne
4. Esidesorptiosäiliö
5. Desorptiosäiliö
6. Jälkidesorptiosäiliö

Prosessi alkaa savukaasun syöttämisestä savukaasupesuriin, jossa siitä poistetaan mahdollinen rikkioksidi ja yli 10 µm partikkelit. Savukaasu syötetään pesuriin noin 100 °C lämpötilassa, jossa se viilenee 10–30 °C lämpötilaan.

Pesty savukaasu johdetaan membraanille, joka poistaa noin 60 % savukaasun sisältämästä tyypeistä. Noin 90 % savukaasun hiilidioksidista saadaan ohjattua absorptioprosessiin. Membraani toimii 4–5 bar(a) paineessa. Membraanilta erotettu savukaasu johdetaan jälkidesorptiokolonnein.

Jälkidesorptiokolonne on jaettu kahteen osaan. Yläosa on pakattu kolonne, kun taas alaosa toimii pumppausosiona. Membraanilta tuleva savukaasu syötetään kolonnin keskiosasta sisään, mistä se virtaa kolonnin yläosaan. Jälkidesorptiokolonnissa loput veteen liuenneesta hiilidioksidista poistuu kolonnin yläpäähän, missä se sekoittuu esidesorptiosäiliöltä ja membraanilta tulevaan

**Concrete Solutions for Fighting Climate Change**

Rajapurontie 16, 21630 Parainen, Finland

contact@qpower.fi

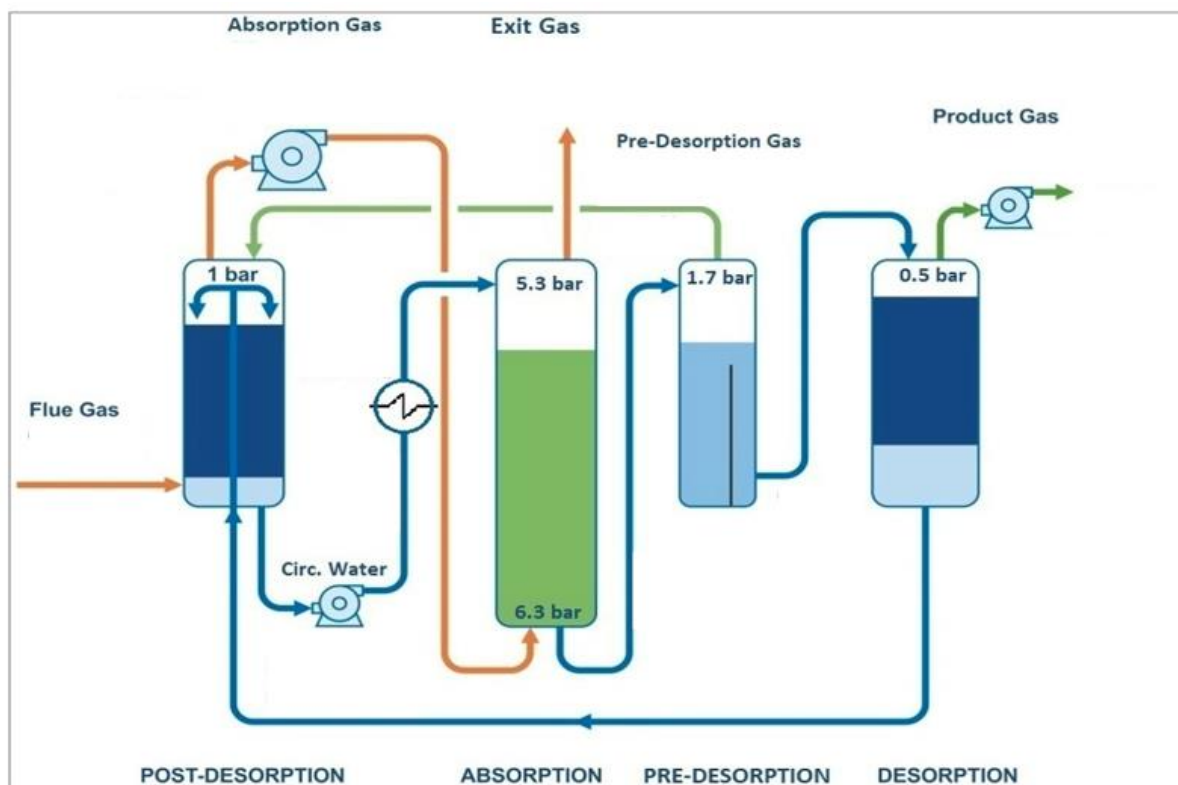
kaasuvirtaan. Tästä kaasuvirta johdetaan absorptiokolonniin. Vesi johdetaan myös absorptiokolonniin.

Absorptiokolonne toimii noin 6–10 bar paineessa. Jälkidesorptiokolonnilta tuleva savukaasu syötetään kolonnin alapäästä sisään, kun taas absorbanttina käytettävä vesi syötetään sisään kolonnin yläpäästä. Savukaasukuplat lähtevät virtaamaan kolonnia ylöspäin, samalla kun hiilidioksidi liukenee alaspäin virtaavaan veteen. Vesi johdetaan paine-eroa käyttäen absorptiokolonnin alapäästä esidesorptiosäiliöön. Liukenemattomat kaasut (pääasiassa typpeä ja happea) kerääntyvät absorptiokolonnin yläpäähän, mistä ne poistetaan prosessista.

Esidesorptiosäiliön paine on 1,5–2 bar(a), riippuen savukaasun hiilidioksidipitoisuudesta. Säiliön yläosaan kerääntyy vedestä vapautuvaa hiilidioksidipitoista kaasua, joka johdetaan jälkidesorptiokolonniin. Esidesorptiosäiliön veteen jäävän kaasun hiilidioksidipitoisuus on lähes 100 %. Vesi johdetaan esidesorptiosäiliön alapäästä desorptiosäiliöön.

Desorptiosäiliön paine on noin 0,5 bar(a) ja veteen liuennut lähes 100 % hiilidioksidi vapautuu säiliön yläpäähän, mistä se johdetaan prosessista ulos. Vesi johdetaan desorptiosäiliön alapäästä jälkidesorptiokolonniin.

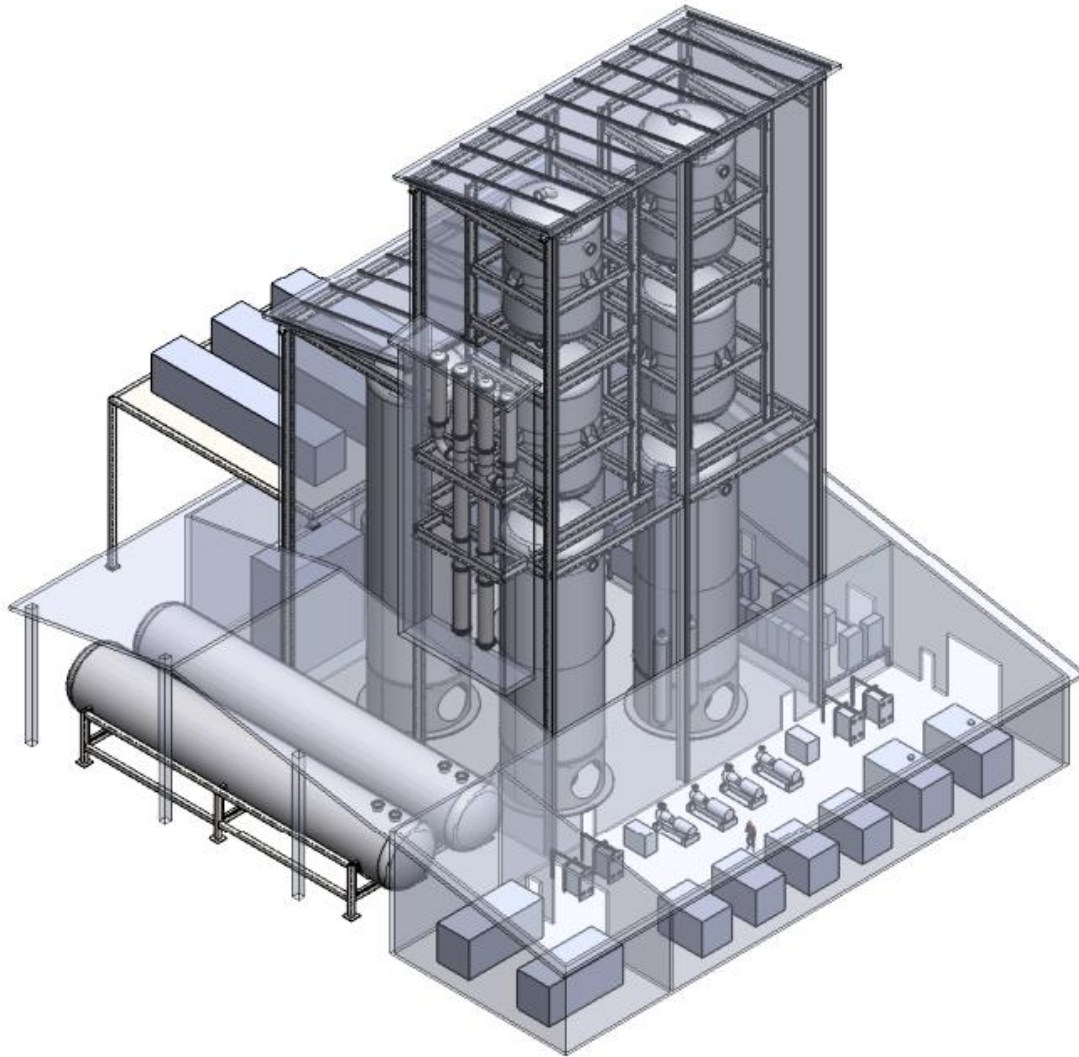
CarbonReUsen teknologian prosessi on esitetty virtauskaaviona kuvassa 6.



Kuva 6. CarbonReUsen prosessin virtauskaavio.

CarbonReUsen talteenottoteknologia kuluttaa sähköenergiaa noin 830 kWh/t<sub>CO2</sub>, mutta ei lämpöenergiaa ollenkaan. Teknologian talteenottotehokkuus on 79,5 % ja laitoksen investointikustannukset ovat noin 400 €/t<sub>CO2</sub>. CarbonReUse tarjoaa teknologiaansa 100 000 t<sub>CO2</sub>/a kokoluokassa, joten se soveltuu Tampereen Sähkölaitoksen käyttötarkoituksiin. Tässä kokoluokassa talteenotto toteutettaisiin monistamalla 20 000 t<sub>CO2</sub>/a kapasiteetin omaavaa

moduulia. Q Power on myös onnistuneesti toteuttanut pilot-hankkeitansa käyttäen CarbonReUsen teknologiaa. Hiilidioksidi tulee prosessista ulos ilmapaineessa. Kuvassa 7 näkyvä laitokuva on 40 000 tonnin talteenottokapasiteetin omaavasta laitoksesta. Kuvasta erottuu kaksi samanlaista 20 000 tonnin talteenottokapasiteetin omaavaa kolumnikonaisuutta. Kuvassa X näkyvän laitos on ulkomitoiltaan noin 42m x 39m, eli sen pinta-ala vaatimus on noin 1 638 m<sup>2</sup>. Naistenlahti 3:en talteenottolaitoksen tulisi olla noin 10 kertainen kuvassa 7 näkyvään laitokseen verrattuna.

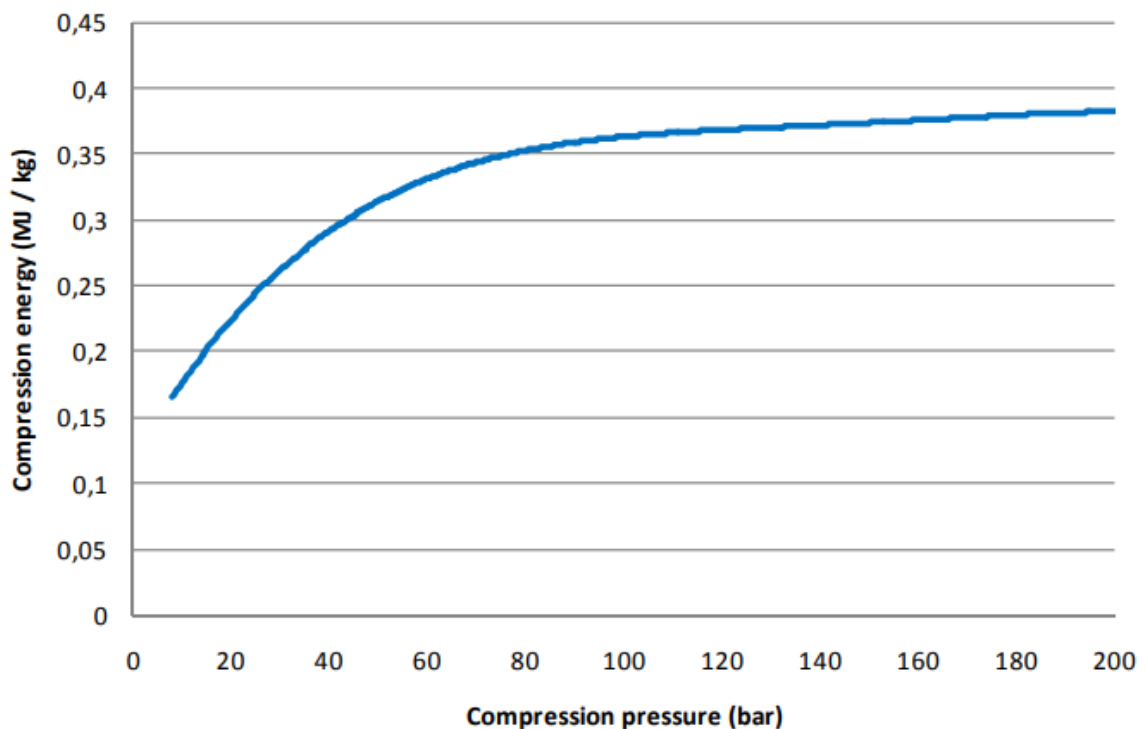


Kuva 7. CarbonReUsen 40 000 t<sub>CO2</sub>/a kapasiteetin laitos.

## 4 Paineistus ja nesteytys

Ennen kuljetusta hiilidioksidi täytyy joko paineistaa tai nesteyttää, riippuen kuljetustavasta, jotta kuljetuksen tehokkuus saadaan maksimoitua. Paineistuksella ja nesteytyksellä hiilidioksidin tiheyttä saadaan korotettua, jolloin samaan kuljetustilavuuteen saadaan mahdutettua enemmän hiilidioksidia. Optimaaliset kuljetusolosuhteet määräytyvät paineistuksen ja nesteytyksen energiankulutuksen sekä saavutettavan kuljetusolomuodon etujen perusteella. Esim. hiilidioksidia ei välttämättä ole edullista paineistaa mahdollisimman korkeaan paineeseen, vaikka sen tiheyttä saataisiin kasvatettua huomattavasti, sillä paineenkorotukseen kulunut energiamäärä saattaa mitätöidä tehokkaammasta kuljetustilavuuden käytöstä saavutetut edut.

Hiilidioksidin paineenkorotus tehdään monivaiheisessa prosessissa, missä hiilidioksidia komprimoidaan ja jäähdytetään vaiheittain. Jäähdytyksellä hiilidioksidista lauhdutetaan kosteus pois. Kosteuden poistolla estetään korroosiota ja hydraattimuodostumia laitteistoissa. Paineistuksen loppupaine määräytyy kuljetusmuodon mukaan. Paineistukseen tarvittava energiamäärä on esitetty kuvassa 8 (Teir et al. 2011a).



Kuva 8. Hiilidioksidin paineistukseen tarvittava energiamäärä (Teir et al. 2011a).

Hiilidioksidin nesteytys voidaan toteuttaa pääasiassa kahdella tavalla. Tavanomaisesti hiilidioksidi nesteytetään käyttämällä ulkoista jäähdytyskiertoa, jonka kylmäaineena käytetään yleensä joko ammoniakkia tai kevyitä hiilivetyjä. Tavanomaisessa tavassa hiilidioksidi komprimoidaan suoraan kuljetus- tai varastointipaineeseen, minkä jälkeen se nesteytetään jäähdyttimessä (Øi et al. 2016).

Vaihtoehtoisessa nesteytysprosessissa hiilidioksidi komprimoidaan kuljetus- tai varastointipainetta korkeampaan paineeseen. Komprimointi tehdään useassa vaiheessa ja hiilidioksidia jäähdytetään vaiheiden välissä, kunnes se nesteytyy. Tämän jälkeen hiilidioksidi paisutetaan kuljetus- tai varastointipaineeseen. Osa hiilidioksidista jää kaasumaiseen olotilaan

paisutuksen jälkeen. Tämä kaasumainen jae ohjataan takaisin nesteytysprosessin alkuun (Øi et al. 2016).

Tavanomainen nesteytysprosessi ei välttämättä tule soveltumaan suuren kokoluokan hiilidioksidin talteenottohankkeisiin, sillä sen kustannukset saattavat nousta liian suuriksi kalliiden kylmäaineiden takia. Vaihtoehtoinen tapa käyttää kylmäaineenaan itse hiilidioksidia, jolloin kylmäaineesta ei synny lisäkustannuksia (Øi et al. 2016).

Absorptioprosessilla savukaasuista erotetun hiilidioksidi nesteytys 15 bar(g) paineeseen kuluttaa sähköenergiaa noin 94,6 kWh/t<sub>CO2</sub> ja sen CAPEX-kustannus on noin 4,3 €/t<sub>CO2</sub> (Roussanaly et al. 2021).

## 5 Kuljetus

### 5.1 Putkikuljetus

Kaasumaisten aineiden putkikuljetus on kypsä teknologia, joka on laajassa kaupallisessa käytössä esim. maakaasun siirrossa ja jakelussa. Putkikuljetusta käytetään myös hiilidioksidin kuljetuksessa öljy- ja maakaasukentillä, missä sitä käytetään tehostamaan öljyn- ja maakaasunporausta (Teir et al. 2011a).

Putkikuljetus mahdollistaa suuret kuljetusvolyymit, mutta putki-infrastruktuurin rakentaminen vaatii suuren alkuinvestoinnin (Lu et al. 2020).

Toisin kuin maakaasu, hiilidioksidi ei vuotolanteessa aiheuta räjähdysvaaraa. Hiilidioksidi ei kuitenkaan ole täysin vaaratonta, sillä se kerääntyy matalille alueille vuotokohdan lähetyvillä ja aiheuttaa tukehtumisvaaran (Lu et al. 2020). Vaaran suuruus riippuu pääasiassa hiilidioksidivirrasta, vuotoajasta ja putken ympäristön olosuhteista, kuten tuulesta. Tarkemman vaara-arvion saaminen vaatisi onnettomuusmallinuksen suunnitellusta kuljetusputkesta.

Putkikuljetus ei rajoitu vain kaasumaisen hiilidioksidin kuljetukseen. Hiilidioksidi voidaan kuljettaa putkea pitkin myös nesteinä, superkriittisessä tilassa tai "dense-phase" tilassa. Kaikkiin neljään kuljetusolomuotoon liittyy etuja ja haittoja, jotka tulee ottaa huomioon putkilinjaston suunnittelussa käyttökohteeseen sopivaksi (Lu et al. 2020).

Kaasumaisessa kuljetuksessa hiilidioksidin paine ei saa missään kohtaa kuljetusta ylittää hiilidioksidin kriittistä painetta (7,38 MPa), jolloin kuljetettavan hiilidioksidin ominaispaino jää matalaksi verrattuna muihin kuljetusmuotoihin. Kaasumaisessa kuljetuksessa putkea ei kuitenkaan tarvitse eristää, sillä hiilidioksidi kuljetetaan ympäristön lämpötilassa. Tällöin lämpötilahäviöt eivät haittaa kuljetusta. Putken materiaalivaatimukset ovat myös kuljetusolotiloista matalimmat, sillä paineen pysyessä kohtuu alhaisena ei putken lujuusvaatimukset korotu turhan korkealle. Kaasukuljetuksen ekonomia on kuitenkin huono verrattuna esim. superkriittiseen ja dense-phase kuljetukseen. Tämä johtuu siitä, että kaasumaisen hiilidioksidin tiheys on alhaisempi mikä johtaa pienempiin kuljetettuihin hiilidioksidimääriin. Tämän takia hiilidioksidin kaasumainen putkikuljetus soveltuukin lähinnä lyhyen matkan (laitosetäisyys) kuljetuksiin, matalan kapasiteetin kohteisiin sekä asutuille alueille, missä putkiston käyttöpaine ei voi olla kovin korkea turvallisuussyistä (Lu et al. 2020).

Nestekuljetuksessa hiilidioksidi saatetaan nestemäiseen olomuotoon laskemalla sen lämpötilaa. Hiilidioksidin lämpötilan kontrollointi on nestemäisessä kuljetuksessa tärkeässä asemassa, ettei hiilidioksidi kaasuunnu sen lämpötilan noustessa. Hiilidioksidin kitka ja viskositeetti ovat matalia nestemäisessä muodossa, mitkä ovat positiivisia piirteitä kuljetuksen suhteen. Nestekuljetuksenkin ongelmaksi muodostuu sen matala siirtokapasiteetti, mikä rajoittaa sen käytön matalan kapasiteetin, tehostetun öljynporauksen ja asuttujen alueiden käyttökohteisiin (Lu et al. 2020).

Dense-phase olotilassa hiilidioksidi on saatettu kriittistä painetta (7,38 MPa) korkeampaan paineeseen, mutta kriittistä lämpötilaa (31,4 °C) matalampaan lämpötilaan. Tässä tilassa hiilidioksidin tiheys kasvaa lämpötilan laskiessa. Dense-phase kuljetuksen ekonomia on parempi kuin kaasu- ja nestekuljetuksessa, mutta korkeamman painetason takia se soveltuu käytettäväksi vain harvaan asutuilla alueilla. Parempi ekonomia johtuu suuremmasta saavutettavasta tiheydestä, jolloin kuljetusputkesta voidaan tehdä pienempi saman hiilidioksidivirtaaman kuljettamiseksi. Pienempi putkikoko laskee putken investointikustannuksia. Dense-phase kuljetuksella voidaan saavuttaa korkea siirtokapasiteetti, minkä takia se soveltuukin pitkän matkan kuljetukseen paremmin kuin kaasu- ja nestekuljetus (Lu et al. 2020).

Superkriittisessä tilassa hiilidioksidin paine ja lämpötila ovat korkeampia kuin hiilidioksidin kriittinen paine (7,38 MPa) ja lämpötila (31,4 °C). Tässä tilassa hiilidioksidi vastaa tiheydeltänsä nestemäistä hiilidioksidia, mutta viskositeetiltansa kaasumaista hiilidioksidia. Olotilavaihtoehtoista superkriittisellä kuljetuksella on paras ekonomia dense-phase kuljetuksen ohella. Parempi ekonomia johtuu suuremmasta saavutettavasta tiheydestä, jolloin kuljetusputkesta voidaan tehdä pienempi saman hiilidioksidivirtaaman kuljettamiseksi. Pienempi putkikoko laskee putken investointikustannuksia. Superkriittisellä putkikuljetuksella voidaan saavuttaa korkea siirtokapasiteetti, minkä takia se soveltuu hyvin pitkän matkan kuljetukseen. Korkeamman painetason takia se soveltuu kuitenkin käytettäväksi vain harvaan asutuilla alueilla (Lu et al. 2020).

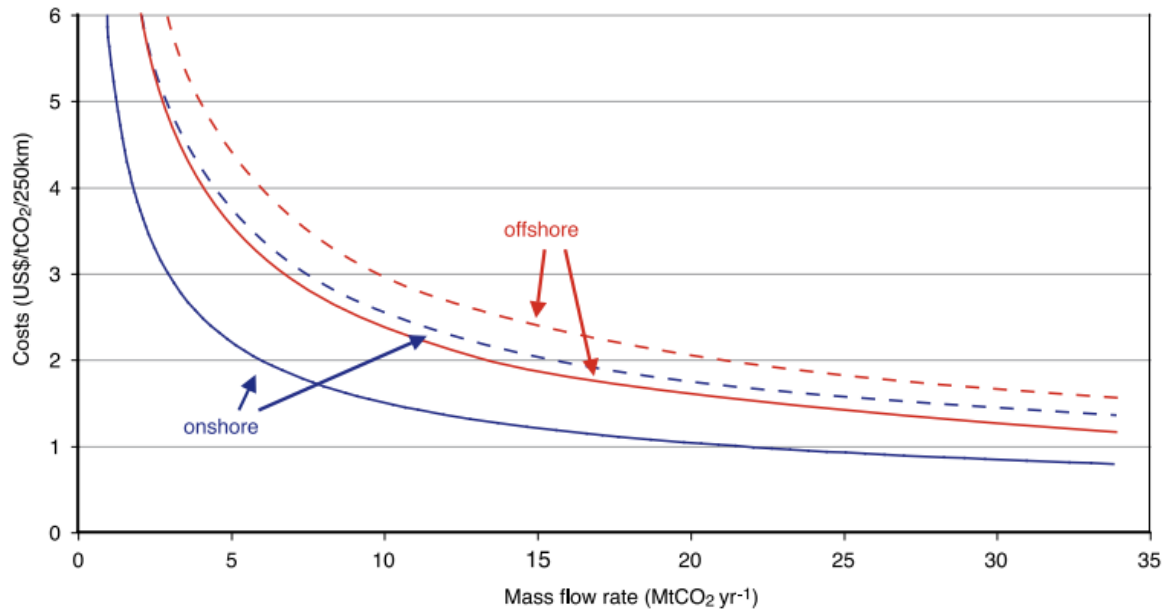
Superkriittisestä ja dense-phase kuljetuksesta todennäköisesti paremmin Suomen olosuhteisiin sopii dense-phase. Tämä johtuu siitä, että superkriittinen hiilidioksidi täytyy pitää jatkuvasti yli 31,4 °C lämpötilassa, mikä johtaa ylimääriin lämmityskustannuksiin. Sen sijaan dense-phase olotilan lämpötilaväli (-56 – 31,4 °C) (Wang et al. 2016) on huomattavasti otollisempi, kun otetaan huomioon Suomen sääolosuhteet. Tällöin hiilidioksidivirtaa ei tarvitsisi jäähdyttää käytännössä koskaan, lukuun ottamatta korkeimpia hellehuippuja. Dense-phase kuljetuksen paineputoama on myös hieman pienempi kuin superkriittisen kuljetuksen.

Mitä tahansa neljästä putkikuljetusolomuodosta käytetäänkään, täytyy hiilidioksidin painetta korottaa paineenkorotusasemilla tasaisin välimatkoin. Muutoin hiilidioksidin paine laskee liikaa ja se alkaa siirtymään kaasumaiseen olotilaan, jolloin syntyvä kaasukupla saattaa tukkia putken. Tämä ei luonnollisesti päde kaasukuljetuksessa. Painetta täytyy kuitenkin korottaa kaasukuljetuksessakin, jotta kaasun painetaso säilyy tarpeeksi korkeana tehokkaan kuljetuksen mahdollistamiseksi (Lu et al. 2020).

Siirrettävä hiilidioksidivirta myös sisältää käytännössä aina epäpuhtauksia. Nämä epäpuhtaudet saattavat aiheuttaa korroosiota siirtoputkessa, mikä lisää vuotojen syntymisen riskiä. Yleisimpien epäpuhtauksien korroosiovaarat on kuitenkin helppo minimoida, esim. vety aiheuttaa vetyhaurautta teräksessä, mutta oikealla putken materiaalivalinnalla tämä riski saadaan minimoitua. Erikoisteräkset ovat kuitenkin yleensä kalliita, joten materiaalivalinta saattaa vaikuttaa negatiivisesti kuljetuksen ekonomiaan. Vesi on erityisen hankala epäpuhtaus hiilidioksidissa, sillä se muodostaa karbonaatteja hiilidioksidin kanssa, jotka laskevat kaasuvirran pH-arvoa ja aiheuttavat syöpymistä putkessa. Rikkivety ja happi kiihdyttävät karbonaattien aiheuttamaa korroosiota. Veden läsnäolo hiilidioksidivirrassa saattaa synnyttää myös hiilidioksidin hydraatteja, mitkä voivat tukkia putken (Lu et al. 2020).

Gao et al. (2011) arvioi putkikuljetuksen kustannusten olevan noin 4,3 €/2011/t<sub>CO2</sub>/300 km (5,01 €/2022/t<sub>CO2</sub>/300 km), kun kuljetettavan hiilidioksidin määrä on 1,46 Mt<sub>CO2</sub>/a. IPCC:n (2005) arvio putkikuljetuksen kustannuksista on esitetty kuvassa 9, mistä voidaan nähdä kustannusten kasvavan erittäin jyrkästi, kun kuljetettavan hiilidioksidin määrä putoaa alle 5 Mt<sub>CO2</sub>/a, mikä mahdollistaa rekka- ja juna kuljetuksen kustannustehokkaan käytön pienemmillä hiilidioksidimäärillä. Kuva 9 esittää putkikuljetuksen kustannuksia yleisesti, eikä minkään tietyn putkikuljetusolomuodon kustannuksia.





Kuva 9. Hiilidioksidin putkikuljetuksen kustannus suhteessa kuljetettavan hiilidioksidin määrään.

## 5.2 Laivakuljetus

Hiilidioksidin laivakuljetus on mahdollinen vaihtoehto putkikuljetukselle suuren kokoluokan hankkeissa. Putkikuljetukseen verrattuna laivakuljetus tarjoaa joustavuutta erityisesti tilanteissa, joissa varastointikohteita on useita. Laivakuljetus voi myös edistää hiilidioksidin talteenottokehteiden kehittymistä, ennen kuin kaapatut hiilidioksidimäärät ovat tarpeeksi suuria oikeuttamaan kuljetusputken investointikustannukset (IEA 2020).

Hiilidioksidin laivakuljetukseen tarvittava teknologia on hyvin tunnettua LPG- ja LNG-laivojen kautta, missä normaaleissa olosuhteissa kaasumainen aine kuljetetaan nestemäisessä tilassa. LPG:n laivakuljetus on hieman lähempänä hiilidioksidin laivakuljetusta, sillä siinä LPG kuljetetaan matalan lämpötilan lisäksi myös ilmanpainetta korkeammassa paineessa. LNG sen sijaan kuljetetaan yleensä ilmanpaineessa, mutta silti matalassa lämpötilassa nestemäisessä tilassa (IEA 2020).

Hiilidioksidin laivakuljetusta ei ole demonstroitu suuressa kokoluokassa ja sen teknologinen valmiustaso on 4-7. Sen odotetaan olevan kilpailukykyinen teknologia putkikuljetukseen verrattuna tapauksissa, joissa kuljetettavat hiilidioksidimäärät ovat alle 2 miljoonaa tCO<sub>2</sub>/a tai kun välimatkat ovat tarpeeksi suuria (IEA 2020).

Tällä hetkellä pienen mittakaavan hiilidioksidin laivakuljetusolosuhteina käytetään -30 – -20 °C ja 15 – 20 bar(g). Kuljetusolosuhteita on suunniteltu laskettavaksi -55 – -40 °C:een ja 5 – 10 bar(g):en kuljetuksen kustannustehokkuuden parantamiseksi (Orchard et al. 2021).

Puhtaiden hiilidioksidivirtojen käsittely on hyvin tunnettu prosessi, mutta veden, hapen ja muiden epäpuhtauksien läsnäolo aiheuttaa vaikeuksia hiilidioksidin kuljetus- ja varastointiprosesseissa. Tämän takia hiilidioksidin puhdistus ennen nesteytystä tai sen aikana on tärkeä osa hiilidioksidin kuljetusketjua, samoin kuin materiaalivalinnat kuljetus- ja varastointilaitteistossa (Orchard et al. 2021).

Orchard et al. (2021) arvioi laivakuljetuksen kustannusten olevan Northern Lights -projektin tyyppiselle varastointiratkaisulle 25 €<sub>2021</sub>/tCO<sub>2</sub> (26,81 €<sub>2022</sub>/tCO<sub>2</sub>) ilman nesteytystä. Tämä luku ei

ole myöhemmin esiteltävän Northern Lights -projektin kuljetus- ja varastointikustannuksen (80-100 €/t) kanssa, joka sisältää laivakuljetuksen tuotantokustannuksen lisäksi hiilidioksidin vastaanottokeskuksen, putkikuljetuksen, pysyvän varastoinnin ja yritystoiminnan katteen.

Laivakuljetuksen kustannuksia voidaan vähentää kasvattamalla yksittäisen laivan kapasiteettia ja purkunopeutta, mikäli näillä toimenpiteillä saadaan laskettua kuljetukseen tarvittavien laivojen määrää. Laivan kapasiteetin ylärajaksi on kuitenkin arvioitu muodostuvan 10 000 t<sub>CO2</sub>, sillä kapasiteetin nosto tämän arvon yli laskee kustannuksia enää vähän tai ei juuri ollenkaan (Orchard et al. 2021).

### 5.3 Rekka- ja junakuljetus

Putki- ja laivakuljetuksen lisäksi hiilidioksidia voidaan kuljettaa myös junalla tai rekalla, mikä voi olla ekonomisesti järkevää lyhyillä matkoilla ja pienillä hiilidioksidin määrillä. Laivakuljetuksen tavoin hiilidioksidi kuljetetaan rekka- ja junakuljetuksessakin nesteenä. Rekka- ja junakuljetuksen ei kuitenkaan odoteta näyttävän isoa osaa tulevaisuuden CCS-infrastruktuurissa, sillä putki- ja laivakuljetuksen odotetaan olevan huomattavasti kustannustehokkaampaa, kun kuljetettavan hiilidioksidin määrät nousevat miljooniin tonneihin vuodessa (Smith et al. 2021). Rekka- ja junakuljetus voi olla myös kilpailukykyinen kohteissa, joissa hiilidioksidin lähteenä olevan voimalaitoksen elinikä on alle 23 vuotta (Leung et al. 2014). Rekkakuljetuksen on arvioitu olevan ekonomisesti järkevämpää kuin putkikuljetus, kun kuljetettavan hiilidioksidin määrä on vähemmän kuin 500 000 t<sub>CO2</sub>/a (Psarras et al. 2020).

Psarras et al. (2020) arvioi rekkakuljetuksen maksavan 0,14 \$<sub>2020</sub>/t<sub>CO2</sub>/maili (0,08 €<sub>2022</sub>/t<sub>CO2</sub>/km), kun kuljetettavan hiilidioksidin määrän kokoluokka on sadoista tuhansista miljooniin tonneihin vuodessa. Gao et al. (2011) arvioi junakuljetuksen kustannusten olevan noin 7,7 €<sub>2011</sub>/t<sub>CO2</sub>/300 km (0,03 €<sub>2022</sub>/t<sub>CO2</sub>/km), kun kuljetettavan hiilidioksidin määrä on 1,46 Mt<sub>CO2</sub>/a.

Rekka- ja junakuljetus on Tampereen Sähkölaitokselle todennäköisin kuljetusvaihtoehto voimalaitokselta satamaan matalan vuosittaisen hiilidioksidivirran (400 000 t<sub>CO2</sub>/a) takia. Tässä työssä kuljetuskustannuslaskennassa käytetään rekkakuljetusta, sillä pienin hiilidioksidimäärä mille junakuljetuksen kustannuksia oli arvioitu kirjallisuudessa, oli yli 1 000 000 t<sub>CO2</sub>/a.

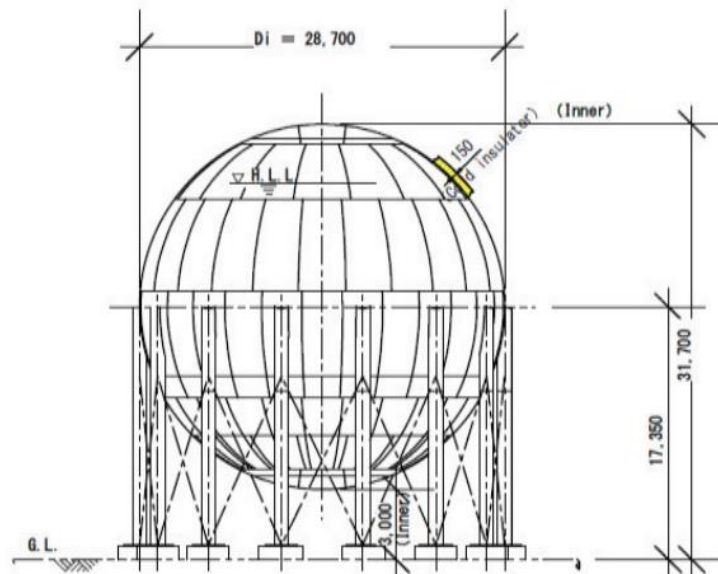
## 6 Välivarastointi

Hiilidioksidille tarvitaan myös välivarastointikapasiteettia eri kuljetusmuotojen välissä, esim. rekkakuljetuksesta siirryttäessä laivakuljetukseen. Varastointikapasiteettia tarvitaan myös talteenottolaitoksen yhteyteen.

Naistenlahti 3:lta voidaan ottaa talteen noin 900-1 000  $t_{CO_2}/d$ , riippuen käytettävästä talteenottoteknologiasta. Nestemäistä hiilidioksidia kuljettavien säiliörekkojen kapasiteetti on noin 20-30 tonnia (Lee et al. 2017), eli Naistenlahti 3:n päivittäinen talteenotettava hiilidioksidimäärä vastaa noin 30-50 säiliörekkalastia.

Nestemäistä hiilidioksidia kuljettavien laivojen kapasiteetti on noin 10 000  $t_{CO_2}$ , joten satamaan tarvittava hiilidioksidin välivarastoinnin tarve on vähintään yhtä suuri. 10 000 tonnia hiilidioksidia vastaa noin 10-11 päivän talteenotettua hiilidioksidimäärää.

Hiilidioksidi voidaan varastoida samassa olomuodossa missä sen kuljetus tapahtuu. Putkikuljetus poisluettuna tämä tarkoittaisi aina varastointia nestemäisessä olomuodossa. Nestemäisen hiilidioksidin varastointiin käytetään eristettyjä ja jäädytettyjä säiliöitä, joko maanpäällisinä tai maanalaisina asennuksina. Kuvassa 10 on esitetty nestemäisen hiilidioksidin varasto, jonka kapasiteetti on noin 12 000  $t_{CO_2}$ . Varastona voidaan käyttää myös sylinterimäisiä säiliöitä, joita voidaan käyttää joko pysty- tai vaaka-asennettuina. Sylinterimäisiä hiilidioksidivarastoja näkyy kuvissa 11 ja 12.



Kuva 10. Nestemäisen hiilidioksidin varasto, jonka kapasiteetti on 12 000  $t_{CO_2}$ .



Kuva 11. Vaaka-asenteinen hiilidioksidisäiliö.



Kuva 12. Pystyasenteinen hiilidioksidisäiliö.

Välivarastointikapasiteettia tarvitaan talteenottolaitokselle ja satamaan yhdistämään talteenoton jatkuvuus ja eri kuljetusmuotojen epäjatkuvuus. Poikkeuksena tästä on putkikuljetus, jolloin kuljetusketju olisi mahdollista toteuttaa teoriassa ilman välivarastoa talteenottolaitoksen yhteydessä. Käytännön syistä välivarasto kuitenkin todennäköisesti tarvittaisiin tässäkin tapauksessa, sillä putkikuljetukseenkin voi tulla keskeytyksiä esim. vuotojen tai huoltojen takia. Siirto satamassa sijaitsevasta välivarastosta laivaan tapahtuu kuvassa 13 näkyvien siirtokäsien avulla.



Kuva 13. Konseptikuva hiilidioksiditerminaalista. Kuvassa näkyy kaksi laivaan kiinnittynyttä siirtokäyttä, joiden avulla nestemäinen hiilidioksidi lastataan laivaan (Suzuki et al. 2013).

## 7 Varastointi

Hiilidioksidin voidaan varastoida geologisiin muodostumiin. Jotta niihin voidaan varastoida hiilidioksidia, täytyy niissä olla huokoinen ja sulkeva kerrostuma. Huokoinen kerros voidaan pumpata täyteen hiilidioksidia samalla, kun tiivis läpäisemätön kerrostuma estää hiilidioksidia karkaamasta huokoisesta kerroksesta. Tämä vaatii sen, että läpäisemätön kerros muodostaa alaspäin aukeavan kupin muodon. Tällöin hiilidioksidi ei pääse nousemaan muodostuman reunoilta maakerroksen läpi ja vapautumaan ilmakehään. Sopivia kerrostumia on käytännössä kahdenlaisissa geologisissa muodostumissa: tyhjentyneissä öljy- ja maakaasukentissä sekä suolaisissa akvifereissa (Equinor 2022).

Hiilidioksidin pumppauksen jälkeen varastoa täytyy valvoa sen varalta, että hiilidioksidi vuotaa ulos muodostumasta. Varastoa valvotaan pääasiassa kahdella menetelmällä. Huokospainetta käytetään määrittämään varaston täyttöastetta (Equinor 2022). Mikäli huokospaine kasvaa hiilidioksidin pumppauksen yhteydessä muodostumassa liian suureksi, voi se johtaa murtumien syntymiseen. Murtumat voivat vaarantaa varaston pitävyyden ja aiheuttaa hiilidioksidin vuotamista muodostumasta (Konstantinovskaya & Malo 2012). Varastoa valvotaan myös seismisillä mittauksilla, joilla voidaan valvoa hiilidioksidin jakautumista varastona toimivaan muodostumaan. Seismisillä mittauksilla valvotaan myös varaston pitävyyttä, sillä tällaisilla mittauksilla voidaan havaita pieniäkin hiilidioksidivuotoja. Muodostelman täytyttyä sen valvontaa jatketaan vähintään 20 vuoden ajan varastojen toimesta. Kun varasto todetaan stabiiliksi, sen operointi luovutetaan EU:n CCS direktiivin mukaisille viranomaisille (Equinor 2022).

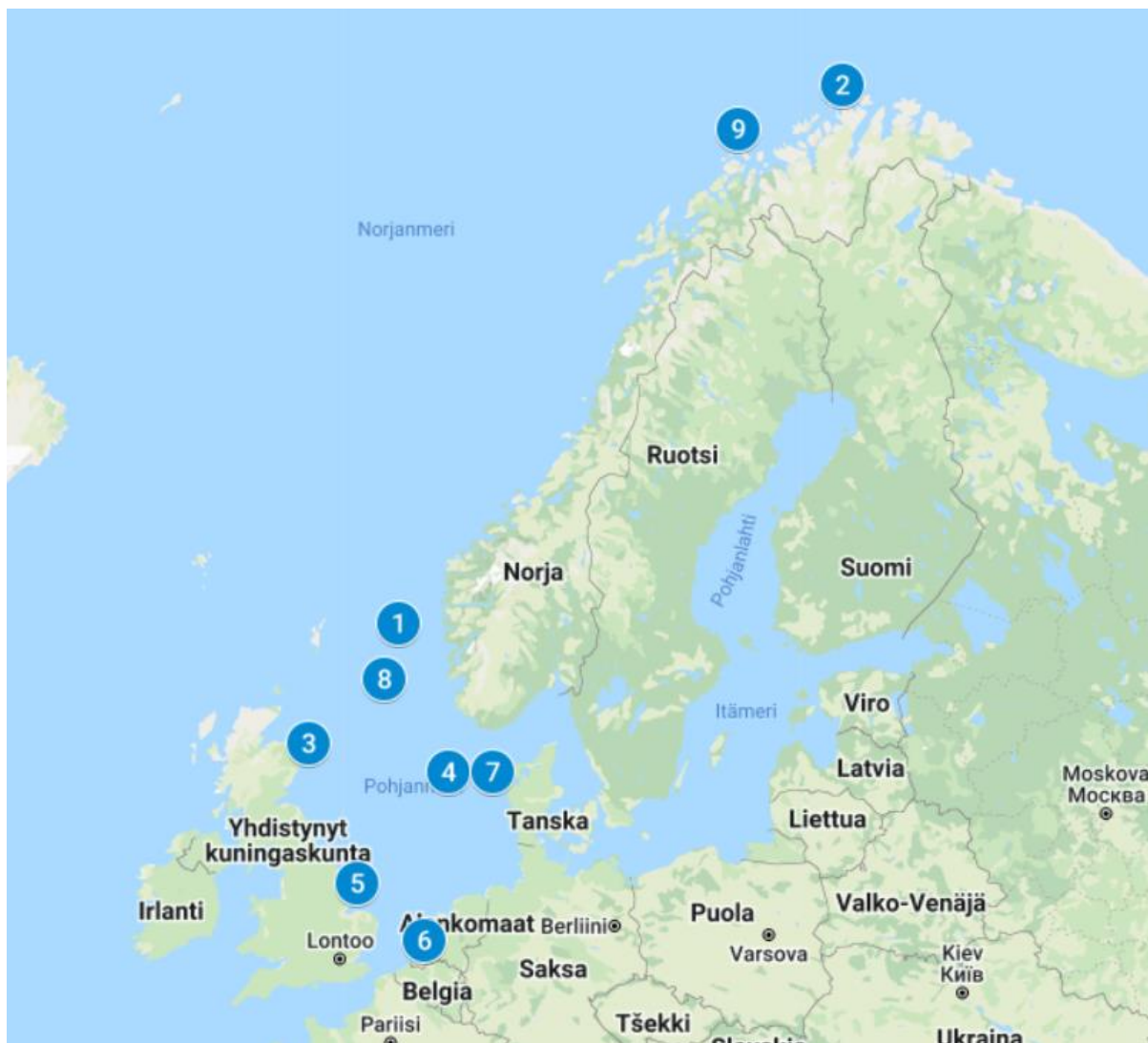
Ajan kuluessa muodostelmaan varastoitu hiilidioksidi liukenee sen sisältämään veteen. Tällöin veden tiheys kasvaa ja vesi uppoaa syvemmälle, parantaen varastoinnin varmuutta. Osa veteen liuenneesta hiilidioksidista muodostaa myös mineraaleja, lukiten varastoidun hiilidioksidin pysyvästi paikoilleen (Equinor 2022).

IPCC:n (2005) arvion mukaan hiilidioksidin varastoinnin kustannus on välillä 0,5-8,0 \$<sub>2005</sub>/t<sub>CO2</sub> (0,7-11,17 €<sub>2022</sub>/t<sub>CO2</sub>). Kustannusvälin alhaisempi pää kuvaa varastoja, jotka ovat maalla, matalia, omaavat korkean läpäisykyvyn ja/tai ovat uudelleenkäytettyjä öljy- ja maakaasukenttiä.

Euroopan hiilidioksidin loppusijoituskapasiteetin on arvioitu olevan noin 117 Gt (Teir et al. 2011b). Euroopan Unionin hiilidioksidipäästöt olivat noin 2 500 Mt vuonna 2020 (Statista 2022), joten Euroopassa sijaitsevaan loppusijoituskapasiteettiin voitaisiin varastoida Euroopan Unionin noin 47 vuoden hiilidioksidi päästöt olettaen, että vuosittainen päästömäärä ei muutu ja kaikki varastointikapasiteetti saataisiin käyttöön.

### 7.1 Projektit

Tässä alaluvussa esitellyt hiilidioksidin varastointiprojektit näkyvät kuvassa 14 sijoitettuna kartalle.



Kuva 14. Työssä esitellyt CCS-projektit sijoitettuna kartalle. 1. Northern Lights 2. Barents Blue/Polaris 3. Acorn 4. Greensand 5. Northern Endurance Partnership 6. Porthos 7. Bifrost 8. Sleipner 9. Snöhvit.

#### 7.1.1 Northern Lights

Northern Lights on hiilidioksidin varastointiprojekti Norjassa. Projekti tarjoaa eurooppalaisille yrityksille mahdollisuuden varastoida hiilidioksidipäästöjään Pohjanmerellä sijaitsevaan loppusijoituskohteeseen (Northern Lights 2022a).

Hiilidioksidi tullaan kuljettamaan erikseen projektia varten suunnitelluilla laivoilla vastaanottoterminaaliiin, joka tulee sijoittumaan Øygardeniin Norjan länsirannikolla. Asiakkaan tulee siis toimittaa varastoitava hiilidioksidi nestemäisessä muodossa satamaan, mistä Northern Lights ottaa sen vastaan laivoillansa. Toimitettavan hiilidioksidin laatuvaatimukset on esitetty taulukossa 6. Vastaanottoterminaalista hiilidioksidi pumpataan putkea pitkin merellä sijaitsevaan suolavesikerrostumaan, mihin se varastoituu pysyvästi (Northern Lights 2022a).

Taulukko 6. Northern Lights:in laatuvaatimukset toimitettavalle nestemäiselle hiilidioksidille (Northern Lights 2022c).

Epäpuhtaus	Konsentraatio [ppm]
Vesi (H <sub>2</sub> O)	≤30
Happi (O <sub>2</sub> )	≤10
Rikkioksidit (SO <sub>x</sub> )	≤10
Typpioksidit (NO <sub>x</sub> )	≤10
Rikkivety (H <sub>2</sub> S)	≤9
Hiilimonoksidi (CO)	≤100
Amiinit	≤10
Ammoniakki (NH <sub>3</sub> )	≤10
Vety (H <sub>2</sub> )	≤50
Formaldehydi	≤20
Asetaldehydi	≤20
Elohopea (Hg)	≤0,03
Kadmium (Cd), Tallium (Tl)	Yhteensä ≤ 0,03

Teollisen hiilidioksidin laatuvaatimukset asettavat vaatimuksen vain veden (≤100 ppm) ja hapen (≤20 ppm) tasoille. Northern Lights -projektin laatuvaatimus on siis tiukempi, kuin teollisen hiilidioksidin. Northern Lights -projektin ilmoittamat epäpuhtaustasot on kuitenkin saavutettavissa oikein suunnitellulla puhdistusprosessilla nesteytysprosessiin liitettynä.

Northern Lights -projektiin voi toimittaa hiilidioksidia mistä tahansa satamasta, joka täyttää seuraavat standardit:

1. International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gas in Bulk (IGC Code)
2. OCIMF "Mooring Equipment Guidelines (4th Edition, 2018)"
3. SIGTTO/OCIMF "Recommendations for Liquefied Gas Carriers Manifolds" 2 nd edition 2018
4. SIGTTO "Recommendations and Guidelines for Linked Ship/Shore Emergency Shutdown of Liquefied Gas Cargo Transfer System"
5. SIGTTO "Recommendations for the Installation of Cargo Strainers"
6. SIGTTO "Guidelines for the Alleviation of Excessive Surge Pressures on ESD, 1987"
7. ISGOTT, 5th Edition – item 8.1.2 re International Ship Shore Fire Connection & 26.5.3
8. SGMF standard for LNG bunkering and applicable ISO standards e.g., 20519, 16904
9. EMSA Guidance on LNG Bunkering to Port Authorities/Administrations
10. ICS/OCIMF/SIGTTO "Ship to Ship Transfer Guide for Petroleum, Chemicals and Liquefied Gases"
11. PIANC MarCom WG 33: Guidelines for the Design of Fender Systems (2002-2004)
12. PIANC MarCom WG 153: Recommendations for the Design and Assessment of Marine Oil and Petrochemical Terminals (2016)

Projektin kuljetus- ja varastointikapasiteetti tulee olemaan noin 1,5 miljoonaa t<sub>CO2</sub>/a, toiminnan alkaessa vuonna 2024. Kapasiteettia on tarkoitus kasvattaa toiminnan käynnistymisen jälkeen 5 miljoonaan t<sub>CO2</sub>:iin, mikäli kysynnän taso sen mahdollistaa (Northern Lights 2022b).

Northern Lights on osa Norjan valtion Longship-projektia, minkä tarkoituksena on kehittää täysmittainen toimitusketju hiilidioksidin talteenotolle, kuljetukselle ja varastoinnille. Northern Lights vastaa Longship-projektin kuljetus- ja varastointitoiminnasta (Northern Lights 2022a).



Longship-projektiin kuuluu myös kaksi hiilidioksidin talteenottohanketta, jotka toteutuessaan käyttäisivät 800 000 t<sub>CO2</sub>:ia Northern Lights'in vuosittaisesta varastointikapasiteetista. Jäljelle jäävä osuus varastointikapasiteetista tullaan täyttämään kolmansien osapuolten hiilidioksidipäästöillä (Northern Lights 2022b).

Northern Lights arvioi hiilidioksidin kuljetus- ja varastointikustannusten olevan 80-100 €/t<sub>CO2</sub>, kun hiilidioksidi tuodaan Suomesta. Arvion toimitusketju alkaa yhtiön laatuvaatimuksia vastaavan nesteytetyn hiilidioksidin noudosta satamasta laivalla ja päättyy hiilidioksidin loppusijoitukseen varastona toimivaan geologiseen muodostelmaan Norjan länsirannikolla. Kustannusarvioon ei siis sisälly hiilidioksidin nesteytys ja sen kuljetus päästölähteestä satamaan.

#### 7.1.2 Barents Blue ja Polaris

Norjalainen "clean energy"-yhtiö Horisont Energi kehittää Barents Blue-hanketta, minkä tarkoituksena on rakentaa Norjan Finnmarkiin ammoniakkin tuotantolaitos. Ammoniakin raaka-aineena tullaan käyttämään maakaasun reformaatiolla tuotettua vetyä. Reformaatioprosessissa syntynyt hiilidioksidi otetaan talteen HPC (hot potassium carbonate; kuuma kaliumkarbonaatti) -absorptioprosessilla. Tuotettu vety vastaa siis statukseltaan englannin kielistä termiä "blue hydrogen". Hiilidioksidista tullaan saamaan talteen >99 % ja sitä tullaan varastoimaan 2 Mt<sub>CO2</sub>/a (Horisont Energi 2022a). Hiilidioksidi varastoidaan "Polaris"-nimiseen varastoon, joka sijaitsee Barentsinmerellä. Sen kokonaiskapasiteetin on arvioitu olevan yli 100 Mt<sub>CO2</sub>, josta 74 Mt<sub>CO2</sub> on vielä varaamatta (Horisont Energi 2022b).

Hankkeelle odotetaan saavan investointipäätös vuoden 2022 loppuun mennessä ja laitoksen suunniteltu käyttöönotto on vuonna 2025 (Horisont Energi 2022a).

Polaris sopii Tampereen Sähkölaitoksen käyttötarkoituksiin, sillä kolmannet osapuolet voivat ostaa varastointikapasiteettia. Suurin este Tampereen Sähkölaitoksen hiilidioksidin varastoinnille Polarikseen on suuri etäisyys tuotantopaikan ja loppusijoituspaikan välillä. Hiilidioksidi pitäisi kuljettaa meriteitse (~3 700 km) laivakuljetuksella tai maateitse (~1 400 km), joko rekkakuljetuksella tai putkikuljetuksella.

#### 7.1.3 BASRECCS

BASRECCS on hiilidioksidin talteenotto- ja varastointiasiantuntijoiden verkosto, joka on perustettu tukemaan Itämeren alueen hiilidioksidin varastointimahdollisuuksien kartoittamista.

Järjestö oli mukana toteuttamassa CGS Baltic seed (S81) -projektissa, minkä perusteella Itämeren alueella on paljon potentiaalista hiilidioksidin varastointikapasiteettia. Potentiaalisimmiksi alueiksi todettiin Ruotsi, Latvia, Liettua, Puola ja Venäjä (BASRECCS 2022a).

BASRECCS:n tavoitteena on tukea hiilidioksidin talteenotto- ja varastointiprojektien kehitystä Itämeren alueella sekä kommunikoida ja jakaa tietämystensä oleellisten sidosryhmien välillä (BASRECCS 2022b). Järjestöllä ei kuitenkaan ole omia varastointihankkeita, joita Tampereen Sähkölaitos voisi hyödyntää. BASRECCS voi kuitenkin olla tulevaisuudessa keskeinen sidosryhmä Suomeen sijoittuville hiilidioksidin varastointihankkeille.

#### 7.1.4 Acorn

Acorn on Koillis-Skotlannin rannikolla sijaitsevaan St. Fergusin kaupunkiin sijoittuva hiilidioksidin talteenotto- ja varastointiprojekti (The Acorn Project 2022).

Projektin ensimmäisessä vaiheessa on tarkoitus rakentaa hiilidioksidin talteenottokyky St. Fergusin kaasuterminaaliin ja varastointi-infrastruktuuri. Varastona tulee toimimaan suuri hiekkakivimuodostelma Pohjanmerellä, noin 100 km päässä rannikosta. Ensimmäisen vaiheen

varastointikapasiteetti on noin 300 000 t<sub>CO2</sub>/a ja toiminnan suunnitellaan käynnistyvän 2020 vuosikymmenen puolivälissä (The Acorn Project 2022).

Toisessa vaiheessa toimintaa on tarkoitus laajentaa kansainväliseksi hiilidioksidin varastointikeskukseksi, mikä mahdollistaa hiilidioksidin varastoinnin muille talteenottoprojekteille Isossa-Britanniassa ja Euroopan Unionissa. Toisen vaiheen aikataulusta ei ole tietoa (The Acorn Project 2022).

#### 7.1.5 Greensand

Greensand on tanskalainen hiilidioksidin varastointiprojekti, jonka suunniteltu varastointikapasiteetti on 0,5-1 Mt<sub>CO2</sub> vuonna 2025 ja 4-8 Mt<sub>CO2</sub>/a vuonna 2030. Hankkeen lopullinen investointipäätös tehdään pilot vaiheen jälkeen, vuoden 2023 jälkimmäisellä vuosipuoliskolla (Ineos 2021).

Greensand-projektin pilot-vaiheen, missä hiilidioksidin varastoinnin toteutettavuutta testataan projektin Pohjanmerellä sijaitsevaan varastoon ensimmäisen kerran, odotetaan olevan käynnissä vuoden 2022 loppuun mennessä (Wintershall Dea 2021). Pilot vaiheen ensimmäiset varastoitavat hiilidioksidit tulevat hankkeen johtoyrityksen Ineos-yhtiön oksiditehtaalta Belgiasta (Greensand 2022), mistä ne kuljetetaan varastopaikalle laivakuljetuksella (Wintershall Dea 2021). Hankkeen varastona toimii tyhjentyneet öljy- ja maakaasukenttä (Ineos 2021).

Hankkeen hyödynnettävyys Tampereen Sähkölaitoksen suhteen on epäselvää, sillä lähteistä ei löytynyt tietoa kolmansien osapuolien osallistumisesta hiilidioksidin varastointitoimintaan.

#### 7.1.6 Northern Endurance Partnership

Northern Endurance Partnership tulee tuottamaan hiilidioksidin talteenotto- ja varastointi-infrastruktuurin Net Zero Teesside-projektille, joka suunnittelee 860 MW:n kaasuturbiinilaitoksen rakentamista Englannin itärannikolle, Teessiden kaupunkiin. Kaasuturbiinilaitos sisältäisi amiiniabsorptioon perustuvan hiilidioksidin talteenottolaitteiston, joka tuottaisi varastoitavaa hiilidioksidia jopa 2 Mt<sub>CO2</sub>/a (Net Zero Teesside 2022a).

Varastoitava hiilidioksidi kuljetetaan Pohjanmerellä sijaitsevalle "Endurance"-nimiselle varastolle putkea pitkin. Varastona toimiva muodostelma on suolainen akviferi, jonka kokonaiskapasiteetin on arvioitu olevan jopa 450 Mt<sub>CO2</sub>. Varaston lähellä on muitakin potentiaalisia varastointikohteita, jotka voisivat nostaa kapasiteetin jopa 1 000 Mt<sub>CO2</sub> asti (Net Zero Teesside 2022b).

Hankkeen hyödynnettävyys Tampereen Sähkölaitoksen suhteen on epäselvää, sillä lähteistä ei löytynyt tietoa kolmansien osapuolien osallistumisesta hiilidioksidin varastointitoimintaan.

#### 7.1.7 Porthos

Porthos on Alankomaihin Rotterdamin satamaan sijoittuva hiilidioksidin kuljetus- ja varastointiprojekti. Projektin tarkoituksena on kerätä Rotterdamin satama-alueen yrityksien hiilidioksidipäästöjä alueen läpi kulkevaan putkiverkostoon, mistä se kuljetetaan Pohjanmerellä sijaitsevaan varastoon. Hiilidioksidivarastona toimii tyhjentyneet maakaasukenttä, jonka kokonaisvarastointikapasiteetti on 37 Mt<sub>CO2</sub>. Hiilidioksidia aiotaan varastoida noin 2,5 Mt<sub>CO2</sub>/a 15 vuoden ajan (Porthos 2022a).

Hankkeesta ei ole tehty vielä investointipäätöstä, mutta sen odotetaan olevan valmis vuoden 2022 toisella puoliskolla. Järjestelmän odotetaan olevan toiminnassa 2024-2025 (Porthos 2022a).

Porthos on verkkosivustonsa mukaan ns. "open access" hanke, mutta lähteessä ei mainita onko hankkeeseen mahdollista tuoda hiilidioksidia Rotterdamin sataman ulkopuolelta laivakuljetuksella. Porthokseen ei myöskään tällä hetkellä voi osallistua enää lisää yrityksiä, sillä hankkeen varastointikapasiteetti on täynnä. Kapasiteetin nostosta tulevaisuudessa ei löytynyt tietoa (Porthos 2022b). Tämän perusteella hanke ei sovellu Tampereen Sähkölaitoksen käyttöön.

#### 7.1.8 Bifrost

Bifrost on tanskalainen hiilidioksidin varastoinnin tutkimus- ja demonstraatioprojekti, jonka tavoitteena on arvioida Pohjanmerellä sijaitsevan "Harald"-nimisen tyhjentyneen öljy- ja maakaasukentän käytettävyyttä hiilidioksidin varastointiin. Projektin suunniteltu varastointikapasiteetti täydessä mittakaavassa on 3 Mt<sub>CO2</sub>/a (SCCS 2022). Bifrost sai vuoden 2021 lopussa Tanskan valtiolta noin 10 miljoonan €:n rahoituksen (Noreco 2022).

Bifrost tällä hetkellä sovellu Tampereen Sähkölaitoksen käyttöön sen varhaisen kehitysvaiheen vuoksi. Kolmansien osapuolien mahdollisuudesta osallistua hiilidioksidin varastointiin ei löytynyt tietoa.

#### 7.1.9 Sleipner ja Snøhvit

Norjalainen öljy- ja maakaasuyhtiö Equinor on jo vuodesta 1996 lähtien varastoinut Pohjanmerellä sijaitsevalta Sleipner-maakaasukentältänsä tuottamastansa maakaasusta erotettua hiilidioksidia geologisiin muodostelmiin. Vuonna 2008 yhtiö aloitti myös Barentsinmerellä sijaitsevan maakaasukenttä Snøhvit:in maakaasusta erotetun hiilidioksidin varastoinnin. Kumpikin hiilidioksidin varastointitoiminta käyttää hiilidioksidin talteenottoteknologiana amiiniabsorptiota. Sleipner- ja Snøhvit-maakaasukentiltä oli vuoden 2017 loppuun mennessä varastoitu yhteensä 22 Mt hiilidioksidia (Ringrose 2018). Yksinään Sleipner-kentän CCS-projektissa oli varastoitu hiilidioksidia 19 Mt vuoden 2020 loppuun mennessä, mikä vastaa noin 10 miljoonan auton vuosittaisia päästöjä (Equinor 2022).

Sleipner- ja Snøhvit-maakaasukentillä käynnissä olevat CCS-projektit eivät sovellu Tampereen Sähkölaitoksen käyttötarkoituksiin, sillä projekteissa varastoidaan vain maakaasukentiltä tuotettua hiilidioksidia eikä kolmansien osapuolien hiilidioksidia.

## 8 Kannattavuuslaskenta

Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin kannattavuuden arvioimista varten rakennettiin Excel-laskuri. Laskuriin voidaan syöttää kaikki hiilidioksidin talteenottoteknologiaa koskevat perustiedot. Laskuriin voidaan syöttää myös hiilidioksidin kuljetus- ja varastointikustannusarvio, jolloin koko hiilidioksidin talteenoton kannattavuutta voidaan tarkastella ottaen huomioon koko ketjun tuottamat kustannukset. Hiilidioksidin jatkokäsittelylle voidaan muodostaa arvo kuljetus- ja varastointiluvuissa esiteltyjen lukujen perusteella. Myös hiilidioksidin paineistukselle ja/tai nesteytykselle täytyy muodostaa hinta, mikäli tarkasteltavaksi valittu talteenottoteknologia ei tuota hiilidioksidia suoraan haluttuun paineeseen tai olotilaan.

Laskurissa on 6 välilehteä:

- Dashboard
- Syöttöarvot
- Talous, tuellinen
- Talous, tueton
- Tekniset aikasarjat
- Apulaskenta

”Dashboard” esittelee keskeisimmät laskennassa käytetyt syöttöarvot sekä laskennan keskeisimmät tulokset. Välilehden alaosassa on kaksi kuvaajaa, jotka esittävät tuoton kumulatiivisen nykyarvon tuellisena sekä tuettomana.

”Syöttöarvot” välilehti on ainoa välilehdistä, minkä arvoja muutetaan laskurin ollessa normaalikäytössä. Välilehdelle syötetään kaikki investoinnin ja teknologian perustiedot, mitä laskurin halutaan käyttää laskennassa.

”Talous, tuellinen”, ”Talous, tueton”, ”Tekniset aikasarjat” ja ”Apulaskenta” sisältävät laskurin laskennan. Näihin välilehtiin ei tulisi tehdä lainkaan muutoksia laskurin normaalikäytössä.

### 8.1 Kanfa

Kanfan talteenottoteknologialle laskettiin talteenottokustannus jokaiselle sen kolmesta kokoonpanovaihtoehdoista. Kokoonpanovaihtoehtojen energiankulutukset on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Kanfan kokoonpanojen 1-3 energiankulutukset.

	Kokoonpano 1	Kokoonpano 2	Kokoonpano 3	Yksikkö
<b>Sähkönkulutus</b>	80	216	208	kWh/t <sub>CO2</sub>
<b>Lämmönkulutus</b>	880	880	680	
<b>Lämmöntuotanto</b>	200	880	0	

Ensin lasketaan hiilidioksidin talteenoton kustannukset ilman hiilidioksidin kuljetus- ja varastointikustannuksia. Tällöin välilehden ”Syöttöarvot” kohdan B34 ”Hiilidioksidin jatkokäsittely [€/t]” arvo asetetaan 0 €/t. Kanfan teknologian talteenottotehokkuus on parhaimmillaan 95 %. Laskennassa käytetään saatavilla olevan hiilidioksidin arvona pyöristettyä 400 000 t<sub>CO2</sub>/a, jolloin Kanfan teknologialla voidaan ottaa talteen **380 000 t<sub>CO2</sub>/a**. Kanfan teknologian CAPEX on 270 €/t<sub>CO2</sub>, jolloin CAPEX-arvoksi saadaan 102 600 000 €.

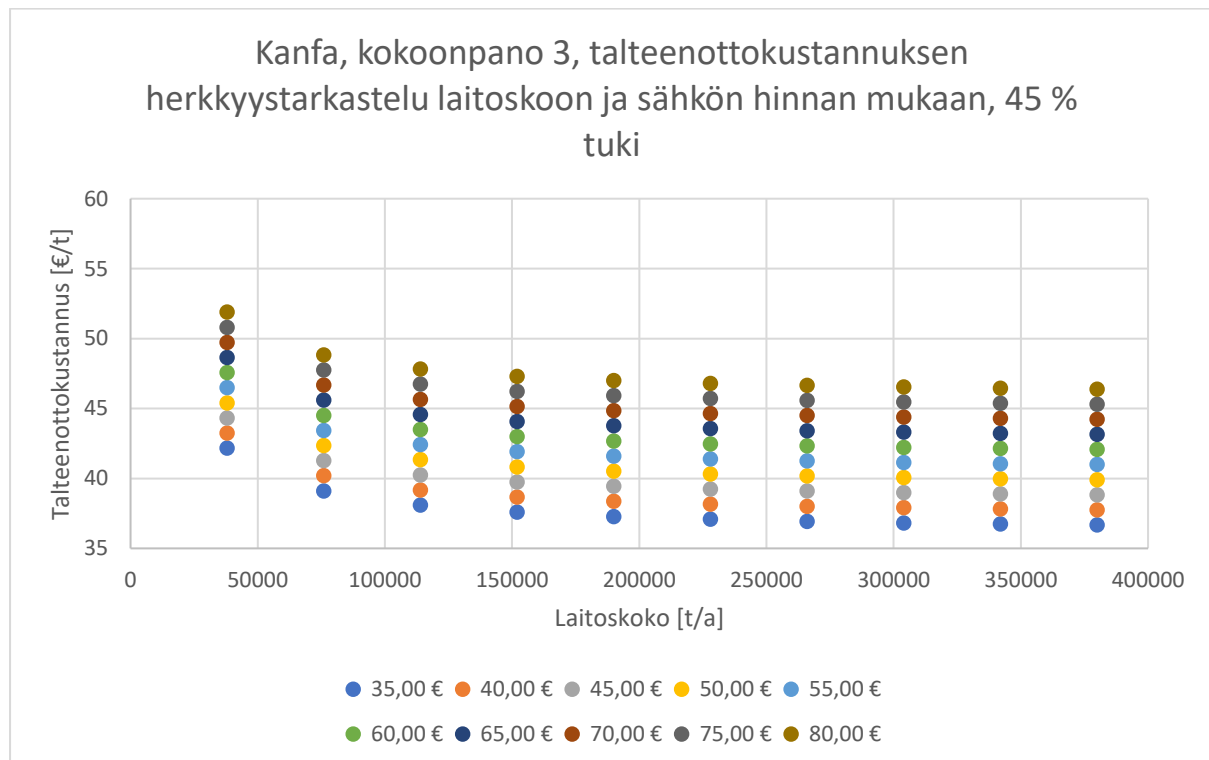
### 8.1.1 Hiilidioksidin talteenottokustannus

Lasketaan hiilidioksidin talteenottokustannus. Edellisessä kappaleessa määritellyillä syöttöarvoilla ja liitteen 1 oletusarvoilla talteenottokustannuksiksi saadaan taulukossa 8 esitetyt arvot. Kanfan kokoonpano kahdelle saatiin matalin hiilidioksidin talteenottokustannus, joten käytetään sitä teknologian jatkotarkastelussa.

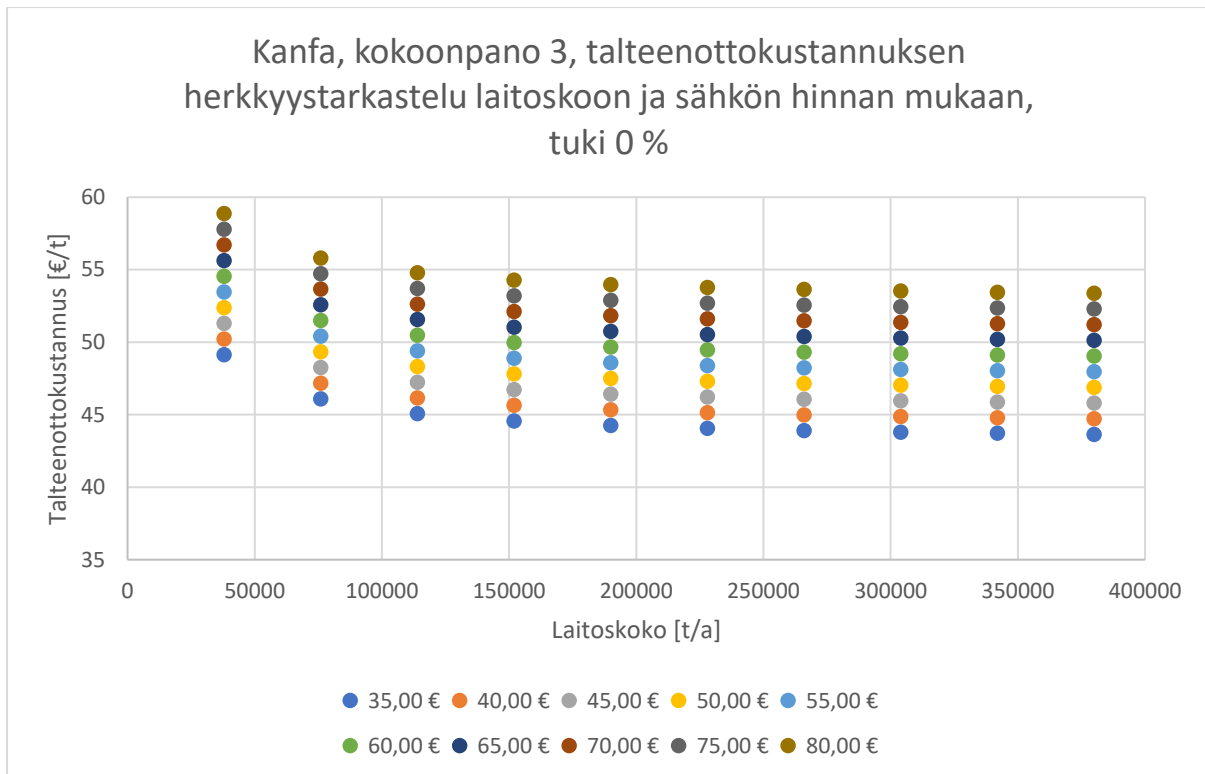
Taulukko 8. Kanfan kokoonpanojen 1-3 hiilidioksidin talteenottokustannukset

	Kokoonpano					
	1		2		3	
	Ilman tukea	Tuettuna	Ilman tukea	Tuettuna	Ilman tukea	Tuettuna
<b>Hiilidioksidin talteenottokustannus, investointikustannusta ei huomioitu [€/t<sub>CO2</sub>]</b>	36		28		43	
<b>Hiilidioksidin talteenottokustannus, investointikustannus jyvitetty pitoajalle [€/t<sub>CO2</sub>]</b>	52	45	45	37	59	52

Kuvissa 15 ja 16 on Kanfan talteenottoteknologian herkkyystarkastelu sähkön hinnan ja laitoksen suhteen tuettuna sekä ilman tukea. Kuvista voidaan nähdä, että talteenottokustannukset alkavat nousemaan jyrkästi, kun laitosteknologia laskee alle 100 000 t<sub>CO2</sub>/a.



Kuva 14. Kanfan teknologian talteenottokustannuksen herkkyystarkastelu laitosteknologiaan ja sähkön hinnan mukaan, kun investoinnilla on 45 % tuki.



Kuva 15. Kanfan teknologian talteenottokustannuksen herkkyystarkastelu laituskoon ja sähkön hinnan mukaan, kun investoinnilla ei ole tukea.

### 8.1.2 Jälkikäsittelyketjun arvotus

Seuraavaksi suoritetaan kannattavuuslaskenta koko hiilidioksidin talteenotto-, kuljetus- ja varastointiketjulle. Tätä varten muodostetaan hiilidioksidin jälkikäsittelyn arvotus. Koska Kanfan talteenottoteknologia tuottaa suoraan nesteytettyä hiilidioksidia, nesteytyksen kustannusta ei lisätä jälkikäsittelyn arvotukseen. Tällöin jäljelle jää vain kuljetus ja varastointi.

Kuljetus voi tapahtua putki-, rekka-, juna- ja/tai laivakuljetuksella. Käytetään kannattavuuslaskennan varastointikohteena Northern Lights -projektia, joka on ylivoimaisesti edistynein varastointiprojekteista. Northern Lights arvioi kuljetus ja varastointikustannusten olevan 80-100 €/t<sub>CO2</sub>, josta käytetään keskiarvoa 90 €/t<sub>CO2</sub>. Tähän arvoon ei kuitenkaan sisälly kuljetuskustannukset voimalaitokselta satamaan, joten se täytyy lisätä Northern Lightsin arvioon.

Kuljetuksen voimalaitoksen ja sataman välillä voidaan olettaa tapahtuvan rekalla, sillä sen tiedetään olevan putkikuljetusta ekonomisempaa erityisesti, kun kuljetettava hiilidioksidimäärä on <500 000 t<sub>CO2</sub>/a. Rekkakuljetuksen kustannukset ovat 0,08 €/t<sub>CO2</sub>/km. Koska laivakuljetus (5,52 €/t<sub>CO2</sub>/300km; 0,02€/t<sub>CO2</sub>/km) on halvempaa kuin rekkakuljetus, kannattaa rekkakuljetuksen matka minimoida. Lähin satama Tampereelta on Porin satama, jonne on matkaa Naistenlahti 3 -voimalaitokselta 133 km. Tällöin rekkakuljetuksen kustannukseksi tulee 10,64 €/t<sub>CO2</sub>, joten koko jälkikäsittelyketjun kustannus on **100,64 €/t<sub>CO2</sub>**. Välivarastoinnin kustannusvaikutusta ei oteta huomioon tässä laskennassa, sillä sen vaikutus hiilidioksidin talteenotto-, kuljetus- ja varastointikustannuksiin on häviävän pieni (<1 %). Välivarastoinnin kustannusvaikutusta on myös vaikea arvioida tarkasti tämän tason tarkastelussa, sillä tarvittavan välivarastokapasiteetin arviointi vaatisi kuljetusketjun tarkemman suunnittelun.

Jälkikäsitteilyn arvo voidaan koota myös kirjallisuuteen perustuvista kustannuksista. Tällöin päästään todennäköisesti lähemmäs todellisia tuotantokustannuksia, ilman palveluntuottajan katteita. Rekkakuljetuksen kustannus on sama kuin aikaisemmin 10,64 €/tCO<sub>2</sub>. Laivakuljetuksen kustannus on ilman nesteytystä 26,81 €/tCO<sub>2</sub> ja varaston kustannus on 11,17 €/tCO<sub>2</sub>. Varaston kustannuksena käytetään IPCC:n (2005) antamaa maksimiarvoa, sillä kyseessä on ensimmäinen kaupallinen hiilidioksidivarasto. Varasto sijaitsee myös merellä, mikä nostaa kustannuksia. Yhteenlaskettu tuotantokustannus on nyt **48,62 €/tCO<sub>2</sub>**. Oletetaan, että Tampereen Sähkölaitos ei aio investoida omaan kuljetus- ja varastointiketjuun, jolloin kannattavuuslaskennassa käytetään Northern Lights -projektin arvotukseen perustuvaa jälkikäsitteilykustannusta 100,64 €/tCO<sub>2</sub>.

### 8.1.3 Hiilidioksidipäästövähennemän arvotus

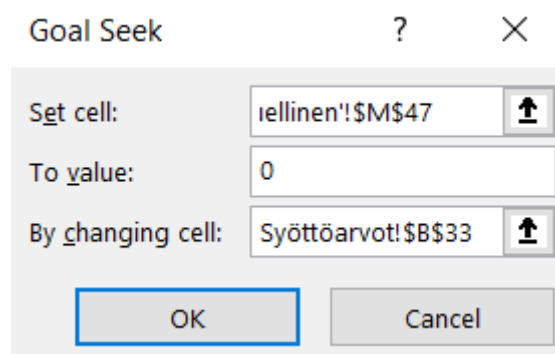
Nyt laskurilla voidaan etsiä hiilidioksidille sopiva arvotus, jotta investoinnille saadaan sopiva takaisinmaksuaika. Valitaan halutuksi takaisinmaksuajaksi 10 vuotta. Hiilidioksidipäästövähennemälle voidaan hakea laskurilla arvo käyttämällä Excelin "Data" sivulta löytyvää "What if" -analyysin "Goal seek" -toimintoa.

Etsitään hiilidioksidipäästövähennemän arvo. Käytetään laskentaan Kanfan kokoonpanoa 2, jonka hiilidioksidin tuotantokustannukset ovat alhaisimmat kolmesta kokoonpanovaihtoehdosta. Käytetyt oletussyöttöarvot löytyvät liitteestä 1. Liitteessä 1 vihreällä näkyviin kohtiin tulee taulukossa 9 esitetyt arvot.

Taulukko 9. Kanfan teknologialle ominaiset syöttöarvot

CAPEX [€]	102 600 000
Hiilidioksidin talteenoton sähkönkulutus [kWh/tCO <sub>2</sub> ]	216
Hiilidioksidin talteenoton lämmönkulutus [kWh/tCO <sub>2</sub> ]	880
Hiilidioksidin talteenoton lämmöntuotanto [kWh/tCO <sub>2</sub> ]	880
Hiilidioksidin talteenoton tehokkuus [%]	95
Hiilidioksidipäästövähennemän arvo [€/t]	0
Hiilidioksidin jatkokäsittely [€/t]	100,64

Haetaan hiilidioksidipäästövähennemälle sopiva arvo "Goal seek" -toiminnolla. "Goal seek" -toiminto avaa ikkunan, johon syötetään kolme arvoa. Ikkuna näkyy kuvassa 16.



Kuva 16. Excelin "Goal seek" -toiminnon ikkuna.

Ensimmäiseen "Set cell:" kohtaan valitaan "Talous, tuellinen" välilehdeltä kumulatiivisen nykyarvon solu siltä pitovuodelta, millä nykyarvon halutaan olevan positiivinen. Tässä tapauksessa haluttu takaisinmaksuaika on 10 vuotta, joten valitaan solu M47. Solu valitaan tuellisen talouden laskenta välilehdeltä, sillä investointi oletetaan tehtäväksi tuettuna.

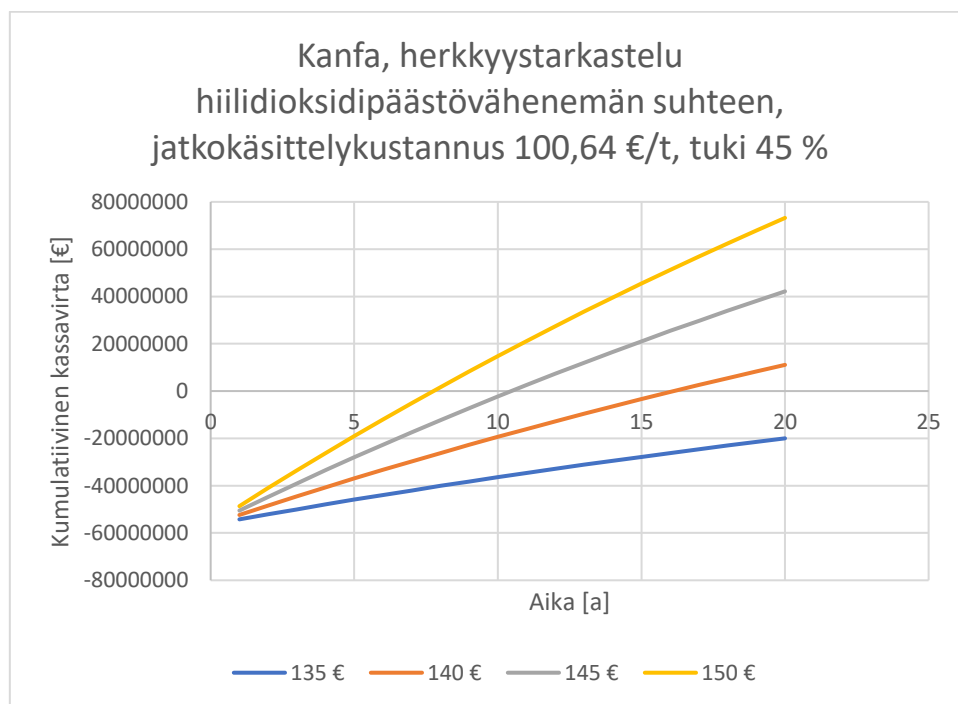
Toiseen "To value:" kohtaa syötetään arvo 0, jolloin investoinnin nykyarvo kääntyy negatiivisesta positiiviseksi.

Kolmanteen "By changing cell:" -kohtaan valitaan "Syöttöarvot" -välilehdeltä hiilidioksidipäästövähennemän arvon syöttösolu eli solu B33.

Seuraavaksi painetaan ikkunan "OK" -painiketta, jolloin toiminto hakee hiilidioksidipäästövähennemän arvolle sellaisen arvon, millä tuetulle investoinnille saadaan 10 vuoden takaisinmaksuaika. Nyt hiilidioksidipäästövähennemän arvoksi saadaan **145,67 €/t<sub>CO2</sub>**.

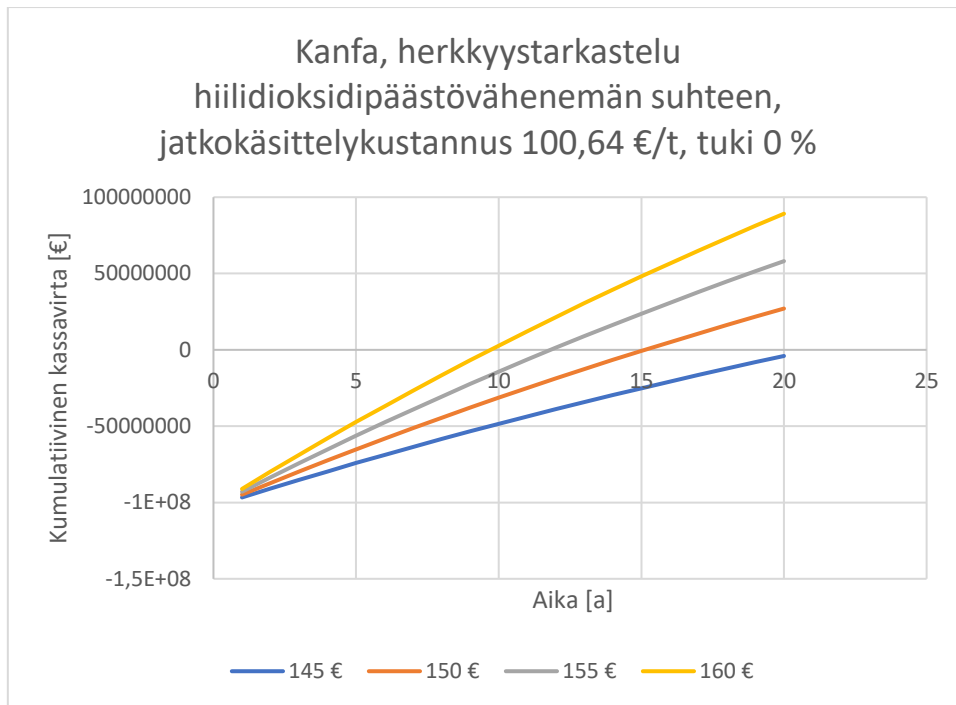
Käytettäessä Kanfan talteenottoteknologiaa hiilidioksidipäästövähennemän arvo tulisi olla siis vähintään 145,67 €/t<sub>CO2</sub>, jotta investoinnin takaisinmaksuaika olisi 10 vuotta. Investoinnin CAPEX:in arvioitiin olevan 102 600 000 € ja käytetty tukiprosentti oli 45 %. Kanfan teknologialla 400 000 tonnista hiilidioksidia 380 000 t<sub>CO2</sub> saatiin talteenotettua.

Kuvissa 17 ja 18 näkyy herkkyystarkastelu Kanfan talteenottoteknologian kumulatiiviselle kassavirralle hiilidioksidipäästövähennemän arvon suhteen.



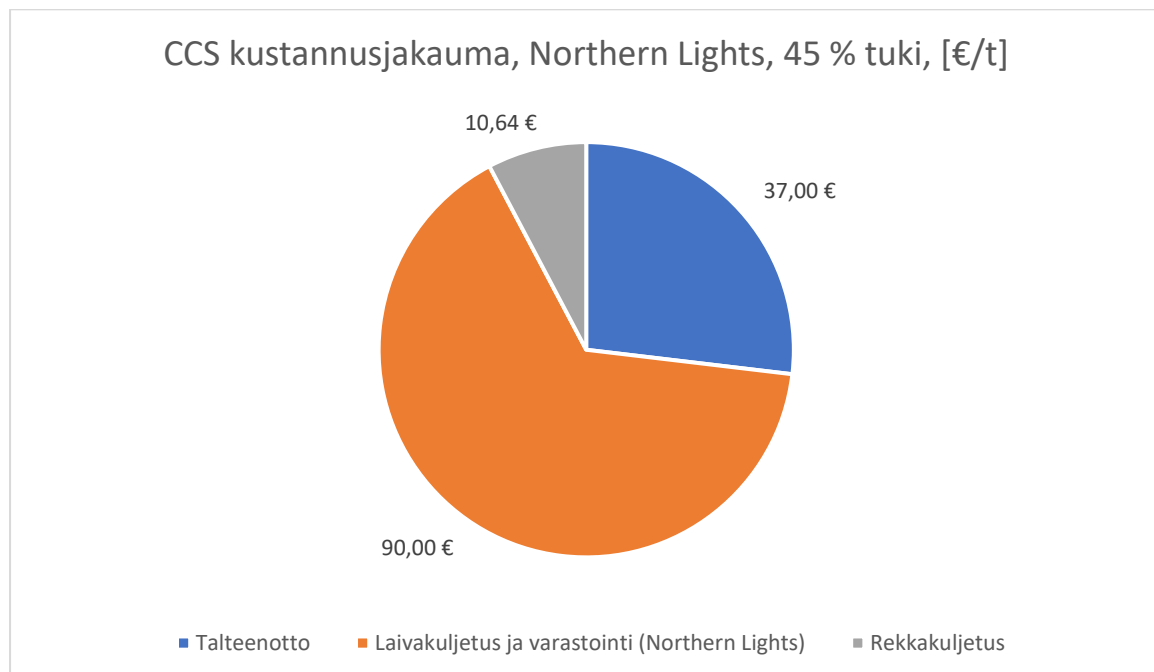
Kuva 17. Kanfan teknologian kumulatiivisen kassavirran herkkyystarkastelu hiilidioksidipäästövähennemän suhteen, kun hiilidioksidin jatkokäsittelykustannus on 100,64 €/t ja investoinnin tuki on 45 %.



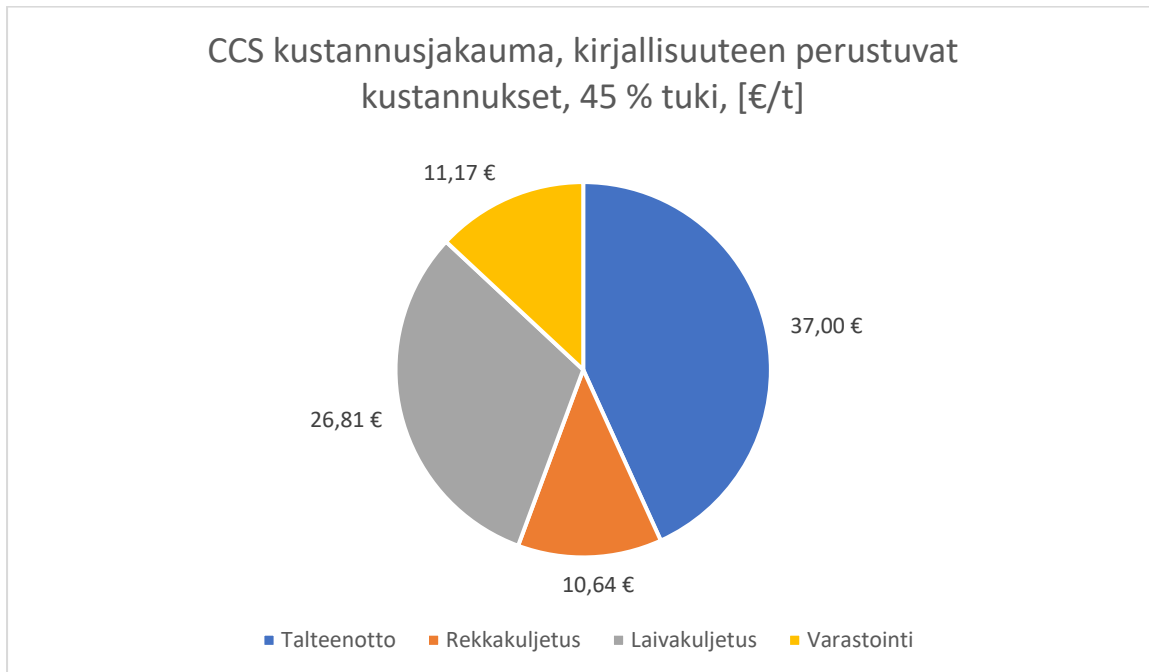


Kuva 18. Kanfan teknologian kumulatiivisen kassavirran herkkyystarkastelu hiilidioksidipäästövähennemän suhteen, kun hiilidioksidin jatkokäsittelykustannus on 100,64 €/t ja investoinnin tuki on 0 %.

Kuvissa 19 ja 20 on hiilidioksidin talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin kustannusjakaumat. Kuvassa 19 on käytetty Northern Lights -projektin arvoja ja kuvassa 20 kirjallisuuteen perustuvia arvoja.



Kuva 19. Hiilidioksidin talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin kustannusjakauma Kanfan teknologialla, kun käytetään Northern Lights -projektin arvoja.



Kuva 20. Hiilidioksidin talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin kustannusjakauma Kanfan teknologiassa, kun käytetään vain kirjallisuuteen perustuvia arvoja.

## 8.2 CarbonReUse

CarbonReUsen talteenottoteknologia kuluttaa sähköenergiaa 830 kWh/t<sub>CO2</sub>. Lämpöenergiaa se ei käytä ollenkaan, eikä hukkalämpöäkään ole täten saatavilla. Teknologian talteenottotehokkuus on 79,5 %, jolloin 400 000 tonnista hiilidioksidia CarbonReUsen teknologiassa voidaan ottaa talteen **318 000 t<sub>CO2</sub>**. Teknologian CAPEX on 400 €/t<sub>CO2</sub>, jolloin CAPEX:in kokonaisarvoksi saadaan 127 200 000 €.

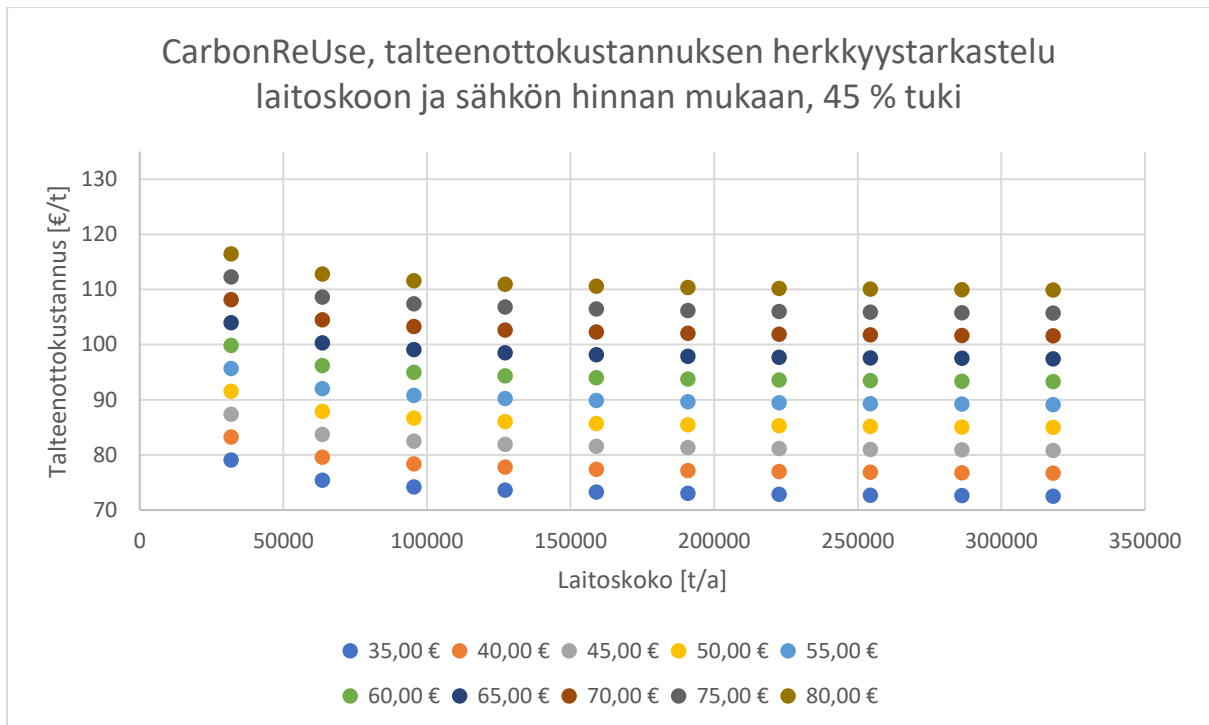
### 8.2.1 Hiilidioksidin talteenottokustannus

Lasketaan hiilidioksidin talteenottokustannus. Edellisessä kappaleessa määritellyillä syöttöarvoilla ja liitteen 1 oletusarvoilla talteenottokustannuksiksi saadaan taulukossa 10 esitetyt arvot.

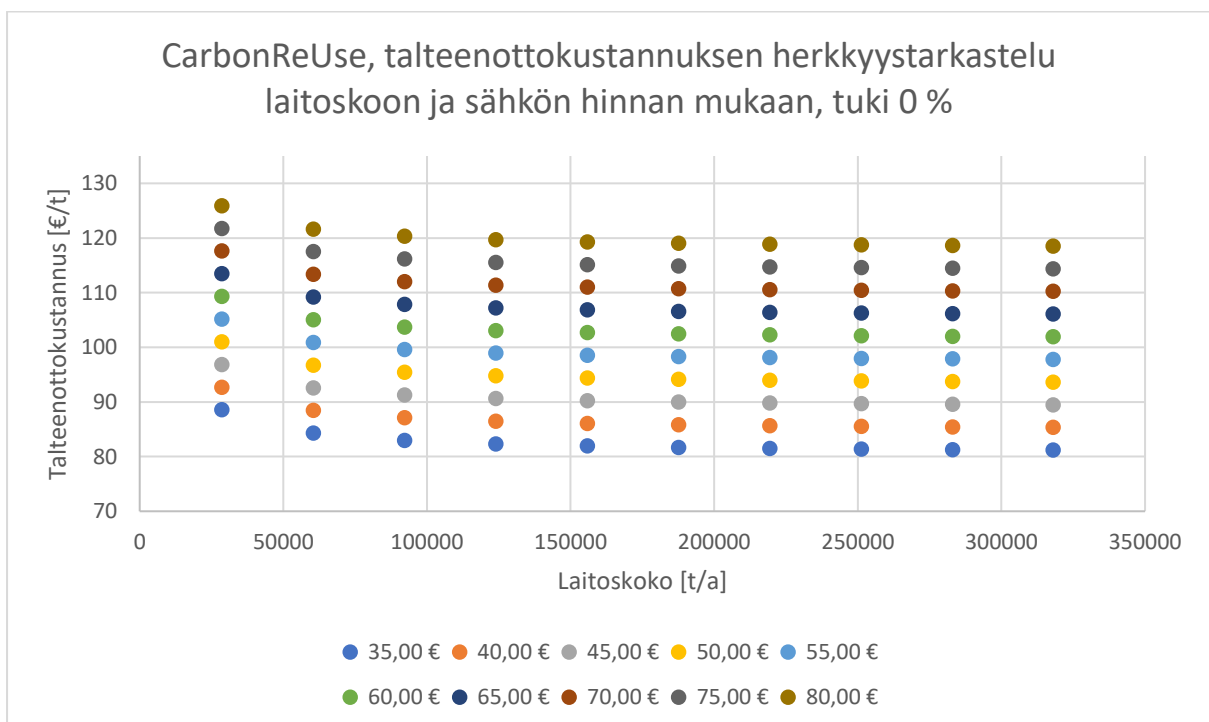
Taulukko 10. CarbonReUsen talteenottokustannukset

	Ilman tukea	Tuettuna
<b>Hiilidioksidin talteenottokustannus, investointikustannusta ei huomioitu [€/t<sub>CO2</sub>]</b>	64	
<b>Hiilidioksidin talteenottokustannus, investointikustannus jyvitetty pitoajalle [€/t<sub>CO2</sub>]</b>	88	77

Kuvissa 21 ja 22 on CarbonReUsen teknologian talteenottokustannuksen herkkyysharkastelu sähkön hinnan ja laitokseen suhteen tuettomana ja tuettuna. Talteenottokustannusten voidaan nähdä alkavan kasvamaan loivasti, kun laitosteknologia laskee alle 75 000 t<sub>CO2</sub>/a.



Kuva 21. CarbonReUseen teknologian talteenottokustannuksen herkkyytarkastelu laitoskoon ja sähkön hinnan mukaan, kun investoinnilla on 45 % tuki.



Kuva 22. CarbonReUseen teknologian talteenottokustannuksen herkkyytarkastelu laitoskoon ja sähkön hinnan mukaan, kun investoinnilla ei ole tukea.

### 8.2.2 Jälkikäsitteilyketjun arvotus

Muodostetaan CarbonReUsen teknologialle hiilidioksidin jälkikäsitteilyketjun kustannus. Hiilidioksidi täytyy nesteyttää talteenoton jälkeen, kuljettaa Naistenlahti 3:lta satamaan, mistä se kuljetetaan laivalla varastointipaikalle. Varastointikohteena käytetään Northern Light -projektia, jonka laivaus- ja varastointikustannukset ovat 80-100 €/t<sub>CO2</sub>, mutta laskennassa käytetään keskiarvoa 90 €/t<sub>CO2</sub>. Northern Lights'in kustannusmäärään täytyy vielä lisätä hiilidioksidin nesteytyksestä ja rekkakuljetuksesta syntyvät kustannukset. Nesteytys kuluttaa 94,6 kWh/t<sub>CO2</sub> sähköä ja sen CAPEX-kustannukset ovat 4,3 €/t<sub>CO2</sub>. Käyttämällä Tampereen Sähkölaitoksen antamaa sähköhintaa 35 €/MWh, nesteytyksen sähkönkulutus muodostaa 3,31 €/t<sub>CO2</sub> ominaiskustannuksen. Yhdistettynä CAPEX-kustannukseen nesteytyksen kokonaiskustannukseksi muodostuu 7,61 €/t<sub>CO2</sub>. Rekkakuljetuksen kustannus on sama kuin Kanfan laskennassa, eli 10,64 €/t<sub>CO2</sub>. Yhdistettynä näistä osakustannuksista hiilidioksidin jälkikäsitteily kokonaiskustannukseksi muodostuu **108,25 €/t<sub>CO2</sub>**.

### 8.2.3 Hiilidioksidipäästövähennemän arvotus

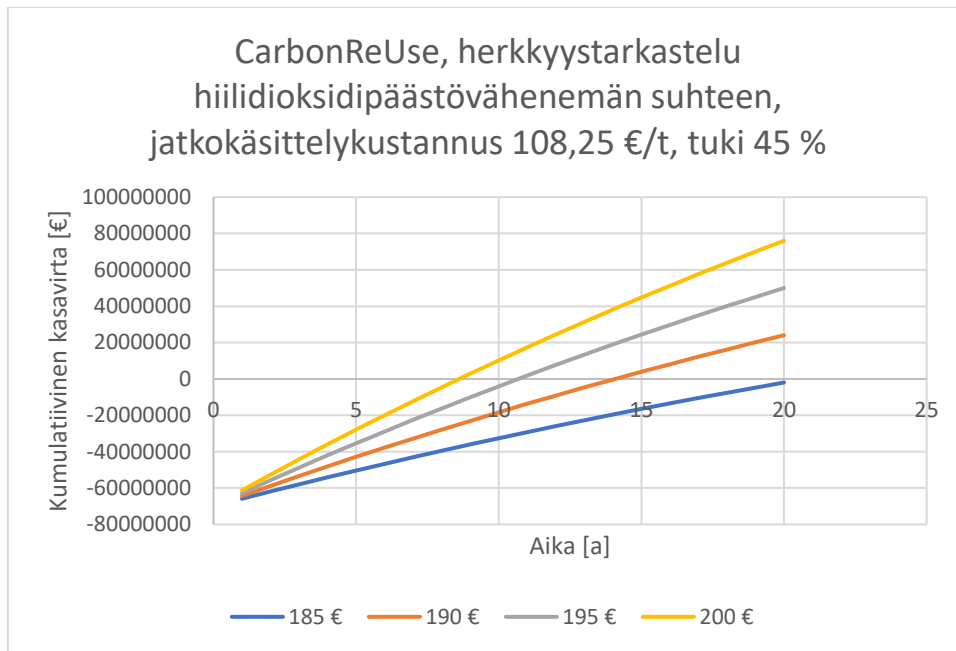
Nyt CarbonReUsen talteenottoteknologialle voidaan etsiä Excelin "Goal seek" -toiminnolla arvotus hiilidioksidipäästövähennemälle, jolla investoinnin takaisinmaksuaika on 10 vuotta. Toistetaan samat työvaiheet mitkä selostettiin Kanfan "hiilidioksidipäästövähennemän arvotus" -kappaleessa. Syöttöarvoina käytetään liitteessä 1 esitettyjä oletusarvoja. Liitteessä 1 vihreällä näkyviin kohtiin tulee taulukossa 11 esitetyt arvot.

Taulukko 11. CarbonReUsen teknologialle ominaiset syöttöarvot

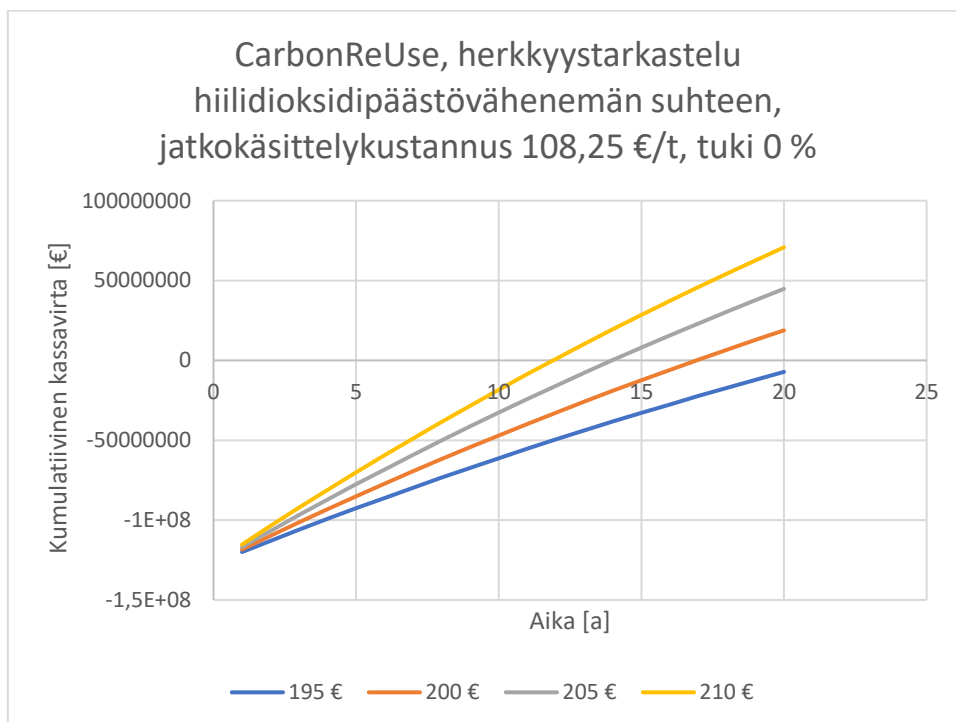
CAPEX [€]	127 200 000
Hiilidioksidin talteenoton sähkönkulutus [kWh/tCO <sub>2</sub> ]	830
Hiilidioksidin talteenoton lämmönkulutus [kWh/tCO <sub>2</sub> ]	0
Hiilidioksidin talteenoton lämmöntuotanto [kWh/tCO <sub>2</sub> ]	0
Hiilidioksidin talteenoton tehokkuus [%]	79,5
Hiilidioksidipäästövähennemän arvo [€/t]	0
Hiilidioksidin jatkokäsittely [€/t]	108,25

Nyt kun hiilidioksidipäästövähennemälle etsitään arvo "Goal seek" -toiminnolla, sen arvoksi saadaan **196,41 €/t<sub>CO2</sub>**. Tällä arvolla investoinnin takaisinmaksuajaksi saadaan 10 vuotta. CAPEX-kustannuksen arvioitiin olevan 127 200 000 € ja käytetty tukiprosentti oli 45 %. CarbonReUsen teknologialla 400 000 tonnista hiilidioksidia saatiin talteenotettua 318 000 t<sub>CO2</sub>.

Kuvissa 23 ja 24 näkyy herkkyystarkastelu CarbonReUsen talteenottoteknologian kumulatiiviselle kassavirralle hiilidioksidipäästövähennemän arvon suhteen.

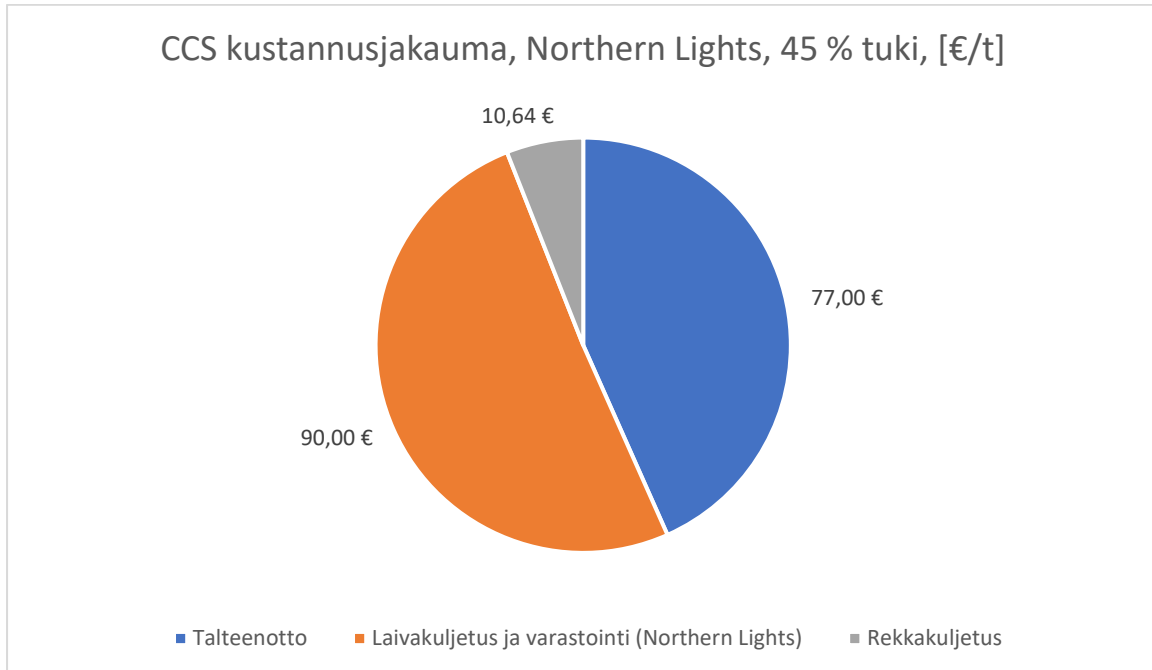


Kuva 23. CarbonReUsen teknologian kumulatiivisen kassavirran herkkyystarkastelu hiilidioksidipäästövähennemän suhteen, kun hiilidioksidin jatkokäsittelykustannus on 108,25 €/t ja investoinnin tuki on 45 %.

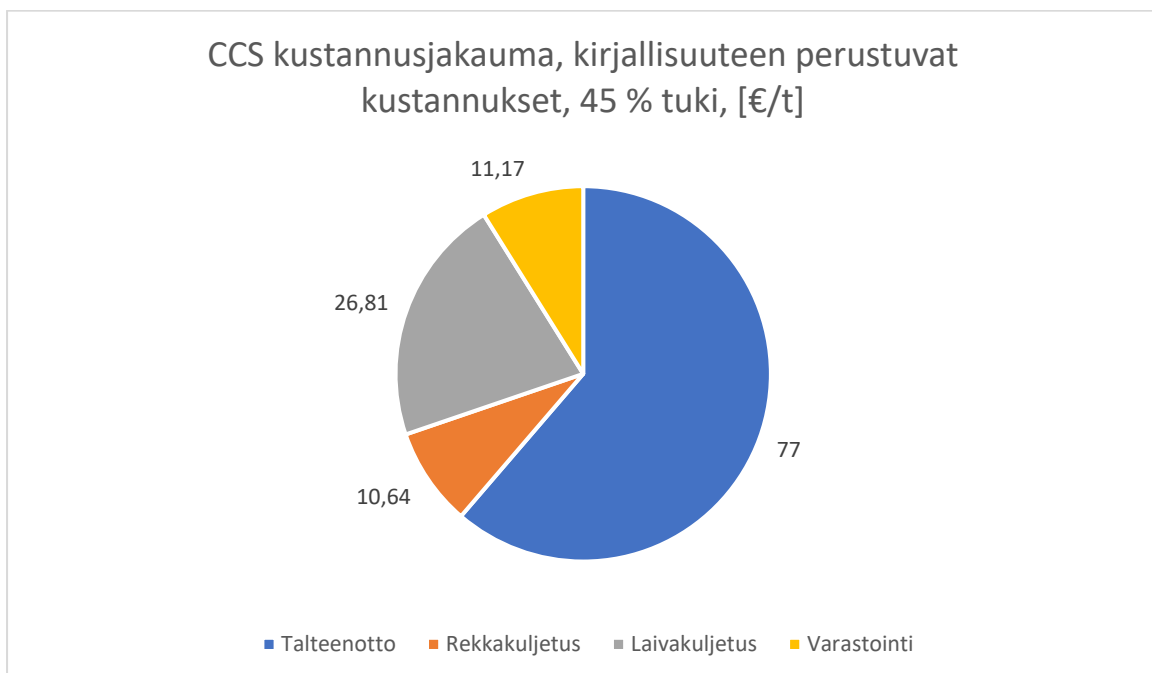


Kuva 24. CarbonReUsen teknologian kumulatiivisen kassavirran herkkyystarkastelu hiilidioksidipäästövähennemän suhteen, kun hiilidioksidin jatkokäsittelykustannus on 108,25 €/t ja investoinnin tuki on 0 %.

Kuvissa 25 ja 26 on hiilidioksidin talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin kustannusjakaumat. Kuvassa 25 on käytetty Northern Lights -projektin arvoja ja kuvassa 26 kirjallisuuteen perustuvia arvoja.



Kuva 25. Hiilidioksidin talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin kustannusjakauma CarbonReUsen teknologialla, kun käytetään Northern Lights -projektin arvoja.

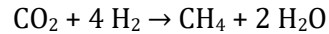


Kuva 26. Hiilidioksidin talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin kustannusjakauma CarbonReUsen teknologialla, kun käytetään vain kirjallisuuteen perustuvia arvoja.

## 9 Hiilidioksidin hyötykäyttö

### 9.1 Metanointi

Tietyt mikrobit kykenevät sitomaan hiilidioksidia tuottamaansa biomassaan. Metanogeenit tuottavat metaania anaerobisissa olosuhteissa. Metaani syntyy ns. Sabatier-reaktion kautta:



Q Powerin kehittämä metanointiteknologia hyödyntää näitä metanogeenisiä mikrobeja bioreaktorissaan, missä ne tuottavat metaania reaktoriin syötetystä vedystä ja hiilidioksidista. Kun vety tuotetaan elektrolyysillä käyttäen uusiutuvasti tuotettua sähköä, on tuotettu metaanikin uusiutuvaa. Teknologian hyötysuhde on kenttänsä paras, 83 %. Tämä tarkoittaa sitä, että 83 % prosessiin syötetyn vedyn energiasisällöstä saadaan varastoitua synteettiseen metaaniin. Q Powerin teknologian ominaissähkönkäyttö on alhainen, mikä takaa myös korkean laitoshyötysuhteen, 82 %. Tämä on mahdollista, sillä Q Powerin teknologia ei vaadi lainkaan sekoittamista, korkeita lämpötiloja tai paineita toisin kuin katalyyttinen metanointi, joka vaatii toimiakseen 200-550 °C lämpötilan ja jopa 100 bar paineen.

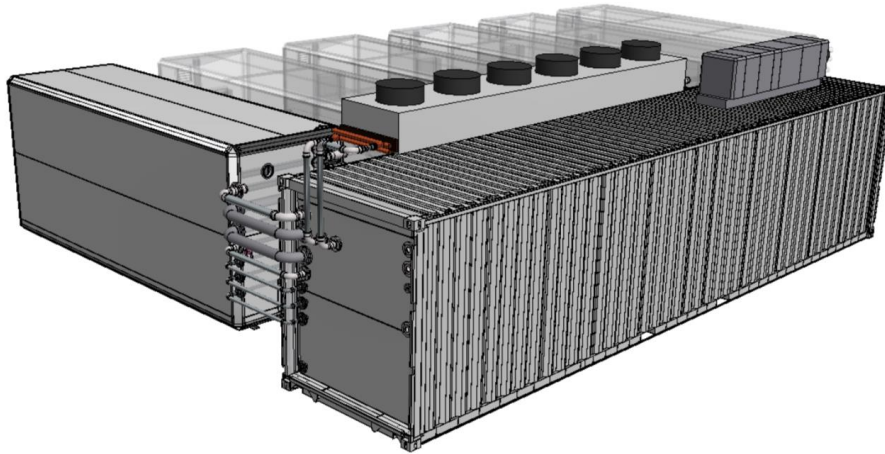
Kuten edellisessä kappaleessa mainittiin, prosessin pääraaka-aineita ovat hiilidioksidi ja vety. Prosessiin syötetään myös ravinneliuosta, mikä sisältää mikrobeille välttämättömiä hivenaineita. Prosessin pääasiallisen tuotteen, metaanin, lisäksi sivuvirtana syntyy myös vettä ja lämpöä. Ylimääräinen lämpö poistetaan prosessista vesikiertoa käyttävän jäähdytysjärjestelmän avulla. Prosessilla on myös korkea epäpuhtauksien sietokyky ja sillä voidaan käsitellä esim. raakaa kaatopaikkakaasua ja biokaasua ilman erillistä kaasun puhdistusta.

Q Powerin teknologia on täysin modulaarinen ja skaalautuu satojen MW:ien kokoluokkaan. Teknologian perusosa on reaktorimoduuli, joka koostuu 29:stä bioreaktorista. Reaktorimoduuli on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27. Q Powerin metanointiteknologian reaktorimoduuli.

Skaalaus tapahtuu monistamalla reaktorimoduulia haluttuun laitospotentiaaliin asti. Moduulit voidaan asentaa sääsuojattuna ulkotiloihin tai tavanomaisesti teollisuuslaitoksen sisälle. Kuvassa 28 on esitetty kuudesta sääsuojatusta reaktorimoduulista ja yhdestä ohjausmoduulista koostuva ratkaisu.



Kuva 28. Q Powerin 1+6 metanointikokoonpano.

Q Power toimittaa metanointiteknologiaansa "plug-and-play" -ratkaisuna, eli reaktorit toimitetaan asiakkaalle käyttöönnottovalmiina kaikkine sähkö-, kaasu- ja vesiliitäntöineen.

Biometaani ja sähköpolttoaineet ovat siirtymässä kansallisen polttoaineen sekoitevelvoitteen piiriin. Tämä tarkoittaa sitä, että polttoaineen jakelijoiden on mahdollista täyttää sekoitevelvoitettaan uusiutuvien nestemäisten polttoaineiden lisäksi uusiutuvilla kaasumaisilla jakeilla, kuten synteettisellä metaanilla.

Synteettisen metaanin tuotantokustannus asettuu tyypillisesti tällä hetkellä teollisissa kohteissa 10-20 MW metaanintuottotehon laitoskokoluokassa välille 90 - 120 €/MWh. Tämä tarkoittaa sitä, että yhden hiilidioksiditonnin metanointikustannus on noin 450 - 600 €/t<sub>CO2</sub>, sisältäen hiilidioksidin talteenoton, vedyn tuotannon ja metanoinnin kustannukset (diskontattu lukema 20 vuoden pitoajalle, sisältäen investoinnin, sekä muuttuvat ja kiinteät käyttökustannukset). Naistenlahti 3:n kaiken hiilidioksidin hyödyntämisellä voitaisiin toteuttaa yli 200 MW metaanintuottotehon laitos, jolloin mittakaavaetu olisi merkittävä ja tuotantokustannus ilmoitettuja lukemia selvästi alhaisempi.

ÅFRY on Työ- ja Elinkeinoministeriölle tekemässään selvityksessä arvioinut mahdollista hinnanmuodostusta uusiutuville kaasuille ja verrokkina on käytetty nykyistä nestemäisten sekoitevelvoitejakeiden ylitäyttöä/tikettihinnoittelua. Ylitäytöllä tarkoitetaan sitä, kun jakelija tuo jakeluun sekoitevelvoitteen mukaista jakeita yli oman jakeluelvoitteensa. Tällöin ylitäyttöosuudelle muodostuu tikettiarvo, joka on se arvo, jolla ylitäytön voi myydä toiselle jakelijalle, jolla ostaja puolestaan voi täyttää omaa jakeluelvoitettaan.

Nestemäisillä jakeilla tikettiarvo on 2020 ollut 0,45 € / l ja kaasulla tikettiarvon on arvioitu asettuvan 60-65 EUR/MWh tasolle. Synteettisen metaanin markkina-arvo polttoainemarkkinoilla muodostuu tikettiarvon ja myyntihinnan summasta, jolloin markkina-arvo asettuisi jopa välille 150 - 185 €/MWh, kun tikettiarvon tuoma arvo lisä huomioidaan.

Verrokkina voidaan käyttää myös nykyistä mädätyspohjaisen biometaanin markkina-arvoa ilman tikettilisää. Suurin osa uudesta biokaasutuotannosta pohjaa enenevässä määrin jakeisiin, joihin ei liity jätteenkäsittelyn vastaanottomaksua (esim. lanta ja muut energiantuotannossa laajamittaisesti hyödyntämättömät biomassat). Uusiutuvan mädätyspohjaisen biometaanin markkina-arvo on tavanomaisesti ollut 60 - 100 €/MWh ilman tikettiarvon osuutta. Nykyinen maailmantilanne ja Ukrainan sodan myötä tapahtunut nopea irtaantuminen venäläisestä maakaasusta on asettanut arvon 90 - 130 €/MWh välille jakeilla, joihin ei liity jätteenkäsittelyn vastaanottomaksuja.



90-120 €/MWh tuotantokustannus synteettiselle polttoaineelle ja 90-140€ markkina-arvo jo tämän hetkessä markkinassa tarkoittaa siis hyödynnetylle hiilidioksiditonille positiivista kassavirtaa kustannusten sijaan. Hiilidioksiditonta kohden tarkasteltuna aikaisemmin ilmoitetulle hiilidioksiditonin metanointikustannukselle 450 – 600 €/t<sub>CO2</sub> on siis mahdollista saada nykymarkkinassa jo myyntiarvo synteettisen metaanin kautta, joka on kustannuksia suurempi.

Maailman vuosittainen maakaasun kysyntä on noin 2,7 miljardia tonnia (IEA 2022a), minkä tuottamiseen synteettisesti vaadittaisiin noin 7,4 miljardia tonnia hiilidioksidia.

## 9.2 Muut biologiset prosessit

Tietyt mikrobit kykenevät myös käyttämään metanogeenien tuottamaa metaania energia- ja hiililähteenään. Tällaisia mikrobeja kutsutaan metanotrofeiksi. Niiden aineenvaihdunnassa metaani käy läpi hapetusreaktioketjun, minkä lopputuotteena syntyy hiilidioksidia. Hapetusketjun välituotteina syntyy kuitenkin aineita, joille on kaupallista käyttöä.

Metaani hapettuu metanotrofien aineenvaihdunnassa hiilidioksidiksi seuraavanlaisen hapetusketjun kautta:

Metaani -> Metanoli -> Formaldehydi -> Formiaatti -> Hiilidioksidi

### 9.2.1 Metanoli

Metaanin hapetusketjun ensimmäinen välituote, metanoli, on merkittävä raaka-aine kemiallisessa teollisuudessa. Sen tuotantokapasiteetin odotetaan nousevan 157 miljoonasta tonnista 500 miljoonaan tonniin välillä 2020-2050. Tavanomaisesti metanolin valmistuksessa käytetään fossiilisten raaka-aineiden, kuten maakaasua ja kivihiihtä, raaka-aineena. Fossiilisiin raaka-aineisiin perustuva metanolintuotanto voidaan korvata metanotrofien aineenvaihduntaan perustuvaan prosessiin. Raaka-aineena käytettävä metaani tuotetaan uusiutuvaa vetyä käyttäen metanogeenien aineenvaihduntaan perustuvalla biologisella konversiolla. Metanotrofit käyttävät uusiutuvaa metaania ravintonaan ja metaanin hapetusketju pysäytetään metanolin kohdalle lisäämällä prosessiin metanotrofien entsyymitoimintaa inhiboivaa ainetta. Tällöin metanoli ei ehdi hapettua formaldehydiksi ja se voidaan poistaa prosessista. Hiilineutraali metanoli mahdollistaa kemianteollisuuden dekarbonisoinnin niiltä osin, missä metanolia käytetään tuotantoprosessin pääraaka-aineena.

Metanolin tuotantoa metanotrofien avulla on onnistuneesti demonstroitu tutkimuksissa, joissa metanolin tuotanto on tapahtunut panosprosessissa. Kaupallisia ratkaisuja ei ole tällä hetkellä saatavissa.

Maailman vuosittainen metanolin kysyntä on noin 110 miljoonaa tonnia (Methanol Institute 2022), jonka tuottamiseen tarvittaisiin vähintään noin 150 miljoonaa tonnia hiilidioksidia.

### 9.2.2 Yksisoluproteiinit

Ihmiset ja muut eläimet kuluttavat proteiinia typen ja aminohappojen lähteenä. Maailman proteiinin kysynnän odotetaan kasvavan ihmismäärän ja varallisuustason mukana. Proteiinintuotannon tulee vastata tähän kasvuun samalla, kun tavanomaiset proteiinintuotantotavat kohtaavat kasvavaa painetta vähentää tuotantonsa maan ja veden kulutusta sekä ilmastonmuutosta kiihdyttäviä kasvihuonekaasupäästöjä.

Yksi proteiininlähde, jolla voitaisiin vastata kasvavaan proteiininkysyntään, on mikrobien biomassa, jonka kuivapainosta noin 50-80 % on proteiinia. Mikrobiperäistä proteiinia voidaan käyttää sellaisenaan eläinravintona, mutta käyttö ihmisravintona vaatii erillisen käsittelyprosessin proteiinin korkean nukleinihappopitoisuuden poistamiseksi. Verrattuna

**Concrete Solutions for Fighting Climate Change**

Rajapurontie 16, 21630 Parainen, Finland

contact@qpower.fi

moniin tavanomaisiin proteiinintuotantotapoihin, mikrobeihin perustuvalla proteiinintuotannolla on korkeampi tuotto. Yksisoluproteiinin käyttö yksimahaisten karjaeläinten rehuna on myös osoitettu tutkimuksissa parantavan tuotetun lihan laatua.

Ennen kuin proteiini voidaan eristää mikrobien biomassasta, täytyy niiden solurakenne ensin hajottaa. Hajottaminen voidaan saada aikaan mekaanisesti, entsyymaattisesti, kemiallisesti tai jollain näiden vaihtoehtojen yhdistelmällä.

Vaihtoehtoisten proteiinien markkinoiden arvioidaan olevan noin 5-10 miljardin \$:in arvoinen tällä hetkellä. Markkinoiden kuitenkin odotetaan kasvavan seuraavan 5-15 vuoden aikana 77-150 miljardiin \$:iin.

Yksisoluproteiinien nykyinen maailmanlaajuinen kulutus on noin 13 miljoonaa tonnia vuodessa. Tämän määrän tuottamiseen kuluisi noin 38 miljoonaa tonnia hiilidioksidia.

### 9.2.3 Biopolymeerit

#### 9.2.3.1 PHA

Polyhydroksialkanoaatit (PHA) ovat solunsisäisiä biopolyestereitä, joita tietyt metanotrofit kykenevät tuottamaan ravinnepöyhissä olosuhteissa varastoidakseen energiaa ja hiiltä. PHA:n biohajoavuus sekä -yhteensopivuus yhdistettynä sen tavanomaisten muovien kanssa vertailukelpoiseen mekaanisiin ominaisuuksiin tekee niistä potentiaalisen vaihtoehdon öljypohjaisille muoveille.

Kuten edellisessä kappaleessa mainittiin, tietyt metanotrofit kykenevät tuottamaan PHA:ta varastoidakseen energiaa ja hiiltä. Mikrobien PHA:n tuotanto saadaan laukaistua altistamalla ne ravinnepöyhille olosuhteille sen jälkeen, kun metaanin hapetusketju on edennyt formaldehydiin asti. Yleisellä tasolla PHA:den tuotantoprosessi metanotrofeja hyödyntämällä koostuu kolmesta vaiheesta:

1. Mikrobibiomassan kasvatusta jatkuvatoimisessa prosessissa
2. Biomassan siirto panostoinnalliseen prosessiin, missä mikrobit tuottavat ja kerryttävät PHA:ta omaan biomassansa
3. PHA:n eristys ja puhdistus mikrobibiomassasta

Tällä hetkellä markkinoilla olevien tuottajien PHA:n tuotantoprosessit perustuvat biopohjaisten raaka-aineiden (esim. sokerijuurikas, rypsi- ja palmyöljy sekä maissi) fermentointiin. Ruokapohjaisten raaka-aineiden käyttö biopolymeerien tuotannossa on kuitenkin ongelmallista sosiaalisen kestävyuden kannalta, mikä on myös osasyynä PHA:n alhaiseen markkinaosuuteen. Metanotrofeihin perustuva PHA:n tuotanto tarjoaa mahdollisen ratkaisun tähän ongelmaan korvaamalla ruokapohjaiset raaka-aineet uusiutuvaan metaaniin perustuvalla ratkaisulla.

PHA:n maailmanlaajuisen tuotannon arvioitiin olevan 2020 noin 36 000 t/a ja markkinoiden arvon arvioitiin olevan 50 miljoonaa euroa vuonna 2021. PHA:n markkinoiden arvon odotetaan kaksinkertaistuvan vuoteen 2026 mennessä. Vuoden 2021 maailmanlaajuisen PHA:n tuotantoon kuluu noin 200 000 tonnia hiilidioksidia. Maailmanlaajuinen muovintuotanto oli vuonna 2019 noin 368 miljoonaa tonnia, joten mikäli kaikki maailman muovintuotanto korvattaisiin PHA:lla, kuluisi tähän noin 2 miljardia tonnia hiilidioksidia. PHA tuotantoa ei ole tällä hetkellä Suomessa.

#### 9.2.3.2 Solun ulkopuoliset polysakkaridit

Solun ulkopuoliset polysakkaridit (eng. extracellular polysaccharides, EPS) ovat biohajoavia, -yhteensopivia ja myrkyttömiä biopolymeerejä. Mikrobit erittävät näitä yhdisteitä niitä ympäröivään biofilmiin, joka suojaa mikrobeja ympäristöltä sekä toimii suodattimena ravintoaineille.

Mikrobeilla tuotetuilla EPS:llä on teolliseen käyttöön paremmat ominaisuudet, kuin levä- ja kasvipohjaiseen tuotantoon pohjautuvilla EPS:llä. Tämä perustuu mikrobi tuotannon parempaan toistettavuuteen ja kestävyteen sekä tuotetun biopolymeerin korkeampaan laatuun.

EPS:ien bioyhteensopivuuden johdosta ne sopivat hyvin käytettäväksi lääketieteellisuuden käyttöön. Niillä on myös sopivia ominaisuuksia käytettäväksi seos- ja sidosainekäyttökohteissa. Silti, vaikka EPS:lle on löydetty useita käyttökohteita teollisuudessa, niiden markkinan koko on jäänyt vielä pieneksi tuotantoprosessin korkeiden kustannusten takia.

#### 9.2.3.3 S-tason polymeeriset proteiinit

Tietyt mikrobit muodostavat solurakenteensa ulkopuolelle kovan kuoren, millä ne suojautuvat ympäristön haitoilta. Tämä kuori koostuu S-tason polymeerisistä proteiineista (eng. Surface layer polymeric proteins, SLP). Nämä proteiinit kattavat noin 15% koko solun proteiinisäilytyksestä.

SLP:t sisältävät funktionaalisia ryhmiä, jotka osallistuvat esim. oksidatiivisen stressin vähentämiseen ja niitä voidaan käyttää erilaisissa lääketieteen hoitomuodoissa. SLP:tä käytetään myös muissa lääketieteellisissä käyttötarkoituksissa, kuten rokotteiden kehityksessä.

#### 9.2.4 Ektoiini

Ektoiini on syklinen iminohappo, joita tietyt mikrobit tuottavat ylläpitämään solurakenteensa osmoottista painetta suolaisissa olosuhteissa. Ektoiinilla on proteiinirakenteita stabiloivia ja säteilyltä suojaavia ominaisuuksia. Nämä ominaisuudet mahdollistavat ektoiinin hyötykäytön monissa käyttökohteissa kosmetiikassa ja lääketieteessä.

Ektoiinin maailmanlaajuinen kysyntä on noin 15 000 tonnia vuodessa ja markkinan arvo on noin 15 miljardia dollaria.

#### 9.2.5 Lipidit

Lipidit eli rasva-aineet ovat molekyyliä, jotka koostuvat hiilivetyketjuista. Niitä löytyy lähes kaikista elävistä organismeista. Soluissa niitä käytetään energiavarastoina, kommunikaatiovälineenä ja erityisesti solujen membraanien pääraaka-aineena.

Lipideille on myös runsaasti teollisia käyttökohteita, esim. lääke-, terveys- ja kosmetiikanteollisuuden raaka-aineina. Yksi suuri käyttökohteiden lipideille on myös polttoaineteollisuuden raaka-aine vaihtoehtona fossiiliselle öljylle, esim. biodieseliä voidaan valmistaa lipideistä. Tavanomaisesti lipidejä tuotetaan kasvi- ja eläinperäisistä lähteistä, esim. soija ja rypsi ovat yleisiä lipidien tuotantoon käytettyjä kasveja.

Mikrobeihin perustuva lipidien tuotanto voidaan jakaa päävaiheiltaan kahteen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa mikrobikulttuurin biomassan annetaan kasvaa ja toisessa vaiheessa mikrobien sisältämät lipidit erotetaan biomassasta. Kuten yksisoluproteiinienkin tapauksessa, mikrobien solurakenne täytyy ensin hajottaa, että lipidit voidaan erottaa biomassasta. Lipidien erotuksen jälkeen, jäljelle jäänyttä biomassaa voidaan käyttää myös muiden lopputuotteiden, kuten yksisoluproteiinien tuotantoon.

### 9.3 Vanadiinin tuotanto

Australialainen yritys Critical Metals on rakentamassa Porin Tahkoluotoon vanadiinin talteenottolaitosta. Laitos tuottaisi valmistuessaan parhaimmillaan 9 000 tonnia vanadiinipentoksia vuodessa. Talteenotto prosessi käyttää raaka-aineenaan teräksen tuotannosta syntyvää vanadiinipitoista teräskuonaa. Vanadiini liuotetaan talteenotto prosessissa kiintoaineesta erilleen. Liuotuksen reagenssina käytetään merkittävä määrä hiilidioksidia, 85 000 – 100 000 tonnia vuodessa. Laitoksen tuotannollisen toiminnan on tarkoitus alkaa vuoden 2024 lopulla (Critical Metals Ltd. 2021). Toimintaan tarvittava hiilidioksidi tullaan hankkimaan

#### **Concrete Solutions for Fighting Climate Change**

Rajapurontie 16, 21630 Parainen, Finland  
contact@qpower.fi

paikallisesta teollisuudesta, joten kohde ei todennäköisesti sovellu Tampereen Sähkölaitoksen hiilidioksidin käyttökohteeksi.

#### 9.4 Hiilidioksidin hyötykäyttö yhteenveto

Esitellyistä hiilidioksidin hyötykäyttökohteista mielenkiintoisimpia Tampereen Sähkölaitoksen suhteen on ovat metaani, metanoli ja PHA:t. Näiden hyötykäyttökohteiden markkinat kokoluokassa, jossa koko markkinan tyydyttäminen hiilidioksidia hyödyntävillä tuotantoprosesseilla vaatisi satoja miljoonia tai miljardeja tonneja hiilidioksidia. Suurimmat markkinat ovat metaanilla, jonka vuosittainen kysyntä on noin 2,7 miljardia tonnia.

## 10 Regulaatioympäristö

Suomessa on säädetty laki hiilidioksidin talteenottamisesta ja varastoinnista (416/2012), jota sovelletaan geologista varastointia varten tapahtuvaan hiilidioksidin talteenottoon, siirtämiseen putken välityksellä ja välivarastointiin sekä hiilidioksidin geologiseen varastointiin.

Edellä mainitun lain 3 §:n mukaan hiilidioksidia ei saa Suomen alueella eikä Suomen talousvyöhykkeellä varastoida geologisesti eikä vesipatsaaseen. Kielto ei kuitenkaan koske hiilidioksidin geologista varastointia, jos varastoitava määrä on alle 100 000 tonnia ja varastoinnin tarkoitus on uusien tuotteiden ja menetelmien tutkimus, kehittäminen ja kokeilu.

Talteenotettua hiilidioksidia saa kuitenkin luovuttaa geologisesti varastoitavaksi geologiseen muodostelmaan, joka sijaitsee kokonaan Euroopan unionin jäsenvaltion alueella taikka sen Yhdistyneiden kansakuntien merioikeusyleissopimuksen mukaisella talousvyöhykkeellä tai mannerjalustalla.

Lain (416/2012) 11 §:n mukaan hiilidioksidin siirtoverkon ja välivarastointitilan suunnitteluun ja rakentamiseen sovelletaan maankäyttö- ja rakennuslakia (132/1999).

Hiilidioksidin talteenoton, siirtämisen ja välivarastoinnin sekä geologisen varastoinnin luvanvaraisuuteen sovelletaan ympäristönsuojelulakia (527/2014), missä hiilidioksidin talteenotto, siirtäminen jne. määritellään luvanvaraiseksi toiminnaksi.

### Euroopan Unionin päästökauppa

Hiilidioksidin talteenotosta ja varastoinnista on myös säädetty Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/31/EY, jossa säädetään oikeudellinen kehys ympäristön kannalta turvallisesti tapahtuvaa hiilidioksidin geologista varastointia varten.

## 11 Yhteenveto

Hiilidioksidia voidaan ottaa talteen voimalaitoksen savukaasuista kolmella tapaa: ennen polttoa, happipoltolla ja polton jälkeen. Tampereen Sähkölaitoksen Naistenlahti 3 -voimalaitoksella näistä kolmesta vaihtoehdosta tulisi käyttää talteenottoa polton jälkeen. Talteenotto ennen polttoa soveltuu vain kaasumaisia polttoaineita käyttäviin voimalaitoksiin ja happipolton käyttöönotto vaatisi muutoksia voimalaitoksen prosessiin ja laitteistoon. Talteenotto polton jälkeen voidaan asentaa voimalaitokseen jälkiasennuksena niin, että voimalaitoksen oma prosessi- ja laitteistokokonaisuus pysyy muuttumattomana.

Talteenotto polton jälkeen voidaan toteuttaa monella teknologialla, kuten absorptiolla, adsorptiolla tai membraanierotuksella, mutta vain absorptioon perustuva talteenotto on tällä hetkellä kaupallisesti saatavilla. Muut teknologiat kärsivät vielä nykyisessä kehitysvaiheessaan tietyistä ongelmista, jotka estävät niiden käyttöönoton hiilidioksidin talteenotossa.

Kaupallisesti saatavilla olevia absorptioon perustuvia talteenottoteknologioita tunnistettiin useita: Kanfa, Aker, CarbonReUse, Ionada ja Capsol. Q Power oli kaikkiin näistä toimittajista yhteydessä ja sai Kanfalta ja CarbonReUselta tarvittavat tiedot kannattavuuslaskennan suorittamiseksi. Ionadalta saatiin tarvittavat tiedot teknologian esittelemiseksi.

Kanfan teknologialla hiilidioksidin talteenottokustannus oli 37 €/t<sub>CO2</sub>, kun investoinnille oletettiin 45 %:n tuki. Vastaava luku CarbonReUsen teknologialla oli 77 €/t<sub>CO2</sub>. Hiilidioksidin kuljetuksen ja varastoinnin kustannuksen arvioitiin olevan noin 100-110 €/t<sub>CO2</sub>, kun varastona käytettäisiin ainoaa tällä hetkellä kaupallisesti saatavilla olevaa varastoa: Northern Lights -projektia. Hiilidioksidipäästövähennemälle tulisi saada 145,67 €/t<sub>CO2</sub> arvo Kanfan teknologiaa käytettäessä ja 196,41 €/t<sub>CO2</sub> arvo CarbonReUsen teknologiaa käytettäessä, jotta investoinnille saataisiin 10 vuoden takaisinmaksuaika.

Hiilidioksidin hyötykäyttökohteita (CCU) kartoitettiin myös. Tunnistetuista käyttökohteista mielenkiintoisimmat Tampereen Sähkölaitoksen suhteen ovat metaani, metanoli ja PHA:t, sillä niiden maailmanlaajuiset markkinat ovat tarpeeksi suuria mahdollistamaan satojen miljoonien tai miljardien hiilidioksiditonniin hyötykäytön.

Koska biomassan poltto ei kuulu tällä hetkellä päästökaupan piiriin, ei Naistenlahti 3:lta talteenotetulle hiilidioksidille voida saada arvoa nykyisen päästökaupan myötä. Täten järkevintä Tampereen Sähkölaitokselle saattaisi olla hiilidioksidin varastoinnin sijaan hiilidioksidin hyötykäyttö, jolloin hiilidioksidi voidaan jalostaa muotoon, jolla on arvoa jo tämän hetkessä markkinassa. Kuten edellisessä kappaleessa mainittiin, tällaisia Tampereen Sähkölaitokselle mielenkiintoisia CCU-tuotteita ovat metaani, metanoli ja PHA. Q Power on valmis tarkastelemaan asiakkaan tarpeet liittyen mahdollisiin jatkoselvityksiin CCU -tuotteiden osalta, mikäli tarpeita ilmenee. Teknologiatuottajana Q Powerilla on erinomaiset valmiudet käytännön toteutuksiin asiakkaan todellisella savukaasuvirtaamalla aina pilotoinneista täysimittaisiin laitostoimituksiin asti.

## Lähdeluettelo

BASRE CCS (2022a). About us. <https://bcforum.net/index.php>

BASRE CCS (2022b). Network. <https://bcforum.net/network.php>

Critical Metals Ltd. (2021). Vanadiinin talteenottolaitos, Pori. Ympäristövaikutusten arviointiselostus. <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BF30F5B73-6AF7-4967-9658-998C533C8D7B%7D/170075>

Equinor (2022). 25 years of successful offshore CO<sub>2</sub> storage in Norway. <https://cdn.sanity.io/files/h61q9gi9/global/5972f8e7d34e8c548d284e6d51cc5cbeb7bf683d.pdf?equinor-ccs-brochure-25-years-of-successful-offshore-co2-storage-in-norway.pdf>

Font-Palma, C., Cann, D. & Udemu, C. (2021). Review of Cryogenic Carbon Capture Innovations and Their Potential Applications. *C - Journal of Carbon Research*, 7, 58. <https://doi.org/10.3390/c7030058>

Gao, L., Fang, M., Li, H. & Hetland, J. (2011). Cost Analysis of CO<sub>2</sub> Transportation: Case Study in China. *Energy Procedia* 4, 5974-5981. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.600>

Gibson, J.A.A., Mangano, E., Shiko, E., Greenaway, A.G., Gromov, A.V., Lozinska, M.M., Friedrich, D., Campbell, E.E.B., Wright, P.A. & Brandani, S. (2016). Adsorption Materials and Processes for Carbon Capture from Gas-Fired Power Plants: AMPGas. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55, 13, 3840-3851. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.iecr.5b05015>

Greensand (2022). What is Project Greensand. <https://www.projectgreensand.com/hvad-er-project-greensand>

Horisont Energi (2022a). Project Barents Blue. <https://www.horisontenergi.no/wp-content/uploads/2021/06/Barents-Blue-Project-Flyer-2021.pdf>

Horisont Energi (2022b). Carbon Storage. <https://www.horisontenergi.no/carbon-storage/>

IEA (2020). Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage – CCUS in clean energy transitions. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/181b48b4-323f-454d-96fb-0bb1889d96a9/CCUS in clean energy transitions.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/181b48b4-323f-454d-96fb-0bb1889d96a9/CCUS%20in%20clean%20energy%20transitions.pdf)

IEA (2022a). Demand – Natural Gas Information: Overview – Analysis – IEA. <https://www.iea.org/reports/natural-gas-information-overview/demand>

IEA (2022b). Direct air capture – Analysis. <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>

Ineos (2021). Project Greensand to receive Danish Government funding of DKK 197 million (€26 million) for CO<sub>2</sub> storage in the North Sea. <https://www.ineos.com/news/ineos-group/project-greensand-to-receive-danish-government-funding-of-dkk-197-million-26-million-for-co2-storage-in-the-north-sea/>

IPCC (2005). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs\\_wholereport-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf)

Isogai, H. & Nakagaki, T. (2022). Mechanistic analysis of post-combustion CO<sub>2</sub> capture performance during amine degradation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 114, 103597. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103597>

Kárszová, M., Zach, B., Petrusová, Z., Červenka, V., Bobák, M., Šyc, M. & Izák, P. (2020). Post-combustion carbon capture by membrane separation, Review. *Separation and Purification Technology*, 238, 116448. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116448>

Keith, D.W., Holmes, G., St. Angelo, D. & Heidel, K. (2018). A Process for Capturing CO<sub>2</sub> from the Atmosphere. *Joule*, 2, 1573-1594. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>

Konstantinovskaya, E. & Malo, M. (2012). Present-day stress analysis of the St. Lawrence Lowlands sedimentary basin (Canada) and implications for caprock integrity during CO<sub>2</sub> injection operations. *Tectonophysics*, 518-521, 119-137. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.11.022>

Lee, J.H., Kim, B.-J., Kwak, N.S., Shim, J.-G., Shin, S.H., Hwang, S.-N. & Lee, J.-H. (2017). Technical and Economic Assessment of CO<sub>2</sub> Transportation Options for Large-scale Integrated Carbon Capture & Sequestration (CCS) Project in South Korea. *Journal on Electric Power and Energy*, 3, 1. <http://dx.doi.org/10.18770/KEPCO.2017.03.01.049>

Leung, D.Y.C., Caramanna, G., Maroto-Valer, M.M (2014). An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 426-443. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.093>

Liang, Z.H., Rongwong, W., Liu, H., Fu, K., Gao, H., Cao, F., Zhang, R., Sema, T., Henni, A., Sumon, K., Nath, D., Gelowitz, D., Srisang, W., Saiwan, C., Benamor, A., Al-Marri, M., Shi, H., Supap, T., Chan, C., Zhou, Q., Abu-Zahrda, M., Wilson, M., Olson, W., Idem, R. & Tontiwachwuthikul, P. (2015). Recent progress and new developments in post-combustion carbon-capture technology with amine based solvents. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, 26-54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.06.017>

Lu, H., Ma, X., Huang, K., Fu, K. & Azimi, M. (2020). Carbon dioxide transport via pipelines: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121994. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121994>

Methanol Institute (2022). Methanol Price. <https://www.methanol.org/methanol-price-supply-demand/>

Net Zero Teesside (2022a). About NZT Power. <https://www.netzeroteesside.co.uk/project/>

Net Zero Teesside (2022b). Northern Endurance Partnership. <https://www.netzeroteesside.co.uk/northern-endurance-partnership/>

Noreco (2022). Projects. <https://www.noreco.com/projects>

Northern Lights (2022a). About the Longship Project - Northern Lights. <https://norlights.com/about-the-longship-project/>

Northern Lights (2022b). What we do - Northern Lights. <https://norlights.com/what-we-do/>

Northern Lights (2022c). Northern Lights specifications. <https://norlights.com/wp-content/uploads/2021/12/Quality-specification-for-liquified-c02.pdf>

Northern Lights (2022d). International ship/shore interface standards. <https://norlights.com/wp-content/uploads/2022/02/International-shipshore-interface-standards.pdf>

Øi, L.E., Eldrup, N., Adhikari, U., Bentsen, M.H., Jayalanka, L.B. & Yang, S. (2016). Simulation and cost comparison of CO<sub>2</sub> liquefaction. *Energy Procedia*, 86, 500-510.

**Concrete Solutions for Fighting Climate Change**

Rajapurontie 16, 21630 Parainen, Finland

contact@qpower.fi



Orchard, K., Hay, M., Ombudstvedt, I., Skagestad, R., Joos, M., Nysæter, G., Sjøbris, C., Jarøy, A.G., Durusut, E. & Craig, J. (2021). The Status and Challenges of CO<sub>2</sub> Shipping Infrastructures. *15<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-15*. [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3820877](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3820877)

Porthos (2022a). Project. <https://www.porthosco2.nl/en/project/>

Porthos (2022b). Customers. <https://www.porthosco2.nl/en/customers/>

Psarras, P., He, J., Pilorgé, H., McQueen, N., Jensen-Fellows, A., Kian, K. & Wilcox, J. (2020). Cost Analysis of Carbon Capture and Sequestration from U.S. Natural Gas-Fired Power Plants. *Environmental Science and Technology*, 54, 10, 6272-6280. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06147>

Ringrose, P.S. (2018). The CCS hub in Norway: some insights from 22 years of saline aquifer storage. *Energy Procedia*, 146, 166-172. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.021>

Roussanaly, S., Anantharaman, R., Lindqvist, K., Zhai, H. & Rubin, E. (2016). Membrane properties required for post-combustion CO<sub>2</sub> capture at coal-fired power plants. *Journal of Membrane Science*, 511, 250-264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2016.03.035>

Roussanaly, S., Deng, H., Skaugen, G. & Gundersen, T. (2021). At what Pressure Shall CO<sub>2</sub> Be Transported by Ship? An in-Depth Cost Comparison of 7 and 15 Barg Shipping. *Energies*, 14, 5635. <https://doi.org/10.3390/en14185635>

SCCS (2022). Project Bifrost Details. <https://www.geos.ed.ac.uk/sccs/project-info/2742>

Smith, E., Morris, J., Kheshgi, H., Teletzke, G., Herzog, H. & Paltsev, S. (2021). The cost of CO<sub>2</sub> transport and storage in global integrated assessment model. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 109, 103367. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103367>

Statista (2022). EU carbon dioxide emissions 1965–2020. <https://www.statista.com/statistics/450017/co2-emissions-europe-eurasia/>

Suzuki, T., Toriumi, M., Sakemi, T., Masui, N., Yano, S., Fujita, H. & Furukawa, H. (2013). Conceptual Design of CO<sub>2</sub> Transportation System for CCS. *Energy Procedia*, 37, 2989-2996. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.185>

Teir, S., Arasto, A., Tsupari, E., Koljonen, T., Kärki, J., Kujanpää, L., Lehtilä, A., Nieminen, M. & Aatos, S. (2011a). Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCS) soveltaminen Suomen olosuhteissa. VTT.

Teir, S., Pikkarainen, T., Kujanpää, L., Tsupari, E., Kärki, J., Arasto, A. & Aatos, S. (2011b). Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS) – Teknologia katsaus. VTT.

The Acorn Project (2022). About Acorn. <https://theacornproject.uk/about/>

Tigges, K.-D., Klauke, F., Bergins, C., Busekrus, K., Niesbacj, J., Ehmann, M., Kuhr, C., Hoffmeister, F., Vollmer, B., Buddenberg, T., Wu, S. & Kukoski, A. (2009). Conversion of existing coal-fired power plants to oxyfuel combustion: Case study with experimental results and CFD-simulations. *Energy Procedia*, 1, 549-556. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.073>

Tilastokeskus (2022). Polttoaineluokitus 2022. [https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut\\_polttoaineluokitus.html](https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html)

Vaz Jr., S., de Souza, A.P.R. & Baeta, B.E.L (2022). Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100456. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100456>

Wall, T., Liu, Y., Spero, C., Elliott, L., Khare, S., Rathnam, R., Zeenathal, F., Moghtaderi, B., Buhre, B., Sheng, C., Gupta, R., Yamada, T., Makino, K. & Yu, J. (2009). An overview on oxyfuel coal combustion – State of the art research and technology development. *Chemical Engineering Research and Design*, 87(8), 1003-1016. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2009.02.005>

Wang, D., Zhang, Y.D., Adu, E., Yang, J.P., Shen, Q.W., Tian, L. & Wu, L. (2016). Influence of Dense Phase CO<sub>2</sub> Pipeline Transportation Parameters. *International Journal of Heat and Technology*, 34, 479-484. <http://dx.doi.org/10.18280/ijht.340318>

Wintershall Dea (2021). Offshore CCS Planned by 2025 at Project Greensand. <https://wintershalldea.com/en/newsroom/offshore-ccs-planned-2025-project-greensand>

Yadav, S. & Mondal, S.S. (2022). A review on the progress and prospects of oxy-fuel carbon capture and sequestration (CCS) technology. *Fuel*, 308, 122057. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122057>

Zanco, S.E., Pérez-Calvo, J.-F., Gasós, A., Cordiano, B., Becattini, V. & Mazzotti, M. (2021). Postcombustion CO<sub>2</sub> Capture: A Comparative Techno-Economic Assessment of Three Technologies Using a Solvent, an Adsorbent, and a Membrane. *ACS Engineering Au*, 1, 50-72. <https://doi.org/10.1021/acsengineeringau.1c00002?urlappend=%3Fref%3DPDF&jav=VoR&rel=cite-as>

## Liitteet

### Liite 1. Laskurin oletussyöttöarvot

Investoinnin perustiedot	
CAPEX [€]	0,00 €
Pitöaika [vuotta]	20
Tukiprosentti [%]	45 %
Käyttötunnit [h/a]	8 040
Epäkäytettävyyprosenti [%]	5 %
Sähkönkäytön veroluokka, hiilidioksidin talteenotto [Veroluokka 1 tai 2]	1
Täysipäiväisen henkilöstön määrä [kpl]	2
Korkoprosentti	2 %
Lyhennyksen aloitusaika [Vuotta laitoksen käynnistämisestä]	4
Tekniset perustiedot	
Hiilidioksidin talteenoton sähkönkulutus [kWh/t <sub>CO2</sub> ]	0
Hiilidioksidin talteenoton lämmönkulutus [kWh/t <sub>CO2</sub> ]	0
Hiilidioksidin talteenoton lämmöntuotanto [kWh/t <sub>CO2</sub> ]	0
Hiilidioksidivirta talteenottoon [t <sub>CO2</sub> /a]	400 000
Hiilidioksidin talteenoton tehokkuus [%]	0,0 %
Hinnoittelu, syötteet	
Sähkön hinta [€/MWh]	36,00 €
Sähkön siirtohintaa [€/MWh]	12,00 €
Sähköveroluokka 1. hinta [€/MWh]	22,53 €
Sähköveroluokka 2. hinta [€/MWh]	0,63 €
Lämpö hiilidioksidin talteenotolle [€/MWh]	36,00 €
Hinnoittelu, tuotteet	
Lämpö [€/MWh]	25,00 €
Hiilidioksidipäästövähennemän arvo [€/t ]	0,00 €
Hiilidioksidin jatkokäsittely [€/t]	0,00 €
Hinnoittelu, kiinteät	
Aineet ja tarvikkeet [%-CAPEX/a]	0,10 %
Vuokrat ja lisenssimaksut [€/a]	50 000,00 €
Ulkopuoliset palvelut [%-CAPEX/a]	1 %
Palkat ja henkilöstökulut [€/hlö]	75 000 €
Muut kulut per hlö	16 000 €