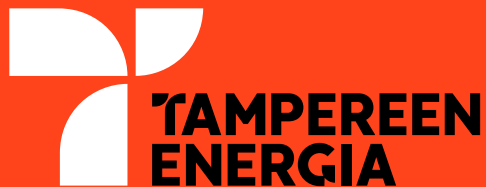


# **SELVITYS POLTTOON PERUSTUMATTOMAAN JA HIILINEGATIIVISEEN KAUKOLÄMPÖÖN SIIRTYMISESTÄ**

Versio 2.0

Marraskuu 2023



**3 Alkusanat****4 1 Tavoite****7** 1.1 Selvityksen rajaukset**8 2 Johdanto****10** 2.1 Sähköllä lämmittämisen mielikuva ja todellisuus**12** 2.2 Energiajärjestelmän trendit ja muutokset vuodesta 2021**16** 2.3 Biomassan kestävyys energiakäytössä**18 3 Teknologiat****23** 3.1 Lämpövarastot**26** 3.2 Sähkökattila**29** 3.3 Hukkalämmöt**32** 3.4 Vety ja uusiutuvat kaasut**35** 3.5 Lämpöpumput**42** 3.6 Geolämpö**44** 3.7 Pienydinreaktori**48** 3.8 Biokaasu ja bioöljy**49** 3.9 Aurinkolämpö**49** 3.10 Hiilidioksidin talteenotto**51** 3.11 Teknologioiden yhdistäminen**52 4 Hiilidioksidin talteenoton mahdollisuudet Tampereella****64 5 Tampereen Energian tuotantoskenaariot****67** 5.1 Skenaario X**72** 5.2 Skenaario X + pienydinvoima**74** 5.3 Skenaario X miinus**76** 5.4 X-skenaarioiden haasteita**78** 5.5 Skenaario BECCS**82** 5.6 Skenaarioiden kustannusvertailu**86** 5.7 Skenaario 100 % maalämpö**92 6 Johtopäätökset****94 7 Yhteenveto****97 8 Syventävä materiaali****98** 8.1 Sähköjärjestelmä vuonna 2040**102** 8.2 Sähkön päästöt**104** 8.3 Vertailu muihin kaukolämpökaupunkeihin**105** 8.3.1 Espoo ja Vantaa**107** 8.3.2 Tukholma**108** 8.3.3 Oslo ja Kööpenhamina**109** 8.4 Lisäskenaario 1, Aurinkolämpö**110** 8.5 Lisäskenaario 2, Ilma-vesilämpöpumppu**112 9 Käytettyjä lyhenteitä**



# Alkusanat

Tampereen Energia kiittää kaikkia, jotka ovat osallistuneet tämän selvityksen tekemiseen ja antaneet arvokkaita kommentteja sen eri vaiheissa.

## Jukka Joronen

Vice President, Energy Markets  
Tampereen Energia

## Pinja Salhoja

Business Intelligence Expert  
Tampereen Energia

## Valteri Seppälä

Business Intelligence Expert  
Tampereen Energia

## Juko Vähätiitto

Business Intelligence Manager  
Tampereen Energia





# 1 Tavoite



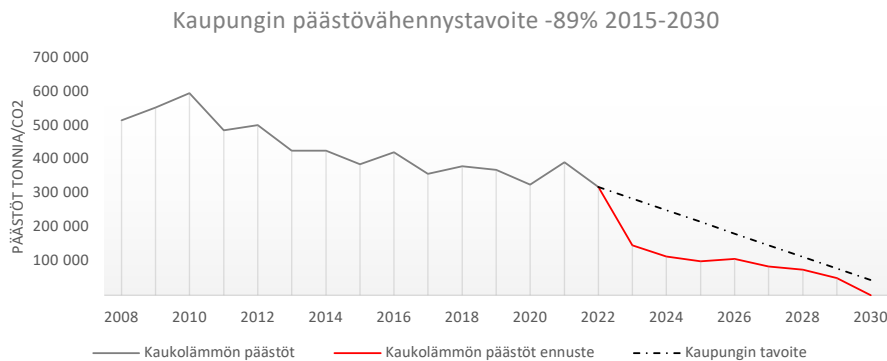


## Selvitys pyrkii edistämään siirtymää kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa lisäämällä ymmärrystä polttoon perustumattoman kaukolämmöntuotannon mahdollisuuksista ja rajoitteista.

Tavoitteena on löytää keinoja rajoitteiden purkamiseen ja selvittää, onko polttoon perustuvalla lämmöntuotannolla roolia hiilineutraalissa tai -negatiivisessa yhteiskunnassa.

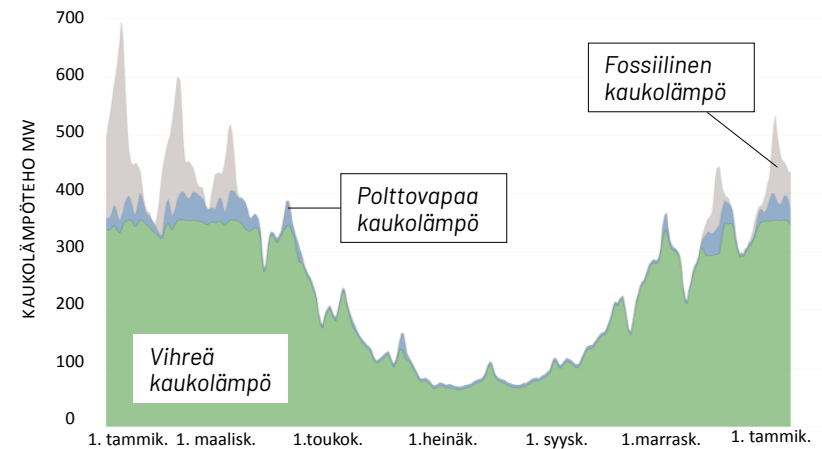
Ensimmäinen versio selvityksestä julkaistiin 1.9.2021. Tämän päivityksen tavoitteena on kertoa Tampereen Energian vihreän siirtymän toimenpiteet ja tarkentaa näkemyksiä teknologioista uusimman tiedon perusteella. Analysoimme myös vuoden 2022 energiakriisin vaikutusta siirtymään. Syvennämme ja tarkennamme analyysiä niiltä osin, mistä olemme oppineet uutta. Toivomme, että tämä selvitys antaisi työkaluja sekä energia-alan että politiikan päättäjille edistää ilmastotavoitteita.

Tampereen Energian tavoite on olla hiilineutraali vuoteen 2030 mennessä (kuva 1). Vastamme energia-alan perinteisen trilemman mukaisesti energiantuotannon taloudellisesta tuloksesta, ympäristövaikutuksista sekä huoltovarmuudesta. Missiomme mukaisesti pysäytämme ilmastomuutoksen yhdessä asiakkaidemme kanssa. Se tarkoittaa laajemmin sovellettavissa olevan tiedon tuottamista ja ratkaisujen etsimistä. Kyvykyys edistää siirtymistä kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa velvoittaa toimimaan tehokkaasti ilmastotyössä.

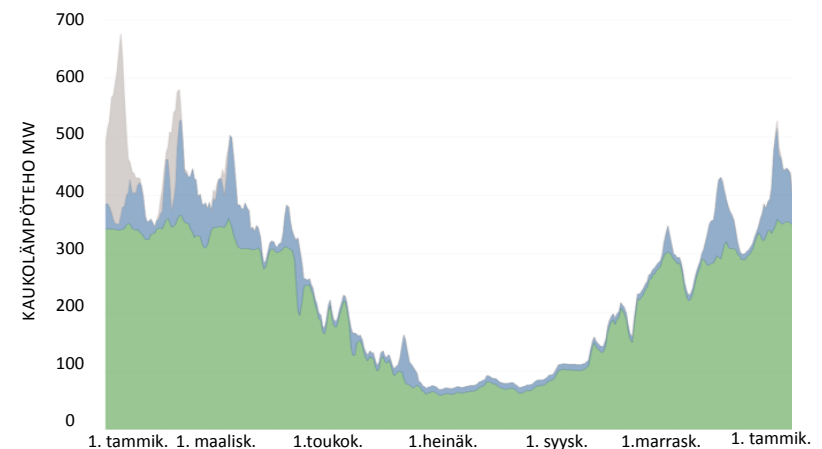


Kuva 1 Tampereen Energian kaukolämmön päästövähennystavoite sekä Tampereen kaupungin linjaus.

Hiilineutraaliustavoite on toteutumassa yli 90-prosenttisesti jo päätetyillä investoinneilla (kuva 3). Selvityksen tavoite polttoon perustumattoman lämmöntuotannon edistämisen ohella on valmistella viimeisten fossiilisten hiilidioksiditonniin tehokasta poistamista. Mitä lähemmäs hiilineutraalisuutta siirrytään, sitä kalliimpia päästövähennysten toteuttaminen on, koska jäännöspäästöt sijoittuvat kulutushuippuihin. Resursseja ei pidä hukata tehottomiin toimenpiteisiin, koska se hidastaa ilmastotavoitteiden saavuttamista.



Kuva 2 Tampereen Energian kaukolämmön tuotantorakenne vuonna 2023. Vihreään kaukolämpöön kuuluvat bioenergia ja jätteenpolto.



Kuva 3 Tampereen Energian kaukolämmön tuotantorakenne vuonna 2027, kun kaikki jo päätetyt investoinnit ovat valmistuneet.

## 1.1 Selvityksen rajaukset

# Tässä selvityksessä tarkastellaan polttoon perustumatonta ja hiilinegatiivista lämmitystä Tampereen Energian näkökulmasta.

Lämmön kysyntä ei ole kaupungissa vakio, kun siirrytään kohti 2040-lukua. Tärkeimmät muuttujat ovat rakennusten energiatehokkuus, kaupungin väestönkasvu ja ilmastonmuutos. 2020-luvulla rakennetut uudet asuinrakennukset ovat tilavuuteen nähden lähes tuplasti energiatehokkaampia kuin 1990-luvun rakennukset. Tampereen väkiluku kasvaa yli prosentin vuosivauhtia, mutta energiatehokkuus paranee huomattavasti nopeammin. Tämän lisäksi lämpenevä ilmasto vähentää lämmityksen tarvetta.

Näiden muuttujien lisäksi kaukolämmön kysyntään vaikuttaa markkinaosuus. Osa nykyään kaukolämmitetyistä rakennuksista siirtynee talokohtaisiin lämpöpumppuihin. Kaikkien tekijöiden summana kaupungin kaukolämmityksen tarve on vuonna 2040 pienempi kuin vuonna 2020. Tämä on huomioitu skenaarioissa parhaiden käytössä olevien ennusteiden mukaisesti.

Suunnitelmalle valitaan kiintopisteiksi Tampereen kaupungin sitoumus hiilineutraaliudesta vuonna 2030 sekä Suomen tavoite hiilineutraaliudesta vuonna 2035. Ne ovat tärkeitä välietappeja matkalla hiilinegatiivisuuteen. Polttoon perustumattoman ja hiilinegatiivisen suunnitelman tavoitevuodeksi asetetaan täten 2040.

Voidaan perustellusti olettaa, että 2030-luvulla poliittinen ohjaus johtaa investointeihin vaiheittain. Jos tavoite otetaan liian pitkälle tulevaisuuteen, menetetään uskottavuutta, eikä huomioida ilmasto- ja haasteiden kiireellisyyttä. Selvityksen keskeisimmille skenaarioille on laadittu askeleet haluttuun lopputilaan pääsemiseksi.

Tavoitevuosi pohjautuu pääosin nykyteknologiaan. Selvitykseen tuodaan rajoitetusti mukaan myös vaihtoehtoja, joissa on mukana astetta spekulatiivisempia teknologioita. Työn tavoitteena ei ole luoda täydellisen optimoitua kehityspolkua vuoteen 2040, vaan lisätä lukijan ymmärrystä nykyisistä haasteista ja realistisista vaihtoehdoista siirtymälle. Liian spekulatiivisen teknologian hyödyntäminen skenaarioissa ei edesauttaisi tätä. Suunnitelmia päivitetään teknologioiden jatkuvasti kehittyessä.



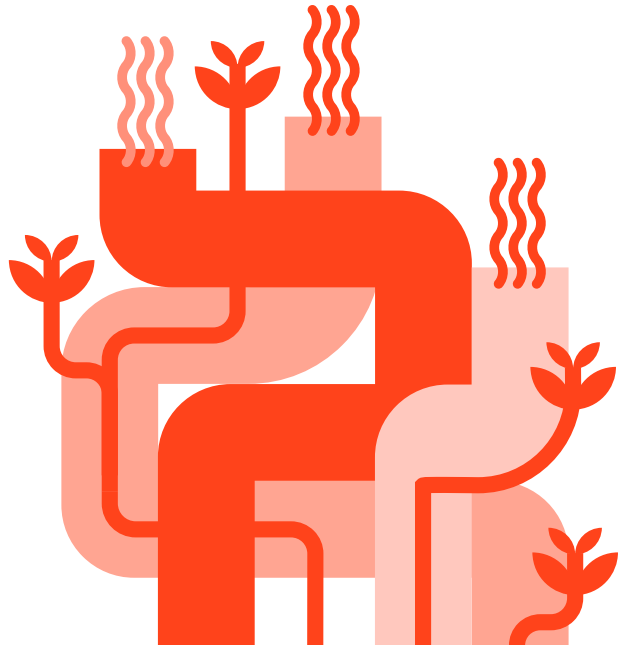
## 2 Johdanto





## Energiajärjestelmä kytkeytyy yhteiskuntaan monin riippuvuussidoksin.

Teknisesti ja poliittisesti toimivien ratkaisujen löytäminen on haastava tehtävä. Osoptimointia olisi vältettävä viimeiseen asti, vaikka sille on tietyissä poliittisissa olosuhteissa tilausta.



Tässä yhteydessä osoptimointi tarkoittaa esimerkiksi ilmastoneutraalin lämmitysratkaisun suunnittelua niin, että lämmityksen synnyttämät päästöt siirretään sähköjärjestelmään tai elinkaaripäästöihin. Osoptimoinnin välttäminen edellyttää eri teknologioiden vaatiman kokonaisinfrastruktuurin arviointia sekä sähkö- ja lämmitysjärjestelmien tarkastelua yhdessä tuntitasolla.

Kun tavoitteena on osallistua vaikuttavasti ilmastotoimiin, "uusiutuva", "polttop vapaa" ja "fossiilinen" ovat hyödyllisiä termejä, mutta nettopäästövähennys ratkaisee. On pyrittävä ratkaisuihin, jotka johtavat koko energiajärjestelmän kannalta negatiivisiin nettopäästöihin.

Kaukolämmön hinta ja koko järjestelmä rakentuu sen ympärille, kuinka saadaan varmistettua kylmimmän kuukauden lämmitys koko kaupunkiin.

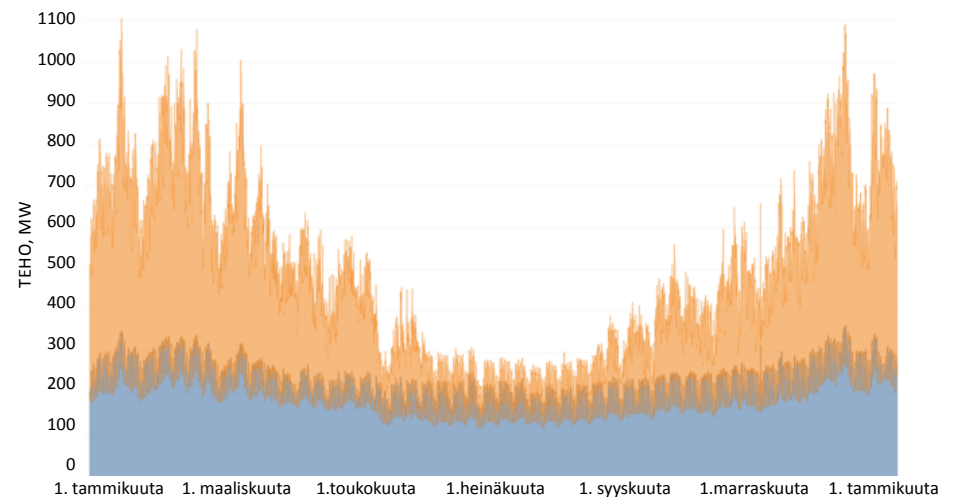
Pakkaskausi voi olla lyhyt, mutta se on tosiasiallisesti asian ydin ja siihen ratkaisujen tulisi aina vastata. Kylmimmällä hetkellä pitää myös pystyä hallitsemaan laiterikko suurimmalla tuotantolaitoksella. Huomattavaa on, että kaukolämmön kanssa kilpailevat lämmitysmodot ottavat kovimmalla pakkasella vaaditun lisätehon lähes poikkeuksetta sähköjärjestelmästä.

Kansantaloudelliset resurssit ovat rajalliset. Energiajärjestelmään sijoitetut ylimääräiset resurssit ovat pois muusta arvokkaasta toiminnasta, kuten terveydenhuollosta ja koulutuksesta. Jos toimenpiteet ja niukat resurssit kohdistetaan projekteihin, jotka eivät todellisuudessa tuota tehokkaasti nettopäästövähennyksiä, hidastetaan päästötavoitteeseen pääsemistä. Vääränlainen ohjaus voi johtaa uuteen lämmitysjärjestelmään, jonka päästöt, hintataso ja toimintavarmuus ovat monessa suhteessa heikompia nykyisen keskitetyn järjestelmän optimaaliseen hyödyntämiseen verrattuna.

Kaupunkien lämmittämiseen liittyy erityispiirteitä verrattuna muihin energiakysymyksiin. On erotettava sähkön ominaispiirteet lämmön ominaispiirteistä, Suomen tilanne muusta Euroopasta, kaupunkien lämmitys yksittäisten rakennusten lämmittämisestä ja erityisesti teho energiasta. Lämmitysjärjestelmän laadukkaassa suunnittelussa näkökulmat tulevat automaattisesti esiin. Tässä selvityksessä pyrimme tuomaan läpinäkyvyyttä eri vaihtoehtoihin.

## 2.1 Sähköllä lämmittämisen mielikuva ja todellisuus

Sähkön kulutus voi kaksin- tai kolminkertaistua kovimmilla pakkasilla kesään nähden. Lämmitysjärjestelmässä sen sijaan lämpöenergian kysyntä jopa kymmenkertaistuu kesän ja talven välillä. Kaupunkien lämmitys on siksi sähköjärjestelmälle rasittavaa ja vaikeasti hallittavaa kuormitusta.



Kuva 4 Sähkön ja kaukolämmön kysyntä tuntitasolla Tampereella vuonna 2021. Sähkön kysyntä on sinisellä ja lämmön kysyntä keltaisella.

Sähkön alkuperätakuujärjestelmä mahdollistaa halutun sähkön tuotantojakeen hankinnan vuosienergiana. Tuulisähköä voi siis hankkia lämmitykseen kovalle pakkasille, mutta energijärjestelmä ei sitä teknisesti tuota alkuperän hankkineen asiakkaan kysyntää vastaavasti. Huipputuotannon osalta alkuperätakuu ei vähennä päästöjä, vaan jakaa ne uudelleen. On teknisesti erittäin haastavaa seurata asiakaskohtaisesti tuotannon ja kulutuksen kytkentää reaaliaikaisesti.

Sähkön alkuperätakuujärjestelmän avulla luodaan markkinahinta uusiutuvan sähkön tuottamisesta, mutta nykyisellään se mahdollistaa päästöjen siirron energijärjestelmän sisällä asiakkaalta toiselle parantaen osin väärin perustein sähköllä lämmittämiseen liittyvää mielikuvaa. Nettopäästövähennysten tavoittelussa sähkön alkuperätakuu ei ole ongelmaton.

Euroopan Unioni on tunnistanut ongelman uusiutuvien liikennepolttoaineiden tuotannon osalta. EU:n delegoidussa asetuksessa C(2023) 1087 säädetään, että vuodesta 2030 eteenpäin uusiutuvan nestemäisen ja kaasumaisen liikennepolttoaineen alkuperätakuiden on vastattava kulutusta tuntitarkkuudella. Mikäli sama vaatimus vietäisiin laajemmin alkuperätakuumarkkinoille, olisi

mahdollista saada tieto sähkön kulutuksen todellisista päästöistä. Jos regulaatiota ohjataan tähän suuntaan, tuntitason seurannan vaikutukset alkuperätakuiden hintaan, saatavuuteen ja kattavuuteen olisivat todella merkittäviä. Sähköntuotannon ajoittamisen haasteita ja alkuperätakuujärjestelmää on käsitelty laajemmin syventävässä materiaalissa kappaleessa 8.

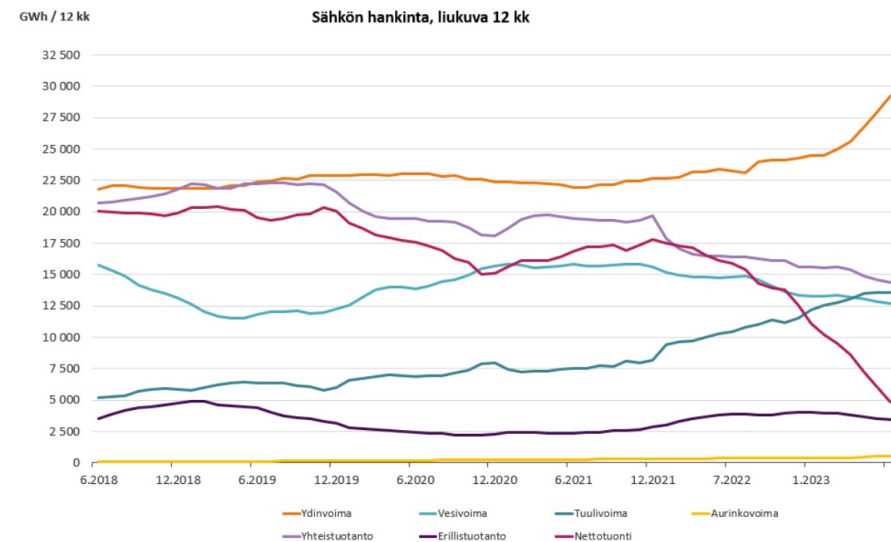
Hiilineutraalisuuteen vakavasti pyrkiville yrityksille sähkön alkuperätakuiden hankinta ei riitä täyttämään esimerkiksi "net zero" -väittämiä EU:n vihreiden väittämien direktiiviehdotuksen mukaisesti (3/2023). Tämä näkyy kiinnostuksen kasvuna hiilidioksidin teknisiä poistoja kohtaan. Hiilidioksidin talteenottoa käsitellään selvityksen kappaleessa 4.

## 2.2 Energiajärjestelmän trendit ja muutokset vuodesta 2021

- **Päästöttömän sähköntuotannon lisääntyminen**
- **Ukrainan sodan vaikutukset**
  - Venäjän sähkön tuonnin loppuminen
  - Puupolttoaineiden ja fossiilisen energian, erityisesti maakaasun, kallistuminen
  - Puun tuonnin loppuminen Venäjältä
  - Energiansäästön yleistymisen
- **Metsän nettokasvun hidastuminen**
- **Energiatehokkuuden kasvu**
- **Sähköveron alentuminen lämmöntuotannossa**
- **Vetyteollisuuden alkusoitto**

## Päästöttömän sähköntuotannon kasvu

Tuulivoiman tuotantokapasiteetti oli vuoden 2022 lopussa 5,7 GW, kun vuoden 2020 lopussa se oli vasta 2,6 GW. Myös aurinkovoimaan määrä on noussut Suomessa 293 MW:sta noin 600 MW:iin samalla aikavälillä. Nopea tuuli- ja aurinkovoiman rakennusvauhti näyttää jatkuvan ainakin vielä 2023. Kotimainen sähkön tuotantokapasiteetti on kasvanut suuresti myös Olkiluoto 3 -voimalaitoksen käynnistymisen myötä. Sähkön tuonti Venäjältä on loppunut, ja Suomesta on tulossa sähkön nettoviejä.



Kuva 5 Muutokset Suomen sähkön hankinnassa vuosina 2018–2023.<sup>1</sup>

## Ukrainan sodan vaikutukset

# Energiajärjestelmää koettelee Ukrainan sodan aiheuttama energiakriisi.

Pakotteet Venäjää vastaan ja Venäjän energia-aseen käyttö aiheuttavat lyhyellä aikavälillä siirtymää maakaasusta öljyyn ja puusta turpeeseen. Kaiken energian tuonti Venäjältä Suomeen on vähentynyt merkittävästi. Samaan aikaan investoinnit fossiilivapaaseen energiaan kiihtyvät.

Ennen Venäjän hyökkäystä maakaasu nähtiin Euroopan energiapolitiikassa erittäin merkittävänä työkaluna kivihiilen poistamiseksi. Nyt siirtymä lämpöpumppeihin, ydinvoimaan ja uusiutuviin energiantuotantomuotoihin on noussut kaasua houkuttelevammaksi. Kaasu on kuitenkin paljon muutakin kuin fossiilista ja venäläistä, ja sen vahvuudet energiajärjestelmän tehon takaajana ovat ennallaan. Kaasujen rooli skaalautuvana sektorikytkennän lähteenä ja kohteena saattaa pidemmällä välillä korostua, kun siirrytään kohti vetytaloutta ja uusiutuvia kaasuja. Kaasuinfrastruktuuri on Euroopan tasolla yksi energiamurroksen mahdollistajia, kuten Suomessa keskitetyt lämmitysjärjestelmät.

Muun Euroopan suuri fossiilisten polttoaineiden käyttö heijastuu myös Suomeen sähkön markkinahinnan kautta. Sodan aiheuttama energiakriisi kiinnitti Suomen sähkön hinnan eurooppalaisen ruskohiilen ja kaasulauhteen hintaan. Tämä sähkön hinnan muodostumismekanismi energiakriisin aikaan on paljastanut eurooppalaiseen sähköntuotantoon liittyvät riippuvuudet yleisölle. Pohjoismaisesta puhtaasta sähköstä sai kriisin aikaan korkean fossiilisähkön hinnan, koska sillä korvattiin fossiilista sähköä Euroopassa. Päästöoikeuksien noussut hinta on korostanut fossiilisiin perustuvan sähköntuotannon aiheuttamia hintahuippuja.

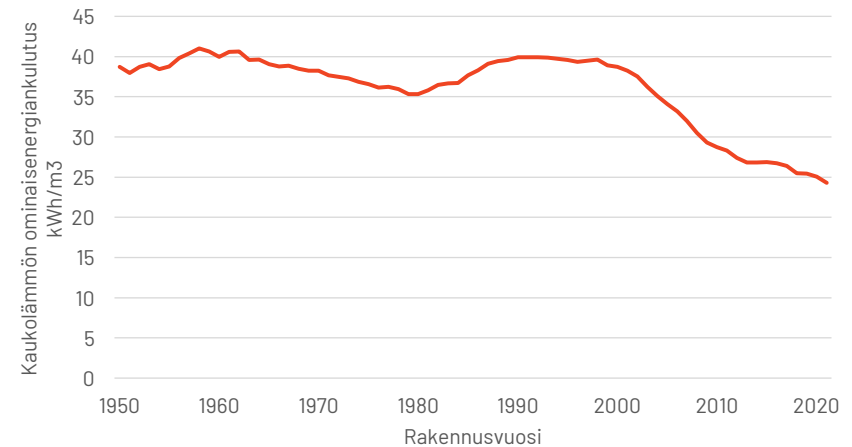
Suomen kytkeytyminen eurooppalaiseen sähkömarkkinaan tulee ottaa huomioon, kun suunnitellaan hiilineutraalia energiajärjestelmää. Fossiilisen sähköntuotannon muuttamisen mittakaava hiilineutraaliin järjestelmään on hämmästyttävän suuri ja ilmastotoimien vaikuttavuuden arviointiin vaikuttaa koko energiajärjestelmä myös Suomen ulkopuolella.

Ukrainan sodan takia puun tuonti Venäjältä on loppunut. Tämä on aiheuttanut puumarkkinalle shokin koko Itämeren alueella. Energiakriisin seurauksena Suomessa on tarve vähentää puun ja fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Kriisin lisäksi painetta puun käytön muutokselle tulee myös viimeisimmistä hiilinielulaskennoista, jotka osoittavat, että Suomen metsien hiilinielut ovat jääneet liian pieniksi tavoitteisiin nähden.

Aidosti ympäristöystävällisiä vaihtoehtoja kriisin hallintaan on ollut vähän. Lämmityskaudella 2022–2023 oli leutoa, mutta sähkön riittävyys oli silti uhattuna. Joustamaton talokohtainen sähkölämmitys ja maalämpö ovat lisänneet sähkönkäyttöä lämmön kulutushuippuihin, mistä aiheutuu haasteita sähkön tuotannon hallintaan.

Suomalaiset onnistuivat reagoimaan kohonneisiin sähkökustannuksiin kohtalaisesti. Fingridin arvion mukaan vuoden 2022 lämpötilakorjattu sähkönkulutus laski noin kuusi prosenttia, painottuen loppuvuodelle. Energian hinnan nousu kiinnitti huomion energiankulutukseen, mikä auttoi kriisinhallinnassa. Kaukolämpöäkin säästettiin Tampereella noin 4 %, vaikka siitä ei ollut pulaa. Nähtäväksi jää, palautuuko sähkönkulutus hintojen laskun myötä takaisin korkeammalla tasolle. Rakennuskanta on toki muuttunut energiatehokkaammaksi koko 2000-luvun ajan (kuva 6).

Lämmityskauden 2022–2023 kriisitilanteessa biomassojen merkitys lämmitystehon tuomiseen tuulettomiin ajanhetkiin korostui. Tampereella lämmitysliiketoiminta kesti kriisin hyvin monipuolisen tuotantorakenteen ansiosta. Kaukolämmön hinta ja toimitus

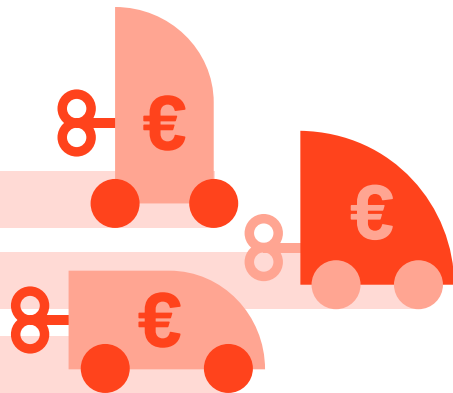


Kuva 6 Asuin kerrostalojen kaukolämmön kulutus rakennusvuoden mukaan. Kuvaajasta nähdään, että vuonna 2020 rakennettu kerrostalo kuluttaa tilavuutta kohden vain noin 60 % kaukolämpöä verrattuna 1990-luvun kerrostaloihin.

olivat vakaita sähkön tempoillessa. Helsinki ajautui valitettavasti dramaattisiin hinnannostoihin fossiilisen polttoaineen korkean osuuden vuoksi, mikä heikensi luottamusta ja heijastui myös muihin kaukolämpötoimijoihin.

## Sähköveron alentuminen

Siirtymää polttoon perustumattomaan kaukolämpöön kiihdytti 1.7.2022 voimaan astunut sähköveron alennus. Muutoksen myötä yli 0,5 MW tehoiset lämpöpumput, sähkökattilat sekä konesalit kuuluvat alempaan sähköveroluokkaan. Tämä muutos paransi merkittävästi sähkökattiloiden kannattavuutta ja vuoden 2022 aikana Suomessa onkin investoitu runsaasti sähkökattilakapasiteettiin. Tampereella otettiin käyttöön vuoden 2023 alussa yksi lämpöteholtaan 45 MW:n sähkökattila, jota käytetään korvaamaan fossiilista huipputuotantoa sekä biopohjaista tuotantoa sähkön markkinahinnan ollessa alhainen.



## Vetyteollisuuden alkusoitto

Vuoden 2023 alkupuolella Suomen hallitus julkisti periaatepäätöksen Suomen nostamisesta Euroopan johtavaan asemaan vetytaloudessa. Tavoitteena on saavuttaa 10 prosentin osuus Euroopan päästöttömän vedyn tuotannosta vuonna 2030. Tämä tarkoittaisi vedyn vuosituotannon kasvua miljoonaan tonniin vuoteen 2030 mennessä.

Kunnianhimoista tavoitetta kohti on otettu ensimmäiset askeleet Suomessa vuoden 2022 aikana, kun vetyinvestointien aalto pääsi kunnolla vauhtiin. Vuoden 2023 alkupuolella Ylen arvion mukaan Suomessa oli vetyyn liittyviä investointeja käynnissä jopa 15 miljardin euron edestä, yhteensä 26 hanketta<sup>2</sup>. Iso osa hankkeista on kuitenkin vielä suunnitteluvaiheessa. Suuressa osassa hankkeista on tarkoituksena tuottaa puhtaasta vedystä jatkojalosteita, ei pelkästään vetyä. Suomi on kuitenkin lisäksi mukana Itämeren alueen yli 5000 kilometrin vetyputkiverkoston kehittämisessä, joten tavoitteena on kuljettaa suuri määrä vetyä myös sellaisenaan Pohjois-Ruotsiin, Baltiaan sekä Keski-Eurooppaan.

Vetyteollisuuden pelisääntöjen kirjoittaminen käynnistyi Euroopassa vuoden 2023 alkupuolella, kun EU julkaisi kaksi delegoitua säädöstä osana RED II -direktiiviä. Säädökset luovat määritelmät uusiutuville sähköpolttoaineille sekä tuovat raamit sähköpolttoaineiden elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjen laskennalle. EU:ssa on avattu myös runsaasti tukimahdollisuuksia uusiutuvan vedyn investointeihin.

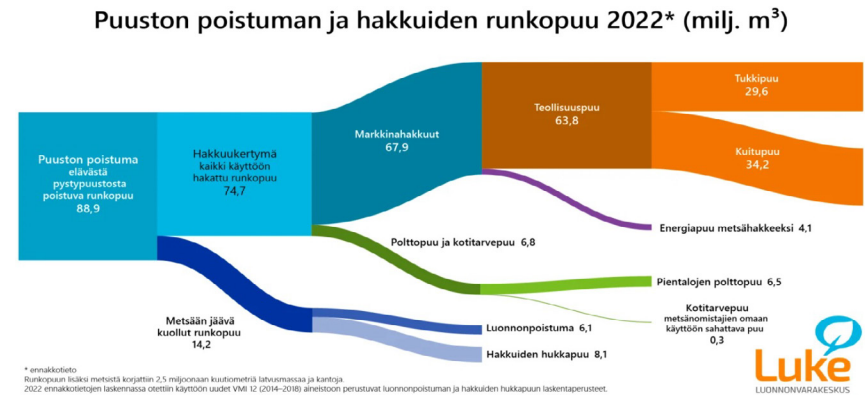
### 2.3 Biomassan kestävyys energiakäytössä

Biomassan käyttö ei saa vauhdittaa nielujen heikkenemistä tai vähentää biodiversiteettiä.

Käytännössä se tarkoittaa, että puuta ei tule voimalaitokselle vanhoista metsistä tai luonnon monimuotoisuuden kannalta tärkeitä alueilta. Tämä asettaa yhtiöille haasteen yhä tarkemmista toimintamalleista puun hankinnassa ja lähteiden raportoinnista. Tampereen Energia on avannut energiapuun käytön kestävyyttä ja toimenpiteitä **selvityksessään** vuonna 2022.

Suomessa ja muissa Pohjoismaissa puuta käytetään enimmäkseen yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa sekä lämpövoimalaitoksissa. Biomassa ei ole ratkaisu koko Euroopan vihreään siirtymään, vaan sen hyödyt tulevat ilmi sovellettuna

keskitettyyn tehon tuotantoon kaupunkien lämmityksessä. Ympäristöystävällisyyden edellytyksenä ovat olemassa oleva laaja kestävä metsäteollisuus ja valmiit kaukolämpöverkot. Ukrainan sodan aiheuttama shokki puumarkkinoille on järkyttänyt kestävä puun käytön tasapainoa Suomessa ja tulevina vuosina on tärkeää painottaa puun käytön kestävyysnäkökulmia huoltovarmuuden ohella.



Kuva 7 Puuston poistuman ja hakkuiden runkopuu Suomessa (LUKE 8.2.2023).





Vuoden 2022 kokonaishakkuukertymästä energiapuuksi luokiteltavaa puuta kerättiin 5 %. Tämä määrä kattoi noin kolmanneksen energiantuotannon puupolttoaineiden tarpeesta. Lisäksi energiantuotannossa käytetään harvennuksen sivutuotteita, kuten latvusmassaa ja kantoja, sekä metsäteollisuuden sivutuotteita.

Energiajärjestelmässä on aina tilanteita, jolloin biomassan käyttö on ympäristöystävällisempää kuin sähkön käyttö sekä tilanteita, kun sähkön käyttö on biomassan käyttöä ympäristöystävällisempää. Tehon tuotto sähköjärjestelmään voi olla hetkellisesti hyvin saastuttavaa, vaikka sähkön tuotannon päästöt vuositason tasolla ovat pienet. Sähkön käyttö lämmityksessä biomassan sijaan on parhaimmillaan tuulivoiman ylituotantotilanteissa. Ylituotantotilanne voi kestää päiviä tai vain tunteja. Keskitetty lämmitysjärjestelmä, joka kykenee yhdistämään joustavasti sähköä ja bioenergiaa sähköjärjestelmän tilan perusteella, on hyvin ympäristöystävällinen.

Bioenergiaprosessit avaavat mahdollisuuksia teknisen hiilinielun rakentamiseen. Mikäli tuotannossa syntyvä biogeeninen hiilidioksidi otetaan talteen, kaupungin lämmittäminen voi poistaa hiilidioksidia

ilmakehästä. Silloin metsät kaappaavat hiilidioksidia ilmakehästä ja se otetaan voimalaitoksella talteen ja varastoidaan pysyvästi. Puun sitoma hiilidioksidi ei missään vaiheessa vapaudu takaisin ilmakehään, vaan prosessi toimii kokonaisuudessaan mittavana hiilinieluna.

## Sähkön käyttö lämmityksessä biomassan sijaan on parhaimmillaan tuulivoiman ylituotantotilanteissa.

Kansainvälisen ilmastopaneelin (IPCC) skenaarioissa on laskettu, että ilman nettonegatiivisia päästöjä ilmastonmuutoksen katastrofaaliseksi määritellyiltä vaikutuksilta ei ole mahdollista välttyä. IPCC:n skenaarioissa merkittäväksi teknologiaksi nousee BECCS (Bioenergy Carbon Capture and Storage). BECCS voidaan nähdä Suomen tulevaisuuden vahvuutena erityisesti bioperäisten hiilidioksidilähteiden suuren saatavuuden ansiosta. Hiilidioksidin talteenottoa avataan tarkemmin kappaleessa 4.



# 3 Teknologiat





## Tässä selvityksessä arvioidaan eri teknologioita kolmesta näkökulmasta: potentiaali, kustannus ja saatavuus.

Tämän jaottelun tavoitteena on ensisijaisesti avata teknologioiden "hyvyyden" ulottuvuuksia, jotta niihin voidaan jatkokeskusteluissa pureutua. On eri asia kritisoida teknologian päästövähennyspotentiaalia tai hintaa. Hieman korkea kustannus ei ole ylittämätön este, päästövähennyksellä on aina jokin hinta.

Luvuissa on pyritty objektiivisuuteen, mutta näin monimutkaisessa aiheessa realistisesti ne kertovat enemmän Tampereen Energian nykyisestä tilannekuvasta, jonka pohjalta teemme päätöksiä. Näistä arvioista saa mielellään tulla kirjoittajia haastamaan.

**Päästövähennyspotentiaali** tarkoitetaan teknologian päästövaikutusta, mikäli teknologia otettaisiin laajasti käyttöön. Esimerkiksi kaupungin kokoinen energiavarasto ei itsessään vähennä päästöjä lainkaan, mutta mahdollistaa muiden teknologioiden tehokkaamman käytön. Niin ikään, jos teknologiasta saadaan lämpöä vain kesällä, sen päästövähennyspotentiaali on pieni. Kaupungin lämmittäminen päästöttömästi kesällä ei ole vaikeaa.

### Päästövähennyspotentiaali:

- 4** = voisi yksinään ratkaista hiilineutraalin lämmityksen ongelman
- 3** = suuri
- 2** = kohtalainen
- 1** = pieni



**Kustannuksilla** tarkoitetaan investointi- ja käyttökustannuksia yhteensä. Arvion tekeminen on haastavaa, koska tämänhetkiset kustannukset ja kustannukset kymmenen vuoden päästä ovat erilaiset. Selvityksen tavoitteena on lisätä ymmärrystä hiilinegatiiviseen yhteiskuntaan siirtymisen esteistä tänään. Kustannustaso tänään on oleellisempi vertailutaso kuin spekulatiivinen kustannustaso tulevaisuudessa. Joitain spekulatiivisia teknologioita työssä on tarkasteltu, kun on tärkeää selvittää, miksi ratkaisu ei voi perustua siihen nykyisen tiedon valossa.

**Kustannus:**

- 4** = mahdollistaa kaukolämmön hinnan laskemisen
- 3** = mahdollistaa kaukolämmön hinnan pitämisen ennallaan
- 2** = pakottaa nostamaan kaukolämmön hintaa
- 1** = merkittävästi kalliimpi kuin asiakkaiden vaihtoehtoiset lämmitysmuodot

**Saatavuudella** tarkoitetaan Tampereen Energian kykyä vaikuttaa teknologian käyttöönottoon. Jos ratkaisua ei voi hankkia mistään, eikä Tampereen Energia voi omalla toiminnallaan merkittävästi teknologian käyttöönottoa edistää, se saa saatavuudesta arvosanan 1. Mikäli teknologia saa mistä tahansa kategoriasta arvosanan 1, sitä ei lähtökohtaisesti tarkastella tässä selvityksessä. Jatkamme erilaisten teknologioiden tarkkailua ja päivitämme arviotamme vaihtoehtojen kypsydestä jatkuvasti.

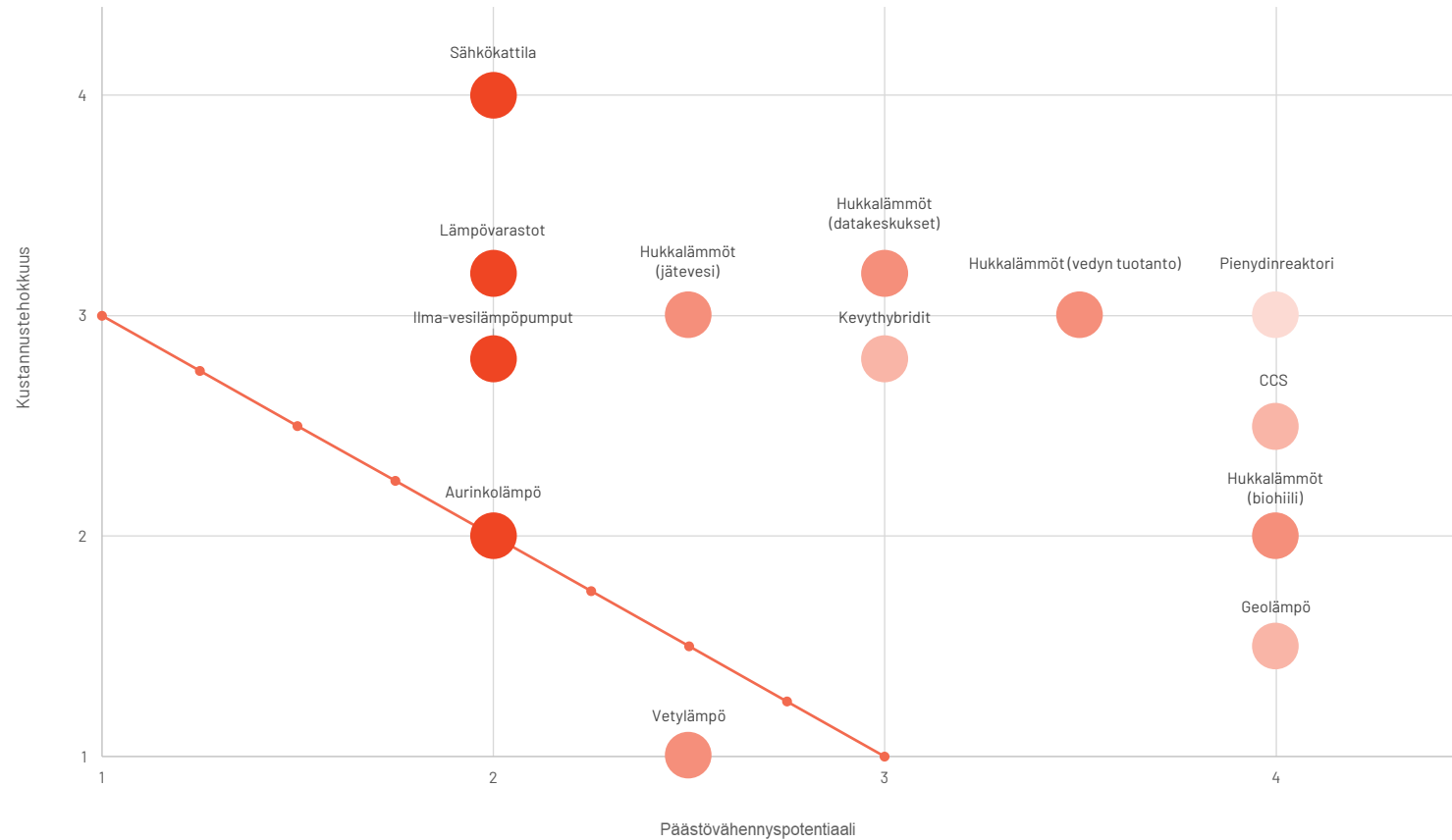
**Saatavuus:**

- 4** = Tampereen Energia voi omalla päätöksellään hankkia
- 3** = tarvitaan yhteistyökumppanin hyväksyntä
- 2** = tarvitaan useamman sidosryhmän hyväksyntä
- 1** = idean asteella



Teknologia	Päästövähennys-potentiaali	Kustannus-tehokkuus	Saatavuus
Lämpövarastot	2	3	4
Sähkökattila	2	4	4
Hukkalämmöt (datakeskukset)	3	3	3
Hukkalämmöt (jätevesi)	3	3	3
Hukkalämmöt (biohiili)	4	2	3
Hukkalämmöt (vedyn tuotanto)	4	3	3
Vety ja uusiutuvat kaasut	3	1	3
Kevythybridit	3	3	2
Ilma-vesilämpöpumput	2	3	4
Geolämpö	4	2	2
Pienydinreaktori	4	3	1
Aurinkolämpö	2	2	4
Hiilidioksidin talteenotto (CCS)	4	3	2

Taulukko 1 Teknologioiden kypsystarkastelu



Kuva 8 Yhteenveto teknologioiden potentiaalista, kustannustehokkuudesta ja saatavuudesta. Mitä himmeämpi pallo on, sitä huonompi sen saatavuus on. Kiinnostavia teknologioita ovat pallot oikeassa yläkulmassa. Kuvaajaan on merkitty katkoviivalla raja, jonka alapuolella olevat teknologiat eivät ole riittävän kiinnostavia tarkasteltavaksi. Jotta pisteet eivät mene päällekkäin, on kuvaajassa käytetty yllä olevaa taulukkoa tarkempia lukuja.

### 3.1 Lämpövarastot

- Päästövähennyspotentiaali = **2**
- Kustannustehokkuus = **3**
- Saatavuus = **4**

Lämpövarasto ei itsessään tuota energiaa tai tehoa, mutta mahdollistaa muiden ratkaisujen liittämisen lämmitysjärjestelmään ja sähkön varastoinnin lämmöksi.

Lämpövarastoja on kokoluokan mukaan kolmeen eri käyttö-tarkoitukseen: päivänsisäiseen käyttöön, viikkotason käyttöön ja kausivarastointiin. Lisäksi kysyntäjousto toimii käytännössä kuten päivänsisäinen lämpövarasto.

Varasto on erityisen houkutteleva vaihtoehto, kun tehdään sähköstä lämpöä. Sähkön hinta vaihtelee hyvinkin paljon, joten tuotannon siirtäminen päivän tai viikon sisällä on kannattavaa. Sähkömarkkinoilla hinta on myös hyvä indikaatio ympäristöystävällisyydestä. Koska nykyään korkea päästöoikeuksien hinta nostaa fossiilisen sähkön tuotantokustannusta, voidaan sanoa, että kun sähkön markkinahinta sähköpörssissä on alhainen, on se myös erittäin vähäpäästöistä.

Päivän sisäiseen varastointiin hyvä ratkaisu on perinteinen eristetty terässäiliö. Lämpöhäviöt ovat mitättömät, se säätty hyvin ja pienehköstäkin varastosta saadaan paljon hyötyä. Erityisesti hyötyä saadaan keväällä ja syksyllä, kun yön ja päivän välinen lämpötilaero on suuri. Lämpövarastojen koko on Tampereen tapauksessa välillä 100–2000 MWh. Näiden kustannustehokkuus on suuri, mutta maksimipotentiaali pieni. Tällainen lämpövarasto tullaan rakentamaan Tampereelle lähitulevaisuudessa.



Myös kysyntäjousto toimii päivän sisäisessä säädössä. Kysyntäjoustolla tarkoitetaan tässä kontekstissa kulutuksen siirtoa tunnilta toiselle, ei energiansäästöä. Kysyntäjoustopa jätetään rakennuksia lämmittämättä hetkellisesti, ja siirretään lämmitystarve hetkeen, jolloin lämmitys voidaan tehdä edullisemmin ja pienemmillä päästöillä. Rakennusta ei voi jättää kuitenkaan moneksi päiväksi kylmäksi, vaan rakennuksen lämpötila pitää palauttaa normaaliksi suhteellisen nopeasti.

Jos kaukolämpöjärjestelmässä on jo kaukolämpöakku, saadaan kysyntäjoustopa vain pientä hyötyä päivän sisäisessä säädössä. Kaukolämpöakku pienentää kysyntäjoustopa vuotuista kustannussäästöä noin 90 %, verrattuna järjestelmään, jossa olisi kysyntäjoustopa mutta ei kaukolämpöakku. Kysyntäjoustopa potentiaali päästövähennyksiin on siis joissain verkoissa hyvä, mutta Tampereen tapauksessa lähitulevaisuudessa hyvin pieni. Älykkäiden lämmitysratkaisuiden suuri päästövähennyspotentiaali onkin siinä, että ne antavat työkalun laskea sisälämpötilaa hallitusti, mikä vaikuttaa suoraan rakennuksen energiatehokkuuteen. Sisälämpötilan säätäminen ylös-alas on energiansäästöön nähden paljon vähemmän merkityksellistä sekä asiakkaan energialaskussa että kaukolämpöverkon päästöissä.

Viikkotason varastointiin tarvitaan huomattavasti kookkaampi varasto, Tampereella 10 000 MWh (eli 10 GWh) tai enemmän. Tällaisia on rakennettu tai rakenteilla esimerkiksi Ouluun (8 GWh), Helsinkiin (Mustikkamaa 11,6 GWh) ja Vaasaan (7–9 GWh). 10 GWh lämpövarastosta voidaan ottaa lämpöä esimerkiksi viikon verran noin 60 MW teholla. 60 MW vastaa talvella lämpiminäkin hetkinä korkeintaan 20 % Tampereen kaukolämmön hetkellisestä tarpeesta, joten kausivarastosta ei voida puhua. Tämän mittakaavan ratkaisuisa lämpöhäviöt muodostavat merkittävän kustannuksen. Tampereen Energian öljyvarastoon on teknisesti mahdollista rakentaa arviolta 11 GWh lämpövarasto. Tällaisen varaston kustannustehokkuus riippuu järjestelmässä olevan sähköistyksen määrästä. Täysin sähköistyneessä järjestelmässä viikkovaraston kustannustehokkuus on 3 tai 4, nykyisessä järjestelmässä ennemmin 2 tai 3.



Kausivarastoksi Tampereella soveltuu vähintään 100 GWh varasto. Vantaalla on meneillään esisuunnitteluvaihe 90 GWh:n lämpövarastosta. Sen kustannusarvio on noin 100 MEUR. Tämä olisi hieman halvempi kuin Helenin Mustikkamaan lämpövarasto megawattituntia kohti. Tampereella 100 GWh riittäisi kattamaan vajaat 5 % koko vuoden lämmön tarpeesta. Kausivarastot ovat teknisesti toteutettavissa. Kustannustehokkaampi ja häviöiden vuoksi yleensä ympäristöystävällisempi tapa on kuitenkin tuottaa päästötöntä lämpöä kysynnän mukaisesti. Kustannustason kehitystä ja projekteja seurataan tarkasti, mutta potentiaali ja kustannustehokkuus ison mittakaavan lämpövarastoille on vielä arvioitu alhaiseksi.

Tamperelainen Polar Night Energy on kehittänyt lämmön varastointiin hiekkaan perustuvan ratkaisun. Kun perinteisessä kaukolämpöakussa vesi vaihtelee noin 45 °C ja 95 °C välillä, hiekassa lämpötila on 400 °C. Hiekka lämmitetään sähkövastuksilla. Kaukolämmön tuotannossa tällä teknologialla on hyviä ja huonoja puolia verrattuna veden lämmittämiseen. Merkittävin etu on kyky tarjota lämpöä korkeassa lämpötilassa ilman polttamista. Tämä tekee teknologian houkuttelevaksi vaihtoehdoksi esimerkiksi lämpöpumppujen yhteyteen. Lämpöpumput eivät tuota kaukolämmön tarpeisiin tarpeeksi kuumaa vettä. Sähkövastuksen ja hiekkavaraston yhdistelmällä voitaisiin akku ladata halvimpina tunteina, ja purkaa kuumaa lämpöä sitten jatkuvasti lämpöpumpun tarpeisiin.

Merkittäviä huonoja puolia on kaksi. Ensimmäinen on se, että hiekkaan perustuvaa akkua ei voi ladata kuin sähköllä. Perinteistä kaukolämpöakkaa voidaan ladata sähköllä, biomassalla tai hukkalämmöllä ja näin huolehtia kaukolämpöverkon säädöstä ja estää tarve ajaa ylimääräiset lämmöt järveen. Toinen huono puoli on hinta. Jos hiekka-akku ei ole sovelluksessa, jossa korkeasta lämpötilasta hyödytään, on se kalliimpi vaihtoehto kuin rakentaa elektrodisähkökattila ja perinteinen kaukolämpöakku erikseen.

## Mitä on tehty vuoden 2021 selvityksen jälkeen:

Tampereen Energia on päättämässä rakentaa päivänsisäiseen säätöön soveltuvan kaukolämpövaraston Lielahteen. Projekti valmistunee vuoden 2025 aikana.

Tampereen Energian osittain omistama Enermix Oy on jatkanut kysyntäjoustoratkaisujensa edistämistä taloyhtiöissä. Valmetin joustoratkaisu, jossa hyödynnetään kaukolämpöverkon varastointikapasiteettia, on otettu käyttöön.

### 3.2 Sähkökattila

- Päästövähennyspotentiaali = 2
- Kustannustehokkuus = 4
- Saatavuus = 4

Sähkökattila on käytännössä jättimäinen vedenkeitin. Sisään menee sähköä ja kylmää vettä, ulos tulee lämmintä vettä.

Yksinkertaisen tekniikkansa ansiosta ne menevät pieneen tilaan ja ovat edullisia. Ne myös säätyvät nolasta täyteen tehoon minuuteissa. Kesästä 2022 alkaen sähkövero sähkökattiloille kaukolämpöverkossa on lähes poistettu, mikä on parantanut niiden kannattavuutta oleellisesti. Niitä rakennetaankin tällä hetkellä Suomeen ja Tampereelle kovaa vauhtia.

Tässä selvityksessä esitetyssä polttovapaassa skenaariossa sähkökattilateho on 350 MW. 350 MW on yhtä paljon kuin koko Tampereen nykyinen sähkönkulutus talvipakkasilla. Tällä ratkaisulla Tampereen kaupungin sähkötehon tarve siis kaksinkertaistuisi. Tämä on kuitenkin pienempi ongelma, kuin miltä se kuulostaa, kunhan sähkökattiloille on olemassa myös jokin varavaihtoehto sähkön tehpuolan tilanteisiin.

Sähköverkon voi ajatella puumaisena rakenteena. Paksu runko on Fingridin ylläpitämä kantaverkko. Ensimmäiset paksut oksat ovat Tampereen Energia Sähköverkon ylläpitämä 110 kV suurjänniteverkko. Jos sähkökattilat kytketään kiinni runkoon tai paksuimpiin oksiin, riittää rungon ja mahdollisesti yhden paksun oksan vahvistaminen. Jos taas sähkövastukset vietäisiin jokaiseen taloon tai asuntoon, voi näitä ajatella puun lehtinä. Tällöin täytyisi vahvistaa koko ketjua rungosta lehtien hiussuoniin asti, mikä olisi valtavan kallista.



Kuva 6 Vertauskuva sähköverkosta ja verkon rungon sähköistämisen hyödyistä.

Toinen avain lämmityksen sähköistämiseen sähkökattiloilla on joustava käyttö. Kasvavissa määrin sähköenergiaa on välillä liikaa ja välillä siitä on pulaa. Lisäksi sähköverkossa vapaa siirtokapasiteetti vaihtelee muun kysynnän ja huoltojen mukaan. Ei ole järkevää suunnitella sähkön tuotanto ja sähköverkko niin, että sähkökattiloiden oletetaan operoivan vuorokauden ympäri tilanteesta riippumatta. Sähkökattilat ovat edullisia, joten ne voidaan rakentaa vaihtoehtoisen tehon rinnalle. Sähkökattila voi osallistua kaikille säätömarkkinoille, ja näin helpottaa kantaverkon tasapainottamisessa. Jos yllättäen tuuli tyyntyy, korkeat säätöhinnat ohjaavat ajamaan kattilan alas ja käynnistämään vaihtoehtoista tehoa. Tämä on paljon kustannus- ja ilmastotehokkaampaa toimintaa kuin käynnistää kaasuturbiineita sähkön tehopulan välttämiseksi. Samaan tapaan, jos uusiutuvaa sähköä onkin yhtäkkiä ylimäärin tarjolla, sähkökattilat voidaan käynnistää nopeasti helpottamaan tilannetta.

Jo nykyiseen sähköverkkoon voidaan Tampereella kytkeä huomattava määrä sähkökattiloita. Sähköverkot on varsinkin kaupunkialueella suunniteltu niin, että laajaan, pitkäkestoiseen sähkökatkoon tarvitaan erittäin poikkeukselliset olosuhteet. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että jos sähkökattila voi sitoutua joustamaan sähköverkon tarpeiden mukaan, vapaata kapasiteettia rungon vahvoissa haaroissa on huomattavasti, jopa satoja megawatteja. Tätä voidaan entisestään vahvistaa uusilla kantaverkkoyhteyksillä. Uudet kantaverkkoyhteydet voivat palvella Suomen sähköistymistä yleisemminkin ja lisäävät Tampereen sähkönsaannin toimitusvarmuutta.



Sähkökattiloiden oikeanlainen sääntely siirtomaksuilla on keskeistä. Sähköenergian hinta ohjaa sähkökattiloita niille tunneille, kun uusiutuvaa halpaa sähköä on tarjolla. Sähkön markkinahinta ei ota kuitenkaan sähkön siirron pullonkauloja huomioon. Toisaalta sähkökattila ei myöskään rasita siirron pullonkaulaa, jos niin sovitaan. Sähkökattiloiden tehontarve on joustavaa ja käytetyt tehot ovat suuria. Mikäli siirto hinnoitellaan verkkoon kytketyn tehon perusteella, se ei huomioi sähkökattilan vahvuutta eli joustavuutta ja olemassa olevaa varakapasiteettia. Tariffista tulee liian korkea, eikä sähkökattilaa rakenneta. Paljon rakentavampi vaihtoehto on tariffi, joka ohjaa sähkökattilat pois siirron pullonkauloista, mutta ei sakota käytöstä, josta ei ole sähköverkolle haittaa.

Sähkökattila voi hyvin sopeutua kaikkiin sähkön siirron rajoitteisiin, kunhan siitä sovitaan. Ohjaussignaalin pitää olla riittävän vahva. Säättötarjouksia voidaan aktivoida maantieteellisesti oikeasta paikasta helpottamaan maan sisälle syntynyttä pullonkaulaa. Näkyvyys siirtokapasiteetin riittävyyteen tuntia pidemmälle tulevaisuuteen on hyvä kehityskohde.

Kaupungin lämmitys ei ole aidosti ilmastoneutraali pelkän sähkölämmityksen varassa johtuen sähkön huipputuotannon päästöistä. Kustannuksia kasvattavat sähkökattiloiden

rinnalla ylläpidettävät biomassaan tai fossiilisiin perustuvat varalämmönlähteet. Jos fossiilisia käytetään vain silloin, kun sähköntuotannossakin joudutaan turvautumaan fossiilisiin polttoaineisiin, ilmastovaikutus on olematon, mutta varalämmönlähde parantaa toimitus- ja huoltovarmuutta aivan keskeisesti verrattuna jäykkään sähköriippuvuuteen.

## Mitä on tehty vuoden 2021 selvityksen jälkeen:

Vuonna 2022 Ukrainan sodan alettua Tampereen Energia investoi nopeasti 45 MW sähkökattilaan, joka asennettiin Lielahteen. Sähkökattilan sijaintipaikaksi valikoitui Lielähti, jotta sähkökattila parantaa läntisen Tampereen kaukolämmön toimitus- ja huoltovarmuutta kovilla pakkasilla.

Sähkökattilan rakentamisen kustannus oli noin kolme miljoonaa euroa ja sähkökattilan toimitti norjalainen PARAT Halvorsen AS. Laitos aloitti tuotannon maaliskuussa 2023. Päätös uuden sähkökattilan hankinnasta ollaan tekemässä.

### 3.3 Hukkalämmöt

- Päästövähennyspotentiaali = **3-4**
- Kustannustehokkuus = **2-3**
- Saatavuus = **3**

## Tampereella on pyritty aktiivisesti tunnistamaan erilaisia hukkalämmönlähteitä.

Selvityksen ensimmäisen version jälkeen on osoittautunut, että osa aiemmin tunnistetuista hukkalämmönlähteistä eivät ole realistisia toteutumaan Tampereella tulevina vuosina. Toisaalta samaan aikaan on muodostunut myös uusia hukkalämmön lähteitä. Hukkalämpöä on rajallisesti saatavilla, mikä tarkoittaa, että Tampereen Energialla on vain rajalliset mahdollisuudet rakentaa polttovapaata skenaariotaan hukkalämmön varaan.

Mikäli järjestelmään haluttaisiin lisätä hukkalämmöntuotantoa, on hyödynnettävissä olevia lämmönlähteitä siis löydettävä joko merkittävästi lisää tai nykyisiä kasvatettava. Pienen kokoluokan lämmönlähteitä olisivat esimerkiksi jäähallit ja kauppojen kylmäjärjestelmät. Kokoluokka näissä on kuitenkin sen verran pieni,

että ne voidaan käyttää oman tarpeen pienentämiseen. Esimerkiksi Nokia-areenalla otetaan talteen jäähdytyksen lämmöt, jotka parhaimmillaankin kattavat joitain kymmeniä prosentteja kyseisen areenan lämmöntarpeesta.

Hukkalämmön talteenottoa suunniteltaessa on otettava huomioon se hukkalämmön ostajan kannalta ikävä tosiasia, että jos varsinainen tuotantoprosessi loppuu tai muuttuu energiatehokkaammaksi, loppuu myös hukkalämmön saanti.

Tampereen Energia on erittäin kiinnostunut kuulemaan kaikista uusista hukkalämmön hyödyntämisen mahdollisuuksista.

## Vedyntuotannon hukkalämmöt

Suurin hukkalämpöjen potentiaali löytyy vedyn tai synteettisen polttoaineen tuotannosta. Esimerkiksi nyt edistymään lähtenyt Nordic Ren-Gasin synteettisen polttoaineen tuotantolaitos tuo Tampereen kaukolämpöverkkoon merkittävästi ympäri vuoden saatavilla olevaa hukkalämpöä. Ensimmäisessä vaiheessa vuoteen 2026 mennessä hukkalämpöä saadaan kaukolämpöverkkoon keskimäärin 20 MW, mutta tuotantotehon noustessa on hukkalämpöä mahdollista saada jopa kolminkertaisesti tähän nähden. Tätä vaihtoehtoa käsitellään tarkemmin luvussa 3.4 Vety ja uusiutuvat kaasut.

## Datasalit

Vuonna 2022 ilmoitettiin Suomen suurimmasta datasalihankkeesta Espooseen. Toimenpiteet Espoon hiilineutraaliustavoitteen saavuttamiseksi koostuvat erilaisista sähköpohjaisista ratkaisuksista, kuten lämpöpumpuista ja sähkökattiloista, sekä biopohjaisista ratkaisuksista huippulämmöntuotantoon. Isoin yksittäinen investointi on kuitenkin Microsoftin kolmen datakeskuksen hanke, jonka

Espoon alueella sijaitsevan hukkalämmön Fortum ottaa talteen. Tämä hanke kattaa jopa 40 % alueen kaukolämmön tarpeesta. Fortumin mukaan kyseessä on maailman suurin datakeskusten hukkalämmön talteenottoprojekti ja tietävästi Suomen historian suurimpia yksittäisiä ICT-investointeja. Microsoft ei ole vielä kertonut investoinnin euromäärää. Fortum puolestaan arvioi, että sen omat investoinnit Espoon kaukolämpöverkkoon ja lämmöntalteenottoon ovat noin 200 miljoonaa euroa.

Tampereella on yksi datasali, josta hukkalämpöä on saatavilla. Kyseessä on Nokian datasali Hatanpään valtatiellä. Datasalin hukkalämpöjä alettiin ottaa talteen keväällä 2022. Lämmöntalteenottokapasiteettia on tarkoitus tulevina vuosina kasvattaa.

Datasalit ovat tasainen ympäri vuoden saatavilla oleva hukkalämmönlähde, mutta niiden määrä on Suomessa rajallinen. Datasalien vähäisyyden lisäksi oleellista on niiden sijainti kaukolämpöverkon varrella ja hukkalämpöjen talteenoton kannattavuus. Esimerkiksi Googlen datakeskus Haminaassa ei tuota lämpöä kaukolämpöverkkoon, vaan se viilennetään merivedellä.

## Jätevedenpuhdistamo

Sulkavuoren keskuspuhdistamon hukkalämpöjen hyödyntämistä on selvitetty perusteellisesti. Tämä on mukana suunnitelmassa, vaikka on kallis nykyiseen pitkän tähtäimen suunnitelmaan verrattuna. Monissa muissa kaupungeissa jäteveden lämpö otetaan jo talteen. Sellaisissa kaupungeissa olosuhteet ovat kuitenkin suotuisimmat kuin Tampereella. Tampereella jätevedenpuhdistamo sijaitsee kaukolämpöverkkoon nähden huonossa paikassa, pullonkaulojen väärällä puolella ja kaukana priimaavista (veden lämpötilaa nostavista) laitoksista ja voimalaitosten sähköverkoista, mikä nostaa sähkön siirron kustannuksia. Jätevesilämpöpumppu on kuitenkin verraten kustannustehokas vaihtoehto, joka on 2040 mennessä toteutettavissa, mikäli toimintaympäristö muuttuu nykyisestä.

## Biohiili

Biohiiltä tuotetaan kuumentamalla biomassaa matalissa happipitoisuuksissa. Tällöin biomassan haihtuvat aineet poistuvat, jättäen jäljelle pääasiassa hiilipitoiset yhdisteet. Biohiilellä on pitkä käyttöhistoria maanparannusaineena ja sitä on tutkittu potentiaalisena keinona sitoa hiiltä maaperään jopa sadoiksi vuosiksi. Biohiilen tuotannossa syntyy merkittävästi hukkalämpöjä. Vuosina 2019–2022 Tampereella tuotettiin biohiiltä ja siitä saatiin keskimäärin 0,5 MW teholla hukkalämpöä kaukolämpöverkkoon.

Biohiilen toteutuminen suuressa mittakaavassa vaatii poliittista ohjausta, jotta biohiilen kysyntä kasvaa ja hiilen sidonta olisi kannattavaa. Toistaiseksi biohiilen kysyntää rajoittaa sen melko korkea hinta ja tarpeen kausiluonteisuus. Yksi vaihtoehto on pyrkiä tukemaan biohiilen tuotannon lisäämistä aluksi lämmöntuotannon ja hiilensidonnan näkökulmasta ja ottaa riskiä hiilen kysynnän nousun suhteen. Tämä olisi investointikustannuksiltaan luonnollisesti kallista.

## Mitä on tehty vuoden 2021 selvityksen jälkeen:

Nokian datasalin kiinteistön omistaja Castellum ja Tampereen Energia toteuttivat yhteistyössä lämmöntalteenoton datasalitoiminnoista keväällä 2022. Kaukolämpöverkkoon saadaan ensimmäisessä vaiheessa noin 3,5 MW teholla hukkalämpöä. Jos lämpöteho kasvaa tämän hetken suunnitelmien mukaisesti, vuonna 2025 tuotetaan lämpöä noin 7 MW teholla.

Tampereen Energia ja Nordic Ren-Gas allekirjoittivat hankekehitys-sopimuksen synteettistä metaania tuottavasta Power-to-Gas-tuotantolaitoksesta Tarastenjärven voimalaitosalueelle joulukuussa 2022. Tästä laitoksesta saadaan hukkalämpötehoja ensimmäisessä vaiheessa keskimäärin 20 MW.



### 3.4 Vety ja uusiutuvat kaasut

- Päästövähennyspotentiaali = **3**
- Kustannustehokkuus = **1**
- Saatavuus = **3**

Vedyn suhteen käsityksemme on muuttunut eniten selvityksen edellisestä versiosta. Vety tulee olemaan nopeasti kasvavassa roolissa Euroopan projektissa päästä eroon venäläisestä maakaasusta.

Ensimmäinen vetyä tuottava laitos aloittanee Tampereella jo 2026. Nordic Ren-Gas Oy tulee tuottamaan laitoksessaan vedystä synteettistä metaania liikennekäyttöön. Tampereen Energia hyödyntää samalla syntyvät hukkalämmöt kaupungin lämmittämisessä mielellään.

Eurooppalainen energiajärjestelmä nojaa Suomea paljon enemmän kaasuinfraan. Eurooppalaisen energiajärjestelmän hiilineutraalisuus edellyttää valtavia määriä vetyä. Mittakaava on verrannollinen nykyiseen fossiiliteollisuuteen. Vuonna 2021 EU:ssa käytettiin maakaasua noin 4100 TWh. Maakaasua ei korvata yksi yhteen vedyllä, vaan mahdollisimman suuri osa suoraan sähköllä ja energiatehokkuuden kasvattamisella.



Euroopan Unionin vetystrategiassa on asetettu vuoden 2030 tavoitteeksi tuottaa 10 miljoonaa tonnia (330 TWh) puhdasta vetyä EU:ssa eli hieman alle kymmenen prosenttia nykyisestä maakaasun kulutuksesta. Maakaasun nykyiseen kulutukseen verraten lopullinen tarve tulee olemaan reilusti tätä tavoitetta enemmän. Jos oletetaan, että Euroopassa tuotettaisiin pidemmällä aikavälillä esimerkiksi 20 % nykyisestä maakaasun tarpeesta vetyä, tämä tarkoittaisi 820 TWh määrää. Koska Suomella on tavoitteena tuottaa 10 % Euroopan vihreästä vedystä, olisi Suomen osuus tässä kontekstissa 82 TWh.

Mittakaavan hahmottamiseksi Suomen sähkönkulutus vuonna 2022 oli juuri 82 TWh. Jos oletamme 50 % hyötysuhteen vedyn valmistuksessa, vetyä syntyisi sillä 41 TWh. Koska Suomen nykyinen sähkönkulutus menee muihin käyttötarkoituksiin, tarvittaisiin siis aiemmin mainitun 82 TWh vedyn valmistukseen Suomen sähköjärjestelmän kolminkertaistaminen. Jos palataan vertaamaan tätä lukua nykyiseen maakaasun käyttöön Euroopassa, joka on siis 4100 TWh, olisi tämä 82 TWh vetyä siitä noin kaksi prosenttia. Tämän ajatusleikin tarkoituksena on havainnollistaa, että Suomen sähköntuotannon kolminkertaistaminen, vaikka on Suomelle valtava projekti, on eurooppalaisittain vain vetytalouden alkupihaus. Vaikka vetyteollisuusvisiot toteutuisivat suppeinkin, se on silti aivan valtavan

kokoluokan teollista toimintaa, energiakäyttöään suurempaa kuin Suomen kaikki muu teollisuus yhteensä.

Edellisessä selvityksessä näimme tuulivoiman mukaan vaihtelevan vedyn tuotannon epätodennäköisenä Tampereella 2040 mennessä. Energiakriisi on kuitenkin tuonut korostetusti esiin, että Suomessa sähkö on muuta Eurooppaa edullisempaa ja puhtaampaa. Lisäksi EU:n regulaatio ohjaa tuottamaan vetyä nimenomaan tuulivoiman tuotannon mukaisesti. Maailmanmarkkinoilla uusiutuva vety kilpailee edullisemman maakaasusta tehdyn vedyn kanssa, eikä ole kilpailukykyinen, jos hiilidioksidipäästöistä ei joudu maksamaan. Regulaatio on siis vetyteollisuuden alkuvaiheessa merkittävin alaa muovaava voima.

Vetyteknologia tuo kaksi sovellusta lämmittämisessä: vedyn valmistuksessa syntyvän hukkalämmön hyödyntäminen tai vedyn käyttö suoraan lämmöksi. Vety palaa hapen kanssa puhtaaksi vedeksi, joten se on täysin hiilineutraalia, olettaen, että vedyn tuotanto on ollut hiilineutraalia. Tämän kappaleen alussa esitetyt päästövähennyspotentiaali, kustannustehokkuus ja saatavuus viittaavat vedyn polttamiseen lämmöksi. Hukkalämmön houkuttelevuutta on kuvattu kappaleessa 3.3.

Vedyn tuotanto kaukolämpöverkkojen yhteydessä on energiatehokasta. Hyötysuhde vedyn tuotannossa on 50 % paikkeilla. Jos hukkalämmöt otetaan talteen, pomppaa hyötysuhde noin 90 prosenttiin. Vedyntuotantoa voi verrata sähkön ja lämmön yhteistuotantoon (CHP), jonka hyödyntämiseen kaukolämpöverkot alun perin perustuvat. CHP-tuotannossa päätuote on sähkö ja hukkalämmöt otetaan talteen kaukolämpöverkkoon. Ehkä tulevaisuudessa vedyn tuotanto ottaa sähkön tuotannon roolin tarjoamalla energiatehokasta hukkalämpöä kaukolämpöverkkojen asiakkaille. Vedyn tuotantoa on mallinnettu selvityksessä esitettyihin skenaarioihin huomattava määrä.

Vetyä ei toistaiseksi kannata polttaa lämmöksi. Vedystä tulee olemaan pulaa ja sen tuotanto on varsin kallista. Toisaalta vedyn kuljetus ja varastointi on haastavaa. Ei ole mitenkään mahdotonta, että pääosin muuhun tarpeeseen rakennetussa vetylaitoksessa vedyn käyttö samalla tontilla korkean sähkön hinnan aikaan CHP-prosessissa osoittautuu kannattavaksi. Pääosin energiatehokkuudessa on kuitenkin resurssitehokkaampia hiilineutraaleja investointivaihtoehtoja tarjolla. Hiilineutraalin vedyn parhaat käyttökohteet löytynevät teollisuudesta ja raskaasta liikenteestä, jossa päästövähennyksiä on muuten vaikea toteuttaa. Toistaiseksi emme ole mallintaneet skenaarioihin vedyn polttoa energiaksi.



### 3.5 Lämpöpumput

- Päästövähennyspotentiaali = **2**
- Kustannustehokkuus = **3**
- Saatavuus = **4**

## Lämpöpumpputeknologiat voi jakaa eri kategorioihin riippuen käytetystä lämmönlähteestä.

Kerrostalojen kokoluokassa käytetyt lämpöpumput ovat joko maalämpö-, ilmavesi- (IVLP) tai poistoilmalämpöpumppuja (PILP). Erityisesti omakotitaloissa ja mökeillä myös ilma-ilma-lämpöpumput ovat yleisiä. Kaukolämmön tuotannossa voidaan teollisen kokoluokan lämpöpumpulla hyödyntää keskitettyjä hukkalämmönlähteitä, kuten jätevesiä ja teollisuuden prosesseja.

### Ilma-vesilämpöpumput

Ilma-vesilämpöpumpuissa lämpö siirretään ulkoilmasta vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään. Ilma-vesilämpöpumpun etuna on se, että sitä voidaan rakentaa isossa mittakaavassa ilman erillistä lämmönlähdettä. Lämpöpumpun sijoittaminen vaatii jonkin verran suunnittelua, sillä laitoksista tulee melua sekä kylmää ilmaa ulos, mikä voi vaikuttaa negatiivisesti alueen muuhun käyttöön.

Fortum on lähtenyt skaalaamaan IVLP-teknologiaa teolliseen mittakaavaan Espoon, Kauniaisten ja Kirkkonummen kaukolämpöverkon alueelle. Kesällä 2023 käynnistyy Vermoon Suomen suurin IVLP-laitos. Laitos on kooltaan 11 MW ja se tuottaa sekä lämmitystä että jäähdytystä. Vermon lisäksi Fortum suunnittelee Espoon Keraan lämpöpumppulaitosta, joka tuottaa ilmasta ja alueen muista lauhteista lämpöä 20 MW maksimiteholla. Keskitetyn lämpöpumppulaitoksen lisäksi alueelle rakennetaan matalalämpöverkko, joka parantaa lämmöntuotannon hyötysuhdetta.

Veroon tulevan Suomen suurimman IVLP-laitoksen arvioiduksi tuotantomääräksi on ilmoitettu 92 GWh. Täten laitoksen huipunkäyttöaika on noin 8400 tuntia eli käytännössä laitos ajaisi laskentojen mukaan melkein ympäri vuoden täydellä teholla. Ilma-vesilämpöpumppujen COP (coefficient of performance eli kulutetun sähkötehon suhde tuotettuun lämpöön) vaihtelee ulkolämpötilan mukaan. Fortum on ilmoittanut laitoksen COP:ksi 1–4. Omien selvitystemme mukaan IVLP-laitoksessa vuoden aikana tuotetulle lämmölle keskimääräinen COP on noin 2, mutta se on monimutkainen teknistaloudellinen optimointi suhteessa esimerkiksi investointikustannukseen.

Vermon IVLP-laitos sai TEM:ltä investointitukea 3 MEUR. Tarkkaa investointikustannusta ei ole ilmoitettu, mutta karkeasti voi olettaa TEM:n tukimäärän perusteella, että investoinnin kokoluokka on 10 MEUR (mikäli tukiprosentti olisi 30 %) eli täten investointikustannus on noin 1 MEUR/MW. Olemme kuulleet ehdotuksia, että hinta voisi

olla jopa 0,3–0,6 MEUR/MW, mutta toistaiseksi emme ole nähneet käytännön projekteja, joissa tällaiseen kustannustasoon olisi päästy, joten epäilemme, että mainittu alempi kustannustaso ei koske koko laitosten investointia, vaan ainoastaan osaa siitä.

Ilma-vesilämpöpumppuun perustuvaa järjestelmää on visualisoitu kappaleessa 8.5. Teknologian ongelmana on se, että saatavuus on käänteinen suhteessa tarpeeseen. Mitä enemmän ulkoilma on pakkasella, sitä vaikeampaa ilmasta on saada lämpöä, ja toisaalta sitä suurempi lämmön tarve kaupungissa on. Tampereella ei ole investoitu ilma-vesilämpöpumppuihin, sillä fossiilittomasta lämmöstä ei ole pulaa lämpimämpään vuoden aikaan ja talvella käyttökustannuksiltaan samaa kokoluokkaa oleva sähkökattila on investointikustannuksiltaan halvempi. Ilma-vesilämpöpumput ovat hyvä vaihtoehto, jos tarvitaan lisää lämpöpumppuihin perustuvaa lämmöntuotantoa lämpimään ja viileään aikaan vuodesta.

Selvityksessä esitettyyn täysin polttovapaaseen skenaarioon (skenaario X) IVLP:n tuotantoa on lisätty. Jos muita lämmön lähteitä ei ole tarjolla, on IVLP sähkökattilaa energiatehokkaampi vaihtoehto jatkuvassa tuotannossa. IVLP:n lisääminen skenaarioihin lisäsi investointikustannusta huomattavasti, koska se ei kuitenkaan vähentänyt tarvittavien sähkökattiloiden määrää. Lämpöjärjestelmä pitää mitoittaa kovimmille pakkaskeskeille, joten lämmöntuotantomuodot, jotka eivät tuota silloin lämpöä, ovat ongelmallisia.

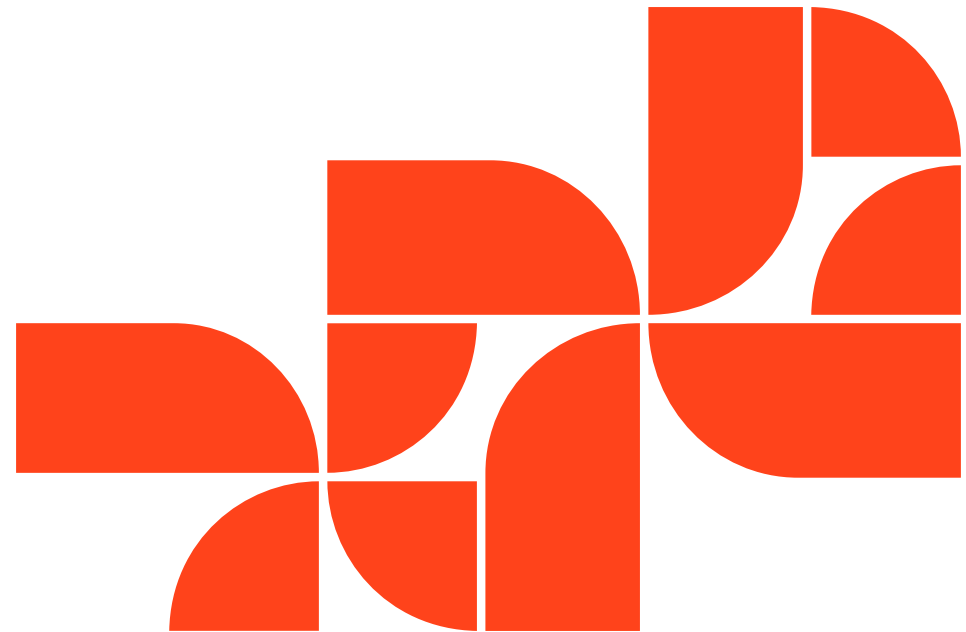
## Järvilämpö

Näsijärveä lämmönlähteenä hyödyntävää lämpöpumppua on Tampereella esitetty esimerkiksi Hiedanrannan lämmityksen vaihtoehdoksi. Helsingin lämmitykseen on myös esitetty merivesilämpöpumppua. Esimerkiksi Tukholmassahan tällainen merivesilämpöpumppu jo on. Helsingin tapauksessa matala merivesi tekee vaihtoehdosta huomattavasti Tukholmaa kalliimman toteuttaa. Tampereella nämä ongelmat ovat vielä oleellisesti suuremmat.

Energiayhtiö Helen on tutkinut meriveden soveltuvuutta lämpöpumppujen lämmönlähteeksi. Yhtiön selvityksessä sanotaan, että käytännössä tarvitaan 3-asteista vettä lämpöpumpun toiminnan varmistamiseksi ja todennäköisyys talvella näin lämpimän veden esiintymiselle 35 metrin syvyydessä on alle 10–25 %<sup>3</sup>. Jos oletetaan,

että Näsijärven pohja on yhtä kylmä kuin merenpohja Helsingin edustalla, saadaan tulokseksi, että järvivesi ei sovellu talvella lämpöä tuottavan lämpöpumpun lämmönlähteeksi. Näsijärvestä löytyy vain muutama kohta, jossa syvyys on yli 35 metriä ja näissäkin kohdissa jatkuvan lämpötehon saamiseen liittyy merkittäviä epävarmuuksia.

Hyvin pienessä mittakaavassa järvilämpöä hyödyntävä lämpöpumppu voi olla taktisella tasolla kiinnostava, mutta tässä selvityksessä ja tulevaisuuden skenaariomallinnuksissa on pienen kokoluokan ratkaisut jätetty tarkastelun ulkopuolelle.





## Kevythybridit

### Kevythybridillä tarkoitamme lämmitysratkaisua, jossa

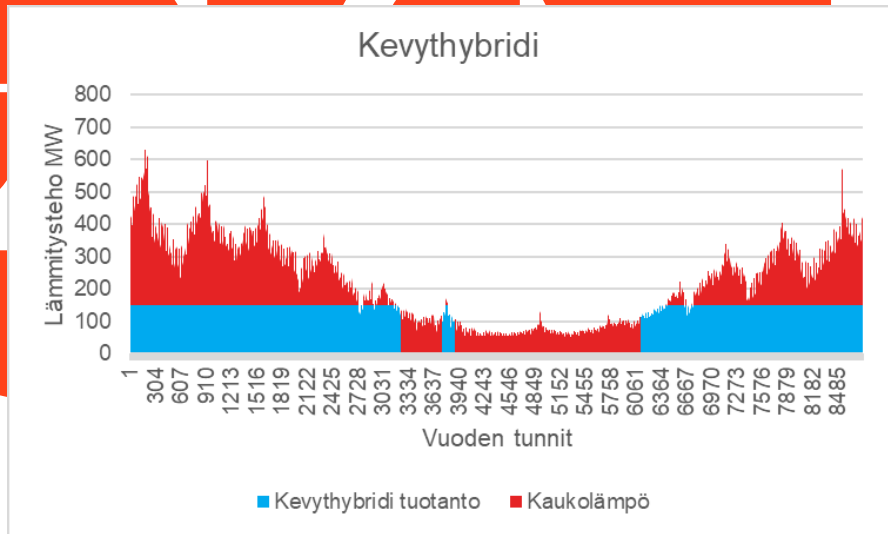
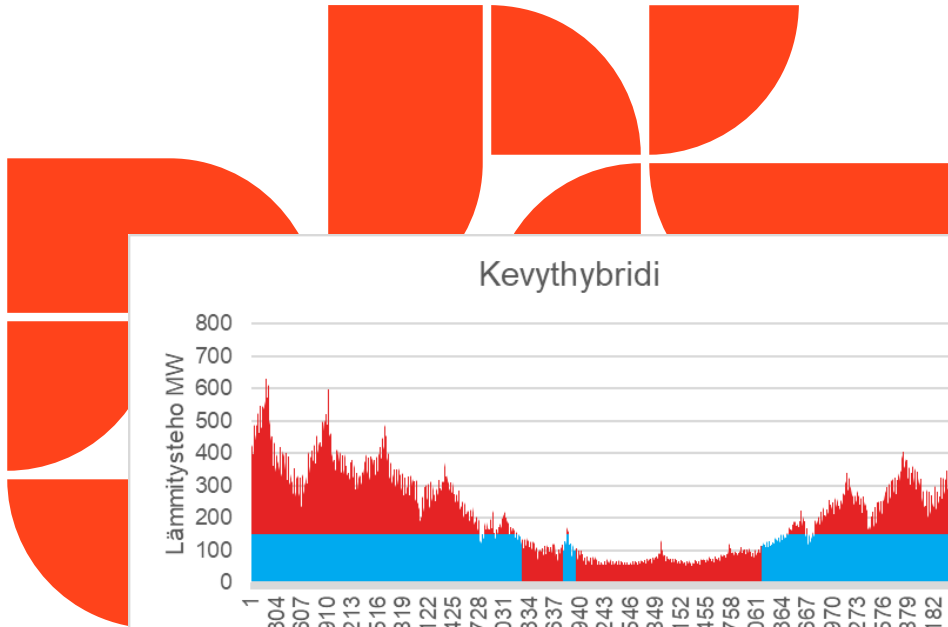
- 1) lämpöpumppu mitoitetaan melko pieneksi, jolloin kallis lämpöpumppuinvestointi voi toimia täydellä teholla suuren osan vuodesta ilman, että järjestelmää tarvitsee rakentaa kaksisuuntaiseksi.
- 2) Tampereen Energia ohjaa lämpöpumppua, jolloin sähköä käytetään vain silloin, kun sähkö on aidosti uusiutuvaa eikä hukkalämpöä saatavissa muualta.

Kevythybridi, jossa yhdistyvät kiinteistökohtaisen lämpöpumpun energiatehokkuus ja kaukolämpöjärjestelmän tehonhallintakyky, on monella tapaa käytännöllinen vaihtoehto. Se on kuitenkin myös teknologia, jonka toteuttaminen ei onnistu pelkästään Tampereen Energian investointipäätöksellä. Toteutus vaatii erillistä sopimusta jokaisen taloyhtiön ja yrityksen kanssa. Tampereen Energia voi vaikuttaa sopimusten syntyyn houkuttelevan tuotteistuksen ja aktiivisen myyntityön kautta. Tämä tuotteistus onkin edellisen selvityksemme jälkeen edennyt.

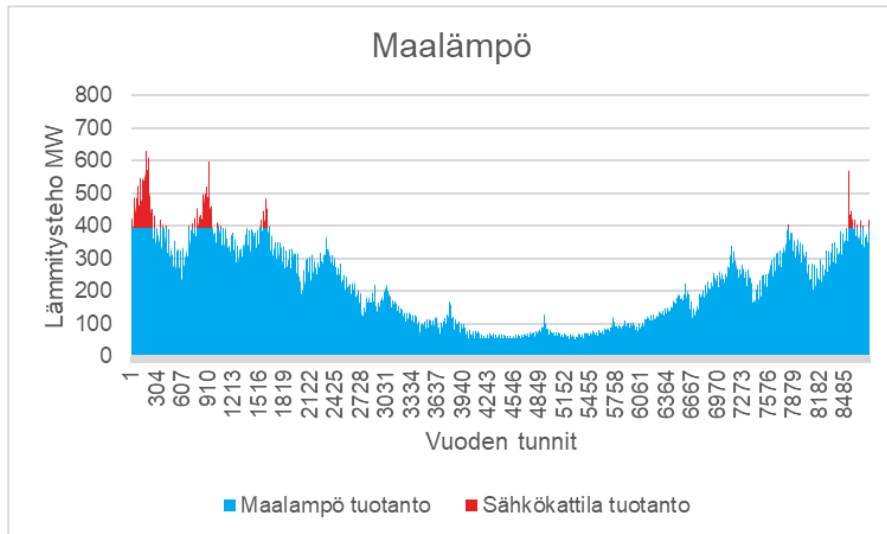
Kevythybridimallissa Tampereen Energia ohjaa pumppujen tuotantoa sähkön hinnan vaihtelun mukaan. Jos kaukolämpöä on saatavilla lämpöpumpun tuotantokustannusta halvemmalla, käytetään

kaukolämpöä. Asiakkaalle säästöä syntyy siis Tampereen Energian toteuttaman tuotannonohjauksen ansiosta. Ilman kaukolämpöä toteutetun talokohtaisten pumppuratkaisun huipputehon tarve katetaan lämpövastuksilla, eli suoralla sähkölämmityksellä. Huippupakkasilla rakennuksen sähkönkulutus nousee jyrkästi, mikä rasittaa sähköjärjestelmää ja tuo hintariskiä asiakkaalle. Lämpöpumppu voi tuottaa myös jäähdytystä kiinteistön tarpeisiin, joskaan tämä ominaisuus ei ole tämän selvityksen kannalta välttämätön.

Suomessa lämmitystarpeen piikki määrää koko sähköjärjestelmän maksimikuormituksen ja huipputuotanto tehdään todennäköisemmin fossiililla polttoaineilla huonolla hyötysuhteella. Kaukolämpöhybridillä tehon hallinta voidaan hoitaa ympäristöystävällisemmin ja vähemmän sähköjärjestelmää rasittaen.



Kuva 10 Kevythybridiä käytetään vain, kun kaukolämpöjärjestelmässä ei ole halvempaa hukkalämpöä tarjolla.



Kuva 11 Maalämpöpumppu toimii vuoden aikana keskimäärin vain 55 % teholla huipputehosta. Lisäksi maalämmössä huiput tehdään suoralla sähkölämmityksellä, kun sähköjärjestelmän rasitus on kaikkein suurin. Kevythybridissä lämpö tulee joustavasti vähäpäästöisimmällä ja edullisimmalla lämmönlähteellä.

## Matalalämpöverkko

Tampereen Energian tavoite on rakentaa Hiedanrantaan edistyksellinen lämmitysjärjestelmä, joka perustuu uudenlaiseen matalalämpöiseen kaukolämpöverkkoon. Verkossa kiertävä vesi on noin 70-asteista, kun normaalisti kaukolämpöverkossa kiertää ilman lämpötilasta riippuen 80–120-asteinen vesi. Kuten tavallinenkin kaukolämpö, ratkaisu on kahdensuuntainen, eli asiakas voi sekä ostaa verkosta lämpöä että myydä verkkoon lämpöä.

Tavallista matalampi lämpötila mahdollistaa sen, että Hiedanrannan alueella hukkalämmön ja lämpöpumppujen on helpompaa. Alueella syntyvä ylijäämlämpö ohjataan kaukolämpöverkkoon kaikkien tamperelaisten hyödyksi. Toiveena olisi kaksisuuntainen kaukolämpö, jota olisi saatavissa myös talvella. Lämmittäminen kesällä ei ole vaikeaa, ja silloin tuotetun lämmön arvo on alhainen.

Kaukolämpöjärjestelmä on osa Hiedanrannan kiertotalouteen perustuvaa energiaekosysteemiä, johon kuuluu myös alueella tuotettua, polttoon perustumatonta lämmöntuotantoa. Järjestelmän myötä Hiedanrannasta on mahdollista tulla energiapositiivinen alue.

## Savukaasupesurit

Voimalaitosten hyötysuhdetta on mahdollista parantaa savukaasupesureilla ja lämpöpumpuilla. Voimalaitoksessa, jossa ei ole savukaasupesureita, on savukaasut pakko päästää piippuun yli sataasteisina. Savukaasuissa on aineita, jotka syövyttävät savupiipun, jos vesihöyry pääsee tiivistymään piipussa. Savukaasun pitää siis olla niin kuumaa, että vesihöyry varmasti myös pysyy vesihöyryinä. Tämä aiheuttaa suuren lämpöhäviön, koska vesihöyryyn on sitoutunut suuri määrä energiaa.

Savukaasupesuri mahdollistaa tämän lämmön talteenoton. Savukaasupesurissa savukaasut jäädytetään kaukolämmön paluulämpötilaan (noin 45–55 astetta), jolloin vesi tiivistyy ja valtaosa hukkalämmöstä saadaan talteen. Savukaasut poistuvat piippuun noin 50 asteisina. Tämä hukkalämpö on liian haalea hyödynnettäväksi kaukolämmöksi suoraan, mutta se on erinomainen lämmönlähde lämpöpumpuille. Tampereella savukaasupesurit ovat käytössä Naistenlahti 3 -voimalaitoksessa, Tammervoiman hyötyvoimalaitoksessa sekä Hervannan hakelämpölaitoksessa.



Kun pesurin jälkeen asennetaan lämpöpumppu, saadaan savukaasut jäädytettyä jopa 10-asteisiksi ja savukaasussa jäljellä oleva kosteus otettua talteen. Tällainen lämpöpumppu voi toimia korkealla COP:illa riippuen talteen otetun lämmön määrästä välillä 3–5, joskin käytännön toteutuksessa todennäköisesti lähempänä vaihteluvälin alapäätä. Sähkö lämpöpumpulle saadaan suoraan voimalaitokselta, joten kokonaisuus on erittäin tehokas tapa tuottaa lämpöä. Kokonaisratkaisu, voimalaitos mukaan lukien, ei siis ole varsinaisesti polttovapaa, eikä lämpöpumpun tuottama lämpö ole tiukan määritelmän mukaan hukkalämpöä, koska prosessin yksi päätuotteista on lämpö jo nyt. Tällä hetkellä lämpö menee savupiipun kautta hukkaan, joten arkikielisempien määritelmien mukaan tällainen investointi voidaan nähdä polttovapaana hukkalämpönä. Naistenlahti 3 -voimalaitoksen yhteyteen on tulossa tällainen lämpöpumppu.

## Mitä on tehty vuoden 2021 selvityksen jälkeen:

Joulukuussa 2022 Tampereen Energia sai myönteisen päätöksen energiatuesta Naistenlahti 3 -voimalaitoksen lisälämmöntalteenoton investointiin. Uusi lämmöntalteenottolaitteisto eli ns. jälkipesuri on yhteensä noin 32 miljoonan euron investointi. Siihen on myönnetty 5,06 miljoonan euron tuki Työ- ja elinkeinoministeriöltä. Hankkeen tavoiteaikataulun mukaan investointi on valmis tammikuussa 2025.



### 3.6 Geolämpö

- Päästövähennyspotentiaali = 4
- Kustannustehokkuus = 2
- Saatavuus = 2

Geolämmön toimintaperiaate on yksinkertainen. Porataan kallioon reikä, jonka läpi kierrätetään kylmää vettä. Vesi lämpenee ja kallio kylmenee. Pinnalla lämpö otetaan talteen ja vesi palautetaan uudelleen kiertoon.

Geolämmön kustannustehokkuus riippuu paljon siitä, kuinka tuliperäisellä alueella ollaan, tarkemmin sanottuna, kuinka nopeasti kallio lämpenee alaspäin poratessa. Suomi on yksi vähiten tuliperäisiä alueita maailmassa, joten kallio lämpenee hyvin hitaasti. Tämä

tarkoittaa, että porattavan reiän täytyy olla hyvin syvä ja lämmön palata jäädyttyyn kallioon hyvin hitaasti. Tuliperäisellä alueella kuten Islannissa riittää, kun porataan matala reikä ja reiästä saadaan tulikuumaa höyryä. Suomessa joudumme poraamaan syvälle kovaan peruskallioon, jotta saadaan edes haaleaa vettä. Teoriassa maaperän lämmöllä voidaan lämmittää koko Suomi. Käytännössä tämä saattaa olla toteutettavissa huomattavasti kustannustehokkaammin ja yhtä vähäpäästöisesti jollain toisella tavalla.

Kaukolämmitykseen käytettävää geolämpöä on kahta peruslaatua, syvä ja keskisyvä geolämpö. Syvässä geolämmössä porataan reikä niin syväälle, että ylös saadaan noin 100-asteista vettä. Se kelpaa suoraan kaukolämmitykseen. Keskisyvässä geolämmössä säästetään porauskustannuksissa ja porataan vain niin syväälle kuin helposti päästään. Tällöin reiästä saadaan vain haaleaa vettä. Haalea vesi lämmitetään lämpöpumpulla kuumaksi ja kylmä vesi palautetaan kiertoon. Keskisyvässä siis säästetään porauskustannuksissa, mutta joudutaan maksamaan lämpöpumpusta ja pumpun käyttämästä sähköstä.

Merkittävimmät epävarmuudet liittyvät geolämmön porauskustannuksiin. Keskisyvän geolämmön tapauksessa kustannukset ja lämpötilatasot ovat varsin hyvin tiedossa, eivätkä



ne näytä edullisilta suhteessa muihin vaihtoehtoihin. Syvän geolämmön tapauksessa tuntemattomia muuttujia on enemmän. Jos yhdestä reiästä saadaan lämpötehona vain megawatin osia, lienee parempia vaihtoehtoja tarjolla. Jos yhdestä reiästä saadaan useampi megawatti tai syvälle poraaminen osoittautuu yllättävän halvaksi, voi geolämpö olla kilpailukykyinen vaihtoehto. Nykytiedon valossa vaikuttaa kuitenkin jokseenkin epätodennäköiseltä, että syvä geolämpö Suomessa olisi halvempaa kuin muut lämmitysmuodot. Tampereen Energia näkee syvän geolämmön mahdollisuutena, mitä tutkitaan aktiivisesti, mutta emme voi laittaa polttovapaan skenaarion tulevaisuutta sen varaan.

Kaivon syvyydeksi saatiin 2 230 metriä, jonka jälkeen kohdattiin louhosalue, jonka ohittaminen olisi vaatinut vahvistustoimenpiteitä. Projektissa nähtiin kuitenkin järkevämmäksi pyrkiä hyödyntämään kaivo saavutetussa syvyydessä. Vaikka tavoitesyvyyteen ei päästy, kokeilu oli onnistunut, sillä hyödyllistä tutkimustietoa saatiin paljon. Kaivo on tarkoitus ottaa kokeelliseen tuotantokäyttöön Tampereen kaukolämpöverkkoon lähivuosina. Kaivosta on saatavilla jatkuvaa tehoa arviolta 0,5 MW. Porauksen hintaluokaksi tuli 1,5 M€. Ylös tulevan veden lämpötila on reilut 20 astetta, joten lämmönlähteenä se vaatii lämpöpumpun ja priimauksen. Projektinnissa geolämmön prioriteetti on sähkökattiloiden alapuolella johtuen porausteknologian vaatimasta tuotekehitystyöstä ja toisaalta sähköistämisen kiireellisyydestä.

## Mitä on tehty vuoden 2021 selvityksen jälkeen:

Vuoden 2022 keväällä päätettiin syvän geolämmön pilotointiprojekti Tampereen Tarastenjärvellä. Neljäntoista muun suomalaisen kaupunkienergiayhtiöin yhteisessä hankkeessa oli tarkoitus porata noin kolmen kilometrin syvyinen geolämpökaivo ja kerätä kokemuksia vesivasarateknologiasta sekä geolämmön potentiaalista suomalaisessa maaperässä.

### 3.7 Pienydinreaktori

- Päästövähennyspotentiaali = 4
- Kustannustehokkuus = 3
- Saatavuus = 1

Ydinvoimasta voidaan saada polttovapaata ja hiilineutraalia lämpöä. Sitä on myös rakennettavissa tiiviiseen tilaan niin paljon kuin sitä tarvitaan.

Sen päästövähennyspotentiaali on siis suuri. Vedyn tuotannon lisäksi pienydinreaktorit ovat toinen teknologia, joka on kehittynyt kahdessa vuodessa paljon. Energiakriisin myötä ydinvoiman kannatus on noussut ennätyskorkealle (kuva 12).

Ydinkaukolämmön kustannuksista on esitetty monia erilaisia arvioita, mutta suuremmatkin arviot ovat varsin kohtuullisia verrattuna muihin saman potentiaalın vaihtoehtoihin. Käytännössä projekteja ei kuitenkaan ole rakennettu, joten arvio kustannustehokkuudesta on

spekulatiivinen. Kannattavuus kuvaa siis käsitystämme siitä, mikä tulee olemaan kustannustaso esimerkiksi neljännen lämpöreaktorin toteutuksessa, ensimmäisten pilottilaitosten jälkeen.

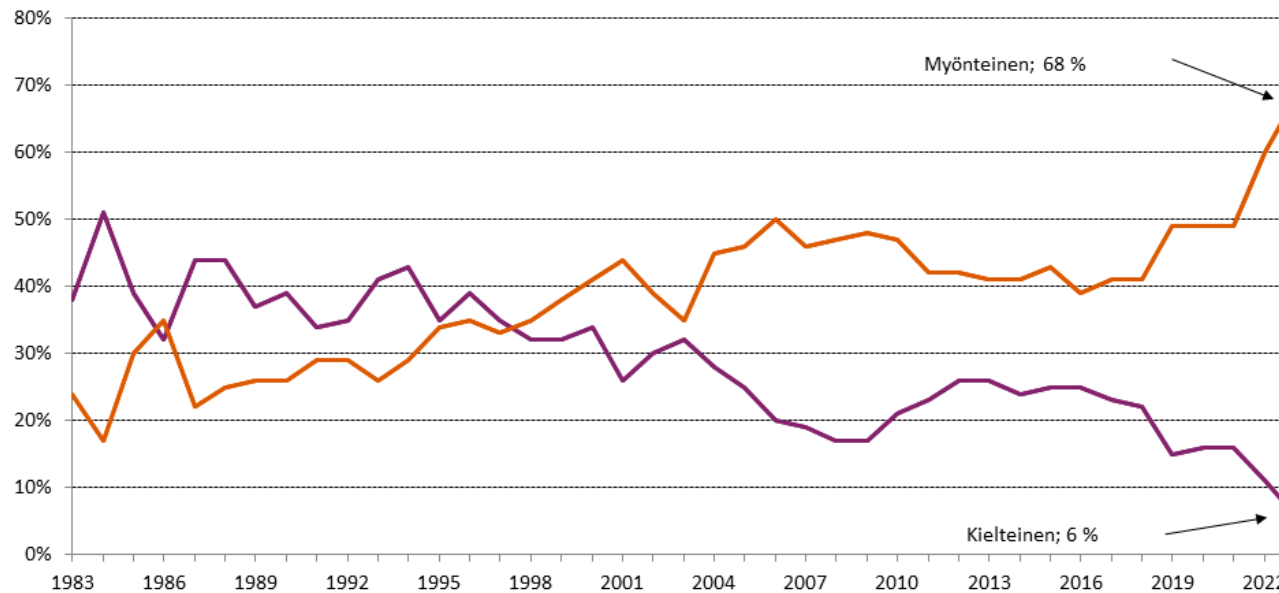
Pienydinreaktorin (SMR, small modular reactor) saatavuus on vieläkin huono, vaikka merkittävää edistystä kahdessa vuodessa onkin tapahtunut. Pienydinvoimalle tarvittaisiinkin julkisvetoista alkupotkua, jotta teknologia ja regulaatio saadaan kehitettyä sille tasolle, että kaupallinen ison mittakaavan käyttöönotto tulee mahdolliseksi.

Kansainvälisiä konsepteja on useita, niistä pisimmällä ovat NuScale (USA), GE-Hitachi (USA-Japani) ja Rolls-Royce (UK). Nämä ”pienet” modulaariset reaktorit ovat kuitenkin kovin suuria suomalaisille kaukolämpöverkoille ja suunniteltu sähköntuotanto edellä. Niistä pienin on 280 MWe (neljän moduulin NuScale), Ge-Hitachin BWRX-300 on 300 MWe ja Rolls-Roycen UK SMR on 470 MWe. MWe merkintä tarkoittaa megawattia sähköntuotantoa. Karkeasti voi laskea, että kun laitos tuottaa yhden megawatin sähköä, se tuottaa samalla kaksi megawattia lämpöä. Esimerkiksi BWRX-300 tuottaisi siis sähkön lisäksi 600 MW kaukolämpöä.

Tampereen kaukolämpöverkko on Helsingin jälkeen toiseksi suurin kaukolämpöverkko, käytännössä tasoissa Fortumin Espoon alueen kanssa. Esimerkiksi Tampereelle oikea kokoluokka olisi 50-100 MWe eli 100-200 MW lämpöä. Pieninkin kansainvälinen konsepti on noin

## Ydinvoiman kannatuksen kehitys 1983-2023

### Yleissuhtautuminen ydinvoimaan energianlähteenä



Energioteollisuus

kolme kertaa liian suuri. Näitä kansainvälisiä sekä sähköä että lämpöä tuottavia SMR-projekteja Suomeen mahtuu korkeintaan yksi, Helsinkiin.

Pienemmän kokoluokan konseptejakin on. Esimerkiksi VTT ja Steady Energy kehittävät 50 MWth kokoista, mahdollisimman paljon perinteiseen tekniikkaan perustuvaa, pelkkää lämpöä tuottavaa pienreaktoria. Ydinvoimaloita on rakennettu Eurooppaan viime vuosikymmeninä varsin vähän, ja kaukolämpökäyttöön Suomessa ei koskaan, joten luvitus on merkittävä este. VTT:n strategia on minimoida teknologista riskiä ja tehdä luvituksesta mahdollisimman helppoa.

LUT uutisoi joulukuussa 2022 allekirjoittaneensa yhteisymmärrysmuistion yhdysvaltalaisen USNC:n kanssa. USNC kehittää kaasujäähdytteistä pientä CHP-laitosta. Tekniikka on paljon kokeellisempaa kuin muissa mainituissa SMR-konsepteissa. Ydinvoimatekniikan professori Juhani Hyvärisen mukaan reaktori rakennettaisiinkin ennen kaikkea tutkimus-, koulutus- ja demonstraatiokäyttöön.

Tampereella syksyllä 2022 neljä eri puolueiden valtuutettua laativat aloitteen, että Tampereella pitää selvittää sijaintia ydinvoimalalle. Aloitteen seurauksena kaupungin yleiskaavoituksen tehtävänä on selvittää asiaa. Aikaa ehdottaa mahdollisia sijainteja on vuoden 2024 loppuun. Kun sijaintivaihtoehdot on esitelty, voidaan tehdä poliittinen

päätös, halutaanko Tampereelle kaavoittaa ydinvoimala. Jos näin tehdään, vie kaavan laatiminen ja hyväksyminen valituskierröksineen arviolta viisi vuotta. Tämä tarkoittaa, että jos asia etenisi nopeasti, kaava voisi olla lainvoimainen 2029. Jos yhteiskunnallinen tahtotila on vahva, ja Tampere haluaa ja pääsee mahdolliseen pilottiohjelmaan mukaan, voisi ydinvoimalan toteutuminen 2030-luvun alkupuolella olla mahdollinen. Tämä riippuu tietysti tässä vaiheessa vielä monesta asiasta.

Ydinkaukolämmön saaminen suunnittelupöydältä todellisuuteen vaatii monen tahon yhteisponnistelua. Tarvitaan poliittinen hyväksyntä, sääntelykehys, luvat, teknologia, toimitusketju, kaupallinen tarve lopputuotteelle, pääoma riskisijoitukseen ja riskiä ottava toimittava yritys. Tarvitaan myös organisaatio, joka pystyy turvallisesti ja kustannustehokkaasti operoimaan laitosta. Periaatteessa kaikki toimijat haluaisivat turhan työn välttämiseksi, että muut osatekijät ovat paikoillaan ennen omien resurssiensa sijoittamista. Valtion rooli on ydinkaukolämmön kehityksessä siksi keskeinen. Valtio voi yhteiskunnallisen hyväksynnän löytyessä tarjota toteutuskelpoisen regulaation ja vähentää taloudellisia riskejä toimijoille.

Ydinvoimaloiden rakentaminen ja operointi sopii huonosti kaukolämpötoimijoiden oman liiketoiminnan osaksi. Ydinvoimalan osajat suunnittelevat, luvittavat ja rakentavat voimalaitoksen. Myös ydinvoimalaitoksen operointi, huolto ja ydinpolttoaineen käsittely vaativat erikoistunutta huippuosaamista. Turvallisuuden

varmistamiseksi ja jatkuvaksi kehittämiseksi edellytyksenä pitää olla, että huolloista päättävällä taholla on oikeus tarvittaessa ajaa laitos alas huoltoon. Organisaatorakenteet pitää miettiä tarkkaan, jotta vastuu laitoksen turvallisuudesta on yksiselitteinen ja vastaavalla taholla on käytännön edellytykset huolehtia turvallisuudesta.

EcoSMR-projektissa esitettiin, että tarvittaisiin vähintään kolme pienydinvoimalaa, jotta huoltojen ja operaattoripalveluiden tarjoaminen palveluna olisi kannattavaa liiketoimintaa. Tämäkin korostaa tarvetta kansalliselle pienydinomastrategialle, jossa toimintaa skaalataan riittävän suurelle tasolle, jotta markkinaehtoinen toiminta alkaa kannattaa kaikissa toimitusketjun osissa. Energiainvestoinneissa paradoksaaliselta kuulostavat väitteet, että tuotanto on kannattavaa, ja että se tarvitsee tukia, voivat samaan aikaan olla totta. Koko toimitusketjun käynnistäminen on energiantuotannossa valtavan kallista. Kaikissa teknologioissa kautta aikojen toiminnan käynnistäminen on edellyttänyt julkista panostusta, minkä jälkeen markkinavoimat voivat ylläpitää kannattavaa toimintaa. Ensimmäiset toteutukset tarvitsevat tukia, sen jälkeen toiminta kannattaa markkinaehtoisesti. Näin kävi tuulivoiman kanssa.

Pienydinvoimalan lähellä ei saa sijaita vaikeasti evakuoitavia tai yhteiskunnan toiminnalle kriittisiä toimintoja. Olkiluoto 3 -voimalaitokselle ja pienlämpölaitokselle "lähellä" tarkoittaa eri asiaa. Lämpöä ei voi kuljettaa kovin pitkiä matkoja. Tiheitä asuinalueita tulee välttää yleisen hyväksyttävyydenkin takia. Hieman syrjäinen,

valmiiksi teollisuuskäytössä olevat alue lienee toimivin sijainti. Regulaation onnistuminen, turvallisuus ja hinta ratkaisevat, saadaanko ydinkaukolämpö osaksi ratkaisua ilmastonmuutokseen.

## Mitä on tehty vuoden 2021 selvityksen jälkeen:

Tampereen Energia on yhdessä yhdentoista muun energiayhtiön ja Lappeenrannan kaupungin kanssa selvittänyt, mitä kaukolämmön tuottaminen ydinvoimalla vaatii, sen toteuttamisen mahdollisuuksia ja esteitä. Selvitys edesauttaa myös syksyllä 2022 Tampereen kaupunginvaltuustossa tehtyä päätöstä selvittää paikkaa pienydinvoimalle kaavoitusta varten. Tampereen Energia tukee aktiivisesti kaupungin selvitystyötä.

### 3.8 Biokaasu ja bioöljy

- Päästövähennyspotentiaali = **2**
- Kustannustehokkuus = **3**
- Saatavuus = **4**

Biokaasun tai -öljyn hyödyntäminen energiantuotannon on verraten halpaa teknologiaa, mutta kaasuja ja nestemäisten biopolttoaineiden kansallinen ja globaali saatavuus on huono verrattuna kysyntään, minkä vuoksi ne toimivat parhaimmillaan vain osaratkaisuna.

Nämä eivät ole polttoon perustumattomia tai hiilinegatiivisia teknologioita, mutta yksi uusiutuvaan energiaan perustuva keino lämmitysjärjestelmän tehonhallinnassa. Biokaasu ja bioöljy on tässä jätetty tarkastelujen ulkopuolelle. Biopolttoaineiden saatavuuden parantuessa niitä voidaan ottaa tarvittaessa käyttöön suhteellisen pienillä investoinneilla ja nopealla aikataululla.

#### Mitä on tehty vuoden 2021 selvityksen jälkeen:

Bioöljyn käyttöä on testattu Tampereen Energian lämpökattiloissa lämmityskaudella 2022–2023.



### 3.9 Aurinkolämpö

- Päästövähennyspotentiaali = **2**
- Kustannustehokkuus = **2**
- Saatavuus = **4**

Teknisesti ei ole ongelma lisätä aurinkolämpöä järjestelmään jopa satoja megawatteja, kunhan sen tuotto tasataan riittävän isolla lämpövarastolla. Ongelma tulee tuotannon käänteisestä saatavuudesta tarpeeseen nähden. Kesällä lämmittäminen on muutenkin helppoa ja kausivarastointi on kallista ja hukkaa merkittävän osan varastoidusta lämmöstä vuoden aikana. Aurinkolämpöön perustuvaa ratkaisua on visualisoitu kappaleessa 8.4.

Maa kaukolämpöverkon varrella on arvokasta, siksi aurinkolämpökenttiä varten tarvittaisiin joko erikseen lisää verkkoa tai peltoasennuksia kalliimpia ratkaisuja. Kattoasennuksissa puolestaan aurinkolämpö kilpailee aurinkosähkön kanssa ja nykysuunta näyttää siltä, että kattopaikat vie enemmän aurinkosähkö. Ison mittakaavan aurinkolämpö ei tuo järjestelmään mitään, mitä ei jollain toisella tuotantomuodolla hoidettaisi yhtä vähäpäästöisesti, mutta kustannustehokkaammin.

### 3.10 Hiilidioksidin talteenotto

- Päästövähennyspotentiaali = **4**
- Kustannustehokkuus = **2**
- Saatavuus = **3**

Hiilen sidonnan voi jakaa kahteen yläkategoriaan: tekniseen ja eloperäiseen sidontaan. Teknistä hiilensidontaa on hiilidioksidin talteenotto polttoprosessin perästä, kuten energiantuotantolaitoksen savupiipusta (CCS), tai hiilidioksidin talteenotto suoraa ilmasta (DACCS) yhdistettynä pysyväisvarastointiin. Myös biohiilen tuotanto (BCR) lasketaan tekniseksi hiilen sidonnaksi. Eloperäistä tai ns. luonnollista hiilensidontaa on puolestaan metsien kasvatus tai hiiliviljely.

Mikäli hiilidioksidin talteenotto ja pysyväisvarastointi yhdistetään bioenergiantuotantoon, saadaan aikaiseksi hiilinegatiivinen järjestelmä (BECCS, bioenergia carbon capture and storage). Talteen otettu hiilidioksidi voidaan myös pysyväisvarastoinnin sijaan käyttää esimerkiksi metaanin tuotannossa tai teollisuudessa. Tällöin puhutaan CCU-tekniologiasta (carbon capture and utilisation).

Biogeenisen hiilidioksidin talteenoton mahdollisuuksia ja kustannuksia on tarkasteltu kappaleessa 4.

## Mitä on tehty vuoden 2021 selvityksen jälkeen:

Tampereen Energia Oy ja Nordic Ren-Gas Oy allekirjoittivat hankekehityssopimuksen synteettistä metaania tuottavasta Power-to-Gas-tuotantolaitoksesta Tarastenjärven voimalaitosalueelle joulukuussa 2022. Laitoksen on tarkoitus tuottaa synteettistä metaania yhdistämällä Tammervoiman hyötyvoimalaitoksen savukaasuista talteen otettu hiilidioksidi uusiutuvalla sähköllä tuotettuun vetyyn.

Tarastenjärven hanke on toteutuessaan kokoluokaltaan merkittävä vetytalouden investointi Suomeen. Toteutuessaan tuotantolaitos luo merkittävän logistisen keskuksen puhtaiden kaasupolttoaineiden tuotantoverkoston sekä edistää Tampereen Energian hiilineutraalisuustavoitteen saavuttamista.

Ensimmäisen vaiheen valmistuttua polttoainetta tuotetaan noin 12 000 tonnia vuodessa raskaan liikenteen käyttöön. Toisen vaiheen valmistuttua synteettistä metaania syntyy 35 000 tonnia vuodessa. Ensimmäisen vaiheen kokonaiskustannukset ovat noin 150 miljoonaa

euroa. Hanke sai vihreän siirtymän energiainvestointitukea lähes 46 miljoonaa euroa. Lopullista investointipäätöstä odotetaan loppuvuoden 2023 aikana, jolloin laitos saataisiin tuotantoon jo vuonna 2026.

Tarastenjärven hankkeen lisäksi Tampereen Energia on lähtenyt selvittämään hiilidioksidin talteenoton mahdollisuuksia ja kustannuksia Naistenlahti 3 -voimalaitoksesta. Vuonna 2022 Tampereen Energia teetti European City Facilityn tukirahalla teknistaloudellisen **selvityksen** Q Power Oy:ltä.

### 3.1 Teknologioiden yhdistäminen

Jotkut teknologiat toimivat huonosti yksin, mutta hyvin yhdistettynä toisen teknologian kanssa. Esimerkiksi lämpöpumput toimivat sitä paremmalla hyötysuhteella, mitä haalempaa vettä ne tuottavat. Toiset laitokset tuottavat automaattisesti kuumempaa vettä kuin mitä kaukolämpöverkko edellyttää. Yhdistelmäratkaisu lienee käyttökelpoisin vaihtoehto siirtymävaiheessa täysin polttovapaaseen lämmitykseen tai järjestelmässä, jossa on hiilidioksidin talteenotolla varustettua polttamista.

Geolämpö-, aurinkolämpö-, järvilämpö- ja ilma-vesilämpöpumppuratkaisut toimivat hyvin muiden lämpölaitosten yhteydessä. Myös osa hukkalämmöistä on niin haaleita, että ne hyötyisivät lämpötilan nostamisesta kaukolämpöverkon vaatimaan lämpötilatasoon, eli priimaamisesta. Riittävän lämmintä vettä tuottavat ratkaisut ovat sähkökattila ja polttoon perustuvat lämmitysmuodot.

Yhdisteleminen ei ole ongelmaton, koska matalampaa lämpötilaa tuottava laitos on riippuvainen priimaavasta laitoksesta. Tämä on haaste erityisesti, jos priimaamiseen halutaan käyttää sähkökattilaa, koska sitä ei haluttaisi käyttää korkeiden sähkönhintojen aikaan. Yhdistelmäratkaisu on luonnollisesti monimutkaisempi vaihtoehto. Teknologioiden yhdisteleminen on kuitenkin oleellista, kun eri tuotantomuotojen rajoitteita ja haittoja minimoidaan.

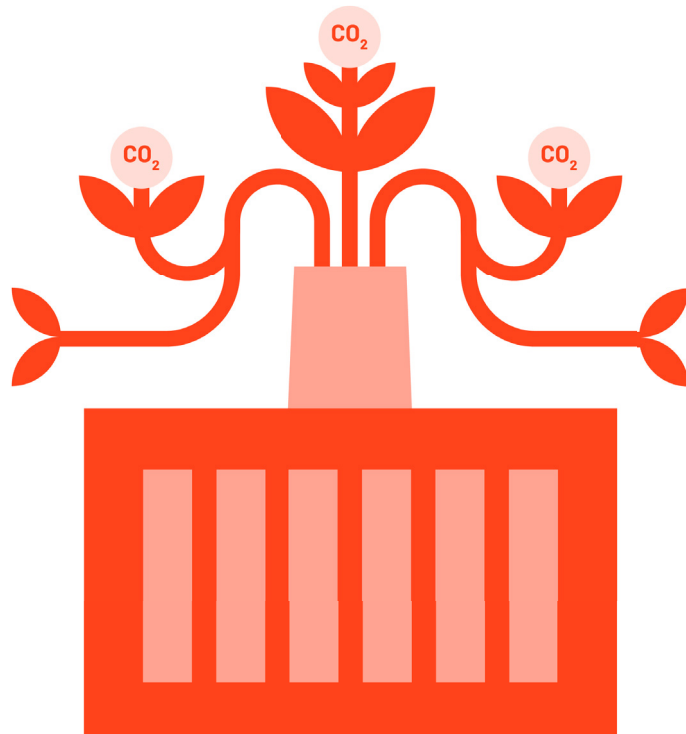




# 4 Hiilidioksidin talteenoton mahdollisuudet Tampereella



IPCC:n selvitysten mukaan hiilidioksidin tekninen poistaminen on välttämätöntä, jotta ilmaston lämpeneminen voidaan hillitä 1,5 asteeseen.



Kuudennessa arviointiraportissa BECCS:n hiilensidonnan globaaliksi potentiaaliksi on arvioitu 500–11 000 Mt/vuosi ja biohiilen 300–6 600 Mt/vuosi. Euroopan Unionin asettama tavoite teknisille hiilinieluille on 5 Mt/vuosi vuoteen 2030 mennessä. Kuitenkin jo nyt Euroopassa käynnissä olevista hiilensidonnan projekteista tulee hiilidioksidin talteenottokapasiteetiksi noin 50 Mt. Tämä on asetettu myös ilmastoneutraalin teollisuuden säädöksessä (Net Zero Industry Act) EU:n alueen varastointikapasiteetin tavoitetasoksi vuonna 2030.

Vaikka EU:n tavoitetaso tekniselle hiilensidonnalle ei ole vielä kunnianhimoinen, on tahtotila selvä. EU:ssa on käynnissä hiilenpoistojen edistämiseen tähtääviä työryhmiä, joiden tavoitteena on luoda järjestelmä negatiivisten päästöjen käsittelyyn. Lisäksi EU ohjaa merkittäviä määriä tukirahoitusta hiilenpoistojen hankkeille Innovaatorahaston kautta.

Kysyntä bioperäiselle hiilidioksidille on kasvussa niin teollisuudessa kuin myös liikennesektorilla. Euroopan komission kestävien hiilenkiertojen tiedonannossa esitettiin, että vuoteen 2030 mennessä tavoitellaan 20 %:n tasoa ei-fossiilisen hiilen osuudelle kaikesta teollisuuden käyttämästä hiilidioksidista. Liikennesektorilla kysyntää kasvattavat vedyn ja siitä tuotetun synteettisen polttoaineen tuotannon kasvutavoitteet.



Hiilineutraali Tampere 2030 -tiekartan mukaan Tampereen kaupungin hiilineutraaliustavoite saavutetaan kasvihuonekaasupäästöjä vähentämällä (80 % eli 1,0 Mt) sekä päästöjä kompensoimalla (20 % eli 0,3 Mt). Tampereella Naistenlahti 3 -biovoimalaitoksen hiilidioksidin talteenottopotentiaali olisi maksimissaan noin 0,4 Mt eli yli asetetun päästövähennysvajeen.

Kaupungin ilmastotavoitteiden saavuttaminen on mahdollista BECCS-teknologialla. Lisäksi teknologian käyttöönotto toisi positiivisia vaikutuksia aluetalouteen. Esimerkiksi Ruotsissa tehdyn tutkimuksen mukaan BECCS-teknologian käyttöönotto toisi maahan 1 400–28 000 uutta työpaikkaa ja kasvattaisi Ruotsin bruttokansantuotetta 110–2 400 M€, riippuen tarkasteluun otetusta skenaariosta.<sup>4</sup>

Suomella on mahdollisuus nousta biogeenisten hiilenpoistojen kärkimaaksi. Suomessa on toiseksi eniten pistemäisiä biogeenisiä päästölähteitä Euroopassa ja hukkalämpöjen hyödyntäminen kaukolämpöverkoissa parantaa hankkeiden kannattavuutta. Suomen 10 % tavoiteosuus Euroopan vihreän vedyn tuotannosta lisää myös siitä tuotetun synteettisen polttoaineen tuotantopotentiaalia.

## Hiilidioksidin talteenoton tekninen toteutus

Teknisestä näkökulmasta hiilidioksidin talteenotolle ei ole esteitä. Oleellimmat hidasteet käyttöönotossa tulevat taloudellisten

kannustimien ja hiilidioksidin logistiikkaketjun puutteista. Naistenlahti 3 -voimalaitokseen soveltuu hiilidioksidin talteenotto polttoprosessin jälkeen, mikä ei vaadi muutoksia itse voimalaitosprosessiin. Talteenotossa hiilidioksidi erotetaan polttoprosessista syntyvästä savukaasusta. 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. Absorptio kuluttaa lämpöä ja sähköä.



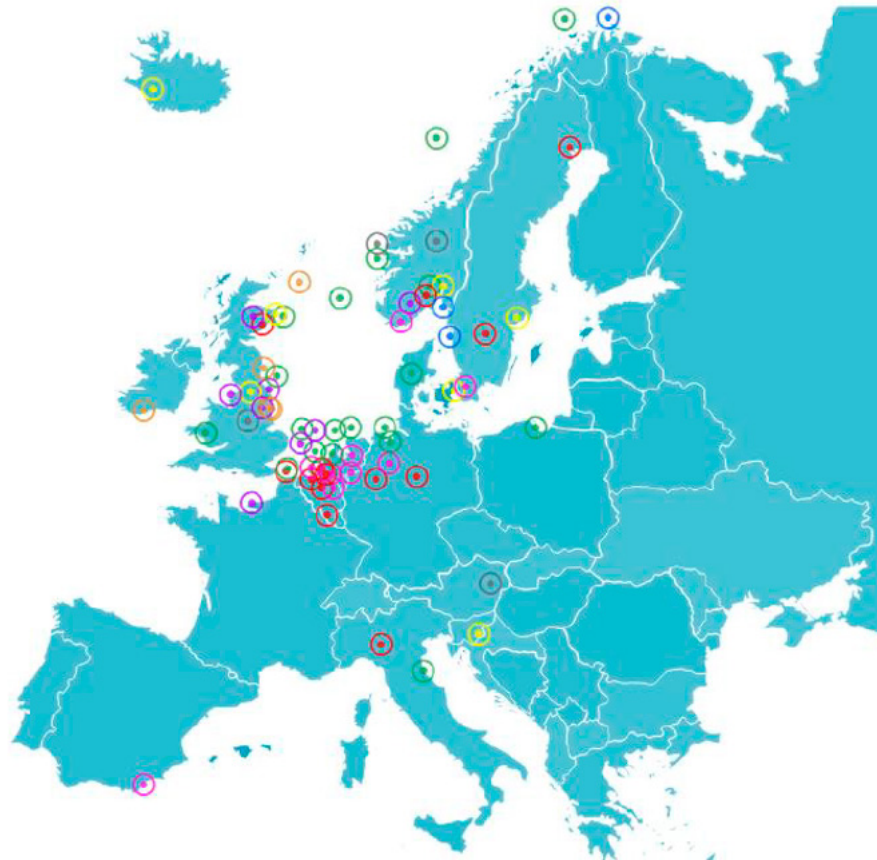
## Loppusijoitus tai hyödyntäminen

Hiilidioksidin talteenoton jälkeen se voidaan hyödyntää raaka-aineena tai varastoida. Hiilidioksidia hyödynnetään esimerkiksi synteettisen metaanin ja metanolin tuottamisessa tai biopolyesterituotteissa. Hiilidioksidia on mahdollista myös jalostaa sulasuolaelektrolyysillä kiinteiksi hiilituotteiksi, kuten hiilinanoputkeksi ja hiilikuiduksi. Näitä hiilituotteita voi hyödyntää esimerkiksi akkuteollisuudessa ja betonintuotannossa. Suurin markkinapotentiaali on kuitenkin synteettisen metaanin tuotannossa. Synteettistä metaania tuotetaan hajottamalla vedestä vetyä elektrolyysillä ja yhdistämällä se hiilidioksidiin.

Suomessa ei ole saatavilla hiilidioksidin varastointiin soveltuvia geologisia muodostumia. Hiilidioksidi on kuljetettava esimerkiksi Norjan vanhoihin öljy- ja maakaasuesiintymiin. Hiilidioksidin kuljetusta ja varastointia tarjoavia toimijoita on vain muutama Euroopassa ja logistiikkaketju on alkutekijöissään. Kustannuksia kasvattavat myös kuljetukset satamaan ja väliaikaisvarastoinnit.

Vaihtoehtona hiilidioksidin geologiselle varastoinnille on hiilidioksidin varastointi mineraaleihin. Tähän tarkoitukseen soveltuva mineraali on esimerkiksi serpentini, johon hiilidioksidin varastointipotentiaali Suomen maaperällä olisi teoreettisesti jopa 20–30 Mt vuodessa. Teoriassa hiilidioksidia voi varastoida myös kaivosjätteisiin, kuten magnesium- ja kalsiumsilikaatteihin, mutta niiden saavutettavuus on Suomessa haastavampi. Hiilidioksidin mineralisaation teknologinen kypsäysaste ei ole yhtä korkea kuin hiilidioksidin geologisen varastoinnin.

Euroopasta löytyy useita hiilidioksidin loppusijoituspaikkoja, joista kiinnostavin on norjalaislähtöinen Northern Lights, joka keskittyy hiilidioksidin varastointiin Pohjanmeren vanhoihin maakaasu- ja öljyesiintymiin. Muut Euroopan projektit eivät ole edenneet yhtä pitkälle. Osasyö löytyy varastokapasiteetin lisäksi myös lainsäädännöstä. Hiilidioksidin varastointi on kiellettyä Suomessa, Baltiassa, Saksassa ja muutamassa muussakin Keski-Euroopan maassa. Pohjanmeren lisäksi myös Itämeren alue tulee kiinnostavaksi varastointikohteeksi, mikäli varastointi syviin suolavesikerrostumiin mahdollistetaan lainsäädännön muutoksilla sekä teknologian kehityksellä.



Kuva 13 CCS-projektit Euroopassa vuonna 2022. Vihreä = hiilidioksidin kuljetukseen ja varastointiin liittyvät projektit, Punainen = CCS teollisuudessa, Keltainen = CCS energiantuotannossa, Pinkki = CCU, Harmaa = testilaitos, Oranssi = projektit koko arvoketjuun, Sininen = ei tarpeeksi tietoa.

## Kustannukset

Hiilidioksidia voi ottaa talteen usealla eri tavalla, kuten suoraan ilmasta, polttoprosessin perästä, tehostamalla fotosynteesiä tai tehostamalla merien kykyä sitoa hiiltä. Näistä BECCS on arvioitu kustannustehokkaimmaksi. Tällä hetkellä korkealta vaikuttava kustannus ei sitä välttämättä ole saman tavoitteen toteuttaviin vaihtoehtoihin nähden.

### Talteen otetulle hiilidioksidille on mahdollista saada arvoa

- 1) myymällä hiilidioksidista jalostettua tuotetta
- 2) hiilidioksidin poistojen sertifiointien kautta
- 3) välttämällä päästöoikeuskustannuksia EU ETS -markkinoilla
- 4) kansallisilla tai kansainvälisillä tukimekanismeilla

Jos hiilidioksidista tuotetaan synteettistä polttoainetta, muodostuu arvo polttoaineen myynnin kautta.

Hiilidioksidin jatkojalostuksessa syntyy myös hukkalämpöä ja hyötyä tämän lämmön myynnistä. Nykyisillä hinta-arvioilla CCU-teknologia on lähellä kannattavuutta.

Hiilidioksidin poistojen suhteen arvo muodostuu tällä hetkellä vapaaehtoisilla päästökompensaatiomarkkinoilla. Päästökompensaatiokauppaa käydään osana yritysten vastuullisuustyötä erityisesti "net zero" -väittämien saavuttamiseksi. Toiminnassa oleva vapaaehtoisten negatiivisten päästösertifiointien markkinapaikka on esimerkiksi Nasdaqin omistama Puro.Earth.



Kysyntä päästökompensaatioille on kasvussa ja suuremmat yritykset ovat enenevässä määrin kiinnostuneita myös päästökompensaatioiden laadukkuudesta eli hiilidioksidipoistojen varmuus, laskentatarkkuus ja pitkäaikaisuus kiinnostavat. Näissä BECCS on vahvoilla.

Hiilidioksidinpoistomarkkinoilla hinnan oletetaan nousevan yli EU ETS -päästöoikeusmarkkinan hintatason, koska sen hinnan muodostusta ohjaa vaikeammin poistettavien päästöjen vaihtoehtokustannus. Nykylainsäädännöllä sertifioituja hiilen poistoja ei voi hyödyntää suoraan EU ETS -päästöoikeusmarkkinalla, mutta Euroopan komissio arvioi sertifioitujen negatiivisten päästöjen sisällyttämisen mahdollisuuksia EU ETS:ään komission ohjelman mukaan vuonna 2026.

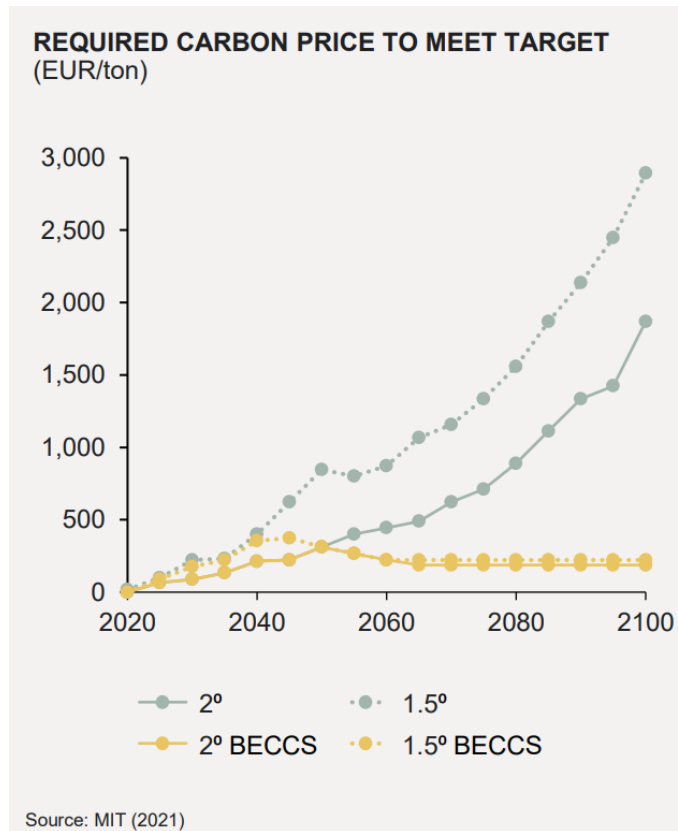
Ruotsissa hiilidioksidin talteenottoa edistetään negatiivisten päästöjen käänteisellä huutokaupalla sekä EU:n Innovaatorahaston tukirahalla (180 M€ investointituki vuonna 2022). Käänteinen huutokauppa on rahoitettu valtion budjetista. Huutokaupassa kaikki toimijat voivat tarjota hiilidioksidin talteenottoja. Tämä on ensimmäinen hiilidioksidin talteenoton arvonluomiselle kehitetty mekanismi maailmassa.

Ruotsin energiaviranomaisen mukaan huutokauppoja järjestetään vähintään kolme vuoteen 2030 mennessä. Niiden volyymi on 0,6–1 Mt/vuosi ja sopimuskausi on 15 vuotta. Pitkä sopimuskausi

ja markkinoiden määräämä hintataso käytännössä mahdollistavat investoinnit hiilidioksidin talteenottoon. Norjassa on esitetty hiilidioksidin poistoille käänteistä hiilidioksidiveroa, jonka suuruus vastaa fossiilisten päästöjen hiilidioksidiveroa. Vuoteen 2030 mennessä tavoiteltu verotaso on 2000 NOK/tCO<sub>2</sub> (172 €/tCO<sub>2</sub>).

MIT:n selvityksen (2021) mukaan kansainvälisten ilmastotavoitteiden saavuttaminen ilman BECCS:iä on erittäin kallista. Alla näkyvässä kuvaajassa on esitetty vaadittava hiilidioksiditonni hinta ilmaston lämpenemisen rajoittamiseksi 1,5 tai 2 asteeseen. Ilman BECCS:iä hinta nousee jopa 3000 €/tCO<sub>2</sub>. Tämä kuvastaa sitä, että BECCS:n kannattavuus toteutuu ennen monia muita ilmastotoimia.





Kuva 14 Vaadittava hiilidioksiditonnin hinta ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi.

Vaikka BECCS-teknologia näyttäytyy kustannustehokkaimpana hiilenpoistojen teknologiana, on poliittisessa päätöksenteossa oleellista säilyttää teknologianeutraalius. Monenlaisten hiilidioksidiratkaisujen yhdistäminen voi olla järkevää, kun markkinamekanismit tuovat kustannustehokkaimmat ratkaisut teknologioiden kärkeen.

## Toimenpiteet

Maaliskuussa 2023 julkaistiin hiilidioksidin käyttöön ja poistoihin liittyvän suomalaisen tutkimushankkeen **tulokset**. Julkaisussa tunnistettiin suomalaisen biogeenisen hiilidioksidin suuri vientipotentiaali ja tulevaisuuden kysyntä. Selvityksessä tehtiin useita toimenpidesuosituksia, kuten kansallisten tavoitetasojen asettaminen, kansallisen strategian luominen, kansainvälisen yhteistyön kehittäminen ja lainsäädännön päivittäminen.

Toimenpiteitä hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin edistämiseksi on monia, mutta Tampereen Energian näkökulmasta oleellisimmiksi tunnistetut ovat:

- 1) Taloudellisen kannattavuus
- 2) Yhteistyö kuljettamisen ja varastoinnin mahdollistamiseksi
- 3) Kansalliset teknisen hiilidioksidin poiston tavoitetasot

1) Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi tarvitsevat investointi- ja käyttötukia. Pelkät tuet eivät kuitenkaan mahdollista toimivaa hiilenpoistojen järjestelmää, vaan vapaaehtoisten negatiivisten päästöjen kysyntä on keskeinen osa ratkaisua.

Vapaaehtoisissa hiilenpoistojen markkinoissa haasteina ovat laadun arviointi ja pienet ostovolyymit. Jotta markkinat voivat kasvaa, on negatiivisten päästösertifiointien toimittava kuten muutkin rahoitusinstrumentit. Niillä on oltava hintanäkyvyys, jälkimarkkinakelpoisuus sekä sopimustekninen varmuus.

Alkuvuonna 2023 Euroopan komissio avasi konsultaation hiilen poistojen sertifiointimekanismista (CRCF). Aloitteessa ehdotetaan hiilenpoistoja koskevaa EU:n sertifiointikehystä, joka perustuu neljään laatukriteeriin: kvantifiointi, täydentävyys, pitkäaikaisvarastointi ja kestävyys. EU:n luoma viitekehys edesauttaa vapaaehtoisten päästökompensaatiomarkkinoiden kehittymistä.

Keräilyjaksolla 1.1.–30.6.2022 Suomessa vapaaehtoisilla päästökompensaatiomarkkinoilla hiilidioksiditonnin keskihinta oli noin 11 €. Siis murto-osa hiilen teknisestä sidonnan kannattavuusrajasta. Kasvava kiinnostus ja sen myötä nouseva hintataso teknisen hiilensidonnan ratkaisuihin on siis välttämätöntä.

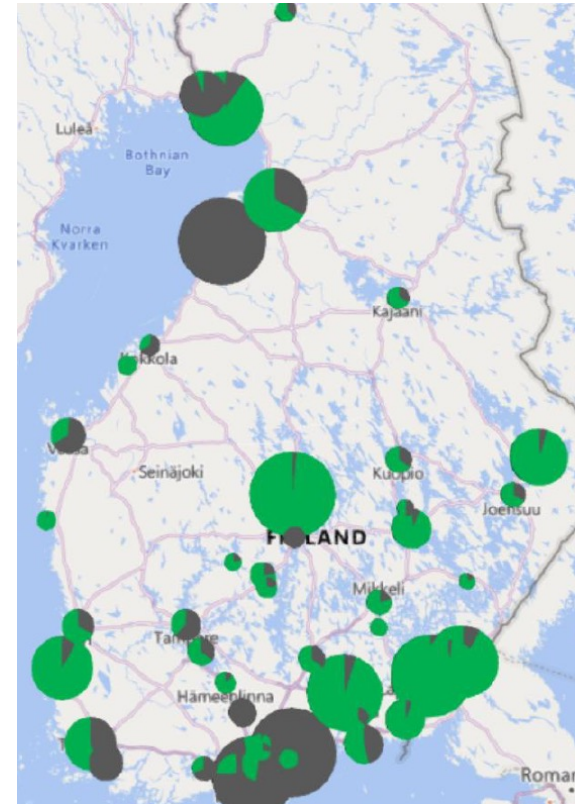
Yllä esitettyjen toimien lisäksi kustannuksia on saatava alemmas kehittämällä teknologiaa sekä parantamalla yhteistyötä Suomessa eri toimijoiden välillä.



**2)** Suomessa tehokkainta on lisätä hiilidioksidin talteenotto ensin rannikolla sijaitseviin laitoksiin, joissa on korkea huipunkäyttöaika. Sekä metsäteollisuudessa että energiateollisuudessa on näihin kriteereihin soveltuvia laitoksia.

Toimijoiden on haastava lähteä yksin käynnistämään BECCS-hankkeita logistiikan puutteen vuoksi. Hiilidioksiditerminaalin luominen mahdollistaisi paremmat neuvottelut loppusijoituspaikkaan kuljettamisesta ja hiilidioksidin ostamisesta jatkojalostusprosesseihin. Hiilidioksiditerminaalissa (tai ns. "CO<sub>2</sub>-hubissa") voisi välivarastoida hiilidioksidia mittavia määriä. Markkinat ohjaisivat hiiltä joko pysyväisvarastointiin tai hyötykäyttöön. Sopiva sijainti hiilidioksiditerminaalille on rannikolla mahdollisimman lähellä talteenottolaitoksia.

Vaihtoehtoja yhteistyömalleille on esimerkiksi kaasumarkkinoita vastaava malli, jossa valtiollinen toimija vastaa infrastruktuuria ja käyttäjät maksavat siirtoverkonhaltijalle. Tämä on kiinnostava malli varsinkin, jos hiilidioksidia aletaan siirtää putkiverkostossa. Yhteistyö kannattaa joka tapauksessa sataman väliaikaisvarastoinnissa sekä laivakuljetuksen järjestämisessä. Optimaalista infrastruktuuria tulisi lähteä kehittämään Suomessa heti. Puute vastuullisesta hiilidioksidinfrastruktuurin toimijasta on hidastanut teknologian käyttöönottoa Suomessa.



Kuva 15 Fossiiliset ja eloperäiset hiilidioksidilähteet Suomessa.

**3)** Tekniselle hiilidioksidin talteenotolle kirjatut tavoitetasot kansalliseen ilmasto-ohjelmaan edistäisivät teknologian poliittista hyväksyvyyttä ja auttaisivat myös ohjaamaan vihreän siirtymän tukirahoja hiilen sidonnan teknologioihin. Nyt kun tavoitetasoja ei ole määritetty, kehittyvät hiilenpoistojen markkinat hiljalleen itsenäisesti muiden edelläkävijämaiden vahvistaessa markkina-asemaansa. Sopivaa tavoitetasoa Suomelle voi hakea hiilinielulaskennasta. Laskennan mukaan Suomessa hiilinielun lisäystarve on 19–22 Mt vuosina 2021–2035 päästövähennystarpeiden lisäksi. Tammikuussa 2023 Ilmastopaneeli nosti suuntaviivoja Suomen ilmastotoimien tehostamiseen. Julkaisussa teknisten nielujen ja muiden mahdollisten innovatiivisten hiilensidonnan ratkaisujen tarpeelliseksi määräksi on esitetty 8 Mt vuoteen 2035 mennessä. Tämä on noin kolmannes koko Suomen biogeenisistä pistemäisistä hiilidioksidilähteistä.

Mallia vaihtoehtoisiin kansallisiin toimiin ja tavoitetasoihin voi ottaa muista Pohjoismaista. Edelläkävijä on Ruotsi, jossa käynnistettyjä hankkeita on jo yli 25. Ruotsissa on asetettu ilmastolaissa tavoitteet negatiivisille päästöille vuosiin 2030 ja 2045 mennessä. Vuoteen 2030 BECCS-kapasiteetin tavoite on 1,8 Mt. Tavoitteiden kautta Ruotsilla on selkeä mandaatti kansallisille ohjaukskeinoille, kuten käänteiselle huutokauppamekanismille. Myös Norjassa ja Tanskassa tekninen hiilensidonta on esillä valtion ilmastotiekartoissa ja valtionrahoitteisia hiilensidonnan hankkeita on käynnistetty.



**Suomessa tulee avata keskustelut pikimmiten hiilenpoistojen strategiaan liittyen, sillä hiilenpoistojen ympärillä kysyntä on kansainvälisesti kasvanut nopeasti. Vuoden 2023 hallitusohjelmassa on tunnistettu tarve edetä ja hiilidioksidin talteenotosta on kirjattu seuraavasti:**



Hallitus asettaa tavoitteen teknisten nielujen käytölle merkittävässä määrin jo 2020-luvun kuluessa. ... Hallitus valmistautuu riittäviin kannusteisiin investointien etenemiseksi. Selvityksen pohjalta otetaan käyttöön hiilidioksidin talteenottoon kannustava negatiivisten päästöjen huutokauppa tai vastaava mekanismi. Mekanismin rahoituksessa hyödynnetään soveltuvin osin hiilensidontamarkkinoita.

...

Energia- ja ilmastostrategian yhdeksi painopisteeksi asetetaan, että Suomi hyödyntää mahdollisuudet teollisuuden ja energiantuotannon ennakoitua nopeampaan päästöjen vähenemiseen sekä Euroopan suurimpiin kuuluvan puupohjaisen hiilidioksidin talteenoton ja jatkokäytön potentiaalin käyttöön.

## Johtopäätökset

Suomessa on mahdollisuudet kehittyä hiilidioksidin talteenoton kärkimaaksi. Suuret biogeenisen hiilidioksidin virrat ja vetysektorin kasvutavoitteet luovat perustaa liiketoimintamalleille. Rahoitusta on Euroopan tasolla saatavilla erityisesti vetyhankkeisiin. BECCS hankkeissa on nähtävissä monia yhtymäkohtia vetytalouteen esimerkiksi synteettisen polttoaineen valmistuksessa. Teknisen hiilensidonnan ratkaisut tukevat ilmastotavoitteiden saavuttamista ja luovat kestäväää talouskasvua, työpaikkoja ja teknologiaosaamista.

Pullonkauloja teknologian käyttöönotolle ovat toistaiseksi hiilidioksidin siirto ja välivarastointi sekä taloudellisten kannustimet. Varmuutta kaivataan vapaaehtoisten päästökompensaatiomarkkinoiden toimintaan sekä päästösertifikaattien raportointiin liittyen.

Tampereen Energia näkee BECCS:ssä suuren markkinapotentiaalin ja on valmis etenemään heti, kun se on taloudellisesti ja poliittisesti mahdollista.

BECCS:n käyttöönotossa kokonaisuuden kestävyys on maksimoitava. Tämä tarkoittaa oikeaa regulaatiota hakkuiden määrän ja luonnon monimuotoisuuden suojelemiseksi. Teknisen hiilensidonnan ja luonnollisen hiilensidonnan tasapaino on mahdollista löytää, mutta se edellyttää myös taitavaa kansallista ohjausta.



# 5 Tampereen Energian tuotantoskenaariot



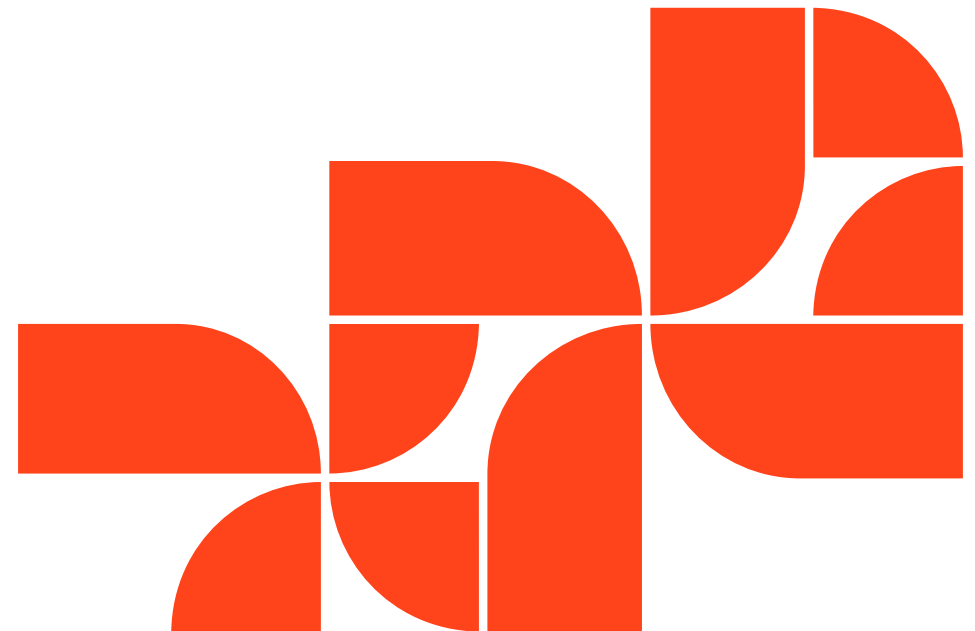


Selvityksessä esitellään Tampereen kaukolämmön tuotantoon sähköistymiseen ja hukkalämpöihin perustuva polttovapaa tuotantomalli (skenaario X) sekä hiilinegatiivinen vaihtoehto (skenaario BECCS) vuodelle 2040. Näiden kahden pääskenaarion lisäksi on otettu tarkasteluun muutama muu vaihtoehtoinen skenaario.

Skenaarioiden tarkastelussa on huomioitu jokaisen tuotantoskenaarion toteutumisen kannalta välttämättömät sisäiset oletukset. Oletuksien auki kirjoittamisen tavoitteena on esitellä, millaisia muutoksia toimintaympäristössä tarvitaan.

**Skenaarioissa tärkeää on, että päästöjä ei ulkoisteta tarkastelurajan ulkopuolelle, vaan koko energiajärjestelmä on toimiva ja hiilineutraali. Skenaarioiden tavoitteena on:**

- 1)** päästä vertailemaan vaihtoehtoja järjestelmätasolla. Työssä saattaa olla epärealistisia yksityiskohtia, mutta skenaario on sisäisesti looginen.
- 2)** ymmärtää, mitä julkisia panostuksia tulokseen pääseminen vaatii.
- 3)** visualisoida ehdotettujen teknologioiden mittakaavaa, jotta eri teknologioiden vahvuudet ja lämmön kysynnän vaihtelun tuomat haasteet olisi helpompi ymmärtää.



Kaikki skenaariot vaativat investointeja, mikä on kalliimpaa kuin nykyisillä tuotantomuodoilla jatkaminen. Kokonaiskustannuksiin vaikuttaa oleellisesti, tehdäänkö uudet investoinnit korvaamalla nykyiset laitokset jo ennen niiden käyttöiän päättymistä. Käytännössä siis toteutetaanko investointisuunnitelma hitaasti vai nopeasti.

**Yksityiskohtaiset kannattavuuslaskennat 20 vuotta tulevaisuuteen eivät palvele selvityksen tavoitetta lisätä ymmärrystä hiilinegatiivisen tuotannon haasteista. Skenaarioiden edullisuus riippuu käytetyistä hintaoletuksista:**

- Jos päästöoikeuden hinta ei nouse korkealle, ei myöskään negatiivisten päästöjen tuottaminen ole kannattavaa.
- Jos puun energiakäytölle (huolimatta hiilidioksidin talteenotosta) asetetaan vero, ei hiilidioksidin talteenotto ole kannattavaa.
- Jos sähkön käyttöä verotetaan paljon, ei sitä voi käyttää lämmöntuotantoon.
- Jos ajoittain on sähkön ylituotantoa, on sähkön käyttö lämmityksessä houkutteleva vaihtoehto.

## Tulevaisuuden lämmitysratkaisujen valinnassa energiapolitiikalla on keskeinen merkitys

Epävarmuutta laskentoihin tuo erityisesti sähkön hintaennuste. Sähköistyminen ja tuulivoiman lisääntyminen tuovat sähkön hintoihin korkeita piikkejä sekä nollahintoja. Arviot siitä, ovatko hintapiikit 100 €/MWh vai 10000 €/MWh ja kuinka usein esiintyy nollatunteja, vaihtelevat eri toimijoiden ennusteissa.

Korkeissa hintapiikeissä sähkön tarve katetaan polttamalla fossiilisia polttoaineita huonolla hyötysuhteella sähköksi, joko naapurimaissa tai Suomessa. Tällöin puun ja joissain tapauksissa jopa fossiilisten polttaminen hetkellisesti lämmöksi korkealla hyötysuhteella on parempi vaihtoehto kuin sähkön käyttö. Vanhan tuotantorakenteen ylläpito erikoistilanteita varten aiheuttaa maltillisesti kustannuksia, mutta ylläpito on kriittistä, jotta toimitusvarmuus ja sähkökattiloiden markkinariski pysyvät hallinnassa.

Tulevaisuuden epävarmuuksista huolimatta voimme esitellä investointikustannuksia eri skenaarioille. Jos laitoksen käyttö lopetetaan, se ei tarvitse ylläpitoinvestointeja. Näitä kustannuksia ei ole pyritty tässä työssä arvioimaan, joten investointikustannuksia voi käyttää vain karkeiden kokoluokkien arviointiin. Yksityiskohtaiset kannattavuuslaskelmat tehdään aina tapauskohtaisesti.

## 5.1 Skenaario X

# Ensimmäinen skenaario on täysin polttoon perustumaton kaukolämmön tuotanto.

Toisin kuin aiemmassa selvityksessämme, Tammervoiman hyötyvoimalaitos on pidetty skenaarioissa käytössä. Mielestämme tämä pragmaattinen muutos edistää paremmin selvityksen tavoitetta lisätä ymmärrystä tulevaisuuden mahdollisuuksista ja esteistä. Jätteenpoltoalle ainoa vaihtoehto olisi läjittää se kaatopaikoille. Selvityksen edellistä versiota esiteltäessä kukaan kuulijoista ei nähnyt kaatopaikkoihin palaamista toivottavana vaihtoehtona.

Jätteen syntymistä vähentämällä ja kierrätystä lisäämällä on mahdollista vähentää jätteenpoltoa ja siitä syntyviä päästöjä. Skenaarioissa on oletettu, että jätteenpoltoa tehdään nykyistä vähemmän. Jos kaatopaikkaläjityksestä vaihtoehtona kieltäydytään, jätteenpolton päästöjen määrään ei voi vaikuttaa lämmitystapavalinnoilla. Tästä näkökulmasta jätteenpoltoista syntyvä lämpö voidaan ajatella hukkalämpönä ja X-skenaariot lämmöntuotannon osalta polttovapaana. Jos poliittisesti niin päätetään, Tammervoiman lämpö on korvattavissa kyllä muilla teknologioilla, kuten selvityksen edellisessä versiossa osoitimme.

Pohjatuotantona skenaariossa X on Tammervoima ja hukkalämmöt. Keskiuormaa tehdään kevythybrideillä ja huiput tuotetaan ilma-vesilämpöpumpuilla ja sähkökattiloilla, lämpövarastoja hyödyntäen. Hukkalämmöt sisältävät datasalien, vedyntuotannon, biohiilen ja jätevedenpuhdistamon hukkalämmöt, jotka otetaan biohiiltä lukuun ottamatta talteen lämpöpumpuilla. Jätteenpolton määrää on vähennetty nykyisestä sillä oletuksella, että kierrätyksen lisääntyessä syntyvän jätteen määrä vähenee. Synteettisen polttoaineen tulevaisuuden tarpeista riippuu, miten jätteenpolttolaitosta käytännössä kannattaisi operoida. Tarvittaessa laitoksessa voitaisiin hyödyntää tukipolttoaineena uusiutuvaa biomassaa, jos poltettavan jätteen määrä vähenee radikaalisti ja hiilidioksidin tarve on kuitenkin suurta, mutta tässä skenaariossa on oletettu, että näin ei tehdä.

Skenaarion haaste on luonnollisesti talven korkea lämmön kulutus, jolloin osa täysin polttoon perustumattomista teknologioista ei ole saatavissa. Parhaiksi kesäajan lämmöntuotannon teknologioiksi on nähty hukkalämmöt. Muita vain kesällä tuottavia teknologioita, kuten järvilämpöä tai aurinkolämpöä, ei ole järkevää ottaa suunnitelmaan kesän rajallisen lämmönkysynnän vuoksi.

Kilpailuetuna skenaariossa on hukkalämpöjen energiatehokas hyödyntäminen ja Tampereen Energian operoima tehonhallinta. Keskitetty tuotanto mahdollistaa järjestelmän optimoinnin korkean kulutuksen aikaan ja sähkökattiloiden kytkemisen kantaverkkoon,

mikä edesauttaa järjestelmän tasapainon ylläpitoa verrattuna hajautettuun sähkölämmitykseen. Keskitetyssä järjestelmässä tuotantomuotojen hintojen ja kulutuksen vaihdellessa tuntitasolla pystytään lämmöntuotantoa optimoimaan taloudellisesti reaaliajassa.

Suunnitelmassa on ylläpidetty polttoon perustuvasta tuotannosta kolmasosaa nykyisestä tehosta. Energiasta nämä tuottavat skenaariossa kuitenkin 0 %. Sähköjärjestelmän puhtauden mukaan toteuma lienee jotain 0–5 % väliltä. Polttoa lämpöjärjestelmässä tarvitaan vain, mikäli sitä tarvittaisiin sähköjärjestelmässä enemmän. Sähkömarkkinan häiriöihin varaudutaan asettamalla sähkön markkinahinnalle raja, jonka jälkeen vanhoja pelletti- ja hakelaitoksia saa ajaa. Näin voidaan estää mahdollisen sähköverkon häiriön eskaloitumista. Mikäli polttovapaita laitosinvestointeja lisätään tähän suunnitelmaan nähden, kustannukset nousevat, mutta poltto ei vähene. Tämä tarve ylläpitää laitoksia varalla toimitus- ja huoltovarmuuden takia kuvaa hyvin tehonhallinnan teknistaloudellista haastetta.

Yhteensä tehoa skenaarioihin on mitoitettu 898 MW ja investointikustannukset ovat noin 393 MEUR. Ilmavesilämpöpumput ovat investointi edulliseen energiantuotantoon vuodenaikoina, jolloin lämpötila ei mene alle -8 °C, jolloin ne eivät pysty tuottamaan lämpöä mitoitussäilytysolosuhteissa. Täten niiden ei voida laskea kasvattavan mitoitettavaa tuotantotehoa.

Tuotantolaitos	Teho	Investointi
<b>Tammervoima</b>	60 MW	
<b>Hukkalämpö</b>	108 MW	
<b>Ilmavesilämpöpumppu</b>	100 MW Huom ei lasketa tehoon mukaan	
<b>Kevythybridi</b>	80 MW	
<b>Sähkökattila</b>	350 MW	
<b>Varateho</b>	300 MW	
<b>Yhteensä</b>	898 MW	393 MEUR
<b>Lämpövarastoja yhteensä</b>	13 GWh	

Taulukko 2 Skenaarion X tuotantotehot ja investointikustannukset

## Skenaarion X oletukset

- 1.** Kaukolämmölle on kysyntää eli se on kilpailukykyistä talokohtaisia lämpöpumppuja vastaan. Tämä toteutuu, mikäli polttovapaan skenaarion siirtymäkustannuksia ei viedä täysimääräisesti kaukolämmön hintaan, vaan rahoitus onnistuu muuten.
- 2.** Lämpöpumput ja sähkökattilat ovat kilpailukykyisempi tapa tuottaa kaukolämpöä kuin jo rakennettu Naistenlahti 3 -biovoimalaitos ja siihen mahdollisesti liitettävä hiilidioksidin talteenotto. Tähän voi vaikuttaa polttoaineen saatavuus ja hinta, päästöoikeuden alhainen hinta suhteessa hiilidioksidin talteenoton kustannukseen tai muu regulaatio.
- 3.** Kierrättämätöntä jätettä muodostuu ja sen polttaminen on hyväksyttävää yhdistettynä hiilidioksidin talteenoton teknologioihin.
- 4.** Jätteen määrä Pirkanmaalla on vähentynyt, minkä seurauksena Tammervoima ajaa kesän pienemmällä teholla.
- 5.** Hiilidioksidin talteenottoon perustuva synteettisen metaanin valmistaminen on kannattavaa liiketoimintaa. Elektrolyysistä vapautuvaa lämpöä voidaan hyödyntää hukkalämpönä, mikä kattaa suuren osa hyödynnettävissä olevasta hukkalämmöstä.
- 6.** Taloyhtiöt ottavat mieluummin kevythybridiratkaisun Tampereen Energialta kuin tekevät maalämpöjärjestelmän itse. Kevythybridit tuotteistetaan onnistuneesti ja siihen liittyvät teknistaloudelliset ongelmat saadaan ratkaistua.
- 7.** Teollisen luokan ilma-vesilämpöpumpuille löytyy soveltuvia sijainteja kaupungista ja teknologia osoittautuu luotettavaksi tavaksi tuottaa lämpöä lämpiminä sekä viileinä vuodenaikoina.
- 8.** Sähkön siirto ja hankinta on edullisempaa keskitetysti kuin talokohtaisesti. Keskitetyllä tuotannolla on mahdollisuus olla käyttämättä huippuhintaista sähköä lämpövarastojen ja muiden tuotantomuotojen kautta, toisin kuin talokohtaisissa järjestelmissä.
- 9.** Sähkökattiloilla ja lämpöpumpuilla ei ole sähköveroa tai sähkövero on EU:n vähimmäisverotaso. Sähkön siirtohintaa on kohtuullinen niin sähkön jakeluverkkoon kuin kantaverkkoon kytkettyjen kattiloiden osalta.
- 10.** Sähkön siirtoverkko kestää lämpötilariippuvan sähkönkulutuksen kasvun. Koko Suomessa varaudutaan sähkön kulutuksen lisääntymiseen investoimalla runsaasti uusiutuvaan sähköntuotantoon ja tehohuippujen turvaamiseen, valtio myös tukee tarvittaessa näitä investointeja.

**11.** Fingrid rakentaa uuden kantaverkkoyhteyden Tampereen länsipuolelle (esimerkiksi Melon voimalaitokselle), jotta sähkökattiloiden kapasiteettia Länsi-Tampereella voidaan kasvattaa.

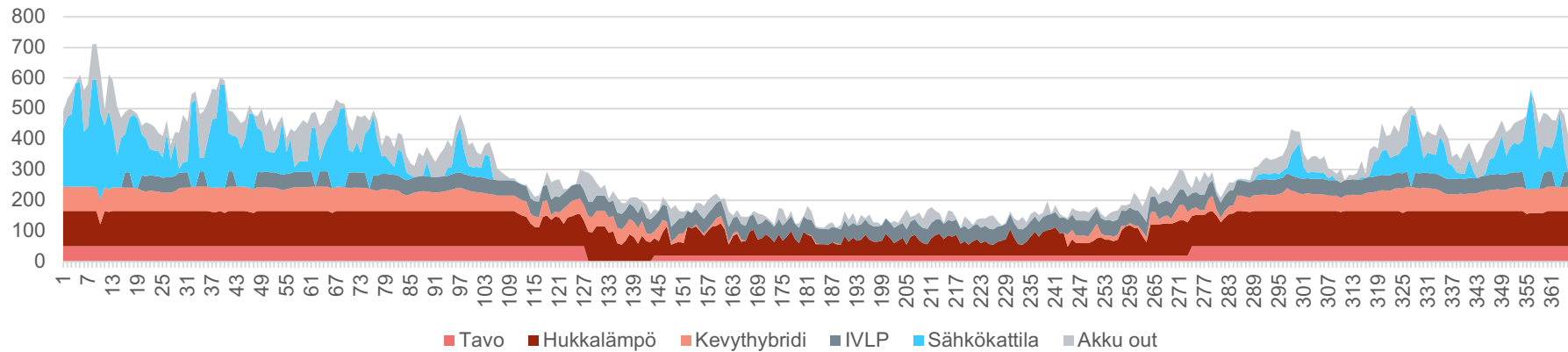
**12.** Tampereen Energian öljyvaraston käyttö päättyy ja se pystytään valjastamaan lämpövarastoksi tai jokin muu vastaavan kokoinen lämpöakku on kannattavaa rakentaa. Lielahteen rakennetaan 3 GWh kaukolämpöakku sähkökattiloiden yhteyteen.

**13.** Hukkalämpöjen saatavilla oleva määrä kasvaa. Biohiilen tai geolämmön tuotanto kasvaa ainakin maltillisesti, jolloin siitä saatava hukkalämpö kattaa osan skenaarion hukkalämmöistä.

**14.** Tampereen Vesi hyväksyy Sulkavuoren lämpöpumpun rakentamisen.

**15.** Ydinlämpö ei ole kannattava tai mahdollinen Tampereella.

### Skenaario X



Kuva 16 Tuotantorakenne skenaario X:ssä. Kuvassa x-akselilla on aika (yksi vuosi päiväresoluutiolla) ja y-akselilla kaukolämmön tarve vuorokauden keskitetona.

## Tiekartta skenaarioon X pääsemiseksi

# Jotta skenario X voitaisiin saavuttaa, täytyy suurin osa nykyisestä tuotannosta korvata jollain uudella.

Osa investoinneista on helposti ja nopeasti toteutettavissa, toiset vaativat pidemmän tähtäimen tekemistä. Mahdollinen tiekartta skenaarioon X vuonna 2040 pääsemiseksi:

- 1.** Sähkökattiloiden asentaminen on yksinkertaista ja voidaan tehdä nopeasti. Sähkökattiloita pystytään lisäämään nykyiseen verkkoon 200 MW edestä. Uuden kantaverkkoyhteyden suunnittelu ja rakentaminen kestää 5–10 vuotta. Uuden kantaverkkoyhteyden myötä sähkökattiloiden kapasiteettia voidaan kasvattaa yli 200 MW tasolle. Jotta polttovapaaseen lämpöön voidaan siirtyä, täytyy kantaverkon suunnittelu aloittaa siis mielellään 20-luvulla.
- 2.** Kaukolämpöakkuja voidaan ottaa käyttöön suhteellisen nopeasti. Niiden aikataulu kannattaa sijoittaa sähkökattiloiden käyttöönottoon.

**3.** Hukkalämpö perustuu voimakkaasti vetyteollisuuteen, hiilidioksidin talteenottoon ja niiden jalostukseen liikennepolttoaineeksi.

Liiketoiminnan regulaatio sekä tuotannon että kysynnän puolelta on keskeinen mahdollistaja tai este. Kun regulaatio saadaan kuntoon, toimintaa voidaan laajentaa nopeastikin. Biohiilen kysyntä rajoittaa sen tuotannosta saatavan hukkalämmön määrää. Kun tämä ratkeaa, toimintaa voidaan laajentaa nopeasti. Muita hukkalämmön lähteitä otetaan käyttöön sitä mukaa kuin niitä Tampereelle tulee. Kapasiteetti siis kasvaa portaittain vuotta 2040 lähestyttäessä.

**4.** Kevythybridejä on suunnitelmassa paljon, valtaosassa kaukolämpökohteita. Jotta tähän voidaan päästä, vaihtoehdon pitää osoittautua kilpailukykyiseksi, se pitää tuotteistaa hyvin ja kannustaa asiakkaita aktiivisesti valitsemaan ratkaisu. Kohteita liitetään lineaarisesti 2040 lähestyessä.

**5.** Vedenpuhdistamon lämpöpumpun käyttöönottoa rajoittaa se, että käyttöönotto aiheuttaisi mahdollisesti häiriötä jäteveden purkupuutken käyttöön. Sopivia ikkunoita saattaa olla vain 5–10 vuoden välein. Kun Tampereen Veden kanssa päästään yhteisymmärrykseen, käyttöönotto lämpöverkossa tapahtuu nopeasti.

**6.** Ilma-vesilämpöpumppuja voidaan suunnitella ja asentaa tarpeen mukaan, kun alkaa näyttää siltä, että parempia lämmönlähteitä ei ole riittävästi saatavilla, tai jos ne osoittautuvat kannattaviksi investoinneiksi.



## 5.2 Skenaario X + pienydinvoima

Yhtenä mahdollisena polttoon perustumattomana lämmöntuotantomuotona voisi tulevaisuudessa toimia pienydinvoima eli pienet modulaariset ydinreaktorit (SMR). Pienydinvoiman hyötynä ovat suuret saatavilla olevat tehot verrattuna esimerkiksi lämpöpumppuihin, tasainen tuotanto ja vähäpäästöisyys. Pienydinvoiman suuri investointikustannus, mutta pienet käyttökulut, mahdollistavat sen, että laitos toimisi pohja- tai keskikuormana. Skenaariossa loput kysynnästä tuotettaisiin muilla polttoon perustumattomilla vaihtoehdoilla. Vaihtoehtoisesti loput kaukolämmön kysynnästä voitaisiin kattaa hiilidioksidin talteenotolla varustetulla bioenergialla.

Pienydinvoiman epävarmuutena on sen saatavuus, investointikustannus sekä poliittinen hyväksyttävyys. Skenaarioon on hahmoteltu yksi pelkkää lämpöä tuottava 50 MW pienydinvoimala. Käytännössä laitosten määrä riippuisi kilpailukyvyistä muihin lämmönlähteisiin, niitä voisi olla 1-5 kappaletta. Tässä skenaariossa Tammervoima toimii pohjatuotantona, koska sen hiilidioksidille on kysyntää synteettisen metaanin tuotannossa. Nähdäksemme ydinkaukolämpö voisi olla kilpailukykyistä esitetyn kaltaisena keskikuormalaitoksena. Lämmöntuotanto kesällä järjestyy helposti joka tapauksessa, joten kannattavuus ei ole kiinni siitä, voiko laitos korvata halpaa lämmöntuotantoa kesällä. Ratkaisevaa on, minkä hintaista lämmöntuotantoa se korvaa lämmityskaudella.





## Skenaarion X + pienydinvoima oletukset

1. Kaukolämmölle on kysyntää eli se on kilpailukykyistä talokohtaisia lämpöpumppuja vastaan. Tämä toteutuu, mikäli skenaarion siirtymäkustannuksia ei viedä täysimääräisesti kaukolämmön hintaan, vaan rahoitus onnistuu muuten.
2. Pienydinvoimaa voi rakentaa Tampereelle turvallisesti.
3. Pienydinvoimalle on selvä poliittinen hyväksyntä ja toteutuksen mahdollistava regulaatio.

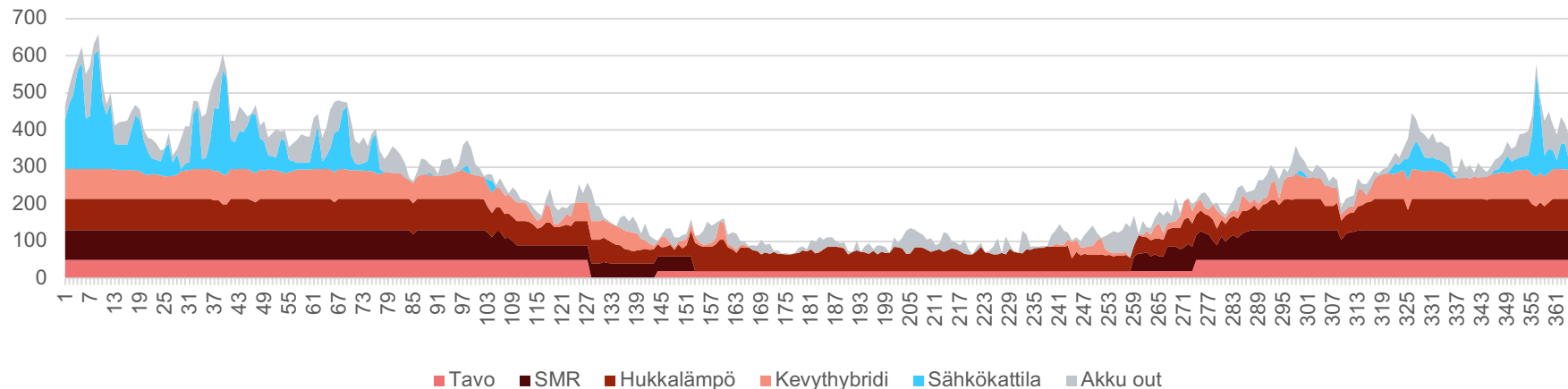
4. Ydinkaukolämpö, lämpöpumput ja sähkökattilat ovat kilpailukykyisempi tapa tuottaa kaukolämpöä kuin jo rakennetut bioenergiaa hyödyntävät laitokset.

5. Kierrättämätöntä jätettä muodostuu ja sen polttaminen on hyväksyttävää yhdistettynä hiilidioksidin talteenoton teknologioihin.

6. Jätteen määrä Pirkanmaalla on vähentynyt, minkä seurauksena Tammervoima ajaa kesän pienemmällä teholla.

7. Hiilidioksidin talteenottoon perustuva synteettisen metaanin valmistaminen on kannattavaa liiketoimintaa. Elektrolyysistä vapautuvaa lämpöä voidaan hyödyntää hukkalämpönä, mikä kattaa suuren osa hyödynnettävissä olevasta hukkalämmöstä.

Skenaario X + SMR



Kuva 17 Tuotantorakenne skenaario X + pienydinvoima.



### 5.3 Skenaario X miinus

Viimeinen X-skenaarioista käsittelee tilannetta, jossa kaukolämpöverkko pienenee eli lämmöntuotanto siirtyy keskitetystä talokohtaisiin ratkaisuihin.

Tämä tarkoittaa, että nykyiset kaukolämmön tuotantolaitokset ja siirtoverkko jäävät käyttämättä ja kaupunkien omistamien energiayhtiöiden liikevaihto pienenee. Tämä johtaa siihen, että verotulot ja osingot laskevat sekä kaupungin omaisuuden arvo pienenee. Tampereen Energia on Tampereen kaupungin suurin osinkojen maksaja. Esimerkiksi vuonna 2023 Tampereen Energia maksoi Tampereen kaupungille 20 miljoonaa euroa osinkoa (n. 80 % kaikista kaupungin osinkotuloista).

Siirtyminen talokohtaisiin ratkaisuihin kasvattaa lämpöasiakkaiden omia investointitarpeita sekä nostaa sähkön tehonhallinnan ja sähköverkon ylläpidon kustannuksia. X miinus -skenaariossa häviäjiä ovat sekä kaupungit että lämpöasiakkaat. Voittajia ovat laitevalmistajat ja suunnittelutoimistot.

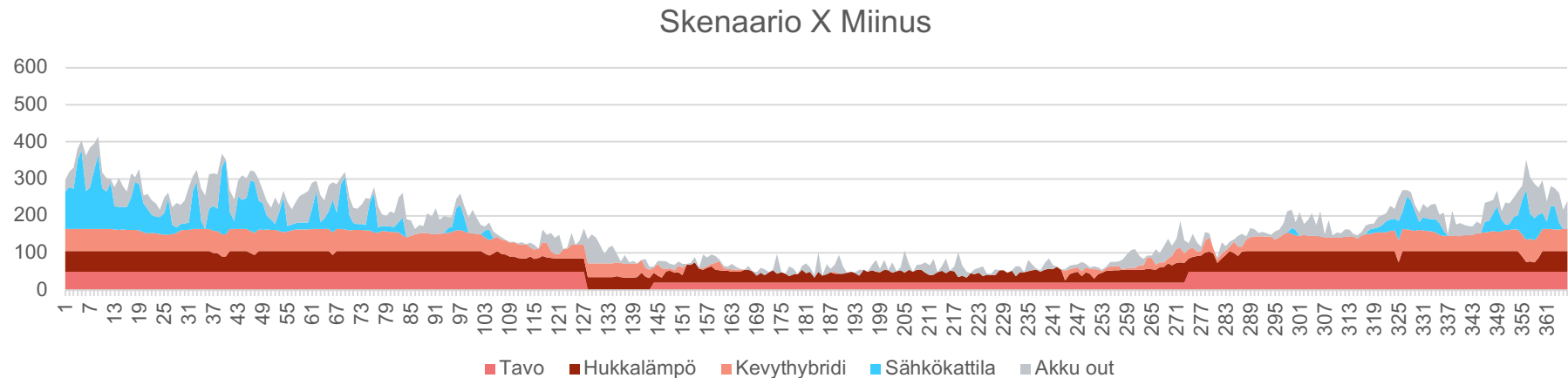
Siirtyminen hiilineutraaliin energiajärjestelmään on meneillään nykyisissä kaukolämpöverkoissa. Sen hyödyntäminen nopeuttaa todellisten ympäristövaikutusten saavuttamista huomattavasti rinnakkaisen uuden lämmitysinfrastruktuurin rakentamiseen nähden. Kaukolämpöjärjestelmässä tehoa tuotetaan lämmitykseen niin, ettei se rasita sähköjärjestelmää. Tämän ympäristöystävällisyys ja kustannuksia säästävä vaikutus on merkittävä.



## Skenaarion X miinus oletukset

1. Kaukolämpö on kilpailukykyistä talokohtaisia lämpöpumppuja vastaan vain alueilla, missä on pulaa tilasta. Kaukolämpökuorma on pienentynyt 40 %.
2. Lämpöpumput ja sähkökattilat ovat kilpailukykyisempi tapa tuottaa kaukolämpöä kuin jo rakennettu Naistenlahti 3 -biovoimalaitos ja siihen mahdollisesti liitettävä hiilidioksidin talteenotto.

3. Hiilidioksidin talteenottoon perustuva synteettisen metaanin valmistaminen on kannattavaa liiketoimintaa. Elektrolyysistä vapautuvaa lämpöä voidaan hyödyntää hukkalämpönä, mikä kattaa suuren osa hyödynnettävissä olevasta hukkalämmöstä.



Kuva 18 Tuotantorakenne skenaario X miinus.

## 5.4 X-skenaarioiden haasteita

Skenaario X lähtee ajatuksesta, että annetuilla oletuksilla kaikki lämmöntuotanto on polttoon perustumatonta. Tällaiselle fundamentalismille on puolestapuhujansa. Silloin usein ajatellaan vain paikallisia hiilidioksidipäästöjä, eikä huomata, että kaikki polttaminen ei ole fossiilisten polttoaineiden polttamista ja päästöt voidaan ottaa talteen.

On huomattava, että jo nykyisin tiedossa olevilla toimenpiteillä kaukolämmön perustuotanto on Suomessa jo lähivuosina lähes päästötöntä. Fossiiliset hiilidioksidipäästöt syntyvät lämmöntuotannossa jatkossa lähes yksinomaan huipputuotannosta.

On huomattava, että jo nykyisin tiedossa olevilla toimenpiteillä kaukolämmön perustuotanto on Suomessa jo lähivuosina lähes päästötöntä. Fossiiliset hiilidioksidipäästöt syntyvät lämmöntuotannossa jatkossa lähes yksinomaan huipputuotannosta.

Huippukulutukseen ei lämpöpumppu toimi ja vaatii sähköksi käännettynä paljon varavoimaa, jossa maakaasu on todennäköinen vaihtoehto. Kaukolämmön päästöt (hyötysuhde yli 90 %) siis vaihtuvat sähkön huipputuotannon maakaasupohjaisiksi päästöiksi (hyötysuhde 40–55 %) tai pahimmassa tapauksessa tuontisähkön hiililauhdetuotannoksi, jossa hyötysuhde voi olla 30 %.

Vaihtoehtoja maakaasulauhteelle olisi esimerkiksi biomassalauhde, kysyntäjousto (mittaluokassa koko kaupungin samanaikaista kulutusta vastaava säätövoima), öljylauhde ja vetylauhde, jossa elektrolyysereillä tuotetaan vetyä ilman lämmön talteenottoa matalalla hyötysuhteella ja poltetaan se lauhteeksi. Luvussa 8.1 on käsitelty tarkemmin tulevaisuuden sähköjärjestelmää tilanteessa, jossa kaukolämmitys on siirtynyt enimmäkseen joustamattomaksi sähkön kulutukseksi ja kysyntään pyritään vastaamaan uusiutuvalla sähköntuotannolla.

Päästöttömien energiajärjestelmien skenaarioissa päästöt ja kustannukset on mahdollista siirtää tarkasteltavan systeemin ulkopuolelle. Seuraavassa on kuvattu muutamia yleisiä piilotettuja oletuksia. Nämä oletukset on helppo tehdä vahingossa, jos niitä ei erityisesti varo.



- Sähköjärjestelmän tasapainottamisen tarve siirretään naapurimaille (tuontia ja vientiä saa olla kuinka paljon tahansa ja koska tahansa. Todellisuudessa säariippuva tuotanto korreloi voimakkaasti naapurimaiden kanssa, joten tämä on epärealistinen oletus).
- Riittävään sähkötehoon ei oteta lainkaan kantaa. Tähän oletukseen päästään, jos mallinnus tehdään vuosi- tai vuodenaikatasolla. Mallinnukseen lisätään valtavasti tuuli- ja aurinkovoimaa, ja todetaan, että vuoden aikana saadaan sähköä yli tarpeen. Ei riitä, että rakennuksia lämmitetään vain kesällä, eikä pyykkiä pestäessä lohduta, jos välillä on sähköä pestä 100 koneellista kerralla ja välillä ei lainkaan.
- Sähköjärjestelmissä käytetään epärealistisen paljon kysyntäjoustoa ilman, että selkeästi perustellaan, mistä se tulee. Tampereen sähkönkulutuksen huippu on noin 350 MW. Monesti kysyntäjoustoa näkee tuhansia megawatteja tuulivoiman tuotantoa seuraten.
- Sähköjärjestelmän ylituotanto ohjataan kaukolämpöjärjestelmiin, vaikka silloin olisi käytössä jo valmiiksi päästötön lämmöntuotanto, jotta voidaan olettaa, että tuulivoimasta saadaan useammin korkeaa hintaa.
- Huonosti harkittu regulaatio voi johtaa myös polton siirtymiseen kaukolämmöstä rakennuskohtaiseksi kaasun tai biomassan pienpoltoksi, mikä johtaa ilmanlaadun heikentymiseen ja kasvaviin päästöihin.



## 5.5 Skenaario BECCS

### Tässä hiilinegatiivisessa skenaariossa on lisätty olemassa oleviin suuriin tuotantolaitoksiin hiilidioksidin talteenottojärjestelmät.

Tuotantopinin pohjakuormana toimii Tammervoiman hyötyvoimalaitos ja Naistenlahti 3 -biovoimalaitos hiilidioksidin talteenotoilla ja loput kysynnästä tuotetaan lämpöpumpuilla ja sähköllä. Skenaariossa mukana olevat teknologiat ovat iso teräskaukolämpöakku, kevythybridit, vedyntuotannon hukkalämpö, Sulkavuoren jätevedenpuhdistamon hukkalämmöt, datasalien hukkalämmöt, muut pienen kokoluokan hukkalämmöt sekä sähkökattilat. Sähköön perustuvia lämmöntuotantomuotoja tarvitaan vähemmän kuin yllä olevissa X-skenaarioissa.

BECCS-skenaarion hyötyinä ovat huomattavasti parempi huoltovarmuus, omavaraisuus ja nettona negatiiviset päästöt. Naistenlahti 3 ja Tammervoima molemmat tuottavat sekä sähköä

että lämpöä, mikä nostaa järjestelmän hyötysuhdetta ja parantaa säädettävyyttä. Hiilidioksidin talteenoton vaatima laitteisto on niin kallis, ettei se voi seisoa puolet vuodesta. Sen vuoksi laitokset toimivat pohjakuormina. Tampereen Energian investointeihin on lisätty vain osa koko varastointiketjun investointikustannuksesta, koska kustannukset ovat todennäköisesti yrityksen näkökulmasta muuttuvia; joku muu investoi, me maksamme kuljetuksesta ja varastoinnista.

## Skenaarion BECCS oletukset

Tuotantolaitos	Teho	Investointi
<b>Tammervoima</b>	60 MW	
<b>Naistenlahti 3</b>	240 MW	
<b>Hukkalämmöt</b>	68 MW	
<b>Kevyhybridi</b>	40 MW	
<b>Sähkökattila</b>	200 MW	
<b>Varateho</b>	290 MW	
<b>Yhteensä</b>	898 MW	326 MEUR
<b>Lämpövarastoja yhteensä</b>	3 GWh	
<b>Hiilidioksidin talteenotto Tammervoima</b>	180 000 t/v	
<b>Hiilidioksidin talteenotto Naistenlahti 3</b>	360 000 t/v	

Taulukko 3 Skenaarion BECCS tuotantotehot ja investointikustannukset.

**1.** Kaukolämmölle on kysyntää eli se on kilpailukykyistä talokohtaisia lämpöpumppuja vastaan. Tämä toteutuu, mikäli skenaarion siirtymäkustannuksia ei viedä täysimääräisesti kaukolämmön hintaan, vaan rahoitus onnistuu muuten.

**2.** Hiilidioksidin talteenotto yhdistettynä biomassaan on kilpailukykyinen verrattuna lämpöpumppuihin (sähköön) ja hiilidioksidin talteenotto ja varastointi on teknis-taloudellisesti mahdollista ottaa käyttöön Naistenlahdessa ja Tammervoimassa.

**3.** Poltettava biomassassa on aidosti kestävä, jolloin sen poliittinen hyväksyttävyyden on hyvä.

**4.** Kierrättämätöntä jätettä muodostuu ja sen polttaminen on hyväksyttävää yhdistettynä hiilidioksidin talteenoton teknologioihin.

**5.** Hiilidioksidin talteenottoon perustuva synteettisen metaanin valmistaminen on kannattavaa liiketoimintaa. Elektrolyysistä vapautuvaa lämpöä voidaan hyödyntää hukkalämpönä, mikä kattaa suuren osa hyödynnettävissä olevasta hukkalämmöstä.

**6.** Taloyhtiöt ottavat mieluummin kevyhybridiratkaisun Tampereen Energialta kuin tekevät maalämpöjärjestelmän itse. Kevyhybridit tuotteistetaan onnistuneesti ja niihin liittyvät teknis-taloudelliset ongelmat saadaan ratkaistua.

**7.** Sähkön siirto ja hankinta on edullisempaa keskitetysti kuin talokohtaisesti. Keskitetyllä tuotannolla on mahdollisuus olla käyttämättä huippuhintaista sähköä lämpövarastojen ja muiden tuotantomuotojen kautta, toisin kuin talokohtaisissa järjestelmissä.

**8.** Sähkökattiloilla ja lämpöpumpuilla ei ole sähköveroä tai sähkövero on EU:n vähimmäisverotaso. Sähkön siirtohintä on kohtuullinen niin sähkön jakeluverkkoon kuin kantaverkkoon kytkettyjen kattiloiden osalta.

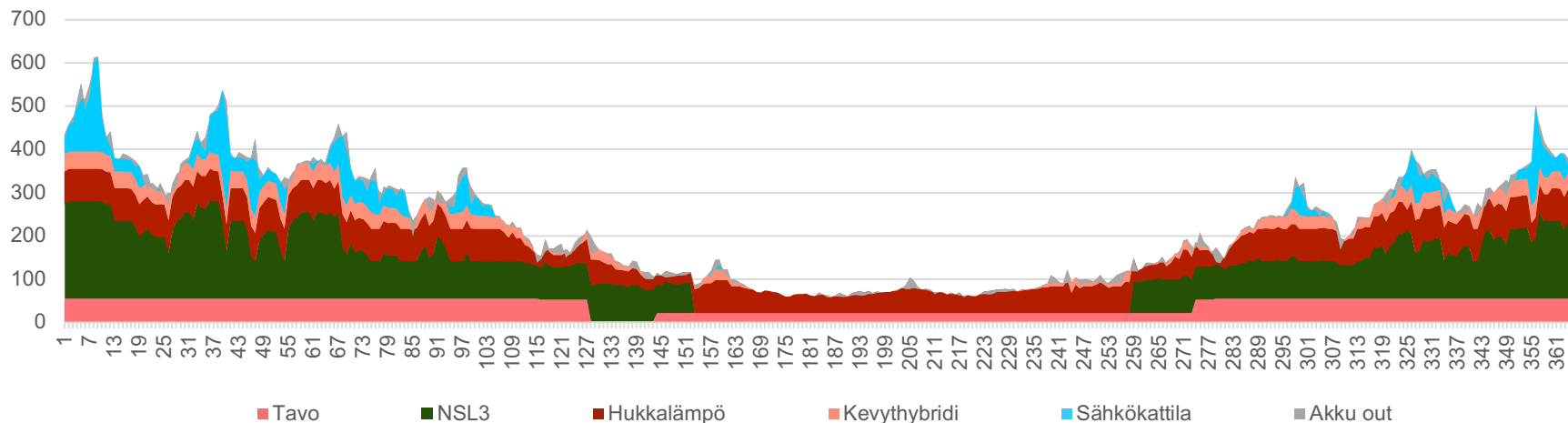
**9.** Lielahden rakennetaan 3 GWh kaukolämpöakku sähkökattiloiden yhteyteen.

**10.** Hukkalämpöjen saatavilla oleva määrä kasvaa. Biohiilen tai geolämmön tuotanto kasvaa ainakin maltillisesti, jolloin siitä saatava hukkalämpö kattaa osan skenaarion hukkalämmöistä.

**11.** Tampereen Vesi hyväksyy Sulkavuoren lämpöpumpun rakentamisen.

**12.** Ydinlämpö ei ole kannattava tai mahdollinen Tampereella.

### Skenaario BECCS



Kuva 19 Tuotantorakenne skenaario BECCS.



## Tiekartta skenaarioon BECCS pääsemiseksi

Osa investoinneista on helposti ja nopeasti toteutettavissa, toiset taas vaativat pidemmän tähtäimen tekemistä. Tässä on nimetty tuotantokuvasta pohjalta ylöspäin edeten yksi mahdollinen tiekartta skenaarioon BECCS pääsemiseksi.

- 1.** Tammervoiman hyötyvoimalaitos ja Naistenlahti 3 eivät vaadi muita toimenpiteitä kuin hiilidioksidin talteenottolaitteiston ja kuljetuslogistiikan rakentamisen. Tämä voidaan tehdä suhteellisen nopealla aikataululla, kunhan se todetaan riittävän kannattavaksi.
- 2.** Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin regulaatio ja markkinamekanismi rakennetaan onnistuneesti, jotta liiketoiminnasta tulee kannattavaa.
- 3.** Hukkalämpö perustuu voimakkaasti hiilidioksidin talteenottoon ja jalostukseen uusiutuvien polttoaineiden tuotannossa. Rajoittavina tekijöinä ovat polttoaineen kysyntä ja liiketoiminnan regulaatio. Kun näihin saadaan varmuus, toimintaa voidaan laajentaa nopeastikin. Biohiilen kysyntä rajoittaa sen tuotannosta saatavan hukkalämmön määrää. Kysynnän lisääntyessä toimintaa voidaan laajentaa nopeasti. Muita hukkalämmön lähteitä otetaan käyttöön sitä mukaa kuin niitä Tampereelle tulee. Kapasiteetti siis kasvaa lineaarisesti vuotta 2040 lähestyttäessä.

**4.** Vedenpuhdistamon lämpöpumpun käyttöönottoa rajoittaa se, että käyttöönotto aiheuttaisi mahdollisesti häiriötä jäteveden purkuputken käyttöön. Sopivia ikkunoita saattaa olla vain 5–10 vuoden välein. Kunhan Tampereen Veden kanssa päästään yhteisymmärrykseen käyttöönotosta, lämpöverkon kannalta käyttöönotto voidaan tehdä nopeasti. Priimausta varten lämpöpumpun yhteyteen kannattaa rakentaa sähkökattila.

**5.** Kevythybridejä on suunnitelmassa niin vähän, että niiden käyttöönotto voidaan tehdä asiakkaiden tarpeiden mukaan. Jos ratkaisu osoittautuu kilpailukykyiseksi, tähän 40 MW tehoon päästään ilman lisätoimenpiteitä.

**6.** Sähkökattiloiden asentaminen on yksinkertaista ja voidaan tehdä nopeasti. Sähkökattiloita pystytään lisäämään nykyiseen verkkoon 200 MW edestä. Uuden kantaverkkoyhteyden suunnittelu ja rakentaminen kestää 5–10 vuotta. Uuden kantaverkkoyhteyden myötä sähkökattiloiden kapasiteettia voidaan kasvattaa yli 200 MW tasolle.

**7.** Kaukolämpöakku voidaan ottaa käyttöön suhteellisen nopeasti. Sen aikataulu kannattanee sitoa sähkökattiloiden käyttöönottoon.



## 5.6 Skenaarioiden kustannusvertailu

Skenaarioiden päästöjä ja investointikustannuksia voidaan vertailla ja tuotantokustannuksista voidaan esittää suuntaa antavia vertailuja. Kaikkia skenaarioita ei ole tässä työssä tarkasteltu yksityiskohtaisesti, vaan tähän vertailuun on otettu kaksi pääskenaariota, skenaario X ja skenaario BECCS.

Skenaarioiden päästöt on laskettu sillä oletuksella, että sähkön ominaispäästökerroin on 62 g/kWh SYKE päästötietokannan Suomen keskimääräisen verkkosähkön vuoden 2040 ominaispäästökertoimen ennusteen perusteella. Sähkönkulutus painottuu talvikaudelle eli ajalle, jolloin voi olettaa sähkön kulutuksen päästöjen olevan keskimääräistä suuremmat.

Jätteenpoltosta saatavan hukkalämmön päästökerroin on 65 g/kWh sillä oletuksella, että jätteenpolton päästöt jaetaan jätteen tuottajakunnan mukaan. Alla olevaan taulukkoon on myös laskettu skenaarioiden päästöt tilanteessa, missä jätteen päästöt lasketaan jätteenhuoltosektorille tai jätteenpoltosta syntyvän hiilidioksidin jalostukseen, ja jätteenpolton hukkalämpö on päästötöntä.

Muuten on käytetty Tilastokeskuksen päästökertoimia. Tärkein oletus on biomassan polton hiilineutraalius, jonka vaikutusta päästöihin voi arvioida taulukon sarakkeesta biomassan käyttö. Teknologinen oletus on, että Naistenlahti 3 -biovoimalaitoksen päästöistä 90 % pystytään ottamaan talteen ja Tammervoiman osalta 50 % hiilidioksidista pystytään ottamaan talteen.

	Päästöt	Päästöt ilman jätteenpolttoa	Investoinnit yhteensä	Biomassan käyttö
<b>Skenaario X</b>	65 606 tCO <sub>2</sub>	37 130 tCO <sub>2</sub>	393 M€	0 TWh
<b>Skenaario BECCS</b>	-343 960 tCO <sub>2</sub>	-375 151 tCO <sub>2</sub>	326 M€	0,65 TWh
<b>Tampereen Energian pitkän tähtäimen suunnitelma (2022)</b>	60 176 tCO <sub>2</sub>	26 054 tCO <sub>2</sub>	41 M€	1,05 TWh

Taulukko 4 Skenaarioiden yhteenveto.

\* Vertailussa on vain varsinaiseen siirtymään liittyvä investointi. Pitkän tähtäimen suunnitelman investoinnit sisältävät tehdyt investointipäätökset muun muassa sähkökattilaan ja kaukolämpöakkuun. Lisäksi jokaiseen skenaarioon liittyy merkittäviä ylläpitoinvestointeja, mutta niiden ajatellaan olevan karkeasti samat kaikissa skenaarioissa. Nykyiseen rakenteeseen joudutaan luonnollisesti investoimaan laitosten käyttöiän päättyessä. Nämä investoinnit ovat lähitulevaisuudessa samat kaikissa skenaarioissa, ja liittyvät Tampereen Energian jo päätettyihin investointeihin tai varatehoon. Pidemmällä tulevaisuudessa merkittävimmät uusittavaksi tulevat komponentit nykyisessä suunnitelmassa ovat pelletti- ja hakelämpökeskus. Nämä laitokset puuttuvat skenaarioissa X ja BECCS. Laskennallisesti näiden laitosten päälaitteet tulevat uusittavaksi 2050-luvun puolessavälissä. Alkuperäisen investoinnin kokoluokka oli yhteensä noin 36 M€ ja päälaitteiden uusinnan hintaluokka on noin 30 M€. Pitkän tähtäimen suunnitelma ei ota kantaa vielä siihen, millaisella teknologialla kyseiset lämpökeskukset uusittaisiin. Muiden lämpökeskusten osalta säästöjä korvausinvestoinneissa tulisi jonkin verran, mutta ei kuitenkaan merkittävästi. Kaasulämpökeskuksen hinta on verrattain alhainen ja käyttöikä pitkä. Merkittävä osa lämpökeskuksista ylläpidettäisiin häiriöiden ja tehopulan varalle myös skenaarioissa X ja BECCS. Investointiluvut ovat hyvin yksinkertaistavat ja esimerkiksi investointien ajoitus vaikuttaa kunkin skenaarion kannattavuuteen keskeisesti.



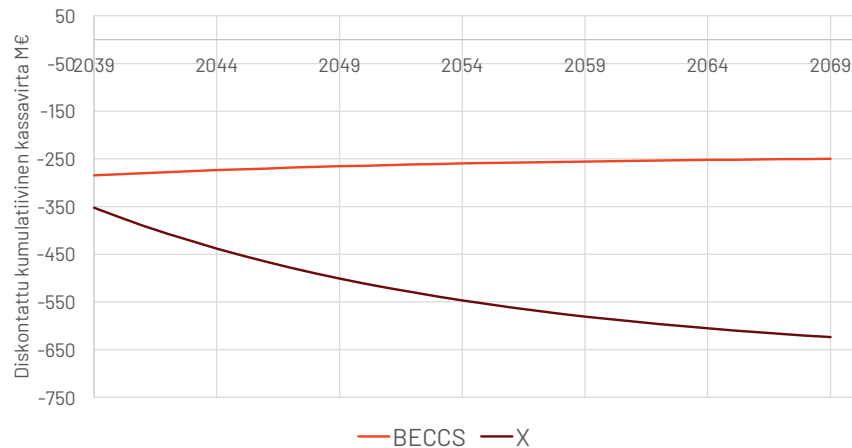
Oletamme, että kaikki investoinnit tehdään vuonna 2039, jonka jälkeen elämme vuotta 2040 uudelleen ja uudelleen. Laskennassa investointien jäännösarvo vuonna 2070 on nolla. Laskennassa ei ole mukana ylläpitoinvestointeja, joiden oletetaan olevan eri skenaarioissa samaa luokkaa. Kuva 20 perustuu vuoden 2022 pitkän tähtäimen suunnitelman yhteydessä ennustettuihin hintoihin, joissa ei oteta kantaa verotuksen muutoksiin tai poliittiseen ohjaukseen. Laskennoissa käytettiin diskonttauskorkona 6,4 prosenttia.

Laitoksille tulee 20–25 vuoden käytön jälkeen merkittävämpi uudistustarve, jossa kustannus on noin 20 % uusinvestoinnista ja 45–50 vuoden kohdalla päälaitteiden uusinta, joka on jonkin verran edullisempi kuin uusinvestointi. Vastaavia arvioita esimerkiksi hajautettuun ylläpitoon kevythybridien osalta ei vielä ole. Pitkän tähtäimen suunnitelman skenaariossa tarvittavia päälaitteiden uusintainvestointeja 2050-luvulta eteenpäin ei ole huomioitu. Skenaarioiden X ja BECCS kannattavuus voi olla tällä perusteella hiukan esitettyä parempi. Tässä merkittävin erottava tekijä tuotantoskenaarioiden välillä on hake- ja pellettilämpökeskuksen päälaitteet.

Käyrä alkaa siis vuodesta 2039 ja skenaariolle lasketuista investointikustannuksista. Lähtöpiste on investoinnin suuruuden verran negatiivisella puolella. BECCS ja X-skenaarioiden investoinneista on vähennetty pitkän tähtäimen suunnitelman kanssa yhtenevät investoinnit, jotta voidaan verrata investointikustannusta

skenaarioiden välillä. Tämän jälkeen skenaarioiden tuotantokustannuksia verrataan pitkän tähtäimen suunnitelman tuotantokustannuksiin. Jos skenaarion tuotantokustannukset ovat edullisemmat kuin pitkän tähtäimen suunnitelmassa, lähestyy käyrä vuosien kuluessa nollaa. Jos käyrä ylittää nollatason, investointi on maksanut itsensä takaisin korkojen kera ja on siis ollut kannattava.





Kuva 20 Diskontattu kumulatiivinen kassavirta 30 vuoden tarkastelujaksolla X- ja BECCS-skenaarioille Tampereen Energian vuonna 2022 ennustetuilla hinnoilla.

Yllä olevasta kuvaajasta nähdään, että käytetyillä hinnoilla ja laskennassa tehdyillä oletuksilla kumpikaan skenaario ei ole kannattava. Korkean päästöoikeuksien hinnan myötä tuotantokustannukset BECCS-skenaariossa ovat matalammat kuin skenaariossa X. Merkittävien investointikustannusten vuoksi BECCS-skenaario ei saavuta positiivista nettohyötyä tarkasteluajana positiivisesta kassavirrasta huolimatta. Mikäli toimintaympäristön

muutokset mahdollistavat nykyistä ennustetta paremman arvontuoton negatiivisille päästöille, lähenee BECCS-skenaario kannattavuutta. Kysymykseen siitä, mikä on paras tapa tuottaa lämpöä seuraavat 50 vuotta, tämä kappale ei pyri eikä pysty vastaamaan. Tarkoituksena on havainnollistaa toimintaympäristön muutosten vaikutusta polttovapaan ja hiilinegatiivisen lämmöntuotannon kilpailukykyyn. BECCS- tai X-skenaarioiden markkinaehtoinen toteutuminen vaatii vielä merkittäviä muutoksia toimintaympäristössä.

Oleellista on kaukolämmön kilpailukyky talokohtaisiin ratkaisuihin nähden investointien jälkeen, koska muuten lopputuloksena on polttoon perustumaton lämmitysjärjestelmä ilman asiakkaita. Vaihtoehtoiset talokohtaiset järjestelmät toimivat samassa toimintaympäristössä.

## 5.7 Skenaario 100 % maalämpö

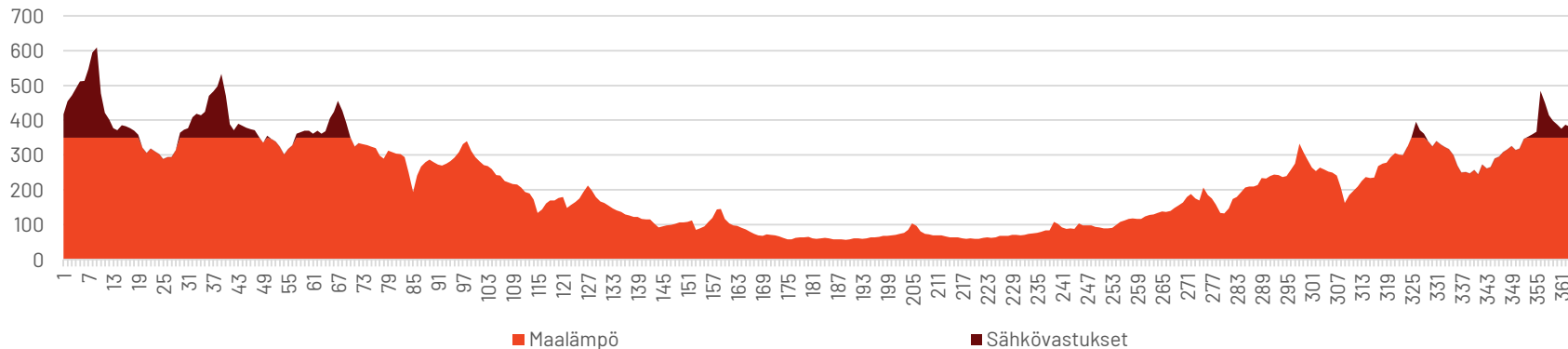
Tämän skenaarion tarkoituksena on havainnollistaa, minkälaisia haasteita syntyisi, jos lämmitysjärjestelmä rakentuisi pelkästään yhden teknologian varaan.

### Skenaarion 100 % maalämpö oletukset

1. Kaukolämpö ei ole kilpailukykyistä maalämpöä vastaan, vaan maalämpö on kustannustehokkain lämmitysratkaisu ja se on saatavilla kaikkiin kohteisiin.

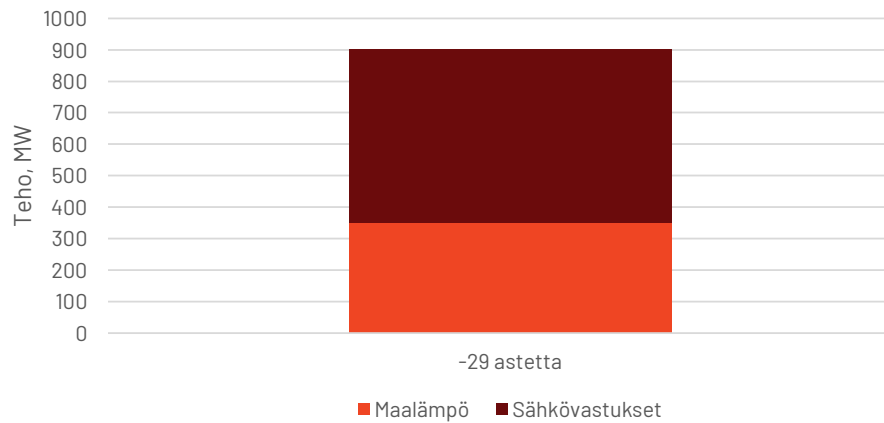
2. Lämmitysjärjestelmän mitoitusteho on 900 MW. Oletetaan, että maalämmön energiaperito on 95 % keskimääräisen vuoden arvioidusta energian kulutuksesta, jolloin maalämmön mitoitusteho on 350 MW. Loput järjestelmän mitoitustehosta katetaan suorilla sähkövastuksilla.

Skenaario 100 % maalämpö



Kuva 21 Tuotantorakenne skenaariossa 100 % maalämpö. Kuvaajassa päiväresoluutio ja tyypillisen vuoden sää. Tampereen mitoitustilassa -29 °C lämmön kysyntä nousee 900 MW tasolle.

### Tuotanto mitoituslämpötilassa



Kuva 22 Lämmöntuotanto skenaariossa 100 % maalämpö mitoituslämpötilassa -29 astetta.

Keskimääräisessä tilanteessa maalämpöjärjestelmällä pystytään tuottamaan suurin osa vuosittaisesta energiasta. Kuitenkin, kun lämpötila laskee lähelle Ilmatieteenlaitoksen määrittämää ja rakennusmääräysten vaatimaa mitoituslämpötilaa, tuotetaan suurin osa lämmöstä suoraan sähkövastuksilla kuvan 22 mukaisesti.



## Skenaarion 100 % maalämpö hyödyt

1. Maalämpö on uusiutuva lämmönlähde ja vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista.
2. Maalämpöpumppu tuottaa lämpöä sähköstä hyvällä hyötysuhteella verrattuna sähkökattiloihin varsinkin silloin, kun lämmitystarve on maltillinen.

## Skenaarion 100 % maalämpö haasteet

1. Lämmityksen mitoitusteho Tampereella on 900 MW. Nykyinen sähköjärjestelmä on mitoitettu 400 MW teholle. Vaikka maalämpö tuottaa energiaa hyvällä hyötysuhteella pitkin lämmityskautta, lämpötilojen ollessa kylmimmässä mitoituslämpötilassa (-29 °C) järjestelmä joutuu turvautumaan pitkälti suoraan sähkölämmitykseen yllä olevan kuvan mukaisesti. Tällöin sähkön tarve on siis nykyinen kulutus, maalämpöpumppujen kuluttama sähkö sekä suorien sähkövastusten kuluttama sähkö (400 MW + 350 MW / 3 + 550 MW = 1067 MW), mikä vaatisi nykyiseen mitoitukseen verrattuna kolminkertaisen sähkön siirtokapasiteetin.
2. Talokohtaiset maalämpöjärjestelmät vaativat huomattavasti enemmän pinta-alaa keskitettyyn lämmöntuotantoon verrattuna. Jos oletetaan, että yhden megawatin tuottamiseen tarvitaan noin 1 hehtaarin verran lämmönkeruuputkistoa, olisi tarvittava pinta-ala lähempänä 400 hehtaaria. Varsinkin kaupungin keskusta-alueilla näin suuren pinta-alan poraamisesta syntyisi ongelmia.

3. Maaperän koostumus vaihtelee alueittain, mikä vaikuttaa maalämmön tehokkuuteen ja siihen onko maalämmön hyödyntäminen ylipäätään mahdollista. Laajamittainen poraaminen rajoittaa kaupunkikehitystä ja toisinpäin.
4. Yhteen teknologiaan perustuvassa lämmitysjärjestelmässä riski polttoaineen (sähkön) hintojen nousulle on suurempi kuin järjestelmässä, missä on mahdollista käyttää useita tuotantomuotoja.
5. Yhteen teknologiaan nojaava lämmitysjärjestelmässä toimitusvarmuus on heikompi kuin järjestelmässä, mikä pystyy tuottamaan lämpöä eri teknologioilla.

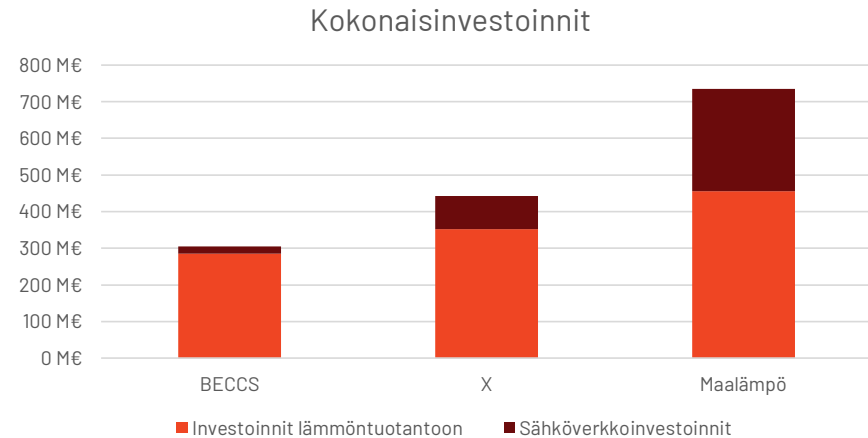


## Kustannukset

Maalämpöinvestointi sisältää investoinnin maalämpöpumppuun, kaivojen porauksen sekä työn. Investointikustannus on kokonaisuudessaan noin 1,3 M€/MW.

Sähkön jakeluverkon valvontamallin mukainen nykykäyttöarvo Tampereella on 190 M€. Mitoitustehon kasvaessa 400 MW:sta 1067 MW:iin tarvitaan investointeja päämuuntajiin, suurjännitteiseen jakeluverkkoon, sähköasemiin, jakelumuuntajiin ja keskijännitekaapeleihin. Näiden sähköverkkoinvestointien kokonaisarvo nousee karkeasti 280 M€ tasolle, eli tarvittavien investointien arvo on suurempi kuin jo olemassa olevan sähköverkon nykykäyttöarvo. Sähkön siirtomaksut riippuvat nykykäyttöarvosta, joten sähkön siirtomaksutkin yli tuplaantuisivat Tampereella.

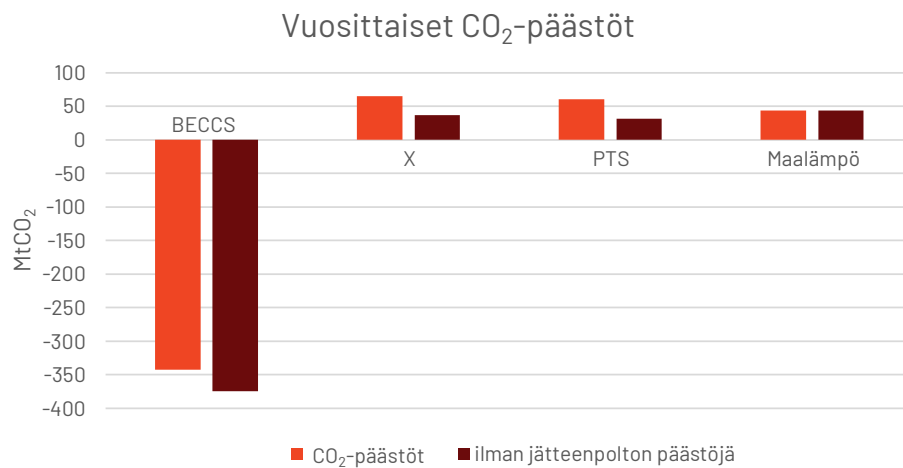
Investointikustannukset lämmöntuotantoon täysin maalämpöön perustuvalla järjestelmällä ovat suuremmat kuin poltton perustumattoman kaukolämpöjärjestelmän skenaarioissa BECCS ja X. Kokonaan maalämpöön perustuvassa lämmitysjärjestelmässä varateho huippupakkasilla perustuu pelkästään suorilla sähkövastuksilla tuotettavaan lämpöön, kun kaukolämpöskenaarioissa varatehona pystytään käyttämään jo olemassa olevia tuotantolaitoksia maltillisilla ylläpitoinvestoinneilla. Varatehon vaatimat investoinnit sähkön siirtoverkkoon nostavat 100 % maalämpöön perustuvan lämmitysjärjestelmän kokonaisinvestoinnit 735 MEUR tasolle. Tässä on



Kuva 23 Kokonaisinvestointikustannukset skenaarioiden 100 % maalämpö, X ja BECCS välillä.

huomioitu vain Tampereen seudulla tehtävät investoinnit maalämpöön ja sähkön jakeluverkkoon. Tässä ei siis ole huomioitu kansalliseen sähköjärjestelmään tarvittavaa huipputuotantoa eikä investointeja kantaverkon siirtotehon kasvattamiseksi. Ilmeinen ratkaisu hyvin harvoin tarvittavaan huipputehoon olisivat fossiiliset varavoimat, mutta varmasti vuosien varrella löytyisi osaratkaisuuja myös jotain fiksumpaa. Siltikin varatehon rakentaminen maksaisi satoja miljoonia vielä kuvaajassa 23 esitetyn päälle.

Maalämpöjärjestelmän päästöt syntyvät sähköntuotannon päästöistä. Pelkästään maalämpöön perustuvassa järjestelmässä sähkönkulutus kasvaa merkittävästi, kun kulutus nousee mitoitusstehon yli ja lämmitys tapahtuu suorilla sähkövastuksilla. Sähkönkulutus maalämpöjärjestelmässä painottuu jaksoihin, jolloin fossiilisen tuotannon osuus on suurimmillaan, joten todellinen päästökerroin lienee suurempi kuin tässä käytetty oletus keskimääräisestä päästökertoimesta 62 g/kWh.



Kuva 24 Hiilidioksidipäästöt eri skenaarioissa (PTS = Tampereen Energian pitkän tähtäimen suunnitelma).





# 6 Johtopäätökset



## Toimiva hiilinegatiivinen yhteiskunta yhdistelee esitettyjen tuotantoskenaarioiden kannattaviksi osoittautuvia investointeja.

Tuotanto pitää sisällään hiilinegatiivisia ja -neutraaleja tuotantomuotoja, jotka auttavat koko Suomen energiajärjestelmän ylläpitoa. Sähköön perustuva lämmitysjärjestelmä ei sovellu pakkasjaksojen huippukulutuksen kattamiseen uusiutuvan sähkön kausiluonteisuuden ja kalliin varavoiman tarpeen takia. Toisaalta sähköistyvät kaukolämpöjärjestelmät mahdollistavat tuulivoiman ylituotannon ja hukkalämpöjen hyödyntämisen.

On oleellista tarkastella energiaratkaisuja kaupunkien lämmittämisen kokoluokassa. Sähkön käytön ympäristöystävällisyys vaihtelee sähköjärjestelmän tuotantotilanteen mukaan, siksi avainasemassa on sähkön kulutuksen joustavuus. Kaukolämpöjärjestelmässä sähkön käytön joustavuuden mahdollistavat tuotantomuotojen monipuolisuus sekä lämpövarastot. Mikäli kaukolämpöjärjestelmä korvattaisiin kaupunkimittakaavassa maalämpöjärjestelmällä, lämmittämisen hintataso nousee sähköverkon lisäinvestointien ja tehonhallinnan kustannuksien vuoksi. Selvityksessä esitettyjen

polttoon perustumattomien vaihtoehtojen heikkous on tukeutuminen sähköjärjestelmään huipputehontarpeen kattamisessa.

Tampereella parhaat menetelmät kaupungin lämmittämässä perustuvat tuntioptimoituun sähkökattilakäyttöön, hukkalämpöjen talteenottoon sekä biogeenisen hiilidioksidin talteenottoon. Sähkökattiloiden vahvuuksia ovat kannattavuus ja saatavuus. Hiilidioksidin talteenotolla on puolestaan suuri päästövähennyspotentiaali, mutta kannattavuus ja saatavuus ovat toistaiseksi osittain epäselviä. Erilaisilla hukkalämmönlähteillä ja lämpöpumpuilla saatavuus, kannattavuus että päästövähennyspotentiaali ovat kohtalaisia.

Edellisen selvityksen kirjoittamisen jälkeen energiakriisi sekä sähkön hinnan yhä rajumpi heilahtelu havainnollistavat lämmityshaastetta ja keskitetyn järjestelmän vahvuuksia. Kaukolämpöjärjestelmät ovat mahdollistaneet nopeat päästövähennykset ja toimitusvarmuuden. Mitä lähemmäs hiilineutraalisuutta siirrytään sitä haastavampaa ja kalliimpaa päästövähennysten toteuttaminen on. Viimeisten hiilidioksiditonni poistamisen haastetta ei ole mahdollista ratkaista suoraviivaisesti sähköön tai maalämpöön perustuen. Hiilidioksidin poisto vaikuttaa lupaavalta teknologialta jäännöspäästöjen poistamiseen. Resurssit on kuitenkin aina kohdistettava vaikuttavimpiin toimiin nettopäästövähennysten näkökulmasta.



# 7 Yhteenveto



## Selvityksemme ensimmäiseen versioon nähden vetytalous, pienydinvoima ja ilmavesilämpöpumput näyttävät etenevän ennakoitua nopeammin.

Tampereella sähkökattilat, lämpövarastot, BECCS ja hukkalämpöjen talteenotto lämpöpumpuilla ovat edenneet ripeästi. Jo päätetyillä investoinneilla Tampereen Energian hiilineutraaliustavoite on toteutumassa yli 90-prosenttisesti.

Tampereen energiajärjestelmässä liikkuu tyypillisenä talvena tehoa noin 1200 MW, josta 30 % sähköverkon kautta ja 70 % kaukolämpöverkon kautta. Suomessa lämmitysverkot tukevat pakkasella voimakkaasti tehon tarvetta, kun taas Euroopassa lämmityksen vaatima lisäteho siirretään kaasuverkon kautta.

Suomen kaukolämpöverkoissa lämmitys ei ole sidottu kaasumaiseen polttoaineeseen, vaan energianlähdettä voidaan muuttaa verrattain kustannustehokkaasti. Tämä on mahdollistanut nopean siirtymän kohti hiilineutraalia lämmöntuotantoa.

Molemmat selvityksen pääskenaariot, polttovapaa skenaario X sekä hiilinegatiivinen skenaario BECCS, vaativat merkittäviä investointeja ja lisäävät kustannuksia nykyisillä tuotantomuodoilla jatkamiseen nähden. Skenaariossa X vuotuisiksi päästöiksi saadaan noin 66 ktCO<sub>2</sub> ja skenaario BECCS toteuttaa puolestaan hiilidioksidin poistoa eli negatiivisia päästöjä noin 344 ktCO<sub>2</sub> vuodessa.

Skenaario X olettaa hukkalämpöjen lisääntymistä sekä kevythybridien käyttöönottoa isossa osassa asuinrakennuksia Tampereella. Lisäksi sähkökattiloiden tuotantokapasiteettia nostetaan 350 MW:iin, mikä käytännössä tuplaa nykyisen sähkön tehontarpeen Tampereella. Tämän skenaarion haasteiksi muodostuu sähköntuotannon ympäristöystävällisyys ja tehon riittävyys kaikkina vuorokauden- ja vuodenaikoina.

Hiilinegatiivinen skenaario BECCS pohjautuu hiilidioksidin talteenottoon. Muuttuva kustannus on BECCS-järjestelmässä korkea, mutta suhteutettuna muihin teknisiin nieluihin mahdollisesti kilpailukykyinen. Sen muita vahvuuksia ovat muun muassa huoltovarmuus ja omavaraisuus. Toimintaympäristö edellyttäneee teknisiä hiilinieluja tulevaisuudessa, mikä tarkoittaisi markkinahintojen nousua teknologian mahdollistavalle tasolle. Kustannus riippuu teknisen toteutuksen yksityiskohdista, biomassan ja hiilidioksidin poiston hinnasta.

BECCS-skenaario on rakenteeltaan monipuolisin ja toimintaympäristön muutoksen mukainen. Se mahdollistaa hiilidioksidia ilmakehästä poistavan lämmitysjärjestelmän toteutuksen; Tampereen Energian negatiivisen päästötaseen ja tarvittaessa koko kaupungin kaikkien sektoreiden jäännöspäästöjen kompensoinnin mukaan lukien liikenne, maankäyttö ja niin edelleen.

Selvityksessä havaitsimme, että maalämpöpohjaiseen kaupungin lämmitysjärjestelmään liittyviä sähkönsiirron kustannuksia BECCS- ja X-skenaarioihin nähden. Lämmityksen sähköistäminen teollisessa mittakaavassa vahvimpia yhteyksiä joustavasti hyödyntäen säästää Tampereen kokoisessa kaupungissa satoja miljoonia euroja verrattuna kuluttajakohtaisiin toteutuksiin.





# 8 Syventävä materiaali







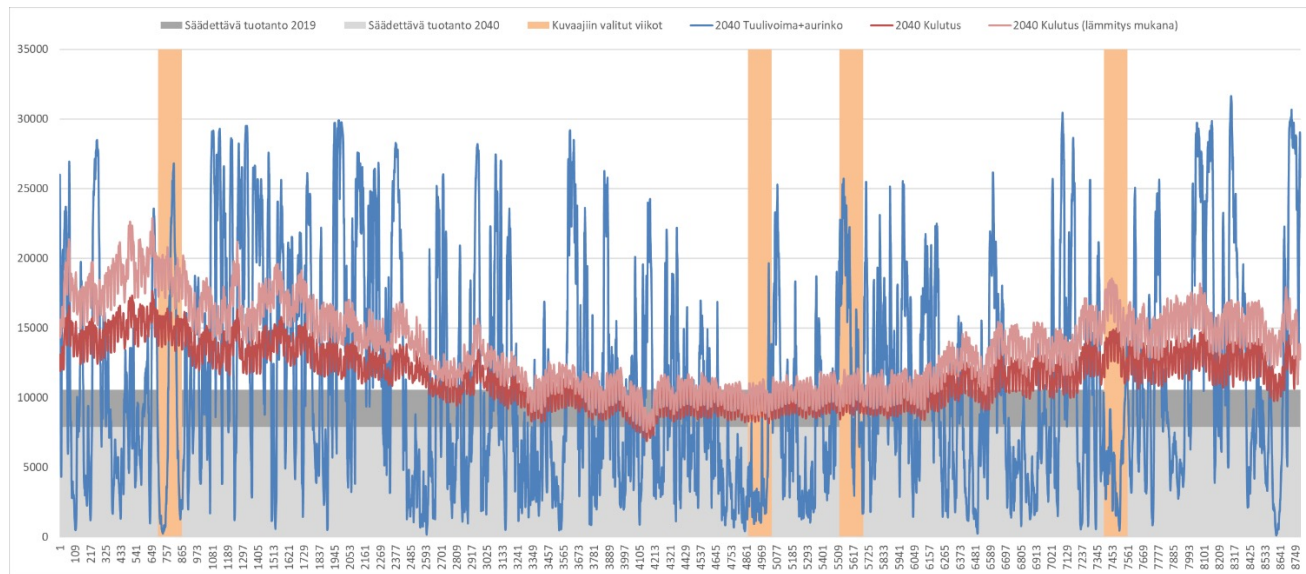
## Syventävä materiaali taustoittaa skenaarioiden oletuksia ja perustelee selvityksessä esitetyjä haasteita lämmöntuotannon sähköistymisessä.

Järjestelmää tarkasteltaessa on tärkeää huomata erot sähkömarkkinoiden ja lämpömarkkinoiden välillä, erottaa keskihinta toteutuneesta tuntihinnasta ja hahmottaa systeemin erilaiset tarpeet teholle ja energialle.

Lisäksi tarkastellaan muutamien muiden kaukolämpökaupunkien suunnitelmia ja tavoitteita, jotka koskevat polttoon perustumatonta tai hiilinegatiivista lämmöntuotantoa.

### 8.1 Sähköjärjestelmä vuonna 2040

Lämmityksen sähköistyminen on haasteellista sähköistyneessä yhteiskunnassa, jossa tuotanto perustuu uusiutuvaan tuuli- ja aurinkovoimaan. Sektorikytkentä ja heilahtelevat hinnat ovat tulevaisuuden energiajärjestelmän ominaisuus. Lämmitysenergian siirron pysyminen kaukolämpöverkossa helpottaisi tilanteessa huomattavasti ja auttaisi päästövähennystoimien suuntaamisessa kustannustehokkaammin.



Kuva 25 Suomen sähkötase vuonna 2040.

Kaukolämmön siirtyminen sähkönkulutukseksi vaikuttaisi merkittävästi koko Suomen sähköverkkoon ja markkinoihin. Haasteita tuottaisi etenkin skenaario "X miinus", jossa keskitetty lämmöntuotanto on muuttunut hajautetuksi sähkön kulutukseksi, eivätkä lämpövarastot tasaa kulutuksen huippuja lainkaan.

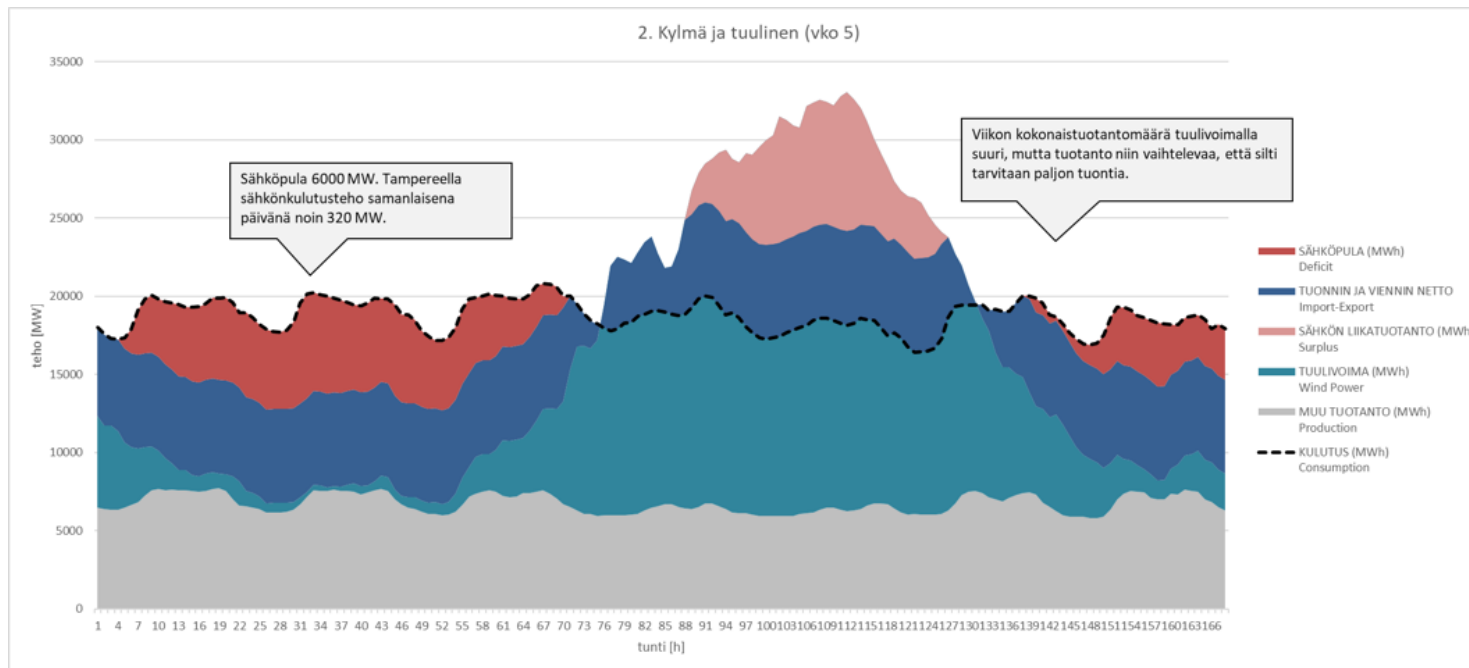
Yllä olevassa kuvassa on sinisellä tuulivoiman toteutunut tehoprofiili vuoden 2019 mukaisesti skaalattuna 100 TWh vuosituotantoon. Tämä tuulivoiman energiamäärä on yleisesti visioissa käytetyllä tasolla, jopa suurempia ennusteita on esitetty. Suomen sähkönkulutus vuonna 2019 on punaisella. Vaaleammalla punaisella käyrällä on sähkönkulutukseen

lisätty kaukolämmityksen osittaista sähköistymistä. Vastaavasti vakaata CHP-sähköntuotantoa on pienennetty puoleen (tummanharmaa alue).

Oletus on, että tuulivoiman moninkertaistaminen laskee sähkön hintaa ja poistaa kannattamattomaksi tulevaa muuta uusiutuvaa sähköntuotantoa markkinoilta. Tämä markkinaefekti on ilmeinen kuvassa näkyvän ylituotannon kautta. Sähkön ylituotantoa on aina sinisen käyrän mennessä vaaleanpunaisen käyrän yli. Ylituotanto heikentää luonnollisesti myös tuulivoimahankkeiden käyttötunteja ja kannattavuutta.

Seuraavissa viikkotason kuvissa sähköpula alkaa, kun tummansinisenä alueena esitetty tuontikapasiteetti loppuu. Laskennassa on oletettu, että naapurimaissa on aina avoin toimitus siirtolinjan maksimiin (6000 MW) saakka. Tampereella sähkönkulutusteho samanlaisena päivänä on noin 300 MW. Suomen suurimman tuotantoyksikön Olkiluoto 3:n sähköteho on 1600 MW. Fingridillä on varakapasiteettina noin 1000 MW kaasulauhdeturbiineja tehopulan varalta.

Kuvassa näkyy merkittävästi viikon sisäisesti vaihtelevaa tuotantoa. Alkuviiikosta ensin sähköpula 6000 MW ja sitten liikatuotantoa saman verran. Sähköpulaan vastaaminen vaatisi 6000 MW uuden siirtolinjan ja oletuksen, ettei naapurimaissa olisi vastaavaa tilannetta. Vaihtoehtoisesti tarvittaisiin Fingridin kaasuturbiinikapasiteetin kuusinkertaistamista tai kiertävät sähkökatkot.

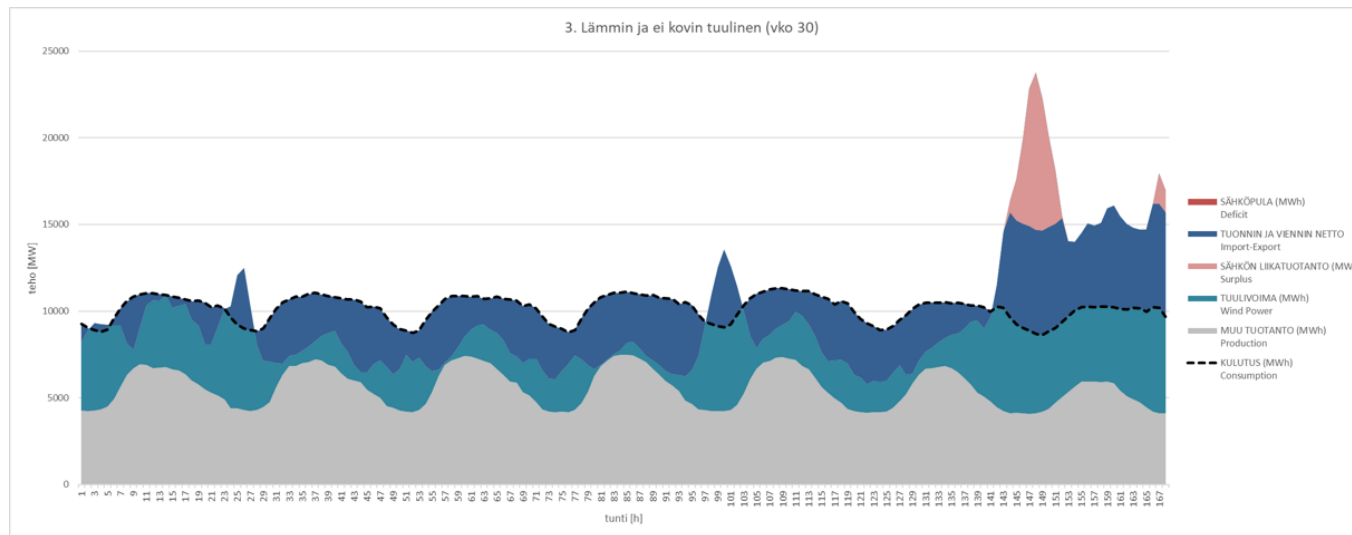


Kuva 26 Viikko 5, vaihteleva sähköpulaviikko.

Heinäkuussa (kuva 27) turvaututaan sähkön tuontiin valtavasta kotimaisesta tuotantokapasiteetista huolimatta. Viikolla oli kuitenkin hetkellinen, noin 14 000 MW kysynnän ylittävä tuotantopiikki.

Kuvista voi päätellä, että mikäli tilanne on mahdollista hallita siirtolinjoilla, kaasuturbiineilla, vedyntuotannolla yms, vaadittavat uudet rakenteet ovat valtavan suuria. Niiden kustannusten hallinta lienee mahdollista tukiin pohjautuen. Vaikuttaa epätodennäköiseltä, että sähkö olisi tällaisessa järjestelmässä halpaa ja resurssit kaikilta osin tehokkaimmin suunnattu taistelussa ilmastonmuutosta vastaan. Varsinkin kaasuturbiinikapasiteetin lisätarve heikentää skenaarion järkevyyttä.

Lämmityksen siirtyminen sähkön kulutukseksi pahentaa kysyntäpiikkejä. Tässä tilanteessa kaasuturbiinilla tullaan ratkaisemaan kulutushuiput, koska käyttötunteja on niukasti ja kaasun käyttövalmius ja toimintavarmuus on vaihtoehtoja parempi. Biomassalla on orgaanisen koostumuksensa takia lyhyt säilöntäaika ja sitä onkin haastavaa varastoida satunnaista käyttöä varten. Lisäksi kaasuturbiinit ovat nopeita käynnistää ja helppoja säätää sähköntarpeen mukaisesti. Kantaverkkoyhtiöt käyttävät kaasuturbiineja juuri tähän tarkoitukseen.



Kuva 27 Viikko 30, vähäinen kulutus ja tuulisuus.



Säätövoimaa tarvitaan ja tuntitasolla järjestelmä näyttää hyvin haastavalta. Tuulivoimaa on mahdollista lisätä valtavasti ja sillä voi tuottaa ison osan Suomen sähköstä, mutta se vaatii rinnalleen säätökapasiteettia. Mitä pidemmälle kaukolämmön sähköistämisen polulla edettäisiin, sitä enemmän rajallisia resursseja, joita voitaisiin käyttää tehokkaiisiin ilmastoprojekteihin toisaalta, tulisi hukattua pysäytettyyn tuulivoimaan, uusiin kaasulauhdevoimalaitoksiin, kannattamattomiin varastointeihin sekä isoihin siirtolinjoihin.

## 8.2 Sähkön päästöt

Kaukolämmöntuotannon siirtäminen talokohtaiseksi sähkönkulutukseksi ei merkitse päästöalennemia systeemitasolla. Kaukolämmöntuotannon hiilineutraalisuustavoite on realistinen ja edennyt odotusten mukaisesti. Sähkö ei ole päästötöntä ja se on lämmityskäytössä saastuttavampaa kuin tasaisessa käytössä. Sähkönkäyttöä pyritään puhdistamaan alkuperätakuilla, joita selvityksessä on tarkasteltu kriittisesti.

Suomessa sähköön sovelletaan eurooppalaista alkuperätakuujärjestelmää. Järjestelmään kuuluvan päästöttömän laitoksen tuotantoa seurataan vuositasolla ja vuosituotannon voi myydä kuluttajalle päästöttömänä. Todellisuudessa kysyntä

ja tuulivoiman tuotanto vaihtelevat toisistaan riippumatta. Järjestelmätasolla on hetkiä, erityisesti kovilla pakkasilla, jolloin vaihtelevaa päästötöntä tuotantoa on vähän, mutta sähkön kysyntä on silti korkea. Tätä vajetta paikataan polttamalla fossiilisia polttoaineita.

Alkuperätakuujärjestelmä ei vähennä sähkön huipputuotannon päästöjä, vaan jakaa päästöt uudelleen. Epätäydelliseen järjestelmään on päädytty tuntitason seurannan haastavuuden vuoksi. Alkuperätakuu helpottaa investointeja uusiutuvaan sähköntuotantoon, koska se luo markkinahinnan uusiutuvan sähköntuotannon lisäarvolle. Tämä kuitenkin aiheuttaa mielikuvien kautta epätasaisen kilpailutilanteen alkuperätakuulla päästöttömän sähkölämmityksen ja muiden vaihtoehtojen välillä.

Alkuperätakuun nettopäästövaikutus ei ole hyvä, koska se on energiapohjainen järjestelmä, ja fossiilisen päästön aiheuttaa tehon tarve. Ongelma pahenee tuulivoiman lisääntyessä. Sähköä tuotetaan aina hetkellisesti tilanteen edellyttämällä koneistolla. Iso asiakas voi sekä aiheuttaa fossiilisen päästön, kuluttamalla sähköä kysyntäpiikin aikaan, että ostaa alkuperätakuut, jolloin syntynyt tuotantopäästö jakautuu muille verkon käyttäjille, vaikka heidän sähkönkulutuksensa mukailisi täysin tuulivoiman tuotantoa ja olisi näin teknisesti päästötöntä.

Keskimääräisen päästökertoimen käyttäminen on samalla tavalla yksinkertaistus todellisuudesta. Samaan keskiarvoon voi päästä monella tavalla. Esimerkiksi päästöjä voi syntyä tasaisesti vähän tai hetkellisesti paljon. Jälkimmäinen tilanne painottunee tulevaisuudessa. Me emme kuitenkaan pysty arvioimaan tulevaisuuden päästökerrointa tuntitasolla. Tässä käytämme sähkölämmitykselle päästökerrointa 30 g/kWh, joka on hyvin alhainen kerroin, eikä käytännössä muuta johtopäätöksiä nollaan verrattuna. Sen tarkoitus on lähinnä pitää mielessä, ettei nolla sähkön päästökertoimenä ole pätevä oletus. Nykyisen alkuperätakuujärjestelmän olemassaolo ei tee tästä nollaoletuksesta oikeampaa.



### 8.3 Vertailu muihin kaukolämpökaupunkeihin

Muissa pohjoismaisissa kaukolämpöä tuottavissa kaupungeissa käytetyt teknologiat ovat hyvin samoja kuin Tampereen suunnitelmissa. Suurimmat erot esimerkiksi Tukholmaan ovat sijainnista riippuvaisia. Tampere ei ole rannikolla, mikä tekee meriveden hyödyntämisestä mahdotonta ja talteen otetun hiilidioksidin varastoinnista kalliimpaa. Lisäksi kaukolämmön tarve on hieman eteläisemmissä kaupungeissa vähemmän piikikästä.

Ruotsissa on ollut Suomea ja Tanskaa alhaisempi konesalien sähkövero, minkä takia Tukholman alueelle on muodostunut paljon suuria datakeskuksia. Ylipäätään sähkön kokonaishinta on ollut Ruotsissa ja Norjassa Suomea alhaisempi, mikä on ollut osasy sähkөөn perustuvien lämmöntuotannon investointien nopeudelle. Myös CCS-projektit ovat edenneet Suomea nopeammin poliittisen päätöksenteon, kuten valtion rahoituksen, ansiosta.

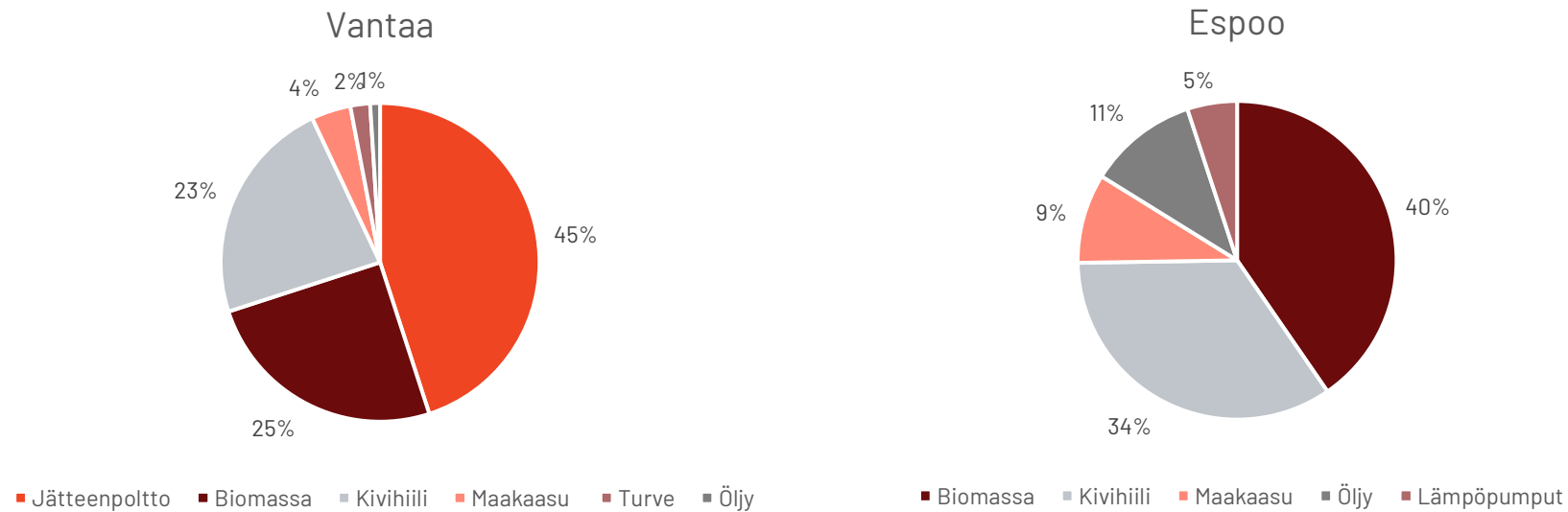
Suomessa kaukolämpö kattaa ison osan kaupunkien lämmöntarpeesta. Suurin osa tämänhetkisistä kaukolämpöjärjestelmistä pohjautuu biomassaan, mutta suunnitelmissa näkyy myös lämpöpumppuja, kaukolämpöakkuja ja sähkökattiloita. Suomen suurin haaste tulevaisuuden

hiilinegatiivisessa tuotannossa tulee olemaan lämmityskauden erittäin suuri kulutus. Kesällä on helppo lämmittää polttoon perustumattomilla ja hiilinegatiivisilla teknologioilla, mutta iso osa näistä teknologioista ei ole talviaikaan yhtä yksiselitteisiä. Suomessa käytännön toimenpiteet kaukolämpökaupungeissa ovat tällä hetkellä lähinnä siirtymä turpeen käytöstä puuhun, jätteenpoltto, kaukolämpöakut ja sähkökattilat.

### 8.3.1 Espoo ja Vantaa

Suomalaisista kaukolämpökaupungeista Tampereen kannalta kiinnostavat vertailukohteet ovat Espoo ja Vantaa, sillä niissä kaukolämmön kulutus on samaa kokoluokkaa kuin Tampereella. Vuonna 2021 kaukolämmöntuotanto oli Vantaalla 1,8 TWh, Espoossa 3,1 TWh ja Tampereella 2,4 TWh.

Vantaalla energiantuotannon polttoainejakauma vuonna 2022 oli 45 % jäte, 25 % biomassa, 23 % kivihiili, 4 % maakaasu, 2 % turve ja 1 % öljy. Espoossa jakauma oli puolestaan 40 % biomassa, 34 % kivihiili, 11 % öljy, 9 % maakaasu ja 5 % lämpöpumput. Tuotantojakaumat visualisoitu kuvaajissa alla.



Kuva 28 Vantaan ja Espoon tuotantojakaumat vuonna 2022.



Molemmissa kaupungeissa on tavoitteena hiilineutraali kaukolämmöntuotanto vuoteen 2030 mennessä. Espoossa toimenpiteet hiilineutraaliustavoitteen saavuttamiseksi koostuvat erilaisista sähköpohjaisista ratkaisuista, kuten lämpöpumpuista ja sähkökattiloista, sekä biopohjaisista ratkaisuista huippulämmöntuotantoon. Isoin yksittäinen investointi on Microsoftin Espooseen tuleva datakeskus, jonka hukkalämmön Fortum ottaa talteen. Tämä yksittäinen datakeskus kattaa jopa 40 % alueen kaukolämmön tarpeesta. Microsoftin datasalin saaminen juuri Espooseen on onnenpotku paikalliselle kaukolämmölle, sillä muualla Suomessa ei ole missään kaukolämpökaupungissa saatavilla yhtä merkittävästi hukkalämpöjä ympäri vuoden yhdestä kohteesta ja Espoon kaukolämmöstä vuonna 2021 tuotettiin yli 60 % fossiilisilla. Datasalin päästövaikutus on siis merkittävä.

Datasalin hukkalämpöjen lisäksi Espooseen on tulossa teollisen kokoluokan ilma-vesilämpöpumppuja sekä sähkökattiloita. IVLP-laitoksia on tulossa suunnitelmien mukaan 30 MW. Sähkökattilatehoa on tulossa nyt aluksi 100 MW, mutta esitetyissä suunnitelmissa on sähkökattiloiden teho tätäkin enemmän. Fortumin ensimmäisissä sähkökattiloissa pilotoidaan dynaamista sähköliittymää eli Caruna voi rajoittaa tarvittaessa sähkökattilan sähkönkulutusta verkossa vallitsevan tilanteen mukaan.

Bioperäistä tuotantoa Espoossa on Kivenlahden biolämpölaitoksessa 58 MW sekä Vermon bioöljylaitoksessa 50 MW. Vuoteen 2030

mennessä Suomenojan kaasuyksiköt rajoitetaan suunnitelmien mukaan vain huippukäyttöön.

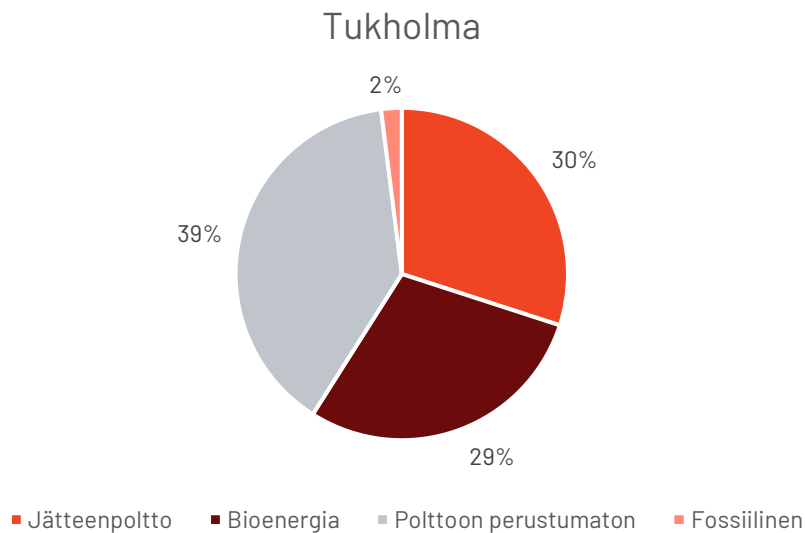
Jos Espoossa on panostettu erityisesti lämpöpumppeihin ja hukkalämpöihin, niin Vantaalla katse on kääntynyt enemmän jätteiden energiahyötykäyttöön. Suomen suurin yhdyskuntajätteen polttolaitos sekä myös metsäteollisuuden sivutuotteiden polttaminen takaavat sen, että Vantaan lämmöntuotanto tulee pitkään perustumaan polttamiseen, joten Vantaalla on lähdetty edistämään myös hiilidioksidin talteenottoa. Vuonna 2022 Vantaan Energia sai Business Finlandin myöntämän tuen jätteenpolttolaitoksen savukaasujen talteenoton ja hyötykäytön tutkimus- ja kehitystyöhön.

Vantaalla kiertotaloutta edistetään mm. investoinneilla aktiivihiiililaitokseen sekä korkealämpötilalaitokseen. Aktiivihiiililaitoksessa kierrätyspuuta jalostetaan aktiivihiiileksi tuottaen samalla hukkalämpöä kaukolämpöverkkoon. Laitoksen on määrä valmistua vuoteen 2027 mennessä. Korkealämpötilalaitos puolestaan polttaa vaaralliseksi luokiteltua jätettä korkeassa lämpötilassa. Tämän laitoksen on määrä valmistua vuonna 2025.

Vantaalle aiotaan rakentaa Kehä III:n 90 GWh lämpövarasto. Vuonna 2022 hankkeen ympäristövaikutusten arviointimenettely saatiin valmiiksi ja nyt hanke on suunnitteluvaiheessa. Alustavan aikataulun mukaan varaston rakentaminen ajoittuisi vuosille 2022–2026. Hankkeelle on myönnetty TEM:Itä 19 MEUR tukiraha vuonna 2021.

### 8.3.2 Tukholma

Tukholmassa ensisijaiset tuotantomuodot ovat biomassa ja jätteenpoltto, mutta merkittävä osa vuoden kaukolämmöntuotannosta tulee myös jäteveden hukkalämmöistä, merivesipumpuista sekä suorasta sähköstä. Vuonna 2022 Tukholman kaukolämmöntuotanto oli 8309 GWh. Tästä 30 % tuotettiin jätteenpoltolla, 29 % bioenergialla (kiinteät polttoaineet sekä bioöljy), 2 % fossiilisilla polttoaineilla ja loput eli 39 % erilaisilla lämmöntalteenotoilla ja sähköllä (sähkökattilat, merivesi, jätevesi, datasalit).



Kuva 29 Stockholm Exergin kaukolämmöntuotanto vuonna 2022.

Tukholman tavoite on olla ilmastopositiivinen vuonna 2025 ja tähän tähdätään investoimalla muun muassa BECCS:ään. Hiilivoimalaitos Värtaverket muutettiin biovoimalaitokseksi vuonna 2020 ja sen yhteyteen on lisätty hiilidioksidin talteenotto, jonka käyttöönotto on suunniteltu vuodelle 2024. Laitos on saanut 180 M€ EU:n innovaatorahaston tukea sekä merkittävästi myös valtion rahoitusta. Tukholman BECCS:n tilannetta on avattu tarkemmin kappaleessa 4.

Investointeja hukkalämpöjen talteenottoon on lisännyt alueella käyttöön otettu "Open District Heating" -tuote. Siinä ostetaan taloyhtiöiltä, datakeskuksilta, jäähalleilta tai keneltä vain ylijäämälämpöä. Tukholman tavoite on saada vuonna 2040 10 % kaukolämmöstä tätä kautta. Hukkalämpöjä on Tukholmaan tullut ja tulossa myös lisää mm. biohiilituotannon kasvun kautta.

#### Tukholmassa käytössä olevat polttovapaat teknologiat ovat

- Jäteveden lämpö. Seitsemän lämpöpumpua, yhteensä 225 MW (1200 GWh) lämpötehoa. Laitoksen kyljessä on myös kaksi bioöljykattilaa ja kaksi sähkökattilaa.
- Merilämpö Värtaverket-voimalaitoksen yhteydessä, teho 180 MW.
- Datakeskusten lämpö, vuonna 2021 teho oli noin 30 MW.
- Arlandan lentokentällä on suurin käytössä oleva pohjavesivarantovarasto (Aquifer Thermal Energy Storage, ATES) 10 MW / 20 GWh.



### 8.3.3 Oslo ja Kööpenhamina

Oslossa kaukolämpö kattaa vain 20 % kaupungin kokonaislämmöntarpeesta. Yli puolet taloista lämpenee suoralla sähköllä ja 17 % öljyllä. Kaukolämmön tuotannosta suurin osa tulee jätteenpoltosta ja melkein kaikki loput sähkökattiloista sekä bioöljykattiloista.

Norjassa on lähdetty edistämään hiilidioksidin talteenottoa valtiovetoisesti. Norjan valtion rahoittama ”Longship”-projekti edistää hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin kehitystä. Osana tätä projektia on valtuutettu Northern Lights -konsortio vastaamaan hiilidioksidin kuljetuksesta ja varastoinnista Norjan rannikon vanhoihin kaasu- ja öljyesiintymiin. Norjassa jo pitkälle edennyt hiilidioksidin talteenottolaitoksen käyttöönotto Klemetsrudin jätteenpolttolaitoksessa keskeytettiin vuoden 2023 alussa valtion rahoituksen loputtua kesken. Tällä hetkellä Norjan CCS-projektit keskittyvät juuri hiilidioksidi-infrastruktuurin kehitykseen.

Yksi Northern Lightsin uusimmista kumppaneista tulee Tanskasta. Tanskalainen energiayhtiö Ørsted A/S on toukokuussa 2023 allekirjoittanut sopimuksen 430 000 hiilidioksiditonin kuljetuksesta ja varastoinnista. Yhtiö asentaa hiilidioksidin talteenottolaitteiston kahteen bioenergialaitokseensa, jotka ovat Asnæs ja Avedøre.

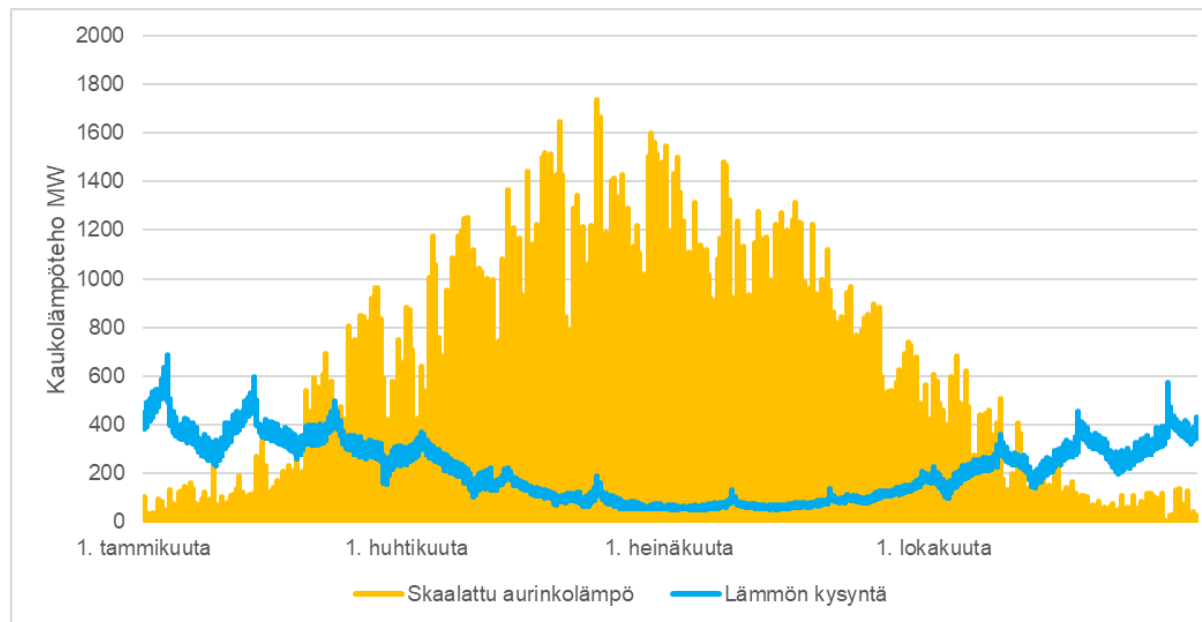
Tanskassa noin 65 % lämmöntarpeesta toimitetaan kaukolämpöverkon kautta. Kööpenhaminassa tämä prosentti on jopa yli 95 %. Kööpenhaminan kaukolämmöntuotannosta nykyisin suurin osa tuotetaan bioenergialla sekä jätteenpoltolla. Huipputuotannossa hyödynnetään lisäksi maakaasua, öljyä ja kivihiiltä. Kööpenhaminassa käyttöön otettu polttoon perustumaton lämmöntuotanto on tällä hetkellä hukkalämmön talteenottoa (pektiinilaitos 5 MW, minkkitarha 1 MW ja jäteveden lämpö 5 MW), mutta kaupungilla on suunnitelmissa lisätä geolämpöä, lämpöpumppuja ja sähkökattilat tuotantoa tulevana vuosina. Muualla Tanskassa on muihin Pohjoismaihin verrattuna isoja aurinkolämpökeräinpeltoja, joissa otetaan lämpöä talteen ja varastoidaan lämpövarastoihin.

## 8.4 Lisäskenaario 1, Aurinkolämpö

Alla on havainnollistettu miltä näyttäisi, jos koko järjestelmä toimisi 100 % aurinkolämmöllä ja lämpövarastolla. Aurinkolämmön profiili on otettu aurinkosähkön tuotannosta 2022. Tarvitaan noin 1800 MW aurinkolämmön tuotantoa ja 1200 GWh energiavarastoja, jos oletetaan, että häviöitä ei ole. Häviöiden huomioimiseksi näitä kokoja pitäisi kasvattaa vielä noin 30 %.

Vantaan Energian suunnittelema maailman suurin lämpövarasto on kooltaan 90 GWh. Näitä tarvittaisiin siis häviöt huomioiden noin 17 kappaletta, mikä maksaisi arviolta 1,7 miljardia euroa. Tähän päälle tulisi tietysti vielä aurinkolämpöjärjestelmien hinta, mikä olisi arviolta 0,8 miljardia. Yhteensä investointi olisi siis noin 2,5 miljardia.

Tämä esimerkki ei ole käyttökelpoinen kokonaisuus, eikä sen ole tarkoitus demonstroida parasta tapaa hyödyntää aurinkolämpöä. Tarkoituksena on visualisoida aurinkolämmön käänteistä saatavuutta tarpeeseen nähden, ja sitä, kuinka kallista tämän ongelman ratkaiseminen varastoilla olisi.

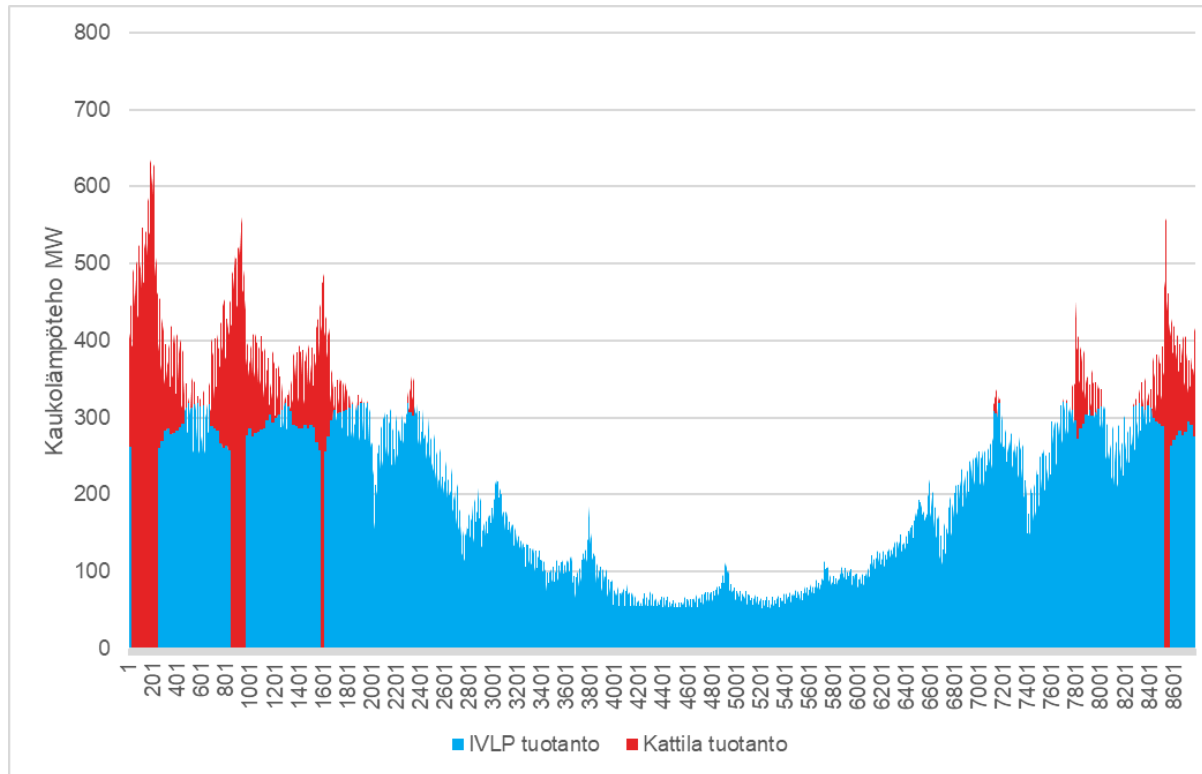


Kuva 30 Aurinkolämpöjärjestelmä, esimerkki.

## 8.5 Lisäskenaario 2, Ilma-vesilämpöpumppu

Alla on liioitellulla esimerkillä havainnollistettu, miltä näyttäisi tuotanto järjestelmässä, jossa on ainoastaan ilma-vesilämpöpumppu ja lämpökeskus. Tämä lämpöpumpun mitoitus pyrkii toimimaan esimerkkinä sitä, miten ilma-vesilämpöpumput kaukolämpöverkossa

suurin piirtein kannattaa mitoittaa. Järjestelmä on mitoitettu niin, että lämpöpumppu tuottaa kaiken lämmön nollassa asteessa. Kun sää kylmenee, ilmasta saadaan vähemmän lämpöä talteen, kun lämpötilaero lämmönvaihtimissa pienenee. Esimerkissä ilma-vesilämpöpumppu on mitoitettu niin, että se lakkaa toimimasta -8 C lämpötilassa.



Kuva 31 Ilma-vesilämpöpumppujärjestelmä, esimerkki.



Esimerkin järjestelmässä varmasti investoitaisiin enemmän lämpöpumppuun, jotta laitos toimisi kylmemmillä pakkasilla. Kylmimmillä pakkasilla laitos ei kuitenkaan toimi, vaikka tehtäisiin mitä, joten 100 % varateho pitää hankkia joka tapauksessa. Kuvaajasta voidaan nähdä, että jos lämmitysverkon ongelmana on lämmittää kesällä ja välikaudella päästöttömästi, ilma-vesilämpöpumpusta voidaan saada hyvin skaalaavaa lämmöntuotantoa. Se on myös varsin edullista.





## 9 Käytettyjä lyhenteitä





## 9 Käytettyjä lyhenteitä

<b>BECCS</b>	bioenergian hiilidioksidin talteenotto (Bio Energy Carbon Capture and Storage)
<b>CCS</b>	hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (Carbon Capture and Storage)
<b>CCU</b>	hiilidioksidin talteenotto ja käyttö (Carbon Capture and Utilisation)
<b>CHP</b>	sähkön ja lämmön yhteistuotanto (Combined Heat and Power)
<b>COP</b>	hyötysuhde (Coefficient of Performance)
<b>IPCC</b>	Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli (Intergovernmental Panel on Climate Change)
<b>IVLP</b>	ilma-vesilämpöpumppu
<b>NSL3</b>	Naistenlahti 3 -biovoimalaitos
<b>PILP</b>	poistoilmalämpöpumppu
<b>PTS</b>	pitkän tähtäimen suunnitelma
<b>SMR</b>	pieni modulaarinen ydinreaktori
<b>TAVO</b>	Tammervoiman hyötyvoimalaitos
<b>TEM</b>	Työ- ja elinkeinoministeriö