

Vedyn hyödyntämismahdollisuudet osana ruokaketjua

”Vetytalouden mahdollisuudet ruokaketjussa -
selvityshanke (VEP)” Raportti TP2

Päiväys 08.08.2024



**Euroopan unionin
osarahoittama**



ETELÄ-POHJANMAAN LIITTO
Regional Council of South Ostrobothnia



Tämä raportti on laadittu osana Vetytalouden mahdollisuudet ruokaketjussa –hanketta (VEP). Hanketta ovat rahoittaneet Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR), Etelä-Pohjanmaan liitto, Etelä-Pohjanmaan korkeakoulusäätiö, Seinäjoen ammattikorkeakoulu, Vaasan yliopisto ja Tampereen korkeakoulusäätiö sr.

Raportin laati:

Perttu Palkia

Valtteri Manninen

ISBN 978-952-7515-54-9



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Sisällys

Sisällys	3
Lyhenteet	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo	5
1 Johdanto	6
2 Vihreän vedyn tuotantomahdollisuudet Etelä-Pohjanmaalla	8
3 Sähkö- ja lämmitysenergiantarpeen nykytila ja kehitys	8
3.1 Typpilannoitetarpeen nykytila ja kehitys	9
3.2 Vihreä vety lannoitetuotannossa	10
3.3 Vihreä vety sähkön tuotannossa	11
3.4 Vihreän vedyn tuotantopotentiaali Etelä-Pohjanmaalla	13
4 Vihreän vedyn käyttöönoton ympäristövaikutukset	17
4.1 Tavoitteet ja soveltamisala	18
4.2 Inventaarioanalyysi	26
4.3 Vaikutustenarviointi	26
4.4 Tulosten tulkinta	28
5 Vedyntuotannon ilmastovaikutusten vähennyspotentiaali	35
6 Johtopäätökset	38
7 Yhteenveto	40
Lähteet	41
Liitteet	44

LYHENTEET

a	Vuosi
EF-score	Environmental Footprint-score
GWh	Gigawattitunti
kWh	Kilowattitunti
LCA	Life Cycle Assessment
MWh	Megawattitunti
PEM	Proton Exchange Membrane
SMR	Steam Methane Reforming
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
ρ	Tiheys
η	Hyötysuhde

KUVA-, KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuvio 1. Maksimaalinen sähköntuotanto eri toteumaskenaarioissa. (Spoof-Tuomi, 2024b, ss. 23, 34)	15
Kuvio 2. Elektrolyysereiden laskennalliset kapasiteetit tasaisella tuotannolla eri skenaarioissa. CC BY-ND	15
Kuvio 3. Tuotejärjestelmä 1. Energiajärjestelmän nykytila. CC BY-ND	19
Kuvio 4. Tuotejärjestelmä 2, vihreää vetyä hyödyntävä energiajärjestelmä. CC BY-ND	20
Kuvio 5. Tuotejärjestelmä 3, Ammoniakin tuotanto maakaasusta. CC BY-ND	21
Kuvio 6. Tuotejärjestelmä 4, Vihreää vetyä hyödyntävä ammoniakin tuotanto. CC BY-ND	22
Kuvio 7. Kaukolämmön tuotannon polttoainejakauma gigawattitunteina Etelä-Pohjanmaalla vuonna 2022. (Energiateollisuus, 2022a).....	24
Kuvio 8. LCIA-analyysin tulokset energiaskenaarioissa. Tulokset kuvattu painotettuina. CC BY-ND	30
Kuvio 9. LCIA-analyysin tulokset ammoniakkiskenaarioissa. Tulokset kuvattu painotettuina. CC BY-ND	32
Taulukko 1. Maa- ja puutarhatalouden energiankulutuksen jakauma Etelä-Pohjanmaalla 2020. (Tilastokeskus, 2020).....	9
Taulukko 2. Sähköntuotannon korvaajana käytettävän vedyn laskennassa käytetyt lähtötiedot. CC BY-ND	11
Taulukko 3. Etelä-Pohjanmaan sähkön tarpeen vedyllä kattamiseen liittyvät tulokset. CC BY-ND	13
Taulukko 4. Elinkaarimallinnuksessa käytetyt tiedot koosteena. CC BY-ND.....	23
Taulukko 5. Käytettävät vaikutusluokat, menetelmät ja painotuskertoimet. (Sala ym., 2018, s. 38).....	25
Taulukko 6. Tarkat LCIA-tulokset energiaskenaariosta 1. CC BY-ND	27
Taulukko 7. Energia- ja ammoniakkiskenaarioiden LCIA tulokset. CC BY-ND	28
Taulukko 8. Herkkyyshanalyysin tulokset. CC BY-ND	34
Taulukko 9. Typpilannoitteiden ja energiantarpeet Etelä-Pohjanmaalla. CC BY-ND.....	36
Taulukko 10. Ilmastovaikutusten vähennyspotentiaali koko tarpeelle. CC BY-ND	36
Taulukko 11. Vähennyspotentiaaliosuus sektorin kokonaispäästöistä eri skenaarioissa. CC BY-ND	37
Taulukko 12. Yhden vetykilon tuottama ilmastovaikutusten vähennyspotentiaali eri skenaarioissa. CC BY-ND	37

1 JOHDANTO

Monipuolisena alkuaineena vetyä voidaan käyttää monissa eri käyttötarkoituksissa energian kantajana, typpilannoitteiden raaka-aineena sekä esimerkiksi terästeollisuudessa. Vetyä käytetäänkin tänä päivänä esimerkiksi ammoniakkin valmistukseen, johon tarvittavaa vetyä tuotetaan pääasiassa maakaasusta. Maakaasuun perustuva ammoniakkin tuotanto onkin merkittävä globaali kasvihuonekaasujen lähde (International Energy Agency, 2021, s. 9). Vetyä voidaan kuitenkin tuottaa fossiilisten polttoaineiden sijasta sähköenergian ja veden avulla erilaisilla elektrolyysiprosesseilla, jolloin vedyn ilmastovaikutukset vähenevät merkittävästi. Vedyllä nähdään muutoinkin potentiaalia ilmastonmuutoksen hillitsemisessä, sillä nykyisten vedyn käyttökohteiden lisäksi vetytaloutta voitaisiin laajentaa uusille sektoreille. Uusiutuvaa vetyä voitaisiin tuottaa myös paikallisemmin, joten sillä voi olla huoltovarmuuden kannalta merkittäviä mahdollisuuksia.

Vetytalouden mahdollisuudet ruokaketjussa -selvityshankkeessa on tarkoitus tutkia vihreän vedyn käytön mahdollisuuksia ruokaketjun kannalta. Tässä raportissa selvitetään hankkeessa aiemmin tehdyn tuuli- ja aurinkovoimapotentiaali selvityksen T1.2 pohjalta, onko Etelä-Pohjanmaalla mahdollista tuottaa tarpeeksi vetyä ruokaketjun lannoitetarpeisiin. Lisäksi lasketaan kuinka paljon vihreää vetyä olisi mahdollista tuottaa uusiutuvilla luonnonvaroilla ja kuinka suuren osuuden se kattaisi koko Etelä-Pohjanmaan energiankulutuksesta vuonna 2030.

Tässä raportissa lasketaan asioita yksinkertaistetusti ja tarkoituksena on selvittää uusiutuvan energian potentiaalia, eikä laskuissa oteta huomioon uusiutuvan energian tuotannon epätasaisuutta. Ensin selvitetään, kuinka paljon vetyä tarvittaisiin Etelä-Pohjanmaan typpilannoitetarpeen kattamiseen ja kuinka paljon vetyä tarvittaisiin koko Etelä-Pohjanmaan sähköntarpeen kattamiseen. Sähköntarpeen kattaminen on ongelmallista selvittää, koska tuotettua sähköä käytetään aina ensisijaisesti sähköinä. Vihreää vetyä voidaan tuottaa vasta, kun uusiutuva sähköntuotanto ylittää sen hetkisen käyttötarpeen. Toiseksi selvitetään Etelä-Pohjanmaan koko vihreän vedyn tuotantopotentiaali perustuen hankkeessa aiemmin tuotetun raportin mukaisia tuuli- ja aurinkovoimatuotanto skenaarioita.

Vihreän vedyn tuotantomahdollisuuksien selvittämisen lisäksi tässä raportissa lasketaan elinkaarimallinnuksen avulla vihreän vedyn ja ammoniakin tuotannon ympäristövaikutuksia. Mallinnetaan nykytilan mukainen energiajärjestelmä ja vastaavasti energiajärjestelmä, joka käyttää vihreää vetyä. Tämän jälkeen mallinnetaan ammoniakin tuotantoketju muutamalla eri skenaariolla. Muuttujina näissä skenaarioissa on vedyn tuotannossa syntyvän hapen hyödyntäminen tai hyödyntämättömyys ja prosesseissa syntyvän lämmön hyödyntäminen kaukolämpöverkossa. Näiden eri laskelmien ympäristövaikutuksia vertaillaan keskenään ja lopuksi tehdään johtopäätöksiä erilaisten ratkaisujen eroista ja mahdollisuuksista.

2 VIHREÄN VEDYN TUOTANTOMAHDOLLISUUDET ETELÄ-POHJANMAALLA

Tässä osiossa selvitetään Etelä-Pohjanmaan potentiaali vedyn tuotannossa. Tuotannossa keskitytään pelkästään uusiutuvan energian käyttöön, jolloin syntyvä vety olisi niin sanotusti vihreää vetyä. Etelä-Pohjanmaan tuuli- ja aurinkovoima potentiaalia on selvitetty hankkeen aiemmassa työpaketissa ja tässä raportissa hyödynnetään siitä löytyviä tietoja (Spoof-Tuomi, 2024b). Lisäksi käytetään aiemmassa raportissa käytettyjä erilaisia tuuli- ja aurinkovoimapotentiaalain skenaarioita, joissa pyritään ennakoimaan erilaisia vaihtoehtoja eri voimalahankkeiden toteutumisen suhteen.

Uusiutuvien energiantuotantomuotojen tuotanto on vaihtelevaa, joten käytännössä niillä ei voida tuottaa vetyä tasaisesti ympäri vuoden, mutta tässä laskennassa on asiaa yksinkertaistettu ja oletettu tuotanto tasaiseksi. Aurinko- ja tuulisähkön maksimaaliset tuotannot voivat myös osua samalle ajankohdalle, jolloin käytännössä elektrolyyseri kapasiteetti pitäisi mitoittaa tuon maksimaalisen nimellistehon mukaan eikä vuotuisen energiantuotannon mukaan. Lisäksi, jos elektrolyysistä ja polttokennolta halutaan ottaa lämpöenergiaa talteen, sen tuotanto hajautuu ajallisesti ympäri vuoden eikä pelkästään lämmityskaudelle. Näin ollen kaikkea lämpöä ei välttämättä saada hyötykäyttöön.

3 SÄHKÖ- JA LÄMMITYSENERGIANTARPEEN NYKYTILA JA KEHITYS

Sähkönkulutus Etelä-Pohjanmaalla vuonna 2022 oli 2159 GWh/a. (Energiateollisuus, 2023) Asuinrakennusten lämmitysenergian kulutus Etelä-Pohjanmaalla oli 1677 GWh/a (Rauhala, 2021a, s. 7). Maa- ja puutarhatalous kulutti energiaa yhteensä vuonna 2020 1270 GWh/a (Tilastokeskus, 2020). Taulukossa 1 kuvataan maa- ja puutarhatalouden energiankulutuksen polttoainejakaumaa Etelä-Pohjanmaalla.

Taulukko 1. Maa- ja puutarhatalouden energiankulutuksen jakauma Etelä-Pohjanmaalla 2020 (Tilastokeskus, 2020).

Energialähde	Yksikkö	Kulutus	Energiasisältö (GWh)
Sähkö	MWh	246 260	246
Moottoripolttoöljy	m ³	27 640	332
Lämmitysöljy	m ³	1 116	13
Polttoöljy viljankuivatukseen	m ³	8 418	101
Raskas polttoöljy	t	414	5
Kierrätyspuu	irto-m ³	4 771	3
Puupelletti ja -briketti	t	1 209	6
Metsähake	irto-m ³	492 485	394
Peltoenergia: Siemensato	t	1 167	0
Peltoenergia: olki ja muu kasviaines	m ³	50 863	0
Jyrsinturve	irto-m ³	7 289	7
Palaturve	m ³	61 717	86
Turvepelletti- ja briketti	t	8	0
Ostettu lämpöenergia	MWh	76 904	77
Yhteensä			1 270

Energiantuotanto Pohjanmaalla ja Etelä-Pohjanmaalla 2050 raportissa arvioidaan, että kokonaisenergiankulutus tulee laskemaan vuoden 2020 tasosta (6305 GWh/a) 4644 GWh/a tasolle vuoteen 2050 mennessä (Rauhala, 2021b, s. 36). Näihin lukuihin sisältyy siis kaikki energia, jota Etelä-Pohjanmaalla käytetään, myös liikennepolttoaineet ja yksityisen sektorin lämmitys ja niin edelleen. Tässä selvityksessä keskitytään kuitenkin selvittämään lannoite- ja sähköntuotannon sekä maatalouden energiankulutuksen kattamiseen vetyä energiavarastona käyttäen. Energiankulutuksen laskeva kehitys johtuu erilaisista kaavailluista toimista, kuten asuntojen energiatehokkuuden parantamisesta, liikenteen sähköistämisestä, asukasmäärän laskusta, päästövähennystavoitteista ja ilmaston lämpenemisestä johtuvasta lämmitystarpeen vähenemisestä. Tässä selvityksessä on kuitenkin käytetty vertailu- ja laskenta-arvoina tämän hetken tilannetta.

3.1 Typpilannoitetarpeen nykytila ja kehitys

Typpilannoitetarpeen laskennassa on oletettu lannoitteiden käytön olevan tasaista koko maassa ja Etelä-Pohjanmaan lannoitteiden käytön osuus laskettiin peltopinta-alojen suhteena. Suomen kokonaislannoitteiden käyttö on siis jaettu Etelä-Pohjanmaan ja Suomen kaikkien peltujen pinta-alojen suhteella. Lannoitteita käytettiin Suomessa vuonna 2021 yhteensä 230 000 tonnia, josta epäorgaanisia typpilannoitteita on Ruokaviraston

mukaan 150 000 tonnia (Järvenranta ym., 2022, s. 4). Etelä-Pohjanmaalla on siis käytetty epäorgaanisia lannoitteita noin 17 600 tonnia vuonna 2021.

Typpilannoitetarve on melko pysyvä ilmiö ja siihen ei ole odotettavissa merkittäviä muutoksia pitkällä aikavälillä. Typpilannoitteiden tarve riippuu enemmänkin viljeltävän tuotteen tarpeista ja siksi sen tarve hieman vaihtelee vuodesta toiseen, jos viljellään eri lajikkeita (Järvenranta ym., 2022, s. 5).

3.2 Vihreä vety lannoitetuotannossa

Tässä osiossa lasketaan vihreän vedyn tarve typpilannoitteiden tarpeen mukaisesti. Tässä selvityksessä käytettiin laskennan perustana PEM-elektrolyyseriä, jonka hyötysuhde on keskimäärin 0,53 (Spoof-Tuomi, 2024a, s. 27). Typpilannoitteena käytetään käytännössä ammoniakkia tai sen johdannaisia (ammoniumnitraatti tai ammoniumsulfidi). Jatkojalostus ammoniakista eteenpäin on jo olemassa olevaa liiketoimintaa, joka ei vaadi vetyä. Tämä tilanne ei muutu tässä tarkastelussa, joten jatkojalostusta ei ole tässä laskennassa otettu huomioon.

Ammoniakin tuotanto kuluttaa vedyn lisäksi lähinnä lisää energiaa, koska typpi otetaan ilmakehästä ja sen lisäksi prosessiin tarvitaan lämpöä ja sähköä. Varsinaisina lannoitteina käytettävien ammoniumnitraatin ja ammoniumsulfaatin valmistaminen vaatii myös energiaa ja muita aineita. Koska ammoniakki muodostaa vain osan lannoitteina käytettävistä aineista, on ammoniakin tarve todennäköisesti pienempi, kuin tässä selvitettyssä esitetty luku. Atomipainoihin perustuen ammoniumnitraatin ja ammoniumsulfaatin valmistamisessa kuluu ammoniakkia noin neljäsosa painosta lopputuote tonnia kohden. Eli jos näitä aineita käytetään lannoitteina, noin neljäsosa aiemmin mainitusta ammoniakki määrästä riittää niiden valmistamiseen.

Ammoniakkia (NH_3) valmistettaessa vetyä kuluu 177 kg per tonni NH_3 . Tarvittava typpilannoitteiden määrä on jaettu vedyn tarpeella ja sen jälkeen jaettu lopputulos vedyn tiheydellä normaalilämpötilassa ja -paineessa. Lopputuloksena saatiin vedyn tarve kuutiometreinä, eli noin 34,6 miljoonaa kuutiometriä vetyä. Kun tämä tulos kerrotaan vedyn energiatiheydellä normaalilämpötilassa ja paineessa ja jaetaan PEM-elektrolyserin hyötysuhteella, saadaan tuotantoon tarvittava sähkön määrä. Vedyn tarpeen täyttämiseksi tarvitaan siis sähköä noin 181,5 GWh/a. Lopuksi voidaan jakaa tarvittava sähkön määrä vuoden tunneilla ja saadaan PEM-elektrolyseriltä vaadittava kapasiteetti, joka on tässä

tapauksessa noin 20,7 MW. Kaavassa 1 on havainnollistettu tässä esitettyä laskutoimitusta.

$$Elektrolyysin koko = \frac{\frac{\text{ammoniakin tarve} \cdot 0,177 \cdot \text{vedyn energiatiheys}}{PVET}}{\frac{\eta_{ELEKTROLYYSERI}}{8760}} \quad (1)$$

Mitään laitosta ei tietenkään voida ajaa ympäri vuoden, vaan laitokselle tulee seisokkeja ja huoltotarpeita, milloin se ei ole tuotantokäytössä. 8000 tunnin käyttöajalla vuodessa PEM-elektrolyysin pitäisi olla 22,7 MW. Tuohon laskelmaan ei kuitenkaan ole huomioitu mahdollista hukkaa tai häviöitä, eli kokoluokan 25–30 MW laitteisto olisi pitkällä aikajänteellä riittävä tuottamaan vetyä Etelä-Pohjanmaan typpilannoitetarpeeseen.

3.3 Vihreä vety sähkön tuotannossa

Tässä kappaleessa selvitetään vedyn mahdollisuuksia toimia energiankantajana Etelä-Pohjanmaan alueella. Lasketaan, kuinka paljon primäärienergiaa tarvitaan tuottamaan vetyä Etelä-Pohjanmaan sähköntarpeen kattamiseen, kun tuo vety muunnetaan takaisin sähköksi ja lämmöksi polttokennolla. Taulukossa 2 on esitelty laskennassa käytetyt alkutiedot. PEM elektrolyysin hyötysuhteena käytetään aiemmin mainittua 53 % ja laitosten oletettu vuotuinen käyttöaika on 8000 tuntia. Vedyn varastoinnissa, kuljetuksessa ja puristuksessa hukkaprosenttina on käytetty 2,5 % (Arrigoni & Bravo Diaz, 2022, s. 20) ja polttokennon hyötysuhteena 55 % (Sazali ym., 2020, s. 8). Lisäksi on laskettu oheistuotantona syntyvän lämmön määrä ja siinä on käytetty hyötysuhteina elektrolyysillä 23,2 % (Jonsson & Miljanovic, 2022, s. 61) ja polttokennolla 30 % (Sazali ym., 2020, s. 8).

Taulukko 2. Sähköntuotannon korvaajana käytettävän vedyn laskennassa käytetyt lähtötiedot. CC BY-ND

Sähkönkulutus Etelä-Pohjanmaalla	2159	GWh
PEM-elektrolyysin hyötysuhde	53	%
Huipunkäyttöaika	8000	h/a
Vedyn varastoinnin yms. hukka	2,5	%
Polttokennon hyötysuhde	55	%
Lämmön hyötysuhde Elektrolyysi	23,2	%
Lämmön hyötysuhde Polttokenno	30	%

Ensin laskettiin kaavan 2 mukaisesti polttokennolle tarvittava energiamäärä, jotta vedystä voidaan polttokennossa tuottaa tarvittava määrä sähköä. Tämä tehtiin kertomalla

elektrolyserin hyötysuhde varastoinnin hyötysuhteella ja jakamalla Etelä-Pohjanmaan sähkönkulutus saadulla luvulla.

$$\text{Polttokennolle tarvittava energia} = \frac{\text{Etelä-Pohjanmaan sähkönkulutus}}{\eta_{\text{POLTTOKENNO}} * \eta_{\text{VARASTOINTI}}} \quad (2)$$

Kaavan 3 mukaisesti laskettiin kokonaisuudessaan tarvittava primäärienergiämäärä. Tämä laskettiin kertomalla PEM-elektrolyserin hyötysuhde vedyn varastoinnin hyötysuhteella ja polttokennon hyötysuhteella ja jakamalla Etelä-Pohjanmaan sähkötarve saadulla luvulla.

$$\text{Tarvittava primäärienergia} = \frac{\text{Etelä-Pohjanmaan sähkönkulutus}}{\eta_{\text{ELEKTROLYYSERI}} * \eta_{\text{VARASTOINTI}} * \eta_{\text{POLTTOKENNO}}} \quad (3)$$

Kaavalla 4 laskettiin polttokennolle tulevasta sähkömäärästä polttokennolta talteen saatava lämpöenergian määrä kertomalla polttokennolle tarvittava energiamäärä polttokennon lämmöntuotannon hyötysuhteella.

$$\text{Polttokennolta saatava lämpö} = \text{Polttokennolle tarvittava energia} * \eta_{\text{LÄMPÖ POLTTOKENNOLTA}} \quad (4)$$

Kaavalla 5 laskettiin elektrolyseriltä talteen saatava lämpöenergiämäärä kertomalla tarvittava primäärienergiämäärä elektrolyserin lämmöntuotannon hyötysuhteella.

$$\text{Elektrolyseriltä saatava lämpö} = \text{Tarvittava primäärienergia} * \eta_{\text{LÄMPÖ ELEKTROLYYSERILTÄ}} \quad (5)$$

Yhteensä talteen saatava lämpöenergia saadaan laskemalla elektrolyseriltä saatava lämpöenergia ja polttokennolta saatava lämpöenergia yhteen. Lisäksi kaavalla 6 laskettiin hyötysuhde pelkästään sähköntuotannon osalta. Tämä laskettiin jakamalla tuotettu sähkömäärä tarvittavalla primäärienergiämäärällä.

$$\text{Sähköntuotannon hyötysuhde} = \frac{\text{Tuotettu sähkö}}{\text{Tarvittava primäärienergia}} \quad (6)$$

Kaavalla 7 laskettiin sähkön- ja lämmöntuotannon kokonaishyötysuhde laskemalla talteen saatava lämpö ja tuotettu sähkö yhteen ja jakamalla se primäärienergiantarpeella.

$$\text{Kokonaishyötysuhde} = \frac{\text{Tuotettu sähkö} + \text{Tuotettu lämpö}}{\text{Primäärienergian tarve}} \quad (7)$$

Taulukkoon 3 on kerätty saadut tulokset. Tässä on laskettu ainoastaan teoreettisia arvoja sähkön tarpeeseen perustuen. Pelkästään uusiutuvalla energialla tällainen tasainen tuotanto ei olisi mahdollista, koska aurinkosähkön ja tuulisähkön tuotantojen määrä ei ole tasaista. Lisäksi lämmön tuotanto jakautuu ympäri vuoden, joten kaikki lämpö ei ole

suoraan käytettävissä lämmityskaudella. Lämpöä voidaan toki joissain määrin varastoida, mutta siitä aiheutuu lisää häviöitä ja niitä ei ole näissä laskuissa otettu huomioon.

Taulukko 3. Etelä-Pohjanmaan sähkön tarpeen vedyllä kattamiseen liittyvät tulokset. CC BY-ND

Primäärienergian tarve	7596,4	GWh
Energiaa polttokennolle	4026,1	GWh
Energiaa polttokennolta	2159,0	GWh
Lämpöä elektrolyysieriltä	1762,4	GWh
Lämpöä polttokennolta	1207,8	GWh
Lämpöä yhteensä	2970,2	GWh
Elektrolyysin koko	949,6	MW
Sähköntuotannon hyötysuhde	0,284	
Kokonaishyötysuhde	0,675	

Koko Etelä-Pohjanmaan sähköntarpeen täyttäminen vaatisi 950 MW PEM-elektrolyysin, jos sitä ajettaisiin 8000 tuntia vuodessa. Käytännössä vetyä tarvitaan hieman enemmän johtuen lopputuotteena toimivan sähkö- ja lämpöenergian käyttövaiheen hyötysuhteista ja häviöistä, joita tässä ei ole huomioitu. Jos pelkästään polttokennossa vedystä saatava sähköenergia hyödynnetään, niin koko prosessin hyötysuhde on 28,4 prosenttia. Jos vedyn tuotannon ja käytön tuottamaa lämpöä voidaan hyödyntää lämmitysenergiana, se parantaa hyötysuhdetta 67,5 prosenttiin asti. Käytännössä kaikkea tuotettua lämpöä ei kuitenkaan voida hyödyntää, vaikka sitä varastoitaisiinkin.

Referenssinä P2X Solutions on avaamassa vuoden 2024 aikana Harjavaltaan 20 MW elektrolyysilaitoksen (P2X Solutions, 2023), EPV energia on avaamassa Vaasaan 14 MW elektrolyysilaitoksen (EPV Energy, 2021) ja Flexens on rakentamassa Kokkolaan laitosta, jossa olisi viime tietojen mukaan 350 MW tehoinen elektrolyysi ja ammoniakkituotantoa (Flexens, 2023).

3.4 Vihreän vedyn tuotantopotentiali Etelä-Pohjanmaalla

Tässä raportissa tarkastellaan samoja skenaarioita, kuin käsiteltiin raportissa T1.2 Etelä-Pohjanmaan tuuli- ja aurinkovoimapotentiali 2030 (Spoof-Tuomi, 2024b, s. 20–21, 32–33). Aurinko- että tuulivoiman potentialit on jaettu erilaisiin toteumaskenaarioihin ja niiden perusteella lasketaan, kuinka paljon Etelä-Pohjanmaalla olisi teoriassa mahdollista tuottaa vetyä pelkästään uusiutuvalla sähköllä vuonna 2030.

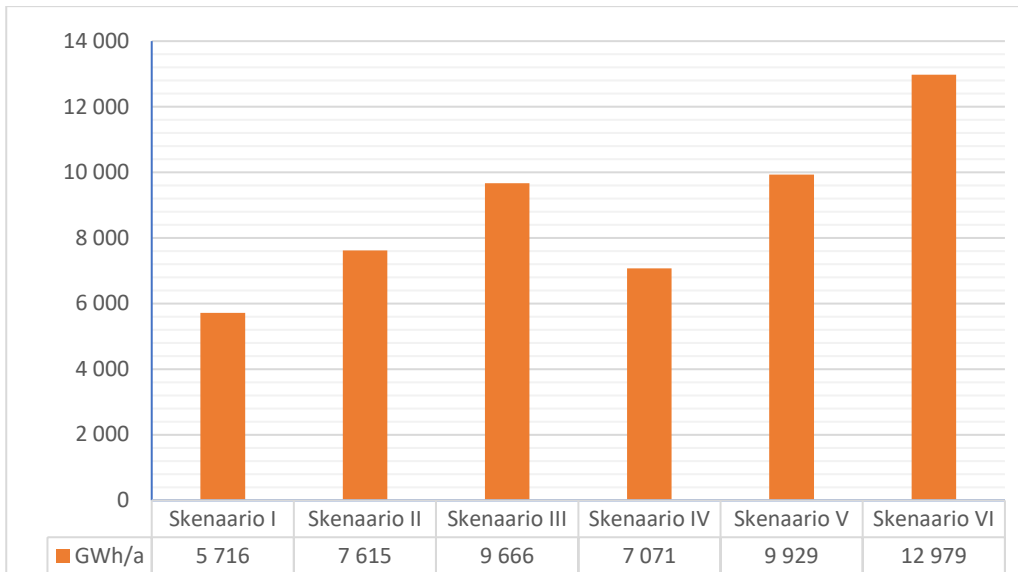
Tuulivoimalla on käytetty tuotantokertoimena 0,31, eli tuulivoimala tuottaa vuodessa sähköä keskimäärin 31 % sen teoreettisesta maksimista ja aurinkovoimalle vastaava luku on 11,3 % tai 0,113 (Spoof-Tuomi, 2024b, s. 22, 34). Eri skenaarioiden tuotantokapasiteetteina käytetään samoja lukuja, kuin raportissa 1.2 Etelä-Pohjanmaan tuuli- ja aurinkovoimapotentiaali 2030. Niiden perusteella laskettiin, kuinka paljon sähköä on mahdollista tuottaa vuodessa. Tämä tapahtuu yhtälön 8 mukaisesti kertomalla nimellisteho vuoden tunneilla ja sitten tuotantokertoimella. Sitten laskettiin aurinkovoiman ja tuulivoiman tuotannot yhteen.

$$\text{Vuotuinen tuotanto} = \text{Nimellisteho} * \text{tunteja vuodessa} * \text{tuotantokerroin} \quad (8)$$

Lopuksi yhtälöllä 9 laskettiin teoreettinen PEM-elektrolyseri, jota voitaisiin pyörittää ympäri vuoden kyseisellä sähköenergian määrällä.

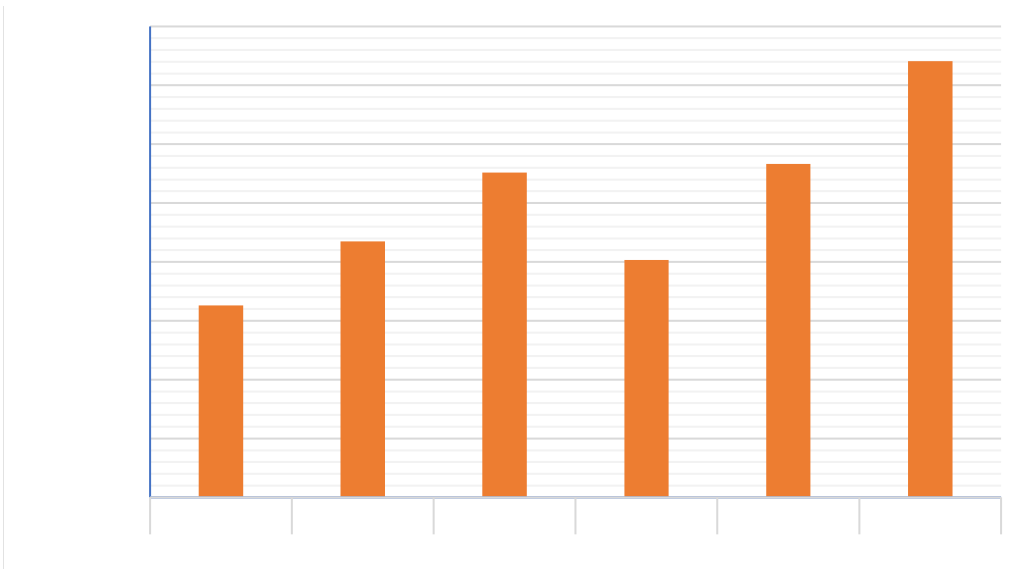
$$\text{Elektrolyserin koko} = \frac{\text{sähkön vuosituotanto}}{\text{vuoden käyttötunnit}} \quad (9)$$

Kuviossa 1 on esitetty maksimaaliset sähköntuotannot eri skenaarioissa. Kuten taulukosta huomataan, niin ainoastaan skenaariossa I tuotanto jää maakunnan nykyisen kokonaisenergiankulutuksen alle, mutta ylittää kuitenkin arvioidun energiantarpeen vuonna 2050. Kaikissa muissa skenaarioissa Etelä-Pohjanmaa voisi olla täysin energiaomavarainen ja jopa viedä energiaa muualle. Haasteena on energian varastointi, koska uusiutuvien energiamuotojen tuotanto ei ole tasaista ja energiaa kuitenkin tarvitaan koko ajan.



Kuvio 1. Maksimaalinen sähköntuotanto eri toteumaskenaarioissa (Spoof-Tuomi, 2024b, ss. 23, 34).

Kuviossa 2 esitellään keskimääräistä PEM-elektrolyyseri kapasiteettia, jota voitaisiin teoriassa ajaa ympäri vuoden kuvan 1 mukaisella sähköntuotannolla. Koska uusiutuvan energian tuotanto on vaihtelevaa, elektrolyyserin pitäisi käyttää muina aikoina muita energialähteitä. Vaihtoehtoisesti elektrolyyserin pitäisi olla niin suuri kapasiteetiltaan, että se voisi hyödyntää kaiken uusiutuvan energian. Käytännössä elektrolyyserin tehon täytyisi olla yhtä suuri kuin uusiutuvan energiantuotannon nimellisteho.



Kuvio 2. Elektrolyysereiden laskennalliset kapasiteetit tasaisella tuotannolla eri skenaarioissa. CC BY-ND

Etelä-Pohjanmaan uusiutuvien energiantuotantomuotojen tuotantokapasiteetti tulee olemaan jatkossa suuri verrattuna energian kulutukseen. Tämä johtaa energian

varastoinnin tarpeeseen ja siinä elektrolyysereit voivat olla avainasemassa. Vielä tällä hetkellä on liian kallista rakentaa elektrolyysereitä vain osittaisen vuoden käyttöä varten. Elektrolyysereiden massatuotanto voi kuitenkin muuttaa tilannetta ja mahdollistaa sellaisten laitosten rakentamisen, joissa varastoidaan ylijäämäenergiaa silloin, kun sitä tuotetaan. Tämä tarkoittaa käytännössä uusiutuvan sähköenergian muuntamista esimerkiksi vedyksi, ammoniakiksi, e-metanoliksi tai e-metaaniksi. Tällainen kehitys mahdollistaisi ylijäämätuotannon aikana tuotetun energian varastoinnin. Kun uusiutuvaa sähköä ei ole käytettävissä, muunnetaan varastoista energiaa takaisin käyttöön.

Yksi potentiaalinen tulevaisuuden tekniikka, jota Suomessa kehittää esimerkiksi Convion, ovat korkeassa lämpötilassa toimivat Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) polttokennot (Singh ym., 2021, s. 3). SOFC polttokennot voivat käyttää erilaisia polttoaineita, kuten metaania, vetyä tai hiilimonoksidia. Korkean käyttölämpötilan ansiosta niillä voidaan helposti tuottaa sekä lämpöä että sähköä.

Raportissa T1.2 arvioitiin aurinko- ja tuulivoiman kapasiteetteja vuoteen 2030 mennessä. Voidaan kuitenkin olettaa, että uusiutuvien luonnonvarojen hyödyntäminen lisääntyy myös vuoden 2030 jälkeen. Koska samaan aikaan energiankulutuksen arvioidaan laskevan, on selvää, että jollain tapaa tuota energiaa pitää tulevaisuudessa varastoida. Tällä hetkellä ei ole taloudellisesti kannattavaa rakentaa elektrolyyserilaitosta, jos sitä ei ajeta täyttä vuotta (Baral & Šebo, 2024, s. 6). Lisäksi vedyn varastointi on ongelmallista, sillä vety on hyvin pienimolekyylinen kaasu ja sillä on siksi taipumus läpäistä monenlaisia metallisia materiaaleja. Lisäksi vety on myös hyvin harvaa, minkä takia sitä on paineistettava tai jäähdytettävä sen varastoimiseksi ja se kuluttaa myös energiaa (Preuster ym., 2017, s. 4). On kuitenkin mahdollista, että tilanne muuttuu teknologioiden yleistyessä ja tuotantomäärien kasvaessa. Jos teknologinen kehitys ja yleistymisen ei ole riittävän nopeaa toiminnan aloittamiseksi taloudellisesti kannattavasti, on keksittävä vaihtoehtoja, joilla toiminnasta saataisiin taloudellisesti kannattavaa.

4 VIHREÄN VEDYN KÄYTTÖNOTON YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Vihreän vedyn käyttöönoton elinkaarivaikutukset ympäristöön riippuvat vahvasti siitä, missä sovelluksessa sitä käytetään. Lähtökohtaisesti merkittävimpien ympäristövaikutusten saavuttamiseksi vihreällä vedyllä pyritään korvaamaan sellaisia toimintoja, joissa käytetään paljon fossiilisia raaka-aineita tai niihin perustuvaa energiantuotantoa. Tässä selvityksessä tutkitaan vihreän vedyn ympäristövaikutuksia energia- ja typpilannoitesektorilla, sillä näissä tyypillisesti syntyy runsaasti kasvihuonekaasupäästöjä ilmakehään elinkaarensa aikana ja näissä vihreää vetyä on mahdollista hyödyntää. Mallinnus keskittyy ilmastovaikutuksiin, mutta myös muita vaikutusluokkia otetaan huomioon.

Elinkaarivaikutuksia ympäristöön tutkitaan kahdessa eri skenaariossa, joista toinen liittyy energiasektoriin ja toinen typpilannoitesektoriin. Näiden skenaarioiden avulla suoritetaan kaksi erillistä, mutta toisiaan tukevaa Life Cycle Assessment-mallinnusta (LCA), joiden avulla voidaan myöhemmin vertailla niiden vaikuttavuutta suhteutettuna Etelä-Pohjanmaan energia- ja typpilannoitetarpeisiin. Molemmissa skenaarioissa vihreää vetyä tuotetaan paikallisesti Etelä-Pohjanmaan alueella tuotetulla tuuli- ja aurinkoenergialla hyödyntäen PEM-elektrolyysiä.

Energiaskenaario liittyy vihreän vedyn käyttöönottoon energiasektorilla. Tässä tapauksessa tuotettua vihreää vetyä hyödynnetään energian varastointiin. Vedystä tuotetaan sähköenergiaa polttokennojen avulla, jolloin se tuottaa sivutuotteena lämpöä ja vettä. Skenaariossa vihreän vedyn avulla korvataan keskimääräistä sähkön- ja lämmöntuotantoa Etelä-Pohjanmaan alueella verrattuna referenssivuoteen 2022.

Ammoniakkiskenaarioissa vihreästä vedystä tuotetaan Haber-Bosch prosessin avulla ammoniakkia, josta voidaan edelleen jalostaa typpihappoa ja siitä epäorgaanisia typpilannoitteita (Kyriakou ym., 2020, s. 6). Tässä skenaariossa vihreän vedyn avulla tuotetut lannoitteet korvaavat suoraan Etelä-Pohjanmaan alueella kulutettua epäorgaanista typpilannoitetta, joka on tuotettu perinteisillä menetelmillä maakaasusta tuotetusta vedystä (Ringsgwandl ym., 2022, s. 3).

Energia- ja ammoniakkiskenaarioissa elinkaaren ympäristövaikutukset mallinnetaan LCA:n avulla. Mallintamisessa noudatetaan standardeja ISO 14040 ja ISO 14044, joiden

mukaisesti selvitys jaetaan neljään päävaiheeseen: tavoitteet ja soveltamisala, inventaarioanalyysi, vaikutustenarviointi ja tulosten tulkinta. Selvityksessä käsitellään kahta mallinnettavaa skenaariota yhtä aikaa, sillä niissä on merkittävästi eroavaisuuksistaan huolimatta runsaasti samoja piirteitä, ja ne jakavat osittain samoja yksikköprosesseja.

4.1 Tavoitteet ja soveltamisala

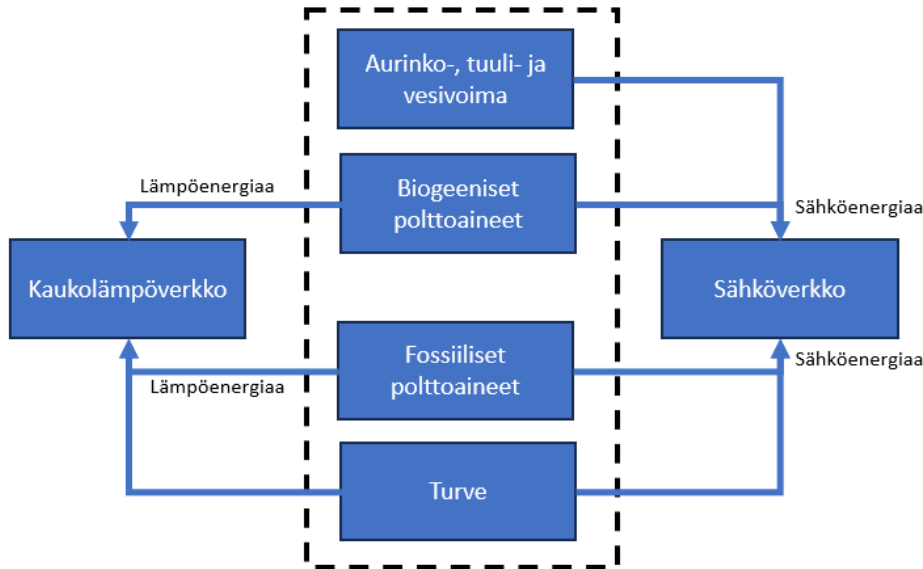
Selvityksen tarkoitus on selvittää vihreän vedyn elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia Etelä-Pohjanmaan alueella kahdessa eri skenaariossa. Tulokset suhteutetaan alueen vihreän vedyn tuotantopotentiaaliin ja skenaarioissa vertailtavien sektoreiden vihreän vedyn tarpeeseen nyt ja lähitulevaisuudessa. Tuloksia voidaan hyödyntää päätöksenteon tukena esimerkiksi uusien teollisuuden investointien tapauksessa. Skenaarioissa vertaillaan tuotejärjestelmiä nykyisen tuotantotavan ja vihreää vetyä käyttävän tuotejärjestelmien välillä.

Molemmissa skenaarioissa vertaillaan vihreää vetyä hyödyntävää tuotejärjestelmää nykytilaan, joten selvitystä varten kuvaillaan neljä eri tuotejärjestelmää. Ensimmäinen tuotejärjestelmä kuvaa nykytilan mukaista energiantuotantoa, toinen vihreää vetyä hyödyntävää energiantuotantoa, kolmas keskimääräistä typpilannoitteiden tuotannon nykytilaa ja neljäs vihreää vetyä hyödyntävää typpilannoitteiden tuotantoa. Kaikissa tuotejärjestelmissä lopputuote hyödynnetään Etelä-Pohjanmaalla, mutta muutoin elinkaaren vaiheet saattavat tapahtua alueen ulkopuolella.

Kuvioissa 3 ja 4 esitetään skenaarioon 1 liittyvät tuotejärjestelmät TJ1 ja TJ2.

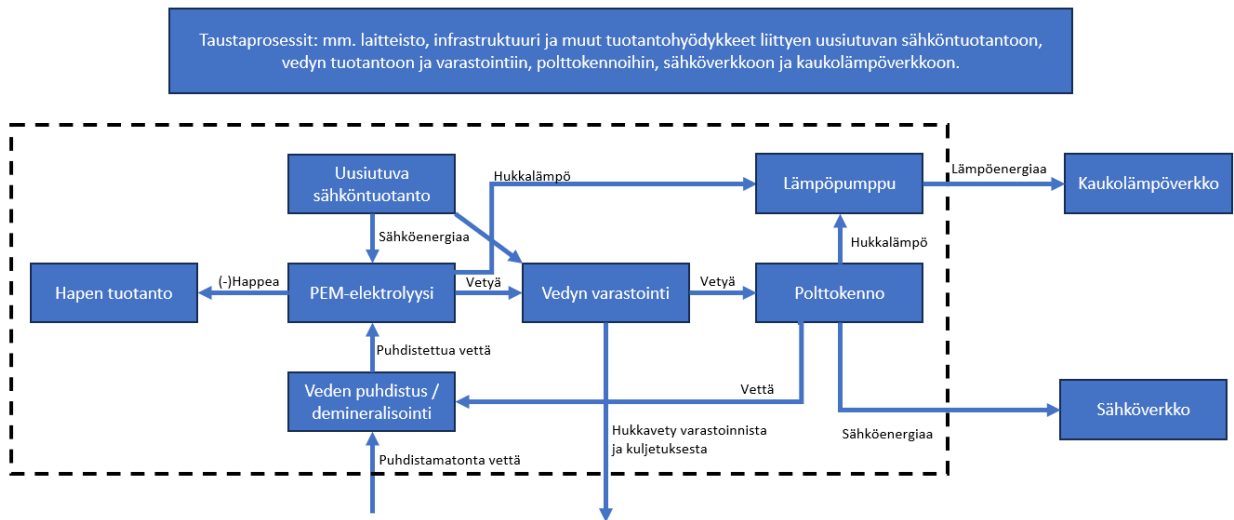
Tuotejärjestelmä 1 kuviossa 3 kuvaa energiajärjestelmän nykytilaa, jossa hyödynnetään sekä polttamiseen perustuvaa teknologiaa että täysin uusiutuvia energianlähteitä. Polttamiseen perustuvassa skenaariossa hyödynnetään fossiilisia ja biopohjaisia polttoaineita (Energiateollisuus, 2022b).

Taustaprosessit: mm. laitteisto, infrastruktuuri ja muut tuotantohyödykkeet liittyen polttoaineiden kuljetukseen, sähköntuotantoon, sähköverkkoon ja kaukolämpöverkkoon.



Kuvio 3. Tuotejärjestelmä 1. Energiajärjestelmän nykytila. CC BY-ND

Kuvion 4 mukainen tuotejärjestelmä 2 kuvaa vihreää vetyä hyödyntävää energiajärjestelmää. Tässä tuotejärjestelmässä uusiutuvan sähköenergian ja puhdistetun veden avulla tuotetaan vihreää vetyä PEM-elektrolyysi-prosessilla, jonka rinnakkaistuotteena syntyy happea. Vetyä tuotetaan silloin, kun uusiutuvaa energiaa on saatavilla, ja varastoidaan myöhemmin käytettäväksi. Vedyn varastointikin vaatii hieman energiaa, koska vetyä täytyy paineistaa tai jäähdyttää säilytystä varten (Preuster ym., 2017, s. 4). Tässä selvityksessä on oletettu vetyä säilytettävän paineistettuna 60 bar paineessa, kuten tehdään jo esimerkiksi Iberdrolan ammoniakintuotantolaitoksella Espanjassa (Iberdrola, 2024). Kun uusiutuvan energian tuotanto on vähäistä, varastoitu vety hyödynnetään polttokennon avulla sähkö- ja lämpöenergiaksi. Elektrolyysin käänteisprosessina tästä syntyy myös vettä, jota muodostuu 9 kg käytettyä vetykiloa kohden. Sivutuotteena syntyvä vesi voidaan helposti uusiokäyttää ja puhdistamisen jälkeen ohjata takaisin vedyn tuotantoprosessiin, tässä tapauksessa veden kulutus on vähäistä (Hristovski ym., 2009, s. 329).



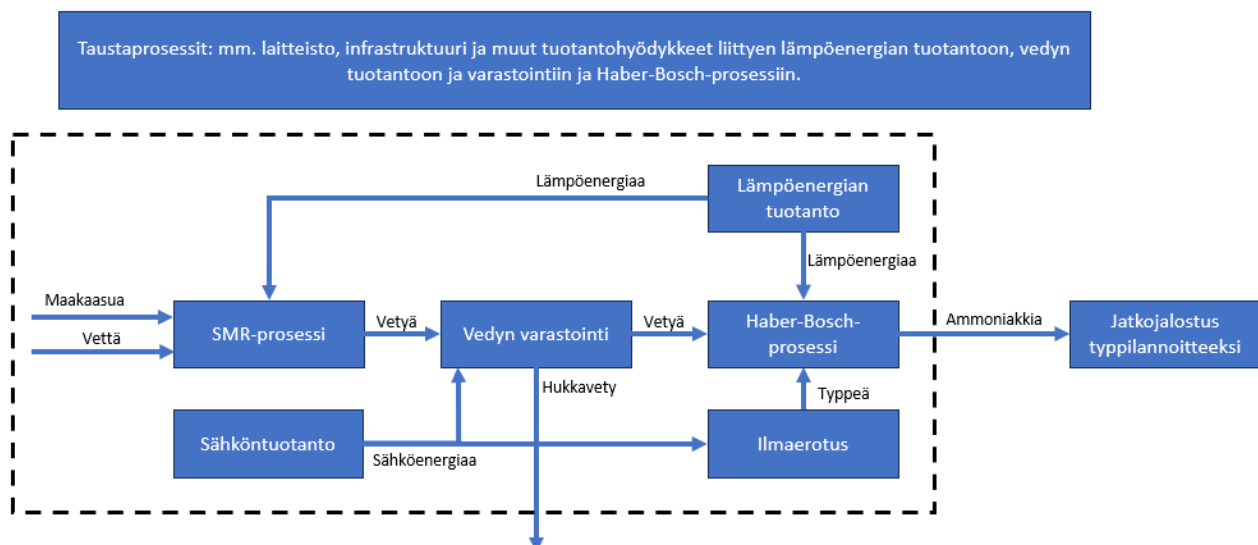
Kuvio 4. Tuotejärjestelmä 2, vihreää vetyä hyödyntävä energiajärjestelmä. CC BY-ND

Skenaariossa 1 on tarkoituksena vertailla ennen kaikkea vaikutuksia energiantuotannon suhteen, joten toiminnalliseksi yksiköksi määritellään 1 kWh energiaa syötettynä sähkö- ja kaukolämpöverkkoon. Molemmissa tuotejärjestelmissä syntyy sekä sähkö- että lämpöenergiaa, jotka laskennan yksinkertaistamiseksi yhdistetään yhdeksi toiminnalliseksi yksiköksi. Tuotejärjestelmästä 2 syntyvistä virtauksista polttokennolta syntyvää vettä ei huomioida uudelleen käytettäväksi ja vedyn varastoinnista ja siirtämisestä syntyvä hukkavetyä huomioidaan ainoastaan korkeampana kulutuksena. Vedyllä on kuitenkin itsessään merkittävä ilmastovaikutus, jota tässä tutkimuksessa käytettävät menetelmät eivät huomio (Ocko & Hamburg, 2022, s. 2). PEM-elektrolyysistä syntyvän hapen oletetaan päätyvän kaupallisesti hyödynnettäväksi, joten tämä huomioidaan mallinnuksessa. Tässä tapauksessa hyödynnetään tuotejärjestelmän laajennusta, jolloin tuotetun hapen oletetaan korvaavan markkinoilla tyypillisesti myytävää happea. Tämä tuotejärjestelmän laajennus näkyy tuotejärjestelmäkuvaajassa virtauksen edessä suluissa olevana miinusmerkinä. Miinus kuvastaa sitä, että virtaus mallinnetaan ikään kuin negatiivisena virtauksena.

Mallinnuksen aikana alustavista tuloksista huomattiin, että tällä rinnakkaistuotteena syntyvällä hapella on erittäin merkittävä vaikutus mallinnuksen lopputuloksiin. Tästä syystä mallinnuksessa päätettiin huomioida erikseen tapaus, jossa tämä sivuvirta jätetään kokonaan tarkastelun ulkopuolelle.

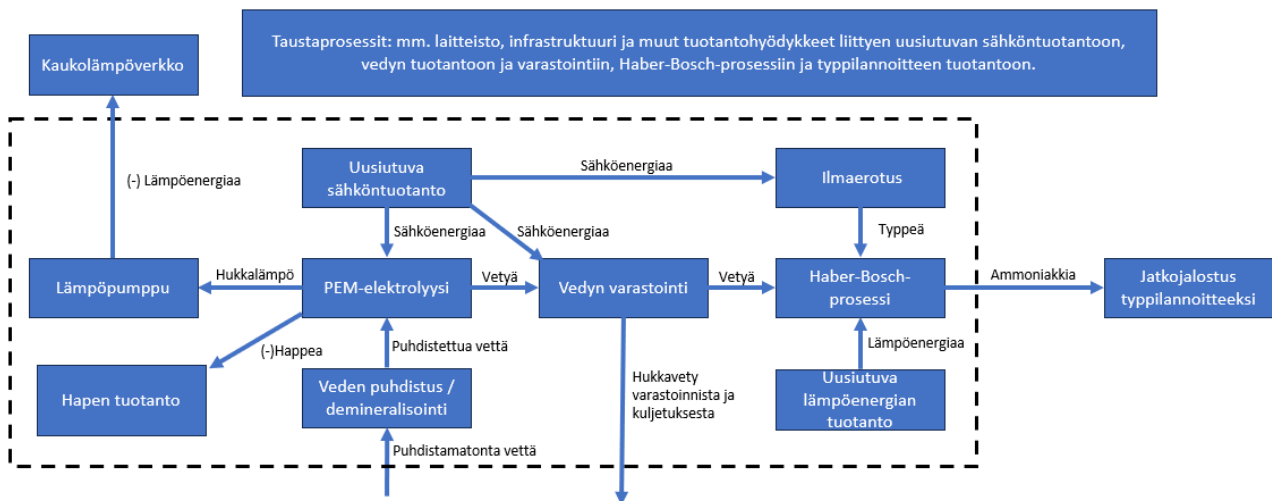
Kuvioissa 5 ja 6 esitetään ammoniakkin tuotantoon liittyviä tuotejärjestelmiä. Molemmissa tuotejärjestelmissä ammoniakkia tuotetaan vedystä Haber-Bosch-prosessin avulla. Tuotejärjestelmän ulkopuolelle rajataan ammoniakkin jatkojalostus typpilannoitteeksi mallinuksen yksinkertaistamiseksi. Rajausta perustellaan myös sillä, että typpilannoitteen jalostus on tässä skenaariossa molemmille tuotejärjestelmille sama eikä näin ollen vaikuta absoluuttiseen lopputulokseen.

Kuviossa 5 on esitetty nykytilan mukainen ammoniakkin tuotantoprosessi, jossa ammoniakkia tuotetaan maakaasusta höyryreformoimalla (Steam Methane Reforming, SMR) tuotetun vedyn avulla. Vetyä syntyy sekä maakaasusta että prosessista käytettävästä vesihöyrystä. Näin ollen lämpö- ja sähköenergian tuotantomenetelmät ja polttoainejakaumat poikkeavat tuotejärjestelmästä 4 (Kyriakou ym., 2020, s. 1).



Kuvio 5. Tuotejärjestelmä 3, Ammoniakin tuotanto maakaasusta. CC BY-ND

Kuviossa 6 esitetään vihreään vetyyn perustuvaa ammoniakkin tuotantoa kuvaava tuotejärjestelmä 4. Tässä vetyä tuotetaan SMR-prosessin sijaan PEM-elektrolyysillä, joka saa syötteenä puhdistettua vettä ja uusiutuvaa sähköenergiaa. Ammoniakin tuotanto tapahtuu samalla prosessilla, kuten tuotejärjestelmässä 4, mutta sähkö- ja lämmöntuotanto oletetaan tapahtuvan paikallisesti Etelä-Pohjanmaalla. Näin ollen tuotantomenetelmät ja polttoainejakaumat ovat erilaiset tuotejärjestelmien välillä.



Kuvio 6. Tuotejärjestelmä 4, Vihreää vetyä hyödyntävä ammoniakin tuotanto. CC BY-ND

Skenaariossa 2 molemmat tuotejärjestelmät tuottavat ammoniakkia päätuotteenaan, joten toiminnalliseksi yksiköksi valitaan 1 kilogramma ammoniakkia. Molemmista tuotejärjestelmistä syntyy hukkavetyä, joka näkyy kuvaajassa varastoinnin yhteydessä. Tämä hukkavetyä huomioidaan vedyn kulutuksessa, mutta sillä ei oleteta olevan muita merkittäviä vaikutuksia. PEM-elektrolyysissä syntyvän hapen oletetaan päätyvän kaupallisesti hyödynnettäväksi, kuten skenaariossa 1. Myös tässä tapauksessa hyödynnetään tuotejärjestelmän laajennusta ja markkinoilla myytävän tyypillisen hapen korvaamista ja tehdään erillinen skenaario ilman sivuvirtahapetta tuotejärjestelmässä.

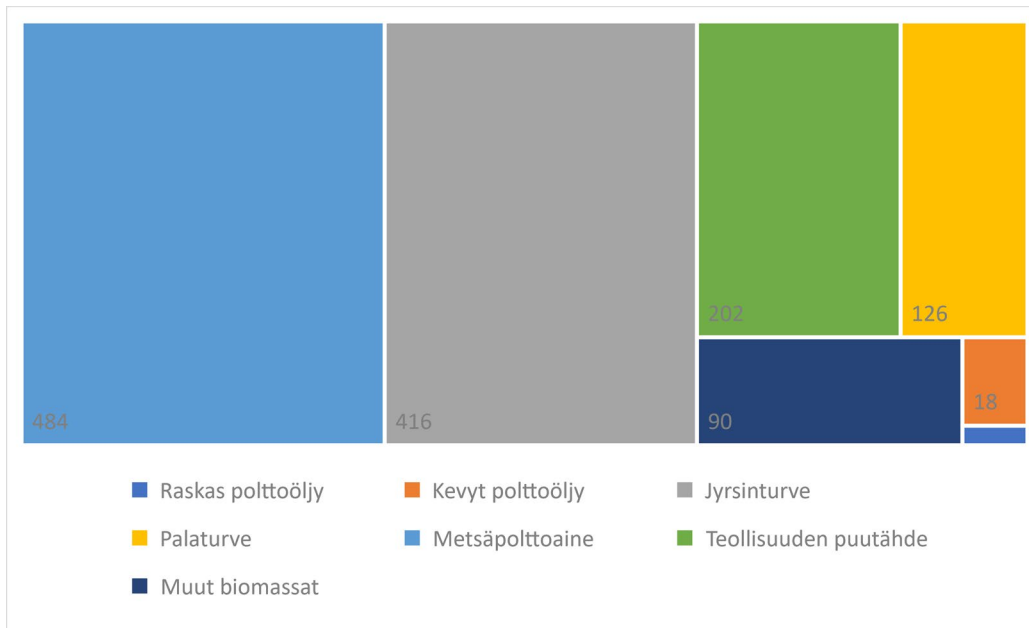
PEM-elektrolyysistä syntyvän hukkalämmön oletetaan päätyvän kaupallisesti hyödynnettäväksi kaukolämpöverkkoon. Tämä huomioidaan mallinnuksessa samalla tavalla kuin rinnakkaistuotteena syntyvä happi, eli tuotejärjestelmää laajentamalla hukkalämmön oletetaan korvaavan kaukolämpöverkosta turpeella tuotettua lämpöenergiaa. Myös tässä tapauksessa käytetään tuotejärjestelmäkuvaajassa virtauksen yhteydessä miinusmerkkiä kuvastamaan tuotejärjestelmän laajennusta. Turve valittiin siksi, että Suomen kansallisena strategiana on ohjata turpeen käyttöä polttamisesta korkeamman jalostusasteen toimintaan (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2021, s. 11). Mallinnuksen aikana alustavista tuloksista huomattiin myös tässä tapauksessa, että tällä tavalla rinnakkaistuotteena syntyvän lämmön vaikutukset ovat hyvin merkittävät. Näin ollen myös tässä tapauksessa lasketaan erikseen tulokset jättäen elektrolyysin hukkalämpö tarkastelun ulkopuolelle. Näin ollen ammoniakkiskenaariossa lasketaan tulokset neljässä

eri tapauksessa: molemmat sivuvirrat jätetään tarkastelun ulkopuolelle, huomioidaan happi ja rajataan hukkalämpö ulkopuolelle, huomioidaan hukkalämpö ja rajataan happi ulkopuolelle, sekä huomioidaan molemmat rinnakkaistuotteet.

Tässä selvityksessä ei kerätä primääristä dataa, joten mallinnus perustuu kirjallisuuden lähteisiin, saatavilla oleviin tietokantoihin ja Tilastokeskuksen dataan. Data koostetaan taulukossa 4 esitetyn suunnitelman mukaisesti, johon on eritelty kaikki inventaarioanalyysin tekemiseen vaadittava data pois lukien kaukolämmön polttoainejakauma gigawattitunteina Etelä-Pohjanmaalla vuonna 2022, joka on selkeyden vuoksi esitetty erikseen kuviossa 7.

Taulukko 4. Elinkaarimallinnuksessa käytetyt tiedot koosteena. CC BY-ND

Data	Yksikkö	Arvo
Etelä-Pohjanmaalla tuotetun sähköenergian määrä	GWh	1966,28
Etelä-Pohjanmaalla tuotetun lämpöenergian määrä	GWh	735,00
Veden puhdistuksen energiankulutus	kWh/m ³	Ecoinvent v.3.10 arvo
PEM-elektrolyysin hyötysuhde		0,53
PEM-elektrolyysin vaatima veden määrä	kg _{H2O} /kg _{H2}	9,00
PEM-elektrolyysin vaatiman veden laatu		ISO 3696 Grade 2
PEM-elektrolyysin tuottaman hapen määrä	kg _{O2} /kg _{H2}	7,94
PEM-elektrolyysin tuottama hukkalämpö	%	23,20
PEM-polttokennon hyötysuhde, sähkö	%	55,00
PEM-polttokennon hyötysuhde, lämpö	%	30,00
Vedyn varastoinnin vaatima säiliö	m ³	1950,00
Vedyn varastoinnin vaatima sähköenergia	kWh / kg	2,22
Vedyn varastoinnista syntyvä hukka	%	2,50
Haber-Bosch prosessin vaatima typpi	kg _{N2} / kg _{NH3}	0,82
Haber-Bosch prosessin vaatima vety	kg _{H2} / kg _{NH3}	0,18
Haber-Bosch prosessin vaatima lämpöenergia	MJ / kg _{NH3}	2,70
Steam Methane Reforming ja Haber-Bosch prosessin energia alkuperäinen		Venäjä/Eurooppa (Ecoinvent v.3.10 arvo)
Steam Methane Reforming ja Haber-Bosch prosessin energia uusi		Etelä-Pohjanmaan uusiutuvat
Steam Methane Reforming prosessin maakaasun, veden ja lämpöenergian tarve		Ecoinvent v.3.10 arvo



Kuvio 7. Kaukolämmön tuotannon polttoainejakauma gigawattitunteina Etelä-Pohjanmaalla vuonna 2022 (Energiateollisuus, 2022a).

LCA-mallinnus toteutetaan ISO 14040/44-standardien mukaisesti. Mallintamisessa käytetään Brightway2-ohjelmistoa Activity Browser-käyttöliittymän avulla, jossa hyödynnetään Ecoinvent v.3.10-tietokantaa. Vaikutustenarvioinnissa käytetään EF v.3.1 (Environmental Footprint) vaikutustenarviointimetodia, josta mallinnetaan 16 Euroopan komission suositukseen perustuvaa vaikutusluokkaa taulukon 4 mukaisesti. Vaikutustenarvioinnissa keskitytään pääasiassa ilmastovaikutuksiin ja muista vaikutusluokista huomioidaan mallinnuksessa merkityksellisiksi määriteltävät vaikutusluokat.

Tuloksista muodostetaan komission suosituksen mukainen niin sanottu Environmental Footprint score (EF-score), jota voidaan hyödyntää mallinnuksessa muodostettavien skenaarioiden vertailuun. EF-score lasketaan kertomalla eri ympäristövaikutusluokkien arvot tietyillä painotuskertoimilla ja laskemalla näiden painotettujen arvojen summa. EF-score ei yksiköttömänä arvona itsessään kerro paljoakaan, mutta sitä voidaan hyödyntää kahden järjestelmän vertailuun, kun halutaan ottaa huomioon ympäristövaikutukset kokonaisuutena yhdellä selkeällä numeerisella arvolla. Täytyy kuitenkin huomata, että EF-scoresta ei voida nähdä suoraan, mistä arvo muodostuu. Tällöin on olemassa riski, että kahden tai useamman vaikutusluokan välillä tapahtuu tasapainottumista (trade-off), jolloin esimerkiksi kaksi merkittävää ja vastakkaisiin suuntiin vaikuttavaa vaikutusluokkaa saattavat kumota toisensa. EF-score ei myöskään ole luonnontieteisiin perustuva

menetelmä, vaan painotuskertoimet perustuvat enemmän tai vähemmän arvovalintoihin. Käytetyt vaikutusluokat, menetelmät ja painotuskertoimet ovat nähtävissä taulukossa 5 (Sala ym., 2018, s. 38).

Taulukko 5. Käytettävät vaikutusluokat, menetelmät ja painotuskertoimet (Sala ym., 2018, s. 38).

Vaikutusluokka	Menetelmä	Yksikkö	Painotuskerroin
Ilmastonmuutos	global warming potential (GWP100)	kg CO ₂ -ekv	21,06
Happamoituminen	accumulated exceedance (AE)	molc H ⁺ -ekv	6,2
Ekotoksisuus: makeassa vedessä	comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)	CTUe	1,92
Uusiutumattomat energiareсурssit	abiotic depletion potential (ADP): fossil fuels	MJ	8,32
Rehevöityminen: makeassa vedessä	fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	kg P-ekv	2,8
Rehevöityminen: meressä	fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)	kg N-ekv	2,96
Rehevöityminen: maalla	accumulated exceedance (AE)	molc N-eq	3,71
Myrkyllisyys ihmiselle: syöpää aiheuttavat	comparative toxic unit for human (CTUh)	CTUh	2,13
Myrkyllisyys ihmiselle: ei syöpää aiheuttavat	comparative toxic unit for human (CTUh)	CTUh	1,84
Ionisoiva säteily: vaikutukset terveyteen	human exposure efficiency relative to u235	kBq U235-eq	5,01
Maankäyttö	soil quality index	-	7,94
Materiaalien käyttö: mineraalit ja metallit	abiotic depletion potential (ADP): elements (ultimate reserves)	kg Sb-eq	7,55
Otsonikato	ozone depletion potential (ODP)	kg CFC-11-eq	6,31
Pienhiukkasten muodostuminen	impact on human health	disease inc.	8,96
Valokemiallinen otsonin muodostuminen: vaikutukset terveyteen	trospospheric ozone concentration increase	kg NMVOC-eq	4,78
Veden käyttö	user deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)	m ³ depriv.	8,51

LCA-analyysistä laaditaan lopuksi herkkyystarkastelu. Herkkyysanalyysiin valittavat tarkastelun kohteet valitaan vaikutustenarvioinnin tulosten pohjalta niistä tekijöistä, joilla on tuloksiin merkittävä vaikutus ja joissa arvioidaan olevan eniten epävarmuutta.

4.2 Inventaarioanalyysi

Inventaarioanalyysi toteutettiin suunnitelman mukaisesti. Tiedot kerättiin taulukossa 2 esitetyn tiedonkeruun suunnitelman mukaisesti useista eri lähteistä. Tiedonkeruun valmistuttua valmisteltiin mallinnus tuotejärjestelmäkuvaajien ja kerätyn tiedon pohjalta Activity Browser-ohjelmistolla. Mallinnuksessa hyödynnettiin osittain myös Ecoinvent-tietokannan sisältämiä aktiviteetteja, joista osaa käytettiin suoraan sellaisenaan ja osasta muokattiin esimerkiksi energian kulutukseen tai materiaalien käyttöön liittyviä aktiviteetteja vastaamaan paremmin mallinnettavaa tapausta.

Mallinnuksessa hyödynnettiin eri tuotejärjestelmien limittymistä tiettyjen prosessien osalta. Esimerkiksi samaa vihreän vedyn tuotannon yksikköprosessia voitiin hyödyntää sekä TJ2 että TJ4 malleissa.

Mallinnuksessa muodostettiin inventaario yhteensä kuudella eri lähtötiedoilla. Kaksi energiaskenaariota, joissa toisessa rinnakkaistuotteena syntyvä happi rajattiin pois ja toisessa huomioitiin. Neljässä ammoniakkiskenaariossa muodostettiin inventaariot siten, että ensimmäisessä sekä rinnakkaistuotteena syntyvät happi ja hukkalämpö rajattiin pois, toinen ja kolmas toisella näistä kahdesta rinnakkaistuotteesta ja neljännessä huomioiden molemmat.

4.3 Vaikutustenarviointi

Vaikutustenarvioinnissa inventaarioanalyysin tulokset suhteutetaan aiemmin kuvattuihin vaikutusluokkiin. Kaikkien kuuden laskennan yksityiskohtaiset tulokset ovat nähtävissä liitteestä I.

Taulukossa 6 on käyty esimerkinomaisesti läpi ensimmäisen energiaskenaarion osalta, mitä tuloksia mallinnuksesta saatiin ja miten EF-score muodostuu.

Taulukko 6. Tarkat LCIA-tulokset energiaskenaariosta 1. CC BY-ND

Energiaskenaario 1	Yksikkö	TJ1: nykytila	TJ2: Vihreään vetyyn perustuva järjestelmä	Painotus- kerroin	TJ1, painotettu	TJ2, painotettu
Uusiutumattomat energiaresurssit	MJ	2,29	1,47	8,32	19,02	12,25
Maankäyttö	-	2,09	5,98	7,94	16,63	47,45
Ekotoksisuus: makeassa vedessä	CTUe	0,34	1,53	1,92	0,66	2,95
Ilmastonmuutos	kg CO ₂ -eq	0,21	0,12	21,06	4,51	2,54
Vedenkäyttö	m ³ depriv.	0,03	0,08	8,51	0,23	0,71
Ionisoiva säteily: vaikutukset terveyteen	kBq U235-eq	0,00	0,01	5,01	0,01	0,06
Rehevöityminen: maalla	molc N-eq	0,00	0,00	3,71	0,01	0,01
Happamoituminen	molc H ⁺ -eq	0,00	0,00	6,20	0,01	0,01
Valokemiallinen otsonin muodostuminen: vaikutukset terveyteen	kg NMVOC-eq	0,00	0,00	4,78	0,00	0,00
Rehevöityminen: merellä	kg N-eq	0,00	0,00	2,96	0,00	0,00
Rehevöityminen: makeassa vedessä	kg P-eq	0,00	0,00	2,80	0,00	0,00
Materiaalien käyttö: mineraalit ja metallit	kg Sb-eq	0,00	0,00	7,55	0,00	0,00
Pienhiukkasten muodostuminen	disease inc.	0,00	0,00	8,96	0,00	0,00
Myrkyllisyys ihmiselle: ei syöpää aiheuttavat	CTUh	0,00	0,00	1,84	0,00	0,00
Otsonikato	kg CFC-11-eq	0,00	0,00	6,31	0,00	0,00
Myrkyllisyys ihmiselle: syöpää aiheuttavat	CTUh	0,00	0,00	2,13	0,00	0,00
EF score					41,07	65,97

Taulukosta 6 nähdään mallinnetun skenaarion vaikutukset vaikutusluokittain. Vasemmalta alkaen taulukosta voidaan lukea vaikutusluokkien nimi, yksikkö, painottamattomat tulokset ilmoitetussa yksikössä, vaikutusluokkaa koskeva painotuskerroin ja kahdessa viimeisessä sarakkeessa painotuskertoimen avulla luodut painotetut tulokset. Näistä painotetuista tuloksista voidaan laskea EF-score, joka näkyy alimmalla rivillä painotettujen tulosten summana. Taulukosta on myös korostettu ilmastonmuutoksen rivi, jonka arvoja käsitellään

tässä raportissa painottamattomina. Muiden skenaarioiden vastaavat taulukot ovat nähtävissä liitteestä I.

Taulukosta 7 nähdään yksinkertaistettu kuvaus vaikutustenarvioinnin tuloksista, jossa on esitetty kuuden eri skenaarion tulokset ilmastonmuutosten vaikutusten ja EF-scoren osalta eri tuotejärjestelmissä.

Taulukko 7. Energia- ja ammoniakkiskenaarioiden LCIA tulokset. CC BY-ND

	Rinnakkaistuotteiden huomioiminen		Nykytila		Vihreään vetyyn perustuva järjestelmä	
	Happi	Hukkalämpö	Ilmastovaikutus [kg CO ₂ -ekv / FU]	EF-score	Ilmastovaikutus [kg CO ₂ -ekv / FU]	EF-score
Energiaskenaario 1	Ei	-	0,21	41,07	0,12	65,97
Energiaskenaario 2	Kyllä	-	0,21	41,07	0,06	39,24
Ammoniakkiskenaario 1	Ei	Ei	2,83	445,67	0,94	519,07
Ammoniakkiskenaario 2	Kyllä	Ei	2,83	445,67	0,48	314,62
Ammoniakkiskenaario 3	Ei	Kyllä	2,83	445,67	-1,76	216,86
Ammoniakkiskenaario 4	Kyllä	Kyllä	2,83	445,67	-2,22	12,41

4.4 Tulosten tulkinta

Taulukosta 7 voidaan nähdä, että kaikkien skenaarioiden tapauksessa vihreän vedyn käyttäminen johtaa pienempiin ilmastovaikutuksiin verrattuna nykytilaan. Eron ollessa pienimmilläänkin ensimmäisen energiaskenaarion tapauksessa nykytilan ilmastovaikutukset ovat noin 75 % suuremmat kuin vihreään vetyyn perustuvassa skenaariossa. Suurimmillaan ero on neljännessä ammoniakkiskenaariossa.

Muiden ympäristövaikutusten osalta tilanne ei kuitenkaan ole yhtä selkeä. EF-scorea tarkastellessa vihreän vedyn käyttäminen aiheuttaa itse asiassa suurempia arvoja nykytilaan verrattuna, mikäli sivuvirrat jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Kuitenkin EF-scoren arvo on pienempi verrattuna nykytilaan kaikissa skenaarioissa, joissa sivuvirrat ovat tavalla tai toisella huomioitu. Viimeisessä ammoniakkiskenaariossa ero on jopa lähes 36-kertainen.

Tarkastellaan seuraavaksi tarkemmin eri skenaarioiden tuloksia eri vaikutusluokissa. Tuloksia tarkastellaan erityisesti vaikutusluokkien painotettujen tulosten näkökulmasta, koska alkuperäisten tulosten ollessa eri vaikutusluokissa eri yksiköissä, ei arvojen suora

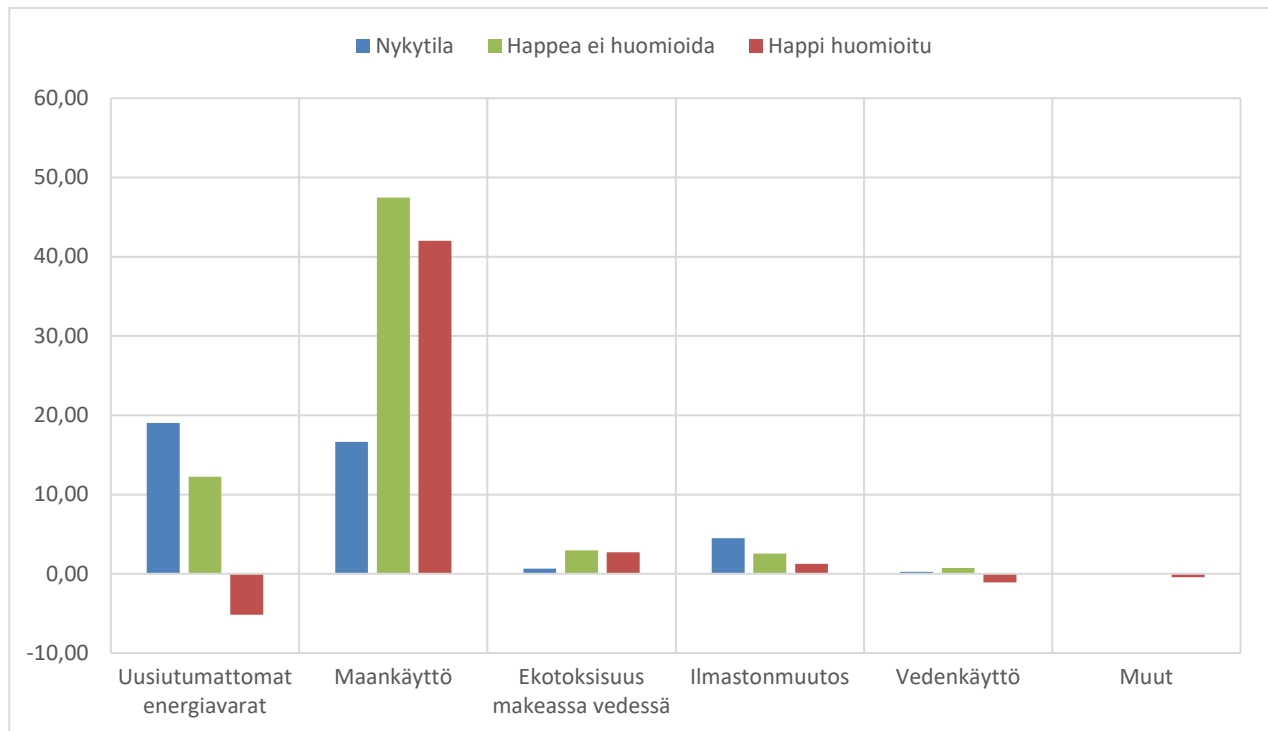
vertailu ole mielekästä. Täytyy kuitenkin muistaa, että EF-score tai sen painotuskertoimet eivät ole tarkka mittari ympäristövaikutusten arvioimiseksi, eikä menetelmä perustu luonnontieteisiin. EF-score antaa kuitenkin hyvin suuntaa ympäristövaikutusten kokonaisuudesta. Käytetty menetelmä on kehitetty yhdistelemällä julkiseen mielipidekyselyyn, LCA-asiantuntijoille suunnattuun mielipidekyselyyn sekä LCA-asiantuntijoille suunnatun webinaarin tuloksista muodostettuja painotuskertoimia. Menetelmässä on myös otettu huomioon eri vaikutusluokkien eriävät tasot luotettavuudessa ja kestävyudessa (Sala ym., 2018, s. 10).

Eri vaikutusluokat korostuvat eri skenaarioissa ja tuotejärjestelmissä, mutta uusiutumattomat energiareсурssit, ilmastonmuutos, ekotoksisuus makeassa vedessä, veden käyttö ja maankäyttö muodostavat viisi merkittävintä vaikutusluokkaa vaihtelevassa järjestyksessä näissä kaikissa. Kaikille skenaarioille ja tuotejärjestelmille on myös yhteistä, että rehevöitymisvaikutukset merellä ja makeassa vedessä, materiaaliressurit: mineraalit ja metallit, otsonikato, pienhiukkasten muodostuminen, sekä myrkyllisyys ihmiselle saavat hyvin pieniä arvoja eivätkä korostu tuloksissa lainkaan muihin vaikutusluokkiin verrattuna. Näiden vaikutusluokkien väliin jäävät luokat saavat vaihtelevasti pieniä arvoja, mutta eivät korostu juurikaan viiteen merkittävimpään verrattuna.

Energiaskenaarioiden painotettuja LCIA-tuloksia tarkastellessa voidaan huomata, että ympäristövaikutukset nykytilassa (TJ1) muodostuvat yli 86 prosenttisesti uusiutumattomien energiareсурssien käyttämisestä ja maankäytön vaikutuksista. Vastaavasti vihreää vetyä hyödyntävän järjestelmän (TJ2) ympäristövaikutuksista noin 70–80 % muodostuu yksinomaan maankäytön vaikutuksista. Merkittävimmät erot kahden energiaskenaarion välillä muodostuivat uusiutumattomien energiareсурssien, maankäytön ja vedenkäytön vaikutusluokissa, kun rinnakkaistuotteena syntyvä happi huomioidaan tuotejärjestelmässä. Tulosten pohjalta voidaan siis päätellä, että merkittävimmät muutokset siirtyessä vihreää vetyä hyödyntävään energijärjestelmään Etelä-Pohjanmaalla tapahtuisivat uusiutumattomien energiavarojen käytössä ja ilmasto-vaikutuksissa vähentävästi, mutta maankäytön vaikutusten suhteen lisäävästi.

Kuviossa 8 on esitetty painotetut tulokset energiaskenaarioissa nykytilan ja vihreään vetyyn perustuvan järjestelmien välillä. Kuvaajassa näkyy viisi merkittävintä

vaikutusluokkaa omina palkkeinaan, ja loput 11 vaikutusluokkaa yhdistettynä palkkiin "Muut".



Kuvio 8. LCIA-analyysin tulokset energiaskenaarioissa. Tulokset kuvattu painotettuina. CC BY-ND

Ilmastovaikutuksiin ja uusiutumattomien energiavarojen käyttöön vaikuttivat mallinnuksen perusteella erityisesti nykytilaa kuvaavassa tuotejärjestelmässä turpeen polttaminen ja vihreään vetyyn perustuvassa järjestelmässä taustaprosesseihin kuuluvat infrastruktuurin rakentamiseen liittyvät aktiviteetit. Näistä merkittävimpiä ovat elektrolyysilaitoksen rakennus ja energiantuotantoon liittyvä tuuli- ja aurinkovoimaloiden rakentaminen. Maankäyttöön vaikutti eniten nykytilassa puu- ja biopohjaisten polttoaineiden käyttäminen ja vihreää vetyä hyödyntävässä järjestelmässä aurinkopaneelien asentaminen. Vedenkäytön vaikutuksista nykyjärjestelmässä suurin osa muodostuu turpeen tuotannosta ja polttamisesta sekä tuulivoimaloiden rakennusvaiheesta. Mikäli rinnakkaistuotteena syntyvä happi huomioidaan, siihen liittyvällä hapen ilmaerotuksen yksikköprosessilla on huomattava merkitys kaikissa muissa edellä mainituissa vaikutusluokissa maankäyttöä lukuun ottamatta, jossa vaikutus on suhteellisesti vähäisempi.

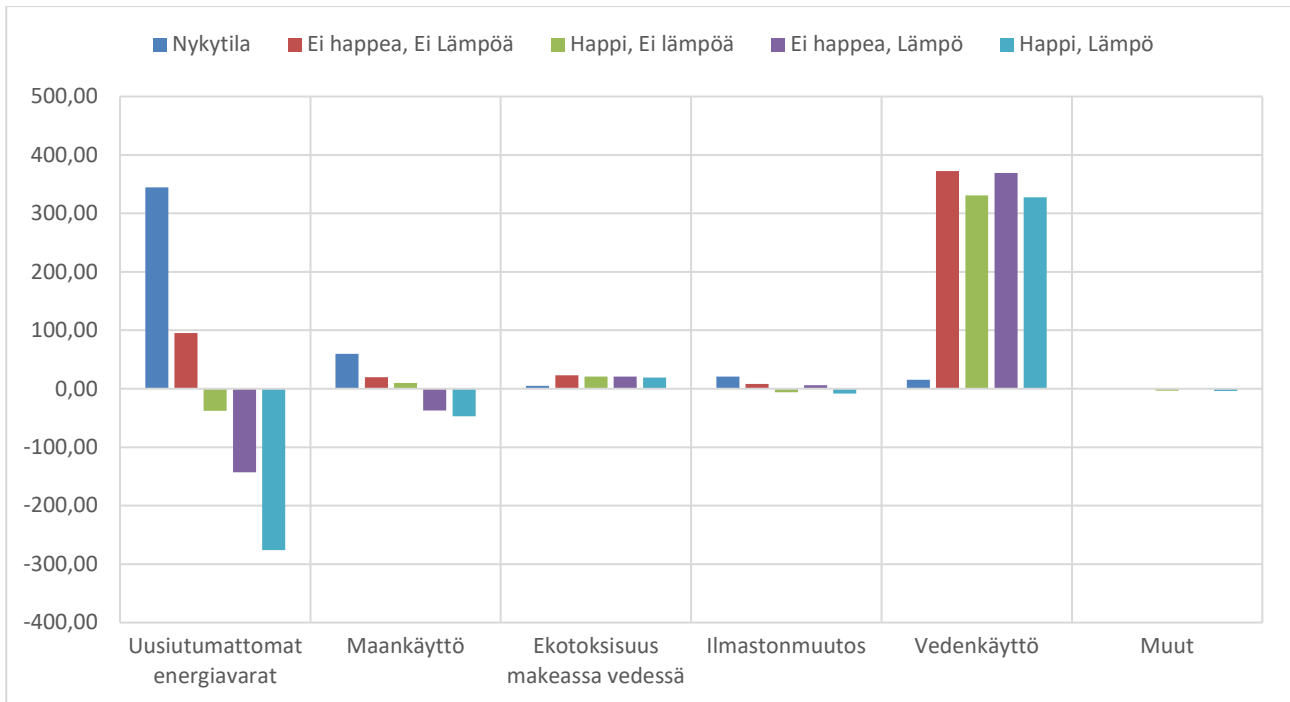
Ammoniakkiskenaarioiden painotetuista LCIA tuloksista nähdään, että ylivoimaisesti merkittävin yksittäinen vaikutusluokka nykytilaa kuvaavassa järjestelmässä (TJ3) on uusiutumattomien energiavarojen käyttö muodostaen noin 77 % ympäristövaikutuksista.

Muita merkittäviä vaikutusluokkia ovat ilmastonmuutos (13 %) ja veden käyttö (5 %). Vihreää vetyä hyödyntävän järjestelmän (TJ4) ympäristövaikutuksista kaikissa skenaarioissa maankäytön vaikutusluokka on selvästi merkittävin muodostaen skenaarion mukaan 48–80 % vaikutuksista. Muita merkittäviä vaikutusluokkia tässä järjestelmässä ovat uusiutumattomat energiavarat, ilmastonmuutos ja ekotoksisuus makealle vedelle.

Merkittävimmin arvot vaihtelevat eri skenaarioiden välillä uusiutumattomissa energiavaroissa, ilmastonmuutoksessa ja maankäytössä. Tuloksien pohjalta voidaan päätellä, että vihreään vetyyn perustuvaan järjestelmään siirtyminen vähentää merkittävästi uusiutumattomien energiavarojen käyttöä, ilmastonmuutokseen liittyviä vaikutuksia sekä vedenkäyttöä, mutta lisää erityisesti maankäyttöä sekä ekotoksisuutta makeassa vedessä, mikäli sivuvirtoja ei huomioida.

Kun ammoniakkiskenaarioissa tuotejärjestelmään otetaan huomioon rinnakkaistuotteina syntyvä happi ja elektrolyysin hukkalämpö, vaikutusluokkien painoarvot muuttuvat. Rinnakkaistuotteena syntyvän hapen huomioiminen vaikuttaa erityisesti uusiutumattomien energiavarojen käyttöön, maankäyttöön, vedenkäyttöön sekä ilmastonmuutokseen. Elektrolyysistä syntyvän hukkalämmön hyödyntäminen turpeella tuotetun energian korvaajana vaikuttaa taas voimakkaasti uusiutumattomien energiavarojen käytössä ja ilmastovaikutuksissa, mutta ei juurikaan muissa vaikutusluokissa.

Kuviossa 9 on esitetty painotetut tulokset ammoniakkiskenaarioissa nykytilan ja vihreään vetyyn perustuvan järjestelmien välillä. Kuvaajassa näkyy viisi merkittävintä vaikutusluokkaa omina palkkeinaan, ja loput 11 vaikutusluokkaa yhdistettynä palkkiin ”Muut”.



Kuvio 9. LCIA-analyysin tulokset ammoniakkiskenaarioissa. Tulokset kuvattu painotettuina. CC BY-ND

Ilmastovaikutuksiin ja uusiutumattomien energiavarojen käyttöön vaikuttavat nykytilaa kuvaavassa järjestelmässä ammoniakin tuotanto ja siinä erityisesti maakaasun käyttö vedyn ja energian lähteenä. Vihreään vetyyn perustuvan järjestelmän tapauksessa ilmastovaikutukset ja uusiutumattomien energiavarojen käyttö muodostuvat enimmäkseen vedyn tuotantolaitoksen sekä tuuli- ja aurinkovoimaloiden rakennusvaiheissa syntyvistä päästöistä, kuten energiaskenaariossakin. Maankäytön vaikutuksista nykytilassa merkittävimmät vaikutukset syntyvät ammoniakin tuotantolaitosten rakennusvaiheesta ja vihreään vetyyn perustuvassa järjestelmässä aurinkopaneelien rakennusvaiheesta. Vedenkäytön suhteen nykytilassa merkittävimmät vaikutukset syntyvät ammoniakin tuotantoprosessissa ja vihreään vetyyn perustuvassa järjestelmässä aurinkopaneelien tuotannosta.

Jos sivuvirtana syntyvä happi sisällytetään tuotejärjestelmään, vaikuttaa se suhteellisessa tarkastelussa merkittävästi maankäyttöä lukuun ottamatta kaikkiin merkittäviin vaikutusluokkiin, kuten energiaskenaarion tapauksessa. Sama ilmiö on havaittavissa sivuvirtana hyödynnettävän elektrolyysin hukkalämmön tapauksessa.

Tässä LCA selvityksessä on tehty useita mallinnusta yksinkertaistavaa oletuksia. Kun tarkastellaan analyysin toteutusta ja tuloksia, voidaan tehdä päätelmiä merkittävimmistä

oletuksista esimerkiksi merkittävimpien yksikköprosessien ja vaikutusluokkien kautta sekä tarkastelemalla luotujen skenaarioiden eroja. Merkittävimpien analyysiin vaikuttaneiden oletusten tunnistamisen myötä voidaan päättää herkkyystarkasteluun valittavat tarkasteltavat tekijät.

Yleisesti paljon laskennan tuloksiin voi vaikuttaa oletettu vedyn hukkaprosentti mallinnuksessa, joten tämä valitaan yhdeksi herkkyyksanalyysin tarkasteltavaksi oletukseksi. Euroopan yhteisen tutkimuskeskuksen raportin mukaan vetykaasun toimitusketjun vuodot ovat tällä hetkellä noin 4,2 % ja ennuste vuonna 2030 3 %. Tämä on vain arvio tulevaisuudesta, mutta koska tuossa skenaariossa on huomioitu ajoneuvokuljetuksessa aiheutuvat vuodot, arvioimme tämän selvityksen tilanteessa vuotojen olevan hieman pienemmät. Mallinnuksessa käytettävää 2,5 % hukkaa vertaillaan 1 %:n minimiarvoon ja 5 %:n maksimiarvoon. Tätä vaihteluväliä perustellaan sillä, että Euroopan yhteisen tutkimuskeskuksen raportin perusteella vuonna 2030 missään kuvatussa arvoketjussa hukka ei ole yli 5 % ja vastaavasti pienimmillään hukan arvioidaan raportissa olevan 2030 pienempi kuin 1 % (Arrigoni & Bravo Diaz, 2022, s. 20).

Herkkyyksanalyysiin valitaan energian tai ammoniakkin tuotantoon vaikuttava infrastruktuuri sisältäen esimerkiksi tuotantolaitokset, voimalat ja varastoinnin. Infrastruktuurin rakennusvaiheiden päästöjen allokointiin vaikuttaa suorimmin oletettu elinkaaren pituus, joten herkkyystarkastelu toteutetaan ± 25 % vaihtelulla elinkaaren oletettuun pituuteen. Infran elinkaaren pituus valitaan herkkyystarkasteluun, koska tämä voi vaihdella laitoskohtaisesti paljon ja infrastruktuurilla on LCIA-tulosten pohjalta hyvin merkittävät vaikutukset useissa skenaarioissa ja vaikutusluokissa.

Herkkyystarkastelussa keskitytään ainoastaan itse mallinnettuihin yksikköprosesseihin, joten Ecoinventin prosesseja esimerkiksi ammoniakkin tuotannon nykytilassa tai energiantuotannon nykytilassa ei sovelleta herkkyystarkasteluun. Sivuvirtojen rajauksella on myös huomattava merkitys tuloksiin. Tämä on kuitenkin huomioitu jo muodostamalla erilaisia skenaarioita, joten tätä ei huomioida erikseen herkkyyksanalyysissä.

Taulukossa 8 on nähtävissä herkkyyksanalyysin tulokset huomioiden vedyn hukkaprosentin ja infran elinkaaren pituuden muutokset. Samassa taulukossa on esitetty ilmastovaikutukset sekä EF-score eri väreillä selkeyden vuoksi. Taulukossa on esitetty tulokset sekä energia- että ammoniakkiskenaarioille. ISO 14044 standardin määritelmän

mukaisesti yli 10 % herkkyttä voidaan pitää merkittävänä (Suomen standardisoimisliitto, 2020). Taulukosta voidaan nähdä, että vedyn hukkaprosentin muuttuminen 2,5 %:n perustasosta 1 %:iin tai 5 %:iin ei vaikuta merkittävästi kummassakaan skenaariossa. Suurin vaihtelu syntyy hukkaprosentin nousemisesta 5 %:iin energiaskenaariossa, jolloin EF-scoren herkkyys on noin 2,4 %.

Infran elinkaaren pituudella on taas huomattavasti vedyn hukkaprosenttia merkittävämpi vaikutus LCIA-tuloksiin. 10 %:n raja herkkyydessä ylittyy kahdessa tapauksessa, eli ilmastovaikutuksissa sekä energia- että ammoniakkiskenaarioissa, kun infran elinkaaren pituus laskee 25 %. Muissakin tapauksissa herkkyyden arvo on selvästi koholla sen ollessa matalimmillaan noin 4,1 %:a EF-scoren tapauksessa ammoniakkiskenaariossa elinkaaren pituuden kasvaessa 25 %.

Taulukko 8. Herkkyysanalyysin tulokset. CC BY-ND

Energiaskenaario		Vedyn hukkaprosentti					
Ilmastovaikutukset	EF-score	1 %	2,5 %	5 %	1 %	2,5 %	5 %
Vihreään vetyyn perustuva järjestelmä		0,119	0,120	0,123	65,024	65,975	67,560
Absoluuttinen poikkeama		-0,002	-	0,003	-0,951	-	1,585
Herkkyys [%]		1,4	-	2,4	1,4	-	2,4
Ammoniakkiskenaario		Vedyn hukkaprosentti					
Vihreään vetyyn perustuva järjestelmä		0,925	0,938	0,960	511,883	519,069	531,045
Absoluuttinen poikkeama		-0,013	-	0,022	-7,186	-	11,976
Herkkyys [%]		1,4	-	2,3	1,4	-	2,3
Energiaskenaario		Infran elinkaaren pituus					
Ilmastovaikutukset	EF-score	-25 %	±0 %	25 %	-25 %	±0 %	25 %
Vihreään vetyyn perustuva järjestelmä		0,136	0,120	0,111	70,547	65,975	63,231
Absoluuttinen poikkeama		0,016	-	-0,009	4,572	-	-2,743
Herkkyys [%]		13,0	-	7,8	6,9	-	4,2
Ammoniakkiskenaario		Infran elinkaaren pituus					
Vihreään vetyyn perustuva järjestelmä		1,058	0,938	0,866	553,710	519,069	497,807
Absoluuttinen poikkeama		0,120	-	-0,072	34,641	-	-21,262
Herkkyys [%]		12,8	-	7,7	6,7	-	4,1

5 VEDYNTUOTANNON ILMASTOVAIKUTUSTEN VÄHENNYSPOSENTIAALI

Epäorgaanisten lannoitteiden tarpeen Etelä-Pohjanmaalla arvioitiin analyysin perusteella olevan noin 17 600 t/a, sähkönkulutuksen 2159 GWh/a ja lämmitysenergian tarpeen 1677 GWh/a. Maa- ja puutarhatalouden osuus Etelä-Pohjanmaan energiankulutuksesta on 1270 GWh/a, eli noin neljäsosan koko Etelä-Pohjanmaan energiankulutuksesta (Tilastokeskus, 2020). Arvioidaan seuraavaksi näiden tarpeiden mukainen ilmastovaikutusten vähennyspotentiaali vihreän vedyn avulla LCA-analyysin tulosten pohjalta. Arvio tehdään ainoastaan ilmastovaikutuksille, koska EF-scoren vähentämispotentiaalin arvioiminen ei ole samalla tavalla mielekästä arvoon liittyvien epävarmuuksien takia.

Oletetaan epäorgaanisten lannoitteiden tarpeen tyydyttyvän suoraan ammoniakilla ilman jatkojalostusta laskennan yksinkertaistamiseksi. Energian tuotannossa otetaan huomioon, että LCA-mallinnuksessa on käytetty toiminnallisena yksikkönä yksinkertaistetusti energiaa, eikä lämpö- ja sähköenergiaa ole tässä eritelty. On kuitenkin tiedossa vihreään vetyyn perustuvan tuotejärjestelmän sähkö- ja lämpöenergian suhde, jolloin voidaan laskea vihreään vetyyn perustuvalla järjestelmällä tuotettavan energian määrä, jotta Etelä-Pohjanmaan molemmat tarpeet tulevat tyydytetyiksi. Taulukossa 9 on esitetty Etelä-Pohjanmaan epäorgaanisten typpilannoitteiden tarve, energiantarpeet, suhteelliset osuudet sekä mallinnetussa vihreään vetyyn perustuvassa järjestelmässä syntyvien sähkö- ja lämpöenergioiden suhteelliset osuudet. Vedyn avulla tuotetusta energiasta lasketut sähkö- ja lämpöenergian suhteet ovat selvitetty laskemalla kummallekin suhde vedystä saatavaan kokonaisenergiaan perustuen laskelmiin taulukossa 3. Näiden tietojen pohjalta nähdään, että järjestelmä tyydyttää viimeisenä sähköenergiantarpeen, joten lämpöenergiaa tuotetaan tällöin yli oman tarpeen. Lämmöntuotanto jakaantuu kuitenkin ympäri vuoden, joten kaikkea lämpöä ei välttämättä voida hyötyä käyttää, vaikka sitä varastoitaisiinkin.

Taulukko 9. Tyypilannoitteiden ja energiantarpeet Etelä-Pohjanmaalla. CC BY-ND

Tyypilannoitteiden tarve	17 600	[t/a]
Sähköenergian tarve	2159	[GWh/a]
Lämmitysenergian tarve	1677	[GWh/a]
Energian kulutus EP:llä maa- ja puutarhatalous 2020	1270	[GWh/a]
Sähköenergian tarpeen suhteellinen osuus energiantarpeesta	0,56	osuus
Lämpöenergian tarpeen suhteellinen osuus energiantarpeesta	0,44	osuus
Maa- ja puutarhatalouden tarpeen suhteellinen osuus energiantarpeesta	0,33	osuus
Vedyn avulla tuotetusta energiasta sähköä	0,43	osuus
Vedyn avulla tuotetusta energiasta lämpöä	0,57	osuus
Tarvittava vetyenergia, jotta molemmat tarpeet täyttyvät	5054,95	[GWh/a]
Ylijäämä lämpö	1218,95	[GWh/a]

Taulukon 9 arvojen perusteella voidaan laskea, kuinka paljon vihreään vetyyn perustuvaan järjestelmään siirtymisellä olisi potentiaalia ilmastovaikutusten vähentämiseen. Taulukossa 10 on esitetty vältetyt ilmastovaikutukset, mikäli vihreän vetyyn perustuvaa järjestelmää verrataan nykytilaan. Arvot on laskettu siten, että koko tarve korvataan nykyisestä järjestelmästä tässä raportissa esitetyllä vihreään vetyyn perustuvalla järjestelmällä. Energiaskenaariossa arvo on laskettu sekä koko Etelä-Pohjanmaalle että rajattuna maa- ja puutarhatalouden energiankulutukselle Etelä-Pohjanmaalla.

Taulukko 10. Ilmastovaikutusten vähennyspotentiaali koko tarpeelle. CC BY-ND

Skenaario	Ilmastovaikutusten vähennyspotentiaali koko tarpeelle [Mt CO₂-ekv]
Energiaskenaario 1 (koko Etelä-Pohjanmaa)	-0,09
Energiaskenaario 2 (koko Etelä-Pohjanmaa)	0,36
Energiaskenaario 1 (maa- ja puutarhatalous)	-0,03
Energiaskenaario 2 (maa- ja puutarhatalous)	0,12
Ammoniakkiskenaario 1	0,03
Ammoniakkiskenaario 2	0,04
Ammoniakkiskenaario 3	0,08
Ammoniakkiskenaario 4	0,09

Taulukosta 10 huomataan, että energiaskenaarioissa 2 vähennyspotentiaali on huomattavasti suurempi verrattuna muihin skenaarioihin. Tämä johtuu enimmäkseen energiantarpeen merkittävästi suuremmasta volyymistä verrattuna epäorgaanisten tyypilannoitteiden tarpeeseen. Lisäksi voidaan huomata, että energiaskenaarioissa 1

vaikutukset ovat negatiiviset. Taulukossa 11 on nähtävissä eri skenaarioissa ilmastovaikutusten vähentyminen suhteessa järjestelmien nykytilan ilmastovaikutuksiin.

Taulukko 11. Vähennyspotentiaalain osuus sektorin kokonaispäästöistä eri skenaarioissa. CC BY-ND

E-P:n energiantuotannon ilmastovaikutus kokonaisuudessaan	0,82	Mt CO ₂ -ekv
Vähennys energiaskenaario 1	-11,51	%
Vähennys energiaskenaario 2	44,15	%
E-P:n alueella käytettävän ammoniakkin ilmastovaikutus kokonaisuudessaan	0,05	Mt CO ₂ -ekv
Vähennys ammoniakkiskenaario 1	66,88	%
Vähennys ammoniakkiskenaario 2	83,11	%
Vähennys ammoniakkiskenaario 3	162,27	%
Vähennys ammoniakkiskenaario 4	178,50	%

Taulukon 11 perusteella nähdään, että ammoniakkiskenaarioissa suhteellinen päästövähennys oman sektorin päästöistä olisi energiaskenaarioita selvästi merkittävämpi. Huomion arvoista on myös se, että kahdessa viimeisessä ammoniakkiskenaariossa vähennyspotentiaali on nykytilan ilmastovaikutuksia suurempi, joten tällöin järjestelmän muutos on laskennallisesti hiilinegatiivinen. Huomattavaa on myös ensimmäisen energiaskenaarion negatiivinen vaikutus. Koska eri sektoreiden volyymien erot aiheuttavat eroavaisuuksia tuloksissa, ilmastovaikutusten vähennyspotentiaali suhteutettiin myös yhtä vetykiloa kohden. Taulukko 12 osoittaa, kuinka paljon yksi vetykilo aiheuttaa ilmastovaikutusten vähennystä kussakin skenaariossa.

Taulukko 12. Yhden vetykilon tuottama ilmastovaikutusten vähennyspotentiaali eri skenaarioissa. CC BY-ND

Skenaario	Vähennyspotentiaali [kg CO₂-ekv / kg H₂]
Energiaskenaario 1	3,72
Energiaskenaario 2	6,11
Ammoniakkiskenaario 1	10,64
Ammoniakkiskenaario 2	13,23
Ammoniakkiskenaario 3	25,83
Ammoniakkiskenaario 4	28,41

Kun tulokset suhteutetaan tällä tavalla vetykiloa kohden, voidaan huomata ammoniakkiskenaarioiden aiheuttavan selvästi energiaskenaarioita suuremman ilmastovaikutusten vähennyspotentiaalain.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Etelä-Pohjanmaan potentiaali uusiutuvan sähköenergian tuotannossa on merkittävä. Kaikelle uusiutuvalle sähkölle täytyy kuitenkin keksiä jotain käyttöä ja tässä vetytalous voi tulla apuun. Maatalouden lannoitetarpeisiin tarvittava vety ja ammoniakki on mahdollista korvata täysin uusiutuvaan sähköntuotantoon perustuvaksi. On jopa mahdollista, että koko Etelä-Pohjanmaan kuluttama sähkö on jossain vaiheessa 2030-lukua mahdollista korvata uusiutuvalla energiantuotannolla ja vedyn käytöllä.

Ongelmaksi muodostuu ensiksi vedyn tuotannon kustannukset. Elektrolyysit ovat vielä tällä hetkellä niin kalliita, että niitä ei voi ajaa pelkästään uusiutuvalla energialla, vaan ne vaativat suuremman käyttöasteen ollakseen taloudellisesti kannattavia. Uusiutuvaa sähköä käytetään tietysti aina ensisijaisesti sähkönä ja vain ylijäämä sähköä voidaan käyttää vedyn tuotantoon, mikä pienentää myös elektrolyysereiden potentiaalista käyttöaikaa pelkästään uusiutuvalla energialla. Toinen ongelma on vedyn varastointi ja jakeluketjun puuttuminen. Molempiin ongelmiin on kehitteillä ratkaisuja ja jos ne saadaan toimimaan, vetytaloudella on mahdollisuudet kasvaa Etelä-Pohjanmaalla merkittäväksi teollisuuden alaksi.

Eri skenaarioille tehtyjen laskelmien perusteella uusiutuvalla energialla tuotetulla vedyllä on mahdollisuus pienentää energia- ja typpilannoitesektoreiden ympäristövaikutuksia ja erityisesti ilmastovaikutuksia. Vähennyspotentiaalın määrä riippuu siitä, voidaanko elektrolyysissä sivutuotteina syntyvää happea ja lämpöä hyödyntää ja miten prosessissa syntyvät ympäristövaikutukset allokoidaan eri tuotteiden kesken. Hapen hyötykäyttö voisi korvata muuta hapentuotantoa ja siten vähentää ympäristövaikutuksia. Lämmön hyötykäyttö vähentää Suomen oloissa käytännössä fossiilisten ja biopohjaisten polttoaineiden käyttöä, Etelä-Pohjanmaan tapauksessa siis lähinnä turpeen käyttöä.

Vedyn tuotannolla on omat ympäristövaikutuksensa ja kaikkein vaikutusluokkien osalta elektrolyysiin perustuva vedyn tuotanto ei ole välttämättä paras vaihtoehto. Maankäytöllä on merkittävä osuus uusiutuvassa energiantuotannossa ja lisäksi elektrolyyseri- sekä ammoniakintuotantolaitosten rakentaminen kuluttaa luonnonvaroja, joiden määrät riippuvat hieman käytetyistä tekniikoista. Esimerkiksi tässä raportissa tarkastellut PEM-elektrolyysit ovat riippuvaisia harvinaisista metalleista.

Eräs yllättävä tulos ympäristövaikutuksiin liittyen ilmeni vedenkäytön vaikutusluokassa. Vaikka usein ajatellaan, että elektrolyysin runsas vedenkäyttö aiheuttaa merkittävän vesijalanjäljen, tuloksien perusteella kuitenkin vedenkäytön vaikutukset ovat kaikissa skenaarioissa huomattavasti pienempiä vihreään vetyyn perustuvissa skenaarioissa verrattuna nykytilaan. Tulosten syvemmän analysoinnin perusteella nykytilassa SMR-prosessin kuluttama vesi ja sähköenergian tuotanto turpeella aiheuttavat merkittäviä vaikutuksia vedenkäytölle, mikä selittää tulosta.

Tämän raportin laskennassa ei ole huomioitu vedyn ilmastovaikutuksia, koska niistä tiedetään vielä verrattain vähän eivätkä käytetyt laskentamenetelmät ota niitä huomioon (Ocko & Hamburg, 2022, s. 2 & 11). Vedyn vapautuminen kuitenkin hidastaa metaanin hajoamista ja se lisää otsonin määrää ylemmässä ilmakehässä ja vesihöyryä alemmassa ilmakehässä. Näillä on ilmakehässä lämmittävä vaikutus, jonka vaikutusaika on noin 10–20 vuotta. Tutkimuksen mukaan vedyn GWP-100 kerroin on noin 11, mikä tarkoittaisi esimerkiksi energiaskenaarion 1 tapauksessa noin 1,6 % kasvua ilmastovaikutuksille, mikäli se huomioitaisiin.

7 YHTEENVETO

Etelä-Pohjanmaalle on rakentumassa merkittävä määrä uusiutuvan energian tuotantoa ja sitä on mahdollista hyödyntää vedyn tuotantoon. Uusiutuvalla vedyllä voidaan korvata maakaasusta tuotettavaa vetyä ja näin ollen vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. Vedystä voidaan myös tuottaa ammoniakkaa, jota voidaan käyttää typpilannoitteena joko sellaisenaan tai jatkojalosteena. Vihreästä vedystä tuotetulla ammoniakilla voidaan korvata tällä hetkellä ulkomailta, lähinnä Venäjältä ja muualta Euroopasta tuotavaa fossiilisista polttoaineista tuotettua ammoniakkaa. Samalla Etelä-Pohjanmaan ja koko Suomen omavaraisuus parantuu, kun typpilannoitteita voidaan tuottaa puhtaasti kotimaassa.

Pelkästään Etelä-Pohjanmaan typpilannoitetarpeeseen vedyntuotannon osalta riittää 25 MW elektrolyyserikapasiteetti ja vastaavasti koko Etelä-Pohjanmaan energiankulutuksen kattamiseen noin 950 MW yhteenlaskettu elektrolyyserikapasiteetti. Etelä-Pohjanmaan uusiutuvien energiantuotantomuotojen yhteenlaskettu kapasiteetti vuonna 2030 on todennäköisesti välillä 7000–10000 GWh ja tällaisella energiantuotantomäärällä voitaisiin teoriassa käyttää noin 800–1150 MW elektrolyyserikapasiteettia. Etelä-Pohjanmaan uusiutuvan energiantuotannon potentiaali on siis huomattavasti suurempi, kuin mitä pelkästään typpilannoitteiden tuotantoon vaaditaan ja tulevaisuudessa mahdollisesti jopa riittävä sähköntuotannon kattamiseen käyttäen vetyä energiavarastona.

LCA-analyysin perusteella vihreään vetyyn perustuva järjestelmä energiasektorilla sekä epäorgaanisten typpilannoitteiden tuotannossa olisi selvästi nykytilaa parempi vaihtoehto ilmastovaikutusten näkökulmasta. Kuitenkin tarkastellessa useita vaikutusluokkia yhdistelevää EF-scorea, paras järjestelmä vaihtelee sen mukaan, miten rinnakkaistuotteet käsitellään. Mikäli rinnakkaistuotteina syntyvät happi ja elektrolyysin hukkalämpö huomioidaan tuotejärjestelmässä, on vihreään vetyyn perustuva järjestelmä myös tästä näkökulmasta parempi vaihtoehto. Jos rinnakkaistuotteet jätetään tarkastelun ulkopuolelle, nykytilaan perustuvat järjestelmät ovat järkevämpiä energiasektorilla ja typpilannoitteiden tuotannossa johtuen vihreän vedyn tuottamisessa syntyvistä merkittävistä vaikutuksista maankäyttöön.

LÄHTEET

- Arrigoni, A., & Bravo Diaz, L. (2022). *Hydrogen emissions from a hydrogen economy and their potential global warming impact: Summary report of the Clean Hydrogen Joint Undertaking expert workshop on the Environmental Impacts of Hydrogen*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/065589>
- Baral, S., & Šebo, J. (2024). Techno-economic assessment of green hydrogen production integrated with hybrid and organic Rankine cycle (ORC) systems. *Heliyon*, 10(4), e25742. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25742>
- Energiateollisuus. (2022a). *Kaukolämmön ja yhteistuotantosähkön tuotantoon käytetyt polttoaineet, alempi lämpöarvo* [Dataset]. <https://energia.fi/tilastot/kaukolampotilasto/>
- Energiateollisuus. (2022b). *Sähköntuotanto maakunnittain* [Dataset]. <https://energia.fi/tilastot/sahkotilastot/sahkontuotanto-ja-kaytto/>
- Energiateollisuus. (2023). *Sähkönkulutus maakunnittain* [Dataset]. <https://energia.fi/tilastot/sahkotilastot/sahkontuotanto-ja-kaytto/>
- EPV Energy. (2021). *Suomen ensimmäinen Power-to-X-to-Power-vetyjärjestelmä Vaasaan*. EPV. <https://www.epv.fi/project/power-to-x-to-power/>
- Flexens. (2023). *Flexens Kokkola | Green hydrogen & green ammonia production in Finland*. <https://www.flexenskokkola.fi>
- Hristovski, K. D., Dhanasekaran, B., Tibaquirá, J. E., Posner, J. D., & Westerhoff, P. K. (2009). Producing drinking water from hydrogen fuel cells. *Journal of water supply: Research and technology—AQUA*, 58(5), 327. <https://doi.org/10.2166/aqua.2009.103>
- Iberdrola. (2024). *Iberdrola builds the largest green hydrogen plant for industrial use in Europe*. <https://www.iberdrola.com/about-us/what-we-do/green-hydrogen/puertollano-green-hydrogen-plant>

- International Energy Agency. (2021). *Ammonia technology roadmap: Towards more sustainable nitrogen fertiliser production*. OECD. <https://doi.org/10.1787/f6daa4a0-en>
- Jonsson, F., & Miljanovic, A. (2022). *Utilization of waste heat from hydrogen production*. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn%3Anbn%3Ase%3Amdh%3Adiva-59079>
- Järvenranta, K., Kapuinen, P., Keskitalo, M., Kykkänen, S., Känkänen, H., Luostarinen, S., Mattila, P., Niskanen, O., Palojärvi, A., Pennanen, T., Pesonen, L., Pussi, K., Pyykkönen, V., Rasa, K., Salo, T., Schulman, A., Seppänen, A.-M., Suokannas, A., Tampio, E., ... Lehto, J. (2022). *Maatalouden typpihaaste – vaihtoehtoja ja ratkaisuja*. Luonnonvarakeskus. https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/551964/luke-luobio_53_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Kyriakou, V., Garagounis, I., Vourros, A., Vasileiou, E., & Stoukides, M. (2020). An Electrochemical Haber-Bosch Process. *Joule*, 4(1), 142–158. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.10.006>
- Ocko, I. B., & Hamburg, S. P. (2022). Climate consequences of hydrogen emissions. *Atmospheric chemistry and physics*, 22(14), 9349–9368. <https://doi.org/10.5194/acp-22-9349-2022>
- Solutions. (1.6.2023). *P2X Solutionsin Harjavallan vetylaitos saavutti harjakorkeutensa – P2X Solutions*. <https://p2x.fi/p2x-solutionsin-harjavallan-vetylaitos-saavutti-harjakorkeutensa/>
- Preuster, P., Alekseev, A., & Wasserscheid, P. (2017). Hydrogen Storage Technologies for Future Energy Systems. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*, 8(1), 445–471. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060816-101334>
- Rauhala, A.-M. (2021a). *Energiantuotanto-Pohjanmaalla-ja-Etela-Pohjanmaalla-2050-selvityksen-liitteet-saavutettava*. <https://www.obotnia.fi/assets/Sidor/1/206/Energiantuotanto-Pohjanmaalla-ja-Etela-Pohjanmaalla-2050-selvityksen-liitteet-saavutettava.pdf>
- Rauhala, A.-M. (2021b). *Energiantuotanto-Pohjanmaalla-ja-Etela-Pohjanmaalla-2050-selvityksen-liitteet-saavutettava*. <https://epliitto.fi/wp-content/uploads/2021/06/Energiantuotanto-Pohjanmaalla-ja-Etela-Pohjanmaalla-2050-selvityksen-liitteet-saavutettava.pdf>

- Ringsgwandl, L. M., Schaffert, J., Brücken, N., Albus, R., & Görner, K. (2022). *Current legislative framework for green hydrogen production by electrolysis plants in Germany*. *Energies*, 15(5), 1786. <https://doi.org/10.3390/en15051786>
- Sala, S., Cerutti, A. K., & Pant, R. (2018). *Development of a weighting approach for the environmental footprint*. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/RC106545>
- Sazali, N., Wan Salleh, W. N., Jamaludin, A. S., & Mhd Razali, M. N. (2020). *New Perspectives on Fuel Cell Technology: A Brief Review*. *Membranes*, 10(5), 99. <https://doi.org/10.3390/membranes10050099>
- Singh, M., Zappa, D., & Comini, E. (2021). Solid oxide fuel cell: Decade of progress, future perspectives, and challenges. *International journal of hydrogen energy*, 46(54), 27643–27674. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.020>
- Spoof-Tuomi, K. (2024a). *Sources and technologies for green hydrogen production: A review: "Hydrogen economy in the food system" project Report on Task 1.1a*. Vaasan yliopisto. https://storage.googleapis.com/seamk-production/2023/09/c98acab8-t1.1a-report-07082023_final.pdf
- Spoof-Tuomi, K. (2024b). *Etelä-Pohjanmaan aurinko- ja tuulivoimalla tuotetun sähkön kokonaispotentiaali vuoteen 2030 mennessä: Vetytalousmahdollisuudet ruokaketjussa - selvityshanke (VEP): Osaraportti T1.2*. Vaasan yliopisto. <https://storage.googleapis.com/seamk-production/2024/01/511beae9-t1.2-etela-pohjanmaan-tuuli-ja-aurinkovoimapotentiaali-2030.pdf>
- Suomen standardisoimisliitto. (2020). *Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja (SFS-EN ISO 14044:2006/A2:2020)*. <https://www.sfs.fi>
- Tilastokeskus. (2020). *Maa- ja puutarhatalouden energiankulutus (GWh) muuttujina Vuosi, ELY-keskus, Energialähde ja Tieto*. PxWeb. <https://www.luke.fi/fi/tilastot/maa-ja-puutarhatalouden-energiankulutus>
- Työ- ja Elinkeinoministeriö. (2021). *Turvetyöryhmän loppuraportti*. <https://tem.fi/turvetyoryhma>

LIITTEET

Liite I: LCIA-tulokset

Energiaskenaario 1	Yksikkö	TJ1: nykytila	TJ2: Vihreään vetyyn perustuva järjestelmä	Painotuskerroin	TJ1, painotettu	TJ2, painotettu
Uusiutumattomat energiareсурssit	MJ	2,29	1,47	8,32	19,02	12,25
Maankäyttö	-	2,09	5,98	7,94	16,63	47,45
Ekotoksisuus: makeassa vedessä	CTUe	0,34	1,53	1,92	0,66	2,95
Ilmastonmuutos	kg CO ₂ -eq	0,21	0,12	21,06	4,51	2,54
Vedenkäyttö	m ³ depriv.	0,03	0,08	8,51	0,23	0,71
Ionisoiva säteily: vaikutukset terveyteen	kBq U235-eq	0,00	0,01	5,01	0,01	0,06
Rehevöityminen: maalla	molc N-eq	0,00	0,00	3,71	0,01	0,01
Happamoituminen	molc H ⁺ -eq	0,00	0,00	6,20	0,01	0,01
Valokemiallinen otsonin muodostuminen: vaikutukset terveyteen	kg NMVOC-eq	0,00	0,00	4,78	0,00	0,00
Rehevöityminen: merellä	kg N-eq	0,00	0,00	2,96	0,00	0,00
Rehevöityminen: makeassa vedessä	kg P-eq	0,00	0,00	2,80	0,00	0,00
Materiaalien käyttö: mineraalit ja metallit	kg Sb-eq	0,00	0,00	7,55	0,00	0,00
Pienhiukkasten muodostuminen	disease inc.	0,00	0,00	8,96	0,00	0,00
Myrkyllisyys ihmiselle: ei syöpää aiheuttavat	CTUh	0,00	0,00	1,84	0,00	0,00
Otsonikato	kg CFC-11-eq	0,00	0,00	6,31	0,00	0,00
Myrkyllisyys ihmiselle: syöpää aiheuttavat	CTUh	0,00	0,00	2,13	0,00	0,00
EF score					41,07	65,97

Energiaskenaario 2	Yksikkö	TJ1: nykytila	TJ2: Vihreään vetyyn perustuva järjestelmä	Painotuskerroin	TJ1, painotettu	TJ2, painotettu
Uusiutumattomat energiareсурssit	MJ	2,29	-0,62	8,32	19,02	-5,16
Maankäyttö	-	2,09	5,29	7,94	16,63	42,00
Ekotoksisuus: makeassa vedessä	CTUe	0,34	1,40	1,92	0,66	2,69
Ilmastonmuutos	kg CO ₂ -eq	0,21	0,06	21,06	4,51	1,27
Vedenkäyttö	m ³ depriv.	0,03	-0,13	8,51	0,23	-1,11
Ionisoiva säteily: vaikutukset terveyteen	kBq U235-eq	0,00	-0,09	5,01	0,01	-0,47
Rehevöityminen: maalla	molc N-eq	0,00	0,00	3,71	0,01	0,00
Happamoituminen	molc H ⁺ -eq	0,00	0,00	6,20	0,01	0,01
Valokemiallinen otsonin muodostuminen: vaikutukset terveyteen	kg NMVOC-eq	0,00	0,00	4,78	0,00	0,00
Rehevöityminen: merellä	kg N-eq	0,00	0,00	2,96	0,00	0,00
Rehevöityminen: makeassa vedessä	kg P-eq	0,00	0,00	2,80	0,00	0,00
Materiaalien käyttö: mineraalit ja metallit	kg Sb-eq	0,00	0,00	7,55	0,00	0,00
Pienhiukkasten muodostuminen	disease inc.	0,00	0,00	8,96	0,00	0,00
Myrkyllisyys ihmiselle: ei syöpää aiheuttavat	CTUh	0,00	0,00	1,84	0,00	0,00
Otsonikato	kg CFC-11-eq	0,00	0,00	6,31	0,00	0,00
Myrkyllisyys ihmiselle: syöpää aiheuttavat	CTUh	0,00	0,00	2,13	0,00	0,00
EF score					41,07	39,24

Ammoniakkiskenaario 1	Yksikkö	TJ3: nykytila	TJ4: Vihreään vetyyn perustuva järjestelmä	Painotus- kerroin	TJ3, painotettu	TJ4, painotettu
Uusiutumattomat energiasurssit	MJ	41,39	11,45	8,32	344,33	95,30
Ilmastonmuutos	kg CO ₂ -eq	2,83	0,94	21,06	59,67	19,76
Ekotoksisuus: makeassa vedessä	CTUe	2,62	11,97	1,92	5,03	22,98
Vedenkäyttö	m ³ depriv.	2,44	0,95	8,51	20,74	8,08
Maankäyttö	-	1,96	46,89	7,94	15,59	372,33
Ionisoiva säteily: vaikutukset terveyteen	kBq U235-eq	0,05	0,10	5,01	0,23	0,48
Rehevöityminen: maalla	molc N-eq	0,01	0,01	3,71	0,04	0,05
Valokemiallinen otsonin muodostuminen: vaikutukset terveyteen	kg NMVOC-eq	0,01	0,00	4,78	0,03	0,02
Happamoituminen	molc H ⁺ -eq	0,00	0,01	6,20	0,02	0,06
Rehevöityminen: merellä	kg N-eq	0,00	0,00	2,96	0,00	0,00
Rehevöityminen: makeassa vedessä	kg P-eq	0,00	0,00	2,80	0,00	0,00
Materiaalien käyttö: mineraalit ja metallit	kg Sb-eq	0,00	0,00	7,55	0,00	0,00
Otsonikato	kg CFC-11-eq	0,00	0,00	6,31	0,00	0,00
Pienhiukkasten muodostuminen	disease inc.	0,00	0,00	8,96	0,00	0,00
Myrkyllisyys ihmiselle: ei syöpää aiheuttavat	CTUh	0,00	0,00	1,84	0,00	0,00
Myrkyllisyys ihmiselle: syöpää aiheuttavat	CTUh	0,00	0,00	2,13	0,00	0,00
EF score					445,67	519,07

Ammoniakkiskenaario 2	Yksikkö	TJ3: nykytila	TJ4: Vihreään vetyyn perustuva järjestelmä	Painotus- kerroin	TJ3, painotettu	TJ4, painotettu
Uusiutumattomat energiasurssit	MJ	41,39	-4,54	8,32	344,33	-37,79
Ilmastonmuutos	kg CO ₂ -eq	2,83	0,48	21,06	59,67	10,08
Ekotoksisuus: makeassa vedessä	CTUe	2,62	10,96	1,92	5,03	21,05
Vedenkäyttö	m ³ depriv.	2,44	-0,69	8,51	20,74	-5,85
Maankäyttö	-	1,96	41,64	7,94	15,59	330,64
Ionisoiva säteily: vaikutukset terveyteen	kBq U235-eq	0,05	-0,72	5,01	0,23	-3,61
Rehevöityminen: maalla	molc N-eq	0,01	0,01	3,71	0,04	0,04
Valokemiallinen otsonin muodostuminen: vaikutukset terveyteen	kg NMVOC-eq	0,01	0,00	4,78	0,03	0,02
Happamoituminen	molc H ⁺ -eq	0,00	0,01	6,20	0,02	0,05
Rehevöityminen: merellä	kg N-eq	0,00	0,00	2,96	0,00	0,00
Rehevöityminen: makeassa vedessä	kg P-eq	0,00	0,00	2,80	0,00	0,00
Materiaalien käyttö: mineraalit ja metallit	kg Sb-eq	0,00	0,00	7,55	0,00	0,00
Otsonikato	kg CFC-11-eq	0,00	0,00	6,31	0,00	0,00
Pienhiukkasten muodostuminen	disease inc.	0,00	0,00	8,96	0,00	0,00
Myrkyllisyys ihmiselle: ei syöpää aiheuttavat	CTUh	0,00	0,00	1,84	0,00	0,00
Myrkyllisyys ihmiselle: syöpää aiheuttavat	CTUh	0,00	0,00	2,13	0,00	0,00
EF score					445,67	314,62

Ammoniakkiskenaario 3	Yksikkö	TJ3: nykytila	TJ4: Vihreään vetyyn perustuva järiestelmä	Painotuskerroin	TJ3, painotettu	TJ4, painotettu
Uusiutumattomat energiareсурssit	MJ	41,39	-17,15	8,32	344,33	-142,68
Ilmastonmuutos	kg CO ₂ -eq	2,83	-1,76	21,06	59,67	-37,16
Ekotoksisuus: makeassa vedessä	CTUe	2,62	10,95	1,92	5,03	21,02
Vedenkäyttö	m3depriv.	2,44	0,68	8,51	20,74	5,82
Maankäyttö	-	1,96	46,53	7,94	15,59	369,44
Ionisoiva säteily: vaikutukset terveyteen	kBq U235-eq	0,05	0,08	5,01	0,23	0,40
Rehevöityminen: maalla	molc N-eq	0,01	0,00	3,71	0,04	0,00
Valokemiallinen otsonin muodostuminen: vaikutukset terveyteen	kg NMVOC-eq	0,01	0,00	4,78	0,03	0,00
Happamoituminen	molc H ⁺ -eq	0,00	0,00	6,20	0,02	0,01
Rehevöityminen: merellä	kg N-eq	0,00	0,00	2,96	0,00	0,00
Rehevöityminen: makeassa vedessä	kg P-eq	0,00	0,00	2,80	0,00	0,00
Materiaalien käyttö: mineraalit ja metallit	kg Sb-eq	0,00	0,00	7,55	0,00	0,00
Otsonikato	kg CFC-11-eq	0,00	0,00	6,31	0,00	0,00
Pienhiukkasten muodostuminen	disease inc.	0,00	0,00	8,96	0,00	0,00
Myrkyllisyys ihmiselle: ei syöpää aiheuttavat	CTUh	0,00	0,00	1,84	0,00	0,00
Myrkyllisyys ihmiselle: syöpää aiheuttavat	CTUh	0,00	0,00	2,13	0,00	0,00
EF score					445,67	216,86

Ammoniakkiskenaario 4	Yksikkö	TJ3: nykytila	TJ4: Vihreään vetyyn perustuva järiestelmä	Painotuskerroin	TJ3, painotettu	TJ4, painotettu
Uusiutumattomat energiareсурssit	MJ	41,39	-33,15	8,32	344,33	-275,77
Ilmastonmuutos	kg CO ₂ -eq	2,83	-2,22	21,06	59,67	-46,84
Ekotoksisuus: makeassa vedessä	CTUe	2,62	9,94	1,92	5,03	19,09
Vedenkäyttö	m3depriv.	2,44	-0,95	8,51	20,74	-8,11
Maankäyttö	-	1,96	41,28	7,94	15,59	327,75
Ionisoiva säteily: vaikutukset terveyteen	kBq U235-eq	0,05	-0,74	5,01	0,23	-3,70
Rehevöityminen: maalla	molc N-eq	0,01	0,00	3,71	0,04	-0,01
Valokemiallinen otsonin muodostuminen: vaikutukset terveyteen	kg NMVOC-eq	0,01	0,00	4,78	0,03	0,00
Happamoituminen	molc H ⁺ -eq	0,00	0,00	6,20	0,02	-0,01
Rehevöityminen: merellä	kg N-eq	0,00	0,00	2,96	0,00	0,00
Rehevöityminen: makeassa vedessä	kg P-eq	0,00	0,00	2,80	0,00	0,00
Materiaalien käyttö: mineraalit ja metallit	kg Sb-eq	0,00	0,00	7,55	0,00	0,00
Otsonikato	kg CFC-11-eq	0,00	0,00	6,31	0,00	0,00
Pienhiukkasten muodostuminen	disease inc.	0,00	0,00	8,96	0,00	0,00
Myrkyllisyys ihmiselle: ei syöpää aiheuttavat	CTUh	0,00	0,00	1,84	0,00	0,00
Myrkyllisyys ihmiselle: syöpää aiheuttavat	CTUh	0,00	0,00	2,13	0,00	0,00
EF score					445,67	12,41

Liite II: Käytetyt ecoinventin aktiviteetit

Aktiviteetin nimi	Tuote	Sijainti	Missä käytetään	Muokattu?
heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014	heat, district or industrial, other than natural gas	FI	Energiantuotanto Etelä-Pohjanmaalla	
heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW	heat, district or industrial, other than natural gas	Europe without Switzerland	Energiantuotanto Etelä-Pohjanmaalla	
heat production, light fuel oil, at industrial furnace 1MW	heat, district or industrial, other than natural gas	Europe without Switzerland	Energiantuotanto Etelä-Pohjanmaalla	
electricity production, peat	electricity, high voltage	FI	Energiantuotanto Etelä-Pohjanmaalla	
electricity production, hydro, run-of-river	electricity, high voltage	FI	Energiantuotanto Etelä-Pohjanmaalla	
electricity production, wind, >3MW turbine, onshore	electricity, high voltage	FI	Energiantuotanto Etelä-Pohjanmaalla	
water production, deionised, future	water, deionised	FI-EP	Veden puhdistus	Energia vaihdettu omaan "Uusiutuva sähköntuotanto Etelä-Pohjanmaalla"
electricity production, wind, >3MW turbine, onshore	electricity, high voltage	FI	Uusiutuva sähköntuotanto Etelä-Pohjanmaalla	
market for transmission network, electricity, high voltage direct current aerial line	transmission network, electricity, high voltage direct current aerial line	GLO	Uusiutuva sähköntuotanto Etelä-Pohjanmaalla	
market for transmission network, electricity, high voltage direct current land cable	transmission network, electricity, high voltage direct current land cable	GLO	Uusiutuva sähköntuotanto Etelä-Pohjanmaalla	
electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si	electricity, low voltage	SE	Uusiutuva sähköntuotanto Etelä-Pohjanmaalla	
electricity production, hydro, run-of-river	electricity, high voltage	FI	Uusiutuva sähköntuotanto Etelä-Pohjanmaalla	
liquid storage tank production, chemicals, organics	liquid storage tank, chemicals, organics	RoW	Vedyn varastointi, uusiutuva energia	
air separation, cryogenic	oxygen, liquid	FI	PEM-elektrolyysi	RER sijaintiin FI vaihtamalla käytetty sähköenergia
chemical factory construction, organics	chemical factory, organics	RER	PEM-elektrolyysi	
market for heat pump, for mini-CHP plant	heat pump, for mini-CHP plant	GLO	Energian tuotanto polttokennolla ja lämpöpumpulla	
market for ammonia, anhydrous, liquid	ammonia, anhydrous, liquid	RER	TJ3: Ammoniakin tuotannon nykytila	
electricity production, peat	electricity, high voltage	FI	TJ4: Vihreään vetyyn perustuva ammoniakin tuotanto	
air separation, cryogenic	nitrogen, liquid	RER	Haber-Bosch-prosessi	
market for heat pump, for mini-CHP plant	heat pump, for mini-CHP plant	GLO	Haber-Bosch-prosessi	



**Euroopan unionin
osarahoittama**



ETELÄ-POHJANMAAN LIITTO
Regional Council of South Ostrobothnia

