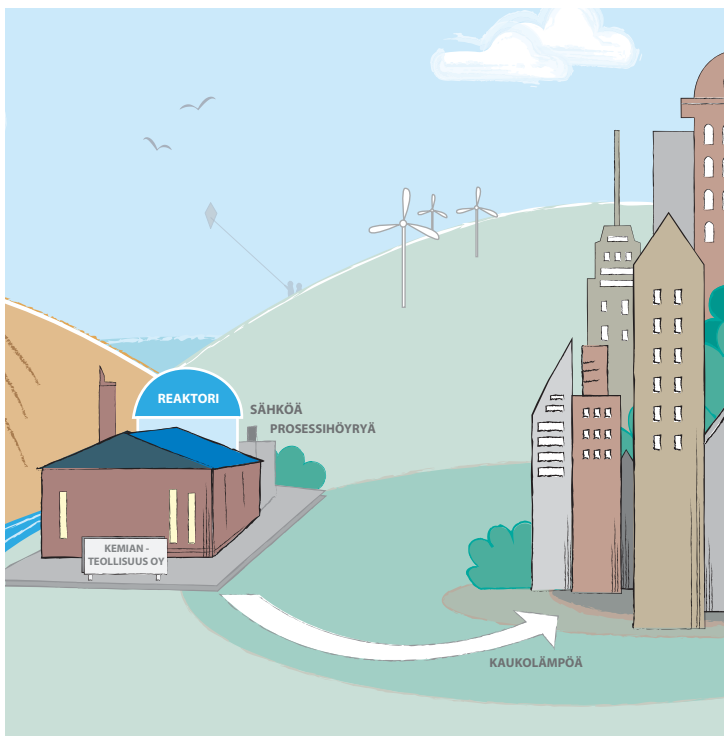
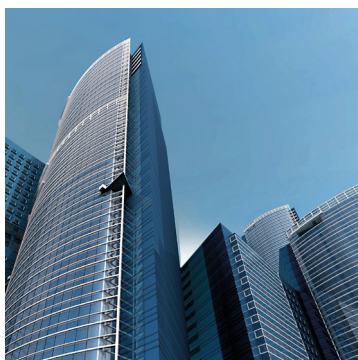
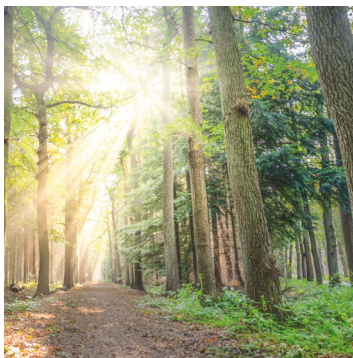
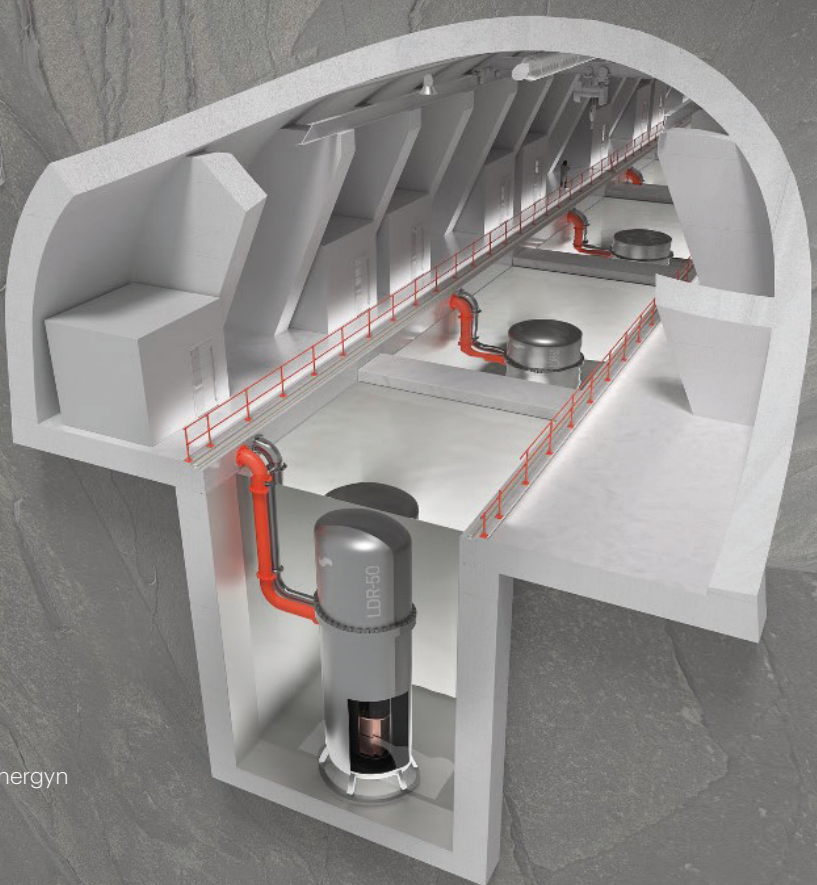


PIENREAKTORIT JA NIIDEN KÄYTTÖKOHTEET





Kuva:
Suomalaisen Steady Energyn
LDR-50 reaktori.
Kuva: Steady Energy

PIENREAKTORIT JA NIIDEN KÄYTTÖKOHTEET



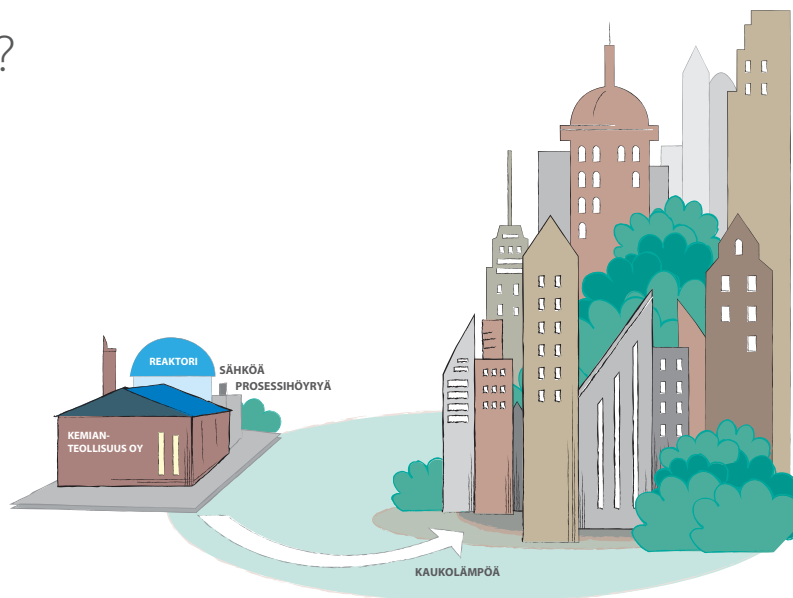
THINK ATOM
think deep decarbonization

SISÄLLYS

Mikä pienreaktori?	4
VAHVUUDET / HEIKKOUEDET	5
Pienreaktorin luvittaminen	6
Kaavoitus ja lupaprosessi.....	7
Lupaprosessien ja kaavoituksen aikataulu	7
Ydinvoiman ympäristövaikutukset.....	10
EU, Taksonomia, SMR-ryhmä ja uusi ydinvoimamyönteisyys Euroopassa	11
Pienydinvoiman paikalliset ympäristövaikutukset	11
Pienreaktoreiden keskeisimmät ympäristövaikutukset.....	11
Mistä pienreaktorin voi ostaa?	12
Pienreaktorit tulevaisuuden energiajärjestelmissä	14
Ydinvoiman käyttö muuhun kuin sähköntuotantoon	16
Metsäteollisuus, sellu ja kehittyneet biotuotteet.....	18
Öljynjalostus	19

Mikä pienreaktori?

Pienreaktoreilla voidaan tuottaa energiaa sekä teollisuudelle että ihmisille, ja ne voidaan mahdollisesti sijoittaa asutuksen läheisyyteen.



Pienreaktori on teholtaan karkeasti kymmenyksen nykyisiin isoihin ydinreaktoreihin nähden, joskin tämä riippuu paljon tapauksesta. Sähköä tuottavilla pienreaktoreilla tehoa on karkeasti välillä 50 – 300 megawattia¹, kun isoilla reaktoreilla vastaava teho on 1 000 - 1 700 megawattia. Pienistä ydinreaktoreista käytetään usein lyhennettä SMR, joka tulee sanoista Small Modular Reactor.

Maaillalla on kehitteillä monenlaisia pienreaktoreita. Yleisin ja teknologisesti kypsä tyyppi on kevytvesireaktori, jollaisia ovat myös Suomen isot reaktorit. Sen lisäksi on sulasuolareaktoreita, metallijäähdytteisiä reaktoreita, kaasujäähdytteisiä reaktoreita, uraania tai toriumia polttoaineenaan käyttäviä reaktoreita ja niin edelleen. Yksi tärkeä ominaisuus on myös reaktorin tuottama lämpötila, joka sekin voi vaihdella 90 ja 900 celsiusasteen välillä. Tästä lämpötilasta riippuu paljon se, mihin reaktoria voi käyttää.

Monet kehitteillä olevat reaktorit ovat tulossa markkinoille 2020- ja 2030-luvuilla. Tämä tarkoittaa monien maiden tapauksessa sitä, että ydinvoimaloiden sääntelyä ja ydinlainsäädäntöä olisi hyvä tarpeen mukaan alkaa muokata jo tänään, sillä tämä prosessi voi viedä useita vuosia. Tässä lyhyessä esitteessä esitellään joitakin kehitteillä olevia reaktoreita ja niiden mahdollisia käyttökohteita.

MIKROREAKTORIT

Vielä pienreaktoreita pienempiä reaktoreita kutsutaan mikroreaktoreiksi. Niitä voidaan käyttää esim. sähköverkon ulkopuolella olevissa kylissä, kaivosyhteisöissä tai pienillä saarilla tuottamaan sähköä, lämpöä ja puhdasta vettä. Ne korvaavat näissä kohteissa usein kallista ja vaikeasti kuljetettavaa dieselöljyä.

PASSIIVINEN TURVALLISUUS

Passiivisella turvallisuudella tarkoitetaan esimerkiksi sitä, että reaktori voi yllättävässä tilanteessa ajaa itsensä automaattisesti alas ja turvalliseen tilaan ilman esimerkiksi sähköisiä järjestelmiä. Yksinkertainen esimerkki on se, että reaktori on riittävän suuren vesialtaan pohjalla, jonka vesi riittää poistamaan kaiken jälkilämmön, jos reaktori sammuu ja sähköjärjestelmät eivät ole käytössä.

¹ Lämmöntuotanto on 2-3 kertaa suurempi

VAHVUUDET

- Pienempi koko soveltuu hyvin paikalliseen lämmön tuotantoon, sillä lämmön kuljettaminen pitkiä matkoja on paljon vaikeampaa kuin sähkön kuljettaminen. Karkeasti puolet maailman käyttämästä energiasta käytetään lämpönä, joten vähäpäästöinen ja luotettava lämmöntuotanto pienreaktoreilla on yksi kiinnostava käyttökohde.
- Pienreaktorit suunnitellaan yleensä valmistettavaksi tehtaassa kokoonpanolinjalla tai telakalla. Tämä voi lyhentää valmistumisaikaa ja leikata kustannuksia merkittävästi.
- Pienreaktorit voidaan suunnitella yksinkertaisemmiksi, ja turvallisuus hoitaa erilaisilla passiivisilla ominaisuuksilla. Tämä voi helpottaa niiden sijoittamista esimerkiksi asutuskeskusten tai teollisuuspuistojen läheisyyteen.
- Pienempi koko tarkoittaa pienempää investointia. Rahoitus voi jäestyä helpommin ja edullisemmin, projektihallinta on yksinkertaisempaa ja läpivienti nopeampaa, mikä voi alentaa rahoituskustannuksia. Pienempiä yksiköitä on helpompi liittää sähköverkkoon tarvittaessa. Tämä on hyödyllistä etenkin pienemmissä, esimerkiksi kehittyvien maiden sähköverkoissa, joissa kysyntä kasvaa ja sähköverkkojen infrastruktuuri vielä kehittyy.

	Sähkö MW	Lämpö MW
Mikro	0.1-50	0.2-100
Pien	50-300	100-900
Keskikoko	300-800	900-2000
Suuri	800-1700	2000-4500

Karkeat sähkö- ja lämpötehot eri kokoluokkien reaktoreille.

HEIKKOUEDET

- Pienemmät reaktorit eivät nauti suuruuden tuomista mittakaavaeduista kustannuksissa. Ne kuitenkin tarvitsevat usein lähes vastaavan infrastruktuurin, viranomaisitoiminnot, luvituksen ja muun säännösten kuin isommatkin reaktorit.
- Monista maista, Suomi mukaan lukien, puuttuu pienreaktoreille ja uusille ydinenergian käyttökohteille soveltuva lainsäädäntö ja regulaatio. Esimerkiksi, mikäli tuotantolinjalla valmistetaan useita samanlaisia reaktoreita, olisi järkevää että niillä olisi jonkinlainen laajemmalla alueella käytetty ”tyyppihyväksyntä” sen sijaan että jokainen luvitetaan ja valmistetaan erikseen paikallisiin oloihin sopivaksi.
- Jotkin reaktorit käyttävät nykyisestä poikkeavia ydinpolttoaineita ja tuottavat erityyppisiä jätteitä nykyreaktoreihin verrattuna. Nämä saattavat tarvita uudenlaista sääntelyä, teknologioita, toimitusketjuja ja hallintoa.

PIENYDINVOIMAN AVAINHAASTEET

Hyväksyttävyyden varmistaminen
vuoropuhelun avulla

Uusien laitospaikkojen löytyminen, jos
tuotetaan kaukolämpöä

Sääntelyn nykyaikaistaminen ja
eurooppalaisen markkinan luominen

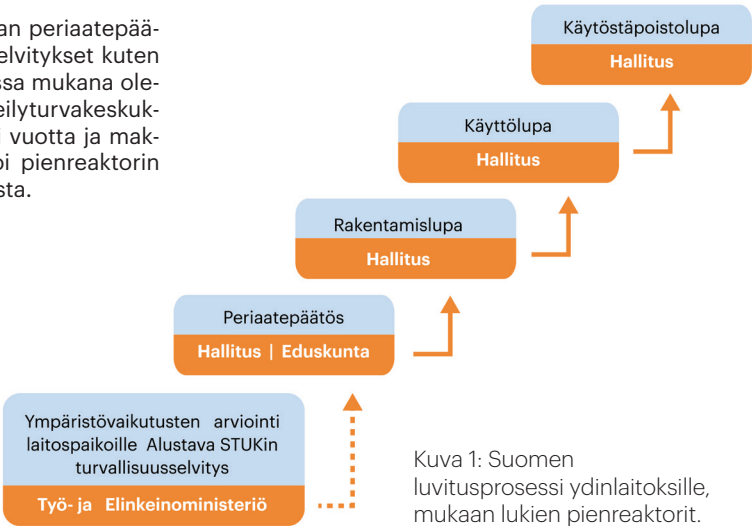
Reaktoritoimittajien kyky kaupallistaa
kilpailukykyinen tuote

Sarjavalmistuksen etujen vaatima useiden
kappaleiden tilauskirja

Pienreaktorin luvittaminen

Valtakunnallisesti ensimmäinen askel on eduskunnan periaatepäätöksen hakemuksen valmistelu ja siihen kuuluvat selvitykset kuten ympäristövaikutusten arviointi (YVA) ja hakemuksessa mukana olevien reaktorien alustavat turvallisuusselvitykset Säteilyturvakeskuksesta (STUK). Tämä prosessi kestää normaalisti pari vuotta ja maksaa tyypillisesti muutaman miljoonan, joten se voi pienreaktorin kohdalla olla merkittävä osa koko hankkeen budjetista.

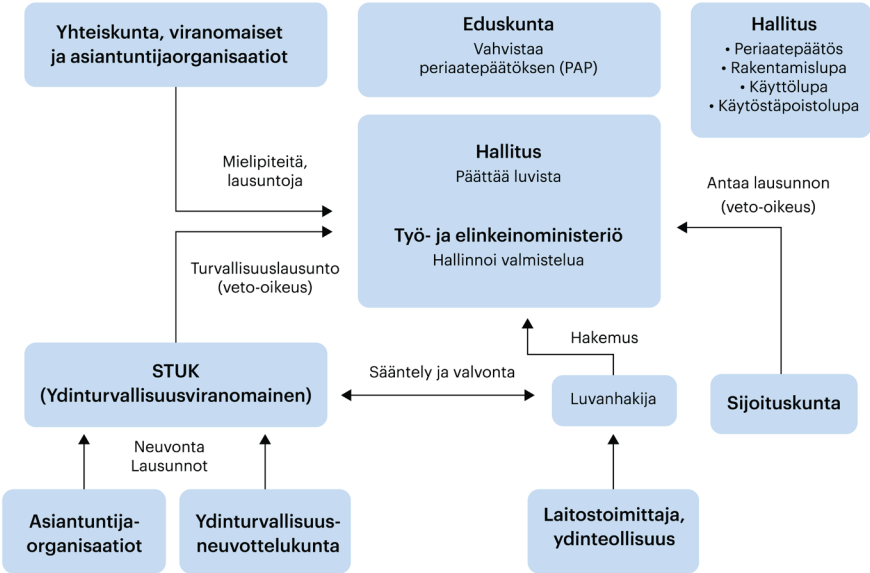
Positiivisen eduskunnan periaatepäätöksen jälkeen haetaan rakentamislupaa. Sen myöntämisestä päättää hallitus, mikäli STUK sitä suosittelee arvioituaan hakemuksen ja siihen liittyvät materiaalit sekä hakijan kyvykkyyden. Voimalaitoksen valmistuttua haetaan hallitukselta vielä käyttöilupaa, joka käytännössä myönnetään STUKin arvioinnin ja suosituksen perusteella.



Kuva 1: Suomen luvitusprosessi ydinlaitoksille, mukaan lukien pienreaktorit.

SUOJAVYÖHYKE JA VARAUTUMISALUE

Aiempi vaatimus kiinteistä 5 km suojavyöhykeestä ja 20 km varautumisalueesta ydinlaitoksen ympärillä on muuttunut. Nykyisin niiden koon määrittelee laitoskohtainen turvallisuusanalyysi. Tämä mahdollistaa pienreaktoreiden sijoittamisen muun ihmistoiminnan ja asutuksen läheisyyteen, kokonaisturvallisuudesta tinkimättä.



Kuva 2: Periaatepäätöshakemus ja sen eri osapuolet sekä niiden keskinäiset suhteet.

Periaatepäätösprosessiin kuuluu kattava julkinen keskustelu eri osapuolien välillä, ja sen tarkoitus on arvioida hankkeen kokonaisuutena suomalaiselle yhteiskunnalle. Periaatepäätös on poliittinen, ja kansanedustajat ovat äänestäneet siitä ”omantunnon mukaan”, ilman puolueelta tulevaa ohjausta. Lausuntoja pyydetään yhteiskunnalta ja sidosryhmiltä laajalla skaalalla, STUK esittää omat alustavat arvionsa ehdotettujen laitosten turvallisuudesta ja sijoituskunnalla on eduskunnan päätökseen veto-oikeus. Positiivinen periaatepäätös poistaa ison osan hankkeen poliittisesta riskistä, mutta on toisaalta raskas ja kallis haakea etenkin pienreaktorihankkeen kokonaisbudjettiin nähden.

Kaavoitus ja lupaprosessi

Nykyisellään pienreaktoreiden sijoittamista ja laitosalueen kokoa ja lähialueiden maankäytön rajoituksia ohjaa vahvasti Säteilyturvakeskuksen ohje YVL A.2. Ohjeen yleisperiaate on, että laitoksen tulee sijaita suhteellisen harvaan asutulla alueella. Laitosalue ulottuu 0,5-1 km etäisyydelle laitoksesta, jolla saa olla pääsääntöisesti vain voimalaitokseen liittyviä toimintoja.

Lupaprosessien ja kaavoituksen aikataulu

AFRY:n (2021) selvityksen mukaan pienreaktorin kaavoitus ja luvitus veisi nopeimmillaan yli kaksi vuotta (ei sisällä rakentamislupahakemusta), ja hitaimmillaan, kaikki valitusprosessit huomioiden, yli seitsemän vuotta. Eri hakemusten edistäminen samanaikaisesti voi lyhentää prosessin kestoa, mutta toisaalta lisää hankkeen rahoittajan riskiä.

Tekeillä olevassa ydinennergialain kokonaisuudistuksessa on ollut esillä, että sijoituspaikalle otettaisiin käyttöön erillinen hyväksyntä. Tämän voisi valmistella myös joku muu taho kuin tuleva luvanhaltija, esimerkiksi kunta. Tämä voi sujuvoittaa koko ydinvoimahankkeen luvitusprosessia merkittävästi.

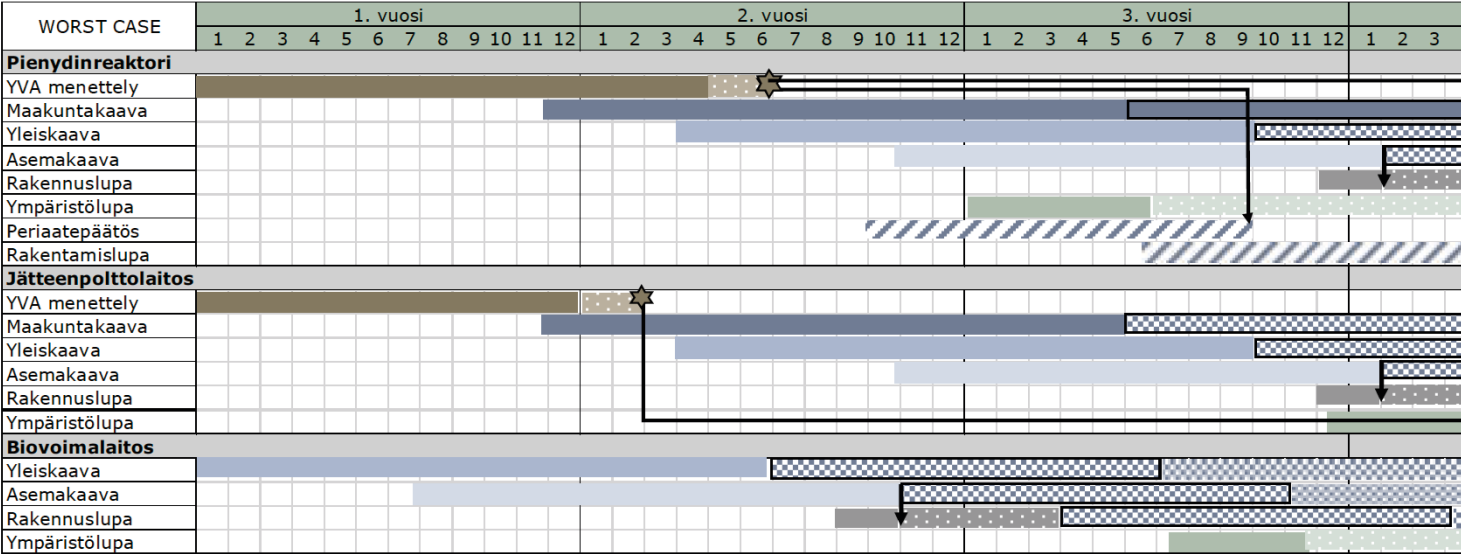
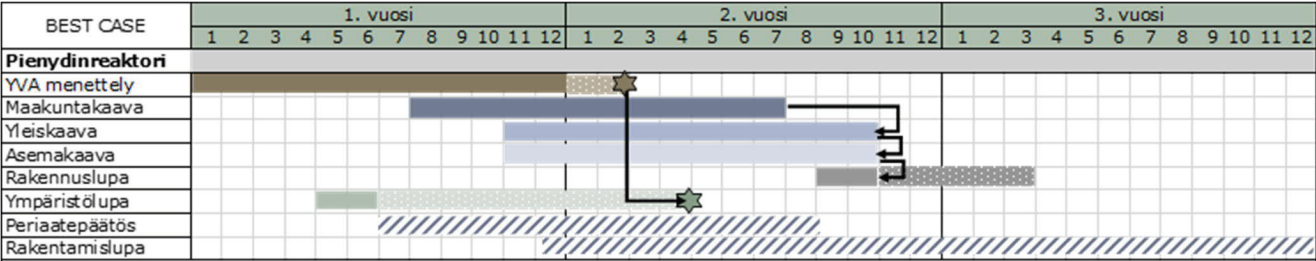
Uusi Alueidenkäyttölaki on valmisteilla, jossa tavoitteina ovat mm. maakuntakaavan yksityiskohtaisuuden ja oikeusvaikutteisuuden keventäminen sekä yleiskaavan ja asemakaavan saman aikaisen valmistelun mahdollistaminen. Näillä olisi kaavoitusta sujuvoittava vaikutus.

TELAKKAVALMISTEISIA LAUTTAYDINVOIMALOITA?

Monet pienreaktorikehittäjät ovat kiinnostuneet viime vuosina mahdollisuudesta asentaa reaktori ja voimalaitos kelluvaan tai merenpohjaan kiinnitettävään, telakalla rakennettavaan lauttaan, jonka voisi hinata kohteeseen. Mahdollisia etuja on runsaasti: telakkavalmistus on paljon maarakennusta tehokkaampaa ja tuottavampaa, laadun- ja toimitusketjujen valvonta yksinkertaisempaa, rakentajat ja tiimit tuntevat toisensa, puhuvat samaa kieltä ja ovat paljolti paikallisia, automaatiotaso on korkeampi, itse laitospaikkaa voidaan valmistella samalla kun voimalaitos on rakenteilla ja niin edelleen. Uusia haasteitakin toki on, esimerkiksi sääntelyssä voi olla puutteita. Ajatuspaja Think Atom julkaisi telakkavalmisteisista ydinvoimaloista selvityksen kesällä 2022 (thinkatom.net/publications).

8 PIENREAKTORIT JA NIIDEN KÄYTTÖKOHTEET

Kuva 3:
Luvitusprosessin eteneminen on parhaassa tapauksessa varsin joutuisaa.
Lähde: AFRY / Energiateollisuus 2021.

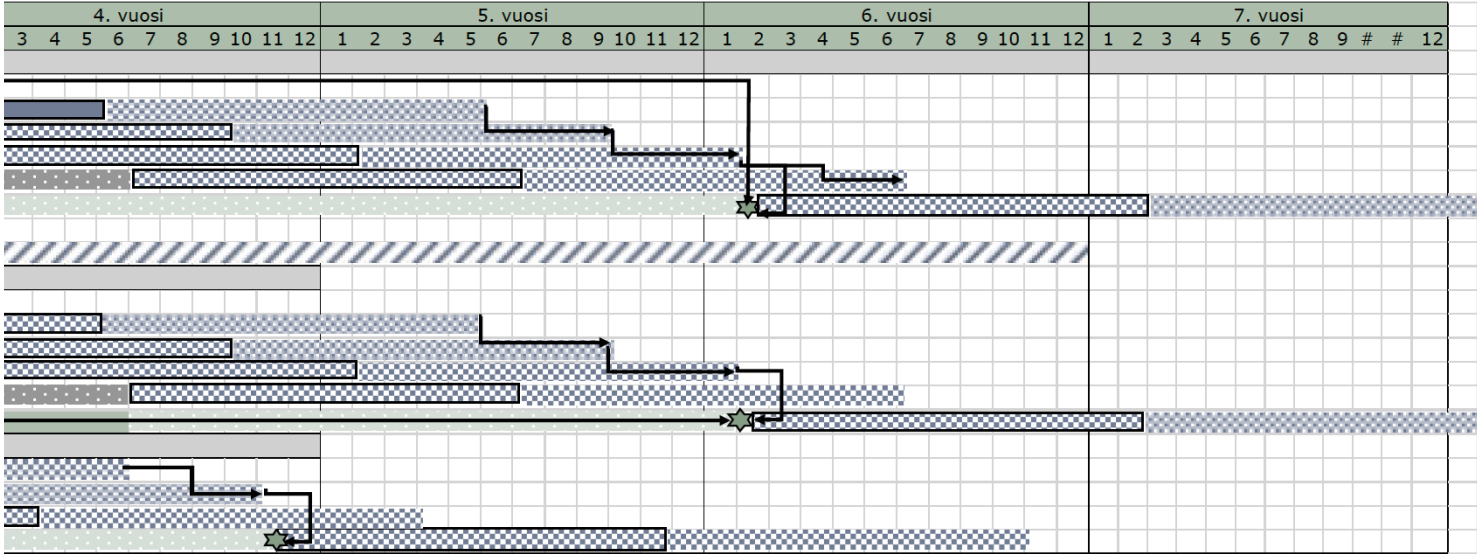


SELITTEET

- Lupahakemuksen valmistelu
- Viranomaisen käsittelyaika
- Perusteltu päätelmä
- Viranomaisen lupapäätös
- Valitusaika hallinto-oikeus
- Valitusaika KHO



KUVAT: Energiateollisuus ry / AFRY 2021
– Selvitys pienydinreaktoreiden
kaavoituksesta ja luvituksesta.



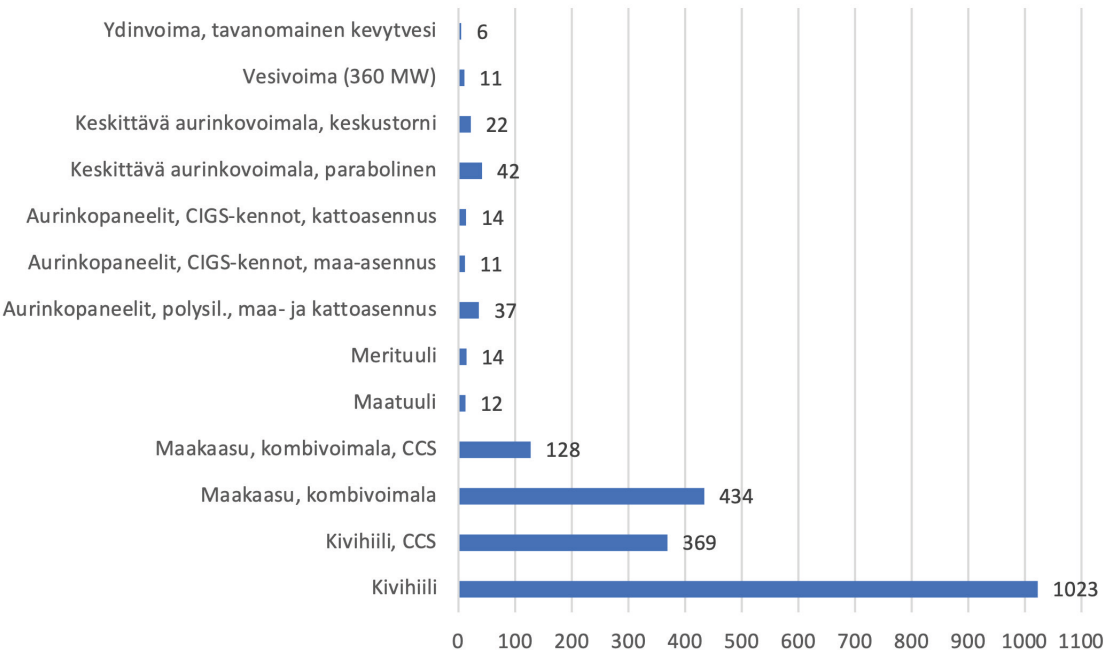
Kuva 4: Pahimmillaan luvitusprosessissa ja valitusten käsittelyssä voi mennä jopa seitsemän vuotta.
Lähde: AFRY / Energiategollisuus 2021.

Ydinvoiman ympäristövaikutukset

Ydinvoiman ilmasto-, ympäristö-, ja materiaalijalanjälki on yhtä pieni tai pienempi kuin millä tahansa muulla energialähteellä. YK:n Euroopan talouskomission (UNECE 2021²) raportin mukaan ydinvoima on kärkisijoilla lähes millä tahansa mittarilla mitattuna. Ainoastaan vedenkäyttö korostuu, mutta ydinvoiman tapauksessa ”käyttö” ei kuvaa tilannetta kovin hyvin, sillä jäähdytysvesi palautetaan ympäristöön muutoin samanlaisena kuin se sieltä otettiin, mutta 10–12 astetta lämminneenä. Kaukolämpölaitoksissa lämpö johdetaan kaukolämpöverkkoon.

Ydinvoima on myös, koko toimitusketju, elinkaari ja käytetyn polttoaineen käsittely ja loppusijoitus huomioiden, turvallisista tapoista tuottaa luotettavaa energiaa mitä ihmiskunnalla on käytössä. Jokainen rakennettu ja käynnissä pidetty ydinvoimala siis käytännössä korvaa terveydelle haitallisempaa tuotantoa, ainakin niin kauan kun energiantuotantoa perustuu polttoaineiden polttamiseen.

Sähkön tuotannon elinkaaripäästöt, Eurooppa 2020, gCO₂-ekv/kWh. Data: UNECE 2021



Kuva:
Euroopassa ydinvoimalla on kaikista energialähteistä pienin hiilijalanjälki.

² <https://unece.org/sed/documents/2021/10/reports/life-cycle-assessment-electricity-generation-options>

EU, taksonomia, SMR-liittouma ja uusi ydinvoimamyönteisyys Euroopassa

Ilmastomuutoksen ja energiakriisin myötä myös EU-maiden suhtautuminen ydinvoimaa kohtaan on muuttunut radikaalisti. Yhä useampi maa haluaa rakentaa ensimmäiset voimalansa, rakentaa uusia laitoksia, tai ainakin jatkaa nykyisten laitosten käyttöä. Kiinnostusta on ollut niin pienreaktoreita kuin perinteisiä isojakin laitoksia kohtaan.

Tämä kiinnostus on poikunut konkreettisiakin asioita. Kesällä 2022 ydinvoima sisällytettiin, tietyin ehdoin, EU:n rahoitusta ohjaavaan kestävien aktiviteettien taksonomiaan. Taksonomian piiriin pääseminen voi laskea projektin rahoituskuluja useamman prosenttiyksikön.

Vuoden 2023 keväällä 16 Euroopan maata julisti tavoitteeksi 150 GW ydinvoimaa 2050 mennessä, mikä on 50% kasvu nykyisestä noin 100 GW kapasiteetista³. Muutamaa kuukautta myöhemmin COP28 ilmastokonferenssissa 22 maata allekirjoitti tavoitteen, että ydinvoimakapasiteetti kolminkertaistetaan 2050 mennessä.

Vuoden 2023 lopulla ydinvoima lisättiin myös EU:n strategisten nettonollateknologioiden joukkoon hiilineutraalia teollisuutta koskevassa säädöksessä (NZIA), mikä tarkoittaa nopeampaa ja sujuvampaa luvitusprosessia toimitusketjuille. Helmikuussa 2024 Euroopan komissio perusti teollisen SMR-liittouman, ja maaliskuussa Brysselissä pidettiin historian ensimmäinen korkean tason globaali ydinvoimahuippukokous. Ydinvoimassa tapahtuu nyt paljon positiivisia asioita.

Pienydinvoiman paikalliset ympäristövaikutukset

Pienydinvoimalat voivat olla keskenään hyvin erikokoisia ja tekniseltä toteutukseltaan ja käyttötarkoitukseltaan erilaisia. AFRY:n Energiateollisuus ry:lle tekemässä selvityksessä arvioidaan karkealla tasolla 40 MWt ydinlämpölaitosta ja 900 MWt/300MWe sähköä tuottavaa ydinvoimalaitosta ja verra-

taan niitä suureen ydinvoimalaan sekä konventionaaliseen voimalaitokseen. Sääntely on raportin julkaisusta ehtinyt jo hieman muuttua, mutta alle on koottu ja muokattu keskeisimmät ympäristövaikutukset.

Pienreaktoreiden keskeisimmät ympäristövaikutukset

JÄÄHDYTYSTARVE

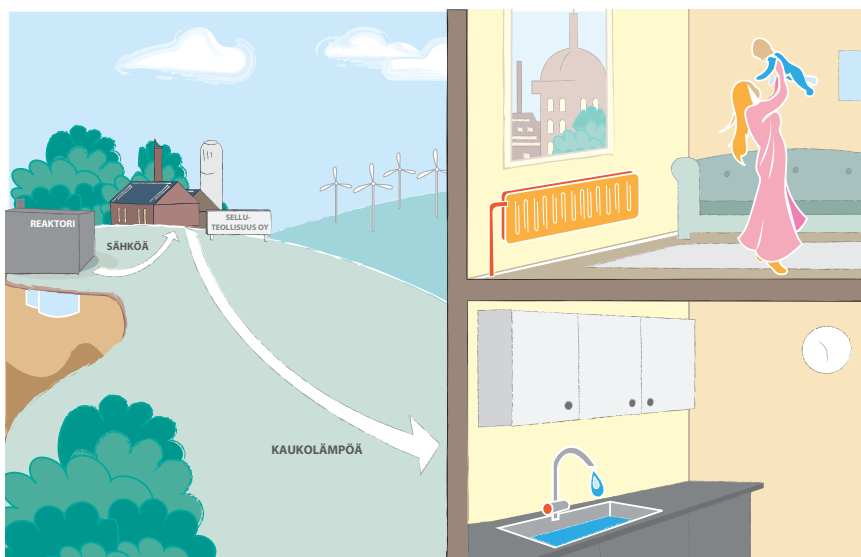
Kaukolämpölaitoksella ei ole jäähdytystarvetta eikä se aiheuta lämpökuormaa vesistöön. Sähköä tuottava 300MWe/900MWt laitos tarvitsee 12–14 m³/s jäähdytysvetä. Se palautetaan vesistöön 10–12 °C lämmentyneenä, mutta muuten samanlaatuisena.

SUOJAVYÖHYKEVAATIMUKSET

Aiemmin Suomessa sovellettiin kaikille uusille ydinvoimaloille 0,5–1 km voimalaitosaluetta, noin 5 km suojavyöhykettä sekä noin 20 km varautumisvyöhykettä, riippumatta laitoksen koosta, teknologiasta, turvallisuudesta tai käyttötarkoituksesta. Vuoden 2024 helmikuussa tuli voimaan STUK:n säännöstö, jonka mukaan nämä alueet voidaan mitoittaa turvallisuusanalyysin perusteella kiinteiden etäisyyksien sijaan. Mikäli laitos voidaan osoittaa turvallisesti ja onnettomuuksien vaikutukset vähäisiksi, voivat yllä mainitut etäisyydet olla huomattavasti aiempaa pienemmät, turvallisuustasosta tinkimättä.

Lisäksi radioaktiiviset jätteet tulee hoitaa asianmukaisesti, joskin niitä syntyy isoa ydinvoimalaa huomattavasti vähemmän. Maisema ja rakentamisaikaiset vaikutukset riippuvat esimerkiksi siitä sijoitetaanko laitos osin maan alle, jolloin maisemavaikutus on pienempi mutta rakentamisvaihe voi aiheuttaa muutoksia pohjaveden pinnankorkeudessa. Ydinvoimala myös vaikuttaa siihen, millaista muuta teollisuutta ja toimintaa lähialueelle voi rakentaa. Ydinenergialaitoksilla ei ole merkittäviä vaikutuksia maa- ja kallioperään tai pohjavesiin. Ympäristöön aiheutuvat melutasot ovat toiminnan aikana vähäisiä, ja käytön aikainen liikennemäärä on hyvin vähäinen.

³ <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/nuclear-alliance-aims-for-150-gw-of-nuclear-power-in-eu-by-2050/>



Pienreaktorit voidaan yhdistää teollisuuden ja kotitalouksien energiantuotantoon, jolloin voidaan saavuttaa korkeampi kokonaistehokkuus.

Mistä pienreaktorin voi ostaa?

Joitain pienreaktoreiden ensimmäisiä First-of-A-Kind -versioita (FOAK) rakennetaan jo, ja joitain on saatu jo valmiiksi. Esimerkiksi kiinalainen korkean lämpötilan kaasujäähdytteinen HTR-PM kuulakekoreaktori kytkettiin sähköverkkoon vuoden 2021 joulukuussa. Myös monet länsimaiset yhtiöt suunnittelevat ensimmäistä kaupallisen mittakaavan reaktoria valmiiksi 2020-luvulla. Tämä tarkoittaa sitä, että rakennustyöt ovat alkamassa muutaman vuoden sisällä. Venäjän Rosatom puolestaan käynnisti kaksi KLT-40S reaktoria sisältävän Akademik Lomonosov lauttareaktorinsa vuoden 2019 lopussa.

Suurin pullonkaula ei siis yleensä ole teknologian valmius, vaan soveltuvan lainsäädännön ja regulaation puute kohteessa. Tämän valmisteluun voi kulua useita vuosia, joten työ olisi viisasta aloittaa mahdollisimman pian.

Nykyinen lainsäädäntö ja turvallisuusohjeet ja määräykset on kirjoitettu isoille, kaukana asutuksesta oleville sähköä tuottaville kevytvesireaktoreille. Pienreaktoreiden käyt-

tökohteita ovat kuitenkin myös lämmön tuotanto tilojen lämmitykseen ja teollisuuden tarpeisiin lähellä käyttäjiä. Yritysten näkökulmasta on riskialtista käynnistää vakavaa hankesuunnittelua jos lainsäädäntö ja regulaatio ovat epäselviä tai pahasti keskeneräisiä. Suomessa on käynnissä ydinenergialain kokonaisuudistus. Sen on arvioitu tulevan voimaan 2028 alussa.

REAKTORIESIMERKKEJÄ

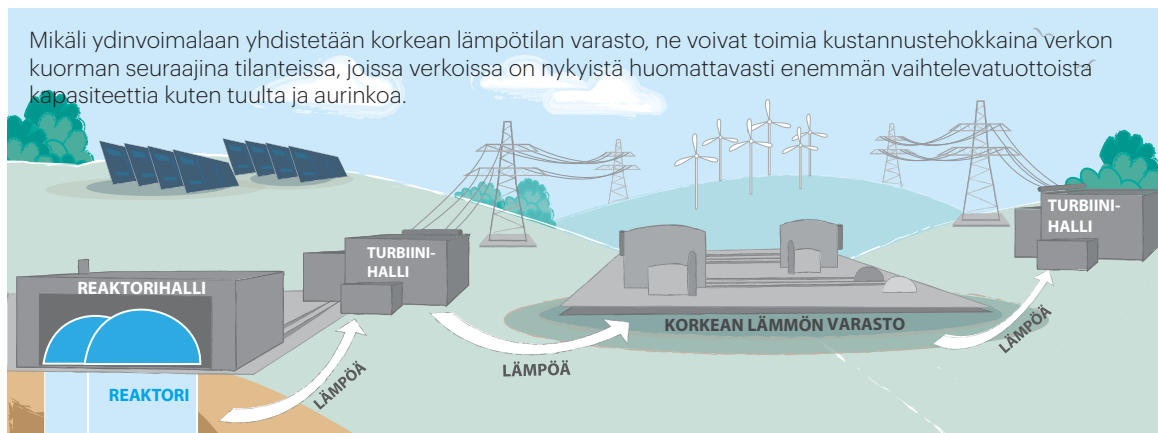
Maailmalla on kehitteillä tusinoittain uusia reaktoreita. Pohjoismaissa uusia reaktoreita kehittävät kotimainen Steady Energy, ruotsalainen LeadCold, sekä tanskalaiset Copenhagen Atomics ja Seaborg. Eteläisemmässä Euroopassa maininnan arvoinen on ainakin Newcleo, joka kehittää neljännen sukupolven liijyjäähdytteistä pienreaktoria sekä sille soveltuvaa nykyreaktoreiden käytetystä ydinpolttoaineesta ja köyhdytetystä uraanista valmistettavaa MOX-polttoainetta.

Nimi / Yritys	Reaktorin tyyppi	Reaktorin teho	Jäähdytin/Moderaattori	FOAK arvio	Käyttökohteet
UK SMR / Rolls Royce	Painevesi	1358 MWt / 470 MWe	Kevytvesi	2030	Sähkö ja lämpö
BWRX-300 / GE Hitachi	Kiehumusvesi	870 MWt / 300 MWe	Kevytvesi	2028	Sähkö ja lämpö
Nuward	Integroitu painevesi	2x540 MWt / 2x170 MWe	Kevytvesi	2033	Sähkö ja lämpö
VOYGR / NuScale	Integroitu painevesi	4, 6 tai 12x250 MWt / 77 MWe	Kevytvesi	2029	Sähkö ja lämpö
Xe-100 / X-Energy	Kaasujäähdyt. korkean lämmön kuulakeko	200 MWt / 80 MWe (x4)	Helium / Grafiitti	2027	Sähkö ja prosessilämpö
MMR / USNC	Ydinparisto (20 vuoden lataus)	15 MWt / 5 MWe (x2)	Helium / Grafiitti	2020-luvulla	Sähkö ja prosessilämpö
Natrium / TerraPower & GE-Hitachi	Natrium, nopea reaktori	345 MWe	Natrium	2020-luvulla	Sähkö ja prosessilämpö
HTR-PM / CNNC	Kaasujäähdyt. korkean lämmön kuulakeko	250MWt/ 105 MWe	Helium / Grafiitti	2021	Sähkö ja prosessilämpö
IMSR / Terrestrial Energy	Sulasuola-allas	400 MWt / 190MWe	Fluoridisuola / Grafiitti	2020-luvulla	Sähkö ja prosessilämpö

Steady Energyn LDR-50

LDR-50 / Steady Energy	Termospullo	50 MWth	Kevytvesi	2020-luvulla	Kaukolämpö, meriveden puhdistus
------------------------	-------------	---------	-----------	--------------	---------------------------------

LDR-50 on alunperin VTT:n ja sittemmin Steady Energy Oy:n kehittämä kaukolämmön tuotantoon ja meriveden puhdistukseen soveltuva, hieman termospulloa muistuttava minireaktori-konsepti. Yhden yksikön lämpöteho on 50 MW, ja yksiköitä voi olla laitoksessa useampia. Sen passiivisen lämmönpoistojärjestelmän suunnittelu voitti kolmannen palkinnon EU Komission ydinvoimainnovaatiokilpailussa. Reaktoreita voisi olla kaupallisen mittakaavan tuotannossa 2030-luvulla, FOAK jopa 2020-luvulla.



Pienreaktorit tulevaisuuden energiajärjestelmissä

Lähivuosina tuulen ja auringon osuus sähköverkoissa tulee todennäköisesti kasvamaan. Niiden sääriippuvainen tuotanto luo haasteita ja lisää verkon vakaana pitämisen kustannuksia sitä enemmän, mitä suurempi osuus sähköstä niillä tuotetaan. Vesivoima on joustavaa ja toimii hyvin paikkaamaan tuulettomia hetkiä ja päiviä, samaten kaasuturbiinit. Molemmilla näistä on kuitenkin rajoitteensa. Vesivoiman lisääminen on monissa maissa vaikeaa, ja maakaasu on fossiilinen polttoaine, päästöineen.

Monia kehitteillä olevia reaktoreita suunnitellaan tätä tulevaa haastetta silmällä pitäen hyvin joustaviksi. Niiden etuna on vähäpäästöisyys sekä käytännössä lähes rajoittamaton skaalautuvuus.

Oheisessa kuviossa on simuloituna yksittäisen NuScale⁴-reaktorin joustavaa toimintaa, jossa se seuraa sekä kysynnän vaihtelua että paikallisen tuulipuiston vaihtelevaa tuotantoa. Reaktoriin on rakennettu turbiinin ohijuoksutus, jolla osa höyrystä voidaan ohjata ohi turbiinista nopeasti, ja tällä voidaan säätää sähköntuotantoa ketterästi. On monia muitakin tapoja lisätä joustavuutta ydinreaktoreiden tuotantoon, mutta avainkysymys on se, että harva tuottaja haluaa ajaa tuotantoaan ylös ja alas, ellei joustamisesta aiheutuvia tuotannon menetyksiä kompensoida taloudellisesti.

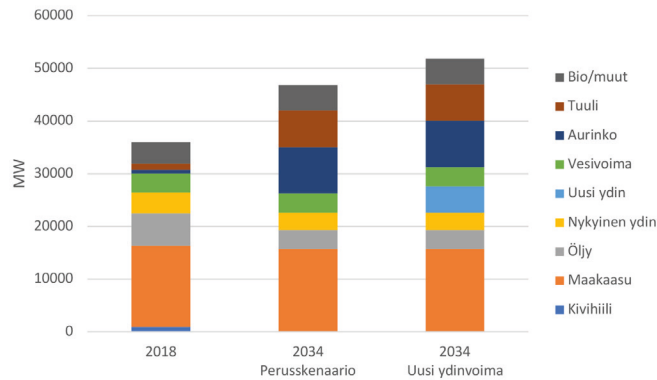
KORKEAN LÄMMÖN LÄMPÖVARASTOT

Ydinreaktorit tuottavat kuumaa höyryä, jolla tuotetaan turbiinigeneraattorissa sähköä. Mikäli tuotantoon halutaan joustoa, voidaan höyryn lämpö varastoida korkean lämpötilan lämpövarastoon. Tämä varastoitu energia voidaan myöhemmin ohjata jälleen turbiiniin ja tuottaa siitä sähköä. Tämä on mahdollisesti erittäin kustannustehokas tapa lisätä puhdasta ja joustavaa tuotantokapasiteettia sähköjärjestelmään.

Jotkin reaktorit, kuten sulasuolareaktorit Moltexilta ja Terrestrial Energyltä, voivat käyttää sulaa suolaa korkean lämpötilan lämmön varastointiin. Kevytvesireaktoreiden kanssa tähän käyttöön soveltuu myös esimerkiksi tulitiilet. Mikäli varaston yhteyteen liitetään ylimääräinen turbiini, reaktorin, energiavaraston ja turbiinien yhdistelmä voi vaihdella tuotantoaan ketterästi esimerkiksi 0 ja 200 % välillä, reaktorin nimellistehoon verrattuna, vaikka itse reaktori toimisi jatkuvasti täydellä teholla.

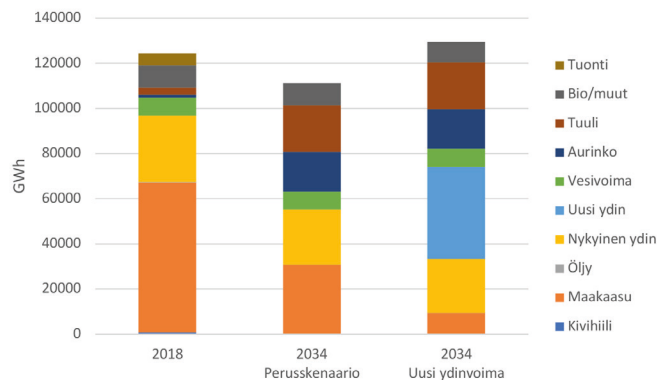
Oheisessa "Asennettu kapasiteetti" -graafissa⁵ paljon uusiutuvaa tuotantoa sisältävään skenaarioon lisättiin noin 10 % (5 GW) tällaista joustavaa, energiavarastolla ja ylimääräisillä turbiineilla varustettua ydinvoimaa. Kuten "Energiantuotanto" -graafista voidaan nähdä, tämä lisätty ydinvoima korvaa suurimman osan järjestelmän kaasuntuotannosta, ja siten myös päästöistä, jättäen uusiutuvan energiantuotannon ennalleen.

Asennettu kapasiteetti

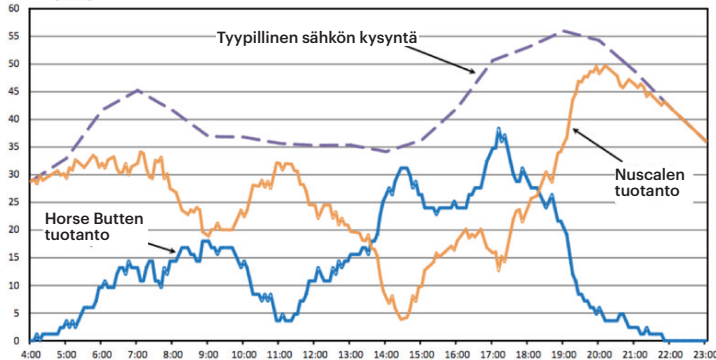


⁵ PLEXOS-mallinnusohjelmalla tehty alustava New Englandin alueen sähköverkon mallinnus. Perustuu Yhdysvaltojen uusiutuvan energian tutkimuslaitoksen, NREL:n, “Matala kaasun hinta, matala uusiutuvan energian hinta” -skenaarioon. Kuva: LucidCatalyst Ltd.

Energiantuotanto

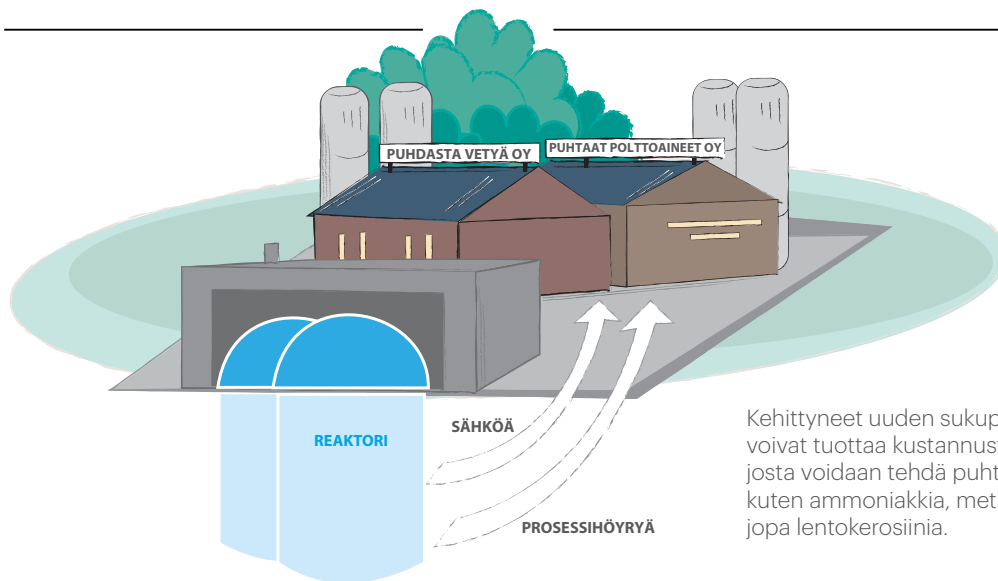


Teho (MWe)



NuScale Power Module tekee paikallisen verkon kysynnän ja tuulipuiston tuotannon kuormanseurantaa.

⁴ D. T. Ingersoll, C. Colbert, Z. Houghton, R. Snuggerud, J. W. Gaston and M. Empey, “Can Nuclear Energy and Renewables be Friends?” Proceedings of the 2015 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 2014), Nice, France, May 2-6, 2015. <http://tinyurl.com/yaws7mcc>



Kehittyneet uuden sukupolven ydinreaktorit voivat tuottaa kustannustehokasta vetyä, josta voidaan tehdä puhtaita polttoaineita kuten ammoniakkia, metaania, metanolia ja jopa lentokerosiinia.

Ydinvoiman käyttö muuhun kuin sähköntuotantoon

Ydinvoimaa on perinteisesti käytetty lähinnä sähköntuotantoon, mutta monet uudet pienreaktorit soveltuvat hyvin myös muuhun käyttöön. Globaalisti sähkö vastaa vain noin viidenneksestä energian loppukäytöstä, siinä missä noin puolet käytetään lämpönä ja noin neljännes liikenteessä.

Teollisuus aiheuttaa noin 28 %, 15 gigatonnia, globaaleista hiilidioksidipäästöistä⁶. Teollisuusalat kuten jalostamot, kemian teollisuus, sellu ja paperiteollisuus, valmistava teollisuus, metallien ja sementin tuotanto ja monet muut käyttävät hyvinkin korkeita lämpötiloja prosesseissaan. Paikallisesti käytetyt tehot ovat kuitenkin varsin maltillisia, joten tämä lämpö voitaisiin hyvinkin tuottaa vähäpäästöisesti pienreaktoreilla.

MATALAT LÄMPÖTILAT TILOJEN LÄMMITYKSEEN, JÄÄHDYTYKSEEN JA MERIVEDEN PUHDISTUKSEEN

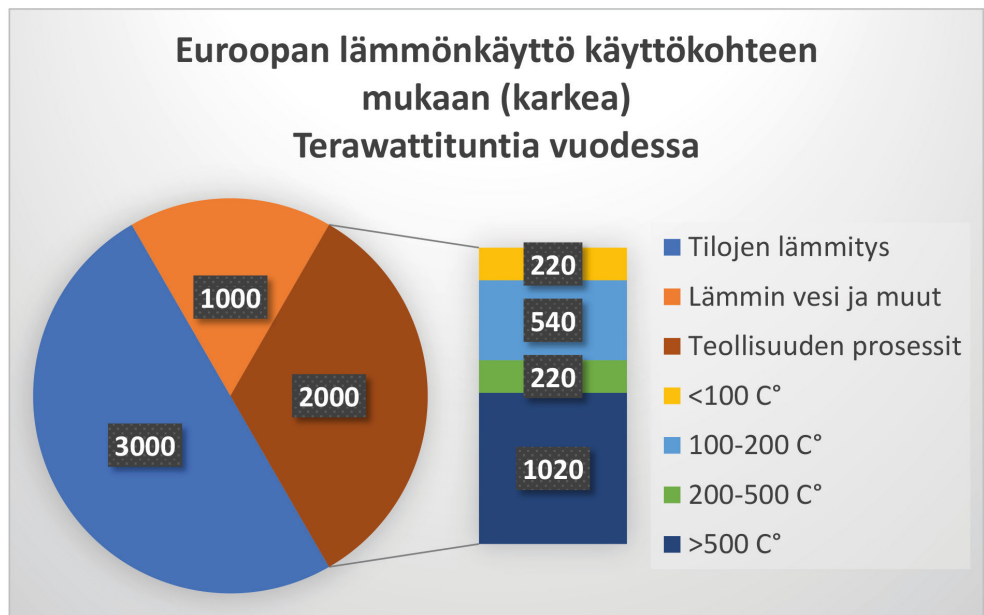
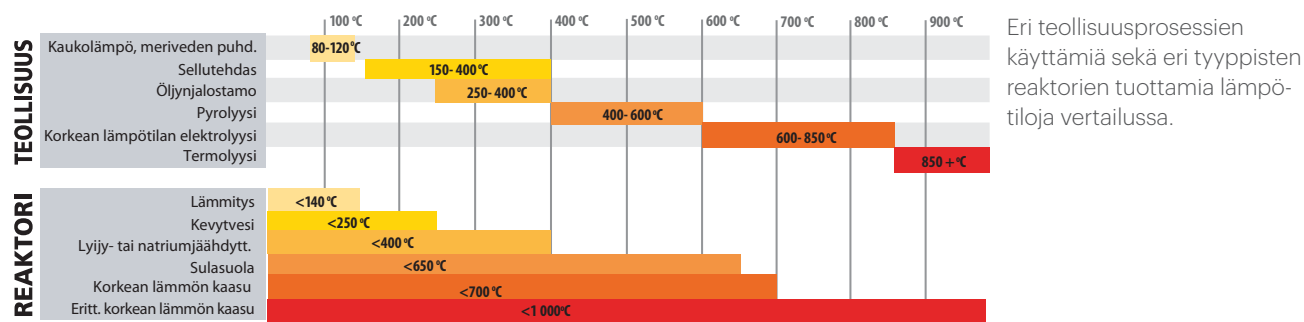
Noin kaksi kolmannesta käytetystä lämmöstä käytetään verraten matalana, 80 – 120 celsiusasteen lämpönä. Tämä käyttö sisältää lämpimän veden ja tilojen lämmityksen sekä

joitakin teollisia käyttökohteita. Tällaista matalalaausta lämpöä voidaan käyttää myös meriveden puhdistamiseen ja kaukojäähdytyksen tuotantoon.

Alhaisia lämpötiloja voidaan tuottaa luotettavasti ja edullisesti monin tavoin, kuten erilaiset hukkalämmöt ja lämpöpumput, lämmön ja sähkön yhteistuotanto sekä matalan lämpötilan lämpöreaktorit.

Pieni, lämmintä vettä tuottava reaktori voidaan suunnitella todella yksinkertaiseksi ja edulliseksi rakentaa ja käyttää. Yhtenä esimerkkinä, reaktori voi istua ”uima-altaan” pohjassa ja lämmittää siellä vettä, josta lämpö siirretään vaikkapa kaukolämpöverkkoon lämmönvaihtimilla. Koska laitos ei tuota korkeita lämpötiloja, saati sähköä, ei se myöskään tarvitse paksuja paineastioita tai höyryturbiineita.

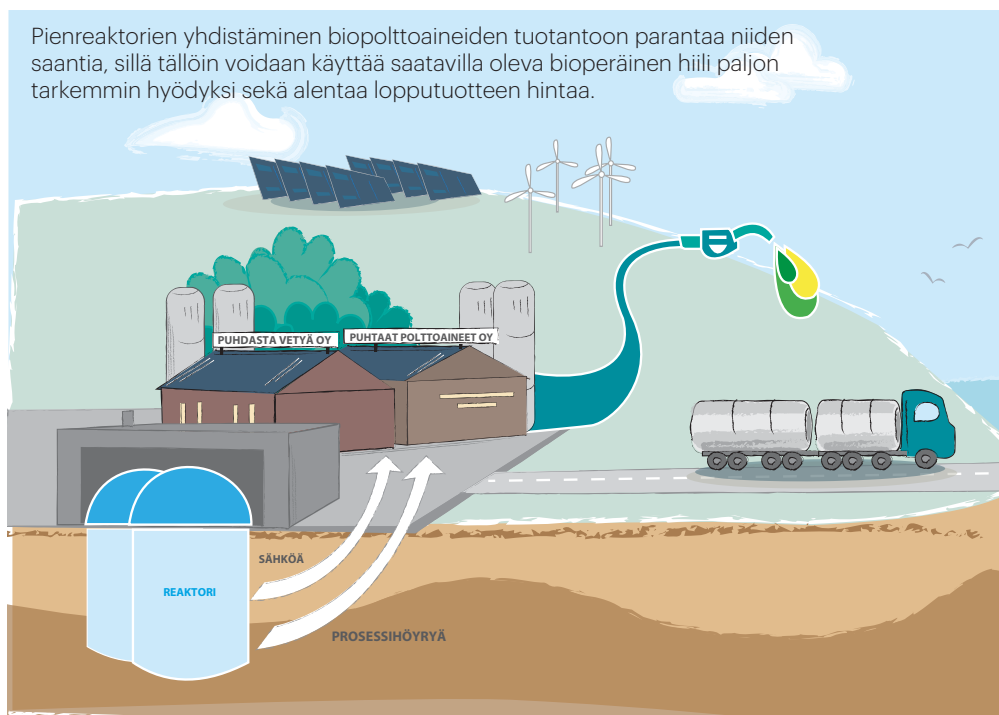
⁶ Noin kaksi kolmannesta (~10 gigatonnia) päästöistä tulee suorista teollisuuden prosesseista ja yksi kolmannes (~5 gigatonnia) tulee teollisuuden käyttämästä sähköstä. MacKinsey 2018: Decarbonization of industrial sectors: the next frontier



Noin puolet energiasta käytetään lämpönä. Euroopassa tämä on noin 6,000 TWh vuodessa. Se jakaantuu eri käyttökohteisiin ja lämpötiloihin kuvan mukaisesti.

SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANTO – CHP

Sähkön ja lämmön yhteistuotanto (CHP) on tehokas tapa tuottaa sekä sähköä että matalan lämpötilan lämpöä esimerkiksi kaukolämpöön. Yhteistuotannossa osa sähkötehosta menetetään, mutta vastineeksi saadaan paljon matala-asteista lämpöenergiaa. Riippuen toteutuksesta, CHP-tuotantolaitoksen ns. rakennusaste on yleensä välillä 70 – 90 % (vrt. sähköntuotantolaitoksella n. 1/3), joten hyötytuotantoa saadaan yli kaksinkertainen määrä pelkkää sähköä tuottavaan laitokseen verrattuna



Metsäteollisuus, sellu ja kehittyneet biotuotteet

Biojalostamot, kuten sellutehtaat, käyttävät paljon energiaa ja ovat suuria paikallisia päästölähteitä. Ne käyttävät yleensä prosessilämpöä välillä 150 ja 400 °C, ja käyttävät monesti myös vetyä, etenkin jos niissä valmistetaan toisen sukupolven biopolttoaineita. Tänä päivänä tarvittava energia tuotetaan yleensä polttamalla metsäteollisuuden jätte- ja sivuvirtoja kuten kuoria, purua, oksia ja mustalipeää (kts. laatikko).

Jos käytetty energia tuotettaisiin pienreaktorilla, voidaan osa biomassasta ohjata muuhun käyttöön, kuten kemianteollisuuden tai biopolttonesteiden raaka-aineeksi. Jos saatavilla on puhdasta ja edullista vetyä (lisää tietoa ydinvoimalla tuotetusta vedystä jäljempänä), voidaan biopolttoaineiden saantia kasvattaa ja lopputuotteen suhteellisia päästöjä pienentää merkittävästi.

PYROLYYSI JA BIOHIILI – HIILINEGATIIVISIA BIOPOLTTOAINEITA

Pyrolyysillä voidaan tehdä hiilinegatiivisia tuotteita ja polttoaineita monenlaisesta biomassasta. Yksi pyrolyysin tuote on biohiili, jota voidaan käyttää esimerkiksi maanparannukseen ja pitkäaikaiseen hiilen sidontaan. Muita tuotteita ovat pyrolyysiöljy ja synteetikaasu. Monesti nämä poltetaan pyrolyysin vaatiman prosessilämmön tuottamiseksi (400 – 600 °C). Mikäli prosessilämpö tuotettaisiin pienreaktorilla, voitaisiin näistä tuotteista tehdä esimerkiksi biopolttonesteitä ja kemikaaleja.

Öljynjalostus

Öljynjalostamot ovat suurimpia yksittäisiä päästölähteitä. Ne päästävät usein miljoonia tonneja hiilidioksidia vuodessa. Jalostuksessa käytetään 250-400 °C lämpötiloja, jonka avulla raakaöljystä erotetaan eri jakeet. Jalostamot käyttävät myös runsaasti vetyä arvokkaampien jakeiden – kuten bensiinin – osuuden kasvattamiseen⁷.

Tänä päivänä sekä lämpö että vety tuotetaan yleensä fossiilisista polttoaineista, mutta molemmat voitaisiin tuottaa myös soveltuvalle pienreaktorilla. Tähän sopisi joko kevytvesireaktori, jonka tuottaman höyryn lämpötilaa nostettaisiin tulistamalla (kts laatikko) tai korkeamman lämpötilan reaktorilla.

VEDYN TUOTANTO JA KÄYTTÖKOHEET

Edullinen ja puhdas vety on avain monien sektoreiden päästövähennyksiin. Vetyä käytetään nykyisin raaka-aineena kemian ja petrokemian teollisuudessa. Se on ammoniakkin pääraaka-aine (typen ohella), joka puolestaan on modernin maatalouden vaatiman typpilannoitteen pääraaka-aine. Tulevaisuudessa vetyä suunnitellaan käytettäväksi myös esimerkiksi teräksen tuotannossa koksien korvaajana (kts laatikko).

Vetyä voidaan käyttää myös polttoaineena, tai siitä voidaan valmistaa synteettisiä polttoaineita kuten metaania, metanolia ja jopa bensiiniä, dieselöljyä tai lentokerosiinia, sekä monia muita tärkeitä kemikaaleja. Noin 95 % käytetystä vedystä tehdään nykyisin fossiilisista polttoaineista kuten maakaasusta, kivihiilestä ja öljystä. Tästä seuraa merkittävät kasvihuonekaasupäästöt.

MUSTALIFEÄSTÄ POLTTOAINEITA

Mustalipeä on metsäteollisuuden sivutuote. Se on myös oiva raaka-aine biopolttonesteiden valmistukseen. Nykyisin se poltetaan sellutehtaan yhteydessä energiaksi, sillä se on kustannustehokas keino saada myös prosessien arvokkaat katalyytit talteen. Mikäli katalyytit saadaan kerättyä talteen jotenkin muuten, voi mustalipeästä valmistaa esimerkiksi biopohjaista lentokerosiinia.

PUHTAAN VEDYN VALMISTUS

Puhdasta vetyä voidaan valmistaa muutamalla tavalla. Elektrolyysissä käytetään sähköä, jonka sisältämästä energiasta noin 50-70 % saadaan vetynä. Korkean lämmön höyryelektrolyysi (HTSE) voi muuntaa yli 90 % sähkön energiasisällöstä vedyksi. Nimensä mukaan se käyttää sähköä lisäksi myös höyryä syötteenä, ja uusimmat laitteet pystyvät hyödyntämään myös matalampia lämpötiloja (150+ °C) todella tehokkaasti. Teknologia on kaupallistunut viimeisen kahden vuoden aikana.

Termolyysi, jossa lämpötila on yli 800 °C, ei tarvitse lainkaan sähköä, vaan vety erotetaan vedestä katalyyttien avulla pelkällä korkealla lämmöllä. Tämä vaatii joko lämmön tulistamista tai vielä kehitteillä olevan erittäin korkean lämmön reaktorin käyttämistä. Termolyysi on vielä kehitysstadiolla. Sekä termolyysin että korkean lämmön höyryelektrolyysin tavoitehinta tuotetulle vedylle on alle 2 € / kg, joka on vertailukelpoinen historialliseen fossiilisen vedyn keskihintaan Euroopassa.

HÖYRYN TULISTAMINEN

Jos prosessi tarvitsee 400 °C höyryä ja reaktorin tuottama höyry on vain 300 °C, voidaan höyryn lämpötilaa nostaa tulistamalla. Suurin osa energiasta kuluu veden höyryttämiseen (keittämiseen), kun taas itse höyryn lämpötilan nostamiseen tarvittu energiamäärä on vähäisempi. Tulistaminen voidaan tehdä esimerkiksi sähköllä, polttamalla maa/biokaasua, vetyä tai jotain muuta polttoainetta. Vaikka tulistamiseen käytettäisiin fossiilista polttoainetta, laskevat koko prosessin tuottamat päästöt merkittävästi.

VÄHÄPÄÄSTÖISTÄ TERÄSTÄ

Teräksen valmistaja SSAB suunnittelee siirtyvänsä koksiin (joka on lähes puhdasta hiiltä) vetyyn vähentääkseen päästöjä. Perinteistä elektrolyysiä käyttäen tarvitaan yhtiön arvion mukaan noin 25 terawattituntia sähköä vuodessa pelkästään vedyntuotantoon. Tämä vastaa noin kahden Olkiluoto 3-tyyppisen EPR-reaktorin vuosituotantoa, ja on lähes kolmannes Suomen vuotuisesta sähkönkäytöstä.

⁷ Vetyä käytetään pidempien hiilivety molekyylien lyhentämiseen käyttökelpoisemmiksi tuotteiksi sekä raakaöljyn rikin poistamiseen.

Tästä esitteestä saat nopeasti pienreaktorien perusteet:

mitä ne ovat, milloin ne tulevat kauppoihin, mitkä ovat niiden hyvä ja huonot puolet ja mihin niitä voi käyttää. Käyttökohteita kun on sähköntuotannon lisäksi myös erilaiset sähköverkon joustopalvelut, kaukolämmön tuotanto, meriveden puhdistaminen, monet teollisuuden prosessit ja jopa kustannustehokkaan puhtaan vedyn valmistus.

Suomenkielinen versio perustuu Energiforskin rahoittamaan englanninkieliseen esitteeseen, joka on saatavilla osoitteessa:
<https://www.energiforsk.se/media/27323/small-nuclear-reactors-and-where-to-use-them.pdf>.

Suomenkielistä versiota rahoitti Energiateollisuus ry.
Lisää tietoa pienistä reaktoreista saa esimerkiksi World Nuclear Associationin usein päivittyvältä sivulta oheisesta webosoitteesta: <http://tinyurl.com/y5fc2olm>

TÄMÄN ESITTEEN IDEOI JA TOTEUTTI THINK ATOM OY.

Think Atom on voittoa tuottamaton ajatuspaja, joka tutkii ja viestii ydinvoiman mahdollisuuksista energiajärjestelmän päästöjen kustannustehokkaaseen vähentämiseen.

Thinkatom.net

THINK ATOM

think deep decarbonization



Energiateollisuus



Energiforsk

Energiforsk AB | Phone: 08-677 25 30 | E-mail: kontakt@energiforsk.se
www.energiforsk.se | Office: Olof Palmes gata 31, Stockholm.
Address: 101 53 Stockholm