

Uusien ydinenergiateknologioiden mahdollisuudet ja kehitystarpeet

Pienet modulaariset sarjavalmisteiset ydinreaktorit eli SMR:t

Elina Hujala, Juhani Hyvärinen, Rauno Rintamaa, Heikki Suikkanen,
Juhani Vihavainen, Susanna Wähä

VALTIONEUVOSTON SELVITYS- JA
TUTKIMUSTOIMINNAN JULKAISUSARJA 2022:43

tietokayttoon.fi

Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2022:43

Uusien ydinenergiateknologioiden mahdollisuudet ja kehitystarpeet

Pienet modulaariset sarjavalmisteiset ydinreaktorit eli SMR:t

Elina Hujala, Juhani Hyvärinen, Rauno Rintamaa, Heikki Suikkanen,
Juhani Vihavainen, Susanna Wähä

Valtioneuvoston kanslia Helsinki 2022

Julkaisujen jakelu

Distribution av publikationer

**Valtioneuvoston
julkaisuarkisto Valto**

Publikations-
arkivet Valto

julkaisut.valtioneuvosto.fi

Julkaisumyynti

Beställningar av publikationer

**Valtioneuvoston
verkkokirjakauppa**

Statsrådets
nätbokhandel

vnjulkaisumyynti.fi

Valtioneuvoston kanslia

This publication is copyrighted. You may download, display and print it for Your own personal use.
Commercial use is prohibited.

ISBN pdf: 978-952-383-189-6

ISSN pdf: 2342-6799

Taitto: Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto

Helsinki 2022

Uusien ydinergiateknologioiden mahdollisuudet ja kehitystarpeet Pienet modulaariset sarjavalmistettävät ydinreaktorit eli SMR:t

Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2022:43

Julkaisija Valtioneuvoston kanslia

Tekijä/t Elina Hujala, Juhani Hyvärinen, Rauno Rintamaa, Heikki Suikkanen, Juhani Vihavainen, Susanna Wähä
Yhteisötekijä LUT Yliopisto
Kieli suomi **Sivumäärä** 88

Tiivistelmä

Pienet modulaariset sarjavalmistettävät ydinreaktorit eli SMR:t (PIEMOS) – selvitys tarkastelee, miten Suomen ydinenergialainsäädännössä huomioitaisiin uusien ydinergiateknologioiden mahdollisuuksia.

Selvitys perustuu julkisesti saatavilla olevaan tietoon ydinreaktoreiden tekniikasta, ydinvoiman sääntelyn historiaan Suomessa, kokemuksiin ydinalan käytännöistä luvituksessa ja valvonnassa, mahdollisuudesta tuottaa ydinvoimalla sähkön lisäksi lämpöä, sekä totuttua selvästi pienemmän yksikkökoon mahdollistamista uusista toimintamalleista.

Raportti tarkastelee sijoituspaikkaan, ydinaineisiin ja ydinteknologioihin liittyviä kysymyksiä: suojaetäisyyttä, maan alle sijoittamista sekä kaavoitusta ja YVA-menettelyä. Ydinaineiden osalta tarkastellaan ydinpolttoaine- ja jätehuoltoa sekä ydinmateriaalivalvontaa. Teknologian osalta tarkastellaan modulaarisuuden vaikutusta käyttökohteisiin, toteuttajatahoihin, valmiiden konseptien käyttämiseen ja kalliiden erikoisvalmistettävien välttämiseen, passiiviseen turvallisuuteen ja yksikkökoon vaikutukseen lupajärjestelmään.

Johtopäätös on, että ydinenergialakiin tarvitaan erillisten hyväksyntien mahdollisuus sekä laitostekniikalle että laitospaikalle, sarjatuotannon etujen varmistamiseksi. Valtioneuvoston periaatepäätöksen sisältöä ja luonnetta on myös mahdollista täsmentää. Turvallisuuden ja suojaetäisyyden arviointi tulisi perustua osoitettuihin suorituskykyihin.

Klausuuli Tämä julkaisu on toteutettu osana valtioneuvoston selvitys- ja tutkimussuunnitelman toimeenpanoa. (tietokayttoon.fi) Julkaisun sisällöstä vastaavat tiedon tuottajat, eikä tekstisisältö välttämättä edusta valtioneuvoston näkemystä.

Asiasanat tutkimus, tutkimustoiminta, ydinvoima, turvallisuus, ydinenergialaki, pienet modulaariset reaktorit, SMR

ISBN PDF 978-952-383-189-6

ISSN PDF 2342-6799

Julkaisun osoite <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-189-6>

Möjligheter och utvecklingsbehov i samband med ny teknik Småskalig modulär kärnreaktorer eller SMRs

Publikationsserie för statsrådets utrednings- och forskningsverksamhet 2022:43

Utgivare Statsrådets kansli

Författare Elina Hujala, Juhani Hyvärinen, Rauno Rintamaa, Heikki Suikkanen, Juhani Vihavainen, Susanna Wähä

Utarbetad av LUT Universitetet

Språk finska

Sidantal

88

Referat

I studien av serietillverkade småmodulära reaktorer, SMR, behandlas hur den finländska kärnenergilagen ska beakta ny teknik för småreaktorer.

Studien baserar sig på allmänt tillgänglig information om kärnreakorteknik, historia om kärnteknisk reglering i Finland, erfarenheter av tillstånds- och tillsynsverksamhet för kärnkraft, möjlighet att producera värme och kraftvärme utöver enbart el samt nya affärsmodeller som möjliggörs av små enheters storlek.

I detta betänkande behandlas placering, kärnämnen och kärnteknik, särskilt storleken på skyddszonen, underjordisk placering, planläggningsförfarande och miljökonsekvensbedömning av projekt och förordningar. Studien omfattar kärnbränsle- och kärnavfallshantering samt nukleär icke-spridning. När det gäller teknik omfattar studien effekter av modularitet på tillämpningar, implementering, användning av befintlig teknik och undvikande av dyra specialprodukter, passiv säkerhet och påverkan av enhetsstorlek på licenseringssystemet.

I rapporten dras slutsatsen att kärnenergilagen bör kompletteras med separat godkännandeprocesser för både reaktorteknik och anläggningsplats, för att säkerställa fördelarna med serieproduktion. Det är också möjligt att klargöra avsikten med och syftet med statsrådets principbeslutet. Säkerhetsbedömning och skyddszonsstorlek bör basera sig på bevisat förmåga.

Klausul

Den här publikation är en del i genomförandet av statsrådets utrednings- och forskningsplan. (tietokayttoon.fi) De som producerar informationen ansvarar för innehållet i publikationen. Textinnehållet återspeglar inte nödvändigtvis statsrådets ståndpunkt

Nyckelord

forskning, forskningsverksamhet, kärnenergi, kärnsäkerhet, kärnenergilagen, små modulära reaktorer, SMR

ISBN PDF 978-952-383-189-6

ISSN PDF

2342-6799

URN-adress <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-189-6>

Opportunities and development needs associated with new technology Small Modular serially produced nuclear reactors, SMRs

Publications of the Government's analysis, assessment and research activities 2022:43**Publisher** Prime Minister's Office

Author(s) Elina Hujala, Juhani Hyvärinen, Rauno Rintamaa, Heikki Suikkanen, Juhani Vihavainen, Susanna Wähä
Group author LUT University
Language Finnish **Pages** 88

Abstract

This report considers how the Finnish nuclear energy act should take into account new small modular serially produced reactor technologies.

The study rests on publicly available information on nuclear reactor technology, history of nuclear regulation in Finland, experiences of nuclear licensing and oversight practices, opportunity to produce heat and cogeneration in addition to electricity only, and new business models enabled by small unit size.

This report considers siting, nuclear materials and nuclear technologies, in particular size of emergency protection zone, underground siting, land use planning, and environmental impact assessment of projects and regulations. Regarding nuclear materials, the study covers nuclear fuel and nuclear waste management as well as nuclear safeguards. Regarding technology, the study covers effects of modularity on applications, implementation, use of existing technologies and avoidance of expensive special products, passive safety and impact of unit size on the licensing system.

The report concludes that nuclear energy act should be complemented with separate approval processes for both reactor technology and plant site, to ensure the benefits of serial production. It is also possible to clarify the intent and purpose of the Government Decision-in-Principle. Safety assessment and protection zone sizing should be performance based.

Provision This publication is part of the implementation of the Government Plan for Analysis, Assessment and Research. (tietokayttoon.fi) The content is the responsibility of the producers of the information and does not necessarily represent the view of the Government.**Keywords** research, research activities, nuclear energy, nuclear safety, nuclear energy act, small modular reactors, SMR

ISBN PDF 978-952-383-189-6**ISSN PDF** 2342-6799

URN address <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-189-6>

Sisältö

| | |
|--|----|
| Esipuhe | 8 |
| 1 Johdanto | 9 |
| 1.1 Tutkimuksen toteutus | 10 |
| 1.2 Käytettävät aineistot | 11 |
| 1.3 Tarkasteltavat reaktorityypit | 12 |
| 1.4 Ydinenergia osana sektori-integraatiota | 15 |
| 1.5 Ydinvoima ja yhteiskunnan kokonaisetut..... | 17 |
| 2 Sijoituspaikka | 20 |
| 2.1 Suojaetäisyys väestönsuojelua varten | 20 |
| 2.2 Maanpinnan alle sijoittaminen..... | 25 |
| 2.2.1 Suunnittelu ja rakentaminen | 26 |
| 2.2.2 Ydin- ja säteilyturvallisuus..... | 28 |
| 2.2.3 Lainvastaisen toiminnan ehkäisy | 28 |
| 2.2.4 Ydinmateriaalivalvonta | 29 |
| 2.3 Kaavoitus-, YVA- ja SOVA-prosessit | 29 |
| 2.3.1 Tarkentuva maankäytön suunnittelu ja kunnallinen itsehallinto | 29 |
| 2.3.2 Ydinlaitoshanke ja kaavoitus..... | 32 |
| 2.3.3 Ympäristövaikutusten arviointimenettely ydinlaitoksen suunnittelussa | 36 |
| 2.3.4 YVA periaatepäätösvaiheessa..... | 38 |
| 2.3.5 Kansallinen turvallisuus maankäytön suunnittelun näkökulmasta | 42 |
| 3 Ydinainekysymykset | 46 |
| 3.1 Polttoainehankinta, varastointi ja jätehuolto | 46 |
| 3.2 Kansainvälinen ydinmateriaalivalvonta | 48 |
| 4 Teknologian vaikutuksia | 52 |
| 4.1 Teknologioiden luonne, rakentamistapa, sijoituspaikat, energiamuodot..... | 52 |
| 4.1.1 Käyttökohteet..... | 53 |
| 4.1.2 Teknologiat..... | 55 |
| 4.1.3 Turvallisuussuunnittelu | 58 |
| 4.2 Kokoluokan vaikutus lupajärjestelmään ja -vaatimukseen..... | 59 |
| 4.3 Hankkeiden toteuttajatahot ja teknologian vaikutus lupamenettelyihin | 63 |
| 4.4 Valmiiksi suunniteltujen konseptien käyttäminen sellaisenaan | 66 |
| 4.4.1 Laitostason suunnittelukriteerit | 66 |
| 4.4.2 Suunnittelu- ja valmistussäännöt (codes and standards) | 70 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.5 | Tarpeettoman kalliiden erikoisvalmisteiden välttäminen | 72 |
| 4.5.1 | Viranomaistoiminta muilla turvallisuuskriittisillä alueilla | 72 |
| 4.5.2 | Laitekanta ja hyväksymismenettely | 73 |
| 4.5.3 | Luvituskäytäntö sarjatuotannossa | 75 |
| 4.6 | Passiivisten turvallisuustoimintojen suorituskyky | 76 |
| 5 | Johtopäätökset ja suositukset | 82 |
| | Liite 1. Ydinlaitoksen suunnitteluun liittyviä viranomaisprosesseja (S. Wähä).... | 86 |
| | Lähteet | 87 |

ESIPUHE

Pienet modulaariset sarjatuotetut ydinreaktorit, Small Modular Reactors (SMR), ovat sekä turvallisuuden, talouden että käyttökohteiden kannalta lupaava ydinvoimateknologian kehityssuunta. Nykyinen ydinenergialainsäädäntö ja valvontakäytännöt Suomessa perustuvat oletukseen, että ydinvoimaa rakennetaan harvakseltaan ja suurina yksikköinä, joissa on monimutkaisia turvallisuusratkaisuja ja paljon erikoisvalmisteisia osia.

Käsillä oleva selvitys pohjustaa ydinenergian valvonnan lupaprosesseja ja käytäntöjä huomioimaan SMR:ien ominaispiirteet ja käyttömahdollisuudet. SMR:t avaavat Suomelle uusia mahdollisuuksia sekä energiapolitiikan että teollisuuspolitiikan alueilla.

Selvitystyön ohjausryhmässä olivat edustettuina tilaaja työ- ja elinkeinoministeriö sekä lisäksi sosiaali- ja terveysministeriö, ympäristöministeriö, ulkoministeriö ja kutsuttuina asiantuntijoina Olli Kymäläinen Fortumista sekä Minna Tuomainen säteilyturvakeskuksesta sekä sisäministeriön edustaja.

PIEMOS-tutkimusryhmä kiittää ohjausryhmää vilkkaasta vuorovaikutuksesta ja väliseminaariin ja hankkeeseen kuuluneisiin haastatteluihin osallistuneita sidosryhmiä niiden rakentavasta kritiikistä ja runsaasta palautteesta, jota valmistelutyön aikana on saatu.

Juhani Hyvärinen, professori
Toukokuu 2022

1 Johdanto

Työ- ja elinkeinoministeriö on käynnistänyt ydinenergialain 990/1987 uudistuksen. Uudistuksen tueksi valtioneuvoston kanslia on tilannut LUT Yliopistolta selvityksen, jossa tarkastellaan pienten modulaaristen sarjavalmistesteisten reaktorien eli ns. SMR-ydinvoimalaitosten vaikutusta suomalaisen ydinvoimalaitosten luvituskäytäntöön. Tässä raportissa lainataan selvityksen tehtävämäärittelyä lukujen johdannoissa.

Tehtävämäärittelyn mukaan ”SMR (Small Modular Reactors) eli pienet modulaariset ja sarjavalmisteteiset ydinvoimalaitokset ovat muuttamassa ydinenergian hyödyntämistä sähkön tuotannossa hajautetun ja joustavamman tuotannon suuntaan mutta myös mahdollisuutena kaukolämmön, höyryn tai vedyn tuotantoon. Tämä muutos edellyttää muutoksia myös perinteiseen isoja voimalaitosyksiköitä palvelevaan ydinvoimalaitosten luvitukseen Suomessa. Kaupallisina ja sarjavalmisteteisina yksikköinä toteutuessaan pienet reaktorit tuovat merkittävän mahdollisuuden hiilivapaaseen energiantuotantoon. Maailmanlaajuisesti tähän on kiinnostusta erityisesti rakennettaessa sähkö/lämpökapasiteettia etäisiin paikkoihin, ml. arktiset alueet sekä kehittyviin maihin rakennettaessa sähköntuotantoa, joka olisi mahdollisimman huoltovapaata. Saudi-Arabiassa ja Emiraateissa mielenkiinto SMR-teknologiaan kohdistuu juomaveden valmistukseen merivedestä sähköllä. Suomeen hankkeita on mahdollisesti odotettavissa vuosikymmenen puolivälissä siten, että ensimmäiset SMR-voimalaitokset voisivat olla käytössä ennen vuotta 2035, jolloin myös Suomen tavoite hiilineutraalista energiantuotannosta tulee täyttää. Pienillä lämmitysreaktoreilla olisi mahdollista säästää suuri päästövähennys kohtuullisin kustannuksin ja toimitusvarmalla tavalla.

Työ- ja elinkeinoministeriön (TEM) ydinenergialain kokonaisarviointityöryhmä (REILA) päätyi kesällä 2020 suosittamaan ydinenergialain (YEL) kokonaisuudistusta, jota myös perustuslakivaliokunta on esittänyt jo useamman kerran lakiin liittyvissä hallituksen esitysten arvioinneissaan. Keskeinen asia tässä kokonaisuudistuksessa tulee olemaan Suomen luvitusjärjestelmä ja sen soveltuvuus tuleviin ydinenergian käytön tarpeisiin, ml. ydinjätehuolto, laitosten käytöstäpoisto ja uusien sekä uudentyyppisten (SMR) laitosten rakentaminen. REILA-raportissa (TEM, 2020) ennakoitiin sekä laitospaikan että reaktorityypin ennakkohyväksyntöjen käyttöönoton tarpeellisuus, mutta tietopohja näiden määrittelyyn puuttuu. Ennakkohyväksynnät voivat liittyä SMR-laitosten osalta uudensijaisiin sijoituspaikkoihin, ydinaineiden hallintaketjuun tai modulaarisen teknologian rakentamiseen ja käyttöön.

Tietotarpeita uusien säännöksiä laatimiseen ja viranomaistyön kehittämiseen liittyen esiintyy laajalti hallinnossa. TEM on vastuussa ydinenergialainsäädännön kehittamisestä ja

siten myös ydinlaitosten päälupien valmistelusta valtioneuvostossa. Ympäristöministeriö (YM) on vastuussa luvitusta edeltävien ympäristövaikutusten arviointimenettelyjen kehittämisestä, ja TEM toimii ydinlaitosten osalta myös YVA-hankkeiden yhteysviranomaisena.”

1.1 Tutkimuksen toteutus

Tutkimuskysymykset on jaoteltu kolmessa seuraavassa pääluvussa kuvattujen aihealueiden mukaisesti sijoituspaikkaa, ydinaineita ja modulaarista teknologiaa koskeviin aiheisiin. Kaikissa kysymyksissä **tuotetaan vastaukset kansallisessa kontekstissa ja huomioidaan kansainväliset käytännöt** soveltuvassa laajuudessa.

Kussakin luvussa kuvataan julkisiin kotimaisiin tai ulkomaisiin aineistoihin ja vuorovaikutukseen perustuva selvitys, joka voi olla luonteeltaan markkina- tai kirjallisuuskatsaus tai pienimuotoinen laskennallinen tutkimus. Jokainen luku päätty perusteltuihin ehdotuksiin siitä, miten sen aihetta olisi tarkoituksenmukaisinta käsitellä suomalaisessa lainsäädännössä, luvituksessa tai viranomaismenettelyissä.

PIEMOS-selvityksen laatineen tutkimusryhmän kokoonpano on seuraava: LUT Yliopiston Ydinvoimatekniikan tutkimusryhmän tutkijatohtori Elina Hujala, professori Juhani Hyvärinen, tutkijatohtori Heikki Suikkanen, laboratorioinsinööri, TKT Juhani Vihavainen sekä LUTin ulkopuolisina asiantuntijoina TKT Rauno Rintamaa ja HTM Susanna Wähä. LUT Yliopiston tutkimusryhmällä on laaja ydinvoimalaitostekniikan ja ydinturvallisuuden asiantuntemus, joka perustuu sekä akateemiseen tutkimustyöhön että teollisuudelle ja turvallisuusviranomaiselle tehtyyn työhön. TKT Rintamaa on perehtynyt materiaali- ja valmistusteknisiin kysymyksiin ja ydintekniikan kansainväliseen verkostotoimintaan. HTM Wähällä on laaja kokemus lainvalmistelusta, maankäyttöön liittyvistä kysymyksistä mm. suurista teollisuushankkeista ja ympäristövaikutusten arvioinnista.

Tutkimusryhmä vastaa yhteisesti luvuista 1 Johdanto ja 5 Johtopäätökset. Päävastuumuista luvuista jakaantuu seuraavasti: 2.1 Hujala, 2.2 Hyvärinen, 2.3 Wähä; 3.1 Vihavainen, 3.2 Hyvärinen; 4.1 Suikkanen, 4.2 Hyvärinen ja Suikkanen, 4.3 ja 4.6 Hyvärinen, 4.4 ja 4.5 Rintamaa.

Pienen modulaarisen reaktorin eli Small Modular Reactor (SMR) käsite on varsin väljä eikä sille ole muuta yleisesti hyväksyttyä määritelmää kuin ”lämpöteholtaan pienempi kuin 1000 MW reaktori”. Käytännössä tätä rajaa ylitetään, eräät laitosvalmistajat myyvät SMR-nimikkeellä lähes 1500 MW lämpötehoista reaktoria. Toisessa ääripäässä pienimmät voimalaitoskäyttöön tarkoitetut reaktorit ovat lämpöteholtaan suuruusluokkaa 20 MW. Siksi tässä raportissa on omaksuttu käytäntö erotella nykyään käytössä olevat eli ”isot” reaktorit

SMR:stä ja ”pienistä” reaktoreista lämpötehon mukaisesti jäljempänä määritelmiä-laatikossa esitetyllä tavalla.

Reaktoreiden kokoon liittyviä määritelmiä

Iso ydinreaktori = lämpöteholtaan **1500 MW tai enemmän**. Suomessa käytössä olevat reaktorit sekä Loviisassa että Olkiluodossa kuuluvat tähän joukkoon.

SMR = lämpöteholtaan **alle 1500 MW**. Tämä kattaa kaikki kaupalliset ja suunnitellut pienet modulaariset reaktorit aina mikroreaktoreihin asti.

Pieni reaktori = lämpöteholtaan suuruusluokkaa **10–300 MW** reaktorit.

1.2 Käytettävät aineistot

Tämä selvitys perustuu julkisesti käytettävissä olevaan tietoon. SMR:ien toteutukseen liittyy lukuisia uusien toimintamahdollisuuksia, joita olemassa oleva kirjallisuus ei vielä kata. Tällaisten piirteiden selvittämiseksi hankkeessa on hyödynnetty mm. REILA-työryhmän tekemiä kartoituksia, joilla on selvitetty toimijoiden odotuksia. Lisäksi selvityksen alustavia tuloksia on esitelty puoliväliseminaarissa Helsingissä 27.10.2021. Puoliväliseminaarissa saatu palaute sekä palautteen pohjalta edelleen käyty keskustelu Energiateollisuus ry:n ja sen jäsenyritysten kanssa osaltaan muodostavat pohjan työlle. Keskustelun pohjalta on muodostunut hyvä kuva siitä, millaisia uudistuksia lainsäädäntöön tarvittaisiin SMR:ien laajamittaisen käytön mahdollistamiseksi tehokkaalla tavalla.

Ydinlaitosten teknologioita on kuvattu tämän selvityksen tarpeisiin riittävällä tarkkuudella IAEA:n Advanced Reactors Information System (ARIS) ja sen julkaisumuotoinen yhteenveto Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), 2020 Edition. (IAEA, 2020) Dokumentti sisältää tekniset perustiedot 70 SMR-reaktorista, ja kattaa kaikki kehitteillä olevat SMR-reaktoriteknologiat.

Rakentamisen ja toteutuksen kaupallisia järjestelymahdollisuuksia on kuvattu mm. suomalaisten voimayhtiöiden 2000-luvulla laatimissa periaatepäätöshakemuksissa. Periaatepäätöshakemuksissa on keskitytty ison voimalaitoksen rakentamiseen, mutta esitetty useita

erilaisia toteutusmallivaihtoehtoja, jotka kaikki voisivat periaatteessa tulla kyseeseen myös sarjatuotantona valmistettaville pienille reaktoreille.

Voimalaitoshankkeen toteutusvaihtoehtojen ääripäät ovat ns. kokonaistoimitus (EPC, Engineering Procurement and Construction), jossa laitoksen teknologiatoimittaja (tai toimittajien konsortio) ottaa kokonaisvastuun hankkeesta, ja hajautettu hankinta, jossa laitoksen omistajalla on kokonaisvastuu ja teknologiatoimittajat ym. toimivat alihankkijaroolissa.

Edellä mainittu TEMin julkaisu 2020:43 sisältää pohdintoja mahdollisista toteutusmalleista. Nämä julkaisut muodostavat lähtökohdan PIEMOS-hankkeen selvitykselle. Business Finland -rahoitteen EcoSMR-projektin tuottamaa tietoa on hyödynnetty siinä laajuudessa kuin sitä on ollut oikea-aikaisesti julkisesti käytettävissä.

Luvitusjärjestelmän juridiikkaa varten PIEMOS-hanke käyttää lähtötietoinaan ydinturvallisuuskonventiota, NPT-sopimusta lisäpöytäkirjoineen, EU-direktiivejä ydinturvallisuuden ja ydinjätehuollon turvallisuuden alalta sekä YVA-menettelystä ja muuta relevanttia määräys- ja säädösdokumentaatiota mukaan lukien kansainväliset maaraportit. Dokumentteihin perehdytään suoraan, tai haastatellen niitä hyvin tuntevia asiantuntijoita. Ydinaineita koskevien kysymysten osalta PIEMOS pohjautuu YORY- ja YETI-työryhmien raportteihin sekä IAEA:n ohjeisiin.

Turvallisuusviranomaisen valvontamenettelyjen tarkastelussa PIEMOS tukeutuu Säteilyturvakeskuksen (STUK) strategiaan, STUKin valvontatyöstä käytännössä saatuun kokemukseen, jota on raportoitu mm. KELPO- ja KELPO2-projekteissa, Luvike1 ja Luvike2-selvityksissä sekä IAEA:n ja WENRAn tekemään säännöstökehitysohjelmaan, niiltä osin kuin näillä on merkitystä SMRien ja PIEMOSin ongelmanasettelun kannalta.

PIEMOSissa hyödynnetään myös laskennallisia arvioita päästöjen leviämisestä tai passiivisten lämmönsiirtomekanismien toiminnasta. Lainsäädännön ja viranomaistoiminnan kehittämisen kannalta on tärkeää, että laskennallinen mallintaminen on mahdollisimman läpinäkyvää ja helposti ymmärrettävää, ja siksi PIEMOSissa tehtävät laskelmat perustuvat ensisijaisesti olennaisten ilmiöiden analyttiseen ratkaisemiseen.

1.3 Tarkasteltavat reaktoryypit

Selvitykseen on valittu taulukossa 1 luetellut viisi edustavaa pientä modulaarista reaktoryyppiä. Tyypit on valittu kattamaan lähitulevaisuudessa kaupallisesti saatavilla olevat vaihtoehdot (NuScale ja BWRX-300, molemmat Yhdysvalloista), keskipitkän aikavälin eurooppalainen vaihto NUWARD™, venäläinen valmiiksi suunniteltu laivareaktori RITM-200 sekä geneerinen kotimainen kaukolämmitysreaktorikonsepti. Valitut tyypit ovat kaikki

kevytvesireaktoreita ja kattavat kaikki keskeiset SMR-sovelluskohteet: sähkön tuotannon, sähkön ja lämmön yhteistuotannon, puhtaan lämmöntuotannon ja päästöttömän merenkulun.

”Modulaarisuus” toteutuu näissä reaktoreissa eri tavoin. Yksittäinen NUWARD- ja NuScale-moduuli sisältää itse ydinreaktorin ja sen välittömästi ympärille rakennettavan suojarakennusrakenteen. Moduuli tuottaa höyryä, jonka lämpöenergiaa muutetaan sähköksi tavanomaisella voimalaitosprosessilla erillisessä rakennuksessa. Reaktori+suojarakennus-moduuleja voidaan sijoittaa 2–12 kpl yhteiseen rakennukseen, yhteiseen vesialtaaseen, joka toimii turvallisuutta varmistavana lämpönieluna. BWRX-300 -laitoskonsepti taas sisältää kaikki voimalaitoksen toiminnot yhden ydinreaktorin ympärille rakennettuina.

Laitostyyppistä riippumatta kaikissa laitoskonsepteissa käytetään sarjatuotantona valmistettavia laitteita: putkistoja, painesäiliöitä, venttiileitä, lämmönvaihtimia, pumppuja, mootoreita, toimilaitteita, sähkökeskuksia, automaatiojärjestelmiä ja -laitteita jne. Sarjatuotantoa on siis tarpeen tarkastella sekä laitostason että laitetaso kannalta.

Taulukko 1. Esimerkkejä SMR-reaktoreista.

| | Tyyppi | Kotimaa | Rakennustapa | Lämpöteho MW | Palama MWd/kgU |
|--------------------|--------|-------------|--------------------------------|-----------------|-------------------|
| BWRX-300 | BWR | USA, Japani | Osin maan alla | 870 | 50 |
| NUWARD | iPWR | Ranska | Maan alla | 540 | 60 |
| NuScale | iPWR | USA | Osin maan alla | 200 | 30 |
| RITM200 | iPWR | Venäjä | Kelluva | 165 | 51 |
| Suomi- Reaktori | DHR | Suomi | Osin tai kokonaan maan alla | 20–50 MWth | 30 |

Lyhenteet: BWR kiehumisvesireaktori, iPWR painevesireaktori, jossa koko primääripiiri on paineastian sisällä (”integroitu”), DHR kaukolämpöreaktori.

Ydinvoimalaitosten turvallisuussuunnittelu perustuu pohjimmiltaan syvyyspuolustusperiaatteeseen (Defence-in-Depth), jota toteutetaan sekä rakenteellisilla että toiminnallisilla ratkaisuilla. Uusien ydinvoimalaitosten osalta noudatettavat yleiset periaatteet on kirjattu kansainvälisen atomienergiajärjestön IAEA:n keskeisiin vaatimuskirjoitukseen (SF-1 ja SSR-2/1 Rev 1). Nämä dokumentit osaltaan muodostavat periaattellisen ja teknisen perustan kansainväliselle ydinturvallisuussopimukselle (CNS), joka on IAEA:n jäsenmaita juridisesti sitova. Ydinturvallisuussopimukseen liittyneet IAEA:n jäsenmaat ovat siirtäneet IAEA:n tekniset vaatimukset omaan säännöstönsä.

PIEMOS-projektissa tarkastelujen reaktorien alkuperämaat (Yhdysvallat, Ranska, Venäjä ja Suomi) ovat kaikki sitoutuneet ydinturvallisuussopimukseen ja noudattavat näin ollen yhtenäisiä suunnitteluperiaatteita. Käytännön toteutuksissa ja vaatimusten yksityiskohdissa on kuitenkin eroja johtuen teollisuushistoriallisista, lakiteknisistä ja kulttuurisista syistä.

Suuret ydinvoimamaat kuten Yhdysvallat ja Iso-Britannia ovat sisällyttäneet lainsäädäntöönsä teknologian ennakoarvioinnin ja ennakkohyväksyntä. Yhdysvalloissa ydinvoimalaitos voidaan luvittaa kahdella vaihtoehdoisella tavalla,

- määräyksen 10CFR50 mukaisesti niin, että laitoksen omistaja hakee laitokselle rakentamislupaa (Construction Permit, CP) , teknologiatoimittajien tuella, ja rakentamisen valmistuttua käyttö lupaa (Operating License, OL) (10CFR50, 2022), tai
- määräyksen 10CFR52 mukaisesti niin, että teknologian omistaja (laitostoimittaja) hakee laitoksensa tekniselle suunnittelulle hyväksyntää (Design Certification), jonka jälkeen laitoksen omistaja voi hakea yhdistettyä rakentamis- ja käyttö lupaa (Combined Construction and Operating License, COL). Rakentamisluvan toisena edellytyksenä on laitospaikan ennakkohyväksyntä, Early Site Permit (ESP). (10CFR52, 2022)

NuScale-laitos on käynyt läpi 10CFR52 mukaisen, tyypillisesti viisi vuotta kestävä Design Certification -prosessin. Prosessi on pitkä, myös kallis. BWRX-300 laitostoimittaja GE Hitachi suunnittelee luvittavansa laitoksen vanhan 10CFR50:n menettelyn mukaisesti, mikäli heidän yhdysvaltalainen asiakkaansa tekee tarvittavan investointipäätöksen. GE Hitachi on aiemmin hakenut ja saanut Design Certification -hyväksynnän laitospaikalleen ESBWR, josta useita olennaisia piirteitä ja teknisiä ratkaisuja on siirretty BWRX-300:an.

Yhdysvaltalaisen reaktorien tapauksessa laitosten turvallisuusteknisen suunnittelun lähtökohdina ovat olleet olemassaolevat uraanidioksidipolttoaineella toimivien kevytvesireaktorien suunnitteluperusteet (10CFR50 Appendix A). Samat vaatimukset pätevät riippumatta lupaprosessista (10CFR50 tai 52).

Iso-Britanniassa on käytössä Generic Design Assessment -prosessi, jossa laitoksen teknologian omistaja voi hyväksyttää teknologiansa nelivaiheisessa arvioinnissa. Mahdolliset laitospaikat on osoitettu Iso-Britannian hallituksen Strategic Site Assessment -prosessissa vuonna 2011.

Yhdysvaltain (Nuclear Regulatory Commission (NRC)) että Kanadan (Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC)) ja myös Britannian (Office for Nuclear Regulation (ONR)) viranomaiset lisensoivat parhaillaan useita muitakin SMR-laitoksia kuin tässä raportissa

tarkastellut. Kevytvesireaktorioiden turvallisuussuunnittelun osalta laitostoimittajat Yhdysvalloissa ovat seuranneet olemassa olevaa säännöstöä, joka on aluperin laadittu isoja laitoksia silmällä pitäen. Laitostoimittajat ovat kuitenkin esittäneet joihinkin turvallisuustehtäviin olennaisesti uudenlaisia teknisiä ratkaisuja, ja hakeneet näille NRC:n erillishyväksyntiä. NRC itse on katsonut tarpeelliseksi käynnistää säännöstönsä uudelleen arvioinnin neljällä osa-alueella:

1. onnettomuuden lähdetermin määrittäminen ja sijoittelusäännöt
2. valmiustoiminnan mitoitusvaatimukset
3. ydinvastuuvakuutusten koon määrittäminen oikeudenmukaisesti
4. turvajärjestely- ja ydinmateriaalivalvonnan vaatimukset.

Nykyinen NRC:n säännöstö edellyttää kategorisesti reaktorioiden sijoittamista kauas asutuksesta.

Lisäksi Ranskassa NUWARD™ -konseptille on muodostettu lisensiointia varten erillinen kansainvälinen asiantuntijaelin (International Advisory Board), jossa suomalaiset voima-yhtiöt ovat mukana. **Kaikkia näitä kehitystöitä on syytä seurata, jotta voidaan tarvittaessa olla tietoisia, mitä tukea ne voivat tuoda lainsäädännön kehitystyöhön ja lisensioinnin erityiskysymyksiin Suomessa.**

1.4 Ydinenergia osana sektori-integraatiota

Suomi on sitoutunut EU:n ilmasto- ja energiatavoitteisiin, jossa kasvihuonekaasupäästöt EU-tasolla pyritään vähentämään vähintään 55 %:iin vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Lisäksi pyritään saavuttamaan ilmastoneutraalius 2050 mennessä. (Anon., 2021) Suomi pyrkii hiilineutraaliksi jo ennen EU:n määräaika, sillä Suomen nykyisessä hallitusohjelmassa tavoitellaan hiilineutraaliutta vuoteen 2035 mennessä (Anon., 2019). Työ- ja elinkeinoministeriön johdolla on valmisteilla ilmasto- ja energiastrategia tukemaan hallitusohjelman tavoitteiden saavuttamista.

Ydinenergialla on jo tällä hetkellä merkittävä rooli Suomen energiajärjestelmässä, sen muodostaessa noin kolmasosan Suomessa tuotetusta sähköstä (Tilastokeskus, 2022). Ydinenergiaa on toistaiseksi käytetty Suomessa pelkästään sähkön tuottamiseen. Pohjimiltaan ydinreaktori kuitenkin tuottaa lämpöä, jota voidaan hyödyntää sellaisenaan tai muuntaa edelleen sähköksi. Ydinreaktorilla tuotettua lämpöä tai sähköä voitaisiin haluttaessa varastoida lämpövarastoihin tai akkuihin, tai niitä voitaisiin hyödyntää tuottamaan energiankantajia kuten vetyä tai synteettisiä polttoaineita. Ydinreaktoreita käytetään myös tuottamaan työntövoimaa esimerkiksi jäänmurtaajissa. Uraanipolttoaineella tuotetusta energiasta saadaan sähköksi muunnettuna muuntohäviöiden vuoksi hyötykäyttöön

vain reilu kolmannes mutta hyödyntämällä kaikki tuotettu energia suoraan lämpönä lähes koko tuotettu energiamäärä. Ydinenergia on potentiaalisten hyödyntämistapojensa osalta monipuolinen ja tuotantovarma energialähde, jonka avulla voidaan edesauttaa ja diversifioida Kuviossa 1 havainnollistettua sektori-integraatiota.

Kuvio 1. Päästöttömän energian uudenlaista siirtoa, käyttöä ja muuntaa kuvaa Sektori-integraatio (TEM, 2021). Ydinvoimalaitos voidaan liittää osaksi sähkö ja lämpöverkkoa syöttämään sähköä ja lämpöä sekä teollisuuden että kotitalouksien tarpeisiin.



Ydinvoiman elinkaaren kasvihuonekaasupäästöt ovat samaa suuruusluokkaa vesi- ja tuulivoiman kanssa (UNECE, 2021), joten se on ilmastoystävällinen energiantuotantomuoto. Osana EU:n kestävien investointien luokittelua eli ns. taksonomiaa on selvitetty täyttääkö ydinvoima ns. do no significant harm -kriteerin (JRC, 2021). Selvityksessä ei löytynyt tieteen perustuvia todisteita, että ydinvoima aiheuttaisi sen enempää haittaa ihmisten terveydelle tai ympäristölle kuin muut taksonomiaan jo sisällytetyt sähköntuotantomuodot. Tuotettuun energiamäärään suhteutettuna ydinvoima on hyvin resurssitehokas sekä käytetyn polttoaineen että maankäytön osalta. Ydinvoiman maankäyttö on huomattavasti tehokkaampaa kuin tuuli- tai aurinkovoiman. Suurten ydinvoimalaitosten kohdalla merkittävin huomioon otettava ympäristövaikutus on erityisesti sisämaahan sijoitettavilla laitoksilla merkittävä jäähdytysveden käyttö ja tähän hyödynnettävään vesistöön kohdistuva lämpökuorma. (JRC, 2021)

Suomessa tuotetaan energiaa sähkönä, lämpönä sekä niiden yhteistuotantona. Vuonna 2020 Suomessa tuotettiin sähköä yhteensä 66,6 TWh ja tuotiin 15,0 TWh. Tuotetusta sähköstä 34 % tuotettiin ydinvoimalla, 36 % vesi-, tuuli- ja aurinkovoimalla, 16 % uusiutuvilla polttoaineilla ja 14 % fossiilisilla polttoaineilla ja turpeella. Vastaavasti kaukolämpöä tuotettiin 35,1 TWh ja teollisuuslämpöä 51,1 TWh. Kaukolämmöstä 55 % ja teollisuuslämmöstä 79 % tuotettiin yhteistuotantona. Kaukolämmöstä 43 % tuotettiin fossiilisilla polttoaineilla ja turpeella ja 44 % uusiutuvilla polttoaineilla. Teollisuuslämmöstä 77 % tuotettiin uusiutuvilla polttoaineilla, pääosin mustalipeällä. (Tilastokeskus, 2022)

Tällä hetkellä Suomessa kulutetaan sähköä hieman alle 90 TWh vuodessa. Kaukolämpöä kulutetaan 37–39 TWh, liikennepolttoaineita noin 40 TWh edestä. Jos oletetaan kaiken liikenteen sähköistyvän täysin, tarvitaan sähköä noin kolmannes polttoaineen lämpöarvosta eli 14 TWh, sähkömoottorin hyvän hyötysuhteen ansiosta. Jos kaukolämpö korvataan täysin lämpöpumpuilla, joiden tehokerroin olisi tyypillinen 3, tarvittaisiin lämmön tuotantoon sähköenergiaa 13 TWh. Täysin sähköistyneessä Suomessa kulutusta (käyttöä) vastaava energian tarve olisi siis 90+14+13 TWh eli noin 110–120 TWh vuodessa. Keskusteluissa on esitetty, että erityisesti tuulivoiman lisääminen nostaisi Suomessa energiantuotantoa huomattavasti suuremmaksikin, suuruusluokkaan 120–200 TWh. Tarpeen ylittävä sähköenergia voidaan käyttää esimerkiksi kemiallisten polttoaineiden synteisiin (ns. P2X-järjestelmä.)

Sähköntuotanto Suomessa on hiilidioksidipäästöjen osalta jo varsin puhdasta, sillä valtaosa sähköstä tuotetaan uusiutuvilla energialähteillä ja ydinvoimalla. Ydinvoiman osuus sähköntuotannossa kasvaa edelleen kun Olkiluoto 3:n käyttö täydellä teholla alkaa. Yhteistuotannon ja lämmön erillistuotannon osalta tilanne on toinen, sillä niiden tuotanto perustuu vielä suurelta osin fossiilisiin polttoaineisiin ja turpeeseen sekä puupohjaisiin polttoaineisiin. Lämmöntuotantoon liittyvä erityisvaatimus on, että tuotannon olisi sijoitettava verrattain lähellä kulutusta siirrosta aiheutuvien lämpöhäviöiden minimoimiseksi. Tämän vuoksi lämpölaitokset ja kaukolämpöverkot ovat paikallisia.

1.5 Ydinvoima ja yhteiskunnan kokonaisetut

Voimassa olevan ydinenergialain (YEL, 990/1987) mukaan yleiseltä merkitykseltään huomattavan ydinlaitoksen rakentaminen edellyttää valtioneuvoston periaatepäätöstä (VNpp) siitä, että ydinlaitoksen rakentaminen on yhteiskunnan kokonaisedun mukaista (YEL 11 §). Säännöksen perusteella yleiseltä merkitykseltään huomattava ydinlaitos ja erityisesti ydinvoimalaitoksen rakentamista koskeva hanke on tullut saattaa mahdollisimman varhaisessa vaiheessa valtioneuvoston käsiteltäväksi. Näin ollen valtioneuvoston toimivaltaan kuuluu päättää siitä, onko hanke yhteiskunnan kokonaisedun mukainen ja sallitaanko hanketta siten vielä jatkettavan.

Valtioneuvoston periaatepäätös, jossa hankkeen katsotaan olevan yhteiskunnan kokonaisedun mukainen, on saatettava eduskunnan käsiteltäväksi, joka voi kumota päätöksen tai jättää sen kumoamatta. Päätös, jolla eduskunta on jättänyt periaatepäätöksen kumoamatta, merkitsee asiallisesti vain lupaa jatkaa valmistelutoimia ja sitä, että rakentamisluvan myöntämisen edellytys on tältä osin olemassa.

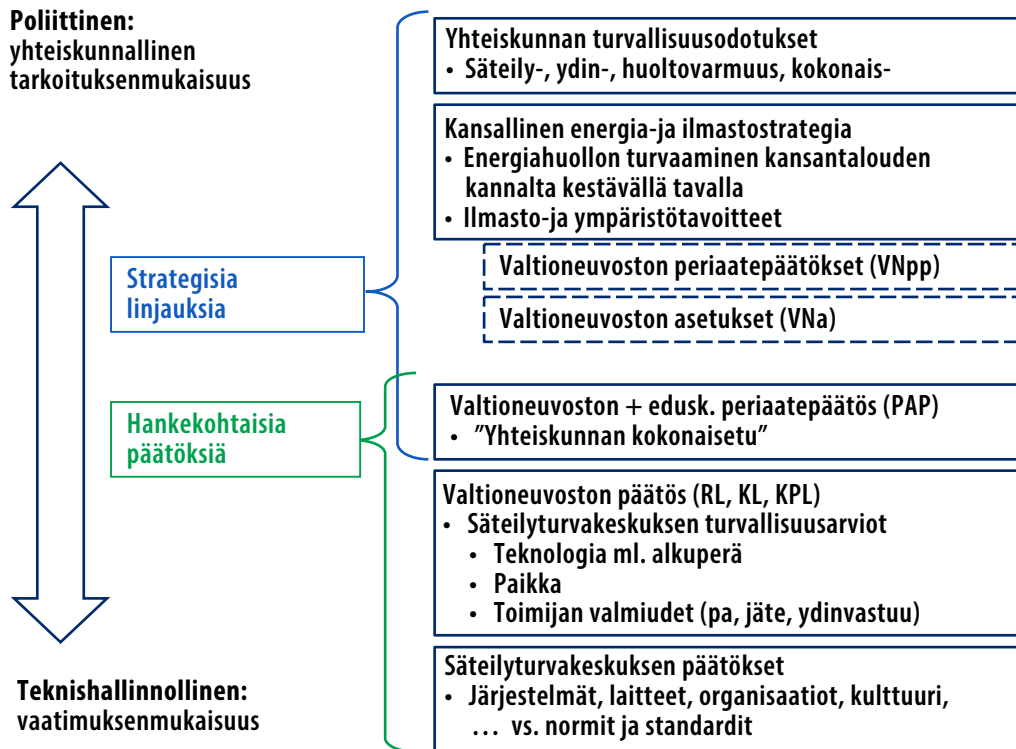
Ydinenergialaissa on poikkeuksellisella tavalla kytketty periaatepäätösmenettely osaksi YEL:n aineellisoikeudellista lupamenettelyä. Valtioneuvoston rooli on tehdä periaatepäätös tarkoituksenmukaisuusharkintaan perustuen tarkastellessaan hankkeen yhteiskunnan kokonaisedun mukaisuutta. Hallituksen esityksessä kokonaisharkintaan vaikuttaviksi tekijöiksi on tunnistettu seuraavia asioita. Energiahuollon varmistaminen, energiatuotannon ja erityisesti ydinenergian tuottamisen teknilliset edellytykset, energian merkitys kansantaloudessa ja erityisesti tuotannontekijänä sekä ydinenergian tuottamisen vaatimien pääomien merkitys koko kansantalouden kannalta. Edelleen HE:ssä on katsottu, että merkityksellisiä voivat olla tekijät, jotka liittyvät energiatuotannon omavaraisuuteen ja kriisiajan polttoainehuoltoon ja eri energiantuotantotapojen keskinäiseen suhteeseen sekä suomalaisen teknologisen tietämyksen edistämiseen. (HE 16/1985, s.24.) Ydinenergian käytön turvallisuus ei kuitenkaan ole tarkoituksenmukaisuusharkinnan kohteena yhteiskunnan kokonaisedun harkittaessa, vaan riittävä turvallisuustaso ratkaistaan oikeuskysymyksenä, jonka perusteet ovat lakia alemman tasoissa säännöksissä ja määräyksissä.

Tähänastisissa ydinlaitoshankkeiden periaatepäätöskäsittelyissä eduskunta on tehnyt poliittisia linjauksia päätösten sisältöön valiokuntalausuntojen kautta. Yhteiskunnan kokonaisedun lieneekin ymmärrettävä ajassa muuttuvaksi käsitteeksi, jonka lopullinen sisältö tarkentuu kulloisessakin päätöksentekotilanteessa, laajentaen laissa ja lain perusteluissa esitettyjen arvioitavien asioiden joukkoa. Tätä, ja poliittisen tarkoituksenmukaisuusharkinnan ja turvallisuusarviontiin kuuluvan vaatimustenmukaisuuden arvioinnin suhdetta, on havainnollistettu kuvassa Kuvio 2.

Myönteisen periaatepäätöksen käsittely eduskunnassa tarkoittaa lupamenettelyn näkökulmasta sitä, että eduskunnalle on YEL:lla annettu hallintotehtävä. Tästä poikkeuksesta erottaa lainsäädäntövalta, toimeenpanovalta ja tuomiovalta toisistaan seurasasi, että YEL aikanaan käsiteltiin perustuslain säätämisjärjestyksessä.

Valtioneuvoston periaatepäätös ei siis tyypillisesti ole ensimmäinen vaihe muiden valtakunnallisesti merkittävien hankkeiden lupaprosessissa. Tavanomaisesti valtioneuvoston periaatepäätöksellä annetaan valtion hallinnolle ohjeita ja suuntaviivoja asioiden valmistelulle, eikä niillä ole välittömiä oikeudellisia vaikutuksia kansalaisiin.

Kuvio 2. Nykyisen ydinenergilain mukainen ydinlaitoksen periaatepäätös on luonteeltaan sekä strateginen linjaus että hankekohtainen lupavaihe. Lyhenteet: RL rakentamislupa, KL käyttö lupa, KPL käytöstäpoistolupa. Poliittiseen harkintaan voidaan sisällyttää muitakin elementtejä kuin kuvassa luetellut odotukset ja tavoitteet.



Ydinenergian käytön valvonta ja tarve varmistua käytön turvallisuudesta ovat asioita, jotka ovat ajankohtaisia ydinlaitoshankkeen tyyppistä riippumatta. Erikseen tarkasteltavia kysymyksiä liittyy kuitenkin siihen, pitääkö valtioneuvoston periaatepäätöksen olla ydinenergian käytön mahdollistavassa lupamenettelyssä ensimmäinen vaihe vai voisiko valtioneuvoston päätöksen sisältö olla nykyistä strategisempi. Voisi olla tarpeen myös tarkastella ydinenergian käytön yhteiskunnallista hyväksyttävyyttä osana energiahuoltovarmuuden kokonaisuutta, yksittäisten hankkeiden asemesta.

Energiaoikeudellisesta näkökulmasta on merkitteä pantavaa, että muita energian tuotantoon liittyviä hankkeita kuin ydinvoimalaitoksia ei käsitellä valtioneuvostossa osana lupaprosessia, vaikka yhteiskunnan kokonaisedun harkintaa koskeva kriteeristö sinänsä voisi olla soveltamiskelpoinen energiasektorilla yleisemminkin.

2 Sijoituspaikka

Teemakuvausten mukaisesti ”SMR-laitoksia suunnitellaan lähemmäs asutusta ja yhteiskunnan muita toimintoja. Lämpöä tuottavat reaktorit olisi tuotava lähelle asutusta. Niiden luontainen turvallisuus (passiivinen) tulisi osoittaa sekä laitoksen sisältä että ulkopuolelta vaikuttavia vaaroja vastaan. Sijoituspaikkojen määrä tulisi myös kasvamaan merkittävästi nykyisestä kahdesta toiminnassa olevasta ydinlaitospaikasta (Loviisa ja Olkiluoto) ja yhdestä hankevaiheessa olevasta (Hanhikivi).”

2.1 Suojaetäisyys väestönsuojelua varten

Millaisia ovat SMR-reaktoreiden turvajärjestelyt ja turvaetäisyydet ja miten ne määritetään ja miten turvaetäisyydet ja vaadittavat turvajärjestelmät eroavat nykyisistä sovelluksista?

Ohjausryhmän mukaan tehtävänasettelussa mainituilla turvajärjestelyillä ja turvaetäisyyksillä tarkoitetaan väestönsuojelun suunnitteluperusteita laitoksen ulkopuolella, mm. laitoksen ja asutuksen väliin tarvittavaa etäisyyttä.

Perinteisesti ydinvoimalaitoksia on tyypillisesti käytetty lähinnä sähköntuotantoon, jolloin niiden sijoittaminen kauas tiheästä asutuksesta on ollut helpoin tapa vähentää mahdollisen poikkeavan tapahtuman aiheuttamia säteilyaltistuksia. SMR:iä on sähköntuotannon lisäksi mahdollista (mutta ei välttämätöntä) käyttää myös sähkön ja kaukolämmön yhteistuotantoon tai jopa pelkästään lämmöntuotantoon, jolloin laitoksen sijoittaminen lähemmäs asutusta on järkevää ja välttämätöntäkin.

Verrattaessa tarkasteltavien SMRien lämpötehoja esimerkiksi Suomen lämpöteholtaan 4300 MWth Olkiluoto 3 reaktoriin, tarkasteltavien reaktoreiden lämpötehot ovat 0,5 %–20 % Olkiluoto 3:n tehosta (Suomi-reaktori/20 MWth, BWRX-300/870 MWth). Pienempi lämpöteho merkitsee pienempää määrää polttoainetta ja näinollen pienempää kokonaisaktiivisuusinventaaria. Yleisimmät laitoksen ulkopuolelle päätyvät päästöt ovat peräisin polttoaineen vauriosta. Useimmiten polttoaine vaurioituu yksittäisten polttoainesauvojen tai -nippujen vaurioituessa polttoaineen siirron yhteydessä. Riippuen tarkastellusta laitostyyppistä verrattuna perinteisiin voimaloihin on SMR:ssä, joko perinteistä laitosta lyhyemmät polttoaineniput,

vähemmän nippuja tai molempia. Tällöin polttoaineaurion ja siitä mahdollisesti syntyvän päästön aktiivisuuden voidaan olettaa olevan paljon pienempi kuin esimerkiksi nykyään yleisesti hyväksytty vakavan onnettomuuden 100 TBq suuruinen ¹³⁷Cs ekvivalentti. On siis syytä tarkastella myös SMR:ien vaatimaa turvaetäisyyttä.

Tarkasteltaessa tarvittavaa suojaetäisyyttä mahdollisessa onnettomuustilanteessa päädyttiin käyttämään yksinkertaistettua Gaussin mallia (Zannetti, 1990) ja laskemalla saatu säteilyannos päästöpilven keskikohdalla pilven osuessa maanpinnalle. Reaktorin piipun korkeutta varioitiin matalasta viiden metrin piipusta tavanomaiseen 100 metrin piippuun, viidellä eri piipun korkeudella. Mallinnukset tehtiin pääasiassa kolmella Pasquill-Giffordin säästabiilisuusluokalla A, D ja F (Pasquill, 1961). Pasquill-Giffordin stabiilisuusluokat on esitetty taulukossa Taulukko 2.

Taulukko 2. Pasquill-Giffordin stabiilisuusluokat säätiloina sekä laskennoissa käytetyt keskimääräiset tuulen nopeudet 10 metrin vertailukorkeudella (US EPA, 1995).

| Stabiilisuusluokka* | Vastaavuus säätilana | Säätötyypille käytetty keskimääräinen tuulen nopeus 10 metrin verrailukorkeudella [m/s] |
|---------------------|-------------------------------------|---|
| A | Kirkas, hyvin aurinkoinen kesäpäivä | 2 |
| B | Aurinkoinen ja lämmin kesäpäivä | 3,5 |
| C | Puolipilvinen päivä | 4,5 |
| D | Pilvinen päivä/yö | 6 |
| E | Puolipilvinen yö | 3,5 |
| F | Kirkas talviyö | 2 |

*Mallinnukseen otettiin tyypillinen pilvinen päivä/yö (D), kirkas kesäpäivä (A) ja kirkas talviyö (F), jotta saataisiin mahdollisimman laaja kuva sään vaikutuksesta säteilyaltistukseen.

Laskennoista haluttiin tehdä mahdollisimman yksinkertaisia ja ymmärrettäviä, osittain tästä syystä päädyttiin käyttämään 1TBq kokonaisaktiivisuusinventaarina. On huomioitavaa, että 1 TBq päästömaksimiin ei päästä pelkillä passiivisilla turvallisuusjärjestelyillä vaan turvallisuusjärjestelyjen, pienen aktiivisuusinventaarin ja hyvän suojarakennustoiminnon yhdistelmällä. Annos käyttäytyy lineaarisesti aktiivisuusinventaarin funktiona, joten 1 TBq aktiivisuutta vastaavasta annoksesta voidaan helposti määrittää muita aktiivisuusinventaa-reja vastaava annos kertomalla 1 TBq vastaava annos halutulla aktiivisuusinventaarilla. 1 TBq sopii tarkastelun pohjaksi myös siksi, että jos päästönä käytetään jotain muuta, on se helppo 1 TBq päästöstä skaalata.

Koska SMR:iä ei toistaiseksi ole vielä käytössä on laskennan aloitusparametrit määritetty lähintä tunnettua polttoainekoostumusta apuna käyttäen. Loviisan voimalaitoksen VVER-440 reaktorin aktiivisuusinventaarit tunnetaan polttoaineen käyttöjakson lopulla. VVER-440 reaktorien poistopalama on myös lähellä SMR:ien suunniteltuja poistopalamia ja suurin osa tarkasteltavista SMR:stä käyttää samantyyppistä polttoainetta kuin nykyisin käytössä olevat ns. isot laitokset. Tarkastelu tehtiin lyhyen ajan päästölle, 1–7 vuorokautta, ja tarkasteltaviksi isotoopeiksi otettiin jodi-131 (^{131}I), cesium-137 (^{137}Cs) sekä krypton-85 (^{85}Kr). Laskennassa ei ole näin ollen otettu huomioon pitkäaikaisannosta, johon vaikuttaisi mm. ravintoketju. Isotoopeista käytetyt laskentaparametrit on esitetty Taulukossa 3.

Taulukko 3. Päästölaskennan alkuparametrit.

| Isotooppi | Puoliintumisaika | Aktiivisuusinventaarit VVER-440 laitoksessa käyttöjakson lopulla [Bq] | Kaasuaukko-osuus |
|-------------------|------------------|--|------------------|
| ^{131}I | 8 d | $1,5 \cdot 10^{18}$ | 2,2 |
| ^{137}Cs | 30,2 a | $1,1 \cdot 10^{17}$ | 3,3 |
| ^{85}Kr | 10,76 a | $1,1 \cdot 10^{16}$ | 3,3 |

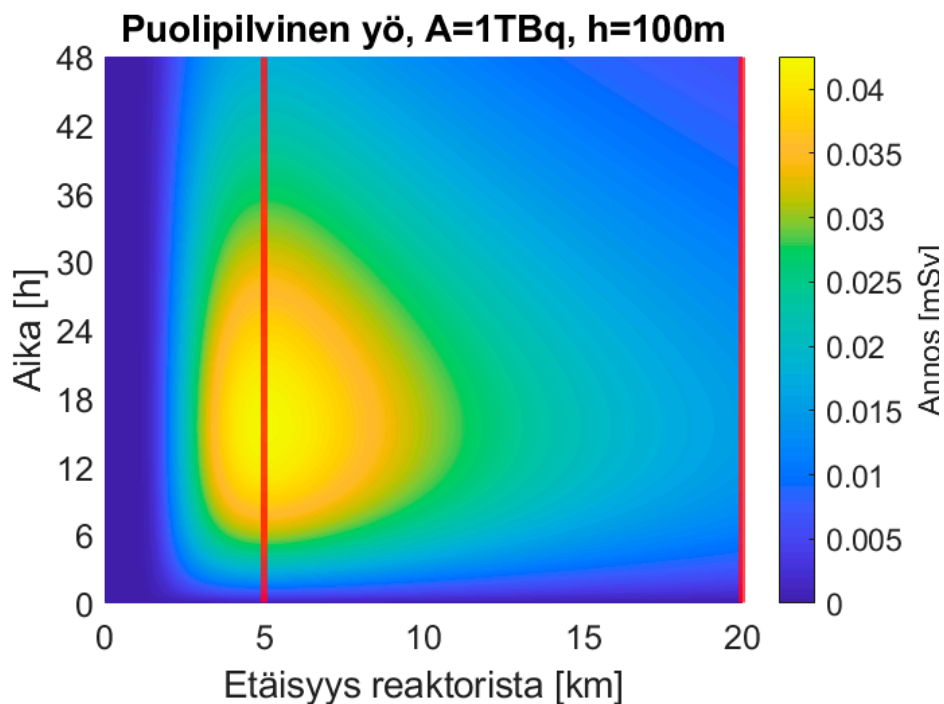
Tunnetun aktiivisuusinventaarin perusteella 1 TBq aktiivisuus koostuu noin 90 prosenttisesti jodista, 9 prosenttisesti cesiumista ja 1 prosenttisesti kryptonista. Koska tarkasteltavat reaktorit ovat joko kokonaan tai osittain maan alla eikä niiden tarkkaa piipun korkeutta ole tiedossa on piipun korkeutena käytetty viittä eri korkeutta 5 metrin piipusta, tavanomaiseen 100 metrin piippuun. Samasta syystä myöskään rakennuksen päästöpilveä levittävää vaikutusta ei ole otettu huomioon. Päästön oletetaan vapautuvan laitoksen suojarakennukseen, josta se vapautuu ilmakehään piipun kautta vuorokauden kuluessa. Lyhytikäisen jodin dominoidessa päästöä, päästön maksimi nähdään jo kahden vuorokauden tarkastelussa.

Voimassaolevan säännösten mukaan voimalaitosta ympäröi noin 5 kilometrin etäisyydelle asti suojavaiohyke, jolla on maankäyttörajoituksia (STUK Y/2/2018). Tämän lisäksi määräyksen STUK Y/2/2018 mukaan on muodostettava noin 20 km etäisyydelle laitoksesta ulottuva varautumisalue, jolle viranomaisten on laadittava väestön suojaamista koskeva yksityiskohtainen ulkoinen pelastussuunnitelma.

Päästölaskennassa käytettäviin säämalleihin vaikuttavat useat tekijät: vuodenaika, vuorokauden aika, pilvisuus, maaperä (kaupunki/maaseutu), tuulen nopeus jne. Jos mallinnetaan 1 TBq päästöä käyttäen säätilana Suomessa varsin yleistä puolipilvistä yötä olettaen,

että päästö vapautuu 100 metriä korkeasta piipusta, saadaan tulokseksi kuvan Kuvio 3 mukainen tilanne.

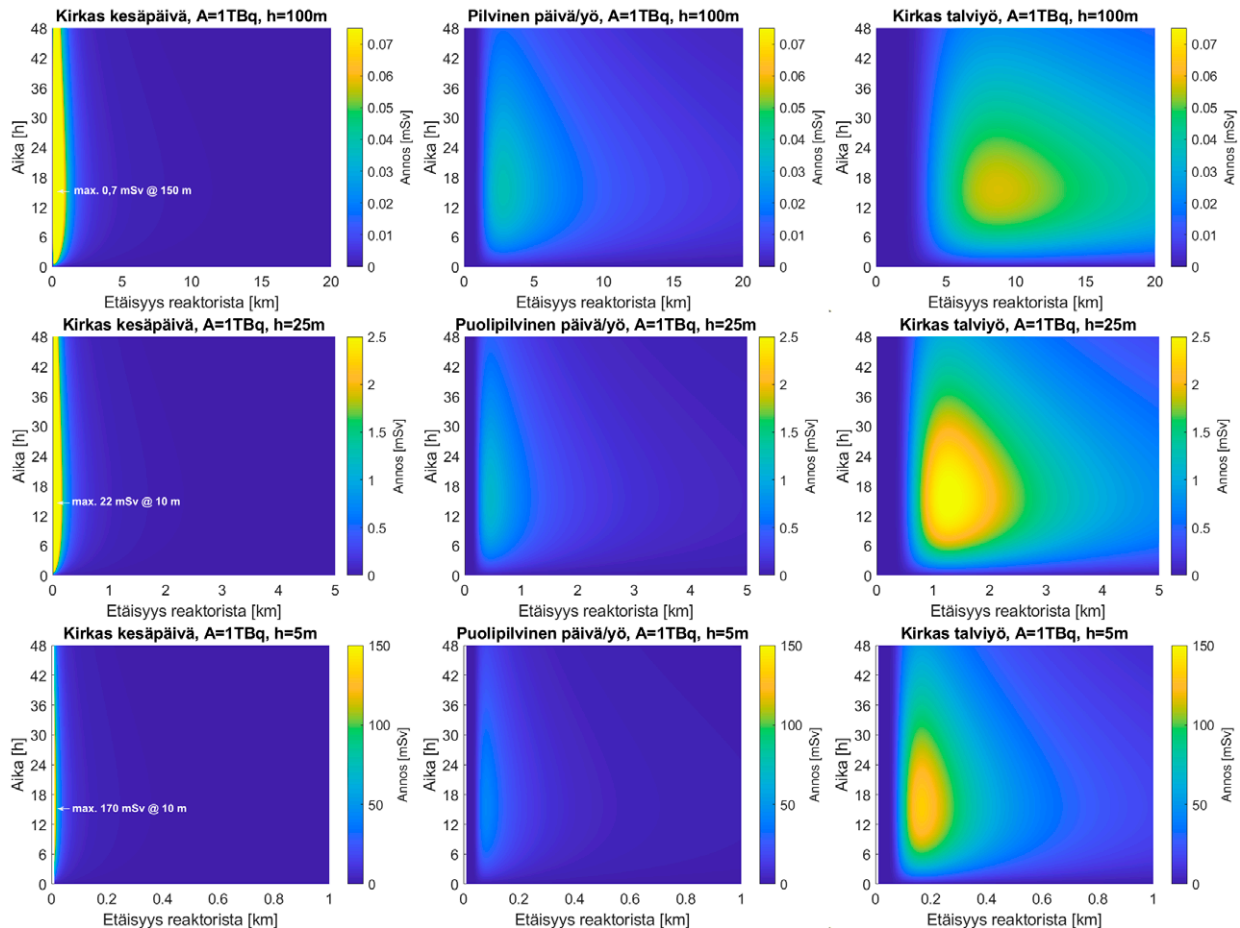
Kuvio 3. Esimerkinomainen annoskertymä puolipilvisenä päivänä/yönä kahden ensimmäisen vuorokauden aikana päästöstä 1 TBq kokonaispäästölle, joka vapautuu 100 m korkeasta piipusta ensimmäisen vuorokauden aikana. Kuvaan on merkitty punaisella viivalla nykysäännösten mukainen 5 km suojavyöhykkeen raja sekä 20 km varautumisalueen raja.



Kuvasta nähdään, että jos onnettomuuspäästö on 1/10 nykyisin sallitusta, lyhyen ajan (viikon) säteilyannoskertymä aivan laitoksen lähistölläkin voi alittaa 20 mSv, joka on nyky sääntöjen mukaan suurin sallittu annos suunnittelun perustaonnettomuuksien laajennustilanteille. Havaitaan myös, että suurin laskeuma tulee juuri nykyisen suojavyöhykkeen 5 kilometrin rajan kohdalle. Näin ollen voidaan todeta, että pelkkä etäisyys ei riitä suojaamaan säteilyn vaikutuksilta, vaikkakin etäisyyden kasvattaminen laimentaakin päästöpilveä ja laskeumaa.

Tarkasteltaessa 1 TBq päästön kulkua 2 vuorokauden aikana 100 metrin, 25 metrin ja 5 metrin piipun korkeuksilla kirkkaana kesäpäivänä (A), puolipilvisenä päivänä/yönä (D) tai kirkkaana talviyönä (F) saadaan kuvan Kuvio 4 mukainen tilanne.

Kuvio 4. Päästöpilven leviäminen ja saatu annos etäisyyden ja ajan funktiona, kolmella eri päästön korkeudella (100, 25 ja 5 m), kolmella eri säätyypillä (erittäin sekoittava, keskimääräinen ja vähän sekoittava).



Päästön ajallista käyttäytymistä pilven keskiakselilla seurataan 48 tunnin ajan (pystyakseli) Tarkastelu-etäisyys lyhenee piipun korkeuden lyhentyessä. Korkealle 100 metrin piipulle (ylärivi) tarkastelu-etäisyys on 20 km, kun lyhimmälle 5 metrin piipulle (alarivi) etäisyys on 1 km. Kirkkaana kesäpäivänä (vasen sarake) sää on hyvin turbulентtinen, jolloin päästöpilvi osuu maahan hyvin lähellä reaktoria, 150–10 metrin päähän. Tähän säätyyppiin on merkitty myös säteilyannoksen maksimi-arvo sekä etäisyys reaktorista. Säteilyannoksen maksimi havaitaan kyseisissä mallinuksissa 15–16 tunnin kuluttua päästön alkamisesta.

Kuvasarjasta voidaan havaita, että suurimmat paikalliset annokset syntyvät kirkkaana kesäpäivänä hyvin turbulентtisella säällä, joka aiheuttaa suurimman laskeuman lähes välittömästi reaktorin viereen. 1 TBq aktiivisuusinventaarilla annokset kauempana reaktorista jäävät nopeasti milliSievertin osiin korkealla 100 metrin piipulla. Päästömaksimi

sattuu vasta yli vuorokauden päähän päästön alkamisesta, mikä antaa tarvittaessa aikaa evakuoinneille.

Piipun korkeuden vaikutusta arvioitaessa havaittiin, että säämallit toimivat parhaiten, kun piipun korkeus on vähintään 25 metriä. Toisaalta tällöin myös laitoksen lähialueen laskeuma jää pienemmäksi ja annos laimenee levitessään laajemmalle alueelle. Selvityksen perusteella voidaan suositella, että SMR:n ilmastointipiipun korkeuden tulisi olla vähintään 25 metriä.

Mallinnuksesta voidaan päätellä, että suojavaoähykkeen etäisyyttä voitaisiin huomattavasti lyhentää nykyisestä etäisyydestään alle 500 metriin. Toisaalta yksiselitteinen etäisyysraja voidaan johtaa annosarvioiden perusteella vasta kun on päätetty mitoittavat sääolosuhteet. Laitoksen välittömässä läheisyydessä pystyttävä työskentelemään myös mahdollisen onnettomuustilanteen aikana, toisaalta suojaetäisyyden ulkopuolella olisi voitava välttää mahdolliset väestönsuojelutoimenpiteet.

Tämän selvityksen puitteissa on tarkasteltu vain lyhytaikaista annosta. Tarkemmissa analyyseissä saadaan lisää muuttujia sekä aktiivisuusinventaarista että altistusreiteistä, kun tarkastellaan pidemmän aikavälin annoskertymiä.

Suunnitellun ydinlaitoksen suojaetäisyyden hyväksyttävyyks tulisi voida varmistaa jo ennen rakentamislupakäsittelyä. Tällainen ennakkohyväksyntä voisi olla osa laitospaikan ennakkohyväksyntäprosessia.

2.2 Maanpinnan alle sijoittaminen

Minkälaisia mahdollisuuksia ja haittoja sisältyy ydinreaktorin sijoittamiseen maanpinnan alapuolelle, suunnittelun, rakentamisen, ydin- ja säteilyturvallisuuden, lainvastaisen toiminnan ehkäisyn ja ydinmateriaalivalvonnan kannalta?

Perinteiset isot ydinvoimalaitokset on rakennettu suurimmaksi osaksi maan pinnalle. Iso laitos perustetaan joko peruskallioon louhittavaan kaivantoon, jos peruskallio on tarpeeksi lähellä maan pintaa, kuten Suomessa yleensä on laita. Pehmeään maaperään rakennettaessa voimalaitoksen pohjalaatan täytyy olla paksumpi kuin kallioperän varaan rakennettaessa. Isossa voimalaitoksessa turvallisuuden kannalta tärkeitä laitososia on tyypillisesti sekä maan pinnan yläpuolella että alapuolella; maan pinnan yläpuolella olevat turvallisuudelle tärkeät rakennukset suojataan ulkoisilta kuormituksilta mitoittamalla vankkoiksi tai hyödyntäen laitosalueen muiden rakennusten suojausvaikutusta.

Pienten modulaaristen ydinreaktoreiden osalta rakentamisessa on useita vaihtoehtoja:

- Kaupallisesti saatavat SMR:t rakennettaisiin perinteiseen tapaan, kuitenkin niin, että turvallisuuden kannalta keskeiset laitososat olisivat kokonaan maanpinnan alapuolella (NuScale, BWRX-300) (osittain maan alla)
- Turvallisuuden kannalta keskeiset laitososat voidaan sijoittaa maanpinnan alapuolelle niin, että niiden yläpuolella olevat rakennusosat suojataan maamassoilla peittämällä (Nuwardin varhaiset versiot, LUTin kaukolämpöreaktorikonsepti)
- Mikäli käytettävissä on suuria vapaita kalliotiloja, voidaan SMR:n kaikki toiminnot sijoittaa maan alle. Tällä hetkellä markkinoilla ei ole kaupallisia laitosmalleja, joissa lähtökohtana olisi kalliotilaan sijoittaminen
- SMR voidaan myös helposti sijoittaa laivanrungon kaltaiseen proomuun ja kiinnittää satamalaiturirakenteeseen (kelluva ydinvoimalaitos).

Alaluvuissa 2.2.1–2.2.4 tarkastellaan näitä sijoitusvaihtoehtoja suunnittelun, rakentamisen, ydin- ja säteilyturvallisuuden, lainvastaisen toiminnan ehkäisyn ja ydinmateriaalivalvonnan kannalta.

Kaikki nämä rakentamistavat sisältävät tavoitteita turvallisuudelle ja teknisiä keinoja saavuttaa haluttu turvallisuustaso. Laitospaikasta itsestään aiheutuu vaaraa laitoksen turvallisuudelle sekä luonnonvoimien että ihmisen toiminnan kautta. Luonnonvoimista mainittakoon kuormitukset kuten maanjäristys, äärimmäiset sääilmiöt, tulvan mahdollisuus; ihmisen aiheuttamista uhkista taas suurienerginen kuljetus- tai teollisuusonnettomuus laitoksen lähellä tai siihen kohdistuen. Näiden tekijöiden viranomaiskäsittely ennakkoon voisi olla luonteva osa laitospaikan ennakkohyväksyntäprosessia.

2.2.1 Suunnittelu ja rakentaminen

Kaupalliset SMR:t on suunniteltu rakennettavaksi avoimelle tontille, tekemättä kovin rajoittavia oletuksia maaperän mekaanisen lujuuden suhteen. Peruskalliolle perustaminen ei siis ole välttämätöntä, mutta maaperän tulee olla riittävän kuivaa ja vakaata. Maanalaisiin tiloihin valuu pohjavettä, ja se voidaan poistaa salaojilla, poistokaivoilla ja poistopumpuilla. Pohjaveden poiston luotettavuudesta tulee veden kanssa mahdollisesti kosketuksiin joutuvien teräs- ja teräsbetonirakenteiden elinikään vaikuttava tekijä. Toisaalta pohjaveden virtaus laitoksesta pois päin edesauttaisi kontaminaation leviämistä pohjaveteen. Suomen kallioperästä tihkuu maanalaisiin tiloihin radonia, jonka riittävästä tuulettamisesta on myös huolehdittava.

Laitosten rakennettavuus on suunniteltu olettaen että laitospaikalla on mahdollista tehdä suuria nostoja, mahdollisesti sääsuojan sisällä. Päälaitteet – reaktori, turbiini, generaattori, päämuuntajat, mahdollisesti suojarakennuksen teräsrakenteita – tuodaan paikalle kuljetuslaveteilla ja nostetaan paikoilleen joko rakennusten vielä ollessa kesken (ns. open-top-rakentaminen) tai rakennusten valmistuttua, laitoksen huoltotöihin tarkoitetuilla nostureilla. Komponenttien asentaminen saattaa rajoittaa rakentamista olemassaoleviin kalliotiloihin, koska niissä ei välttämättä ole tilaa kuljettaa tai asentaa suuria komponentteja.

Kotimainen kaukolämpöreaktori saattaa olla mahdollista suunnitella niin, että se olisi sijoitettavissa valmiiseen kalliotilaan. Koska kaukolämpöreaktorikin on voitava sijoittaa joustavasti monenlaisille laitospaikoille, kallioluolasijoitus ei voi olla ainoa suunnitteluperuste, paitsi tilanteessa, jossa luolan rakentaminen ja suojarakennuskelpoiseksi varustaminen osoittautuu perinteistä rakentamista kustannustehokkaammaksi. Tämä voi rajoittaa teknologian vientipotentiaalia.

Maan alle rakentamiseen liittyviä tekijöitä on tiivistetty taulukkoon Taulukko 4 alla.

Taulukko 4. Maanalaisen rakentamisen vaihtoehtojen vertailua.

| | Hyödyt | Haitat | Saatavuus |
|---|--|---|---|
| Rakennukset maan päällä | Vakiintunutta normaalia rakentamista. Pohjavesivirtaus luonnostaan kallioperään päin. | Näkyvä kohde pahantekijälle, maanpäälliset rakenteet oltava riittävän vankat | Yleisesti käytetty rakentamistapa. |
| Reaktori maanpinnan alapuolella, rakennuksia näkyvissä | Pohjavesi virtaa aina tilaa kohti → kontaminaatio ei leviä | Pohjaveden poiston varmennus. Radontuuletus, pohjavesikaivojen erillinen ilmastointi. | Yleisesti tarjolla. |
| Reaktori maanpinnan alapuolella, rakennukset maamassan sisällä | Reaktori luontaisesti suojassa, mutta luokse päästävä Laitoksen konventionaalinen osuus voi olla maan päällä. | | Harvinainen vaihtoehto. |
| Reaktori ja rakennukset kallioluolassa | Reaktori luontaisesti suojassa. Suomessa otollinen kallioperä. Kalliotiloja on suurissa kaupungeissa valmiina, mutta vähällä käytöllä. | Luokse pääsy työläämpää. Pohjaveden poiston varmennus. Radontuuletus, pohjavesikaivojen erillinen ilmastointi. Luolan sortuminen epätodennäköinen mutta teoriassa mahdollinen vaara. | Ei yleensä tarjolla kaupallisissa ratkaisuissa. |

2.2.2 Ydin- ja säteilyturvallisuus

Ydinturvallisuuden kannalta maan alle sijoittaminen tarjoaa sekä etuja että haittoja, olipa se sitten osittaista tai kokonaista. Etuna maaperä tarjoaa luotettavaa mekaanista suojaa ulkoisia uhkia vastaan, erityisesti rajuja sääilmiöitä, laitoksen lähellä tapahtuvia (kuljetus- tai teollisuus-) onnettomuuksia ja lainvastaista toimintaa. Turvallisuuden kannalta tärkeiden rakennusten ja vesialtaiden sijoittaminen maanpinnan tason alapuolelle vähentää olennaisesti vaaraa menettää vesimassoja laitoksen ulkopuolelle rakenteiden rikkoumisen takia.

Maan pinnan alle rakentamisen haittana taas voidaan pitää suurempaa alttiutta sisäiselle tulvalle erityisesti syvälle maan alle (kallioluolaan) sijoitetuissa laitoksissa, joissa tarvitaan suurta jäähdytysvesivirtausta laitoksen läpi (joissa tuotetaan sähköä ja turbiinilaitos on mukana luolassa).

Laitoksen sisäisten tapahtumien, kuten tulipalojen, kannalta maan pinnan alapuolelle sijoitetut laitososat vastaavat turvallisuudeltaan maan päälle rakennettuja (vankkoja) rakennuksia muuten, mutta poistumis- ja pelastusreiteillä joudutaan kulkemaan vaakatason tai alaspäin johtavien portaiden asemesta pitkiäkin matkoja ylöspäin. Lisäksi varsinaiseen maanalaiseen rakentamiseen liittyy omaa palo- ja pelastussäätelyä, joka on hankkeessa huomioitava.

Säteilyturvallisuuden kannalta maan alle rakentaminen ei tuota erityistä etua. Laitosalueen ulkopuolisiin toimintoihin vaikuttava säteilyaltistus tulee onnettomuustilanteessa päästöistä, ei suorasta säteilystä. Päästöjen välttämiseksi maan alle rakennetun laitoksen suojarakennustoiminto joudutaan joka tapauksessa varmistamaan samalla tavalla kuin maan päälle rakennetuissa isoissa voimaloissa tehdään: varmistamalla suojarakennukselle riittävä tiiveys, luokkaa 0,2–0,5 % kaasutilavuudesta vuorokaudessa, ja luotettava suojarakennuksen eristystoiminto.

2.2.3 Lainvastaisen toiminnan ehkäisy

Kaupalliset SMR:t on suunniteltu lainvastaisen toiminnan torjunnan osalta samalla tavalla kuin isot ydinvoimalaitokset, eli laitosrakennusten ympärillä on joka tapauksessa aidattu laitosalue, jonka sisälle pääsy on rajoitettua ja tarkasti valvottua. Järjestely on turvallisuudelle tärkeiden laitososien sijoitusyvyydestä riippumaton.

Maaperä itsessään tarjoaa luotettavaa mekaanista suojaa ulkoisia uhkia vastaan, myös lainvastaista toimintaa. Sähköä tuottava voimalaitos on kuitenkin välttämättä yhteydessä ympäristöön sekä jäähdytysvesijärjestelmän että sähkönsiirtojärjestelmän kautta. Laitoksella on lisäksi oltava kulku- ja kuljetusreitit, joiden kautta henkilökunta, tarvikkeet, varaosat ja polttoaine voivat liikkua. Yhteydet muuhun maailmaan suojattava lainvastaiselta

toiminnalta turvajärjestelyjen mitoitusperusteiden (suunnitteluperustauhkan) mukaisesti, riippumatta siitä, miten syväälle maan alle turvallisuudelle tärkeät laitososat on sijoitettu.

Laitoksen sijoittaminen lähelle asutusta on lainvastaisen toiminnan kannalta tarkoituksenmukaista, koska lainvastaisen toiminnan torjunta on viime kädessä virkavallan tehtävä. Lähellä asutuskeskuksia virkavallan vasteaika on todennäköisesti lyhyempi kuin kaukana asutuksesta. Viranomaisten ylläpitämää uhkakuvaakin lainvastaisesta toiminnasta olisi kuitenkin epäilemättä paikallaan päivittää.

2.2.4 Ydinmateriaalivalvonta

Ydinmateriaalivalvontaa käsitellään laajemmin luvussa 3.2, tässä kohdassa todetaan vain, että maan alle rakentamisesta sinänsä ei seuraa ydinmateriaalivalvonnan käytäntöjä muuttavia vaikutuksia.

Ydinmateriaalivalvonnan toteuttaminen edellyttää materiaalitasealueen määrittämistä, varautumista IAEA:n valvontajärjestelmien asentamiselle laitokseen, tarkastusten mahdollistamista sekä ydinmateriaalikirjanpitoa.

Maan alle rakentaminen voisi vaikuttaa eniten IAEA:n valvontajärjestelmien asentamiseen, mutta valvonnan tarpeet ovat laitoksen fyysisestä sijainnista riippumattomia: valvontakameroiden katkoton sähkönsyöttö, luotettava tietoliikenneyhteys, kiinnikkeet sineteille, ydinmateriaalin siirtelyyn liittyvät mittaukset sekä inventaarin tarkastamiseksi tarpeellinen pääsy ydinmateriaalien sijoituspaikoille on yhtä hankala tai helppo järjestää maanpäällisiin rakennuksiin kuin maan alle osin tai kokonaan rakennettuihin tiloihin.

2.3 Kaavoitus-, YVA- ja SOVA-prosessit

Miten toteutetaan tarvittavat kaavoitus-, YVA- ja myös mahdolliset SOVA-prosessit?

2.3.1 Tarkentuva maankäytön suunnittelu ja kunnallinen itsehallinto

Maankäyttö- ja rakennuslain (MRL, 132/1999) kokonaisuudistuksen tavoitteena oli muuttaa kaavojen välisiä oikeudellisia suhteita muun ohella maakuntakaavassa tehtävien ratkaisujen oikeusvaikutuksia rajaamalla (HE luonnos kaavoitus- ja rakentamislainsäädännön VN/279/2018).

Ympäristöministeriö tiedotti kuitenkin 22.3.2022, että lain kokonaisuudistuksesta luovutaan, eikä kaavajärjestelmää koskeviin säännöksiin näin ollen ole tiedossa olevia muutoshankkeita. Sen sijaan kokonaisuudistukseen liittyviä rakentamista koskevia säännösmuutoksia on tarkoitus edistää ja ympäristöministeriön tiedotteen perusteella rakentamisen säännökset eivät jatkossa sisältyisi maankäyttö- ja rakennuslakiin, vaan uutena säädettävään rakentamislakiin. Lausunnolla olleessa hallituksen esityksessä rakennuslupamenettely oli ehdotettu muutettavaksi kaksivaiheiseksi, jossa ensin myönnetään sijoittamislupa ja tämän jälkeen toteuttamislupa. Lausuntopalautteessa kaksivaiheiseen menettelyyn nähtiin ehdotetulla tavalla liittyvän ongelmia niin lupakynnyksen määräytymiseen kuin sääntelytekniisiin ratkaisuihin, sillä rakennusluvan luvanmyöntämisedellytykset eivät yksiselitteisesti käy ilmi ehdotetusta säännöksestä. HE:n perustelujen mukaan kunnan olisi toteuttamisluvan yhteydessä otettava huomioon myös muusta lainsäädännöstä, kuten pelastuslaista, johtuvat vaatimukset toteuttamiselle. Muuttuneen säädösvalmistelun tavoitteet lupamenettelyn ja kaavojen välisten suhteiden järjestämisestä eivät ole tätä kirjoitettaessa tiedossa.

MRL:n ohjaama maankäytön suunnitteluprosessi, kaavoitus, on suunnittelua alueen osoittamiseksi tarkoituksenmukaisella tavalla eri tarkoituksia varten. Suunnittelua ohjaavat valtioneuvoston päätöksenä annetut valtakunnalliset alueidenkäyttötavoitteet (VAT, VNp 14.12.2017). VAT:ssa käsitellään sellaisia asiakokonaisuuksia, jotka on tarpeen huomioida alueidenkäytön suunnittelussa osana laaja-alaista ja eri alueidenkäyttötarpeita ennalta yhteen sovittavaa toimintaa (VAT 2.1). Sanamuoto ei siis rajaa tavoitteiden kohdistumista kaavalajeittain, vaan huomioonottamisvelvoite koskee kaikkia kaavoja. Voimassa olevan kolmiportaisen kaavajärjestelmän tarkoituksena on toteuttaa kaavoitus ns. tarkentuvan suunnittelun periaatteen mukaisesti, jossa edetään yleispiirteisemmän suunnitelman ohjaamana yksityiskohtaisempaan suunnitelmaan. MRL:ssa ei ohjata hanketyyppiokohtaisesti energiantuotantoon liittyvien toimintojen kaavoitusta, mistä poikkeuksena on tuulivoima, jonka rakentamista ohjaaville yleiskaavoille on asetettu omat erityiset sisältövaatimukset (MRL 10 a luku).

Yleis- ja asemakaavoituksesta vastaavat kunnat omalla alueellaan sekä maakuntakaavoituksesta maakuntien liitot, jotka ovat lakisääteisiä kuntayhtymiä. MRL korostaa kuntien päätösvaltaa ja vastuuta alueiden käytön suunnittelussa sekä rakentamisen ohjauksessa ja valvonnassa. Perustuslaissa turvattuun kunnalliseen itsehallintoon kuuluu, että kunnilla on hallinnollisten rajojensa sisällä mahdollisuus päättää harkintavaltansa ja MRL:n kaavoitukselle asettamien sisältövaatimusten reunaehdoin alueidenkäytöstään, mitä suunnitellaan, minne ja millä aikataululla. Tästä ns. kaavamonomopolista seuraa, että yhdelläkään julkisella tai yksityisellä toimijalla ei ole subjektiivista oikeutta saada haluamaansa kaavaa laadituksi tai määrätä kaavan sisällöstä ennakkollisesti. Päätösvalta kaavoitukseen ryhtymisestä ja kaavan hyväksymisestä on yksinomaan kunnalla MRL 20 § ja esim. MRL 52 §).

Kaikilla kolmella kaavatasolla on omat sisältövaatimuksensa (MRL 28 §, 39 § ja 54 §), joilla on tarkoitus painottaa eri kaavatasojen päätöksenteossa olennaisia harkintaperusteita. Sisältövaatimukset käsittävät laaja-alaisesti eri alueidenkäyttömuotoihin liittyviä intressejä yhdyskuntarakenteen kehittämisestä, liikenteen ja luonnonvarojen kestäväää käyttöä koskeviin kysymyksiin. Kaavoituksessa on kysymys sisältövaatimuksissa esitettyjen asioiden ja asiakokonaisuuksien *vaikutusten arviointiin perustuvasta yhteensovittamisesta kaavan tavoite ja tehtävä huomioon ottaen*. Tällä tarkoitetaan sitä, ettei kaikkia keskenään ristiriitaisia kaavan sisältövaatimuksia voida ottaa aina huomioon täydellisesti kaavaratkaisussa, eikä välttää kaavasta aiheutuvia haitallisiakaan vaikutuksia. (Jääskeläinen, et al., 2018, s. 249.)

MRL 9 §:n menettelysäännös edellyttää kaavojen laadinnassa viranomaisen selvittävän kaavan merkittävät vaikutukset. Kaavaa laadittaessa on tarpeellisessa määrin selvittävä suunnitelman ja tarkasteltavien vaihtoehtojen toteuttamisen ympäristövaikutukset, mukaan lukien yhdyskuntataloudelliset, sosiaaliset, kulttuuriset ja muut vaikutukset. Selvitykset on tehtävä koko siltä alueelta, jolla kaavalla voidaan arvioida olevan olennaisia vaikutuksia.

Vaikutusten selvittämisen tarkoituksena on osoittaa, että laadittava kaava täyttää MRL:ssä kyseiselle kaavamuodolle asetetut sisältövaatimukset, kaava edistää valtakunnallisia alueidenkäyttötavoitteita ja kaavassa on otettu huomioon yleispiirteisemmän kaavan ohjausvaikutus. Merkittävien vaikutusten tunnistamista ohjaavat kaavan tehtävä ja tarkoitus. MRL 9 §:n tarkoituksena on kohdentaa tehtävät selvitykset tavoitellun kaavaratkaisun kannalta olennaisiin asioihin sekä välttää päällekkäisten selvitysten tekemistä. (Jääskeläinen, et al., 2018, s. 169–170)

MRL:n mukaan kaavan tulee perustua kaavan merkittävät vaikutukset arvioivaan suunnitelman ja sen edellyttämiin tutkimuksiin ja selvityksiin (MRL 9.1 §). Asetuksen mukaan suunnitelman toteuttamisen merkittäviä välittömiä ja välillisiä vaikutuksia tulee arvioida: 1) ihmisten elinoloihin ja elinympäristöön; 2) maa- ja kallioperään, veteen, ilmaan ja ilmastoon; 3) kasvi- ja eläinlajeihin, luonnon monimuotoisuuteen ja luonnonvaroihin; 4) alue- ja yhdyskuntarakenteeseen, yhdyskunta- ja energiatalouteen sekä liikenteeseen; 5) kaupunkikuvaan, maisemaan, kulttuuriperintöön ja rakennettuun ympäristöön; 6) elinkeinoelämän toimivan kilpailun kehittämiseen. (MRA 1 §) Vaikutusten arvioinnissa otetaan huomioon aikaisemmin tehdyt selvitykset sekä muut selvitysten tarpeellisuuteen vaikuttavat seikat.

Ydinenergialain, sen nojalla annettujen velvoittavien määräysten ja maankäyttö- ja rakennuslain mukaisen kaavoitusta koskevan sääntelyn kohteet eivät ole samat. Ydinvoimalaitoksen sijaintipaikkaa koskevat velvoitteet kohdistuvat luvanhakijaan tai -haltijaan, kun taas kaavoitusta koskeva aineellisoikeudellinen sääntely kohdistuu kaavaa laativaan kuntaan tai kuntayhtymään. Ydinlaitoshankkeesta vastaava voi laatia ja/tai tuottaa kaavoitusta varten tarvittavat tutkimukset ja selvitykset kunnalle. Kunta kuitenkin vastaa

kaavoitusmenettelyn lakisääteisten prosessien toteuttamisesta ja kaavan hyväksymiskäsittelystä itsenäisesti. Kaavoitukseen kytkeytyvä kunnan mahdollisuus edistää, estää tai keskeyttää hanke on otettava huomioon kriittisenä tekijänä hankesuunnittelussa ja vuorovai-
kutuksessa hankkeen koosta riippumatta. Luonnollisesti kunnallisen kaavamonopolin vaikutus on sama hankkeen toimialasta ja suunniteltavasta alueidenkäytöstä riippumatta.

YEL:ssa kunnallista itsemääräämisoikeutta on tahdottu korostaa myös sillä, että ydinlaitoksen sijaintikunnan myönteinen lausunto on ehdoton edellytys valtioneuvoston periaatepäätöksen tekemiselle (HE 16/1985, s.5). YEL:n periaatepäätösmenettelyyn liittyvällä kunnan myönteisellä lausunnolla ei voida kuitenkaan ratkaista sitä, että ydinlaitoshankkeen tarvitsemat kaavat tulisivat myöhemmin kunnassa hyväksytyiksi. Kunnanvaltuustolle kuuluvaa toimivaltaa hylätä tai hyväksyä kaavaratkaisu ei voida ennakkollisesti ratkaista lausuntomenettelyyn viitaten ilman, että olisi kysymys lainvastaisesta kaavan sisällön hyväksymisestä tai siitä sopimisesta.

Ajallisesti periaatepäätösmenettelyyn kuuluva lausuntomenettely on käytännössä vuosia ennen hankkeen tarvitsemien yksityiskohtaisten kaavojen laatimis- ja hyväksymiskäsittelyjä, eikä näin ollen näistä prosesseista ole päättämässä sama kunnan valtuustokaan. *Kun otetaan huomioon, että kaavoitusta koskevassa päätöksenteossa kunnalla on tosiasiallinen mahdollisuus ratkaista, tuleeko kunnan alueelle ydinvoimalahanketta, näyttäytyy ydinenergialakiin liittyvä suostumusmenettely päällekkäisenä menettelynä.*

2.3.2 Ydinlaitoshanke ja kaavoitus

Kaavoitus kytkeytyy ydinenergiain mukaiseen menettelyyn keskeisesti, sillä jo periaatepäätöshakemuksessa on otettava kantaa suunnitellun sijaintipaikan sopivuuteen ja ydinlaitoksen ympäristövaikutuksiin (YEL 14 §, YEA 24 §). Käytännössä tämä on tarkoittanut selvitystä laitoksen suunnitellun sijaintipaikan kaavoitustilanteesta sekä YVA-lain mukaisen arviointimenettelyyn kuuluvan YVA-selostuksen ja YVA-yhteysviranomaisen perustellun päätelmän esittämistä periaatepäätöshakemuksessa.

Säteilyturvakeskuksen määräyksen ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta (STUK Y/1/2018) 11 §:n mukaan ydinvoimalaitoksen sijaintipaikan valinnassa on otettava huomioon paikallisten olosuhteiden vaikutus turvallisuuteen sekä turva- ja valmiusjärjestelyt. Sijaintipaikan on oltava sellainen, että laitoksen ympäristölleen aiheuttamat haitat ja uhkat ovat hyvin pienet ja laitoksen lämmönpoisto ympäristöön voidaan tehdä luotettavasti. STUK:n antamien YVL-ohjeiden mukaan ydinvoimalaitoksen sijaintipaikan valinnassa on otettava huomioon laitokseen sen ympäristöstä kohdistuvat ulkoiset uhat sekä laitoksen ympäristön olosuhteet, elinkeinotoiminta ja väestö. Lisäksi on tarpeen arvioida lainsäädännön ja teknisten näkökohtien kannalta voimalaitoshankkeen vaikutukset luontoympäristöön ja

maankäyttöön, sen sosiaaliset ja taloudelliset vaikutukset, liikennejärjestelyt ja sähköyhteydet kantaverkkoon, jäähdytysvesiratkaisut sekä erityiset huoltovarmuuskohdat (YVL A.2 103–105).

STUK:n määräys kytkeytyy juridisessa mielessä kaavan sisältövaatimuksista mm. terveyllisen ja turvallisen elinympäristön vaatimukseen, mutta ei asiallisesti laajenna kaavoituksen sisältövaatimusta ydinvoimalaitoshankkeen teknisiin kysymyksiin, sillä kaavassa ei ratkaista laitoksen rakentamisen teknisiä ominaisuuksia.

Ydinlaitoshankkeen tarvitsemien kaavaprosessien määrä tai ajallinen kesto eivät suoraan määräydy voimalaitosyksikön koon tai lukumäärän mukaan. Näin ollen ei voida suoraan todeta, mitä yhden tai useamman SMR:n suunnittelu edellyttää kaavoitukselta. Alueidenkäyttöisten edellytysten tarkastelu riippuu suunniteltavan hankkeen ennakkoon tiedetyistä ja tavoiteltavista vaikutuksista ja olemassa olevasta kaavoitustilanteesta. Vaikutusten selvittämisen laajuus ja yksityiskohtaisuus puolestaan määräytyvät kaavalajin, hankkeen ja kaavoitettavan alueen perusteella.

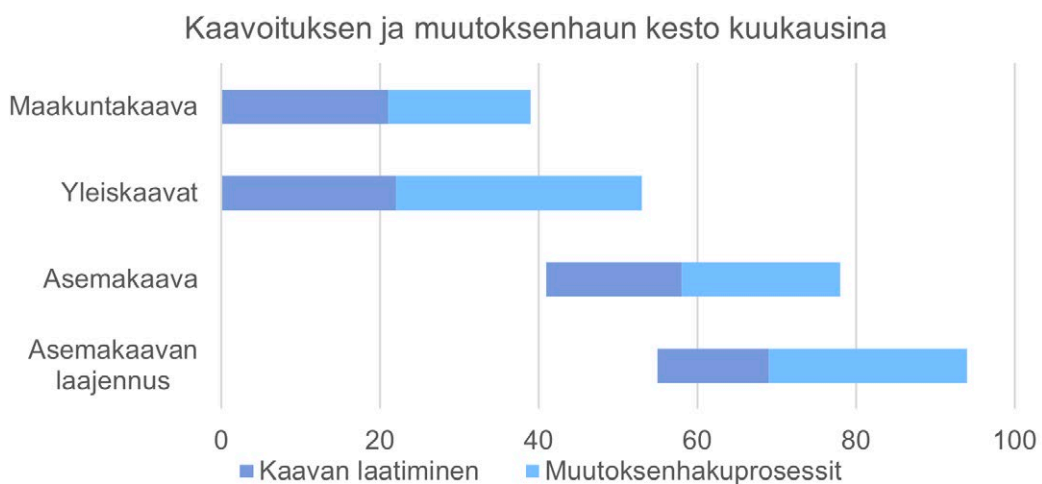
Kaavalajien näkökulmasta valtakunnallisia, maakunnallisia ja/tai seudullisia vaikutuksia omaava ydinlaitoshanke edellyttää lähtökohtaisesti alueidenkäyttöisten edellytysten tarkastelua maakuntakaavassa ennen yleis- ja asemakaavojen laadintaa. Mikäli hankkeen merkitys ja vaikutukset jäävät paikallisiksi ja voimassa oleva maakuntakaavaratkaisu mahdollistaa ydinlaitoksen osoittamisen kuntakaavoituksessa, ei maakuntakaavaa tarvitsisi muuttaa tai laatia. Olemassa olevien kaavaratkaisujen suhdetta SMR:n sijoittamiseen tulisi tarkastella SMR:n teknisen turvallisuusvaikutusten näkökulmista suhteessa alueen ominaisuuksiin, joissa olisi nykyistä kaavoitusmenettelyä yksityiskohtaisemmin otettava huomioon huoltovarmuus- ja turvallisuusnäkökohdat.

Koska MRL 32.1 § edellyttää, että maakuntakaava on ohjeena kuntakaavoitukselle, maakuntakaavassa osoitetun alueidenkäytön ohjausvaikutus ydinlaitoksen sijoittamisen mahdollistavaan yleis- tai asemakaavan edellyttää aina tapauskohtaista tarkastelua. SMR:n kaavoitukselle asettamat selvitys- ja selvilläolovelvollisuudet voi olettaa useinmiten edellyttävän vähintään yleispiirteisten kaavojen vaikutusarviointien tekemistä asemakaavaprosessin yhteydessä, vaikka maakuntakaava- tai yleiskaavaprosessia ei olisikaan kaavan aluevarauksen muuttamiseksi tarpeen käydä.

Suomessa toimivien ydinvoimalaitosten suunnittelussa esimerkiksi Hanhikiven ydinvoimalaitoshankkeessa kaavoitus toteutettiin kaikilla kolmella kaavatasolla laatimalla hanketta koskeva maakuntakaava, yleiskaavat ja asemakaavoja. Suunnittelun ensisijaisena tavoitteena oli selvittää laitoksen sijoittamisen alueidenkäyttöiset edellytykset eli voidaanko kaavoituksen kohteena ollutta aluetta osoittaa ydinvoimalaitoksen rakentamiseen ja sen oheistoimintojen sekä tarvittavan infrastruktuurin rakentamiseen, kuten teihin ja

voimajohtoihin. Yleispiirteisen suunnittelun osalta keskeinen keskustelun aihe oli myös laitosalueen ympärille osoitettavan suojavyöhykkeen laajuus.

Kuvio 5. Maakuntakaavoituksen aloittamisesta asemakaavan laajennuksen lainvoimaiseksi tuloon kului Hanhikivi-hankkeessa noin 94 kuukautta. Kaavan laatimisaika laskettu kaavoituksen vireilletulo kuulutuksesta kaavan hyväksymispäätökseen. Muutoksenhakuprosessit käsittävät muutoksenhakuajan hallintotuomioistuimissa ja maakuntakaavan osalta ympäristöministeriössä ja KHO:ssa.



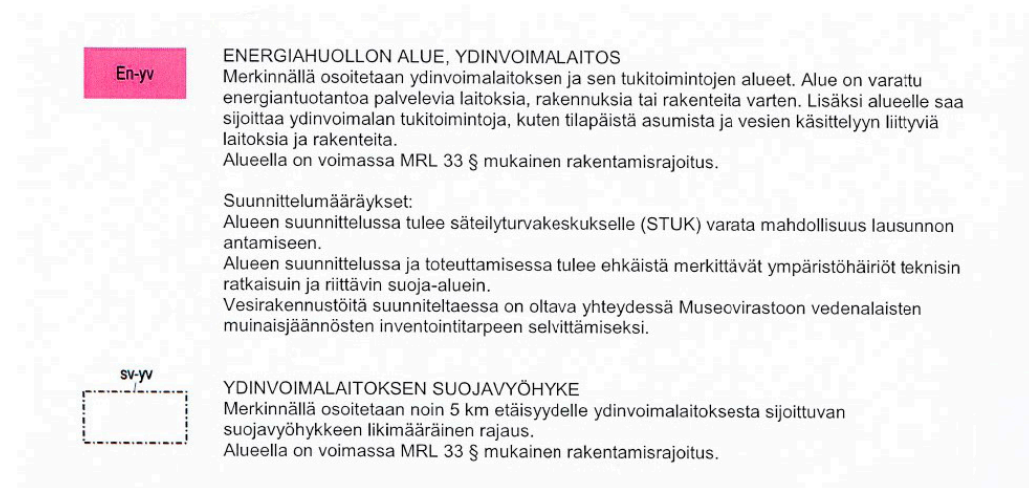
Hanhikiven ydinvoimalaitoksen kaavoitusta koskevasta esimerkistä ilmenee, että ajallisesti kysymys on ollut noin kuuden ja puolen vuoden suunnitteluprosessista maakuntakaavoituksen aloittamisesta ensimmäisen asemakaavan lainvoimaiseksi tuloon. Näin siitä huolimatta, että eri kaavalajeja on valmistelu samanaikaisesti ja esim. yleiskaavat sekä Pyhäjoella että Raahessa hyväksyttiin hieman sen jälkeen, kun Hanhikiven ydinvoimamaakuntakaava oli hyväksytty, jotta muutoksenhakuprosessit saatiin etenemään samanaikaisesti. Menettely sisälsi tietoisin riskin siitä, että mikäli maakuntakaavarakaisu olisi kumoutunut lainvastaisena, myöskään maakuntakaavan perusteella laaditut yleiskaavat eivät olisi muutoksenhakua kestäneet, sillä MRL 39.1 §:n mukaisesti maakuntakaavan tulee olla ohjeena yleiskaavaa laadittaessa.

Vaikutusten huomioon ottamiseksi ja hallitsemiseksi kaavoissa on mahdollista antaa suunnittelu-, suojelu-, ja rakentamismääräyksiä (MRL 30 §, 41 §, 57 §).

Kaavoissa käytettävät merkinnät perustuvat MRL:n 206 §:n 2 momentin nojalla antamaan ympäristöministeriön asetukseen maankäyttö- ja rakennuslain mukaisissa kaavoissa käytettävistä merkinnöistä (kaavamerkintäasetus, 31.3.2000). Kaavamerkintäasetuksessa on merkinnät kaavalajeittain, mutta asetusta ei ole tyhjennetty. Asetuksen 1 §:n mukaan

kaavoissa voidaan tarvittaessa käyttää muitakin merkintöjä. Kun kaavassa käytetään asetuksen mukaista merkintää, sitä tulee käyttää asetuksessa esitetyssä tarkoituksessa ja merkintää voidaan täsmentää kaavamääräyksillä. Uuden ydinvoimalaitoksen sijoittamisen suunnittelun kannalta mahdollistavia kaavamerkintöjä ovat energiahuollon aluetta koskeva merkintä EN tai esimerkiksi teollisuusaluetta koskeva T-merkintä, jos sen käyttötarkoitus täsmennetään osoittamalla ydinvoimalaitoksen sijoittaminen erikseen esimerkiksi /yv-merkinnällä.

Kuvio 6. Esimerkki maakuntakaavassa käytetystä ydinvoimalaitoksen ja sitä koskevasta suojavyöhykkeen merkinnöistä sekä kaavamääräyksistä.



Ydinvoimalaitoksen ympärille osoitetaan kaavassa suojavyöhyke. YVL-ohjeet lähtevät ajatuksesta, että ydinvoimalaitoksen tulee sijaita harvaan asutulla alueella ja laitokselle määritellään laitosalue, jossa on varauduttava esim. pelastuslain mukaisin suunnitelmin myös vakavan onnettomuuden mahdollisuuteen. Ydinvoimalaitoksen normaali käyttö tai käyttöhäiriöt eivät aiheuta rajoituksia maankäytölle laitosalueen ulkopuolella. Ohjeen mukaan ydinvoimalaitoksen laitosalue ulottuu paikalliset olosuhteen huomioon ottaen noin 0,5–1 km etäisyydelle laitoksesta (YVL A.2, 406). STUK:n määräyksissä tai ohjeissa ei käy ilmi, mihin etäisyysvaatimus perustuu. SMR:ien osalta voimalaitospaikan valintaa ja suojaetäisyyden tarvetta onnettomuuden osalta on tarkasteltu edellä kohdassa 2.1.

YVL-ohjeissa määritellään myös ydinvoimalaitoksen sijaintipaikan valinnassa tarvittava asiantuntemusta. Ohjeen mukaan sijaintipaikan valinnassa ja arvioimisessa on käytettävä sellaista asiantuntemusta, joka kattaa ydinturvallisuuden, ympäristön säteilyturvallisuuden ja maankäytön sekä luonnonsuojelun (YVL A.2, 403). Vaatimus kohdistuu luvanhakijaan, eikä se huomioi, että maankäytön suunnittelusta vastaavan kunnan roolia

laitospaikan suunnittelussa. Ohjeissa yhdistyvät näin olleen myös suunnittelun strateginen arviointi ja teknologiaan liittyvät arviointivelvollisuudet.

Alueidenkäytössä suojavyöhykemerkintää on käytetty osoittamaan alueita, joilla alueidenkäyttöä on läheisen vaara-alueen tai muun ympäristönkäytön rajoituksia aiheuttavan luonteen vuoksi rajoitettava (Maakuntakaavamerkinnot ja -määräykset Opas 10). Tavanomaisesti suojavyöhykemerkintää vastaava konsultointivyöhyke on käytössä suuronnettomuusvaarallisiksi kohteiksi luokitelluilla laitoksilla (2012/18/EU), jollaisiksi luetaan Tukesin valvonnassa olevat turvallisuusselvitys- ja toimintaperiaateasiakirjavelvolliset kemikaali- ja räjähdelaitokset. Näiden ns. SEVESO-laitosten lisäksi suojavyöhykettä käytetään myös lentoesteettömyyttä edellyttäville kohteille.

Toisin kuin ydinvoimalaitoksen sijainnissa, SEVESO-laitoksiin ei sisälly lähtökohtaista vaatimusta laitoksen sijoittamisesta harvaan asutulle alueelle. Suomessa on satoja SEVESO-laitoksia, joille osoitettujen konsultointivyöhykkeiden laajuudet vaihtelevat 200 m–2 km (Kemikaalilaitosten konsultointivyöhykkeet 10.5.2021, Tukes). Konsultointivyöhykkeeseen liittyy velvollisuus pyytää kaavoitusmuutoksista tai merkittävämmästä rakentamisesta lausunto Tukesilta ja pelastusviranomaiselta, mutta esimerkiksi turvauhkiin varautumisen sääntely laitoksilta puuttuu. (TEM, 2017)

Objektiivista vertailua riskienhallinnasta sääntelyn näkökulmasta eri teollisuuden aloilla, joiden toimintaan liittyy suuronnettomuuden vaaraa, ei ole käytettävissä. Kaavoituksen näkökulmasta haitallisten vaikutusten hallinta perustuu mahdollisuuteen antaa ydinvoimalaitoksen sijoittamisesta yksityiskohtaisempaa suunnittelu- ja lupamenettelyä ohjaavia määräyksiä. Riskienhallinnan näkökulmasta itse laitosalueen suunnittelun lisäksi olisi tärkeää kiinnittää huomiota myös ympäröivään alueidenkäyttöön erityisesti kansallisen turvallisuuden näkökohdat huomioon ottaen (ks. jäljempänä jakso 2.3.5).

2.3.3 Ympäristövaikutusten arviointimenettely ydinlaitoksen suunnittelussa

Kaavoituksen ohella keskeinen vaikutusten arviointia koskeva mekanismi ydinvoimalaitoksen suunnitteluun liittyen on ympäristövaikutusten arvioinnista annetun lain (252/2017) mukainen ympäristövaikutusten arviointimenettely (YVA-menettely), joka ei ole lupa tai suunnitelma, vaan lähinnä tiedontuottamismekanismi lupaa edellyttävissä hankkeissa. YVA-menettelyn soveltaminen edellyttää siis sitä, että on olemassa oleva hanke, toisin kuin kaavoituksen yhteydessä tehtävä vaikutusten arviointi, joka on mahdollista tehdä myös ilman konkreettista hankesuunnitelmaa.

YVA-direktiivin 1 artiklan 2(a) kohdan mukaan hankkeella tarkoitetaan rakennustyön tai muun laitoksen tai suunnitelman toteuttamista sekä muuta luonnonympäristöön ja maisemaan kajoamista mukaan lukien maaperän luonnonvarojen hyödyntäminen. Hankkeen määritelmää ei sisälly YVAL:iin, vaan YVAL:a sovelletaan lähtökohtaisesti kaikkiin hankkeisiin, joilla on todennäköisesti merkittäviä ympäristövaikutuksia hanketyypistä ja vaikutusten aiheuttamistavasta riippumatta (ks. YVA-direktiivin soveltamisalaa koskevista EYTI ratkaisuista Pölönen, 2007, s. 99–101).

Ympäristövaikutuksella tarkoitetaan YVA-laissa hankkeen aiheuttamia välittömiä ja välillisiä vaikutuksia Suomessa ja sen alueen ulkopuolella, jotka kohdistuvat väestöön sekä ihmisten terveyteen, elinoloihin ja viihtyvyyteen; maahan, maaperään, vesiin, ilmaan, ilmastoon, kasvillisuuteen sekä eliöihin ja luonnon monimuotoisuuteen, erityisesti niihin lajeihin ja luontotyyppihin, jotka on suojeltu luontotyyppien sekä luonnonvaraisen eläimistön ja kasviston suojelusta annetun neuvoston direktiivin 92/43/ETY ja luonnonvaraisen lintujen suojelusta annetun Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2009/147/EY nojalla; yhdyskuntarakenteeseen, aineelliseen omaisuuteen, maisemaan, kaupunkikuvaan ja kulttuuriperintöön; luonnonvarojen hyödyntämiseen sekä edellä mainittujen tekijöiden vuorovaikutussuhteisiin. (YVA-lain 2 §) Ydinvoimalaitosta ja muuta ydinreaktoria koskeva hanke edellyttää aina YVA-menettelyä, eikä hankkeen koolle ole annettu kokorajaa. (YVA-lain liite 1 kohta 7 alakohta b).

YVA-menettelyn vaikutusten arviointikategoriat ovat yhteväisiä kaavoituksessa selvitettävien vaikutusten kanssa. Kaavoituksessa vaikutusten arvioinnin kohteena on monien eri toimintojen yhteensovittaminen, kun taas YVA-menettelyssä yksittäisen hankkeen ja sen vaikutusten arviointi. Yhteistä menettelyille on laaja ympäristökäsite ja laajat osallistumisoikeudet menettelyyn. Lisäksi on huomattava, että kaavoituksessa tehtävä alueidenkäyttövaraus edellyttää vaikutusten arviointia MRL:n mukaan, mutta kaavaratkaisun hyväksyminen sinällään ei edellytä YVA-menettelyä, vaikka YVA-menettelyä edellyttävän hankkeen ympäristövaikutukset voidaan arvioida ns. hankekaavaprosessin yhteydessä.

YVA-menettely onkin mahdollista yhdistää kaavoitusprosessiin YVAL 5 §:n mukaisin edellytyksin muissa kuin ydinenergiaa koskevissa hankkeissa, jotka on erikseen suljettu kaava-yva-yhteismenettelyn ulkopuolelle (YVAL 5.3 §). Hallituksen esityksessä tätä rajausta on perusteltu sillä, että ydinenergialain mukaisia ydinlaitoksia koskevat hankkeet ovat monivaiheisia ja niissä yhteysviranomaisen on ELY-keskuksen sijaan työ- ja elinkeinoministeriö. Lisäksi HE:ssä on katsottu ydinenergiahankkeiden yleisen merkityksen olevan valtakunnallinen (HE 259/2016, yksityiskohtaiset perustelut). Perusteluihin on vaikea yhtyä muilta kuin yhteysviranomaisesta lausutun osalta, sillä myös monilla muilla YVA-menettelyn kohteena olevilla hankkeilla on monivaiheinen lupaprosessi ja valtakunnallista merkitystä. Laki mahdollistaa kaava-yva -menettelyn esimerkiksi kemianteollisuuden tai terästeollisuuden tuontalaitoksia tai vaikkapa erityyppisten luonnonvarojen ottoa koskevissa hankkeissa.

YVA-menettelyn osittainen yhdistäminen kaavoitusprosessiin on kuitenkin mahdollista kuulemisen osalta. YVAL 22 §:ssä on säädetty tästä hanketta koskevan kaavoituksen ja ympäristövaikutusten arviointimenettelyn kuulemisten yhteensovittamisesta. Kuulemismenettelyjen yhteensovittamisen edellytyksenä on, että hankkeen toteuttamiseksi laadittava kaava ja hanketta koskeva YVA-menettely ovat samanaikaisesti vireillä (MRL 62 a §). Tällöin kuuleminen sekä YVA-lain mukaisesta arviointiohjelmasta ja MRL:n mukaisesta osallistumis- ja arviointisuunnitelmasta voidaan järjestää yhteisessä menettelyssä. (Ks. tarkemmin Pölönen & Perho, 2018, s. 161–162).

2.3.4 YVA periaatepäätösvaiheessa

Ydinenergialain 14 §:n ja ydinenergia-asetuksen (YEA 161/1988) 24 §:n mukaisesti ydinvoimalaitoshankkeen vaikutuksia ympäristöön tulee selvittää ja arvioida ennen ydinenergialain mukaista periaatepäätöshakemuksen käsittelyä. YVAL:n 15 § ohjaa toteuttamaan YVA-menettelyn suunnittelun mahdollisimman varhaisessa vaiheessa, jolloin hankkeen vaihtoehdot olisi vielä avoinna, ja jossa voidaan vaikuttaa vaihtoehtoihin ja hankkeesta vastaavan tekemiin ympäristövaikutuksia koskeviin ratkaisuihin.

Euroopan union tuomioistuimen oikeuskäytännön mukaan YVA-direktiivissä tarkoitettu lupa, jota ennen hankkeen ympäristövaikutukset on arvioitava, voi muodostua useista kansallisesti säädetyistä luvista ja vastaavista ratkaisuista, jotka yhdessä oikeuttavat hankkeen aloittamiseen. (Pölönen & Perho, 2018, s. 33–34) Suomen järjestelmässä YVA-hankeluettelon hankkeet edellyttävät tyypillisesti useita eri lupia, jotka yhdessä muodostavat YVA-direktiivissä tarkoitetun luvan. YVAL:n näkökulmasta YEL:n mukainen valtioneuvoston periaatepäätös on ydinlaitoshankkeen monivaiheisen lupaprosessin ensimmäinen osa, jota ennen YVA-menettely on tehtävä. YEL:n 14 § korostaa periaatepäätöstä koskevassa harkinnassa erityisen huomion kiinnittämistä muun ohella ympäristövaikutuksiin. Näin ollen YVAL:n näkökulmasta ei ole mahdollista valita YVA-menettelyn paikkaa, silloin kun periaatepäätöksessä on kysymys hanketta koskevasta päätöksenteosta ja se on osa ydinlaitoshankkeen lupakokonaisuutta, kuten olemassa olevien ydinvoimalaitosten kanssa on ollut.

Käytännön kokemukset varhaisessa vaiheessa toteutetusta YVA-menettelystä on hankkeesta vastaavien kannalta voitu kokea hankesuunnittelua sitovana. Hankkeen varhaisessa vaiheessa tehtävässä YVAssa tehdään teknologiaa ja laitoksen kokoa koskevia oletuksia, joiden puitteissa on myöhemmissä lupavaiheissa (vielä vuosien päästä) pysyttävä, vaikka tarjolle tulisi hankkeen kannalta parempia vaihtoehtoja, ilman olennaista muutosta ympäristövaikutuksiin. Toisaalta oletuksiin perustuvaa YVAa on myös moitittu siitä, että YVA:n aikana ei vielä ole käytettävissä laitosten teknisistä ratkaisuista koskevaa yksityiskohtaista tietoa, jonka nojalla ratkaisuja voitaisiin arvioida kriittisesti. Nämä huolenaiheet ovat olleet

omiaan herättämään keskustelua YVA-menettelyn ajantasaisuudesta, kun hanke on edennyt suunnittelusta yksityiskohtaisiin lupamenettelyihin.

YVAL:n perustelujen mukaan aikaisessa suunnitteluvaiheessa arviointimenettelyyn liittyvät selvitykset ja vaikutusten arviointi olisivat yleispiirteisempiä kuin arviointimenettelyssä, joka toteutetaan myöhäisemmässä suunnitteluvaiheessa. HE:n mukaan hankkeen teknisen suunnittelun tulee kuitenkin olla tarpeeksi pitkällä, jotta hanke voidaan kuvata riittävällä luotettavuudella. (HE 259/2016, yksityiskohtaiset perustelut)

YVAL:n perustelujen mukaan arviointimenettelyn ajankohdalla ei voida katsoa tarkoitettua edellyttää valmista hankesuunnitelmaa YVA-menettelyn alkaessa, vaan mahdollistaa hankesuunnittelun täsmentyminen YVA-menettelyn päättymisenkin jälkeen. Näin ollen YVAL:n säännösten näkökulmasta kynnys kokonaan uuden arviointiohjelman laadintaan hankesuunnitelman täsmentymisen vuoksi on korkealla, ellei kyse ole sillä tavoin muuttuneesta hankkeesta, että sitä voitaisiin pitää kokonaan eri hankkeena. (Ks. hankesuunnitelman kehittämisestä Pölönen & Perho, 2018, s. 95–99). Ydinlaitoshankkeen täsmentyminen varhaisen YVA-menettelyn jälkeen voi kuitenkin merkitä perustellun päätelmän ajantasaisuuden arviointitarvetta lupamenettelyvaiheessa.

YVAL 26 §:ssä päätöksentekijälle on asetettu YVA-asiakirjojen ja kuulemisten tulosten huomioonottamisvelvollisuus sekä tähän liittyvä perusteluvaatimus. KHO:n ratkaisukäytännössä ja oikeuskirjallisuudessa on todettu, että YVAL:ssa tai sen taustalla olevasta YVA-direktiivistä ei johdu seikkoja, jotka voisi tulkita niin, että YVA-direktiivin tarkoituksena olisi ollut säätää lupapäätöksenteon aineellisista vaatimuksista (KHO 2005:25, KHO 2005:70 ja Pölönen & Perho, 2018, s. 141–142). Näin ollen YVA-menettelyn rooli on menettelyllinen myös YEL:n mukaisessa hankkeessa, eikä YVA-menettelyn tulokset oikeudellisesti sido lupapäätöstä ellei YEL:ssa ole tähän velvoittavia lupaharkintaa koskevia säännöksiä. (Ks. YVA:n menettelyllisestä roolista Pölönen 2007, s. 160–165).

YVAL 23.1 §:n nojalla yhteysviranomaisen velvollisuutena on tarkistaa ympäristövaikutusten arviointiselostuksen riittävyys ja laatu sekä laatia tämän jälkeen perusteltu päätelmänsä hankkeen merkittävistä ympäristövaikutuksista. Hankkeen edetessä lupavaiheeseen YVAL 27.1 §:ssä edellytetään lupaviranomaiselta perustellun päätelmän ajantasaisuuden varmistamista. Ajantasaisuuden arvioinnissa on otettava huomioon, ovatko muutokset sen laatuista, että päätelmät toiminnan merkittävistä ympäristövaikutuksista voisivat olla niiden johdosta erilaisia. Tästä olisi kysymys esimerkiksi tilanteessa, jossa muutokset voisivat johtaa perustellussa päätelmässä käsittelemättömien merkittävien vaikutusten syntymiseen tai hankkeen vaikutusalueen olennaiseen muuttumiseen. (Pölönen & Perho, 2018, s. 130–131)

Ydinenergiain mukaisesti olemassa olevien viiden voimalaitosyksikön suunnittelu- ja lupaprosessit ovat kokonsa (tehon) ja sitä kautta yhteiskunnallisen merkittävyyden näkökulmasta edellyttäneet energiaoikeudellista ja -poliittista päätöksentekoa hankekohtaisesti valtioneuvoston periaatepäätösmenetelyssä.

Energia- ja ilmastopoliittisista tavoitteista esim. energiaomavaraisuus ja uusien teknologioiden mahdollistaminen voisivat puoltaa valtioneuvoston aktiivista roolia energiaoikeudellisessa päätöksenteossa. Ottaen huomioon toimintaympäristössä tapahtuneet muutokset ja yhteiskunnallisesti merkittävien energiantuotantotapojen moninaisuus, voisi olla tarpeen soveltaa ydinenergian käytön hyväksyttävyyden arviointikriteeristöä: tarpeellisuus, taloudellisuus ja ympäristövaikutukset, ja näiden arviointia sekä yhteiskunnan että toiminnanharjoittajan kannalta koko energiasektorilla.

YEL:n uudistamisessa periaatepäätöksen sisällön uudistamista tulisi tarkastalle erikseen niin, että VN:n tasolla tehtäisiin ainoastaan strategisen tason päätös ydinvoiman käytöstä esimerkiksi nykyistä ohjaavamman sisältöisessä energiapoliittisessa tai energiahuoltovarmuutta koskevassa strategiassa. Strategiassa olisi mahdollista ottaa kantaa kaikkiin valtakunnallisesti merkittäviin energiantuotantotapoihin, ja linjata myös energiantuotantotavoitteet eri toimialoille (ydinvoima, vesivoima, biomassa, tuulivoima, maakaasu, öljy, turve, jäte, aurinkovoima jne.). Ydinvoiman osalta tämä voisi tarkoittaa esimerkiksi valtioneuvoston strategista linjausta siitä, montako megawattia ydinenergiaa Suomeen tavoitellaan tietyllä aika välillä. Suunnittelu- ja lupaprosessien sujuvoittamisen näkökulmasta lakisääteisestä valtioneuvoston periaatepäätöstä koskevasta lupaviranomaisroolista luopuminen mahdollistaisi myös YVA-menettelyn sijoittamisen hankesuunnittelun kannalta tarkoituksenmukaisempaan ajankohtaan. Ja valtioneuvoston strategian käsittelyn yhteydessä riittäisi viranomaisten suunnitelmien ja ohjelmien ympäristövaikutusten arvioinnista annetun lain 3 §:n mukainen menettely (SOVAL, 200/2005).

SOVAL 3 §:n mukainen menettely edellyttää viranomaiselta yleistä velvollisuutta selvittää ja arvioida ohjelman tai suunnitelman ympäristövaikutukset, mutta selvitystarkkuus on SOVA-menettelyssä paljon YVA-menettelyn hankekohtaista arviointia yleispiirteisempi. SOVAL:n perustelujen mukaan ympäristövaikutukset on selvitettävä ja arvioitava siinä laajuudessa ja sillä tarkkuudella kuin se kulloinkin on päätöksenteon kannalta tarpeellista (HE 243/2004). SOVAL:n taustalla olevan SEA-direktiivin mukaan arviointi tehtäisiin osana muuta suunnitelman tai ohjelman valmistelua ja siihen kuuluisi tarpeellisessa määrin vaihtoehtojen ja niiden vaikutusten selvittämistä sekä eri tahojen välistä yhteistyötä ja osallistumista. (Direktiivi tiettyjen suunnitelmien ja ohjelmien ympäristövaikutusten arvioinnista 2001/42/EY). SEA-direktiivin mukainen menettely on pantu täytäntöön SOVAL:n lisäksi MRL:n kaavoitusta koskevilla täydennyksillä, minkä johdosta kaavoituksessa tehtävä vaikutusten arviointi täyttää myös SOVAL:n vaatimukset.

Kaavoitukseen liittyvän vaikutusten arvioinnin ja YVA-menettelyn lisäksi ydinvoimalaitoshankkeeseen kuuluu pääsääntöisesti lukuisia muita lupa- ja sitä vastaavia prosesseja, joissa hankkeen ympäristövaikutuksia arvioidaan. Merkittävä osa näistä sisältyy ympäristölainsäädäntöön kuuluviin säädöksiin, kuten luonnonsuojelulakiin (Natura-arviointi), ympäristönsuojelulakiin, vesilakiin, kemikaalilakiin ja maa-aineslakiin. Ympäristölainsäädännön ulkopuolisista laeista, joihin ympäristövaikutusten arviointia liittyy mainittakoon, sähkömarkkinalain, maantielain ja ratalain mukaiset menettelyt (ks. Liitteen 1 kuva, Ydinlaitoksen suunnitteluun liittyviä viranomaisprosesseja).

Varsinaisten menettelyä ohjaavien säännösten lisäksi hankkeesta vastaavalle kuuluu yleinen selvilläolovelvollisuuden perustava vaikutusten tunnistaminen, mikä johtuu useasta eri sektorilaista (ks. tarkemmin Pölönen & Perho, 2018, s. 14). Ydinlaitosta koskevaan ympäristöoikeudelliseen sääntelyyn kuuluvat myös laajat osallistumis- ja vuorovaikutusmenettelyt, jotka on säädetty osaksi menettelysäännöksiä.

Osallistumisoikeuksien laajuutta ydinvoima-alalla kuvaa SEA-direktiivistä johtuva kuuleminen rajat ylittävien ympäristövaikutusten arvioinnista. SEA-direktiivi on puolestaan yhteneväinen Espoon sopimuksen (SopS 67/1997) strategista ympäristöarviointia koskeva lisäpöytäkirjan määräysten kanssa (SEA-pöytäkirja). Rajat ylittävää ympäristövaikutusten arviointimenettelyä on sovellettu ydinlaitoshankkeeseen sekä YVA-menettelyn että kaavoituksen osalta suunnittelun eri tasoilla. Tämän niin sanotun kansainvälisen YVA-menettelyn keskeinen sisältö on huolehtia toisen EU-maan tiedonsaannista silloin kun kaavan tai YVA:n toteuttamisella on todennäköisesti merkittäviä vaikutuksia toisen valtion alueella. Menettelyyn liittyy ilmoitus- ja neuvottelumenettely, joka ilmoitusperusteisesti mahdollistaa minkä tahansa EU-maan osallistumisen vuorovaikutukseen. (esim. MRL 206 a-c §)

Ympäristöministeriön käytäntö arvioinneissa, joissa on edellytetty Espoon sopimuksen mukaista menettelyä, on vaihdellut rantayleiskaavan maisemallisista vaikutuksista, tuuli-voima- ja ydinlaitoshankkeisiin. Soveltamiskynnyksen korkeutta olisikin tarpeen tarkastella kriittisesti siitä näkökulmasta, että menettelyä sovellettaisiin vain, jos hankkeen toteuttaminen aiheuttaa todennäköisesti **merkittäviä** vaikutuksia toisen valtion alueelle ja erottaa tästä menettelystä tarve valtioiden väliseen muuhun yhteistyö- ja vuorovaikutusmenettelyihin. *Koska kysymys on valtioiden välisestä menettelystä, jossa toimijoina ovat ministeriöt, mutta menettely vaikuttaa olennaisesti niin kaava- kuin YVA-menettelyjen aikatauluun sekä kustannuksiin, olisi tarpeen tarkastella erikseen myös naapurimaiden Espoon sopimukseen perustuvan YVA- ja SOVA-menettelyjen kohteena olevia hankkeita sekä selvittää, millaisin merkittävyyskriteereihin perustuen menettelyyn otetut hankkeet on valittu.*

2.3.5 Kansallinen turvallisuus maankäytön suunnittelun näkökulmasta

Vuoden 2020 alussa voimaan tullut maankäyttö- ja rakennuslain muutos (29.3.2019/467) toi kansallisen turvallisuuden turvaamisvelvollisuuden alueidenkäytön suunnittelua koskeviin tavoitesäännöksiin. MRL 4 a §:n mukaan alueidenkäytön suunnittelussa on turvattava maanpuolustuksen, rajaturvallisuuden ja rajavalvonnan, väestönsuojelun sekä huoltovarmuuden edellyttämät kehittämistarpeet ja varmistettava, ettei niistä vastaavien tahojen toimintamahdollisuuksia heikennetä. Kansallisen turvallisuuden ottaminen MRL:iin liittyi kiinteän omaisuuden ja erityisten oikeuksien lunastuksesta kansallisen turvallisuuden varmistamiseksi annetun lain (468/2019) säätämiseen. Sitä koskevassa hallituksen esityksessä (HE 253/2018) yhteiskunnallisen vaikutusten arvioinnissa todetaan, että ehdotetulla sääntelyllä on tarkoitus suojata Suomen kansallista turvallisuutta. Vaikka sääntelyn ensisijainen tavoite oli parantaa viranomaisten keinoja muodostaa tilannekuva kiinteistönomistukseen liittyvistä riskitekijöistä, hallituksen esityksessä todetaan, että ehdotetut säädökset muodostaisivat osan keinovalikoimasta, jolla voidaan ehkäistä ennalta ja viime kädessä puuttua yhteiskunnan kokonaisturvallisuutta heikentävään kiinteistöomistukseen, tunnistaa yhteiskuntaan kohdistuvia uhkia ja torjua niitä sekä turvata kriittisen infrastruktuurin suojaaminen. Ehdotuksen tavoitteena mainittiin myös tietojen saannin parantaminen mahdollisimman varhaisessa vaiheessa kansallista turvallisuutta vaarantavasta mahdollisesta valmistautumisesta valtiolliseen vaikuttamiseen.

MRL velvoittaa kansallisen turvallisuuden turvaamiseen tavoitesäännöksessä (4 a §). Valtioneuvoston päätös valtakunnallisista alueidenkäyttötavoitteista edellyttää kokonaisturvallisuuden huomioon ottamista alueidenkäytön suunnittelussa. Kaavojen laadintaa ohjaavat kaavojen sisältövaatimukset eivät tunnista kansalliseen turvallisuuteen liittyviä asiakokonaisuuksia käsitte tasolla, eikä kaavojen vaikutusten arvioinnissa ole erikseen veloitettu kaavanlaatijaa kansallisen turvallisuuden vaikutusten arviointiin. Näin ollen tavoitesäännöksen huomioon ottaminen on pitkälti kaavanlaatijan aktiivisuuden varassa. Kaavojen sisältövaatimuksissa terveellisen ja turvallisen elinympäristön vaatimukset (MRL 39 § ja 54 §) viittaavat lähiympäristöä koskevien toimintojen yhteensovittamiseen, kuten teollisuuden ja asumisen suunnitteluun, melu- ja päästöhaittojen huomioon ottamiseen (Jääskeläinen, et al., 2018 s.287, 347–350).

Kun otetaan huomioon, ettei tavoitesäännökseen voi myöskään tehokkaasti vedota muutoksenhaussa, ei liene liioiteltua todeta, että kansallinen turvallisuuden näkökulmasta kaavoitusta koskevat tavoitteet ovat yleispiirteiset ja velvoittavuuden puuttuessa niiden toteutuminen ei myöskään ole tehokkaasti valvottavissa. Vaikka laissa ei ole yksiselitteisesti määritelty kansallisen turvallisuuden käsitettä, sillä tarkoitettaneen turvallisuuspoliittisessa keskustelussa käytettyä sisältöä, jossa kansallinen turvallisuus ymmärretään toiminnallisena prosessina ja tavoitteena, johon liittyy pyrkimys toisaalta suojata kansakuntaa ja valtiota uhkilta sekä toisaalta ylläpitää sen kykyä toimia vapaasti (Laitinen & Huhtinen 2021, s. 60).

Maankäytön suunnittelun tavoitteena on ratkaista mihin ja kuinka alueita käytetään, sekä luoda edellytykset hyvälle ja toimivalle elinympäristölle, jossa myös kansallisen turvallisuuden edellytykset turvataan. Riippuen siitä tarkastellaanko tilannetta ns. normaaliolojen vai kriisi- tai häiriöolosuhteiden kautta, kysymys kansallisesta turvallisuudesta ja maankäytöstä saa erilaisia ulottuvuuksia.

Normaaliolojen näkökulmassa kysymykset varautumisesta sekä toisaalta esimerkiksi huoltovarmuudesta ja logistiikasta ovat keskeisesti esillä. Huoltovarmuudella tarkoitetaan väestön toimeentulon, maan talouselämän ja maanpuolustuksen kannalta välttämättömän kriittisen tuotannon, palvelujen ja infrastruktuurin turvaamista vakavissa häiriötilanteissa ja poikkeusoloissa (VNp huoltovarmuuden tavoitteista 1048/2018). Huoltovarmuustavoitteissa kunnilla on keskeinen rooli yhteiskunnan huoltovarmuuden ja peruspalveluiden paikallisessa varmistamisessa. Kuntien rooli korostuu kriittisen infrastruktuurin, väestön toimintakyvyn ja henkiseen kriisinkestävyyteen liittyvissä tehtävissä. Kuntien, kuntayhtymien ja muiden kuntien yhteenliittymien tulee varmistaa erilaisilla varautumistoimenpiteillä kriittisten tehtäviensä mahdollisimman hyvä hoitaminen myös yhteiskuntaa koskevissa vakavissa häiriötilanteissa ja poikkeusoloissa.

On tärkeä huomata, että voimassa olevista maakuntakaavoista pääosa on laadittu ennen MRL 4 a §:n voimaantuloa, eikä yleispiirteinen suunnittelu näin ollen ohjaa kansallisen turvallisuuden huomioon ottamiseen säännöksen tarkoittamalla tavalla. Maakuntakaavan valmistelun lähtökohdana yleisesti ottaen ei ole ollut sisällönkään puolesta kansallisen turvallisuuden huomioon ottaminen, vaikka kaavojen teemana onkin voinut olla merkittäväsikin huoltovarmuuteen liittyvien seikkojen kaavoittaminen, kuten pohjavesialueiden ja liikenne- ja sähköinfrastruktuurin tai vaikkapa tuulivoima-alueiden osoittaminen.

Normaalioloissa ei maankäytön suunnittelussa lainsäädännön velvoittamana ole tehty päätöksiä ja linjauksia, jotka loisivat perustaa kriisiaikojen toimille. Tästä poikkeuksen muodostavat puolustusvoimien alueita ja intressejä koskevat asiat, kuten ampuma- ja harjoitusalueiden tai varalaskupaikkojen osoittaminen tai tutkavaikutusten selvittäminen tuulivoimakaavoitusta koskevien hankkeiden yhteydessä. Puolustusvoimien intressien huomioon ottaminen ei kuitenkaan perustu kaavan aineellisoikeudellisiin sisältövaatimuksiin, vaan viranomaisten väliseen lausuntomenettelyyn, mitä voi pitää kaavoituksen ennakoitavuuden näkökulmasta jossain määrin ongelmallisena.

Kriisi- ja häiriötilassa alueen ja tilan kontrollointi on olennaista, lisäksi pahimmillaan kyse voi olla jopa tarkoituksellisesta toiminnasta ja pyrkimyksestä etukäteen luoda olosuhteet, jossa esimerkiksi erilaiselle sotilaalliselle toiminnalle luodaan edellytyksiä omistamalla jokin sotilasstrategisesti kriittinen alue. Ydinlaitosten kohdalla kansalliseen turvallisuuteen liittyvien näkökohtien huomioon ottaminen YEL:n mukaisessa lupaprosessissa voi ajatella vastaavan näihin kysymyksiin. Lupaprosessi on kuitenkin myöhäinen vaihe, kun otetaan

huomioon luvittamisen edellyttämä tarve suunnitella ja selvittää laitoksen alueidenkäyttö kaavoituksella. Koska kaavoitus on suunnittelua, joka yleispiirteisellä maakunta- ja yleiskaavatasolla voi tapahtua myös ilman konkreettisia hankkeita, ei kaavoitusta ohjaavaan lainsäädäntöön liity häiriötilanteita ohjaavia säännöksiä.

YEL:n ja siihen kytkeytyvän lainsäädännön uudistamisessa tulisikin kiinnittää huomiota jo lainsäädännön valmisteluvaiheessa kansallisen turvallisuuden vaikutusten arviointiin. Kansallisen turvallisuuden näkökulmasta tehtävien vaikutusten arviointien tulisi edesauttaa sääntelyn kehittymistä niin, että kansalliseen turvallisuuteen liittyvät kysymykset tulevat huomioon otetuiksi sääntelystä vastaavasta ministeriöstä riippumatta (Lonka, et al., 2020).

Kriisi- ja häiriötilanteita ajatellen on erittäin merkityksellistä kenen hallinnassa ja omistuksessa erilaiset alueet ovat ja millaiseen käyttöön alueita osoitetaan. Näin ollen kaavoituksessa tulisikin ennakoida selvityksin yhteiskunnan toimintojen kannalta haavoittuvien ja kriittisten toimintojen toimintakyvyn turvaaminen. Tällä hetkellä Suomessa ei ole kansallista kriittistä infrastruktuuria, kriittisiä sektoreita tai toimijoita määritelty lainsäädännön tasolla. Valmisteilla olevan CER-direktiiviehdotuksen soveltamisala koskee kymmentä sektoria, kattaen liikenteen, energian, pankit, finanssimarkkinat, terveyden, vesi- ja jätevesihuollon, digitaalisen infrastruktuurin, julkishallinnon ja avaruuden. (Euroopan komission ehdotus Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviksi kriittisten toimijoiden häiriönsietokyvystä (COM (2020) 829 final)). Direktiivi asettuu yhteiskunnan turvallisuusstrategian ja sitä palvelevan kokonaisturvallisuusmallin nimeämien yhteiskunnan elintärkeiden toimintojen ja huoltovarmuuden turvaamiseksi tunnistettujen sektorien sekä huoltovarmuuspoolien toimialojen väliin.

CER-direktiivi siis tulee edellyttämään jäsenvaltioilta, että ne tunnistavat sektorikohtaiset elintärkeät toiminnot ja nimeävät niitä tarjoavat kriittiset toimijat yhteisten eurooppalaisten kriteerien ja kansallisen riskiarvion pohjalta. Näin ollen on oletettavaa, että lähitulevaisuudessa sähkön- ja lämmöntuotantoon tähtäävät SMR:t lukeutuisivat kriittisen infrastruktuurin joukkoon.

Edellä esitetty ”energiahuoltovarmuutta koskeva strategia” voisi olla yksi tapa vastata myös direktiivin vaatimuksiin valtion tasolla. Mutta *välttämätöntä olisi kehittää myös maankäytön suunnittelua koskevia säännöksiä turvallisen ympäristön edellytysten täyttämistä kansallisen turvallisuuden ja huoltovarmuuden velvoittavasti huomioon ottavaan suuntaan. Tällöin selvitysten kohteena ei olisi paikallisella ja maakunnallisella tasolla vain yksittäisen SMR:n vaikutukset, vaan esimerkiksi vesi- ja jätehuollon, sähkö- ja liikenneinfrastruktuurin järjestäminen kokonaisuutena huomioon ottaen huoltovarmuus, kriisi- ja häiriötilanteet.*

Suosituksia liittyen sijoitukseen, kaava-, yva- ja sova-asioihin

Sijoituspaikkaan liittyen:

Ydinvoimalaitoksen paikka voi olla asutuksen lähelläkin. Suojaetäisyys tulisi määrittää ydinlaitoksen ominaisuuksien perusteella. Keskeisiä mitoitettavia tekijöitä ovat tällöin aktiivisuusinventari (ydinreaktorin tapauksessa lähtökohtana reaktorin lämpöteho ja poistopalama) ja laitoksen turvallisuussuunnittelussa osoitettu suorituskyky radioaktiivisten aineiden leviämisen estämiseksi.

Sijoituspaikan hyväksyttävyyden ydinturvallisuuden kannalta tulisi voida haluttaessa tarkastella ja päättää erikseen, riippumatta laitoshankkeista. Tämä käsittely kattaisi mm. suojaetäisyydeltä tarkasteluja ja laitospaikasta johtuvien ydinturvallisuuteen kohdistuvien ulkoisten uhkien ennakkohyväksynnän. Laitospaikan ennakkohyväksyntä luonnollisesti sisältäisi laitosteknologian mitoitusta rajoittavia ehtoja: teknologian tulee kestää paikalla esiintyvät uhat riittävällä varmuudella.

Kokonaan maan alle sijoittamiseen on syytä varautua, vaikka se todennäköisimmin tuleekin kyseeseen vain kotimaisten vaihtoehtojen osalta.

Kaavaan liittyen:

Maankäyttö- ja rakennuslain mukainen kunnan kaavoitusmonopoli takaa kunnalle päätösvalan laitoshankkeen sijoittamisesta alueelleen. Näin ollen ei ole välttämätöntä edellyttää kunnalta erikseen kannanottoa laitoshankekohtaisen periaatepäätöksen yhteydessä.

Energiahuoltovarmuuden näkökulmasta on olennaista kehittää maankäytön suunnittelussa tehtäviä ratkaisuja ja vaikutusten arviointia kansalliset turvallisuusnäkökohdat huomioon ottavammaksi.

YVA- ja SOVA-prosesseihin liittyen:

YEL:n mukainen valtioneuvoston periaatepäätös on osa ydinlaitoksen lupaprosessia, josta seuraa myös velvollisuus toteuttaa YVA-menettely hankesuunnittelun kannalta hyvin varhaisessa vaiheessa.

Valtioneuvoston periaatepäätöksen sisältöä olisi mahdollista muuttaa strategisempaan suuntaan ja näin ollen luopua VNpp:n roolista osana yksittäisen hankkeen lupaprosessia. Tämä mahdollistaisi YVA-menettelyn sijoittamisen lähemmäs rakentamislupakäsittelyä.

3 Ydinainekysymykset

Teemakuvauksen mukaisesti ”Ydinlaitoksen polttoaineketju eroaa nykylaitosten ja SMR-laitosten välillä merkittävästi. Polttoainetta tulisi varastoida ja käyttää useammalla laitospaikalla; määrät olisivat suhteellisen pienet, mutta paikkoja olisi useita. Polttoaineiden vaihtoväli tulisi olemaan nykyisiä isoja laitoksia pidempi. Polttoaineet ovat sinänsä samantyyppisiä, mutta kooltaan skaalattuja. Käytetystä polttoaineesta huolehtiminen tulee ratkaista varastoinnista loppusijoitukseen. Jätteistä huolehtimiseksi tulisi valita kansallisesti sopiva malli, jota luvanhaltijat toteuttavat.”

3.1 Polttoainehankinta, varastointi ja jätehuolto

Miten SMR-laitosten polttoainehankinta, varastointi ja ydinjätehuolto rakentuvat? Mitä muutostarpeita valvontaan ja säädöksiin liittyy? Miten ydinjätehuolto voisi kytkeytyä nykyisiin yritysten ratkaisuihin ja kansallisiin mahdollisuuksiin?

Ydinvoimalaitosten käyttämän nykymuotoinen polttoaineen hankinta toimii pääpiirteis- sään seuraavasti:

- polttoaine voidaan hankkia valmiina polttoaine-elementteinä tai
- hajautettua hankintaketjua käyttäen.

Hankinta valmiina polttoaine-elementteinä edellyttää, että polttoaineen valmistaja pystyy hankkimaan myös uraani-, konversio- ja rikastusresursseja. Tilaajan vastuut koskien suunnittelua, toimitusketjun ja sopimusten valvontaa ovat tällöin vähäisempiä kuin hajautettua toimitusketjua käytettäessä. Hankinnan taloudellinen painopiste siirtyy valmiiden polttoaine-elementtien toimitukseen.

Hajautettua hankintaketjua käytettäessä joudutaan eri hankintavaiheille neuvottelemaan erilliset sopimukset useiden toimijoiden kanssa. Tämä tuottaa joustoa hankintoihin muuttuvissa markkinatilanteissa sekä mahdollistaa varastoinnin ja hankintatoimien suunnittelun.

Uraani on luokiteltu tavanomaisista raaka-aineista poikkeavaksi aineeksi, jonka hankintaan liittyy myös kansainvälisistä ja valtioiden keskenään tekemistä valvontasopimuksista aiheutuvia veloituksia sekä toimijoille että viranomaisvalvonnalle. Valvonnan tarkoituksena on varmistaa, ettei ydinainetta käytetä ase- tai räjähdetarkoituksiin eli taataan uraanin pysyminen rauhanomaisessa käytössä.

SMR:ien käytön yhteydessä syntyy myös matala- ja keskiaktiivista jätettä, joka on saman tyyppistä kuin isoilla voimalaitoksilla. Syntyvän ydinjätteen määrä on pääsääntöisesti suhteessa reaktorin tehoon. Kevytvesipohjaisten SMR:ien ydinjätehuollon toteuttaminen ei poikkeaisi teknisesti isoilla ydinvoimalaitoksilla totutusta tavasta, jossa rakentamislupakäsittelyn yhteydessä on arvioitu onko olemassa jätehuoltoon tarvittavaa teknologiaa ja teknisesti mahdollisia sijoituspaikkoja.

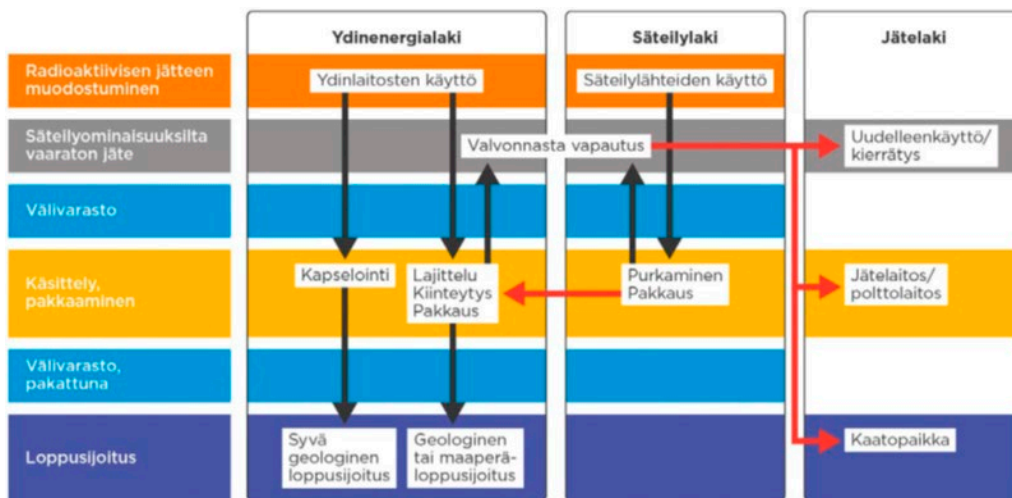
SMR:ien jätehuolto toteutettaisiin mahdollisesti kokonaan ostopalveluna, mikäli ydinjätehuollon palveluntarjoajia olisi käytettävissä. SMR:n rakentaja voi myös olla yhtiö, jolla on jo luvitettu ydinlaitos toisella paikkakunnalla, kuin minne SMR rakennetaan. Loppusijoituksen tilankäytön kannalta on edullista välivarastoida käytettyä polttoainetta pitkään (kymmeniä vuosia), jonka ansiosta monesta yksiköstä koostuvan laitoksen aikataulu ei vaikuta jätehuollon uskottavuuteen, vaikka se olisi vaiheistettukin. Tärkeintä on kulloisessakin päätöksenteossa huomiotava jätteen kokonaismäärä.

Työ- ja elinkeinoministeriö asettamien ydinjätehuollon työryhmien (TEM, 2013) ja (TEM, 2019) tehtävinä on ollut selvittää turvallisen ja kustannustehokkaan ydinjätehuollon ja muun radioaktiivisen jätteen huollon tavoitteita, kehitystoimenpiteitä sekä ratkaisuvaihtoehtoja. Työryhmien suosituksissa on mainittu mm. seuraavia asioita:

- TEM ja STUK selvittävät ja tarvittaessa kehittävät yhdessä luvanhaltijoiden kanssa ydinenergiain määritelmää ydinjätteelle ja selventävät jätehuoltovelvollisen määritelmää, tavoitteenaan mahdollistaa erilaisesta toiminnasta syntyvän jätteen tai tuotteen tarkoituksenmukainen käsittely. Tavoitteena on lisäksi kansallisten ja kansainvälisten määritelmien yhdenmukaistaminen.
- TEM ja STUK laativat asiakirjan jätehuoltovelvollisen huolehtimisvelvollisuudesta. Asiakirjassa käsitellään jätehuoltovelvollisia koskevia huolehtimisvelvollisuuteen liittyviä ratkaisuvaihtoehtoja ja huomioidaan myös loppusijoituslaitosten osittaiseen ja lopulliseen sulkemiseen liittyvät menettelyt ja vastuut.
- Työryhmä suosittelee, että TEM, STM ja STUK kehittävät ydinenergiain ja säteilylain mukaisia lupamenettelyjä ja valvontatoimia siten, että luvat mahdollistavat yhteistyön kaiken Suomessa syntyneen ydinjätteen ja muun radioaktiivisen jätteen huollossa. Jätehuoltoyhteistyö tapahtuisi osana luvanhaltijoiden liiketoimintaa niin, että jätehuollon kehittäminen ei vaaranna jätehuollon turvallisuutta.

Työryhmien suositusten johdosta käyvien ydinvoimalaitosten yhteydessä toimivien loppusijoituslaitosten käyttö lupia on päivitetty niin, että käyvät voimalaitokset saavat myydä jätehuollon palveluita ulkopuolisille toimijoille matala- ja keskiaktiivisen jätteen osalta.

Kuvio 7. Ydinjätteiden, säteilevän jätteen ja tavallisten jätteiden käsittely (TEM, 2019).



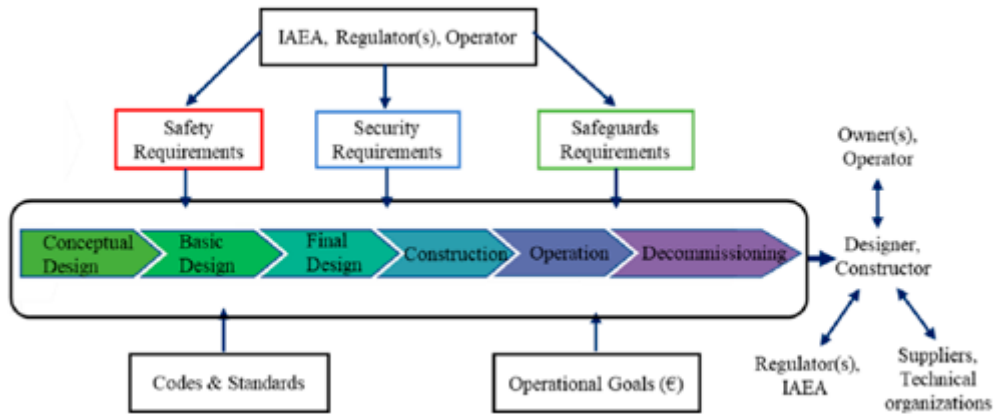
Kevytvesireaktorien käytetyn ydinpolttoaineen osalta turvallisen loppusijoituksen teknologia on olemassa, kaupallista palvelua ei kuitenkaan vielä ole. Kansallisiin mahdollisuuksiin voisi sisältyä joko Posivan palveluiden tarjoaminen muille toimijoille, jos Posivan omistajat näkevät tämän tarkoituksenmukaiseksi, tai muiden toimijoiden omat jätehuollon toimenpiteet.

3.2 Kansainvälinen ydinmateriaalivalvonta

Miten voidaan varmistua kansainvälisten ydinmateriaalivalvonnan vaatimusten toteutumisesta sekä miten ydinmateriaalivalvonta käytännössä hoidettaisiin ja miten tämän tulee näkyä säädöksissä?

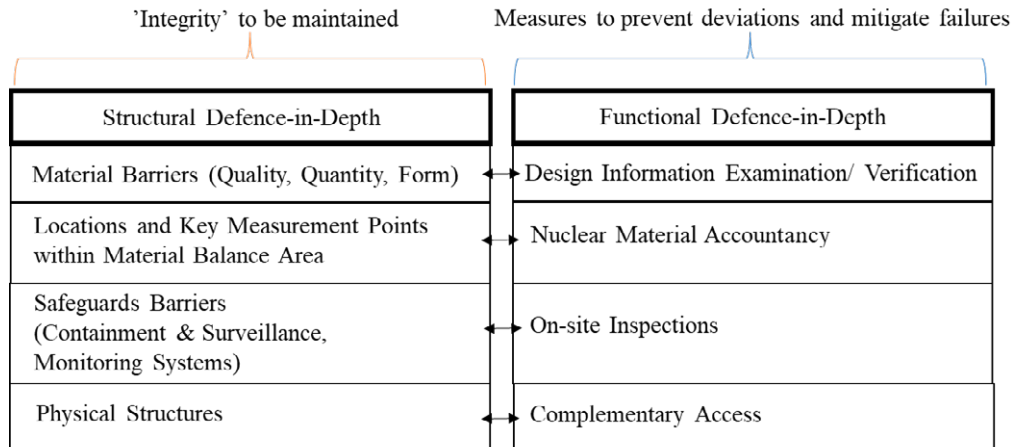
Kansainvälisen ydinmateriaalivalvonnan perustana on ydinsulkusopimus (Non-Proliferation Treaty, NPT). Kansainvälistä ydinmateriaalivalvontaa toteuttavat Kansainvälinen atomienergiajärjestö (International Atomic Energy Agency, IAEA) ja Euroopan komission energian pääosasto (DG ENER). Suunnitteluperustainen ydinmateriaalivalvonta liittyy jo ydinlaitoksen suunnitteluvaiheeseen ja säilyy mukana koko laitoksen elinkaaren ajan (Kuvio 8).

Kuvio 8. Ydinmateriaalivalvonta ydinlaitoksen elinkaaren ajan, eri toimijoiden liittynät.



Suunnitteluvaiheessa IAEA ohjeistuksen mukaan täytyy määritellä ydinlaitoksen alustavat materiaalitasealue (MBA, material balance area) ja valvontaan vaadittavat mittausjärjestelmät. Riittävä varustelutaso taataan safeguards-by-design vaatimusten kautta. Laitoksen valmistuttua täytyy varmistua, että dokumentaatio suunnitelmista ja toteutuksesta vastaavat toisiaan ja ydinmateriaalivalvontaan tarvittavat laitteistot on kalibroituja ja käytökelpoisia ennen kuin ensimmäinen ydinmateriaalia sisältävä kuljetus saapuu ydinlaitokselle. Suunnittelussa on huolehdittava tarvittavien tarkastusten tekeminen mahdollisimman helpoksi ja edelleen IAEAn tarkastuskäytien tarpeen minimointi. Valvontalaitteiden on pystyttävä toimimaan myös normaalikäyttötilanteista poikkeavissa olosuhteissa ja myös varmistettava varavoiman saanti, sijainti ja keston ajallinen riittävyys. Valvontalaitteet koostuvat on-line kamera- ja mittalaittevalvonnasta ydinlaitoksen eri kohteissa, kuten esimerkiksi suojarakennuksessa, **käytetyn polttoaineen varastointialtaiden läheisyydessä**, ja erillisen käytetyn polttoaineen välivaraston valvonnasta. Valvontaan liittyy myös pääsyräjoitettujen alueiden ja tilojen sinetöintiä eheyden varmistaminen.

Ydinmateriaalivalvonnan toimintoja on havainnollistettu alla. Ydinmateriaalivalvonta edellyttää toimenpiteitä sekä laitoksen suunnittelijalta, jonka on otettava valvonnan tarvitsemat rakenteet (kamerahyllyt, sinetikiinnitteet) ja tekniset palvelut (tietoliikenneyhteys IAEA:lle, varmennettu sähkösaanti), ja laitoksen omistajalta/käyttäjältä, jonka on ylläpidettävä ydinmateriaalikirjanpitoa.

Kuvio 9. Ydinmateriaalivalvonnan ”rakenteita” ja toimintoja (Valkeapää, 2021)


SMR-laitosten kohdalla lainsäädännössä tulee varautua tilanteeseen, jossa laitoksen omistaja (rakentamis- tai käyttöluvan haltija) ja käyttäjä ovat eri organisaatioita. Taulukossa alla esitetään yksi mahdollinen tapa jakaa ydinmateriaalivalvonnan vastuita näiden kesken. Huomattakoon, että laitoksen suunnittelutiedot, joita tarvitaan Design Information Questionnairen täyttämiseen, ovat suurelta osin laitoksen teknologiatoimittajan omaisuutta ja vastuulla. Viimekätinen vastuu ydinmateriaalivalvonnan toteuttamisesta olisi kuitenkin laitoksen (tulevalla) omistajalla (luvanhaltijalla).

Taulukko 5. Ydinmateriaalivalvonnan mahdollista vastuunjakoa tilanteessa, jossa käyttö ostetaan alihankintana.

| Omistaja vastaa | Käyttäjä vastaa |
|---|---|
| Laitostietojen toimittamisesta viranomaisille. (Omistaja saa tiedot laitostoimittajalta) | |
| Polttoaineen hankinnasta Kuljetusten alihankinnasta Kirjanpidon olemassaolosta | Polttoaineen käsittelystä laitoksella Kirjanpidon ajatasaisuudesta TTKE-rajojen noudattamisesta |
| Ydinmateriaalivalvonnan laitepaikoista ja käyttövoimasta (osana teknologiatilasta) | Ydinmateriaalivalvonnan laitteiden toimintarauhasta |
| Tarkastajien isännöinnistä | Tarkastajien liikkumisesta laitoksella |

Nykyisillä ydinlaitoksilla on tuoretta ydinpolttoainetta varastoituna ennen sen lataamista reaktoriin. Kaupalliset SMR laitokset ovat pääsääntöisesti pienikokoisempia, mutta niiden rakennuksiin sisältyy välivarastotilaa sekä tuoreelle että käytetylle polttoaineelle. Käytetyn polttoaineen varasto mitoitetaan tyypillisesti 10 vuoden jätemäärän mukaan. Laivareaktorien välivarastot todennäköisesti sijaitsisivat maissa.

Mikäli samanlaisia SMR:iä olisi tulevaisuudessa sijoitettuna useille eri paikkakunnille, olisi käytetyn ydinpolttoaineen keskitetty pitkäaikainen välivarasto ehkä perusteltavissa Suomessakin. Ruotsissa näin on menetelty ydinenergian käytön alusta asti. Tästä tosin seuraisi käytetyn ydinpolttoaineen kuljetuksia Suomen sisällä nykyistä huomattavasti taajempaan.

Suosituksia liittyen ydinainekysymyksiin

Ydinainekysymyksiin liittyen:

Ydinalan ja säteilyalan jätehuotoyhteistyö on 2010-luvulla parantunut huomattavasti TEMin työryhmien ansiosta. Ydinalan jätehuollon yhteistyötä on syytä kehittää edelleen, koska turvallinen ja toimiva jätehuolto on yhteisen menestymisen edellytys.

Vastuu ydinmateriaalivalvonnan toteuttamisesta tulee säilyä laitoksen omistajalla. Omistajan on kuitenkin voitava järjestää laitoksen käyttö, polttoainehankinta ja jätehuolto alihankintoina päteviltä palveluntarjoajilta.

4 Teknologian vaikutuksia

Teemakuvausten mukaisesti ”SMR-laitokset perustuvat modulaarisuuteen, sarjatuotannon hyödyntämiseen ja laitosten täydentämiseen moduulien kautta. SMR-laitoksia rakennetaan eri tavoin kuin nykyisin käytössä olevia ydinlaitoksia, koska ne voidaan rakentaa myös vaiheittain ja käyttäen jo hyväksyttyä teknologiaa (”pakettitalomalli”). Näin SMR-laitosten suunnittelu ja rakentaminen voivat erota merkittävästi nykymalleista. SMR-laitosten käyttötapa voi myös poiketa nykyisten isojen laitosten käytöstä suurestikin; käyttöön voi liittyä syklisyyttä, joka tukisi uusiutuvan ja hajautetun tuotannon kokonaisuutta, käyttö voi myös teoriassa perustua etäohjaukseen tai useita laitoksia voitaisiin käyttää samojen käyttö- ja huoltohenkilöstöjen kautta. Myös laitosten omistajana ja käyttäjänä saattaisivat olla eri tahot. Säädösten arvioinnissa tulisi siis arvioida myös mahdolliset erilaiset liiketoimintamallit. Kokonaisuudessaan tavoitteena olisi oltava tarkoituksenmukaiset lupaprosessit, joissa ydinturvallisuuden, säteilyturvallisuuden ja turvajärjestelyjen valvonta toteutuisi riittävästi.”

4.1 Teknologioiden luonne, rakentamistapa, sijoituspaikat, energiamuodot

Minkälaiset teknologiat, rakentamistavat ja sijoituspaikat soveltuvat parhaiten Suomeen, jossa energiaa tuotetaan sähkönä, lämpönä sekä niiden yhteistuotantona?

SMR: t suunnitellaan käytettäväksi useampiin sovelluksiin kuin nykyiset isot laitokset. Uusina sovelluskohteina kyseeseen tulevat sähköntuotannon lisäksi puhtaan lämmityksen tuotanto, yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto sekä mahdollisesti vielä korkealämpötilaisen höyryn ja vedyn tuotanto. Lämmön tuotanto on aina lähellä kuluttajia, eli lämpöä käyttävää teollisuutta tai asutusta.

Kaukolämmitys SMR:llä tapahtuisi tyypillistä sähköntuotantoprosessia matalammilla paineilla ja lämpötiloilla. Kaukolämmitykseen ei sisälly prosesseja, jotka loisivat kevytvesireaktorilaitokselle kokonaan uudentyyppeisiä vikamekanismeja tai vaaratilanteita. Vedyn tuotanto elektrolyytisesti edellyttää suuritehoisia elektrolyysereitä, joiden

vikaantumismekanismien mahdollista vaikutusta niitä käyttävään ydinvoimalaitokseen ei tiettävästi ole erikseen tarkasteltu. Voimalaitoksen ulkopuolinen räjähdys on jo nykyisellään laitosten rakennuksia mitoittava tekijä.

Tulevaisuuden energiajärjestelmässä erilaiset hybridiratkaisut tulevat yleistymään, mikä tarkoittaa sitä, että tuulivoiman vaihteleva tuotanto tullaan tasaamaan käyttäen SMR:llä tuotettavaa säädettävää perusvoimaa. Tämä tarkoittaa sitä, että SMR-laitosten tuotanto joutuu alttiiksi jatkuvalle kuormanvaihtelulle, mikä suurentaa väsyttävien kuormitusten määrää ja vaikuttaa siten laitosten mitoituksessa käytettävään laskennaliseen elinikäkertymään.

Useat SMR:t (mm. NuScale ja RITM) on suunniteltu moduulirakenteisiksi ja ne valmistetaan mahdollisimman pitkälle tehdasolosuhteissa niin isoina kokonaisuuksina, että ne voidaan kuljettaa laitospaikalla käyttäen olemassa olevia kaupallisia kuljetusmahdollisuuksia ja infrastruktuuria. Monimodulikonsepteissa, kuten NuScale ja NUWARD™, useita reaktori-suojarakennus -moduleita asennetaan yhteen yhteiseen reaktorirakennukseen, jossa tyypillisesti on myös käytetyn ydinpolttoaineen varastoallas. BWRX-300 todennäköisesti rakennettaisiin nykylaitosten tapaan, mutta koska se on kiehutusvesireaktori, höyrykehitysprosessi on luonnostaan täysin integroitu reaktoripainesäiliön sisään.

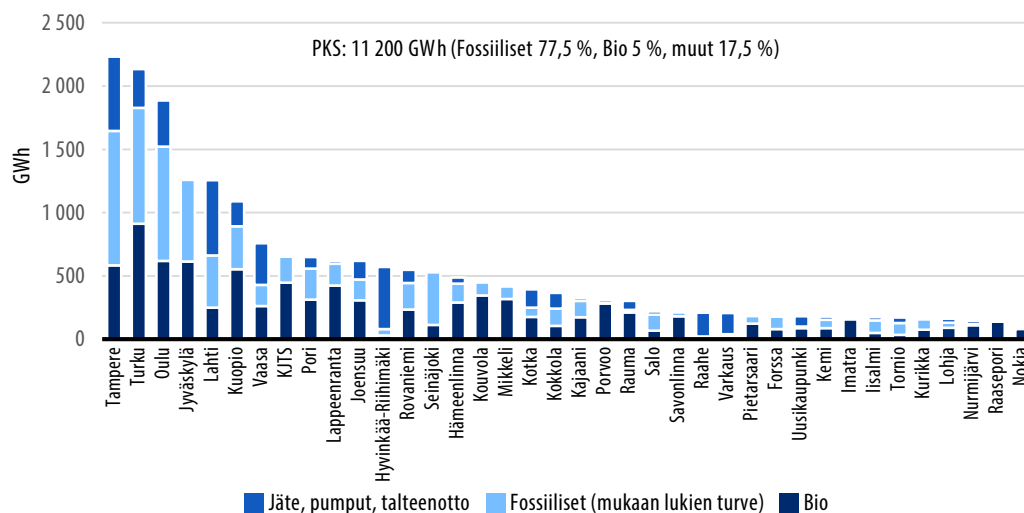
4.1.1 Käyttökohteet

Suomessa tuotetaan energiaa sähköinä, lämpönä sekä niiden yhteistuotantona. Vuonna 2020 Suomessa tuotettiin sähköä yhteensä 66,6 TWh ja tuotiin 15,0 TWh. Tuotetusta sähköstä 34 % tuotettiin ydinvoimalla, 36 % vesi-, tuuli- ja aurinkovoimalla, 16 % uusiutuvilla polttoaineilla ja 14 % fossiililla polttoaineilla ja turpeella. Vastaavasti kaukolämpöä tuotettiin 35,1 TWh ja teollisuuslämpöä 51,1 TWh. Kaukolämmöstä 55 % ja teollisuuslämmöstä 79 % tuotettiin yhteistuotantona. Kaukolämmöstä 43 % tuotettiin fossiililla polttoaineilla ja turpeella ja 44 % uusiutuvilla polttoaineilla. Teollisuuslämmöstä 77 % tuotettiin uusiutuvilla polttoaineilla, pääosin mustalipeällä. (Tilastokeskus, 2022)

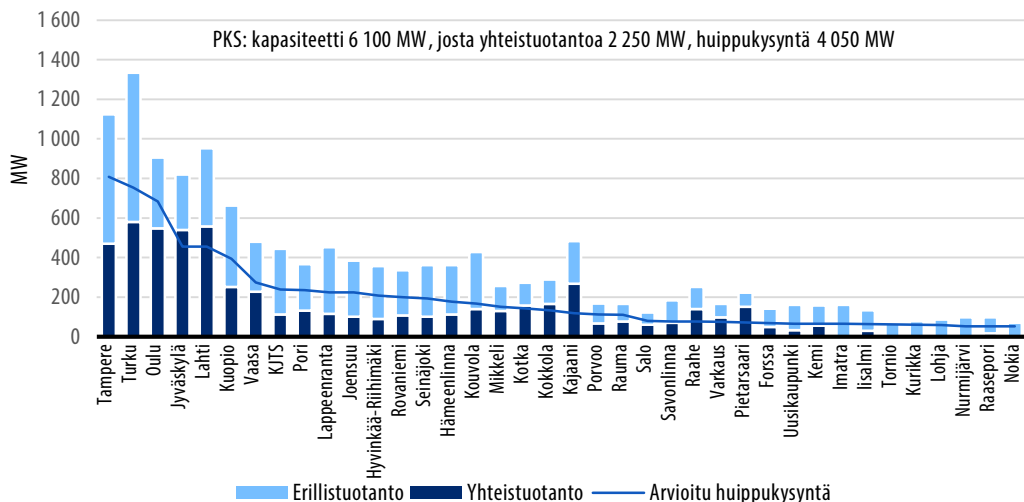
Sähköntuotanto Suomessa on hiilidioksidipäästöjen osalta jo varsin puhdasta, sillä valtaosa sähköstä tuotetaan uusiutuvilla energialähteillä ja ydinvoimalla. Ydinvoiman osuus sähköntuotannossa kasvaa edelleen kun Olkiluoto 3:a aletaan käyttää täydellä teholla. Yhteistuotannon ja lämmön erillistuotannon osalta tilanne on toinen, sillä niiden tuotanto perustuu vielä suurelta osin fossiilisiin polttoaineisiin ja turpeeseen sekä puupohjaisiin polttoaineisiin. Lämmöntuotantoon liittyvä erityisvaatimus on, että tuotannon olisi sijaittava verrattain lähellä kulutusta siirrosta aiheutuvien lämpöhäviöiden minimoimiseksi. Tämän vuoksi lämpölaitokset ja kaukolämpöverkot ovat paikallisia.

Kuviossa 10 on esitetty 39 suurinta kaukolämmöntuottajaa Suomessa vuonna 2019. Pääkaupunkiseutu on kaukolämmöntarpeen osalta selvästi omassa luokassaan ja myös sen tuotantorakenne on painottunut voimakkaasti fossiilisiin polttoaineisiin. Kuviossa 11 on esitetty kaukolämpökapasiteetti ja arvioitu huipputehon tarve näillä 39 paikkakunnalla ja lisäksi eritelty erillis- ja yhteistuotannon osuudet. Huomionarvoista on, että noin 74 % kaukolämmöstä näillä 39 paikkakunnalla tuotetaan yhteistuotantona, erillistuotantokapasiteetin suuntautuessa suurelta osin vastaamaan kulutushuippuihin. Kuvioista voidaan todeta selkeä kasvihuonekaasujen vähentämispotentiaali korvaamalla ensisijaisesti fossiilisia energialähteitä, mutta mahdollisesti pidemmällä aikavälillä myös biopolttoaineita päästöttömillä ratkaisulla. Lisäksi voidaan todeta, että pääkaupunkiseudun lisäksi Suomessa on 6–7 paikkakuntaa, joissa päästöttömillä tuotantomuodoilla korvattavaa tehontarvetta on yli 100 MW, ja 16 joissa korvattava tehontarve olisi 70 MW.

Kuvio 10. Tuotettu kaukolämpö vuonna 2019 polttoaineittain tuotannoltaan 39 suurimmalla paikkakunnalla. (Energiateollisuus ry, 2020) PKS = Helsinki, Vantaa, Espoo, Kauniainen KJTS = Kerava, Tuusula, Järvenpää, Sipoo



Kuvio 11. Kaukolämpökapasiteetti ja arvioitu huipputehon tarve vuonna 2019. (Energiateollisuus ry, 2020)



4.1.2 Teknologiat

Taulukossa 6 on eritelty energiamuodot ja niiden tuottamiseen soveltuvat SMR-tekнологiat. Koska sähköntuotanto Suomessa on jo varsin vähäpäästöistä, pelkästään sähköntuotantoon kaavailut SMR:t voisivat lähinnä kasvattaa sähköntuotannon omavaraisuusastetta tai korvata aikanaan käytöstä poistettavia voimalaitoksia. Sähköntuotantoon Suomessa soveltuvat parhaiten toimintaparametreiltaan (lämpötila, paine) ja näin ollen sähköntuotannon hyötysuhteeltaan nykylaitoksia vastaava kevytvesiteknologiaan perustuvat pienet reaktorit. SMR:t soveltuisivat myös yhteistuotantoon ja niillä voisi sähköntuotannon ohella tuottaa kaukolämpöä tai vastata teollisuuden lämmöntarpeisiin, kun vaadittava lämpötila jää alle 300 °C. Tätä korkeampaa lämpötilaa tarvitsevat sovellukset vaatisivat kaasu-, metalli- tai sulasuolajäähdytteistä korkealämpöreaktoritekniikkaa, joka poikkeaa huomattavasti kevytvesireaktoreista.

Taulukko 6. Energiamuodot, niiden tuottamiseen soveltuvat pienreaktoritekнологiat sekä todennäköiset rakentamistavat ja sijoituspaikat.

| Energiamuoto | Tekнологia | Rakentamistapa | Sijoituspaikka |
|-------------------------------------|---|---|---|
| Sähkö | Kevytvesi SMR, nykylaitoksia vastaava polttoaine ja toimintaparametrit | Avaimet käteen, isot toimijat | Olemassaoleva tai vastaava uusi ydinvoimalaitospaikka |
| Yhteistuotanto, $T < 300\text{ °C}$ | | | Kaukolämpöverkon tai teollisuuslaitoksen yhteydessä, suuret/ metsäteollisuuskaupungit |
| Lämpö, $T < 120\text{ °C}$ | Kevytvesi SMR, nykylaitoksia vastaava polttoaine, mutta huomattavasti edullisemmat toimintaparametrit ja kokoluokka | Kotimainen konsortio tuottaa pl. polttoaine | Kaukolämpöverkon tai teollisuuslaitoksen yhteydessä, suuret/ keskisuuret kaupungit |
| Lämpö, $T > 300\text{ °C}$ | Korkealämpöreaktori SMR, polttoaine ja tekнологia poikkeavat huomattavasti nykylaitoksista | Avaimet käteen, isot toimijat | Suuren teollisuuslaitoksen tai laitokeskittymän yhteydessä |
| Vety | Sähköä tuottava kevytvesi SMR (vedyn valmistus elektrolyyysillä) | Avaimet käteen, isot toimijat | Olemassaoleva tai vastaava uusi ydinvoimalaitospaikka tai vedyntuotantolaitoksen yhteydessä |
| | Lämpöä tuottava Korkealämpöreaktori (termokemiallinen vedyn valmistus) | | Vedyntuotantolaitoksen yhteydessä |

T on lämpötila.

Kaukolämmitykseen vaadittavat lämpötilat ovat huomattavasti matalampia sillä mitoituksilämpötila Suomen kaukolämpöverkoissa on 120 °C. Lisäksi kun huomioidaan Suomen kaukolämpöverkkojen tarpeet, olisi sopivin yksikkökoko, pääkaupunkiseutua lukuunottamatta, joitain kymmeniä lämpömegawatteja. Tämä on kertaluokkaa vähemmän kuin yleisimmissä kehitteillä olevissa sähköntuotantoon suunnitelluissa SMR:ssä. Kaukolämmön erillistuotantoon voitaisiinkin ottaa käyttöön erityisesti tähän tarkoitukseen suunniteltuja pieniä reaktoreita, joissa korkea turvallisuustaso voidaan toteuttaa pienen tehon ja vaatimattomien toimintaparametrien (matala paine ja lämpötila) ansiosta yksinkertaisemmilla ja kustannustehokkaammilla ratkaisuilla kuin isommissa sähköä tuottavissa reaktoreissa.

Pelkkää sähköä tuottava tai yhteistuotantoon tarkoitettu laitos hankittaisiin käytännössä jonkun suuren kotimaisen toimijan tai toimijoiden yhteenliittymän toimesta joltain ulkomaiselta reaktoritoimittajalta kokonaishankintana. Mikäli laitoksella tuotettaisiin pelkästään sähköä, voisi laitoksen sijoittaa jo olemassaolevalle ydinvoimalaitospaikalle tai uudelle paikalle, jonka ei olisi välttämätöntä sijaita lähellä asutusta. Sähköntuotantoon hankittava laitos luultavimmin edustaisi teholtaan suurempaa SMR-kokoluokkaa tai koostuisi useammasta pienempitehoisesta moduulista.

Lämmöntuotantoon tai yhteistuotantoon tarkoitettu reaktori on väistämättä sijoitettava verrattain lähelle lämmön loppukäyttäjää siirtohäviöiden minimoimiseksi. Sopiva sijoituspaikka voisi olla esimerkiksi olemassaoleva voimalaitos- tai muu teollisuusalue, jossa olisi valmiina yhteys kaukolämpöverkkoon tai teollisuuslämmön tapauksessa lyhyt etäisyys prosessihöyryn loppukäyttäjään. Reaktori voidaan sijoittaa myös proomuun. Tällainen sijoitustapa on esimerkkireaktoreista RITM200:lla mutta vaihtoehtona myös BWRX-300:lla ruotsalaisen Kärnfull Next yrityksen tarjoamana (Kärnfull Next, 2022). Lämmöntuotantoon soveltuvin reaktoriteknologia määräytyy hyödynnettävältä lämmöltä vaadittavan lämpötilan perusteella. Kevytvesireaktoriteknologialla jäädään käytännössä alle 300 °C lämpötilaan, joka rajaa mahdolliset lämpösovellukset käytännössä kaukolämmitykseen ja matalan lämpötilan prosesseihin esimerkiksi sellun ja makean veden tuotannossa. Kaukolämmön erillistuotantoon soveltuvan reaktorin voisi toteuttaa polttoainetta lukuunottamatta myös kotimainen konsortio.

Ydinenergialla voidaan myös tuottaa energiakantaja vetyä. Vedyn tuotantoon voidaan hyödyntää ydinvoimalla tuotettua sähköä (elektrolyysi), lämpöä (termokemiallinen vedynvalmistus), tai molempia (korkean lämpötilan elektrolyysi). Perinteinen kevytvesireaktoriteknologia soveltuu vedyn tuottamiseen perinteisellä elektrolyysillä mutta myös reaktorin tuottamaa lämpöä voidaan hyödyntää lämmittämään elektrolyyserille menevää vettä prosessin hyötysuhteen kasvattamiseksi. Varsinaiset lämpöä hyödyntävät vedyn tuotantomenetelmät vaativat korkeampia lämpötiloja kuin mitä kevytvesireaktorit kykenevät tuottamaan. Yhdistetyssä sähkön ja vedyntuotantolaitoksessa vety voi toimia

tuotantokustannuksia tasapainottavana tekijänä, jolloin sähkönkäytön ollessa vähäistä, kasvatetaan vedyntuotannon osuutta.

Suomessa lähitulevaisuudessa nähtävissä oleviin pääasiallisiin käyttötarkoituksiin (sähkö, kaukolämpö) soveltuu parhaiten kevytvesireaktoritekniikka. Suomessa on osaamista ja kokemusta kevytvesireaktorien elinkaaren kaikista vaiheista ja teknologiset ratkaisut käytetyn kevytvesireaktoripolttoaineen loppusijoitukseen. Valikoidut esimerkkireaktorit (Taulukko 7) ovat kaikki perustekniikaltaan kevytvesireaktoreita hieman erilaisina variaatioina. Kaikki hyödyntävät polttoaineena tavanomaista matalarikasteista (LEU, low enriched uranium) uraanidioksidipolttoainetta, jota käytetään vastaaviin tai matalampiin palamiin kuin käytössä olevien reaktorien polttoaine.

Taulukko 7. Valikoitujen laitosten kokoluokka ja valmistusta ohjaavat normit.

| Nimi | Tyyppi | Lämpöteho MW / palama MWd/kg | Laitosalue | Normipohja |
|--------------------|--------|---------------------------------|--|--|
| NuScale | iPWR | 200 / 30 | 12 yksikköä 400 x 350 m ² | 10CFR50 App A ym. ASME BPV Section III |
| RITM200 | iPWR | 165 / 51 | Proomu 160 x 33 m ² | RF normi NP-022-17 (kv. normi IMO 491.A(XII)) |
| Nuward | iPWR | 540 / 60 | Alue ei tiedossa; 2 yksikön reaktorirakennus 70 x 50 m ² | RCC-M |
| BWRX-300 | BWR | 870 / 49,5 | 1 yksikkö 170 x 280 m ² tai proomu (koko ei tiedossa) | 10CFR50 App A ym. ASME BPV Section III |
| Suomi- Reaktori | DHR | 20–100 / 30 | 1 yksikkö n. 100 x 100 m ² | Mahdollisimman pitkälle PED ym. |

Pienreaktoreiden suunnitteluratkaisujen kertaluontoista hyväksymiskäsittelyä tulisi harkita Suomessakin, jotta toimijoille syntyy ennakkoon varmuus, että suunnitteluratkaisua on tarkoitukseensa riittävä. Hyväksymiskäsittelyn laajuus voisi vaihdella yksittäisestä toiminnosta aina koko laitoksen laitostason turvallisuussuunnitteluun asti. Tällöin samalla suunnittelulla voidaan toteuttaa useita eri hankkeita eri omistajille eri paikoissa Suomessa. Lainsäädännön tulisikin osoittaa STUKille sekä mahdollisuus että velvollisuus antaa erillis-hyväksyntä joko koko laitoksesta tai hakijan siitä rajaamasta pienemmästä (mutta silti selvärajaisesta) asiakokonaisuudesta. Hyväksynnän yhteydessä voidaan määritellä

hyväksynnälle rajoituksia, kuten noudatettavat normit, voimassaoloaika, mahdolliset ydinvoimalaitosympäristöstä johtuvat kuormitukset, ja muita tarvittavia rajoituksia.

4.1.3 Turvallisuussuunnittelu

Pienreaktorien turvallisuussuunnittelussa noudatetaan kaikkien laitosten kohdalla syvyyssuuntaisen puolustuksen (DiD, Defence-in-depth) periaatetta, vaikka yksityiskohdissa onkin eroja. Maailmalla kehitteillä olevissa pienreaktoreissa hyödynnetään laajasti uudentyyppisiä ja passiivisia turvallisuusratkaisuja. Alla on esitetty muutamia esimerkkejä.

Reaktori tulee voida sammuttaa myös siinä tapauksessa, että ensisijainen, tyypillisesti sääätösauvoilla toteuttu, pikasulku vikaantuu. Tyypillisesti reaktorin pikasulku on diversifioitu siten, että sääätösauvojen lisäksi reaktorin sammutus on varmistettu jäähdyteveden boorausjärjestelmällä myös kiehumusvesireaktoreissa, kuten Olkiluoto 1 ja 2, vaikka järjestelmä ei painevesireaktoreista poiketen käytetä normaalin käytön aikana. BWRX-300 reaktorin suunnittelija on esittänyt kotimaansa viranomaiselle ratkaisua, jossa pikasulku on poikkeuksellisesti diversifioitu (GE Hitachi, 2020). Tätä vaihtoehtoista ratkaisua ei ole julkistettu, mutta sen voi päätellä liittyvän reaktorin pinnan- ja/tai syöttöveden säätöön. Aivan viime aikoina on julkisuudessa esitetty myös (ilmeisesti eurooppalaistettua) BWRX-300 -versiota, jossa olisi boorausjärjestelmä.

NuScale:ssa reaktorin paineastia, joka sisältää reaktorin lisäksi höyryn tuottamiseen tarvittavat komponentit kuten höyrystimen, on ympäröity kompaktilla terässuojarakennuksella. Tämä kokonaisuus on upotettu suureen vesialtaaseen, joka toimii lämpönieluna onnettomuustapauksissa. Tällöin reaktorin jäähdytys pyritään ensisijaisesti hoitamaan höyrystimeen liitetyillä eristyslauhduttimilla, jotka siirtävät lämpöä vesialtaaseen. Mikäli eristyslauhduttimet eivät olisi käytettävissä, annetaan reaktoria jäähdyttävän veden höyrystyä ja se johdetaan paineastian ulospuhallusventtiilien kautta suojarakennukseen. Kulkeutuessaan suojarakennuksen sisäseinämille höyry lauhtuu luovuttaen samalla lämpöä, joka edelleen johtuu seinämän läpi ja siirtyy näin passiivisesti vesialtaaseen. Suojarakennuksessa lauhtunut vesi kulkeutuu edelleen reaktoripainesäiliöön jäähdyttämään reaktoria. Käynnistyttyään ratkaisu ei vaadi toimiakseen liikkuvia osia, mutta käynnistyminen vaatii venttiilien avautumista, mikä puolestaan vaatii ohjauksen, sekä suojausjärjestelmän joka antaa avautumiskäskyn, että toimilaitteen, joka suorittaa avaamisen. NuScale:ssa hätäjäähdytyksen venttiilitoiminnot on kahdennettu N+1 vikakriteerin mukaisesti, sillä venttiilit ovat suojarakennuksen sisällä, jonne ei käytön aikana pääse. Näin ollen N+2 kriteeri, jossa oletetaan yhden varajärjestelmän olevan huollettavana, olisi turha.

4.2 Kokoluokan vaikutus lupajärjestelmään ja -vaatimukseen

Miten näiden teknologioiden modulaarisuus ja kokoluokka tulisi ottaa huomioon lupavaatimuksissa, -järjestelmässä sekä valvonnassa?

Ydinenergian lupajärjestelmän täytyy huomioida sekä teknisiä että ei-teknisiä asioita, laitosten koosta riippumatta. Ei-teknisiin kysymyksiin kuuluvat mm. hankekehittäjän (lupahakijan) edellytykset, kuten omistus, osaaminen ja rahoitusasema, sekä teknologian alkuperä, mikäli ulkomaalainen. Tekniikan osalta lupajärjestelmän tulisi kohdella SMR-ydinlaitoksia johdonmukaisesti ja tasapuolisesti siten, että

1. laitoksen lupaprosessi olisi hyvällä varmuudella ennakoitavissa. Tässä yksittäisistä projekteista riippumattomat ennakkohyväksynät ovat keskeinen, mutta eivät ainoa, työkalu.
2. lupaprosessissa tehtäisiin mahdollisimman vähän rajoittavia oletuksia siitä keitä toimijat tai sovellukset voivat olla, niin että erilaiset ydinenergian turvalliseen käyttöön liittyvät vastuut voidaan osoittaa hankkeeseen kuuluville tahoille, joilla on parhaat edellytykset huolehtia vastuista.
3. laitokselle asetetut turvallisuusvaatimukset, mukaan lukien ydinvastuuvälitteet, olisivat tasapainoisessa suhteessa laitoksen todennettavaan kykyyn aiheuttaa vaaraa ihmisille, omaisuudelle tai ympäristölleen (riskitietoinen ajattelu)
4. laitosten laitekanta noudattaisi laitossuunnittelun tarpeiden kanssa yhteensopivia teknisiä standardeja. Standardien mukaisesta valmistuksesta poikkeavia viranomaistarkastuksia ja -hyväksyntiä vältettäisiin.

SMR:iä varten ei siis laadittaisi "omia" sääntöjä, vaan pienreaktorien ja pienreaktorihankkeiden ominaisuudet huomioitaisiin lisäämällä lainsäädäntöön uusia elementtejä. Itse asiassa, monet pienten reaktorien hyödyntämisen kannalta tärkeät elementit, kuten ennakkohyväksynät, valvontatoimien ennakoitavuus sekä laitevalmistuksessa pitäytymisen tiukasti standardienmukaisiin menettelyihin, edesauttaisivat myös isojen reaktorien turvallista ja kustannustehokasta käyttöä.

Ennakkohyväksyntää pitäisi olla mahdollista hakea ainakin laitoksen teknologialle ja laitospaikalle, yksittäisistä laitoshankkeista riippumatta. Ennakkohyväksynnän laajuus pitäisi olla hakijan valittavissa. Hyväksyntäprosesseista riippumatta, vastuu laitoshankkeen eri osatekijöiden hyväksyttävyydestä tulisi osoittaa kulloinkin sille taholle jolla on aidot edellytykset kantaa tarvittava vastuu.

Taulukko 8. Ydinenergia-alaissa tarkoitettujen turvallisuuteen liittyvien vastuiden jako ydinvoimahankkeessa.

| Osa-alue | Luvanhaltija nykyjärjestelmässä | Luvanhaltija uudessa järjestelmässä |
|--------------|--|---|
| Teknologia | Laitoksen omistaja Käytännössä ulkoistaa vastuun laitostoimittajalle toimitussopimuksessa | Laitostoimittaja tai teknologian omistaja |
| Laitospaikka | Laitoksen omistaja Vain omalle maalle saa rakentaa | Laitospaikan omistaja Voi siirtää laitospaikan laitoksen omistajalle myöhemmin |
| Toiminnot | Laitoksen omistaja | Laitoksen omistaja Voi ulkoistaa käytön palveluntuottajalle |
| Ydinvastuu | Laitoksen omistaja | Laitoksen omistaja |
| Jätehuolto | Laitoksen omistaja vastaa kustannuksista Toiminnan voi ulkoistaa tytäryhtiölle | Laitoksen omistaja vastaa kustannuksista Toiminnan voi ulkoistaa palveluntuottajalle |

Laitoksen omistajan vastuu laitoksen turvallisuudesta ei vähene sillä, että hän käyttää laitostoimittajaa, joka on hyväksyttänyt laitossuunnittelunsa etukäteen viranomaisella. Laitoksen omistajasta tulee rakentamisluvan ja käyttöluvan haltija, ja hankinta- sekä lupaprosessien aikana laitoksen omistajan täytyy hankkia riittävä kyky hallita laitoksensa turvallisuutta. IAEA:n (INSAG, 2017) luvun 4 mukaan omistaja-luvanhaltijan tulee omata teknistä, suunnittelu- ja käyttökyvykkyyttä siinä määrin, että hän pystyy toimimaan ns. älykäänä asiakkaana (intelligent customer), eli palveluita tai tekniikkaa hankkiessaan ymmärtää mitä on tekemässä. Omistajan on myös kyettävä ylläpitämään laitoksensa suunnittelun eheyttä ns. design authority -toiminnon avulla. Luvanhaltija saa tukea kaikkia näitä kyvykkyyksiä asiantuntijaorganisaatioiden palveluita alihankkimalla. Tätä on havainnollistettu edelleen raportin (INSAG, 2003) kuvassa Kuvio 12.

Kuvio 12. Design authority -toiminto voi tukeutua laitostoimittajaan ja muihin alihankkijoihin, kun se ylläpitää kokonaiskuvaava laitoksen turvallisuudesta.

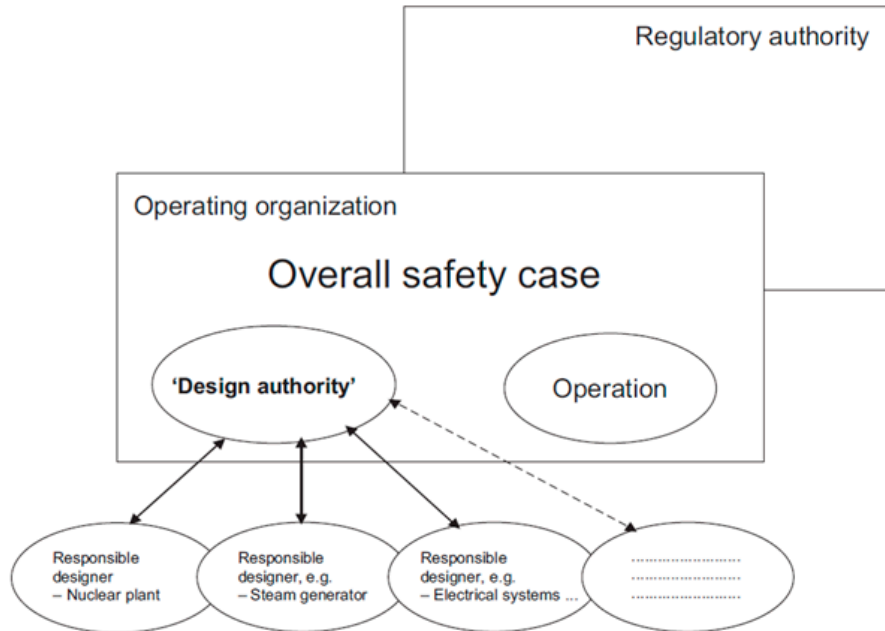


FIG. 1. Relationships between the design authority and other entities.

Ydinvoimalaitoksen turvallisuus palautuu lopulta säteilyturvallisuuuteen, ja laitoksen ulkopuolella oleskelevien ihmisten ym. elollisten olentojen hyvinvoinnin takaamiseen minimoimalla säteilyaltistuksesta aiheutuva haitta. Kuten edellä luvussa 2 nähtiin, säteilyaltistus on suoraan verrannollinen lähdetermiin laitokselta, joka puolestaan on suoraan verrannollinen reaktorin (tai käytetyn polttoaineen varaston) aktiivisuusinventareihin. Puolikkantitatiivisesti voidaan esittää, että

Päästö=

Aktiivisuusinventari

Rakenteiden vankkuus * Luontainen turvallisuus * Turvallisuusmarginaalit * Turvallisuustoiminnot

ja ympäristössä

Altistus =

Päästö

, $n \leq 2$

Lievennykset * Etäisyysⁿ

Päästöä vähentävät tekijät ovat kaikki laitoksen sisäisiä:

- *rakenteiden vankkuus*, eli rakenteiden ja laitteiden korkea eheys ja vähäiset valmistuksen jälkeiset viat tai puutteet; tähän päästään noudattamalla oikein valittuja standardeja ja toimivaksi tunnettuja valvontamenettelyitä
- *luontainen turvallisuus*, eli massoista johtuva hitaus (inertia) ja tapahtumia stabiloivat tai jarruttavat fysikaaliset takaisinkytkennät (kuten reaktorin tehoheilahduksia rajoittava Doppler-takaisinkytkentä)
- *turvallisuusmarginaalit* onnettomuuskuormituksia vastaan
- *turvallisuustoiminnot*, eli erityiset häiriöiden ja onnettomuuksien varalta suunnitellut tekniset toiminnot ja järjestelmät.

Päästön lähdettyä laitokselta sen altistavaa vaikutusta pienentävät

- *lievennykset*, suojelutoimet, joita laitoksen ympäristössä voidaan tehdä
- *etäisyyden n:s potenssi*, $n \leq 2$; $n=2$ vastaisi aktiivisuuden leviämistä tasaisesti pinta-alaa kohti matkalla laitokselta kohteeseen "etäisyyden" päässä.

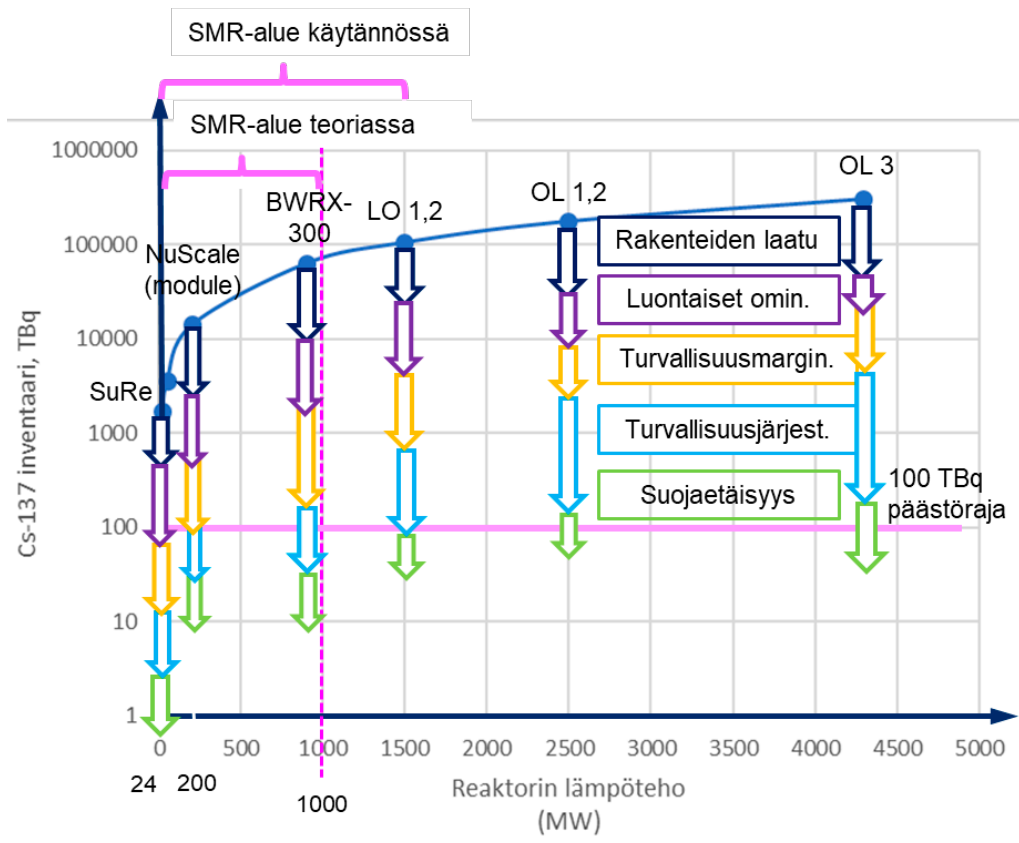
Nämä kaikki tekijät pätevät reaktoreiden turvallisuuteen, reaktorin koosta riippumatta. Pienessä reaktorissa on fysikaalisesti mahdollista painottaa luontaisia tekijöitä (vankkuus, hitaus, takaisinkytkennät, turvallisuusmarginaalit) erityisten turvallisuusjärjestelmien kustannuksella; hyvin suurissa reaktoreissa riittävä turvallisuustaso voidaan saavuttaa vain monikertaisilla ja erilaistetuilla (diversifoiduilla) turvallisuusjärjestelmillä. Tätä on havainnollistettu kuvassa Kuvio 13.

Sivuhuomatuksena todettakoon, että ydinlaitosten vahinkovakuutusten suuruutta arvioitaessa vakuutusyhtiöt huomioivat vahinkoa rajoittavina tekijöinä *rakenteiden vankkuuden* ja *luontaisten prosessien* tyyppisiä asioita. Sen sijaan mitään häiriöiden tai onnettomuuksien varalta suunniteltuja *turvallisuustoimintoja*, *lievennyksiä* tms. ei lasketa hyväksi.

Kuten kuvasta 13 nähdään, ei ole olemassa yksiselitteistä kokorajaa joka erottaisi "isot" laitokset "pienistä", vaan reaktoreita on kaiken kokoisia, lämpöteholtaan muutamasta megawattista aina useisiin tuhansiin megawatteihin.

Kooltaan suhteellisen pienistä reaktoreista voidaan koota kokonaisteholtaan "ison" veroinen voimalaitos, sijoittamalla sinne useita yksiköitä. Yhdyvalloissa kehitetty NuScale-reaktorityyppi on ajateltu enimmillään 12 reaktoriyksikköä sisältäväksi laitospakettisuudeksi.

Kuvio 13. Reaktoritehon vaikutus eri turvallisuustekijöiden merkitykseen. Mitä suurempi reaktoriteho, sitä monimutkaisempi kokonaisuus turvallisuusjärjestelmiä tarvitaan, ja silti sijoitusetäisyydelle on tarvetta. Hyvin pieni reaktori voidaan turvallisuusominaisuuksiensa puolesta sijoittaa lähelle asutusta.



4.3 Hankkeiden toteuttajatahot ja teknologian vaikutus lupamenettelyihin

Millaiset tahot toteuttavat SMR-hankkeita Suomessa? Millaiset lupamenettelyt tulisi luoda, jotta eri teknologiat ja toteutustavat tulisi huomioitua?

Suomessa SMR-hankkeen mahdollisia toteuttajatahoja on kolmea tyyppiä, ydinalalla jo toimiva suuri yritys, ydinalalle toimintaansa laajentava suuri yritys, ja ydinalalle toimintaansa laajentava keskikokoinen yritys. Hankittava teknologia ja uuden laitoksen sijaintipaikka voivat vaihdella taulukossa alla esitetyllä tavalla.

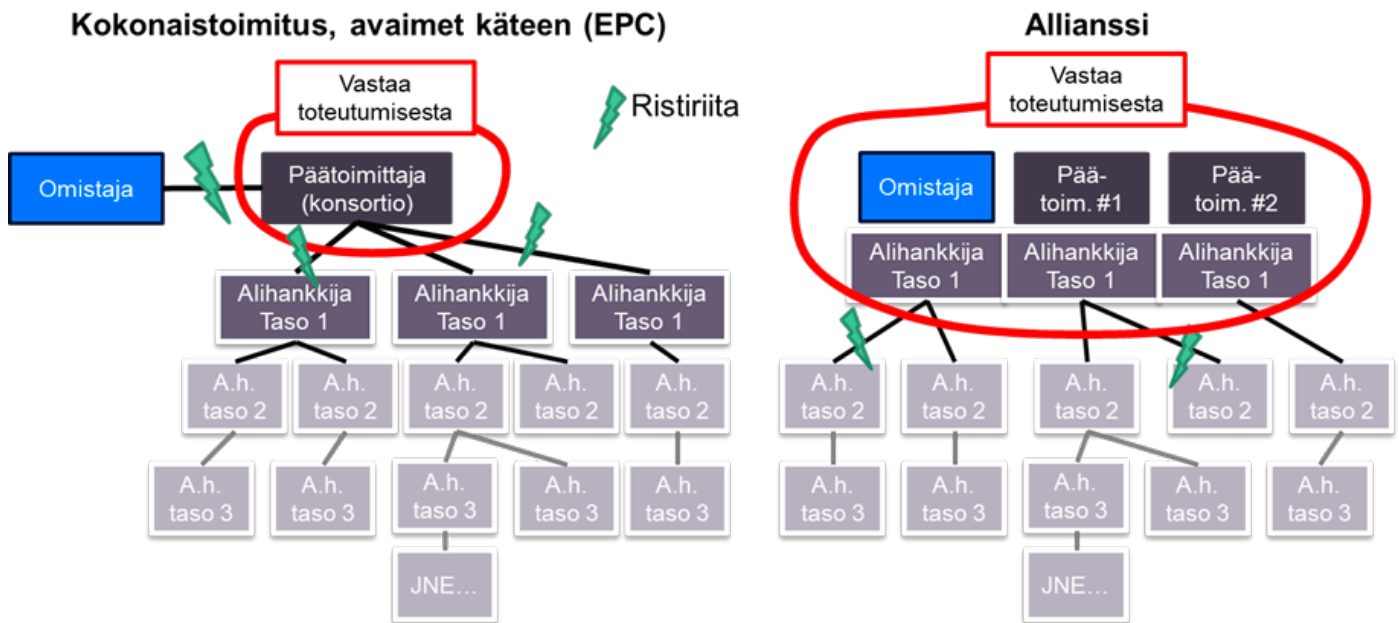
Taulukko 9. Suomessa mahdollisia SMR-hankkeita.

| | Nykyinen suuri ydinvoimatoimija | Suuri toimija, uusi ydinvoimatoimija | Keskikokoinen toimija, uusi ydinvoimatoimija |
|---------|--|--|--|
| Laitos | Kaupallisia SMR-laitoksia, tai Pieniä reaktoreita | Kaupallisia SMR-laitoksia | Pieniä (lämmitys) reaktoreita |
| Paikka | Olemassaoleva paikka, tai Uusi paikka | Uusi ydinlaitospaikka, mahdollisesti teollisuusalue | Uusi ydinlaitospaikka, mahdollisesti teollisuus- tai voimalaitosalue |
| Tavoite | Jatkaa / laajentaa nykyistä tuotantoa, tai Laajentaa uudelle tuotantoalueelle | Korvaa aiemmin käyttämiään energiamuotoja ydinvoimalla | Korvaa aiemmin käyttämiään lämmitysenergiamuotoja ydinvoimalla |

Ydinvoimalaitoksen rakentaminen voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Perinteisiä toimitusmallia ovat ns. avaimet käteen -hanke (EPC, Engineering, Procurement and Construction), jossa laitostoimittaja tai toimittajkonsortio ottaa kokonaisvastuun hankkeen toteuttamisesta, ja hajautettu hankinta, jossa omistaja itse hallinnoi projektia ja vastaa kokonaisuuden toimivuudesta. Suomessa on 1970-luvulla koeteltu kumpaakin menettelyä. Imatran Voima Oy rakensi Loviisan laitoksen hajautettuna hankintana, koska neuvostoliittolainen päälaitetoimittaja kieltäytyi ottamasta kokonaisvastuuta laitoksen muokkauksesta länsimaiset turvallisuusvaatimukset täyttäväksi. Teollisuuden Voima Oy rakennutti Olkiluoto 1 ja 2 -yksiköt ruotsalaisella Asea Atomilla, joka toimitti laitokset menestyksellisesti avaimet käteen -periaatteella. Olkiluoto 3 ja Hanhikivi 1 on molemmat ostettu avaimet käteen -laitoksina, ilmeisesti rahoitusteknisistä syistä, joskin hankkeiden toteutumisen kannalta vähemmän menestyksellisesti. Sekä EPC-toimituksiin että hajautettuun hankintaan liittyy tyypillisesti keskeisten projektiosapuolien intressiristiriitoja ja vastakkainasettelua.

Joitakin isoja infrahankkeita on Suomessa 2000-luvulla toteutettu hyvällä menestyksellä ns. allianssimallilla. Allianssin ideana koota yhteen projektiorganisaatioon kaikki projektin osapuolet – sekä hankkeen tilaaja että keskeiset laite- ja palvelutoimittajat – ja jakaa projektiriskit osapuolten kesken tasapuolisesti. Näin allianssi välttää päätoimijoiden vastakkainasettelun; elämässä väistämättömät ristiriidat siirtyvät projektissa alemmille tasoille, missä ne koskevat pienempiä asiakokonaisuuksia.

Kuvio 14. Toimitusvastuun ja ristiriitojen erot kokonaistoimitus- ja allianssimalleissa.



Ydinlaitosten vastuiden jakaminen eri toimijoille on käsitelty jo edellä luvussa 4.2. Omistajan pitää tuntea oma laitoksensa siinä määrin, että hän pystyy toimimaan ns. Intelligent Customer -roolissa. Tämä edellyttää, että omistaja ymmärtää turvallisuusperustelut laitos- ja järjestelmätasolla – mitoitettavat tilanteet, hyväksymiskriteerit, vikaoletukset. Omistajalla ei kuitenkaan tarvitse olla laitosuunnittelijan kaikkia kyvykkyyksiä.

Vikaoletusten osalta tärkeää on tuntea sekä noudatettavat vikakriteerit (N+1, N+1+D+1, N+2 tms.) että keskeisten laitteiden oletettavat vikaantumismekanismit. Laiteteknologian vaihtuessa kokonaan uudenlaiseen myös laitteille ominaiset vikaantumismekanismit vaihtuvat.

Teknologian sinänsä ei kuulu vaikuttamaan lupamenettelyihin, niin kauan kuin lupituksen kohteena on puhtaasti energiantuotanto, oli loppuenergiamuoto mikä hyvänsä: sähkö, lämpö tai liike. (Laivareaktoreiden osalta kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO on harmonisoinut laivareaktoreiden turvallisuutta koskevat säännöt 1980-luvulla, IMO A.491(XII).)

Lupamenettelyt on johdettava yhtäältä yhteiskunnan tarpeesta tuottaa itselleen energiaa, mutta samalla valvoa ja hallinta toimintoja, toisaalta toiminnan aiheuttamien haittojen ja vaarojen rajoittamisesta hyväksyttäväksi koetulle tasolle. Yleiseltä merkitykseltään huomattavan ydinlaitoksen käsite kannattaa laissa säilyttää, mutta sen kokorajaa voisi nostaa esimerkiksi 300 MWth tasolle, mikä vastaisi YVA-menettelyn rajaa muuta polttoainetta käyttävälle lämpövoimalalle.

Hankekohtaisten valtioneuvoston periaatepäätösten tilalle tai rinnalle tulisi harkita ydinvoiman osuutta suomalaisessa energijärjestelmässä linjaava strateginen periaatepäätös. Hankekohtaiset periaatepäätökset voisi rajata koskemaan ”isojen” ydinlaitosten hankkeita, joilla kokonsa vuoksi on valtakunnallista energiapoliittista merkitystä. Strateginen periaatepäätös mahdollistaisi useita eri toimijoiden ydinvoimalaitoshankkeita, joilla yksin kappalein tarkasteltuna ei olisi valtakunnallista merkitystä. Strategisen periaatepäätöksen mahdollistamia hankkeita koskevassa päätöksenteossa YVA olisi mahdollista sijoittaa rakentamisluvan yhteyteen, jolloin YVA-prosessin täyttäisi paremmin tarkoituksensa.

Periaatepäätöksissä on tarkoituksenmukaista ottaa kantaa käsiteltävien hankkeiden enimmäislämpötehoon, riippumatta siitä tuotetaanko lopputuotteena sähkö, lämpöä, vai molempia. Sen sijaan reaktorien lukumäärään ei periaatepäätöksessä ole tarpeen ottaa kantaa, tarvittaessa enimmäismäärää voidaan rajata mutta tarkkaa lukumäärää ei ole tarkoituksenmukaista yksilöidä, jotta hankkeita valmistelevilla jää mahdollisuus kilpailuttaa teknologiatoimittajia. Periaatepäätöksessä voidaan rajoittaa teknologia-, paikka-, toimija- tai muuta valintaa asettamalla edellytyksiä rakentamisluvan myöntämiselle.

Rakentamis- ja käyttöluvuissa tiedetään jo yksikkökoko, ja luvissa voidaan rajata esimerkiksi rakennettavien laitosesiköiden lukumäärä. Valtioneuvoston päätöksenteon kannalta on tarkoituksenmukaisinta käsitellä esimerkiksi yksi (usean modulin tai yksikön) voimalaitoskokonaisuus kerrallaan, sen sijaan että rakentamislupia myönnettäisiin moduli kerrallaan.

4.4 Valmiiksi suunniteltujen konseptien käyttäminen sellaisenaan

Miten varmistetaan, ettei valmiiksi suunniteltuja SMR-konsepteja jouduta suunnittelemaan uudelleen Suomessa erityisten luvitusvaatimusten ja käytäntöjen takia?

4.4.1 Laitostason suunnittelukriteerit

Keskeisin periaate ydinturvallisuudessa on syvyyspuolustusperiaate, jota toteutetaan sekä rakenteellisin että toiminnallisoin ratkaisuin. Kaupallisesti saatavilla olevat laitokset noudattavat tätä periaatetta alkuperämaansa käytäntöjen mukaisesti.

Yhdysvaltain ja Euroopan välillä syvyyspuolustuksen toteutustavassa on käytännöllisiä eroja, joita havainnollistetaan kuvassa Kuvio 15. Kaikissa toimintaympäristöissä tarkastellaan suunnittelussa tilanteet normaalikäytöstä laitoksen tuhoutumiseen, mutta

Euroopassa suunnittelun laajennus- ja sydämensulamistilanteita painotetaan laitoksen mitoituksessa Yhdysvaltoja enemmän.

Kuvio 15. Toiminnallinen syvyyspuolustus IAEA:n ohjeiston mukaisesti, ja sen arviointivat Yhdysvalloissa ja Euroopassa. Yhdysvalloissa painotetaan PRA-pohjaista (riskianalyysiin perustuvaa) lähestymistä harvinaisille tilanteille.

| | Käyttötilat | | Onnettomuustilanteet | |
|--------------------|--|------------------------------------|---|---|
| | Normaali käyttö | Odotettavissa olevat käyttöhäiriöt | Suunnittelun-perusta-onnettomuudet | Oletettujen onnettomuuksien laajennus (Design Extension Conditions) |
| | | | Vähäisiä polttoainevarioita | Reaktorisydämen sulaminen |
| Yhdysvallat | Mitoittavat tilanteet tunnistetaan ja analysoidaan laitostyyppikohtaisesti, "standardikriteerit" | | Vain tietyt tilanteet: LOOP, ATWS, lentokonetörmäys | Riskipohjainen tarkastelu laitoskohtaisesti |
| WENRA | Mitoittavat tilanteet laitostyyppikohtaisesti | | Laitoskohtainen, lievät kriteerit | |
| Suomi | Mitoittavat tilanteet laitostyyppikohtaisesti | | Laitoskohtainen, tiukemmat kriteerit | |

Eri syvyyspuolustustasoilla keskeiset *prosessitekniset hyväksymiskriteerit* ovat pääpiirteissään samanlaisia Yhdysvalloissa ja Euroopassa. *Järjestelmäsuunnittelun* vaatimusten yksityiskohtaisissa määrittelyissä voi kuitenkin olla huomattaviakin eroja.

Häiriö- ja onnettomuustilanteista selviytymiseksi laitosten suunnittelussa käytetään kahta pääkeinoa:

1. luontaiset turvallisuusominaisuudet, jotka saadaan aikaan rakenteellisilla ja prosessiteknisillä ratkaisuilla, ja jotka ehkäisevät häiriöiden syntyä ja hidastavat onnettomuuksien kehittymistä (passiivista turvallisuutta, ks. myös luku 4.6)
2. erillisiä turvallisuusjärjestelmiä, joilla laitos saatetaan tilanteessa kuin tilanteessa ensin hallittuun tilaan ja sitten turvalliseen tilaan.

Turvallisuusjärjestelmien suunnittelussa varaudutaan satunnaisiin vikoihin ja ihmisen virheisiin. Yhdysvalloissa noudatetaan ns. yksittäisvikaperiaatetta N+1, eli järjestelmän on kyettävä täyttämään tehtävänsä vaikka mikä tahansa sen toimintaan vaikuttava laite ei toimisi. Euroopassa on laajasti (joskaan ei täysin) siirrytty edellyttämään, että aktiivisten turvallisuusjärjestelmien on kyettävä täyttämään tehtävänsä vaikka N+1 -satunnaisvian lisäksi mikä tahansa osajärjestelmä on pois käytöstä ennakkohuollon takia, mikä johtaa N+2 -vikakriteeriin.

N+2 -vikakriteeriä on tarkoituksenmukaista soveltaa vain sellaisille järjestelmien osille, jotka ovat laitoksen käynnin aikana luoksepäästävässä. Monissa SMR-teknologioissa keskeisiä turvallisuustoimintoja toteuttavat prosessilaitteet sijaitsevat fyysisesti niin lähellä reaktoria, että niiden huoltaminen käynnin aikana on mahdotonta. Tällaisilta laitteilta ei ole järkevää edellyttää satunnaisvikakriteeriä enempää.

Syvyyspuolustuksen pääpiirteet määritellään tyypillisesti maakohtaisen luvitushierarkian yläosassa, laillisesti sitovan säännösten puitteissa. Kuten syvyyspuolustusperiaate, myös luvitushierarkia eri maissa muistuttaa hyvin paljon toisiaan.

Kun tarkastellaan valmiiksi suunniteltujen konseptien luvitusta ja hyväksyntää, keskeinen kysymys on, miten suhtautuvat alkuperä- ja kohdemaan

- Laillisesti sitovat vaatimukset
- Turvallisuusviranomaisen sitovat vaatimukset ja
- Suunnittelu- ja valmistusstandardien mukaiset tekniset vaatimukset (luku 4.4.2)

Lainsäädäntöön on kirjattu yhteiskunnan turvallisuutta koskevat odotukset, sellaisina kuin ne kussakin maassa ovat ajan saatossa muotoutuneet. Lainsäädännön vaatimuksista johdetaan turvallisuusviranomaisen sitovat ja ohjeelliset vaatimukset, jotka määrittävät *laitostason* ja *järjestelmätason* suorituskyvyn.

Turvallisuustoiminnot muodostuvat siis rakenteista ja fysikaalisista prosesseista, jotka määräävät luontaiset ominaisuudet, sekä erikseen suunnitelluista turvallisuusjärjestelmistä. *Järjestelmät* muodostuvat *rakenteista ja laitteista*. Yksittäisten rakenteiden ja laitteiden suunnittelu, mitoitus ja valmistus perustuu eri viranomaisohjeissa esitettyihin vaatimuksiin ja määriteltyihin (hyväksyttäviin) standardeihin.

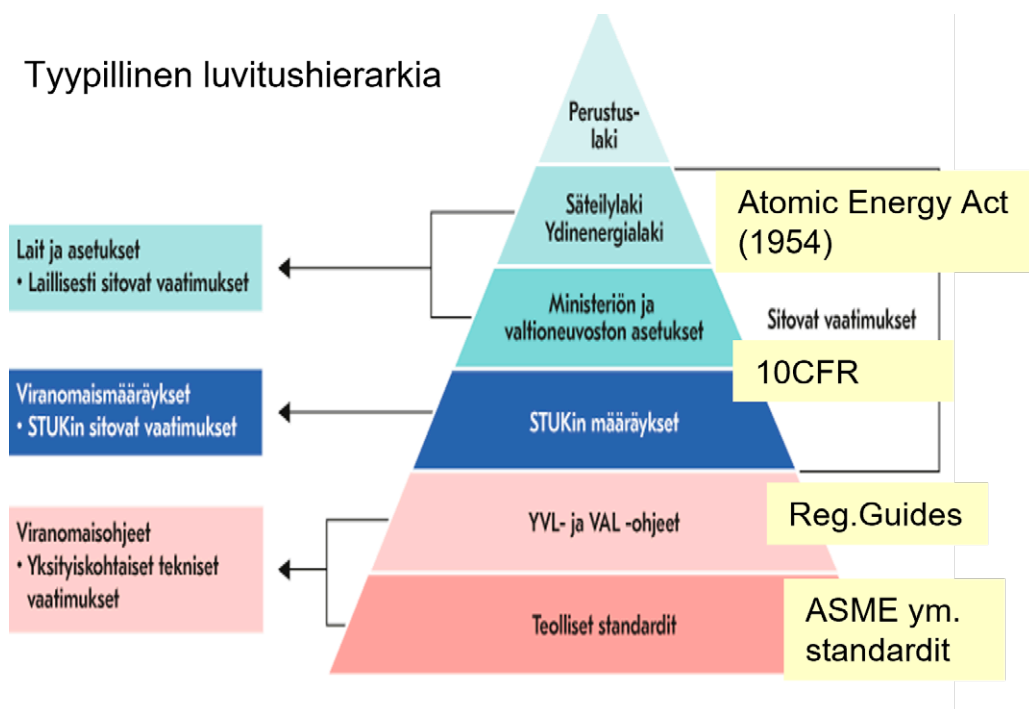
Standardien mukaan suunnitellut ja valmistetut yksittäiset systeemit, rakenteet ja laitteet saavuttavat riittävän suorituskyvyn normaaleissa käyttöolosuhteissa sekä oletetuissa häiriö- ja onnettomuustilanteissa, kuten luvussa 4.4.2 kuvataan.

Eri maissa mutta samaan turvallisuuskriittiseen tarkoitukseen laadittujen standardien mukaiset *menettelyt* voivat poiketa toisistaan, mutta tästä ei automaattisesti seuraa, että eri standardien *tuottama suorituskyky* poikkeaisi olennaisesti toisistaan (suorituskyvyn osalta ks. Kuvio 17). Tämän selvityksen puitteissa ei ole mahdollista tarkastella tarkemmin esimerkiksi ASME:n ydinteknisten standardien eroja Euroopassa noudatettaviin painelaitenormeihin, mutta lopputuotteiden suorituskykyä kiinnostavissa kuormitustilanteissa vertailemalla voitaisiin selvittää onko syytä pelätä että olennaista suorituskykyeroa voisi muodostua.

PIEMOS-tutkimusryhmä pitää tätä skenaariota epätodennäköisenä, koska käytännössä Euroopassa ASMEa on käytetty yleisesti ydinlaitosten suunnittelussa, ja jopa erillisenä normina esitetty ranskalainen RCC-M pitkälti perustuu ASMEen. Näin ollen laitosten suunnittelukriteerit voidaan sellaisenaan hyväksyä Suomessa, mikäli ne täyttävät turvallisuusviranomaisen sitovat vaatimukset (määräystasolla).

Suomen vaatimussäännöstössä viranomaisten määräykset ovat velvoittavia ja ohjeet suosituksia. Rajapinta näiden välillä voi olla tulkinnanvarainen, kuten Luvike -selvityksissä (Rintamaa & Törrönen, 2017) selkeästi tuli esille. Säännösten uudistuksen yhteydessä tulisikin varmistaa, että velvoittavia vaatimuksia esitetään vain määräyksissä.

Kuvio 16. Yleinen luvitus- ja säännöstöhierarkia laitoesimerkkien kohdemaissa (USA, Ranska, Venäjä ja Suomi). Esimerkkinä on Suomi.



Kuten Kuvio 16 osoittaa Yhdysvaltain ja Suomen välillä sitovien vaatimusten hierarkisella sijainnilla ei ole eroa. Suomea vastaava Yhdysvaltain hierarkia Atomic Energy Act > Codes of Federal Regulation > Regulatory Guides > Codes and Standards. Sen sijaan vaatimusten sisällä eroja voi olla, kuten edellä on selitetty.

4.4.2 Suunnittelu- ja valmistussäännöt (codes and standards)

Laitteiden ja rakenteiden suunnittelussa ja mitoituksessa käytettävien standardien joukko on suuri. Mitoitukseen olennaisesti vaikuttavat materiaaliominaisuudet hallitaan materiaalistandardien kautta. Valmistukseen, valmistuksen valvontaan ja vaatimustenmukaisuuden toteamiseen sovelletaan vielä omia standardeja.

Standardit laatii tyypillisesti kunkin toimialan yhteisö, kansallisten tai kansainvälisten standardisoimiselinten kautta. Standardinmuodostus on alun perin ollut kansallista ja sen takia standardeja käytetään vieläkin yleisesti myös kauppapolitiikan välineinä. Turvallisuuskriittisiin sovelluksiin on tyypillisesti kehitetty omia standardiperheitä, esimerkiksi yhdysvaltalainen painelaitestandardiperhe ASME Boiler and Pressure Vessel Code sisältää erilliset osat ydinteknisille ja muille painelaitteille.

Suunnittelussa ja mitoituksessa käytettävien standardien avulla määritetään, mikä on suunniteltavan ja valmistettavan yksittäisen laitteen suorituskyky. Sen tulee olla suurempi kuin laitteeseen sille suunnitelluissa käyttötilanteissa aikana kohdistuva rasitus. Kuvassa (Kuvio 17) on havainnollisesti kuvattu tilannetta. Suunnittelussa on otettava huomioon tilannekohtaiset rasitusta lisäävät tekijät, joita on hyvin paljon ja joita eri standardit tarkastelevat eri tavoin. Nämä epävarmuustekijät lisäävät tarvetta korottaa suunniteltavaa laitteeseen kohdistuvia rasituksia. Toisaalta taas käyttö alentaa laitteen kykyä kestää käytöstä johtuvia rasituksia. Standardin soveltaminen oikein johtaa tilanteeseen, jossa turvallisuusmarginaali on riittävä. Tällainen tilanne on silloin, kun on huomioitu rasitusta/suoritusta lisäävät tekijät ja suoritus/rasituskykyä alentavat tekijät ja näiden välillä on riittävä turvallisuusmarginaali.

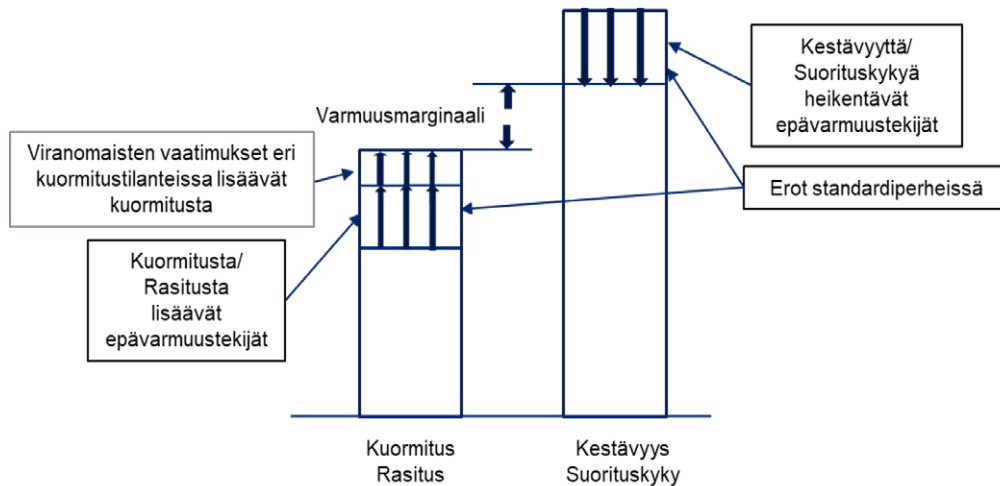
Merkittävimmät erot standardiperheiden välillä tulevat esiin siinä, millä tavoin rasitusta lisäävät epävarmuustekijät on eri standardeissa otettu huomioon. Painelaitestandardeissa näitä ovat laitteen muotoilun epäjatkuvuuskohdat, jotka määräävät jännityskeskittymiä, ja jäännösännitysten poistoon käytettävät erilaiset lämpökäsittelyt. Valittavien kuormitusten suuruus määräytyy luvun 4.4.1 viranomaisvaatimuksista, mikä on otettava huomioon standardiperheissä esitettyjen vaatimusten lisäksi.

Yhdysvalloissa, Iso-Britanniassa ja melko yleisesti EU:n alueella ydinlaitoksissa käytettäville painelaitteille sovelletaan ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III – Rules for Construction of Nuclear Facility Components standardia (ASME, n.d.). Ranskassa sovelletaan heidän omaa standardiaan RCC-M Design and Construction Rules for Mechanical PWR Nuclear Island -normistoa (RCC-M, n.d.).

EU ja ETA -maissa sovelletaan yleisesti painelaitteille PED-painelaitedirektiiviä ja EN-normeja aina kuin se on mahdollista. Painelaitteisiin liittyvä viranomaistoiminta on harmonisoitu. Sama koskee rakennusteknisiä rakenteita.

Kuvio 17. Periaattellinen esitys, miten standardien ja viranomaisvaatimusten soveltaminen vaikuttaa laitteen suunnittelussa ja mitoituksessa ja siten varmistaa luotettavan käytön sovitulla turva/varmuusmarginaalilla. (Muokattu (Laufs, 2013) pohjalta)

Yksittäisen järjestelmän, rakenteen ja laitteen suunnittelu/mitoitusperiaate



Sähkö- ja automaatiolaitteille on laajasti käytössä kansainväliset IEEE ja IEC-standardit. Näissä standardiperheissä on sekä konventionaalisia, ydinteknisiä että muita turvallisuuskriittisiä sovelluksia koskevia standardeja.

Kuten edellä jo todettiin, Euroopassa sovelletaan paljon ASME BPV Section III suunnittelustandardia ja soveltuvin osin myös harmonisoituja ei-ydinenergian normistoja ja standardeja silloin, kun viranomaisvaatimusten perusteella on mahdollista.

Euroopan ja Yhdysvaltain välillä on eroja. Mutta yksittäisten kohteiden mitoituksen perusteella saavutettavassa turvallisuustasossa ei tämän selvityksen puitteissa ole tunnistettu olennaisia eroja. Näin ollen suunnittelijan käyttämiin suunnittelu-, mitoitus-, materiaali- tai valmistusstandardeihin ei ole tarkoituksenmukaista puuttua, vaan tulee tarkistaa niillä saavutettu suorituskyky. Normistojen ja standardien eroja voidaan myös tarkastella täydentävillä selvityksillä, joilla arvioidaan erojen merkityksiä laitteen suorituskykyyn/turvallisuuteen.

Kotimainen viranomaissäännöstö pitäisi muotoilla niin, että niiden noudattaminen mahdollistaisi toimimisen kansainvälisesti laajasti käytettyjen standardien mukaan ilman erikoistoimenpiteitä.

4.5 Tarpeettoman kalliiden erikoisvalmisteiden välttäminen

Mitä menettelyjä muilla turvallisuuskriittisillä aloilla on käytössä laitteiden riittävän suorituskyvyn varmistamiseksi, ja miten näitä voitaisiin hyödyntää pienissä reaktoreissa? Tavoitteena tulisi olla hyödyntää laajasti markkinoilla olevaa laitekantaa ja välttää tarpeettoman kalliit erikoisvalmisteet.

4.5.1 Viranomaistoiminta muilla turvallisuuskriittisillä alueilla

Muilla turvallisuuskriittisillä teollisuuden aloilla kuin ydinteollisuus turvallisuuteen liittyvät yleiset vaatimukset ja vaatimuksenmukaisuuden osoittamisen menettelyt on harmonisoitu EU:n alueella, mutta viranomaistoiminta on kansallista. Suomessa turvallisuuskriittisillä konventionaalisen teollisuuden aloilla, jotka eivät kuulu STUKin alaan, viranomaisena toimii Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (TUKES). Ilmailun alueella viranomaistoimintaa hoitaa Liikenne- ja viestintävirasto (Traficom).

TUKES on lupa- ja valvontaviranomainen, joka valvoo ja edistää mm. tuotteiden, palveluiden ja tuotantojärjestelmiin liittyvää teknistä turvallisuutta ja vaatimustenmukaisuutta sekä toimeenpanee niihin liittyvää lainsäädäntöä. TUKES huolehtii myös arviointilaitosten (testaus- ja tarkastuslaitosten) pätevyyden arviointiin ja akkreditointiin liittyvistä tehtävistä. Tätä tehtävää varten TUKESissa on akkreditointiyksikkö. TUKES toimii usean ministeriön ohjauksessa. TEM vastaa TUKESin yleishallinnollisesta ohjauksesta ja valvonnasta.

TUKESin teollisuusyksikkö valvoo tuotantolaitosten ja laitteistojen turvallisuutta, kaivos-toimintaa, urakointi- ja asennustoimintaa sekä tarkastuspalveluja. Valvontakohteina ovat mm. vaarallisia kemikaaleja valmistavat ja käsittelevät teollisuuslaitokset, neste- ja maakaasukohteet, räjähdetehtaat ja -varastot, painelaitteet ja näitä käyttävät tuotantolaitokset, kaivokset, malminetsintä- ja kullanhuuhdontakohteet.

TUKES valvoo ja ohjeistaa myös vaarallisten kemikaalien valmistus- ja käyttölaitosten sekä niiden varastojen sijoitukseen liittyviä turvallisuuskysymyksiä.

Ilmailun alueella kansallisena valvontaviranomaisena Suomessa toimii Traficom eli Liikenne- ja Viestintävirasto. Kansainvälisen siviili-ilmailujärjestön ICAO:n yleissopimuksen mukaan ilma-aluksen tulee olla tyyppihyväksytty, jotta sille voidaan antaa yleissopimuksen mukainen lentokelpoisuustodistus. Tämä on edellytyksenä sille, että ilma-alus kelpaa kansainväliseen liikenteeseen ja kansainvälisille markkinoille yleissopimuksen mukaisesti.

Ilma-alustyyppille myönnetään tyyppihyväksyntä, kun se täyttää vaadittavat tyyppihyväksyntävaatimukset. Euroopan lentoturvallisuusvirasto (EASA, European Union Aviation Safety Agency) on antanut yhteiset eurooppalaiset tyyppihyväksyntävaatimukset (Certification Specification) eurooppalaisen tyyppihyväksynnän myöntämiseksi. Lentokoneen valmistajan tulee hakea tyyppihyväksyntäsertifikaatti, jonka EASA antaa. Ilma-alus voi olla tyyppihyväksytty myös ulkomaisen, esimerkiksi USA:n FAA tyyppihyväksyntävaatimusten mukaisesti. Jos koneella on tyyppihyväksyntä, kansallinen viranomainen (Suomessa Traficom) ei tarkastele erikseen lentokoneen tekniikkaa, kun se rekisteröi ilma-aluksen käyttöön.

Syksyllä 2017 ja 2018 tehtyjen teknologiayritysten haastattelujen (Rintamaa & Törrönen, 2017) (Rintamaa, et al., 2018) perusteella yhtenä merkittävänä tuloksena oli se, että *laittemitoitusta koskevissa yleisissä ydinalan turvallisuusvaatimuksissa ei ole isoja eroja muiden teollisuudenalojen vaatimuksiin nähden*. Merkittävät erot tulevat esiin vaatimusten hallinnassa ja niiden todentamisessa. Lisäksi ydinalan standardeissa on pidemmät ja tarkemmat vaatimuslistat. Eroja saattaa esiintyä myös yksittäisissä mitoitukseen liittyvissä standardeissa.

4.5.2 Laitekanta ja hyväksymismenettely

EU:ssa ja myös Suomessa suunnitellaan ja valmistetaan korkealuokkaisia komponentteja ja laitteita turvallisuuskriittisten teollisuusalojen tarpeisiin. Näitä laitteita ovat mm. turvallisuus- ja käyttöautomaation eri laitteet ja järjestelmät, lukuisa joukko erilaisia motorisoituja ja normaaleja venttiilejä sekä erilaisia lämmönsiirtimiä ja painesäiliöitä laajalla materiaalivalikoimalla. Näiltä laitteilta edellytetään korkeaa suorituskykyä turvallisen toiminnan näkökulmasta. Siksi näiden laitteiden ja järjestelmien soveltuvuutta ydinvoimalaitokseen tulisi arvioida jo saavutetun suorituskyvyn pohjalta Kuvio 17:ssä esitetyn periaatteen mukaisesti.

Turvallisuuskriittisten alueiden kaikki laitteet, joiden käytöstä voi aiheutua vaaraa ympäristölle tai ihmisille, suunnitellaan ja valmistetaan hyväksytyjen lakien ja viranomaisten säännösten mukaisesti. Ydinteknisten ja turvallisuuskriittisen teollisuuden laitteiden teknisissä turvallisuusvaatimuksissa ei ole merkittäviä eroja. Ainoa eroavaisuus liittyy säteilystä johtuvista erityisvaatimuksista. Sen sijaan toimintatavassa, jolla vaatimustenmukaisuus valmistuksen yhteydessä varmistetaan, on hyvinkin merkittävä ero.

Konventionaalisten laitteiden valmistukseen liittyvän hyväksynnän ja tarkastustoiminnan suorittavat hyväksytyt tarkastuslaitokset tai valmistajan oma tuotanto-organisaatiosta riippumaton tarkastusosasto. Tuotteen valmistaja on vastuussa siitä, että kaikki suunnitteluun

ja valmistukseen liittyvien säännösten vaatimat velvollisuudet on hoidettu ja että hyväksytty tarkastuslaitos on antanut vaadittavat dokumentit hyväksymisestä.

Kun tarkastellaan yksittäisistä laitteista koostuvaa järjestelmäkokonaisuutta eli laajaa laitosta, voidaan laitostason turvallisuusuunnittelun keinoilla (rinnakkaisuus, erilaisuus, erottelu, vikaantuminen turvalliseen suuntaan) taata turvallisuustoiminnon onnistuminen yksittäisen laitteen vikaantumisesta huolimatta.

Esimerkkejä ydinlaitoksen tyypillisistä laitteista, joihin kohdistuu erityisiä turvallisuudesta johtuvia vaatimuksia, kuten

- vaatimus säilyttää rakenteellinen eheys äärimmäisissä kuormitusolanteissakin, kuten: reaktorin painesäiliö
- vaatimus säilyttää riittävä toiminnallisuus kaikissa tarvetilanteissa (normaalikäyttö, häiriöt, onnettomuudet, DECit ml. luonnonmullistukset, vakavat jos kuuluu SAM-laitteisiin, hasardit, turvajärjestelyuhat), kuten: säätösauvojen mekaaniset osat, varoventtiilit, eristysventtiilit toimilaitteineen, jälkilämmönpoistoon ja hätäjäähdytykseen osallistuvat säiliöt, pumput moottoreineen, lämmönvaihtimet, varavoimakoneet, turvallisuustoimintoja ohjaava automaatio.

Laittekannassa voidaan erotella laitteet, joiden toiminta voidaan varmentaa rinnakkais- tai erillisillä laitteilla, ja laitteet, joiden rikkoutuminen ei ole sallittua, koska laitteen tehtävää ei voida varmentaa. Käytännössä ainoa tällainen laite nykyisissä teknologioissa on ydinreaktorin painesäiliö.

Turvallisuuskriittisten teollisuusalojen standardeissa liittyen instrumentointi- ja automaatiojärjestelmiin on laajasti käytössä vaatimuksia, jotka todennetaan SIL-sertifikaattien avulla (SIL = Safety Integrity Level). SIL-sertifikaatti perustuu automaation IEC 61508-kattostandardiin, jonka pohjalta on laadittu omat alakohtaiset standardit eri teollisuuden aloille. SIL-sertifikaatteihin perustuva menettely korreloi vikataajuuksien kanssa ja menettely on harmonisoitu EU:ssa. Mitä korkeampi SIL-taso sitä pienempi on vikataajuus. SIL-sertifikaatti edellyttää kahta erillistä riskipohjaista hyväksymiskriteeriä. Kussakin tasossa, joita on neljä, vikataajuuksien vaatimukset tulee täyttyä.

Ydinalalla valmistuksen valvontamenettelyn ja vaatimustenmukaisuuden toteamisen etenkin tärkeimpien turvallisuusluokiteltujen laitteiden osalta suorittaa STUK, kun taas turvallisuuskriittisillä teollisuuden aloilla valmistuksen valvonnan liittyvät tehtävät toteuttavat hyväksytyt tarkastuslaitokset.

Tämä selvä ero tuli esille syksyllä 2017 ja 2018 tehtyjen teknologiayritysten haastattelujen (Rintamaa & Törrönen, 2017), (Rintamaa, et al., 2018) perusteella. Erityisesti merkittävimmät erot tulivat esiin toimintatavassa, miten vaatimustenmukaisuus todettiin.

Vaatimustenmukaisuuden toteaminen on keskeinen osa suunnittelun ja valmistuksen valvontaprosessia, jonka kehittämisessä on useita kehittämisalueita/kohteita. Näitä ovat vaatimusten selkiyttäminen ja harmonisointi, tulkinnanvaraisuuden vähentäminen, tarkempi ohjeistus vaatimustenmukaisuuden toteamisessa ja teollisuusstandardien hyödyntämisessä tuotantoprosessin eri vaiheissa. Tavoitteita voisi lähestyä TUKESin toimintamallien kautta ja soveltaa toimintatapaa esim. painelaitteiden suunnitteluun, valmistuksen ja vaatimustenmukaisuuden arviointiin, jolloin tuotannossa voidaan vähentää poikkeamia ja parantaa toiminnan ja lopputuotteiden laatua.

Ydinturvallisuusviranomaisen itse tekemä laite- ja rakennetason tarkastustoiminta tulisi keskittää kohteisiin, joihin kohdistuu erityisiä vain ydinvoimalaitosympäristössä esiintyviä kuormituksia. Näitä ovat neutroni- ja ionisoivan säteilyn vaikutukset materiaaleihin, eli kuten aktivoituminen, haurastuminen ja muut säteilyn vaikutukset.

4.5.3 Luvituskäytäntö sarjatuotannossa

Kokonaisen laitoksen sarjatuotanto Yhdysvalloissa on mahdollista USA:n 10CFR52:ssa määritellyn prosessin mukaan sen jälkeen, kun Design Certification -hyväksyntä laitoksen konseptille on virallisesti vahvistettu (10CFR52, 2022). Sertifiointi kattaa laitoksen suunnittelun, mitoituksen, laitteiden valmistusvaatimukset ja käyttöönottosuunnitelman. Esim. NuScalen SMR-konsepti on nyt tällainen laitos. Hyväksyntä on voimassa 15 vuotta. USAn markkinoilla tällaisen sertifioidun laitoksen teknologiaa ei enää tarkastella rakentamis- ja käyttö lupaa haettaessa.

Muilla turvallisuuskriittisillä teollisuuden aloilla esim painelaitedirektiivi (PED) mahdollistaa yksittäisten laitteiden sarjavalmistuksen EU-maissa. Tällöin painelaitteen valmistuksessa on käytetty PED:n laatujärjestelmämoduuleja, jotka mahdollistavat EU-tyyppitarkastuksen. Lisäksi vaatimuksena on, että ilmoitettu laitos on hyväksynyt valmistajan laatujärjestelmän ja valvoo sen noudattamista.

Valmistaja tai valmistajan valtuutettu edustaja laatii painelaitteesta tai laitekokonaisuudesta EU-vaatimustenmukaisuusvakuutuksen. Vakuutus on asiakirja, jossa todetaan, että laite täyttää sovellettavan lainsäädännön olennaiset vaatimukset. Mikäli painelaitteen tai laitekokonaisuuden valmistukseen sovelletaan PED:n lisäksi myös muita yhdenmukaistamissäädöksiä, valmistaja vakuuttaa EU-vaatimustenmukaisuusvakuutuksessa myös näiden

osalta vaatimusten täyttymisen. Tarvittaessa vakuutukset liitetään painelaitteen tai laitekoneisuuden EU-vaatimustenmukaisuusvakuutukseen.

Yhdysvalloissa ASMen akkreditoimat ja sertifioimat laitokset suorittavat kaikki tarvittavat valmistuksen valvonta- ja tarkastustehtävät sarjavalmistettavien laitosten laitteille.

Ilmailun alueella sarjavalmistusta varten ilma-alustyyppille myönnetään tyyppihyväksyntä, kun se täyttää vaadittavat tyyppihyväksynnän vaatimukset. Tyyppihyväksynnän myöntää Euroopan unionin lentoturvallisuusvirasto (EASA), kuten luvussa 4.5.1 on jo kerrottu.

Ydinalan erityiset vaatimukset ovat johtaneet merkittäviin käytännön eroihin laitteiden suunnittelu-, tuotanto- ja toimitusprosesseissa niissä yrityksissä, joissa ei ole omaa tuotantolinjaa ainoastaan ydinenergian tuotteille. Koska useimmissa kotimaisissa yrityksissä ydinalan liiketoiminnan osuus on marginaalinen, on käytössä yhteinen tuotantolinja ydin ja ei-ydinalan tuotteille. Merkittävimmät erot syntyvät siitä, että valmistuksen aikaista STU-Kin viranomaisvalvontaa ja viranomaisen suorittamaa tarkastustoimintaa ei voida riittävästi ja ennakoivasti aikatauluttaa tuotannonohjaukseen. Tämä näkyy huomattavina viivästyksinä tuotannossa ja lopulta korkeampina hintoina/ kustannuksina ja pidempinä toimitusaikoina. Tarve on siirtää vastuuta valmistuksen valvonnasta enemmän hyväksytyille tarkastuslaitoksille ja valmistavalle yritykselle. Erityisesti tämä tarve korostuu laitteiden sarjatuotannossa.

4.6 Passiivisten turvallisuustoimintojen suorituskyky

Minkälaisia mahdollisuuksia on toteuttaa passiivisia turvallisuustoimintoja? Mikä on konvektiivisen painovoimaisen lämmönsiirron suorituskyky, luotettavuus ja rajoitukset reaktorisovelluksissa? Millaisia ”turvallisia tiloja” on tarkoituksenmukaista määritellä häiriöiden/onnettomuuksien lopputiloiksi?

Passiivisen turvallisuusjärjestelmän käsite otettiin laajemmin käyttöön 1990-luvun alussa, kun laitostoimittajat alkoivat kehittää vähäisellä ulkoisella käyttövoimalla toimivia turvallisuusjärjestelmiä. IAEA:n julkaisussa (IAEA, 1993) määritellään neljä passiivisuuden astetta lämmönsiirtoon liittyville järjestelmille ja prosesseille:

- A. täysin passiivinen: johtuminen ja säteily – vain lämpöenergiaa siirtyy
- B. melkein passiivinen: lämpö siirtyy liikkuvan väliaineen mukana, mutta järjestelmään ei kuulu liikkuvia osia, kuten venttiileitä. Ainoa ulkoinen voima, joka järjestelmässä saa vaikuttaa, on painovoima. Avoimet luonnonkiertojärjestelmät ja vapaa konvektio seinäpinnoilla kuuluvat tähän luokkaan.

- C. puolipassiivinen: lämpö siirtyy liikkuvan väliaineen mukana, mutta järjestelmään voi kuulua liikkuvia osia kuten venttiileitä, jos osien liike johtuu prosessista itseltään, ilman ulkoista ohjausta tai käyttövoimaa. Takaiskuventtiilit, murtokalvot ja jousikuormitetut varoventtiilit sekä varastoidun kaasun paineella toimivat paineakut kuuluvat tähän joukkoon
- D. aktiivisesti käynnistettävät passiivisesti ylläpidettävät toiminnot: lämpö siirtyy liikkuvan väliaineen mukana, mutta toiminnon käynnistää toimilaitte, joka ohjaa venttiilejä tms.. Toimilaitteen ja sitä ohjaavan logiikan voimanlähtenä tulee olla varastoitu energia, kuten akut tai paineistettu kaasu.

Reaktorin kokoluokka vaikuttaa saavutettavissa olevaan passiivisuuden asteeseen. Mitä isompi reaktori, sitä aktiivisemmaksi turvallisuusjärjestelmät on lähtökohtaisesti suunniteltava.

Täysin passiivista, A-luokan lämmönsiirtoa voidaan käyttää jälkilämmön poistoon reaktorin lämpötehon ollessa yksittäisiä megawatteja, mahdollisesti muutama kymmenen. Tässä selvityksessä tarkasteltavat kevytvesireaktorit ovat teholtaan pääsääntöisesti niin suuria, että sydänalueen keskiosa sulaisi käsiin, mikäli jälkitechoa yritettäisiin poistaa pelkästään säteilyn ja johtumisen avulla.

Toiseksi parasta, B-luokan passiivisuutta, voidaan toteuttaa rajoitetuissa sovelluksissa kaiken kokoisissa reaktoreissa. Luonnonkierrolla toimivat jäähdytyspiirit, joiden perustilana on avoin piiri, eli joissa toiminnon käynnistymiseen ei tarvita venttiilioperaatioita, kuuluvat tähän kategoriaan. Avoimia piirejä käytetään suojarakennuksen passiivisissa jäähdytysjärjestelmissä, koska normaalikäytön aikana niissä ei ole lämmönsiirtoa ajavaa voimaa. Lämmönsiirto vesialtaasen sijoitetusta teräksisestä suojarakennuksesta altaan veteen on myös B-luokan passiivinen toiminto – vesi liikkuu, mutta mekaaniset osat eivät.

Luokan C passiivisia komponentteja, lähinnä takaiskuventtiilejä, saatetaan käyttää SMR:issä suojarakennuksen eristysventtiilitoiminnossa, mutta ei jälkilämmön poistoon liittyvissä passiivisissa järjestelmissä.

Luokan D aktiivisesti käynnistettäviä turvatoimintoja on varsinkin yhdysvaltalaisissa passiivisissa reaktoreissa paljon. Nuscalen tapauksessa sekä jälkilämmön poisto luonnonkierrolla että hätäjäähdytyskierto reaktorista suojarakennukseen ja suojarakennuksesta takaisin reaktoriin käynnistyvät automaation ohjaamalla venttiilitoiminnoilla. BWRX-300 laitoksen eristyslauhdutintoiminto on luonnonkiertopiiri, jonka automaation ohjaama käyttöventtiili avaa. BWRX-300:n erikoisuus on hätäjäähdytystoiminnon tekeminen tarpeettomaksi varustamalla reaktoriin liittyvät putkilinjat sulkuventtiileillä, jotka keskeyttävät

jäähdyteinventaarin menetyksen, mikäli putki katkeaa. Sulkuventtiilien tarkka toimintatapa ei ole julkinen, mutta vaikuttaa perustuvan varastoituun energiaan.

Suljetun piirin luonnonkiertoon perustuva jälkilämmönpoisto voidaan rakentaa niin tehokkaaksi kuin halutaan, mitoittamalla tarvittavat lämmönvaihtimet ja putkistot vastamaan siirrettävää tehoa ja haluttua lämpötilaeroa lämmönsiirtimien yli. Lämmönsiirtimen, tai yleisesti seinäpinnan, läpi siirtyvä lämpöteho Q riippuu lämmönsiirtoon osallistuvasta pinta-alasta A , lämmönsiirtokerroimesta h , sekä lämpötilaerosta kuumalta kylmälle puolelle ΔT :

$$Q \sim hA\Delta T_{local} \quad (1)$$

Luokan B lämmönsiirtoa seinien läpi rajoittaa vapaan konvektion kyky siirtää lämpöä seinän yli sallitulla lämpötilaerolla. Seinän pinta-ala määräytyy useimmiten rakenteen mekaanisesta mitoitusvaatimuksesta; reaktoripainesäiliön seinämän tai suojarakennuksen seinän mitat määräytyvät rakenteiden koon optimoinnista mitoittavia painekuormia vastaan, ja maksimilämmönsiirtokyky seuraa tämän jälkeen sallittavasta lämpötilaerosta rakenteen yli sekä sisä- ja ulkopuolisten konvektio- tai faasinmuutosilmiöiden tehokkuudesta. Suuntaa-antavana yläraja-arvona seinälämmönsiirrolle veteen voidaan käyttää allaskiehunnan kriittistä lämpövuota, joka ilmakehän paineessa on noin 1 MW/m^2 .

Reaktorin koko vaikuttaa sen jäähdytettävyyteen siten, että seinälämmönsiirtoon perustuvat lämmönsiirtomekanismit käyvät riittämättömiksi kun reaktorin teho kasvaa. Tämä johtuu siitä, että kevytvesireaktoreissa polttoaineen tehotehoisuus on jokseenkin vakio, reaktorin koosta riippumatta; kun reaktorin kokoa L kasvatetaan, kasvaa reaktorin tilavuus ja siis myös teho mittojen kuutiossa L^3 , mutta lämmönsiirtopinta-ala kasvaa vain mittojen neliössä L^2 . Teho siis kasvaa nopeammin kuin lämmönsiirtokyky. Pieni reaktori on seinän läpi riittävästi jäähdytettävissä, isompi ei. Tarkka raja riippuu myös lämpönielusta ja lämmönlähteen puolella sallitusta suurimmasta lämpötilasta.

Tarkempia arvioita eri mekanismeista rajoittaville lämpötehoille olisi mahdollista laskea, mutta laskelmien edellyttämät mallinnukset eivät mahtuneet selvityksen puitteisiin.

Passiivisten lämmönsiirtojärjestelmät ovat itsesäätyviä, toisin kuin aktiiviset järjestelmät. Yhtälöstä (1) nähdään, että jos siirrettävä lämpöteho on annettu, ja jokin mekanismi rajoittaa lämmönsiirtokerrointa h tai pinta-alaa A , kasvaa lämpötilaero uuteen arvoon, jolla yhtälö toteutuu. Tämä on vaarallista vasta jos lämpötilaeron kasvu johtaa jonkin muun suoritusarvon (kuten suojarakennuksen paineen) hyväksymisrajan ylitykseen.

Yksifaasisessa suljetussa luonnonkiertopiirissä turbulentilla virtauksella siirtyvä lämpöteho Q on verrannollinen piiriin kitkavastuksia kuvaavaan termiin F ja kuuman ja kylmän puolen lämpötilaeroon ΔT :

$$\left(\frac{Q \sim \Delta T^3}{F}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Yhtälöstä (2) nähdään, että lämpöteho riippuu kitkatermin neliöjuuresta, eli kitkaan liittyvä epävarmuus näkyy pienenä epävarmuutena lämpötehossa. *Luonnonkierto ei ole siis ole herkkää pienille epävarmuuksille*, vaikka näin usein väitetään.

Passiivisten järjestelmien toiminnallinen luotettavuus on pitkälti kiinni niihin liittyvien ohjattavien osien luotettavuudesta (venttiilit, toimilaitteet, niiden käyttövoima ja automaatio). Painovoima vaikuttaa varmasti aina. Mutta luonnonkierron käynnistymiseen saattaa liittyä huomattavakin hitaus, mikäli järjestelmän alkutila on yksifaasinen ja tasalämpöinen. Toisaalta taas BWR:n eristyslauhduuttimessa, jossa ajava voima muodostuu höyryn ja veden (isosta) tiheuserosta, ja korkeuserokin saattaa olla huomattava, käynnistystransietissa siirtyvä lämpötehopiikki saattaa ylittää tasapainotilan lämmönsiirtokyvyn huomattavastikin. Tämä on arvioitavissa tarkemminkin, mutta arvioita varten on valittava esimerkkijärjestelmä.

Passiivisten jälkilämmönpoistojärjestelmien lämpönieluna toimii lähes poikkeuksetta vesiallas, jonka inventaaria keitetään kuiviin suunnilleen ilmakehän paineessa. Veden keittäminen on hyvin tehokas tapa sitoa lämpöä, koska ilmakehän paineessa veden höyrystymislämpö on verrattain korkea, noin 2200 kJ/kg. Näin ollen 1 MW lämpötehon sitomiseen riittää keittää reilu 0,45 kg/s vettä. Mikäli sama teho halutaan siirtää yksifaasisella jäädytyksellä, tyypillisellä 30 °C lämpötilaerolla, sitoutuu jäähdytysveteen vain noin 130 kJ/kg. Lämpötehon 1 MW siirtämiseen tarvitaan siis noin 8 kg/s massavirta. Lämpöteholtaan 1000 MW reaktorin jälkilämmönpoisto 1 tunti reaktorin pysäyttämisen jälkeen vaatii noin 15 MW kapasiteettia, eli noin 6,8 kg/s veden keittoa mutta 120 kg/s jatkuvaa massavirtaa. Keitettävä veden määrä on järjestettävissä vaikka ämpäriketjulla; 120 kg/s massavirta edellyttää suuruusluokaltaan 50–100 kW pumppauskapasiteettia, eli varavoimaa jota on tuotettava jatkuvasti. Yksifaasinen jäähdytys vaatii siis mittavaa ylläpitokapasiteettia.

Lämmönsiirto reaktorista kiehuvaan altaaseen edellyttää, että reaktorissa lämpötilan on oltava altaan kiehumislämpötilaa selvästi suurempi. Tarkka arvo riippuu lämmönsiirtopiirin mitoituksista, mutta tyypillinen lämpötilaero voisi olla luokkaa 20–30 °C. Tämä taas vastaa 2–3 bar(a) kylläistä painetta reaktorissa. Veden keittämiseen perustuva jälkilämmönpoisto ei siis pysty jäädyttämään reaktoria paineettomaksi.

Häiriöiden ja onnettomuuksien jälkeen reaktori on saatettava turvalliseen tilaan. Tämän hetken säännöstö määrittelee, että turvallisessa tilassa reaktori on alikriittinen ja paineeton, eli sen jäähdytteen lämpötilan on oltava alle 100 °C. Määritelmä on tarkoituksenmukainen vuotojen kaltaisten häiriöiden lopputilan rajoittamiseksi, paineeton reaktori ei enää vuoda, ja reaktoripiiri on periaatteessa mahdollista avata. Mutta kuten edellä todettiin, tämä tila on työläs ylläpitää.

Ylläpidettävyyden kannalta helpoin reaktorin tila on alikriittinen haalea tila, jossa reaktori on tarpeeksi lämmin voidakseen ylläpitää keittämiseen perustuvaa jälkilämmönpoistoa. Tällöin reaktoria ei voi avata, mutta tilan ylläpitämiseen tarvitaan hyvin vähän toimenpiteitä ja nekin harvoin: lämpönieluna toimiva allas on täytettävä aika ajoin. Allas voidaan myös mitoittaa niin suureksi, että sen kuivaksi keittämiseen kuluvana aikana jälkilämpö laskee niin vähäiseksi, että konvektio ilmaan riittää jälkilämmön poistoon; Nuscalessa on suunniteltu näin.

Nykyistä säännöstöä tulisi päivittää niin, että edellä kuvattu haalea seisokki hyväksyttäisiin myös turvalliseksi tilaksi. Tämä edesauttaisi passiivisen teknologian käyttöönottoa.

Suosituksia liittyen Teknologiakysymyksiin

Teknologiaan liittyen:

Ydinenergiaan liittyviä lupamenettelyjä suunniteltaessa on huomioitava sekä energian tarve että energiahuollon päätöksentekoa koskevat moninaiset rajoitteet. Lainsäädännön tulisi mahdollistaa monipuolinen toimijajoukko ja monipuoliset teknologian sovellukset.

Lupaprosesseihin sisältyviä turvallisuuden arviointeja tulisi olla mahdollista tehdä ennakkoon ainakin laitosteknologioiden ja laitospaikkojen hyväksyttävyyden osalta. Tällaiset mahdollisuudet pienentäisivät ydinlaitoshankkeiden projektiriskiä olennaisesti, reaktorin koosta riippumatta, ja toimijoille syntyisi ennakkoon varmuus, että samalla suunnittelulla voidaan toteuttaa useita eri hankkeita eri omistajille eri paikoissa Suomessa. Lainsäädännön tulisi osoittaa STUKille sekä mahdollisuus että velvollisuus antaa erillishyväksyntä joko koko laitospaikkakonseptista tai hakijan siitä rajaa- masta pienemmästä (mutta silti selvärajaisesta) asiakokonaisuudesta, samoin kuin laitospaikan niistä olosuhteista joilla olisi merkitystä ydinturvallisuuden kannalta.

Vastuu teknologian hyväksyttävyydestä tulisi osoittaa laitoksen suunnittelijalle.

Hankekohtaisten valtioneuvoston periaatepäätösten tilalle tai rinnalle tulisi harvinaisempaa ydinvoiman osuutta suomalaisessa energiajärjestelmässä linjaava strateginen periaatepäätös.

Periaatepäätöksissä on tarkoituksenmukaista ottaa kantaa käsiteltävien hankkeiden enimmäislämpötehoon, riippumatta siitä tuotetaan lopputuotteena sähkö, lämpöä, vai molempia. Sen sijaan reaktorien lukumäärään ei periaatepäätöksessä ole tarpeen ottaa kantaa. Periaatepäätöksessä voidaan rajoittaa teknologia-, paikka-, toimija- tai muuta valintaa asettamalla edellytyksiä rakentamisluvan myöntämiselle.

Rakentamis- ja käyttöluvissa voidaan rajata esimerkiksi rakennettavien laitosten lukumäärä yksi (usean modulin tai yksikön) voimalaitoskokonaisuus kerrallaan.

Rajapinta velvoittavien määräysten ja ohjeistavien ohjeiden välillä pitäisi määrittää nykyistä tarkemmin, jotta ohjeista ei muodostu määrääviä.

Alkuperämaassaan jo hyväksytyt laitoksen suunnittelijan käyttämiin suunnittelu-, mitoitus-, materiaali- tai valmistusstandardeihin ei ole tarkoituksenmukaista puuttua, vaan tulee tarkistaa suunnittelijan käyttämällä standardeilla saavutettu suorituskyky.

Kotimainen viranomaissäännöstö pitäisi muotoilla niin, että niiden noudattaminen mahdollistaisi toimimisen kansainvälisesti laajasti käytettyjen standardien mukaan, ilman Suomi-spesifisiä erikoistoimenpiteitä.

Laitetason vaatimustenmukaisuuden toteamista voisi lähestyä TUKESin toimintamallien kautta ja kohdistaa toiminta valmistajan suunnittelu- ja tuotantoprosessin sekä tarkastusta suorittavien tarkastuslaitosten valvontaan. Samalla voidaan enemmän hyödyntää Graded Approach -periaatetta kohdistamalla toimintaa korkean riskin osiin tuotannossa.

Reaktoreiden laitostason kertaluontoiselle hyväksymiskäsittelylle on Suomessa tarvetta, jotta toimijoille syntyy ennakkoon varmuus, että samalla suunnittelulla voidaan toteuttaa useita eri hankkeita eri omistajille eri paikoissa Suomessa.

Passiivisten turvallisuusratkaisujen suorituskykyä tulisi tutkia tarkemmin, jotta niiden suorituskyvyn rajoista ja mahdollisista häirömekanismeista saataisiin nykyistä selvempi käsitys.

Turvallisen tilan määritelmää tulisi tarkentaa niin, että paineettoman reaktoripiirin (ns. kylmä seisokki) myös ilmakehän paineessa tapahtuvaan veden keittämiseen perustuva ns. haalea seisokki hyväksyttäisiin turvalliseksi tilaksi. Kylmän seisokin ylläpitäminen vaatii jatkuvasti toimivia isoja ja monimutkaisia prosessijärjestelmiä, varavoimaa ja ohjausta, haalean seisokin ylläpitäminen taas lämpönieluna toimivan vesialtaan täyttämistä harvakseltaan.

5 Johtopäätökset ja suositukset

Teemakuvausten mukaisesti ”SMR-laitokset perustuvat modulaarisuuteen, sarjatuotannon hyödyntämiseen ja laitosten täydentämiseen moduulien kautta. SMR-laitoksia rakennetaan eri tavoin kuin nykyisin käytössä olevia ydinlaitoksia, koska ne voidaan rakentaa myös vaiheittain ja käyttäen jo hyväksyttyä teknologiaa (”pakettitalomalli”). Näin SMR-laitosten suunnittelu ja rakentaminen voivat erota merkittävästi nykymalleista. SMR-laitosten käyttötapaa voi myös poiketa nykyisten isojen laitosten käytöstä suurestikin; käyttöön voi liittyä syklisyyttä, joka tukisi uusiutuvan ja hajautetun tuotannon kokonaisuutta, käyttö voi myös teoriassa perustua etäohjaukseen tai useita laitoksia voitaisiin käyttää samojen käyttö- ja huoltohenkilösten kautta. Myös laitosten omistajana ja käyttäjänä saattaisivat olla eri tahot. Säädösten arvioinnissa tulisi siis arvioida myös mahdolliset erilaiset liiketoimintamallit. Kokonaisuudessaan tavoitteena olisi oltava tarkoituksenmukaiset lupaprosessit, joissa ydinturvallisuuden, säteilyturvallisuuden ja turvajärjestelyjen valvonta toteutuisi riittävästi.” Lisäksi on huolehdittava ydinmateriaalivalvonnan tarpeista.

Lukujen 1–4 perusteella voidaan todeta, että nykyisen ydinenergiain lupaprosessi tarvitsee ajanmukaistamista. Tarkastelut osoittavat, että pieniä modulaarisia reaktoreita varten ei ole tarpeen laatia erillistä prosessia tai uusia sääntöjä; sen sijaan olemassaolevia prosesseja olisi täydennettävä ja käytäntöjä päivitettävä, alla esitettyjen suositusten mukaisesti. ”Pienouden” tai ”modulaarisuuden” innoittamat ehdotukset prosessien parantamiseksi ja käytäntöjen päivittämiseksi ovat sinänsä käyttökelpoisia kaiken kokoisille reaktoreille, myös ”isoille” tai ”perinteisille”.

Modulaarisuus merkitsee sarjatuotantoa. Sarjatuotanto on mahdollista ja tehokasta vain, jos siihen liittyvä suunnittelu on hyväksytty etukäteen, eli kesken projektin ei tehdä uudeleen suunnittelua, ja toteutuksen valvonta noudattaa kaikkien osapuolien tuntemia ja hyväksi havaittuja menetelmiä (standardeja). Modulaarisuuden ja sarjatuotannon tarpeet näkyvät ydinenergiain tasolla lähinnä siinä, että kirjoitushetkellä voimassa oleva laki ei sisällä mahdollisuutta saada säteilyturvakeskukselta sitovaa hyväksyntää suunnitteilla olevan laitoksen teknisiin ratkaisuihin tai sijoituspaikkaan. Lainsäädäntö ei yksilöi, eikä sen pidäkään yksilöidä, mitä yksityiskohtaisia teknologisia standardeja hankkeissa olisi noudatettava – riittävän turvallisuuden ja toteutuskelpoisuuden tarkka määrittely kuuluu teknikan alalle itselleen ja sitä valvovalle asiantuntijaviranomaiselle.

Suosituksia sijoituspaikkaan liittyen:

Ydinvoimalaitoksen paikka voi olla asutuksen lähelläkin. Suojaetäisyys tulisi määrittää ydinlaitoksen ominaisuuksien perusteella. Keskeisiä mitoittavia tekijöitä ovat tällöin aktiivisuusinventari (ydinreaktorin tapauksessa lähtökohtana reaktorin lämpöteho) ja laitoksen turvallisuussuunnittelussa osoitettu suorituskyky radioaktiivisten aineiden leviämisen estämiseksi.

Sijoituspaikan hyväksyttävyyys ydinturvallisuuden kannalta tulisi voida haluttaessa tarkastella ja päättää erikseen, riippumatta laitoshankkeista. Tämä käsittely kattaisi mm. suojaetäisyydeltä tarkasteluja ja laitospaikasta johtuvien ydinturvallisuuteen kohdistuvien ulkoisten uhkien ennakkohyväksynnän. Laitospaikan ennakkohyväksyntä luonnollisesti sisältäisi laistoteknologian mitoitusta rajoittavia ehtoja: teknologian tulee kestää paikalla esiintyvät uhat riittävällä varmuudella.

Kokonaan maan alle sijoittamiseen on syytä varautua, vaikka se todennäköisimmin tuleekin kyseeseen vain kotimaisten vaihtoehtojen osalta.

Ydinenergialain lisäksi ydinvastuulakia olisi päivitettävä. Ydinvastuita määrittelevää Pariisin yleissopimusta täydentävän 2004 pöytäkirjan mukaisesti ydinvahingon vastuumäärässä voidaan ottaa huomioon reaktorin koko ja ominaisuudet (artikla 7 b i)).

Suosituksia kaavaan liittyen:

Maankäyttö- ja rakennuslain mukainen kunnan kaavoitusmonopoli takaa kunnalle päätösvalan laitoshankkeen sijoittamisesta alueelleen. Näin ollen ei ole välttämätöntä edellyttää kunnalta erikseen kannanottoa laitoshankekohtaisen periaatepäätöksen yhteydessä.

Energiahuoltovarmuuden näkökulmasta on olennaista kehittää maankäytön suunnittelussa tehtäviä ratkaisuja ja vaikutusten arviointia kansalliseen turvallisuuteen liittyvät näkökohdat huomioon ottavaksi.

Suosituksia YVA- ja SOVA-prosesseihin liittyen:

YEL:n mukainen valtioneuvoston periaatepäätös on osa ydinlaitoksen lupaprosessia, josta seuraa myös velvollisuus toteuttaa YVA-menettely hankesuunnittelun kannalta hyvin varhaisessa vaiheessa.

Valtioneuvoston periaatepäätöksen sisältöä olisi mahdollista muuttaa strategisempaan suuntaan ja näin ollen luopua VNpp:n roolista osana yksittäisen hankkeen lupaprosessia. Tämä mahdollistaisi YVA-menettelyn sijoittamisen lähemmäs rakentamislupakäsittelyä.

Suosituksia ydinainekysymyksiin liittyen:

Ydinalan ja säteilyalan jätehuotoyhteistyö on 2010-luvulla parantunut huomattavasti TEMin työryhmien ansiosta. Ydinalan jätehuollon yhteistyötä on syytä kehittää edelleen kansallisen ydinjätehuolto-ohjelman edistämiseksi, koska turvallinen ja toimiva jätehuolto on yhteisen menestymisen edellytys.

Vastuu ydinmateriaalivalvonnan toteuttamisesta tulee säilyä laitoksen omistajalla. Omistajan on kuitenkin voitava järjestää laitoksen käyttö, polttoainehankinta ja jätehuolto alihankintoina pätevilta palveluntarjoajilta.

Suosituksia teknologiaan liittyen:

Ydinenergiaan liittyviä lupamenettelyjä suunniteltaessa on huomioitava sekä energian tarve että energiahuollon päätöksentekoa koskevat moninaiset tavoitteet ja rajoitteet. Lainsäädännön tulisi mahdollistaa erilaiset liiketoimintamallit ja monipuoliset teknologian sovellukset.

Lupaprosesseihin sisältyviä turvallisuuden arviointeja tulisi olla mahdollista tehdä ennakkoon ainakin ydinlaitosten teknologioiden ja laitospaikkojen hyväksyttävyyden osalta. Tällaiset mahdollisuudet pienentäisivät ydinlaitoshankkeiden projektiriskiä olennaisesti, reaktorin koosta riippumatta, ja toimijoille syntyisi ennakkoon varmuus, että samalla suunnittelulla voidaan toteuttaa useita eri hankkeita eri omistajille eri paikoissa Suomessa. Lainsäädännön tulisi osoittaa STUKille sekä mahdollisuus että velvollisuus antaa erillishyväksyntä joko koko laitospäätöksistä tai hakijan siitä rajaamasta pienemmästä (mutta silti selvärajaisesta) asiakokonaisuudesta, samoin kuin laitospaikan niistä olosuhteista, joilla olisi merkitystä ydinturvallisuuden kannalta.

Vastuu teknologian hyväksyttävyydestä tulisi osoittaa laitoksen suunnittelijalle.

Hankekohtaisten valtioneuvoston periaatepäätösten tilalle tai rinnalle tulisi harkita ydinvoiman osuutta suomalaisessa energijärjestelmässä linjaava strateginen periaatepäätös.

Periaatepäätöksissä on tarkoituksenmukaista ottaa kantaa käsiteltävien hankkeiden enimmäislämpötehoon, riippumatta siitä tuotetaanko lopputuotteena sähkö, lämpöä, vai molempia. Sen sijaan reaktorien lukumäärään ei periaatepäätöksessä ole tarpeen ottaa kantaa. Periaatepäätöksessä voidaan asettaa edellytyksiä rakentamisluvan myöntämiselle ja siten rajoittaa teknologia-, paikka-, toimija- tai muuta valintaa.

Rakentamis- ja käyttöluvissa voidaan rajata esimerkiksi rakennettavien tai käytettävien laitosyksiköiden lukumäärä voimalaitoskokonaisuus kerrallaan, vaikka laitoksessa olisikin useasta modulistai yksiköstä koostuva laitos.

Rajapinta velvoittavien määräysten ja ohjeistavien ohjeiden välillä pitäisi määrittää nykyistä tarkemmin, jotta ohjeista ei muodostu määrääviä.

Alkuperämaassaan jo hyväksytyn laitoksen suunnittelijan käyttämiin suunnittelu-, mitoitus-, materiaali- tai valmistusstandardeihin ei ole tarkoituksenmukaista puuttua, vaan tarvittaessa tulee tarkistaa suunnittelijan käyttämällä standardeilla saavutettu suorituskky.

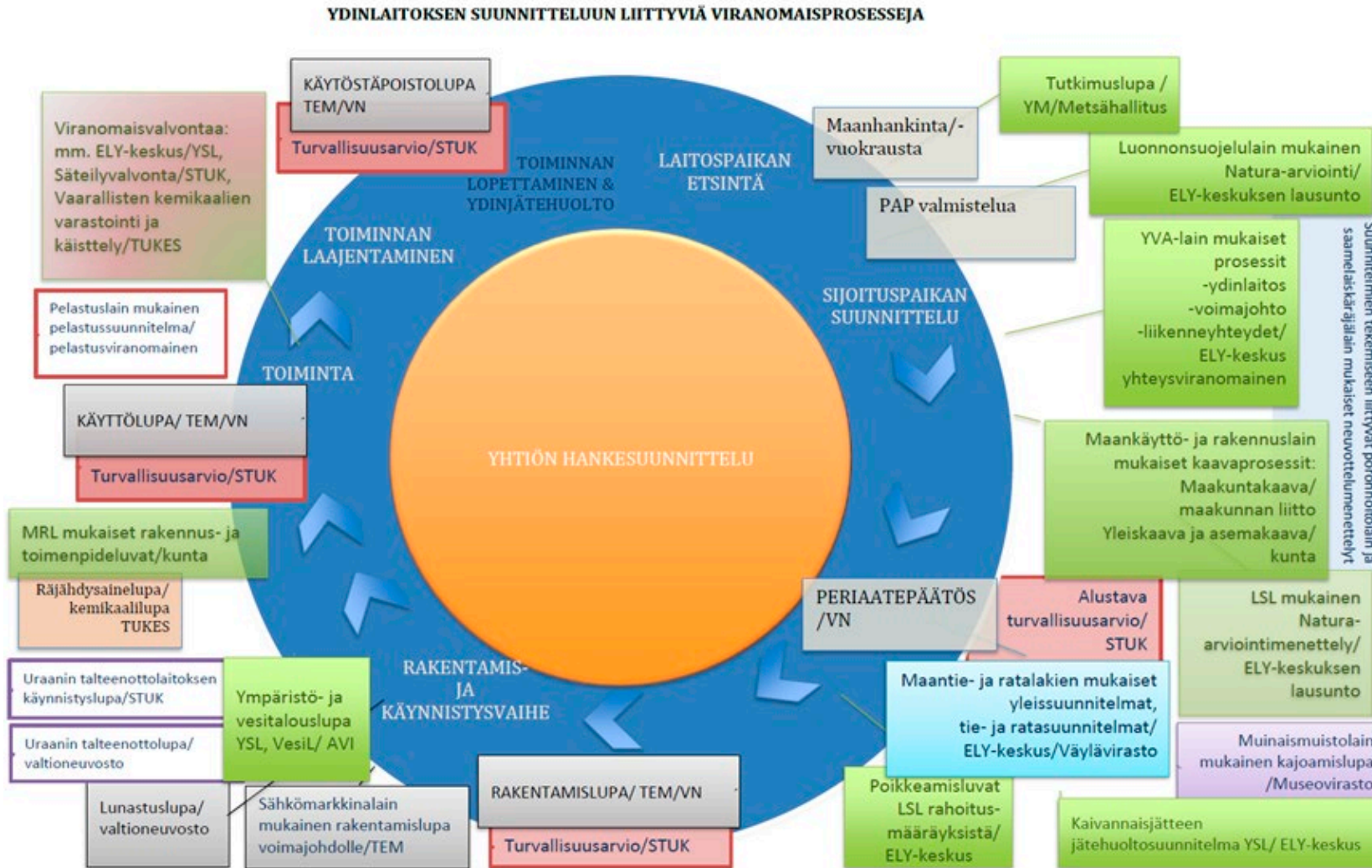
Kotimainen viranomaissäännöstö pitäisi muotoilla niin, että sen noudattaminen mahdollistaisi laitevalmistuksen ja rakentamisen kansainvälisesti laajasti käytettyjen standardien mukaan.

Laitetason vaatimustenmukaisuuden toteamista voisi lähestyä TUKESin toimintamallien kautta ja kohdistaa toiminta valmistajan suunnittelu- ja tuotantoprosessin sekä tarkastusta suorittavien tarkastuslaitosten valvontaan. Samalla voidaan tehokkaammin hyödyntää Graded Approach -periaatetta kohdistamalla toimintaa korkean riskin osiin tuotannossa.

Passiivisten (rakenteellisten) turvallisuuspiirteiden merkitys kokonaisturvallisuutta arvioitaessa tulisi tunnistaa. Passiivisten turvallisuusratkaisujen suorituskkyä tulisi tutkia tarkemmin, jotta niiden suorituskvyn rajoista ja mahdollisista häiriömekanismeista saataisiin nykyistä selvempi käsitys.

Turvallisen tilan määritelmää tulisi tarkentaa niin, että paineettoman reaktoripiirin (ns. kylmä seisokki) lisäksi myös ilmakehän paineessa tapahtuvaan veden keittämiseen perustuva ns. haalea seisokki hyväksyttäisiin turvalliseksi tilaksi. Veden keittäminen on tyypillinen lopullinen lämpönielu useissa SMR-konsepteissa. Kylmän seisokin ylläpitäminen vaatii jatkuvasti toimivia isoja ja monimutkaisia prosessijärjestelmiä, varavoimaa ja ohjausta, haalean seisokin ylläpitäminen taas lämpönieluna toimivan vesialtaan täyttämistä harvakseltaan.

Liite 1. Ydinlaitoksen suunnitteluun liittyviä viranomaisprosesseja (S. Wähä)



Lähteet

- 10CFR50, 2022. *PART 50—DOMESTIC LICENSING OF PRODUCTION AND UTILIZATION FACILITIES*. [Online]
Available at: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part050/full-text.html>
- 10CFR52, 2022. *PART 52—LICENSES, CERTIFICATIONS, AND APPROVALS FOR NUCLEAR POWER PLANTS*. [Online]
Available at: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part052/index.html>
- Anon., 2019. *Marinin hallitusohjelma*. s.l.:Valtioneuvoston julkaisuja 2019:31, Helsinki 2019, ISBN PDF 978-952-287-808-3.
- Anon., 2021. *Eurooppalainen ilmastolaki*. s.l.:s.n.
- ASME, n.d. *Boiler and Pressure Vessel Code Section III - Rules for Construction of Nuclear Facility Components*, s.l.: American Society of Mechanical Engineers.
- Energiatoteollisuus ry, 2020. *Kaukolämpötilasto 2019*, s.l.: ISSN 0786-4809.
- GE Hitachi, 2020. *BWRX-300 Reactivity Control*, Available at www.nrc.gov: GE Hitachi, Licensing Topical Report NEDO 33912.
- IAEA, 1993. *Safety related terms for advanced nuclear power plants*, TECDOC-626, s.l.: IAEA.
- IAEA, 2020. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)*, s.l.: IAEA.
- INSAG, 2003. *Maintaining the design integrity of nuclear installations throughout their operating life*, INSAG-19, Vienna: IAEA International Nuclear Safety Advisory Group.
- INSAG, 2017. *Ensuring Robust National Nuclear Safety Systems — Institutional Strength in Depth*, INSAG-27, Vienna: IAEA, INTERNATIONAL NUCLEAR SAFETY GROUP.
- JRC, 2021. *Technical assessment of nuclear energy with respect to the 'do no significant harm' criteria of Regulation (EU) 2020/852 ('Taxonomy Regulation')*, JRC Science for Policy Report, s.l.: European Commission.
- Jääskeläinen, L., Syrjänen, O., Hurmeranta, J. & Wähä, S., 2018. *Maankäyttö- ja rakennuslaki*, Helsinki: Rakennustieto Oy.
- Kärnfull Next, 2022. [Online]
Available at: <https://www.knxt.se>
- Laitinen, K. & Huhtinen, A.-M., 2021. *Kansallinen turvallisuus murroksessa*. Latvia: Docendo Oy.

- Laufs, P., 2013. *Reaktorsicherheit für Leistungskernkraftwerke. Die Entwicklung im politischen und technischen Umfeld der Bundesrepublik Deutschland*, 1115 sivua., s.l.: Sonderedition Springer Vieweg.
- Pasquill, F., 1961. The Estimation of the Dispersion of Windborne Material. *The Meteorological Magazine*, pp. Vol. 90, No. 1,063.
- Pölonen, I., 2007. *Ympäristövaikutusten arviointimenettely. Tutkimus YVA-menettelyn oikeudellisesta asemasta ja kehittämistarpeista ympäristöllisen vaikuttavuuden näkökulmasta*. Jyväskylä: Suomalaisen lakimiesyhdistyksen julkaisuja, A-sarja N:o 280.
- Pölonen, I. & Perho, J., 2018. *YVA-oikeus – Uudistunut ympäristövaikutusten arviointimenettely*. Helsinki: Edita Publishing Oy.
- RCC-M, n.d. *Design and Construction Rules for Mechanical PWR Nuclear Island.*, s.l.: s.n.
- Rintamaa, R., Rintamaa, K. & Törrönen, K., 2018. *Ydinlaitosten luvitusmallin kehittäminen (Luvike 2). Loppuraportti. 62 sivua.*, s.l.: s.n.
- Rintamaa, R. & Törrönen, K., 2017. *Ydinlaitosten luvitusmallin kehittäminen (Luvike). Esiselvitys.*, s.l.: s.n.
- TEM, 2013. *Ydinjätehuoltoyhteistyön selvitys, TEM raportti 1/2013.*, s.l.: s.n.
- TEM, 2017. *Kemikaalikohteiden suojaamista lainvastaiselta toiminnalta selvittäneen työryhmän raportti*, s.l.: Työ- ja elinkeinoministeriö.
- TEM, 2019. *Kansallisen ydinjätehuollon yhteistyöryhmän loppuraportti. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 39/2019.*, s.l.: Työ- ja elinkeinoministeriö.
- TEM, 2020. *Ydinlaitosten elinkaaren sääntelyn kehittäminen. Loppuraportti. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 43/2020, Energia ja ilmasto, 27.8.2020.*, s.l.: Työ- ja elinkeinoministeriö.
- TEM, 2021. *Sektor-integraatiotyöryhmän loppuraportti, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2021:47*, s.l.: Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki 2021, ISBN PDF 978-952-327-697-0.
- Tilastokeskus, 2022. *Suomen virallinen tilasto (SVT): Sähkön ja lämmön tuotanto [verkkajulkaisu]. ISSN=1798-5072. 2020. Helsinki: Tilastokeskus. [Online]*
Available at: http://www.stat.fi/til/salatuo/2020/salatuo_2020_2021-11-02_tie_001_fi.html
- UNECE, 2021. *Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options*, Geneva: United Nations Economic Commission for Europe.
- US EPA, 1995. *User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models*, s.l.: United States Environmental Protection Agency EPA-454/B-95-003a.
- Valkeapää, A., 2021. *Overall safety and the '3S' of Small Modular Reactors*, s.l.: MSc Thesis, LUT University.
- Zannetti, P., 1990. *Gaussian Models. In: Air Pollution Modeling*. Boston, MA: Springer.

tietokayttoon.fi

ISBN PDF 978-952-383-189-6

ISSN PDF 2342-6799