

---

**TERÄSLEVY—BETONI-LIITTOSEINÄRAKENNE  
SUURMODUULIRAKENTEISESSA  
YDINVOIMALAITOSRAKENNUKSESSA**

**HAMK**  
HÄMEEN AMMATTIKORKEAKOULU

Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Rakennetekniikka

Visamäki, kevät 2014

Jarkko Koskinen

---

VISAMÄKI  
Rakennusinsinöörikoulutus  
Rakennetekniikka

---

<b>Tekijä</b>	Jarkko Koskinen	<b>Vuosi</b> 2014
<b>Työn nimi</b>	Teräslevy—betoni-liittoseinärakenne suurmoduulirakenteissa ydinvoimalaitosrakennuksessa	

---

**TIIVISTELMÄ**

Opinnäytetyötutkimuksen tavoitteena on selvittää japanilaisen teräslevy—betoni-liittoseinärakenteisen suurmoduulirakennustekniikan soveltamista ydinvoimalaitoksen reaktorisaarekkeen rakennuksissa ja rakenteissa. Säteilyturvakeskus, joka on tutkimuksen tilaaja, haluaa selvittää rakennetta säteily- ja ydinturvallisuuden sekä valvonnan näkökulmista. Tutkimus on kirjallisuustyö ja sen viitekehysten muodostavat merkittävimmät lähteet hierarkkisesti: japanilainen JEAC 4618–2008:2010 (Technical Code for Aseismic Design of Steel Plate Reinforced Concrete Structures) standardi, ydinvoimalaitosohjeiden (YVL-ohjeet) uusimmat luonnosversiot ja STUK:n ydinturvallisuus kirja. YVL-ohjeista ja ydinturvallisuus kirjasta käsitellään tutkimuksen keskeisimmät lähtötiedot (ydin- ja säteilyturvallisuusjärjestelmät ja ydinvoimalaitoksen perusturvallisuusperiaatteet). Tutkimus osoittaa, että teräslevy—betoni-liittoseinärakennestandardia JEAC 4618–2008:2010 voidaan soveltaa seuraavin osin:

Suunnitteluvarmuuden hallitsemiseksi suunnittelussa pitää huomioida haurasmurtomekanismit ja suunnittelutilanteesta riippuen haurasmurtomekanismin varmuustaso pitää olla vähintään 1—2 kertaa vastaavien rakennosien lujuuteen nähden (JEAC 4618–2008:2010, 2.3-1).

Rakenteelle tarvitaan lisätutkimuksia yli 40 mm pintateräslevypaksuuksissa (vastaava seinäpaksuus 1,2—8 m).

Standardia sovellettaessa pitää huomioida standardin liittyminen muihin standardeihin kuten japanilaiseen standardiperhe-kokonaisuuteen. Pintateräslevy—betoni-liittoseinärakenteiden suunnittelulle tulee tehdä suunnitteluohje josta selviää millaisia rakenteita kohteessa käytetään ja kuinka JEAC 4618–2008:2010 standardia on tarkoitus soveltaa näiden yksilöityjen rakenteiden suunnittelussa, valmistuksessa ja laadunvalvonnassa.

Rakenteiden analyysimenetelmät ovat kehittyneet standardin laskentamenetelmistä.

**Avainsanat** JEAC 4618–2008:2010 standardi, Teräslevy—betoni-liittoseinärakenne, SC-rakenne, suurmoduulirakentaminen, ydinvoimalaitosrakenteet

**Sivut** 52 + liitteet 13

VISAMÄKI

Degree Programme in Construction engineering  
Structural Engineering**Author**

Jarkko Koskinen

**Year** 2014**Subject of Bachelor's thesis****Steel plate reinforced concrete structure in large modular construction nuclear power plant.****ABSTRACT**

The purpose of study was to investigate the use of the Japanese steel plate reinforced concrete in the construction and structures of the large modular structure power plant reactor island. The study was commissioned by Säteilyturvakeskus STUK. They want to examine the structures from the point of view for the radiation and nuclear safety and the monitoring of the implementation. The thesis consists of a literature review and the most significant sources examined were Japanese JEAC 4618-2008:2010 (Technical Code for A Seismic Design of Steel Plate Reinforced Concrete Structures) standard, the latest draft versions of the nuclear power plant's instructions (YVL guides) and STUK's (STUK- Radiation and Nuclear Safety Authority) nuclear safety certificate book. The main points included in the YVL guide and nuclear safety certificate are dealt with, i.e. nuclear and radiation safety systems and the basic principles of security of nuclear power plant.

The study shows that the steel-concrete composite wall structure standard JEAC 4618-2008:2010 can be applied in the following way To manage the planning certainty the guiding principle in the design is that the level of certainty of brittle fracture mechanism must be at least equal to the safety level of the structural member A general recommendation is that the brittle fracture mechanism –specific security level is twice a high (JEAC 4618-2008:2010). Further studies are needed in steel plated with thicknesses of more than 40 mm (corresponding to the wall thickness from 1.2 to 8 m). When applying the standard the connection of the standard to other standards, such as the Japanese standard package, must be taken to into consideration. The surface of steel plate reinforced concrete wall structure planning needs to be done planning guidelines indicating what kind of structures are used in and how JEAC 4618-2008:2010 standard is intended to apply to the structures identified in the design, manufacture and quality control of. Structural analysis methods have developed standard calculation method

**Keywords**

JEAC 4618-2008 standard, Steel Plate Reinforced Concrete Wall Structure, the SC-structure, large modular construction, nuclear power plant structures

**Pages**

52 p. + appendices 13 p.

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	SUOMESSA OLEVAT YDINVOIMALAITOSRAKENTEET.....	2
2.1	Yleistä.....	2
2.2	Ydinvoimalaitosrakennukset ja -rakenteet .....	3
2.3	Olemassa olevien laitosten rakennesuunnittelu .....	7
3	UUSIEN YDINVOIMALAITOSRAKENTEIDEN SUUNNITTELUVAATIMUKSET .....	8
3.1	Yleistä.....	8
3.2	Ydinvoimalaitoksen erityiskuormat.....	12
3.3	Ydinvoimalaitoksen käyttötilat.....	14
4	MODUULIRAKENTAMINEN .....	15
4.1	Yleistä.....	15
4.2	Käyttökohteet, edellytykset, rajoitteet, ja hyödyt .....	17
4.3	Rakennus- ja rakennesuunnittelu.....	19
4.4	Liitos- ja valmistussuunnittelu.....	19
5	TERÄSLEVY—BETONI-LIITTOSEINÄRAKENTEEN SUUNNITTELU JEAC 4618–2008:2010 STANDARDIN MUKAAN.....	21
5.1	Soveltuvuusalue.....	21
5.2	Rakennetyypit ja -osat .....	24
5.3	Kuormat ja kuormitusyhdistelmät .....	30
5.4	Mitointi.....	33
6	VALVONTA.....	46
6.1	Yleistä.....	46
6.2	Moduulirakentamisen laadunvalvonta.....	46
6.3	Viranomaisvalvonta.....	47
7	YHTEENVETO .....	51

## Liitteet

Liite 1	YDINVOIMALAITOSALUEEN RAKENNUKSET
Liite 2	YVL-OHJEIDEN KESKEISIMMÄT RAKENNUSTEKNISET NORMIT
Liite 3	YVL-OHJEIDEN MUKAISET KUORMITUSYHDISTELMÄT
Liite 4	VALMISTUSSUUNNITTELUN TEHTÄVÄT JA DOKUMENTIT
Liite 5	SEISMINEN SUUNNITTELU S-LUOKAN RAKENNUKSISSA JA RAKENTEISSA (JEAC 4618-2008:2010, 1.4-5)
Liite 6	PEKKA VÄLIKANKAAN VASTAUS KYSYMYKSEEN PINTATERÄSLEVYN PAKSUUDESTA JA VASTAAVASTA SUUNNITTELUN VARMUUSTASOSTA
Liite 7	MODUULIRAKENTAMISVAIHEIDEN VALVONTA
Liite 8	VIRANOMAISVALVONTA

## LYHENNE- JA KÄSITELUETTELO

Anchor bolt guide	Ankkuripulttiopas
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BWR	Boiling Water Reactor, suom. kiehutusvesi-reaktori
ERP	European Pressurized Water Reactor
EYT	Ei ydinturvallisuusluokitusta rakenne
HSC	Half Steel Plate Reinforced Concrete
IAEA	International Atomic Energy Agency
JEAC	Japan Electric Association Code
JEAC 4618-2008:2010	Technical Code for Aseismic Design of Steel Plate Reinforced Concrete Structures
JIS	Japan Institute of Standard
Kannake	Seinään asennettavien järjestelmien ja laitteiden kiinnitysjärjestelmä
Käyttötila	Laitoksen toimintatila: normaali käyttö-, häiriö-, onnettomuus- tai vakavan onnettomuuden jälkeinen tila
Leikkauslevy	SC-rakenteisen seinän ja väli- ja yläpohjalaa- tan liitosrajapintaan asennettava leikkauska- pasiteettia lisäävä rakenneos
Luvanhaltija	Ydinenergialain tarkoittama luvanhaltija
Läpivienti	Huonetilojen välillä järjestelmien- ja laitteiden yhdistämisen mahdollistava kanava
Normi	ohje
Missiili	Liike-energiaa sisältävä materiaali esim. rä- jähdysten lennättämä sirpale
Moduuli	Esivalmistetuista rakennesista muodostuva kokonaisuus
Mutatis mutandis	Muutostarve jonka seurauksena käytettyä olet- tamaa tarkennetaan, korjataan tai muutetaan (muutetaan hypoteesia)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
Pintateräslevy	SC-rakenteisen seinän uloin rakenneos joka toimii myös betonointimuottina
puoli SC-rakenne	Osittainen teräslevy—betoni-liittorakenne (HSC)
PWR	Pressure Water Reactor, suom. painevesi- reaktori
RakMK	Suomen rakentamismääräyskokoelma
Rib	SC-rakenteessa käytettävä teräksinen ripa- vahvike
RC	Reinforced Concrete suom. teräsbetoni
RC-rakenne	Teräsbetonirakenne
RC-N standardi	Normaali teräsbetoni-standardi
SC	Steel Plate Reinforced Concrete
SC-rakenne	Teräslevy—betoni-liittorakenne
SC-rakenteinen seinä	Teräslevy—betoni-liittoseinärakenne

SAHARA	Safe As High As Reasonably Achievable
Shear Plate	ks. leikkauslevy
Shear Wall	Jäykisteseinä
STUK	Säteilyturvakeskus
Stud	ks. vaarnatappi
Suunnittelumaanjärjestys	Todennäköisyysperusteinen arvio laitospaikal- la esiintyvistä vaikutuksiltaan suurimmasta maanjärjestyksestä
Syvyyspuolustusperiaate	Defence in Depth, STUK:n määrittelemä tur- vallisuustoimintamenettely
Tie Bar	SC-rakenteen pintateräslevyjä yhdistävä si- detanko
Vaarnatappi	SC-rakenteisen seinän osa jolla varmistetaan pintateräslevyn ja betonin välinen tartunta
Vahviste	SC-rakenteisen seinän osa jolla vahvistaa ra- kennettä
VHL cranes	Very Heavy Lift Cranes, suom. erittäin paina- viin nostoihin suunniteltu nosturi
WENRA	Association of Regulators of Western Europe
YEL	Ydinenergialaki 1987/990
YVL-ohjeet	STUK:n laatimat ja hyväksymät sitovat ydin- voimalaitosohjeet

## KUVIOT JA TAULUKOT

Kuva 1. Periaatekuva OL 3 ydinvoimalaitossaarekkeen rakennuksista (Ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu, 26).....	3
Kuva 2. Olkiluoto 3 primäärisuojarakennus raudoitusvaiheessa (Ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu, 60).....	4
Kuva 3. Loviisan ydinvoimalaitoksen jäälauhdutinsuojarakennus (Sandberg 2004, 62).	5
Kuva 4. Olkiluodon kiehtusvesireaktoreiden suojarakennus (Sandberg 2004, 64).....	6
Kuva 5. Ydinvoimalaitossuunnittelua koskevat lait ja säädökset.....	8
Kuva 6. Aktiivisen komponentin säteilysuojaus (Sandberg 2004, 151).....	11
Kuva 7. FEM-malli laajarunkoisen matkustajalentokoneen törmäyksen aiheuttamista siirtymistä (Ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu, 35).....	12
Kuva 8. Moduulirakentamisen pääperiaatteet (Ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu, 79).....	16
Kuva 9. Erittäin suuren järjestelmämoduulin asennus (Advanced .., 6). ....	16
Kuva 10. OL3 Suojarakennuksen liner:n pohjalohkon nosto (Ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu, 71).....	17
Kuva 11. SC-rakenteiden asennusrajapinnat (Kaneuji ym., 71). ....	20
Kuva 12. JEAC 4618–2008:2010 standardin mukainen teräslevy—betoni- liittoseinärakenne (Advance., 9). ....	21
Kuva 13. SC-rakenteiden käyttökohteita ydinvoimalaitossaarekkeessa (JEAC 4618- 2008:2010, 1.1-2).....	22
Kuva 14. Rakenteiden toimintaperiaatemalli (JEAC 4618-2008:2010, 1.1-9). ....	23
Kuva 15. Lähtötietojen analysointimenetelmät. ....	24
Kuva 16. SC-, HSC- ja RC-rakenne (JEAC 4618-2008:2010, 1.1-4). ....	25
Kuva 17. SC-rakennetyypit ja raudoitusperiaatteet (Ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu, 76—77).....	26
Kuva 18. SC-rakenteisen seinän vahviketyypit (JEAC 4618-2008:2010, 1.1-3).....	27
Kuva 19. SC-seinärakenteen alapohjaliitos (JEAC 4618-2008:2010, 1.1-8).....	27
Kuva 20. SC-rakenteisen seinän liitostavat väli- ja yläpohjarakenteisiin (JEAC 4618- 2008:2010, 1.1-7).....	28
Kuva 21. Kannakkeiden perusliitostavat (JEAC 4618-2008, 1.1-11). ....	29
Kuva 22. SC-seinärakenteen kannakointijärjestelmät. ....	30
Kuva 23. SC-seinän ja pintateräslevyn paksuussuhteen vaikutus leikkausmuodonmuutokseen leikkausrasituksen kasvaessa (JEAC 4618- 2008:2010, 2.2-9).....	34
Kuva 24. Pintateräslevyn paksuusmitoituksen käyttöalue (JEAC 4618–2008:2010, 2.2- 5, kuva 2.2.1-2).....	37
Kuva 25. Jäykisteseinän kapasiteetin tehollinen alue (JEAC 4618-2008:2010, 2.2-30).....	40
Kuva 26. SC-seinä—välipohjaliitos (JEAC 4618-2008, 2.2-41). ....	41
Kuva 27. SC-seinän ja HSC-laatan liitos murtotilassa (JEAC 4618-2008:2010, 2.2-42). .....	42
Kuva 28. SC-seinä—pohjalaattaliitos (JEAC 4618-2008:2010, 2.2-50). ....	44
Kuva 29. SC-rakenteisen seinän esivalmistus ja kokoonpano (Advance., 10).....	50
Taulukko 1. Kuormitusyhdistelmätaulukko rakennuksista (Ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu, 34).....	13
Taulukko 2. Moduulirakennepohjaisia ydinvoimalaitoshankkeita (Advanced Construction Methods for New Nuclear Power Plants, 1).....	15
Taulukko 3. SWOT-analyysi modulaarisesta rakentamisesta (Sorri 2013, 69) .....	18

Taulukko 4. Rakenteen seismisessämitoituksessa käytettävät kuormat (JEAC 4618-2008:2010, 1.6-2).....	31
Taulukko 5. SC-rakenteisen seinän B-suhdelukutaulukko.....	35
Taulukko 6. Vaarnatappien suosituspaksuustaulukko (JEAC 4618-2008:2010, 2.2-10). .....	38
Taulukko 7. Vaarnatappien sallitut jännitykset (JEAC 4618-2008:2010, 1.5-5).....	39
Kaava 1. Betonin sallitut jännitykset (JEAC 4618-2008:2010, 1.5-4).....	31
Kaava 2. Pintateräslevyn sallitut jännitykset (JEAC 4618-2008:2010, 1.5-4).....	32
Kaava 3. Vaarnatappien tiheyden vaikutus pintateräslevylle sallittuihin jännityksiin (JEAC 4618-2008:2010, 2.2-11) .....	32
Kaava 4. SC-rakenteisen seinän mitoitusmenetelmän valinta (JEAC 4618-2008:2010, 2.2-8).....	33
Kaava 5. Leikkauslevyn tehollinen vaikutus liitoskohdassa (JEAC 4618-2008:2010, 2.2- 47).....	43



## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyötutkimus selvittää, voidaanko ydinvoimalaitoksen rakentamisessa soveltaa japanilaista JEAC4618-2008:2010 (Technical Code for Aseismic Design of Steel Plate Reinforced Concrete Structures) standardiin pohjautuvaa suurmoduulirakenteista teräslevy—betoniliittoseinärakennetta (SC-rakenne). Standardia on esitetty sovellettavaksi uusien ydinvoimalaitosten suunnittelussa. Japanin maaperän seismisestä aktiivisuudesta johtuen JEAC 4618-2008:2010 standardi käsittelee teräslevy—betoniliittoseinärakennetta seismisestä näkökulmasta. Tutkimuksen laadunvalvonnallinen osuus tulee standardin ulkopuolelta, koska japanilaiseen suunnittelukulttuuriin ei kuulu ulkopuolisen viranomaisen suorittama laadunvalvontaa.

Suurmoduulirakenteisesta teräslevy—betoniliittoseinärakenteesta on jonkin verran kokemusta Isossa Britanniassa ja entisen Itä-Euroopan maissa. Rakennetta ei kuitenkaan ole yleisesti käytetty läntisen Euroopan maissa, eivätkä Eurostandardit sisällä tällaisia rakennetyyppejä. Rakennetta ei ole myöskään sovellettu eikä käytetty Euroopan ydinvoimalaitosrakenteissa. Pohjois-Amerikassa rakennetta on tutkittu ja käytetty toteutumattomissa ydinvoimalaitossuunnitelmissa. Aasiassa on rakennettu tai on rakenteilla yhdeksänä moduulirakenteista ydinvoimalaitosta ja rakenne on yleisesti käytetty Japanissa ja Etelä-Koreassa.

Säteilyturvakeskus (STUK) varautuu uusien ydinvoimalaitosten moduulirakentamiseen ja varmistaakseen valvontatyönsä laadullisten kriteerien täyttymisen STUK selvittää rakenteeseen liittyviä standardeja ja erityisvaatimuksia. Tutkimuksessa kuvataan ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelun lähtötietoja niiltä osin, kun ne suoraan tai välillisesti vaikuttavat rakennesuunnitteluun. Esimerkiksi sisemmän suojarakennuksen sisäilmanpaine on suunnitteluperusteinen lähtötieto.

Tutkimus käsittelee suurmoduulirakenteisen ydinvoimalaitoksen teräslevy—betoniliittoseinärakenteiden suunnittelua, toteutusta ja valvontavaatimuksia:

- olemassa olevien ydinvoimalaitosten
- uusien ydinvoimalaitosten suunnitteluvaatimusten
- suurmoduulirakentamisen
- Japanilaisen teräslevy—betoniliittoseinärakennestandardin (JEAC 4618-2008:2010)
- moduulirakentamisen valvonnan näkökulmasta.

## 2 SUOMESSA OLEVAT YDINVOIMALAITOSRAKENTEET

### 2.1 Yleistä

Ydinvoimalaitos on toimintaperiaatteeltaan lämpövoimalaitos jossa vesihöyry pyörittää turbiinia ja siihen liitettyä sähkögeneraattoria. Höyrystymiseen tarvittava lämpöenergia syntyy atomiytimen halkeamis- eli fissioreaktiossa. Ketjureaktio tapahtuu reaktorisydämessä, joka on suljettu reaktoripainesäiliöön. Fissioreaktiossa vapautuva energia kuumentaa polttoainetta, ja lämpö siirretään pois reaktorista sen läpi virtaavan jäähdytteen avulla. (Sandberg 2004, 26.)

Suomessa on ydinvoimalaitoksia Loviisan Hästholmenissa ja Eurajoen Olkiluodossa. Molemmilla paikkakunnalla on kaksi ydinvoimalaitosyksikköä. Olkiluotoon on rakenteilla myös kolmas laitosyksikkö, joka edustaa kolmannen sukupolven painevesireaktoria (EPR, OL3 2016). Lisäksi Olkiluotoon sekä Hanhikiveen (Fennovoima, Pyhäjoki) on kumpaankin myönnetty periaatepäätös yhden yksikön rakentamisesta (OL4 ja Hanhikivi 1). Loviisan ydinvoimalaitosyksiköt ovat painevesireaktoreita (PWR, LO1 1977 ja LO2 1981) ja Olkiluodon käytössä olevat yksiköt ovat kiehuvesireaktoreita (BWR, OL1 1978 ja OL2 1982). Olkiluoto kolmonen on toimintaperiaatteeltaan Loviisan kaltainen painevesireaktori.

Ensimmäinen uraanipolttoaineen leviämistä estävä suojarakenne on polttoainesauva, joka estää polttoainetableteista irronneiden hiukkasten ja kiinteän materiaalin leviämisen vesihöyrynkiertoon (metallurgiaa, kaasutiivis ja mekaanisesti kestävä). Toinen suojaava rakenne on reaktoripaineastia, jonka tehtävänä on estää reaktorissa tapahtuva hallitsematon paineen nousu ja sen purkautuminen rakennuksen sisälle (paineastiatekniikkaa, reaktoripaineastia; sis. putket ja venttiilit). (Sandberg 2004, 97.)

Kolmantena suojaavana rakenteena toimii sisempi- ja ulompisuojarakenne (primääri- ja sekundäärisuojarakenne), jotka estävät mahdollisten vuotojen kulkeutumisen laitoksen ulkopuolelle (rakennustekniikkaa, paineenkestävä ja kaasutiivis). Suojarakennusten tehtävänä on myös suojata ydinvoimalaitosta ulkopuolisilta uhilta. (Sandberg 2004, 97.)

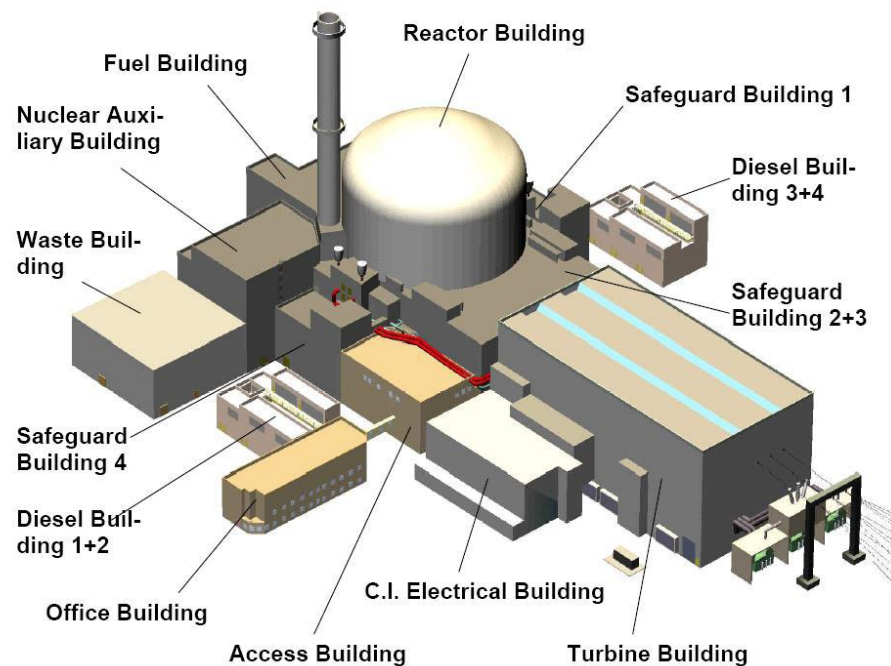
Maailmalla yleisin reaktoryyppi on painevesireaktori (kuva 3). Painevesireaktorissa on kolme erillistä jäähdytyspiiriä joista kaksi ensimmäistä piiriä ovat suljettuja ja kolmas piiri on avoin merivesipiiri. Ensimmäisen jäähdytyspiirin (primääripiiri) vesi kiertää reaktorialtaassa ja saattaa sisältää säteileviä hiukkasia. Loviisan voimalaitosten primääripiirin paine ja lämpötila ovat suojarakennuksen suunnitteluperusteisia lähtötietoja {12,3 MPa (n. 123 ilmakehää) ja 300 °C}. Primääripiirin painetta säädellään erillisellä paineistimella, joka suojaa reaktoripaineastiaa ylipaineelta päästämällä ylipaine puhallussäiliön kautta suojarakennuksen sisälle. (Sandberg 2004, 44—48.)

Maailmalla toiseksi yleisin reaktorityyppi on kiehumisvesireaktori (kuva 4). Kiehumisvesireaktorissa on kaksi erillistä jäähdytyspiiriä, joista ensimmäinen piiri on suljettu ja toinen on avoin merivesipiiri. Kiehumisvesireaktorissa käyttöpainetta (7 MPa) ei ole suojarakennuksen suunnittelua mittaava tekijä. Kiehumisvesireaktorissa primäärisuojarakennuksen mitoitettavana tekijänä käytetään vakavan onnettomuuden seurauksena syntyvän runsaan vedynmuodostuksen aiheuttamia vetypaloja ja räjähdyksiä. (Sandberg 2004, 50—51 ja 189.)

## 2.2 Ydinvoimalaitosrakennukset ja -rakenteet

### Ydinvoimalaitosrakennukset

Reaktorisaarekkeen (Reactor Building) rakennusten keskinäinen sijoittelu pohjautuu erilaisiin turvallisuus- ja toiminnallisuusvaatimuksiin (kuva 1). Ydinvoimalaitostontilla on useita käyttötarkoitukseltaan erityyppisiä rakennuksia (suomenkieliset nimet liitteessä 1). Varsinainen reaktorirakennus muodostuu sisä- ja ulkopuolisesta suojarakennuksesta. Ydinvoimalaitossaarekkeella on reaktorirakennuksen lisäksi turpiinisaarekkeen rakennukset jotka ovat turpiini- ja kytkinrakennus, reaktorin jäähdytyksen varmistavien turvajärjestelmien neljä rakennusta, polttoainerakennus ja laitosalueen ydinturvajärjestelmiin liittyvät dieselgeneraattoreita sisältävät varavoimarakennukset.



Kuva 1. Periaatekuva OL 3 ydinvoimalaitossaarekkeen rakennuksista (Ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu, 26).

Reaktorisaarekkeen rakennuksilla on säteily- ja ydinturvallisuusvaatimuksia. Turpiinisaarekkeen rakennuksilla, toimistorakennuksella sekä reaktorisaarekkeen edessä olevalla sisäänkulkurakennuksella ei ole ydinturvallisuusvaatimuksia (EYT).

### Rakenteet

Suomessa olevat ydin- ja säteilyturvallisuuden kannalta tärkeimmät ydinvoimalaitosrakenteet (esim. primäärisuojarakennus) ovat massiivisia paikalla rakennettuja teräsbetoni- ja jännebetonirakenteita (kuvat 2—4). Esimerkiksi primäärisuojarakennus mitoitetaan niin, että se kestää suurimman mahdollisen ylipaineen ja lämmön. Suojarakennusjärjestelmiä on myöhemmin täydennetty niin, että ne kestävät myös mahdolliset kuviteltavissa olevat sydämensulamisonnettomuudet (Sandberg 2004, 65).

Primäärisuojarakennuksen ja allasrakenteiden tiiveysvaatimukset toteutetaan teräksisellä tiivistelevyllä, joka pitää rakenteen tiiviinä mahdollisissa siirtymä- ja muodonmuutostilanteissa (liner, paksuus 6 mm). Rakenteella ja materiaalin myötö-ominaisuuksilla varmistetaan tiiveys rakennesiirtymien jälkeenkin. Liner kestää siirtymiä ja muodonmuutoksia enemmän kuin kuormia kantavat jälkijännitetyt teräsbetonirakenteet. Liner:n tartuntarauhoitus suunnitellaan sopusointuun betonin liikkeiden ja huippumuodonmuutosten kehittymisen kanssa, kuten palotilanteiden epätasaisessa lämpörasituksessa. Esimerkkikuvan 2 Olkiluoto 3 primäärisuojarakennuksen rakenteet ovat ulkoapäin luoteltuna: ulkopinnan raudoitteet ja jännepunosten suojaputket (keskeis- sekä sisäpinnanraudoitteet ja Liner eivät näy kuvassa).

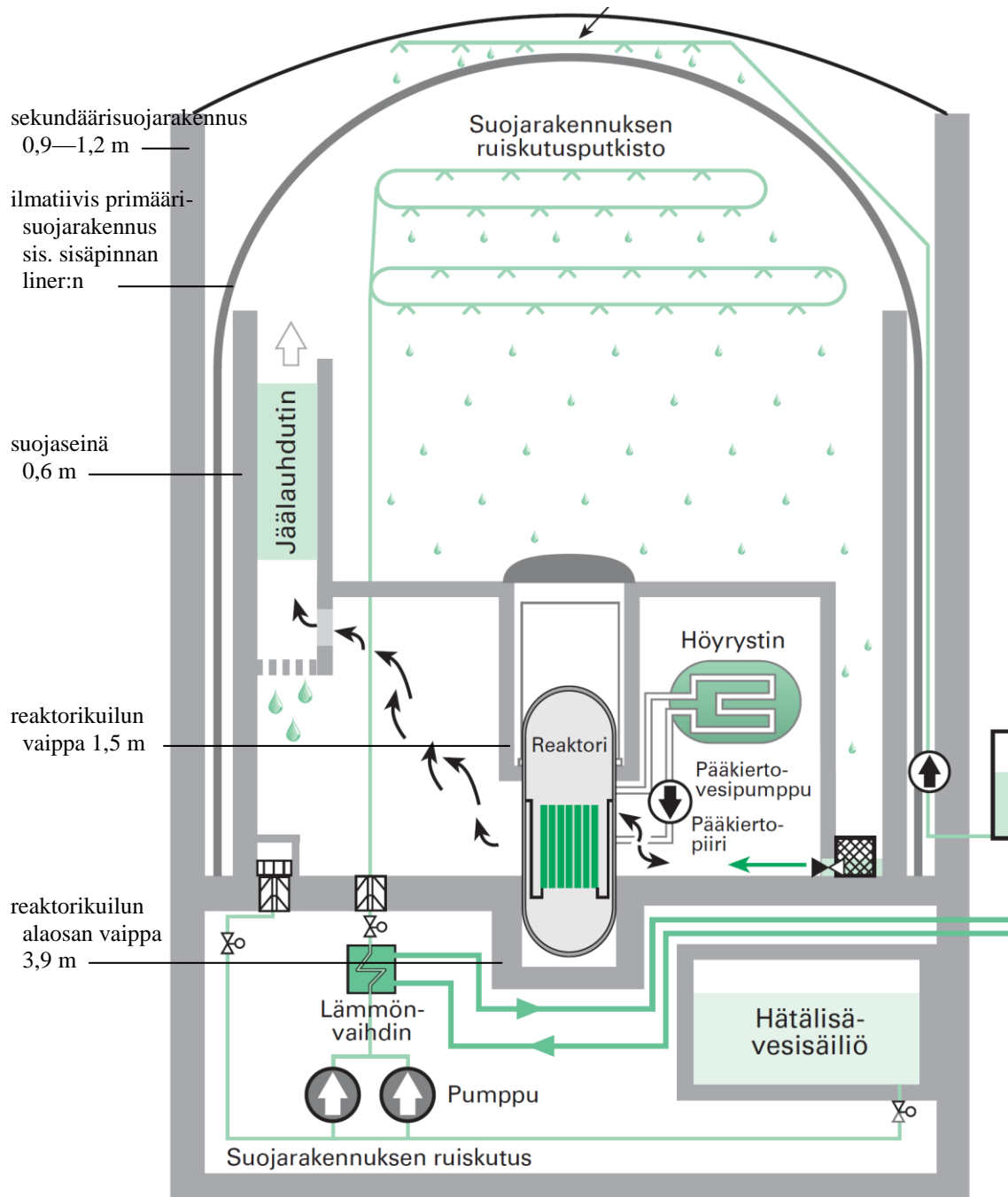


**Kuva 2. Olkiluoto 3 primäärisuojarakennus raudoitusvaiheessa (Ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu, 60).**

Primäärisuojarakennuksen suunnittelun yhtenä lähtötietona käytetään reaktorisalin sisäilmanpaineen muodostusta. Loviisan reaktoreissa onnettomuuden aikaista paineen muodostusta vähennetään hehkutulppa-, jäälauhdutus- ja ruiskutusjärjestelmillä. Primäärisuojarakennuksen sisäpinnassa

Teräslevy—betoniliittoseinä-rakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.

on hehkutulppa-turvajärjestelmä, jonka sytyttää ja polttaa hallitusti mahdollisesti onnettomuustilanteissa syntyvän runsaan vetykaasun. Suunnitelupaineen alentamiseksi jäälauhdutinjärjestelmällä lauhdutetaan korkea-paineista höyryä. Samaa tehtävää toimittaa suojarakennuksen sisä- ja ulkopuolinen ruiskutusjärjestelmä. (kuva 3.)

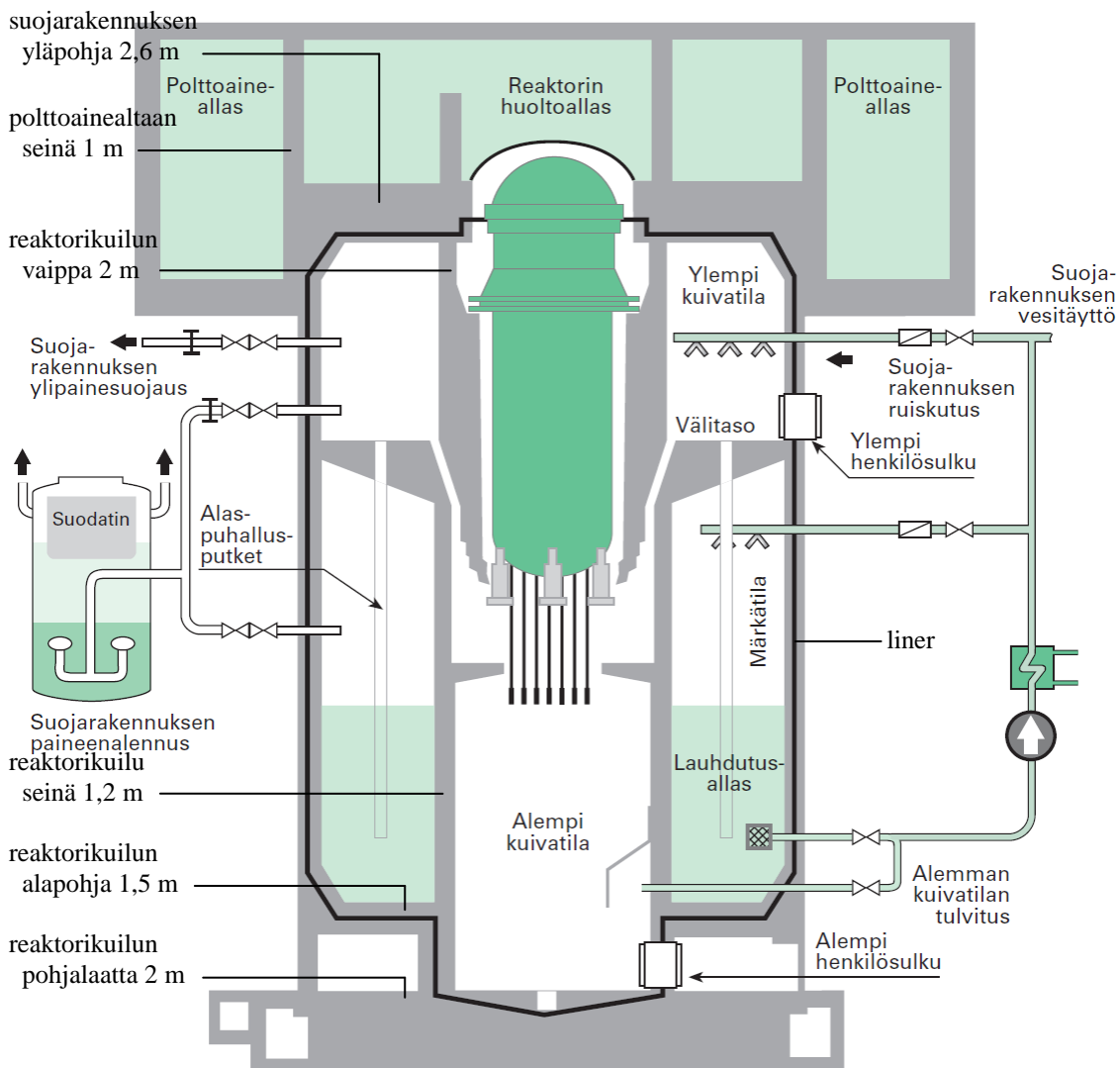


Kuva 3. Loviisan ydinvoimalaitoksen jäälauhdutinsuojarakennus (Sandberg 2004, 62).

Reaktorivuodon sattuessa Loviisan reaktorista vapautuva höyry kulkee jäälauhduttimen läpi suojarakennuksen ylätilaan. Jäälauhduttimessa suurin osa höyrystä tiivistyy vedeksi, joka rajoittaa sisemmän suojarakennuksen paineen nousua. Jäälauhdutusjärjestelmä on yhdysvaltalaisen Westinghou-

Teräslevy—betoniliittoseinärakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.

se:n kehittämä. Jäälahdutus etuna on jäädytyksen menetyssonnettomuudessa vähäinen paineen muodostus, joka helpottaa suojarakennuksen rakenneteknistä toteutusta. Suurempi paineen muodostus olisi edellyttänyt hyvin suurta suojarakennusta ja sen mitoittamista korkeaan paineeseen. Rakenne olisi vaatinut ratkaisuja, joista Suomessa ei tuolloin ollut kokemusta. Loviisan suojarakennuksen tilavuus on noin 60 000 m<sup>3</sup> ja suunnittelupaine 0,17 MPa. (Sandberg 2004, 63.) Loviisan ydinvoimalaitosyksiköiden sekundäärisuojarakennus on teräsbetonia, jonka ainevahvuus on 0,9—1,2 metriä. Primäärisuojarakennus on teräsrakenteinen ja sisältää liner:in ja sen teräksisen runkojärjestelmän. Rakenteen paksuus on n. 60 + 6 mm. Liner:ia suojaa reaktorista lentäviltä heitteiltä teräsbetoninen suojaseinä, jonka ainevahvuus on n. 0,6 m. Reaktorikuilun yläosan seinä on 1,5 m ja alaosa 3,9 m paksua teräsbetonia. Olkiluodossa kiehumisvesireaktorin reaktorista vuotava korkeapaineinen höyry ohjataan alemmpipaineiseen märkätilaan, jossa höyry kulkee suurten vesialtaiden läpi ja lauhtuu vedeksi (kuva 4). Vedyn palo- ja räjähdysvaaran eliminoinemiseksi kiehumisvesilaitoksen suojarakennus on käytön ajaksi täytetty typpellä. Varsinainen reaktorirakennus toimii sekundäärisenä suojarakennuksena täyttäen kaksois-suojarakennus- ja alipaineistusvaatimukset. (Sandberg 2004, 61—65.)



Kuva 4. Olkiluodon kiehumisvesireaktoreiden suojarakennus (Sandberg 2004, 64).

Kiehutusvesireaktorissa paineen alentamisen ja radioaktiivisten hiukkasten leviämisen estämiseksi suojarakennuksessa on vesisuihkutusjärjestelmä. Suojarakennuksen kaasutilavuus on 7300 m<sup>3</sup> ja suunnittelupaine 0,47 MPa. (Sandberg 2004, 61—65.) Olkiluodon primäärisuojarakenne on jännitettybetonirakenne, jonka ainevahvuus on noin 1 m. Rakenne sisältää 6 mm paksun liner:in. Suojarakennuksen yläpohjan paksuus on n. 2,6 m. Huoltotoimintoihin käytettävien polttoainevälivarastoaltaiden seinät ovat teräsbetonia ja niiden seinämäpaksuus on n. 1 m. Reaktorikuilu on teräsbetonirakenteinen ja sen paksuus reaktoripaineastian kohdalla on n. 2 m ja alaosassa 1,2 m. Reaktorikuilun alapohjan paksuus on n. 1,2 m ja pohjalaatan 2 m.

### 2.3 Olemassa olevien laitosten rakennesuunnittelu

Perinteiseen teollisuusrakentamiseen verrattuna ydinvoimalaitosrakentamisessa määrätään noudatettavaksi laajempia normikokonaisuuksia ja tiukempia turvallisuusvaatimuksia. Perinteiseen rakennesuunnitteluun verrattuna suunnittelun lähtötiedot ovat tarkemmat sekä laajemmat ja niitä analysoidaan monipuolisemmin ja saatuja tuloksia tarkastellaan useista eri näkökulmista. Normaaliin teollisuusrakennussuunnitteluun verrattuna suunnittelussa huomioidaan myös tarkemmin laitoksen toiminta häiriö- ja onnettomuustilanteissa.

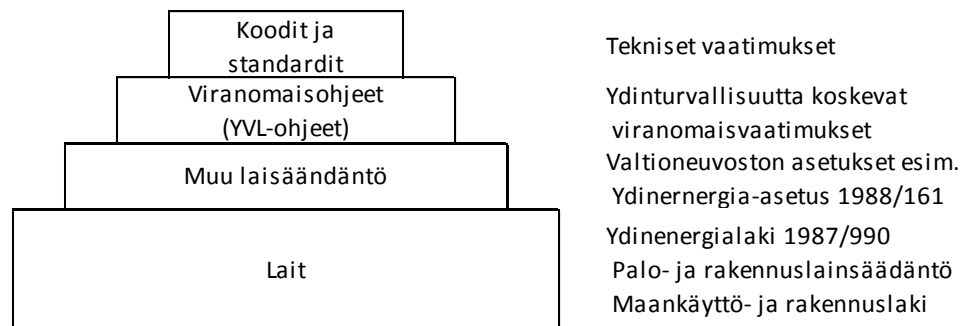
Nykyisten laitosten suunnittelumenetelmät ovat olleet tarkimpia ja luotettavimpia sen aikaisia menetelmiä. Suomessa olevat ydinvoimalaitosrakenteet on yleisesti analysoitu kaksiulotteisesti ja erikoistapaukset kolmiulotteisesti. Rakenteiden lujuuslaskenta on tehty elementtimenetelmään perustuvilla laskentaohjelmilla joiden paperille tulostettuja tuloksia on käytetty rakennesuunnittelussa. Kyseisten suunnittelumenetelmien perusteet toimivat edelleenkin ydinvoimalaitosrakentamisessa. Suunnittelustandardeissa tapahtuneen kehityksen seurauksena laskentamenetelmiä on tarvittaessa tarkennettu, korjattu ja lisätty. Suunnittelutulokset on dokumentoitu kaksiulotteisina piirustuksina.

Olemassa oleville ydinvoimalaitoksille voidaan asettaa uusia tiukempia vaatimuksia myös käyttöönoton jälkeenkin. Esimerkiksi YVL-ohjeistoon on lisätty Tšernobylin onnettomuuden jälkeen suojarakennukselle vakavan onnettomuuden jälkitilan hallintaan liittyviä vaatimuksia. Kyseiset vaatimukset täyttyvät nykyisissä laitoksissa.

### 3 UUSIEN YDINVOIMALAITOSRAKENTEIDEN SUUNNITTELUVAATIMUKSET

#### 3.1 Yleistä

Ydinvoimalaitossuunnittelussa noudatetaan Ydinenergialakia ja sitä täydentäviä valtioneuvoston asetuksia. Lain valvonnan toteutumiseksi valvova viranomainen (STUK) on luonut ydinvoimalaitosohjeet (YVL-ohjeet), jotka täydentävät normaaliin rakentamiseen liittyviä standardeja ja määrittelevät vaatimustasoja säteily- ja ydinturvallisuudelle. (kuva 5.)



Kuva 5. Ydinvoimalaitossuunnittelua koskevat lait ja säädökset

Ydinvoimalaitoksen suunnittelu pohjautuu hyväksytyihin standardeihin. Standardien käytössä suositellaan käytettäväksi samojen standardiperheiden standardeja ja eri standardeja sovellettaessa luvan haltija on velvollinen todentamaan standardien soveltuvuus sekä keskinäinen yhteneväisyys esimerkiksi olemassa olevin Euro-koodien osalta.

#### Ydinturvallisuuden varmistaminen

Ydinonnettomuuksien vähäisten käytännön kokemusten takia laskennallisilla malleilla ja käytännön kokeilla varmistetaan yleisesti riskivarausten riittävyys. Kansallisessa ydinvoimalaitossuunnittelussa noudatetaan kansainvälistä SAHARA-periaatetta, joka tarkoittaa, että ydinvoimalaitoksen turvallisuustason tulee olla niin korkea kuin se käytännöllisin toimin on mahdollista. (Sandberg 2004, 90—92.)

#### Ydinturvallisuusperiaate

Turvallisuussuunnittelun lähtökohdaksi valitaan pahimpia mielekkäästi kuviteltavissa olevia tapahtumia ja olosuhteita, kuten ympäristöolosuhteet ja alkutapahtumat. Erilaisilla herkkyystarkasteluilla huomioidaan turvallisuusanalyysiin liittyvät epävarmuudet; toisinsanoin selvitetään lähtötietojen ja laskentamenetelmien muutosten vaikutukset lopputuloksiin. Yleensä alkutapahtumatutkimukseen sisällytetään yksi seurauksiltaan mahdollisimman haitallinen vika. (Sandberg 2004, 95—97.)



### Peräkkäiset esteet

Radioaktiivisen ydinmateriaalin leviäminen estetään kolmella peräkkäisellä esteellä (ydinpolttoainesauva, primääripiiri ja suojarakenne). Leviämisesteet mitoitetaan niin, että niiden tiiveys säilyy mahdollisimman hyvällä varmuudella, vaikka niihin kohdistuisi pahin mielekkäästi kuviteltavissa oleva uhka. (Sandberg 2004, 97.)

Suojarakennuksen suunnittelun yhtenä lähtötietona on, että heti reaktorisydämen sulamisonnettomuuden alussa purkautuu suurin mahdollinen määrä radioaktiivisia hiukkasia (oletettu pahin mahdollinen onnettomuus). Vallitsevan käsityksen mukaan radioaktiivisen päästön alkaessa sen keskeyttäminen saattaa olla hankalaa ja päästöt olisivat sitä pienemmät mitä pidempää suojarakenne pysyisi tiiviinä ja ehjänä. Esimerkiksi sisemmän suojarakennuksen tiiveyden merkitystä ja hyvää suojarakennussuunnittelua kuvaa Amerikan Yhdysvalloissa Three Mile Island 2:n sydänsulaonnettomuudessa suojarakennuksen tiiveyden säilyminen, joka esti lähes kokonaan ympäristöpäästöt (Harrisburg 1979). Three Mile Island 2:n suurimmaksi säteilyn yksilöannokseksi on arvioitu 0.85 mSv, kun ihmiselle suoria terveyshaittoja syntyy yli 500 mSv säteilystä. (vrt. primäärisuojarakennuksen murtuminen Tshernobyl 1986 ja Fukushima 2011). (Sandberg 2004, 90—100 ja 192—196.)

### Syvyysuuntainen turvallisuusajattelu

Säteily- ja ydinturvallisuuteen tähtäävä rakennesuunnittelu pohjautuu STUK:n edellyttämään syvyyspuolustusperiaatteeseen, jossa kokonaisturvallisuus muodostuu mm. yksittäisten turvallisuustekijöiden keskinäisestä riippumattomuudesta. Syvyysuuntaisella turvallisuusajattelulla tarkoitetaan reaktorivaurioiden ja haitallisten säteilyvaurioiden estämistä usealla toisiaan varmentavalla peräkkäisellä tasolla. Turvallisuuden varmentamisesta voidaan erottaa kolme eri tasoa: ennalta ehkäisy (taso 1), suojaaminen (taso 2) ja haittojen lieventäminen (taso 3). Lisäksi vakavien onnettomuuksien varalta on olemassa erilaisia onnettomuudenhallintamenetelmiä, kuten valmius- ja pelastusjärjestelyjä (tasot 4—5). (Sandberg 2004, 101—102.)

Tasossa 1 estetään laitoksen normaalin käyttötilan poikkeamat ja taso edellyttää korkeaa laatutasoa rakenteiden suunnittelussa, valmistuksessa, asennuksessa, huollossa ja käytössä. Tasossa 2 varaudutaan erilaisilla turvajärjestelmillä ydinvoimalaitoksen käytön poikkeamiin. Tasolla havaitaan häiriöt ja estetään niiden kehittyminen vakavaksi onnettomuudeksi esimerkiksi keskittymällä reaktorin pysäytykseen, reaktorisydämen jäädyttämiseen, jälkilämmön poistoon ja polttoainesauvojen rakenteellisen eheyden suojaamiseen. Jos tasoilla 1—2 on epäonnistuttu, niin taso 3 pyrkii lieventämään onnettomuuden seurauksia. Tärkein seurausten hallintaja rajoittamismenetelmä on varmistaa primäärisuojarakennuksen eheys ja tiiveys. (Sandberg 2004, 101—102.)

Syvyyspuolustusperiaate sisältää myös edellä esitetyt radioaktiivisten aineiden leviämissesteet (luku 2.1) ja hyvän suunnittelun sekä laadunhallinnan periaatteet joista muodostuvat syvyyspuolustuskokonaisuus jolla var-

mistetaan turvallisuus kaikissa tilanteissa. Laadunvalvonnan tehostamiseksi ydinvoimalaitosjärjestelmät, -laitteet ja -rakenteet jaetaan turvallisuusmerkitysten mukaisiin turvallisuusluokkiin (TL1—3, STUK-EYT ja EYT, liite 2).

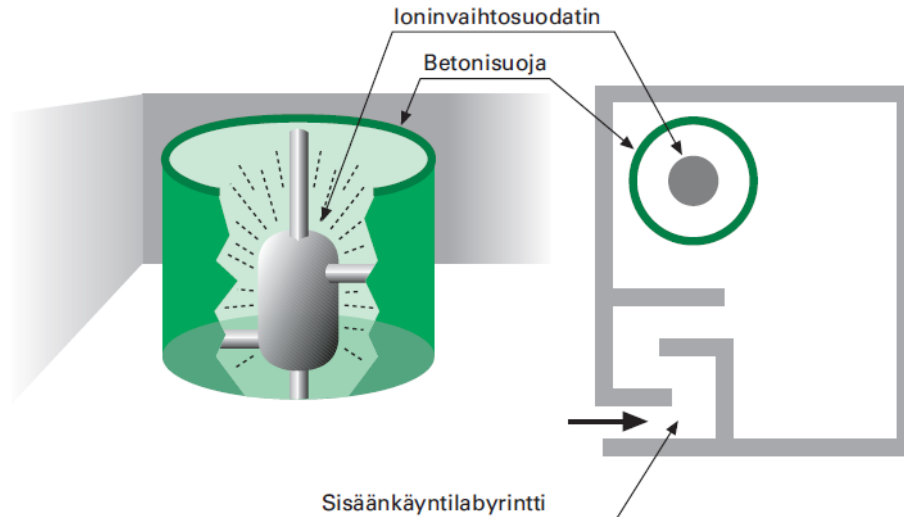
Turvallisuussuunnittelu sisältää turvallisuusperiaatteita, joilla varmistetaan poikkeamatilanteissa tärkeiden laitteiden häiriötön toiminta. Näistä periaatteista rakennusteknisesti tärkeimpiä on erotteluperiaate. Erotteluperiaatteessa rinnakkaiset toisiaan varmentavat laitteet sijoitetaan eri tiloihin jolla estetään tulipalon, tulvan tai muun vastaavan tapahtuman aiheuttamat toiminnalliset haitat. (Sandberg 2004, 102—105.)

#### Ydinvoimalaitosohjeet

YVL-ohjeita voidaan verrata normaalin rakentamisen suunnitteluohjeisiin. Ohjeet täydentävät kansallisia normeja. Ohjeiden vaatimustaso on luvanhaltijoita sitova. Vaatimukset voidaan täyttää vaihtoehtoisilla tavoilla, mutta vaihtoehdon esittäjä veloitetaan osoittamaan sen soveltuvuus kyseiseen käyttötarkoitukseen. YVL-ohjeissa viitataan mm. RakMK:aan ja esitetään niihin tarvittavia tiukennuksia. Ohjeet on ajantasaistettu kattamaan nykyiset turvallisuusvaatimukset. Ohjeissa huomioidaan Olkiluoto 3 rakentamisesta saadut kokemukset ja Fukushima:n onnettomuuden esille tuomat turvallisuusuhat. YVL-ohjeet on kirjoitettu alun perin Loviisa 1 rakentamista varten, josta ne ovat kehittyneet nykyiseen muotoonsa. (Rakennusteknisesti merkittävimmät YVL-ohjeet esitelty liitteessä 2.)

#### Säteilyvaikutukset ja vakavan onnettomuuden vaikutukset primäärisuoja-rakennukseen

Säteilysuojien suunnittelu ja säteilyolosuhteiden määrittely ovat tärkeä osa ydinvoimalaitossuunnittelua. Säteilylähtötiedot saadaan annoslaskentaohjelmista, jotka simuloivat säteilyn määrää ja vaikutusaluetta. Saaduille tuloksille asetetaan riittävän suuri varmuuskerroin jolloin saadaan todellista suurempia annosnopeuksia. Säteilysuojausmateriaaleina käytetään vettä, betonia, terästä ja lyijyä. Suurin osa laitosrakennuksen tiloista ja laitteista tulee suunnitella siten, että paras mahdollinen säteilysuojaus toteutuu. Suunnittelun täytyy mahdollistaa käytön aikainen tiloihin ja laitteisiin pääsy. Säteilyä pienennetään mm. erottelemalla radioaktiiviset komponentit eri tiloihin tai rakentamalla niiden ympärille erillisiä säteilysuojia (kuva 6). (Sandberg 2004, 150—154.)



Kuva 6. Aktiivisen komponentin säteilysuojaus (Sandberg 2004, 151).

Ydinvoimalaitossuunnittelun lähtökohtana on laitoksen selviytyminen onnettomuudesta ilman huomattavia polttoainevaurioita. Vakavalla onnettomuudella tarkoitetaan tilannetta, jossa huomattava osa reaktorin polttoaineesta vaurioituu. Onnettomuuden loppuvaiheelle on tyypillistä polttoainesydämen sulaminen ja reaktorin alaosaan kertyvä sydänsula-allas (sydänsulan lämpötila 2000 °C). Lopulta sydänsula valuu reaktoripaineastian pohjalle. Vakavassa onnettomuudessa tarkastellaan polttoaineen vaurioitumista, sulamista ja karanneiden fissiotuotteiden ja sydänsulan vaikutusta suojarakennukseen. Lisäksi tarkastellaan sydänsulan ja rakennusmateriaalien vuorovaikutusta, vedynmuodostusta ja siitä aiheutuneiden palojen ja räjähdysten vaikutusta suojarakennukseen. Esimerkiksi Loviisan reaktoreissa reaktoripainesäiliön pohja on ulkopuolelta jäähdytysveden peittämä (suurella varmuudella) jolloin paineastian pohjamateriaalin (teräs) lämmönsiirtokyvyllä jäähdytetään sydänsulaa niin, että se jähmettyy paineastian pohjalle.

Lauhtumisprosessi synnyttää suojarakennuksen sisäpuolelle höyryä ja höyrynpainetta. Lisäksi onnettomuuden aikana primääripiirin vesi pääsee vuotamaan suojarakennuksen sisälle lisäten sisätilan painetta. Jos turvallisuusjärjestelmät eivät toimi, höyrynpaine kasvaa hitaasti ja lopulta ylittää suojarakennuksen suunnittelupaineen. Esimerkiksi Olkiluodon voimalaitoksissa suojarakennuksen suunnittelupaineen ylittymisen estämiseksi on rakennettu suodattimilla varustetut ulospuhallusjärjestelmät ns. ylipaineventtiili järjestelmät (kuva 4). (Sandberg 2004, 172—186.)

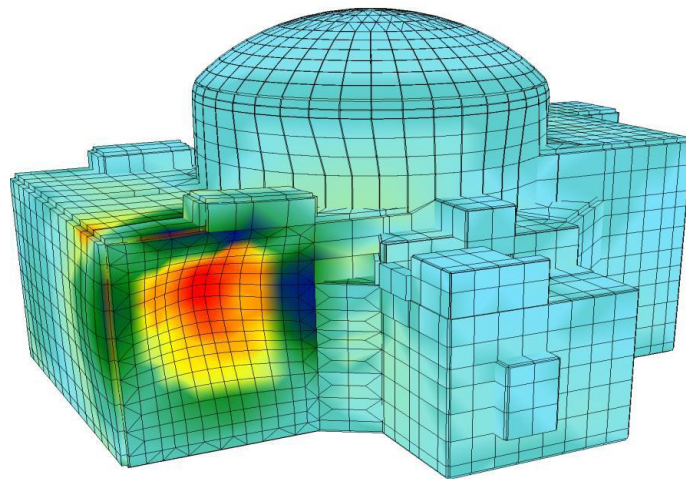
#### Uusien ydinvoimalaitosten kehityssuunnat

Uusien ydinvoimalaitosten suunnittelu voidaan jakaa kahteen eri suunnitteluperiaatteeseen: evoluutio- ja innovatiivisiin laitoksiin. Evoluutiolaitokset pohjautuvat tekniikaltaan nykyisiin laitoksiin ja uusien laitosten suunnittelussa pyritään poistamaan havaitut käyttö- ja turvallisuus puutteet. Laitosten turvallisuusjärjestelmät ovat aktiivisia. Innovatiivisissa laitoksissa on kokonaan uudenlaisia teknisiä ratkaisuja ja niiden turvajärjestelmät

ovat passiivisia ja toimivat ilman ulkoista käyttövoimaa. (Sandberg 2004, 71—76.)

### 3.2 Ydinvoimalaitoksen erityiskuormat

Ydinvoimalaitosrakenteisiin kohdistuu pääsääntöisesti samoja kuormia kuin teollisuusrakennuksiin. Perinteiseen rakentamiseen verrattuna tiukempien turvallisuusvaatimusten seurauksena mm. maanjäristys- ja palokuormia analysoidaan laajemmin ja tarkemmin. Perinteisten kuormien lisäksi ydinvoimalaitokselle tyypillisiä erityiskuormia ovat paineen-, lämmön- ja säteilyn hetkellisten nousujen aiheuttamat kuormat. Kuormat voivat olla rakennuksen sisäisiä tai ulkoisia. Sisäisten kuormien aiheuttajia ovat mahdollisista tahallisista vahingonteoista, tulipaloista, laite- tai putkivaurioista johtuvat tulvat, räjähdykset, ylijännitteet sekä törmäys- ja suihkuvoimat. Ulkoisia kuormia voi synnyttää harvinaiset sääilmiöt, kuten korkea tai alhainen merenpinnan taso, seismiset ilmiöt, laitosympäristön tulipalo ja lämpönielun tukkeutuminen jonkun muun kuin jäätyminen tai seismisen ilmiön seurauksena. Lisäksi ulkoisia kuormia voi synnyttää ihmisen aiheuttamat ulkoiset uhat kuten lentokonetörmäys, sähkömagneettiset ilmiöt, räjähdykset, myrkylliset kaasut laitosalueella, öljyvuodot laitoksen läheisellä merialueella ja luvattomat tunkeutumiset laitosalueelle sekä tietojärjestelmiin. (Sandberg 2004, 61 ja 95—105.)



**Kuva 7. FEM-malli laajarunkoisesta matkustajalentokoneesta törmäyksen aiheuttamista siirtymistä (Ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu, 35).**

Jotkut onnettomuustyyppit voivat aiheuttaa vakavan uhan laitoksen toimintaturvallisuuteen ja siksi ne on erikseen huomioitava suunnittelussa, kuten laajarunkoisesta matkustajalentokoneesta aiheuttamat törmäyskuormat (kuva 7) ja voimakkaan maanjäristyksen osuminen ydinlaitosalueelle. Ennen WTC-terrori-iskuja (2001) Suomen ydinvoimalaitosten suunnitteluperusteena ei käytetty suurten matkustajalentokoneiden törmäystä (pienet lentokoneet ovat olleet suunnitteluvaatimuksissa). Uusien laitosten turvalli-

suusvaatimuksia on tiukennettu niin, että ne kestävät myös täysimittaisen matkustajalentokoneen törmäyksen. Kuva 7 esittää törmäyshetkeä, jolloin jännitykset eivät ole vielä edenneet törmäysseinästä eteenpäin. Kuvan lentokonetörmäyksen kuormat kohdistuvat ensin sekundäärisuojarakennukseen minkä jälkeen ne siirtyvät muihin ulko- ja sisäpuolen rakenteisiin. Sisäisistä uhista vakavimpia vaurioita ja suurimpia erityiskuormia aiheuttavat suuret primääripiirien poikittaiset putkikatkot. Ydinvoimalaitosrakenteissa materiaalien ja pinnoitteiden ikääntymisessä huomioidaan myös säteilykuorman vaikutus. Taulukko 1 esittää eurooppalaisella tavalla ydinvoimalaitosrakenteisiin kohdistuvia kuormia ja kuormitusyhdistelmiä (suomennettu liitteessä 3).

**Taulukko 1. Kuormitusyhdistelmätaulukko rakennuksista (Ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu, 34)**

Load DESCRIPTION	Design	Test	LC 1	LC 2	LC 3	LC 4	LC 5	LC 8	LC 10	LC 11	LC 12	LC 13	LC 14	LC 15
Dead	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Pre-stress	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Test pressure & Temperature		X												
Design pressure & Temperature	X													
Operating Pressure & Temperature			X	X		X	X						X	X
Normal Pipe Reaction			X	X	X	X	X						X	X
ADS Actuation Pressure & Temp.					X									
Hydrodynamic loads				X				X		X	X	X		
Basic wind				X										
Extreme wind						X								
DBE							X							
DBA pressure & Temperature								X			X			
Local Effects DBA											X			
DBA pipe reaction	X							X			X			
DEC pressure & Temperature									X	X		X		
Aircraft crash													X	
External Explosion														X
ACCEPTANCE CRITERIA Structural Integrity	Allowable Stress	Test Limits	1	1	1	1	II	1			III loca		II	II
ACCEPTANCE CRITERIA Leaktightness	N/A.	1	1	1	1	1	N/A	1			N/A		N/A	N/A

Koska opinnäytetyössä tutkittava japanilainen JEAC 4618-2008:2010 standardi keskittyy teräslevy—betoni-liittoseinärakenteiden seismiseen suunnitteluun, taulukosta 1 käsitellään seismiset kuormat sisältävää kuormitusyhdistelmää 5 (LC 5). Taulukossa seismisten kuormien kanssa samanaikaisesti laskettavia kuormia ovat pysyvät ja pitkäaikaiset kuormat sekä paine-, lämpö- ja normaalit putkikuormat. Kuormitusyhdistelmän perusoletuksena on, että laitteet ja järjestelmät kestävät maanjäristyksen siten, että onnettomuus ei aiheuta suurta putkirikkoa ja siitä johtuvia erityiskuormia. Käytännössä tämä merkitsee sitä, että laitteissa ja järjestelmissä käytetyn teräksen sitkeämurtomekanismeilla varmistetaan, että maanjäristyksen kuormat eivät murra laitteita ja järjestelmiä. Suomessa seisminen mitoitus eroaa japanilaisesta mitoituksesta siten, että ydinvoimalaitosrakenteet mitoitetaan kestävämmän vaakasuuntaisia kuormia enimmillään 10—30 % pystykuorman määrästä, kun Japanissa vaakasuuntaiset kuormat voivat olla 3—10 kertaisia.

### 3.3 Ydinvoimalaitoksen käyttötilat

Turvallisuusvaatimusten seurauksena suunnittelussa analysoidaan myös normaalia rakentamista laajemmin ja tarkemmin laitoksen poikkeamatilat ja niiden vaikutukset. Ydinvoimalaitoksen käyttötilat jaetaan normaaliin käyttö-, häiriö-, onnettomuus- ja vakavan onnettomuuden jälkeiseen tilaan.

Normaalissa käyttötilassa rakenne toimii suunnitteluperustaolosuhteissa ja on käyttötarkoitukseensa suunniteltu sekä täyttää sille asetetut turvallisuusvaatimukset.

Käyttöhäiriöt ovat häiriöitä, jotka todennäköisesti esiintyvät vähintään kerran laitoksen käytön aikana (esiintymiä vähintään kerran sadassa vuodessa). Häiriöt luokitellaan laitoksen toiminnan poikkeamiksi, jotka pystytään korjaamaan ja palauttamaan normaaliin tilaan ohjaus- ja hallintomenetelmillä. Häiriötilassa laitoksen hetkellinen häiriö aiheuttaa rakenteille poikkeuksellisia rasituksia. Häiriön seuraamusvaikutukset eivät murra rakennetta, mutta voivat lyhentää sen teknistä käyttöikä. Tyypillisiä häiriötilan kuormia ovat taulukon 1 äärimmäinen tuuli-, suunnitteluperustainen muuttuva- ja suunnitteluperustaiset paikallisvaikutteiset muuttuvat kuormat.

Suunnittelussa varaudutaan myös oletettuihin onnettomuuksiin, jotka ovat niin harvinaisia, että niitä ei odoteta tapahtuvan kertaakaan laitoksen käytön aikana, mutta onnettomuuksia pidetään kuitenkin laitoksen ominaispiirteiden takia mahdollisena (suunnitteluperustaonnettomuus). Onnettomuustilassa ydinvoimalaitos ajetaan alas ja laitoksen käyttökelpoisuus arvioidaan uudelleen. Alasajotilassa tehdään tarvittavat korjaukset ennen laitoksen uutta käyttöönottoa. Onnettomuustilassa haitalliset tapahtumat kuormittavat rakennetta sillä seurauksella, että rakenteisiin syntyy pysyviä vaurioita. Tyypillisiä onnettomuustilan kuormia ovat taulukon 1 suunnitteluperustaisen maanjäristyksen ja putkirikon muuttuvat sekä vakavan reaktorionnettomuuden aiheuttamat paine- ja lämpötilakuormat. (Sandberg 2004, 170—172.)

Vakavien onnettomuuksien jälkitilassa rakenteen suunnitteluvaatimuksissa edellytetään rakenteilta tiiveyttä ja kantavuutta, joka varmistetaan varautumalla erilaisiin onnettomuuden jälkeisiin säteily- ja lämpökuormiin.

## 4 MODUULIRAKENTAMINEN

### 4.1 Yleistä

Euroopasta suurmoduulirakenteisten ydinvoimalaitosten puuttumisen seurauksena pääluvussa sovelletaan mm. Jaakko Sorrin Tampereen teknillisessä yliopistossa toimittamaa Moduulirakentaminen: teräskennoteknologian mahdollisuudet -julkaisua. Julkaisu käsittelee kerrostalojen suurmoduulirakentamista. Soveltamisaluetta voidaan pitää kuvaavana, koska suurmoduulirakentamisen yleiset vahvuudet ja heikkoudet ovat samat teollisuus- kuin asuinrakentamisessa. Aasiassa olevista kymmenestä (taulukko 2) suurmoduuli- ja teräslevy—betoni-liittoseinärakenteisesta ydinvoimalaitoksesta on olemassa rakentamisen ja käytön aikaisia kokemuksia. Taulukossa on myös mainittu Olkiluoto kolmosen liner-rakenteen valmistaminen suurmoduulitekniikalla.

**Taulukko 2. Moduulirakennepohjaisia ydinvoimalaitoshankkeita (Advanced Construction Methods for New Nuclear Power Plants, 1)**

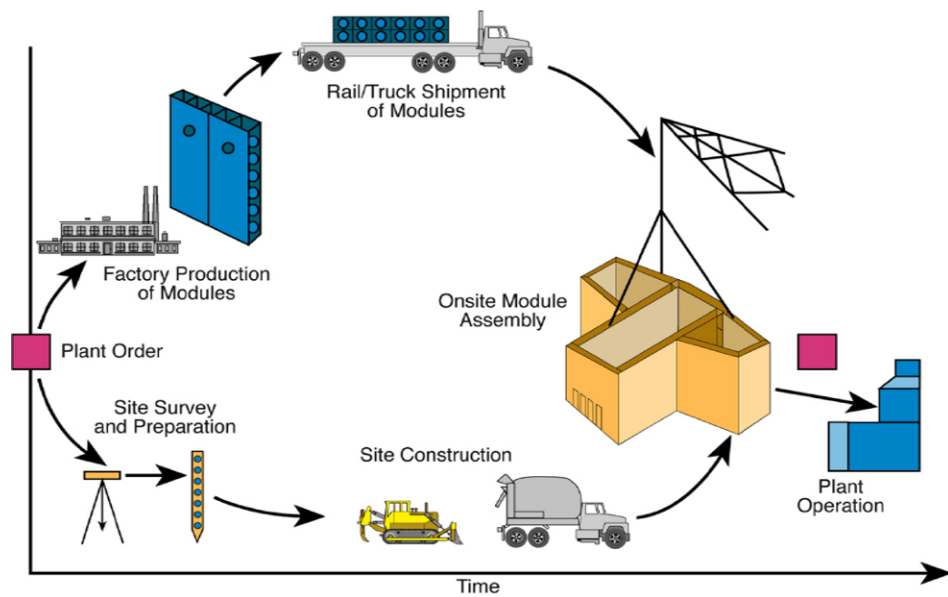
Reactor	Country	Construction period (months)*	Start of commercial operation	Type of reactor (approx. MW(e))**
Kasiwazaki Kariwa-6	Japan	48	Nov. 1996	ABWR (1350)
Kasiwazaki Kariwa-7	Japan	48	Jul. 1997	ABWR (1350)
Lingao-1	China	60	May 2002	PWR (1000)
Lingao-2	China	62	Jan. 2003	PWR (1000)
Qinshan 3-1	China	54	Dec. 2002	PHWR (720)
Qinshan 3-2	China	58	Jul. 2003	PHWR (720)
Tarapur-3	India	75	Aug. 2006	PHWR (540)
Tarapur-4	India	66	Sep. 2005	PHWR (540)
Shin Kori-1	Republic of Korea	54 (planned)	Dec. 2010 (planned)	PWR (1000)
Olkiluoto-3	Finland	70 (planned)	Jun. 2012 (planned)	EPR (1600)
Kudankulam-1	India	84 (planned)	Mar. 2009 (planned)	PWR (917)

\* The construction period is generally considered to be the time from the first major pour of concrete for the main plant building to the commercial operation date.

\*\* ABWR = advanced boiling water reactor; EPR = European pressurized water reactor; PHWR = pressurized heavy water reactor; PWR = pressurized water reactor

Yleisesti moduulirakentamisella tarkoitetaan siirrettävien rakennus-, rakenne- ja laitekokonaisuuksia yhteen liittämällä ja asentamalla tehtyä rakentamista, missä rakennekokonaisuudet eli moduulit kasataan esivalmistetuista osista rakennuspaikan ulkopuolella (kuva 8).

Teräslevy—betoniliittoseinärakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.



Kuva 8. Moduulirakentamisen pääperiaatteet (Ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu, 79).

Moduulirakentaminen voidaan jakaa työmaan ulkopuolella ja työmaalla tehtäviin töihin. Työmaan ulkopuolella tapahtuvia töitä ovat moduulin osien esivalmistus, kokoaminen ja -kuljettaminen. Tyypillisiä työmaalla tapahtuvia töitä ovat perustustyöt, moduulien liitos-, asennus- ja paikallarakentamistyöt. Moduulit voidaan erotella tila- sekä järjestelmämoduuleiksi ja niiden koko voi vaihdella kymmenestä tuhanteen tonniin (kuva 9).



Kuva 9. Erittäin suuren järjestelmämoduulin asennus (Advanced ..., 6).

Kuvassa 9 asennetaan erittäin painaviin nostoihin suunnitellulla nosturilla (VHL cranes) Japanin Kashiwazaki Kariwa-7:n reaktorisaliin 650 tonnia painavaa järjestelmämoduulia. Kariwa-7:n reaktorisalin seitsemän kerrok-



Teräslevy—betoniliittoseinärakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.

sinen laitosjärjestelmä on esivalmistettu kolmena eri suurmoduulina, min-  
kä jälkeen moduulit on onnistuneesti nostettu ja asennettu reaktorisaliin.  
(Advanced Construction Methods for New Nuclear Power Plants, 6.)

#### 4.2 Käyttökohteet, edellytykset, rajoitteet, ja hyödyt

Ydinvoimalaitossaarekkeen rakenteissa moduulirakentamista voidaan hyödyntää kaikissa jännittämättömissä rakenteissa kuten suurimmassa osassa reaktorisali- ja suojarakennusrakenteissa. Esimerkiksi Olkiluoto 3 suojarakennuksen Liner:n rakenteet rakennettiin moduulirakennustekniikalla, kun Liner-moduulit esivalmistettiin telakalla, kasattiin maassa työmaa-alueella, nostettiin ja asennettiin. Pohjalohkomoduulin massa oli noin 200 tonnia (kuva 10). Lisäksi ydinvoimalaitos-alueella sijaitsevat EYT rakennukset voidaan rakentaa perinteisen rakentamisen puitteissa moduulirakentamistekniikalla. Turvallisuusvaatimuksista johtuen reaktorikuilu ja perustusrakenteet suositellaan paikallarakennettavaksi, millä varmistetaan piiloon jäävien rakenteiden oikea rakentamistapa ja -laatu.



**Kuva 10. OL3 Suojarakennuksen liner:n pohjalohkon nosto (Ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu, 71).**

Perinteiseen rakentamiseen verrattuna moduulirakentamisessa määrääväksi tekijäksi muodostuvat moduulien suuri koko ja siitä aiheutuvat haitat käsittelyssä, kuljetuksessa ja lujuus- sekä liittävaikutusten varmistamisessa. Moduulien käsittely voi vaatia varta vasten suunniteltuja sekä rakennettuja työkaluja ja järjestelmiä. Moduuleilta vaaditaan, työmaaolosuhteissa korjattavuutta, muutettavuutta ja asennettavuutta. Vaatimuksia aiheuttaa esimerkiksi varautuminen kuljetuksessa vaurioituneen moduulin korjaami-

seen. Moduulirakenteiden täytyy olla liitettävissä myös paikallarakennetuhin rakenteisiin.

Moduulirakentamistavan haitaksi koetaan standardien sekä vakioitujen toimintatapojen puute ja jälkeempään tehtävien muutosten vaikea toteuttaminen (Sorri 2013, 9). Esimerkiksi JEAC 4618–2008:2010 standardia vastaavaa standardia ei ole kansallisissa standardeissamme eikä EN-standardeissa. Taulukko 3 soveltaa kerrostalojen moduulirakentamisesta saatuja vahvuuksia ja haittoja ydinvoimalaitosrakentamiseen.

**Taulukko 3. SWOT-analyysi modulaarisesta rakentamisesta (Sorri 2013, 69)**

<b>VAHVUUDET</b>	<b>HEIKKOUEDET</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>- säältä suojassa rakentaminen</li><li>- varmuus tehdastuotannon tuottaman laadun tasaisuudesta</li><li>- paremmat mahdollisuudet aikataulun pitämiseen ja valmiina luovuttamiseen</li><li>- nopea työmaavaihe</li><li>- ekologisuus -tehokkaampi materiaalien käyttö ja vähäisempi kaatopaikkajätteen määrä</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- kokemusten puute uusista ratkaisuista</li><li>- modulaariset ratkaisut ja projektien erityispiirteet eivät ole vielä tuttuja tilaajille ja suunnittelijoille</li></ul>
<b>MAHDOLLISUUDET</b>	<b>UHAT</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>- viranomaisten ja päättäjien kiinnostuksen kasvu</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- alalla ei ole Suomessa koulutusta, mikä voi hidastaa osaamisen kehittymistä</li></ul>

Lisäksi ydinvoimalaitoksissa suurmoduulirakentamistavan hyötyjä ovat:

- kolmiulotteisen suunnittelun hyödyntäminen
- rakentamisen tuotteistaminen.
- tilaajakohtaiset variaatiot voidaan toteuttaa jo hyviksi todettujen moduulien pohjalta
- moduulien suunnittelua, kokoonpanoa sekä menetelmäkokeita voi laitetoimittaja valmistella ja toteuttaa jo ennen varsinaista tilausta
- moduulien liittäminen ja erityismoduulien toiminnallisuuksien varmistamista voidaan tehdä moduulien valmistuspaikoilla.

Esimerkiksi Isossa Britanniassa suurmoduulirakenteisissa asuinkestoaloissa paikallarakentamisen osuus kokonaisrakentamisesta on ollut noin 55 % ja rakentamistavan kokonaiskustannussäästöksi on saatu 11—20 % josta säästöä on muodostunut mm. tilaajan nopea liiketoiminnan aloittami-

nen. (CIB Publication 354, CIB TG57-Industrialisation in Construction 2010, 38—51.)

#### 4.3 Rakennus- ja rakennesuunnittelu

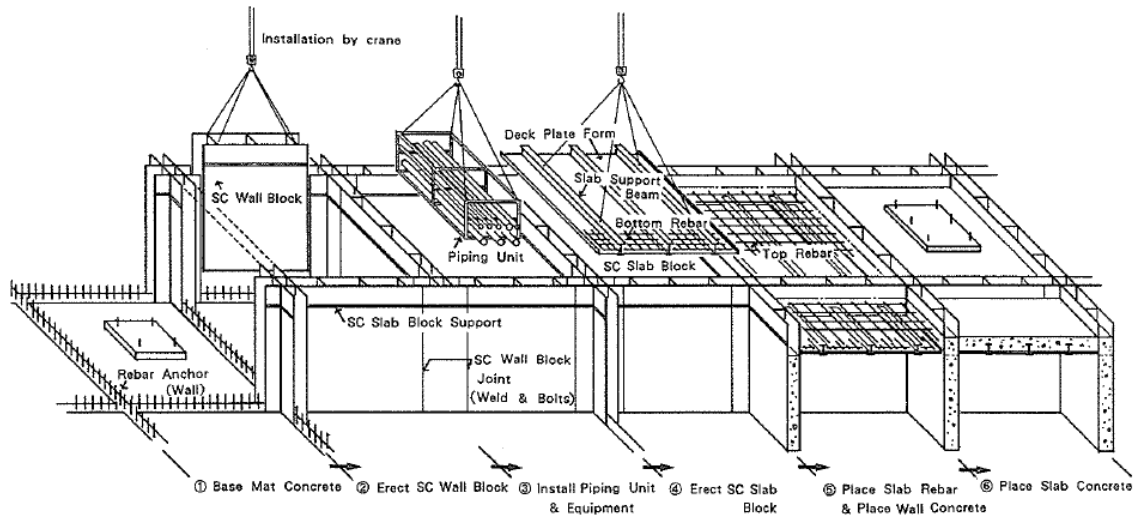
Moduulirakentamisen suunnitteluvaiheeseen käytetään enemmän aikaa ja työtunteja kuin perinteisessä rakentamisessa. Suunnittelu tehdään normaalia suunnittelusisältöä huomattavasti tarkemmin ja moduulikohtaisemmin. Ennen suunnitteluvaihetta tulee määrittellä tehtävien rajapinnat kuten moduulitehtaan ja muun toteutusorganisaation työnjako. Asennussuunnitelmissa sovitetaan yhteen rakenteet ja tekniikat. Rakentamisen alkuvaiheen valvonta vie normaalia rakentamista enemmän aikaa, koska yhteistyökumppanit ovat vieraita tai kokemattomampia (esivalmistus—työmaarakeneminen). (Sorri 2013, 92—95.)

Ydinvoimalaitoksen rakennussuunnittelussa kokonaisrakennusmassa muodostetaan yksittäisiä tila- ja järjestelmämoduuleja yhdistelemällä (vrt. tilaelementtirakentaminen). Moduulirakentamisessa rakennesuunnitteluvaatimukset ovat samat kuin perinteisillä menetelmillä valmistettavassa ydinvoimalaitoksessa. Suunnittelussa korostuu yksittäisen moduulin toiminnan ymmärtäminen kokonaisuuden osana kuten usean moduulin palontorjunta järjestelmissä, maanjäristysvoimien sitomisessa tai onnettomuustilanteiden säteilyä rajoittavien rakenteiden ja osastointien suunnittelussa.

#### 4.4 Liitos- ja valmistussuunnittelu

Perinteiseen ydinvoimalaitos rakentamiseen verrattuna rakennesuunnittelun lisäksi tulee erikseen suunnitella komponenttien esivalmistus sekä moduulien kokoaminen, -käsittely, -kuljetus, -liittäminen ja -asentaminen (liite 4). Liitossuunnittelussa määritellään yksittäisen moduulin liittyminen muihin rakennus- ja järjestelmämoduuleihin, pohjalaattoihin ja paikalarakennettuihin rakenteisiin (kuva 11). Liitossuunnittelussa tulee huomioida moduulien väliset rajapinnat ja niiden toiminnallisuudet kuten liitos- ja asennustoleranssit. Perinteiseen rakentamiseen verrattuna toleranssit määritellään suunnitteluvaiheessa tarkemmin. Liitos ja valmistussuunnittelussa huomioidaan normaalit aikataulu- ja laatuksiteerit.

Teräslevy—betoniliittoseinärakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.



Kuva 11. SC-rakenteiden asennusrajapinnat (Kaneuji ym., 71).

## 5 TERÄSLEVY—BETONI-LIITTOSEINÄRAKENTTEEN SUUNNITTELU JEAC 4618–2008:2010 STANDARDIN MUKAAN

### 5.1 Soveltuvuusalue

Jäljempänä esiteltävin yksityiskohdin japanilaista JEAC 4618–2008:2010 (Technical Code for Aseismic Design of Steel Plate Reinforced Concrete Structures) teräslevy—betoni-liittoseinärakenne (SC-seinärakenne) standardia voidaan soveltaa suurmoduulirakenteisen ydinvoimalaitoksen suunnittelussa. Standardia on esitetty sovellettavaksi uusien suomalaisten ydinvoimalaitosten suunnittelussa. Standardi sisältää kokeelliseen tutkimukseen perustuvat liittorakenteiden analyysit ja mitoitusmenettelyt sekä kuvaa tyypilliset rakennukset ja rakenteet joissa rakennetta tai vastaavaa rakennetyyppejä voidaan käyttää (kuva 12).



**Kuva 12. JEAC 4618–2008:2010 standardin mukainen teräslevy—betoniliittoseinärakenne (Advance..., 9).**

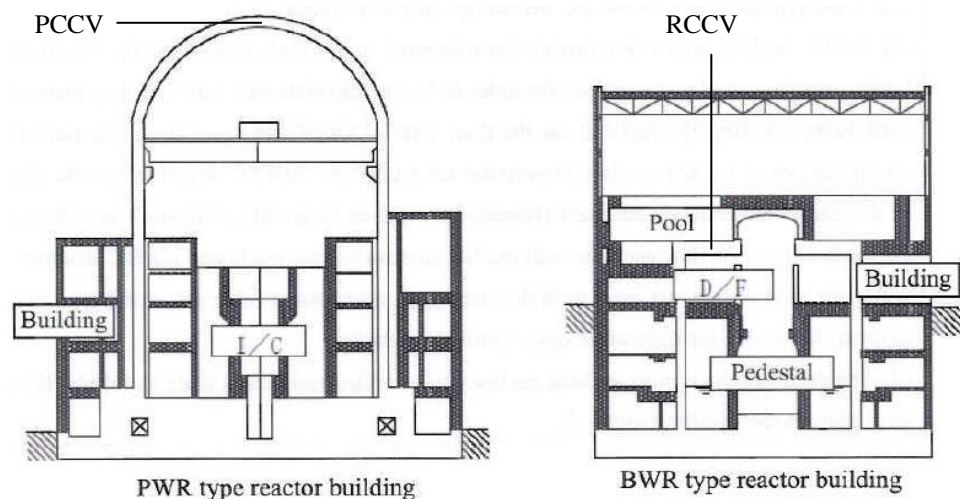
Standardi toimii kokeellisen varmistuksen periaatteella siten, että esitettyjä laskentakaavoja voidaan koetulosten perusteella tarkentaa (*mutatis mutandis*). Standardin perusteet on luotu ennen tietokoneiden laskentakapasiteetin voimakasta kehittymistä ja tästä johtuen käsin laskennan mahdollistamiseksi laskentakaavat ovat standardissa yksinkertaistettuja. Suunnitteluvälineiden kehittymisen myötä voidaan erilaisten kuormien ja kuormitusyhdistelmien aiheuttamia jännityksiä ja muodonmuutoksia analysoida JEAC 4618–2008:2010 standardia tarkemmin esimerkiksi FEM-analyysillä. Standardin laskukaavojen karkeilla tuloksilla on kuitenkin tärkeä merkitys erityisesti varmistustarkastuksissa, joilla vahvistetaan suunnittelutulosten oikeat suuruusluokat. Japanilaisessa suunnittelussa käytetään suunnittelumaanjäritystä, joka arvioidaan laitospaikka- ja rakennuskohtaisesti. JEAC 4618–2008:2010 standardista käsitellään:

Teräslevy—betoniliittoseinärakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.

- jäykisteseiniä vaarnatappien mitoittamista (luku 2.2.3.2)
- liitosten suunnittelua (2.2.3.3)
- seismisen turvallisuuden todentamista (2.3)
- suunnittelumaanjärjestyksen tutkimista (2.3.1)
- laitospaikka- ja rakennuskohtaisen suunnittelumaanjärjestyksen elastista arviota ja vastaavan rakennusta kuormittavan staattisen voiman määrittelyä (2.3.2)
- kapasiteettia vaakasuoria kuormia vastaan (2.3.3)

Liitteen 5 vuokaavio tarkentaa suunnittelumaanjärjestyksen analysointia ja rakenteiden seimistä suunnittelua.

Kuva 13 havainnollistaa SC-rakenteiden käyttökohteita paine- ja kiehuvesireaktorityypin voimalaitosrakenteissa (rasteroitu tummemmalla). Molemmat laitokset on rakennettu massiiviselle teräsbetonilaatalle.

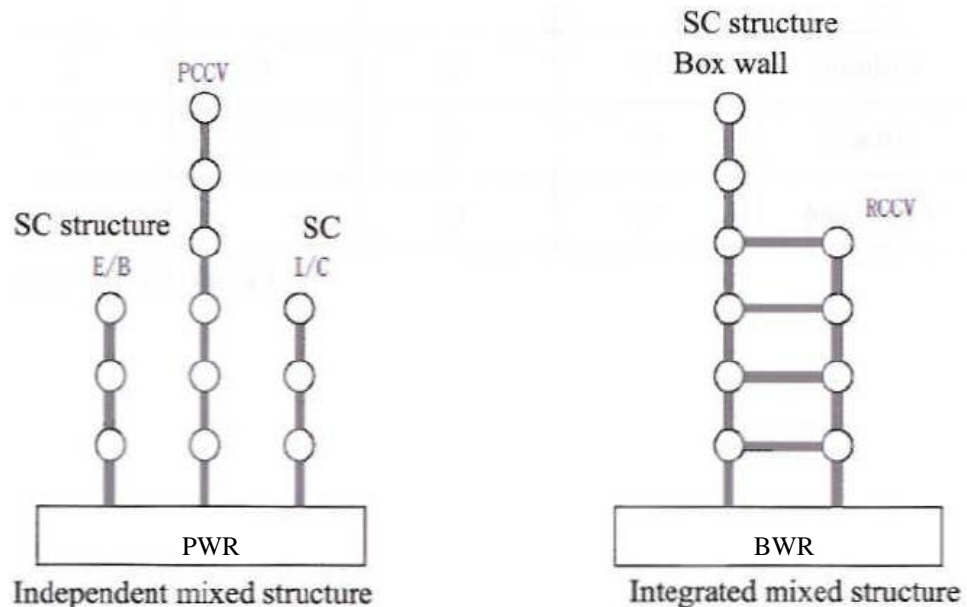


**Kuva 13. SC-rakenteiden käyttökohteita ydinvoimalaitossaarekkeessa (JEAC 4618-2008:2010, 1.1-2).**

Kuvan PWR-laitoksen I/C lyhennettä käytetään primäärisuojarakennuksen sisäpuolella olevista betonirakenteista (Internal Concrete structure). PCCV on jännitetty betoninen primäärisuojarakennus (Prestressed Concrete Containment Vessel). BWR-laitoksen D/F lyhennettä käytetään primäärisuojarakennuksen sisäpuolella olevista ja reaktoria ympäröivistä rengaslaatta- ja kuilurakenteista (Diaphragm Floor) ja Pedestal:ia reaktorikuilun jalustasta. RCCV on teräsbetonirakenteinen primäärisuojarakennus (Reinforced Concrete Containment Vessel). BWR-laitoksessa suojarakennus voidaan rakentaa myös jännittämättömänä teräsbetonirakenteena. Poolit ovat vedellä täytettyjä polttoainealtaita, jotka toimivat käytön sekä huollon aikana polttoainesauvojen välivarastoina ja joista häiriö- ja onnettomuustilanteissa voidaan siirtää reaktoriin jäähdytysvettä.

Paine- ja kiehuvesilaitoksissa rakenteiden kokonaistoimintatapa ja -ideologia ovat erilaiset (kuva 14). PWR-laitoksissa rakenteet ovat itsenäisiä ja erillisiä kokonaisuuksia, kun taas BWR-laitoksessa rakenteet muodostavat toisiinsa limittyneinä ja liittyneinä yhtenäisen rakennekokonai-

suuden, jotka sisältävät mm. sisemmän suojarakennuksen. Kuvan E/B lyhennettä käytetään primäärisuojarakennuksen ulkopuolisista rakenteista (Environmental Building) ja Box wall lyhennettä reaktorirakennuksen laattikomaisesta vaipparakenteesta. Kuvan 14 ideologiassa sauvat esittävät jäykisteseiniä ja pallot välipohjien välittäviä voimia sekä jäykisteseinän liitosta.

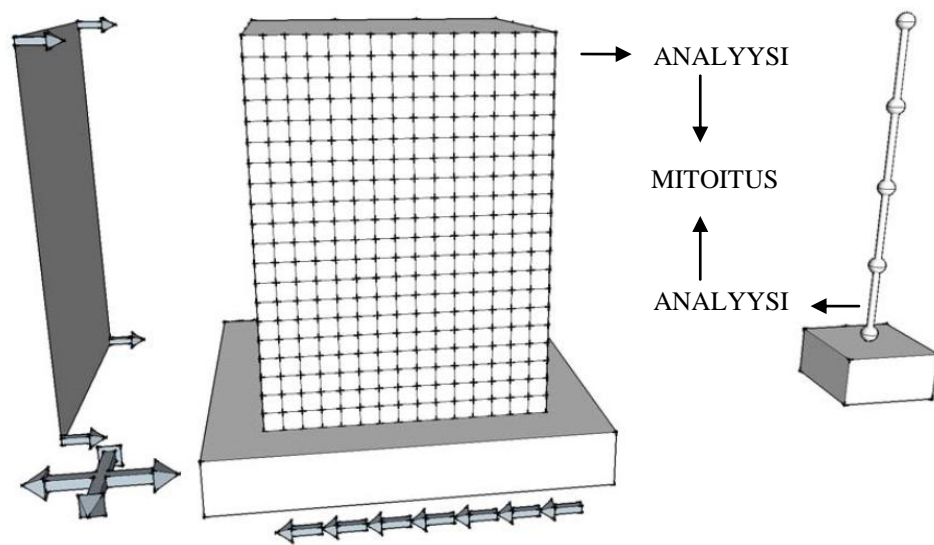


Kuva 14. Rakenteiden toimintaperiaatemalli (JEAC 4618-2008:2010, 1.1-9).

PWR-laitoksessa koko rakenteen kestävyys muodostetaan itsenäisten rakenneosien pohjalta. Esimerkiksi primäärisuojarakennus on oma erillinen rakenne joka on liitetty pohjalaattaan siten, että turvallisuusvaatimukset täyttyvät myös tiiveyden osalta. Itsenäiset rakennukset ja rakenteet mitoitetaan kantamaan esimerkiksi maanjäristyskuormia. Rakenteiden välillä kuormat siirtyvät vain pohjalaatan välityksellä. Esimerkiksi lentokonetörmäyksen aiheuttamat ulkoiset kuormat siirtyvät vaipasta sisempiin rakenteisiin pohjalaatan kautta. Kestävyys määräytyy heikoimman osarakenteen mukaan. Yksittäiset rakenteet täyttävät turvallisuusvaatimusten edellyttämät varmuuskertoimet.

BWR-laitokselle asetetaan vastaavat turvallisuusvaatimukset kuin PWR-laitokselle. PWR-malliin verrattuna BWR-laitoksen rakennukset ja rakenteet muodostavat yhdistävien tasorakenteiden avulla suurempia rakennekokonaisuuksia. Esimerkiksi primäärisuojarakennus on sisällytetty sisä- ja ulkopuolen rakenteisiin. Lentokonetörmäystapauksessa tämä tarkoittaa sitä, että törmäyksen aiheuttamat kuormat siirtyvät ulkopuolisista rakenteista tasojen välityksellä suoraan sisemmälle suojarakennukselle asti. Rakenneosat liittyvät toisiinsa niin, että turvallisuusvaatimukset täyttyvät myös tiiveyden osalta. BWR-laitoksessa kantavuus muodostuu PWR-laitoksen mukaisesti heikoimman rakenneosan mukaan, mutta rakenteet toimivat yhdessä siten, että jatkuvamurtuma ja stabiliteetin menetys estetään rakennuksen runkosuunnittelulla.

Edellä esitettyihin sauva- ja mastomalleihin verrattuna rakenteita ja niiden toimintaa voidaan nykyään tarkemmin analysoida tietokonepohjaisilla analyysimenetelmillä. Esimerkiksi yhdistämällä elementtimenetelmä-analysointi (FEM) ja 3D-suunnittelu saadaan sauvamallia tarkemmin selvitettyä rakenteisiin kohdistuvia kuormia ja jännityksistä (kuva 15). Elementtimenetelmässä muodostetaan vastaavasta rakenteesta kolmiulotteinen elementtiverkosto, jossa yksittäiselle elementille määritellään materiaalivahvuus, murtolujuus, kuormat sekä vapausasteet. Yksittäisiä elementtejä analysoidaan selvittääkseen rakenneseinään kohdistuvat jännitykset ja elementtejä yhdistämällä pystytään analysoimaan koko rakennuksen siirtymät (kuva 7).



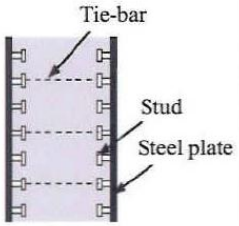
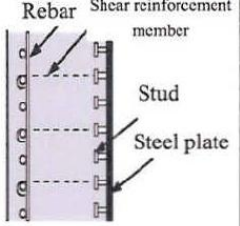
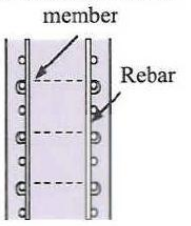
Kuva 15. Lähtötietojen analysointimenetelmät.

## 5.2 Rakennetyypit ja -osat

Teräslevy—betoni-liittoseinärakenne on normaali lujuuksisella betonilla täytetty teräskotelorakenne joka muistuttaa komposiittimaista rakennetta. Rakenteesta puuttuu perinteinen teräsbetoniraudoitus ja sen seurauksena rakennetta vahvistetaan erilaisilla kotelon sisälle asennettavilla vahvike- ja tartuntajärjestelmillä joilla varmistetaan myös teräksen ja betonin keskinäinen toiminta. SC-rakenteita on olemassa kolme tyyppiä: koko-, puoli- ja erikois SC-rakenne (kuva 16). JEAC 4618-2008:2010 standardi ei käsittele erikois SC-rakenteita.



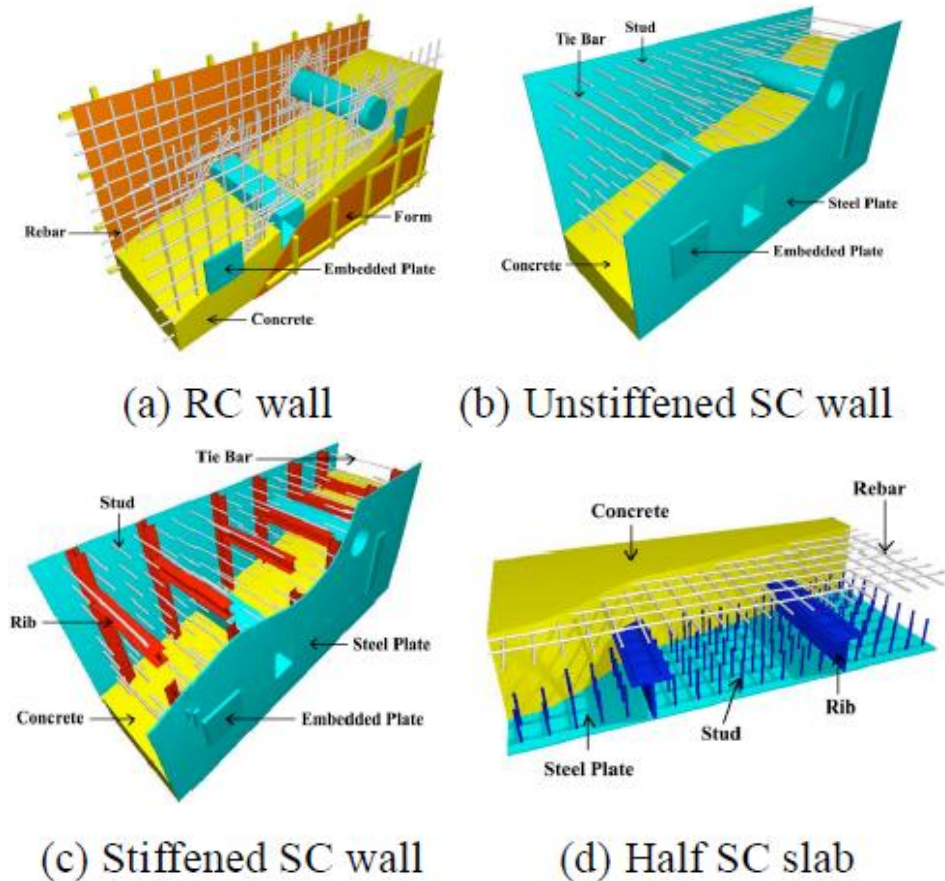
Teräslevy—betoniliittoseinärakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.

	SC structure	Half SC structure	RC structure
Image diagram	 <p>The diagram shows a cross-section of a Standard Structure (SC) wall. It features a central vertical steel plate with horizontal studs attached to both sides. Horizontal tie-bars connect the studs across the wall thickness. The wall is shown as a solid, uniform structure.</p>	 <p>The diagram shows a cross-section of a Half SC structure. It features a central vertical steel plate with horizontal studs on one side. On the other side, there is a shear reinforcement member with vertical rebar. Horizontal tie-bars connect the studs to the rebar. The wall is shown as a solid, uniform structure.</p>	 <p>The diagram shows a cross-section of an RC (Reinforced Concrete) structure. It features a central vertical rebar with a shear reinforcement member attached to both sides. The wall is shown as a solid, uniform structure.</p>
Remarks	Standard structure	Standards for the half SC floor slabs should be applied mutatis mutandis.	“RC-N standards” should be applied.

Kuva 16. SC-, HSC- ja RC-rakenne (JEAC 4618-2008:2010, 1.1-4).

Teräslevy—betoni-liittoseinärakenteessa perinteinen teräsbetoniraudoitus korvataan pintateräslevyillä, vaarnatapeilla, läpivientiholkeilla, mahdollisilla keskitettyillä rakenneteräksillä ja erilaisilla vahvikkeilla. Pintateräslevyn tartunta betoniin varmistetaan vaarnatapeilla (Stud) ja keskenään levyt yhdistetään sidetangoilla (Tie Bar). Rakennetta voidaan vahvistaa teräksillä pysty- ja vaakasuuntaisilla ripa- ja levyvahvisteilla (Rib ja vertical bulkhead). Puoli SC-rakenteessa pintateräslevy on vain toisessa pinnassa ja rakenteen toinen pinta valmistetaan perinteisenä teräsbetonirakenteena. Rakenne muistuttaa tunnettua välipohjan liittolaattarakennetta missä pintateräslevy muodostaa valumuotin pohjan. Rakenteessa käytetään samoja tartunta- ja vahvikejärjestelmiä kuin SC-rakenteessa esimerkiksi vaarnatappeja sekä erilaisia vahvikkeita kuten ala- ja yläpinnan lisärakenneteräksiä (kuva 17d). SC-rakenteen erityistapauksia ovat SC-rakenteinen pilari ja -palkki, jotka koostuvat pyöreästä tai suorakaiteen muotoisesta teräsputkesta ja sisäpuolen betonista sekä tartunta- ja lisäraudoituksesta. Paksuista SC-rakenteisista pilareista on olemassa kokemukseräistä ja tutkittua tietoa esimerkiksi Ranskassa rakenteilla olevasta OL3:n sisälaiteesta Flamville 3:sta, jossa rakennetta on käytetty turpiinrakennuksessa.

Teräslevy—betoniliittoseinä rakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.

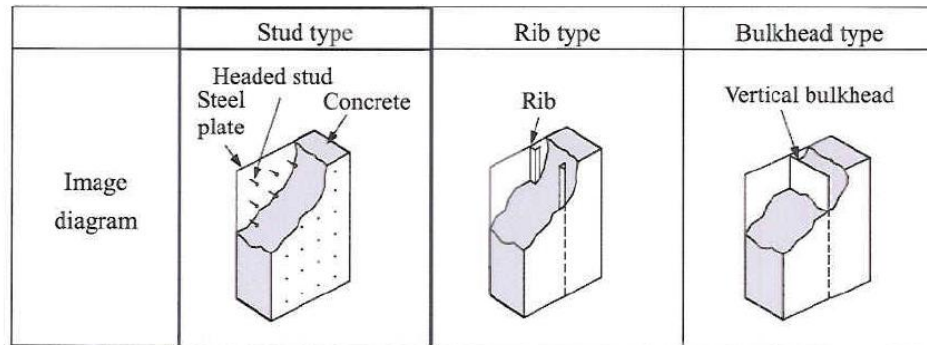


Kuva 17. SC-rakennetyypit ja rauditusperiaatteet (Ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu, 76—77).

#### Vahvikkeet

JEAC 4618-2008:2010 standardi keskittyy vaarnatappivahvistettuihin SC-rakenteisiin ja muut vahvistejärjestelmät käsitellään JEAC perheen muissa standardeissa. Vahvikkeet jaetaan betonin pintaan jääviin vaarnatappeihin ja ripajäkisteisiin sekä koko seinärakenteen läpäiseviin sidetanko- ja levyvahvikkeisiin. Vaarnatapeilla ja ripa-vahvikkeilla varmistetaan teräslevyn ja betonin tartunta seinään kohdistuvissa normaalivoima-, taipuma- ja lommahdustilanteissa. Läpäisevät vahvikkeet pitävät rakennetta kasassa ja estävät levyjen lommahduksen. Ripojen ja läpäisevien vahvikelevyjen pystysuuntaisella asentamisella pyritään vähentämään valutaskujen syntymistä. (kuva 18)

Teräslevy—betoniliittoseinä rakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.



Note:  (Thick line box): Indicates the type to be addressed in this code.

Kuva 18. SC-rakenteisen seinän vahviketyypit (JEAC 4618-2008:2010, 1.1-3).

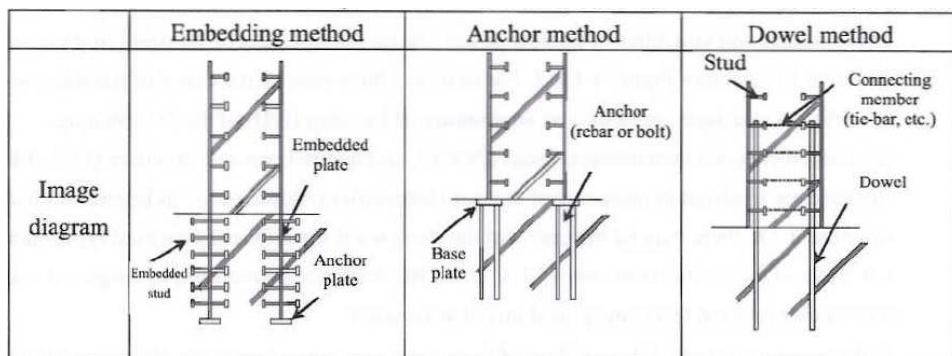
### Kulkuaukot ja läpiviennit

Erilaisilla kulku- ja läpivientiaukoilla mahdollistetaan seinän läpi tapahtuva henkilöliikenne ja järjestelmäläpiviennit. Kulkuaukkojen ja läpivientien sijainti, koko ja määrä vaikuttavat jäykisteseinän toimintaan ja lujuuteen. SC-rakenteessa läpivientien ja kulkuaukkojen reuna-alueiden pintateräslevyyn kohdistuu suurempia jännityksiä kuin muualle levyyn. Suunnittelussa tulee minimoida kulkuaukkojen ja läpivientien määrä sekä koko. YVL-ohjeiden mukaan läpivientipituus tulee olla mahdollisimman pieni ja siksi ei suositella vinoja läpivientejä. Läpivienneissä ja kulkuaukoissa voidaan käyttää erilaisia putki- tai holkkirakenteisia vahvikkeita (kuvat 17b ja c).

### SC-rakenteen liitokset muihin rakenteisiin

Teräslevy—betoni-liittoseinä rakenne voidaan liittää muihin rakenteisiin ankkurointirauhoituksella ja hitsausliitoksella. Rakenne on liitettävissä erityyppisiin ala-, väli- ja yläpohjarakenteisiin sekä erilaisiin paikalla rakennettuihin rakenteisiin.

JEAC 4618–2008:2010 standardissa SC-rakenteisen seinän ja pohjalaatan liitokset ovat tyyppillisiä ja tunnettuja teräsbetonirakenteiden alapohjaliitoksia. Alapohjaliitos voidaan toteuttaa kolmella eri tavalla: upotus-, ankkurointi- ja vaarnamenetelmällä (kuva 19).

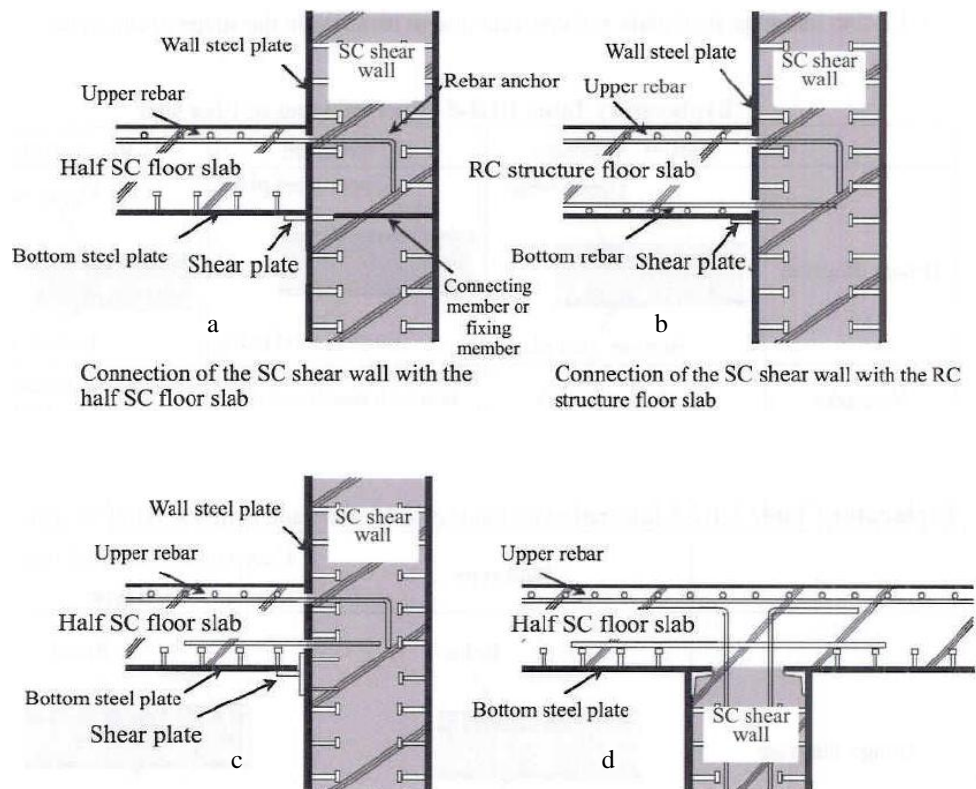


Kuva 19. SC-seinä rakenteen alapohjaliitos (JEAC 4618-2008:2010, 1.1-8).

Kuvan 19 upotusmenetelmässä (Embedding method) seinärakenteen pintateräslevyt upotetaan lattiarakenteeseen. Upotusmenetelmässä upotettujen pintateräslevyjen molemmille puolille hitsataan rakenteelle tyyppillisiä

vaarnatappeja. Lisäksi pintateräslevyn alalaitaan hitsataan ankkurilatta-teräs (Oletettavasti koko matkalle.). Ankkurointimenetelmässä (Anchor method) pohjalaataan asennetaan ennen betonointia ankkuroitu tartuntalatta tai -laput. Tartuntalatat voidaan ankkuroida betoniin kierretangoilla tai harjateräksillä. Menetelmässä SC-rakenteinen seinä liitetään tartuntalattaan hitsausliitoksella (Oletettavasti koko seinän pituudella.). Vaarnamenetelmä (Dowel Method) on variaatio tyypillisestä teräsbetonirakenteisesta harjateräsankkuriliitoksesta jossa tartuntarauditus vastaa perinteisen teräsbetoniseinän tartuntaraudoitusta. Hakasraudoitteet nousevat pohjalaa- tasta ja jatkuvat seinärakenteen sisälle ja ne liitetään SC-seinärakenteen vahvisteraudoitukseen.

Teräslevy—betoni-liittoseinä rakenteen sekä väli- ja yläpohjalaatan liitok- sessa JEAC 4618-2008:2010 standardi käyttää omaa liitosjärjestelmää, jonka erityinen yksityiskohta on leikkauslevyn käyttö laatan alapinnan ja seinärakeen liitoskohdassa (Shear plate, osakuvat 20a—c).



Kuva 20. SC-rakenteisen seinän liitostavat väli- ja yläpohjarakenteisiin (JEAC 4618-2008:2010, 1.1-7).

Kuvassa a HSC-väli- ja yläpohjalaatan ja SC-rakenteisen seinän liitoksessa väli- pohjarakenteen alapinnan teräslevy liitetään leikkauslevyllä ja hitsauslii- tokseilla seinän pintateräslevyyn. SC-rakenteisen kotelon sisälle asenne- taan seiniä yhdistävä vahvike siten, että se hitsataan vastaisen pintateräs- levyn sisäpintaan. Alapinnan vahvisteella ja yläpinnan raudoituksella saa- daan kannettua liitoskohtaan kohdistuvat voimat. SC-seinärakenteen läpäi- sevää vahvistelevyä käytettäessä tulee huomioida betonoinnin esteettö-

myys. Laatan yläpinnan taivutusraudoitteet ankkuroidaan seinärakenteen sisälle.

Kuvassa b perinteisen teräsbetonilaatan ja SC-rakenteisen seinän liitoksessa laatan tartuntaraudoitteet ankkuroidaan seinän sisälle perinteisen teräsbetoniraudoituksen mukaisesti. Rakenteessa käytetään leikkauslevyä laatan alapinnan ja seinärakenteen saumassa.

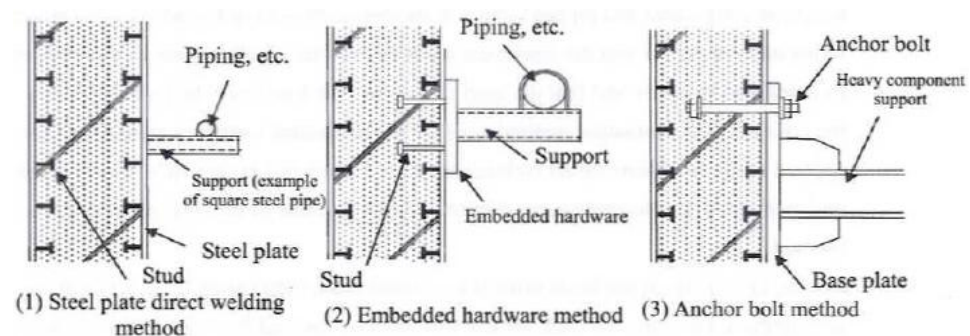
Kuva c on variaatio kuvan a liitoksesta. Rakenteessa vain korvataan seinärakenteen sisälle tuleva vahviste seinän ja laatan alapinnan liitoskohtaan tulevalla T-muotoisella teräksellä. HSC-laatan pohjalevy hitsataan T-muotoiseen leikkausteräkseen. Laatan ala- ja yläpinnan raudoitteet ankkuroidaan seinärakenteen sisälle. Laatan ja seinän rajapintaan kohdistuva taivutusmomentti aiheuttaa vetoa laatan yläpintaan joka hoidetaan yläpinnan raudoituksella. Pystysuuntaiset leikkausvoimat kannetaan betonilla ja alapinnan T-muotoisella vahvisteella.

Kuvassa d HSC-yläpohja liitetään SC-rakenteisen seinän päälle ankkuroimalla laatan yläpinnan teräkset seinärakenteen sisälle. Lisäksi rakenteen alapinnan raudoitteet vietään seinärakenteen yli jolla varmistetaan leikkausvoimien kantokyky. Rakenteessa laatan pohjalevy hitsataan seinärakenteen pintateräslevyyn. Liitoksessa käytetään seinärakenteen sisälle tulevaa L-terästä.

Kuvan 20 massiivisten raudoittamattomien laattarakenteiden pystysuuntaisen leikkauksen kapasiteetin riittävyys arvioinnissa on myös huomioitava massiivisille rakenteille ominaiset kutistumat sekä maanjäristyskuormien dynaamisuus.

#### Kannakkeet ja tartunnat.

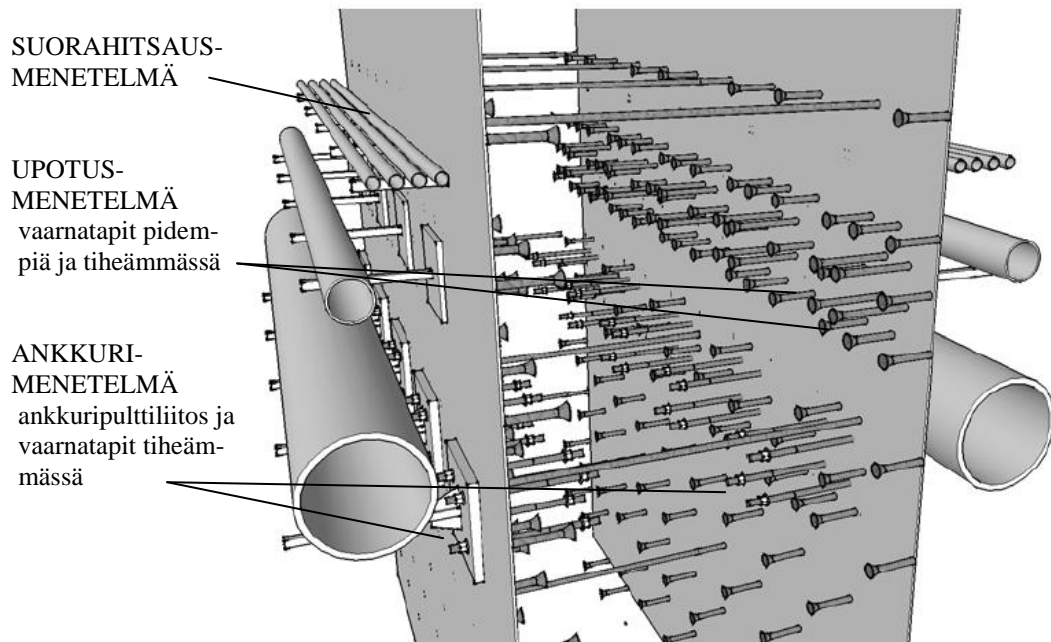
Ydinvoimalaitoksessa suuret putket sekä laitteet asennetaan lattiatasoon ja pienet sekä keskisuuret kiinnitetään seinälle. Seiniin asennettavat järjestelmät ripustetaan seinärakenteeseen kolmella erilaisella kannakkeella (kuva 21). Kannakointimenetelmän määrittelee kannakkeeseen kohdistuvat kuormat. Kannake voidaan liittää seinärakenteeseen hitsaus- tai ankkurointiliitoksilla.



Kuva 21. Kannakkeiden perusliitostavat (JEAC 4618-2008, 1.1-11).

Pienen kantokapasiteetin kannakkeita voidaan hitsata suoraan pintateräslevyyn (1). Upotusmenetelmässä asennetaan ennen valua seinän ulkopin-

taan vaarnatapillinen vahvistekannake (2). Ankkuripulttimenetelmässä kannatin hitsataan erilliseen vahvikelätkään ja liitetään pulttiliitoksella betoniin ankkuroituihin kierretankoihin (3). Suorahitsattu kannake kantaa pienimmän ja ankkuripulttimenetelmä suurimman kuorman. Kannakkeen kuormien hallitsemiseksi vaarnatapin tiheys mitoitetaan tapauskohtaisesti. Kuvassa 22 vaarnatappeja ja sidetankoja on asennettu tiheämmin laitoskannakkeiden kohdalle.



Kuva 22. SC-seinä rakenteen kannakointijärjestelmät.

### 5.3 Kuormat ja kuormitusyhdistelmät

Seuraava taulukko 4 esittää alaluvussa 3.2 esitetystä kuormitusyhdistelmätaulukosta 1 seismisen mitoituksen kuormat japanilaisella ja JEAC 4618–2008:2010 standardin mukaisella tavalla. Taulukossa 4 Load condition määrittelee rakenteeseen kohdistuvat kuormatyytit, Seismic class seismisen luokan, Load Combination kuormitusyhdistelmien laskentaperiaatteet, General case yleiset kuormitusyhdistelmät, Case of heavy snowfall area suurten lumialueiden kuormitusyhdistelmät ja Allowable criterion sallitut jännitykset eri kuormitusyhdistelmille.

Teräslevy—betoniliittoseinärakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.

**Taulukko 4. Rakenteen seismisessämitoituksessa käytettävät kuormat (JEAC 4618-2008:2010, 1.6-2)**

Load condition	Seismic class	Load combination		Allowable criterion
		General case	Case of heavy snowfall area	
Normal	S B C	Normal load + operating load	Normal load + operating load	Long term allowable stress described in "1.5.3 Allowable stress of materials"
			Normal load + operating load + 0.7x snowfall load	
Snowfall		Normal load + operating load + snowfall load	Normal load + operating load + snowfall load	Short term allowable stress described in "1.5.3 Allowable stress of materials"
Windstorm		Normal load + operating load + wind load	Normal load + operating load + wind load Normal load + operating load + 0.35x snowfall load + wind load	
Earthquake	S	Normal load + operating load + seismic force due to Ss	Load of left column + 0.35x snowfall load	Specified values described in "2.3 Verification of seismic safety"
		Normal load + operating load + seismic force due to Sd or static seismic force		
	B	Normal load + operating load + static seismic force		Short term allowable stress described in "1.5.3 Allowable stress of materials"
	C	Normal load + operating load + static seismic force		

Besides above combinations, the combinations with the loads specific to nuclear reactor facilities and the allowable criteria should be taken into account, as necessary.

Seismisessä luokassa S yleiselle tapaukselle esitetty seismic force due to Sd tarkoittaa, että maanjäristysten vaikutus rakenteisiin pitää arvioida dynaamisilla analyyseillä. Tämän alapuolella esitetty static seismic force tarkoittaa, että dynaamisten analyyseiden tilalla voidaan käyttää staattista korvausvoimamenetelmää. Dynaamisten analyyseiden vaatimus koskee seismisen luokan S tärkeitä rakennuksia, kun muille rakennuksille riittää staattisen korvausvoiman menetelmä. Liitteessä 5 esitetään vuokaavio seismisten analyyseiden tekemisestä ja miten dynaamisia rakenneanalyysejä edellyttävät rakennukset tunnistetaan. Taulukon 4 sallitut jännitykset betonille ja teräkselle lasketaan kaavojen 1 ja 2 mukaisesti.

**Kaava 1. Betonin sallitut jännitykset (JEAC 4618-2008:2010, 1.5-4)**

	Long term				Short term			
	Compressive		Tensile	Shear	Compressive		Tensile	Shear
	Stress condition 1	Stress condition 2			Stress condition 1	Stress condition 2		
Normal concrete	$\frac{1}{3}F_c$	$\frac{9}{20}F_c$	-	$\frac{1}{30}F_c$ and $\left(0.49 + \frac{1}{100}F_c\right)$ or lower	$\frac{2}{3}F_c$	$\frac{3}{4}F_c$	-	1.5 times of the long term value.

Note:  $F_c$ : Specified compressive strength of concrete ( $N/mm^2$ ).

Stress condition: The stress condition 1 refers to the case without temperature load and the stress condition 2 refers to the case with temperature load.

Betonin sallitut jännitykset ovat normaaleja teräsbetoneille sallittuja jännityksiä ja mitoituksessa sovelletaan RC-N standardeja.

**Kaava 2. Pintateräslevyn sallitut jännitykset (JEAC 4618-2008:2010, 1.5-4)**

Steel plate and steel frame	Long term		Short term
	Tensile, compressive <sup>Note)</sup> , and bending	Shear	
	$\frac{F}{1.5}$	$\frac{F}{1.5\sqrt{3}}$	1.5 times of the long term value.

Note: F: Reference strength of steel (N/mm<sup>2</sup>).

In the case out of the limitation on the width to thickness ratio to prevent steel plate buckling as shown in Subsection 2.2.1.1 of this code, the allowable compressive stress should be based on the requirement in the Subsection.

Pintateräslevyjen lommahduslujuuteen vaikuttaa erityisesti vaarnatappien tiheys. Kaavalla 3 lasketaan teräslevyn sallitut jännitykset vaarnatappien tiheydestä.

**Kaava 3. Vaarnatappien tiheyden vaikutus pintateräslevylle sallittuihin jännityksiin (JEAC 4618-2008:2010, 2.2-11)**

The limitation on the width to thickness ratio  $B/t$  of steel plate supported by studs is given as follows.

$$\frac{B}{t} \leq \frac{600}{\sqrt{F}} \quad (2.2.1-5)$$

The allowable compressive stress  $f_c'$  for steel plate when the limitation on the width to thickness ratio is exceeded is given as follows.

$$f_c' \leq \frac{\zeta_d \cdot E_s \cdot \pi^2}{12 \cdot k^2 \cdot \left(\frac{B}{t}\right)^2} \quad (2.2.1-6)$$

The above relation is applicable under the conditions of  $f_c' \leq \zeta_d F$  and  $B/t \leq 1300/\sqrt{F}$  and  $\leq 85$ .

Where,  $B$  : Stud interval (mm)

$T$  : thickness of steel plate (mm)

$F$  : Reference value when determining the allowable stress of steel plate (N/mm<sup>2</sup>)

$\zeta_d$  : Reduction coefficient (long term: 2/3, short term: 1.0)

$E_s$  : Young's modulus of steel plate (N/mm<sup>2</sup>)

$k$  : Buckling coefficient when steel plate is supported by studs (= 0.7)

Pintateräslevyjen sallittuja jännityksiä käsitellään tarkemmin JEAC 4618-2008:2010 standardin alaluvussa 2.2.1.1 (2.2-11).



## 5.4 Mitoitus

JEAC 4618–2008:2010 standardissa mitoituksessa lasketaan rakenteeseen kohdistuvat kuormat, joista saadaan rakenteen jännitykset. Saatuja jännityksiä verrataan rakenteen sallittuihin jännityksiin. Laskentatapa on perinteinen yhden varmuuskertoimen menetelmä. Standardissa maanjäristysten aikaisten vaakasuuntaisten kuormien mitoitus toteutetaan rakenneanalyysin ja muodonmuutoskapasiteettien avulla siten, että se sisältää rakentyyppien haurasmurtotulkinnat ja niin ettei kantavuus vaarannu. Kuormien aiheuttamat rasitukset eivät saa ylittää rakenteiden kapasiteettia. Standardissa rakenteiden mitoitus tulee varmistaa kokeellisesti.

### Mitoitusmenetelmän valinta

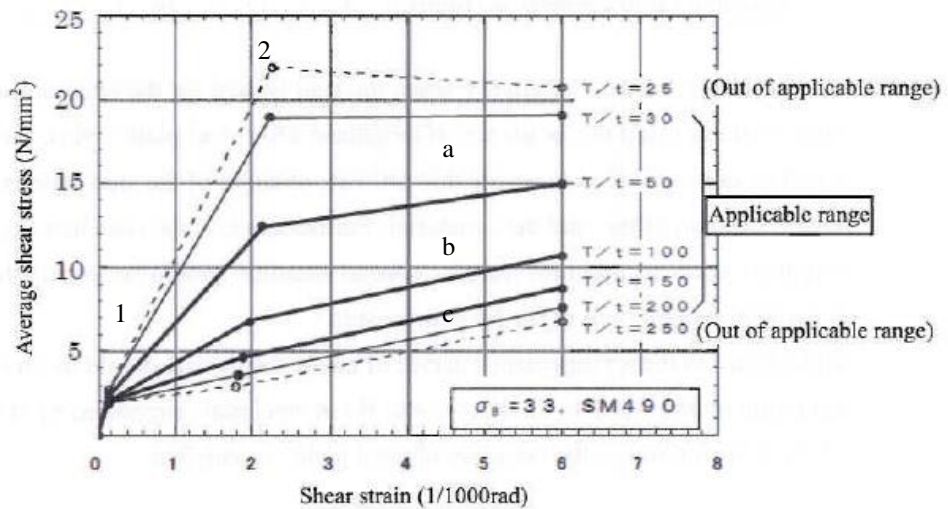
JEAC 4618–2008:2010 standardissa teräslevy—betoniliittoseinärakenteen pintateräslevyn paksuuden suhde seinän kokonaispaksuuteen vaikuttaa rakenteen myötö- ja murtolujuusominaisuuksiin. SC-rakenteisen seinän murto-ominaisuudet voivat olla perinteisen teräsbetoni-, SC- tai perinteisen teräsrakenteen kaltaisia. Kaava 4 määrittelee rakenteen murtotavan seinä- ja pintateräslevyn paksuuden suhteesta.

$$B := \frac{T}{t} \quad \begin{array}{l} T = \text{SC-rakenteisen seinän kokonaispaksuus (mm)} \\ t = \text{pintateräslevyn seinämäpaksuus (mm)} \end{array} \quad (4)$$

**Kaava 4. SC-rakenteisen seinän mitoitusmenetelmän valinta (JEAC 4618-2008:2010, 2.2-8).**

Saatu suhdeluku B kuvaa rakenteen murtumistapaa, kuten teräkselle tyypillistä sitkeää tai betonille tyypillistä haurasmurtoa. Kuva 23 esittää eri suhteisten SC-rakenneseinien leikkausrasitusmittaustuloksia ja kaavio osoittaa, että rakenteessa pelkän pintateräslevyn paksuuden kasvattaminen, siten että suhdeluku B pienenee, aiheuttaa murtotyypin muuttumisen sitkeästä murrosta haurasmurroksi. Kuvassa suhdeluku vaihtelee 25—250 välillä josta sallittu alue on 30—200. Kun SC-rakenteen suhdeluku vaihtelee 30—50 välillä, niin rakenteen myötö- ja murtolujuusominaisuudet muistuttavat perinteistä teräsrakennetta (käyrä a). Kun SC-rakenteen suhdeluku on 50—150, rakenne mitoitetaan JEAC 4618–2008:2010 standardin mukaisena SC-rakenteena (käyrä b). Kun SC-rakenteen suhdeluku on 150—200, niin rakenteen myötö- ja murtolujuusominaisuudet muistuttavat perinteistä teräsbetonirakennetta (käyrä c). (liite 6.)

Kuvan 23 mittaukset on tehty vaarnatappirakenteiselle seinälle. Kaavion pystyakseli esittää leikkausjännitystä ( $N/mm^2$ ) ja vaakakseli leikkausmuodonmuutosta (1/1000 rad). Kuvan käyrissä on havaittavissa kaksi taipistealuetta jotka ovat n. 0.2/1000 ja 1.8—2.2 /1000 rad kohdissa (kohdat 1 ja 2). Kuva esittää hyvin kuormituskapasiteetin kehittymistä leikkausmuodonmuutosalueen 2 jälkeisessä kuormituksessa (Shear strain > 1.8—2.2 /1000rad).



Kuva 23. SC-seinän ja pintateräslevyn paksuussuhteen vaikutus leikkausmuodonmuutokseen leikkausrasituksen kasvaessa (JEAC 4618-2008:2010, 2.2-9).

Kuvassa 23 rakenteen kuormituksen alkaessa betonin halkeilu käynnistyy ja ensimmäiseen taitepisteeseen asti paksu-, keskimääräisen paksu- ja ohutpintateräslevyrakenteinen SC-rakenne toimivat samalla lailla.

Taitepisteen 1 jälkeen rakenteiden kapasiteettierot alkavat erottua ja kapasiteetin kasvu on erilaista (käyrillä eri kulmakertoimet). Taitepisteen jälkeen suhteellisesti teräksisempi (B pienempi) seinä ottaa vastaan enemmän kuormankantokykyä kuvaavaa leikkausjännitystä, kuin seinä jossa teräslevyn paksuudesta osa on korvattu betonilla (B suurempi). Teräksen ominaisuudet aiheuttavat sen, että rakenne luontaisesti muuttuu joustavammaksi. Erisuhteisilla SC-rakenteilla leikkausjännityksen arvot vaihtelevat taitepisteessä kaksi n. 4—18 MPa välillä eli paksuilla pintateräsrakenteilla arvo on 18, keskimääräisillä 12 ja ohuilla 4. Taitepisteen 2 jälkeen rakenteiden toiminnassa ja kantokyvyssä syntyy merkittäviä eroja. Taitepiste edustaa a käyrätyypin rakenteille lujuuden huippuarvoa, kun muilla rakenteilla on vielä lisälujuutta jäljellä.

Turvallisuusvaatimusten takia kantokyvyssä keskitytään rakenteen käyttäytymiseen toisen taitepisteen jälkeisessä kuormituksessa eli selvitetään murtuuko rakenne vai onko sillä kapasiteettia jäljellä. Taitepisteen jälkeistä kapasiteettia tarvitaan seisimisessä mitoituksessa esimerkiksi jälkimaanjärityksissä ja mahdollisissa uusissa vielä voimakkaammissa maanjäristyksissä. Perinteisesti turvallisuus varmistetaan siten, että rakenteissa on sitkeyttä vielä ensimmäisten vaurioiden jälkeenkin.

Käyrällä a suhteellisesti paksuilla pintateräslevyillä toteutetussa SC-rakenteessa tapahtuu taitepisteessä leikkautumien eli haurasmurto ja leikkautumien jälkeen käyrän kulmakerroin muuttuu nolllaksi, mikä tarkoittaa, että leikkausjännityskapasiteetti ei kasva muodonmuutoksen kasvaessa. Varmuuskertoimessa tulee huomioida, että muutos teräslevyn paksuudessa johtaa suhteellisesti samansuuruiseen muutokseen leikkausjännityskapasiteetissa. Toisinsanoin rakenteessa suhteeton pintateräslevyn pak-

suntaminen huonontaa leikkaus-murtuman jälkeistä tilannetta, eikä rakenteiden suhteellisen kokonaispaksuuden kasvattaminenkaan paranna asiaa. Rakenneosien paksuuden kasvaessa suhteessa teräslevy ja betoni paksunevat niin, että suhdeluku B ei muutu ja rakenteen sitkeys ei parane.

Käyrällä b suhteellisesti keskimääräisen paksulla pintateräslevyllä toteutetussa SC-rakenteessa käyrän kulmakerroin on kasvava taitepisteen jälkeen, joka tarkoittaa, että leikkausjännityskapasiteetti kasvaa ja rakenteessa on sitkeyttä jäljellä. Varmuuskertoimessa tulee huomioida, että muutos teräslevyn paksuudessa johtaa suhteellisesti kaksinkertaiseen muutokseen leikkausjännityskapasiteetissa, mikä on selkeä epävarmuustekijä eikä siten sulje pois haurasmurtomekanismia. Toisinsanoin rakenteessa suhteeton pintateräslevyn paksuntaminen huonontaa tilannetta ja aiheuttaa sen, että taitepisteen 2 jälkeen käyrän kulmakerroin pienenee, jolloin leikkauskapasiteetin katonkyvyn kasvu vähenee ja saattaa aiheuttaa jopa haurasmurtuman eli rakenteen toiminta alkaa muistuttaa käyrän a rakennetta.

Käyrällä c suhteellisesti ohuilla pintateräslevyillä toteutetussa SC-rakenteessa taitepisteen jälkeen rakenteella on jäljellä kasvavaa leikkausjännityskapasiteettia, joka tarkoittaa, että rakenne on vaihtoehdoista sitkein ja sillä on luontaista varmuutta taitepisteen jälkeenkin. Varmuuskertoimessa tulee huomioida, että muutos teräslevyn paksuudessa johtaa suhteellisesti samansuuruiseen tai hieman pienempään muutokseen leikkausjännityskapasiteetissa. Rakenteessa pintateräslevyn suhteettoman paksuuden kasvattamisen aiheuttama taitepisteen 2 jälkeisen leikkauskapasiteetin pieneminen ei ole niin huomattavaa, kuin suhteellisesti paksummalla pintateräsrakenteella. Toisinsanoin rakenteen toiminta pysyy käyrän c rakennetyypissä. Varmuuskertoimessa tulee kuitenkin huomioida leikkauskapasiteetin kasvun pieneminen. Taulukko 5 soveltaa suhdelukua B olemassa olevien ydinvoimalaitosten seinärakennepaksuuksille.

**Taulukko 5. SC-rakenteisen seinän B-suhdelukutaulukko**

seinän kokonaispaksuus [mm]	suhdeluku B	pintateräslevyn paksuus [mm]	leikkausjännitys [N/mm <sup>2</sup> ]	leikkausvoima [N/mm]
600	50	12,0	12	7200
600	100	6,0	7	4200
600	150	4,0	5	3000
900	50	18,0	12	10800
900	100	9,0	7	6300
900	150	6,0	5	4500
1200	50	24,0	12	14400
1200	100	12,0	7	8400
1200	150	8,0	5	6000
2000	50	40,0	12	24000
2000	100	20,0	7	14000
2000	150	13,3	5	10000

Taulukon mukaisesti suhdeluku B vaikuttaa niin, että eri paksuisilla seinärakenteilla voi olla samaa kokoluokkaa olevia leikkausjännityskapasiteetteja, mutta toinen rakenteista on kuitenkin sitkeämpi. Esimerkiksi 1200 mm paksu seinärakenne 8,0 mm:ä paksulla pintateräsrakenteella on sitkeämpi kuin 900 mm:ä paksu seinärakenne 9,0 mm:n pintateräslevyllä, vaikka leikkausvoimat ovat molemmissa rakenteissa noin 6 kN/mm. (vrt. pääluvussa 2 esiteltyjen olemassa olevien ydinvoimalaitosten primäärisuoja-rakennuksen seinän ja Liner:n paksuutta.)

Perinteisesti raudoitettut RC-leikkausseinät ovat SC-rakenteisiin verrattuna lähinnä c-käyrän tyyppiä ja sen alapuolella. JEAC 4618–2008:2010 standardin mukaan paksuulta ja keskimääräisen paksuulta pintateräsrakenteisilta SC-rakenteilta edellytetään kuormien kantamiseksi selkeästi korkeampaa varmuuskerrointa (vähintään 2). Varmuuden arvioinnissa ohutpintateräsvyrakenteinen SC-rakenne on materiaali- sekä rakenneominaisuuksiltaan paras vaihtoehto. Rakenne ei vaadi suurta varmuuskerrointa, mutta kerrointa 1 ei ole perusteltua käyttää.

#### Maanjärityskapasiteetin varmistaminen

Ydinvoimalaitossuunnittelussa seisminen mitoitetaan jaetaan toiminnallisiin ja seuraamuksellisiin vaikutuksiin. Maanjäritysmitointi määrittää erikseen rakennukselle ja rakenteille sekä toisaalta arvioidaan perustusten liitosvoimia.

Maanjärityskestävyys varmistetaan:

1. laitosalueen ja runkorakenteiden maanjärityskuormien määrityksellä
2. rakenteiden kuormankantokyvyllä vaakasuuntaisia voimia vastaan
3. rakenteiden muodonmuutoskyvyllä ja kuormituskapasiteetilla.

SC-rakennusten ja -rakenteiden jännitykset pintateräslevyissä, betonissa ja tapeissa perustuvat maanjäritysluokan S kuormitusyhdistelmiin sisältäen elastisen maanjärityksen  $S_d$  maanliikkeet. JEAC 4618–2008:2010 standardissa maanjärityksessä toiminnallisten rasitusten mitoittaminen SC-rakenteen sisälle upotetuille teräksille perustuu perinteiseen RC-rakenteiden mitoitukseen (JEAC 4618–2008:2010, 2.3-9). Toisinaan seismisessä kuormassa SC-rakenteen sisälle lisättävät vahvikkeet, kuten perinteinen teräsbetoniraudoite, mitoitetaan teräsbetoniraudoitusnormien mukaisesti.

Tämän opinnäytetyön rakenneteknisenä tuloksena voidaan pitää JEAC 4618–2008:2010 standardin maanjärityskestävyystuloksia ja erityisesti tulosta jossa todetaan, että maanjäritystilanteessa SC-rakennetta voidaan käyttää tietyin edellytyksin perinteisen teräsbetonirakenteen korvaajana; JEAC 4618–2008:2010 standardin mukaan suunnittelussa tulee huomioida haurasmurtomekanismit ja suunnittelutilanteesta riippuen mekanismin varmuustaso pitää olla vähintään 1–2 kertainen vastaavan rakenneosan lujuuteen nähden (2.3-1). Suomalaisille ydinvoimalaitoksille tullaan todennäköisesti edellyttämään vähintään varmuustasoa 2. Käytännössä tämä tarkoittaa, että paksut ja keskimääräisen paksut pintateräslevyt jäykistävät rakennetta niin paljon, että rakenteen muodonmuutoskyky vähenee, minkä

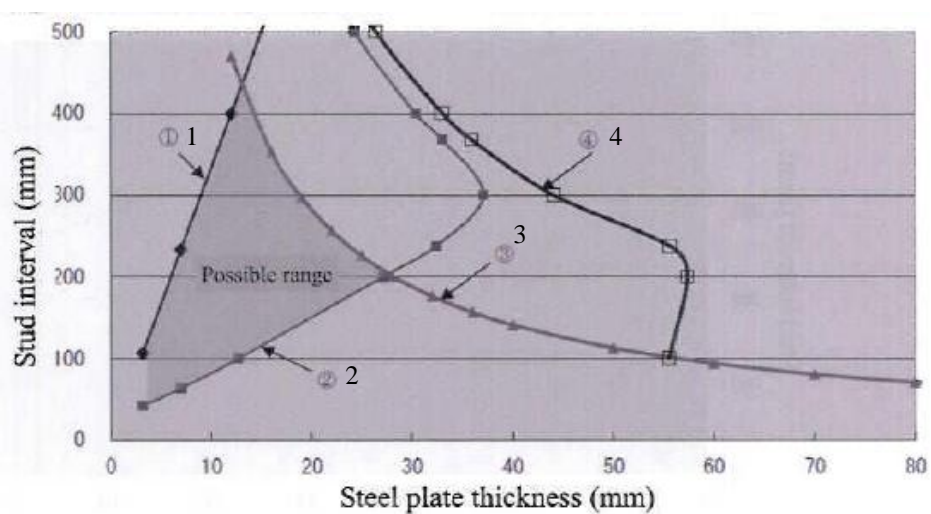
seurauksena liittorakenteelta edellytetään erityisesti leikkautumista vastaan kaksinkertaista varmuutta.

Pintateräslevyn, vaarnatapin ja betonin valinta.

JEAC 4618–2008:2010 standardin taulukon 1.5.3-3 mukaan pintateräslevyn valmistusmateriaalina voidaan käyttää normaaleja teräslaatuja. Levyltä vaaditut myötölujuudet vaihtelevat 215—355 N/mm<sup>2</sup> ja murtolujuudet 400—520 N/mm<sup>2</sup> välillä. Lujuudet ovat Suomessa käytettävien normaali-terästen mukaisia ja ne ovat tyypillisiä massiivisten rakenteiden materiaallilujuuksia. JEAC 4618–2008:2010 standardissa lujuusvaatimukset luokitellaan alle ja yli 40 mm pintateräslevyn seinämäpaksuuksille. (1.5-5.)

JEAC 4618–2008:2010 standardissa pintateräslevyn seinämäpaksuus voi olla 3,2—100 mm, josta suosituspaksuusalue on 3,2—40 mm. Suositusalueelta on olemassa kooperäistä tutkimustietoa. Standardi esittää yli 40 mm paksuille pintateräslevy-rakenteille lisätutkimuksia ja esimerkiksi termomekaanisen toiminnan selvittämistä. Suuremmasta levynpaksuudesta on hyötyä, kunhan varmistetaan valmistettavuus ja rakennetyypille riittävä varmuus haurasmurtomekanismeja vastaan. Käytännössä seinämäpaksuuden ala- ja ylärajan määrittelevät työmaatyöstettävyys. Suositusaluetta ohuemmat ja paksummat pintateräslevyt eivät ole työmaalla helposti työstettävissä mm. työnaikaisten lommahdusten (alaraja) ja hitsaustyön asettamien rajoitteiden takia (yläraja). Pintateräslevyn seinämävahvuuden ylärajan muodostumista käsitellään tarkemmin JEAC standardiperheen JIS G3101 (rolled steels for general structures) ja JIS G3114 (Hot rolled atmospheric corrosion resisting steels for welded structure) standardeissa.

Kuva 24 esittää pintateräslevyn seinämäpaksuuden käyttöaluetta (rasteroitu tummemmalla), kun teräksen lujuus on 325 N/mm<sup>2</sup>, betonin puristuslujuus on 33 N/mm<sup>2</sup> (C25/30), vaarnatappien tiheys 270 mm ja tappien koko on 19 x 152 mm (halkaisija x pituus).



Kuva 24. Pintateräslevyn paksuusmitoituksen käyttöalue (JEAC 4618–2008:2010, 2.2-5, kuva 2.2.1-2).

Kuvassa sallittu seinämäpaksuuden suositusalue on n. 3—28 mm. Pintateräslevyn paksuuden mitoitus pohjautuu myös materiaaliominaisuuksiin ja sen takia paksuutta valittaessa tulee tutkimuksilla selvittää mm. teräslevyn hitsattavuus- ja hitsausparametrit. Esimerkiksi paksujen pintateräslevyjen valmistukseen vaikuttavat hitsausmenetelmä, sisääntulolämmöt ja jälkikarastukset.

#### Vaarnatapit

JEAC 4618-2008:2010 standardin mukaan vaarnatapit kantavat suurempia tai yhtä suuria voimia, kuin teräslevyn murtovetolujuus edellyttää (2.2-36). Vaarnatappien määrä, pituus ja keskinäinen etäisyys mitoitetaan niin, että tappiin kohdistuvat kuormat siirtyvät pintateräslevyyn ja että tappien sallitut jännitykset eivät ylitä. Tarkemmin vaarnatappien mitoitusta käsitellään ankkurointimitoitushjeessa (Anchor bold guide).

Kuva 24 esittää myös vaarnatappien mitoituksen ja pintateräslevypaksuuden suositusalueen keskinäistä suhdetta. Kuvan käyrät tulevat vaarnatappien mitoituksen neljästä tekijästä:

1. tapin paksuuden suhteesta levyn paksuuteen
2. kartiomekanismien mukaisesta ulosvetovoimasta
3. hitsatun tapin vetolujuudesta
4. betonin leimapuristusvoiman kehitymisestä tapin taivutuksessa. (JEAC 4618-2008:2010, 2.2-4.)

Suositusalueen maksimiarvo saadaan tapin vetolujuus- ja hitsausliitoksen vetolujuuskäyrän leikkauskohdasta (käyrät 2 ja 3). Standardin mukaan pintateräslevyn paksuutta voidaan hyödyntää aina 50 mm asti (~ suositusalueen yläraja, JEAC 4618-2008:2010, 2.2.1-5).

JEAC 4618-2008:2010 standardi esittää vaarnatapin halkaisijaksi 9—25 mm siten, että halkaisija on pienempi kuin kolme kertaa pintalevyn paksuus. Vaarnatapin halkaisijan ollessa suositusta pienempi tappien tiheyttä kasvatetaan. Tapin pituuden tulee olla vähintään 8 x tapin halkaisija. Leikkausvoimien hallitsemiseksi tappien pituus tulee olla suurempi tai yhtä suuri kuin neljä kertaa tapin halkaisija (täyttyä edellisellä säännöllä). Taulukko 6 esittää pintateräslevyn paksuuden suhdetta vaarnatappien halkaisijaan.

**Taulukko 6. Vaarnatappien suosituspaksuustaulukko (JEAC 4618-2008:2010, 2.2-10).**

Steel plate thickness $t$ (mm)	3.2	4.5	6	9	12
Maximum stud diameter $s_{Td}$ (mm)	9	13	16	22	25

Taulukossa pintateräslevyn paksuuden ylärajan on 12 mm, jolloin tapin halkaisija on 25 mm, jos levy on esitettyä paksumpi, niin tapin halkaisija ei kasva esitetystä.

Pintateräslevyn lommahduksen estämiseksi JEAC 4618-2008:2010 standardissa määritellään valitun vaarnatappityypin ankkurointilujuus vetoa

vastaan, joka on vähintään 4 % pintateräslevyn puristuslujuudesta (2.2-11). Ehdossa on kaksinkertainen varmuus normaaliin lommahdusvarmuuteen nähden. Ehto heijastuu vaarnatappien asennustiheyteen ja kokoon. Taulukko 7 esittää vaarnatappien materiaalivaatimukset ja terästyypille sallitut pitkän ja lyhyen ajan jännitykset.

**Taulukko 7. Vaarnatappien sallitut jännitykset (JEAC 4618-2008:2010, 1.5-5)**

Stud material type	Long term allowable tensile stress	Short term allowable tensile stress
SS 400 equivalent	1/1.5 of the short term value	235

Vaarnatappeja valmistetaan SS 400 tai vastaavasta teräsmateriaalista, jonka vaadittavat lujuudet ovat normaali lujuuksia (murtolujuus 400 ja myötölujuus 235 N/mm<sup>2</sup>). Tapit liitetään pintateräslevyyn hitsaamalla (robotti). Pintateräslevyn paksuuntuessa tulee kiinnittää huomiota tappien hitsaustekniikkaan. Työvaiheiden ja työstettävyyden helpottamiseksi suositellaan käytettäväksi vakiomateriaalisia ja -mittaisia (halkaisija) vaarnatappeja esimerkiksi rakennustyömaa-aikaisten korjausten ja muutosten onnistumiseksi.

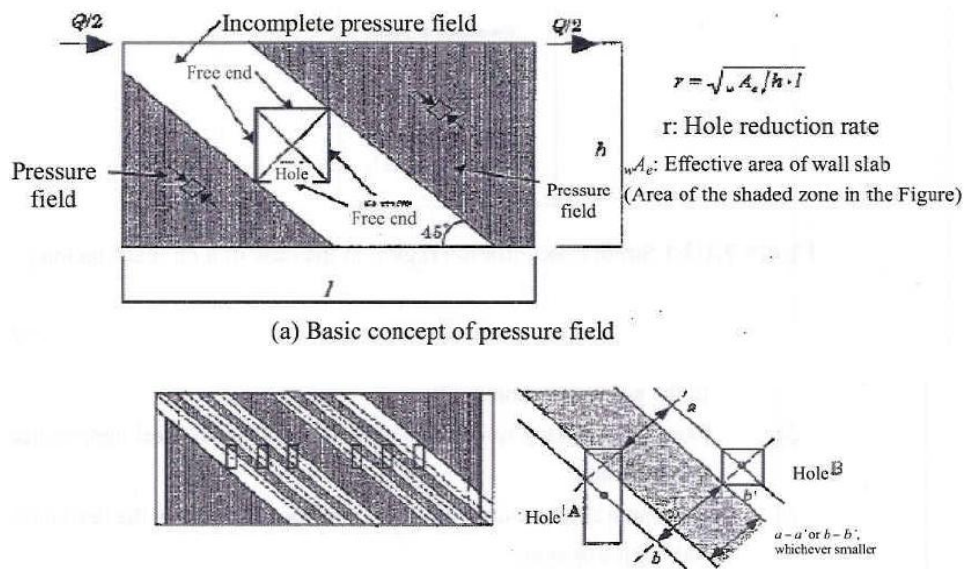
Vaarnatappien ja tartuntaraidoiteiden mitoituksessa ja asennustoleransseissa tulee varmistua myös elementtien asennustyön ja betonoinnin onnistuminen siten, että moduulia asennettaessa vaarnatappi ja tartuntaraidoite eivät keskenään ns. kanita ja että betonin runkoaineen raekoko mahtuu kulkemaan raidoiteiden välistä kaikkialle, niin ettei valutaskuja pääse muodostumaan.

#### Vahvisteet

JEAC 4618-2008:2010 standardissa vahvistemateriaalit valitaan siten, että sallitut jännitykset ovat enintään vaarnatappien myötölujuuden suuruisia. Esimerkiksi sidetanko, joka yhdistää vastakkaiset pintateräslevyt toisiinsa, mitoitetaan samalla menetelmällä ja samoilla materiaaleilla kuin vaarnatappi. Jotta sidetangot toimisivat yhtenäisesti vaarnatappien kanssa lommahdusta vastaan, niin sidetankojen lujuuden tulee olla vähintään sama kuin vaarnatappien. Poikkeuksena, että sidetankojen halkaisija voi olla suurempi kuin 25 mm. Vahvisteet valmistetaan vakioteräksestä. JEAC 4618-2008:2010 standardin taulukko 1.5.3-4 (1.5-5) esittää vahvikkeille määritellyt terästyypit ja niiden sallitut pitkän ja lyhyen ajan jännitykset. Jäykisteteteräksinä käytetään normaaleja teräslaatuja (murtolujuus 235—390 MPa). Vahvisteet liitetään pintateräslevyyn hitsaamalla. Rakennetta voidaan vahvistaa myös perinteisellä teräsbetoniraidoituksella.

#### Läpiviennit ja betoni

Sivujäykisteseinien läpivientien suunnittelussa seinän toiminta tulee varmistaa, koska maanjäristystilanteen jäykisteseinältä edellytetään toimintakyvyn säilyttämistä. JEAC 4618-2008:2010 standardissa läpiviennit mitoitetaan elastisen teoria mukaisesti kaavalla 2.2.3-3 (2.2-31). Läpiviennin halkaisija voi olla neliömäinen tai pyöreä. Kuva 25 esittää jäykisteseinissä läpivientien vaikutusta teholliseen alueeseen. Jäykisteseinän tehollinen alue on tummennettu ja valkoinen alue ei kannu kuormia.



Method determining the effective width of pressure field between holes

Note: the effective width of pressure field between holes should be the distance  $a'-a$  from the corner  $a'$  of the hole A to the straight line drawn through the center of the hole B in 45 degrees direction, or the distance  $b-b'$  from the corner  $b'$  of the hole B to the straight line drawn through the center of the hole A in 45 degrees direction, whichever smaller. The pressure field between the holes should be linear and act on the center between the respective centers of the holes A, B.

**Kuva 25. Jäykisteseinän kapasiteetin tehollinen alue (JEAC 4618-2008:2010, 2.2-30).**

JEAC 4618-2008:2010 standardissa esitetään yleisiä ohjeita jännityskeskittymien arvioimiseksi erikokoisille ja -muotoisille läpiviennille. Standardi ei esitä tarkasti suorakaiteen muotoisen läpiviennin sivujen suhteen keskinäistä vaikutusta, mikä on luonnollista, koska standardin analyysiosa ei ole siihen riittävä.

JEAC 4618-2008:2010 standardissa ei ole betonille mitoitusohjeita ja betonin mitoitusta käsitellään muissa JEAC perheen standardeissa. Betonina käytetään normaaleissa teräsbetonirakenteissa tunnettua C25/30 lujuusluokan betonia. Koska rakenteiden täytyy olla säteilyeristystarpeidenkin takia paksuja, niin alemman lujuusluokan betonin kapasiteetti riittää. Betonin lujuusluokka ja SC-rakenteen paksuus (1—3 m) ovat keskenään sopusuhteissa rakenteen kantavuustarpeiden kanssa. Toisinaan rakennepaksuuksien ollessa metrin luokkaa ei ole tarkoituksen mukaista käyttää korkeamman lujuusluokan betonia.

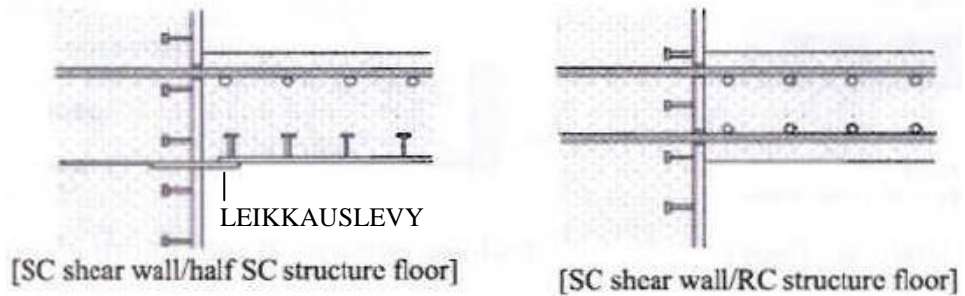
Seinä—väli- ja yläpohjaliitokset

SC-rakenteinen seinä voi liittyä ala-, väli- ja yläpohjarakenteisiin. Liitoskohtien materiaalit ovat normaaleja rakenneteräksiä ja vaadittavat lujuudet edellä esitettyjen materiaalimitoitusten mukaisia. Liitosten suunnittelussa tulee huomioida suojaetäisyydet ja valutaskujen muodostumisen estäminen.

JEAC 4618–2008:2010 standardissa välipohjaliitoksen mitoituksessa liitosalueella määritellään sekä todennetaan tappien ja jäykisteiden määrät, leikkausalueen teräkset sekä niiden sijainnit (2.2-51) ja asennuksen aikaiset liikkeet, kuten lattiarakenteen taipuminen (2.2-42). Jäykisteseinän leik-



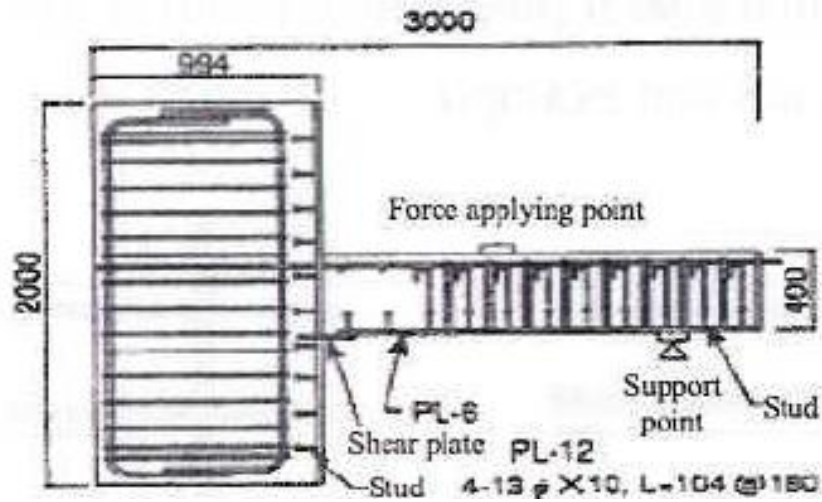
kausvoimien vastustuskyky pitää olla suurempi tai yhtä suuri kuin laatan välittämät leikkausvoimat. Mitoitusten varmistamiseksi suositellaan analyyseissä käytettävän menetelmäkokeista saatua käytännön tietoa. Kuva 26 esittää teräslevy—betoni-liittoseinärakenteen liittymistä HSC- ja RC-laattaan. Kuvan erityispiirre on HSC-laatan ja seinän liitoskohtaan asennettava leikkauslevy.



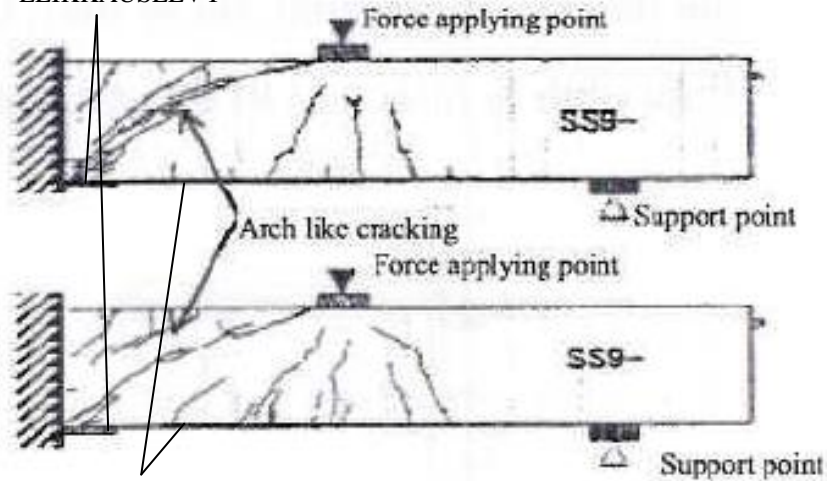
**Kuva 26. SC-seinä—välipohjaliitos (JEAC 4618-2008, 2.2-41).**

JEAC 4618-2008:2010 standardissa HSC-laatan kuormat ja jännitykset siirretään seinärakenteeseen leikkauslevyllä ja tartuntaraidoituksella. Leikkauslevy läpäisee seinän pintateräslevyn ja ankkuroituu seinärakenteen betoniin. Leikkauslevyn ulkonema on 50 mm ja vähintään 4 x levyn paksuus (2.2–43, kaava 2.2.3-13). Leikkauslevy välittää 40 % liitokseen kohdistuvista leikkausvoimista. HSC-laatan teräspohjalevy voidaan myös hitsata suoraan pintateräslevyyn (ilman leikkauslevyä). JEAC 4618-2008:2010 standardi kuitenkin suosittelee leikkauslevyn käyttämistä. Kuva 27 havainnollistaa seinän ja HSC-laatan liitoskohdan käyttäytymistä murtotilassa.

Teräslevy—betoniliittoseinärakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.



LEIKKAUSLEVY



PINTATERÄSLEVY

Kuva 27. SC-seinän ja HSC-laatan liitos murtotilassa (JEAC 4618-2008:2010, 2.2-42).

JEAC 4618-2008:2010 standardin liitoskohdan leikkausvoimien mitoitusmääreitä tarkennetaan kaavalla 5, jossa käytetään kapasiteetissa halkeilevalle betonille rohkeasti leikkauslevyn synnyttämää holvivaikutusta.

**Kaava 5. Leikkauslevyn tehollinen vaikutus liitoskohdassa (JEAC 4618-2008:2010, 2.2-47).**

$$Q_a = Q_{sp} + Q_{fr} \quad (\text{Explanation 2.2.3-15})$$

Where,

$$Q_{sp} = 3M_a / l_w \quad (\text{Explanation 2.2.3-16})$$

$$Q_{fr} = \phi_1 \cdot \mu \cdot s_{ca} \cdot f_t \quad (\text{Explanation 2.2.3-17})$$

$$M_a = Z_{sp} \cdot s_f \quad (\text{Explanation 2.2.3-18})$$

$$l_w = 4 \cdot t_{sp} \quad (\text{Explanation 2.2.3-19})$$

$Q_a$ : Allowable out-of-plane shear force of the wall and floor joint portion (N)

$Q_{sp}$ : Shear resistance of a shear plate when the shear plate is attached. It should be 40% or higher of the allowable out-of-plane shear force. (N)

$Q_{fr}$ : Friction resistance on the joint interface. When the shear plate is attached, it should be 60% or lower of the allowable out-of-plane shear force. (N)

$M_a$ : Allowable out-of-plane bending moment of the shear plate (N·mm)

$Z_{sp}$ : Cross section coefficient for the out-of-plane bending of the shear plate (mm<sup>3</sup>)

$s_f$ : Allowable stress for the out-of-plane bending of the shear plate (N/mm<sup>2</sup>)

$l_w$ : Load distribution length on the shear plate (mm)

$t_{sp}$ : Shear plate thickness (mm)

$\mu$ : Friction coefficient between steel plate and concrete on the joint interface and set as 0.7.

$s_{ca}$ : Rebar cross sectional area at the end and upper face of the floor slab (mm<sup>2</sup>)

$f_t$ : Allowable tensile stress of rebar (N/mm<sup>2</sup>)

$\phi_1$ : Reduction coefficient and set as 0.5 for long term and 1.0 for short term

Kaavassa leikkauslevyn kapasiteetin leikkausvastus tulee olla vähintään 40 % ja betoni saa tuoda kapasiteettia enintään 60 % pintateräslevyn sallituista leikkausvoimista. Kaavassa kannetaan leikkausvoimasta poikkeuksellisen suuri osuus raudoittamattomalla betonilla sekä lisäksi terästen ja betonin leikkausvoimat lasketaan yhteen, joka poikkeaa totutusta ajattelutavasta. Esimerkiksi perinteisen teräsbetonirakenteen leikkauskapasiteetin riittämättömyystilanteessa rakenne suunnitellaan niin, että raudoite yksin hoitaa leikkausvoiman.

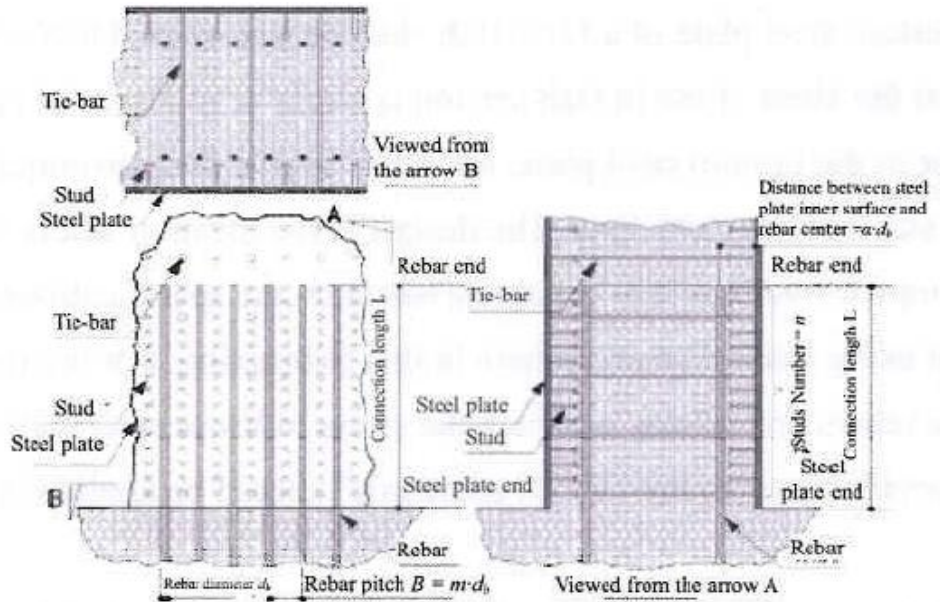
JEAC 4618-2008:2010 standardissa RC-laatan kuormien siirtokapasiteetti pohjautuu RC-N standardiin (JEAC standardiperheen normaali teräsbetonistandardi). Suomeen mahdollisesti tuleviin teräslevy—betoniliittoseinärakenteisiin ydinvoimalaitoksiin esitetään käytettäväksi RC-rakenteisia laatastoja (kuva 26b), jossa laatan kuormat ja jännitykset siirretään seinään normaaleilla teräsbetoniraudoitteilla ja leikkausmitoituksessa ei käytetä leikkauslevyä. SC-rakenteisen seinän ja RC-laatan liitoskohdan

Teräslevy—betoniliittoseinärakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.

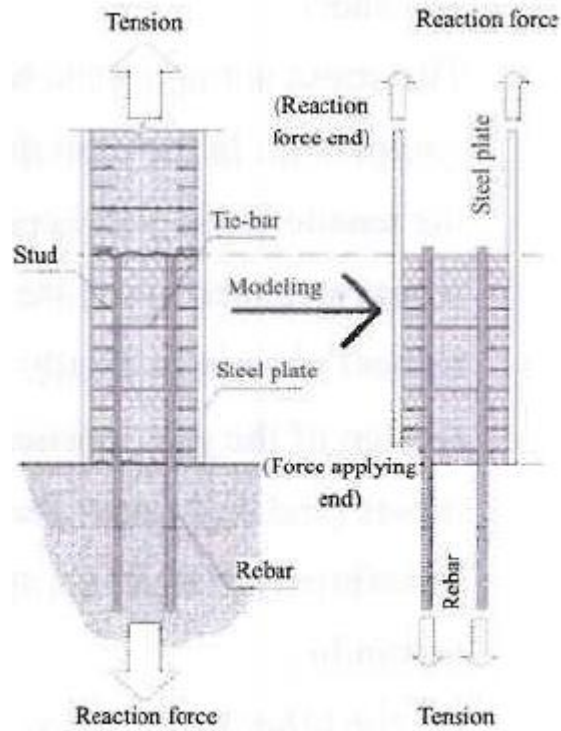
suunnittelussa tulee huomioida seinän pintateräslevyyn valmistettavat laatan ankkurointiterästen läpivientireiät.

Seinä—alopohjaliitos

JEAC 4618-2008:2010 standardissa alopohjanliitos mitoitetaan muiden japanilaisten normien mukaisesti (kuva 28).



[Example of the geometry of the connection using steel plate and rebars]



[Concept of specimen]

Kuva 28. SC-seinä—pohjalaattaliitos (JEAC 4618-2008:2010, 2.2-50).

Teräslevy—betoni-liitoseinärakenteen ja paikallavaletun pohjalaatan liitos on SC-rakenteen rajapinta muihin rakenteisiin ja tästä johtuen mitoituksessa käytetään JEAC 4618-2008:2010 standardin lisäksi esimerkiksi JEAC standardiperheen RC-N standardia. Suomessa liitoksen suunnittelussa voidaan soveltaa esimerkiksi kansallisia teräsbetonirakenteen suunnitteluohjeita, kuten BY:n betoninormikorttia n:o 7:aa joka käyttää lineaarista elementtimenetelmää halkeilevien teräsbetonirakenteiden rajatilamitoituksessa.

Kuvan 28 alapohjaliitos on tyypillinen teräsbetonirakenteisen seinän ja alapohjan liitos, jossa SC-rakenne ankkuroidaan alapohjaan harjateräksillä ja hakasraudoituksella. Alapohja vahvistetaan JEAC 4618-2008:2010 standardiin liittyvien muiden standardien mukaisella raudoituksella. Standardi edellyttää liitoksen murtolujuusmäärittelyn pohjautumista kokeelliseen tietoon (JEAC 4618-2008:2010, 2.2-49). Standardissa teräslevy—betoni-liittoseinärakenteen pintateräslevyille tulevat kuormat siirretään tartuntaraudoitukselle, josta voimat siirtyvät pohjalaattaan. Mitoituksessa normaali- sekä leikkausvoimat ja taivutus- että vääntömomentti voidaan jakaa sekä mitoittaa betonin ja teräslevyjen mukaisille puristus- että vetovyöhykkeille. Kokeellisesti tulee osoittaa, että voimien siirtyminen laattaan on tasaista ja laatan raudoitteiden tartuntakapasiteetti säilyy. (JEAC 4618-2008:2010, 2.2-50.)

SC-rakenteisen seinän vaarnatappien ja sidetankojen määrä ja harjaterästen poikkipinta-ala sekä sijoittelu mitoitetaan niin, että ne pystyvät siirtämään kokonaisvetojännityksen pintateräslevyille ilman rakenteiden myötämistä ja ankkuroinnin liukumia. (JEAC 4618-2008:2010, 2.2-51.)

#### Järjestelmä- ja laitekannakkeet

JEAC 4618-2008 standardi viittaa ankkurointikapasiteetin mitoituksessa standardiperheen teräsbetonirakenne ohjeisiin.

## 6 VALVONTA

### 6.1 Yleistä

Rakennusteollisuuden laadunvalvonnan pääperiaatteet, toteutus sekä hallinnointi liittyvät läheisesti yrityksen omaan laatustrategiaan ja yrityksen näkökulmasta sertifioitu laatujärjestelmä on kilpailuetu, joka pyritään pitämään luottamuksellisena tietona. Tästä seikasta ja rakenteen vähäisestä tietämyksestä Euroopassa tutkimukseen ei ollut saatavilla laadunvalvontaan liittyvää kirjallisuutta.

Laadunvalvontaa suoritetaan hankkeen kaikissa vaiheissa. Suunnittelun ohjaus ja valvonta vaiheen laadunvalvonnassa seurataan suunnittelun normiperustaista toteutumista ja sen tuloksia. Rakentamisen ohjaus ja valvonta vaiheen laadunvalvonnalla varmistetaan suunnitelmien mukainen rakentaminen. Käyttö- ja vastaanottovaiheen laadunvalvonnalla seurataan laitoksen suunnitelmien mukaista käyttöä.

Perinteisen rakentamisen mukaisesti ydinvoimalaitosrakennushankkeessa kokonaisvastuu on hankkeeseen ryhtyvällä. Teollisuusrakentamiseen verrattuna hankkeeseen ryhtyvällä on laajemmat ja tarkemmat turvallisuus- ja laatuvelvoitteet. Valvonta tapahtuu kansallisten sekä kansainvälisten lakien, asetusten, määräysten ja ohjeiden mukaisesti. Esimerkiksi turvallisuusluokan TL2 rakenteiden laadunvalvonnassa noudatetaan yleisesti käytettyjen ISO-laatustandardien lisäksi IAEA:n laatuohjeita. Hankkeeseen osallistuvista organisaatioista nimetään vastuulliset henkilöt (esim. suunnittelu- ja valvontaorganisaatioissa). Organisaatioilta edellytetään omaa sisäistä laadunvalvontaohjelmaa ja Suomen rakentamismääräyskokoelma edellyttää valvonnassa vaativille kohteille rakennuttajan ja rakentajan välillä käytettävän kolmatta osapuolta. Viranomainen määrittelee suunnittelijoilta, rakentajilta ja valvojalta vaadittavat kriteerit jotka noudattavat RakMK:n vaativiin kohteisiin edellyttämiä pätevyyskriteerejä. Pätevyyskriteerit esitetään YVL-ohjeissa.

### 6.2 Moduulirakentamisen laadunvalvonta

Moduulirakentamisen laatujärjestelmästä edellytetään selvyttä globaalien rakentamisen aiheuttamiin ongelmiin kuten erilaisten standardien ja materiaaliyhväksyntöjen yhteneväisyyteen. Luvanhaltijalta vaaditaan varmuus hankkeen laadullisista ohjaustoimista ja niiden tehokkuudesta. Laatuohjelmassa määritetään erilaisten ongelmatilanteiden ohjausmekanismit. Yleisesti tilaajan laadunvalvonnan ohjausmekanismit pohjautuvat sopi-

musosapuolten välisiin sopimusoikeuksiin sekä niiden noudattamiseen kuten erilaisiin maksuposteihin ja niiden velvoitteiden täyttämiseen.

Teräslevy—betoni-liittoseinärakenteinen suurmoduulirakentaminen muuttaa valvonnan kokonaispainopistettä valmistuksen ja rakennejärjestelmien arviointiin, rakennettavuuteen ja elinkaariajatteluun. Perinteisen rakentamisen laadunvalvontaan verrattuna suurmoduulirakentamisessa valvonta vaiheistuu ja sen myötä selkeytyy. Valvonta jakautuu moduuliosien esivalmistuksen, kokoonpanon, kuljetuksen, asennuksen ja täydennysrakentamisen kesken (liite 7). Valvonnan kriittisiä kohtia ovat tuotantoketjun toimivuuden varmistaminen, poikkeamatilanteiden hallinta, varaosien saatavuus ja valvonnan suorittaminen oikeaan aikaan oikeassa paikassa.

Perinteisen ydinvoimalaitosrakentamisen laatuohjelmaan verrattaessa suurmoduulirakentamisessa lisätään uusia tarkastustehtäviä. Laatusuunnitelmiin edellytetään lisäyksiä sekä selvityksiä lisäpiirustus, -asiakirja ja -valvonnan tarpeesta. Lisäksi laatuohjelmasta poistetaan vanhoja tarkastustehtäviä kuten perinteisiä teräsbetoinnin laadunvalvontatehtäviä, esimerkiksi muottityön valvontaan liittyviä tehtäviä. Ohjelman päivitykset määräytyvät viranomaisten sekä suunnittelijoiden tarpeista ja niille suunnitellaan sekä hyväksytään tarkastusmenettelyt.

### 6.3 Viranomaisvalvonta

Ydinenergiain yleisenä periaatteena on, että ydinenergian on yhteiskunnan kokonaisedun mukaista ja siihen sisältyvät esimerkiksi rakentamisen, ylläpidon ja käytön jälkeiset kustannukset. Säteilyturvakeskuksen valvonnan perimmäisenä tarkoituksena on säteilyn vahingollisten vaikutusten estäminen ja rajoittaminen. Valvonnalla toteutetaan SAHARAN periaate säteilyn ja ydinonnettomuuden estämisestä hyvin suurella varmuudella. Käytännössä tämä merkitsee, että ydinvoimalaitoksesta tehdään niin turvallinen, kuin se kohtuullisilla toimenpiteillä on mahdollista. Toisinsanoin periaatteella ei minimoida kuluja, vaan lisäsatsaukset turvallisuuteen voidaan lopettaa, kun niillä ei saada enää vastaavaa lisäturvallisuutta. Ydinenergiain mukaan ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta vastaa luvanhaltija ja käytön turvallisuudesta STUK. Ydinvoimalaitosturvallisuuden varmistamisen tärkein erityistavoite on estää reaktorionnettomuus. STUK varmistaa, että ydinvoimalaitoksen käyttöä varten on riittävät turvallisuusedellytykset ja -kulttuuri. STUK valvoo yksityiskohtaisesti ydinvoimalaitoksen rakentamista. (Sandberg 2004, 90—93 ja 386—389.)

Ydinvoimalaitos-hankeen viranomaisvalvonta toteutetaan lainmukaisilla viranomaisorganisaatioilla jossa Säteilyturvakeskus valvoo ydin- ja säteilyturvallisuuden vaikuttavaa rakentamista. Keskeisimpänä Suomessa noudatettavia laadullisia normeja ovat Ydinenergiainlaki, palo- ja rakennuslainsäädäntö, valtioneuvoston asetukset ja STUK:n laatimat ohjeet.

STUK:n normit täyttävät IAEA:n, WENRA:n ja OECD:n asettamat kansainvälisten sopimusten vaatimukset.

Perinteisen teollisuusrakennuksen rakennusvalvontaan verrattuna ydinvoimalaitoksen rakentamisvaiheen viranomaisvalvonnan peruseriaatteen ovat samat. Itse viranomaistarkastuksissa rajoitetaan vain olennaisiin asioihin. Viranomaisen edellyttää hankeosapuolien sisäiseltä valvonnalta selkeyttä ja läpinäkyvyyttä. Viranomaisvalvonta ei ole osa tuotantoprosessia eli STUK valvoo organisaatioiden sisäistä valvontaa ja teoriassa viranomaiselle ei pitäisi kantautua teknisten puutteiden havaitsematta jättämistapauksia. Suurmoduulirakentamisessa viranomaiselta vaaditaan käsitys teräslevy—betoni-liittoseinärakentamisen vaatimista kokeista, materiaaleista ja todentamistavoista esimerkiksi kokoonpanovaiheen viranomaisvalvonnassa huomioidaan kokoonpanotehtävät sekä laatuohjelmän virhetilanteiden ohjaustoimet. Viranomaisella on velvollisuus tarpeen mukaan hankkia ulkopuolisilta asiantuntijoilta täydentävää osaamista.

Viranomaisen edellyttää suunnittelijoilta ensimmäisenä laatusuunnitelmaa joka on osa rakennesuunnitelmaa. Valmistusorganisaation laatusuunnitelmalta odotetaan selvitystä laadunvalvonnan kohteista ja niille tehtävistä toimenpiteistä, kuten tarkastuksista ja testauksista. Laadunvalvonta ohjeet sisältävät myös tulosten tallentamismenettelyn. Laatuohjelmassa määritellään viranomaisten läsnäolovelvoitteelliset erityistyövaiheet (liite 8). Viranomaisen laadunvalvontavaatimukset määritellään YVL-ohjeissa. Esimerkiksi STUK tarkastaa turvallisuusluokkien 2 ja 3 betoni-, teräs- ja liittorakenteiden suunnitelmat, tekee betonoinnin aloitusvalmiustarkastuksia sekä teräs- ja liittorakenteiden teräsosien rakennetarkastuksia. (YVL-ohjeet E.6, YVL-ohjeiden luonnos versioiden elämisen seurauksena tarkempaa viittausta ei tehdä). Betoni- ja teräsrakenteiden tarkastusyksityiskohtia käsitellään tarkemmin E.6:n liitteissä A ja B. Liitteissä betonia sekä terästä käsitellään erillisinä materiaaleina ja teräs—betoniliittoseinärakenteiden laadunvalvonnassa sovelletaan molempia liitteitä (E.6).

#### Suunnitteluvaatimusten viranomaisvalvonta

Viranomaisen valvoo suunnitteluvaatimusten toteutumista neljässä päävaiheessa: periaatepäätös-, rakentamislupa-, rakentamis- ja käyttöluvavaiheissa. Periaatepäätösvaiheessa suunnitteluvaatimusten toteutumisen edellytyksistä annetaan selonteko jossa määritellään käytettävät määräykset, ohjeet, standardit ja niiden soveltamisalat esimerkiksi JEAC 4618-2008:2010 standardin käyttöalue ja sen soveltuvuus suunnitteluun. Rakentamislupavaiheessa viranomaisen hyväksyy tarkemmat kuvaukset standardin käyttökohteista ja niihin liittyvät hyväksymiskriteerit. Vaiheen suunnitteluvaatimuksissa luvanhaltija toimittaa alustavan turvallisuusselosteen järjestelmäkuvauksineen että mahdolliset aihekohtaiset raportit sekä alustavat suunnittelu- ja laadunvarmistusohjeet. Selosteen avulla varmistetaan periaatteiden hyväksyttävyyden ja toteutusmahdollisuudet (Olki-  
luoto 4 ja Hanhikivi 1 lähestyvät ajallisesti tätä vaihetta).



Suunnitteluvaiheen valvonta toteutetaan suunnittelun elinkaaren jokaisessa vaiheessa. Suunnittelun valvonnalla on suurin ja tärkein osuus hankkeen laadullisten kriteerien onnistumisen takaamiseksi. Vaiheen valvonnan suorittavat hankeosapuolet omien hyväksytyjen laatuohjelmien avulla. Valvonnalla varmistetaan mm. suunnittelun lähtötietojen oikeellisuus ja määrä esimerkiksi maaperätutkimustulostarkasteluilla. Laatuohjelma varmistaa, että lähtötietoja analysoidaan kattavasti ja analyysimenetelmät ovat oikeita. Tarkastuksilla varmistetaan, että analyysien tulokset ovat oikeita ja tulosten tulkinta on oikein sekä niistä tehdyt johtopäätökset ovat realistiset. STUK hyväksyy kriittisten työvaiheiden suunnitelmat ja suunnitteluasiakirjat. TL2 rakenteiden valmistus voidaan aloittaa, kun luvanhaltija on hyväksynyt suunnitelmat ja lähettänyt ne STUK:lle. Rakennetarkastukset tehdään STUK:n hyväksymien rakennesuunnitelmien mukaisesti. Tällaisia suunnitelmia ovat mm.:

- rakennesuunnitelmat
- betonityösuunnitelmat
- jännitys ja injektointitöistä laadittavat työnsuoritus suunnitelmat ja
- laadunvalvonta suunnitelmat.

Rakentamisvaiheessa valvotaan suunnitelmien toteutumista ja yksittäisten työsuoritteiden onnistumista. Suunnitelmat luovutetaan viranomaiselle tarkastettavaksi hyvissä ajoin ennen rakentamisen tai asentamisen aloittamista. Esimerkiksi Betonirakenteiden valmistus perustuu STUK:n hyväksymisiin suunnitteluasiakirjoihin sekä yksittäistä työvaihetta tai työtä koskeviin suunnitelmiin. Turvallisuusluokkiin TL2 ja TL3 kuuluvien betonirakenteiden betonointi, pinnoitus- ja maalaustyöt saa aloittaa vasta, kun STUK on hyväksynyt niitä koskevat asiakirjat (E.6). Rakentamisen aikaiselta suunnittelulta vaaditaan täydennetyt järjestelmäkuvaukset, suunnittelu- sekä laadunvarmistusohjeet ja suunnitteluasiakirjat soveltuvuusarvoineen. Asiakirjat sisältävät vastaavien suunnittelijoiden pätevyyselosteet, piirustukset, analyysit, suunnitteluvaiheen riskianalyysit ja käytönaikaisten tarkastusten periaateohjelmat.

Työmaajohdolla on vastuu yksittäisten rakennustöiden laadullisesta valvonnasta ja viranomaisen toteaa valvonnan laadullisesti sekä määrällisesti suoritetuksi. Johdolla on selvyys menettelytavoista esimerkiksi betonointiongelmassa tai moduulien keskinäisissä sopimattomuus tilanteissa. Organisaatiolla on selvyys ongelmamoduulien korjaustavasta ja -paikasta ja se hallitsee moduulien vaihtotilanteet ja niiden heijastumisen kokonaisaika-tilaan. Kriittisissä ja hallinnollisissa työvaiheissa viranomaisen on läsnä varsinaisessa työvaiheessa. Kriittiset ja hallinnolliset työvaiheet määritellään YVL-ohjeissa.

Kuvassa 29 kokoonpanohenkilöstö valvoo Kashiwazaki Kariwa-7:n SC-rakenteisen seinän hitsaustyön laatua ja viimeistelee raudoiterobotin 3D-suunnitelmien mukaisesti hitsaamaa raudoitusta.

Teräslevy—betoniliittoseinärakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.



Kuva 29. SC-rakenteisen seinän esivalmistus ja kokoonpano (Advance., 10).

Käyttölupavaiheen suunnitteluvaatimuksena on lopullinen turvallisuusseloste sekä siihen liittyvät aihekohtaiset raportit analyysineen ja erinäiset turvallisuustekniset käyttötiedot. Lopullisessa turvallisuusselosteessa kuvataan järjestelyt siten kuin ne on toteutettu ja miten niitä seurataan. Ydinvoimalaitoksen käytön aikana rakennuksia sekä rakenteita valvotaan silmämääräisesti ja erilaisilla tutkimusmenetelmillä kuten suunnitelmallisella näytteiden otolla ja ainetta rikkomattomin koestuksin esimerkiksi allasrakenteiden ikääntymistä seurataan tiiveys ja vuodonvalvonta kokeilla. Käytön aikaisen jatkuvan turvallisuusarvioinnin lisäksi tehdään kymmen vuoden välein perusteellinen ja kattava kokonaisarviointi. Kymmenvuotistarkastuksessa huomioidaan mm. tekniikan ja tieteen kehittyminen, kokemukset kyseisestä laitostyyppistä ja muuttuneet turvallisuusvaatimukset. Esimerkiksi Loviisan reaktoreiden reaktorisuojarakennuksia valvotaan vuosittain silmämääräisesti ja keskimäärin neljän vuoden välein tiiveyskokeilla ja Olkiluodon esijännitetystä teräbetonirakenteesta valvotaan esijännityksen säilymistä, betonirakenteiden muodonmuutoksia ja pitkäaikaiskestävyyttä. Yleisesti laitosten teräsrakenteissa valvotaan kantavien rakenteiden ympäristöolosuhteita ja liikuntasauvoja. (Sandberg 2004, 386—389.)

## 7 YHTEENVETO

Tutkimus osoittaa, että Suomen ydinvoimalaitosrakentamisessa voidaan seuraavin seikoin soveltaa suurmoduulirakentamisessa käytettyä japanilaista JEAC 4618-2008:2010 standardin teräslevy—betoniliittoseinärakennetta. Standardi käsittelee rakenteen suunnittelua seismisestä näkökulmasta.

Suomessa olevat ydinvoimalaitosrakennukset on rakennettu käyttöpaikkaansa massiivisina teräsbetoni- ja jännebetonirakenteina. Perinteistä rakentamistapaa on esitetty korvattavaksi suurmoduulirakentamisella, jota voidaan hyödyntää ydinvoimalaitoksen kaikissa jännittämättömissä reaktorisaarekkeen rakenteissa lukuun ottamatta primäärisuojarakennuksen suojakuori- (liner), reaktorikuilu- ja perustusrakenteita, jotka suositellaan laadun varmistamiseksi rakennettavaksi perinteisillä rakennusmenetelmillä käyttöpaikalleen.

Rakenneteknisesti ydinvoimalaitoksen merkittävimmät rakenteet ovat primääri- ja sekundäärisuojarakennus, josta ydin- ja säteilyturvallisuuden kannalta tärkein on primäärisuojarakennus, jonka tehtävänä on estää mahdollisten onnettomuuksien aiheuttamat säteilypäästöt ympäristöön. Primäärisuojarakennuksen mitoituksen keskeisimmät seikat ovat painevesireaktorissa paineenalennusjärjestelmän ja suojarakennuksen tilavuuden valinta ja kiehutusvesijärjestelmässä vedynmuodostuksen aiheuttamien vety-palojen ja -räjähdysten hallintajärjestelmän valinta. Esimerkiksi Loviisan reaktoreissa tehdyt valinnat ovat suoraan vaikuttaneet primäärisuojarakennuksen ainevahvuuksiin. Sekundäärisen suojarakennuksen päätehtävä on suojata laitosjärjestelmiä ulkoisilta uhilta ja muodostaa alipaine primäärisuojarakennuksen ympärille.

Ydinvoimalaitossaarekkeen rakennesuunnittelussa käytetään samoja kuormia kuin perinteisemmässä teollisuusrakentamisessa. Tiukempien turvallisuusvaatimusten seurauksena kuormia analysoidaan tarkemmin ja laajemmin. Rakenteiden mitoituksessa keskeisimpiä huomioitavia kuormia ovat maanjäristyskuormat ja voimalaitoksen käyttötilojen poikkeamien aiheuttamat kuormat.

Suurmoduulirakenne pohjautuu JEAC 4618–2008:2010 standardissa esitettyyn teräslevy—betoni-liittoseinärakenteeseen, joka koostuu esivalmistetuista osista (pintateräslevy, vaarnatapit, vahvisteet, läpiviennit, kannakkeet ja liittymät). SC-rakenteen esivalmistettujen komponenttien mitoitus toteutetaan luvussa 5.4 JEAC 4618-2008:2010 standardin mukaisesti. Standardissa esitettyjä SC-rakennetyyppejä ovat HSC- ja SC-rakenne ja niissä standardi keskittyy vaarnatappivahvisteisiin rakenteisiin. Standardissa pintateräslevyn ja SC-rakenteisen seinän kokonaispaksuuden suhde määrittelee rakenteen murtotavan. Seinärakenteessa teräksen osuuden kasvassa teräksen kapasiteetti kasvaa ja rakenteen toiminta muistuttaa entistä

enemmän pelkistettyä teräsrakennetta ja päinvastaisessa tilanteessa teräsbetonirakennetta. JEAC 4618-2008:2010 standardissa suunnitteluvarmuuden hallitsemiseksi suunnittelussa pitää huomioida haurasmurtomekanismit ja suunnittelutilanteesta riippuen haurasmurtomekanismin varmuustaso pitää olla vähintään 1—2 kertaa vastaavien rakenneosien lujuuteen nähden (2.3-1) ja yli 40 mm paksuissa pintateräslevyrakenteissa rakenteen toiminta ja mitoitus tulee varmistaa menetelmäkokeilla (seinärakenteen paksuus 1,2—8 m).

JEAC 4618-2008:2010 standardin soveltaminen tulee selventää käytettävien rakenteiden osalta ja selvitykseen sisällyttää kaikki valvontaan liittyvät tehtävät koko lupaprosessin aikana. Suunnitteluohjeessa tulee esittää rakennekohtaisesti käytettävien standardien soveltaminen ja soveltamisala esimerkiksi JEAC 4618-2008:2010 standardin liittyminen EN-standardiin tai japanilaiseen standardiperhe-kokonaisuuteen kuten ripojen, sidetankojen, läpimenevien vahvisteiden sekä seinärakenteen alapohja- ja teräksisten huoltotasojen liitosten mitoituksessa.

Vaikka uusien suunnitteluvälineiden myötä erilaisten kuormien ja kuormitusyhdistelmien aiheuttamien jännitysten ja muodonmuutosten analysointi on JEAC 4618-2008:2010 standardin menetelmiä tarkempaa, niin silti standardin karkeita käsin laskenta tuloksia tarvitaan esimerkiksi varmistustarkastuksissa.

## LÄHTEET

### STANDARDIT

JEAC 4618-2008. 2010. Technical Code for Aseismic Design of Steel Plate Reinforced Concrete Structure, Viitattu 28.10.2013

### KIRJALLISUUSLÄHTEET

Toimittanut Sandberg J. 2004, Ydinturvallisuus, Hämeenlinna: STUK, 41—196, 362—365 ja 386—404

Työ- ja Elinkeinoministeriön julkaisuja, energia ja ilmasto, Kansallinen ydinvoimalaitosten turvallisuustutkimus 2011—2014, Uuden tutkimusohjelman SAFIR2014 runkosuunnitelma, nro 49/2010

### STUK JA MUUT VIRALLISLÄHTEET

Akira Kaneuji, Yutaka Okuda, Kiyoshi Hara, Hiroyuki Masumoto: Feasibility of Concrete Filled Steel (SC) Structure for Reactor Building (IASMIRT 10\_DC\_250324 EN 6.pdf)

CIB Publication 354, CIB TG57-Industrialisation in Construction, World Building Congress May 2010 Sanford, UK, 38—51

STUK: Ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu runkorakenteet ja paloturvallisuus 2011, pdf-kalvosarja

YVL ohje A.5 Ydinlaitoksen mekaaniset laitteet ja rakenteet, Valmistuksen valvonta

YVL ohje A.8 Ydinlaitoksen ikääntymisen hallinta.

YVL ohje B.1 Ydinlaitoksen turvallisuussuunnittelu.

YVL ohje B.2 Ydinlaitosten järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden luokittelu.

YVL ohje B.6 Ydinvoimalaitosten suojarakennus.

YVL ohje B.7 Varautuminen sisäisiin ja ulkoisiin uhkiin ydinlaitoksissa.

YVL ohje B.8 Ydinlaitosten palontorjunta.

YVL ohje C.1 Ydinlaitosten rakenteellinen säteilyturvallisuus ja säteilymittaukset.

YVL ohje E.6 rakennukset ja rakenteet.

Toimittanut Sorri J. 2013, Moduulirakentaminen: Teräskennoteknologian mahdollisuudet, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos Rakennustuotanto ja -talous Raportti 14. Tampere: TUT

Teräslevy—betoniliittoseinärakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.

---

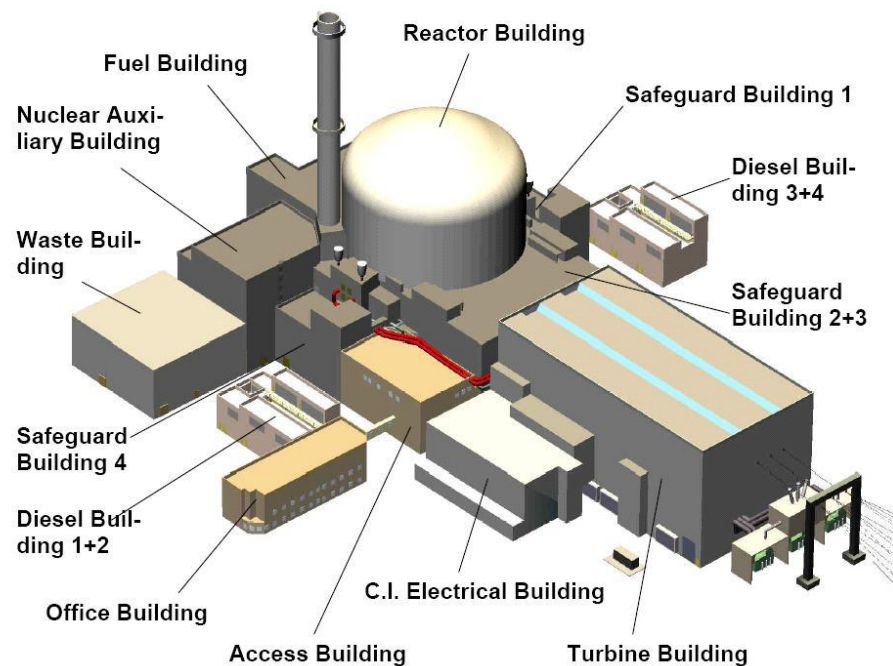
INTERNET

Advanced Construction Methods for New Nuclear Power Plant, Viitattu 23.10.2013. [www.iaea.org/About/Policy/.../gc53inf-3-att4\\_en.pdf](http://www.iaea.org/About/Policy/.../gc53inf-3-att4_en.pdf)

YDINVOIMALAITOSALUEEN RAKENNUKSET

Liite 1

- reaktorirakennus (Reactor Building)
- ydinpolttoainerakennus (Fuel Building)
- apurakennus (Nuclear Auxiliary Building)
- ydinjäterakennus (Waste Building)
- turbiinirakennus (Turbine Building)
- sähkörakennus (C.I. Electrical Building)
- dieselerakennus 1—4 (Diesel Building)
- turvallisuuslohkorakennus 1—4 (Safeguard Building)
- toimistorakennus (Office Building)
- sisäänkulkurakennus (Access Building).



Periaatekuva OL 3 ydinvoimalaitossaarekkeen rakennuksista (Ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu, 26)

### Rakennesuunnittelun kannalta keskeisimmät YVL-ohjeet

ydinlaitosten rakentamistoiminta	A.5
ydinvoimalaitoksen ikääntymisen hallinta	A.8
ydinvoimalaitoksen turvallisuussuunnittelu	B.1
ydinlaitosten järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden luokittelu	B.2
ydinvoimalaitosten suojarakennus	B.6
varautuminen sisäisiin ja ulkoisiin uhkiin ydinlaitoksissa	B.7
ydinlaitoksen palontorjunta	B.8
ydinlaitosten rakenteellinen säteilyturvallisuus ja säteilymittaukset	C.1
ydinlaitoksen rakennukset ja rakenteet	E.6

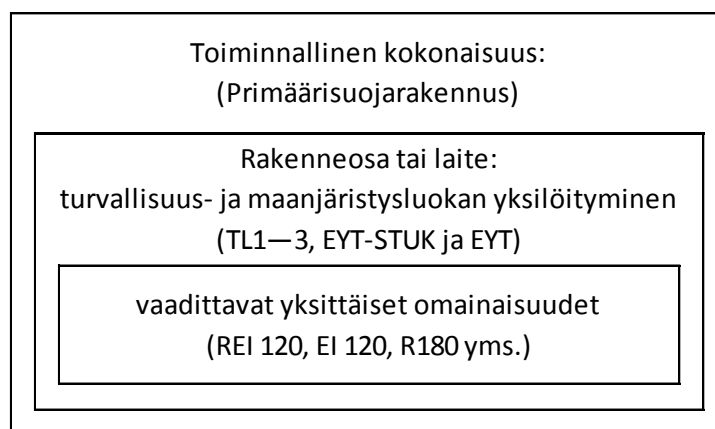
#### Ydinlaitoksen rakennukset ja rakenteet (E.6)

Ohje käsittelee sekä suunnittelu- ja organisaatiovaatimuksia että pätevyys ja suunnittelumenetelmiä. E.6 esittää vaatimuksia betoni-, teräs- ja liittorakenteiden hyvälle suunnittelulle sekä viranomaisille toimitettavista asiakirjoista että viranomaisvalvonnasta. Esimerkiksi turvallisuusluokkien 2 ja 3 rakenteet kuuluvat RakMK seuraamusluokkaan CC3, rakenteiden suunnittelu tapahtuu vaatavuusluokan AA mukaisesti.

#### Ydinlaitosten, järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden luokittelu (B.2)

Ydinvoimalaitosrakenteiden turvallisuusluokittelun lähtökohtana on laadullisten tarkastusten hallitseminen ja ohjaaminen. Turvallisuusluokitus määrittelee STUK suorittaman valvonnan laajuuden. Luokittelu mahdollistaa tärkeille laitteille, rakenteille ja järjestelmille riittävät tarkastukset, arvioinnit ja testaukset. Hierarkkisesti tarkentuvassa luokittelussa kokonaisuus tarkennetaan; järjestelmään, rakenteeseen, ja vaadittuihin yksittäisiin turvallisuusominaisuuksiin (esim. TL1—3 ja REI).

#### **Turvallisuus perusteinen rakenneluokittelutaulukko**



Turvallisuusluokitus perustuu turvallisuusanalyysiin (esim. maanjäristys ja palo) jossa kaikki rakenteet ja laitteet sisältyvät johonkin kokonaisuuteen. Esimerkiksi primäärisuojarakennuksen sisällä olevan teräslevy-



Teräslevy—betoniliittoseinärakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.

betoni—liittoseinärakenteen turvallisuusluokka on TL3 ja maanjäristysluokka S1 sekä palonkestoluokka REI 120.

Ydinvoimalaitosrakenteilla korkein turvallisuusluokka on kaksi (TL2) jossa rakenteilta vaaditaan poikkeamatilanteissa eheyttä ja tiiveyttä kuten radioaktiivisten aineiden leviämisen estoa. Luokan rakenteita ovat reaktorin suojarakennus (liner) ja suojarakennuksen TL1 toimintoihin liittyvät rakenteet. (primääripiirin putkistotuet). Luokkiin TL2 tai TL3 luokitellaan käytetyn ydinpolttoaineen siirtoon tarkoitettut käytävät ja tilat. Muiden reaktorisaarekkeen rakenteiden turvallisuusluokka on TL3. Reaktorisaarekkeen ulkopuoliset rakennukset ovat yleensä EYT-STUK tai EYT.

Luokiteltavan kohteen yksittäisiä vaadittavia ominaisuuksia on esimerkiksi maanjäristyskestävyys, jossa rakenne- tai osa luokitellaan kestävyysvaatimusten perusteella kolmella maanjäristysluokalla: S1, S2A ja S2B. Esimerkiksi primäärisuojarakennuksen sisäpuoleiset rakenteet kuuluvat, turvallisuusluokkaan TL3 ja maanjäristysluokkaan S1.

#### Ydinvoimalaitoksen suojarakennus (B.6)

Ohje esittää suojarakennukselle suunnitteluvaatimuksia laitoksen eri käytötiloissa esimerkiksi rakenteille kohdistuvia paine- ja lämpövaatimuksia kuten eniten kuormittavassa onnettomuustilanteessa maksimipaineeseen lisätään 10 % marginaali laskentamenetelmien epävarmuudesta johtuen.

#### Varautuminen sisäisiin ja ulkoisiin uhkiin (B.7)

Ohjeessa asetetaan suunnitteluvaatimuksia erilaisille kuviteltavissa oleville uhille. Ohje esittää vaatimuksia mm. layout-suunnittelulle. Esimerkiksi tila- ja sijoitussuunnittelussa on otettava huomioon erityisesti ohjeissa E1, E2 ja F2 esitetyt vaatimukset.

#### Ydinlaitoksen palontorjunta (B.8)

Ohje täydentää ympäristöministeriön vaatimuksia (E1) rakenteellisen paloturvallisuuden toteuttamisesta ja ne ovat yhteneväiset tai tiukempia kuin RakMK:n vaatimukset. Ydinvoimalaitoksen kantavissa rakenteissa käytetään yleisesti palonturvallisuusluokkaa REI120, esimerkiksi turvallisuuslohkon erottelevilta rakenteilta vaaditaan EI-M120 osastointivaatimus.

#### Ydinlaitoksen rakentamistoiminta (A.5)

Rakenteiden turvallisuusvaatimukset täytetään elinkaariajattelulla hankkeen jokaisessa vaiheessa.

#### Ydinvoimalaitoksen ikääntyminen (A.8)

Ikääntymisen riskit pyritään estämään jo suunnitteluvaiheessa. Ohje asettaa suunnitteluvaatimuksia käyttö- ja kunnossapitosuunnitelmiin. Mittausmenetelmiä ovat mm. erilaiset viruma-, karbonatisoitumis- ja rapauttamamittaukset. Esimerkiksi teräslevy—betoni-liittoseinärakenteissa rakennetta seurataan silmämääräisesti ja mittausperäisesti halkeamien- ja pinnoitteiden osalta. Ikääntymisen suunnittelussa huomioidaan varaosahuollon toteutus, muutostyöt, turvallisuusselosteen osana toimitettavat asiakirjat ja viranomaisvalvonta. Ikääntymissuunnitelmat sisältävät ikääntymisen

hallintaohjelman, joka kattaa käyttöiän ajan turvallisuudelle tärkeät laitososat. Rakenne on oltava kunnossapidettävissä. Rakenteille määritellään vähimmäiskäyttöikä. Ikääntymisen vaikutuksista huolimatta rakenteilta vaaditaan tarvittava toimintakyky. Ikääntymisen hallinnassa esimerkiksi kantavien teräslevy—betoni-liittoseinärakenteiden eheys on oltava tarkastettavissa rakenteita rikkomattomilla menetelmillä kuten ultraäänitutkimuksilla. Ydinvoimalaitoksilla on tunnettu mm. MIRA laitteisto, jossa usealla ultraäänilähteellä samaan aikaan kuvataan rakenne siten, että rakenteesta saadaan kolmiulotteinen kuva. Tietokonepohjaisilla ultraääniaaltojen analyysimenetelmillä voidaan tarkastella erilaisia vaurioitumismuotoja ja rakenneosien sijaintia. Valmistuksen aikana rakenteista otetaan talteen vertailukappaleet (esim. betoninäytteet). Jäykistetysterästen rikkoutumisen välttämiseksi suunnitteluvaiheessa rakenteisiin määritellään tutkimusreikien porauspaikat. Edellä esitettyjen kolmen tutkimusmenetelmän keskinäisellä vertailulla tehdään rakenteiden ikääntymisanalyysejä.

#### Ydinvoimalaitoksen turvallisuussuunnittelu (B.1)

Ohjeessa määritellään turvallisuuskriteerit suunnittelulle. Kriteerit sisältävät suunnittelun hallintaprosessit, joissa määritellään suunnittelun tarkistus- ja laadunvalvontamenetelmät. Turvallisuussuunnittelulla asetetaan vaatimuksia turvallisuustoimintojen luotettavuuden varmentamiseksi. Tyypillinen rakenneosakokonaisuudelle asetettu suunnitteluvaatimus on Liner-rakenteen tiiveyteen liittyvät vaatimukset. Turvallisuussuunnitelmassa määritetään STUK:lle toimitettavat asiakirjat ja eri lupavaiheiden viranomaisvalvonta.

#### Ydinlaitoksen rakennukset ja rakenteet (E.6)

Ohjeessa esitellään suunnitteluvaatimukset, organisaatiovaatimukset, pätevyudet ja suunnittelumenetelmät. Suunnitteluvaatimuksissa esitetään ohjeet esimerkiksi betoni-, teräs- ja liittorakenteiden hyvälle suunnittelulle ja viranomaisvalvonnalle sekä viranomaisille toimitettavista asiakirjoista.

Ohje määrittää ydinvoimalaitoksen:

- rakenteet, niiden tyypit ja niistä seuraavat suunnitteluvaatimukset
- suunnittelu- ja toteutusprosessit sekä organisaatiot
- suunnittelijoilta vaadittavat pätevyudet
- suunnittelumenetelmät.

Rakennussuunnitteluvaatimuksissa esitetään vaatimuksia:

- suunnitteluohjeille
- toteutussuunnitelmien organisaatioselvityksille
- käytettäville määräyksille
- ohjeille ja standardeille
- rakennelaskelmille ja analyyseille
- piirustuksille
- toteutuseritelmille
- työselostuksille
- laatusuunnitelmille
- käytönaikaisille rakennevalvonnan suunnitelmille

Teräslevy—betoniliittoseinärakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.

---

- soveltuvuusarvioille.

Betonirakenteiden osalta esitetään suunnitteluvaatimuksia betonirakenteiden:

- toteutukselle sisältäen rakennustöiden toteuttajaorganisaation
- toteutuksen suunnittelulle
- betonirakenteiden materiaaleille ja tuotteille
- betonivalmisosille
- betonielementeille.

Teräsrakenteiden osalta esitetään vaatimuksia rakenteiden toteutuksesta:

- rakenteiden toteuttajaorganisaatiolle
- teräs- ja liittorakenteiden toteutuksen suunnittelulle
- teräs- ja liittorakenteiden materiaaleille ja tuotteille
- betoni ja teräsrakenteiden maalaus- ja pinnoitustyölle.

Ohje määrittää suunnitteluvaiheet ja niihin liittyvät suunnitteluasiakirjat sekä erikseen STUK:lle toimitettavat asiakirjat:

- periaatepäätösvaiheessa
- rakentamislupavaiheessa
- rakentamisen aikana
- käyttölupavaiheen aikana
- käytössä olevan ydinvoimalaitoksen rakentamisjärjestelmien muutosten aikana.

Ohjeessa määritellään STUK suorittama valvonta, joka sisältää mm.:

- betonoinnin aloitusvalmistustarkastukset
- injektioinnit
- jännitykset
- teräsrakenteiden rakennetarkastukset
- toteutuksen seurantatarkastukset
- tarkastuslaitosten hyväksymisen tiedottamisen STUK:lle
- käyttöönottotarkastukset
- käytön aikaiset tarkastukset (määräaikaistarkastukset sekä korjaus- ja muutostyöt).

Taulukon 1 rakenteisiin kohdistuvat kuormat ja kuormitusyhdistelmät:

- pysyvätkuormat (Dead)
- jännityskuormat (Pre-stress)
- paine- ja lämpökuormat (Test Pressure & Temperature)
- suunnittelupaine ja -lämpö (Design Pressure & Temperature)
- toimintapaine ja -lämpö (Operating Pressure & Temperature)
- normaali putkikuorma (Normal Pipe Reaction)
- muuttuvat paine- ja lämpökuormat (ADS Action Pressure and Temp.)
- Hydrodynaamiset kuormat (Hydrodynamic loads)
- Normaali tuulikuorma (Basic Wind)
- Äärimmäinen tuulikuorma (Extreme Wind)
- Suunniteltuperusteinen maanjäristys (DBE)
- Suunnitteluperustainen muuttuvakuorma (DBA pressure & Temperature)
- paikallisvaikutteiset suunnitteluperustaiset muuttuvat kuormat (Local Effects DBA)
- Suunnitteluperustainen putkirikon muuttuvakuorma (DBA Pipe Reaction)
- Vakavan reaktorionnettomuuden aiheuttamat paineet ja lämpötilat (DEC pressure & Temperature)
- Laajarunkoisen lentokoneen törmäys (Aircraft crash)
- Äärimmäinen räjähdys (External Explosion)

**Kuormitusyhdistelmätaulukko (Ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu, 34)**

Load DESCRIPTION	Design	Test	LC 1	LC 2	LC 3	LC 4	LC 5	LC 8	LC 10	LC 11	LC 12	LC 13	LC 14	LC 15
Dead	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Pre-stress	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Test pressure & Temperature		X												
Design pressure & Temperature	X													
Operating Pressure & Temperature			X	X		X	X						X	X
Normal Pipe Reaction			X	X	X	X	X						X	X
ADS Actuation Pressure & Temp.					X									
Hydrodynamic loads				X				X		X	X	X		
Basic wind				X										
Extreme wind						X								
DBE							X							
DBA pressure & Temperature								X			X			
Local Effects DBA											X			
DBA pipe reaction	X							X			X			
DEC pressure & Temperature									X	X		X		
Aircraft crash													X	
External Explosion														X
ACCEPTANCE CRITERIA Structural Integrity	Allowable Stress	Test Limits	1	1	1	1	II	1			III loca		II	II
ACCEPTANCE CRITERIA Leaktightness	N/A.	1	1	1	1	1	N/A	1			N/A		N/A	N/A

Komponenttisuunnittelulla käsitetään moduulien kasaamisessa käytettävien esivalmistettavien osien suunnittelua. Osien tulee täyttää laadulliset kriteerit. Osien valmistus on tyypillistä alihankintatyötä. Osien ja moduulien valmistus- ja kokoomapaikkojen hajaantuessa suunnittelijoiden tulee huomioida materiaalisuunnittelussa erilaiset materiaalihyväksynät, kuten EU-alueen ulkopuolelta tulevilta teräsmateriaaleilta puuttuvat CE-hyväksyntä.

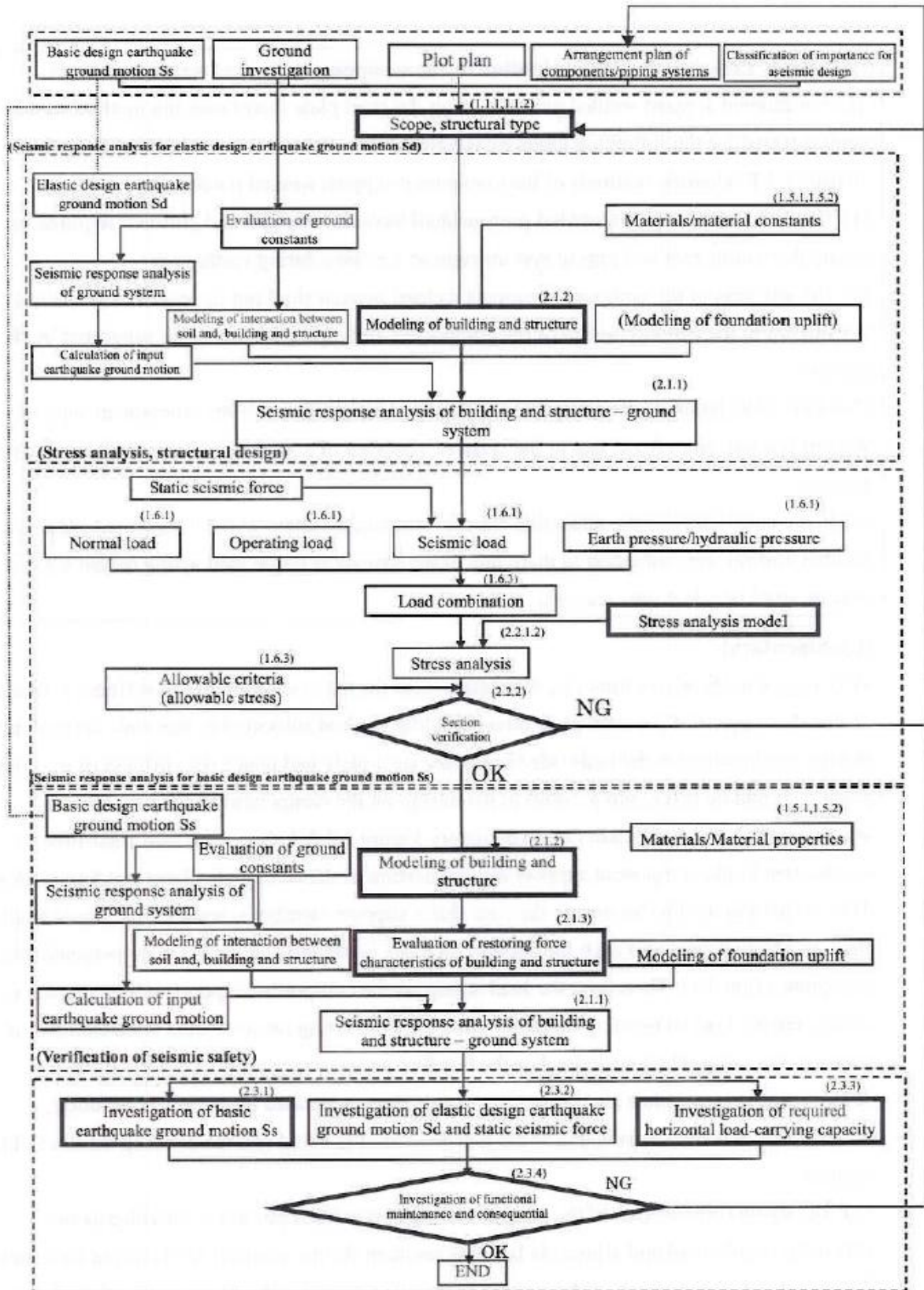
Kokoonpanolla tarkoitetaan kokoamispaikalla tapahtuvaa moduulien koaamista esivalmistetuista osista. Kokoaminen tehdään erilaisilla hitsaus- tai pulttiliitoksilla. Kokoonpanosuunnittelussa suunnitellaan moduulien kokoaminen, kokoamisjärjestys ja mahdollinen rakennuspaikalla tapahtuva jälki- tai lisäkokoaminen. Suunnitelmasta ilmenee mm. kokoonpanotoleranssit ja suunnitelmiin liitetään rakennesuunnitelmat. Rakennesuunnittelu tehdään perinteisen ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelun mukaisesti.

Käsittelyllä tarkoitetaan moduulin kokoamisvaiheessa pienimuotoista siirtoa, kääntämistä tai välivarastointia. Moduulien turha käsittely tulee minimoida. Käsittelysuunnitelmiin dokumentoidaan kokoonpanon, siirtojen ja asennusta aikana tehtävät käsittelyt kuten työmaa-aikaiset nostot.

Kuljetuksella tarkoitetaan moduulin pidempikestoista liikuttamista kuten rakennuspaikalle tuontia. Kuljetussuunnittelussa määritellään moduulien siirtotekniikat ja järjestelmät. Suunnittelun tuloksena syntyy siirtosuunnitelma.

Kuljetuksen aiheuttamien rajoitteiden seurauksena ennen varsinaista asentamista moduuleja voidaan yhdistää suuremmiksi kokonaisuuksiksi. Yhdistämisellä tarkoitetaan työmaalla tapahtuvaa moduulien kuljetuksen jälkeistä yhdistämistä.

Asennuksella tarkoitetaan moduulin asentamista käyttöpaikkaansa. Asennussuunnittelussa suunnitellaan moduulien asentaminen ja liittäminen muihin moduuleihin esimerkiksi järjestelmämoduuleihin. Asennussuunnitelmissa dokumentoidaan moduulien liitokset paikallarakennettaviin rakenteisiin, kuten perustus- ja pohjarakenteisiin. Asennussuunnitelmassa esitetään asennustoleranssit, asennuksen aikaiset tuennat, asennuspoikkeamien toteamisen menettelyt ja niiden korjaustavat.



**Explanatory Figure 1.4.1-1 Aseismic design flow for the class S building and structure**

Note: Each number in ( ) indicates the relevant item number of this code. Thick frame indicates the item specific to the case using the SC structure.

Teräslevy—betoniliittoseinärakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.

PEKKA VÄLIKANKAAN VASTAUS KYSYMYKSEEN PINTATERÄSLEVYN PAKSUUDESTA JA VASTAAVASTA SUUNNITTELUN VARMUUSTASOSTA

Liite 6

Välikangas, Pekka <Pekka.Valikangas@stuk.fi>

pe 22.11.2013 17:14

**Vastaanottaja:**

Jarkko Koskinen;

Marita Mäkinen;

Tapio Korkeamäki;

Kuvassa 23 näkyy, että aivan alun betonin halkeilun jälkeen (n. 0.2/1000rad; 2.5 MPa) rakenne muuttuu joustavammaksi. Tämän jälkeen suhteellisesti ohuempi betoniseinä ottaa enemmän vastaan kuormankantokykyä kuvaavaa leikkausjännitystä kuin paksimmat rakenteet, eli mitä paksumpi rakenne sitä alempi käyrä. Seuraava taitepiste tapahtuu leikkausmuodonmuutosalueella n. 1.8—2.2 /1000rad, jolloin kuormankantokykyä kuvaava leikkausjännitys on suhteellisen ohuilla betoniseinillä luokkaa 20 MPa, keskimääräisillä luokkaa 12 MPa ja paksuilla luokkaa 5 MPa.

1. Mitä ohuempi betoniseinä on suhteessa teräslevyyn, sitä selkeämmin n. 2 /1000rad leikkausmuodonmuutoksen jälkeen kantokykyä ei ole enää tarjolla lisäkuormille, eli tämä on luonteeltaan haurasmurto, koska kyseessä on leikkautuminen. Varmuuskertoimen kannalta pitää tällöin ottaa huomioon, että kuvan 23 mukaan muutos teräslevyn paksuudessa johtaa suhteellisesti samansuuruiseen muutokseen leikkausjännityskapasiteetissa.
2. Keskimääräisen paksuilla betoniseinillä suhteessa teräslevyyn on n. 2 /1000rad leikkausmuodonmuutoksen jälkeen vielä kasvavaa leikkausjännityskapasiteettia jäljellä, jolloin rakenteessa on vielä hieman sitkeyttä jäljellä. Varmuuskertoimen kannalta pitää kuitenkin ottaa huomioon, että kuvan 23 mukaan muutos teräslevyn paksuudessa johtaa suhteellisesti kaksinkertaiseen muutokseen leikkausjännityskapasiteetissa, mikä on selkeä epävarmuustekijä eikä siten sulje myöskään haurasfurtomekanismia pois.
3. Paksuilla betoniseinillä suhteessa teräslevyyn on n. 2 /1000rad leikkausmuodonmuutoksen jälkeen vielä selkeästi kasvavaa leikkausjännityskapasiteettia jäljellä, jolloin rakenne on vaihtoehdoista sitkein. Varmuuskertoimen kannalta pitää silti ottaa huomioon, että kuvan 23 mukaan muutos teräslevyn paksuudessa johtaa suhteellisesti samansuuruiseen tai hieman pienempään muutokseen leikkausjännityskapasiteetissa. Materiaali- / rakenneominaisuuksien varmuuden arvioinnissa tämä tilanne on näistä kolmesta paras.

Teräslevy—betoniliittoseinärakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.

---

Kuvan 23 kaksi ensimmäistä tapausta edellyttää vaakasuuntaiselle kantavuudelle selkeästi korkeampaa varmuuskerrointia, vähintään 2. Kolmas tapaus ei edellytä niin suurta varmuuskerrointia kuin kaksi aikaisempaa tapausta. Varmuuskerrointia 1 ei ole kuitenkaan tämän esityksen osalta vielä riittävästi perusteltu.

Terveisin,

Pekka Välikangas

Section Head,  
Civil Engineering and Fire Protection,

**Radiation and Nuclear Safety Authority, Finland**

Nuclear Reactor Regulation

Addr. Laippatie 4, P.O.Box 14, FI-00881 Helsinki, Finland

Tel.

GSM

pekka.valikangas@STUK.fi



Komponenttien esivalmistus

Komponenttien valmistuksen laadunvalvonnalla varmistetaan, että osien valmistus toteutetaan suunnitellusti ja materiaalit, valmistustavat sekä -toleranssit ovat suunnitelmien mukaisia ja ne ovat jälkeenpäin todennettävissä.

Kokoonpanovaiheen laadunvalvonta

Laatuohjelmassa määritellään kokoonpanossa piiloon jäävien rakenteiden ja materiaalin laadunvalvonnan toteutus ja laajuus.

Käsittelyn ja siirron laadunvalvonta

Laatuohjelmassa kuvataan toimintatavat ja vaadittavat tarkastukset moduulien kuljetukseen luovuttamisesta ja rakentamispaikalla vastaanottamisesta. Laatuasiakirjoista ilmenee rakennustyömaalla tehtävien täydennyskokoonpanojen ja kuljetusvaurioiden korjaustyön laadunvalvonta.

Yhdistämisen ja asennuksen laadunvalvonta

Yhdistämisen ja asennuksen laadunvalvontasuunnitelmissa määritellään asennusaikaisten poikkeamien ja ongelmien ratkaisumenetelmät. Perinteisen ydinvoimalaitos-rakentamisen laadunvalvontamenetelmiä voidaan suoraan soveltaa paikallarakentamisen ja moduulien liittymäkohtien laadunvalvonnassa. Esimerkiksi peittyvien rakenteiden osalta teräsrakenteiden rakennetarkastukset vaikuttavat valvontaan. Rakennetarkastukset tulee tehdä rakenteiden ollessa näkyvissä. Ideaalinen suunnitteluratkaisu on, että esimerkiksi kaikki hitsausaummat ovat näkyvissä vielä valmiissa rakenteissa, kuten Flamville 3 ydinvoimalaitoksen polaarinosurin kuljetinkiskon konsolien rakenteissa.

Betonoinnin valvonta

Betonointityön valvonta tapahtuu YVL ohjeiden mukaisesti.

#### Moduulin osien esivalmistus ja kokoonpano

STUK hyväksyy osavalmistajat ja kokoonpanoyritykset referenssien ja laatuohjelmien perusteella (sisältää henkilöstön pätevyyden). Ennen kokoonpanolaitoksen hyväksymistä viranomaisen voi suorittaa organisaatio- ja laitoskatselmuksia. Katselmuksen lopputulokseen voi aiheutua vääristymiä, jos katselmuksen aikana ei ole tuotanto käynnissä. Tuolloin tuotantoa pitää valvoa tarpeen mukaan myös erikseen. Moduulien kokoonpano tapahtuu suunnitteluohjeissa esitettyjen rakentamismääräysten mukaisesti. Tarvittaessa STUK suorittaa kokoonpanon auditointia ja pistokoetarkastuksia.

#### Kuljetus

Moduulien liikuttelussa päävalvontavastuu on hankeosapuolilla, mutta vastaavasta viranomaisvalvonnasta pitää kuitenkin sopia etukäteen osana suunnitteluohjetta.

#### Rakennusmoduulien asennus

Moduulien asennustyön valvonta rinnastetaan perinteisen rakentamisen tarkastukseen. Moduulien asennuksessa tulee huomioida vaadittavat toleranssit ja betonoinnin asettamat vaatimukset. Asennusta täydentävissä rakennustöissä viranomaisvalvonta suoritetaan perinteisen rakennusvalvonnan mukaisesti. Modulaarisuudesta huolimatta paikallarakentamista on runsaasti. Tyypillisiä asennusvaiheeseen kuuluvia täydentäviä rakentamistöitä ovat mm.:

- osamuotitukset
- erilaiset asennusvalut
- seinärakenteiden osa-betonoinnit
- välipohjien rakennustyöt
- tarkastukset (muotti- ja betonointityötarkastukset).

Merkittävänä työsuorituksena asennusvaiheeseen kuuluu teräslevy—betoniliittoseinärakenteen betonointi.

Seinä—laatta-rajapintojen liittymä- ja viimeistelytyövaiheessa viranomaisen varmistaa, että liitosten käytännön toteutus on tehty suunnitellusti, esimerkiksi paikalla rakennettujen välipohjien sekä moduuliseinärakenteiden liittymäkohdat ja kokonaan paikalla rakennettujen rakennusten liittyminen moduulirakenteisiin rakennuksiin. Rajapintojen lopullinen siisteys ja viimeistely varmistetaan.

#### Järjestelmämoduulien asennus

Ydinvoimalaitoksen järjestelmämoduulien (erilaiset laitemoduulit) asennuksen viranomaisvalvonnan hoitaa STUK:n eri teknisten alojen asiantuntijat. Rakennustyönvalvonta ulottuu laitostekniikan asennusten rajapintaan. Asennettava laitosmoduuli sisältävät mm. putkistoja, kaapelihyllyjä, sähkölaitteita yms. STUK:n rakennustyön valvonta huolehtii laitosasen-

Teräslevy—betoniliittoseinärakenne suurmoduulirakenteisessa ydinvoimalaitosrakennuksessa.

---

nuksessa tarvittavien tartuntojen asemoinnista, toleransseista ja mahdollisten muutostöiden teettämisestä.

#### Rakenteiden viimeistely

Toimitettavien moduulien levy pintojen viimeistelyaste voi vaihdella raakapinnasta aina loppuviimeistelyyn pintaa. Viimeistelyvaiheessa rakenteiden pintojen tulee olla yleisilmeiltään siistit. STUK tarkastaa pinnoitteiden dekontaminoitavuuden eli puhdistettavuuden esimerkiksi radioaktiivisista aineista.

#### Käyttöönotto

Viranomaisen suorittaa ydinvoimalaitosten perinteiset käyttöönottotarkastuksen.