

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikka

Meritekniikka

2023

Maksim Petrov

Laivan aukkojen suunnitteluprosessin luominen



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka | Meritekniikka

2023 | 47

Maksim Petrov

Laivan aukkojen suunnitteluprosessin luominen

Tämän työn tavoite oli luoda asiakasyritykselle, Elomatic Oy:lle kokonaisvaltainen aukkojen suunnitteluprosessi ja sitä tukeva ohjeistus hyödyntäen tuoreimpia työkaluja ja työskentelytapoja.

Työn julkinen osuus syventyy yksityiskohtaisesti prosessin muodostaviin palasiin, painopisteellä aukkojen suunnitteluun lujuudellisesta näkökulmasta sekä aukkojen sijoitteluun ja muotoon.

Työn lopputuotteeksi julkisessa osuudessa tuotettu materiaali pelkistettiin koko prosessin kattavaksi, interdisiplinääriseksi ohjeistukseksi, joka on nykyisillään käytössä toimeksiantajan suuressa suunnitteluprojektissa.

Asiasanat:

Meritekniikka, Kevennysaukot, Laivan aukot, Jännityskonsentraatio

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering | Naval Architecture

2023 | 47

Maksim Petrov

Creating of a design process for a vessel's openings

The goal of the thesis was to create a comprehensive design process of openings while utilizing the latest tools and working methods for the client company Elomatic Oy

The public part of the thesis discusses in detail into the pieces that make up a complete process, with an emphasis on the design of the openings from the point of view of strength, as well as the placement and shape of the openings.

The material produced for the public part of the thesis was summarized into a cross-disciplinary instructions encompassing the entirety of the opening process, which is now being used by the client company in a large-scale project.

Keywords:

Naval architecture, Lightning holes, Vessel's openings, Stress concentration

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	7
1 Johdanto	8
1.1 Työn tausta	8
1.2 Työn tavoitteet ja rakenne	8
1.3 Toimeksiantajan esittely	9
2 Aukkotyytit ja niiden suunnittelu	10
2.1 Kevennysaukot	10
2.1.1 Kevennysaukot luokituslaitosten säännöissä	12
2.2 Läpivientiaukot	15
2.3 Ovi- ja kulkuaukot	16
2.3.1 Pällekkäiset oviaukot	17
2.4 Laidan aukot	19
2.5 Ikkuna-aukot	19
2.5.1 Frontti-laipion ikkunat	19
2.6 Miesluukut	20
2.7 Kansiaukot	21
2.7.1 Kansien jännitysdynamiikka	22
2.7.2 Aukkojen sijoittelu kannessa	23
2.8 Aukkojen sijoittelu	25
2.9 Aukkojen muoto	26
3 Aukkojen laskennan käsitteet	29
3.1 Vauriomekanismi	29
3.2 Jännityskonsentraatio	30
4 Aukkoprosessin kuvaus	33
4.1 Aukkopyynti	33
4.2 Aukkotarkastus	34
4.3 Aukkolaskenta	35
4.4 Aukkojen systeemivastuut	36

4.5 Inter-disipliininen yhteistyö	37
4.6 Aukkotarkastusprosessin mukautuminen tuotantovaiheisiin	37
4.7 Suunnitteluohjelmisto	37
4.8 Tehtävienhallinta	37
4.9 Prosessikaavio	38
4.10 Ohjeistus	39
4.10.1 Aukkojen pyyntiohje	39
4.10.2 Aukkojen tarkistusohje	39
5 Tulevaisuuden innovaatiot	41
5.1 FEA integraatio runkosuunnitteluohjelmistoon	41
5.2 Vahvistusrautojen kompensointi läpivientiholkeilla	41
5.3 Rakenteellisen lasin käyttö kansirakennuksessa	42
5.4 Prosessin laajempi integraatio tehtävienhallintatyökaluihin	42
5.5 Laskentatyökalujen kehitys	43
6 Yhteenveto	44
Lähteet	45

Liitteet

Liite 1. Kansiaukkojen sijoitteluohjeet.

Liite 2. Kehyskaaren kielletyt alueet

Kuvat

Kuva 1. Kehyskaaren tyypillisiä kevennysaukkoja	11
Kuva 2. Runko & Kansirakennus & 0.6L -alue.....	11
Kuva 3. Palkin keskialue ja päädyt.....	13
Kuva 4. Jäykästi tuetun palkin voimajakauma	13
Kuva 5. Kevennysaukot T-palkin uumassa.....	14

Kuva 6. Kevennysaukot kahden kannen välisessä uumassa.....	15
Kuva 7. Oviaukkojen muotoja	17
Kuva 8. Päällekkäinen sijoittelu	18
Kuva 9. Zigzag -sijoittelu	18
Kuva 10. Frontilaipio (harmaalla viivoitettu).....	20
Kuva 11. Miesluukku 800*600 mm.....	21
Kuva 12. Alus jännittyneenä hogging -tilassa.....	22
Kuva 13. Kansiaukon jännitysvuo.....	23
Kuva 14. Kansiaukkojen sijoitteluohjeet.....	24
Kuva 15: Kehyskaaren kielletyt alueet	26
Kuva 16. r/b -suhde konsentraatiokertoimeen (D'arcangelo 1964).....	27
Kuva 17. a/b -suhde konsentraatiokertoimeen (D'arcangelo 1964).....	28
Kuva 18: Jäykisteillä vahvistetut aukot.....	30
Kuva 19. Jännityskonsentraatio ja -vuot.	31
Kuva 20. Jännityskonsentraatiokertoimet pyöreälle aukolle.....	32
Kuva 21. Jännitysvuon hälventyminen.....	32
Kuva 22: Aukon elinkaaren prosessikaavio	38

Taulukot

Taulukko 1: Disipliininen jako komponentteihin.....	33
Taulukko 2. Aukkojen systeemivastuut disiplineittain.....	36

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

FEA	Finite Element Analysis
IACS	International Association of Classification Societies
K	Jännityskonsentraatiokerroin
UF	Usage Factor (Käyttökerroin)

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Idea opinnäytetyölle muovaantui työskennellessäni suuren, Global-luokan risteilijäprojektin parissa aluksen rungon lujuudesta vastaavassa tiimissä. Työläimmäksi vastuualueeksemme muodostui runkorakenteiden aukkojen kelpoisuudesta vastaaminen, meritekniikan sisäisessä slangissa ns. aukkopoliisityö. Turhautumiseni tarpeettoman raskaalta tuntuneeseen prosessiin ja puutteelliseksi kokemiini työkaluihin purkautui pohdintoihin, mitä voisin itse tehdä toisin projektista oppineena – näistä pohdinnoista kehkeytyi opinnäytetyön runko.

Tutustuessani aihetta käsittelevään kirjallisuuteen huomasin aukkojen suunnitteluperiaatteita ja kompensoimista käsittelevien julkaisujen olleen lähestulkoon olemattomia, niiden parin harvan olleen pitkälti peräisin vuosilta 1940–1960. Prosessia käsitteleviä julkaisuja ei löytynyt lainkaan.

Vaikkakaan aukkojen suunnittelu- ja kompensointioperiaatteet eivät juurikaan ole muuttuneet sitten edellä mainittujen julkaisujen, ovat tietotekniset työkalut ottaneet valtavan harppauksen. Uusilla työkaluilla on potentiaalia prosessiin integroituna tehostaa ja tarkentaa työtä merkittävästikin. Näin ollen uudelle katsaukselle oli mielestäni selvästi tilausta – etenkin prosessin osalta.

Hieman epäortodoksisesti työn tekijällä on kirjutushetkellä jo noin kuuden vuoden työkokemus meritekniikan suunnittelutöistä. Tämän vuoksi opinnäytetyö nojaa poikkeuksellisen vahvasti työelämässä opittuun kokemukseräiseen tietoon, jolle ei löydy julkisia viittauksia.

1.2 Työn tavoitteet ja rakenne

Työstä syntyy lopputuotteena toimeksiantajalle sisäiseen käyttöön tarkoitettu aukkoprosessi ohjeistuksineen. Salassapitovelvoitteen vuoksi itse lopputuotetta

ei työssä esitetä – lopputuote kuitenkin koostuu pitkälti työssä käsitellyistä luvuista pelkistetyssä muodossa.

Työn julkisessa osuudessa katselmoidaan kokonaisvaltaisen aukkoprosessin muodostaviin palasiin käytännönläheisestä näkökulmasta, pyrkien ottamaan huomioon modernimmat työkalut ja työskentelytavat.

Työ aloitetaan tutustuttamalla lukija aluksesta tyypillisesti löytyviin aukkoihin ja niiden suunnittelussa huomioitaviin seikkoihin. Toisessa varsinaisessa luvussa käsitellään hyvin suppeasti aukkojen laskennan kannalta oleellisemmat käsitteet. Työn paisumisriskin vuoksi yksityiskohtaisempi katsaus laskentaan rajattiin työstä. Kolmannessa luvussa käsitellään aukkoprosessin muodostavat komponentit. Lopuksi viimeisessä luvussa spekuloidaan tulevaisuuden innovaatioita, joilla aukkoprosessia voitaisiin tehostaa edelleen.

1.3 Toimeksiantajan esittely

Elomatic on vuonna 1970 perustettu suomalainen, yli 1200 henkilöä työllistävä monialainen suunnittelutoimisto. Ympäri Suomea sijaitsevien kuuden toimiston lisäksi yrityksellä on kirjoitushetkellä toimistoja kahdeksassa maassa ympäri maailmaa.

Yritys tarjoaa yksiköstä riippuen konsultointi-, suunnittelu-, tuotekehitys- ja projektinhallintapalveluita sekä tuotteita ja kokonaisratkaisuja teollisuusyrityksille sekä julkisen sektorin organisaatioille. Yrityksen päätoimialat ovat meriteollisuudessa, Kone- ja laitevalmistusteollisuudessa, Prosessi- ja energiateollisuudessa sekä lääketeollisuudessa.

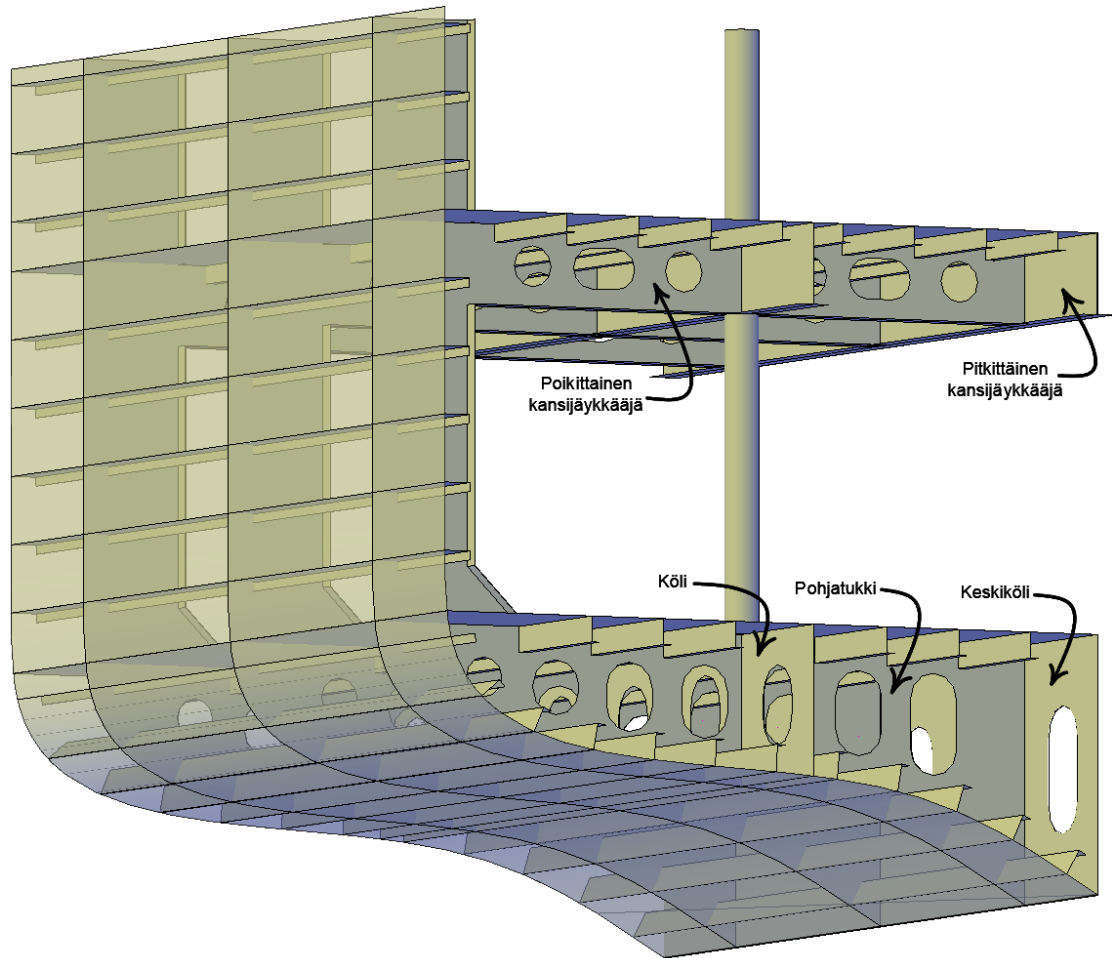
2 Aukkotyypit ja niiden suunnittelu

Työn ensimmäisessä varsinaisessa luvussa lukija tutustutetaan tyypillisestä aluksesta löytyviin aukkoihin omina alaotsikkoina. Kunkin aukkotyyppin osalta pohjustetaan käyttökohteet ja ominaispiirteet sekä esitetään kokemusperäisiä suosituksia sudenkuoppien välttämiseksi.

2.1 Kevennysaukot

Kevennysaukot ovat alusten yleisempiä aukkotyyppejä. Niiden päällimmäinen tarkoitus on keventää rakenteita ja tarjota valmiita läpivientiaukkoja tyypillisille systeemeille, kuten putkille, ilmakeinaville ja kaapeliradoille. Kansijäykkääjien kevennysaukkojen koot ja sijainnit tulisi koordinoida mahdollisimman varhaisessa suunnitteluvaiheessa yhteistyössä aukkoja käyttävien disipliinien kanssa, jotta päädyttäisiin kaikkia osapuolia parhaiten palvelemaan kompromissiin ja systeemit pääsisivät hyödyntämään aukkoja suunnittelussaan.

Kevennysaukkoja löytyy tyypillisimmittain kansijäykkääjistä ja kaksoispohjan rakenteista, kuten köleistä ja pohjatukeista (Kuva 1). Pitkittäisten kansijäykkääjien aukotus on tapauskohtaisempaa, rungon (Kuva 2) jäykkääjiä ei aukoteta pituuslujuudellisesti kriittisessä aluksessa, sillä aukot vähentävät aluksen poikkileikkauksen taivutusvastusta ja voivat olla hyvin korkeasti kuormitettuja. Kansirakennuksen (Kuva 2) huomattavasti pienemmän pituuslujuudellisen efektiivisyyden vuoksi jäykkääjien kuormitustaso on alhaisempi ja ne voidaan yleisesti aukottaa.



Kuva 1. Kehyskaaren tyypillisiä kevennysaukkoja



Kuva 2. Runko & Kansirakennus & 0.6L -alue

2.1.1 Kevennysaukot luokituslaitosten säännöissä

Luokituslaitokset sallivat rakenteisiin vahvistamattomia kevennysaukkoja tiettyjen sääntöehtojen täytyessä – mutta, kuten kaikkien muidenkin luokan sääntöjen osalta, voidaan seuraavaksi esitettyjen sääntöjen noudattamiselta välttyä todistamalla rakenteen lujuus ja vakaus suoralaskentamenetelmillä

Luokituslaitokset pyrkivät kattojärjestönsä IACS:in agendan mukaisesti jatkuvasti suurempaan koherenssiin, jonka ansiosta kevennysaukkoja käsitellään eurooppalaisessa laivanrakennuksessa yleisesti käytetyissä luokituslaitoksissa, joko identtisesti, tai vähintään niin saman piirteisesti, että tarkastelu voidaan yksinkertaistaa tutustuen vain suurimpaan meritekniikan luokituslaitoksen DNV:n sääntöihin.

Seuraavaksi esitetään suoraan laineen säännöstö, minkä jälkeen säännöstön tulkinta avataan ja esitetään kuvallisessa muodossa.

7.2.3 Manholes and lightening holes

— In single skin sections, having depth not exceeding 40% of the web depth and located so that the edges are not less than 20% of the web depth from the faceplate.

— In double skin sections, having depth not exceeding 50% of the web depth and located so that the edges are well clear of cut outs for the passage of stiffeners.

For web openings without reinforcements of free edges, the length of openings shall not be greater than

— At the mid-span of primary supporting members: the distance between adjacent openings.

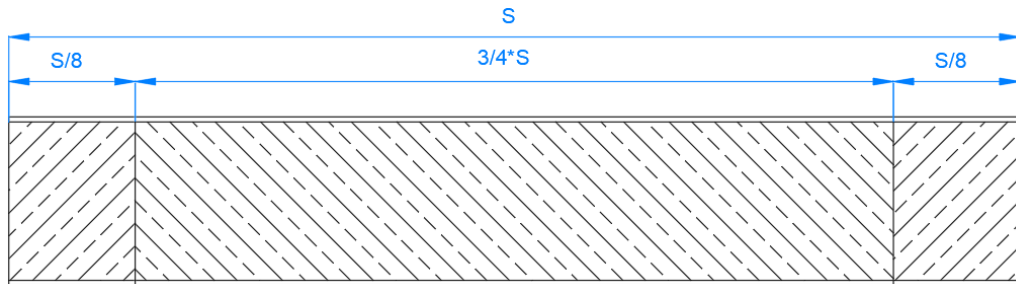
— At the ends of the span: 25% of the distance between adjacent openings.

For openings cut in single skin sections, the length of opening shall not be greater than the web depth or 60% of the stiffener spacing, whichever is greater.

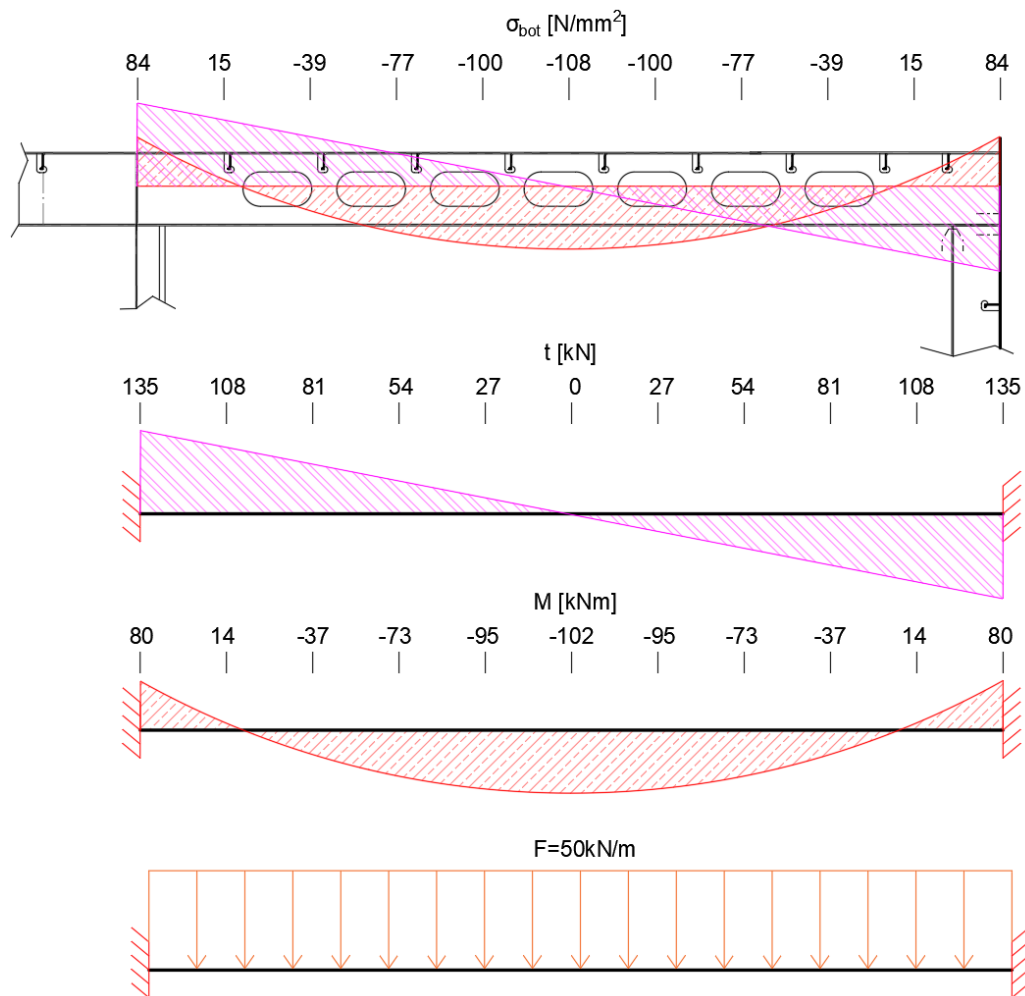
(DNVGL 2022)

Yllä lainatuissa säännöissä palkki jaetaan keskialueeseen *mid span*, ja palkin päätyihin *end span* - näille ei kuitenkaan sääntökirjasta löydy määritelmää. Yksi tulkinta palkin jaosta löytyy opuksesta (Industry Standards for Hull Structural Penetration Design Criteria and Detail; s. 17) ja esitetään Kuva 3:ssa.

Palkin päädyt huomioidaan erillisinä alueina jäykästä kiinnityksestä syntyvien korkeiden leikkausvoimien vuoksi (Kuva 4). Esimerkipalkki on kiinnitetty päistään meriteknikassa tyypilliseen tyyliin 0.5 vapausasteella – toisiinsa hitsattujen rakenteiden ei voida olettaa olevan jäykästi kiinnitettyjä.



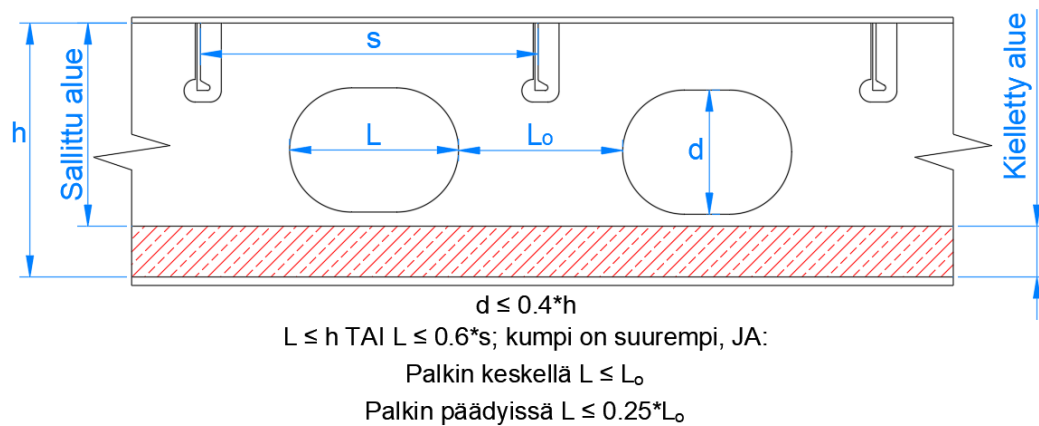
Kuva 3. Palkin keskialue ja päädyt



Kuva 4. Jäykästi tuetun palkin voimajakauma

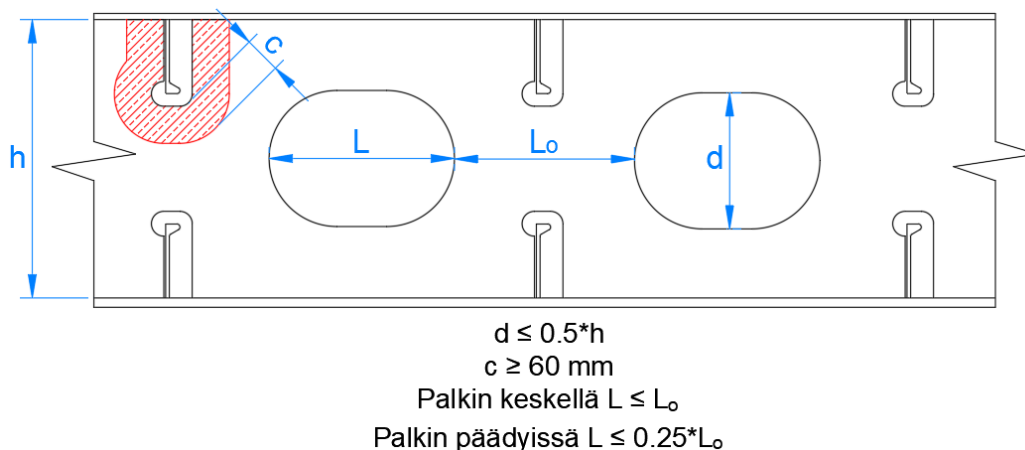
Double skin sectionia eli kahden kannen / laipion välistä uumaa, jollaisia löytyy esim. pohjatukeista ja kofferidameista, käsitellään sen suuremman taivutusvastuksen vuoksi säännöissä hieman löyhemmin kuin *single skin sectionia* eli tavallista T-palkkia.

Kuva 5 esittää T-palkkia koskevat sääntökohdat, sekä sääntöjen puitteissa suurimman sallitun kevennysaukon sillä oletuksella, että uuman korkeus olisi $h = 450$ mm ja jäykisteiden kaariväli $s = 600$ mm; näin aukko määräytyisi 300×180 mm kokoiseksi.



Kuva 5. Kevennysaukot T-palkin uumassa

Säännöt edellyttävät määrittelemättömän kokoista väliä aukon reunan ja kansijäykisteen läpivientiaukon välille. Sääntökohta koskee hieman omituisesti vain kahden laipion välistä uumaa. Oletusarvoisesti kahden aukon välillä on aina oltava tarpeeksi materiaalia paikallisen kuormituksen kestämiseksi. Normaalisti rasitetuilla alueilla kokemusperäisenä nyrkkisääntönä $c = 80$ mm väli riittää (Kuva 6). Korkeammin rasitetuilla kansilla aukkojen välinen minimiala on tarkistettava laskennallisesti.



Kuva 6. Kevennysaukot kahden kannen välisessä uumassa

Edellä mainituista säännöistä huolimatta eurooppalaisessa laivanrakennustavassa, etenkin risteilijöissä ja matkustajalautoissa Kuva 5 -esimerkkiä vastaavassa kansijäykkäjässä käytettäisiin tyypillisesti suurempia, 440*220 mm kevennysaukkoja. Koko on vakiintunut kevennysaukoista läpivietävien 220 mm halkisijan kokoisten hyttien ilmaputkien sanelemana. Luokitustalon hyväksyisi sääntöjen vastaiset aukot, sillä 450 mm korkea jäykkäjä täyttää moninkertaisesti luokan laskennallisen taivutusvastusvaatimuksen matkustaja-aluksen kansijäykkäjäille. Suurempien kevennysaukkojen kelpoisuus voitaisiin redundanssin nimissä todentaa myös aluksen FEA-mallilla, joka kuuluu nykyisellään uudisrakennusprojektin standardiaineistoon.

2.2 Läpivientiaukot

Läpivientiaukkoja syntyy samoista systeemeistä, jotka hyödyntävät läpiviennissään kevennysaukkoja. Tarve läpivientiaukoille syntyy, kun läpivientiä ei voida suorittaa jo valmiiksi olemassa olevasta aukosta, kuten umpinaisten laipioiden, kansien taikka liian pienien kevennysaukkojen vuoksi. Esimerkiksi suorakulmaiset ilmakeinavat eivät usein mahdu standardikokoisista kevennysaukoista.

Rakennesuunnittelijan tai teknisen laskijan tulee tarkistaa jokaisen alukseen toivotun läpivientiaukon kelpoisuus ja tarvittaessa vahvistaa aukkoa ympäröivä levykenttä. Pahimmassa tapauksessa aukkoja joudutaan teettämään tuotantovaiheessa jo valmiisiin lohkoihin, jolloin kustannukset moninkertaistuvat. Parantaakseen tehokuutta on näin olleen kriittistä pyrkiä pitämään läpivientiaukkojen määrä minimaalisena. Työn laatijan ammatillista kokemusta heijastaen merkittävä osa läpivientiaukoista olisi vältettävissä paremmalla ohjeistuksella ja sujuvoittamalla disipliinien välistä yhteistyötä.

Suureet, joihin voidaan vaikuttaa lieventäessä läpivientiaukon haitallisuutta, ovat sijainti ja muoto - joista sijainnilla on suurempi merkitys. Molempia suureita on pyrittävä kontrolloimaan aukotettavan rakenteen lujuuden kannalta mahdollisimman suotuisiksi. Aukkojen sijoittelua käsitellään luvussa 2.8 ja muotoa luvussa 2.9.

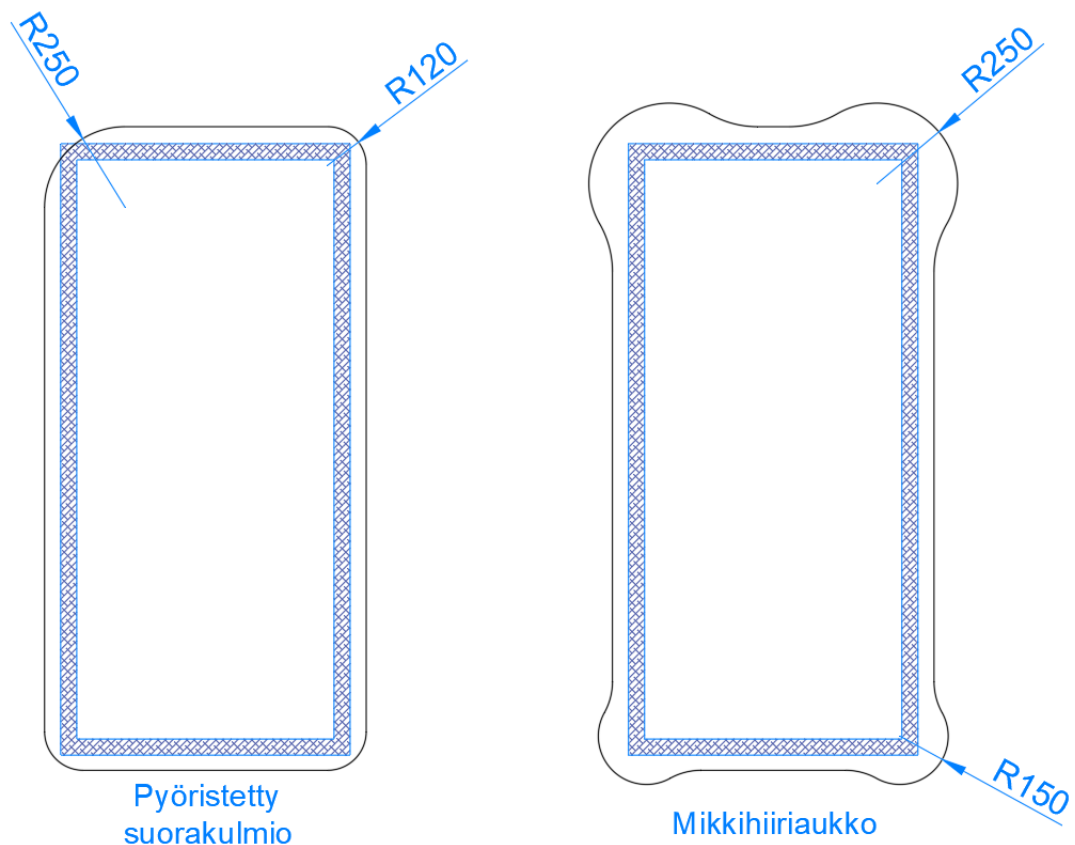
2.3 Ovi- ja kulkuaukot

Ovi- ja kulkuaukkoja on pääasiassa kahden muotoisia, pyöristettyjä suorakulmioita, ja ns. mikkihiirikorvallisista (Kuva 7). Muoto määräytyy käyttötarkoituksen ja aukotettavan rakenteen rasitustason mukaisesti.

Tyypillisempi näistä on pyöristetyn suorakulmion muotoinen aukko, joka sopii pitkälti kaikille aluksen matalimmin rasitetuilla alueilla, joissa riittää R100-150 nurkkapyörityssäde. Korkeammin rasitetuissa rakenteissa käytetään suurempaa nurkkapyöritystä, esim. R250-300, jolloin karmilliset ovet eivät mahdu asennettavaksi aukkoon – katso Kuva 7. Aukon leventämisen sijaan näissä tapauksissa käytetään mikkihiirikorvallista aukkoa, joka mahdollistaa huomattavasti suuremmat nurkkapyöritykset kaventamatta aukkoa pyöritysten kohdalta. Poikkeuksena kulkuaukoissa ja rungon karmittomissa, aukon ympäröivää laipiota vastaan tiivistyvissä ovissa, voidaan käyttää suorakulmaista aukkoa myös isommilla nurkkapyörityksillä.

Etenkin suurissa pitkittäisissä laipioissa ja poikittaisissa pääpalolaipioissa, ns. primäärirakenteissa, jännitykset oviaukkojen nurkissa ylittävät herkästi

luokituslaitoksen sallitun rajan jännityspiikeille. Jännityksiä tulee kontrolloida ensisijaisesti kasvattamalla nurkkapyörityksen säteen kokoa. Jännityksen voidaan odottaa laskevan noin 15 %:lla 50 mm sädettä kohden eli kasvattamalla sädettä R100 -> R200 voidaan jännityksen odottaa putoavan noin 30 %. Arvot pohjautuvat todellisten alusten FEA-malleissa tehtyihin kokeiluihin. Toissijaisesti jännitykset voidaan lieventää kasvattamalla nurkkauksen materiaalivahvuutta inserttilevyillä.



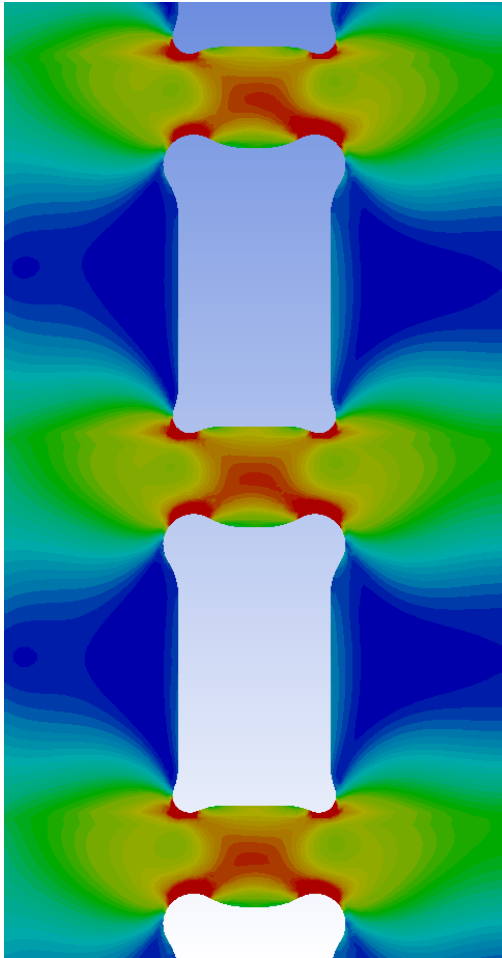
Kuva 7. Oviaukkojen muotoja

2.3.1 Päällekkäiset oviaukot

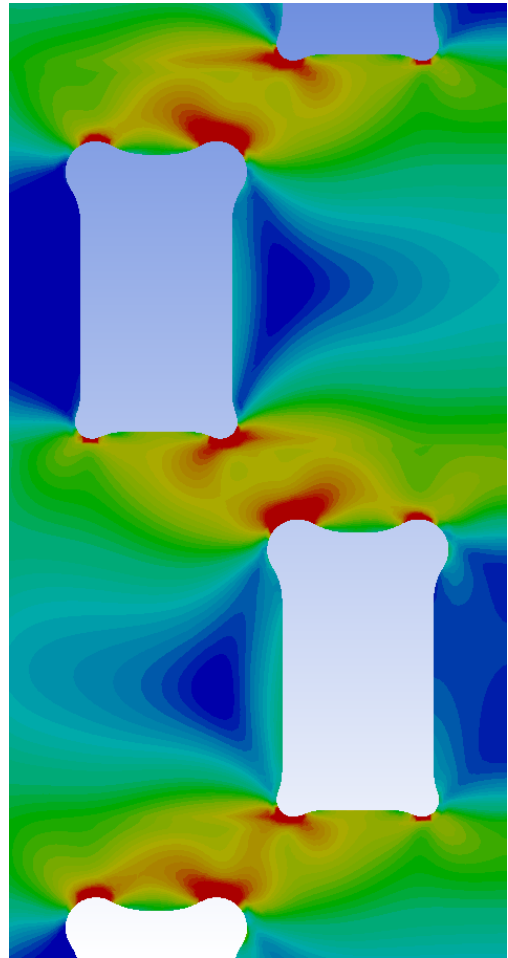
Suurissa, useamman kansivälin korkuisissa laipioissa oviaukot tulisi jo projektin alkuvaiheessa sijoittaa pystylinjassa hajalleen niin, että päällekkäisten kansien oviaukkojen jännitysvuot eivät vuorovaikuta keskenään kumulatiivisesti (Kuva 8). Suositeltu kompromissi pystylinjassa kohdakkain sijoitetuille oviaukoille on

ns. zigzag -sijoittelu (Kuva 9), jolloin vähennetään keskenään vuorovaikuttavat jännitysvuot puoleen.

Suurissa risteilijöissä ja matkustajalautoissa on mielekästä vahvistaa edellä mainitun kaltainen laipio oviaukkojen ympäriltä jo projektin alkuvaiheessa, etenkin jos zigzag -sijoittelu ei onnistu. Näin voidaan vähentää työläiden nurkkavahvistusten tarvetta, joita on pahimmassa tapauksessa jouduttu risteilijän pääpituuslaipioissa asentamaan jokaisen oviaukon nurkkaukseen.



Kuva 8. Päällekkäinen sijoittelu



Kuva 9. Zigzag -sijoittelu

2.4 Laidan aukot

Tyypillisesti laidan aukotustarpeet syntyvät laitaporteista, bunkkeriasemista, pohjatulpista, merivesi- / jääkaivoista, kiinnityslaitteistoista, valumisaukoista sekä valoventtiileistä. Poissulkien korkealla partaalla sijaitsevat valumis- ja kiinnityslaitteiston aukot, laidan aukkojen on luonnollisesti oltava vesitiiviitä ja hyvin vahvistettuja - etenkin jääluokitetuissa aluksissa, joissa jäävyön alueelle kohdistuvat kuormat voivat olla hyvin korkeita.

Nykyään laita-aukkoja tarvitsevat systeemit ostetaan kokonaistoimituksina, jolloin toimittaja suunnittelee koko systeemin, esimerkiksi laitaportin vahvistuksineen suoraan yhteensovittaviksi aluksen laidan rakenteisiin.

2.5 Ikkuna-aukot

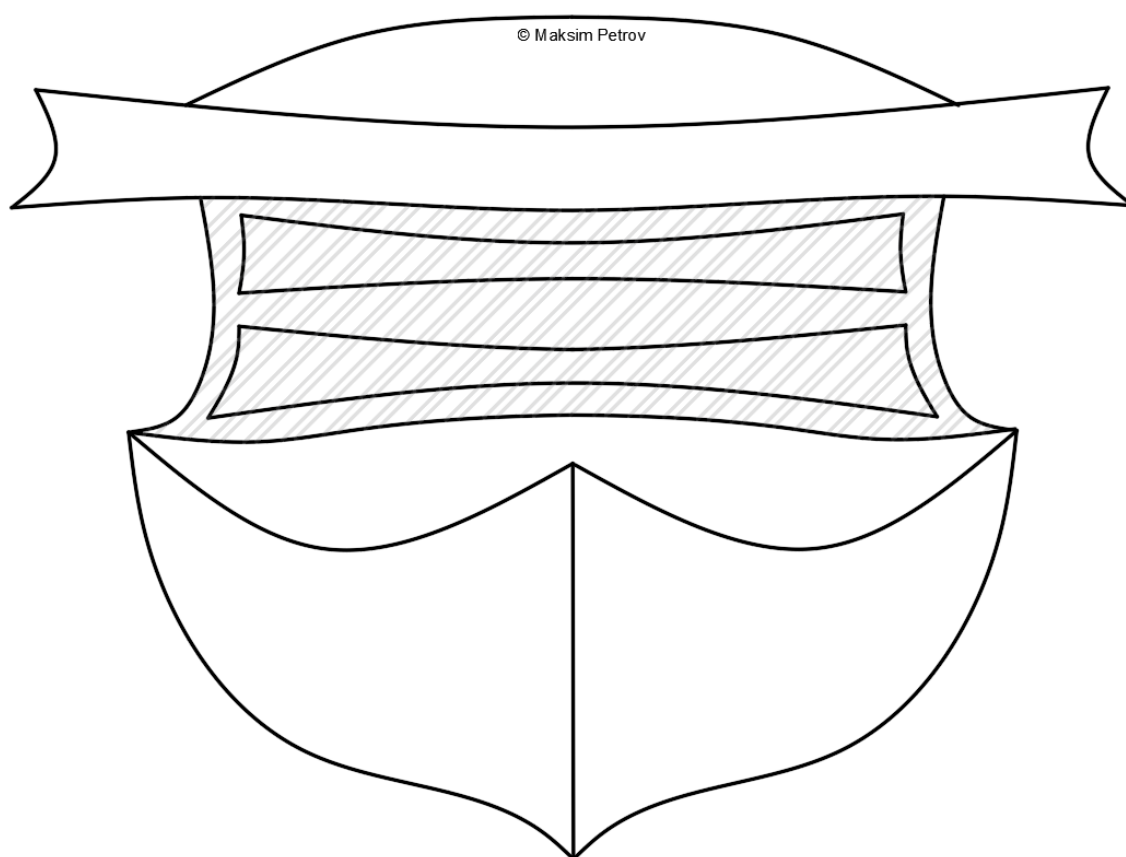
Ikkunoita, joiksi rungon valoventtiileitä ei luokitella, on lähes poikkeuksetta pelkästään aluksen kansirakennuksen ulkolaipioissa. Työaluksissa on yleisesti verrattain vähän ikkunoita, jotka eivät kokonsakaan puolesta tuota rakenteellisia haasteita. Vastakohtaisesti matkustaja-aluksissa ikkunoilla on hyvinkin merkittävä arkkitehtuurinen rooli. Ikkunoiden koon kasvu on selvä trendi, joka ei varmasti vielä lähivuosina tasoitu. Rakennesuunnittelijan vastuulle jääkin yhä tarkempien laskentamenetelmien kehittäminen – kunnes ikkunakoon absoluuttinen yläraja löydetään.

2.5.1 Frontti-laipion ikkunat

Frontilla viitataan aluksen kaulan puoleiseen päätylaipioon – katso Kuva 10 viivoitettu alue. Frontti ansaitsee oman alaotsikon sen aukkojen erityispiirteiden vuoksi niin tukirakenteiden osalta kuin luokitusmielessäkin. Ikkunat tulisi pyrkiä sijoittamaan mahdollisimman sopusoinnussa frontin jäykisteiden ja jäykkääjien kanssa. Etenkään jäykkääjiä ei tulisi katkaista ikkunoiden tieltä, jos jäykkääjä on liitoksessa pitkän kansijäykkääjän kanssa. Liittyvä kansijäykkääjä saattaa olla

kymmenien metrien tai jopa koko kansirakennuksen pituinen, muodostaen valtavasti kuormaa siirtävän kehän. Kehän katkaisu fronttilaipioon loisi kuormaa keräävän epäjatkuvuuskohdan jo muutoinkin aukolla heikennettyyn rakenteeseen.

Loiskumisen vuoksi luokituslaitokset käsittelevät fronttia omana systeeminään, muuta kansimökin laittaa vaativimmilla säännöillä. Laskennallinen pintapaine on alakansilla yläkansia korkeampi, mikä johtaa merkittävästi suurempiin materiaalivahvuuksiin.

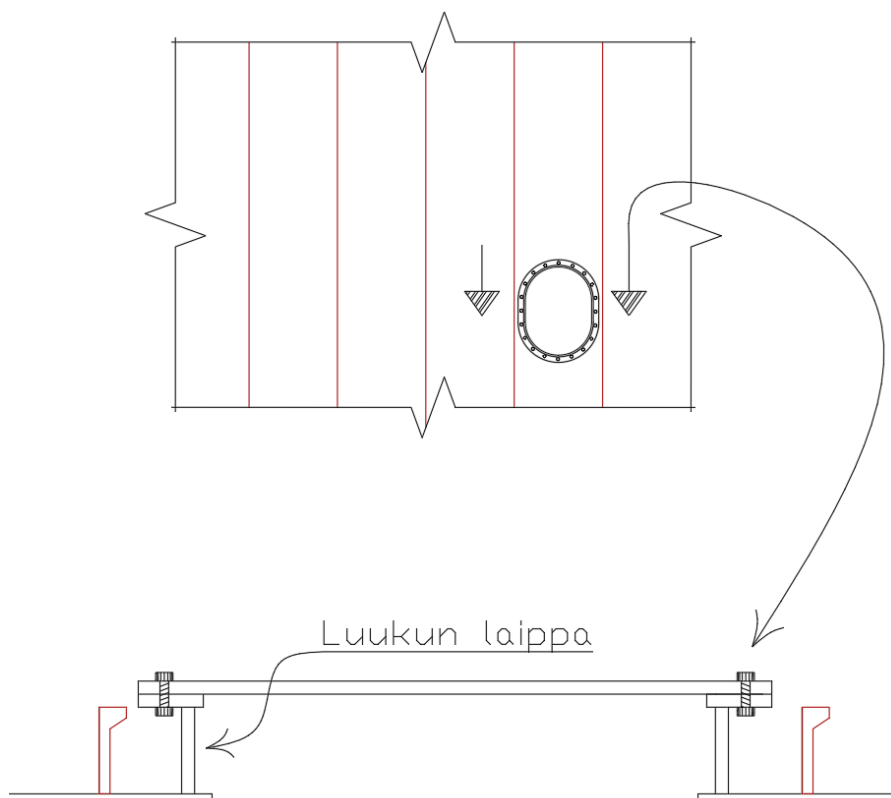


Kuva 10. Fronttilaipio (harmaalla viivoitettu)

2.6 Miesluukut

Miesluukkuja voidaan ajatella ihmisen mentävän kokoisina huoltoluukkuina suljettuihin tiloihin (Kuva 11). Luukun aukon jouhevan, lähes soikean muodon ansiosta jännitysvuo kulkee tasaisesti luukun ympäri, välttämällä pienille

nurkkapyörityksille tyypilliset suuret paikalliset konsentraatiot. Luukun laippa toimii jäykisteenä, kasvattaen aukkoa ympäröivän levykentän lommahduskapasiteettia. Luukun aukkoa ympäröivä levykenttä ei kaipa lisävahvistusta, jos laipion voidaan todentaa olevan vähäisesti rasittunut.



Kuva 11. Miesluukku 800*600 mm

2.7 Kansiaukot

Aluksen rungon eli pääkannen alapuolisen rakenteen (Kuva 2) kansien aukotustarve syntyy pääasiassa systeemien tarpeista. Näitä ovat tyypillisesti korkeat koneet, moottorien putkistot, putkikuilut, kansiluukut ja harvakseltaan moonpoolit. Myös hissi- ja porraskuilut synnyttävät alustyyppistä riippuen aukkoja runkoon.

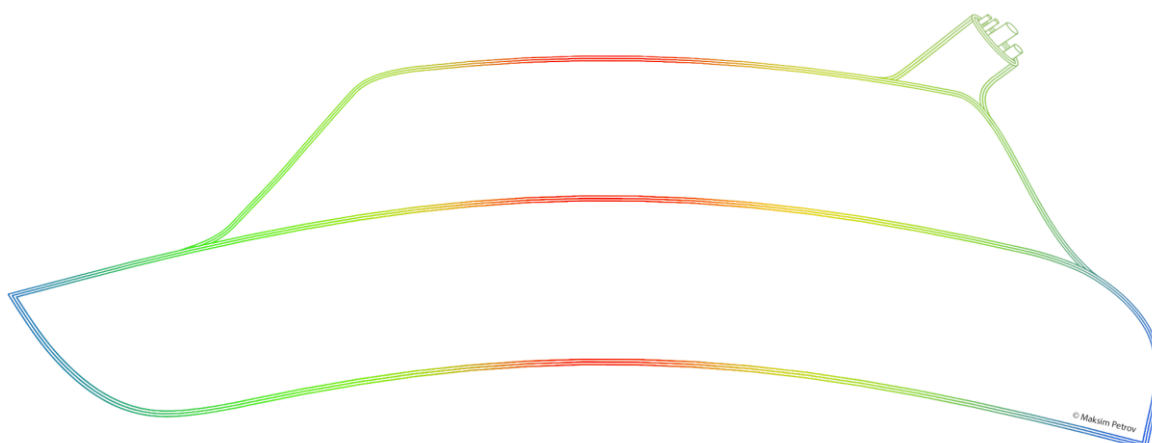
Kansirakennuksen eli pääkannen yläpuolisen rakenteen (Kuva 2) kansien aukotustarve taas syntyy pääasiassa henkilöstön ja matkustajien tarpeista,

kuten hissi- ja porraskuiluista, viihdetiloista ja lujuusmielessä pahimmillaan keskilaivan promenadiaukiosta.

2.7.1 Kansien jännitysdynamiikka

Aluksen runkopalkki käyttäytyy päistään yksinkertaisesti tuetun palkin kaltaisesti, palkin taivutusmomentin kasvaessa keskilaivaa kohti ja ollessa suurimmillaan keskilaivassa. Näin ollen myös kansien jännitys kasaantuu taipuessaan keskilaivaan, rasittaen ankarimmin keskilaivan aukkoja – katso Kuva 12 hogging -tilassa jännittyneestä aluksesta. Hogging-tila syntyy staattisesti tasapohjaan kohdistuvasta nostevoimasta, taikka dynaamisesti aallokkoon keskilaivaan kohdistuvasta nostevoimasta.

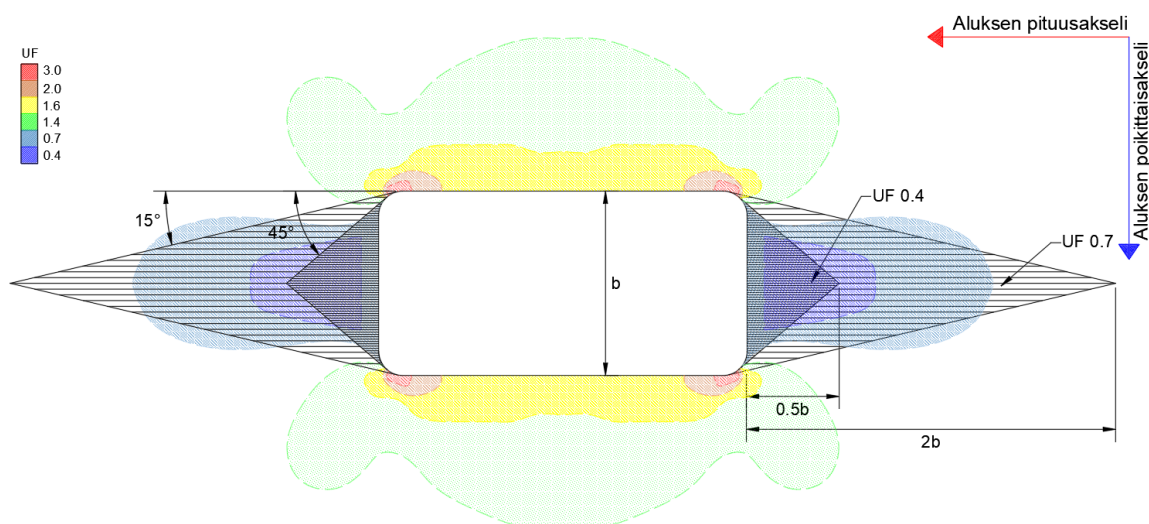
Suuret aukot on myös vähennettävä poikkileikkauksen neliömomentista. Etenkin runkopalkin laippana toimivan pääkannen aukot on huomioitava taivutusvastuksessa hyvin aikaisessa vaiheessa. Myös aukon luoma ns. varjoalue on huomioitava vähennyksessä, tästä lisää seuraavassa alakappaleessa 2.7.2. Näistä kahdesta syystä, kohonneesta jännityksestä ja alentuneesta taivutusvastuksesta, suuret kansiaukot tulisi pyrkiä sijoittamaan aluksen lievimmän rasitetulle alueelle eli aluksen pätyihin, 0.6L -keskilaiva-alueen ulkopuolelle (Kuva 2).



Kuva 12. Alus jännittyneenä hogging -tilassa

2.7.2 Aukkojen sijoittelu kannessa

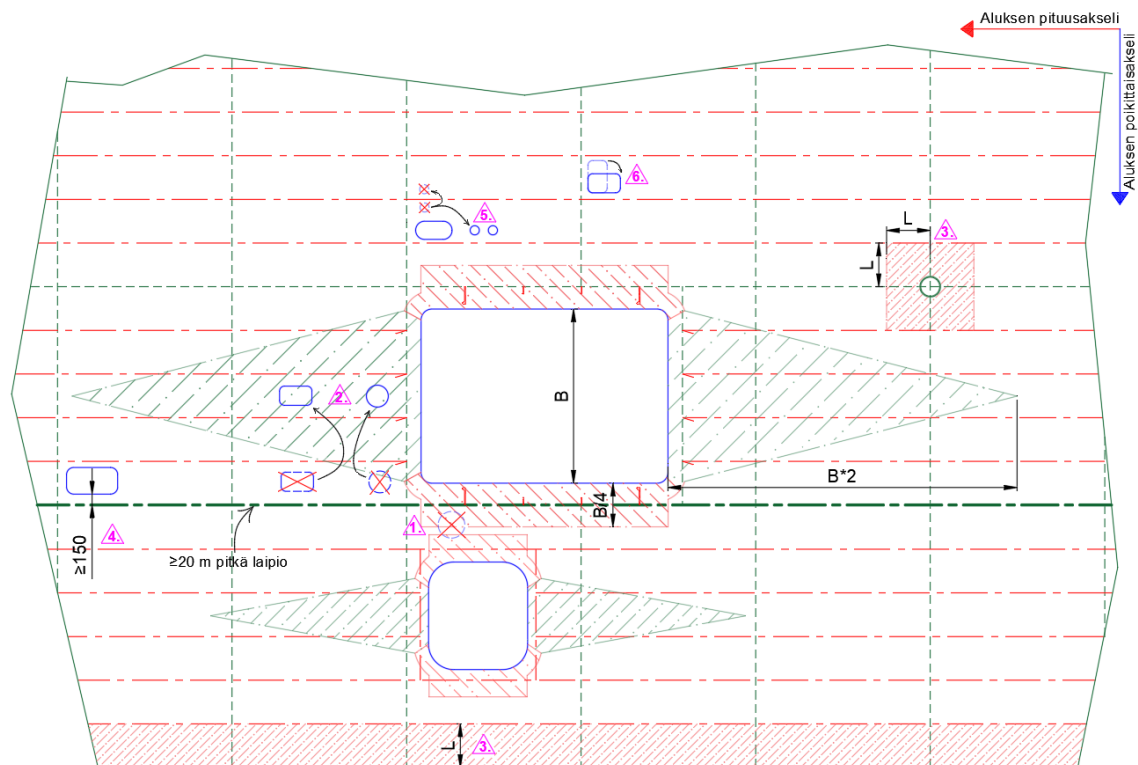
Kuten edellä on mainittu, kannet kuormittuvat pääasiallisesti runkopalkin taipumasta. Näin ollen kuormituksesta syntyvä vetojännitys kulkeutuu pääasiassa aluksen pituusakselin suuntaisesti. Jännityksen kulkusuunnan ollessa ennustettavissa voimme ennustaa myös aukosta syntyvän jännitysvuon kohonneen ja madaltuneen jännityksen alueet. Kuva 13 esittää mainittujen oletusten mukaisen aukon jännitysvuon. Huomaamme kohonneen jännityksen kulkeutuvan aluksen poikittaisakselin suuntaisesti ja madaltuneen jännityksen aluksen pituusakselin suuntaisesti. Pituuslujuudellisessa kontekstissa madaltuneen jännityksen alueen, ns. varjoalueen, ei konservatiivisuuden nimissä oleteta kantavan lainkaan kuormaa. Siten on muistettava huomioida varjoalue kannen poikkipinta-alassa.



Kuva 13. Kansiaukon jännitysvuo

Voimme käyttää kansiaukkojen erityispiirrettä, ennalta-arvattavissa olevaa jännitysvuota eduksemme asetellessamme kansiaukkoja. Kuva 14 tiivistää edellä kerrotun sekä kansille tyypilliset paikalliset rasitukset kuvalliseen ohjeeseen, jota käytetään osana työn tuloksena syntyviä aukkojen sijoitteluohjeita. Kuvan numeroidut rakenteet vastaavat seuraavia numeroituja kuvauksia. Kuva löytyy täysikokoisena Liite 1:stä.

1. On ehdottomasti vältettävä muiden aukkojen kohonneen jännityksen aluetta.
2. Madaltuneen jännityksen aluetta tulisi suosia mahdollisuuksien mukaan.
3. Paljon kuormaa kantavia ja siten liittyviin rakenteisiin kuormaa siirtäviä rakenteita, kuten rungon laitaa ja pilareita tulisi välttää vähintään yhden pitkittäisen kaaren matkalta – etenkin runkopalkin ylälaippana toimivan kannen laitaa on vältettävä.
4. Samasta syystä pitkittäiseen pituuslujuuteen osallistuvia rakenteita, kuten pitkiä laipioita ja jäykkäjäjä, tulisi välttää tyypillisen 50 mm sijaan vähintään 150 mm matkalta.
5. Useampi pienempi aukko tulisi sijoittaa sarjaan aluksen pituusakselissa, tällöin vain madaltuneen jännitykset alueet vuorovaikuttavat keskenään aukkojen välissä.
6. Suorakulmaiset aukot on pyrittävä sijoittamaan pitkä sivu aluksen pituusakselin suuntaisesti. Näin jännityksellä on suurempi ala hälventyä, madaltaen nurkkien jännityskonsentraatiota.



Kuva 14. Kansiaukkojen sijoitteluohjeet

2.8 Aukkojen sijoittelu

Aluksen rungon rasitustaso vaihtelee sijainnista riippuen lähes rasittamattomasta aina hyvin korkeasti, jatkuvalla syklillä rasitettuihin alueisiin – jälkimmäisillä aukkojen kontrollointi on välttämätöntä. Aluksen mukana pitkältä matkalta taipuvien ja siten pituuslujuuteen osallistuvien rakenteiden, ns. primäärirakenteiden, kuten rungon kansien, pitkittäisten laipioiden, pitkittäisten jäykkääjien ja laidan, voidaan olettaa olevan kauttaaltaan korkeasti rasittuneita. Erityismainintana runkopalkin muodostavan kannen ja laidan nurkkausten - sekä jääluokitettujen alusten jäävyön alueella laidoitukseen kiinnittyvät rakenteet ovat tyypillisen aluksen rasittuneimpia rakenteita.

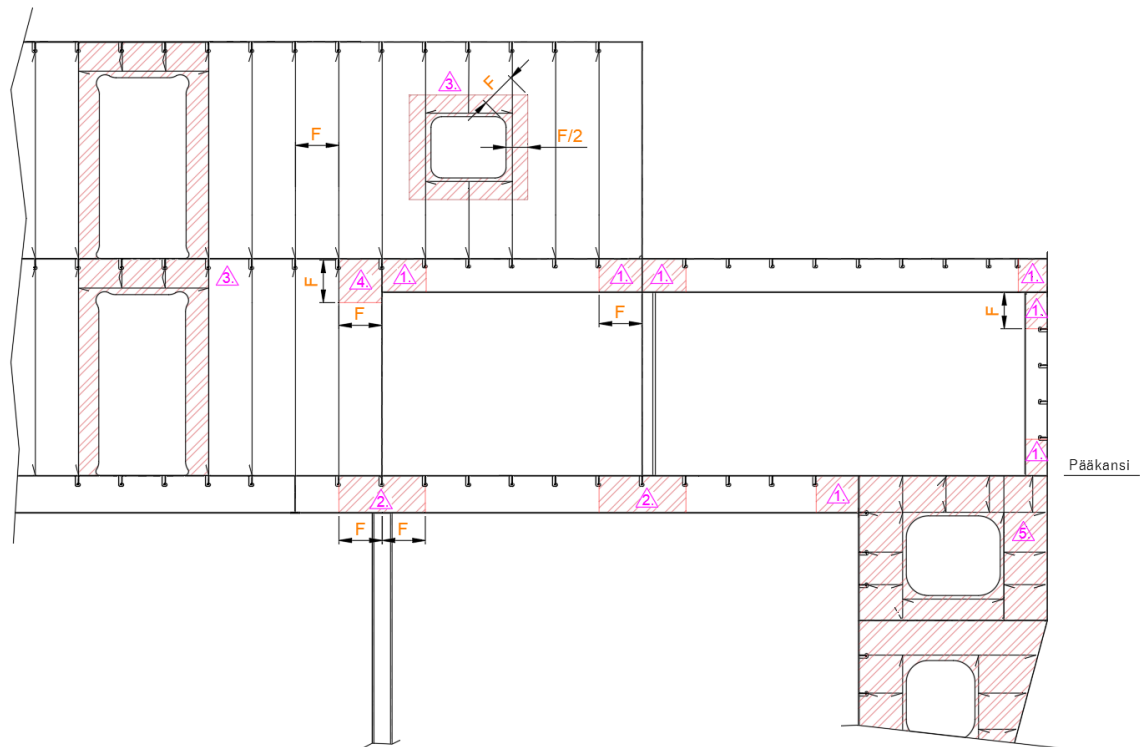
Myös kauttaaltaan maltillisesti rasitetuissa rakenteissa esiintyy aina paikallisia rasituksia, joiden jännitystaso voi hyvin olla jopa yli 10-kertainen rakenteen keskimääräiseen jännitykseen nähden. Paikalliset rasitukset syntyvät joko muista aukoista taikka liitoksesta kuormaa kantavaan, korkeasti jännittyneeseen rakenteeseen, joka heijastaa jännitystä liittyviinsä rakenteisiin.

Tyypillisimpiä aluksesta löytyviä paikallisia rasittumia on esitetty seuraavassa kehyskaarileikkauksessa (Kuva 15), jota käytetään osana työn tuloksena syntyviä aukkojen sijoitteluohjeita. Kuvan numeroidut rakenteet vastaavat seuraavia kuvauksia. Kuva löytyy täysikokoisena Liite 2:sta.

1. Aukkoja tulisi välttää palkin päädyissä vähintään yhden kaaren matkalta jäykän kiinnityksen aiheuttamien korkeiden leikkausvoimien vuoksi (NSRP 1998, 17) (Kuva 4).
2. Liitoskohdat mahdollisesti hyvinkin paljon kuormaa kantavien rakenteiden, kuten pilarien ja laipioiden kanssa, oletetaan olevan korkeasti rasittuneita. Aukkoja on vältettävä vähintään yhden kaaren etäisyydellä kummallakin puolella liitosta.
3. Aukot synnyttävät ympärilleen jännityskonsentraatioita häiritsemällä jännityksen kulkua. Jännityskonsentraatiot ovat pahimmillaan aukkojen nurkissa, mutta myös tasaisella sivulla on joko kohonnutta taikka alentunutta jännitystä. Koska emme pysty ennustamaan jännityksien

suuntia ja magnitudeja satunnaisessa rakenteessa, meidän täytyy olettaa koko aukon ympäröivän alueen olevan kriittisesti rasittunutta muutaman sadan millin matkalta. Keskikokoisiin aukkoihin, kuten ikkuna- ja oviaukkoihin, on pidettävä vähintään puolen kaaren etäisyys tasaisella sivulla ja yhden kaaren etäisyys nurkkien kohdalla.

4. Jäykkääjä saattaa siirtää merkittävästikin kuormaa laipioon kiinnittyvään nurkkaukseen, siten nurkkaus on pidettävä aukottomana yhden kaaren matkalta.
5. Jääluokitetuissa aluksissa on hyvin kriittistä kontrolloida jäävyön laidoitukseen liittyvät rakenteet. Laidan kehyskaarien rakenteisiin tulee suunnitella ennakkoon kevennysaukot systeemien läpivientien varalle.



Kuva 15: Kehyskaaren kielletyt alueet

2.9 Aukkojen muoto

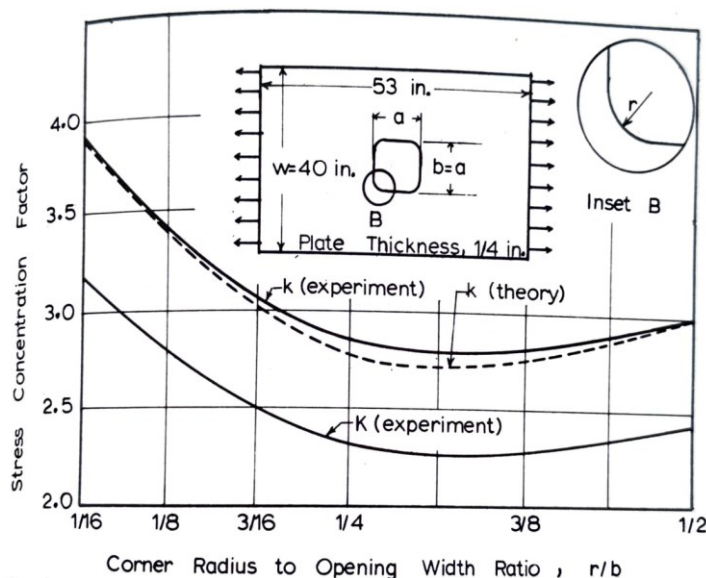
Jännityskonsentraation minimoimisen näkökulmasta pyöreät ja tasasivuiset aukot hyvin pyöristetäillä nurkillla ovat ideaalisia.

Pienissä ja keskikokoisissa aukoissa matalin konsentraatiokerroin saavutetaan nurkkapyöristyksen r/b -suhteen ollessa $\frac{1}{2} \dots \frac{1}{4}$ välillä (Kuva 16).

Poikkeuksena suorakulmaisen kanavan läpiviennissä jäykkäjässä voidaan sallia pienemmät nurkkapyöristykset aina $\frac{1}{8}$ saakka, sillä pienemmät nurkkapyöristykset aiheuttavat pienemmän haitan kuin aukon koon suurennus rakenteessa, jossa on jo muutoinkin rajallisesti materiaalia. Laipiossa aukon koon kasvatus on todennäköisesti mieluisampi kompromissi kuin nurkkapyöristysten pienennys.

Sama r/b suhdesääntö ei päde suuriin kansiaukkoihin, joissa suotuisan suhteen on kokemusperäisesti ja laskennallisesti todettu olevan $\sim 1/20$ (SSC-418 2002, 28).

Suorakulmion sivujen suhde a/b on pyrittävä pitämään korkeintaan $\frac{1}{2} - 2$ suuruisena (Kuva 17), poissulkien pitkittäisissä rakenteissa, joissa pääjännityksen tiedetään runkopalkin taipumasta johtuen olevan pituussuuntainen. Näin ollen hoikka suorakulmainen aukko voidaan asettaa pitkä sivu jännityksen suuntaisesti.



Kuva 16. r/b -suhde konsentraatiokertoimeen (D'arcangelo 1964)

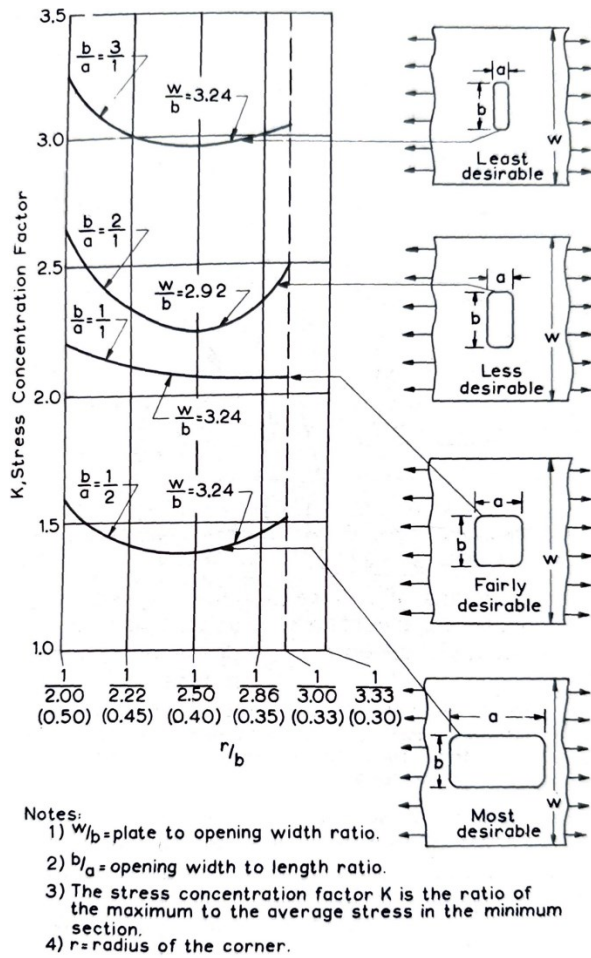


FIG. 2-20. Effect of the b/a ratio on the stress concentration factor. (Ref. 9)

Kuva 17. a/b -suhte konsentraatiokertoimeen (D'arcangelo 1964)

3 Aukkojen laskennan käsitteet

Luku käsittelee suppeasti aukkojen laskennan kannalta oleellisimpia käsitteitä, työn laajuus ei ylety käytännölliseen tarkasteluun saakka.

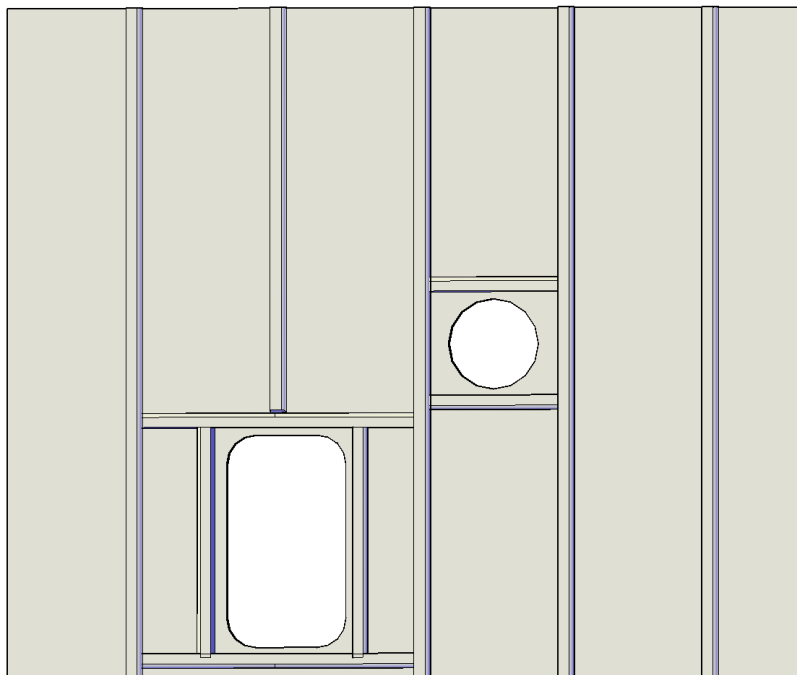
Jokaisen aukon ympäröivä levykenttä on joko vahvistettava taikka sen lujuus ja vakaus on todistettava riittäväksi laskennallisesti. Vahvistukset ovat työläitä, monimutkaistavat rakenteita ja lisäävät painoa. Siten ne ovat yleensä kustannuksellisesti epäedukkaita laskennalliseen todistamiseen nähden - näin laskennasta syntyy hyvin oleellinen osa aukkojen tarkastusprosessia.

Kantavissa ja / tai korkeammin rasitetuissa rakenteissa on mielekästä vahvistaa aukkoja redundanssin nimissä, mutta keski- ja matalarasitteisissa rakenteissa on pyrittävä todistamaan aukkojen kelpoisuus laskennallisesti.

3.1 Vauriomekanismi

Aukot ovat rakenteen lujuuteen ja vakavuuteen alentavasti vaikuttavia epäjatkuvuuksia. Aukot nostavat ympäröivän levykentän jännitystasoa poistetun materiaalin edestä, synnyttävät reunoilleen jännityskonsentraatioita ja toimivat levykentän heikompina kohtina.

Aukot voivat vaurioittaa ympäröiviä rakenteita joko lommahtamalla korkeasta leikkaus- / puristusjännityksestä, murtamalla myötörajan äkillisestä ylityksestä, taikka murtamalla pidempiaikaisesta väsymisestä. Aukko on todennäköisesti levykentän heikoin kohta, joten korkeassa kuormitustilanteessa levykentän vaurioituminen alkaa aukosta, leviten pienimmän vastuksen reittiä liittyviin rakenteisiin. Leviämistä voidaan lieventää / ehkäistä vahvistamalla aukkoa ympäröivä levykenttä jäykisteillä (Kuva 18).

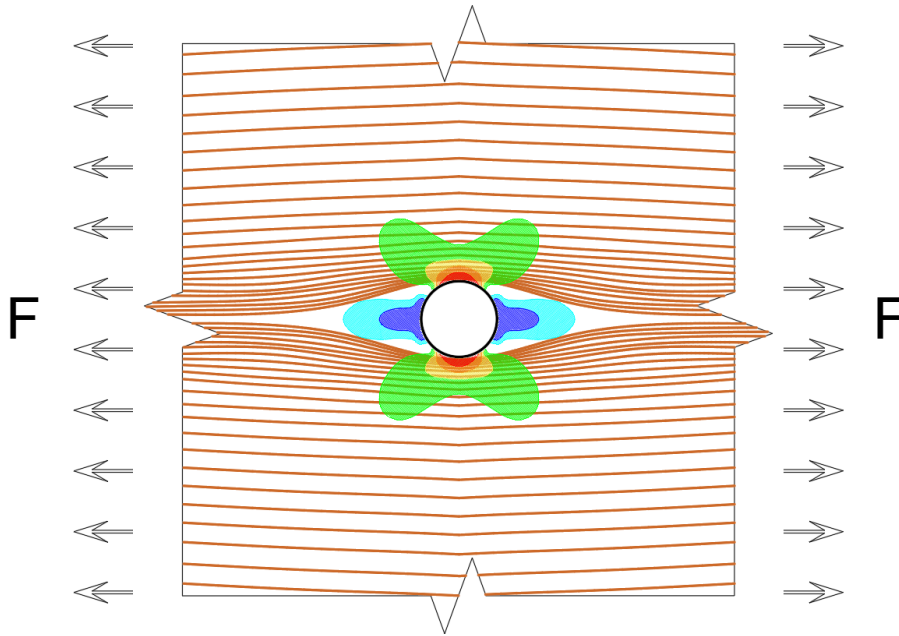


Kuva 18: Jäykisteillä vahvistetut aukot.

3.2 Jännityskonsentraatio

Jännitys syntyy levykentän sisäisten voimien liikkeestä atomirakenteen absorboidessa ulkoisia voimia. Jännityksen voidaan kuvata leviävän virtauksen lailla teräsmolekyylien siirtäessä ulkoisen voiman energian ulommas, hälveten etäisyyden funktiona. Epäjatkuvuuskohdat luonnollisesti haittaavat virtausta. Molekyylit pakkautuvat tiiviimmin päästääkseen virtaamaan epäjatkuvuuskohdan ylitse ja synnyttävät sisäisten voimien konsentraatioita – jännityskonsentraatioita. Kuva 19 pyrkii havainnollistamaan jännityksen virtauksen, ns. jännitysvuon ja jännityskonsentraation aukon ympärillä vedossa olevassa levykentässä.

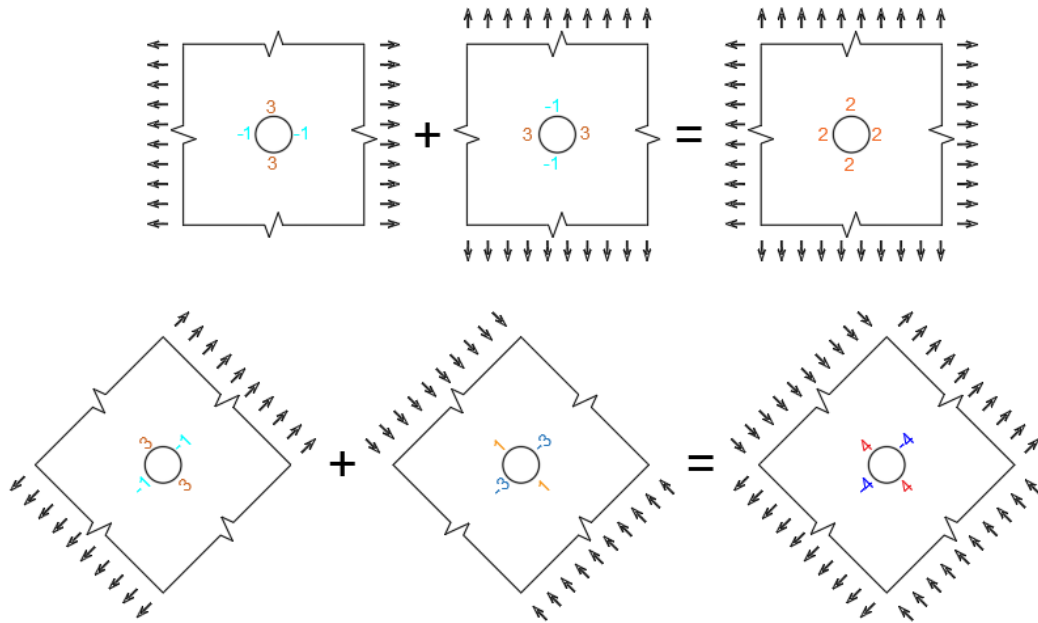
Jännityskonsentraatiokerroin K on dimensioton suhdeluku aukon reunan korkeimman piikkijännityksen suhteesta levykentän normaalijännitykseen.



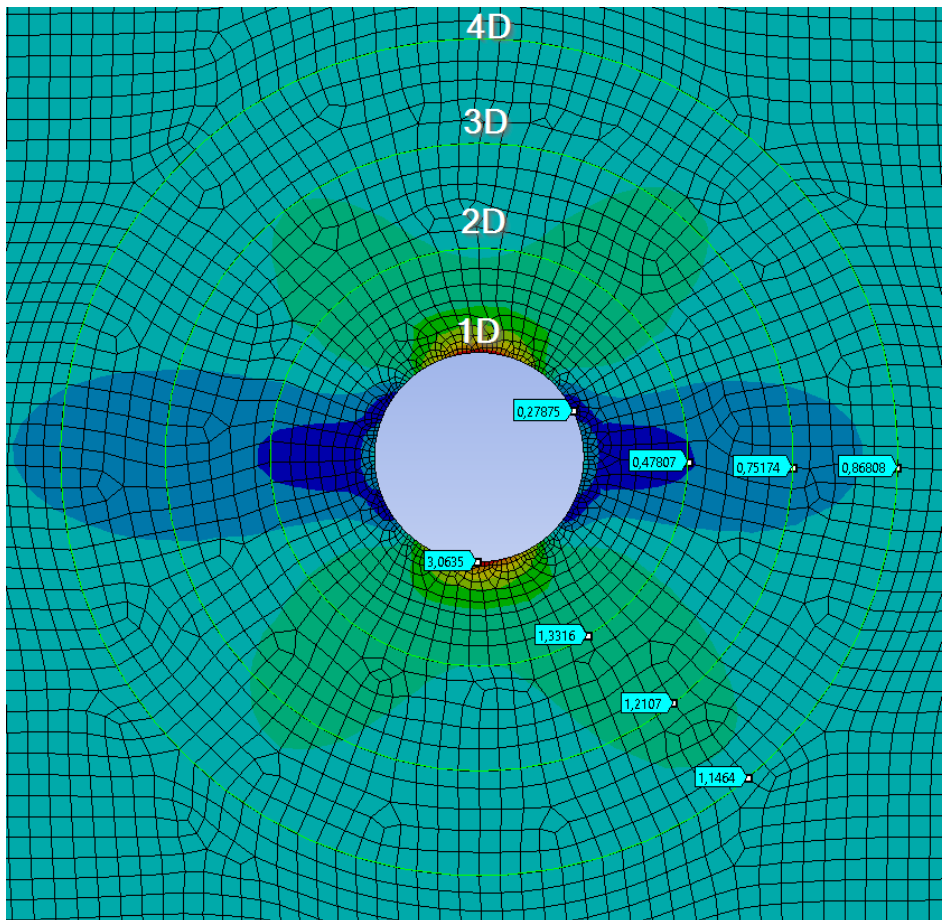
Kuva 19. Jännityskonsentraatio ja -vuot.

Yksinkertaisimmillaan jännityskonsentraatiota voidaan tarkastella äärettömän kokoiselle levykentälle, jossa on yksi pyöreä reikä. Tällöin jännityskonsentraatiokerroin on väliltä 2–4 riippuen kuormitusilanteesta. Yhdensuuntaisessa vedossa taikka puristuksessa kerroin on 3 (Kuva 20), alhaisimmillaan kerroin on samansuuntaisessa bi-akσιαalisessa kuormituksessa, jolloin kerroin on 2. Korkein konsentraatio syntyy tilanteessa, jossa vastakkaisten 45-asteisten kuormien leikkausvoimat kumuloituvat keskenään.

Levykentän nähdään olevan äärettömän suuri, jos aukosta syntyvä jännitysvuo häviää täysin törmäämättä seuraavaan rakenteeseen / levyn reunaan – näin jännitysvuo pysyy ennakoitavana. Kirjallisuudesta löytyvän viitteen mukaisesti jännitysvuon voidaan olettaa hälventyneen neljän halkaisijan etäisyydeltä aukosta (SSC-418 2002, 16). FEA-mallilla tehdyn kokeen perusteella jännitysvuo häviää tällä matkalla noin 90 %:lla, levykentän normaalijännitys on 1 (Kuva 21) – käytännöllisyyden nimissä neljän halkaisijan oletusta voidaan pitää riittävän tarkkana.



Kuva 20. Jännityskonsentraatiokertoimet pyöreälle aukolle.



Kuva 21. Jännitysvuon hälventyminen.

4 Aukkoprosessin kuvaus

Aukkoprosessi voidaan hajottaa kolmeen peruskomponenttiin: aukkojen pyyntiin, tarkastukseen ja laskentaan. Se, miten kukin komponentti hoidetaan ja kuka vastaa kustakin komponentista, on yksilöllisen telakan järjestelmistä ja käytössä olevista työkaluista kiinni.

Seuraavaksi kuvattu aukkoprosessi on soviteltu toimeksiantajan järjestelmiin ja vastaa pääpiirteiltään Suomen telakoiden käytäntöjä. Prosessissa on pyritty hyödyntämään uusimpia työkaluja mahdollisuuksien mukaan.

Taulukko 1 jakaa aukkoprosessiin osallistuvat disipliinit suorittaviin komponentteihinsa. Mutta kuten edellä on mainittu, disipliinien vastuut voivat vaihdella telakasta riippuen.

Taulukko 1: Disipliininen jako komponentteihin

Pyynti	Tarkastus	Laskenta
Kansivarustelu	Runko (Suunnittelija)	Runko (Laskija)
Konevarustelu (LVI)		
Sisustus		
Sähkö		

4.1 Aukkopyynti

Kaikki aukkoja tarvitsevat systeemivastuulliset disipliinit osallistuvat aukkojen pyyntiin – systeemivastuut käsitellään tarkemmin alaotsikossa 4.4.

Yksinkertaisuudessaan aukkojen pyytäjien vastuulla on toimittaa aukkosuunnitteluohjeen mukaisesti pyydetyn aukon geometriatiedot tarkastajille ja huolehdittava pyydettyjen aukkojen muutosprosessista.

Tämän prosessin tapauksessa aukon pyynti tapahtuu rekisteröimällä aukkopyyntityökaluun, Cadmaticin Hole Manageriin haluamansa aukon keskipisteen ja muodon geometriset tiedot, tästä tiedot siirtyvät tarkastajille.

Pyytäjät huolehtivat myös tarvittaessa aukon muutosprosessista, joka käynnistyy ohjeiden vastaisesti pyydetyistä aukosta tai aukon geometriatietojen muutostarpeesta. Kun ohjeiden vastaisesti pyydetyin aukon tapauksessa tarkastaja on hylännyt aukot ja antanut suositukset, joilla aukko saadaan hyväksytyksi, vastuu aukosta siirtyy takaisin pyytäjälle. Geometriatietojen muutostarve taas voi syntyä systeemien lähtötietojen kypsyessä projektin edetessä, esimerkiksi oviaukon sijainnin siirtyessä taikka ikkunan koon muuttuessa.

Ennen kaikkea pyytäjien vastuulla on perehtyä huolellisesti projektikohtaiseen aukkopyyntiohjeeseen ja pyrkiä mukauttamaan omia systeemejä sallittujen läpikulkureittien puitteissa, sillä korkeasti rasitetut kielletyt alueet tulevat väistämättä määrittelemään joidenkin kanavien ja putkien kulkureittejä. Aukkopyyntiohjeet voivat rakentua pitkälti Aukkotyypit ja niiden suunnittelu - yläotsikossa läpikäytyjen suositusten varaan.

4.2 Aukkotarkastus

Runkosuunnittelija vastaa suunnittelualueelleen pyydettyjen aukkojen tarkastuksesta. Tarkastuksen laajuus eli se, miten monta muuttujaa tarkastajan on otettava huomioon, riippuu projektikohtaisesta prosessista. Toisaalla koko tarkastusprosessi saattaa jäädä puhtaasti laskijoiden vastuulle, kun taas toisaalla runkosuunnittelijoiden tehtäväksi on voitu antaa täysimääräiset tarkastukset kompensointianalyysineen. Tämän työn prosessissa tarkastajan odotetaan varmistavan aukon sijainnin ja muodon olevan aukkopyyntiohjeiden mukainen, ja tarkistavan FEA-mallista aukon ympäröivän levykentän käyttökertoimen. Käyttökertoimen pohjalta aukot joko hyväksytään sellaisenaan, hyväksytään vahvistettuna tai korkean käyttökertoimen tapauksissa lähetetään eteenpäin tarkistettavaksi laskentatiimille. Tuloksinvaraisissa tilanteissa tai

rajatapauksissa tarkastajana tulisi konsultoida laskijaa ennen päätöksen tekemistä.

4.3 Aukkolaskenta

Täydellisenkin aukkojen sijoitteluohjeen kanssa osa aukoista joudutaan väistämättä asettamaan ohjeiden vastaisille kielletyille alueille, taikka aukkojen muodot tulevat olemaan ohjeiden vastaisia. Osa oikeinkin sijoitetuista aukoista tulee sattumanvaraisesti olemaan korkeasti rasitetulla, korkean käyttökertoimen rakenteessa. Näissä kahdessa poikkeustapauksessa aukot siirtyvät analysoitavaksi laskentatiimille. Laskentatiimi joko hyväksyy aukon sellaisenaan taikka vahvistuksineen.

Aukotetun levykentän lujuuden ja vakavuuden analysoinnin laajuus riippuu tarkasteltavan systeemin monimutkaisuudesta. Valtaosa tapauksista voidaan luokitella yksinkertaisiksi, jolloin analysointiin riittää puhtaasti matemaattiset laskentatyökalut. Monimutkaisissa systeemeissä, joissa useamman aukon jännitysvuot vuorovaikuttavat keskenään kantavissa, korkeasti rasitetussa rakenteessa, joudutaan turvautumaan kalliisiin ja työläisiin FEA-malleihin.

Laskentatiimin yksi päävastuista on huolehtia analyysien kustannustehokkuudesta. Analyysien taso on suhtautettava tarkistettavan kohteen tuotantovaiheeseen. Suunnitteluvaiheessa mahdollisimman moni tarkastus on pyrittävä suorittamaan tehokkaasti matemaattisilla työkaluilla. Tämä johtaa FEA-malleja konservatiivisempien oletuksien vuoksi suurempaan määrään vahvistuksia, mutta vastapainoksi analyysien nopeus on moninkertainen. Myöhemmissä tuotannollisissa vaiheissa FEA-mallit saattavat monissa tapauksissa olla kustannustehokkaampia, jos niillä voidaan välttyä teettämästä vahvistuksia jo rakennettuihin ja varusteluihin lohkoihin.

4.4 Aukkojen systeemivastuut

Disipliinien aukkoihin liittyvissä systeemivastuissa on lähes poikkeuksetta eroavaisuuksia projektista riippuen. Eri telakoilla ja suunnittelutoimistoilla voi olla merkittäviäkin eroja disiplinien systeemivastuissa. Projektikohtainen systeemivastuujako on huomioitava prosessia suunnitellessa, mutta sillä ei ole niinkään merkitystä sattuuko kansivarustelu - vai sisustusdisipliini olemaan vastuussa esimerkiksi ovista. Vaan jotta aukkokyyntitiedot olisivat mahdollisimman laadukkaita ja ajantasaisia on systeemin omistajan oltava myös vastuussa systeemin aukkojen pyynnistä, sillä systeemin omistajalla on viimeisin tieto vastuualueestaan. Esimerkiksi ikkunahankintavastuun olleessa kansivarustelulla on kansivarustelun myös oltava vastuussa ikkuna-aukkojen pyynnistä, sillä heillä on ajantasaisin tieto ikkunoiden sijainnista ja koosta. Aukkojen systeemivastuut jakautuvat disiplineille tässä prosessissa seuraavan taulukon mukaisesti.

Taulukko 2. Aukkojen systeemivastuut disiplineittain

Runko	Kansivarustelu	Konevarustelu	Sisustus	Sähkö
Isot kansiaukot	Hissi- ja porraskuilut	HVAC	Ikkunat	Kaapelihyllyjen läpiviennit
Kevennysaukot	Kansiluukut	Muut systeemien putkien aukot	Ovet	
	Miesluukut	Koneiden aukot kuten pakoputket, rikkipesurit, jne.		
	Laita-aukot			

4.5 Inter-disipliininen yhteistyö

Aukkoprosessiin osallistuvien disipliinien välinen yhteistyö on pyrittävä pitämään mahdollisimman saumattomana ongelmienratkaisun tehokkuuden nimissä. Yksi ratkaisu on jokaisen disipliinin vastuullisista edustajista muodostuva työryhmä, jossa yhdessä pohditaan parasta kompromissia yksilöllisille ongelmille. Työryhmää voidaan pyörittää yrityksen / projektin sisäisissä pikaviestikanavissa, kuten Teams ja Slack.

4.6 Aukkotarkastusprosessin mukautuminen tuotantovaiheisiin

Herkkyden teettää vahvistuksiin johtavia muutoksia runkoon pitäisi tippua mitä pidemmälle rungon tuotantoa edetään. Laskenta-analyysien tarkkuuden on myös noustava sitä mukaan, mitä kalliimpaa ehdotettu muutos on toteuttaa – kuten alaotsikossa 4.3 on mainittu.

4.7 Suunnitteluohjelmisto

Aukkoprosessin hallittavuuden näkökulmasta aluksen suunnittelua olisi mielekästä työstää erikoistuneella suunnitteluohjelmistolla, kuten Avevalla tai Cadmaticilla jo perussuunnitteluvaiheesta lähtien, ja näin nykyään useimmiten toimitaankin. Edellä mainitut suunnitteluohjelmistot tarjoavat valmiita aukkohallintatyökaluja, joilla voidaan siirtää tietoa aukoista ja hallinnoida aukkojen muutosprosessia luotettavasti disipliinien välillä. Tässä työssä luotu aukkoprosessi hyödyntää Cadmaticin aukkohallintatyökalua aukon geometriatietojen siirrossa, tilan hallinnassa ja geometriatietojen muutosprosessin hallinnassa.

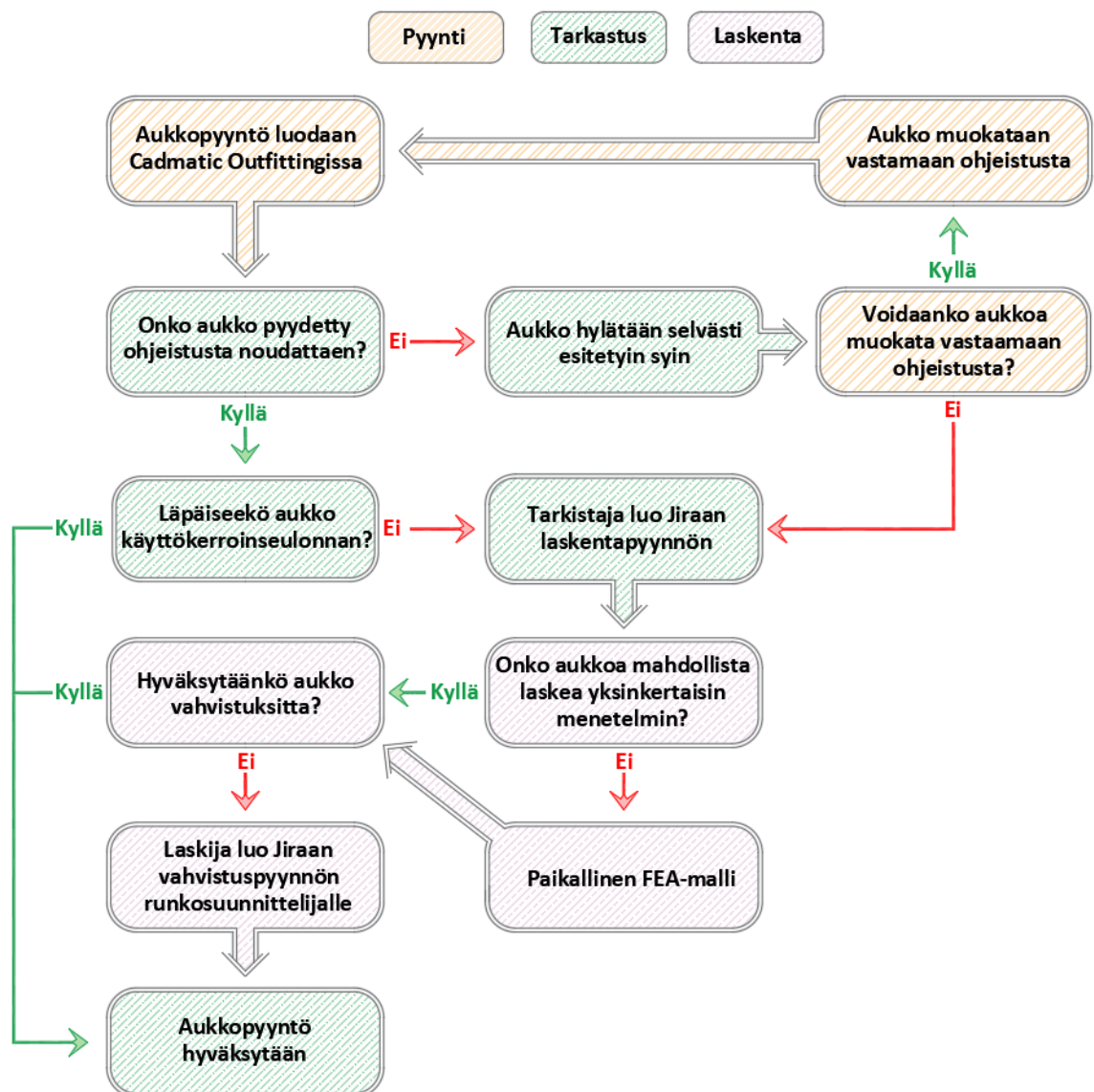
4.8 Tehtävienhallinta

Suunnitteluohjelmistojen lisäksi, tai etenkin jos suunnitteluohjelmistojen hallintatyökalut ovat puutteellisia tai puuttuvat täysin, on Jiran kaltaisia

tehtävienhallintaohjelmistoja suositeltavaa käyttää aukkotietojen ja -tehtävien hallinnassa. Tässä työssä Jiraa käytetään tarkastajien ja laskijoiden väliseen tehtävienantoon – kuten voidaan nähdä prosessikaaviosta (Kuva 22).

4.9 Prosessikaavio

Kuva 22 tiivistää Aukkoprosessin kuvaus -otsikon sisällön aukon elinkaaren prosessikaavioksi.



Kuva 22: Aukon elinkaaren prosessikaavio

4.10 Ohjeistus

Kuten johdannon tavoitteissa mainitaan, työn varsinaisena lopputuotteena toimeksiantajalle luodaan aukkoprosessi. Koko prosessi jakaantuu kahdeksi ohjeistukseksi aukkoja pyytävälle disiplineille, sekä aukkoja tarkastaville disiplineille. Seuraavaksi esitetään suppeasti kummankin ohjeistuksen sisältö.

4.10.1 Aukkojen pyyntiohje

Aukkojen pyyntiohjeen ensimmäisessä kappaleessa pohjustetaan projektille valikoidun suunnitteluohjelmiston, Cadmatic Outfittingin sisäisen aukkohallintatyökalun, Hole Managerin ominaisuudet ja käyttö alkaen aukon pyynnistä aina aukon muutoshallintaan.

Toinen kappale käsittelee aukkojen sijoittelua erityyppisissä rakenteissa ja muotoa. Käytännössä Aukkotyytit ja niiden suunnittelu -luvun sisältö on pelkistetty helposti tulkittavaksi kahdeksi A3:sen kokoiseksi kuvaksi, kuvien Kuva 14 ja Kuva 15 kaltaisesti. Jokainen kuvissa esitetty sääntö / suositus on avattu laajemmin käytännön esimerkeillä väärin sijoitetusta aukosta johtuviin haittoihin rungolle.

Viimeisessä kappaleessa pohjustetaan aukkoprosessia ja esitetään Kuva 22 - tyylinen, projektille räätälöity prosessikaavio.

Aukkopyynnin tehtävät ja vastuut pohjustetaan luvussa 4.1.

4.10.2 Aukkojen tarkistusohje

Tarkistusohje aloitetaan pyyntiohjeen kaltaisesti pohjustaen rungon suunnitteluohjelmiston, Cadmatic Hullin sisäisen aukkohallintatyökalun, Hole managerin ominaisuuksiin ja käytännön työn käyttöohjeisiin.

Aukkojen sijainti ja muoto tarkastetaan edellisessä luvussa esiteltyä ohjeistusta vastaan, siten ohje esitetään samassa muodossa myös tarkastusohjeen toisessa luvussa.

Kolmannessa luvussa tarkastaja perehdytetään FEA-käyttökerroinseulontaan ja aukkojen vahvistukseen. Tarkastajalle esitetään raja-arvot erityyppisissä rakenteissa, joiden puitteissa aukko voidaan joko hyväksyä sellaisenaan, hyväksyä vahvistettuna taikka toimittaa edelleen laskentatiimille. Vahvistusten osalta tarkastaja perehdytetään erityyppisten aukkojen vahvistamiseen jäykisteillä lommahdusta ja murtumista vastaan.

Kuten pyyntiohjeidenkin osalta, lopuksi pohjustetaan ja esitetään projektille räätälöity prosessikaavio.

Aukkotarkastuksen tehtävät ja vastuut pohjustetaan luvussa 4.2.

5 Tulevaisuuden innovaatiot

Luvussa pohditaan lähitulevaisuuden innovaatioita, joilla aukkoprosessin seuraavat harppaukset tehokkuudessa ja tarkkuudessa mahdollisesti otetaan.

5.1 FEA integraatio runkosuunnitteluohjelmistoon

Tehokkuuden ja tarkkuuden kannalta suurimman harppauksensa aukkoprosessi ottaisi saumattomasta integraatiosta runkosuunnitteluohjeiston ja FEA-mallinnusohjelmiston välillä. Runkoon toivottuja aukkoja voitaisiin parhaimmillaan analysoida päivittäin yön aikana ratkottavalla FEA-mallilla, johon tuotaisiin päivän päätteeksi viimeisin runkomalli, sisältäen viimeisimmät aukkopyyntöt. Jatkuvasti kasvavan, jo nykyisellään kohtalaisen halvalla vuokrattavan laskentatehon ansiosta, mallia voitaisiin ajaa aukkojen kohdalta tiheämmällä verkotuksella.

Integraatiolle ei nykyisellään ole teknistä estettä, vaan luultavasti esteenä on taloudelliset kannustimet. Pienen alaan erikoistuneeseen ohjelmistoon ei välttämättä ole nykyisellään mahdollista resursoida integraatioon vaatimaa tuotekehitysbudjettia. Nykyisen kehityksen jatkuessa integraatioon kykenevän ohjelmiston voitaisiin nähdä markkinoilla 5-10 vuoden päästä.

5.2 Vahvistusrautojen kompensointi läpivientiholkeilla

Putkien läpivientiholkkeja voisi jo nykyiselläänkin olla mahdollista valmistaa kuormaa kantaviksi, jos markkinoilta löytäisi tuotteelle käyttökohteita.

Parhaimmillaan holkki jäykistäisi läpivientiaukkoa nostaen sen lommahduskapasiteettia ja toimien myös murtuman leviämisen estäjänä - korvaten nykyisin käytettyjä aukon vahvistusrautoja. Kantavat ja luokitellut holkit olisivat toki tavallisia kalliimpia. Niiden käyttökohteet rajoittuisivat korkeammin rasetuilla alueille, joissa aukot pitää vahvistaa.

Holkkien kustannustehokkuuden selvittäminen vaatisi oman tutkielmansa.

5.3 Rakenteellisen lasin käyttö kansirakennuksessa

Kuten luvussa 2.5 mainittiin, arkkitehtien halu suurentaa matkustajatilojen ikkunoita on selvä trendi, jolle ei vielä ole löytynyt ylärajaa. Staattisemmissa maarakennuksissa suuria ikkunoita on käytetty kantavina rakenteina jo vuosikymmeniä. Jonkin verran tutkimusta on myös tehty vastaavien ikkunoiden käytöstä superjahtien kansirakennuksissa. Nykyiset rakenteelliset ikkunat eivät kuitenkaan sovellu laivan kaltaisiin dynaamisiin rakenteisiin. Ei kuitenkaan ole täysin poissuljettua nähdä ikkunoidenkin ja laskentatekniikan kehittyvän lähitulevaisuudessa pisteeseen, jossa ikkunoita voitaisiin käyttää osana kansimökin kuormaa kantavaa laidoitusta. Ikkunoiden materiaali- ja valmistustekniikan tulisi kuitenkin kehittyä vielä selvästi nykyisestään.

Mahdollisesti ikkunat voisivat koostua soluista, jotka katkaisevat murtumien leviämisen, ja materiaalia voitaisiin seostaa mahdollistaen suuremman elastisuuden. Ikkunoita ympäröivä rakenteellinen kehikko, eli kannen ja laidan liitoksen muodostamaa palkkia voitaisiin myös vahvistaa hyvin paljon nykyisestään minimoidessa ikkunoihin kohdistuvaa venymää.

5.4 Prosessin laajempi integraatio tehtävienhallintatyökaluihin

Jo vuosikymmenen IT-puolella käytössä olleet Jiran kaltaiset tehtävienhallintatyökalut kasvattavat suosiotaan meritekniikankin suunnittelutöissä. Suunnittelutyön sirpaloituessa vuosi vuodelta enemmän fyysisestä konttorista ympäri maailmaa tulee keskitetyistä tehtävienhallintatyökaluista entistä oleellisempi osa arkista työntekoa.

Nykyisellään aukkoprosessia hallinnoidaan pitkälti suunnitteluohjelmistojen kautta, kuten luvussa 4.7 kerrotaan. Suunnitteluohjelmistojen työkalut ovat nykyisellään hyvin rajoitettuja seurannan ja raportoinnin suhteen, mikä luo luottamusongelmia alihankituista työstä. Prosessin hallinnoiminen Jiran taikka vastaavan ohjelmiston kautta mahdollistaisi jokaisen yksilöllisen aukon elinkaaren seurannan. Seurannan tarve riippuu hyvin paljon projektin luonteesta

ja koosta, eikä näin tarkalle seurannalle yleensä ole ollut tarvetta – toki työkalujakaan seurannalle ei ole aiemmin ollut yhtä helposti saatavilla.

Hallintatyökalun täysimittainen integroiminen aukkoprosessiin voisi olla lähitulevaisuuden mielenkiintoinen kokeilu, etenkin vahvasti alihankituille projekteille.

5.5 Laskentatyökalujen kehitys

Matemaattisten laskentatyökalujen, joilla tarkoitetaan kaikkia työkaluja pois lukien FEA, kehityksellä voidaan vaikuttaa merkittävästikin aukkojen tarkastusprosessin tehokkuuteen ja vahvistusten määrään. Nykyiset, yleensä yksinkertaiset Excel-pohjaiset työkalut sisältävät paljon epävarmuustekijöitä, jotka vaativat tarkistajan kokemukseen pohjautuvia tulkintoja.

Sofistikoituneemmat työkalut vähentäisivät tulkinnanvaraisuutta ja mahdollistaisivat tarkistajien tehokkaamman kouluttamisen sekä vähentäisivät varovaisuuden ja konservatiivisuuden nimissä tehtyjä, usein tarkemmissa FEA-laskelmissa turhaksi osoittautuvia vahvistuksia.

Työn kirjoitushetkellä ChatGPT:n julkaisu on synnyttänyt valtavaa yhteiskunnallista keskustelua tekoälyn potentiaalista erikoistuneina työkaluina. Arvoa luovien tekoälypohjaisten työkalujen rantautuminen meritekniikkaan kestää varmasti vielä muutaman vuoden, mutta en näkisi estettä, miksei tekoälypohjainen sovellus voisi mullistaa laskentatyökaluja. Esimerkkinä tekoäly voitaisiin opettaa tulkitsemaan rungon 3D-mallista leikattuja pienempiä, tarkistettavia aukkoja sisältäviä malleja koodiksi, joka rakentaa vastaavan mallin automaattisesti Ansysin kaltaiseen FEA-työkaluun. Näin aukot voitaisiin tarkastella lähes automaattisesti hyvin paljon nykyistä suuremmalla tarkkuudella.

6 Yhteenveto

Työn tuloksena on luotu koko aukkoprosessin kattavat, toimeksiantajan projektiin räätälöidyt ohjeistukset aukkojen pyynnille ja tarkastukselle. Projekti, jossa prosessi on otettu käyttöön ei opinnäytetyön kirjoitushetkellä ole tarpeeksi pitkällä, jotta johtopäätöksiä prosessin vahvuuksista ja heikkouksista voitaisiin tehdä - sillä vasta aluksen tuotantovaihe laittaa aukkoprosessit koville.

Yksi työn oleellisimpia tavoitteita oli pyrkiä hyödyntämään viimeisempiä työkaluja ja työskentelytapoja. Tavoitteessa onnistuttiin kohtalaisen hyvin, sillä prosessi hyödyntää kommunikointia, että jäljitettävyyttä tehostavia trendaavia työkaluja kuten Jiraa ja Teamsia. Aukkojen tarkastuksessa hyödynnetään FEA-tuloksia tavalla, joka potentiaalisesti tarkentaa ja suoraviivaistaa huomattavasti tarkistusprosessia aiemmasta.

Työn paisumisriskin vuoksi aukkojen laskentaa ei työssä käsitelty kuin pintapuolisesta. Aukotettujen ohutlevyrakenteiden laskennassa on kuitenkin valtavasti potentiaalista aukkoprosessin tehokuutta kasvattavaa kehitystyötä, joka vaatisi omat tutkielmansa. Nykyiset, monimutkaiset ja kömpelöt laskentatyökalut eivät hitautensa puolesta monesti ole olemassaolostaan huolimatta laajassa käytössä, sillä projektin nopea tahti ei salli työkalujen käyttöä nykyisillä laskentaresursseilla. Tämän vuoksi valtaosa aukoista tarkistetaan hyvin yksinkertaistetuilla työkaluilla, joiden tuloksiin joudutaan leipomaan suuria virhemarginaaleja. Tämä taas johtaa epäoptimaalisiin ratkaisuihin, joita tarkemmilla työkaluilla voitaisiin parannella, jos niitä vain ehtisi käyttämään.

Lähteet

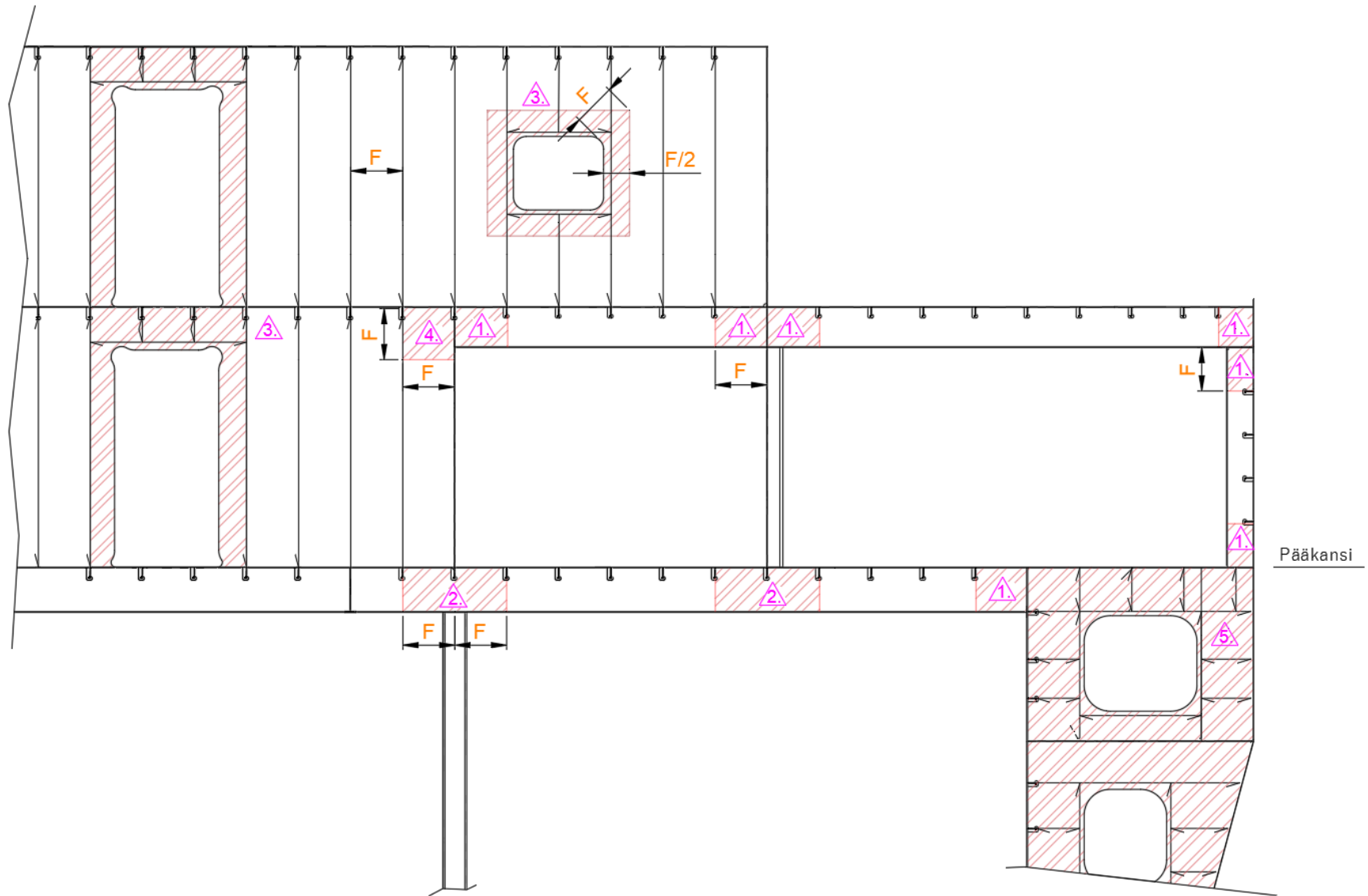
Amelio M. D'arcangelo. 1964. A guide to sound ship structures. Cornell maritime press.

SSC-418. Compensation for openings in primary ship structures. 2002. Ship structure committee.

DVN 2022. DNV GL Class documents. Jul 2022. Part 3 Hull. Chapter 1 General principles. Edition July 2022. Part 3 Chapter 3 Section 6 7.2.3. Manholes and lightening holes. <https://rules.dnv.com/servicedocuments/dnvp/>

Walter D. Pilkey. 1997. Petersons stress concentration factors. A Wiley-Interscience Publications.

NSRP. Industry Standards for Hull Structural Penetration Design Criteria and Details. 1998. The National Shipbuilding Research Program.



Pääkansi