

Opinnäytetyö (AMK)

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

2019

Riikka Heiska

TEMPEST-HUONEEN RAKENTEET

Riikka Heiska

TEMPEST-HUONEEN RAKENTEET

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on suunnitella TEMPEST- huoneen rakenteet. TEMPEST on termi, jota käytetään toimista, joiden avulla suojaudutaan hajasäteilyn aiheuttamilta tietoturvariskeiltä. Hajasäteilyllä tarkoitetaan elektronisista laitteista lähtevää tahatonta sähkömagneettista säteilyä. TEMPEST-huoneen suojarakenteet estävät hajasäteilyn etenemisen huoneen ulkopuolelle.

Työssä on käyty läpi kansalliset tietoturvaohjeet hajasäteilyn osalta, tarkoituksena löytää vaatimukset TEMPEST-huoneelle. Työssä esitellään lyhyesti radioaaltojen käyttäytymistä, heijastumista ja vaimenemista, taajuudesta ja väliaineen sähköisistä ominaisuuksista riippuen. Lisäksi käsitellään sähkömagneettiselta säteilyltä suojautumista esittelemällä kaupallisia suojahuoneita ja muutamia tutkimuksia. Tyypillisin tapa suojaukselle on käyttää yhtenäistä johdepintaa, esimerkiksi teräslevystä rakennettua kokonaisuutta.

Lopuksi työssä kuvataan suunnitellut TEMPEST-huoneen tyypirakenteet, niiden mitoitusperusteet ja laskelmat. Hajasäteilyn vaimennus on toteutettu teräslevyllä, jonka paksuudeksi on määritetty suuntaa antavalla laskelmalla 1 mm. Äänenvaimennuksen takia seinärakenne on kaksirankainen ja huoneessa on alas laskettu katto, jonka mitoitus on tehty Gyproc-käsikirjan mukaan. Lisäksi työssä on laskettu rakenteista tulevat lisäkuormat, koska työoletuksena huone suunniteltiin toteutettavaksi olemassa olevaan rakennukseen.

Työn toimeksiantaja on Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy. Opinnäytetyön tuloksena on tehty toimeksiantajalle tyypirakennekuvat ja ohjeet TEMPEST-huoneen toteutukseen.

ASIASANAT:

TEMPEST-huone, sähkömagneettinen hajasäteily, RF-suojattu huone, rakennesuunnittelu

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Civil Engineering

2019 | 27 pages, 7 pages in appendices

Riikka Heiska

TEMPEST-ROOM STRUCTURES

The purpose of this thesis was to design TEMPEST-room structures. A TEMPEST room is a shielded enclosure for the unwanted electromagnetic emission of electronic devices. The emission can cause an information security threat. TEMPEST is a widely used term for the emission security countermeasures.

The thesis introduces emission security in the national information security instructions. It presents radio wave propagation briefly as well as electromagnetic shielding.

Tempest room structures are described finally with the design criteria and calculations.

The thesis was commissioned by Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy. As a result of the thesis structural and detail drawings were completed together with implementation instructions.

KEYWORDS:

TEMPEST-room, RF-shielded room, emission security, structural design

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	6
2 VAATIMUKSIA SUOJAUSTASON II (TEMPEST-) HUONEELLE	7
2.1 VAHTI 2/2103	7
2.2 Sähkömagneettisen hajasäteilyn aiheuttamien tietoturvariskien ehkäisyn periaatteet	10
3 RADIOAALTOJEN ETENEMINEN	12
4 SÄHKÖMAGNEETTISELTA SÄTEILYLTÄ SUOJAUTUMINEN	17
4.1 Kaupallisia TEMPEST- ja suojahuoneita	17
4.2 Tutkimuksia sähkömagneettisilta kentiltä suojautumisesta	19
5 TEMPEST-HUONEEN RAKENTEET	20
5.1 Seinärakenteet	20
5.2 Kattorakenteet	21
5.3 Lattiarakenteet	21
5.4 Rakenneosien liitokset hajasäteilyn kannalta	21
5.5 Läpiviennit	22
5.6 Rakenteista tulevat kuormat	22
6 YHTEENVETO	24
LÄHTEET	26

LIITTEET

- Liite 1. Teräslevyn paksuuden arviointi.
- Liite 2. Alas lasketun katon mitoitus.
- Liite 3. TEMPEST-huoneen rakenteista tulevat kuormat.

KUVAT

Kuva 1. Pohjakuvaesimerkki tason II turvallisuusvyöhykkeen mukaisesta työympäristöstä (VAHTI 2/2013, 49).	8
Kuva 2. Radioaallon heijastuminen ja läpäisy, $\theta_1 = \theta_1'$.	12
Kuva 3. Sironna.	13

TAULUKOT

Taulukko 1. Hajasäteilyn vaimennusvaatimukset eri turvallisuustasojen tiloille.	11
--	----

1 JOHDANTO

Koska tieto on nykyään pääasiassa digitaalisessa muodossa, tietoturvan merkitys on nykyisessä yhteiskunnassa korostunut. Erityisesti valtion hallinnossa käsitellään turvaluokiteltua tietoa. Osa tästä tiedosta on kansainvälistä ja sen turvallista käsittelyä määrittävät kansainväliset sopimukset. Tietoturvallisuudesta valtion hallinnossa määrätään lainsäädännöllä: Laki viranomaisen toiminnan julkisuudesta 621/1999, Valtioneuvoston asetus tietoturvallisuudesta valtionhallinnossa 681/2010 ja Laki kansainvälisistä tietoturvallisuusvelvoitteista 588/2004. Tietoturvaan liittyvää ohjeistusta ylläpitää ja kehittää useat organisaatiot ja näiden toimintaa ohjaa VAHTI, joka on valtiovarainministeriön alaisuudessa toimiva julkisen hallinnon digitaalisen turvallisuuden johtoryhmä. Yksi VAHTIn ohjeistuksista on VAHTI 2/2013 Toimitilojen tietoturvaohje. Siinä määritellään lainsäädäntöön perustuen toimitilojen luokittelu erilaisiin suojaustasoihin ja millaisia vaatimuksia näiden eri suojaustasojen tilojen fyysiselle turvallisuudelle on. (VAHTI 2/2013, 13.)

Yksi tietoturvallisuuden osa-alue on sähkömagneettisen hajasäteilyn aiheuttamat tietoturvariskit. Elektronisista laitteista lähtevää tahatonta sähkömagneettista säteilyä kutsutaan hajasäteilyksi. Sopivalla laitteistolla sitä voidaan vastaanottaa ja selvittää tiedon sisältö. Tältä suojautumiseksi Liikenne- ja viestintävirasto on tehnyt ohjeistuksen Sähkömagneettisen hajasäteilyn aiheuttamien tietoturvariskien ehkäisyn periaatteet. Ohjeistus on tarkoitettu käytettäväksi yhdessä Toimitilojen turvaohjeen kanssa ja tilojen turvaluokittelu on näissä yhtenäinen. Ohjeistus perustuu vastaaviin EU:n ja Naton turvallisuusohjeisiin, jotka eivät ole julkisia. Naton käyttämä termi hajasäteilyltä suojautumiseen liittyviin toimiin on TEMPEST, tätä termiä käytetään kansainvälisesti laajasti. (Viestintävirasto 2013, 3.)

Tämän työn tarkoituksena on suunnitella sellaisen tilan rakenteet, joka täyttää suojaustason II vaatimukset ja voidaan toteuttaa olemassa olevaan rakennukseen. Työ on rajattu suojaustasoon II, sen vuoksi, että sen vaatimus hajasäteilyvaimennukselle on niin suuri, että rakenteilta vaaditaan erityistä kykyä vaimentaa sähkömagneettista säteilyä. Tässä työssä tällaisesta huoneesta käytetään nimitystä TEMPEST-huone. Työn toimeksiantaja on Insinööri-toimisto Lauri Mehto Oy. Näissä julkisissa ohjeistuksissa ei ole yksityiskohtaisia ohjeita TEMPEST-huoneen rakenteista. Sen vuoksi tämän opinnäytteen tavoitteena on tehdä Insinööri-toimisto Lauri Mehto Oy:lle tyyppirakennekuvat ja työselostus tällaisen huoneen toteutukseen.

2 VAATIMUKSIA SUOJAUSTASON II (TEMPEST-) HUONEELLE

Kansainvälinen TEMPEST-standardi ei ole julkinen, joten tässä työssä käytetään niitä vaatimuksia ja ohjeita, joita julkisista kotimaisista julkaisuista löytyy. Vaatimuksia TEMPEST-huoneelle löytyy lähinnä julkaisuista: VAHTI 2/2013 Toimitilojen tietoturvaohje sekä Sähkömagneettisen hajasäteilyn aiheuttamien tietoturvariskien ehkäisyn periaatteet.

2.1 VAHTI 2/2103

VAHTI-ohjeistuksessa tiedon luokittelu perustuu lainsäädäntöön. Laki viranomaisen toiminnan julkisuudesta 621/1999, 24. § määrittelee salassa pidettävät viranomaisten asiakirjat. Näitä ovat esimerkiksi ulkopoliittisia asioita käsittelevät asiakirjat, poliisin ja puolustusvoimien erilaiset asiakirjat sekä useat yksityishenkilöiden tietoja sisältävät asiakirjat, jotka sisältävät tietoa, minkä julkisuus voisi aiheuttaa haittaa. (621/1999, 24. §.) Salassa pidettäväksi määritelty tietoaineisto on jaoteltu neljään luokkaan. Valtioneuvoston asetus tietoturvallisuudesta valtionhallinnossa 681/2010, 9. § määrittelee suojaustasot I–IV tiedon paljastumisen tai käytön aiheuttaman haitan tai vahingon merkittävyyden perusteella. Näistä suojaustaso I on korkein ja IV vähäisin. (681/2010, 9 §.) VAHTI ohjeistuksessa toimitilojen turvallisuudelle annetaan vaatimuksia tasoille II–IV. Tason I määräykset annetaan tapauskohtaisesti, eikä niiden ohjeistus ole julkista. (VAHTI 2/2013, 13.)

Valtionhallinnon toimitilat on jaettu turvallisuusvyöhykkeisiin sen mukaan, minkä suojaustason tietoa niissä saa käsitellä. Julkisen tiedon käsittely ei vaadi suojaustoimenpiteitä. Toimitiloista tehtävään vyöhykekarttaan nämä tilat merkitään väreillä seuraavasti:

Tiedon suojaustaso	Vyöhykkeen väri
IV	VIHREÄ
III	KELTAINEN
II	SININEN
I	PUNAINEN

(VAHTI 2/2013, s.21.)

Turvallisuusvyöhykkeet pyritään sijoittamaan rakennuksessa sisäkkäin tai peräkkäin niin, että uloimpana rakennuksen sisäänkäynnin yhteydessä olisi julkiset tilat ja siitä eteenpäin tasojen IV, III, II tilat. Näin korkeamman tason vyöhykkeen läpi ei olisi läpikulua alempien tasojen vyöhykkeiltä.

VAHTI 2/2013:n liitteessä 3 on esimerkkejä valtionhallinnon toimipisteiden turvallisuusvyöhykejaottelusta. Sen mukaan tason II tiloja voisivat olla esimerkiksi ylimmän johdon ja operatiiviset neuvottelutilat, palvelinhotellit, tietotekniset laitetilat, valtakunnalliset johtamistilat, viraston johtamistilat, varavoimakonetilat sekä arkistotilat. (VAHTI 2/2013, 50–51.) Tässä työssä keskitytään neuvottelutilojen ja vastaavien toimistokäytössä olevien tason II tilojen vaatimuksiin ja rakenneratkaisuihin. Tietotekniset laitetilat ja muut vastaavat jätetään tämän työn ulkopuolelle, koska niiden rakenteilta vaaditaan mm. suojautuminen sortumaa vastaan sekä suojautumisen suurienergistä sähkömagneettista pulssia (EMP) vastaan (VAHTI 2/2013, 57–59). Tällaiset vaatimukset asettavat rakenteiden lujuuksille ja sähkömagneettisen säteilyn vaimennuskyvylle merkittävästi suuremmat arvot kuin tason II toimistotilan vaatimukset. Seuraavaksi on koottu VAHTI 2/2013:n ohjeistuksesta tason II alue- ja rakennevaatimukset. Muita turvallisuusvaatimuksia, kuten esimerkiksi kulunvalvontaa, ei käsitellä tässä työssä, koska ne eivät kuulu tämän työn aihepiiriin.

KORKEA TASO ST II, SININEN TURVALLISUUSVYÖHYKKE

Alue aidattu. Portti (päivisin puomi).

Ajoesteet riskiarvion mukaisesti.

Luja uloimman vyöhykkeen ulkoseinä

- vieraat hyväksytään etukäteen, tunnistetaan, kirjataan + valvotaan
 - vyöhykkeelle pääsy: kulunvalvonta ja kaksoistunnistus
 - vyöhykkeeltä poistuminen: kulunvalvonta
 - tunkeutumisen ilmaisujärjestelmä myös tilan aukoissa
- siivous- ja huoltohenkilöstö tunnistetaan, kirjataan ja valvotaan
 - vain sallitut elektroniset laitteet tilaan (kännykkäparkki ulkopuolelle)
- vahvat tai vahvistetut rakenteet
 - hyvä äänieristys
 - salakatselun esto (kaihtimet)
- ikkunoihin murtosuojaletit ja äänivärähtelyn esto
 - kameravalvonta (vyöhyke tai tila)
- vyöhykkeen rajalla turvaovet ja kulkuannostelija (vast.), käyttölokun lisäksi varmuuslukko
 - vyöhykkeen sisällä riittää pelkkä käyttölukko
- ST II –tiedon säilytys kassakaapissa (vähintään Euro II) tai holvissa (Euro V)
- varmistetut LVIS-järjestelyt rajoitettu etäohjaus
- hisseissä kulunvalvonta, kuulut valvotaan

Aluevalvonta tai kuoren valvonta

Mahdolliset TEMPEST-vastatoimet (uhka-arvio)

Vartiointi ja reagointi!
Testaus!

Kuva 1. Pohjakuvaesimerkki tason II turvallisuusvyöhykkeen mukaisesta työympäristöstä (VAHTI 2/2013, 49).

Alue

Alueen kulun rajaamisella ja valvonnalla voidaan vaikuttaa TEMPEST-huoneen kannalta siihen, kuinka lähelle rakennusta pääsee esim. ajoneuvolla. Mitä lähemmäs pääsee, sitä helpompaa mahdollisen vuotavan hajasäteilyn vastaanottaminen on. Mikäli rakennuksessa on myös julkisia alueita, ei todennäköisesti ole perusteita estää vapaata kulkua rakennuksen lähellä. Siinä tapauksessa tason II alueen sijaintiin rakennuksessa on kiinnitettävä erityistä huomiota, eikä se voi sijaita rakennuksen ulkopintaa vasten. (VAHTI 2/2013, 27, 36.)

Seinärakenne

Tason II vyöhykettä rajaavat seinärakenteet tulee rakentaa sellaisiksi, että niistä ei pääse tunkeutumaan läpi tietyssä vasteajassa. Nämä vasteaikavaatimukset ovat salaisia. Tällaisena rakenteena kuitenkin pidetään teräsbetonia, tiilirakennetta tai vahvistettua seinärakennetta. Mikäli tason II vyöhyke sijaitsee tason III sisäpuolella ja sen rajaavat seinärakenteet täyttävät tason II vaatimukset, voidaan II vyöhykkeen väliseinät rakentaa kevytrakenteisina. Lisäksi tason II väliseinärakenteessa on kiinnitettävä huomiota riittävään äänieristykseen niin, että puheääni ei kuulu seinän läpi, eikä kulkeudu ilmastointi- tai kaapelikanavia pitkin. Lisäksi mainitaan hajasäteilyn estämisestä, että arvioidaan tarve tilan suojaamiseksi TEMPEST-vastatoimin. (VAHTI 2/2013, 28, 37.)

Ala- ja yläpohjat

Ala ja yläpohjia koskevat käytännössä samat vaatimukset kuin seinärakenteita. Tason II tiloissa suositellaan käytettäväksi ontelolaatan päällä pintavalua ja ylös nostettua lattiaa ja alas laskettua kattoa. Lisäksi kerrostenvälisen IV- ja kaapelikuilujen ei ole hyvä kulkea tason II tilaan, koska ääni siirtyisi kuilua pitkin tilasta toiseen. Näin estetään myös hajasäteily. (VAHTI 2/2013, 28.)

Ikkunarakenteet

Ikkunoista mainitaan tason II huoneille vaatimus standardin SFS-EN 365 P6B-luokan suojalasista ja muutenkin murrenkestävyydestä (VAHTI 2/2013, 30, 38). Kuitenkin tason II tilan hajasäteilyvaimennusvaatimus käytännössä edellyttää, ettei tilassa ole ikkunoita.

Ovirakenteet

Samoin kuin ikkunoista, ovista mainitaan vaatimus standardin SFS EN 1627 mukaisista murronestävästä turvaovista. Myös ovissa, kuten ikkunoissa, pitää huomioida hajasäteilyn vaimennusvaatimukset tason II tiloissa, mikä johtaa erikoisrakenteiseen oveen, joka lisäksi pitää toteuttaa tilan äänieristysvaatimukset. (VAHTI 2/2013, 28–29, 38.)

EMP ja hajasäteily

Hajasäteilyltä suojautuminen edellyttää tilan suojaamista metalliverhouksella ja tilan ulkopuolelle ulottuvat johdot suojataan kytkeytymiseltä maadoitetuilla metallivaipoilla ja suodattimilla (VAHTI 2/2013, 44).

Liite 5 määrittelee Vahti 2/2013:n ohjeessa rakentamisdokumentaation käsittelysuositukset eri turvatasojen hankkeille rakentamishankkeen aikana. Suojaustason II dokumentaatiosta sanotaan, että perusteltu osa on julkista ja muiden hankintakokonaisuuksien dokumentaatio, kuten turvarakenteet, osa tilarakenteista ja verkot, määritellään suojaustasolle IV–III. (VAHTI 2/2013, 79.) Näin ollen hankkeeseen osallistuvat tahojen, esim. suunnittelutoimistojen, täytyy täyttää tällaisen tiedon suojausvaatimukset. Liitteessä 7 on valtion turvallisuussopimusmallit, joita käytetään eri osapuolten kanssa tällaisissa hankkeissa. Suunnittelu ja konsulttipalvelujen turvallisuussopimuksessa määritellään, että yrityksen hankkeeseen osallistuvista työntekijöistä tehdään turvaselvitys ja he tekevät vaitiolosopimuksen. Ainoastaan näillä työntekijöillä on pääsy asiakkaan tiloihin ja oikeus käsitellä hankkeen tietoja. Hankkeen tietojen turvallinen käsittely ja säilytys on myös määritelty tarkasti. Takuuajan umpeuduttua yritys on velvollinen hävittämään tiedot hankkeesta.

2.2 Sähkömagneettisen hajasäteilyn aiheuttamien tietoturvariskien ehkäisyn periaatteet

Laki viranomaisten tietojärjestelmien ja tietoliikennejärjestelyjen turvallisuuden arvioinnista 1406/2011 (4. §) määrittelee viestintäviraston tehtävät viranomaisten tietojärjestelmien ja tietoliikennejärjestelyjen tietoturvallisuuden edistämiseksi ja varmistamiseksi. Liikenne- ja viestintäviraston tekemä ohjeistus Sähkömagneettisen hajasäteilyn aiheuttamien tietoturvariskien ehkäisyn periaatteet on tarkoitettu kansallisen salattavan tiedon suojaamiseen. Se perustuu EU:n vaatimuksiin ja ohjeisiin hajasäteilyn hallitsemiseksi. Kansainvälisen salattavan tiedon käsittelyn suojaamiseen sovelletaan EU:n tai NATON vaatimuksia, jotka ovat salaisia. (Viestintävirasto 2013, 3.)

Ohjeistuksessa käsitellään yleisiä periaatteita hajasäteilyongelmien hallitsemiseksi. Hajasäteilyyn voidaan vaikuttaa tilaratkaisuilla, sijainnilla ja rakenteilla tai käyttämällä suojattuja laitteita (tietokoneet, näytöt ym.), joista ei vuoda sähkömagneetista säteilyä. (Viestintävirasto 2013, 5.) Tähän on kerätty vaatimukset hajasäteilyltä suojattujen tilojen vaimennuksille. Vaimennusvaatimukset on luokiteltu EU-vaatimusten mukaisesti 0–3, jotka vastaavat kansallisia tiedon suojaustasoja siten, että 0 on julkisen tason ja 3 on II tason, turvallisuusvyöhyke sininen, vaatimus.

Tässä työssä suunnitellaan rakenteet sinisen vyöhykkeen tiloille, joissa tiedon suojaus-taso on II. Lisävaimennusvaatimus tällaiselle tilalle on ylläolevan taulukon mukaan vähintään 34 dB, kun käytetään COTS-laitteita, mikä tarkoittaa, että laitteissa itsessään ei ole suojausta vuotavalle sähkömagneettiselle säteilylle.

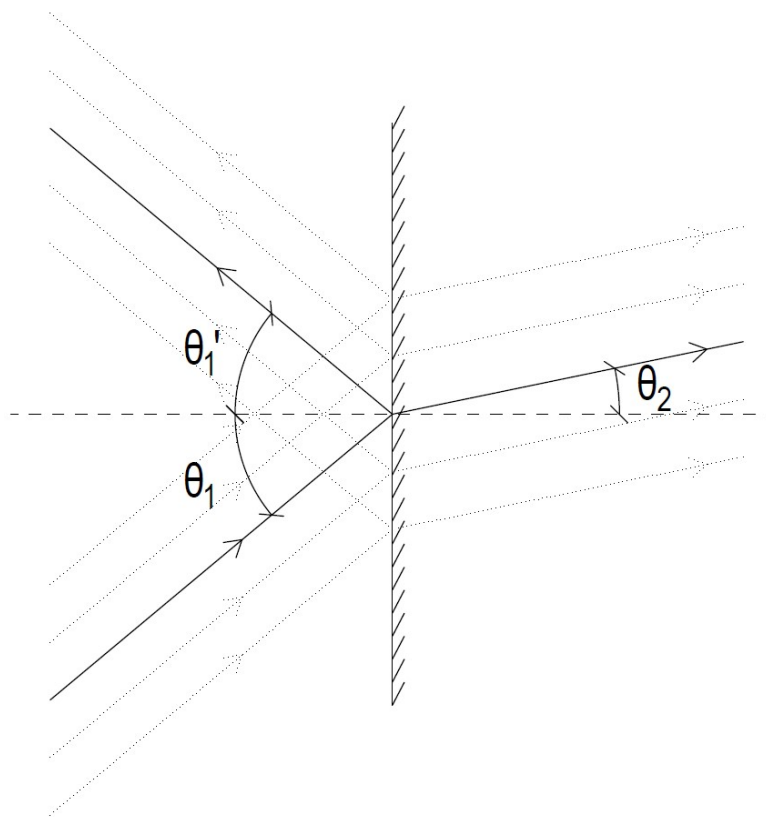
Taulukko 1: Kansalliset TEMPEST-tilavyöhykkeiden vaimennusvaatimukset toimittaessa COTS-laitteilla

Kansallinen turvallisuusvyöhyke	Kansallinen TEMPEST-tilavyöhyke	Vaimennusvaatimus
KELTAINEN	2	Lisävaimennus $14 \text{ dB} \leq \text{vaimennus} < 34 \text{ dB}$ (vertailu referenssimittaukseen)
SININEN	3	Lisävaimennus $\geq 34 \text{ dB}$ (vertailu referenssimittaukseen)
PUNAINEN	n/a	Vaatii erityistarkastelun

Taulukko 1. Hajasäteilyn vaimennusvaatimukset eri turvallisuustasojen tiloille. (Viestintävirasto 2013, 6.)

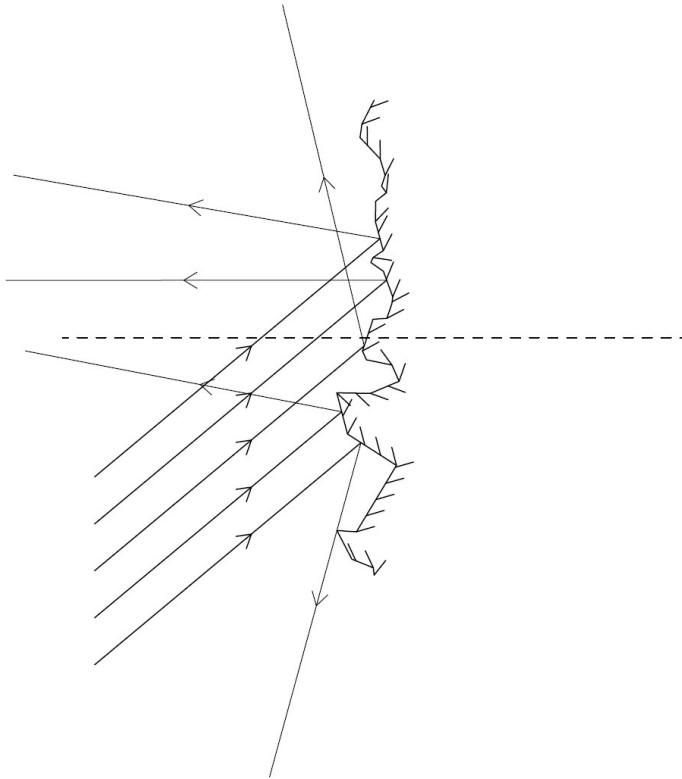
3 RADIOAALTOJEN ETENEMINEN

Radioaaltoiksi kutsutaan sähkömagneettisen spektrin osaa alle 3 THz:n taajuuksilla. Radioaaltojen eteneminen rakennuksessa on laajasti tutkittu aihepiiri. Radioaallon etenemismekanismejä ovat eteneminen vapaassa tilassa, taipuminen, sironta sekä heijastuminen ja eteneminen väliaineiden rajapinnassa. Näitä voidaan ymmärtää ajattelemalla valon käyttäytymistä. Valo on myös sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on merkittävästi lyhyempi kuin radioaaltojen. Kuvitellaan valon lähde rakennuksen ikkunattomalle käytävälle. Suoralla käytävällä valo näkyy kauas, lähellä valonlähdettä on kirkasta ja kaukana valon lähde on havaittavissa, vaikka ympärillä on jo pimeää. Valo näkyy ja etenee samalla tavalla kaikkiin suuntiin, joten yhteen suuntaan sen tehotiheys vaimenee. Signaali siis vaimenee vapaassa tilassa edetessään. Kulman taakse mentäessä on vielä havaittavissa, että kulman takana on valon lähde, tapahtuu siis taipumista. Heijastuminen tasaisesta pinnasta tapahtuu samassa kulmassa kuin aalto tulee pintaan. Samalla osa radioaallostasta läpäisee pinnan ja etenee väliaineessa sen ominaisuuksien mukaisesti, kuten kuvassa 3. (Räisänen & Lehto 1993, 29.)



Kuva 2. Radioaallon heijastuminen ja läpäisy, $\theta_1 = \theta_1'$.

Sironta taas tapahtuu hiukkasista, kappaleista ja epätasaisesta pinnasta. Kuvassa 4 on hahmoteltu sironnan käsitettä. (Lindell 1994, 58, 210.)



Kuva 3. Sironta.

Vapaassa tilassa radioyhteys voidaan määritellä yhtälöllä

$$P_2 = \frac{G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi r)^2} P_1,$$

jossa

P_1	lähetysantennin säteilemä teho
P_2	vastaanottoantennin säteilemä teho
G_1	lähetysantennin vahvistus
G_2	vastaanottoantennin vahvistus
λ	signaalin aallonpituus
r	välimatka

(Lindell 1994, 7–8).

Yhtälöstä nähdään, että mitä pidempi etäisyys lähettimen ja vastaanottimen välillä on, sitä heikompi signaali vastaanottimeen tulee. Samoin nähdään, että mitä pienempi aallonpituus signaalilla on, sitä heikompi signaalitaso on vastaanottimella.

Sähkömagneettisten aaltojen käyttäytymistä kuvaavat matemaattisessa muodossa Maxwellin yhtälöt. Maxwellin yhtälöt differentiaalimuodossa ovat

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t},$$

joissa

\vec{D}	sähkövuo
\vec{B}	magneettivuo
\vec{E}	sähkökenttä
\vec{H}	magneettikenttä
\vec{J}	virrantiheys
ρ	varaustiheys

(Räisänen & Lehto 1993, 18).

Riittävän kaukana säteilylähteestä voidaan sähkökenttää kuvata homogeenisellä tasoaallolla. Maxwellin yhtälöille voidaan isotrooppisessa, homogeenisessä väliaineessa määritellä ratkaisu, jonka sähkökenttävektori on muotoa

$$E(r) = E_0 e^{-jk \cdot r}$$

jossa

E_0	sähkökentän amplitudi
k	kompleksinen etenemisvektori
r	etäisyys.

Kompleksinen etenemisvektori määräytyy väliaineen sähköisten ominaisuuksien perusteella. (Lindell 1994, 15.)

Aallonpituus väliaineessa

$$\lambda = \frac{1}{f\sqrt{\mu\epsilon}}$$

f on signaalin taajuus

$\mu = \mu_r\mu_0$ μ_r on väliaineen suhteellinen permeabiliteetti ja

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

$\epsilon = \epsilon_r\epsilon_0$ ϵ_r on väliaineen suhteellinen permittiivisyys ja

$$\epsilon_0 = 8.8542 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

Aallon etenemisnopeus on

$$v = f\lambda = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$

μ ja ϵ siis edustavat väliaineen ominaisuuksia. (Räisänen & Lehto 1993, 21, 25, 26.) Yhtälöstä nähdään, että mitä suurempi taajuus sitä pienempi aallonpituus ja lisäksi väliaineen ominaisuudet vaikuttavat aallonpituuteen ja myös signaalin vaimenemiseen väliaineessa.

Väliaineessa voi tapahtua häviöitä aineen polarisoitumisesta johtuen tai häviöt voivat aiheutua aineen johtavuudesta (Räisänen & Lehto 1993, 22). Kompleksisen etenemisvektorin avulla voidaan häviölliselle väliaineelle määrittellä vaimennuskertoimen, joka hyvälle johteelle on

$$\alpha \approx \sqrt{\frac{\omega\mu_r\mu_0\sigma}{2}} = \sqrt{\pi f\mu_r\mu_0\sigma}$$

σ on väliaineen johtavuus

(Lindell 1994, 18).

Tunkeutumissyvyys on vaimennuskertoimen käänteisluku. Tunkeutumissyvyydellä tarkoitetaan sellaista etäisyyttä johteen pinnasta, missä kentänvoimakkuus on pienentynyt osaan $1/e$ eli n. 37 % alkuperäisestä.

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

Yhtälöstä nähdään, että hyvälle johteelle tunkeutumissyvyys on pieni, esimerkiksi puhtaalle kuparille 10 GHz:n taajuudella tunkeutumissyvyys on $6,6 \times 10^{-7}$ m. (Räisänen & Lehto 1993, 26). Johdepinnat estävät siis sähkömagneettisen aallon etenemistä tehokkaasti. Tästä nähdään myös, että matalat taajuuden tunkeutuvat syvemmälle metalliin kuin korkeat taajuudet. Matalataajuuksien signaalien vaimentamiseksi tarvitaan siis paksuumpi metallikerros.

Raot johdepinnassa heikentävät suojausta. Rako voi pahimmillaan toimia kuten rakoantenni, mikäli sen koko on signaalin aallonpituuden λ suuruusluokkaa (Räisänen & Lehto 1993, 175). Antennit ovat tyypillisesti puolen aallon tai neljännesaallon kokoisia. Näin ollen korkeilla taajuuksilla pienetkin raot saattavat vuotaa. Esimerkiksi 10 GHz:n taajuudella aallonpituus on n. 30 mm.

Hajasäteilyn lähde on periaatteessa tuntematon. Se voi olla mikä tahansa elektronisen laitteen osa tai komponentti. Näin ollen myöskään hajasäteilyn taajuutta ei tunneta, vaan suojaus on suunniteltava riittävän laajakaistaiseksi eli suojaamaan riittävän suurella taajuusalueella. Radioaallon vaimenemisen laskeminen tarkasti tavanomaisen seinärakenteen läpi on haastavaa. Tärkeimmät mekanismit ovat heijastuminen aineiden rajapinnoista ja vaimeneminen eri materiaalikerroksissa, materiaalien sähköisistä ominaisuuksista riippuen. Rakennusmateriaalien sähköisiä ominaisuuksia, permittiivisyyttä ja permeabiliteettiä, ei yleisesti tunneta. Niitä on mitattu joillekin materiaaleille tietyllä taajuudella, mutta esim. kosteuspitoisuudesta tai vaikkapa betonin koostumuksesta riippuen niiden tarkka määrittäminen ei ole mahdollista. Toisaalta seinä- tai kattorakenteen vaimennus ei kerro suojatun huoneen vaimennuksesta välttämättä paljoakaan, sillä huoneen vaimennukseen sisältä ulos vaikuttaa pitkälti rakenteiden liitoksien ja aukkojen, kuten ovien ym., käytännön toteutukset. Tässä työssä käytetään yleisiä tunnettuja suojausten periaatteita. Tehokas suojaus saadaan tiiviillä, riittävän paksulla metallikerroksella, jollaista käytetään yleisesti myös esimerkiksi antenni- ja EMC-mittahuoneissa, joissa halutaan estää ulkoisten häiriöiden vaikutus mittaustulokseen. (Lehto & Räisänen 1991, 183, 203.)

4 SÄHKÖMAGNEETTISELTA SÄTEILYLTA SUOJAUTUMINEN

4.1 Kaupallisia TEMPEST- ja suojahuoneita

ETS-Lindgren Oy kuuluu ESCO Technologies-konserniin. Euralainen Euroshield Oy, alkuperäisestä nimeltään Oy Euramecano Ab 1972, tuli vuonna 1997 yrityskauppojen myötä osaksi ETS Lindgreniä. ETS Lindgren Toimittaa RF-suojattuja huoneita erilaisiin tarpeisiin. ”Series 81 RF Shielded Enclosure” on yksi yrityksen suojahuoneista. Siitä mainitaan, että voidaan käyttää TEMPEST-suojattuna alueena. Sen rakenneratkaisu perustuu moduuleihin. Moduulit muodostuvat vanerilevyistä, joiden pintaan on liimattu 0,474 mm:n galvanoitu teräslevy molemmin puolin. Moduulit kiinnitetään toisiinsa asentamalla levyjen molemmille puolille saumakohtaan 3,175 mm teräslistat, jotka ruuvataan toisiinsa 10,16 cm:n välein, niin että ne puristuvat tiukasti liimattua teräslevyä vasten. Suojahuoneen on testattu toteuttavan NSA 65-6/NSA 94-106 testivaatimukset seuraavasti:

- vaimennus magneetikentille taajuudella 1 kHz 20 dB, 10 kHz 56 dB ja 200 kHz 100dB
- sähkökentille 200 kHz – 50 MHz 100dB
- tasoaallolle 50 MHz – 1 GHz 100 dB
- mikroaalloille 10 GHz 100 dB.

Huoneiden lisäksi ETS Lindgrenin valikoimissa on erilaisia oviratkaisuja RF-suojattuihin huoneisiin, sekä RF-suodattimia ilmanvaihtokanaviin, joiden vaimennus on 100 dB taajuudelta 100 kHz aina 40 GHz:iin asti. (ETS-Lindgren 2019)

Holland Shielding systems BV valmistaa suojahuoneita erilaisiin tarpeisiin. Sen lisäksi yrityksellä on laaja valikoima muitakin suoja tuotteita, kuten suoja tiivisteitä erilaisista materiaaleista, johtavia teippejä, liimoja sekä pinnoitteita, suojattuja ikkunoita, ilmanvaihtokanavien RF-suodattimia ja RF-suodattimia sähkö- ja datakaapelien läpivienteihin suojahuoneisiin. Yrityksellä on myös tuotenimellä ”Amucor foil”, ohut metallikalvo tai folio, jonka paksuus on vain 48 µm. Sitä saa myös metalliverkolla vahvistettuna ja laminoituna, jolloin sen paksuus on 0,31 mm. Sitä markkinoidaan myös TEMPEST-suojaukseen, vaikkakaan se ei täytä samoja vaatimuksia kuin ETS Lindgrenin suojatut huoneet. Mittaustulokset ovat 23 dB / 100 kHz... 97 dB / 20 GHz. (Holland Shielding 2019)

Soliani EMC:llä on myös erittäin kattava valikoima erilaisiin sähkömagneettisiin suojaus-tarpeisiin tuotteita, edellä mainittujen lisäksi mm. johtavia kankaita. Yrityksellä on kaksi suojausratkaisua. Toinen on toteutettu johtavalla kankaalla ja vaimentaa 60 dB taajuusalueella 30 MHz – 5 GHz. Toinen ratkaisu on perinteisempi metallilevyistä tehty ja vaimennus 100 dB:iin asti taajuusalueella 10 kHz – 18 GHz. Soliani EMC:n kotisivuilla ei ole mittaustuloksia tai tarkempia teknisiä tietoja, mutta ne saa pyydettäessä. (Soliani EMC 2019)

IAC Acoustics on pääasiassa keskittynyt akustiikkaratkaisuihin ja värinänvaimennukseen. Yrityksellä on kuitenkin myös tarjolla RF-suojattu huone, jota saa kolmella eri vaimennustasolla: 25 dB, 50 dB ja 100 dB. Huoneessa käytetään "Moduline"-seinäpaneeleita, jotka muodostuvat ääntä vaimentavasta materiaalikerroksesta, jonka ulkopinnassa on metallilevy. Tarkempia materiaalitietoja tai mittaustuloksia sähkömagneettisten kenttien vaimennukselle, esimerkiksi taajuusalueelta, ei ole heidän kotisivuillaan kerrottu. (IAC Acoustics 2019)

Comtest Engineering toimittaa erilaisia mittahuoneita radiotekniikan tarpeisiin. Yrityksellä on valikoimassaan myös RF-suojahuone sekä TEMPEST-huone. RF-suojahuone tehty on 2 mm galvanoiduista teräslevypaneeleista. Liitoskohdissa on käytetty RF-tiivisteitä. RF suojahuone on testattu standardien IEEE-299 ja IEC/EN 50147-1 mukaan ja sille on tarjolla mitatut vaimennuskäyrät 10 kHz – 40 GHz:n taajuusalueelle. (Comtest Engineering 2019)

Kansallisessa ohjeessa tason II suojahuoneelle määriteltiin vaimennusvaatimus ≥ 34 dB. Siinä ei otettu kantaa taajuusalueeseen, millä sen pitäisi toteutua. Suojahuoneiden valmistajien vaatimuksista voi päätellä, että standardeissa yleisesti käytetty taajuusalue suojahuoneiden vaimennuksen mittaamiseen on 10 KHz – 40 GHz. ETS Lindgrenin ja Comtest Engineeringin esittämistä mittaustuloksista heidän suojahuoneratkaisuilleen voi myös päätellä, että taajuusalueen alareunalla, 10 kHz:n taajuudella, 34 dB:n vaimennuksen saavuttaminen on haasteellisinta. Tämä päätelmä tehtiin myös tarkasteltaessa tunkeutumissyvyyden kaavaa. Aivan ohut metallikalvo ei siis välttämättä tuota matalilla taajuuksilla riittävän hyvää suojausta tason II huoneille. Vaikkakin edellä mainitut ETS Lindgrenin ja Comtest Engineeringin suojahuoneet lienevät täyttäneet punaisen tason I vaatimukset. Kansallisessa ohjeessa tasolle I ei ole annettu vaimennusvaatimusta, vaan mainitaan, että vaatii erityistarkastelun.

4.2 Tutkimuksia sähkömagneettisilta kentiltä suojautumisesta

Tuomas Nyberg (2015) on tehnyt Tampereen teknillisessä yliopistossa diplomityön aiheesta Sähkömagneettinen suojaus. Työssä käsitellään varsin kattavasti sähkömagneettisen säteilyn käyttäytymistä, millaisia haittoja siitä voi olla laitteille tai ihmisille ja miten sähkömagneettiselta säteilyltä suojaudutaan. Suojauksessa käytettävät metallit on esitelty perusteellisesti. Lisäksi käsitellään hiilikuitujen ja hiilinanoputkien käyttöä. Erityisen mielenkiintoisia ovat erilaiset seosmateriaalit, joissa sähköä johtavia partikkeleita on lisätty polymeereihin, sekä itseisjohtavat polymeerit, jotka saadaan aikaan käsittelemällä polymeerien elektronien määrää. (Nyberg 2015, 32.)

Sotilastekniikassa sähkömagneettisilta kentiltä suojautumisessa huomioidaan EMP-pulssi, eli erittäin voimakas sähkömagneettinen pulssi, jonka aiheuttaja on ydinase tai mikroaaltose. Tällaisen pulssin kentänvoimakkuus on merkittävästi suurempi kuin hajasäteilyn. (Siirilä 2018, 5.) Tehokkaan suojauksen toteuttamiseksi suojahuoneet tehdään paksusta metallista ja kaikki liitokset hitsataan (Luokkanen 2009, 18).

Hajasäteilyä ja sen aiheuttamia turvallisuusriskejä ja suojautumisperiaatteita yleisellä tasolla on käsitelty laajasti Jokso Velemirin (2018) Senaattikiinteistön turvallisuusorganisaatiolle tekemässä opinnäytetyössä TEMPEST-hyökkäykset ja suojautumiskeinot.

Erilaisia sementtipohjaisia komposiittimateriaaleja, joihin on seostettu johtavia partikkeleja, on tutkittu myös runsaasti mm. Mazzoli ym. (2018) ja Liu ym. (2017). Vaimennusta oli kuitenkin mitattu näissä tutkimuksissa vain n. 1 GHz taajuudesta ylöspäin ja vaimennus mittausalueen alarajalla alkoi laskea. Lisäksi tällaisissa seosmateriaaleissa ongelmaksi nousevat liitoskontaktit oviin ja muihin läpivienteihin, kun materiaalissa ei ole johdepintaa, mitä vasten kontakti voitaisiin sähköisesti tiivistää (Mazzoli ym. 2018, 34).

5 TEMPEST-HUONEEN RAKENTEET

Rakennetyyppi- ja liitosdetaljit laadittiin toimeksiantajalle, eivätkä ne kuulu tämän opin- näytetyön sisältöön. Tässä luvussa kerrotaan ratkaisujen toteutusperiaatteet. Näiden ra- kenteiden suunnittelussa on lähtökohtana pidetty huoneen rakentamista olemassa ole- vaan rakennukseen. Koska suojaustason II tilalle suositellaan, ettei se olisi ulkoseinää vasten, eivät suunnitelmaan kuulu ikkunat. Ikkunoiden murtosuojauskin olisi haasteel- lista, eikä riittävä hajasäteilyn vaimennus ole oikein mahdollista, vaikka hyviä vaimen- nuksia laajalle taajuusalueelle onkin saatavilla.

5.1 Seinärakenteet

TEMPEST-huoneen seinärakenteisiin vaikuttaa huoneen sijainti. Tässä työssä on ole- tettu, että alue, joka ympäröi huonetta ei rajaudu betoni-, tiili- tai muutoin vahvistettuun rakenteeseen. Seinärakenteissa on siis huomioitu tunkeutumisen estäminen. Suunnitel- lut rakenteet perustuvat näiltä osin Finanssialan keskusliiton ohjeeseen Rakenteellinen murtosuojaus III ja siihen perustuvaan Gyproc Murtosuoja-järjestelmän ohjeisiin. Oh- jeissa määritellään, että rakenteet tai niiden osat eivät saa olla ulkopuolelta rikkomatta irrotettavissa ja että väliseinärakenteen tulee ulottua lattiasta kattoon ja kevyet rakenteet, kuten kipsilevyväliseinät, on molemmin puolin vahvistettava 1,0 mm:n teräslevyllä 4 m:n korkeuteen lattiasta. (Finanssiala 2017, 5.; Gyproc 2018, 234–235.)

Riittävän äänieristyksen aikaansaamiseksi seinärakenne tehdään kaksinkertaisella 95 mm:n rungolla ja runkojen välissä on ilmarako, etteivät rungot ole toisiinsa kytkettyinä. Ulomman rungon kiskona, sekä lattiassa että katossa, on Gyproc AC 60, 95/60 kisko, jossa on ääntä eristävät tiivisteet molemmilla puolilla laipassa ja pohjassa. Molempien runkojen ulkopinnoissa on kaksi kipsilevykerrosta. Lisäksi runkojen väliin, ulomman run- gon sisäpintaan, tulee kipsilevy hajasäteilysuojauksen metallipinnan toteutusta varten. Tämä ei paranna äänen eristävyttä. Kipsilevyt tiivistetään liittyviin rakenteisiin elastisella massalla. Gyprocin ohjeiden mukaan tällaisella rakenteella saavutetaan äänitasoeroluku $D_{nT,w} \geq 55$ dB, joka vastaa asuinhuoneistojen välistä äänitasoerovaatimusta. Lisäksi pu- heäänen kuulumista huoneen ulkopuolelle voidaan heikentää käyttämällä huoneen sisä- pintojen materiaalina ääntä absorboivia materiaaleja. Vaikka ne eivät parannakaan ra- kenteen ääneneristävyttä, äänenpainetaso huoneen sisäpuolella pienenee.

Hajasäteilyn vaimennus seinissä toteutetaan liimaamalla ulomman seinärungon sisäpinnan kipsilevyyn 1 mm:n sähkösinkitty teräslevy (liite 1). Teräslevyt asennetaan pusku-
saumoin ja sauma peitetään ruuvaamalla 50 x 2 mm:n teräslista päälle. Ruuveina käytetään sähkösinkittyjä ruuveja ja ruuvausväli 100 mm. Teräslevyn ja -listan väliin laite-
taan 0,5 mm:n johtava tiivisteteippi.

5.2 Kattorakenteet

Katto tehdään alas laskettuna äänieristyksen vuoksi. Hajasäteilyä vaimentavat teräslevyt liimataan kipsilevyihin, jotka kiinnitetään betonivälipohjaan k600-koolauksella. Saumat peitetään teräslistoilla, kuten seinissä. Koska tähän teräslevyyn ei haluta ylimääräisiä reikiä, tehdään alas laskettu sisäkatto kantavana sisemmän seinärakenteen päälle. Rakenne on suunniteltu Gyproc-käsikirjan ohjeiden mukaan: Gyproc Teräsrunkoiset kantavat sisäkatot (Gyproc 2018, 234–235). Kantavina palkkeina on käytetty Gyproc DU-
RONomic-seinäjärjestelmän teräsprofieileja GRF 120, ja mitoitus on tehty seinäjärjestelmän mitoitusohjetta soveltaen (Gyproc 2018, 491–498). Rakenteiden mitoituslaskelmat on esitetty liitteessä 2.

5.3 Lattiarakenteet

Lattiarakenteen oletuksena kantava välipohja on ontelolaatta tai teräsbetonilaatta. Jos kantava rakenne on puurakenteinen pitää ääneneristyksen osalta tässä esitetty ratkaisu tarkistaa. Ontelolaatan tai teräsbetonilaatan päällä olevaan pintavaluun liimataan hajasäteilyä vaimentavat teräslevyillä pinnoitetut kipsilevyt ja saumat peitetään samalla tavalla kuin katossa ja seinissä. Sen päälle tulee 30 mm askeläänieristevillalevy ja 50 mm pintavalu. Lattiakipsilevyt jätetään 10 mm irti väliseinien sisäpinnoista ja tiivistetään elastisella massalla. Tällaisella rakenteella saavutetaan askeläänitasoluku $L'_{nT,w} + C_{I,50-2500} \leq 63$ dB, joka on suositus toimistorakennukseen kerrosten väliin.

5.4 Rakenneosien liitokset hajasäteilyn kannalta

Teräslevypintojen liitos vierekkäisten seinien, katon ja seinän sekä seinän ja lattian välillä toteutetaan samalla periaatteella kuin levysaumojen tiivistys. Kulmiin asennetaan 50 x 50 x 3 mm:n L-teräkset, jotka tiivistetään 0,5 mm johtavalla tiivisteteipillä ja ruuvataan

100 mm:n välein. Katossa L-teräs ruuvataan vain kattoon. L-teräkseen asennetaan metallinen sormiliuskajousitiiviste koko huoneen ympäri. Sormiliuskatiiviste on kontaktissa seinän teräslevyyn ja varmistaa johtavan kontaktin seinän ja katon välillä. Samanlainen kontakti tehdään myös seinän ja lattian väliin. Tämä sallii rakennuksen normaalin painumisen ilman, että liitokset vaurioituvat.

5.5 Läpiviennit

Ovi ja oven karmit tilataan valmisosana suojuhuoneovien toimittajalta, esim. ETS Lindgreniltä. Näin ovirakenne itsessään toteuttaa varmasti tarvittavat hajasäteilyvaimennus- ja ääneneristysvaatimukset. Oven karmin liitos seinän ja lattian metallipintoihin toteutetaan valmistajan ohjeiden mukaan.

Ilmanvaihtokanavat tuodaan seinän läpi alas lasketun katon yläpuolella. Ilmanvaihtokanaviin tarvitaan sekä äänenvaimentimet että suodattimet hajasäteilylle. ETS Lindgrenillä on valikoimissaan mm. suodattimia, jotka tarjoavat yli 100 dB:n vaimennuksen taajuusalueella 100 kHz – 40 GHz ja yli 40 dB:n vaimennuksen yli 10 kHz:n taajuuksille, sekä sähkö- että magneettikentille ja tasoaalolle. Ne asennetaan seinän hajasäteilyä vaimentavaan teräspintaan valmistajan ohjeiden mukaan ja ulospäin lähtevä IV-kanava erotetaan sähköisesti eristävällä materiaalilla seinän teräslevystä ja suodattimesta. Näin hajasäteily ei kytkeydy IV-kanavaan ja sitä kautta ulos huoneesta.

Sähkö- ja datakaapelit tuodaan seinän läpi myös alas lasketun katon yläpuolella. Ne tarvitsevat suodattimet, jotka estävät kaapeleihin kytkeytyneen hajasäteilyn pääsyn ulos huoneesta. Nämä suodattimet ovat melko suurikokoisia ja kiinnitetään ulomman seinän sisäpintaan alas lasketun katon alapuolella siten, että niille saadaan maadoituskontakti hajasäteilyä vaimentavaan teräslevyyn. Asennuksessa noudatetaan valmistajan ohjeita.

Tarvittaessa läpivienteihin on suunniteltava myös palokatkot, mikäli huoneen rakenteille annetaan palo-osastointivaatimuksia.

5.6 Rakenteista tulevat kuormat

Useissa tapauksissa tällainen huone rakennetaan korjausrakennushankkeen yhteydessä olemassa olevaan rakennukseen. Koska huoneen rakenteissa on käytetty terästä ja muutenkin poikkeuksellisia ratkaisuja, niiden aiheuttamat lisäkuormat ovat suurempia

kuin tavallisten kevytrakenteisten väliseinien. Liitteessä 3 lasketut kuormat ovat ominaiskuormia. Korjausrakennuskohteessa täytyy olemassa olevien rakenteiden kantavuus tarkistaa ja miettiä tarvittaessa soveltuvat vahvistusmenetelmät.

6 YHTEENVETO

Työn toimeksiantajana oli Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy. Tarkoituksena oli suunnitella TEMPEST-huoneen rakenteet, joka täyttää kansallisen tason vaatimukset. Varsinaisia vaatimuksia sähkömagneettisen kentän vaimennukselle ei löytynyt julkisesti saatavilla olevista ohjeista, muuta kuin maininta ≤ 34 dB. Siksi rakenteiden suunnittelussa käytettiin vaatimuksille referenssinä kaupallisten suojahuonetoimittajien standardien mukaisia vaimennusmittauksien tuloksia.

Äänen eristävyydelle ei ole myöskään julkisissa ohjeissa annettu mitään tarkkaa arvoa. Tässä käytettiin raja-arvona ilmaääneneristävyydelle asuinhuoneistojen äänitasoerolu-kuvaatimusta $D_{nT,w} \geq 55$ dB ja askelääneneristävyydelle toimistorakennuksen kerrostenvälistä askeläänitasolukusuositusta $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500} \leq 63$ dB. Raja-arvoiksi valittiin nämä, koska puheäänien kuuluvuus huoneesta ulos on kriittistä.

Yhtenäisen, tiiviin johtavan pinnan suunnitteleminen enimmäkseen tavanomaisia rakennusmateriaaleja käyttäen oli haastavaa. Suojauksen onnistumista määrittävät liitokset ja läpiviennit. Yleensä suojahuoneet rakennetaan irti muista rakenteista, jolloin rakennesien liitokset on helpompi toteuttaa. Toteutukset perustuvat joko valmismoduuleihin tai hitsattuihin liitoksiin. Tässä ratkaisussa teräslevyistä tehty pinta haluttiin tehdä kaksirunkoisen seinärakenteen väliin, missä mitkään huoneen sisä- tai ulkopuolelle tulevat valaisin- tai kalusteasennukset eivät pääse aiheuttamaan sen vaurioitumista. Lisäksi kantava alakattoratkaisu valikoitui myös siksi, että haluttiin välttää ylimääräisiä reikiä katon hajasäteilyä vaimentavassa teräslevypinnassa. Tällaisen huoneen toteutuksessa joutuu väistämättä käyttämään myös valmiita erikoisratkaisuja, kuten ovia ja läpivientisuodattimia sekä erikoistiivistettä.

Sähkömagneettisen vaimennuksen osalta vaatimusten toteutuminen riippuu pitkälti myös käytännön toteutuksesta. Tällaisen huoneen rakentaminen vaatii erityistä huolellisuutta. Mikäli urakoitsijalla, joka tällaista toteuttaa, ei ole osaamista tai aiempaa kokemusta alueelta, olisi hyvä hankkeen alussa pitää lyhyt perehdytys rakenteisiin ja toteutuksen tarkkuusvaatimuksiin. Lisäksi toteutusvaiheessa tarvitaan vastaavan suunnittelijan ja valvojan huolellista ja tiivistä toteutuksen seuraamista. Kaikki työvaiheet on syytä tarkastaa vähintään silmämääräisesti työn edetessä, koska jälkikäteen niiden korjaaminen vaatii pitkälti huoneen purkamista. Tästä syystä myös suunnitelmien on oltava tarkat

ja yksityiskohtaiset. Materiaalivalinnoista ei voi poiketa ilman vastaavan suunnittelijan lupaa.

Kaikkiaan suunnittelutyö oli erittäin monipuolinen. Se sisälsi rakenteiden suunnittelua niiden kantavuus huomioiden, äänen eristävyys suunnittelua ja sähkömagneettisten aaltojen vaimennuksen suunnittelua. Lopputulos ja sen arviointi perustuvat referenssien käyttöön, koska tämän opinnäytteen yhteydessä ei tällaista huonetta ole rakennettu, ei myöskään ole voitu mitata, toteutuvatko oletetut vaatimukset.

LÄHTEET

Comtest Engineering 2019. RF Shielded Enclosures. Viitattu 19.2.2019 <https://www.comtest.eu/solutions/rf-shielded-enclosures/>.

ETS-Lindgren 2019. Series 81 RF shielded enclosures. Viitattu 18.2.2019 <http://www.ets-lindgren.com/products/shielding/rf-shielded-enclosures/11003/1100302>.

Finanssiala ry 2017. Rakenteellinen murtosuojaus III. Viitattu 3.3.2019 <http://www.finanssiala.fi/vahingontorjunta/dokumentit/Rakenteellinen%20murtosuojaus%20III.pdf>.

Gyproc, Saint-Gobain 2018. Gyproc-käsikirja. Kevytrakennejärjestelmät. Kirkkonummi: Saint-Gobain Finland Oy/Gyproc. Saatavissa <http://www.gyproc.fi/tilaa-ja-lataa/gyproc-kasikirja>.

Holland Shielding Systems BV 2019. Amucor Faraday cage. Viitattu 18.2.2019 <https://hollandshielding.com/Amucor-Faraday-cage>.

IAC Acoustics A/S 2019. RF-suojattu huone. Viitattu 19.2.2019 <https://iac-nordic.fi/tuotteet/akustiikkaosasto/akustisia-erityisvaatimuksia-sisaltavat-huoneet/rf-suojattu-huone>.

Laki kansainvälisistä tietoturvallisuusvelvoitteista 588/2004. Annettu Helsingissä 24.6.2004. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2004/20040588>.

Laki viranomaisen toiminnan julkisuudesta 621/1999. Annettu Helsingissä 21.5.1999. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990621>.

Laki viranomaisten tietojärjestelmien ja tietoliikennejärjestelyjen turvallisuuden arvioinnista 1406/2011. Annettu Helsingissä 22.12.2011. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20111406>.

Lehto, A. & Räisänen, A. 1991. Mikroaaltomittaustekniikka. Espoo: Otatieto Oy.

Lindell, I. 1994. Radioaaltojen eteneminen. Espoo: Otatieto Oy.

Liu Z., Ge H., Wu J. & Chen J. 2017. Enhanced electromagnetic interference shielding of carbon fiber/cement composites by adding ferroferric oxide nanoparticles. Construction and building materials 151 (2017), 575-581. Viitattu 20.2.2019 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.017>.

Luokkanen M. 2009. Elektroniikkalaitteiden suojaaminen sähkömagneettiselta pulssilta. Opinnäytetyö. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu.

Mazzoli A., Corinaldesi V., Donnini J., Di Perna C., Micheli D., Vricella A., Pastore R., Bastianelli L., Moglie F. & Mariani Primiani V. 2018. Effect of graphene oxide and metallic fibers on the electromagnetic shielding effect of engineered cementitious composites. Journal of Building Engineering 18 (2018), 33-39. Viitattu 20.2.2019 <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2018.02.019>.

Nyberg T. 2015. Sähkömagneettinen suojaus. Diplomityö. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 19.2.2019.

Räisänen, A. & Lehto, A. 1993. Radiotekniikka. Espoo: Otatieto Oy.

Siirilä, J. 2018. Sotilaallisen liikkuvan kaluston sähkönsyötön toteutus ja suojaus. Opinnäytetyö. Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma. Valkeakoski: Hämeen ammattikorkeakoulu.

Soliani EMC 2019. Shielded rooms. Viitattu 19.2.2019 <https://www.solianiemc.com/en/cp/shielded-rooms/>.

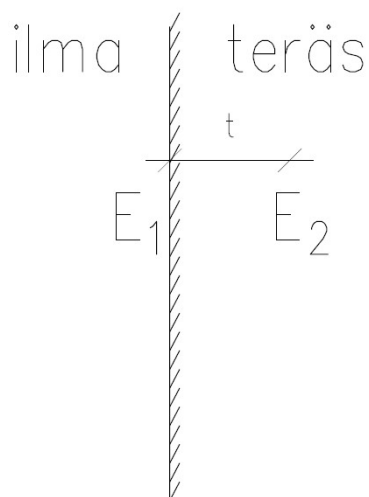
VAHTI 2/2013. Toimitilojen tietoturvaohje. Saatavilla sähköisesti osoitteessa https://www.vah-tiohje.fi/c/document_library/get_file?uuid=78751ee8-c2c8-4ac4-945c-72cb9ec4a01b&groupId=10229.

Valtioneuvoston asetus tietoturvallisuudesta valtionhallinnossa 681/2010. Annettu Helsingissä 1.17.2010. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2010/20100681>.

Velemir, J. 2018. TEMPEST-hyökkäykset ja suojautumiskeinot. Opinnäytetyö (YAMK). Turvallisuusjohtamisen koulutusohjelma. Espoo: Laurean ammattikorkeakoulu.

Viestintävirasto 2013. Sähkömagneettisen hajasäteilyn aiheuttamien tietoturvariskien ehkäisyn periaatteet. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <https://www.kyberturvallisuuskeskus.fi/sites/default/files/media/regulation/ohje-kansallinen-TEMPEST.pdf>.

Teräslevyn paksuuden arviointi



Sähkökenttä $E_2 \approx E_1 e^{-\alpha}$

Vaimennuskerroin $\alpha = \sqrt{\pi f \mu \sigma} = \sqrt{\pi f \mu_r \mu_0 \sigma}$

$20 \log\left(\frac{E_2}{E_1}\right) = 20 \log(e^{-\alpha t}) = -A$, missä A on vaimennus [dB]

etäisyys t, millä matkalla sähkökenttä on vaimentunut halutun vaimennuksen A dB

$$t = \frac{\ln\left(10^{\frac{A}{20}}\right)}{\sqrt{\pi f \mu_r \mu_0 \sigma}}$$

Tämä on suuntaa antava arvio, joka perustuu ainoastaan sähkökentän vaimenemiseen johteessa. Tämä laskelma ei huomio heijastusten vaikutusta, ja on siis varmallalla puolella.

Arvio tarvittavan teräslevyn paksuudelle:

Haluttu vaimennus	40 dB
Taajuus f	10 kHz
	10000 Hz
ur	400
u0	1.26E-06 H/m
johtavuus	1380000 S/m
teräslevyn paksuus	0.000986 m
	0.986498 mm

Tämän arvion perusteella 1,0 mm teräslevy riittää tuottamaan yli 34 dB vaimennuksen sähkökentälle taajuusalueella 10 kHz - 10 GHz.

Alas lasketun katon ja sitä tukevien seinien mitoitus

ALASLASKETUN KATON KUORMAT:

Kantavan katon jänneväli < 6 m, muuten pitää käyttää järeämpää kannatusta:

L **6 m**

primäärikannattaja GFR k1200 **lg** **0.6 m**

GFR 70 paino 173 kg/100m
metrille 1.73 kg/m
17.3 N/m

neliölle **28.83333 N/m²**

GFR 95 paino 197 kg/100m
metrille 1.97 kg/m
19.7 N/m

neliölle **32.83333 N/m²**

GFR 120 paino 221 kg/100m
metrille 2.21 kg/m
22.1 N/m

neliölle **36.83333 N/m²**

sekundäärit tukee GFR kannattajia yläpinnasta k800

ls **0.8 m**

s25/85 paino annettu 71 kg/100m
paino metrille 0.71 kg/m
7.1 N/m

neliölle **8.875 N/m²**

sekundäärit alapinnassa levytystä varten k 600

ls **0.6 m**

s25/85 paino annettu 71 kg/100m
paino metrille 0.71 kg/m
7.1 N/m

neliölle **11.83333 N/m²**

kipsilevy GFR alapinnassa

GN 13 8.4 kg/m²

84 N/m²

2x GN 13 16.8 kg/m²

168 N/m²

Katon omapaino:

1 kipsilevy

2 kipsilevyä

GFR 70 **133.5417 N/m²**

217.5417 N/m²

GFR 95 **137.5417 N/m²**

221.5417 N/m²

GFR 120 **141.5417 N/m²**

225.5417 N/m²

rakenteesta GFR primäärikannattajalle tuleva paino:

		1 kipsilevy	2 kipsilevyä
GFR 70	$g_{k,70}$	0.080125 kN/m	0.130525 kN/m
GFR 95	$g_{k,95}$	0.082525 kN/m	0.132925 kN/m
GFR 120	$g_{k,120}$	0.084925 kN/m	0.135325 kN/m
	$g_{d,70}$	0.092144 kN/m	0.150104 kN/m
	$g_{d,95}$	0.094904 kN/m	0.152864 kN/m
	$g_{d,120}$	0.097664 kN/m	0.155624 kN/m

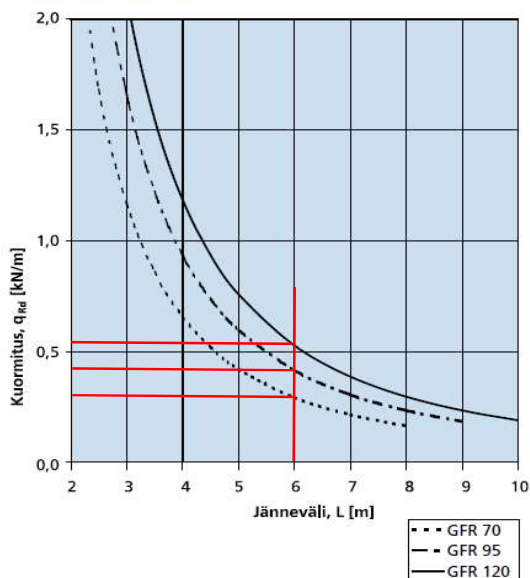
Maksimimometti kattokannattajissa:

$M_{ed,70}$	0.000415 kNm	0.000675 kNm
$M_{ed,95}$	0.000427 kNm	0.000688 kNm
$M_{ed,120}$	0.000439 kNm	0.0007 kNm

Käyrästä 4.3.3:01

Mitoittava vaakakuorma q_d (kN/m)

Molemmat laipat tuettu



(Gyproc 2018, 492)

Taulukko: Teräsprofiilien leikkauskestävyydet

Leikkausvoima tuella:

$V_{ed,70}$	0.000450311 kN
$V_{ed,95}$	0.000458591 kN
$V_{ed,120}$	0.000466871 kN

Teräsprofiili	Leikkauskestävyys uuman suunnassa V_{rd} [kN]
GFR 45	9,5
GFR 70	13,6
GFR 95	13,6
GFR 120	12,1

(Gyproc 2018, 493)

1.3. Mitoitus taipumalle käyttörajatilassa

Suurin sallittu taipuma käyttörajatilassa on $L/150$.

Teräsprofiilin taipuma voidaan tarkistaa seuraavan kaavan mukaan:

$$U_{\max} = C \cdot q \cdot L^4$$

U_{\max} = taipuma metreissä

q = teräsprofiilin vaakakuorma käyttörajatilassa kN/m

L = jänneväli metreissä

C = vakio, joka saadaan alla olevasta taulukosta

Taulukko: Vakio C taipuman laskentaa varten

Teräs-profiili	Molemmat laipat tuettu C	Toinen (puristettu) laippa tuettu C
GFR 45	$13,2 \cdot 10^{-4}$	$13,2 \cdot 10^{-4}$
GFR 70	$4,88 \cdot 10^{-4}$	$9,98 \cdot 10^{-4}$
GFR 95	$2,33 \cdot 10^{-4}$	$8,92 \cdot 10^{-4}$
GFR 120	$1,30 \cdot 10^{-4}$	$8,22 \cdot 10^{-4}$

(Gyproc 2018, 493)

U_{sall}

0.04 m

1 kipsilevy

GFR 70	$g_{k,70}$	0.080125 kN/m
GFR 95	$g_{k,95}$	0.082525 kN/m
GFR 120	$g_{k,120}$	0.084925 kN/m

	$g_{d,70}$	0.092144 kN/m
	$g_{d,95}$	0.094904 kN/m
	$g_{d,120}$	0.097664 kN/m

2 kipsilevyä

	0.130525 kN/m
	0.132925 kN/m
	0.135325 kN/m

	0.150104 kN/m
	0.152864 kN/m
	0.155624 kN/m

C_{70} 0.000488

0.000618

C_{95} 0.000233

0.000298

C_{120} 0.00013

0.000165

käyttöaste:

$U_{\max,70}$ 0.05827613 145.6903 %

0.1202223 300.5557 %

$U_{\max,95}$ 0.028657896 71.64474 %

0.0590372 147.593 %

$U_{\max,120}$ **0.016454389** 41.13597 %

0.0332786 83.19646 %

Valitaan katon primäärikannattajaksi GFR 120, k 600

KATON PAINO SEINÄLLE:

		1 kipsilevy	2 kipsilevyä
GFR 70	$\xi_{k\text{seinä},70}$	400.625 N/m	652.625 N/m
GFR 95	$\xi_{k\text{seinä},95}$	412.625 N/m	664.625 N/m
GFR 120	$\xi_{k\text{seinä},120}$	424.625 N/m	676.625 N/m
	$\xi_{d\text{seinä},70}$	460.7188 N/m	750.5188 N/m
	$\xi_{d\text{seinä},95}$	474.5188 N/m	764.3188 N/m
	$\xi_{d\text{seinä},120}$	488.3188 N/m	778.1188 N/m

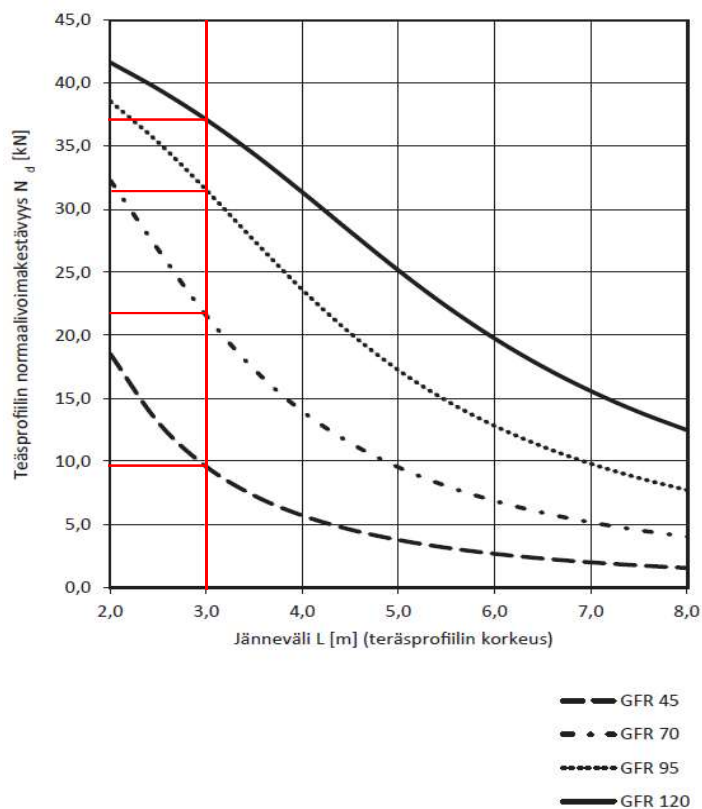
yhdelle seinärangalle k

0.6 m

$N_{ed,70}$	0.276431 kN	0.450311 kN
$N_{ed,95}$	0.284711 kN	0.458591 kN
$N_{ed,120}$	0.292991 kN	0.466871 kN

Käyrästä 4.3.3:04

Teräsprofiilin normaalivoimakkestävyys, kun molemmat laipat tuettu



Seinän korkeus max 2.5 m.

Kaikki profiilit kestää katosta tulevat kuormat.

TEMPEST-huoneen rakenteista tulevat kuormat:

Gyproc GN 13 Normaali		8.4 kg/m ²		
Rigidur H GFH 13		15 kg/m ²		
Gyproc GL 15 Lapikas		15.4 kg/m ²		
Gyproc 4PRO Sisäverhouslevy		8.8 kg/m ²		
Kisko GFS 95 DUROnomic		2.02 kg/m		
Ranka GFR 95 DUROnomic		1.95 kg/m		
Ranka GFR 120 DUROnomic		2.18 kg/m		
Gyproc S 25 sekundääri		0.7 kg/m		
Hattuprofiili HTL 16/100, 0.7		1 kg/m		
Teräksen tiheys p		7850 kg/m ³		
Teräslevy 1 mm		7.85 kg/m ²		
Teräslista 3x50 mm		1.1775 kg/m		
L-teräs 50x50x3 mm		2.24 kg/m		
Isover FLO		85 kg/m ³		
Isover FLO 30 mm		2.55 kg/m ²		
Isover KL-AKU		13 kg/m ³		
Isover KL-AKU 95 mm		1.235 kg/m ²		
Katto ylemmälle välipohjalle:		25.49792 kg/m²	254.9792 N/m²	0.254979 kN/m²
Lattia:		139.6313 kg/m²	1396.313 N/m²	1.396313 kN/m²
Seinä:				
Ulkorunko:	2.85 m	174.0238 kg/m	1740.238 N/m	1.740238 kN/m
Sisärunko:	2.425 m	69.64113 kg/m	696.4113 N/m	0.696411 kN/m
Sisärunko, jolle tulee alas lasketun katon paino:				
alas lasketun katon leveys max.	6 m	14.76667 kg/m ²		
	yhteensä	113.9411 kg/m	1139.411 N/m	1.139411 kN/m