



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Wimme Tyni

# Elektroniikan suojaaminen sähkömagneettiselta pulssilta kriittisissä kohteissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

11.2.2021

Tekijä Otsikko	Wimme Tyni Elektroniikan suojaaminen sähkömagneettiselta pulssilta kriittisissä kohteissa
Sivumäärä Aika	25 sivua 11.2.2021
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	automaatiotekniikka
Ohjaajat	lehtori Kai Virta ryhmäpäällikkö Mikko Pöysti
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä EMP-suojan suunnitteluun kokonaisuutena ja selvittää, mitä erilaisia EMP-suojaratkaisuja ja -laitteistoja on olemassa, sekä minkälaisia asennustapoja niihin liittyy. Työn tavoitteina oli selvittää Granlund Oy:lle, miten kriittisten kohteiden EMP-suoja rakennetaan ja suunnitellaan.</p> <p>Raportissa on käsitelty kuinka sähkömagneettiset pulssit muodostuvat, mitä vaikutuksia niillä on, miten niiltä voidaan suojautua sekä kuinka EMP-suoja rakennetaan ja mitä komponentteja siihen tarvitaan. Tässä työssä on keskitytty lähinnä erittäin voimakkaisiin sähkömagneettisiin pulsseihin ja suurtehomikroaaltoaseisiin.</p> <p>Työn tärkein tarkoitus on kertoa, mitä EMP-suojan suunnittelussa tulisi ottaa huomioon ja minkälaisia ratkaisuja laitteiden, laitteistojen ja rakennuksien suojaukseen voidaan käyttää, jotta EMP:n vaikutukset herkkään elektroniikkaan saadaan eliminoidua. Työssä tarkastellaan erilaisia suojaustapoja, materiaaleja sekä miten mm. suodattimet ja EMP-läpiviennit toimivat.</p> <p>Työn lopputulokseksi saatiin sähkösuunnittelun yleisohje EMP-suojan rakentamisessa tarvittavista materiaaleista, laitteista ja vaatimuksista.</p>	
Avainsanat	EMP, sähkösuunnittelu, kriittiset kohteet, sähköverkot, elektroniikka

Author Title	Wimme Tyni Protecting electronics from electromagnetic pulse in mission critical environment
Number of Pages Date	25 pages 11 February 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering
Professional Major	Automation Technology
Instructors	Kai Virta, Senior Lecturer Mikko Pöysti, Group Manager
<p>The purpose of this work was to get acquainted with the design of EMP protection and to find out what different EMP protection solutions and equipment exist and what kind of installation methods are involved. The aim of the work was to find out how EMP protection is built and designed in mission critical environment.</p> <p>The thesis discusses how electromagnetic pulses are formed, what effects they have, how to protect against them, and how EMP protection is built and what components are needed for it. This work focuses mainly on very strong electromagnetic pulses and High-Power microwave weapons.</p> <p>The main goal is to cover what should be considered in the design of EMP protection, what protective equipment could be used and finding out different installation and building solutions in order to eliminate the effects of EMP on sensitive electronics. The work examines different protection methods, materials and how e.g. filters and EMP bushings work.</p> <p>The result of the work is a general guide to the materials, equipment and requirements for the electrical design of EMP protection.</p>	
Keywords	EMP, electrical design, mission critical, electrical grid, electronics

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähkömagneettinen pulssi	1
2.1	Maanpäällinen sähkömagneettinen pulssi	2
2.2	Lähdealueen sähkömagneettinen pulssi	2
2.3	Suuren altitudin sähkömagneettinen pulssi	3
3	Suurtehomikroaaltoase	5
3.1	Suurtehomikroaaltoaseiden vaikutusmekanismit ja vaikutukset	6
3.2	Suurtehomikroaaltoaseiden uhka	7
4	Sähkömagneettisten pulssien vaarat	7
5	Laitteiden suojaaminen sähkömagneettiselta säteilyltä	8
5.1	Faradayn häkkimenetelmä	9
5.2	Ovet ja tiivisteet	13
5.3	Läpiviennit ja maadoitus	13
5.4	Kaapelointi	16
5.5	Ilmastointikanavat ja kennostot	17
5.6	Erotusmuuntajat	18
5.7	Ylijännitesuojat	18
5.8	Suodattimet	19
5.8.1	Suodattimien eri tyypit	20
5.8.2	Suodattimen eri tehtävät	21
5.8.3	Jännite- ja virta-alue	22
5.8.4	Vaimennus	22
5.8.5	Suodattimen asennus ja johdotus	22
6	Yhteenveto	23
	Lähteet	25

## Lyhenteet

<b>EMP</b>	Electromagnetic Pulse, maanpäällinen sähkömagneettinen pulssi
<b>HEMP</b>	High-Altitude EMP, korkealla maan ilmakehässä syntyvä sähkömagneettinen pulssi
<b>HPM</b>	High-Power Microwave weapon, korkeatehoinen Mikroaaltoase
<b>IED</b>	Intelligent Electronic Device, sähköteollisuudessa käytetty sähköjärjestelmään integroitu mikroprosessoripohjainen ohjain.
<b>NEMP</b>	Nuclear Electromagnetic Pulse, ydinräjähdyksestä muodostuva sähkömagneettinen pulssi
<b>MC</b>	Mission Critical, kriittiset kohteet
<b>SREMP</b>	Source Region EMP, lähdealueen sähkömagneettinen pulssi

## 1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö käsittelee EMP-suojan (Electromagnetic Pulse) sähkösuunnittelua pääpiirteittäin. Työssä käydään lyhyesti läpi sähkömagneettinen pulssi ja sen eri muotoja. Työssä selvitetään myös, kuinka HPM-aseet vaikuttavat elektroniikkaan ja miten se eroaa EMP-iskusta.

Työn tärkein tarkoitus on kertoa, mitä EMP-suojan suunnittelussa tulisi ottaa huomioon ja minkälaisia ratkaisuja laitteiden, laitteistojen ja rakennuksien suojaukseen voidaan käyttää, jotta EMP:n vaikutukset herkkään elektroniikkaan saadaan eliminoitua. Työssä tarkastellaan erilaisia suojaustapoja, materiaaleja sekä miten mm. suodattimet ja EMP-läpiviennit toimivat. Työ oli selvitystyö, jonka pohjalta tuotettiin yleisohje EMP-suojan sähkösuunnitteluun Granlund Oy:lle.

Työssä ei käsitellä suojatun huoneen tai laitteiden mittaus- sekä testausmenetelmiä. Työ on kirjoitettu lähdekirjallisuuden pohjalta.

## 2 Sähkömagneettinen pulssi

Sähkömagneettinen pulssi, Electro Magnetic Pulse EMP, on sähkömagneettisen energian välitön purkaus, joka etenee avaruudessa tai ilmakehässä. Kohdatessaan sähköä johtavaa materiaalia, kuten johtimia tai vaikkapa metallisia putkistoja, se voi indusoida niissä hyvinkin voimakkaita sähkövirtauksia. Yleisemmin EMP muodostuu ”transienttien” eli äkillisten ja voimakkaiden virtapiikkien tuloksena, kuten salaman tai sähköstaattisen purkauksen yhteydessä. Tämän kaltainen matalaenerginen EMP vaikuttaa lähinnä vain erittäin herkkiin mikropiireihin. Erittäin korkeaenerginen ja laajasti leviävä EMP aiheuttaa suurempaa tuhoa ylikuormittamalla sekä häiritsemällä jopa ”raskaita” sähköjärjestelmiä ja niiden kriittisiä osia ja komponentteja, kuten sähköasemia ja muuntajia. On myös laitteita, joilla pystytään tuottamaan voimakas EMP pienemmille keskitetyille alueille, kuten eri kaupunginosiin tai sähköasemille. Näillä laitteilla on erilaisia nimityksiä, joista yleisin on HPM-ase (High-Power Microwave weapon) eli korkeatehoinen radioaaltoase. [1, s. 3.]

Auringon koronan massapurkaukset kuljettavat mukanaan voimakkaita magneettikenttiä. Jos poikkeuksellisen suuri massapurkaus suuntautuu kohti maata, syntyy siitä voimakas Maan magneettikenttää häiritsevä geomagneettinen myrsky. Tällainen ilmiö voimistaa mm. ionikehässä kulkevia sähkövirtoja, aiheuttaen maanpinnalla mitattavia maan magneettikentän häiriöitä. G5-luokituksen omaava äärimmäisen voimakas geomagneettinen myrsky voi aiheuttaa sähköjakelun kantaverkkoon laajoja jännitteenhallintaongelmia sekä sähkökatkot ja muuntajavauriot ovat mahdollisia. Vertauksena maakaasuputkiin indusoituneet sähkövirrat ovat jopa satoja ampeereja. G5 luokituksen omaavia geomagneettisia myrskyjä esiintyy noin neljä kertaa neljänä päivänä auringonpilkkuajaksossa eli todella harvoin. [2; 3.]

Voimakkaan ydinräjähdysen vaikutuksena syntyy EMP, josta käytetään nimitystä NEMP (Nuclear Electromagnetic Pulse). Ydinräjähdysen korkeus merenpinnasta sekä räjähdyksestä vapautuvan gammasäteilyn määrä vaikuttavat suoraan sähkömagneettisen pulssin leviämisalueeseen sekä voimakkuuteen, ja NEMP:tä luokitellaankin eri kategorioihin. [4.]

## 2.1 Maanpäällinen sähkömagneettinen pulssi

Maanpäällinen sähkömagneettinen pulssi (EMP) syntyy, kun ydinräjähdys tapahtuu maan pinnalla tai alle kaksi kilometriä maan pinnan yläpuolella. Räjähdyksestä muodostuva säteilevä aalto leviää vain 10–20 km säteellä räjähdyspisteestä, ilmakehän alemman osan aiheuttaman vaimennuksen vuoksi, mutta aiheuttaa paikallisesti suurta tuhoa. [4.]

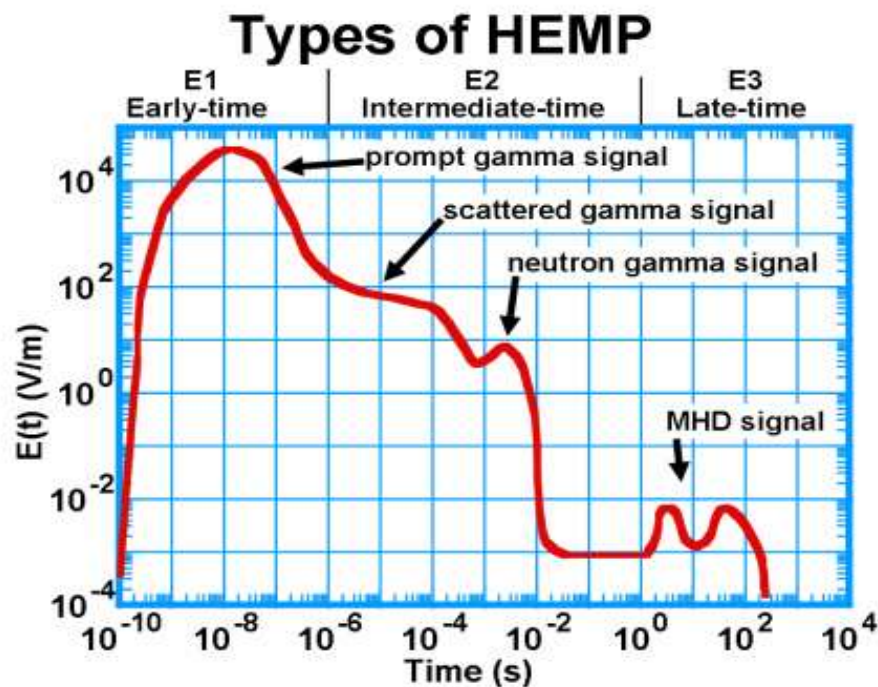
## 2.2 Lähdealueen sähkömagneettinen pulssi

Usean sadan metrin korkeudella meren pinnasta tapahtuvasta ydinräjähdyksestä syntyvää sähkömagneettista pulssia kutsutaan nimellä SREMP (Source Region EMP). Tämä sähkömagneettinen pulssi vaikuttaa vain kolmesta kahdeksaan kilometriin räjähdyksestä, mutta SREMPin sähkökentät saattavat nousta yli  $10^5$  kV/m ja magneettikentät yli 4 kA/m lukemiin. Nämä sähkö- ja magneettikentät ovat paljon suurempia kuin HEMP:n aiheuttamat kentät. [4; 9, s. 331.]

## 2.3 Suuren altitudin sähkömagneettinen pulssi

Korkealla maan ilmakehässä sekä ulkoavaruudessa syntyvää sähkömagneettista pulssia kutsutaan nimellä HEMP (High-Altitude Electromagnetic Pulse). Tämä on merkittävin sekä mahdollisesti kaikista tuhoisin uhka kansainväliselle turvallisuudelle. HEMP syntyy ydinräjähdysten tapahtuessa yli 30 km:n korkeudella merenpinnasta.

HEMP jakautuu kolmeen eri vaiheeseen, jotka ilmenevät peräkkäin. Näistä vaiheista käytetään usein lyhenteitä E1, E2 ja E3, jotka esitetty kuvassa 1. [4; 5, s. 12.]



Kuva 1. HEMP:n eri vaiheet ja niiden sähkökentän voimakkuus kuvattu ajan funktiona. (Pystyakselilla sähkökentän voimakkuus, yksikkö V/m.) [5, s. 12.]

Pulssin ensimmäinen vaihe, E1, on nopein ja voimakkain vaihe, jonka aikana pulssi nousee huippuarvoonsa nanosekunneissa ja kestää kokonaisuudessaan noin mikrosekunnin. Tämän ensimmäisen vaiheen aikana EMP:n muodostama sähkökenttä voi nousta



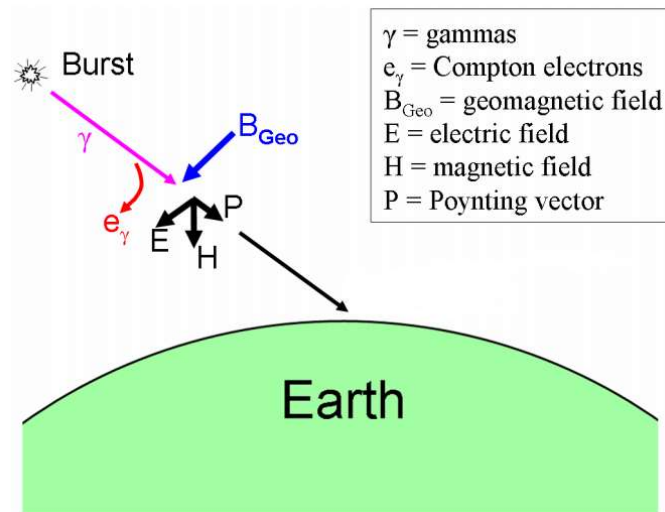
jopa 50 kV/m lukemiin. E1-vaiheessa ilmenee voimakkaimmat sähkökentän vaihtelut, jotka vahingoittavat ja tuhoavat elektroniikkaan perustuvia ohjaus-, viestintä- ja suojausjärjestelmiä sekä antureita, tietokoneita ja muita samankaltaisia laitteita. [5, s. 12; 6, s. 5.]

Pulssin toinen vaihe, E2, on samankaltainen kuin salama, mutta vaikutusalueeltaan paljon laajempi ja sen vaihteluväli on pienempi kuin salamalla. Infrastruktuurin kriittisille järjestelmille tämä ei ole niin suuri uhka, mikäli järjestelmät on suojattu salamaniskujen varalta. Suurin riski on synergistinen, koska E2-vaihe seuraa välittömästi E1-vaihetta, jolloin E2:n energia voi läpäistä ja rikkoa järjestelmiä. [6, s. 6.]

Pulssin viimeinen vaihe, E3, on hitaasti nouseva pulssi, joka muodostuu ydinräjähdysten aiheuttamista muutoksista maan magneettikenttään ja on verrattavissa auringon koronan massapurkauksen aiheuttamiin geomagneettisiin myrskyihin. E3 saattaa kestää sekunneista jopa minuutteihin, mutta on amplitudiltaan heikoin HEMP:n vaihe. Hitaan nousujan takia E3 vaikuttaa pitkiin sähköjohtimiin ja ”raskaisiin” sähköjärjestelmiin. [7, s. 13; 8, s. 2.] Alla olevassa taulukossa on esitetty sähkömagneettisten aaltojen kolme vaihetta HEMP tapahtumassa. Taulukossa esitetään vaiheiden pituuksien yhtäläisyys eri sähkömagneettisten ilmiöiden kanssa, ja tuottaako ne häiriötä/tuhoa sähköjärjestelmien eri laitteille. [8, s. 2.]

Sähkömagneettinen aaltomuoto (HEMP)	Aallonpituuden yhtäläisyys luonnonilmiöihin	Herkälle elektroniikalle aiheutuva haitta
E1: lyhytaikainen	sähköstaattinen purkaus	kyllä
E2: väliaikainen	salaman isku	ei
E3: pitkäaikainen	geomagneettinen myrsky	ei

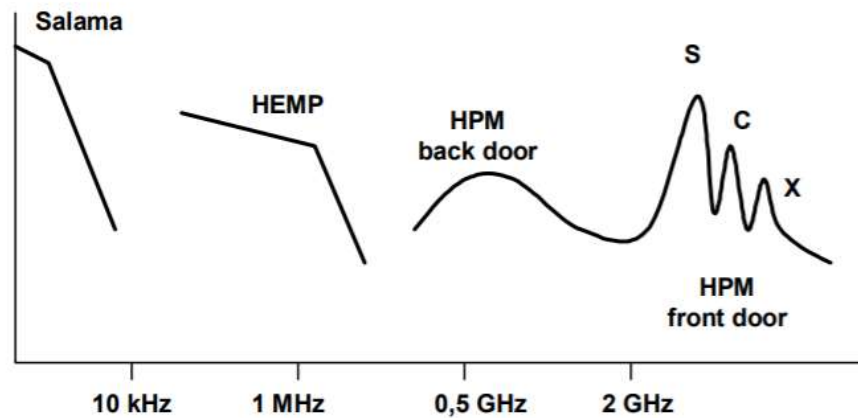
HEMP syntyy, kun ydinräjähdyksessä muodostuneet gammasäteet törmäävät maapallon ilmakehään ja ionisoivat sen atomeja. Irronneet elektronit ohjautuvat maan magneettikentän mukaisesti, synnyttäen maata kohti kulkevan sähkömagneettisen aallon. Ilmiö perustuu Comptonin sirontaan. (kuva 2.) Esimerkiksi 500 km:n korkeudella suoritettava ydinräjähdys Yhdysvaltojen keskiosassa tuottaisi niin vahvan sähkömagneettisen kentän, että se lamauttaisi kaikki kommunikaatiojärjestelmät Yhdysvaltojen mantereissa. [4; 8, s. 1.]



Kuva 2. Yksinkertaistettu Comptonin sironnan periaatekuva. [5, s. 13.]

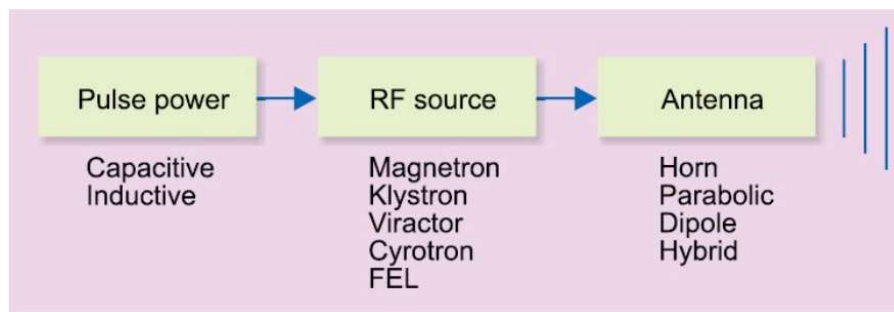
### 3 Suurtehomikroaaltoase

Mikroaaltoaseiksi (High-Power Microwave weapon) kutsutaan laitteita, joiden toimintaperiaatteena on lähettää tuhovaikutuksen aikaansaavaa mikroaaltoalueen sähkömagneettista säteilyä. Mikroaaltoaseet toimivat mikroaaltoalueella eli taajuuksilla 300 MHz – 30 GHz. HPM-aseen ero perinteisiin häirintälaitteisiin on siinä, että HPM-aseella on tavoitteena tuhota elektroniikkaa tai lamauttaa se niin, ettei sen käyttö ilman jonkinlaista korjausta tai huoltoa onnistu. HPM-aseella saavutettavat hetkelliset tehot ovat jopa tuhansia megawatteja. Aseen toiminta edellyttää näköyhteyttä kohteeseen. Monikäyttöisen HPM-aseen saa luotua käyttämällä esimerkiksi suuritehoisia akkuja tai kondensaatoreita. Kuvassa 3 on esitetty eri sähkömagneettisten häiriöiden aiheuttajia ja niiden taajuusalueita. [10, s. 16; 11, s. 14.]



Kuva 3. Suurtehomikroaaltoase vaikuttaa muita sähkömagneettisia häiriöitä ja aseita, kuten salamia ja EMP:a korkeammilla taajuuksilla. [11.]

Suurtehomikroaaltoaseen tuhovaikutus perustuu suurenergiseen ja suurtaajuiseen sähkömagneettiseen, joka on tarpeeksi voimakas ylikuormittamaan sähköpiirejä, aiheuttaen riittävän suuria virtoja väliaikaisesti häiritsemään elektronisia järjestelmiä tai vahingoittamaan pysyvästi integroituja piirejä aiheuttaen niiden vikaantumisen minuutteja, päiviä tai viikkoja myöhemmin. Mikroaaltoaseen purkaus saattaa jopa sulattaa piirejä joissakin tapauksissa. [11, s. 393.]



Kuva 4. Mikroaaltoaseen yksinkertaistettu rakenneperiaate. [10.]

### 3.1 Suurtehomikroaaltoaseiden vaikutusmekanismit ja vaikutukset

HPM-aseella voidaan vaikuttaa kohteeseen joko suoraan tai epäsuorasti. Suorassa vaikuttamisessa (front-door) aalto indusoituu kohdejärjestelmän antenneihin ja

metallijohtimiin ja tunkeutuu johtumalla kaapeliyhteyksiä pitkin laitteistoon. Suorassa tunkeutumisessa täytyy olla hyvä näkyvyys kohdejärjestelmän antenneihin, jolloin saadaan maksimaalinen vaikutus aikaiseksi. Häirinnällä vaikutetaan herkkiin puolijohdekomponentteihin, jotka ylikuormittuvat ja hajoavat helposti suurten virtapiikkien yhteydessä. [12, s. 393.]

Epäsuorassa vaikuttamisessa (back-door) HPM-pulssi tunkeutuu ajoneuvojen, asuntojen, konttien ja laitteiden sisälle ovien, luukkujen ja läpivientien kautta. Häirintä vaikuttaa esimerkiksi tehonsyöttö- tai signaalikaapeleihin tai antenneina toimiviin pitkiin johdotuksiin. Vaikutus kaapeleihin ja johdotuksiin voi olla heikkoa ja suojauksen tasosta riippuen vaikutus voi vaihdella merkittävästi. Epäsuoralla vaikuttamisella on kuitenkin merkitystä tilanteissa, joissa suora vaikuttaminen on mahdotonta. [12, s. 393.]

### 3.2 Suurtehomikroaaltoaseiden uhka

HPM-aseen uhka perustuu suurelta osin sen suureen toimintataajuuteen, joka mahdollistaa kapeiden suurienergisten pulssien muodostamisen sekä säteilyenergian tunkeutumisen kohdelaitteisiin, jotka on suojattu matalampitaajuiselta säteilyltä, esim. EMP-suojauksella. Mitä korkeampi taajuus, sitä kapeampia pulsseja voidaan synnyttää. Taajuuden nostamisen myötä yhä pienemmät raot toimivat aaltojohteina mahdollistaen säteilyn tunkeutumisen kanavia ja rakoja pitkin laitetiloihin ja laitteisiin. HPM-ase voi olla erikoisjoukkojen, agenttien tai terroristien käyttämä HPM-salkkupommi. HPM-salkkupommi voi pienimmillään olla attaseasalkun kokoinen ja suurimmillaan pakettiauton tavaratilaan mahtuva ase. [12, s. 397.]

## 4 Sähkömagneettisten pulssien vaarat

Sähkömagneettisen pulssin vaarat ymmärrettiin vasta vuonna 1962 Yhdysvaltojen toteuttamassa STARFISH PRIME -ydinkokeessa, jossa Yhdysvaltojen armeija räjäytti 1,4 megatonnin ydinpommin Johnstonin Atollin yllä 40 km:n korkeudessa. Tämän seurauksena avaruudessa Yhdysvaltojen, brittien sekä Neuvostoliiton satelliitit kärsivät vaurioita, ja 1300 km:n päässä Havaijilla, katuvalojen toiminta häiriytyi sekä puhelimet, radiot että televisiot hajosivat. [13.]

Voimakas ja laajalle leviävä EMP voi pahimmassa tapauksessa halvaannuttaa valtioiden kriittisen infrastruktuurin pitkäksi ajaksi vaikuttamalla sähkönjakeluverkkoon ja tätä kautta esimerkiksi ruoan saantiin sekä sairaaloihin. Luotettava sähkönjakelu- ja informaatiojärjestelmä toimii nykyisen hyvinvointiyhteiskunnan tukipilarina, jolloin sen pitkäaikainen häiriö tai katkeaminen vaikuttaa merkittävästi ihmisten päivittäiseen elämiseen. Vaikka voimakkaita sähkömagneettisia pulsseja syntyy vain harvinaisissa tilanteissa, on niitä vastaan kuitenkin suojauduttava. [1, s. 7.]

## **5 Laitteiden suojaaminen sähkömagneettiselta säteilyltä**

”EMP-suoja on käytännössä suljettu johtava kuori, jonka tiiveys tulee tarkastaa ja mitata ennen käyttöönottoa. Kaikki läpiviennit kulkevat suodattimien läpi, jotka estävät säteilyn pääsyn sisälle.” [14]. EMP-tilan on tarkoitus suojata laitetilaa asennettavia laitteita sähkömagneettisilta häiriöiltä ja mahdollistaa laitteiden toiminta kaikissa olosuhteissa sekä laitteiden huolto-, korjaus- ja ylläpitotöiden suorittaminen työ- ja laiteturvallisuus huomioiden.

Nykyään suurin osa yhteiskunnalle kriittisestä infrastruktuurista on liitetty IT-järjestelmiin, jotka ovat riippuvaisia kriittisistä elektronisista järjestelmistä sekä laitteistosta. Data-, IT-, säätö- sekä sähkönsyöttöjärjestelmät sisältävät herkkiä mikropiirejä, jotka ovat erityisen alttiita sähkömagneettisille häiriöille, esimerkiksi EMP:lle. Suojaamattomilla järjestelmillä sekä laitteistolla on suuri riski hajota EMP-tapahtuman jälkeen. [15, s. 14.]

Sähkömagneettisen säteilyn tietoliikennelaitteita tuhoava vaikutus perustuu antenneihin tai antennina toimiviin johtimiin indusoituviin energiapulsseihin. Vaurion syntymisen herkkyys riippuu laitteiston herkkyydestä, sähkömagneettisen kentän voimakkuuksista ja antennien sekä antennina toimivien johtimien ominaisuuksista. [10, s. 15.]

Laitteiden suojaaminen sähkömagneettisilta pulsseilta on periaatteessa hyvin yksinkertaista. Monissa tapauksissa pelkkä suljettu metallinen suojakotelo, ns. Faradayn häkki, laitteen tai laitteiston ympärillä riittää suojaksi. HEMP voi kuitenkin olla niin voimakas, että se pääsee jopa metallilevyistä valmistetun kotelon läpi. Kotelon suojauksen vahvistamiseksi vaihtoehtoina on lisätä suojakerroksia, vaihtaa koteloinnin materiaalia, tai lisätä suojakotelon paksuutta. Laitteiden koteloinnissa on myös otettava huomioon

mahdolliset läpiviennit tarvittaville signaali- ja/tai syöttökaapeleille, sillä jokainen aukko kotelossa laskee sen varmuutta suojata sisällä olevaa laitetta. [15, s. 18.]

Herkän elektronisen laitteiston suojaamiseen on pääasiassa kolme eri menetelmää. [16, s. 15.]

- 1) laitteiston suojaaminen Faradayn häkkiin perustuvalla huoneratkaisulla (metallinen kotelo)
- 2) laitteiston sijoitus vuorien tai maanalaisten bunkkerien sisälle ja
- 3) laitteiston sijoitus rakennuksen sisälle erilliseen huoneeseen, jossa paksut betoniset seinät ja katto.

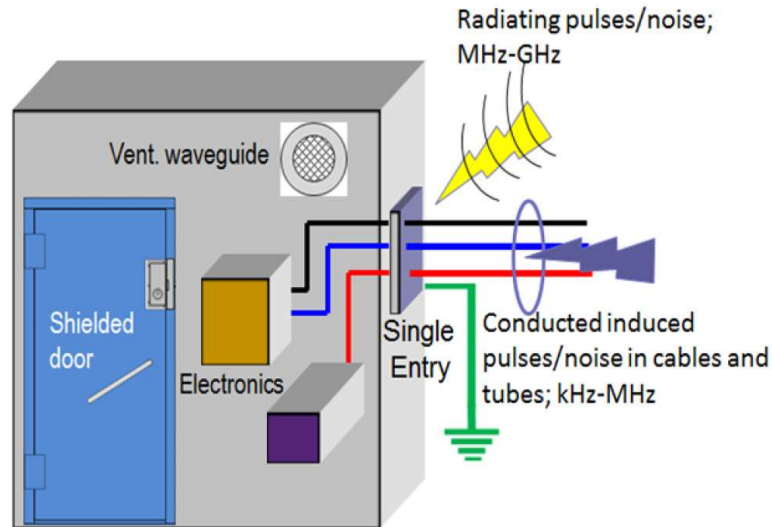
Yleisesti jo ensimmäisellä menetelmällä oikein rakennettuna saavutetaan tarvittava suojaustaso.

Suojauksen tehokkuus bunkkerin tai vuoren sisälle sijoitetussa laitteistossa riippuu eri tekijöistä, kuten kiven ja maaperän tyypistä, luolan/bunkkerin syvyydestä, kaapelien pituudesta, turvalaitteistosta kuten porteista ja muista esteistä laitosten sisäänkärsillä.

Viimeinen vaihtoehto takaa vain välttävän suojauksen. Tavallisesti tämä ei pelkästään riitä, ellei sitä käytetä yhdessä Faradayn häkin kanssa. [16, s. 16.]

## 5.1 Faradayn häkkimenetelmä

Faradayn häkki on johtavasta materiaalista rakennettu kotelo, joka estää ulkoisen sähkökentän pääsyn sen sisälle asennettuun laitteistoon johtamalla ulkoisen sähkökentän positiiviset ja negatiiviset varausosuudet häkin eri puolille. Positiivisten ja negatiivisten varausten keskittymät luovat oman sähkökenttensä, joka mitätöi ulkoisen sähkökentän vaikutuksen häkin sisäpuolella. Faradayn häkin pääasiallinen tehtävä on suojata herkkää elektroniikkaa salamaniskuilta, sähköstaattisilta purkauksilta sekä EMP:ltä. Kuvassa 5 on esitetty Faradayn häkin toimintaperiaate. [16, s. 16.]



Kuva 5. Faradayn häkin toimintaperiaate. Kuvassa on esitetty Faradayn häkki, sen maadoitus sekä kaapeli- ja ilmanvaihtoläpiviennit. Häkin metallinen pinta pääasiassa heijastaa ja pidättää sähkömagneettisen energian. [16, s. 16.]

Faradayn häkki ei pysty estämään staattista tai hitaasti muuttuvaa magneettista kenttää, kuten Maan magneettista kenttää. Suurimmaksi osaksi kuitenkin häkki suojaa sisäpuolta ulkoiselta sähkömagneettiselta säteilyltä, jos häkki on tarpeeksi paksu ja reiät ovat pienempiä kuin säteilyn aallonpituus. [16, s. 16.]

Ideaali Faradayn häkki tai suojattu huone on metallinen "laatikko" ilman aukkoja, mutta todellisuudessa tämä on mahdoton toteuttaa, koska tilaan on myös päästävä sisälle. Suojattuja huoneita rakennetaan parilla eri ratkaisulla.

Ensimmäisessä ratkaisussa käytetään mittatilattuja 1–2 mm teräslevyelementtejä, jotka asennetaan EMP-tiivisteiden kanssa. Tämä rakennustapa takaa hyvän vaimennuksen sekä suojan sähkömagneettisilta häiriöiltä. Toisessa rakennustavassa käytetään normaaleita teräslevyjä, joista EMP-tila rakennetaan. Tällä menetelmällä saavutetaan kohtuu hyvä sähkömagneettinen suoja sekä vaimennus. [16. s. 16.]

Suojatun tilan tehokkuus riippuu monesta eri tekijästä. Suojattu tila 10 GHz:n taajuusalueella ja sen ylimenevä alue voidaan vaimentaa aina muutamasta dB:stä yli 100 dB:iin. Käytännössä tilan suojaus huononee aina mitä enemmän läpivientejä ja sisääntuloja on.

Yhtenäisen metallikotelon tai tilan suojauksen tehokkuus määritellään seuraavien tekijöiden mukaan:

Häiritsevät virrat tulisi estää kotelon ulkopinnalla tai suljetuissa silmukoissa yhdistämällä nämä maadoitusjärjestelmään. Sisään tulevat kaapeliasennukset tulisi suodattaa sekä kaapeleiden suojavaippa tulisi maadoittaa kotelon runkoon. Sähköä johtavien saumojen pituus suojatun tilan kaikissa osissa tulisi olla mahdollisimman lyhyt, mieluiten alle 1/10 häiriön aallonpituudesta. Reikien koko tulisi olla mahdollisimman pieni verrattuna häiriön aallonpituuteen. [18, s. 20.] Kuvassa 6 näkyy ns. "purpose-built" EMP-tila mittatilaustyö-teräslevyillä rakennettuna.



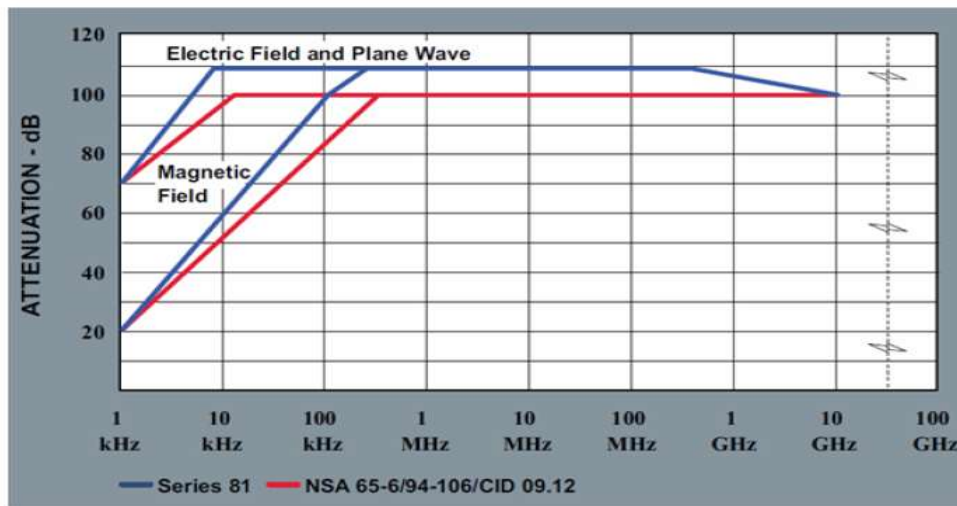
Kuva 6. "Purpose-built" EMP-tila. [16, s. 17.]





Kuva 7. EMP-tilan sisäosa. [16, s. 17.]

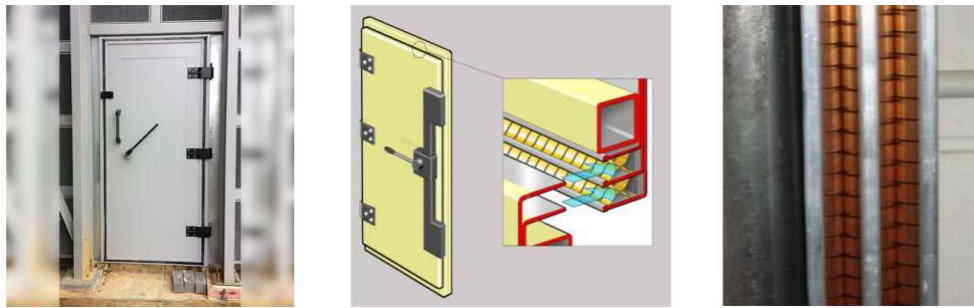
Kummatkin rakennustavat noudattavat yleisimpiä sähkömagneettiseen vaimennukseen liittyviä standardeja. Suojan itsessään on oltava sähköä johtavaa materiaalia. Tyypillisesti käytetään ohuita galvanoituja teräslevyjä, mutta joissain tapauksissa kupari tai messinki rakennusmateriaalina on soveltuva. [16, s. 17.] Kuvassa 6 olevassa kuvaajassa verrataan tyypillisen EMP-suojan ja mittatilatun suojan vaimennuksen eroa. Mitä suurempi vaimennus (attenuation), sitä parempi.



Kuva 8. Tässä taulukossa verrataan tyypillisen EMP-suojan ja mittatilatun suojan vaimennusta. [16, s. 17.]

## 5.2 Ovet ja tiivisteet

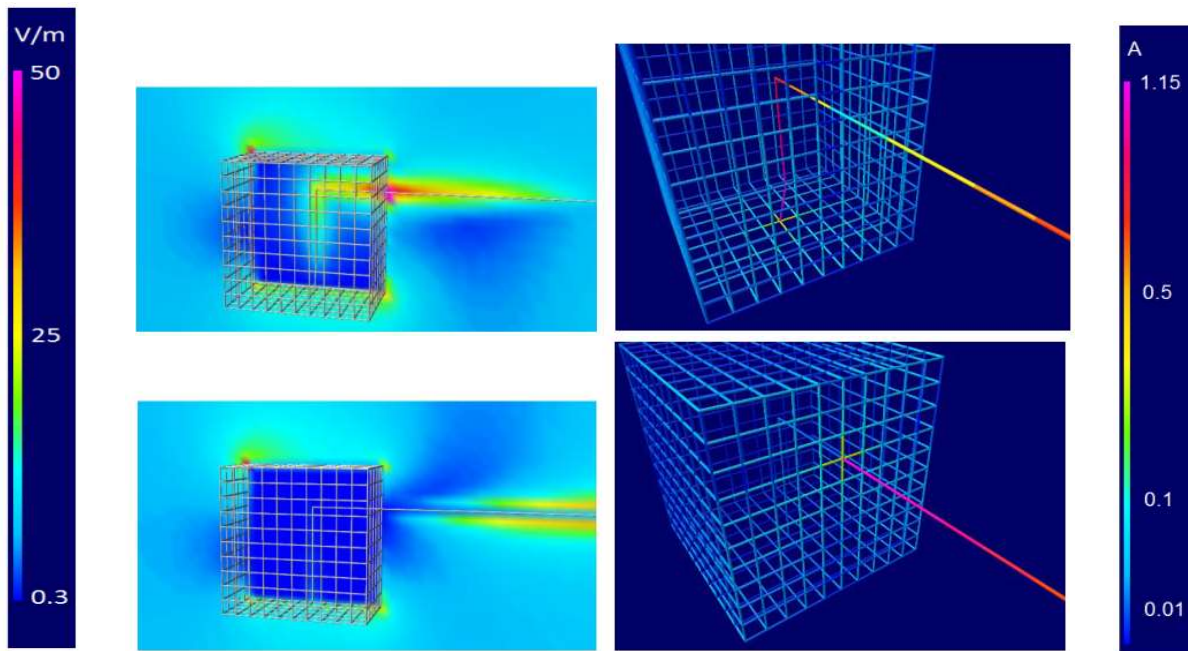
EMP-tilan ovet ovat suunniteltu vaimentamaan sähkömagneettisia aaltoja. Ovet ovat varustettu EMP-tiivisteillä, joka takaa riittävän tiiveyden sekä kytkeytymisen tilan metallirakenteisiin. Sähköä johtavia tiivisteitä käytetään vähentämään aukkojen vaikutusta sekä ylläpitämään suojatun tilan rakenteiden sidoksia. Tiivisteillä saadaan jatkuva ja kiinteä yhteys saumapinnoille. [16, s. 18; 18, s. 20.]



Kuva 9. European EMC Productsin (EEP) EMP-ovi, sen toimintaperiaate sekä tiivisteet. [17, s. 1.]

## 5.3 Läpiviennit ja maadoitus

Yleisesti ottaen pieni aukko EMP-suojan seinämässä ei aiheuta suojaustason heikkenemistä. Jos kaapeli kulkee läpiviennistä eristettynä johtavasta seinästä, aiheuttaa se suuren suojaustason alenemisen. Kun kaapelit kulkevat ilman kunnollista maadoitusta EMP-suojan läpi pääsee sähkömagneettinen häiriö kulkeutumaan kaapelia pitkin suojan sisälle. Aukkojen tekemiseltä suojaukseen ei kuitenkaan voi välttyä (kaapelit, kaapelireitit, ilmastointi ja jäähdytys). Oikein rakennettuna ne säilyttävät suojauksen tason suurella osalla taajuualueesta. Parhaan suojaustason takaamiseksi kaikki kaapelit sekä ilmastointi/jäähdytyskanavat tuodaan yleensä EMP-tilaan yhden läpiviennin kautta, jossa kaapelit, kaapelireitit, jäähdytys- ja ilmastointikanavat maadoitetaan suojan ulkokuoreen sekä metallisiin osiin. [18, s. 24; 19, s. 4.]



Kuva 10. Kuvissa esitetty maadoittamattomien ja maadoitettujen kaapelien ero sähkömagneettista häiriötä vastaan. (Maadoittamattomat ylempänä ja maadoitetut alempana). [19, s. 5.]

Ylemmissä kuvissa näkyy maadoittamattomat kaapeliläpiviennit häiriösuojaan. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty ulkoinen 100 MHz:n taajuinen sähkökenttä ja kuinka sähkökenttä kytkeytyy maadoittamattomaan kaapeliin ja siitä suojatun tilan sisälle. Oikeanpuoleisessa kuvassa 100 MHz:n taajuista sähkövirtaa syötetään johdinta pitkin, josta se pääsee maadoittamattoman kaapelin kautta tilan sisälle. [19, s. 5.]

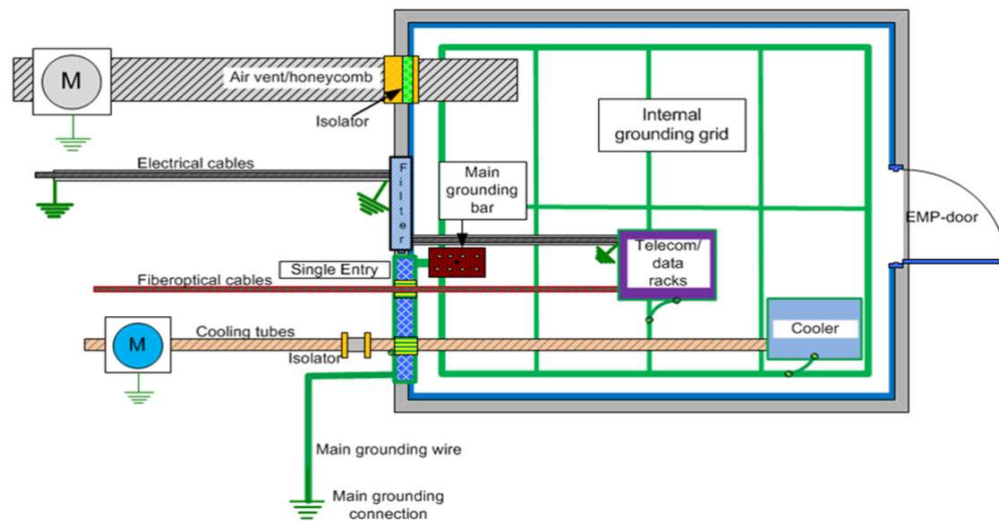
Alemmissä kuvissa on sama tilanne kuin ylemmissä kuvissa, mutta kaapelit on kytketty suojauksen ulkokuoreen. Ulkoinen sähkökenttä ei pääse suojatun tilan sisälle, koska kaapeliin kytkeytynyt sähkökenttä ja siitä syntyvät virrat ohjataan suojauksen ulkokuoren kautta maahan. [19, s. 5.]

Sähköjärjestelmien maadoittamisella on eri määritelmiä, tarkoituksia sekä käyttötarkoituksia, tässä käydään läpi suojamaadoitus ja toiminnallinen maadoitus:

- 1) Suojamaadoituksen tarkoituksena on estää vaarallisten kosketusjännitteiden syntymistä laitteiden tai järjestelmän vikatapauksissa. Esimerkiksi EMP-suojan metallisen kuoren yhdistäminen sähköverkon suojamaadoitukseen. Suojamaadoituksessa on tavoitteena pieni maadoitusresistanssin arvo.” [20, s. 50.]

- 2) Toiminnallisen maadoituksen tarkoituksena on luoda maan potentiaalissa oleva referenssijännite sitä tarvitseville elektronisille laitteille, joka häiriöiden torjumiseksi toteutetaan PE-johtimesta erillään olevan toiminnallisen maadoitusjohtimen (FE) avulla. [20, s. 52.]

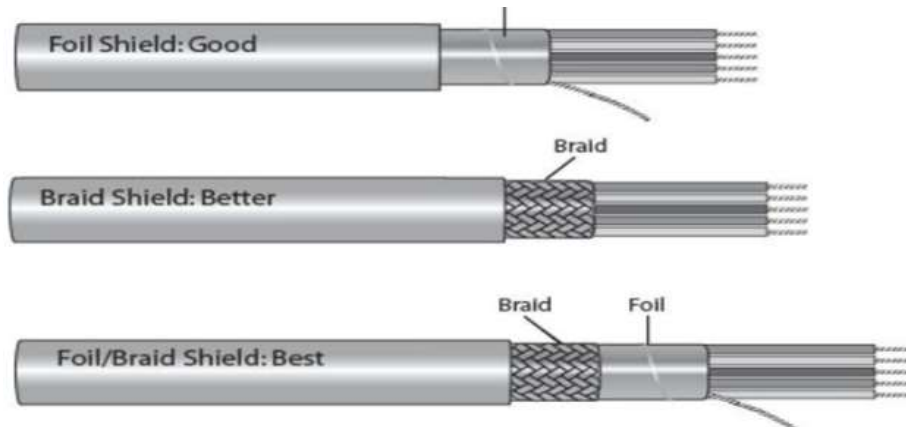
EMP-suojille ja -kabineteille on olennaista hyvä suojamaadoitusjärjestelmä riittävän suojaustason takaamiseksi. EMP-suojassa maadoitusjärjestelmän pääasiallinen tehtävä on johtaa mahdolliset ei-toivotut virrat laajalla taajuuskaistalla pois elektronisista laitteista, joten maadoitustopologia on erittäin tärkeä. Yleensä suoja on kytketty maahan suurella johtimella päämaadoitusjärjestelmään. Maan resistanssin ollessa pieni (yleensä muuttaman ohmin) tulee EMP-suojan kuoren sekä läpivientien resistanssi olla vielä pienempi, jonka suositellaan olevan  $< 1 \text{ m}\Omega$ . [19, s. 26.] Alla oleva kuva 11 esittää suojatun huoneen maadoitusperiaatteen.



Kuva 11. EMP-tilan maadoitusperiaate. [19, s. 27.]

## 5.4 Kaapelointi

Kaapeleiden on oltava suojattuja EMC-kaapeleita, kun niitä tuodaan ja asennetaan suojattuun tilaan. Suojaamattomat ja huonosti suojatut kaapelit heikentävät suojauksen tasoa merkittävästi, kuten yllä olevista kuvista näkyy. Suosituksena tulisi käyttää tuplasuojattuja kaapeleita, joissa on johtavasta materiaalista valmistettu folio sekä yleensä kuparista valmistettu punos. Kuvassa 12, 13 ja 14 on esimerkkejä sekä hyvin että huonosti suojatuista kaapeleista. [19, s. 20.]



Kuva 12. Foliolla suojatulla kaapelilla saavutetaan kohtuu hyvä suojaus, punoksella vielä parempi ja paras tulos saavutetaan yhdistämällä nämä kaksi suojaustapaa. [19, s. 21.]



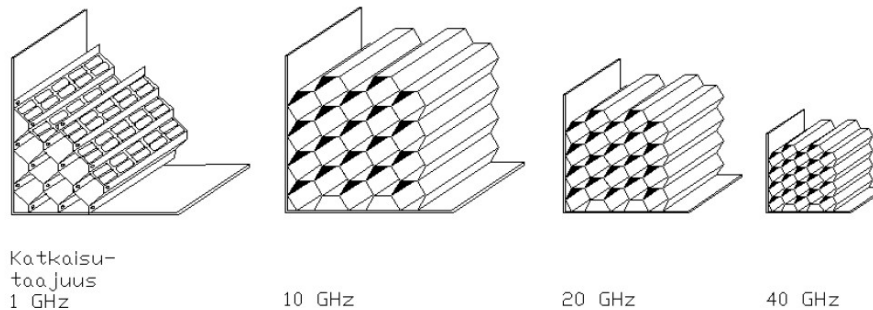
Kuva 13. Huonosti suojattu kaapeli, joka ei sovi suojatun tilan sähkönsyöttöön, koska kaapelin ympärillä oleva suoja ei ole yhtenäinen. [19, s. 22.]



Kuva 14. Hyvin suojattu valokuitukaapeli. Kaapelin ympäri oleva metallinen punos takaa hyvän suojaustason [19, s. 23.]

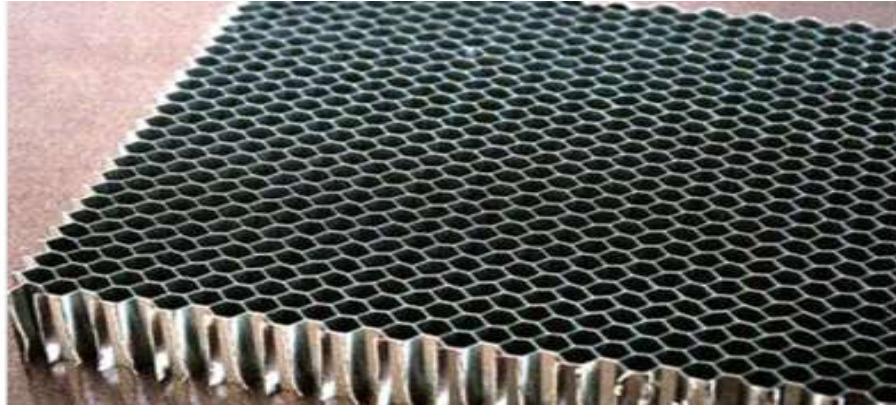
### 5.5 Ilmastointikanavat ja kennostot

EMP-suojatuissa ilmastointipaneeleissa käytetään kennostorakennetta. Kennostorakenne toimii aallonjohtimena, joka ohjaa sähkömagneettiset aallot EMP-tilan ulkopinnalle. Putkiston halkaisija sekä pituus tulisi valita sen maksimitaajuuden mukaan, jolla EMP-tilan tulee toimia. Putkien tulisi muodostaa hyvä johtava yhteys kohdissa, joissa ne koskettavat toisiaan. Verkko- tai kennostorakenteen tulisi koskettaa seinää, johon se on kiinnitettynä koko reunaa vastaavalta alueeltaan. Tyypillinen vaimennus on luokkaa 80–100 dB 20 GHz:n taajuudella. [18, s. 24; 19, s. 23.]





Kuva 15. Ilmastointikanavan kennostorakenteet kuvattu eri taajuuksilla. [18, s. 24.]



Kuva 16. Kuva ilmastointikanavan kennostorakenteesta. [16, s. 24.]

## 5.6 Erotusmuuntajat

Tehokas keino häiriöiden välttämiseksi rakennuksen ja suojauksen välisissä signaalijohdoissa on galvaaninen erottaminen. Erotusmuuntajia käytetään johtavan yhteyden katkaisussa kuitenkin säilyttämällä epäsymmetristen signaalien läpipääsy. Tässä tapauksessa epäsymmetriset signaalit ymmärretään kommunikaatiosignaaleina tai tasa- tai vaihtosähköinä. Erotusmuuntajien taajuusalue vaihtelee muutamien kHz:ien alueella. Jotkin erotusmuuntajat saattavat yhä päästää korkeimmillakin (kymmenien kHz:ien) taajuuksilla huomattavan määrän ensiöpuolen jännitteestä toisiopuolen käämeille. Yleisesti luullaan, että erotusmuuntaja vaimentaa ylijännitteitä huomaamatta niitä, yleensä tämä toiminta on rajoitettu vain symmetrisille jännitehäiriöille. [18, s. 37; 20, s. 48.]

## 5.7 Ylijännitesuojat

Ylijännitesuojia käytetään sähköpiireissä laitteiden suojaamiseen korkeataajuisilta jännite- ja virtapiikeiltä. Toisin kuin suotimet, joita käytetään yleensä jatkuvien häiriöiden vaimennuksessa, on ylijännitesuojat suunniteltu käytettäväksi yksittäisten, satunnaisten sekä ennalta arvaamattomien pulssien vaimentamiseen. Ylijännitesuojia käytetään usein suodattimien kanssa. Yleinen tapa vaimentaa pulsseja on luoda niille yhtenäinen reitti,

joka ohjaa jännite- ja virtapiikit pois laitteistosta. Matalilla taajuuksilla reitti mahdollistaa suhteellisen pienen jännitteenaleneman suojatun laitteen päätteille. [18, s. 41.]

Suojauksen tarve signaalipiireille on kasvanut voimakkaasti elektroniikkaa sisältävien laitteiden lisääntyessä. Transientit kytkeytyvät signaalipiireihin useimmiten epäsuorasti. Epäsuorat kytkeytymiset tapahtuvat usein sähköverkossa hallitsemattomasti kulkevien transienttien aiheuttamina. Esimerkiksi EMP aiheuttaa suuren jännite- ja virtapiikin sähköverkkoon sekä tiedonsiirtoverkkoon. [20, s. 84.]

Elektroniikkapiirien sekä komponenttien ylijännitekestoisuus on vain murto-osa laitteiden sähkönsyöttöön verrattuna. Usein jo muutaman kymmenen voltin jännite ja pieni energia rikkovat laitteessa olevan elektroniikkapiirin. EMP:stä syntyvät suuret sähkö- ja magneettikentän muutokset saattavat kuitenkin häiriösuojauksesta huolimatta aiheuttaa liian suuria transientteja herkille elektroniikkapiireille. [20, s. 84.]

## 5.8 Suodattimet

Suodattimia käytetään sähkö-, telekommunikaatio- sekä ohjausjärjestelmissä häiriöiden poistamiseen. Suodattimen tehtävä on rajoittaa kaistanleveyttä ja tällä on monia eri sovelluksia.

- Elektroniset laitteet suojataan häiriöiltä haluttujen signaalien taajuusalueen ulkopuolella.
- Erotetaan symmetriset häiriöt epäsymmetrisistä signaaleista.
- Rajoitetaan epäsymmetristä kaistanleveyttä mahdollisimman pieneen toiminnalliseen leveyteen. [18, s. 26.]

Suodattimet voivat toimia kahteen suuntaan: ne suojaavat ympäristöä laitteista syntyviltä häiriöiltä sekä suojaavat laitteita ulkopuolisen ympäristön häiriöiltä. Tämä tarkoittaa sitä, että myös muiden suojaavien laitteiden, kuten ylijännitesuojien, tulee olla kaksisuuntaisia. Yleensä EMP-suojaan menevät kaapelit vaativat alipäästösuodattimen, jotta korkea-taajainen häiriö ei murra suojausta. [18, s. 26.]



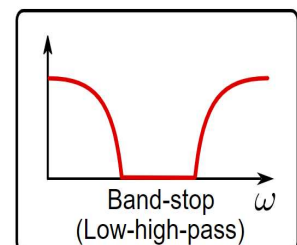
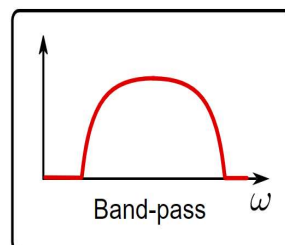
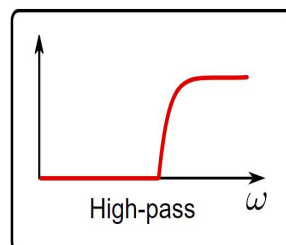
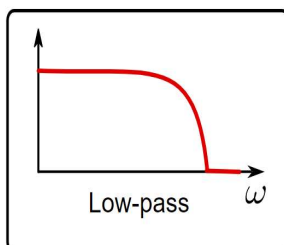
Valittaessa suodattimia ulkoisten häiriöiden suojaamiseen, tulisi kiinnittää huomiota kolmeen seikkaan:

- 1) Heijastukset, onko suodatin sopiva lähteen ja kuorman impedanssiarvoille?
- 2) Vaimennukset, tuottaako suodatin tarpeetonta vaimennusta tai vääristymiä alkuperäiseen signaaliin.
- 3) Epälineaarinen suorituskky, ovatko odotettavat häiriötasot suodattimen toiminta-alueella? Muodostuuko uusia häiriöitä, jos rajat ylittyvät? [18, s. 27.]

### 5.8.1 Suodattimien eri tyypit

Kaapelisuodattimet antavat lisäsuojan indusoituja EMP-pulsseja vastaan. Suodattimia on monia erilaisia ja alla on listattuna yleisimmät eri suodattimien tyypit.

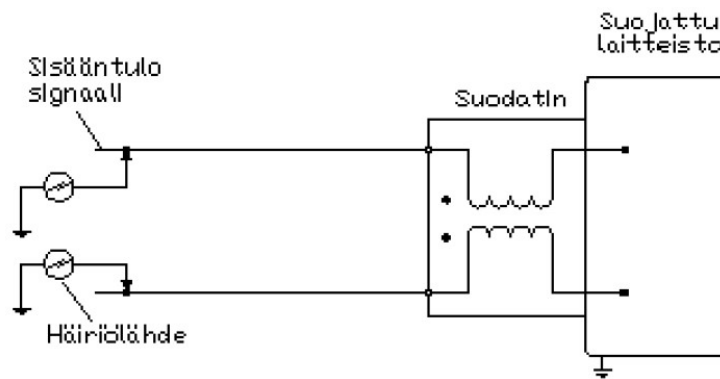
- Alipäästösuodatin päästää matalat taajuudet lävitseen ja vaimentaa korkeat taajuudet.
- Ylipäästösuodatin päästää korkeat taajuudet lävitseen ja vaimentaa matalat taajuudet.
- Kaistanpäästösuodatin päästää lävitseen tietyn taajuusalueen ja vaimentaa taajuusalueen ulkopuolelle jäävät taajuudet.
- Kaistanestosuodatin estää tietyn taajuusalueen pääsyn ja päästää taajuusalueen ulkopuolelle jäävät taajuudet lävitseen.



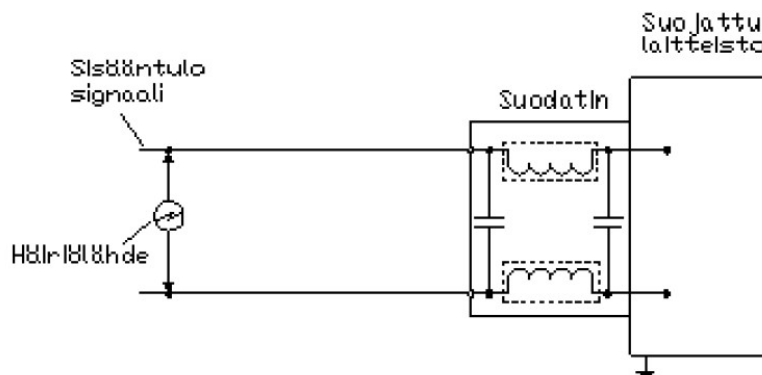
Kuva 17. Suodattimien eri käyrät vasemmalta oikealle: Alipäästösuo-datin, ylipäästösuo-datin, kaistanpäästösuo-datin ja kaistanestosuo-datin. [21.]

### 5.8.2 Suodattimen eri tehtävät

Suodatin estää asennettavan laitteen vikaantumisen/käyttökatkoksen suodattamalla ulkoisen häiriön pois. Se vähentää ulosmenevää kohinaa sähköverkossa ja ympäristössä rajoittamalla kaapeleista tai laitteista aiheutuvia säteilyhäiriöitä. Suodatin estää sähkömagneettisia häiriöitä laitteen osien välillä tai itse laitteessa. Suodattimet tulisi ja niitä tulisi käyttää harkiten. Aluksi on määriteltävä häiriön tyyppi, jota vastaan halutaan suojautua. [18, s. 29–30.]



a) Symmetrisen häiriön suodatus



b) Epäsymmetrisen häiriön suodatus

Kuva 18. Symmetrisen ja epäsymmetrisen häiriön suodatuksen toimintaperiaate. [18, s. 29.]

### 5.8.3 Jännite- ja virta-alue

Markkinoilla on suodattimia useille eri jännitteille, kuten 125 V, 250 V, 380 V ja 440 V. Jotkin valmistajat määrittelevät sallitut ylijännitteet tietylle ajanjaksolle. Telekommunikatio- ja ohjausjärjestelmien suodattimia on markkinoilla puhelinjärjestelmille, digitaalisille ja analogisille piireille, ohjausjärjestelmille ja koaksiaalijärjestelmille. Suodattimia on laaja skaala erilaisiin sovelluksiin, kuten laitteiden suojaukseen, suojattujen huoneiden ja kaappien suojaukseen ja asennuksen sähköjärjestelmän suojaukseen. [18, s. 31.]

### 5.8.4 Vaimennus

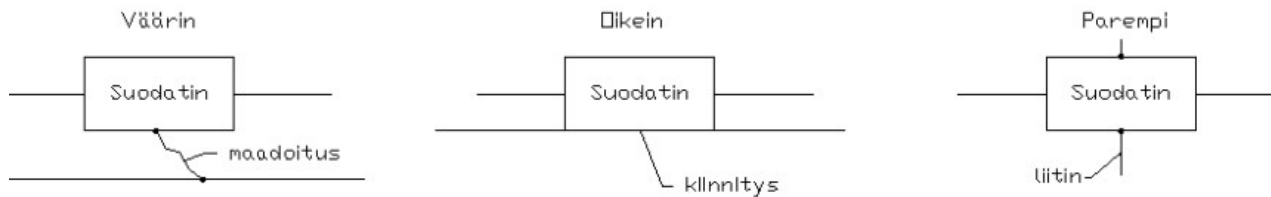
Yleisissä sovelluksissa käytettyjen suodattimien vaimennus on 20–50 dB taajuuksilla 0,1–100 MHz. Korkeampaa vaimennusta saadaan järeämillä suodattimilla, joilla suojataan huoneita ja isompia laitteita. Näiden suodattimien vaimennus on 80–120 dB taajuuksilla 10 kHz–1 GHz. [18, s. 32.]

Suodattimien liitosvaimennus on tyypillisesti suunniteltu ja mitattu sisään- ja ulostulo terminoituna 50  $\Omega$ :n impedanssilla. Tässä tapauksessa suojauksen liitosvaimennus voi olla mitä tahansa 80–120 dB:n välillä. Oikeassa asennuksessa linjaimpedanssi voi poiketa 50  $\Omega$ :sta ja voi olla heikentynyt määritellystä liitosvaimennuksesta (<80 dB). [18, s. 32.]

### 5.8.5 Suodattimen asennus ja johdotus

Suodattimia käytettäessä on oikea asennustapa erittäin tärkeää, jos halutaan säilyttää suojatun tilan suojaustaso mahdollisimman korkeana. Yleisenä ohjeena voidaan pitää, varsinkin korkeataajuisilla häiriöillä, suodattimen sijoitusta mahdollisimman lähelle häiriintyvää laitetta, sillä näin minimoidaan liitännän impedanssi. Suodattimet voidaan asenta joko laitteen kotelon sisään tai laitteen välittömään läheisyyteen. Suodattimen täytyy olla yhtenäinen koko suojattavan rakenteen tai järjestelmän osalta. [18, s. 33.]

Sisään- ja ulostulolinjojen fyysinen erotus on helppoa suodattimien läpisyötön ansiosta. Sisään- ja ulostulojohtoja ei saa niputtaa yhteen. Suodattimen maadoitusjohtimen impedanssi tulisi olla niin pieni kuin mahdollista, jotta välttyttäisiin syntyviltä häiriöiltä, jotka muuten lisääntyisivät symmetriseen jännitteeseen ja näin laitteelle suodatettaviksi. [18, s. 34–35.]



Kuva 19. Suodattimen kytkentä. Suodatin kiinnitetään suojattuun seinään tai sen lähelle, jotta saadaan lyhyt yhteys maahan ja taataan hyvä maadoitus. [18, s. 35.]

## 6 Yhteenveto

Nykypäivänä suurin osa infrastruktuurista on liitetty IT-järjestelmiin, jotka ovat riippuvaisia kriittisistä elektronisista järjestelmistä sekä laitteistosta. Data-, IT-, säätö- sekä sähkönsyöttöjärjestelmät sisältävät herkkiä mikropiirejä, jotka ovat erityisen alttiita sähkömagneettiselle pulssille.

Herkkiä elektronisia laitteita ja mikropiirejä voidaan suojata sähkömagneettiselta pulssilta sijoittamalla laitteet erilaisten suojien sisään. Suojia voivat olla esim. rautatangoilla vahvistettu betoniseinäinen rakennus, maanalainen tai kallion sisään rakennettu bunkkeri, sisätilat, jotka on suojattu metallisilla seinillä (Faradayn häkki) sekä laitteiden ja piirien suojaaminen metallikoteloilla.

Edellä mainittujen suojaustapojen lisäksi on huomioitava hyvä maadoitus, häiriösuojaukseen tarkoitetut läpiviennit, kaapelien suojaus, turhien läpivientien minimointi ja läpivientien kautta tulevien häiriöiden estäminen. Näitä häiriöitä saadaan ehkäistä käyttämällä ylijännitesuojia, suodattimia, erotusmuuntajia, johtavia tiivisteitä sekä käyttämällä ilmastointikanavissa kennostorakennetta.

Suodattimia käytetään haluttaessa estää ulkopuolisten häiriöiden pääsy suojatun tilan sisälle. Ylijännitesuojat suojaavat laitteita ja mikropiirejä yksittäisiltä- tai satunnaisilta

virta- ja jännitepiikeiltä. Kennostorakenteita käytetään aaltojohteina mm. ilmanvaihtokanavissa häiriöiden etenemisen estämiseksi. Johtavia tiivisteitä käytetään suojatun tilan aukkojen ja saumojen tiivistämiseen yhtenäisen johtavan pinnan säilyttämiseksi.

Kaapeloinnilla on merkittävä osa jännite- ja virtapiikkien kytkeytymisen estossa. Kierrettyä parikaapelia käyttämällä saadaan virta- ja jännitepiikit ohjattua pois herkistä mikropiireistä. Parhaan suojaustason takaamiseksi on käytettävä suojattuja sähkönsyöttö- ja telekaapeleita sekä johtimia sisältämättömiä valokaapeleita, jotka ovat immuuneja sähkömagneettisille häiriöille.

Häiriövaimennusmuuntajia käytetään verkkohäiriöiden vaimennukseen sekä ne toimivat myös erotusmuuntajina. Erotusmuuntajia käytetään, kun halutaan toteuttaa galvaaninen erotus laitteistolle.

## Lähteet

- 1 Wilson, C. 2008. HEMP and HPM Devices: Threat Assessments. Congressional Research Service. Verkkoaineisto.  
<<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a480808.pdf>>. 26.3.2008.  
Luettu 26.10.2020.
- 2 Geomagneettiset myrskyt. 2018. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos.  
<<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/geomagneettiset-myrskyt>>. 2018.  
Luettu 26.10.2020.
- 3 Roihut ja massapurkaukset. 2018. Ilmatieteen laitos. Verkkoaineisto.  
<<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/roihut-ja-massapurkaukset>>. 2018.  
Luettu 26.10.2020.
- 4 CaJohn, M. 1988. Weapons of mass destruction. Verkkoaineisto.  
<<https://www.globalsecurity.org/wmd/library/report/1988/CM2.htm>>. 1988.  
Luettu 29.10.2020.
- 5 Savage, E.; Gilbert, J. & Radasky, W. 2010. The Early-Time (E1) High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and It's Impact on the U.S Power Grid. Verkkoaineisto. <[https://www.eiscouncil.org/App\\_Data/Upload/9b03e596-19c8-49bd-8d4e-a8863b6ff9a0.pdf](https://www.eiscouncil.org/App_Data/Upload/9b03e596-19c8-49bd-8d4e-a8863b6ff9a0.pdf)>. 2010.  
Luettu 29.10.2020.
- 6 Foster, J.; Gjede, E.; Graham, W.; Hermann, R.; Klupfel, H.; Lawson, R.; Woodard, J. 2004. Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (EMP) Attack. Verkkoaineisto.  
<[https://www.globalsecurity.org/wmd/library/congress/2004\\_r/04-07-22emp.pdf](https://www.globalsecurity.org/wmd/library/congress/2004_r/04-07-22emp.pdf)>. 2004. Luettu 2.11.2020.
- 7 Gilbert, J.; Kappenman, J.; Radasky, W.; & Savage, E. 2010. The Late-Time (E3) High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and It's Impact on the U.S Power Grid. Verkkoaineisto. <[https://www.eiscouncil.org/App\\_Data/Upload/992d83e8-77a2-4118-99ee-0974823b1dbd.pdf](https://www.eiscouncil.org/App_Data/Upload/992d83e8-77a2-4118-99ee-0974823b1dbd.pdf)>. 2010.  
Luettu 2.11.2020.
- 8 Minter, T.; Mooney, T.; Artz, S.; & Whitehead, D. E. 2017. Understanding Design, Installation, and Testing Methods that Promote Substation IED Resiliency for High-Altitude Electromagnetic Pulse Events. *70<sup>th</sup> Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. Texas, USA: Schweitzer Engineering Laboratories Inc. Verkkoaineisto. 1998.  
Luettu 4.11.2020.

- 9 The Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition and Technology. 1998. The Military Critical Technologies List, Part II: Weapons of Mass Destruction Technologies. Washington D.C.: Department of Defense. Verkkoaineisto. <<https://fas.org/irp/threat/mctl98-2/mctl98-2.pdf>>. 1998. Luettu 5.11.2020.
- 10 Valtionhallinnon tietoturvallisuuden johtoryhmä. 1/2002. Tietoteknisten laittilojen turvallisuussuositus. PDF-dokumentti. 1/2002. Luettu 26.10.2020.
- 11 Maini, Anil Kumar. Directed Energy Weapons: High-Power Microwaves. 10/2016 Verkkoaineisto. <<https://www.electronicsforu.com/market-verticals/directed-energy-weapons-high-power-microwaves>>. 2016. Luettu 10.1.2021.
- 12 Kosola, J.; Solante, T. Digitaalinen Taistelukenttä – Informaatioajan sotakoneen tekniikka. Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, Julkaisusarja 1 n:o 13 toinen painos. 2003. Luettu 10.1.2021.
- 13 U.S. House of Representatives, Committee on Homeland Security, Subcommittee on Cybersecurity, Infrastructure Protection, and Security Technologies, Washington, DC. Electromagnetic Pulse (EMP): Threat to Critical Infrastructure. 5/2014 Verkkoaineisto. <<https://www.govinfo.gov/content/pkg/CHRG-113hhrg89763/html/CHRG-113hhrg89763.htm>> 5/2014. Luettu 20.1.2021.
- 14 Rittal Oy. 2017. EMP- ja HPM-suojaus elektromagneettista säteilyä vastaan. Verkkoaineisto. 2017. <<https://www.rittal-it.fi/tuoteratkaisut/kriittiset-tilat/emp-hpm-suojat>> Luettu 21.1.2021.
- 15 Romppanen, Elias. 12/2018. Selvitys EMP-simulaattoreista ja niiden rakentamisesta. Opinnäytetyö. 12/2018. <<https://www.theseus.fi/handle/10024/156232>> Luettu 21.1.2021.
- 16 Brantzeg, Espen C. 6/2015. Solutions for EMP/EMI protection in Control rooms/-centers in critical infrastructure. PDF-dokumentti. 6/2015. Luettu 22.1.2021.
- 17 Product Datasheet. Electromagnetic Pulse (EMP) Shielded Doors. 2002. European EMC Products. <<https://www.euro-emc.co.uk/admin/resources/datasheets/emp-shielded-doors-2.pdf>>. Verkkoaineisto. 1/2002. Luettu 30.1.2021.
- 18 IEC TR 61000-5-6. 6/2002. Electromagnetic compability (EMC) – Part 5-6 Installation and mitigation guidelines – Mitigation of external EM influences. PDF-dokumentti. 6/2002. Luettu 30.1.2021.

- 19 Claudio de Oliveira e Silva, José. Roxtec BG. 3/2017. Diverting unwanted currents from your electrical installations. PDF-dokumentti. 3/2017.  
Luettu 30.1.2021.
- 20 ST-käsikirja 37 – EMC ja rakennusten sähkötekniikka. 2018. Sähkötieto ry. PDF-dokumentti. 2008.  
Luettu 1.1.2021.
- 21 Filter (signal processing). 2021. Wikipedia. Verkkoaineisto. <[https://en.wikipedia.org/wiki/Filter\\_\(signal\\_processing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Filter_(signal_processing))>. 2021.  
Luettu 2.1.2021.