



Ari Karhusaari

MAGNEETTIKENTÄN VAIKUTUS BETONIRAKENTEISIIN

Tekniikka

2019

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	
ABSTRACT	
KUVALUETTELO	
KÄYTETYT MERKINNÄT	
LIITELUETTELO	
KAAVALUETTELO	
1 JOHDANTO	11
1.1 Opinnäytetyön tausta ja tavoite	11
1.2 Opinnäytetyön rajaus	11
1.2.1 Siirtymävirta termi	11
1.2.2 Raudoituksen kapasitanssi	12
1.2.3 Saturaatio	12
1.2.4 Virran pakkautuma.....	13
1.2.5 Lämpötila	13
1.2.6 Raudoite	13
1.2.7 3-vaihe järjestelmä.....	14
2 YRITYSESITTELY ABB OY	15
3 COMSOL MULTIPHYSICS	16
4 FYSIIKKA	19
4.1 Maxwellin yhtälöt.....	19
4.1.1 Gaussin laki sähkökentille.....	19
4.1.2 Gaussin laki magneettikentille	20
4.1.3 Faradayn induktiolaki	20
4.1.4 Ampère Maxwell laki	21
4.2 Magnetismi.....	22
4.2.1 Permeabiliteetti.....	23
4.2.2 Magneettikenttä	23
4.2.3 Magneettivuon tiheys	24

4.2.4	Magneettivuo	24
4.2.5	Magneettikentän voimakkuus	25
4.2.6	Sähkömagneettinen induktio	25
4.3	Virran pakkautuman vaikutus	26
5	LÄMPÖ	27
5.1	Lämpötila	27
5.2	Lämmön siirtymä	28
5.3	Lämpenemä	28
6	MAGNEETTIKENTÄN VAIKUTUS BETONIRAKENTEISIIN	32
6.1	Betonirakenteet	32
6.1.1	Betoni	33
6.1.2	Raudoitus	33
6.2	Johdinsilmukka magneettikentässä	33
6.2.1	Kaapelin aiheuttama magneettikenttä	34
6.2.2	Magneettivuo johtimen suuntaisen silmukan läpi	35
6.2.3	Silmukkaan indusoitunut jännite	37
6.3	Johdin silmukan läpi	38
7	YHTEENVETO	40

LÄHTEET

LIITTEET

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Ari Karhusaari
Opinnäytetyön nimi	Magneettikentän vaikutus betonirakenteisiin
Vuosi	2019
Kieli	suomi
Sivumäärä	41 + 9 liitettä
Ohjaaja	Jussi Ojanen

Tehtävän tarkoituksena on tutkia magneettikentän vaikutusta betonirakenteisiin sähköasemaympäristössä. Työssä tutkitaan, kuinka paljon kaapeleiden ympärille muodostuva magneettikenttä aiheuttaa kiertovirtoja betonirakenteen raudoitteeseen eri raudoittemateriaaleilla. Tarkoituksena on hakea ongelmatilanteita, joissa raudoitteissa kiertävät virrat saattaisivat kasvaa liian suuriksi.

Ongelmaa lähestytään alkaen Maxwellin yhtälöistä, joista johdetaan ratkaisuja käsin laskentaan. Käsin laskennalla saatuja arvoja vertaillaan comsol-ohjelmiston tuottamiin ratkaisuihin vastaavasta tilanteesta, ja näiden pohjalta saatuja arvoja vertaillaan keskenään.

Työssä saatujen lopputuloksien perusteella, tarvitaan lisätutkimusta tarkempien laskelmien tuottamiseksi, johtuen materiaalien sähköisien arvojen saatavuudesta. Saadut tulokset ovat kuitenkin itsessään käyttökelpoisia suunnittelun tukena.

ABSTRACT

Author	Ari Karhusaari
Title	Effect of Magnetic Field on Concrete Structures
Year	2019
Language	Finnish
Pages	41 + 9 Appendices
Name of Supervisor	Jussi Ojanen

The purpose of the task is to study the effect of the magnetic field on concrete structures in substation environment. This thesis examines how much the magnetic field around the cables causes eddy currents to the reinforcement of the concrete structure with different reinforcing materials. The purpose is to find problem situations where eddy currents could grow too large.

The problem is approached with the Maxwell's equations, where results are derived for hand calculations. The values obtained by manual calculation are compared with the solutions provided by the Comsol software, and the values derived from them are compared between each other, and the solutions are derived from these.

Based on the results obtained in the thesis, further research is needed to produce more accurate calculations due to the availability of electromagnetic values of the materials. However, the result obtained as such are useful in supporting designing.

KUVALUETTELO

Kuva 1.	Meshattu raudoite silmukka ja johdin.	17
Kuva 2.	Virran tunkeutuminen raudoitteeseen	18
Kuva 3.	Magneettikentän pyörimissuunta	21
Kuva 4.	Magneettikenttä kondensaattorissa	22
Kuva 5.	Tunkeutumissyvyys	26
Kuva 6.	Raudoitteen lämpenemä betonipilarin sisällä	29
Kuva 7.	Raudoitteen loppulämpötila Comsol.	30
Kuva 8.	Betonipalkin taipuma	32
Kuva 9.	Magneettikenttä johtimen ympärillä.	34
Kuva 10.	Magneettivuo silmukan läpi.	36
Kuva 11.	Johdin toroidin läpi.	39
Kuva 12.	Pyörrevirta	39

KÄYTETYT MERKINNÄT

A_{eff} Effektiivinen poikkipinta-ala, m^2 ,

A Pinta-ala, m^2 .

$B(t)$ Magneettivuon tiheys ajan funktiona, Tesla, $T = Wb/m^2 = V \cdot s/m^2$.

B Magneettivuon tiheys, Tesla, $T = Wb/m^2 = V \cdot s/m^2$.

C Kapasitanssi, Faradi, F.

D Halkaisija, m

E Sähkökenttä, V/m

H Magneettikentän voimakkuus, $H = \frac{B}{\mu}$, A/m

$I(t)$ Virta ajan funktiona, Ampeeri, A.

I_p Virran huippuarvo , Ampeeri, A

I Virta, Ampeeri, A.

J Virtatiheys, A/m^2

L Pituus, Metri, m.

Q Sähkövaraus, C

R Resistanssi, Ω

S Lämmönjohtumisen muotokerroin, m

T Lämmötila, K tai °C,

Φ_B Magneettivuo ,Weber $Wb = \frac{kg \cdot m^2}{s^2 \cdot A}$.

Φ_E sähkövuo, $\frac{V}{m}$.

δ Tunkeutumissyvyys, m

\dot{Q} Lämmön siirtymä, kW,

\dot{q} Lämpövuoto, kW/m^2 ,

ℓ Raudoitteen pituus, m

μ_0 Tyhjiön permeabiliteetti $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

μ_r Suhteellinen permeabiliteetti, suhdeluku.

μ Väliaineen permeabiliteetti, $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$, H/m

ω Kulmataajuus, $2\pi f$, Rad/s.

ρ Resistiivisyys, $\Omega \cdot m$

σ Johtavuus, S/m, Resistiivisyyden käänteisarvo $\frac{1}{\rho}$

ϵ_0 Tyhjiön permittiivisyys, $8,854187 \times 10^{-12}$ F/m.

ϵ_i Indusoitunut jännite, Voltti, V.

ϵ_r Suhteellinen permittiivisyys, Laaduton luku

ϵ permittiivisyys, $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$

f Taajuus, Hertsi, Hz.

k Lämmönjohtavuus, W/m ,

r Ympyrän säde, Metri, m.

smv Sähkömotorinen voima, W/Q

s Etäisyys, metri m.

t Aika, sekunti, s.

LIITELUETTELO

9

LIITE 1. Raudoituksen kapasitanssi

LIITE 2. Tunkeutumissyvyys raudoitteessa

LIITE 3. Raudoitesilmukassa kiertävä virta vikatilanteessa

LIITE 4. Raudoitesilmukassa kiertävä virta normaalissa käyttötilanteessa

KAVALUETTELO

1	Kahden johtimen välinen kapasitansi	12
2	Gaussin laki sähkökentille	19
3	Gaussin laki magneetikentille	20
4	Faradayn induktiolaki	20
5	Ampèren laki intergraalimuoto	21
6	Magneettivuon kaava	25
7	Vuon tiheyden ja-voimakkuuden välinen suhde	25
8	Faradayn induktiolaki	26
9	Tunkeutumisyvyys	26
10	Lämpövuoto	28
11	Loppulämpötilan määrittäminen muotokerrotimeen avulla.	30
12	Magneettivuon tiheys	34
13	Magneetikentän voimakkuus	35
14	Magneettivuon tiheys ajan funktiona	35
15	Magneettivuoto johtimen suuntaisen silmukan läpi	37
16	Silmukkaan indusoituva jännite	38

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia sähkömagneettisten kenttien vaikutusta betonirakenteiden raudoitukseen. Työssä tullaan laskemaan Maxwellin yhtälöiden avulla raudoitteeseen indusoitunutta jännitettä, tämän aiheuttamaa kiertovirtaa raudoitteeseen. Osassa tilanteita joudutaan turvautumaan numeeriseen laskentaan comsol multiphysicsin avulla, johtuen siitä, että osa tilanteista ei ole analyttisesti ratkaistavissa käsin laskennan avulla.

1.1 Opinnäytetyön tausta ja tavoite

Tavoitteena on lisätä tietämystä magneettikentän vaikutuksista rakenteisiin ja kartoittaa mahdollisia ongelmatilanteita, jotka saattaisivat olla vahingollisia betonirakenteille ja näin ollen ohjata mahdollista rakennesuunnittelua oikeaan suuntaan. Aiheen haastavuudesta johtuen, joudutaan tilannetta yksinkertaistamaan tietyillä oletuksilla.

1.2 Opinnäytetyön rajaus

Työssä joudutaan tekemään joitakin oletuksia ja yksinkertaistuksia, johtuen rajoitetusta ajasta, joka työhön on käytettävissä. Tässä luvussa kerrotaan mitkä asiat jätetään ottamatta huomioon ja pyritään perustelemaan miksi kyseisiä tekijöitä ei oteta huomioon.

1.2.1 Siirtymävirta termi

Työssä oletetaan, että maxwellin yhtälöissä oleva siirtymävirtatermi ei vaikuta merkittävästi tulokseen vaan jätetään tämän johdosta pois, termi kylläkin esitellään ja käsitellään, mutta laskelmissa sitä ei oteta huomioon.

1.2.2 Raudoituksen kapasitanssi

Työssä ei oteta huomioon raudoituksen kapasitanssia, johtuen siitä, että se on häviävän pieni tekijä kokonaisuuden kannalta. Kaavalla (1) voidaan arvioida raudoituksen keskinäisien kapasitanssien suuruuksia./1/ Betonin permittiivisyys ε_r on noin 4.5 /2/

$$C = \frac{\pi\varepsilon_0\varepsilon_r L}{\ln\left(\frac{s}{2r} + \sqrt{\frac{s^2}{4r^2} - 1}\right)} \quad (1)$$

Yksinkertainen laskuesimerkki kaavasta (1) liitteessä 1.

Tästäkin syystä johtuen, on järkevää työn suorituksen kannalta jättää kaavassa (5) siirtymävirtatermi kokonaan huomiotta, koska emme oleta kapasitiivisesta efektistä johtuvan sähkökentän luovan merkittävää magneettikenttää.

1.2.3 Saturaatio

Työssä ei oteta huomioon raudoituksessa esiintyvää saturaatiota vaan työssä oletetaan raudoitteen permeabiliteetin pysyvän koko ajan vakiona.

Saturaatiolla tarkoitetaan materiaalin permeabiliteetin muutosta magneettikentän voimakkuuden H funktiona. Permeabiliteetti ei pysy vakiona H :n muuttuessa, vaan lähestyy ykköstä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että raudoite ei kykene johtamaan magneettivuota materiaalissa lineaarisesti. Saturaatiota esiintyy ferromagneettisissa materiaaleissa. Permeabiliteetti ei millään tunnetulla materiaalilla kasva H :n kasvaessa, vaan alkaa lähestymään 1 eli magneettista saturaatiota./3/

Seurauksena tälle on se, että raudoitteeseen indusoituneen jännitteen johdosta syntyvät pyörrevirrat, eivät myöskään kasva yhtä suuriksi kuin työssä on laskettu. Saturaatiota ei ote huomioon sen takia, että raudoiteteräksille ei ole yleisesti saatavilla hystereesisilmukkaa, josta permeabiliteetin funktio voitaisiin ratkaista, joten työssä joudutaan oletamaan permeabiliteetin arvoja perustuen erinäisiin lähteisiin.

1.2.4 Virran pakkautuma

Työssä ei oteta käsinlaskennassa huomioon kaapelissa tapahtuvaa virranpakkautumaa, koska sen määrittäminen kaapelille, joka koostuu useista osajohtimista, on erittäin haastavaa ja tämän vaikutus magneettikenttään on erittäin pieni.

Raudoitteen osalta kuitenkin lasketaan tunkeutumis syvyys, koska tämän määrittäminen on erittäin paljon yksinkertaisempaa, koska raudoite ei koostu yksittäisistä säikeistä. Aiheesta tarkemmin kappaleessa 4.3

1.2.5 Lämpötila

Työssä ei oteta huomioon lämpötilan muutosta materiaalien ominaisuuksiin, esimerkkinä raudoitteen resistanssi. Raudoitteen resistanssi on riippuvainen materiaalin lämpötilasta, mutta tätä ei oteta huomioon syystä, että oletamme sen olevan niin pieni, että sillä ei ole oleellista merkitystä laskelmien kannalta.

1.2.6 Raudoite

Raudoitteiden oletetaan olevan galvaanisessa yhteydessä keskenään, oletamme siis, että tutkittava silmukka ei koostu erillisistä tangoista vaan koko

silmukka on yhtenäistä materiaalia ilman liitoksia. Syy tälle on se, että reaali maailman tilanteessa raudotteiden välillä voi esiintyä erittäin paljon vaihtelevia galvaanisia yhteyksiä, eikä näiden huomioon ottaminen ole työn tarkoituksen kannalta merkityksellistä.

1.2.7 3-vaihe järjestelmä

Laskennassa ei oteta huomioon, että tilanteissa, joissa sähkömagneettisista vaikutuksista ollaan kiinnostuneita, on pääsääntöisesti 3-vaihe järjestelmiä. 3-vaihejärjestelmällä tarkoitetaan tilannetta, jossa on 3 vaihe johdinta, jossa jokaisessa kulkeva virta on 120° vaihesiirrossa keskenään.

Työn laskelmat on suoritettu 1-vaiheisina johtuen siitä, että 1-vaihe järjestelmä on pahin mahdollinen tilanne magneettikenttien kannalta, koska tällöin ei tapahdu ns. kenttien kumoutumista. Kenttien kumoutumisella tarkoitetaan, sitä kun kaksi toisistaan riippumatonta yhtä voimakasta vastakkaisuuntaista kenttää kohtaavat toisensa avaruuden pisteessä, jolloin tässä kyseisessä avaruuden pisteessä magneettikentät ”kumoavat” toisensa. Tällöin netto magneettikenttä tässä avaruudenpisteessä on nolla. 3-vaihe järjestelmässä tapahtuva kenttien kumoutuminen heikentää magneettikenttää jokaisessa avaruuden pisteessä. Tämä ei sinällään ole merkittävä tekijä laskelmien kannalta, koska työssä ollaan kiinnostuneita magneettikenttien pahimmista mahdollisista vaikutuksista teräsrakenteisiin, joten voimme olettaa pahimman tilanteen olevan 1-vaihe järjestelmä, jossa kentät eivät pääse kumoutumaan.

2 YRITYSESITTELY ABB OY

ABB on maailman johtava automaatio ja sähkövoimatekniikan yritys. Vaasan yksikön toimintaan kuuluu muuntajien, moottorien ja releiden tuotanto ja valmistus. Yritys syntyi 1988 kun ruotsalainen ASEA ja BBC Brown Boveri yhdistyivät./4/

Henkilöstömäärä suomessa on noin 5 300 henkilöä ja maailmanlaajuisesti 147 000. Suomessa ABB toimii 20 paikkakunnalla. Tehdaskeskittymät sijaitsevat Haminassa, Helsingissä, Vaasassa ja Porvoossa. Suomessa ABB on yksi suurimmista teollisista työnantajista, pääkaupunkiseudulla suu-rin. Liikevaihto on noin 2,3 miljardia euroa./4/

Työ tehdään Vaasan toimipisteen PGGI-yksikköön, jossa on erikoistuttu sähköasemasuunnitteluun. PGGI-yksikkö työllistää noin 60 työntekijää. Sähköasema suunnittelua tehdään kotimaahan kuin myös ulkomaille, mm. Venäjälle ja Afrikkaan.

3 COMSOL MULTIPHYSICS

Comsol Multiphysics on simulointiohjelma, jolla kyetään mallintamaan fysikaalisia ilmiöitä ja tutkimaan niiden vaikutuksia. Comsolilla voidaan mallintaa mm. nesteen virtausta, lämmön siirtymistä, sähköisiä ilmiöitä, sekä magneettikenttiä.

Comsol sai alkunsa 1986 Tukholmassa, kun Svante Littmarck ja Farhad Saeidi perustivat yrityksen nimeltä Comsol, joka alkoi kehittää Comsol multiphysicsiä./5/

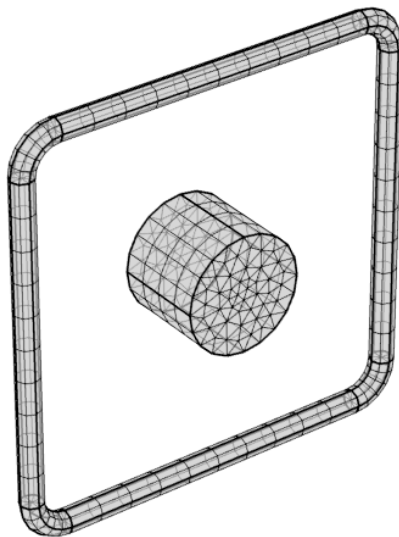
Työn mallintaminen comsolilla on kohtuullisen yksinkertaista. Geometrian piirtäminen on osittain verrattavissa Solidwoksiin tai Inventoriin pienellä varauksella, koska comsolista puuttuu muutamia solidworksistä tuttuja tehokkaita työkaluja. Geometrialla määritellään kappaleiden muodot ja etäisyydet toisiinsa.

Geometrian rakentamisen jälkeen voidaan jokaiselle kappaleelle määritellä materiaali, josta kyseinen kappale koostuu. Jos valmiista materiaalistasta ei löydy sopivaa materiaali voi tämän määrittää myös itse. Kaikkien materiaalien parametrit ovat määriteltävissä ja muutettavissa haluttua tilannetta vastaavaksi.

Geometrian ja materiaalien ollessa valmiina, voidaan malli ”meshata” eli määritellään millaisissa palasissa kappaleessa tapahtuvien fysikaalisten ilmiöiden ratkaisut halutaan saavuttaa. Meshaaminen käytännössä määrittelee kuinka pienillä ja minkä muotoisilla palasilla kappaletta pyritään ratkaisemaan. Meshaus on yksi mallinnuksen työläimpiä osuuksia, koska jos meshaus tehdään

huonosti, saattaa lopputulos olla epätarkka, ja mallin ratkaisemisessa kuuluu paljkon aikaa. Meshauksen ollessa hyvä, saadaan laskenta keskitettyä alueille, joista olemme erityisen kiinnostuneita, ja suhteessa kulutettuun aikaan saadaan tarkempia tuloksia.

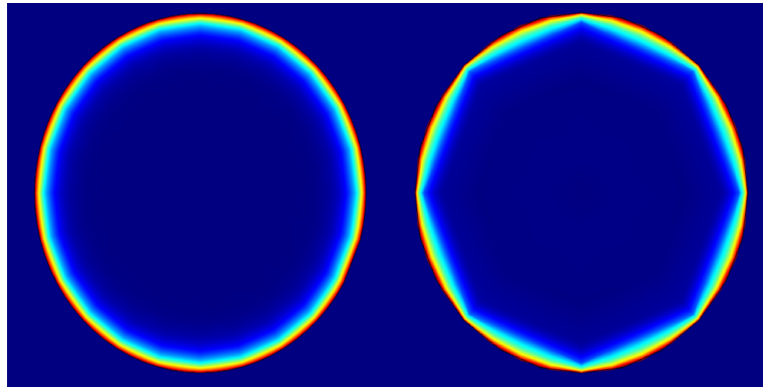
Hyvän meshauksen määrittäminen on mutkikasta ja on riippuvainen fysikaalisesta suureesta, jota pyritään ratkaisemaan. Nyrkkisääntönä voitaisiin pitää, että meshausta pyritään tihentämään niille alueille, joiden käyttäytymisestä ollaan kiinnostuneita, ja harventaa siellä mistä ei olla yhtä kiinnostuneita.¹



Kuva 1. Meshattu raudoite silmukka ja johdin.

Esimerkkinä kuvassa 2 tarpeettoman tarkasta meshauksesta, jossa sama tulos on saatu aikaiseksi sekä tarkemmalla meshillä että harvemmalla, erona on se, että harvemman meshin tilanteessa vastaus saatiin 5 kertaa nopeammin kuin tarkemmalla.

Kuten voidaan huomata, kuvassa 2 oikealla oleva raudoite on yksinkertais-



Kuva 2. Virran tunkeutuminen raudoitteeseen

tunut boundary layer-toiminnon myötä 8-kulmioksi, kun vastaavasti vasemmalla boundary-layer elementin kokoa on pienennetty ja kerroksia lisätty.

Comsolissa on myös hyvät post-processing ominaisuudet, joiden avulla voidaan helposti luoda erilaisia graafeja ja kuvia eri tilanteista, esimerkkinä kuva 2 on suoraan comsol multiphysicsillä luotu kuva virran tunkeutumisesta raudoitteeseen.

4 FYSIIKKA

4.1 Maxwellin yhtälöt

Maxwellin yhtälöt esittävät, kuinka sähkö- ja magneettikentät vaikuttavat toisiinsa ja kuinka varaukset ja virrat vaikuttavat kenttiin. Maxwellin yhtälöitä pidetään sähkömagnetismin tärkeimpinä yhtälöinä, koska ne esittävät kenttien käyttäytymistä. /3/ Johtuen Maxwellin yhtälöiden tärkeydestä sähkömagnetismissä, työssä on varattu kokonaan oma osikko käsittelemään Maxwellin yhtälöitä. Tässä luvussa esitellään ja avataan Maxwellin yhtälöitä ja niiden peruseriaatteita lukijalle tarpeellisissa määrin työn selkeyden kannalta.

Maxwellin työstäessä teoriaansa sähkömagnetismista sai hän lopputuloksena 20 yhtälöä sähkömagnetismissä. Lopullisen muotonsa neljälle tunnetulle Maxwellin yhtälölle loi Oliver Heaviside ja Heinrich Herz, jotka tunnetaan muista merkittävistä tutkimuksistaan sähkötekniikan osa-alueella. /3/

4.1.1 Gaussin laki sähkökentille

Sähkövaraus luo ympärilleen sähkökentän, ja tämän sähkökentän vuo joka läpäisee minkä tahansa pinnan on verrannollinen pinnan, kokonaisvarauksien määrään.

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{a} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0} \quad (2)$$

Yhtälön vasen puoli voidaan ajatella sähkövuona, joka läpäisee pinta-alan S , joka koostuu pinta-ala alkioista da . Yhtälön oikealla puolella on Q_{enc} , joka tarkoittaa varauksia pinta-alan sisäpuolella. Pinta-alan ulko-puolella olevia varauksia ei oteta huomioon. Sähkövuolla tarkoitetaan sähkökentää, joka

läpäisee pinta-alan S .

$$\Phi_E = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0}$$

4.1.2 Gaussin laki magneettikentille

Toisin kuin Gaussin laissa sähkökentille magneettivuo minkä tahansa suljetun pinnan läpi on nolla. Toisin sanoen valitaan mikä tahansa satunnainen pinta, jonka läpi kulkee magneettivuo, kun magneettivuo integroidaan tämän pinnan yli, on nettomagneettivuo 0, koska sama vuo, joka menee alueen sisään, poistuu myös tältä pinnalta./3/

$$\oint_s \vec{B} \cdot d\vec{a} = 0 \quad (3)$$

4.1.3 Faradayn induktiolaki

Magneettivuon tiheyden muutos minkä tahansa pinnan läpi aiheuttaa indusoituneen jännitteen./3/

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{a} \quad (4)$$

Miinusmerkki tulee Lenzin laista, joka kertoo, että indusoitunut jännite on vastaan magneettivuon muutosta, eli kun vuon tiheys kasvaa, syntyy indusoitunut jännite, jonka aiheuttama virta johtimessa pyrkii kumoamaan vuon syntymistä. Samaan tapaan, jos magneettivuon tiheys pienenee, pyrkii indusoituneen jännitteen aiheuttama virta vahvistamaan magneettivuota.

Yhtälön vasen puoli voidaan esittää sähkömotorisena voimana, jonka yksikkö on voltti.

$$smv = \oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

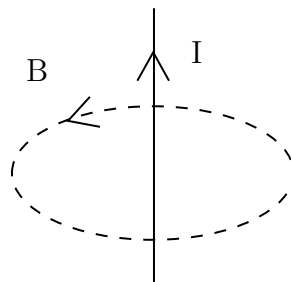
Yhtälön oikea puoli voidaan esittää vuon derivaattana.

$$\Phi_B = \int_s \vec{B} \cdot da$$

4.1.4 Ampère Maxwell laki

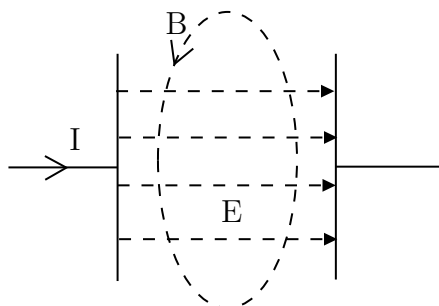
Työn tärkeimpänä yhtälönä voidaan pitää Ampère Maxwell lakia, joka kertoo kuinka virrallisen johtimen ympärille muodostuu magneettikenttä. Kentän pyörimissuunta on virran kulkusuuntaan myötäpäiväinen. Hyvänä muistisääntönä oikean käden sääntö, jossa peukalo asetetaan virran kulkusuuntaan, jolloin muut sormet osoittavat kentän pyörimissuunnan.

$$\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(\iint J \cdot da + \underbrace{\iint \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}}_{\text{Siirtymävirta termi}} \right) \quad (5)$$



Kuva 3. Magneettikentän pyörimissuunta

Alkuperäisessä Ampèren laissa ei ollut siirtymävirta-termiä vaan sen kehitti Maxwell. Maxwell tajusi, että sähkökentän muutos aiheuttaa ympärilleen magneettikentän samalla tapaa kuin virta aiheuttaa johtimessa ympärilleen magneettikentän. Hyvänä esimerkkinä tästä on kondensaattorin sähkökentän aiheuttama magneettikenttä, esimerkki kuvassa 4. Sähkökentän muutoksen aiheuttamalle magneettikentälle pätee sama sääntö magneettikentän pyörimissuunnalle kuin virran tapauksessa eli magneettikenttä pyörii myötäpäivään sähkökentän kulkusuuntaan katsoen. Magneettikentää ei muodostu jos sähkökenttä pysyy vakiona.



Kuva 4. Magneettikenttä kondensaattorissa

Kuvassa 4 kondensaattorilevyt, johon AC-tyyppinen virta, joka aiheuttaa sähkökentän muuttumisen ajan funktiona, jolloin ampère Maxwellin lain mukaan sähkövuon ympärileisyntyy tässä tapauksessa magneettikenttä.

4.2 Magnetismi

Magnetismi on fysikaalinen ilmiö, jossa sähköisten varauksien liike aiheuttaa puoleensa vetäviä tai hylkiviä voimia kappaleiden välillä. Tunnetuimpana ilmiönä voidaan pitää ferromagneettista ilmiötä, jossa ferromagneettinen kappale, eli magneetti vetää puoleensa lähellä olevia rautaisia kappaleita.

Magnetismi on erittäin iso osa nykyaikaista sähkötekniikkaa, johtuen sähkövirran syntyvän elektronien liikkeestä, jolloin aina kun kappaleen läpi kulkee sähkövirta, syntyy magneettikenttä. /6/

4.2.1 Permeabiliteetti

Permeabiliteetti materiaalin fysikaalinen suure, joka kuvaa kuinka materiaali käyttäytyy magneettikentässä. Permeabiliteetti μ koostuu materiaalin suhteellisesta permeabiliteetista μ_r ja tyhjiön suhteellisesta permeabiliteetista μ_0 .

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

Materiaalin suhteellinen permeabiliteetti on laaduton luku, joka kertoo kuinka suuri materiaalin permeabiliteetti on suhteessa tyhjiön permeabiliteettiin. /3/

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

4.2.2 Magneettikenttä

Kenttä on fysikaalinen ajatusmalli tai olio, jolla on jokaisessa avaruuden pisteessä arvo. Kenttä voidaan jakaa skalaari- ja vektorikenttiin. /7/

Skalaarikenttä eli skalaarifunktio tarkoittaa sitä, että fysikaalisella suureella ei ole suuntaa, vain suuruus. Esimerkkinä lämpötila eri avaruuden pisteissä on skalaariluku, koska sillä ei ole suuntaa. Vektorikenttä tarkoittaa sitä, että fysikaalisella suureella on suunta, johon se vaikuttaa ja suuruus jokaisessa avaruuden pisteessä. /7/

Vektorikentällä voidaan esimerkiksi esittää magneettikentän tiheyttä kaikissa avaruuden pisteissä ja mihin suuntaan magneettivuon tiheys vaikuttaa. /7/

Magneettikentän suuruutta ja suuntaa kuvataan magneettivuon tiheydellä B ja magneettikentän voimakkuudella H , joista molemmat ovat riippuvaisia etäisyydestä magneettikentän aiheuttajaan. /7/

4.2.3 Magneettivuon tiheys

Magneettivuon tiheys B kuvaa aluetta magneetin tai virrallisen johtimen ympärillä, jossa liikkuvat varaukset kokevat magneettisen voiman. Voimavaikutus syntyy myös paikallaan oleviin varauksiin, jos magneettikenttä vaihtelee ajan funktiona. Tämä on perimmäinen syy sähkömagneettiselle induktiolle, jota työssä tullaan käsittelemään.

Magneettivuon tiheys on erittäin helposti harhaanjohtava käsite. Magneettivuon tiheyttä kuvataan monesti kenttäviivoilla magneetin ympärillä. Jos kaikki kenttäviivat piirrettäisiin paperille, jäljellä olisi vain musta kuva. Magneettivuon tiheys ei kuvaa kuinka lähellä kenttäviivat ovat toisiaan, vaikka nimestä saattaisikin näin päätellä. Kenttäviivat piirretään näkyviin vain visuaaliseksi tueksi.

4.2.4 Magneettivuon

Magneettivuon tunnuksena käytetään Φ, Φ_B tai Φ_M . Magneettivuota mitataan SI-järjestelmän yksiköllä Weber (tunnus:Wb) perusyksiköissä $\frac{kg \cdot m^2}{s^2 \cdot A}$ tai johdetuilla yksiköillä $V \cdot S$. /7/

Magneettivuolla tarkoitetaan sitä, kuinka paljon magneettivuon tiheyttä läpäisee

pinta-alan S . Ajatusmallinna tälle voidaan pitää sitä kuinka paljon vuovii-voja läpäisee pinta-alan.

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot da \quad (6)$$

4.2.5 Magneettikentän voimakkuus

Magneetivuon voimakkuus H , josta käytetään yksikköä A/m , on toinen merkittävä magnetismin suureista, joka kuvaa kuinka paljon tarvitaan magneettista voimaa, jotta saadaan aikaiseksi tietyn suuruinen magneetivuon tiheys B . Magneetivuon tiheyttä ja voimakkuutta yhdistää permeabiliteetti.

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (7)$$

4.2.6 Sähkömagneettinen induktio

Kaapelin ympärille muodostuva muuttuva magneettikenttä indusoi läheisiin johtimiin smv :n. Pelkkä magneettikenttä itsessään ei aiheuta induktiota, vaan sen muutos.

Ac-tyyppinen jännite aiheuttaa sähkömagneettista induktiota, koska vaihtovirta, nimensä mukaan, vaihtelee ajan funktiona. Dc-virta ei siis kykene aiheuttamaan induktiota, koska virran pysyessä koko ajan vakiona, ei synny myöskään vuon muutosta. Vaikkakin Dc-tyyppisellä virralla voidaan saada sähkömagneettinen induktio aikaiseksi katkomalla Dc-tyyppistä virtaa sopi-

vasti. Tätä hyödynnetään mm. taajuusmuuttajissa, joilla ohjataan mm. vaihtovirtamoottoreita.

Faradayn induktiolaki sanoo, että silmukkaan indusoitunut smv on suoraan verrannollinen magneettivuon Φ_B muutosnopeuteen.(8)

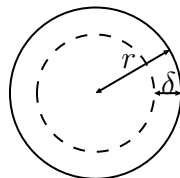
$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (8)$$

4.3 Virran pakkautuman vaikutus

AC-tyypiselle virralle on ominaista virran pakkautuma, jolla tarkoitetaan sitä, että johtimessa AC-tyyppinen virta ei kykene käyttämään johtimen koko poikkipinta-alaa hyödyksi, vaan pakkautuu lähelle johtimen ulkokehää. Tästä johtuen virran pakkautumaa kuvataan tunkeutumissyvyydellä δ , joka kertoo, kuinka syvälle johtimeen virta kykenee tunkeutumaan./8/

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \sigma \mu}} \quad (9)$$

Tällä on suuri merkitys, koska osa pinta-alasta, joka kykenisi johtamaan virtaa, ei ole käytettävissä, jolloin johtimen resistanssi luonnollisesti kasvaa, verrattaen tilanteeseen, jossa virran pakkautumaa ei otettaisi huomioon.



Kuva 5. Tunkeutumissyvyys

5 LÄMPÖ

Tässä luvussa on tarkoituksen kertoa lukijalle tarvittava tieto lämpöfysiikasta työn vaivattoman lukemisen kannalta.

Lämpenemällä on suuri merkitys työn kannalta, koska raudoitteessa kiertävän virran vaikutuksesta syntyvä raudoitteen lämpenemä vaikuttaa sekä raudoitteen elinkaareen, että siihen kuinka raudoitteen ympärillä oleva betoni käyttäytyy mm. betoniin syntyy puristus- ja vetorasituksia suurista lämpötilaeroista johtuen, mikä altistaa betonin halkeilulle. Työssä ei pureuduta lämpenemän loppuvaikutuksiin betonirakenteessa vaan pyritään selvittämään raudoitteen loppullinen lämpötila muuhun ympäristöön nähden.

5.1 Lämpötila

Lämpötila on makroskooppinen suure, joka kuvaa kappaleen atomien liike-energian keskiarvoa. Lämpö itsessään johtuu kappaleen atomien liikkeestä. Mitä enemmän kappaleessa on atomien liikettä, sitä lämpimämpi kappale on. Atomien liikkuaessa kappaleessa syntyy atomien välillä törmäyksiä, mitä enemmän atomit törmäilevät sitä enemmän kappaleessa on lämpöenergiaa, ja sitä korkeampi on kappaleen lämpötila. /9/.

Kappaleen tuntuaessa lämpimältä kädellä koskettaessa johtuu siitä, että kappaleen liikkuvien atomien ja molekyylien liike-energiaa siirtyy kosketuksen välityksellä ihoon, jonka ihminen aistii ”lämpönä” /9/. Lämpötilasta käytetään useita eri asteikkoja, mutta yleisimmät ovat Kelvin- ja Celsius-asteikot. Celsius-asteikolla absoluuttinen nollapiste on $-273,15^{\circ}\text{C}$, kun vastaavista Kelvin-asteikolla tämä on 0 K .

5.2 Lämmön siirtyminen

Lämmön siirtymällä tarkoitetaan kappaleen atomien liike-energian siirtymistä materiaalissa tai materiaalista toiseen. Lämmönsiirtymä tapahtuu aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan. Tämä johtuu siitä, että korkeammassa lämpötilassa olevan kappaleen atomit ja molekyylit törmäilevät kylmemmän kappaleen atomien kanssa, mikä aiheuttaa toisen kappaleen atomien ja molekyylien liikkemäärän lisääntymistä [9].

Lämmön siirtymä \dot{Q} kuvaa siirtyvää lämpöenergiaa J/s eli W , kun taas kyseinen lämpöenergia siirtymistä pinta-alan läpi kuvataan lämpövuolla \dot{q} .

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (10)$$

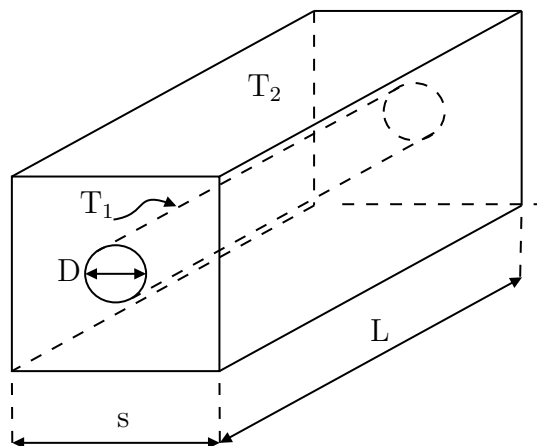
5.3 Lämpenemä

Lämpenemän laskennassa on otettava huomioon kappaleeseen ulkopuolelta siirtyvä lämpöenergia, kappaleessa syntyvä lämpöenergia, esimerkiksi kiertovirta raudotteissa ja kappaleen luovuttama energia ympäristöönsä. Jos kaikki tunnetaan, voidaan lopullinen lämpenemä laskea. Materiaalin lämpenemän laskeminen saattaa olla erittäin työlästä johtuen hankalista geometrioidista ja oletuksista, joita joudutaan tekemään. Monesti laskennassa oletetaan ilman lämpötilan olevan ”lämpönielu”, johon lämpö lopulta siirtyy prosessista. Tämä on sinällään erittäin mutkikas asia, johtuen siitä, että jos oletamme ilman pysyvän paikallaan, niin ilma toimii erittäin hyvänä eristeenä, jolloin tässä tilanteessa laskennan antama lämpötila on merkittävästi liian suuri, jos emme oleta ilman pysyvän paikoillaan vaan annamme lämmön siirtyä konvektion avulla. Konvektio on lämmön siirtymis muoto, jossa jokin

fluidi sitoo itseensä lämpöenergiaa ja siirtää mukanaan lämpöenergiaa toisaalle. Tällöin joutuisimme mallintamaan ilman liikkumista fluididynamiikan avulla, joka on erittäin haastavaa ja tarpeetonta tämän työn kannalta.

Yksinkertaistuksena voimme olettaa ilman pitävän tutkittavan kappaleen pintalämpötilan jossakin oletetussa lämpötilassa, tämän oletuksen avulla voimme jättää fluididynamiikan huomiotta.

Yksinkertaisena esimerkkinä laksetaan raudoitettangon loppulämpötila betonipilarin sisällä. /9/.



Kuva 6. Raudoitteen lämpenemä betonipilarin sisällä

Oletetaan ympäristön lämpötilan pitävän pilarin pintalämpötilan 30 °C ja, että lämpöä ei johdu pilarinpäädyistä ollenkaan. Betoninlämmön johtavuus $k = 1.17\text{W/m}$, $s = 0.3\text{m}$, $D = 0.01\text{m}$, $L = 1\text{m}$. Raudoitteessa syntyvä häviölämpöteho $\dot{Q} = 10\text{W}$.

$$\dot{Q} = kS(T_1 - T_2) \quad (11)$$

Muotokerroin S saadaan kirjallisuudesta /9/.

$$S = \frac{2\pi L}{\ln(1.08 s/D)}$$

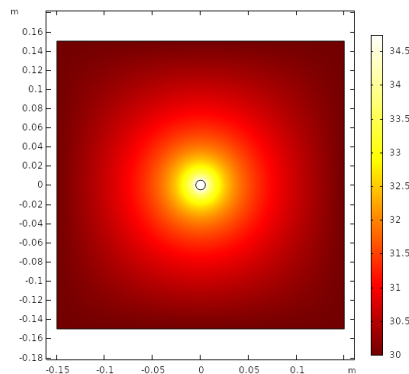
Sijoitetaan S kaavaan (11) ja ratkaistaan T_1 .

$$T_1 = \frac{\dot{Q} \ln(1.08 s/D)}{k 2\pi L} + T_2$$

$$T_1 = \frac{10W \cdot \ln(1.08 \cdot 0.3m/0.01m)}{1.17 W/m^\circ C \cdot 2 \cdot \pi \cdot 1m} + 30^\circ C$$

$$T_1 = 34.7313^\circ C$$

Vastaava tilanne comsolilla laskettuna.



Kuva 7. Raudoitteen loppulämpötila Comsol.

Kun verrataan käsin laskennan tulosta ja comsolin tuottamaa numeerista likiarvoa, ovat ne yhden desimaalin tarkkuudella samat. Työn kannalta yhden desimaalin tarkkuus on aivan riittävä, eikä kappaleen meshausta ole tarpeellista parantaa tarkempien tuloksien takia.

Laskennassa täytyy kuitenkin olla huolellinen oletuksien takia, koska laskenta perustuu tällä hetkellä oletukseen, jossa pilaria ympäröivä materiaali kykenee pitämään pilarin pintalämpötilan 30°C :ssa. Tämä ei sinällään ole hyvä oletus tarkan laskennan kannalta, mutta tarpeeksi hyvä käytännön tilanteiden kannalta.

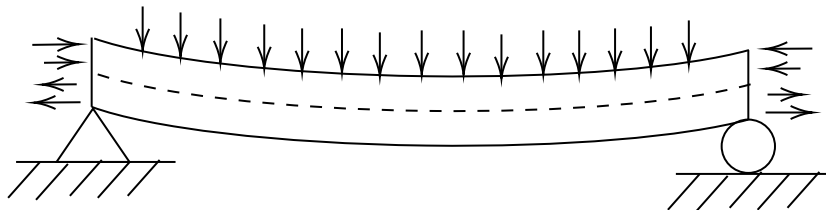
6 MAGNEETTIKENTÄN VAIKUTUS BETONIRAKENTEISIIN

6.1 Betonirakenteet

Opinnäytetyössä ei pureuduta syvälle betonitekniikkaan, vaan tarkoituksena on antaa lukijalle tarpeellinen ymmärrys betonitekniikasta ja sen perusteista, jotta opinnäytetyön kokonaisuus olisi helpommin hahmotettavissa.

Betonirakenteet, kuten perustukset tai seinäelementit, koostuvat betonista sekä betonin sisällä olevasta raudoituksesta. /10/ Betonilla on hyvä puristuslujuus eli betoni pystyy kannattelemaan suuria painoja päällään murtumatta, mutta betonilla on erittäin huono vetolujuus. Tätä betonin huonoa vetolujuutta pyritään korjaamaan lisäämällä betoniin raudoitetta, jolla on hyvä vetolujuus. /10/

Raudoitteen tehtävänä on siirtää vetorasitus betonista teräkseen, jolla vältetään betonin murtuminen vetorasituksen alaisuudessa. Klassinen esimerkki on betonipalkki, jonka päällä oleva kuorma saa betonipalkkiin syntymään sekä puristusta, että vetorasitusta. /10/



Kuva 8. Betonipalkin taipuma

6.1.1 Betoni

Betoni ei tunnetusti ole magneettinen aine, eikä täten johda magneettivuota erityisen hyvin. Betonin suhteellinen permeabiliteetti $\mu = 1$ eli betonin ja magneettivuon välillä ei ole vuota heikentävää tai vahvistavaa vaikutusta./11/

Betonilla on kuitenkin tämän työn kannalta huomattava merkitys raudoituksen jäähtymisen suhteen. Raudoituksen ollessa betonin sisällä on oletettavaa, että suurin osa lämmöstä johtuu raudoituksen ja betonin rajapinnan kautta betoniin, josta se johtuu muuhun ympäristöön.

6.1.2 Raudoitus

Betonin sisällä olevan raudoituksen μ on erittäin paljon suurempi kuin betonin, jolloin raudoitus johtaa magneettivuota merkittävästi paremmin. Raudoitteen resistiivisyys vaihtelee $1 - 10 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$ välillä. Työssä on laskuissa käytetty arvoa $6.9 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$. Raudoitteen asennuksella on huomattava merkitys raudoitteen kokonaisresistanssiin. Raudoitteen ollessa galvaanisessa yhteydessä keskenään muodostuu silmukka, jota pitkin virta pääsee kiertämään. Mikäli raudoitteen risteämiskohdissa ei ole galvaanista yhteyttä keskenään, ei tässä kohdissa voi virtaa siirtyä, koska silloin virtasilmukka ei pääse sulkeutumaan.

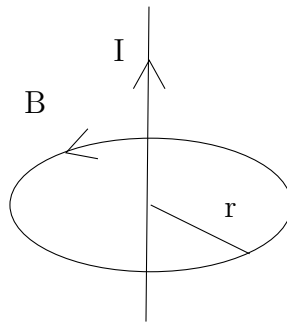
6.2 Johdinsilmukka magneettikentässä

Esimerkissä lähdetään Maxwellin yhtälöstä alkaen johtamaan ratkaisua silmukkaan indusoituneen jännitteen selvittämiseksi. Käsien laskenta valitettavasti osoittautuu erittäin tehottomaksi selvittämään reaalielämän ongelmia, johtuen hankalista ja työläistä integroinneista. Tämän takia reaalielämän ratkaisuja haetaan Comsol multiphysicsin avulla.

6.2.1 Kaapelin aiheuttama magneettikenttä

Kaapelin ympärille muodostuvan magneettikentän tiheys voidaan laskea Ampéren lain avulla. Ampéren laki Maxwellin yhtälönä integraalimuodossa(5).

$$\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(\iint J \cdot d\vec{a} + \iint \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$$



Kuva 9. Magneettikenttä johtimen ympärillä.

Esimerkki kaapelin ympärille muodostuvasta magneettikentästä.

Integroidaan B koko ympyrän kehän pituudelta C ja oletetaan virtajohtimen olevan äärettömän pieni, jolloin termi $J \cdot d\vec{a}$ voidaan kirjoittaa suoraan I :ksi. Koska tulemme liitteissä 3 ja 4 laskemaan kyseisellä kaavalla esimerkkejä, korvataan μ_0 :lla μ :llä, jotta saamme materiaaliirippuvaisen μ_r mukaan laskuihin.

$$2\pi r B = I\mu$$

$$B = \frac{I\mu}{2\pi r} \quad (12)$$

Kaavaa lisää johtamalla saadaan magneettikentän voimakkuudelle kaava, koska B ja H ovat riippuvaisia μ :stä.

$$H = \frac{B}{\mu}$$

kaava saa muodon.

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (13)$$

Tämän työn tilanteissa olemme kiinnostuneita Ac-tyyppisestä tilanteesta, jossa virta on muotoa

$$I(t) = I_p \cdot \sin(\omega t)$$

Jolloin joudumme esittämään magneettivuon tiheyden ajan funktiona(14), koska vuo on riippuvainen virran hetkellisarvosta ja virta on riippuvainen ajasta.

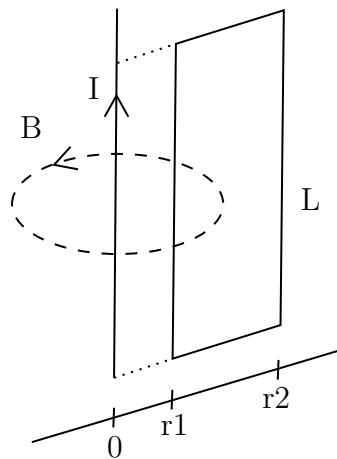
$$B(t) = \frac{\mu I(t)}{2\pi r} \quad (14)$$

6.2.2 Magneettivuo johtimen suuntaisen silmukan läpi

Käyttäen kaavaa (14) apuna voimme laskea, kuinka paljon magneettivuota kulkee silmukan läpi, josta myöhemmässä vaiheessa voimme laskea silmukkaan indusoituneen jännitteen.

Magneettivuo silmukan läpi voidaan laskea kaavasta(6)

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{a}$$



Kuva 10. Magneettivuo silmukan läpi.

Koska vuon tiheys on riippuvainen etäisyydestä, voidaan silmukan pituus L pitää integroinnissa vakiona, koska se pysyy muuttumattomana. Jäjelle jäävä osa pinta-ala alkiosta ei ole vakio, koska vuon tiheys ei ole vakio etäisyyden muuttuessa, jolloin kaava saa muodon.

$$\Phi_B = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\mu_r \mu_0 I(t)}{2\pi r} L dr$$

josta yksinkertaisella integroinnilla pääsemme vastaukseen

$$\Phi_B = \frac{\mu_r \mu_0 I}{2\pi} L \int_{r_1}^{r_2} r^{-1} dr$$

$$\Phi_B = \frac{\mu_r \mu_0 I L}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

Sähkömagneettisen induktion syntymiseksi tarvitaan muuttuva magneettikenttä, joten kaava voidaan muuttaa ajan funktioksi, koska virta muuttuu ajan funktiona.

$$\Phi_B(t) = \frac{\mu_r \mu_0 I(t) L}{2\pi} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (15)$$

6.2.3 Silmukkaan indusoitunut jännite

Silmukkaan indusoitunut jännite voidaan laskea faradayn induktiolain avulla (8)

$$\varepsilon_i = - \frac{d \Phi_B}{dt}$$

Indusoituneen jännitteen ollessa verrannollinen vuon muutokseen, voidaan vuo derivoida ajan suhteen ja saada ratkaisu indusoituneelle jännitteelle. Ainoa termi, joka on riippuvainen ajasta on virta, joten kaikki muut voidaan pitää vakiona derivoinnin ulkopuolella.

$$\varepsilon_i(t) = - \frac{\mu_r \mu_0 L}{2\pi} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \frac{d I(t)}{dt}$$

$$I(t) = I_p \cdot \sin(\omega t)$$

Virran ollessa muotoa saadaan derivoinnin tulokseksi silmukkaan indusoituneen jännitteen kaava. Laskuesimerkki liitteessä 2.

$$\varepsilon_i(t) = -\frac{\mu_r \mu_0 L}{2\pi} \underbrace{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}_{\text{Logaritmitermi}} I_p \omega \cos(\omega t) \quad (16)$$

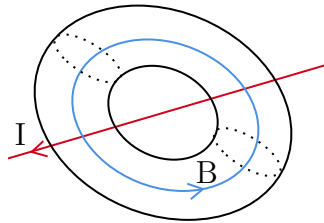
Kaavan (16) käyttäytymisen kannalta on merkittävänä huomiona luonnollisen logaritmin termi. Termi määrittää indusoituneen jännitteen suuruuden silmukan sijoittumisesta kaapeliin nähden. r_1 ollessa silmukan kaapelia lähimmän reunan etäisyys kaapelista ja r_2 silmukan kauemman reunan etäisyys kaapelista. Tästä voidaan huomata, että vaikka r_1 pysyisi muuttumattomana ja r_2 kasvaisi, nousisi indusoitunut jännite. Tämä saattaa olla hiukan vieras ajatus, että jännite nuosee jos silmukan reunaa siirretään etäämmälle johtimesta. Tämä on seurausta magneettivuosta Φ_B , joka tarkoittaa magneettivuon tiheyttä B , joka läpäisee pinta-alan S , jolloin silmukan r_1 pysyessä paikallaan, kun silmukan pinta-ala kasvaa, nousee indusoitunut jännite. Voidaan sanoa, että aina kun silmukan sisään sulkema vuon arvo kasvaa, nousee indusoituneen jännitteen arvo, vastaavasti jos silmukan sisään sulkema vuon arvo pienenee, laskee indusoituneen jännitteen arvo.

6.3 Johdin silmukan läpi

Johdinta, joka läpäisee silmukan, ei voida laskea käsin samalla tapaa kuin silmukalle johtimen tasossa, joten tuloksia on lähdettävä hakemaan numeeristen likiarvojen laskennan kautta.

Tilanne, jossa raudoiteteräs muodostaa neliön johtimen ympärille, ei voida ratkaista järkevästi käsin laskennan avulla, johtuen hankalasta integroinnista koko silmukan pituudelta, jolloin jokainen ”pinta” silmukassa, on eri kulmassa suhteessa johtimeen. Tämä on niin hankala ja hidas suorittaa, ettei

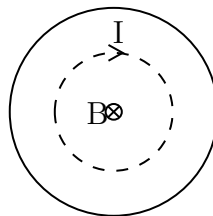
sitä kannata edes yrittää ratkaista käsin laskennan avulla. Tästä johtuen, emme voi vertailla käsin laskennan tuloksia comsol-mallin antamiin tuloksiin.



Kuva 11. Johdin toroidin läpi.

Vaikka raudoiteteräs yksinkertaistettaisiin toroidiksi, eli ”donitsiksi” johtimen ympärille, jolloin päästään pinnan kulman vaikutuksesta eroon, koska jokainen pinta on samassa kulmassa johtimeen nähden, ei käsin laskennalla pystytä tuottamaan edes likiarvoisesti tarpeeksi tarkkoja tuloksia. Vaikka tälle voidaan tuottaa kaava, ei sitä pystytä dervinoinnin takia ratkaisemaan.

Silmukassa kiertävät virrat voidaan jakaa kahteen eri virtaan. Kiertovirtaan ja pyörrevirtaan. Pyörrevirralla tarkoitetaan virtaa, joka syntyy magneettivuon ympärille, kun magneettivuo kulkee silmukassa. Kiertovirta on silmukan pituuden suuntaisesti kulkeva virta, joka johtuu silmukan epäsymmetrisyydestä suhteessa magneettikenttään.



Kuva 12. Pyörrevirta

7 YHTEENVETO

Työ oli erittäin mielenkiintoinen suorittaa ja sain paljon uutta tietoa magnetismista, lämmön siirtymisestä ja opin käyttämään comsol multiphysicsiä. Työ oli sellaisenaan hiukan haastava insinööriopiskelijalle, johtuen vaaditusta fysiikan ymmärryksestä ja rajoitetusta ajasta, joka työhön oli käytettävissä. Suurimmiksi ongelmiksi muodostui tiedonhaku raudoitteiden sähkömagneettisista ominaisuuksista ja niiden käyttäytymisestä magneettikentässä. Toisena isona ongelmana oli comsol multiphysicsin käyttö. Comsolin käyttäminen vaatii erittäin hyvän ymmärryksen kyseisestä fysikaalisesta ilmiöstä, jotta laskennan avulla saataisiin edes likimääräisesti vertailukelpoisia tuloksia.

Tarkempien tuloksien saamiseksi olisi tarvittu raudoitemateriaalien permeabiliteetin mittausta laboratorioympäristössä, johon ei ajan puutteen vuoksi ollut aikaa. Tällöin olisi mahdollista ottaa raudoituksessa tapahtuva saturaatio huomioon, jolla kuitenkin on kohtuullisen suurimerkitys indusoituneeseen jännitteeseen.

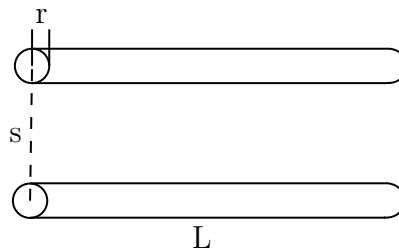
Saatujen tuloksien perusteella kaapeleiden tuottama magneettikenttä ei pääsääntöisesti aiheuta ongelmia, joihin pitäisi kiinnittää erityistä huomiota suunnittelussa.

LÄHTEET

- /1/ Jackson J. *Classical Electrodynamics*. JohnWiley Sons, 1975.
- /2/ Nat M. *Dielectric Permittivity of various Cement based materials during the first 24 Hours hydration*. 2013.
- /3/ Fleisch D. *A Student's Guide to Maxwell's Equations*. Cambridge University Press, 2012.
- /4/ ABB lyhyesti -2019. viitattu 20.2.2019. <https://new.abb.com/fi/yhtyma>, Viitattu 20.2.2019.
- /5/ Comsol company. viitattu 7.5.2019, <https://www.comsol.com/company>.
- /6/ Hayt W & Buck J. *Engineering electromagnetics*. McGraw-Hill New York, 2012.
- /7/ Lindell I & Sihvola A. *Sähkömagneettinen kenttäteoria : 1, Staattiset kentät*. Helsinki : Otatieto, 2002.
- /8/ Lindell I & Sihvola A. *Sähkömagneettinen kenttäteoria : 2, Dynaamiset kentät*. Helsinki : Otatieto, 1996.
- /9/ Yunus A. *Heat Transfer: A Practical Approach*. Mcgraw-Hill, 2003.
- /10/ Suomen betoniyhdistys. *Betonitekniikan oppikirja*. Suomen Betonitieto Oy, 1999.
- /11/ Determination of dielectric properties of insitu concrete at radar frequencies. viitattu 20.2.2019. <https://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v078/v078.htm>, Viitattu 20.2.2019.
- /12/ Comsol Multiphysics. *Comsol Multiphysics user's Guide Version 4.3*. 2012.

Oletetaan, että kaksi harjaterästä betonivalussa aiheuttaa kapasitanssia. Kuinka suuri on kapasitanssi näiden 2 harjateräksen välillä? Harjateräkset ovat 150 mm päässä toisistaan s , 100 m pitkiä L ja Harjateräksen säde r on 5 mm. Kapsitanssi voidaan laskea kaavalla(1)

Harjaterästen välissä olevan betonin suhteellinen permittiivisyys $\varepsilon_r = 4.5$ jolloin permeabiliteetti on $\varepsilon = 3.98438 \cdot 10^{-11} \text{F/m}$



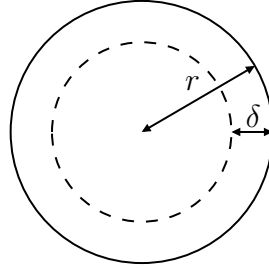
Tällöin kapasitanssi voidaan laskea kaavalla (1).

$$C = \frac{\pi \cdot 3.98438 \cdot 10^{-11} \cdot 100}{\ln\left(\frac{0.15}{2 \cdot 0.005} + \sqrt{\frac{0.15^2}{4 \cdot 0.005^2} - 1}\right)}$$

$$C = 3.68147 \cdot 10^{-9} F$$

Eli kapasitanssi on noin 3.68 nF, joka on häviävän pieni kapasitanssi otettavaksi huomioon. On toki selvää, että reaalielämän tilanteessa raudointus ei ole näin yksinkertainen, koska raudoituksen kokonaiskapasitanssin laskeminen on jo niin suuri työ, että päättötyössä ei riitä aika niin tarkkaan tarkasteluun.

Tunkeutumissyvyys raudoiteteräksessä.



$f(\text{Hz})$	$\sigma(\text{S/m})$	$\mu_0(\text{H/m})$	μ_r	$r(\text{m})$
50	1.44928×10^6	$4\pi \times 10^{-7}$	5×10^3	8×10^{-3}

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \sigma \mu}}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 1.44928 \times 10^6 \text{S/m} \cdot 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m} \cdot 5 \times 10^3}}$$

$$\delta = 0.836\text{mm}$$

Lasketaan raudoitteen effectiivinen poikkipinta-ala

$$A_{eff} = \pi \cdot r^2 - \pi \cdot r1^2$$

$$r1 = r - \delta$$

$$r1 = 8 \times 10^{-3} - 0.836 \times 10^{-3}$$

$$r1 = 7.16\text{mm}$$

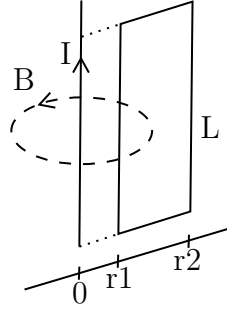
$$A_{eff} = \pi \cdot (8 \times 10^{-3})^2 - \pi \cdot (7.16 \times 10^{-3})^2$$

Voidaan huomata A_{eff} :n olevan 80.09 % pienempi kuin raudoitteen normaali poikkipinta-ala A .

$$A = 201mm^2$$

$$A_{eff} = 40mm^2$$

Vikatilanteessa normaalilla raudoiteteräksellä, ottaen virran pakkautuman huomioon.



$I_p(\text{kA})$	$f(\text{Hz})$	$L(\text{m})$	$\mu_0(\text{H/m})$	μ_r	μ_{r1}	$r1(\text{m})$	$r2(\text{m})$	$\rho(\Omega \cdot \text{m})$	$r(\text{m})$
100	50	5	$4\pi \times 10^{-7}$	5000	1	0.1	0.3	6.9×10^{-7}	5×10^{-3}

$$\varepsilon_i(t) = -\frac{\mu_{r1}\mu_0 L}{2\pi} \ln\left(\frac{r2}{r1}\right) I_p 2\pi f \cos(2\pi f t)$$

$$\varepsilon_i(t) = -\frac{1 \cdot 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m} \cdot 5\text{m}}{2\pi} \ln\left(\frac{0.3\text{m}}{0.1\text{m}}\right) 100\text{kA} \cdot 2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot \cos(2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot t)$$

Indusoitunut jännite saa huippuarvonsa kun cosini termi saa arvon 1. Jännitte ajan funktiona ei ole oleellinen asia vaan sen tehollisarvosta, joten voimme jättää cosini termin huomiotta.

$$\varepsilon_{i\text{peak}} = -\frac{1 \cdot 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m} \cdot 5\text{m}}{2\pi} \ln\left(\frac{0.3\text{m}}{0.1\text{m}}\right) 100\text{kA} \cdot 2\pi \cdot 50\text{Hz}$$

$$\varepsilon_{i\text{peak}} = -34.51\text{V}$$

Oletamme indusoituneen jännitteen olevan sinimuotoista, joten voimme laskea tehollisarvon ilman integrointia jakamalla huippujännitteen $\sqrt{2}$:lla. Jännitteen suunnalla ei ole merkitystä, joten voimme unohtaa miinusmerkin jännitteen edestä.

$$\varepsilon_i = \frac{34.51V}{\sqrt{2}}$$

$$\varepsilon_i = 24.40V$$

Lopullinen virta voidaan ratkaista käyttäen ohmin lakia apuna. Tämä edellyttää sen, että tiedämme raudoitteen resistanssin.

$$I = \frac{\varepsilon_i}{R}$$

Ratkaistaan raudoituksen resistanssi Poullietin lain avulla. Otettaessa huomioon virran pakkautuman, korvataan raudoitteen poikkipintaala efektiivisellä poikkipinta-alalla.

$$R = \rho \frac{\ell}{A}$$

$$R = \rho \frac{\ell}{A_{eff}}$$

Lasketaan tunkeutumissyvyys. Resisttiivisyys on johtavuuden käänteisarvo, joten voimme sijoittaa resistiivisyyden käänteisarvon johtavuuden paikalle, jolloin kaava saa muodon.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \sigma \mu}}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f \mu}}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot 6.9 \times 10^{-7} \Omega \cdot m}{2\pi \cdot 50Hz \cdot 4\pi \times 10^{-7} H/m \cdot 5000}}$$

$$\delta = 0.836mm$$

$$A_{eff} = \pi \cdot r^2 - \pi \cdot r1^2$$

$$r1 = r - \delta$$

$$r1 = 5 \times 10^{-3} - 0.836 \times 10^{-3}$$

$$r1 = 4.16mm$$

$$A_{eff} = \pi \cdot (5 \times 10^{-3})^2 - \pi \cdot (4.16 \times 10^{-3})^2$$

$$A_{eff} = 24mm^2 \approx 24 \times 10^{-6}m^2$$

$$R = \rho \frac{\ell}{24 \times 10^{-6}m^2}$$

Lasketaan raudoitesilmukan pituus ja sijoitetaan kaavaan.

$$\ell = 2 \cdot L + 2 \cdot (r2 - r1)$$

$$R = \rho \frac{2 \cdot L + 2 \cdot (r2 - r1)}{24 \times 10^{-6}m^2}$$

$$R = 6.9 \times 10^{-7}\Omega \cdot m \frac{2 \cdot 5m + 2 \cdot (0.3m - 0.1m)}{24 \times 10^{-6}m^2}$$

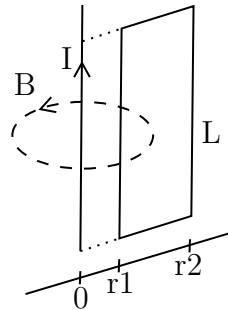
$$R = 0.299\Omega$$

Sijoitetaan ohmin lakiin.

$$I = \frac{24.4V}{0.299\Omega}$$

$$I = 81.60A$$

Käyttötilanteessa, normaalilla raudoiteteteräksellä, ottaen virranpakkautuman huomioon.



I_p (kA)	f (Hz)	L (m)	μ_0 (H/m)	μ_r	μ_{r1}	$r1$ (m)	$r2$ (m)	ρ ($\Omega \cdot m$)	r (m)
1.5	50	5	$4\pi \times 10^{-7}$	5000	1	0.1	0.3	6.9×10^{-7}	5×10^{-3}

$$\varepsilon_i(t) = -\frac{\mu_{r1}\mu_0 L}{2\pi} \ln\left(\frac{r2}{r1}\right) I_p 2\pi f \cos(2\pi f t)$$

$$\varepsilon_i(t) = -\frac{1 \cdot 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m} \cdot 5\text{m}}{2\pi} \ln\left(\frac{0.3\text{m}}{0.1\text{m}}\right) 1.5\text{kA} \cdot 2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot \cos(2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot t)$$

Indusoitunut jännite saa huippuarvonsa, kun cosinitermi saa arvon 1. Jännite ajan funktiona ei ole oleellinen asia vain sen tehollisarvosta, joten voimme jättää cosinitermin huomiotta.

$$\varepsilon_{i\text{peak}} = -\frac{1 \cdot 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m} \cdot 5\text{m}}{2\pi} \ln\left(\frac{0.3\text{m}}{0.1\text{m}}\right) 1.5\text{kA} \cdot 2\pi \cdot 50\text{Hz}$$

$$\varepsilon_{i\text{peak}} = -0.5177\text{V}$$

Oletamme indusoituneen jännitteen olevan sinimuotoista, joten voimme laskea tehollisarvon ilman integrointia jakamalla huippujännitteen $\sqrt{2}$:lla. Jännitteen suunnalla ei ole merkitystä, joten voimme unohtaa miinusmerkin jännitteen edestä.

$$\varepsilon_i = \frac{0.5177V}{\sqrt{2}}$$
$$\varepsilon_i = 0.3660V$$

Lopullinen virta voidaan ratkaista käyttäen ohmin lakia apuna. Tämä edellyttää sen, että tiedämme raudoitteen resistanssin.

$$I = \frac{\varepsilon_i}{R}$$

Ratkaistaan raudoituksen resistanssi Poullietin lain avulla. Otettaessa huomioon virran pakkautuman korvataan raudoitteen poikkipintaala efektiivisellä poikkipinta alalla.

$$R = \rho \frac{\ell}{A}$$

$$R = \rho \frac{\ell}{A_{eff}}$$

Lasketaan tunkeutumissyvyys. Resisttiivisyys on johtavuuden käänteisarvo, joten voimme sijoittaa resistiivisyyden käänteisarvon johtavuuden paikalle, jolloin kaava saa muodon.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \sigma \mu}}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f \mu}}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot 6.9 \times 10^{-7} \Omega \cdot m}{2\pi \cdot 50Hz \cdot 4\pi \times 10^{-7} H/m \cdot 5000}}$$

$$\delta = 0.836mm$$

$$A_{eff} = \pi \cdot r^2 - \pi \cdot r1^2$$

$$r1 = r - \delta$$

$$r1 = 5 \times 10^{-3} - 0.836 \times 10^{-3}$$

$$r1 = 4.16mm$$

$$A_{eff} = \pi \cdot (5 \times 10^{-3})^2 - \pi \cdot (4.16 \times 10^{-3})^2$$

$$A_{eff} = 24mm^2 \approx 24 \times 10^{-6}m^2$$

$$R = \rho \frac{\ell}{24 \times 10^{-6}m^2}$$

Lasketaan raudoitesilmukan pituus ja sijoitetaan kaavaan.

$$\ell = 2 \cdot L + 2 \cdot (r2 - r1)$$

$$R = \rho \frac{2 \cdot L + 2 \cdot (r2 - r1)}{24 \times 10^{-6}m^2}$$

$$R = 6.9 \times 10^{-7}\Omega \cdot m \frac{2 \cdot 5m + 2 \cdot (0.3m - 0.1m)}{24 \times 10^{-6}m^2}$$

$$R = 0.299\Omega$$

Sijoitetaan ohmin lakiin.

$$I = \frac{0.366V}{0.299\Omega}$$

$$I = 1.224A$$