

Håkon Sars

Analyse av magnetiske tap i stålarmeringer ved å benytte en kompleks permeabilitet

Masteroppgave i Energi og Miljø

Veileder: Bjørn Gustavsen

Medveileder: Arne Nysveen

Juni 2022

Håkon Sars

Analyse av magnetiske tap i stålarmeringer ved å benytte en kompleks permeabilitet

Masteroppgave i Energi og Miljø
Veileder: Bjørn Gustavsen
Medveileder: Arne Nysveen
Juni 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk
Institutt for elkraftteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Forord

Denne masteravhandlingen er gjennomført våren 2022 som det avsluttende arbeidet for det fjerde semesteret av det toårige masterprogrammet for studie *Energi og miljø*. Avhandlingen er gjort for instituttet for elkraftteknikk ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU). Denne masteravhandlingen er en fortsettelse på arbeidet gjort i forprosjektet høsten 2021 og er basert på arbeidet gjort i masteravhandlingen skrevet av R. Stølan i 2009.

Sjøkabler konstrueres ofte med ytre stålarmering av magnetisk materiale for å oppnå tilstrekkelig mekanisk styrke. Armeringen gir tilleggstep som følge av hysteres i armeringen, hvilke øker oppvarmingen og derav reduserer overføringsevnen. Tapenes størrelse avhenger i stor grad av trådens permeabilitet. Beregningene av tapene blir ofte gjort ved formlene beskrevet av IEC-normer, hvilke er kjent for å overestimere tapene vesentlig. Ved å bruke hensiktsmessige modeller av kabler kan man beregne tapene med høyere presisjon ved å bruke Finite Element metoden (FEM). Denne metoden er imidlertid avhengig av å kunne bestemme materialets magnetiske egenskaper i avhengighet av påtrykt magnetisk feltstyrke og retningen på feltet. Dette kan oppnås ved å foreta fysiske målinger på armeringstrådene, som vil gi B-H kurver eller komplekse permeabilitet.

Innholdet i denne rapporten vil gi størst utbytte til de som har grunnleggende kunnskap om elektromagnetisk teori og Finite Element metoden.

Jeg vil uttrykke min største takknemlighet til min veileder Bjørn Gustavsen som har veiledet meg og diskutert løsninger med meg gjennom hele prosessen. En takk sendes også til Arne Nysveen, min med-veileder, som har veiledet meg ved behov. Jeg ønsker også å takke Anyuan Chen som har veiledet meg rundt bruken av instrumentet og har vært en god partner å diskutere resultatene med. Takk til NEXANS Norway og spesielt Martin Hovde som har stilt opp med armeringstråder og har svart på spørsmål underveis. Til slutt ønsker jeg å takke NTNU for å ha stilt med instrumentet.

Håkon Sars

Håkon Sars

Trondheim, Våren 2022

Sammendrag

Det er foretatt tapsanalyser for fire rektangulære- og fem runde armeringstråder av stål. Det ble først utført målinger med måleinstrumentet Brockhaus Messtechnik ved ulike magnetiske flukstettheter og frekvenser. Disse målingene brukes til å separere de totale tapene inn i hysteres- og virvelstrømstap ved hjelp av Steinmetz metoden, som videre er benyttet til å sammenligne med de separerte tapene gitt av instrumentet. Disse beregningene samsvarte godt med de målte separerte tapene, med små avvik.

Videre ble det utført målinger på de fem runde armeringstrådene hvor ulike magnetiske feltstyrker og frekvenser ble benyttet. Målingene ble benyttet for å sammenligne de målte totale tapene med de analytisk- og de FEM-beregna totale tapene for en modell hvor tapene i materialet ble representert av en kompleks permeabilitet med null ledningsevne. For begge beregningsmetodene ble de totale tapene funnet ved å erstatte et ledende material med et ikke-ledende material beskrevet av en kompleks permeabilitet. Den komplekse permeabiliteten ble funnet ved å optimalisere og analytisk beregne faseforskjellen mellom den målte magnetiske flukstettheten og den påtrykte magnetiske feltstyrken fra målingene. Resultatet viste god overensstemmelse for de optimaliserte og de analytisk beregna komplekse permeabilitetene for lineære elliptiske B-H kurver. Når B-H kurvene var ikke-lineære så man tydelige avvik for de komplekse permeabilitetene. De analytisk beregna totale tapene funnet med en kompleks permeabilitet hadde en veldig god overensstemmelse med de målte tapene. FEM-beregningene ble utført med et fint, et medium og et grovt mesh. Resultatet viste tydelig at de totale tapene stemte godt overens med de målte tapene, med maksimalt 0.09% avvik.

Det denne avhandlingen har vist er at bruken av kompleks permeabilitet er en god tilnærming for beregninger av totalt tap i en armeringstråd. Metoden skaper et stort potensial for å kunne redusere beregningstiden, samtidig som det reduserer behovet for å ha kunnskap og informasjon om ståltrådens materialegenskaper. For store og avanserte geometrier vil det å kun være avhengig av kompleks permeabilitet gjøre det mulig å bruke veldig grove mesh og derav kunne redusere beregningstiden betraktelig.

Abstract

Loss analyzes have been performed for four rectangular and five round steel armoring wires. Measurements were first performed with the measuring instrument Brockhaus Messtechnik at different magnetic flux densities and frequencies. These measurements are used to separate the total losses into hysteresis and eddy current losses using the Steinmetz method, which is further used to compare with the separated losses given by the instrument. These calculations corresponded well with the measured separated losses, with small deviations.

Furthermore, measurements were performed on the five round armoring wires where different magnetic field strengths and frequencies were used. The measurements were used to compare the measured total losses with the analytical and the FEM-calculated total losses for a model where the losses in the material were represented by a complex permeability with zero conductivity. For both calculation methods, the total losses were found by replacing a conductive material with a non-conductive material described by a complex permeability. The complex permeability was found by optimizing and analytically calculating the phase difference between the measured magnetic flux density and the applied magnetic field strength from the measurements. The result showed good agreement for the optimized and the analytically calculated complex permeabilities for linear elliptical B-H curves. When the B-H curves were non-linear, clear deviations were seen for the complex permeabilities. The analytically calculated total losses found with a complex permeability clearly agreed with the measured losses. The FEM calculations were performed with a fine, a medium, and a coarse mesh. The result clearly showed that the total losses corresponded well with the measured losses, with a maximum deviation of 0.09%.

This thesis has shown that the use of complex permeability is a good approach for calculations of total loss in an armoring wire. This approach creates a great potential to reduce the calculation time, as well as reduce the need to have knowledge and information about the material properties of the steel wire. For large and advanced geometries, being only dependent on complex permeability will make it possible to use very coarse meshes and thus be able to reduce the calculation time considerably.

Innhold

1	Innledning	1
1.1	Hensikt	1
1.2	Bakgrunn	1
1.3	Mål	1
2	Teori	3
2.1	Typisk design av sjøkabler	3
2.2	Tap i kabelarmeringer	4
2.3	Separering av tap	5
2.4	B-H kurver	9
2.5	Magnetisk permeabilitet	10
2.6	Kompleks permeabilitet	11
2.7	Studie basert på bruk av kompleks permeabilitet	11
2.8	Beregning av tap	15
2.8.1	Tapsberegning i henhold til standarden	15
2.8.2	Analytisk beregning av tap	16
2.9	Brockhaus måleinstrument	17
2.9.1	Generell info	17
2.9.2	Målemetodikk benyttet av Brockhaus måleinstrumentet	19
2.9.3	Brockhaus metode for beregning og separering av tap	20
3	Armeringstrådene brukt i målingene	21
4	Metodikk for måling og beregning av tap	23
4.1	Målinger gjort med Brockhaus måleinstrument	23
4.1.1	Målinger med hensyn på magnetisk flukstetthet	23
4.1.2	Målinger med hensyn på magnetisk feltstyrke	24
4.2	Separering av totalt tap	24
4.3	Beregning av kompleks permeabilitet	25

4.3.1	Optimalisering av kompleks permeabilitet	25
4.3.2	Analytisk beregning av kompleks permeabilitet	26
4.4	Tapsberegninger	27
4.4.1	Arealberegning av B-H kurver	28
4.4.2	Analytisk beregning av tap	28
4.4.3	FEM-beregning av tap	28
5	Resultat fra måling og beregning av tap	30
5.1	Separerte tap	30
5.1.1	Beregna koeffisienter	30
5.1.2	Sammenligning av målte og beregna separerte tap	31
5.2	Kompleks permeabilitet	36
5.2.1	Beregna kompleks permeabilitet	37
5.2.2	Sammenligning av målte og transformerte kurver	40
5.3	Beregna tap	44
6	Diskusjon	51
6.1	Separerte tap	51
6.2	Beregna kompleks permeabilitet	52
6.3	Beregna tap	54
7	Konklusjon	56
8	Veien videre	58

1 Innledning

1.1 Hensikt

Denne avhandlingens hensikt er å undersøke de magnetiske tapene for stålarmeringen til undersjøiske kabler og hvordan permeabiliteten i kablene påvirker de resistive- og hysterestetapene. Et ledende material erstattes av et ikke ledende material med en elliptisk hystereseløype beskrevet beskrevet av en kompleks permeabilitet. Hypotesen er at de analytisk beregna totale tapene i en armering, ved å benytte en kompleks permeabilitet, vil samsvarer med de målte totale tapene. Hensikten ved å benytte en kompleks permeabilitet i kombinasjon med et material uten ledningsevne er blant annet å redusere beregningstiden av tapene i kabler. Da dagens kabler har store dimensjoner og avanserte geometrier er det hensiktsmessig med beregningsmetoder som kan redusere beregningstiden. Det er også nyttig å se på de totale tapene ved ulike frekvenser da det i dag også brukes andre frekvenser enn 50 Hz i overføring av strøm. Denne avhandlingen bygger på Ronny Stølans arbeid i [1] fra 2009. Samtidig bygger denne oppgaven på arbeidet som ble gjort i prosjektoppgaven [2] skrevet høsten 2021. Deler av teorien brukt i denne avhandlingen er hentet fra eller inspirert av teorien i prosjektoppgaven. I denne avhandlingen utføres det målinger og beregninger med påtrykk av H-felt parallelt med trådene.

1.2 Bakgrunn

Strøm er i dag en verdensavhengig ressurs og dagens undersjøiske kabler utgjør en sentral rolle i kraftoverføringen og kommunikasjonen i utallige industrier over hele verden. Disse kablene brukes mellom fastland og offshore vindparker eller hydrokarbon felt, samt internt mellom installasjonene i slike felt. Feil på disse kablene kan gi betydelige økonomiske og tekniske problemer på verdensbasis [3]. Undersjøiske kabler utformes med armering for å beskytte kabelen under lagring, legging og mot ytre mekaniske påkjenninger under drift. Armeringen består vanligvis av ståltråder, typisk av galvanisert stål, som er viklet rundt en tre-leder kabel. Denne typen metallisk og magnetisk armering vil gi ytterligere tap i form av hystereseløype- og virvelstrømstap ved bruk av vekselstrøm i lederne, som vil redusere kabelens overføringsevne.[4] Dagens analytiske formler overestimerer armeringstapene som gjør at man ved design av sjøkabler velger å benytte større og mer kostbare kabler.[4] Dermed vil en mer nøyaktig tilnærming bidra til å redusere størrelsene og dimensjonene på lederne og kablene som vil bidra til reduserte kostnader. Det er sentralt å se på armeringens magnetiske egenskaper for å kunne gjøre gode analyser og estimeringer av armeringstap ved et påtrykt magnetfelt.

1.3 Mål

Hovedfokuset i denne avhandlingen er å bruke fysiske målinger og analytiske formler til å finne en kompleks permeabilitet som beskriver de totale tapene i et ledende magnetisk materiale, gitt av virvelstrømstap og hysterestetap. Mange forskningsartikler i dag baserer seg på bruken av kompleks permeabilitet, men svært få av dem viser hvordan de finner den. Derfor er det et mål å finne tilnærminger for kompleks permeabilitet som kan basere seg på fysiske målinger. En kombinasjon av fysiske målinger, analytiske beregninger og *Finite Element Method* (FEM) i den kommersielle programvaren COMSOL skal benyttes for å beregne de totale tapene.

Fysiske målinger med *Brockhaus Messtechnik* måleinstrumentet skal utføres for å gi et grunnlag for å kunne separere de totale tapene inn i virvelstrøms- og hysterese tap, og for å kunne beregne den komplekse permeabiliteten og de totale tapene. Målet med avhandlingen er å finne den komplekse permeabiliteten ved å benytte analytiske metode og sammenligne med en beregnet optimalisert kompleks permeabilitet. Den komplekse permeabiliteten vil benyttes til å beregne de totale tapene, som videre skal gi grunnlag for å kunne sammenligne med de totale tapene fra målingene. For de analytiske- og de FEM-baserte beregningene skal det benyttes en ledningsevne tilnærmet null, for å se på om de beregna totale tapene med en kompleks permeabilitet er presis sammenlignet med de målte totale tapet. Det er forventet at avvikene mellom de målte og beregna totale tapene vil være små.

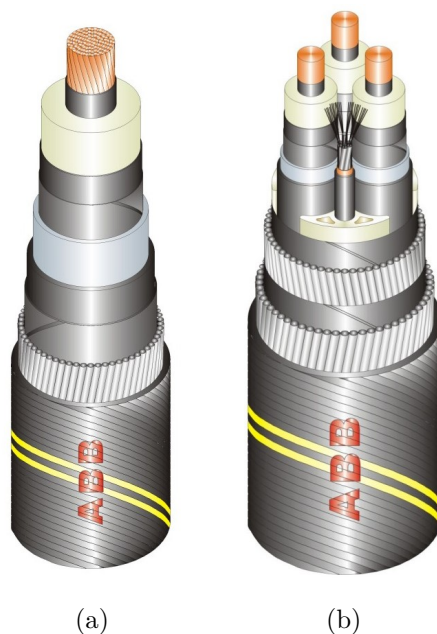
I FEM-beregningene vil grovheten på meshene varieres for å se om det vil være avvik når det benyttes veldig grove mesher. Det er forventet at grovheten vil ha minimal innvirkning på de FEM-beregna totale tapene, da det ved å benytte et materiale med tilnærmet null ledningsevne ikke vil være skinneffekt i geometrien og alle tapene er forårsaket av nærhetseffekten.

2 Teori

I dette avsnittet fremlegges viktig teori og bakgrunnsinformasjon for å gjøre gode beregninger og analyser av tap i stålarmerede kabler. Først fremlegges en beskrivelse av typiske kabel design og tapene man finner i sjøkablenes armering, etterfulgt av en forklaring av hvordan man kan separere tapene analytisk. Videre blir det presentert en teoretisk beskrivelse av B-H kurver og den magnetiske permeabiliteten. En studie av ulike bruksområder og beregningsmetoder av kompleks permeabilitet blir videre presentert for å legge grunnlag for beregninger av kompleks permeabilitet. Det blir videre presentert formler og fremgangsmåter for beregning av totale tap i en armeringstråd. Til slutt vil en beskrivelse av måleinstrumentet *Brockhaus Messtechnik* bli presentert. I dette avsnittet er kapitlene om Typiske design for sjøkabler, Tap i kabelarmeringer og Brockhaus måleinstrument hentet fra eller inspirert av teorien fra prosjektoppgaven [2] skrevet høsten 2021.

2.1 Typisk design av sjøkabler

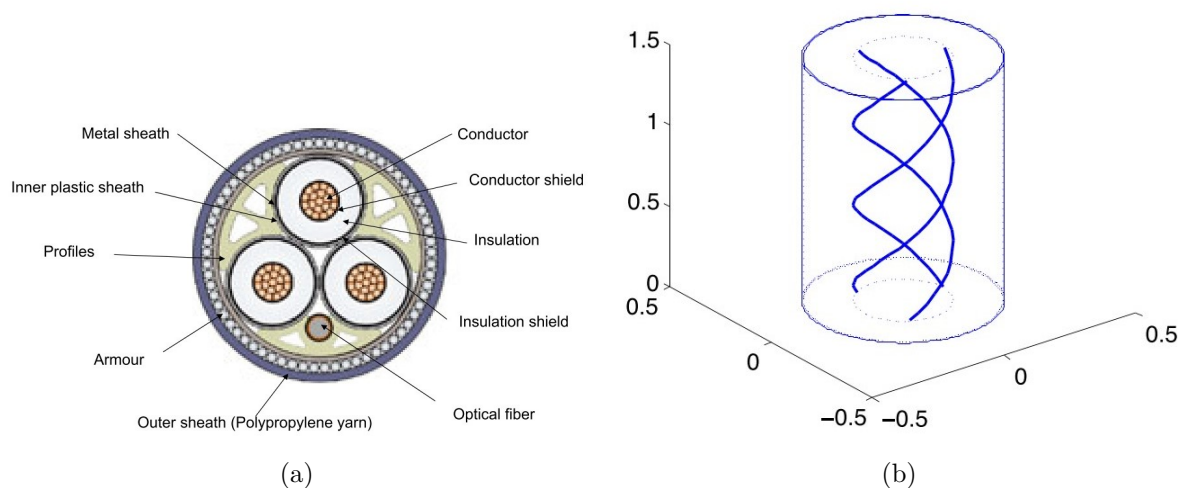
Dagens undersjøiske høyspentkabler står for overføring mellom fastland og offshore energiproduksjon eller mellom installasjonene, hvor det enten brukes høyspennings likestrøms kabler (HVDC) eller høyspennings vekselstrøms kabler (HVAC). Bruken av de to kablene avhenger i stor grad av distansen. HVDC og HVAC kablene er illustrert i henholdsvis Figur 1a og 1b.[5]



Figur 1: Typisk design for høyspent kabler, hvor (a) er HVDC og (b) er Tre-fase HVAC. [5]

Det er viktig at kablene designes med solid konstruksjon. Den solide konstruksjonen består ofte av en beskyttende kappe og en metallisk armering. Formålet med disse er å beskytte mot uforutsette mekaniske påkjenninger og for at kabelen skal ligge stabilt på havbunnen. Dersom de beskyttende delene utsettes for slitasje, kan det føre til svikt eller skade på kabelen[3]. I dag blir sjøkablene designet med en beskyttende armering for å unngå skader fra uforutsette mekaniske påkjenninger under drift, ved lagring og ved legging av kablene.[4] Funksjonen til

ytterkappen er å beskytte armeringen på innsiden fra korrosjon og slitasje.[3] Armeringen består av ståltråder, typisk av galvanisert stål, som er tvinnet rundt tre-leder kjernen.[4] Figur 2a viser den kompliserte strukturen i kabelen med ulike komponenter og inndelinger. Den kompliserte strukturen i kombinasjon med at lederne er tvinna, vist i Figur 2b, gjør det vanskelig å forutse hvilken påvirkende effekt tapsmekanismene fra armeringen vil ha på kabelen.[6] Dersom det flyter vekselstrøm i lederne vil den metalliske og magnetiske armeringen gi ytterligere tap som vil redusere den tillatte strømstyrken i ledere.[4]



Figur 2: Typisk geometri (a) og tvinning (b) av en trefase HVAC kabel. [6]

2.2 Tap i kabelarmeringer

Tap i kabelarmeringen kan deles inn i ulike hovedtyper avhengig av kabeltype, armeringsmaterial og installasjonsmetode. HVDC-kabler installeres normalt med en armering av et ikke-magnetisk materiale da tapene ville blitt for store ved bruk av magnetiske materialer. Tapsberegninger på HVDC-kabler gjøres med hensyn på den kombinerte resistansen til armeringen og kappen.[1] Det magnetiske feltet fra lederne i HVAC-kabler blir i større grad kansellert og vil redusere det magnetiske tapet sammenlignet med HVDC-kabler med magnetisk armering. Armeringstapene i HVAC-kablene er ikke ubetydelige, og bidrar til oppvarming av kablene. Oppvarmingen kan skje på to måter, den ene er oppvarming av selve armeringstrådene og den andre er ved å øke den magnetiske induksjonen. Dette kan resultere i høyere skjermstrømmer og større tap i kabelskjermene.[7]

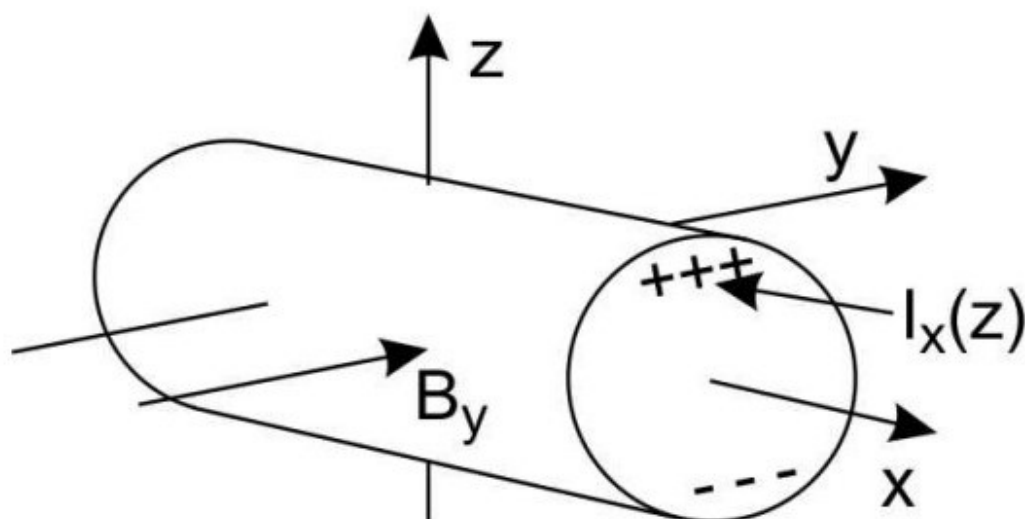
Det er normalt å dele inn induksjonstapene for den magnetiske armeringen til HVAC-kablene inn i virvelstrømstap og hysteretap:[8]

- *Virvelstrømstap* - induisert av magnetisk fluks. Den magnetiske fluksen B , som blir generert av lederstrømmen, vil indukere virvelstrømmer i armeringstrådene.
- *Hysteretap* - i magnetiske ståltråder. Disse tapene oppstår når en drivende magnetomotorisk kraft vil prøve å etablere et magnetfelt i stålarmingen.

Hysteres- og virvelstrømstapene utgjør de totale tapene når det er null nettostrøm i armeringstrådene og er et resultat av snoingen av trådene.[9] I en trefase kabel vil hver av lederne indusere virvelstrømmer. Dette kommer fra genererte magnetiske feltet fra lederen selv og dette fenomenet kalles for skinneffekten. Nærliggende vekselstrøms ledere vil også påtrykke magnetiske felt på nærliggende ledere som resulterer i virvelstrømmer. Dette fenomenet kalles for nærhetseffekten.[10] Dersom det er en konstant magnetisk flukstetthet (B_y) påtrykt i tråden, vist i Figur 3, med diameteren d , vil virvelstrømstapene være gitt ved Formel 1.

$$P_a = \frac{\pi d^2 \sigma \omega^2 B_y^2}{64} \quad (1)$$

Effekttapet avhenger ifølge formelen av trådens diameteren d , ledningsevne σ , flukstetthet B_y og den elektriske vinkelhastigheten ω . Den maksimale verdien av virvelstrøm vil oppstå på den øverste og den nederste delen av tråden. Formel 1 gir det maksimale effekttapet i en armert en-leder kabel, men i praksis vil virvelstrømstapet være lavere da skinneffekten vil redusere effekttapet i trådene.[8]



Figur 3: En konstant magnetisk flukstetthet B_y påtrykt normalt på en rund tråd. [8]

I denne oppgaven vil det imidlertid bare bli sett på B-felt i langsretning som skyldes snoing av armeringstrådene.

2.3 Separering av tap

Det er veldig vanskelig å skille mellom hysteres- og virvelstrømstap basert på målinger alene. Det er derfor utledet formler og tilnærminger som gjør det mulig å separere de målte totale tapene. Den modifiserte Steinmetz ligningene er presentert i kildene "*Prediction of Iron Losses Using the Modified Steinmetz Equation under the Sinusoidal Waveform*"[11] og "*Loss in Steel Armour Wires for Submarine Power Cables*"[7]. Denne metoden brukes til å separere det totale

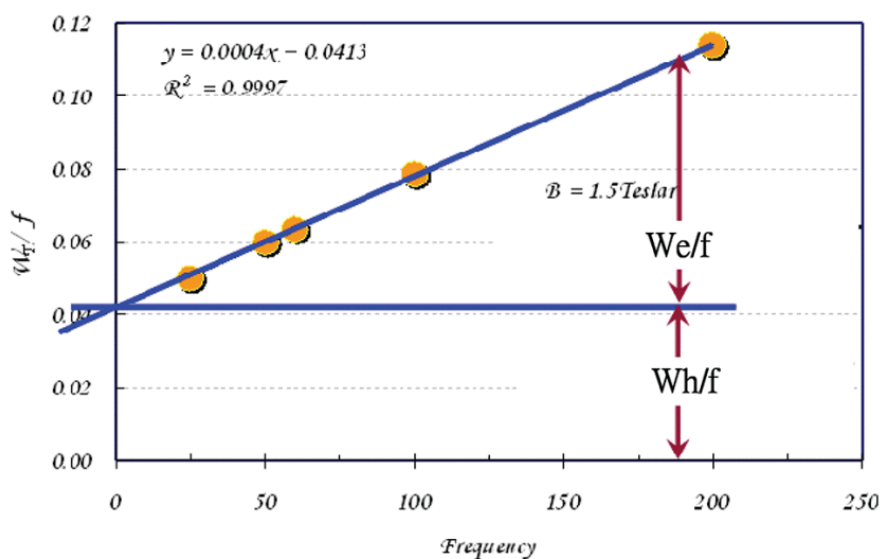
tapet inn i hysteres- og virvelstrømstap. Den generaliserte Steinmetz likningen er gitt av Formel 2 under.

$$W_{tot} = h \cdot f \cdot B_{Max}^x + ec \cdot f^2 \cdot B_{Max}^y \quad (2)$$

hvor B_{Max} er den maksimale flukstettheten, f er frekvensen for det magnetiske feltet, og h , ec , x og y er koeffisienter avhengige av materialets tykkelse og konduktivitet[7]. Dersom begge sider av Formel 2 divideres på frekvensen får man Formel 3 gitt under.

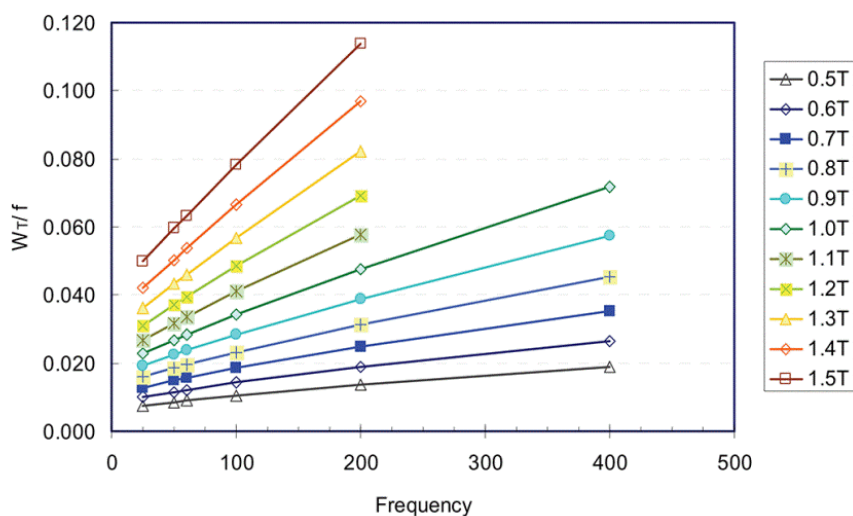
$$\frac{W_{tot}}{f} = h \cdot B_{Max}^x + ec \cdot f \cdot B_{Max}^y \quad (3)$$

Først utføres målinger på et material ved forskjellige frekvenser i frekvensintervallet 25 Hz ~ 200 Hz for en definert B-verdi. Fra dette kan man beregne $\frac{W_{tot}}{f}$ og lage et diagram av $\frac{W_{tot}}{f}$ som funksjon av frekvens. En lineær regresjon gjøres for punktene slik som vist i Figur 4. Fra den lineære regresjonen er det mulig å finne linjens stigningstall, samt linjens skjæringspunktet i $\frac{W_{tot}}{f}$ -aksen. Den horisontale linjen i Figur 4 representerer hysteresetapet som funksjon av frekvens, mens delen mellom de to linjene i figuren viser virvelstrømstapet for hver enkelt sirkulasjon. Derfor kan man allerede her beregne virvelstrøms- og hysteresetapene. For å finne koeffisientene og kunne forutse tapene ved ulike frekvenser og ulike magnetiske flukstettheter må man utføre ytterligere beregninger.



Figur 4: Diagram for de separerte armeringstapene. [11]

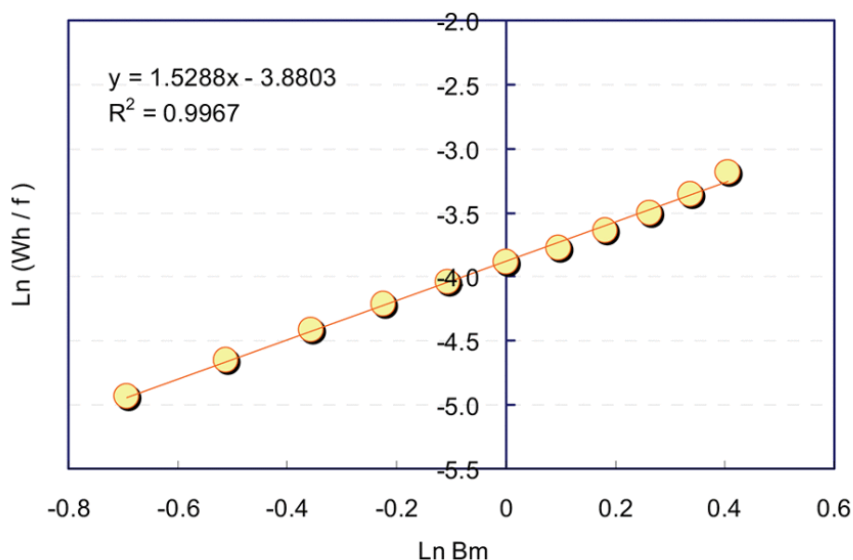
Dersom denne prosessen gjentas for flere B-verdier og plottet i samme diagram vil plottet se ut som diagrammet i Figur 5.



Figur 5: Forholdet mellom $\frac{W_{tot}}{f}$ og frekvens for ulike B-verdier. [11]

Videre benyttes Formel 4 under til å lage et nytt diagram. Her plottes $\text{Ln}(\frac{W_h}{f})$ som funksjon av $\text{Ln}(B_{Max})$. B_{Max} og $\frac{W_h}{f}$ vil være verdiene ved en bestemt frekvens fra Figur 5. En ny lineær regresjon gjøres for disse punktene som vil gi et plot lignende det som er vist i Figur 6.

$$\text{Ln}\left(\frac{W_h}{f}\right) = \text{Ln}(h) + x \cdot \text{Ln}(B_{Max}) \quad (4)$$



Figur 6: $\text{Ln}(\frac{W_h}{f})$ som funksjon av $\text{Ln}(B_{Max})$. [11]

Skjæringspunktet fra den lineære regresjonen vil være $\text{Ln}(h)$ og hysterese-koeffisienten h vil da være gitt av $\exp(\text{Ln}(\frac{W_h}{f}(f)))$ når f er 0. Koeffisienten x vil være gitt av den lineære regresjons-

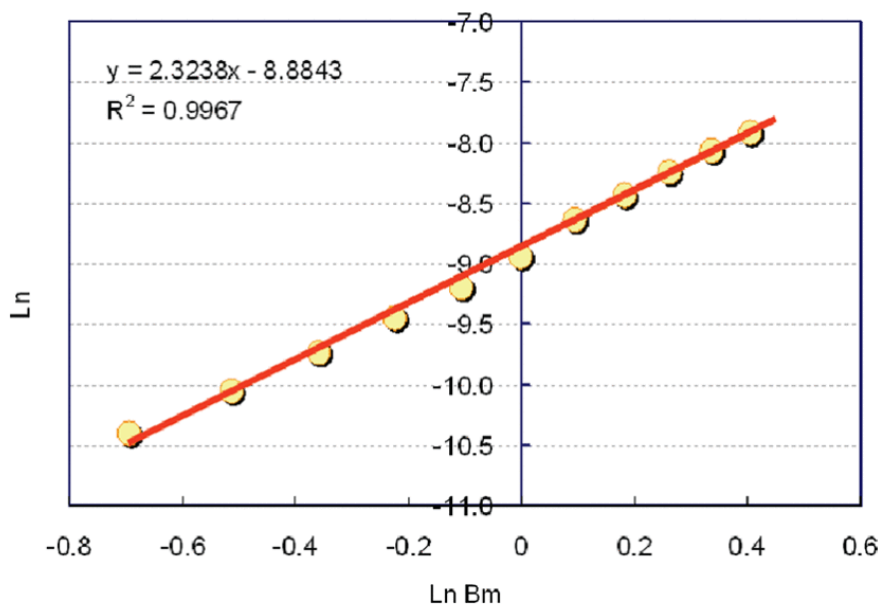
linjens stigningstall. Hysteresekoeffisientene kan da settes inn i den delen av Formel 2 som representerer hysteresetapet, gitt under.

$$W_h = h \cdot B_{Max}^x \cdot f$$

Virvelstrømstapets koeffisienter ec og y kan videre beregnes ved å benytte Formel 5 under, hvor $Slope = e \cdot B_{Max}^y$.

$$\ln(Slope) = \ln(ec) + y \cdot \ln(B_{Max}) \quad (5)$$

Da lages et diagram hvor $\ln(Slope)$ plottes som funksjon av $\ln(B_{Max})$ og utfører en lineær regresjon i henhold til punktene, som vist i Figur 7.



Figur 7: $\ln(Slope)$ som funksjon av $\ln(B_{Max})$. [11]

Skjæringspunktet vil da være gitt av $\ln(ec)$ og y vil være stigningstallet:

$$ec = \exp(\text{skjæringspunktet})$$

$$y = \text{stigningstallet}$$

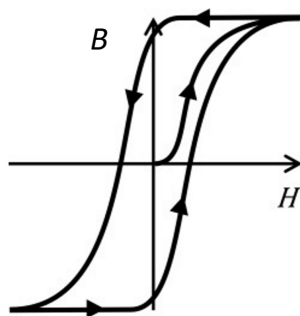
Virvelstrømskoeffisientene kan da legges inn i den delen av Formel 2 som representerer virvelstrømstapet, gitt under.

$$W_{ec} = ec \cdot B_{Max}^y \cdot f^2$$

Fremgangsmåten presentert i dette kapittelet vil bli benyttet i arbeidet for å separere tapene.

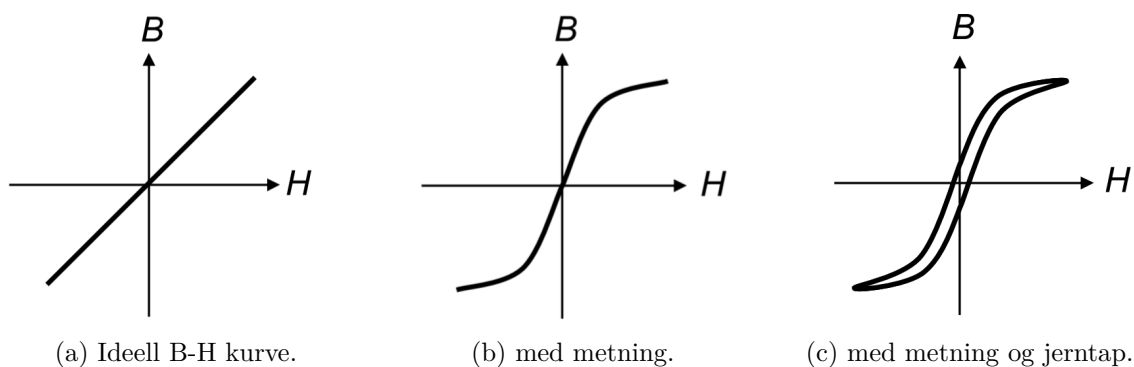
2.4 B-H kurver

Ved å påtrykke et magnetisk felt på armeringen vil det oppstå hysteresetap. I Figur 8 er forholdet mellom magnetfeltet H og den magnetiske flukstettheten B i materialet plottet. Kurven som stiger fra origo vil øke frem til den oppnår et metningspunkt, denne kurven kalles den initiale magnetiseringskurven. Dersom det gjøres endringer etter det er oppnådd metning vil ikke kurven gå tilbake til utgangspunktet i origo. Kurven vil derimot bli fallende som vist i Figur 8. Dette fenomenet kalles for hysteresese.[12]



Figur 8: Magnetisk flukstetthet B som funksjon av magnetisk feltstyrke H .

B-H kurven representerer magnetisk flukstetthet som funksjon av magnetisk feltstyrke for et magnetisk materiale. Et ideelt og tapsfritt lineært magnetisk materiale vil ha en B-H kurve representert av en rett linje som illustrert i Figur 9a. Linjen vil være proporsjonal med materialets permeabilitet μ . Den magnetiske metningen vil i praksis påvirke den maksimale oppnåelige magnetiske flukstettheten i materialet. Denne metningen vil gjøre at B-H kurven blir ikke-lineær, som vist i Figur 9b. Jerntap forårsaker at B-H kurven blir til en løkke, som vist i Figur 9c. Løkkens areal representerer energitapet $[\frac{J}{m^3}]$ forårsaket av hysteresese- og virvelstrømstap.[13]



Figur 9: Faktorer som bestemmer B-H kurvenes form. [13]

For en ikke-lineær B-H kurve hvor permeabiliteten er en funksjon av B , det vil si $B = \mu(B)H$, vil uttrykket for den magnetiske energien bli modifisert til Formel 6.

$$W_M = \int_v \int_0^B H dB dV \quad (6)$$

Her representerer $\int HdB$ energitettheten. Dette er arealet under B-H kurven kalkulert med referanse til B-aksen.[9] Formelen for omgjøring av energitetthet W [$\frac{J}{m^3}$] til effekt tap P [$\frac{W}{m^3}$] er gitt av Formel 7 hvor f er frekvens.

$$P = W \cdot f \quad (7)$$

Fra dette kapitlet vil teorien om at arealet til B-H kurven utgjør tapene bli benyttet i beregninger av tap, basert på målte B-H kurver.

2.5 Magnetisk permeabilitet

Den magnetiske permeabiliteten er definert som et materials evne til å magnetiseres.[14] Magnetisk permeabilitet er et materials evne til å magnetiseres i et ytre magnetfelt og avgjør i hvor stor grad et magnetfelt kan trenge inn i et material.[15] Når et magnetisert materiale blir påført en magnetisk feltstyrke H er den resulterende flukstettheten B summen av bidraget fra vakuum og fra materialet. Derav kommer Formel 8. [16]

$$B = \mu_0 H + J = \mu_0 \cdot (H + M) \quad (8)$$

hvor μ_0 er permeabiliteten i vakuum og er konstanten $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [$\frac{Vs}{Am}$]. Den magnetiske polariseringen er representert ved J , mens magnetiseringen er representert ved M . Forholdet mellom flukstettheten B og det påførte magnetiske feltet H kalles absolutt permeabilitet og er gitt ved Formel 9. [16]

$$\frac{B}{H} = \mu_0 \left(1 + \frac{M}{H}\right) = \mu_{absolutt} \quad (9)$$

Den absolutte permeabiliteten uttrykkes vanligvis som produktet av den magnetiske konstanten for vakuum μ_0 and den relative permeabiliteten μ_r , gitt ved Formel 10.[16]

$$\mu_{absolutt} = \frac{B}{H} = \mu_0 \mu_r \quad (10)$$

Den relative permeabiliteten er en materialeegenskap som for vakuum vil være 1. For materialer uten jerninnhold, samt gasser vil den relative permeabiliteten være tilnærmet 1. Jernholdige materialer vil ha en betraktelig høyere og ikke-lineær relativ permeabilitet. Ved høy magnetisk felt styrke H vil materialet vise metning og hysteresese. Den magnetiske permeabiliteten vil få en relativ reduksjon eller økning i det magnetiske feltet dannet i et material sammenlignet med det påtrykte magnetiserte feltet fra omgivelsene.

2.6 Kompleks permeabilitet

Permeabilitet kan representeres som en kompleks størrelse hvor den imaginære delen representerer virvelstrømstapene og hysteretapene som oppstår i ferromagnetiske materialer som utsettes for vekselstrøm(AC). Ved en økning av frekvens vil det induerte feltet øke og tilsvarende virvelstrømmene. Dette vil redusere verdiene av feltet i materialet og materialets effektive permeabilitet. Dersom man neglisjerer tapene i et magnetisk materiale, vil materiale være preget av den reelle delen av permeabiliteten. [9]

Ferritter er en kjemisk forbindelse hvor mange av dem er kjent for ferromagnetisme. Et typisk bruksområde for ferritter er i elimineringen av elektromagnetisk støy på grunn av deres elektromagnetiske interfererte (EMI) skjermingsegenskaper. De magnetiske egenskapene av disse materialene bestemmes i stor grad av den kjemiske sammensettingen, den gjennomsnittlige partikkelstørrelsen og den relative tettheten. Den magnetiske permeabiliteten μ i materialet er en kompleks materialeegenskap som oppstår når det blir påført et magnetiskfelt med vekselstrøm (AC) med vinkelfrekvensen ω på materialet. Dette gjør at et material kan karakteriseres av den komplekse permeabilitet (reell og imaginær del) i henhold til frekvensspektrum, som i litteraturen er kjent som frekvensspredningen av materialet. [17] Den komplekse relative permeabiliteten er gitt av Formel 11.[18]

$$\mu_r = \mu' - j\mu'' \quad (11)$$

Den reelle delen av den komplekse permeabiliteten representerer materialets lagringskapasitet av magnetfelt, mens den imaginære delen representerer effekttap. Den reelle delen relateres til induktans og den imaginære delen til resistans.[19] Det finnes mange ulike tilnærminger for å finne den komplekse permeabiliteten. Den absolutte komplekse permeabiliteten vil være gitt av $\mu_r\mu_0$ som nevnt i Formel 10.

2.7 Studie basert på bruk av kompleks permeabilitet

Det finnes mange tilnærminger for å finne kompleks permeabilitet og det finnes mange bruksområder hvor bruken av kompleks permeabilitet er hensiktsmessig. Et par artikler som har brukt eller funnet kompleks permeabilitet vil bli presentert her.

I artikkelen [14] tar de for seg en tilnærming for modellering av magneto-elastiske oppførsler for et elektrisk stål ved å bruke kompleks permeabilitet. Den komplekse permeabiliteten brukes første gang i denne litteraturen til å modellere effektene av stresset. Artikkelen slår fast at modellen er veldig anvendelig for numeriske analyser og at den reduserer beregningstiden betydelig. Metoden gjelder kun for jevn tilstand eller sykliske felt, og at den kun ivaretar reversible effekter av stress. På tross av dette gir den en alternativ metode for å vurdere magneto-elastisk koblet oppførsel i numerisk analyse av elektriske enheter som involverer magnetiske materialer. Bruken av en kompleks permeabilitet som en tilnærming til å beskrive magnetiske egenskaper er veldig interessant, da de ikke-lineære hysteretiske egenskapene til kjernematerialene blir representert av elliptiske løkker som bruker kompleks permeabilitet.[14] Artikkelen har to tilnærminger for å finne den komplekse permeabiliteten, disse er: [14]:

1. Vurdere en fundamental harmonisk komponent av B og faseforskjellen mellom B og H som hysteresetapsvinkelen. Denne metoden kalles *Fundamental Harmonic Method (FHM)*.
2. Ta i betraktning tapene i kjernen for å beregne den imaginære delen av den ekvivalente komplekse permeabiliteten. Denne metoden beholder også de eksakte verdiene av B_{max} og H_{max} for hysteresekurven. Metoden er kalt *The equivalent core loss approach (ECL)*.

For et ferromagnetisk materiale kan hysteresetapene bli gitt i form av faseforskjellen θ_l mellom B og H . Dette er en representasjon av forsinkelsen i B -responsen til magnetisering H . Artikkelen sier at dersom man setter B og H som fasevektor, kan permeabiliteten bli definert på komplekse form som gitt i Formel 12, hvor θ_l er faseforskjellen mellom B og H . [14]

$$\mu_l = \frac{B}{H} = \mu e^{-j\theta_l} = \mu' - j\mu'' \quad (12)$$

I tillegg til hysteresetap som oppstår ved tidsvarierende magnetiske felt, har man dynamiske tap som virvelstrømstap som gjør den komplekse permeabiliteten frekvensavhengig. Den effektive komplekse permeabiliteten kan da bli gitt som:

$$u_{eff} = u_l \frac{\tanh(1+j)b/\delta}{(1+j)b/\delta} \quad (13)$$

hvor δ er inntrengningsdybden for et elektromagnetisk felt inni en leder og b er bredden til et kvadratisk objekt. Praktiske situasjoner kan avvike fra denne metoden, da standard målesystem vanligvis setter en maksimal verdi for magnetisk flukstetthet (B_{max}) som holdes konstant for målinger ved forskjellige frekvenser. For tilfellet i denne artikkelen beregnes den effektive komplekse permeabiliteten i form av reluktivitet ved å bruke energitapet P per syklus. Flukstettheten kan bli gitt som Formel 14. [14]

$$B = B_{max} e^{j\omega t} \quad (14)$$

Den magnetiske felt styrken (H) kan da bli beregnet ved Formel 15.

$$H = B_{max}(\nu' \cos\omega t + \nu'' \sin\omega t) \quad (15)$$

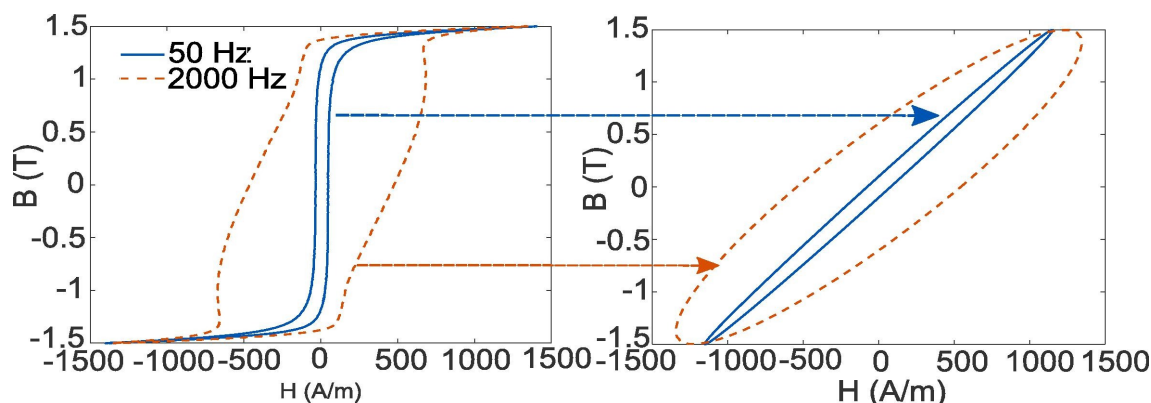
Den imaginære delen av reluktiviteten (ν'') blir utledet til å være gitt av Formel 16 under.

$$\nu'' = \frac{P}{\pi B_{max}^2} \quad (16)$$

Fra forholdet $H_{max} = |\nu| B_{max}$ kan man finne at $|\nu| = \frac{H_{max}}{B_{max}}$ som gjør at man kan beregne den reelle delen av reluktiviteten (ν') ved Formel 17 under.

$$\nu' = \sqrt{|\nu|^2 - \nu''^2} \quad (17)$$

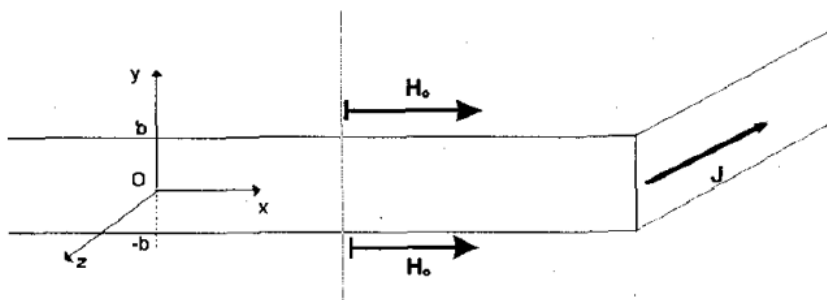
Formel 15 forutsetter ikke at armeringstråden må ha en kvadratisk geometri og metoden vil derfor være gyldig for andre geometrier også. Den komplekse reluktiviteten ble i artikkelen beregnet ved å bruke Formel 16 og 17 for tre datasett med frekvenstap, hvor frekvensene 50, 100 og 2000 Hz benyttes. Reluktiviteten legger videre grunnlag for å beregne den frekvensavhengige effektive komplekse permeabiliteten μ_{eff} . Med denne metoden kan ikke-lineære karakteristikker transformeres til lineære-elliptiske hysteresekurver ved å bruke tilnærmingen som vist i Figur 10 og man kan ved å utføre fremgangsmåten for å finne μ_l finne den tilhørende komplekse permeabiliteten.[14]



Figur 10: Omgjøring av ikke lineær hysteresese karakteristikk til lineære elliptiske hysteresekurver ved 1.5 T. [14]

Artikkelens resultater stemmer godt overens med målte verdier, og har et maksimalt avvik på 2.5% for ulike spenningsnivå og frekvenser. [14] Fremgangsmåtene presentert i denne artikkelen vil bli benyttet i denne avhandlingens beregninger av kompleks permeabilitet.

I [20] var formålet med rapporten å erstatte et ledende material med et ikke ledende hysteretisk material beskrevet av en kompleks permeabilitet. Dette blir gjort for lederne i en transformator og uttrykkende er funnet fra homogeniseringen fra analytiske 1D magnetisk felt kalkulasjoner. Disse kalkulasjonene ble videre implementert i en 2D *finite element* elektromagnetisk felt beregnende programvare. Finite element beregninger av virvelstrømmer ved høye frekvenser for industri transformatorer vil kreve fine mesher for å kunne inkludere skinneffekten skikkelig. Derfor er finite element beregninger urealistisk å bruke på disse transformatorene. Artikkelen mener at disse problemene kan unngås ved å bruke konseptet med kompleks permeabilitet. Kompleks permeabilitet i henhold til x-aksen stammer fra analytiske beregning av magnetfelt i en uendelig ledende plate med et påtrykt homogent harmonisk felt H_0 , dette er vist i Figur 11



Figur 11: Magnetfelt i en uendelig plate med et påtrykt homogent felt H_0 . [20]

For et ledende material er det magnetiske feltet uttrykt ved:

$$H_x(y) = H_0 \frac{\cosh(\alpha y)}{\cosh(\alpha b)}$$

Artikkelen utleder det komplekse tapet til å være gitt av Formel 18 for et ledende material.

$$P = \int_{y=-b}^{+b} \rho dy = \sqrt{\frac{2\mu\omega}{\sigma}} H_0^2 \left(\frac{\sinh(\frac{2b}{\delta}) - \sin(\frac{2b}{\delta})}{\cosh(\frac{2b}{\delta}) + \cos(\frac{2b}{\delta})} + j \frac{\sinh(\frac{2b}{\delta}) + \sin(\frac{2b}{\delta})}{\cosh(\frac{2b}{\delta}) + \cos(\frac{2b}{\delta})} \right) \quad (18)$$

For et ferromagnetisk material er den magnetiske feltstyrken gitt som:

$$H_x(y) = H_0$$

Det komplekse tapet ble da utledet til å være gitt av:

$$P = -Im(\mu^*) 2b\omega H_0^2 + j Re(\mu^*) 2b\omega H_0^2 \quad (19)$$

dersom man setter Formel 18 lik Formel 19 får man den Reelle $Re(\mu_x^*)$ og den imaginære delen $Im(\mu_x^*)$ av den komplekse permeabiliteten i henholdsvis Formel 20 og 21.

$$Re(\mu_x^*) = \frac{\mu\delta}{2b} \left(\frac{\sinh(\frac{2b}{\delta}) + \sin(\frac{2b}{\delta})}{\cosh(\frac{2b}{\delta}) + \cos(\frac{2b}{\delta})} \right) \quad (20)$$

$$Im(\mu_x^*) = -\frac{\mu\delta}{2b} \left(\frac{\sinh(\frac{2b}{\delta}) - \sin(\frac{2b}{\delta})}{\cosh(\frac{2b}{\delta}) + \cos(\frac{2b}{\delta})} \right) \quad (21)$$

Det ble konkludert med at de teoretiske testene besto, mens de første industrielle studiene påpekte at dempingsfaktorene til resonans-modusene er for svake. Derfor vil forbedringer ved høyfrekvente transformatorer være avhengig av videre forskning på beregningene av taps matrisene.[20]

I rapporten [21] sees det på elektromagnetisk modellering for måling og estimering av kompleks relativ permeabilitet for magnetisk stål. Hovedapplikasjonen av den komplekse relative permeabiliteten er estimering av elektromagnetiske material parameterne til armeringstrådene brukt for HVAC-kabler. Rapporten viser også hvordan man kan estimere kompleks permeabilitet når det er en kraftig skinneffekt til stede. Dette ble gjort ved å bruke en transformator spole bygget rundt det magnetiske stålet som skal testes. Det blir videre brukt numeriske modeller basert på bølgeleder teori og kompleks analyse. De numeriske beregningene er basert på Finite Element Metoden (FEM) ved å bruke programvaren COMSOL, som brukes til å fastslå når randvirkningen kan ignoreres i de forenklete analytiske formlene. [21] Det konkluderes med at numeriske beregninger i COMSOL vil være upraktisk når man bruker estimeringsalgoritmen på grunn av stor beregningstid, men at det er nødvendig for å kunne fastslå når randvirkningene kan ignoreres i den forenklete analytiske modellen.

I artikkelen [22] blir det foreslått en innovativ 3D-tilnærming for å beregne elektromagnetiske

tap de metalliske armeringstrådene, som man finner i sjøkabler, på en rask og effektiv måte. Armeringene er vanligvis bestående av et ferromagnetisk material som har en ikke-lineær elektromagnetisk oppførsel som gir en påvirkning av hysteresese. En ikke-lineær FEM-simulering i tidsdomene vil være nødvendig for å inkludere hysteresen på riktig måte. Dette vil medføre at analysene vil kreve større beregningskostnader. Derfor blir det i artikkelen benyttet en tilnærming som inkluderer en kompleks permeabilitet for å ta hensyn til påvirkningen av hysteresese. Ved å bruke denne tilnærmingen vil en enkel, lineær og tidsharmonisk FEM-simulering vær nok for å analysere kabelens oppførsel. For å utvikle en effektiv tilnærming med hensyn på de typisk mest brukte FEM 3D-simuleringsmetodene, blir det foreslått en passende utledning av en integrert formulering. Tilnærmingen er anvendelig for både motsatt orienterte og samme orienterte tvinninger av armeringstrådene i henhold til faselederne. Denne metoden viser seg å være svært effektiv i tilfeller med veldig store geometriske parametere og kompliserte geometriske oppbygninger, hvor FEM-simuleringer vil være svært tungvint og tidkrevende. Tilnærmingen gir en reduksjon i både beregningstid, samtidig som det reduserer minneforbruk som gjør det mulig å gjøre kompliserte sensitivitetsstudier med hensyn på geometriske parametere og materialets egenskaper som ellers ville vært uoverkommelig med eksisterende 3D-metoder.[22]

I artikkelen [23] blir det for å analysere skinn- og nærhetseffekt i flergjenget(multiturn) spoler i store ligningssystemer, som krever lang beregningstid, foreslått en semi-analytisk tilnærming. I analysen av nærhetseffekten blir et rundt ledene materials komplekse permeabilitet representert i lukket form når det blir påtrykt et uniformt harmonisk magnetisk felt på materialet. Formelen artikkelen bruker til å finne den komplekse permeabiliteten for en isolert rund tråd er gitt i Formel 22. Denne formelen er gyldig ved antagelsen om at det eksterne magnetiske feltet er uniformt.

$$\mu_r = \mu_r \frac{J_1(z)}{zJ_1'(z)} \quad (22)$$

Her er J_1 Bessel funksjon av den første typen og $zJ_1'(z)$ kan skrives som $zJ_0(z) - J_1(z)$. z er gitt av $r\sqrt{-j\omega\sigma\mu}$ hvor r er trådens radius. Videre blir den homogeniserte komplekse permeabiliteten over tverrsnittet av spolen analytisk evaluert ved å bruke Ollendorff formelen.[23] Den homogeniserte komplekse permeabiliteten til flergjenget spoler er avhengig av konduktiviteten, den relative permeabiliteten og volumfraksjonen. Skinneffekten blir analysert ved å bruke en impedans i kretsligningene. Denne metoden for å analysere skinn- og nærhetseffekt er vist å gi impedans til flergjenget spoler som samsvarer med konvensjonelle FEM-beregninger.[23]

2.8 Beregning av tap

2.8.1 Tapsberegning i henhold til standarden

IEC 60287-1-1 [24] standarden oppgir formler for å estimere armeringtap. Flere studier påpeker at beregninger basert på standardens formler resulterer i betydelig overestimering av armeringstapene. Konsekvensen av overestimeringer er at det blir benyttet større kabler. Derfor vil mer presise tilnærminger for beregning av armeringstap føre til redusert ledertverrsnitt og konsekvent kabel størrelsen og prisen på kabel. [4]

IEC 60287-1-1 gir formler for å beregne effekttapene i ulike deler av kabelen som lederne, skjermene eller armeringene. Det blir oppgitt ulike formler avhengig av kabeltype, og for tre-leder sjøkabler er armeringstapene gitt som en fraksjon av de resistive ledertapene ved maksimum temperatur av koeffisienten λ_2 :[\[24\]](#)

$$\lambda_2 = 1.23 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2c}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2.77 R_A 10^6}{\omega} \right)^2 + 1} \quad (23)$$

Her er R_A og R henholdsvis armeringens og lederens AC resistans, d_A er gjennomsnittets diameter for armeringen, c er distansen mellom aksene for lederne og aksene til tre-leder kabelen (mm) og ω er systemets vinkelfrekvens. Dersom disse sjøkablene har individuelle skjermene, vil skjermvirkningen redusere armeringstapene. Derfor må den gitte λ_2 bli multiplisert med den korrigerende faktoren under: [\[24\]](#)

$$\left(1 - \frac{R}{R_s} \lambda_1' \right) \quad (24)$$

hvor da R_s er skjermens AC resistans og λ_1' er forholdet mellom tap i en skjerm grunnet sirkulerende strømmer og tapene i en leder.[\[24\]](#)

2.8.2 Analytisk beregning av tap

I [\[22\]](#) utføres tapsberegninger for en stål-armeringstråd. Denne artikkelen tar for seg tapene for en armeringstråd som utsettes for et uniformt tidsharmonisk magnetisk felt H_0 . Dette feltet kan dekomponeres inn i H^{\parallel} og H^{\perp} som er henholdsvis det magnetiske feltet som er parallelt med tråden og normalt på tråden. Det eksterne magnetiske feltet genererer tap i tråden, hvor det totale tapet P er summen av det resistive tapet P_r og hysteretapet P_h . Merk at i formlene nedenfor står det kr og $k * r$. Forskjellen på dem er at $k * r$ er den konjugerte av kr . Formlene for det parallell- og det normale totale tapet ble utledet til Formel 25 og 26.[\[22\]](#)

$$P^{\parallel} = \frac{2\pi}{\sigma} \frac{\text{Re}[-kr J_0(k*r) J_1(kr)]}{|J_0(kr)|^2} |\mathbf{H}_0^{\parallel}|^2 \quad (25)$$

$$P^{\perp} = \frac{16\pi}{\sigma} \frac{\text{Re}[-kr J_1(kr) J_1'(k*r)]}{|F(kr)|^2} |\mathbf{H}_0^{\perp}|^2 \quad (26)$$

Her er H RMS-verdien av den påtrykte magnetiske feltstyrken, J_0 og J_1 er henholdsvis Bessel funksjonen av første typen i nulte og første orden, σ er konduktiviteten, r er objektets radius og k er gitt som:

$$k = j \sqrt{j\omega\sigma\mu_0\mu_r}$$

Det resistive tapet er utledet til å være gitt av Formel 27 og 28 forårsaket av henholdsvis et parallelt og et normalt H-felt.

$$P_r^{\parallel} = \frac{2\pi}{\sigma} \frac{|k|^2}{|J_0(kr)|^2} \frac{\text{Im}(k^* r J_0(k^* r) J_1(kr))}{\text{Im}(k^2)} |\mathbf{H}_0^{\parallel}|^2 \quad (27)$$

$$P_r^{\perp} = \frac{16\pi}{\sigma} \frac{|k|^2}{|F(kr)|^2} \frac{\text{Im}(k^* r J_0(k^* r) J_1(kr))}{\text{Im}(k^2)} |\mathbf{H}_0^{\perp}|^2 \quad (28)$$

Dersom man antar at de totale tapene består av kun hysterese- og virvelstrømstap vil hysterese- og virvelstrømstapet være gitt av differansen mellom P og P_r . Formlene for dette er gitt av Formel 29 for et parallelt H-felt og av Formel 30 for et normalt H-felt.[22]

$$P_h^{\parallel} = P^{\parallel} - P_r^{\parallel} \quad (29)$$

$$P_h^{\perp} = P^{\perp} - P_r^{\perp} \quad (30)$$

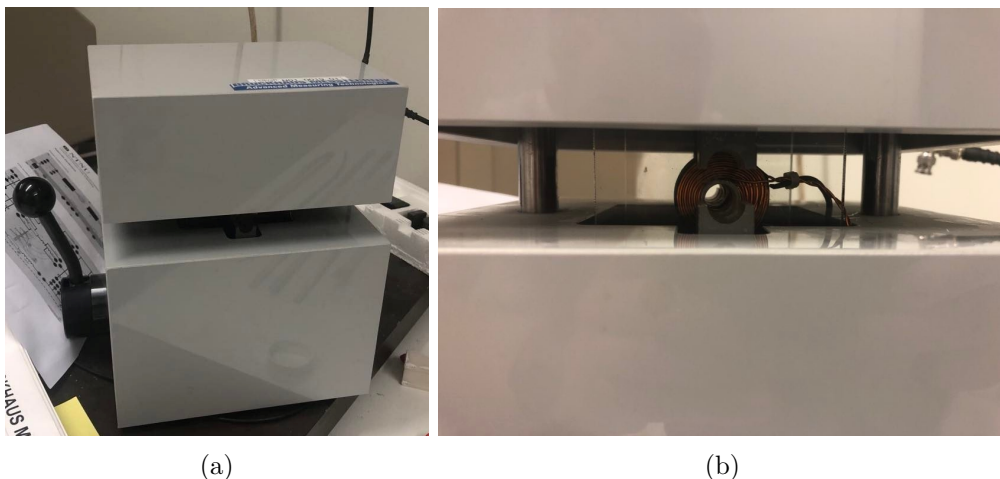
Fra dette kapitlet er det bare formelene for parallelt H-felt som vil bli benyttet i de analytiske beregningene.

2.9 Brockhaus måleinstrument

Modell MPG 100 av Brockhaus måleinstrumentet kan benyttes til å definere et elektrisk materials magnetiske egenskaper. Det er mulig å operere instrumentet med ulike spolesystem og den tilhørende programvaren MGP 100D gjør det mulig å koble seks målende spolesystem samtidig. Det er tilgjengelig ulike forsterkere for å forsyne målespole-systemene og måleprosessen utføres med et fullstendig digitalisert datafangstsystem.[25] Figur 36a og 36b i Vedlegg 1 viser henholdsvis koblingsoppsettet og instrumentet. Kunnskapen om instrumentet er hentet fra brukermanualen[25], via kommunikasjon med Brockhaus support og basert på egne erfaringer. Det ble også under læreprosessen laget en selvskreven brukermanual som kan finnes i Vedlegg 6.

2.9.1 Generell info

Det benyttes SST (Single sheet tester) målingssensorer som er doble spolesystem. Dette finnes ulike dimensjoner og antall viklinger av SST målingssensoren som er optimalisert og er utformet i henhold til de målekravene i IEC-standard 60404-3. Både det primære og sekundære spolesystemet omfavner testobjektet og lukker den magnetiske kretsen. Magnetfeltet blir bestemt ved å måle feltstrømmen ved å bruke en presisjonsmotstand. Konstruksjonsprinsippet i kombinasjon med den mekaniske presisjonen på SST-målesensorene garanterer høy presisjon på målingene. To av SST spolesystemene som er tilgjengelig på NTNU er *SST10x150* og *SST50x150*. I Figur 12 er spolesystemet SST10x150 vist, hvor Figur 12a er måleboksen og Figur 12b er spolen.



Figur 12: Måleboksen (a) og spolen (b) for spolesystemet SST10x150.

Figur 13 under viser spolesystemet SST50x150, hvor måleboksen er gitt i Figur 13a og spolen er gitt i Figur 13b.



Figur 13: Måleboksen (a) og spolen (b) for spolesystemet SST50x150.

For runde testobjekter benyttes spolesystemet *SST 10x150*, mens det for rektangulære testobjekter benyttes *SST 50x150*. Spolesystemene parametere er gitt i Tabell 1 under.

Tabell 1: Spoleparameterne for SST50x150 og SST10x150.

	SST 50x150	SST 10x150
Antall primær vindinger	150	900
Antall sekundær vindinger	150	900
Magnet lengde [mm]	109	85
Antall vindinger for felt spolen	10	10
Tversnittet av feltspolen [mm ²]	10	10
Verdi for degmagnetisering [A/m]	1000	1000
Maks strøm [A]	2	2

Den magnetiske lengden er satt til å være 85mm av produsenten. Det er mulig å kontrollere både B- og H-feltet, men det er satt et par grensebetingelser i programvaren. Instrumentet vil ikke overskride en strøm på 2 A, det maksimale H-feltet er 30 000 A/m og maksimal magnetisk flukstetthet er 2 T. Ulempen med å kontrollere B-feltet er at strømmen som kreves for å oppnå det ønskede B-feltet er avhengig av materialet. Dette kan medføre at man overskrider de maksimalt tillatte 2 A. En måte å sjekke dette på er å utføre tester ved å kontrollere H-feltet først, da det er lettere å kontrollere den magnetiske feltstyrken enn flukstettheten. Ulempen ved å kontrollere H-feltet er at programvaren ikke klarer å separere de totale tapene riktig inn i hysteres- og virvelstrømstap. Dette klarer programvaren derimot ved å kontrollere B-feltet. Tapene instrumentet gir ut er gitt i W/kg.

2.9.2 Målemetodikk benyttet av Brockhaus måleinstrumentet

For å måle de magnetiske egenskapene må en prøve av et material bli utsatt for et forhånds definert magnetisk felt i et tilpasset spolesystem. I spole systemet skaper primærviklingene et magnetisk felt som skaper en magnetisk fluks i test-materialet. Det magnetiske feltet er definert ved Formel 31 som avhenger av strømmen $I(t)$, antall vindinger N_1 og den magnetiske lengden av spolen l_m . [25]

$$H(t) = \frac{N_1 I(t)}{l_m} \quad (31)$$

Den nødvendige strømmen blir tilført via en forsterker og blir målt med en presisjons-motstand (shunt) som er uavhengig av temperaturendringer og er fri for induksjon eller felt fra spolene. Spenningen som brukes blir digitalisert med et datafangstsystem via et tilstrekkelig antall støttepunkter på banen til primærsignalet. En automatisk dynamisk justering gjør det mulig å få presise spenningsmålinger med en digital oppløsning på 16 Bit. Den 16 Bit prosessoren konverterer den målte spenningen til magnetisk feltstyrke, eller konverterer feltet til primærstrøm. [25]

$$H(t) = \frac{N_1}{R_n l_m} u_1(t) \rightarrow H_i = \frac{N_1}{R_n l_m} u_{1_i} \quad (32)$$

Med et videre data målingssystem blir den magnetiske fluksen eller polariseringen J målt. Polariseringen blir bestemt ved å måle den induserte spenningen i sekundærvindingene i spolesystemet. [25]

$$\frac{dJ}{dt} = \frac{-u_2(t)}{N_2 A_m} \rightarrow J(t) = -\frac{1}{N_2 A_m} \int_0^t u_2(t) dt \quad (33)$$

Den sekundære spenningen er på samme måte som primær spenningen digitalisert med automatisk dynamisk justering. Beregning og integrering blir gjort av den 16 Bit prosessoren. En parallell måling av H- og B-verdiene med to separate systemer garanterer absolutte samtidige målinger. Dette fører til at man unngår målingsfeil grunnet faseforskjeller. [25]

Alle de nevnte verdiene blir målt av prosessor systemet fra differensierte og integrerte måleverdier. Siden det ikke er feilkilder som analoge multiplikatorer og integratorer, er prosessen lett repeterbar og dette garanterer en drift fri langtidsstabilitet. Målingene utføres med sinusformet polarisering og er forskrevet av de tilsvarende forskriftene i DIN nr. 50 462. Derfor må

sekundærspenningen også være sinusformet. Spolesystemet har imidlertid ikke lineær overføring og en styrekrets for primærsignalet er nødvendig for å bestemme formen på sekundær-signalet. Styrealgoritmen tester formen til sekundær-signalet og styrer forsterkeren på en slik måte at sekundærspenningen er sinusformet.[25]

Målingsspenningen skapes ved hjelp av en ekstremt stabil, quartz-styrt og digital sinusgenerator. Med dette opprettholdes en høy stabilitet av både amplitude og frekvens. Dette ville ikke vært mulig uten den ekstremt nøyaktige justeringen og målingen oppnådd med *Brockhaus Messtechnik*. Amplituden og frekvensen til prosessoren blir justert med hensyn til prøvedata som for eksempel vekt, tetthet og ønsket frekvens, som blir lagt inn via det opererende programmet. [25]

2.9.3 Brockhaus metode for beregning og separering av tap

For å beregne det spesifikke totaltapet P_s [$\frac{W}{kg}$] for et magnetisk materiale blir det brukt punktvis multiplisering for u_{2j} og u_{1j} verdiene og summering over en magnetiseringens periode T . Hvor u_2 er sekundær spenningen og u_1 er spenningsfallet over den induktansfrie motstanden R som er i serie med primær vindingen. Dette er gitt ved Formel 34 [25]

$$P_s = \frac{N_1}{l_m R N_2 A \rho_m} \frac{1}{T} \int_{t=0}^T U_1(t) U_2(t) dt \equiv \frac{N_1}{l_m R N_2 A \rho_m} \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} u_{1j} u_{2j} \quad (34)$$

hvor N_1 og N_2 er henholdsvis antallet vindinger for primær- og sekundærvindingen, l_m er den konvensjonelle effektive magnetiske lengden (0.085m), ρ_m er den konvensjonelle tettheten for test-materialet [$\frac{kg}{m^3}$], og A er arealet til testobjektet.[26][25]

Tapet kan beregnes basert på det magnetiske arealet, altså vekt, tetthet og lengde, eller dersom ingen av disse er gitt kan man bruke bredden og tykkelsen eller diameteren til testobjektet. Ved å bruke vekt, tetthet og lengde vil man få mest nøyaktige resultater. Lengden på målingene er definert som lengden mellom de indre sidene på spolen og ikke trållengden. Instrumentet har ikke mulighet til å måle hysteres og virvelstrømstapene direkte, men med tilnærminger som Steinmetz og Bertotti kan man beregne dem. Instrumentets programvare benytter en enkel tilnærming som ekstrapolerer tapene til 0 Hz for ulike frekvenser (f) med antagelse om at virvelstrømstapene endres proporsjonalt med f^2 og at hysteresetapene endres proporsjonalt med f . [25]

3 Armeringstrådene brukt i målingene

Til denne rapporten har *NEXANS Norway* sendt 9 armeringstråder med ulike geometrier, dimensjoner og graderinger. Informasjonen om armeringstrådene er samlet i Tabell 2. Det er også lagt inn hyperkobling til bilder av de ubehandlede armeringstrådene fra Vedlegg 2 i Tabellen.

Tabell 2: Armeringstrådenes nummerering, ståltyper og dimensjoner.

Armeringstråd	Ståltype	Dimensjoner(tverrsnitt)	Bilde referanser
0	GR34	Ø5.6 mm	37
1	GR34	Ø6 mm	38
2	GR34	Ø5 mm	39
3	GR65	Ø5 mm	40
4	GR65	10.5 mm x 3 mm	41
5	GR95	9 mm x 3 mm	42
6	GR105	9 mm x 3 mm	43
7	GR125	9 mm x 3 mm	44
8	Bezinox (a-magnetisk)	Ø5mm	45

Da spole systemet *SST 10x150* er 13 cm langt og *SST 50x150* er 15 cm lang ble armeringstrådene kortet ned til disse lengdene. Det ble deretter gjort målinger av vekten, diameteren og lengden for armeringstrådene. Vekten og de geometriske dimensjonene for de runde armeringstrådene er gitt i Tabell 3.

Tabell 3: Data brukt for runde armeringstråder i Brockhaus.

	Tråd 0	Tråd 1	Tråd 2	Tråd 3	Tråd 8
Trådens vekt [g] uten hylse	28	28	20	18	18
Trådens massetetthet [g/cm^3]	8.7448	7.6177	7.8353	7.0518	7.0518
Trådens lengde [mm]	130	130	130	130	130
Trådens diameter [mm]	5.6	6	5	5	5

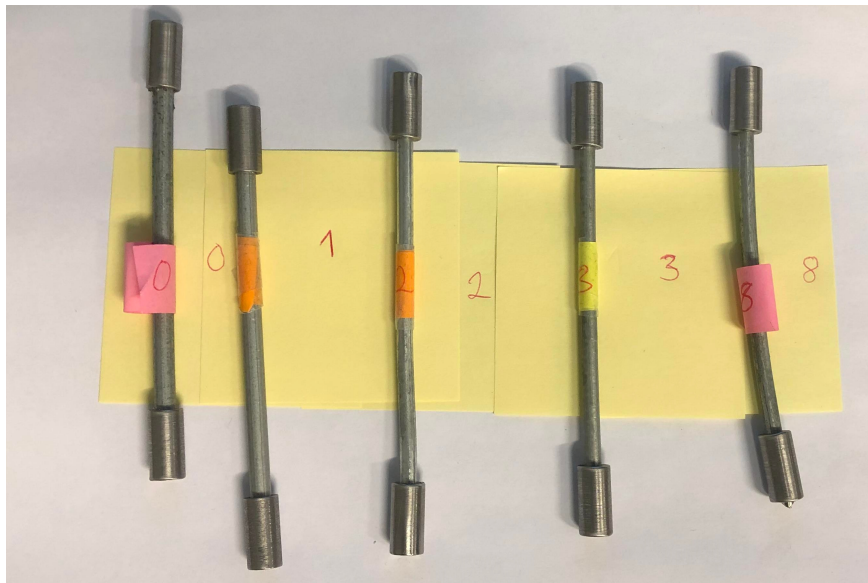
Lengden, bredden, vekten, tykkelsen og massetettheten for de flate trådene er gitt i Tabell 4.

Tabell 4: Data brukt for flate armeringstråder i Brockhaus.

	Tråd 4	Tråd 5	Tråd 6	Tråd 7
Trådens vekt [g]	34	28	28	28
Tråden massetetthet [g/cm^3]	7,1958	6.9136	6.9136	6.9136
Trådens lengde [mm]	150	150	150	150
Trådens bredde [mm]	10.5	9	9	9
Trådens tykkelse [μm]	3000	3000	3000	3000

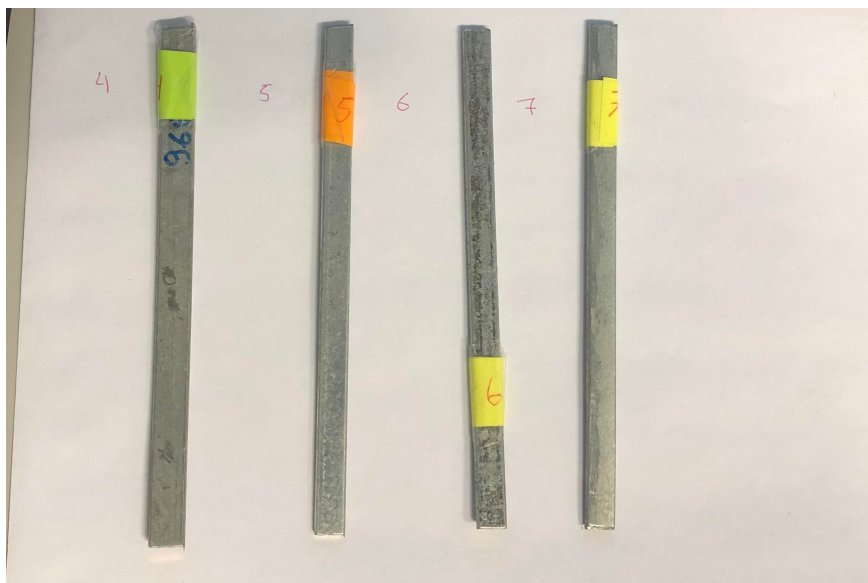
SST10x150 systemet, som er vist i Figur 12b, har en rund åpning med diameter på 10mm, og armeringstrådene har en diameter på maksimalt 6mm. Dette gjør at måleinstrumentet ikke vil få full kontakt med armeringstrådene. Det ble derfor montert på en hylse på hver av sidene til alle de runde armeringstrådene. Hylsene var av et magnetisk metall-materiale og ble montert på for å sørge for å få fullkontakt mellom armeringstrådene og måleinstrumentet. Ved monteringen

av hylsene var det veldig viktig å unngå luftgap mellom hylsen og armeringstråden da dette ville gitt feilaktig tapsmålinger. De runde armeringstrådene er vist i Figur 14 under.



Figur 14: De runde armeringstrådene 0, 1, 2, 3 og 8.

For de rektangulære armeringstrådene var det ikke nødvendig med hylser da systemet SST50x150 som er brukt for de rektangulære armeringstrådene, som er vist i Figur 13b, har en kvadratisk åpning og at systemet kan senkes ned til armeringstråden og oppnå fullkontakt. Et bilde av de flate armeringstrådene etter de var ferdig behandlet er gitt i Figur 15 under.



Figur 15: De flate armeringstrådene 4, 5, 6 og 7.

4 Metodikk for måling og beregning av tap

I dette avsnittet vil metodikken brukt for å måle, separere og beregne totalt tap bli presentert. Først blir måleoppsettet og målemetodene gjort ved bruk av Brockhaus måleinstrumentet beskrevet. De første målingene baserer seg på å definere magnetiske flukstettheter (B) og frekvenser, hvor disse målingene brukes i et arbeid for å analytisk separere de totale tapene inn i hysteres- og virvelstrømstap. De andre målingene baserer seg på å definere magnetiske feltstyrker (H) og frekvenser, hvor disse målingene brukes i et arbeid for å sammenligne målte totale tap med analytisk beregna og FEM-beregna totale tap. De beregna tapene blir funnet for et ledende materiale erstattet av et ikke ledende material beskrevet av en kompleks permeabilitet. Den komplekse permeabiliteten blir først funnet ved å optimalisere faseforskjellen mellom B og H , mens den andre baserer seg på å analytisk finne faseforskjellen mellom B og H . Det blir også utført beregning av B - H kurvenes areal for å se om arealet samsvarer med det totale tapet.

4.1 Målinger gjort med Brockhaus måleinstrument

Det ble utført fysiske målinger på de ni armeringstrådene ved å bruke *Brockhaus messtechnik*. Oppsettet og målingene er utført i henhold til manualen [25] og den erfaringsbaserte selvskrivne brukermanualen i Vedlegg 6.

Det ble først utført forberedelser i den tilhørende programvaren *MPG-Expert*. Det var her mulig å velge mellom å bruke ring, stav eller kappe. Det ble benyttet kappe for de rektangulære armeringstrådene, mens det ble benyttet stav for de runde armeringstrådene. Fra verdiene for de runde armeringstrådene gitt i Tabell 3 på side 21 ble det innsatt parametere for vekt(g), lengde(mm) og massetetthet(g/cm^3). Den fjerde parameteren, diameter, ble stående åpen. Fra erfaring ble det funnet ut at instrumentet beregner diameteren selv. Verdiene for flate tråder, gitt i Tabell 4 på side 21, ble det innsatt verdi for vekt, massetetthet, lengde, tykkelse og bredde.

Det ble deretter valgt spolesystem, hvor *SST 10x150* ble benyttet for de runde armeringstrådene, mens *SST 50x150* ble benyttet for de rektangulære armeringstrådene. Spole systemene *SST 10x150* og *SST 50x150* er henholdsvis vist i Figur 12 og 13 på side 18 og 18, hvor Figurene 12a og 13a er bilder av måleboksene og Figurene 12b og 13b er bilder av spolene.

4.1.1 Målinger med hensyn på magnetisk flukstetthet

Det ble først utført målinger på armeringstråd 1, 2, 3, 4, 5, 6 og 7 ved å spesifisere frekvens og B -felt. Målingene ble gjort for å kunne utføre analytiske beregninger for separering av tap. Da den ikke-magnetiske armeringstråden ga ut ugyldig separering fra målingene ble det valgt å ikke inkludere armeringstråd 8 i denne delen. Instrumentet måler magnetiske flukstetthet (B) og påtrykker magnetisk felt styrke (H), som vil si at instrumentet øker feltstyrken til det ønskede B -feltet oppnås. Det ønskede magnetiske flukstettheten ble satt til å starte på 50 mT og stige med 50 mT frem til den oppnådde 700 mT. Det ble laget en løkke slik at denne prosessen ble gjort for frekvensene 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 og 100 Hz. Instrumentet fant da det totale tapet i armeringstråden og brukte enkle tilnærminger til å separere det totale tapet inn i hysteres- og virvelstrømstap. Målingene benyttes videre i kapittelet hvor det totale tapet separeres analytisk.

4.1.2 Målinger med hensyn på magnetisk feltstyrke

Det ble utført målinger hvor frekvens og magnetisk feltstyrke ble definert. Disse målingene ble bare utført for de runde armeringstrådene. Da man ved å definere H-feltet ikke får ut riktig verdier for hysteres- og virvelstrømstap, var det bare interessant å se på de totale tapene. Den magnetiske feltstyrken ble satt til å starte på $100 \frac{A}{m}$ med intervaller på $100 \frac{A}{m}$ frem til den oppnådde $5000 \frac{A}{m}$. Denne prosessen ble gjort i løkker med tre ulike frekvenser, disse var 40 Hz, 50 Hz og 60 Hz. Det er interessant å gjør målinger ved ulike frekvenser da det i dag kan brukes andre frekvenser enn driftsfrekvensen på 50 Hz til å overføre strøm mellom offshore plattformen og fastland. Instrumentet ga da ut de totale tapene, den relative permeabiliteten og hysteresekurvene for hvert intervall. Målingene ble videre brukt i de analytiske og FEM-baserte beregningene, og sammenligne de beregna totale tapene ved å benytte en kompleks permeabilitet med målte totale tap.

4.2 Separering av totalt tap

Da det var mistanke om at måleinstrumentet brukte standardiserte koeffisienter for å separere tapene ble det utført analytiske beregninger for å separere de totale tapene. Hensikten var å sammenligne analytiske beregninger oppimot de separerte tapene Brockhaus måleinstrumentet beregnet. Dersom instrumentet bruker standardiserte koeffisienter vil de separerte tapene fra målingene på enkelte metall bli presise og stemme med de faktiske forholdene, mens andre vil avvike fra de faktiske forholdene. Det er derfor interessant å separere tapene analytiske for å se hvordan instrumentet separerer tap og samtidig se om det er tydelige avvik.

I slike analyser er man nødt til å stole på at målte verdier er riktige, men heller stille seg kritisk til verdier instrumentet beregner selv. Derfor ble det antatt at den magnetiske feltstyrken, det magnetiske feltet og de totale tapene $P_s[W/kg]$ gitt av instrumentet var riktige. Med dette som utgangspunkt var det mulig å separere de totale tapene med analytiske formler. Separeringen ble gjort i henhold til metoden beskrevet i kapittel 2.3 på side 5 og kildene [11] og [7].

Det ble først utført målinger på de magnetiske armeringstrådene med frekvensene 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 og 100 Hz for hver 50 mT mellom 50-700 mT. Disse målingene ble beskrevet i kapittel 4.1.1 på side 23. For hver av armeringstrådene ble det målte totale tapet dividert med den tilhørende frekvensen og deretter plottet i et diagram som funksjon av frekvens. En lineær regresjon ble videre gjort for punktene som ga mulighet for å finne stigningstallet og skjæringspunktet. Når dette var gjort for alle frekvensene var det mulig å finne skjæringspunktet ($h \cdot B_{Max}^x$) og stigningen ($ec \cdot B_{Max}^y$) som er vist i Figur 5 på side 7. Fra dette ble det laget et diagram hvor y-aksen er representert av $Ln(\frac{W_h}{f})$ som funksjon av $Ln(B_{Max})$, etterfulgt av en ny lineær regresjon for punktene. Dette ble brukt til å beregne hysteresetaps koeffisientene h og x , hvor h er gitt av eksponential funksjonen av skjæringspunktet og x er gitt som stigningstallet.

Det ble videre utført tilnærminger for å finne virvelstrømskoeffisientene. Dette ble gjort ved å lage et diagram hvor y-aksen er gitt av $Ln(Slope)$ som funksjon av $Ln(B_{Max})$ og en lineær regresjon ble utført i henhold til punktene. $Ln(ec)$ vil da være gitt ved å finne skjæringspunktet til den lineære linjen og y vil være gitt av stigningstallet.

Til slutt ble verdiene for koeffisientene satt inn i Formel 2 og det ble satt inn ulike frekvenser

og maksimale flukstettheter for å sammenligne de målte separerte tapene med de beregna separerte tapene. Dette ble gjort for frekvensene 30, 50, 70 og 80 Hz ved de maksimale magnetiske flukstetthetene 100, 400 og 600 mT.

4.3 Beregning av kompleks permeabilitet

Det ble utført tre ulike metoder for å beregne kompleks permeabilitet for de runde armeringstrådene, det vil si armeringstråd 0, 1, 2, 3 og 8. Alle metodene er basert på å finne faseforskjellen mellom B og H, og metodene er beskrevet under:

1. *Optimalisert* - Finne kompleks permeabilitet fra Formel 12 ved å optimalisere faseforskjellen θ mellom B og H slik at differansen mellom de totale tapene gitt av målingene og de beregna tapene funnet fra Formel 25 blir tilnærmet null.
2. *Målt* - Finne kompleks permeabilitet fra Formel 12 ved å analytisk finne faseforskjellen θ mellom B_{min} og H_{min} basert på B-H kurvene fått fra målingene.
3. *Transformert* - Finne kompleks permeabilitet fra Formel 12 ved å analytisk finne faseforskjellen θ mellom B_{min} og H_{min} basert på de transformerte B-H kurvene ved å finne reluktiviteten.

Alle metodene bruker resultatet fra målingene gjort i kapittel 4.1.2 hvor det ble gjort målinger ved 40 Hz, 50 Hz og 60 Hz, og feltstyrker fra 100 A/m til 5000 A/m. Fra målingene ble den maksimale feltstyrken, det totale tapet og den relative permeabiliteten hentet ut. I henhold til Formel 12 er absoluttverdien gitt av forholdet mellom B og H og vinkelen er faseforskyvningen mellom B og H. Og fra Formel 10 ser man at $\frac{B}{H} = \mu_0 \mu_r$, som gjør at absolutt verdien i Formel 12 vil være den relative permeabiliteten måleinstrumentet utgav. Derfor er det bare vinkelen, dvs. faseforskjellen mellom B og H, som er ukjent. Alle beregningene her er utført med konduktiviteten (σ) tilnærmet $0 \Omega^{-1}$. Med hensyn til at konduktiviteten skulle inn i COMSOL ble det sjekket at løsningen konvergente. Løsningen konvergente ved σ lik $0.1 \Omega^{-1}$ for armeringstråd 0, 1, 2 og 3, mens for armeringstråd 8 måtte konduktiviteten settes til $100 \Omega^{-1}$. Det er bare benyttet formler for et påtrykt H-felt parallelt med armeringstrådene, da Brockhaus instrumentet bare påtrykker H-felt parallelt med armeringstrådene.

4.3.1 Optimalisering av kompleks permeabilitet

Ideen bak optimaliseringen var å finne den faseforskjellen som ga den minste differansen mellom det målte og det beregna totale tapet. Denne tilnærmingen er gitt i Formel 35, hvor $P_{Tot}^{Beregnet}$ er gitt av Formel 25 fra kapittel 2.8 på side 16 og $P_{Tot}^{Målt}$ er det målte totale tapet. Ved å sette vinkelen inn i Formel 12 vil man få den komplekse permeabiliteten.

$$P_{Tot}^{Beregnet} - P_{Tot}^{Målt} \approx 0 \quad (35)$$

Først ble målingene importert til et Matlab-script, hvor den maksimale feltstyrken (H), den relative permeabiliteten (μ_r) og det totale tapet ble hentet ut. Deretter ble det laget en funksjon

for Formel 35, hvor den eneste ukjente er vinkelen θ og konduktiviteten er satt til å være lik $0.1 \Omega^{-1}$ for armeringstråd 0, 1, 2 og 3, mens for armeringstråd 8 måtte konduktiviteten settes til $100 \Omega^{-1}$. Det er viktig å påpeke at Formel 25 krever H_{rms} . Det ble videre brukt en innebygd ubegrenset multivariabel funksjonen *fminsearch* i Matlab. Denne funksjonen finner minimum verdier for variabler ved å bruk en derivatfri metode. De derivatfrie metodene krever ikke eksplisitte beregninger av gradienter og benytter bare verdiene som er hentet fra funksjonsevalueringer[27]. I denne funksjonen er det nødvendig å legge i en funksjon som man ønsker skal bli minst mulig ved å variere på en ukjent. Det ble satt inn en ønsket initialverdi X_0 og da det var ønskelig å finne den minste vinkelen ble denne satt til å være 0. Når denne funksjonen ble beregnet fikk man ut X , som er vinkelen, i radianer og *fval* som er verdien man får dersom man setter X inn i Formel 35.

Ved å sette inn vinkelen for θ i Formel 12 får man ut den tilhørende komplekse permeabiliteten. Denne prosessen utføres for alle de runde armeringstrådene med 40 Hz, 50 Hz og 60 Hz, og for hvert 100 A/m intervall med magnetisk feltstyrke mellom 100-5000 A/m. For alle disse komplekse permeabilitetene ble den reelle og imaginære delen plottet som funksjon av påtrykt H-felt.

4.3.2 Analytisk beregning av kompleks permeabilitet

Fremgangsmåten som ble valgt å benytte i den analytiske beregningen av kompleks permeabilitet er hentet fra kilden [14] og formelen benyttet er Formel 12. Denne fremgangsmåten er presentert i kapittel 2.7 på side 2.7. Valget av formel er basert på at μ_l representerer hystereseetapene og at det ved $\sigma = 0$ ikke vil finnes resistive tap (virvelstrømstap). I dette tilfellet vil da det totale beregna tapet være gitt av hystereseetapet. I et reelt tilfelle ville ikke $\sigma = 0$, men denne rapporten baserer seg på en tilnærming for å finne de totale tapene.

Først ble et forsøk på å finne vinkelen basert på B-H kurvene utgitt fra målingene utført. Det ble laget et Matlab-script for å finne faseforskjellen θ mellom B og H. Først blir resultatene importert til Matlab, hvor den relative permeabiliteten og B-H kurvene blir hentet ut. Hver B-H kurve består av 421 målepunkter. Deretter plottes B og H fra B-H kurvene som funksjon av tid, hvor tidsintervallet t ble satt til å være $[0, 2\pi/420, 2\pi]$ da B-H kurven plottes for en periode og 421 punkter. Plottet blir videre brukt til å finne tiden når den laveste verdien for både B-feltet og H-feltet oppstår. Grunnen til at B_{min} og H_{min} benyttes er fordi det ved å bruke maksimal vinkelen mellom disse punktene ville blitt for stor, og at skjæringspunktene ikke nødvendigvis blir målt. Det er ikke garantert at målingene blir tatt eksakt når H og B er lik 0. Derfor var det enklest å bruke minste verdiene. Når tidspunktene for B_{min} og H_{min} var funnet ble vinkelen θ funnet ved Formel 36 under.

$$\theta = t_{B_{min}} - t_{H_{min}} \quad (36)$$

Som en sjekk av kurveformene for B og H ble det laget sinuskurver med utgangspunkt i startvinkelen til B-kurven og faseforskyvningen θ for H-kurven. Disse kan verifisere om kurven oppnår metning eller ikke. Når vinkelen θ er funnet settes denne og den relative permeabiliteten inn i Formel 12 fra kapittel 2.7, som er gjentatt under:

$$\mu_l = |\mu_r| e^{-j\theta_l} = \mu' - j\mu''$$

Da den første metoden ga avvik mellom den optimaliserte og den analytisk beregna relative komplekse permeabiliteten ble det videre utført en metode for å transformere ikke lineære B-H kurver inn til lineære elliptiske B-H kurver. Dette ble gjort ved å beregne den reelle ν' og den imaginære delen ν'' av reluktiviteten ved Formel 17 og 16 fra kapittel 2.7 på side 16, gjentatt under.

$$\nu' = \sqrt{|\nu|^2 - \nu''^2}$$

$$\nu'' = \frac{P}{\pi B_{max}^2}$$

Hvor $|\nu|$ er gitt av $\frac{H_{max}}{B_{max}}$. Videre ble B og H beregnet med Formel 14 og 15 hvor tiden t ble satt til å være en hel periode $[0:2\pi/420:2\pi]$. Deretter ble tidspunktet t for den minste magnetiske flukstettheten B_{min} og minste magnetiske feltstyrke H_{min} funnet og videre brukt til å beregne vinkelen θ ved Formel 36. Den målte relative permeabilitet og den nye vinkelen θ ble videre satt inn i Formel 12 for å beregne den komplekse permeabiliteten. Dette er prosessen som ble utført for alle målingen for hver av de fem armeringstrådene.

4.4 Tapsberegninger

Det er utført fire ulike metoder for beregning av det totale tapet i de runde armeringstrådene, disse er:

1. Totalt tap basert på B-H kurvens areal.
2. Totalt tap ved bruk av den analytiske formelen 25 som baserer seg på de optimaliserte komplekse permeabilitetene funnet i kapittel 4.3.1.
3. Totalt tap ved bruk av den analytiske formelen 25 som baserer seg på de analytisk beregna komplekse permeabilitetene basert på de transformerte B-H kurvene funnet i kapittel 4.3.2.
4. Totalt tap basert på FEM-beregninger i COMSOL med den optimaliserte komplekse permeabiliteten i kapittel 4.3.1 og med et fint, et medium og et grovt mesh.

Metode 2, 3 og 4 baserer seg kun på å benytte en kompleks permeabilitet μ og en konduktivitet σ tilnærmet 0. Alle metodene er basert på målingene gjort i kapittel 4.1.2 hvor det ble definert H-felt med 100 A/m intervall mellom 100-5000 A/m for frekvensene 40 Hz, 50 Hz og 60 Hz. Da instrumentet bare påfører et parallelt H-felt er det bare benyttet formler som tar et parallelt H-felt i betraktning. Fra målingene ble det valgt å se på 8 ulike magnetiske feltstyrker for hver av frekvensene, disse feltstyrkene er 100 A/m, 200 A/m, 300 A/m, 400 A/m, 500 A/m og 600 A/m. De benyttede verdiene for frekvens og magnetisk feltstyrken er lagt inn i Tabell 5 under. Valget av feltstyrker er basert på at kilden [28] sier at 550 A/m er representativt for et magnetisk felt inni armeringstråden under normal drift og korresponderer til lederstrøm opp til omtrent 1200 A.

Tabell 5: Frekvenser og magnetiske feltstyrker benyttet til å beregne totalt tap for armeringstrådene.

Test	Frekvens [Hz]	Felt styrke [A/m]
1	40, 50 og 60	100
2	40, 50 og 60	200
3	40, 50 og 60	300
4	40, 50 og 60	400
5	40, 50 og 60	500
6	40, 50 og 60	600

4.4.1 Arealberegning av B-H kurver

Som teorien i kapittel 2.4 sier tilsvarende B-H kurvens areal, energitettheten per syklus [J/m^3]. Først ble B-H kurvene plottet i Matlab og deretter ble funksjonen $\text{polyarea}(x,y)$ brukt til å beregne arealet. Funksjonen returnerer arealet for et 2D-polygon som er definert av toppunktene i vektor x og y . Dersom x og y er to like lange vektorer returnerer funksjonen skalararealet til polygonet definert av x og y . For å omgjøre energitettheten [J/m^3] til effekttap [W/kg] ble det multiplisert med frekvens og dividert på massetettheten. Det beregnede tapet blir videre sammenlignet med de målte totale tapene, samt de beregnede tapene funnet med de andre tilnærmingene.

4.4.2 Analytisk beregning av tap

I de analytiske beregningene av totalt tap er σ satt tilnærmet lik 0, H-feltet er definert til å være parallelt og den relative permeabiliteten er satt til å være de beregnede komplekse permeabilitetene fra kapittel 4.3.2 og 4.3.1. Formel 25 fra kapittel 2.8 på side 16 er brukt til å beregne de totale tapene og er gjentatt under.[22]

$$P^{\parallel} = \frac{2\pi \operatorname{Re}[-krJ_0(k^*r)J_1(kr)]}{\sigma |J_0(kr)|^2} |\mathbf{H}_0|^2$$

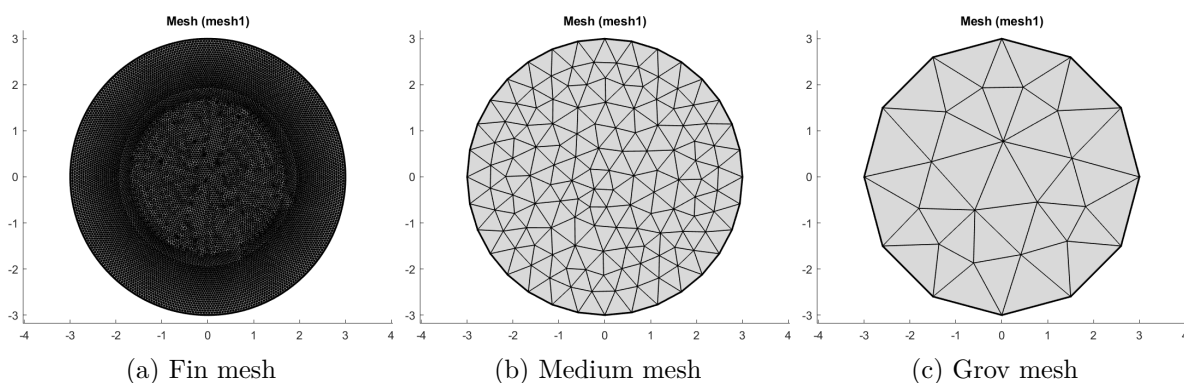
4.4.3 FEM-beregning av tap

I *COMSOL* ble det laget en geometrisk 2D modell tilsvarende armeringstrådenes geometri. Det ble definert parametre for vekten, dimensjonene, frekvensen, permeabiliteten, konduktiviteten og feltstyrken for geometrien. Permeabiliteten brukt her er den optimaliserte komplekse permeabiliteten funnet i kapittel 4.3.1 og konduktiviteten ble satt til $0.1\Omega^{-1}$ for armeringstråd 0, 1, 2 og 3, og $100\Omega^{-1}$ for armeringstråd 8. Parametrene ble definert slik at det skulle være enkelt å endre parametrene i et Matlab-script ved å bruke *LiveLink for MATLAB*. Dette gjorde det mulig å benytte samme *COMSOL* modell hvor de tilhørende parameterne for alle armeringstrådene ble endret på en effektiv måte. Dimensjonene og vekten brukt for armeringstrådene er hentet fra Tabell 2 og 3. Den benyttede frekvensen og magnetiske feltstyrkene er hentet fra Tabell 5.

Det ble benyttet magnetisk felt (mf) som fysiske betingelser. For å få et H-felt som går parallelt

med tråden ble det benyttet *surface current density*. På innstillingene for *mf* ble det i *Field components solved for* endret fra *Out-of-plane vector potential* til *In-plane vector potential*. Videre ble det gjort endringer av koordinatsystemet på innstillingene for *surface current density* hvor det ble valgt å byttet til koordinatsystemet som heter *Boundary System 1*. Dette er et lokalt koordinatsystem for 2D modeller definert ved $(t1, n, t0)$ og representerer den tangentielle og normale retningen for geometri-grensene. Dette koordinatsystemet er alltid høyreorientert, hvor den andre tangentielle retningen ($t0$) er kryssproduktet mellom normal vektoren (n) og den første tangens retningen ($t1$). Denne metoden gir alltid en høyreorientert ortonormalt system, med unntak av om tangens retningen er parallell med den normale retningen.

Det ble definert en magnetisk feltstyrke H_0 under *surface current density* i $t1$ -retningen. Deretter ble det utført beregninger i frekvensdomenet med et fint, et medium og et grovt mesh. COMSOL har 9 forhåndsdefinerte mesher hvor nr. 1 er ekstremt fin mesh og nr. 9 er ekstremt grov mesh. I denne avhandlingens beregninger er det benyttet 1, 6 og 9. Disse meshene er illustrert i Figur 2, hvor henholdsvis Figur 16a, 16b og 16c er fin, medium og grov mesh.



Figur 16: De tre typene mesh brukt i FEM-beregningene.

Det ble utført en analyse av tapene per lengdeenhet i geometrien ved å utføre en evaluering med overflateintegral.

5 Resultat fra måling og beregning av tap

I dette avsnittet vil resultatene funnet ved å følge metodikken i kapittel 4 bli presentert. Først vil de beregna hysteres- og virvelstrømstaps koeffisientene bli presentert. Disse koeffisientene blir videre brukt til å beregne hysteres-, virvelstrøms- og totalt tap for å gjøre en sammenligning med de separerte tapene funnet av måleinstrumentet. Deretter vil kompleks permeabilitet funnet ved den analytiske tilnærmingene bli sammenlignet med den komplekse permeabiliteten funnet ved å optimalisere vinkelen med tanke på de totale tapene. Til slutt vil resultatene fra beregningene gjort for de totale tapene ved å beregne arealet til B-H kurven, og ved å bruke kompleks permeabilitet i analytiske formler og i COMSOL bli sammenlignet med de målte totale tapene.

5.1 Separerte tap

Det ble utført beregninger og målinger for å finne de tilhørende koeffisientene og separerte tapene for armeringstråd 0-7 i henhold til fremgangsmåten beskrevet i kapittel 4.2 og 2.3. Først vil de beregnede koeffisientene bli presentert i en tabell. Disse koeffisientene blir videre brukt til å beregne og separere de totale tapene inn i hysteres- og virvelstrømstap ved å sette inn ulike B-verdier og frekvenser inn i Formel 2 for hver av armeringstrådene. De beregna hysteres-, virvelstrøms- og totale tapene vil videre bli sammenlignet med de målte tapene funnet i målingene.

5.1.1 Beregna koeffisienter

Det ble utført beregning av de tilhørende koeffisientene for alle de magnetiske armeringstrådene ved å benytte fremgangsmåten og formlene gitt i kapittel 2.3 og 4.2. Disse koeffisientene er gitt i Tabell 6.

Tabell 6: Beregna koeffisienter for hysteres- og virvelstrømstap i henhold til Formel 2.

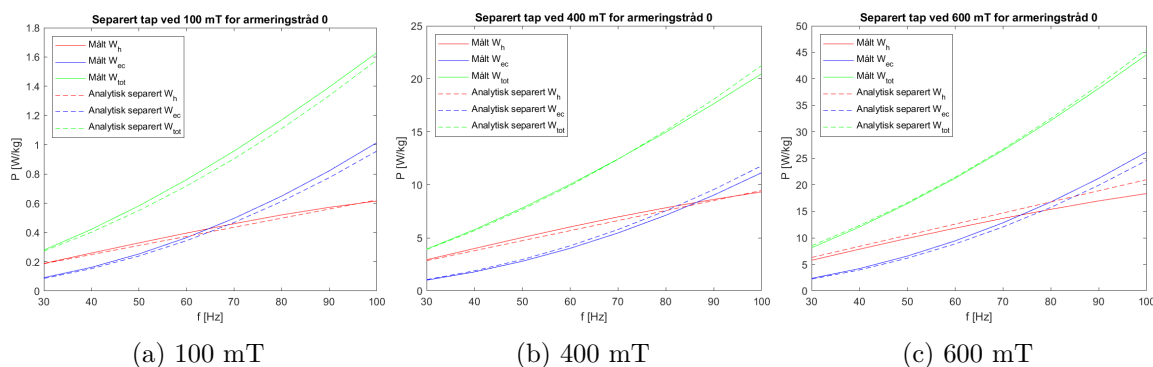
Armeringstråd	h	x	ec	y
0	0.5719	1.9631	0.0062	1.8124
1	0.3326	1.6886	0.0099	2.0833
2	0.3491	1.7891	0.0088	1.9827
3	0.8906	2.0200	0.0104	1.8776
4	0.6134	2.0044	0.0071	1.8770
5	0.6896	1.8353	0.0066	1.8622
6	0.7144	1.8012	0.0069	1.8746
7	0.8289	1.8501	0.0068	1.8543

Tabellen viser en god spredning for koeffisientene til de ulike armeringstrådene.

5.1.2 Sammenligning av målte og beregna separerte tap

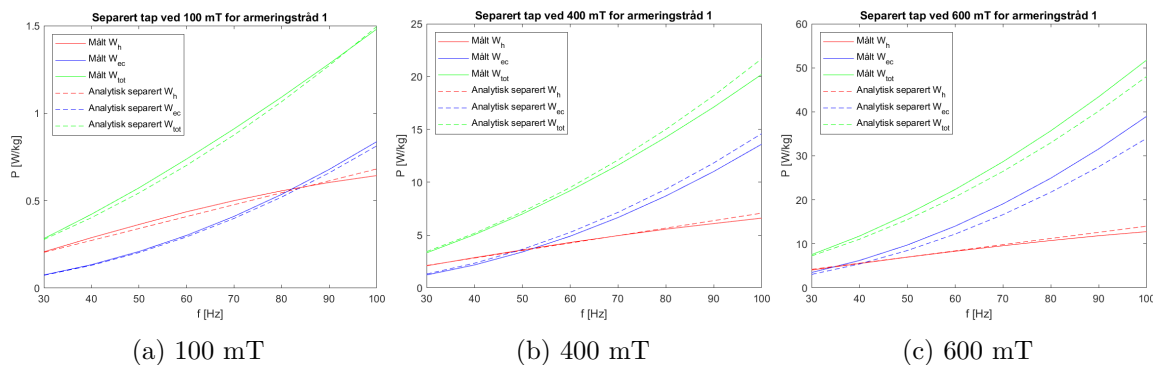
En sammenligning av det totale- W_{tot} , hysteres- W_h og virvelstrømstapet W_{ec} ble gjort for de målte og beregna tapene. De beregna tapene ble funnet ved å implementere de beregna koeffisientene fra Tabell 6 i Formel 2, gitt i kapittel 2.3 på side 6. I Figur 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 og 24 er de målte og de analytisk beregna hysteres-, virvelstrøms- og totale tapene plottet som funksjon av frekvens ved 100, 400 og 600 mT for henholdsvis armeringstråd 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 og 7. De plottede punktene er hentet fra Vedlegg 3 på side 71.

I Figur 17 gitt under er det vist for armeringstråd 0 at hysteresetapene forandrer seg proporsjonalt med endringen i frekvens for både 100, 400 og 600 mT. Da Formel 2 baserer seg på at virvelstrømstapene endrer seg proporsjonalt med kvadratet av frekvensen, er det fra figuren mulig å si at også de målte virvelstrømstapene endres proporsjonalt med kvadratet av frekvensen. Det kan observeres små avvik mellom de målte og analytisk separerte tapene i Figur 17a, 17b og 17c, men avvikene er minimale.



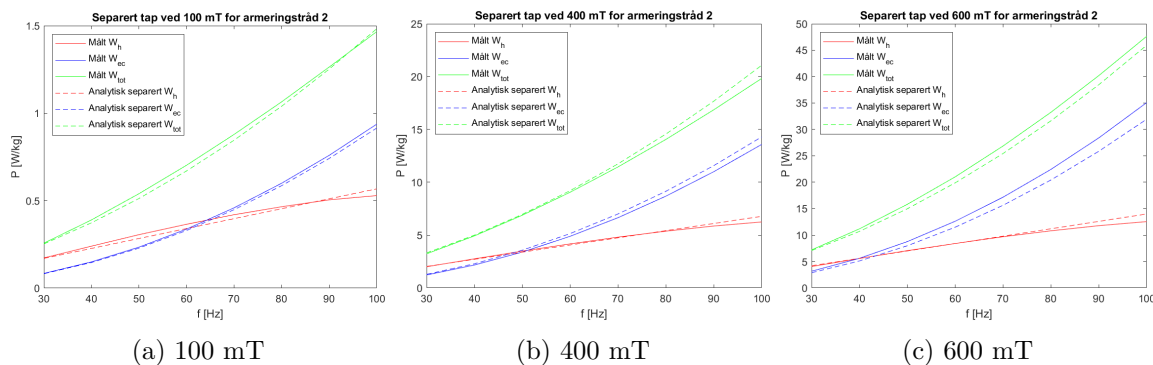
Figur 17: Hysteres-, virvelstrøms- og totalt tap plottet som funksjon av frekvens for armeringstråd 0 ved magnetisk flukstetthet a) 100 mT, b) 400 mT og c) 600mT.

De målte og de analytisk separerte tapene er plottet som funksjon av frekvens for armeringstråd 1 i Figur 18. Her er hysteresetapene proporsjonale med frekvensen og virvelstrømstapene er proporsjonale med kvadratet av frekvensen. Små avvik mellom målte og analytisk separerte tap kan observeres i Figur 18a ved 100 mT, mens det ved 400 mT og 600 mT i Figur 18b og 18c er litt større avvik. Avvikene er på tross av dette ikke veldig grove.



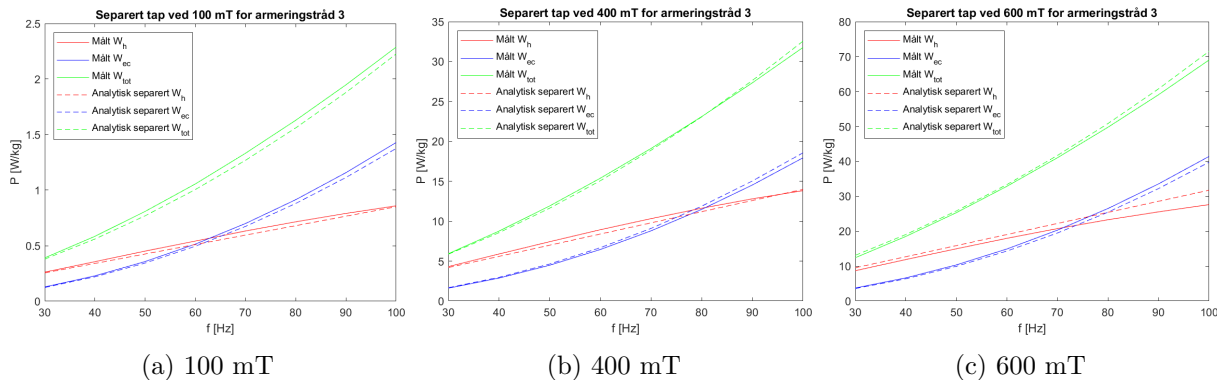
Figur 18: Hysteres-, virvelstrøms- og totalt tap plottet som funksjon av frekvens for armeringstråd 1 ved magnetisk flukstetthet a) 100 mT, b) 400 mT og c) 600mT.

For armeringstråd 2 er de målte og analytisk separerte tapene plottet i Figur 19 som funksjon av frekvens ved 100, 400 og 600 mT. Fra Figurene kan det observeres at den målte W_h linjen ikke er helt lineær. Når frekvensen overstiger 80 Hz ser man at kurvene begynner å falle. Avvikene er veldig små og vil i et stort bilde ikke være bemerkelsesverdige.



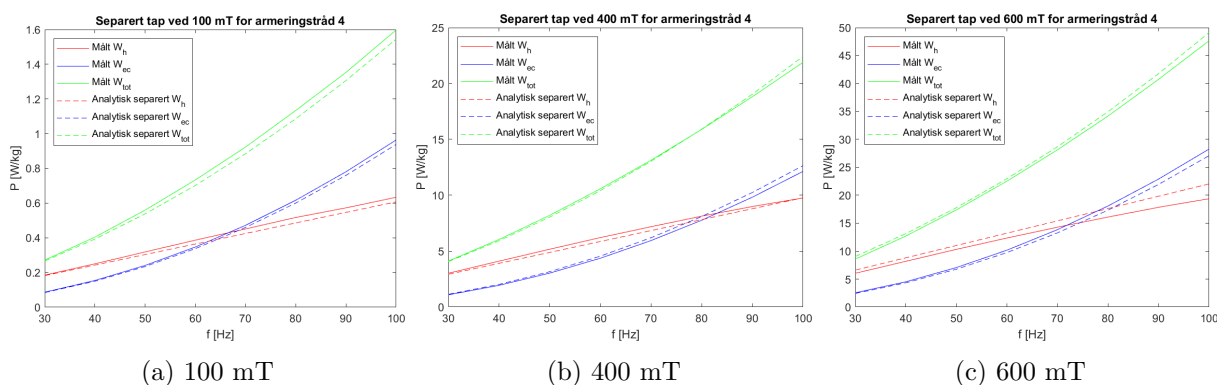
Figur 19: Hysterese-, virvelstrøms- og totalt tap plottet som funksjon av frekvens for armeringstråd 2 ved magnetisk flukstetthet a) 100 mT, b) 400 mT og c) 600mT.

De målte og analytisk separerte tapene for armeringstråd 3 er gitt i Figur 20. Figurene viser god overensstemmelse mellom de målte og de beregna separerte tapene. Da den analytiske separeringen baserer seg på at hysterestetapene endrer seg proporsjonalt med frekvensen og virvelstrømstapene endrer seg proporsjonalt med kvadratet av frekvensen, viser resultatet at tapene fått fra målingene også baserer seg på denne tilnærmingen.



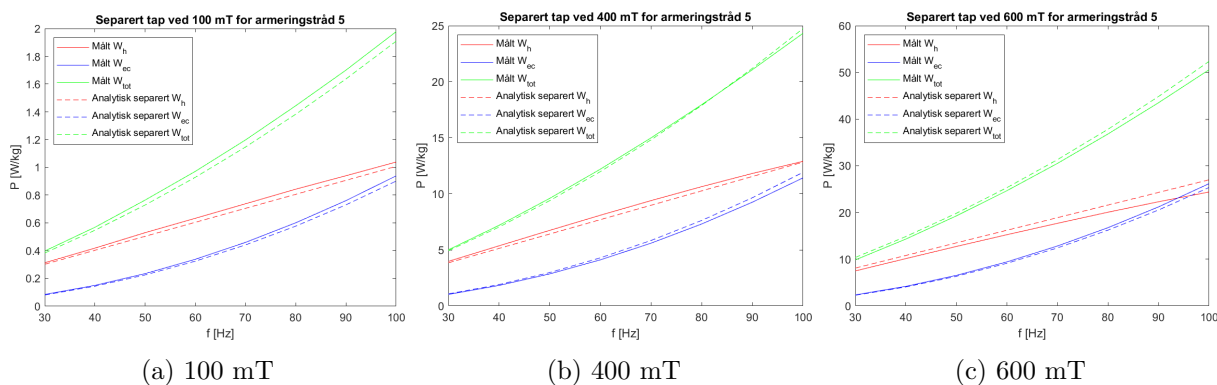
Figur 20: Hysterese-, virvelstrøms- og totalt tap plottet som funksjon av frekvens for armeringstråd 3 ved magnetisk flukstetthet a) 100 mT, b) 400 mT og c) 600mT.

I Figur 21 gitt under er det vist for armeringstråd 4 at virvelstrømstapet har en endring proporsjonalt med kvadratet av frekvensen for både 100, 400 og 600 mT. Hysterestetapene forandrer seg derimot proporsjonalt med endringen i frekvens. Det kan observeres små avvik mellom de målte og analytisk separerte tapene i Figur 21a og 21b, mens for Figur 21c er det litt større avvik for hysterestetapene når frekvensen øker.



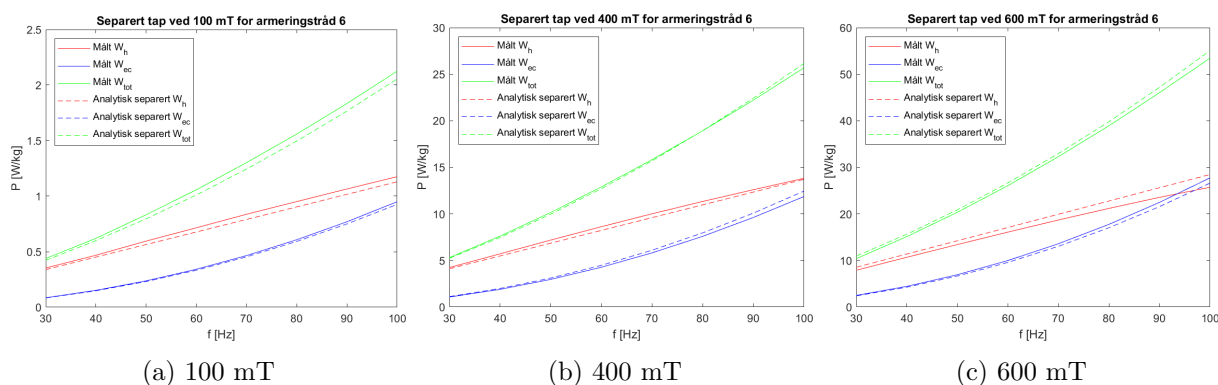
Figur 21: Hysterese-, virvelstrøms- og totalt tap plottet som funksjon av frekvens for armeringstråd 4 ved magnetisk flukstetthet a) 100 mT, b) 400 mT og c) 600mT.

De målte og de analytisk beregna separerte tapene som funksjon av frekvens er plottet i Figur 22 for armeringstråd 5. Hysteresetapene er proporsjonale med frekvensen og virvelstrøms tapene er proporsjonale med kvadratet av frekvensen. Små avvik mellom målte og analytisk separerte tap kan observeres i Figur 22a for 100 mT, i Figur 22b for 400 mT og for 600 mT i Figur 22c.



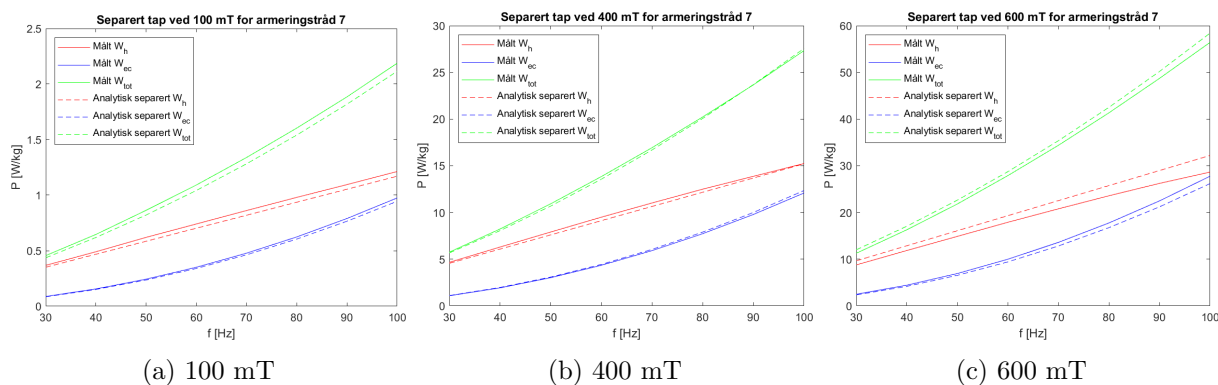
Figur 22: Hysterese-, virvelstrøms- og totalt tap plottet som funksjon av frekvens for armeringstråd 5 ved magnetisk flukstetthet a) 100 mT, b) 400 mT og c) 600mT.

I Figur 23 er det vist for armeringstråd 6 at virvelstrøms tapet har en endring som er proporsjonal med kvadratet av frekvensen ved 100, 400 og 600 mT. Hysteresetapene forandrer seg proporsjonalt med endringen i frekvens. Små avvik kan observeres mellom de målte og analytisk separerte tapene i Figur 23a og 23b, mens for Figur 23c er det litt større avvik for hysterese tapene.



Figur 23: Hysterese-, virvelstrøms- og totalt tap plottet som funksjon av frekvens for armeringstråd 6 ved magnetisk flukstetthet a) 100 mT, b) 400 mT og c) 600mT.

For armeringstråd 7 er plottet av de målte og de analytisk separerte tapene gitt i Figur 24 som funksjon av frekvens ved 100, 400 og 600 mT. Figurene viser at den målte W_h linjen ikke er helt lineær. Når frekvensen overstiger 80 Hz ser man at kurvene begynner å falle. Avvikene er veldig små og vil i et stort bilde ikke være bemerkelsesverdige.



Figur 24: Hysterese-, virvelstrøms- og totalt tap plottet som funksjon av frekvens for armeringstråd 7 ved magnetisk flukstetthet a) 100 mT, b) 400 mT og c) 600mT.

De prosentvise avvikene, for hysterese-, virvelstrøms- og de totale tapene, mellom de målte og de analytisk separerte tapene for alle armeringstrådene er gitt i Tabell 7, 8 og 9 under.

I Tabell 7 er det stor variasjon for hysterestetapsavvikene til de ulike armeringstrådene. Armeringstråd 1 og 2 er de som har lavest avvik, da disse har et maksimalt avvik i overkant av henholdsvis 6% og 7%. De resterende armeringstrådene avviker på det meste mellom 9-10%. Det kan bemerkes at de største avvikene ofte oppstår ved 30 Hz og 80 Hz når den magnetiske flukstettheten er 600 mT. Dette kan ha sammenheng med at disse frekvens- og flukstetthets verdiene er på ytterpunktet av målingene. Det ble også bemerket i plottene over at det var større avvik mellom hysterestetapene fått av instrumentet og de som ble analytisk beregnet når både frekvensen og B-feltet hadde høye verdier.

Tabell 7: Avvikene mellom de målte og de analytisk separerte hysteresetapene W_h .

Variabler		Avvik for beregna W_h [%] for armeringstråd							
f [Hz]	B_{max} [mT]	0	1	2	3	4	5	6	7
30	100	-1.15	-1.57	-1.41	-2.61	-1.47	-3.46	-4.09	-4.62
30	400	-3.06	1.37	1.34	-2.80	-3.01	-3.21	-2.98	-2.30
30	600	9.19	3.68	3.73	9.67	9.44	8.07	8.05	10.02
50	100	-5.42	-6.37	-7.17	-5.82	-4.75	-4.94	-5.19	-5.62
50	400	-5.95	-1.52	-2.83	-5.91	-5.53	-4.85	-4.62	-3.87
50	600	6.03	0.45	-0.90	6.05	6.71	6.02	6.08	8.13
70	100	-5.29	-4.68	-5.34	-5.88	-5.79	-4.45	-5.58	-4.90
70	400	-5.01	0.100	-1.29	-5.11	-4.81	-4.42	-4.14	-3.38
70	600	7.44	2.55	1.09	7.12	7.95	6.86	6.60	8.45
80	100	-4.30	-2.01	-2.43	-4.84	-6.10	-4.40	-5.05	-4.46
80	400	-3.37	1.84	0.910	-3.71	-3.86	-3.55	-3.24	-2.63
80	600	9.17	4.33	3.58	9.07	9.48	7.66	7.52	9.26

Fra virvelstrømstaps avvikene gitt i Tabell 8 observeres det en jevn spredning i avvikene, som storsett er mellom 2-5%. Det er litt kraftige avvik på opptil 12% for armeringstråd 1. De største avvikene oppstår også her som for hysteresetapene ved 30 Hz og 80 Hz når flukstettheten er 600 mT.

Tabell 8: Avvikene mellom de målte og de analytisk separerte virvelstrømstapene W_{ec} .

Variabler		Avvik for beregna W_{ec} [%] for armeringstråd							
f [Hz]	B_{max} [mT]	0	1	2	3	4	5	6	7
30	100	-5.63	-2.89	-2.37	-3.77	-2.68	-4.02	-2.47	-3.11
30	400	5.85	7.41	5.25	3.53	4.25	4.29	4.86	2.17
30	600	-6.14	-12.77	-8.95	-4.02	-4.19	-3.17	-4.08	-5.68
50	100	-5.69	-2.89	-2.37	-3.77	-2.68	-4.02	-2.53	-3.11
50	400	5.85	7.34	5.25	3.47	4.25	4.28	4.87	2.17
50	600	-6.14	-12.83	-8.95	-3.98	-4.19	-3.17	-4.08	-5.64
70	100	-5.69	-2.86	-2.31	-3.74	-2.62	-3.97	-2.48	-3.11
70	400	5.85	7.37	5.31	3.47	4.25	4.29	4.87	2.23
70	600	-6.14	-12.81	-8.90	-4.02	-4.16	-3.17	-4.09	-5.67
80	100	-5.67	-2.87	-2.32	-3.74	-2.63	-4	-2.49	-3.09
80	400	5.88	7.37	5.30	3.49	4.27	4.31	4.92	2.20
80	600	-6.12	-12.81	-8.91	-3.97	-4.14	-3.15	-4.06	-5.65

Avvikene for de totale tapene gitt i Tabell 9 viser at avviket ligger jevnt mellom 0.1-7.6%. Et avvik under 10% bør regnes som god overensstemmelse. Avvikene kommer som et resultat av de varierende avvikene fra hysteres- og virvelstrømstapene.

Tabell 9: Avvikene mellom de målte og de analytisk separerte totale tapene W_{tot} .

Variabler		Avvik for beregna W_{tot} [%] for armeringstråd							
f [Hz]	B_{max} [mT]	0	1	2	3	4	5	6	7
30	100	-2.61	-1.92	-1.72	-2.99	-1.85	-3.58	-3.77	-4.33
30	400	-0.79	3.6	2.82	-1.08	-1.08	-1.67	-1.4	-1.45
30	600	4.74	-3.94	-1.83	5.56	5.4	5.38	5.13	6.54
50	100	-5.54	-5.1	-5.09	-4.91	-3.86	-4.66	-4.43	-4.91
50	400	-1.74	2.79	1.15	-2.38	-1.92	-2.13	-1.85	-2.2
50	600	1.18	-7.29	-5.36	1.95	2.28	2.9	2.62	3.76
70	100	-5.5	-3.86	-3.76	-4.75	-4.17	-4.26	-4.47	-4.26
70	400	-0.24	4.27	2.54	-1.17	-0.71	-1.17	-0.82	-1.42
70	600	0.86	-7.68	-5.3	1.61	1.99	2.64	2.1	2.87
80	100	-5.06	-2.43	-2.37	-4.22	-4.22	-4.24	-4.05	-3.92
80	400	1.04	5.21	3.62	-0.13	0.11	-0.35	0.04	-0.78
80	600	1.2	-7.64	-4.85	2.13	2.27	2.74	2.24	2.85

5.2 Kompleks permeabilitet

Beregningene av kompleks permeabilitet ble gjort som presentert i kapittel 4.3.1 og 4.3.2. Det ble først utført målinger med en H-felts sekvensen for hver 100 A/m mellom 100 A/m til 5000 A/m ved frekvensene 40 Hz, 50 Hz og 60 Hz. Målingene ble benyttet i tre tilnærminger av kompleks permeabilitet for armeringstrådene 0, 1, 2, 3 og 8. Disse tilnærmingene er:

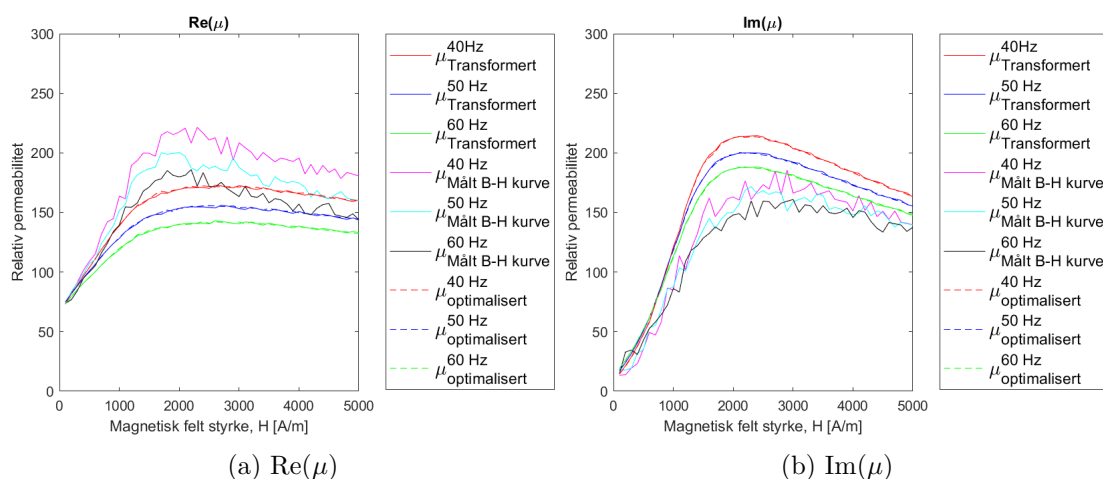
1. *Optimalisert* - Finne kompleks permeabilitet fra Formel 12 ved å optimalisere faseforskjellen θ mellom B og H slik at differansen mellom de totale tapene gitt av målingene og de beregna tapene funnet fra Formel 25 blir tilnærmet null.
2. *Målt* - Finne kompleks permeabilitet fra Formel 12 ved å analytisk finne faseforskjellen θ mellom B_{min} og H_{min} basert på B-H kurvene fått fra målingene.
3. *Transformert* - Finne kompleks permeabilitet fra Formel 12 ved å analytisk finne faseforskjellen θ mellom B_{min} og H_{min} basert på de transformerte B-H kurvene ved å finne reluktiviteten.

For å skille mellom tilnærmingene i de kommende resultatene vil det bli benyttet *Optimalisert*, *Målt* og *Transformert* for henholdsvis tilnærming 1, 2 og 3.

5.2.1 Beregna kompleks permeabilitet

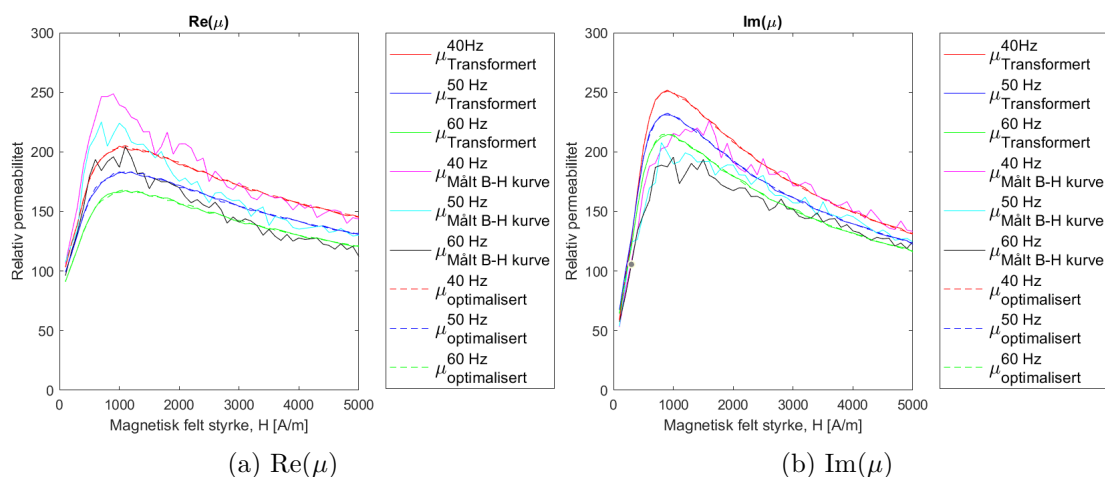
De komplekse permeabilitetene funnet analytisk for de runde armeringstrådene 0, 1, 2, 3 og 8, basert på de transformerte- og de målte B-H kurvene, er plottet som funksjon av påtrykt H-felt sammen med den optimaliserte komplekse permeabiliteten i Figur 25, 26, 27, 28 og 29. Figurene inneholder et plot med den reelle delen og et plot med den imaginære delen av den komplekse permeabiliteten. I figurene utgjør rød, blå og grønn linje henholdsvis 40 Hz, 50 Hz og 60 Hz. De hele linjene er plottet for de analytisk beregna komplekse permeabilitetene, mens de stipla linjene representerer de optimaliserte komplekse verdiene som en funksjon av H. Verdiene brukt til å plote permeabilitetskurvene er gitt i Tabell 23, 24, 25, 26 og 27 for henholdsvis armeringstråd 0, 1, 2, 3 og 8 i Vedlegg 4 på side 79.

I Figur 25 er den reelle og den imaginære delen av den komplekse permeabiliteten plottet som funksjon av den påtrykte magnetiske feltstyrken H for armeringstråd 0. Fra figuren er det en veldig god overensstemmelse for både den reelle delen og den imaginære delen av den komplekse permeabiliteten mellom de optimaliserte stipla linjene og de analytisk beregna verdiene basert på de transformerte B-H kurvene. Figurene viser derimot tydelige avvik for den komplekse permeabiliteten funnet for de målte B-H kurvene. Differansen er kun avhengig av vinkelen θ , da alle tilfellene bruker samme relativ permeabilitet. Fra figuren er det også tydelig at den kompleks permeabiliteten synker når frekvens øker.



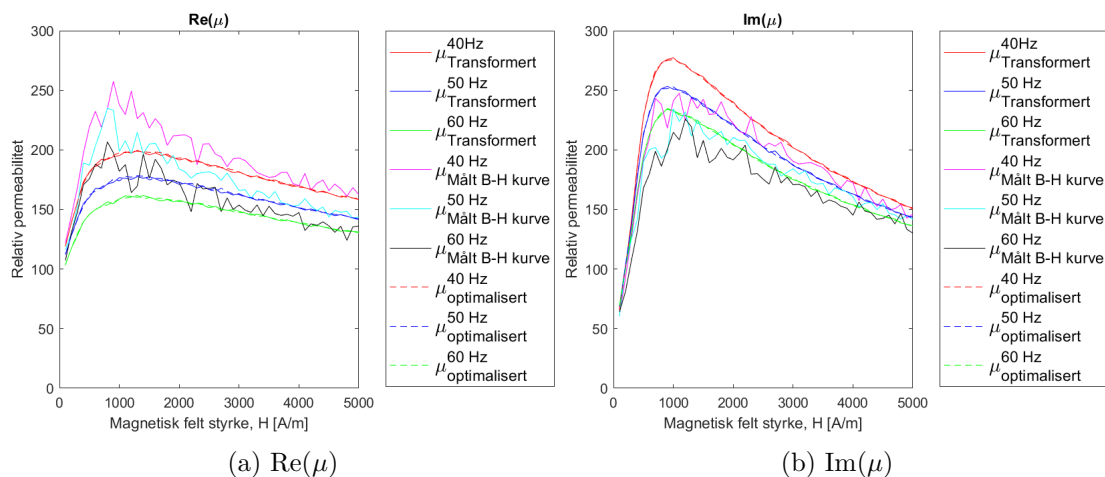
Figur 25: Den reelle og den imaginære delen av kompleks permeabilitet for armeringstråd 0 plottet som funksjon av magnetiske feltstyrke (H) for 40 Hz, 50 Hz og 60 Hz.

For armeringstråd 1 er den reelle og den imaginære delen av den komplekse permeabiliteten plottet som funksjon av den magnetiske feltstyrken i Figur 26. Her samsvarer den optimaliserte og den analytiske beregna permeabiliteten funnet fra de transformerte B-H kurvene godt for både 40, 50 og 60 Hz. Når frekvensen øker så synker både den reelle og den imaginære delen av den komplekse permeabiliteten. Fra figuren er det tydelig at kurvene oppnår et metningspunkt ved omtrent 1000 A/m, og kurvene begynner å avta for høyere H-verdier. Den komplekse permeabiliteten funnet ved de målte B-H kurvene har en god overensstemmelse for H-verdier under 500 A/m og over 2000 A/m. Det er derimot store avvik mellom dette intervallet, som indikerer at den analytiske tilnærmingen som baserer seg på de målte B-H kurvene, ikke er representativ for alle tilfellene.



Figur 26: Den reelle og den imaginære delen av kompleks permeabilitet for armeringstråd 1 plottet som funksjon av magnetiske feltstyrke (H) for 40 Hz, 50 Hz og 60 Hz.

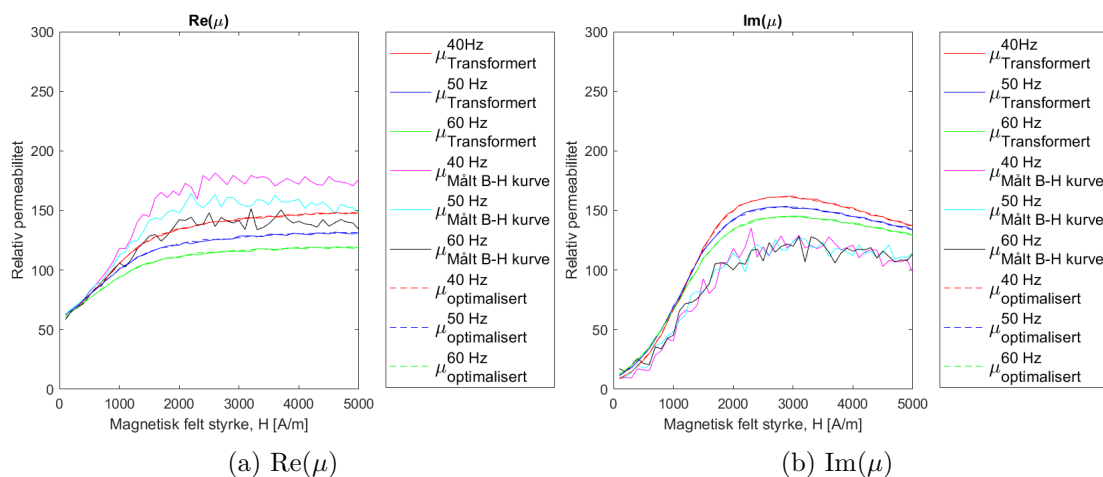
Den reelle og den imaginære delen av den komplekse permeabiliteten for armeringstråd 2 er plottet som funksjon av den magnetiske feltstyrken H i Figur 27. Det er et veldig godt samsvar mellom de optimaliserte og de analytisk beregna permeabiliteten basert på de transformerte B-H kurvene for både 40, 50 og 60 Hz. Fra figuren er det tydelig at permeabiliteten avtar når frekvensen øker, samt at kurvene stiger jevnt frem til den oppnår metning rundt 1000 A/m og deretter avtar. For både armeringstråd 1 og 2 har de imaginære kurvene mye brattere form enn de reelle kurvene etter 1000 A/m. For kurvene for den komplekse permeabiliteten funnet ved å bruke de målte B-H kurvene, er det store avvik i forhold til de andre kurvene. Sammenlignet med de målte permeabilitetskurvene for armeringstråd 1 har begge et relativt godt samsvar mellom 100-500 A/m og 2000-5000 A/m, med et større avvik i intervallet mellom 500-2000 A/m.



Figur 27: Den reelle og den imaginære delen av kompleks permeabilitet for armeringstråd 2 plottet som funksjon av magnetiske feltstyrke (H) for 40 Hz, 50 Hz og 60 Hz.

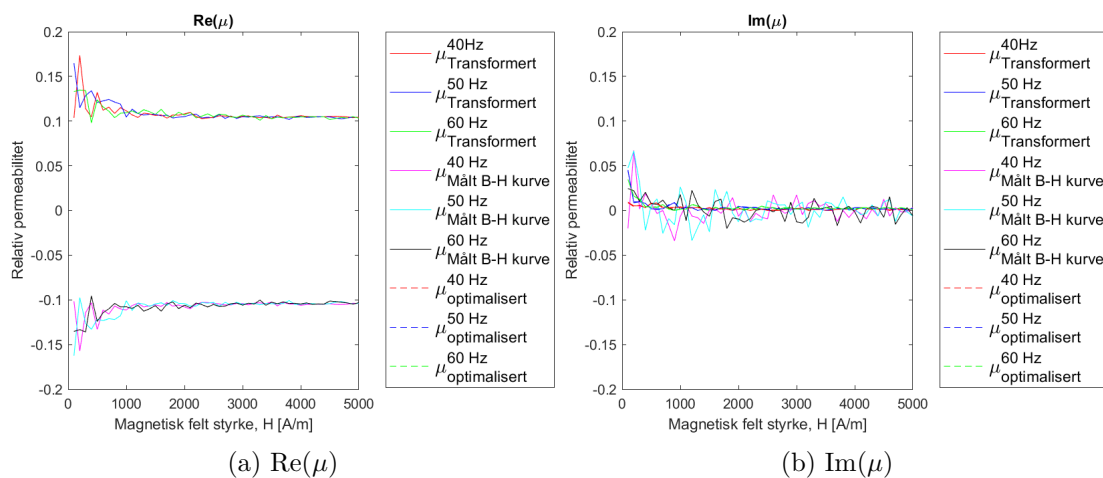
I Figur 28 er den reelle og den imaginære delen av de komplekse permeabilitetene plottet som funksjon av den magnetiske feltstyrken for armeringstråd 3. Kurvene samsvarer veldig godt mellom de optimaliserte permeabilitetene og permeabiliteten funnet for de transformerte B-H kurvene ved alle de tre frekvensene. Fra kurvene observeres det at den imaginære delen oppnår

metning ved omtrent 2500 A/m, mens den reelle delen fremdeles har en stigende kurve ved 5000 A/m. For permeabilitetene funnet for de målte B-H kurvene er det et større avvik fra de optimaliserte verdiene. Avvikene minner om avvikene funnet for armeringstråd 0. Toppunktet for kurvene kommer, ut ifra kurven, omtrent ved 2500 A/m. Mens de andre armeringstrådene 1 og 2 oppnår toppunktet ved 1000 A/m, og for armeringstråd 0 er toppunktet rundt 2000 A/m. Selv om det ved høye H-verdier er større avvik er det relativt godt samsvarer ved lave påtrykk av H-felt.



Figur 28: Den reelle og den imaginære delen av kompleks permeabilitet for armeringstråd 3 plottet som funksjon av magnetiske feltstyrke (H) for 40 Hz, 50 Hz og 60 Hz.

For den ikke-magnetiske armeringstråd 8 er den reelle og den imaginære delen av den komplekse permeabiliteten plottet som funksjon av den magnetiske feltstyrken i Figur 29. Her samsvarer den optimaliserte og den analytiske beregna permeabiliteten funnet for de transformerte B-H kurvene godt langs hele kurven. Kurvene humper litt og er de flyter ikke så godt. Den relative permeabiliteten er under 1 hvilke bekrefter at armeringstråden er ikke magnetisk. Permeabiliteten funnet for de målte B-H kurvene er negativ og stemmer derfor dårlig overens. Basert kun på kurvene kan det virke som at disse permeabilitetsverdiene har feil fortegn.

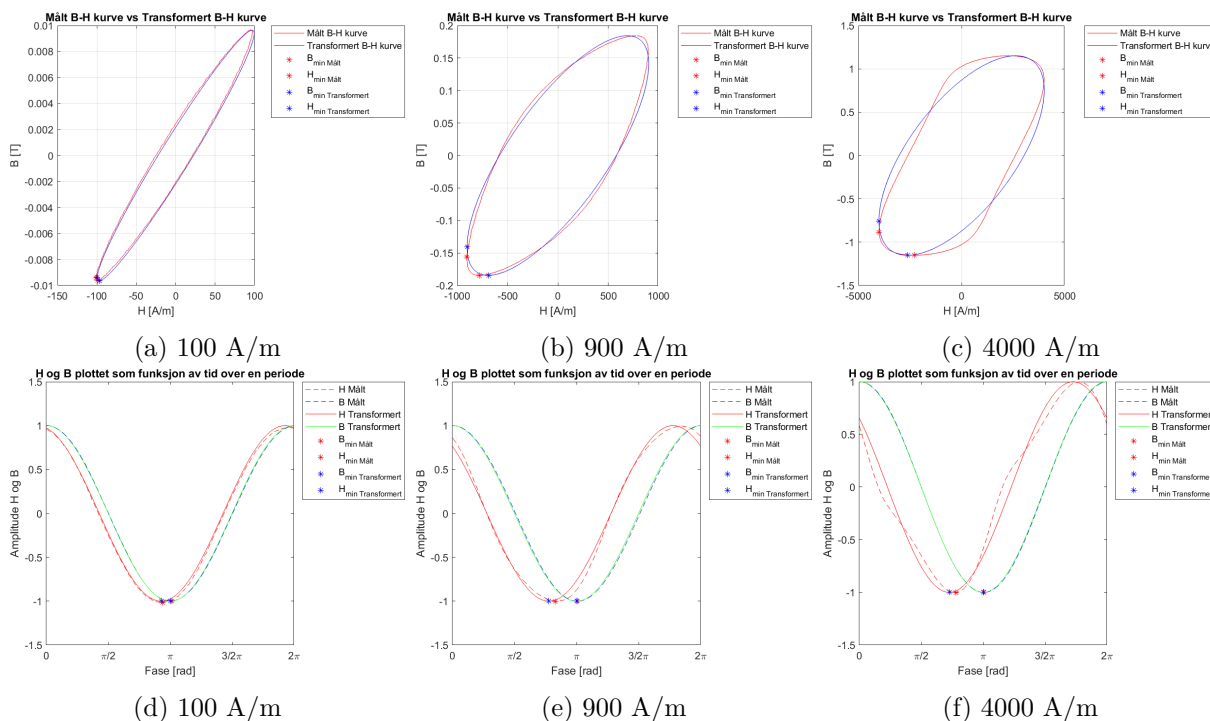


Figur 29: Den reelle og den imaginære delen av kompleks permeabilitet for armeringstråd 8 plottet som funksjon av magnetiske feltstyrke (H) for 40 Hz, 50 Hz og 60 Hz.

5.2.2 Sammenligning av målte og transformerte kurver

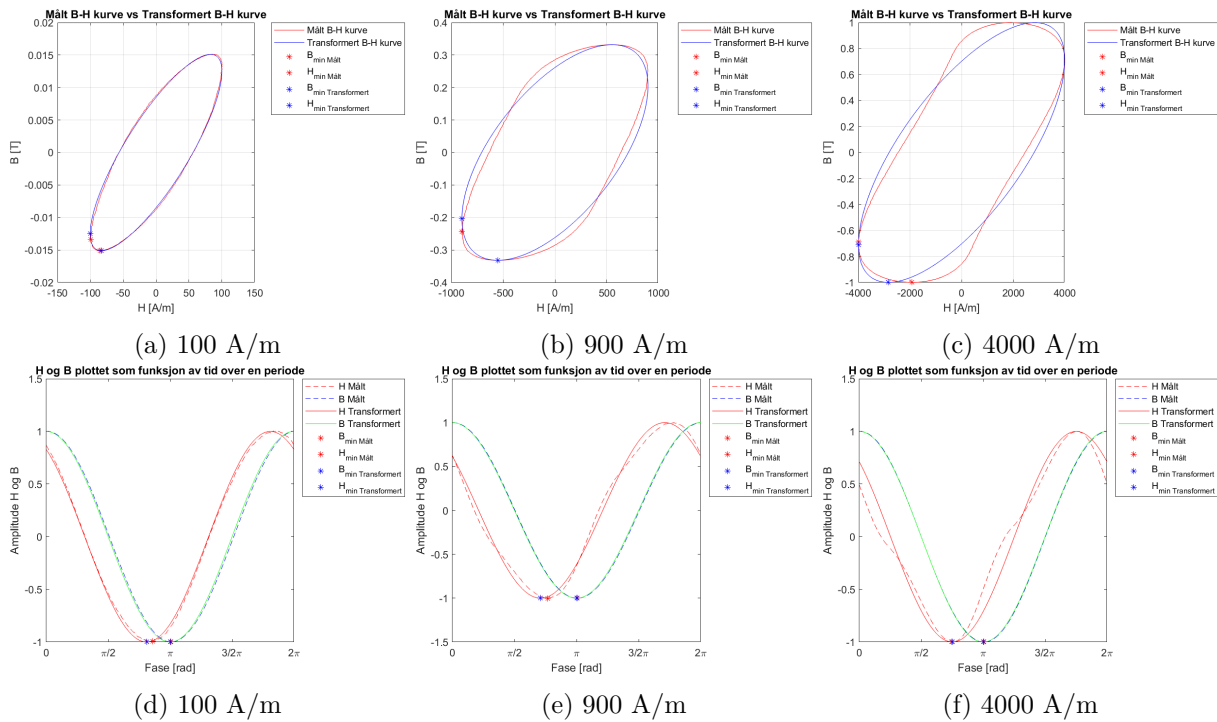
De transformerte B-H kurvene ble funnet ved hjelp av reluktiviteten til materialet, som beskrevet i kapittel 4.3.2. En sammenligning av de målte og transformerte B-H kurvene og de tilhørende fasekurvene er vist i Figur 30, 31, 32, 33 og 34 for en frekvens på 50 Hz og en magnetisk feltstyrke på 100, 900 og 4000 A/m. Hensikten med å vise ved ulike feltstyrker er å vise endringen av geometrien og fase forskyvningen ved ulike H-verdier. De røde kurvene i B-H kurvene representerer den målte-, mens den blå kurven representerer den transformerte B-H kurven. I faseplottet representerer de stipla linjene de målte H og B-verdiene, hvor rød er H og blå er B, og de hele linjene er de transformerte H og B-verdiene, hvor rød er H og grønn er B. Både i B-H kurven og faseplottene er B_{min} og H_{min} markert for både den målte kurven og den transformerte kurven.

B-H kurvene og fasekurvene for armeringstråd 0 er vist i Figur 30 under. Fra Figur 30a er det godt samsvar mellom geometrien til den målte og den transformerte BH-kurven ved 100 A/m. Faseplottene for 100 A/m i Figur 30d viser ingen tydelige avvik for minimums verdiene for de ulike kurvene. Ved 900 A/m, illustrert i Figur 30b, er kurvenes geometri veldig like, men den målte B-H kurven er mye spisser i bunnen. Dette er også synlig i plottet i Figur 30e, hvor B-kurvene har samme form og minimums punkt, mens det er avvik for H-kurvens form og minimums punkt. Ved 4000 A/m, vist i Figur 30c, er B-H kurvenes former svært ulike. Samtidig er det en liten differanse for minimumsverdiene i Figur 30f. Fra både fasekurven ved 900 A/m og 4000 A/m vil faseforskjellen for de målte kurvene være mindre enn for de transformerte kurvene. En lavere faseforskjell vil gi høyere reell permeabilitet og lavere imaginær permeabilitet. Dette bekrefter resultatet fra kurvene i Figur 25 hvor den reelle delen av permeabiliteten er for høy og den imaginære delen er for lav.



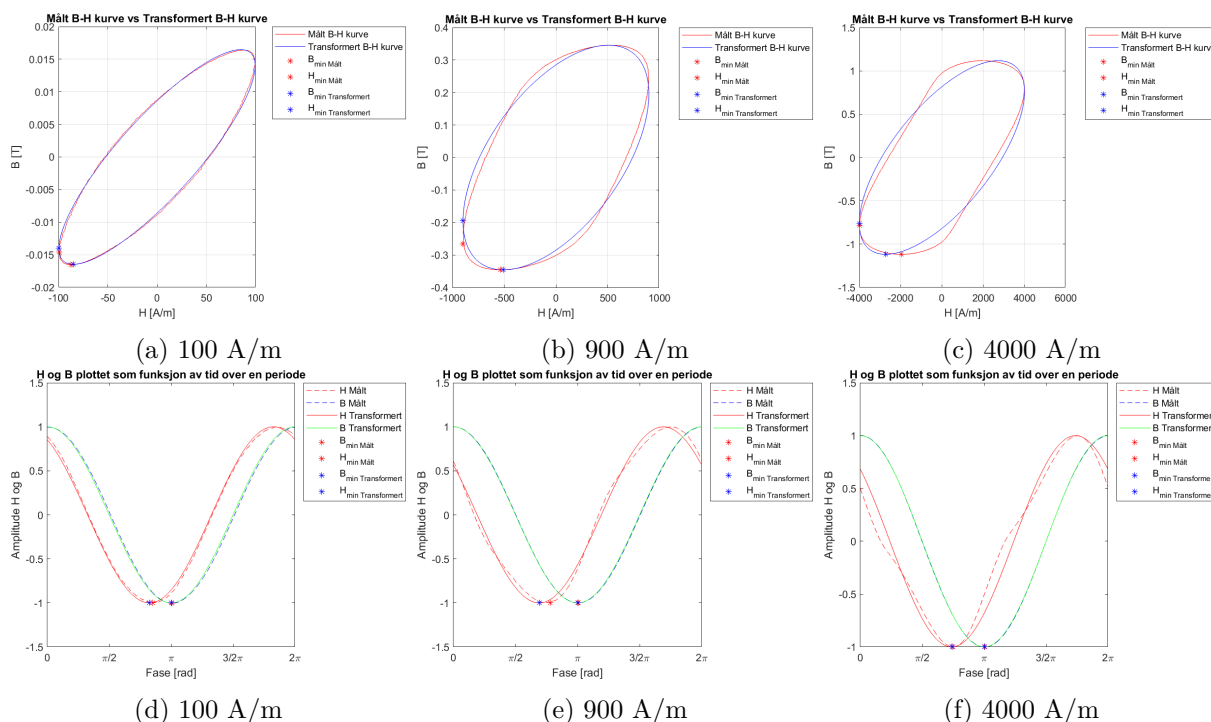
Figur 30: De målte og transformerte B-H kurvene og fasekurvene, ved 50 Hz og 100, 900 og 4000 A/m, for armeringstråd 0.

I Figur 31 er B-H kurvene og fasekurvene vist for armeringstråd 1. For 100 A/m i Figur 31a og 31d har både B-H kurvene og fasekurvene veldig godt samsvar mellom de målte og de transformerte kurvene. Ved 900 A/m, som er vist i Figur 31b, observeres samme tendens som for armeringstråd 0, hvor den målte kurven blir for spiss og derav får en mindre vinkel enn den transformerte kurven, som også blir vist av fasekurvene i Figur 31e. Fra B-H kurven ved 4000 A/m i Figur 31c er det tydelig at verken geometrien eller B_{min} og H_{min} er like for den målte kurven og den transformerte kurven. Men fra fasekurvene kan man se at både B_{min} og H_{min} er like for begge tilfellene, som vil gi samme faseforskyvning mellom B og H. Dette bekrefter utformingen av den reelle og den imaginære komplekse permeabiliteten i Figur 26 hvor den komplekse permeabiliteten stemmer godt overens ved 4000 A/m og 100 A/m for armeringstråd 1, mens ved 900 A/m er det større avvik.



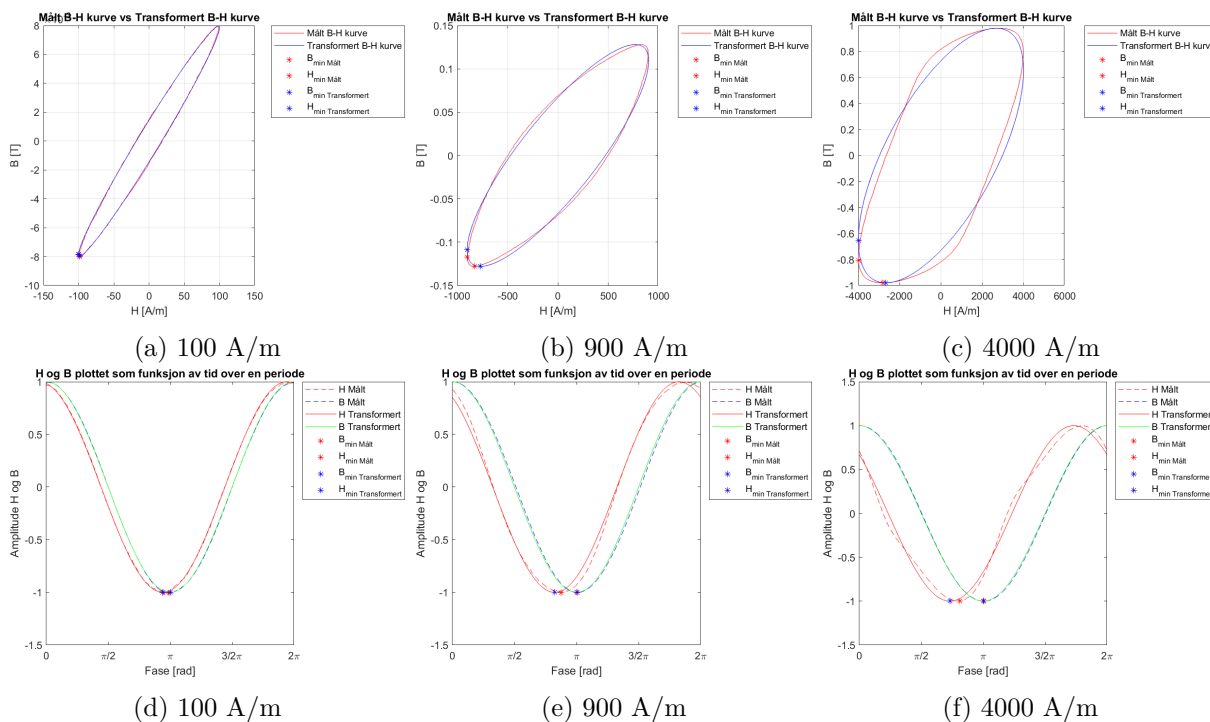
Figur 31: De målte og transformerte B-H kurvene og fasekurvene, ved 50 Hz og 100, 900 og 4000 A/m, for armeringstråd 1.

Fra Figur 32 ser man B-H kurvene og fasekurvene for 100, 900 og 4000 A/m for armeringstråd 2. Tendensene for armeringstråd 2 er de samme som for armeringstråd 1. B-H kurvene og fasekurvene ved 100 A/m er vist i Figur 32a og 32d hvor det er god overensstemmelse mellom kurvene. For 900 A/m som er vist i Figur 32b er den målte kurven mye spisser og det er avvik mellom H_{min} -verdien for de to H-kurvene i Figur 32e. Mens det for 4000 A/m er en geometrisk differanse mellom B-H kurvene i Figur 32c som er et resultat av transformeringen til en lineær elliptisk kurve, samtidig som både H_{min} og B_{min} er like i Figur 32f.



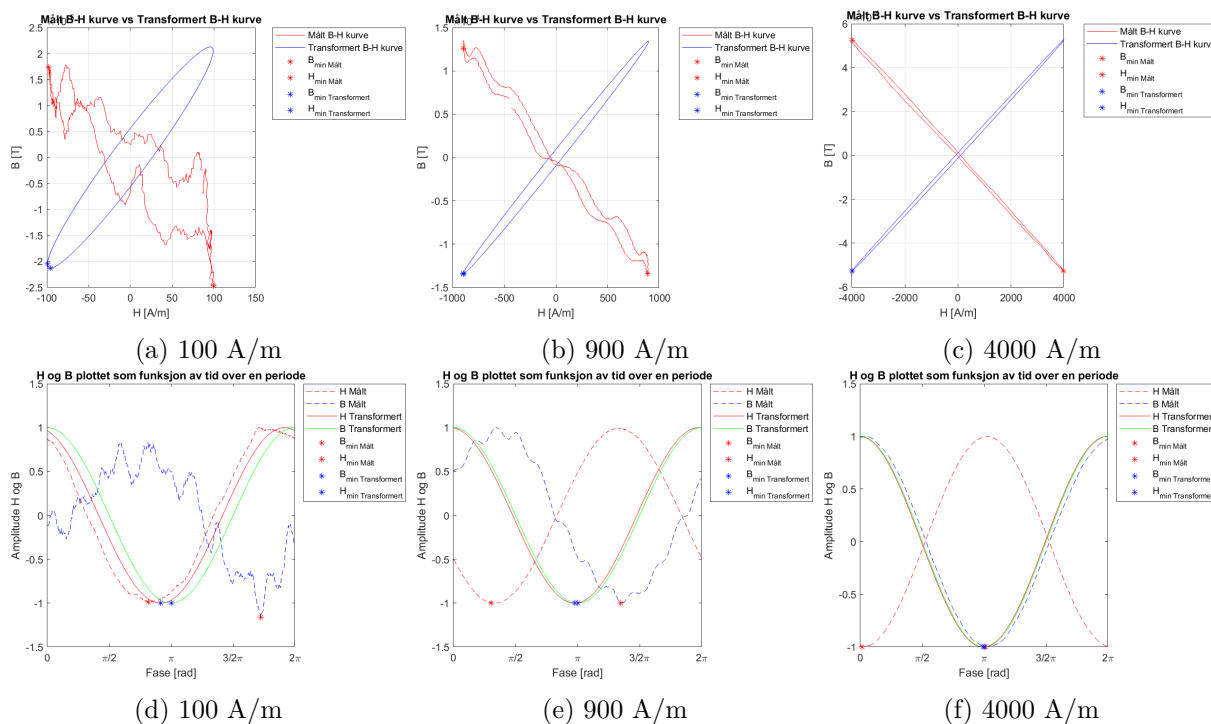
Figur 32: De målte og transformerte B-H kurvene og fasekurvene, ved 50 Hz og 100, 900 og 4000 A/m, for armeringstråd 2.

Figur 33 viser B-H kurvene og fasekurvene ved 100, 900 og 4000 A/m for armeringstråd 3. Kurven ved 100 A/m er vist i Figur 33a og 33d viser god overensstemmelse mellom de målte og de transformerte kurvene, som resulterer i mindre avvik i plottet for den reelle og den imaginære delen av den komplekse permeabiliteten vist i Figur 28. For 900 A/m ser man et avvik mellom kurvene i Figurene 33b og 33e. Sammenlignet med armeringstråd 1 og 2 ved 900 A/m er differansen for armeringstråd 3 er mye mindre. Ved 4000 A/m er det derimot større avvik illustrert ved Figurene 33c og 33f, mye forårsaket av den spisse enden og forskyvningen for de målte kurvene. Dette vil resultere i en for liten vinkel som vil medføre at den reelle permeabiliteten kurven vil bli for høy og den imaginære vil bli for lav.



Figur 33: De målte og transformerte B-H kurvene og fasekurvene, ved 50 Hz og 100, 900 og 4000 A/m, for armeringstråd 3.

De målte BH kurvene og fasekurvene for den ikke-magnetiske armeringstråden 8 i Figurene 34 vil ikke kunne gi ut en korrekt faseforskjell mellom B og H, da den ikke er en fullstendig kurve. Samtidig er de målte kurvene motsatt rettet i forhold til de transformerte. Dette forklarer de negative permeabilitetsverdiene i Figur 29. Ved å transformere kurven til en lineær elliptisk kurve vil det være mulig å finne faseforskjellen ved H_{min} og B_{min} . Disse figurene er tatt med for å illustrere hvordan kurvene for et ikke-magnetisk material blir funnet ved målingene og for å vise at tilnærmingen kan brukes for ikke-magnetisk materialer for å finne en kompleks permeabilitet analytisk for å så beregne det totale tapet ved $\sigma = 0$.



Figur 34: De målte og transformerte B-H kurvene og fasekurvene, ved 50 Hz og 100, 900 og 4000 A/m, for armeringstråd 8.

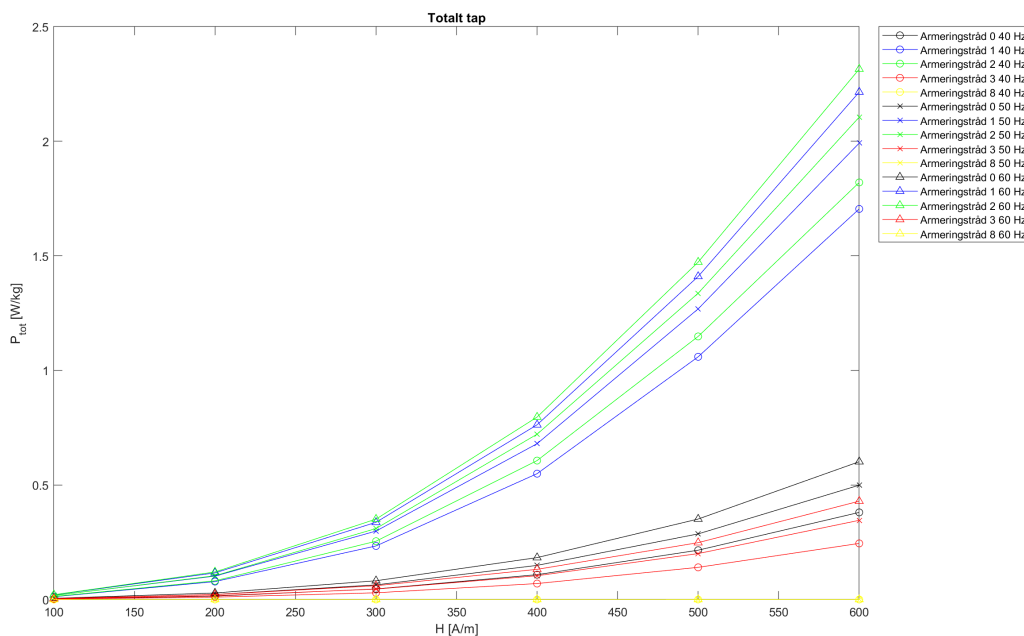
5.3 Beregna tap

De totale tapene ble beregnet med de 4 ulike metoder presentert i kapittel 4.4 på side 27. De 4 ulike metodene er:

1. Totalt tap basert på B-H kurvens areal.
2. Totalt tap ved bruk av den analytiske formelen 25 som baserer seg på de optimaliserte komplekse permeabilitetene funnet i kapittel 4.3.1.
3. Totalt tap ved bruk av den analytiske formelen 25 som baserer seg på de analytisk beregna komplekse permeabilitetene basert på de transformerte B-H kurvene funnet i kapittel 4.3.2.
4. Totalt tap basert på FEM-beregninger i COMSOL med den optimaliserte komplekse permeabiliteten i kapittel 4.3.1 og med et fint, et medium og et grovt mesh.

Hvor metode 1 baserer seg på energitetthet representert av B-H kurvens areal og metode 2, 3 og 4 baserer seg kun på å benytte en kompleks permeabilitet μ og en konduktivitet σ tilnærmet 0. Alle disse metodene er brukt for de runde magnetiske armeringstrådene 0, 1, 2 og 3, samt den ikke-magnetiske armeringstråden 8. Det ble valgt å beregne tapene med de påtrykte H-feltene 100, 200, 300, 400, 500 og 600 A/m ved frekvensene 40, 50 og 60 Hz.

De målte totale tapene plottet som funksjon av påtrykt parallelt H-felt for 40, 50 og 60 Hz er vist i Figur 35. Her representerer henholdsvis de svarte, de blåe, de grønne, de røde og de gule linjene armeringstråd 0, 1, 2, 3 og 8. For å skille mellom frekvensene er det lagt sirkler på 40 Hz kurvene, kryss på 50 Hz kurvene og trekkanter på 60 Hz kurvene. Resultatet i figuren viser at det er mye større tap for armeringstråd 1 (blå) og 2 (grønn) sammenlignet med de andre armeringstrådene. De totale tapene for armeringstråd 8 (gul) er tilnærmet null. Figuren viser også at ved å øke frekvensen så øker også tapene i trådene.



Figur 35: Det totale tapet som funksjon av påtrykt parallelt H-felt for alle armeringstrådene.

De prosentvise avvikene for de beregna totale tapene basert på de 4 metodene sammenlignet med de målte tapene er gitt i Tabell 10, 11, 12, 13 og 14 for armeringstråd 0, 1, 2, 3 og 8. Tapsverdiene brukt til å finne avvikene er lagt ved i Vedlegg 5.

Avviket fra de målte totale tapene for armeringstråd 0 er gitt i Tabell 10. Tabellen viser at differansen mellom de beregna og de målte tapene er tilnærmet identiske, med minimale avvik. Det er veldig små avvik som i store systemer ville blitt vurdert som neglisjerbart. De største avvikene oppstår ved bruk av den komplekse permeabiliteten funnet analytisk, som avviker på maksimalt 2.85%.

Tabell 10: Prosentvis avvik for analytisk- og Fem-beregna totalt tap sammenlignet med målt totalt tap for armeringstråd 0.

Prosentvis avvik sammenlignet med målte tap: Armeringstråd 0								
Målinger			Analytiske tap [%]			FEM-tap mesher [%]		
f [Hz]	H [$\frac{A}{m}$]	$P_{tot}^{m\ddot{a}lt}$ [$\frac{W}{kg}$]	Areal B-H kurve	$\mu_{Optimalisert}$	$\mu_{Analytisk}$	Fin	Medium	Grov
40	100	0.0026	0.02	0.01	0.35	0.01	0.01	-0.01
40	200	0.015	0.02	0	2.85	0	0	-0.02
40	300	0.0461	0	0.01	2.12	0.01	0.01	-0.01
40	400	0.1085	0.03	0	1.16	0	0	-0.02
40	500	0.2153	0.03	-0.01	0.8	-0.01	-0.01	-0.03
40	600	0.3803	0.03	0	-1.16	0	0	-0.02
50	100	0.0039	0	-0.01	-0.74	-0.01	-0.01	-0.03
50	200	0.022	0	-0.01	-1.9	-0.01	-0.01	-0.02
50	300	0.0639	0	0	0.78	0	0	-0.02
50	400	0.149	0	0	-1.55	0	0	-0.02
50	500	0.2864	0	0	-0.51	0	0	-0.02
50	600	0.499	0.02	0	0.22	0	0	-0.02
60	100	0.0052	0.02	0	-0.69	0	0	-0.02
60	200	0.0285	0	0	-1.65	0	0	-0.02
60	300	0.0819	0.02	0	-0.34	0	0	-0.01
60	400	0.183	0.02	0.01	-0.4	0.01	0.01	-0.01
60	500	0.3513	0.02	0	-0.8	0	0	-0.02
60	600	0.6015	0	0	0.39	0	0	-0.02

I Tabell 11 er avvikene fra de totale målte tapene for de beregna totale tapene gitt for armeringstråd 1. Resultatet i tabellen viser tydelig at det er et minimalt avvik mellom målte og beregna tapsverdier. De største avvikene kommer ved bruk av den komplekse permeabiliteten funnet analytisk, men disse avvikene er så små at de er neglisjerbare i store sammenhenger. Det oppstår avvik på 0.02% når meshen er grov, mens det for de to andre meshene er 0% avvik. Et avvik på 0.02% er neglisjerbare i beregninger av tap, spesielt for store systemer.

Tabell 11: Prosentvis avvik for analytisk- og Fem-beregna totalt tap sammenlignet med målt totalt tap for armeringstråd 1.

Prosentvis avvik sammenlignet med målte tap: Armeringstråd 1								
Målinger			Analytiske tap [%]			FEM-tap mesher [%]		
f [Hz]	H [$\frac{A}{m}$]	P ^{målt} _{tot} [$\frac{W}{kg}$]	Areal B-H kurve	$\mu_{Optimalisert}$	$\mu_{Analytisk}$	Fin	Medium	Grov
40	100	0.0121	0.03	0	1.62	0	0	-0.02
40	200	0.0783	0	0	0.59	0	0	-0.02
40	300	0.2338	0.02	0	0.24	0	0	-0.02
40	400	0.5493	0.02	0	0.59	0	0	-0.02
40	500	1.0593	0.03	0	-0.51	0	0	-0.02
40	600	1.7047	0.02	0	-0.1	0	0	-0.02
50	100	0.0175	0	0	-0.28	0	0	-0.02
50	200	0.1022	0	0	1.07	0	0	-0.02
50	300	0.2987	0	0	0.18	0	0	-0.02
50	400	0.6801	0	0	-0.46	0	0	-0.02
50	500	1.2684	0	0	-0.45	0	0	-0.02
50	600	1.992	0	0	1.07	0	0	-0.02
60	100	0.0202	0.02	0	-0.99	0	0	-0.02
60	200	0.1163	0.01	0	0.88	0	0	-0.02
60	300	0.337	0.02	0	0.01	0	0	-0.02
60	400	0.7626	0.02	0	-0.37	0	0	-0.02
60	500	1.41	0.02	0	-0.14	0	0	-0.02
60	600	2.2148	0.02	0	0.13	0	0	-0.02

Avvikene fra de målte totale tapene til de beregna totale tapene for armeringstråd 2 er presentert i Tabell 12. Tabellen viser et minimalt avvik mellom målte og beregna tap. De største avvikene skjer ved bruk av de analytiske komplekse permeabilitetene, hvor avviket er maksimalt 1.32%. I det stort system vil disse avvikene være så ubetydelige og det vil være umulig å si at det er feil i beregningene.

Tabell 12: Prosentvis avvik for analytisk- og Fem-beregna totalt tap sammenlignet med målt totalt tap for armeringstråd 2.

Prosentvis avvik sammenlignet med målte tap: Armeringstråd 2								
Målinger			Analytiske tap [%]			FEM-tap mesher [%]		
f [Hz]	H [$\frac{A}{m}$]	P _{tot} ^{målt} [$\frac{W}{kg}$]	Areal B-H kurve	$\mu_{Optimalisert}$	$\mu_{Analytisk}$	Fin	Medium	Grov
40	100	0.0133	0.02	0	0.92	0	0	-0.02
40	200	0.0816	0.02	0	-0.12	0	0	-0.02
40	300	0.2545	0.03	0	0.13	0	0	-0.02
40	400	0.6065	0.03	0	-0.68	0	0	-0.02
40	500	1.1482	0.02	0	-0.11	0	0	-0.02
40	600	1.8202	0	0	-0.39	0	0	-0.02
50	100	0.0172	0	0	1.32	0	0	-0.02
50	200	0.1038	0	0	-0.54	0	0	-0.02
50	300	0.3099	0.02	0	-0.51	0	0	-0.02
50	400	0.7215	0	0	-0.92	0	0	-0.02
50	500	1.3369	0.02	0	0.65	0	0	-0.02
50	600	2.1052	0.02	0	-0.62	0	0	-0.02
60	100	0.0209	0	0	-1.05	0	0	-0.02
60	200	0.1203	0.02	0	0.15	0	0	-0.02
60	300	0.3509	0.02	0	0.99	0	0	-0.02
60	400	0.7963	0.02	0	0.07	0	0	-0.02
60	500	1.4726	0	0	-0.07	0	0	-0.02
60	600	2.3149	0	0	0.09	0	0	-0.02

For armeringstråd 3 er en sammenligning av avvikene fra de målte til de beregna totale tapene gitt i Tabell 13. Tabellen viser et minimalt avvik mellom målte og beregna tap. Avvikene er maksimalt 3.75%, som oppsto ved bruk av den analytiske komplekse permeabiliteten. De resterende metodene har et avvik mellom 0-0.04%.

Tabell 13: Prosentvis avvik for analytisk- og Fem-beregna totalt tap sammenlignet med målt totalt tap for armeringstråd 3.

Prosentvis avvik sammenlignet med målte tap: Armeringstråd 3								
Målinger			Analytiske tap [%]			FEM-tap mesher [%]		
f [Hz]	H [$\frac{A}{m}$]	P ^{målt} _{tot} [$\frac{W}{kg}$]	Areal B-H kurve	$\mu_{Optimalisert}$	$\mu_{Analytisk}$	Fin	Medium	Grov
40	100	0.002	0.02	-0.02	3.75	-0.02	-0.02	-0.04
40	200	0.0105	0.03	-0.01	0.97	-0.01	-0.01	-0.03
40	300	0.0294	0.03	0	0.39	0	0	-0.01
40	400	0.0697	0.03	-0.01	-1.15	-0.01	-0.01	-0.03
40	500	0.1404	0	-0.01	-2.55	-0.01	-0.01	-0.03
40	600	0.2449	0	0	-1.09	0	0	-0.02
50	100	0.0032	0	0	-1.28	0	0	-0.02
50	200	0.0165	0	-0.01	2.47	-0.01	-0.01	-0.03
50	300	0.0455	0	0	0.92	0	0	-0.02
50	400	0.1039	0.02	0.01	-0.63	0.01	0.01	-0.01
50	500	0.2005	0	0	-0.81	0	0	-0.02
50	600	0.3457	0.02	0	-0.31	0	0	-0.02
60	100	0.0041	0	0.01	5.08	0.01	0.01	-0.01
60	200	0.0217	0.02	0	-1.09	0	0	-0.01
60	300	0.0603	0.02	-0.01	0.92	-0.01	-0.01	-0.02
60	400	0.1318	0.02	0	1.11	0	0	-0.02
60	500	0.2482	0	0	1.22	0	0	-0.02
60	600	0.4293	0	-0.01	0.31	-0.01	-0.01	-0.02

En sammenligning av avvikene for de beregna totale tapene med hensyn på de målte totale tapene for den ikke-magnetiske armeringstråden 8 er presentert i Figur 14. Resultatet viser et gode samsvar for alle metodene utenom ved bruk av permeabiliteten funnet analytisk. Her avviker de totale tapene opptil 60%, hvilke kan være et resultat av humpene fra permeabilitetskurvene. Tapene for armeringstråd 8 er veldig små sammenlignet med de andre armeringstrådene, som gir mening da tråden er ikke-magnetisk og at det derfor ikke vil oppstå store induserte tap i materialet.

Tabell 14: Prosentvis avvik for analytisk- og Fem-beregna totalt tap sammenlignet med målt totalt tap for armeringstråd 8.

Prosentvis avvik sammenlignet med målte tap: Armeringstråd 8								
Målinger			Analytiske tap [%]			FEM-tap mesher [%]		
f [Hz]	H [$\frac{A}{m}$]	$P_{tot}^{m\ddot{a}lt}$ [$\frac{W}{kg}$]	Areal B-H kurve	$\mu_{Optimalisert}$	$\mu_{Analytisk}$	Fin	Medium	Grov
40	100	2e-06	-0.07	0	7.07	0	0	-0.02
40	200	3.8e-06	-0.01	-0.08	21.09	-0.08	-0.08	-0.1
40	300	1.18e-05	-0.06	-0.04	-12.56	-0.04	-0.04	-0.06
40	400	1.23e-05	0.24	0.01	-8.8	0.01	0.01	-0.01
40	500	4.57e-05	-0.07	0.05	-3.04	0.05	0.05	0.03
40	600	6.12e-05	-0.05	0	10.69	0	0	-0.02
50	100	1.24e-05	0.14	0	2.49	0	0	-0.02
50	200	1.08e-05	-0.31	0.02	-10.65	0.02	0.02	0
50	300	2.45e-05	0.18	-0.02	-0.87	-0.02	-0.02	-0.04
50	400	3.55e-05	0.03	0.04	1.25	0.04	0.04	0.02
50	500	1.38e-05	0.09	-0.07	-8.36	-0.07	-0.07	-0.09
50	600	1.15e-05	-0.31	0.03	60.69	0.03	0.03	0.01
60	100	1.17e-05	-0.29	0	-0.71	0	0	-0.02
60	200	2.12e-05	0.04	0.01	2.67	0.01	0.01	-0.01
60	300	3.86e-05	0.14	-0.03	-5.34	-0.03	-0.03	-0.05
60	400	2.08e-05	-0.11	-0.01	13.78	0	-0.01	-0.02
60	500	3.87e-05	0.01	0.04	-19.64	0.03	0.03	0.02
60	600	4.55e-05	0.04	-0.05	-7.81	-0.05	-0.05	-0.07

6 Diskusjon

I dette kapitlet vil de oppnådde resultatene bli drøftet. Et fokus vil være på hva resultatene ble, og hva de har å si for bruken av kompleks permeabilitet i et eventuelt videre arbeid.

6.1 Separerte tap

Fra Tabell 6 i kapittel 5.1.1 på side 30 kan man se at det er en liten spredning for både hysteretapets koeffisienten h og virvelstrømstaps koeffisienten ec . Både x og y ligger mellom 1.7 og 2.1 noe som teorien antok at den skulle. Dersom mistanken om at instrumentet benytter standardiserte koeffisienter stemmer, vil det med så store differanser i de beregna koeffisientene føre til store avvik mellom de målte og de beregna separerte tapene.

For alle armeringstrådene observeres det fra Figurene og Tabellene i kapittel 5.1.2, som starter på side 31, at det i stor grad er små avvik. Sammenlignes tapene i armeringstråd 0 med tapene i armeringstråd 1, hvor begge trådene er av grade 34, er de totale tapene høyere i armeringstråd 0. Den eneste differansen mellom dem er diameteren hvilke tyder på at hysteretapene reduseres ved økt diameter, mens virvelstrømstapene økes ved samme tilfelle. Sammenlignes tapene for armeringstråd 1 med tapene i armeringstråd 2 er tapene veldig like. De tilhørende koeffisientene for armeringstråd 1 og 2 er mer like sammenlignet med armeringstråd 0. Sammenlignes koeffisientene til armeringstråd 3 opp imot koeffisientene til armeringstråd 0, 1 og 2, er 3 av 4 koeffisienter høyere, det vil si at h , x og ec er høyere. Ved å sette inn ulike frekvenser og B_{max} -verdier vil dette føre til høyere tap, hvilke blir gjenspeilet i Figur 20.

Dersom armeringstråd 5 sammenlignes med armeringstråd 4 er de totale tapene for armeringstråd 5 litt høyere. Dette kan være et resultat av at armeringstråd 4 og 5 henholdsvis har graderingen 65 og 95, samtidig som at bredden til 4 er 10.5 mm og at bredden til 5 er 9 mm. Armeringstråd 6 har graderingen 105 og en diameter på 9 mm. Dersom tapene for armeringstråd 5 og 6 sammenlignes, er det tydelig at tapene øker med graderingen. Tapene for armeringstråd 7 er litt høyere sammenlignet med tapene for ulike frekvenser og H-felt for armeringstrådene 4, 5 og 6. Her er også graderingen høyere, da armeringstråd 7 har en gardering på 125. Det disse sammenligningene viser er at ved å øke graderingen eller diameteren øker også tapene.

Det prosentvise avviket for de beregna totale tapene med hensyn på de målte tapene, varierte mellom 0.1-6%. Slik avvik må man regne med når man benytter lineariserte tilnærminger. Det samme gjelder også for hysterese- og virvelstrømstapene, hvor alle armeringstrådene har avvik mellom 1-12%. Når frekvensen oversteg 80 Hz, kunne man ved et par av figurene, som Figur 20 og 21, se at de målte hystereseplottene ble ikke-lineære. Dette kan være hovedårsaken til avvikene.

Det ble også observert at de største avvikene skjedde ved 30 Hz og 80 Hz når B-feltet var 600 mT. Det viser at jo nærmere man kommer ytterpunktene av de definerte målepunktene, altså laveste og høyeste definert frekvens og magnetisk flukstetthet, jo større er avvikene. Ved et B-felt på 400 mT er det mindre avvik for de totale tapene. Ved å utføre flere målinger med mindre intervaller mellom B-verdiene, samt også flere frekvenser, kunne det resultert i mer presise koeffisienter som ville gitt bedre samsvar for flere verdier. Resultatet presentert i denne rapporten viser at ved å bruke de beregna koeffisientene og utfører tester ved å sette koeffisientene inn med ytterpunktene

av frekvens og flukstetthet, så vil tilnærmingen være mindre presis enn ved for målepunkter midt i de lineære tilnærmingene. Basert på de relativt lave avvikene, så tyder resultatet på at instrumentet ikke bruker standardiserte koeffisienter og dermed gir gode tilnærminger av de separerte tapene i sammenlignet med Steinmetz metoden.

Steinmetz metoden baserer seg på at hysterestapene forandres proporsjonalt med frekvensen og at virvelstrømstapene forandres proporsjonalt med kvadratet av frekvensen. Basert på de små avvikene, samtidig som at hystereseplottene er tilnærmet lineære og at de målte virvelstrømstapene stiger fortere likt med de beregna virvelstrømstapene, blir det riktig å si at resultatet stemmer med teorien om at W_h stiger proporsjonalt med frekvens og at W_{ec} er proporsjonal til kvadratet av frekvensen:

$$\begin{aligned} W_h &\propto f \\ W_{ec} &\propto f^2 \end{aligned}$$

Da både målingene og beregningene ser ut til å gå ut ifra samme prinsipp om at hysterese- og virvelstrømstapene endres henholdsvis lineært og kvadratisk med frekvensen, vil ikke disse beregningene være en fasit svar på hva de faktiske hysterese og virvelstrømstapene. Resultatene viser bare at instrumentets tilnærming for å separere tapene er basert på samme prinsipp som Steinmetz og verifiserer på ingen måte hva de faktiske separerte tapene er. Målingen gir derimot en indikasjon på hva hysterese- og virvelstrømstapene i materialet er ved ulike påtrykk av B-felt.

6.2 Beregna kompleks permeabilitet

I kapittel 5.2.1 er det gitt Figurer for den reelle og den imaginære delen av den komplekse permeabiliteten tilhørende armeringstråd 0, 1, 2, 3 og 8. Figurene inneholder den komplekse permeabiliteten funnet ved tre metoder beskrevet i kapittel 4.3.1 og 4.3.2. Metodene blir forkortet til; Optimalisert, Målt og Transformert. Alle tilnærmingene baserer seg på Formel 12 som representerer hysterestapene.

Fra Figurene kan man se en veldig god overensstemmelse mellom de optimaliserte kurvene og de transformerte kurvene for armeringstråd 0, 1, 2 og 3. Da det er en så god overensstemmelse kan det argumenteres for at det er riktig å bruke Formel 12 som gir en kompleks permeabilitet som representerer hysterestapene når konduktiviteten σ er tilnærmet null. Når konduktiviteten settes lik null, vil det ikke kunne flytte resistive strømmer i materialet og alle resistivetap kan utelukkes. Det betyr at de totale tapene teoretisk sett vil kun være forårsaket av hysterese og at de derfor vil være representert av hysterestapene. Den komplekse permeabilitet som representerer hysterestapene i Formel 12 vil derfor være den riktige tilnærmingen for å finne det totale tapet i dette tilfellet. Den gode overensstemmelsen mellom de transformerte og de optimaliserte komplekse permeabilitetsverdiene kommer som resultat av at begge metodene baserer seg på det faktiske målte totale tapet. I den optimaliserte metoden ble faseforskjellen som ga den minste differansen mellom de målte totale tapene og de analytisk beregna totale tapene funnet. Mens for den transformerte metoden blir det målte totale tapet brukt til å beregne reluktiviteten for materialet.

Tilnærmingen som transformerer ikke-lineære B-H kurver til lineære elliptiske B-H kurver ble benyttet for å forsikre at alle kurvene ved alle målingene inntar en elliptisk form som representerer det totale energitapet per syklus som også kan gi en riktig vinkel θ for faseforskjellen. Resultatet i kurvene viser at den analytiske tilnærmingen av kompleks permeabilitet basert på de transformerte B-H kurvene samsvarer i veldig stor grad med de optimaliserte verdiene for den komplekse permeabiliteten. Man kan se desimalavvik på flere av de komplekse verdiene, disse kan komme av at den optimaliserte tilnærmingen går mot den minste mulige verdien for forskjellen mellom de beregnet og de målt totalt tapene. Som oftest kom differansen ut som en verdi ganger 10^{-16} , hvilket kan påvirke avvikene, men i en så alt for liten grad. Samtidig ble plottene for de transformerte B-H kurvene plottet som funksjon av tiden t , hvor tiden t var satt til å være mellom 0 og 2π med 421 punkter. Dersom det hadde blitt benyttet enda flere målepunkter ville man kanskje fått små endringer i tidene hvor B_{min} og H_{min} oppsto som kunne gitt enda større samsvar mellom de to tilnærmingene for å finne komplekse permeabilitet. Det er her viktig å presisere at hensikten med denne metoden var ikke at svarene måtte bli identiske, men heller at tilnærmingene gir resultater som er innenfor rimelighetens grenser slik at metoden kan brukes for å på en enkel måte kunne forutsi tapene i store og avansert kabelgeometrier på en rask og effektiv metode.

Det er derimot større avvik mellom de målte og de optimaliserte komplekse permeabilitetene. I intervallet mellom 100-600 A/m er det i stor grad en god overensstemmelse for de reelle og imaginære delene for de magnetiske materialene. For armeringstråd 1 og 2 er permeabilitetskurvene gitt i Figur 26 og 27. Disse viser store avvik mellom de målte og optimaliserte kurvene i intervallet mellom 900-2000 A/m, mens de viser mindre avvik i intervallet 2000-5000 A/m. Fra de tilhørende B-H kurvene og fasekurvene i Figur 31 og 32 for armeringstråd 1 og 2 kan det se ut som at avvikene oppstår når man får en asymmetriske ellipser, altså en ikke-lineær B-H kurve. Permeabilitetskurvene for armeringstråd 0 og 3 gitt i Figur 25 og 28 er det store avvik mellom 500-5000 A/m. De tilhørende B-H kurvene og fasekurvene i Figur 30 og 33 viser asymmetriske ellipser for både 900 og 4000 A/m. Man ser for alle de magnetiske armeringstrådene at ved 100 A/m er B-H kurvene elliptiske og tilnærmet lineære, men når påtrykket øker til 900 A/m ser man tydelig at kurvene blir mindre elliptiske og mindre lineære. Resultatet fra permeabilitetskurvene, fasekurvene og B-H kurvene for armeringstråd 0, 1, 2 og 3 tyder derfor på at den analytiske metoden kun er gyldig for lineære elliptiske B-H kurver.

Når man sammenligner de målte og transformerte B-H kurvene for de fire magnetiske trådene ser man at den målte har en mye spissere ende. Når man videre ser på de tilhørende fasekurvene ser man at det er en faseforskjell mellom de ulike kurvenes minimumspunkt for H-verdiene. Minimumspunktet for B er nøyaktig det samme uavhengig av armeringstråd, tilnærming og påtrykk av H. I alle tilfellene er fasen for H_{min} for den målte kurven større enn for den transformerte kurven. Dette vil gjøre at man får en mindre faseforskjell mellom B og H enn ved bruk av fasen til den transformerte kurven. Ved å bruke en mindre faseforskjell θ vil man få en høyere reell del og lavere imaginær del for den komplekse permeabiliteten. Dette er vist i permeabilitetskurvene i Figurene i kapittel 5.2.1, hvor man tydelig ser at den reelle permeabiliteten er for høy og den imaginære delen er for lav. Når man da benytter faseforskjellen mellom den transformerte H_{min} og B ser man i permeabilitetskurvene i Figur 25, 26, 27 og 28 fra kapittel 5.2.1 på side 37 at kurvene jevner seg ut og blir mer presise.

Resultatet viser viktigheten av at kurvene B og H som funksjon av tid er sinusformet for å kunne finne riktig faseforskjell mellom B og H. Selv om man ved H-felt under 500 A/m og over 2500 A/m ser at det er en god overensstemmelse for de målte permeabilitetene for armeringstråd 1 og

2, er ikke dette tilfellet for armeringstråd 0 og 3. Man kan se en sammenheng mellom formene på B-H kurvene da de for lave H-verdier er tilnærmet elliptiske for armeringstråd 1 og 2, men ved H-felt rundt 900 A/m ser det ut som at kurven er i et mellomstadium mellom å oppnå og ikke oppnå metning. Det vil si at kurven faller mye raskere, hvilke gir feil vinkel.

For armeringstråd 8 var det også en god overensstemmelse mellom de optimaliserte og transformerte permeabilitetskurvene i Figur 29, med unntak av et par ujevnheter. Disse ujevnhetene skyldes at B-feltet er så lavt ved lave påtrykk av H-felt at instrument, for det ikke magnetiske materiale i armeringstråd 8, sliter med å gjøre nøyaktige målinger. Derav kan den målte B-verdien måles ujevnt, mens ved høye H-verdier så vil forholdet mellom B og H være mer stabilt. For armeringstråd 8 er den målte komplekse permeabiliteten i Figur 29 veldig feil. Basert på permeabilitetskurvene alene kan det virke som en fortegnsfeil. Dersom man ser på de tilhørende B-H kurvene og fasekurvene gitt i Figur 34 er det tydelig at de målte kurvene ikke vil være brukende i beregningene av kompleks permeabilitet. Kurvene er rotete og motsatt orientert. Den motsatte orienteringen vil gjøre at vinkelen mellom B_{min} og H_{min} bli tilnærmet 180 grader og derfor vil den komplekse permeabiliteten bli negativ. Dette forklarer oppførselen til de målte permeabilitetskurvene i Figur 29. Selv om resultatet for armeringstråd 8 viser små avvik for den transformerte permeabiliteten, viser resultatet også at selv for ikke-magnetiske materialer vil den analytiske tilnærmingen kunne være representativ for den komplekse permeabiliteten når de målte kurvene transformeres inn til elliptiske B-H kurver. Det vil kreves enda dypere dykk i hvordan målingene av ikke-magnetiske materialer bør gjøres for å få best mulig resultat ut, da målingene i denne avhandlingen, for den ikke magnetiske armeringstråden, viser merkelige tendenser. Dersom man får enda mer pålitelig svar for ikke-magnetiske materialer vil dette redusere begrensingsområdene i tapsberegninger ved at man ikke trenger å ta hensyn til om armeringen er magnetisk. Anvendeligheten og bruksområde for metoden blir dermed også mye større. Dette gjør at man med videre utvikling på dette forskningsområde vil kunne beregne de totale tapene i armeringstrådene basert på analytiske formler ved å benytte et ikke-magnetisk materiale beskrevet med en kompleks permeabilitet.

6.3 Beregna tap

Beregningene av totalt tap ble gjort i henhold til metodikken presentert i kapittel 4.4 og resultatene er presentert i kapittel 5.3 i Tabellene 23, 24, 25, 26 og 27. Resultatet viser at de målte tapene stemmer godt overens med arealet til B-H kurven. Fra teorien vet man at areal til B-H kurven tilsier energitapet per syklus per volum, og dette omgjort til effekttap vil tilsi det totale tapet. Dette er akkurat hva resultatet i tabellene viser. Disse beregningene er gjort av arealet til den målte B-H kurven, hvilke for armeringstråd 8 er et ganske fascinerende resultat. Selv om kurvene for armeringstråd 8 ikke er lukkede kurver og er veldig rotete, stemmer det totale tapet beregna fra arealet med de målte totale tapene. Resultatet påpeker også at arealet til B-H kurven inkluderer både hysterese- og virvelstrømstap.

De totale tapene beregnet ved bruk av analytiske formler hvor konduktiviteten er satt til tilnærmet 0 og permeabilitet beskrevet i kompleksform viser også at de stemmer godt overens med de målte totale tapene. Den optimaliserte komplekse permeabiliteten er forventet at den skal gi riktig totalt tap, da den komplekse permeabiliteten er funnet slik at differansen mellom målt og beregnet totalt tap blir minst mulig. Tapene beregnet analytisk med den komplekse permeabiliteten som ble funnet basert på de transformerte B-H kurvene, viser veldig god overensstemmelse

med de målte tap for armeringstråd 0, 1, 2 og 3. De analytisk beregna tapene for armeringstråd 8 er derimot litt mer avvikene, hvor det på det meste er et avvik på 60%. Dette skyldes ujevnhetene vist i permeabilitetskurven i Figur 29. Fra permeabilitetskurvene i Figur 25, 26, 27 og 28 har den optimaliserte og beregna komplekse permeabiliteten god overensstemmelse. Dette vil også resultere i god overensstemmelse for de analytisk beregna totale tapene, da begge de analytiske metodene bruker Formel 25 og at alle andre variabler er de samme. Resultatet stemmer relativt godt, foruten ujevnhetene for det ikke-magnetiske materialet. Samtidig viser avvikene for de totale tapene funnet når man benytter den optimaliserte komplekse permeabiliteten for armeringstråd 8, at det finnes en kompleks permeabilitet som klarer å representere de totale tapene for et ikke-magnetisk materiale. Dette reduserer begrensingsområdene for tapsberegninger ved at man ikke trenger å ta hensyn til om armeringen er magnetisk. Anvendeligheten og bruksområde for metoden blir dermed også mye større. Resultatet viser at man ved å erstatte et ledende materiale med et ikke-ledende materiale beskrevet av en kompleks permeabilitet kan beregne de totale tapene på en effektiv og veldig presis måte. Dette gjør at man i stor grad ikke er avhengig av annet enn den komplekse permeabiliteten for å kunne beregne de totale tapene for et materiale. I store og kompliserte geometrier kan dette redusere beregningstiden.

De beregna totale tapene gjort med tre ulike mesher i COMSOL samsvarer også med tapene gjort ved målingene. Små avvik kan observeres ved den grove meshen, men dette er avvik på maksimalt 0.09%, et avvik som kan betraktes som neglisjerbart. I et stort system er dette et avvik man aldri ville lagt merke til. Resultatet viser derfor at man ved å sette ledningsevnen til å være tilnærmet null, ikke vil være avhengig av fine mesh for å inkludere alle de resistivetapene, men at man heller kan bruke grove mesh da man ikke lenger er avhengig av tapene i overflaten. Ved fine mesher for store og avanserte geometrier vil beregningstiden være veldig lang. Men ved å benytte et material uten ledningsevne vil man da kunne bruke grovere mesh, som vil redusere beregningstiden.

Fra resultatene kan man også se at tapene øker når frekvensen øker. Dette vil si at dersom man benytter lavere frekvenser ved overføring fra plattformer til land kan dette redusere transmissjonstapene i armeringen.

7 Konklusjon

Denne avhandlingen omfatter en studie om bruken av en kompleks permeabilitet til å beskrive et ikke-ledende material som erstatter et ledende material. Den komplekse permeabiliteten er basert på fysiske målinger gjort for fem ulike armeringstråder, og brukes til å beregne det totale tapet analytisk og ved å benytte FEM-beregninger i COMSOL.

Det ble først gjort målinger hvor B-feltet ble variert som funksjon av frekvens. Dette ble gjort for åtte ulike armeringstråder, hvorav fire av dem var runde og fire av dem flate. Hensikten var å se hvordan instrumentet målte og separerte det totale tapet inn i hysterese- og virvelstrømstap. Den modifiserte Steinmetz metoden ble benyttet til å analytisk separere de totale tapene. Resultatet av separeringen viste at det var godt samsvar mellom de beregna og de målte separerte tapene.

Videre ble den komplekse permeabiliteten beregnet med tre metoder for fire runde magnetiske armeringstråder og en rund ikke-magnetisk armeringstråd. Alle metodene baserer seg på å finne faseforskjellen mellom B og H. Den første metoden baserte seg på å optimalisere faseforskjellen mellom B og H slik at man får minst mulig differanse mellom beregna og målte tap. Tapet beregnet ved den optimaliserte komplekse permeabiliteten stemte godt i alle tilfeller og dette bekrefter hypotesen om at et ledende materiale kan erstattes av et ikke ledende materiale beskrevet av en kompleks permeabilitet. Den andre metoden for å finne kompleks permeabilitet var basert på analytiske formler som tar utgangspunkt i de fysiske målingene og de målte B-H kurvene, hvor beregningene først baserte seg på faseforskjellen mellom B og H fra den målte B-H kurven. Resultatet for denne komplekse permeabiliteten stemte godt overens med den optimaliserte komplekse permeabiliteten ved lave påtrykk av H-felt, da kurvene her var lineære elliptiske kurver. Men ved høyere påtrykk av H-felt ble B-H kurvene ikke-lineære, som gjorde at fasevinkelen ble for lav og dermed avviket den komplekse permeabiliteten fra den optimaliserte komplekse permeabiliteten.

Deretter ble B-H kurvene transformert til å bli lineære elliptiske kurver for alle påtrykk av H-felt ved å finne reluktiviteten. Ved å bruke faseforskjellene mellom B og H for disse kurvene ble det en god overensstemmelse for de komplekse permeabilitetene sammenlignet med den optimaliserte komplekse permeabiliteten. Det beregna totale tapet hadde veldig god overensstemmelse med de målte tapene for de magnetiske armeringstrådene, med avvik på omtrent 0.01%. For den ikke-magnetiske armeringstråden var det små ujevnheter i beregningen av den komplekse permeabiliteten forårsaket av målingene, som førte til et par større avvik. På tross av dette var det godt samsvar mellom målt og beregna totalt tap for denne armeringstråden også. Dette viser at man ved å benytte enkle analytiske formler sammen med en kompleks permeabilitet kan enkelt beregne de totale tapene for både et ledene og et ikke-ledene materiale i en armering.

Den optimaliserte komplekse permeabiliteten ble også lagt inn i en COMSOL geometri. Det ble da beregnet totalt tap ved å benytte et fint, et medium og et grovt mesh. Resultatet viser at for både det fine og for medium meshet har det beregna totale tapet veldig god overensstemmelse med det målte tapet. Ved bruk av det grove meshet er det maksimale avviket på omtrent 0.09%, hvilke betraktes som neglisjerbart. Det resultatet viser er at man ved å bruke et ikke ledende materiale med en kompleks permeabilitet i COMSOL kan bruke veldig grove mesh uten at dette påvirker resultatet. Dette vil for stor og avanserte geometrier redusere beregningstiden.

Konklusjonen fra denne avhandlingen er at bruk av kompleks permeabilitet til å beskrive de totale tapene, for et ikke ledende material som erstatter et ledende material, er en effektiv og veldig presis tilnærming. Med minimale avvik og enkle formler kan en forutse tapene i en armeringstråd uten å være avhengig av å ha kunnskap om materialets egenskaper. Dersom det utføres mange målinger på samme tråd og man finner en form for gjennomsnittsverdi for den komplekse permeabiliteten ved ulike påtrykk av H-felt og ulike frekvenser, kan man bruke dette til å forutse de totale tapene i avanserte geometrier for sjøkablene.

8 Veien videre

- Det vil være interessant å se på bruken av kompleks permeabilitet i et system. Dette kan for eksempel være å lage en 2D eller 3D modell av en tre-leder kabel i COMSOL og se på hvor gunstig bruken av kompleks permeabilitet kan være i et system.
- Da det ikke ble tid til å finne den komplekse permeabilitet for de flate armeringstrådene i denne avhandlingen, ville dette vært interessant å gjøre i et videre arbeid.
- Datasettene i denne avhandlingen er basert på en målesekvens for hver tråd. Da målingene kan variere fra gang til gang, kunne det vært interessant å gjøre flere av samme typen målinger og bruke gjennomsnittsverdier. Dette vil gjøre at man for hver enkelt tråd type kan forutse tapene i de kablene de blir benyttet.
- Se på påvirkningen av tap i normal-retning og ikke bare parallell retning. Dette vil kreve mer avansert måleinstrument, da Brockhaus instrumentet bare påfører et parallelt H-felt.
- Gå enda dypere inn i målinger gjort på ikke-magnetiske materialer.

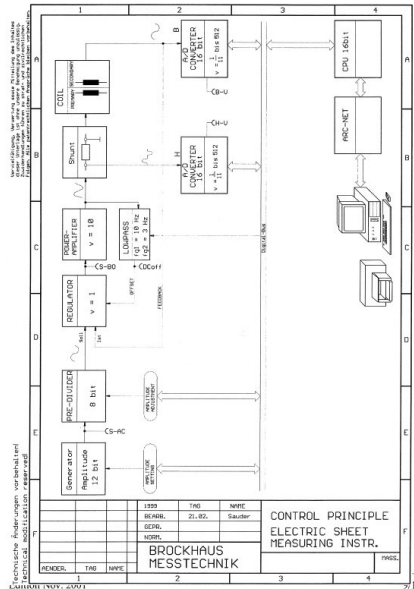
Referanser

- [1] Ronny Stølan. Losses and inductive parameters in subsea power cables. Master's thesis, Institutt for elkraftteknikk, 2009.
- [2] Håkon Sars. Tapsberegninger i stålmerte kabler. Prosjektoppgave i TET4510, Instituttet for elkraftteknikk, NTNU, Desember 2021.
- [3] Ahmed Reda, James Thiedeman, Mohamed A Elgazzar, Mohamed A Shahin, Ibrahim A Sultan, and Kristoffer K McKee. Design of subsea cables/umbilicals for in-service abrasion-part 1: Case studies. *Ocean Engineering*, page 108895, 2021.
- [4] Wilfried Frelin, Christophe Moreau, Dag Willen, Carsten Thidemann, G De Robien, and N Boudinet. Measurements of losses on three-core submarine power cables. In *Proceedings of the 9th International Conference on Insulated Power Cables, Versailles, France*, pages 21–25, 2015.
- [5] Yevhen Ivanenko. *Estimation of electromagnetic material properties with application to high-voltage power cables*. PhD thesis, Linnaeus University Press, 2017.
- [6] Sven Nordebo, Mats Gustafsson, Yevhen Ivanenko, Börje Nilsson, and Daniel Sjöberg. Cylindrical multipole expansion for periodic sources with applications for three-phase power cables. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 41(3):959–965, 2018.
- [7] Evangelia Bompou, Nenad Mijatovic, Chresten Træholt, Dag WA Willén, and Carsten Thidemann. Loss in steel armour wires for submarine power cables. In *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, pages 1–5. IEEE, 2018.
- [8] Danijela Palmgren, Johan Karlstrand, and Gunnar Henning. Armour loss in three-core submarine xlpe cables. In *International Conference On Insulated Power Cables. France*, 2011.
- [9] SV Kulkarni and SA Khaparde. *Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics*. CRC Press, 2012.
- [10] Paweł Jabłoński, Tomasz Szczegielniak, Dariusz Kusiak, and Zygmunt Piątek. Analytical–numerical solution for the skin and proximity effects in two parallel round conductors. *Energies*, 12(18):3584, 2019.
- [11] Ping-Kun Lee, Kai-Chen Kuo, Cheng-Ju Wu, Zuo-Tin Wong, and Jia-Yush Yen. Prediction of iron losses using the modified steinmetz equation under the sinusoidal waveform. In *2011 8th Asian Control Conference (ASCC)*, pages 579–584. IEEE, 2011.
- [12] Satoshi Saga. Mechanical sensors. In *Reference Module in Biomedical Sciences*. Elsevier, 2021.
- [13] WL Soong. Bh curve and iron loss measurements for magnetic materials. *Power Engineering Briefing Note Series*, 12, 2008.
- [14] APS Baghel, B Sai Ram, L Daniel, SV Kulkarni, G Krebs, JB Blumenfeld, and L Santandrea. An alternative approach to model mechanical stress effects on magnetic hysteresis in electrical steels using complex permeability. *Computational Materials Science*, 166:96–104, 2019.

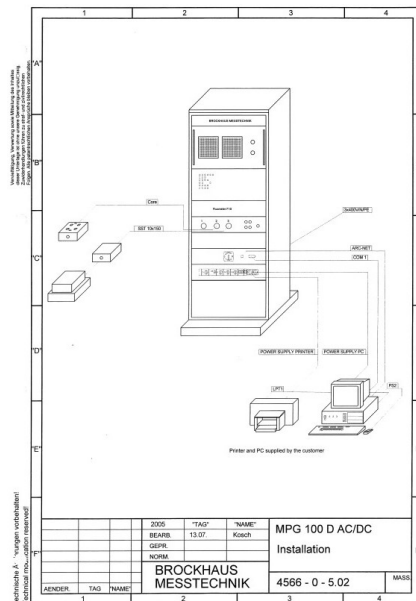
- [15] Paul Regtien and Edwin Dertien. 6 - inductive and magnetic sensors. In Paul Regtien and Edwin Dertien, editors, *Sensors for Mechatronics (Second Edition)*, pages 145–182. Elsevier, second edition edition, 2018.
- [16] Ferroxcube Data Handbook. Soft ferrites and accessories, 2009.
- [17] Antonio Barba-Juan, Nuria Vicente, Andrés Mormeneo-Segarra, and Carolina Clausell-Terol. Influence of microstructure and magnetizing mechanisms on magnetic complex permeability (imaginary part) of a cu-doped ni-zn polycrystalline ferrite. *Ceramics International*, 47(20):29504–29508, 2021.
- [18] Juan Carlos Del-Pino-Lopez, Pedro Cruz-Romero, and Luis Carlos Sánchez-Díaz. Loss allocation in submarine armored three-core hvac power cables. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021.
- [19] A Barba, C Clausell, JC Jarque, and Luis Nuño. Magnetic complex permeability (imaginary part) dependence on the microstructure of a cu-doped ni-zn-polycrystalline sintered ferrite. *Ceramics International*, 46(10):14558–14566, 2020.
- [20] O Moreau, L Popiel, and JL Pages. Proximity losses computation with a 2d complex permeability modelling. *IEEE Transactions on Magnetics*, 34(5):3616–3619, 1998.
- [21] Yevhen Ivanenko and Sven Nordebo. Measurements and estimation of the complex valued permeability of magnetic steel. In *Linnæus University, Department of Physics and Electrical Engineering*, volume 351, 2015.
- [22] Luca Giussani, Luca Di Rienzo, Massimo Bechis, and Carlo De Falco. Computation of armor losses in ac submarine cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36(5):3014–3021, 2020.
- [23] Hajime Igarashi. Semi-analytical approach for finite-element analysis of multi-turn coil considering skin and proximity effects. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(1):1–7, 2016.
- [24] IEC 60287-1-1: 2006. Electric cables—calculation of the current rating—part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses—general, 2006.
- [25] Brockhaus Industrial Group. *Brockhaus Messtechnik MPG 100 D AC/DC*. Brockhaus Industrial Group.
- [26] IEC 60404-3:1992+AMD1:2002+AMD2:2009 CSV. Magnetic materials - part 3: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester, 2009.
- [27] D Echeverría Ciaurri, Obiajulu J Isebor, and Louis J Durlofsky. Application of derivative-free methodologies to generally constrained oil production optimization problems. *Procedia Computer Science*, 1(1):1301–1310, 2010.
- [28] R Stølan and M Hatlo. Armour loss in three core submarine cables—measurements of cable impedance and armour wire permeability. *Proceedings of the CIGRE Session, Paris, France*, pages 26–31, 2018.

Vedlegg 1 - Måleinstrument

Her er kretsen og oppsettet for Brockhaus messtechnik vist i henholdsvis Figur 36a og 36b.



(a) Kretsdigram for Brockhaus måleinstrumentet.

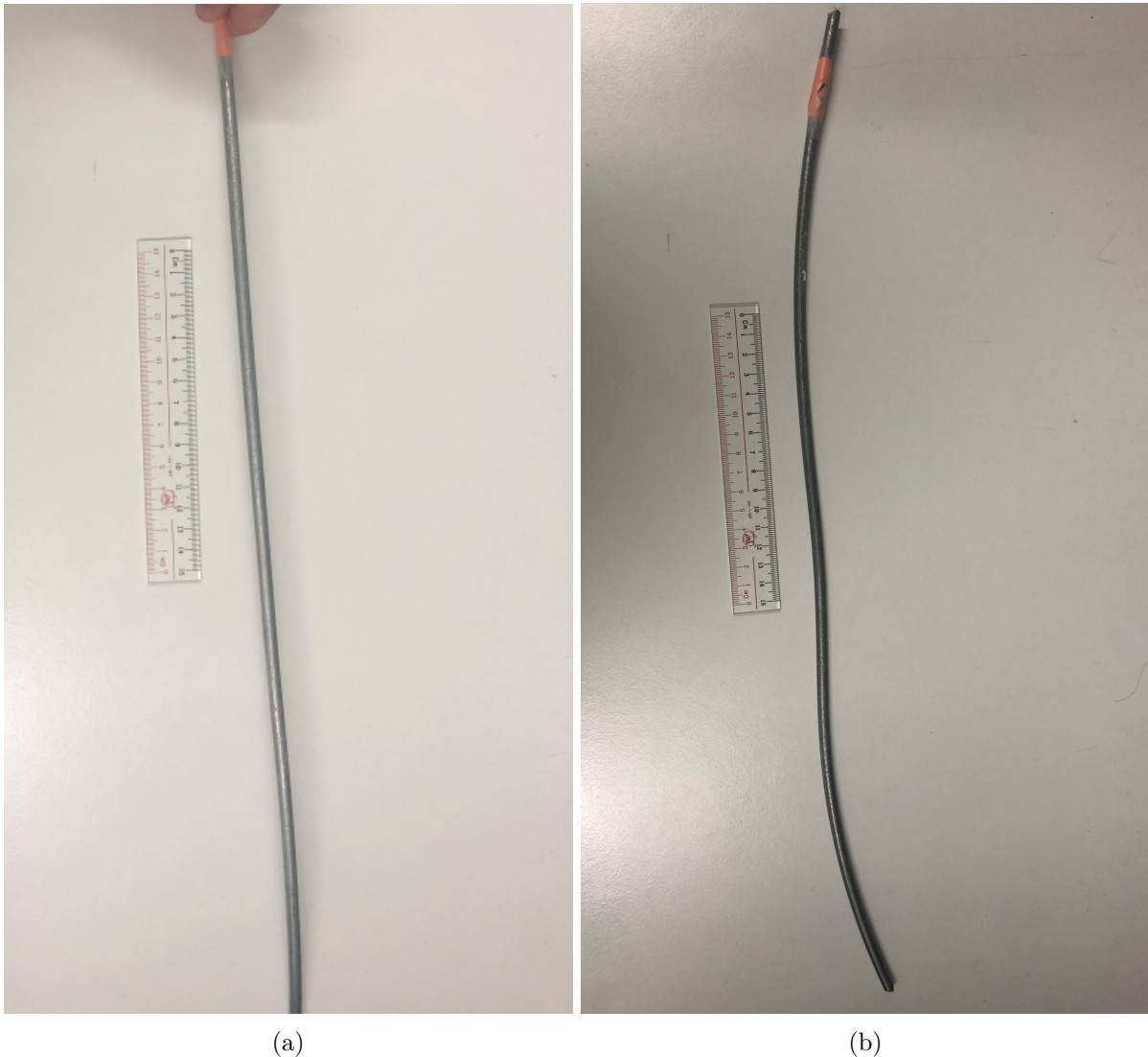


(b) Oppsettet til Brockhaus måleinstrumentet.

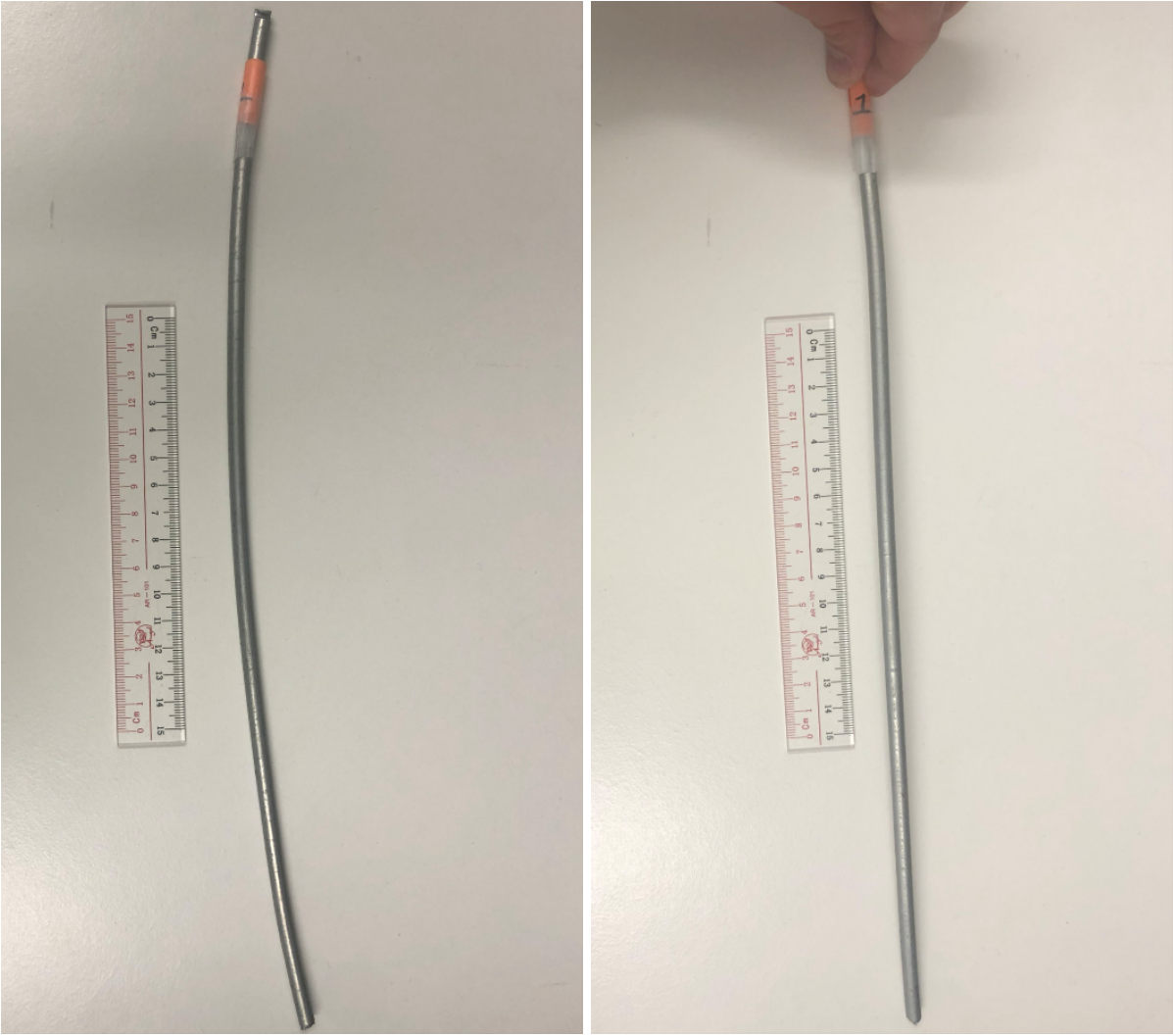
Figur 36: Oppsett og krets for *Brockhaus messtechnik*. [25]

Vedlegg 2 - Armeringstrådene

I dette avsnittet er det lagt ved bilder av de ubehandla armeringstrådene fått fra *NEXANS Norway*. Bildene er lagt ved for å vise at trådene ikke er beine. En linjal er også med på bildene, for å vise trådenes størrelse. Linjalens lengde er 15 cm. Figur 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45 viser henholdsvis armeringstråd 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 og 8 som er videre presentert i kapittel 3 på side 21.



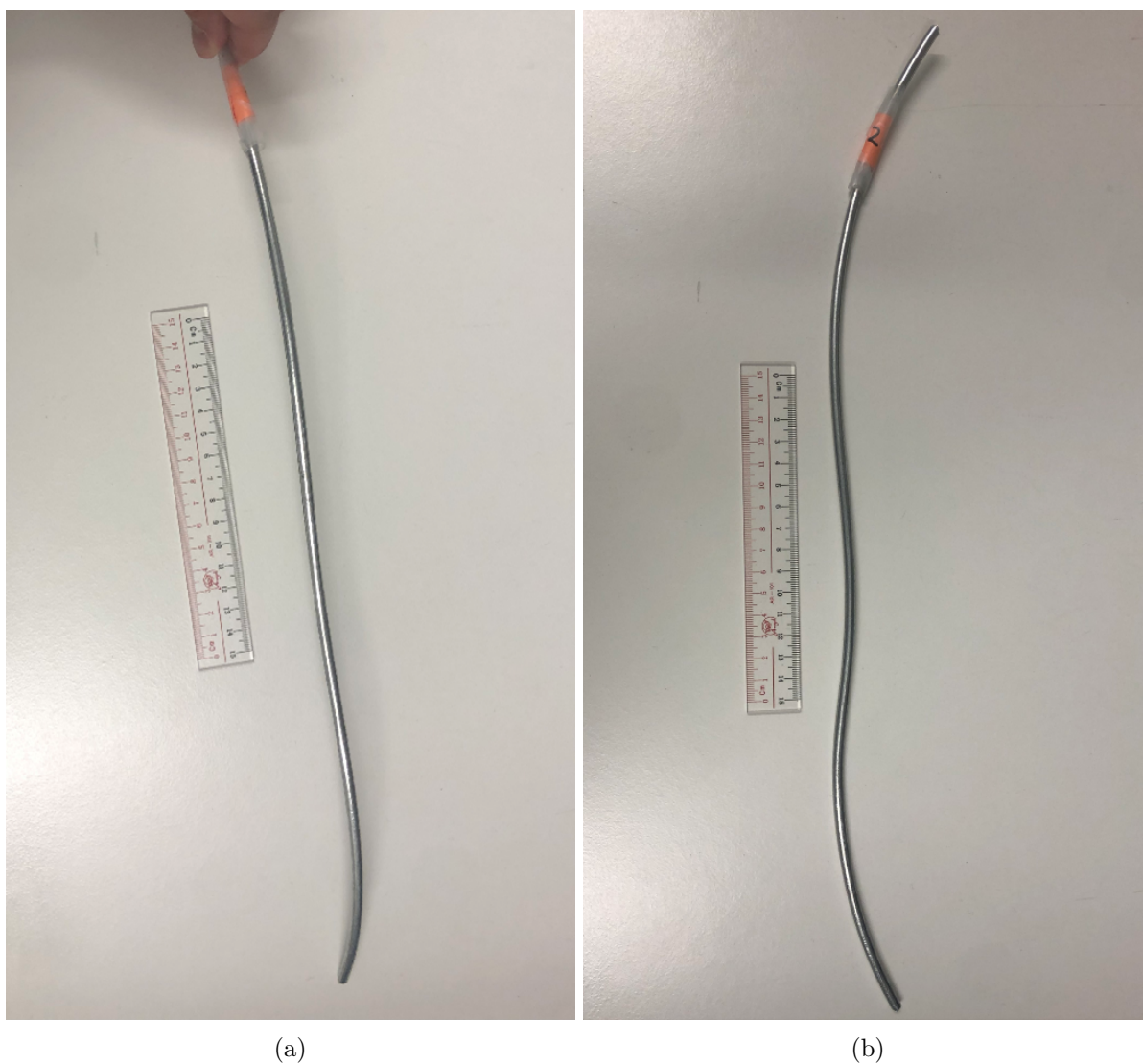
Figur 37: Den ubehandla armeringstråden 0.



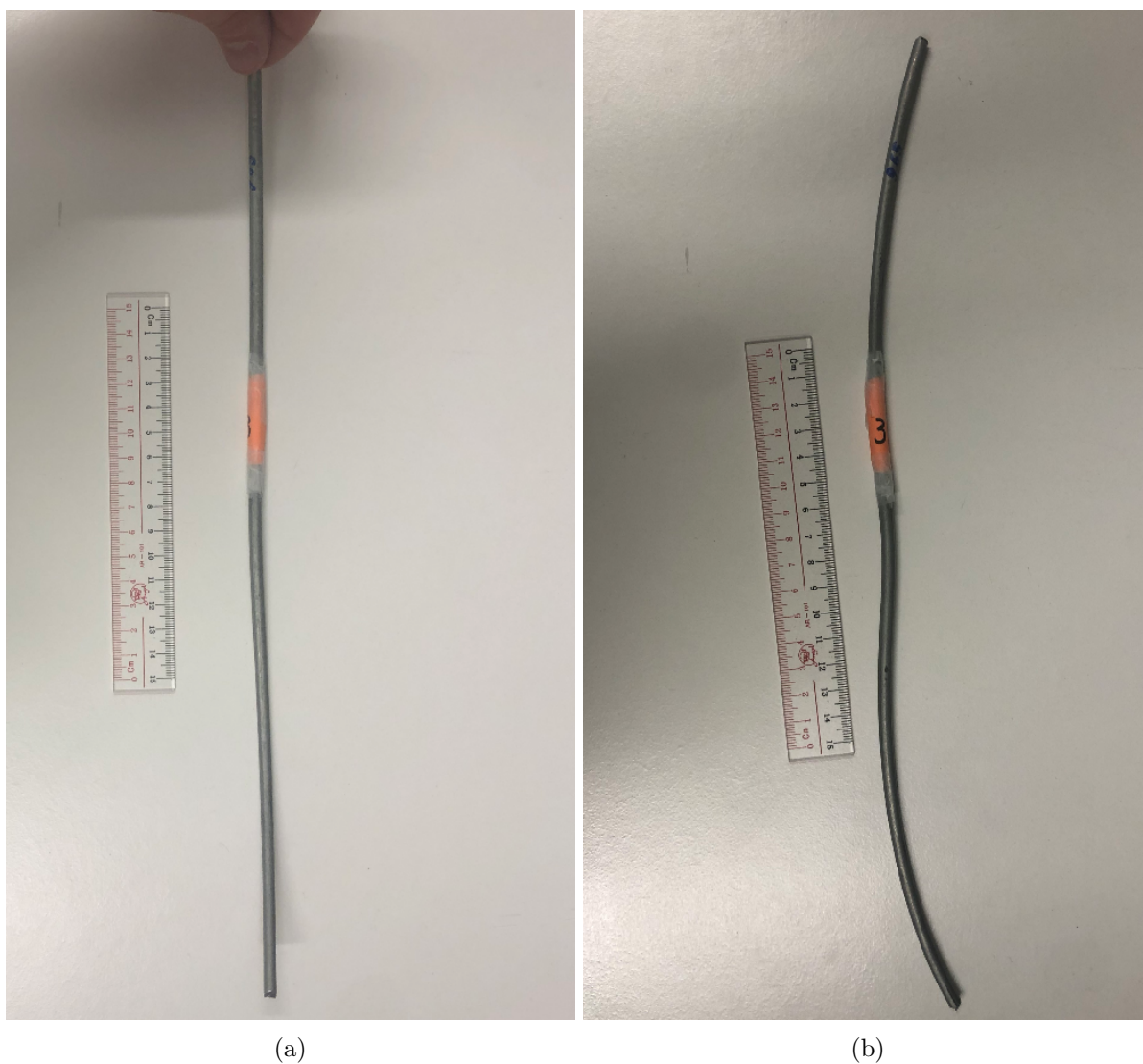
(a)

(b)

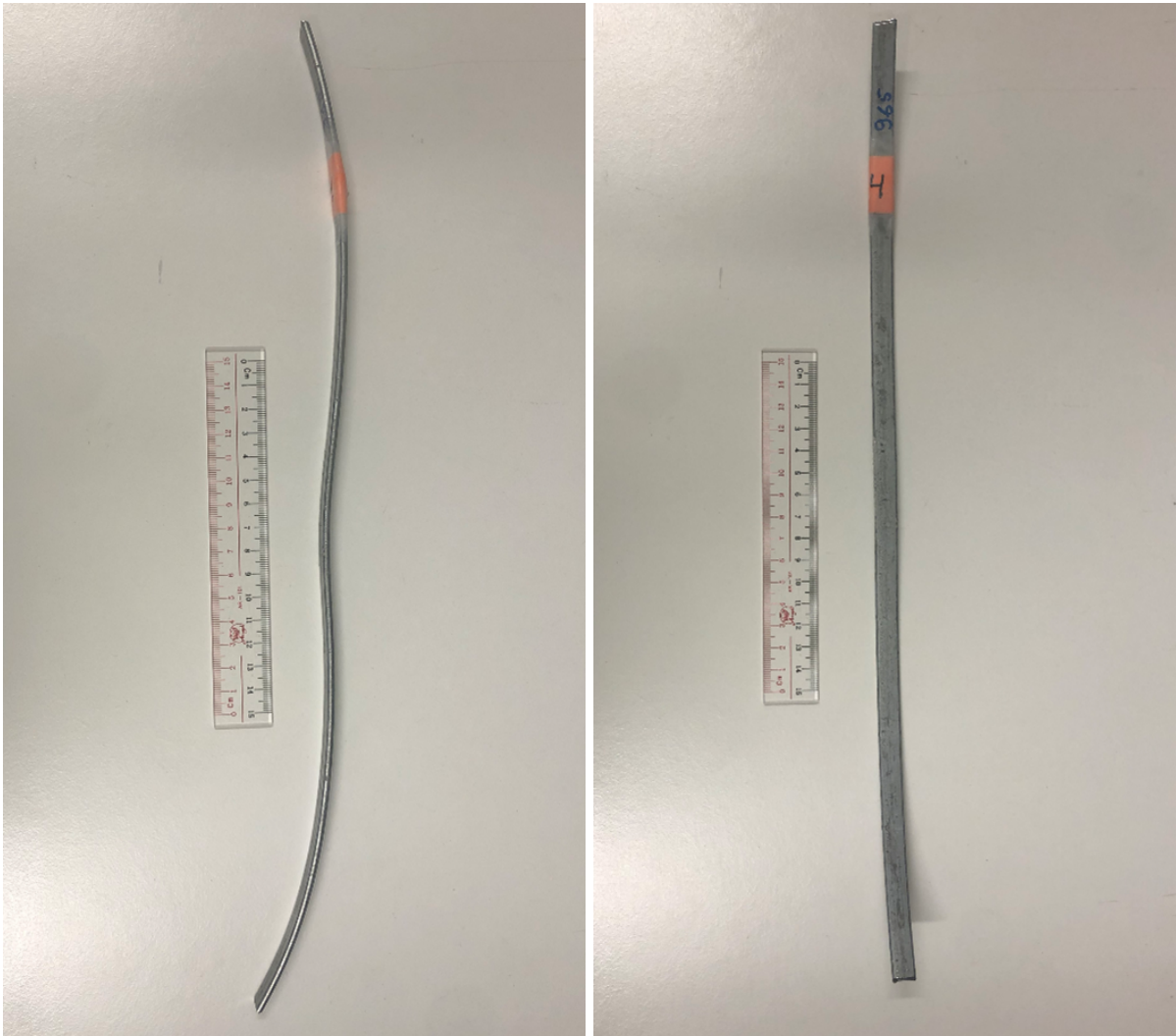
Figur 38: Den ubehandla armeringstråden 1.



Figur 39: Den ubehandla armeringstråden 2.



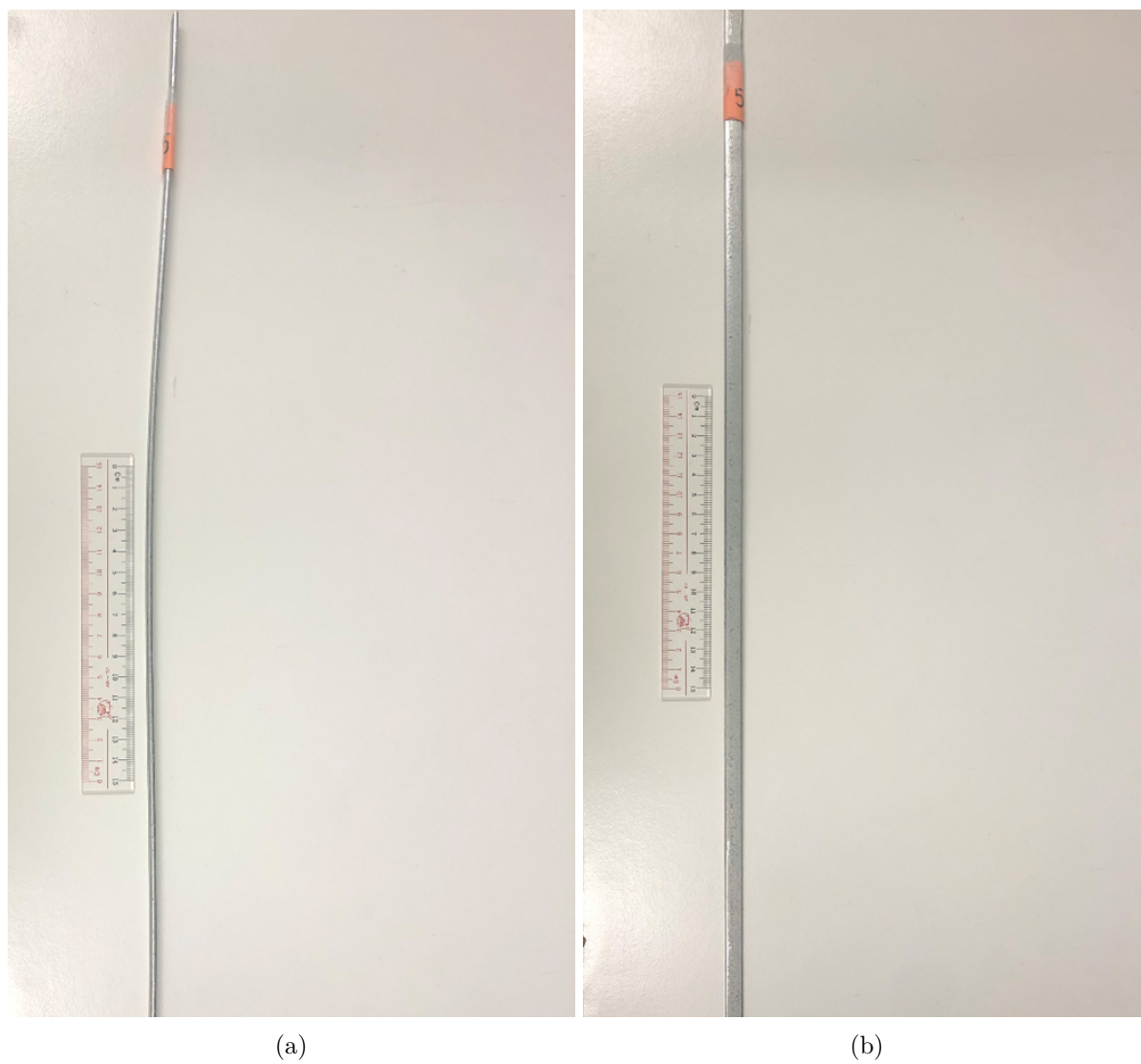
Figur 40: Den ubehandla armeringstråden 3.



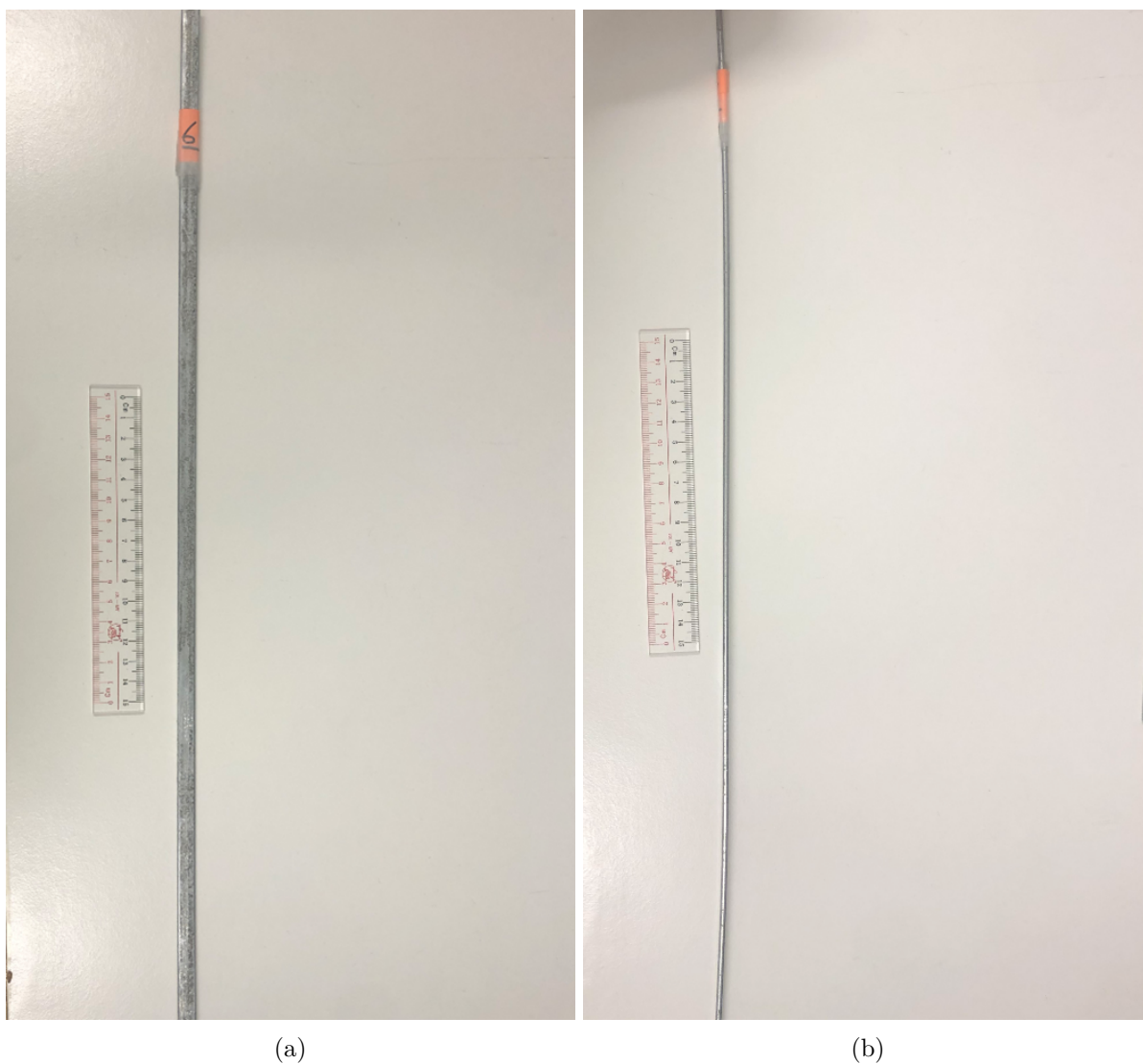
(a)

(b)

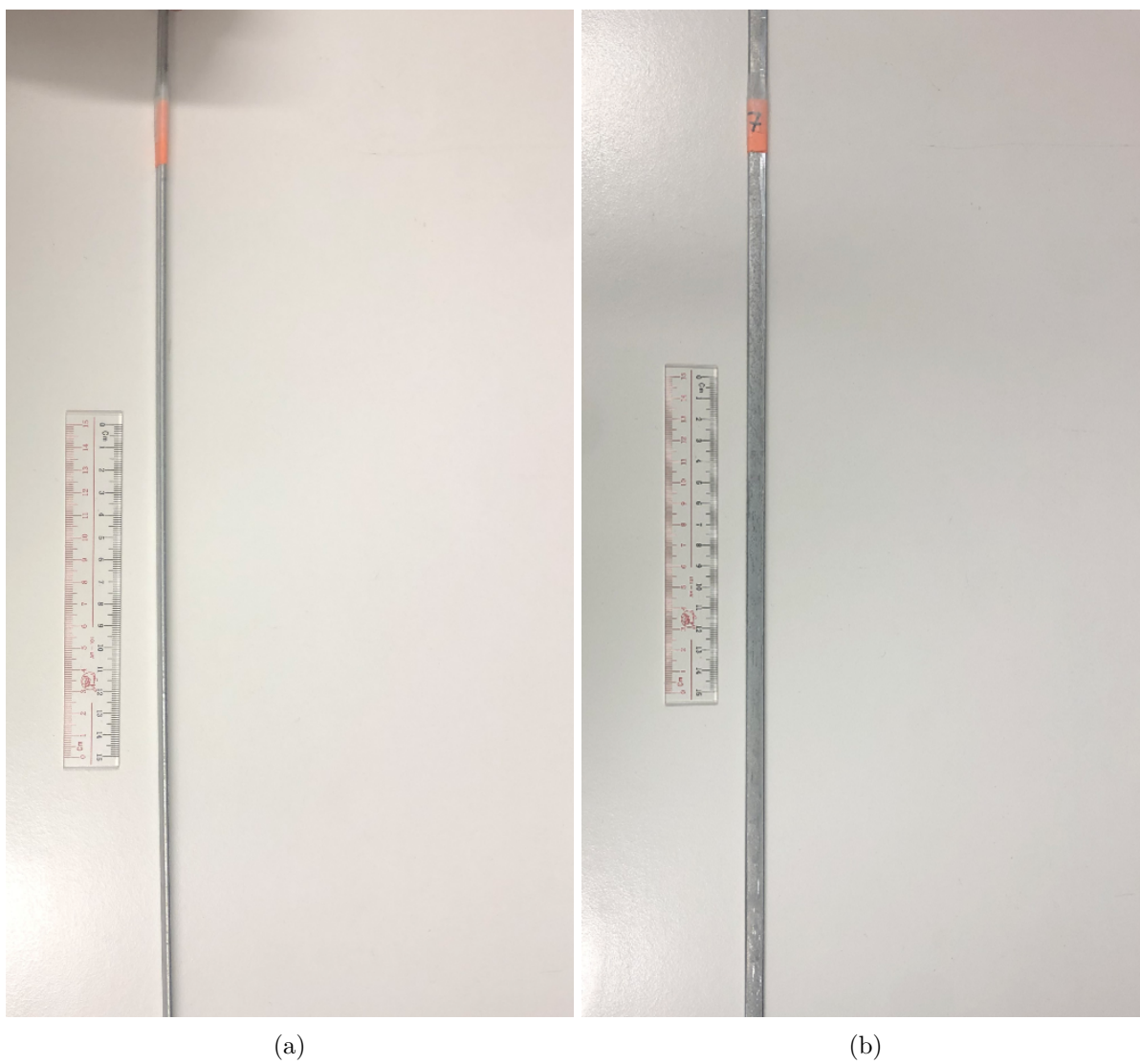
Figur 41: Den ubehandla armeringstråden 4.



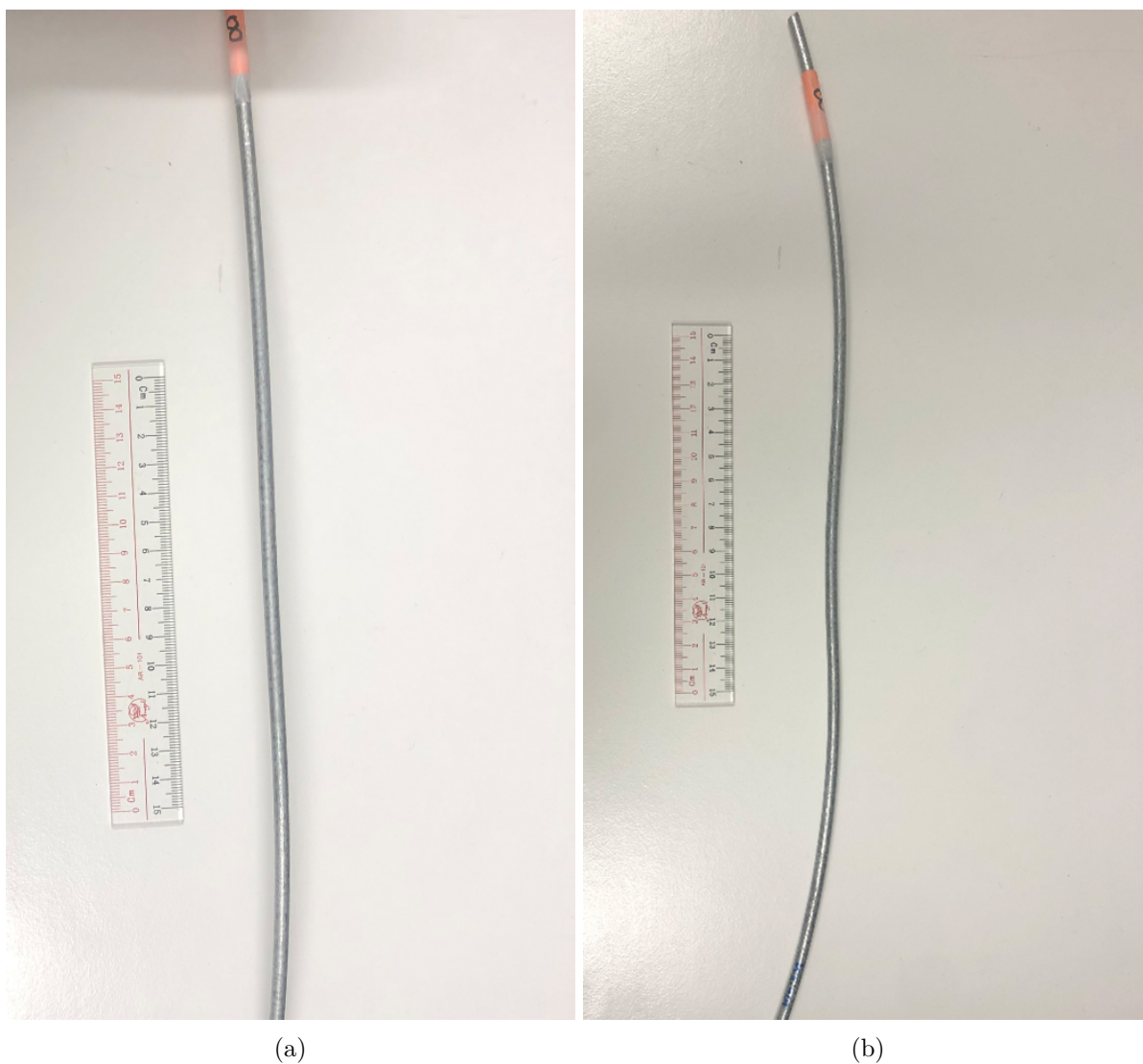
Figur 42: Den ubehandla armeringstråden 5.



Figur 43: Den ubehandla armeringstråden 6.



Figur 44: Den ubehandla armeringstråden 7.



Figur 45: Den ubehandla armeringstråden 8.

Vedlegg 3 - Separerte tap

I dette vedlegget er de målte og analytisk beregna separerte tapene gjort i henhold til fremgangsmåten beskrevet i teori kapittelet 2.3 på side 5 og i metodikk kapittelet 4.2 på side 24. De målte og beregna separerte tapene er funnet for frekvensene 30,40,50,60,70,80,90 og 100 Hz ved magnetisk flukstetthetene 100, 400 og 600mT. Resultatet av de målte og analytisk beregna tapene er vist i Tabell 15, 16, 16, 17, 18, 19, 20, 21 og 21 for henholdsvis armeringstråd 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 og 7. Verdiene i disse tabellene er brukt til å plote Figurene 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 og 24, samt til å finne avvikene i Tabellene 7, 8 og 9 i kapittel 5.1.2 på side 31.

Tabell 15: De målte og analytisk beregna separerte tapene [W/kg] for armeringstråd 0.

Målte og analytisk beregna separerte tap [W/kg] for armeringstråd 0								
Variabler			Målt			Analytisk		
f [Hz]	B_{max} [mT]	H [$\frac{A}{m}$]	W_h	W_{ec}	W_{tot}	W_h	W_{ec}	W_{tot}
30	100	598	0.189	0.091	0.280	0.187	0.086	0.273
30	400	1277	2.929	1.003	3.932	2.840	1.062	3.901
30	600	1667	5.765	2.359	8.123	6.294	2.214	8.508
40	100	616	0.260	0.162	0.422	0.249	0.153	0.402
40	400	1354	3.993	1.782	5.775	3.786	1.887	5.674
40	600	1808	7.854	4.191	12.045	8.392	3.936	12.328
50	100	636	0.329	0.253	0.583	0.311	0.239	0.550
50	400	1427	5.032	2.786	7.818	4.733	2.949	7.682
50	600	1936	9.894	6.551	16.445	10.490	6.149	16.640
60	100	653	0.396	0.365	0.761	0.374	0.344	0.718
60	400	1499	6.028	4.010	10.039	5.679	4.247	9.926
60	600	2062	11.824	9.431	21.255	12.588	8.855	21.444
70	100	670	0.460	0.497	0.957	0.436	0.469	0.904
70	400	1565	6.975	5.461	12.436	6.626	5.780	12.406
70	600	2189	13.670	12.841	26.511	14.687	12.053	26.739
80	100	690	0.521	0.649	1.169	0.498	0.612	1.110
80	400	1631	7.836	7.130	14.967	7.572	7.550	15.122
80	600	2305	15.375	16.768	32.142	16.785	15.742	32.527
90	100	709	0.572	0.822	1.394	0.560	0.775	1.335
90	400	1688	8.624	9.029	17.653	8.519	9.555	18.074
90	600	2426	16.968	21.227	38.195	18.883	19.924	38.807
100	100	724	0.615	1.014	1.629	0.623	0.956	1.579
100	400	1754	9.335	11.144	20.479	9.465	11.796	21.262
100	600	2542	18.357	26.206	44.563	20.981	24.597	45.578

Tabell 16: De målte og analytisk beregna separerte tapene [W/kg] for armeringstråd 1.

Målte og analytisk beregna separerte tap [W/kg] for armeringstråd 1								
Variabler			Målt			Analytisk		
f [Hz]	B_{max} [mT]	H [$\frac{A}{m}$]	W_h	W_{ec}	W_{tot}	W_h	W_{ec}	W_{tot}
30	100	334	0.208	0.075	0.283	0.204	0.073	0.278
30	400	869	2.095	1.224	3.319	2.124	1.314	3.438
30	600	1357	4.062	3.507	7.569	4.211	3.059	7.270
40	100	359	0.288	0.134	0.422	0.273	0.130	0.403
40	400	985	2.868	2.176	5.043	2.832	2.337	5.168
40	600	1584	5.545	6.235	11.780	5.615	5.438	11.053
50	100	381	0.364	0.209	0.573	0.341	0.203	0.544
50	400	1089	3.594	3.401	6.995	3.539	3.651	7.190
50	600	1797	6.988	9.748	16.735	7.019	8.497	15.516
60	100	400	0.436	0.301	0.738	0.409	0.293	0.701
60	400	1190	4.305	4.896	9.201	4.247	5.257	9.505
60	600	2005	8.333	14.032	22.364	8.423	12.235	20.658
70	100	418	0.500	0.410	0.910	0.477	0.398	0.875
70	400	1290	4.950	6.665	11.615	4.955	7.156	12.111
70	600	2203	9.583	19.100	28.682	9.827	16.654	26.480
80	100	434	0.556	0.536	1.092	0.545	0.520	1.065
80	400	1387	5.561	8.705	14.266	5.663	9.346	15.009
80	600	2399	10.764	24.947	35.711	11.231	21.752	32.982
90	100	447	0.604	0.678	1.283	0.613	0.659	1.272
90	400	1476	6.092	11.022	17.115	6.371	11.829	18.200
90	600	2604	11.853	31.582	43.435	12.634	27.529	40.164
100	100	462	0.643	0.837	1.481	0.681	0.813	1.494
100	400	1569	6.607	13.602	20.209	7.079	14.603	21.682
100	600	2792	12.779	38.982	51.762	14.038	33.987	48.025

Tabell 17: De målte og analytisk beregna separerte tapene [W/kg] for armeringstråd 2.

Målte og analytisk beregna separerte tap [W/kg] for armeringstråd 2								
Variabler			Målt			Analytisk		
f [Hz]	B_{max} [mT]	H [$\frac{A}{m}$]	W_h	W_{ec}	W_{tot}	W_h	W_{ec}	W_{tot}
30	100	323	0.173	0.084	0.257	0.170	0.082	0.253
30	400	832	2.006	1.222	3.228	2.033	1.286	3.319
30	600	1260	4.048	3.157	7.204	4.199	2.874	7.073
40	100	346	0.240	0.150	0.390	0.227	0.146	0.373
40	400	941	2.754	2.172	4.926	2.710	2.287	4.997
40	600	1461	5.578	5.609	11.187	5.598	5.109	10.707
50	100	368	0.306	0.234	0.540	0.284	0.229	0.512
50	400	1047	3.487	3.395	6.882	3.388	3.573	6.961
50	600	1648	7.062	8.768	15.830	6.998	7.983	14.981
60	100	387	0.365	0.337	0.702	0.340	0.329	0.670
60	400	1142	4.171	4.889	9.060	4.066	5.145	9.210
60	600	1825	8.406	12.622	21.028	8.398	11.495	19.893
70	100	406	0.420	0.459	0.878	0.397	0.448	0.845
70	400	1236	4.805	6.650	11.455	4.743	7.003	11.746
70	600	1997	9.692	17.175	26.867	9.797	15.647	25.444
80	100	423	0.465	0.599	1.065	0.454	0.586	1.039
80	400	1328	5.372	8.686	14.058	5.421	9.147	14.567
80	600	2163	10.810	22.435	33.245	11.197	20.436	31.633
90	100	441	0.505	0.759	1.263	0.511	0.741	1.252
90	400	1412	5.859	11.002	16.861	6.098	11.576	17.674
90	600	2323	11.784	28.402	40.186	12.596	25.865	38.461
100	100	456	0.529	0.937	1.466	0.567	0.915	1.482
100	400	1489	6.245	13.579	19.824	6.776	14.292	21.067
100	600	2479	12.554	35.072	47.626	13.996	31.932	45.928

Tabell 18: De målte og analytisk beregna separerte tapene [W/kg] for armeringstråd 3.

Målte og analytisk beregna separerte tap [W/kg] for armeringstråd 3								
Variabler			Målt			Analytisk		
f [Hz]	B_{max} [mT]	H [$\frac{A}{m}$]	W_h	W_{ec}	W_{tot}	W_h	W_{ec}	W_{tot}
30	100	753	0.262	0.129	0.391	0.255	0.124	0.379
30	400	1617	4.319	1.614	5.933	4.197	1.671	5.869
30	600	2141	8.681	3.728	12.410	9.521	3.578	13.100
40	100	769	0.356	0.229	0.585	0.340	0.220	0.560
40	400	1715	5.894	2.872	8.766	5.597	2.971	8.568
40	600	2316	11.881	6.628	18.509	12.695	6.362	19.056
50	100	786	0.452	0.357	0.809	0.425	0.344	0.769
50	400	1809	7.435	4.487	11.922	6.996	4.643	11.638
50	600	2477	14.963	10.352	25.315	15.869	9.940	25.809
60	100	806	0.542	0.514	1.056	0.510	0.495	1.005
60	400	1901	8.935	6.459	15.395	8.395	6.685	15.080
60	600	2640	17.959	14.908	32.867	19.042	14.314	33.356
70	100	824	0.633	0.700	1.333	0.595	0.674	1.269
70	400	1985	10.322	8.795	19.117	9.794	9.100	18.894
70	600	2789	20.740	20.299	41.039	22.216	19.482	41.698
80	100	844	0.715	0.914	1.630	0.680	0.880	1.561
80	400	2069	11.625	11.484	23.109	11.193	11.885	23.078
80	600	2937	23.278	26.499	49.778	25.390	25.446	50.836
90	100	863	0.791	1.158	1.948	0.766	1.114	1.880
90	400	2151	12.803	14.538	27.342	12.592	15.042	27.635
90	600	3073	25.532	33.547	59.080	28.563	32.206	60.769
100	100	880	0.859	1.429	2.288	0.851	1.375	2.226
100	400	2224	13.831	17.945	31.776	13.992	18.571	32.562
100	600	3212	27.612	41.418	69.030	31.737	39.760	71.497

Tabell 19: De målte og analytisk beregna separerte tapene [W/kg] for armeringstråd 4.

Målte og analytisk beregna separerte tap [W/kg] for armeringstråd 4								
Variabler			Målt			Analytisk		
f [Hz]	B_{max} [mT]	H [$\frac{A}{m}$]	W_h	W_{ec}	W_{tot}	W_h	W_{ec}	W_{tot}
30	100	539	0.185	0.087	0.272	0.182	0.084	0.267
30	400	1141	3.023	1.093	4.116	2.932	1.139	4.071
30	600	1500	6.039	2.545	8.584	6.609	2.438	9.048
40	100	552	0.250	0.154	0.404	0.243	0.150	0.393
40	400	1204	4.107	1.942	6.049	3.910	2.025	5.935
40	600	1616	8.186	4.522	12.708	8.813	4.334	13.147
50	100	562	0.319	0.241	0.560	0.304	0.235	0.538
50	400	1264	5.173	3.035	8.208	4.887	3.164	8.051
50	600	1726	10.323	7.069	17.392	11.016	6.773	17.788
60	100	575	0.387	0.347	0.734	0.364	0.338	0.702
60	400	1324	6.215	4.369	10.584	5.865	4.556	10.421
60	600	1829	12.351	10.176	22.527	13.219	9.753	22.971
70	100	586	0.451	0.472	0.923	0.425	0.460	0.885
70	400	1380	7.188	5.949	13.136	6.842	6.201	13.043
70	600	1927	14.286	13.851	28.137	15.422	13.274	28.696
80	100	597	0.517	0.617	1.134	0.486	0.600	1.086
80	400	1436	8.134	7.768	15.901	7.819	8.100	15.919
80	600	2026	16.099	18.087	34.187	17.625	17.338	34.963
90	100	613	0.573	0.781	1.353	0.546	0.760	1.306
90	400	1489	8.994	9.832	18.826	8.797	10.251	19.048
90	600	2124	17.849	22.903	40.752	19.828	21.943	41.772
100	100	624	0.634	0.964	1.597	0.607	0.938	1.545
100	400	1541	9.760	12.138	21.898	9.774	12.656	22.430
100	600	2218	19.383	28.275	47.658	22.031	27.091	49.122

Tabell 20: De målte og analytisk beregna separerte tapene [W/kg] for armeringstråd 5.

Målte og analytisk beregna separerte tap [W/kg] for armeringstråd 5								
Variabler			Målt			Analytisk		
f [Hz]	B_{max} [mT]	H [$\frac{A}{m}$]	W_h	W_{ec}	W_{tot}	W_h	W_{ec}	W_{tot}
30	100	701	0.313	0.085	0.398	0.302	0.081	0.383
30	400	1260	3.977	1.028	5.005	3.849	1.073	4.922
30	600	1554	7.496	2.357	9.853	8.101	2.282	10.384
40	100	711	0.419	0.150	0.569	0.403	0.144	0.547
40	400	1314	5.364	1.827	7.192	5.132	1.907	7.039
40	600	1649	10.133	4.188	14.321	10.802	4.057	14.859
50	100	713	0.530	0.235	0.765	0.504	0.225	0.729
50	400	1364	6.742	2.857	9.599	6.415	2.979	9.395
50	600	1742	12.736	6.547	19.283	13.502	6.339	19.842
60	100	723	0.633	0.338	0.972	0.605	0.325	0.929
60	400	1415	8.093	4.113	12.205	7.698	4.290	11.989
60	600	1835	15.252	9.428	24.680	16.203	9.129	25.331
70	100	733	0.738	0.460	1.198	0.705	0.442	1.147
70	400	1465	9.396	5.600	14.996	8.981	5.840	14.821
70	600	1924	17.689	12.832	30.522	18.903	12.425	31.328
80	100	743	0.843	0.601	1.444	0.806	0.577	1.383
80	400	1513	10.642	7.312	17.954	10.264	7.627	17.892
80	600	2011	20.066	16.757	36.822	21.604	16.229	37.832
90	100	754	0.940	0.761	1.701	0.907	0.730	1.637
90	400	1558	11.820	9.257	21.077	11.548	9.653	21.201
90	600	2097	22.305	21.208	43.513	24.304	20.540	44.844
100	100	763	1.039	0.939	1.978	1.008	0.902	1.909
100	400	1602	12.900	11.426	24.325	12.831	11.917	24.748
100	600	2182	24.392	26.183	50.575	27.004	25.358	52.362

Tabell 21: De målte og analytisk beregna separerte tapene [W/kg] for armeringstråd 6.

Målte og analytisk beregna separerte tap [W/kg] for armeringstråd 6								
Variabler			Målt			Analytisk		
f [Hz]	B_{max} [mT]	H [$\frac{A}{m}$]	W_h	W_{ec}	W_{tot}	W_h	W_{ec}	W_{tot}
30	100	764	0.353	0.085	0.439	0.339	0.083	0.422
30	400	1358	4.241	1.069	5.310	4.115	1.121	5.235
30	600	1691	7.905	2.498	10.403	8.541	2.396	10.937
40	100	772	0.468	0.152	0.620	0.452	0.148	0.600
40	400	1410	5.716	1.899	7.615	5.486	1.992	7.478
40	600	1787	10.692	4.439	15.131	11.388	4.260	15.648
50	100	770	0.596	0.237	0.833	0.565	0.231	0.796
50	400	1462	7.190	2.968	10.158	6.858	3.113	9.970
50	600	1883	13.419	6.940	20.358	14.235	6.656	20.891
60	100	781	0.715	0.342	1.057	0.678	0.333	1.011
60	400	1517	8.626	4.273	12.899	8.229	4.482	12.711
60	600	1982	16.092	9.990	26.082	17.081	9.585	26.667
70	100	790	0.837	0.465	1.302	0.790	0.454	1.244
70	400	1566	10.015	5.818	15.832	9.601	6.101	15.702
70	600	2078	18.695	13.602	32.297	19.928	13.046	32.975
80	100	801	0.951	0.608	1.559	0.903	0.593	1.496
80	400	1617	11.339	7.595	18.933	10.972	7.968	18.941
80	600	2172	21.183	17.761	38.944	22.775	17.040	39.815
90	100	809	1.065	0.770	1.834	1.016	0.750	1.766
90	400	1665	12.598	9.619	22.217	12.344	10.085	22.429
90	600	2264	23.558	22.484	46.042	25.622	21.566	47.189
100	100	819	1.176	0.950	2.125	1.129	0.926	2.055
100	400	1713	13.819	11.870	25.690	13.715	12.451	26.166
100	600	2352	25.720	27.753	53.473	28.469	26.625	55.094

Tabell 22: De målte og analytisk beregna separerte tapene [W/kg] for armeringstråd 7.

Målte og analytisk beregna separerte tap [W/kg] for armeringstråd 7								
Variabler			Målt			Analytisk		
f [Hz]	B_{max} [mT]	H [$\frac{A}{m}$]	W_h	W_{ec}	W_{tot}	W_h	W_{ec}	W_{tot}
30	100	861	0.368	0.088	0.456	0.351	0.085	0.436
30	400	1542	4.672	1.088	5.760	4.564	1.112	5.676
30	600	1912	8.784	2.500	11.284	9.664	2.358	12.022
40	100	868	0.491	0.156	0.647	0.468	0.151	0.619
40	400	1589	6.305	1.934	8.240	6.086	1.976	8.062
40	600	1996	11.869	4.442	16.311	12.886	4.192	17.078
50	100	871	0.620	0.244	0.864	0.585	0.236	0.821
50	400	1637	7.913	3.023	10.936	7.607	3.088	10.695
50	600	2088	14.896	6.941	21.837	16.107	6.550	22.657
60	100	881	0.741	0.351	1.092	0.702	0.340	1.042
60	400	1690	9.503	4.352	13.855	9.129	4.447	13.576
60	600	2183	17.915	10.003	27.918	19.328	9.432	28.760
70	100	888	0.862	0.478	1.339	0.819	0.463	1.282
70	400	1739	11.023	5.921	16.944	10.650	6.053	16.703
70	600	2277	20.792	13.610	34.402	22.550	12.838	35.388
80	100	897	0.980	0.624	1.604	0.936	0.605	1.541
80	400	1788	12.500	7.736	20.236	12.171	7.906	20.077
80	600	2369	23.588	17.772	41.360	25.771	16.768	42.539
90	100	906	1.095	0.790	1.885	1.053	0.765	1.819
90	400	1835	13.876	9.793	23.669	13.693	10.006	23.699
90	600	2457	26.241	22.494	48.734	28.993	21.222	50.215
100	100	912	1.213	0.975	2.188	1.171	0.945	2.115
100	400	1883	15.246	12.090	27.336	15.214	12.353	27.567
100	600	2542	28.660	27.776	56.436	32.214	26.200	58.414

Vedlegg 4 - Kompleks permeabilitet

I dette vedlegget presenteres de beregnede verdiene for kompleks permeabilitet gjort i henhold til beskrivelsene i kapittel 4.3.1 og 4.3.2. Det er brukt tre metoder for å beregne kompleks permeabilitet, disse er:

1. *Optimalisert* - Finne kompleks permeabilitet fra Formel 12 ved å optimalisere faseforskjellen θ mellom B og H slik at differansen mellom de totale tapene gitt av målingene og de beregna tapene funnet fra Formel 25 blir tilnærmet null.
2. *Målt* - Finne kompleks permeabilitet fra Formel 12 ved å analytisk finne faseforskjellen θ mellom B_{min} og H_{min} basert på B-H kurvene fått fra målingene.
3. *Transformert* - Finne kompleks permeabilitet fra Formel 12 ved å analytisk finne faseforskjellen θ mellom B_{min} og H_{min} basert på de transformerte B-H kurvene ved å finne reluktiviteten.

For å skille mellom tilnærmingene i de kommende resultatene vil det bli benyttet *Optimalisert*, *Målt* og *Transformert* for henholdsvis tilnærming 1, 2 og 3.

Disse beregningene ble gjort for 5 armeringstråder, disse er armeringstråd 0, 1, 2, 3 og 8 fra Tabell 2 i kapittel 3 på side 21. Tabellene 23, 24, 25, 26 og 27 på de neste sidene viser og sammenligner de komplekse permeabilitetene ved forskjellig frekvens og påtrykt magnetisk feltstyrke (H). Disse verdiene er brukt som punkter i permeabilitet plottene i kapittel 5.2.1.

Tabell 23: Den komplekse permeabiliteten funnet ved optimalisering, fra de transformerte B-H kurvene og fra de målte B-H kurvene for armeringstråd 0 ved 40 Hz, 50 Hz og 60 Hz når det påtrykkes H-felt mellom 100 og 5000 A/m.

Relativ kompleks permeabilitet for armeringstråd 0									
H $\frac{A}{m}$	$\mu_{Optimalisert}$			$\mu_{Transformert}$			$\mu_{m\ddot{a}lt}$		
	40 Hz	50 Hz	60 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz
100	73.2 - 14.4i	75.1 - 17.3i	73.0 - 19.1i	73.2 - 14.4i	75.1 - 17.2i	73.1 - 19.0i	73.7 - 13.4i	74.5 - 18.2i	73.6 - 14.5i
200	82.4 - 20.8i	81.8 - 24.4i	79.6 - 26.3i	82.2 - 21.4i	81.9 - 23.9i	79.7 - 25.9i	83.0 - 13.8i	83.6 - 17.8i	76.9 - 32.9i
300	89.4 - 28.4i	88.5 - 31.4i	85.3 - 33.6i	89.2 - 29.0i	88.4 - 31.7i	85.3 - 33.5i	91.6 - 19.5i	91.1 - 19.4i	84.4 - 34.6i
400	97.0 - 37.6i	94.8 - 41.3i	90.7 - 42.2i	96.8 - 38.0i	95.0 - 40.6i	90.8 - 42.1i	101.4 - 23.1i	98.4 - 32.0i	94.9 - 30.8i
500	103.9 - 47.7i	100.8 - 50.8i	95.4 - 51.9i	103.8 - 48.1i	101. - 50.5i	95.6 - 51.5i	109. - 35.4i	107.1 - 34.8i	100.1 - 42.8i
600	111.1 - 58.5i	106.7 - 61.4i	100.4 - 61.7i	111.4 - 57.8i	106.6 - 61.5i	100.2 - 61.9i	115.4 - 49.3i	110.6 - 53.2i	105.4 - 52.7i
700	118.8 - 73.6i	112.7 - 75.4i	105.6 - 74.9i	118.9 - 73.5i	113.2 - 74.7i	105.9 - 74.5i	131.6 - 47.2i	123.9 - 55.2i	116. - 58.0i
800	125.9 - 87.9i	118.8 - 88.9i	110.6 - 85.8i	125.6 - 88.4i	118.7 - 89.0i	110.7 - 85.6i	142.1 - 58.2i	131.5 - 68.2i	124.1 - 64.4i
900	132.9 - 104.1i	123.8 - 105.3i	115.4 - 99.5i	133.5 - 103.2i	124. - 105.1i	114.7 - 100.3i	144.9 - 86.5i	138.7 - 85.7i	134. - 72.1i
1000	139.1 - 120.8i	129.1 - 118.1i	119.8 - 112.2i	138.7 - 121.2i	128.3 - 119.i	118.7 - 113.4i	163.7 - 85.0i	151.5 - 87.5i	139.4 - 86.2i
1100	145.3 - 134.4i	133.8 - 132.i	123.6 - 125.i	145.1 - 134.6i	133.9 - 131.9i	123.4 - 125.2i	161.5 - 113.7i	156.8 - 103.5i	154.7 - 83.2i
1200	150.7 - 153.6i	138.1 - 147.1i	126.6 - 139.6i	151. - 153.3i	137.3 - 147.9i	126.1 - 140.1i	189.4 - 101.9i	174.6 - 100.8i	154.3 - 108.6i
1300	155.9 - 167.1i	141.3 - 160.1i	131.3 - 148.7i	155.4 - 167.4i	140.5 - 160.8i	130.5 - 149.4i	193.6 - 119.6i	181.6 - 112.2i	157.9 - 118.4i
1400	158.6 - 179.7i	144.1 - 170.9i	132.4 - 160.i	157.7 - 180.5i	144.5 - 170.5i	131.9 - 160.4i	199.8 - 131.9i	184.5 - 125.8i	167.9 - 122.i
1500	161.5 - 190.8i	146.4 - 178.8i	135.2 - 167.1i	161.6 - 190.7i	146.8 - 178.5i	134. - 168.i	199.7 - 149.7i	186.8 - 135.7i	171.4 - 128.5i
1600	165.3 - 196.1i	148.4 - 185.7i	136.4 - 174.4i	162.9 - 198.1i	148.2 - 185.9i	135.4 - 175.2i	197.2 - 162.1i	187.8 - 145.2i	176.7 - 132.5i
1700	167.7 - 200.7i	150.2 - 190.6i	136.9 - 179.i	166.1 - 202.i	148.5 - 192.i	137.9 - 178.3i	214.9 - 146.5i	200.1 - 136.4i	178.3 - 137.9i
1800	166.9 - 207.7i	152. - 194.i	137.7 - 182.6i	166.2 - 208.4i	150.8 - 195.i	137.2 - 183.i	217.8 - 153.3i	198.8 - 144.5i	185.2 - 134.5i
1900	168.7 - 210.2i	150.9 - 198.i	138.9 - 185.4i	168.1 - 210.8i	152.3 - 196.9i	138.9 - 185.3i	215.4 - 161.5i	199.5 - 149.5i	181.1 - 144.4i
2000	168.9 - 212.8i	153.5 - 198.5i	140.3 - 186.3i	169.4 - 212.4i	153.5 - 198.5i	139.9 - 186.6i	217.5 - 163.i	200.3 - 150.2i	179.9 - 147.9i
2100	171. - 213.5i	153.6 - 200.3i	139.9 - 188.i	170.6 - 213.9i	154.4 - 199.7i	140.6 - 187.6i	220.8 - 160.4i	197.2 - 157.2i	181.2 - 149.i
2200	171.9 - 212.9i	155.2 - 199.7i	140.3 - 188.2i	170.6 - 213.9i	154.7 - 200.1i	140.8 - 187.8i	208.2 - 176.5i	187.4 - 168.7i	186. - 143.8i
2300	171.4 - 213.7i	155. - 199.7i	141. - 187.6i	170.8 - 214.2i	154.7 - 200.i	140.8 - 187.8i	221.4 - 160.9i	185. - 171.7i	172.2 - 159.7i
2400	172.3 - 213.4i	155.6 - 199.3i	142.4 - 187.i	171. - 214.4i	154.7 - 200.i	141. - 188.1i	216.5 - 167.4i	189.9 - 165.9i	183.4 - 146.3i
2500	171.8 - 212.2i	155.7 - 198.2i	140.8 - 187.i	170.2 - 213.5i	154.2 - 199.4i	140.4 - 187.3i	210.8 - 173.3i	186.9 - 168.3i	172. - 159.6i
2600	171.8 - 211.i	155.5 - 197.5i	142. - 185.9i	172.8 - 210.2i	153.8 - 198.9i	143.1 - 185.i	212.7 - 169.6i	189. - 165.1i	171.4 - 159.i
2700	171.6 - 210.2i	155.1 - 196.3i	141.8 - 184.6i	172.3 - 209.6i	156. - 195.6i	142.4 - 184.1i	198.9 - 184.5i	185.8 - 167.3i	175.3 - 153.2i
2800	171.6 - 208.1i	155. - 195.3i	141.5 - 183.7i	171.3 - 208.3i	155.4 - 194.9i	141.8 - 183.4i	213.3 - 165.i	185. - 166.6i	170. - 157.8i
2900	171.6 - 206.7i	155.5 - 192.9i	141. - 182.1i	170.6 - 207.5i	154.5 - 193.7i	140.9 - 182.2i	194. - 185.5i	195.6 - 151.2i	166.7 - 159.4i
3000	171.3 - 204.6i	153.9 - 191.7i	141.9 - 180.5i	172.5 - 203.5i	153.3 - 192.2i	140.5 - 181.7i	208.5 - 166.3i	187.7 - 159.1i	163.4 - 160.9i
3100	172.3 - 201.9i	154.3 - 189.9i	140.5 - 179.3i	171.6 - 202.5i	152.5 - 191.3i	142. - 178.1i	204.3 - 168.i	184.1 - 160.9i	171.8 - 150.1i
3200	170.4 - 200.5i	153.7 - 188.3i	142. - 177.1i	170.2 - 200.8i	154.3 - 187.7i	141.5 - 177.5i	200.7 - 170.2i	180.5 - 162.6i	163.6 - 156.5i
3300	171.1 - 198.i	153.5 - 186.2i	141.2 - 175.5i	169.2 - 199.6i	153.2 - 186.4i	140.5 - 176.1i	194. - 174.7i	181.6 - 158.7i	162.6 - 155.5i
3400	169.7 - 196.3i	151.8 - 185.1i	140.5 - 173.9i	170.7 - 195.4i	152. - 184.9i	139.4 - 174.8i	200.3 - 164.7i	173.4 - 165.8i	166.1 - 149.5i
3500	169.7 - 194.2i	153.6 - 182.2i	140.3 - 172.2i	169.7 - 194.2i	151.3 - 184.1i	141.1 - 171.5i	196.4 - 166.4i	171.7 - 164.2i	158.1 - 155.7i
3600	168.4 - 192.3i	152.2 - 180.5i	139.2 - 170.7i	168.2 - 192.5i	152.7 - 180.1i	139.9 - 170.2i	192.5 - 168.2i	180. - 152.6i	161.6 - 150.i
3700	167.9 - 189.8i	151.4 - 178.9i	139.5 - 169.2i	166.7 - 190.9i	151.5 - 178.7i	139.3 - 169.4i	195.7 - 160.9i	176.5 - 154.2i	160.5 - 149.i
3800	167.4 - 187.8i	151.1 - 176.7i	138.2 - 167.6i	168.3 - 187.i	150.3 - 177.4i	138. - 167.8i	194.3 - 159.7i	175.1 - 152.9i	157.2 - 150.3i
3900	166.6 - 185.7i	150.9 - 174.8i	138.5 - 165.6i	167. - 185.4i	149.3 - 176.2i	137.1 - 166.8i	192.8 - 158.5i	175.9 - 149.1i	151.4 - 153.7i
4000	166.3 - 183.4i	149.8 - 173.3i	137.8 - 164.2i	165.7 - 184.i	150.7 - 172.5i	138.6 - 163.5i	195.8 - 151.4i	174.7 - 148.1i	157.1 - 145.7i
4100	166.4 - 181.1i	149.1 - 171.4i	137.4 - 162.4i	164.6 - 182.8i	149.5 - 171.1i	137.5 - 162.2i	182.3 - 164.2i	171.1 - 149.5i	149.2 - 151.5i
4200	165. - 179.1i	148.9 - 169.4i	137.3 - 160.7i	165.6 - 178.5i	148.4 - 169.8i	136.6 - 161.2i	190.3 - 151.8i	162.9 - 155.8i	148.1 - 150.3i
4300	164.5 - 177.i	148.6 - 167.5i	136.4 - 159.1i	164.4 - 177.1i	147.3 - 168.6i	135.5 - 159.9i	181.9 - 158.9i	168.4 - 147.1i	153.6 - 142.5i
4400	164. - 175.1i	147.3 - 165.9i	135.5 - 157.6i	163.2 - 175.9i	148.4 - 164.9i	136.7 - 156.5i	189.5 - 146.5i	162.8 - 151.i	156.6 - 136.8i
4500	162.6 - 173.2i	147.3 - 164.1i	134.9 - 156.2i	161.6 - 174.2i	147.5 - 163.8i	135.8 - 155.4i	183.6 - 151.i	161.5 - 149.8i	157.5 - 133.5i
4600	161.8 - 171.2i	146.6 - 162.3i	134.7 - 154.6i	162.8 - 170.3i	146.3 - 162.5i	134.9 - 154.4i	186.6 - 144.3i	164.6 - 143.8i	148.1 - 141.6i
4700	161.7 - 169.1i	146. - 160.5i	134.4 - 152.8i	161.7 - 169.1i	145.2 - 161.2i	133.9 - 153.2i	178.5 - 151.3i	167.5 - 137.8i	146.9 - 140.5i
4800	160.8 - 167.1i	145.6 - 159.i	133.7 - 151.4i	160.2 - 167.6i	144.3 - 160.2i	132.9 - 152.1i	183.6 - 141.9i	162.2 - 141.7i	145.9 - 139.5i
4900	160.4 - 165.3i	144.9 - 157.1i	132.9 - 149.9i	159.1 - 166.5i	145.4 - 156.7i	134.1 - 148.9i	182.1 - 140.8i	160.9 - 140.5i	148.9 - 134.1i
5000	160.1 - 163.3i	143.8 - 155.7i	132.2 - 148.5i	160.5 - 162.9i	144.2 - 155.4i	133. - 147.8i	180.7 - 139.7i	159.7 - 139.5i	143.8 - 137.5i

Tabell 24: Den komplekse permeabiliteten funnet ved optimalisering, fra de transformerte B-H kurvene og fra de målte B-H kurvene for armeringstråd 1 ved 40 Hz, 50 Hz og 60 Hz når det påtrykkes H-felt mellom 100 og 5000 A/m.

Relativ kompleks permeabilitet for armeringstråd 1									
H $\frac{A}{m}$	$\mu_{Optimalisert}$			$\mu_{Transformert}$			$\mu_{m\ddot{a}lt}$		
	40 Hz	50 Hz	60 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz
100	103.7 - 58.6i	98.9 - 67.7i	90.9 - 64.9i	103.1 - 59.5i	99.1 - 67.5i	91.3 - 64.3i	106.3 - 53.2i	107.5 - 53.8i	96.1 - 57.4i
200	123.2 - 94.4i	115. - 98.6i	105.5 - 93.5i	122.8 - 94.9i	114.1 - 99.7i	104.7 - 94.3i	130.5 - 83.4i	122.4 - 89.0i	116.2 - 79.3i
300	139.8 - 125.3i	130.5 - 128.1i	118.7 - 120.4i	139.5 - 125.6i	130.2 - 128.3i	118.6 - 120.4i	153.7 - 108.2i	133.9 - 124.2i	132.4 - 105.6i
400	160.3 - 165.6i	146.2 - 164.i	132.8 - 153.3i	159.3 - 166.6i	147. - 163.3i	133.4 - 152.7i	188.4 - 132.6i	179.7 - 126.5i	153. - 133.7i
500	176.5 - 204.4i	159.2 - 195.8i	144.1 - 181.4i	177.7 - 203.4i	160.3 - 194.9i	144.4 - 181.1i	211.3 - 168.5i	204.1 - 148.3i	179.4 - 147.5i
600	187.4 - 228.4i	169.8 - 213.5i	153.5 - 197.9i	187.6 - 228.2i	166.9 - 215.8i	153.2 - 198.1i	228.5 - 187.9i	212.6 - 169.6i	193.5 - 159.1i
700	194.9 - 243.i	174.4 - 224.8i	159. - 208.6i	194.2 - 243.5i	174. - 225.1i	160.5 - 207.5i	246.4 - 190.5i	225.1 - 174.1i	184.2 - 187.i
800	198.8 - 249.1i	176.9 - 231.i	161.6 - 214.3i	198.7 - 249.2i	178. - 230.2i	164.2 - 212.4i	246.4 - 202.6i	204.8 - 207.9i	191.8 - 188.9i
900	201.8 - 250.9i	181.7 - 231.i	165.1 - 214.9i	200.8 - 251.8i	179.8 - 232.5i	165.8 - 214.4i	248.7 - 204.5i	215.1 - 199.6i	196. - 187.3i
1000	203.4 - 250.i	182.3 - 230.5i	167.2 - 213.4i	204.7 - 249.i	183.2 - 229.8i	165.9 - 214.5i	239.4 - 215.6i	224.1 - 189.9i	187.1 - 195.7i
1100	205.3 - 245.2i	183.3 - 227.i	168.2 - 209.4i	203.1 - 247.i	181.9 - 228.1i	167.4 - 210.i	237. - 213.4i	219.4 - 191.7i	204.5 - 173.3i
1200	202.9 - 243.5i	182.9 - 223.1i	165.8 - 208.2i	201.3 - 244.8i	183.2 - 222.8i	165.9 - 208.1i	229.2 - 219.1i	208.4 - 199.2i	195.5 - 181.4i
1300	201.7 - 239.4i	181.3 - 219.7i	165.8 - 204.1i	202.4 - 238.8i	180.9 - 220.i	167. - 203.1i	226.7 - 216.7i	206.1 - 197.i	181.9 - 190.3i
1400	201.5 - 234.7i	182. - 216.1i	166. - 200.3i	200. - 235.9i	179.4 - 218.2i	165.3 - 201.i	216.8 - 220.1i	206.4 - 191.5i	182.3 - 185.1i
1500	199.7 - 230.3i	178.9 - 212.1i	163. - 198.i	200.6 - 229.6i	179.4 - 211.7i	162.9 - 198.1i	217. - 213.8i	200.8 - 191.9i	169.1 - 193.6i
1600	197.6 - 226.6i	177.8 - 208.2i	162.5 - 193.7i	197.8 - 226.4i	177. - 208.9i	163.5 - 192.9i	197.7 - 226.3i	195. - 192.1i	177.6 - 180.3i
1700	196.9 - 221.1i	176.5 - 204.1i	161.7 - 189.8i	194.8 - 223.i	177.6 - 203.2i	161.2 - 190.2i	204.3 - 213.7i	200.4 - 180.4i	174.9 - 177.6i
1800	194.5 - 217.3i	175.6 - 200.2i	159.3 - 186.5i	195.2 - 216.8i	175.2 - 200.5i	161.4 - 184.7i	216.5 - 194.9i	189.2 - 186.4i	175. - 172.4i
1900	192.5 - 212.8i	173.5 - 196.3i	159.2 - 182.8i	192. - 213.3i	172.4 - 197.3i	159.5 - 182.5i	198.2 - 207.3i	180.8 - 189.1i	172.3 - 169.8i
2000	191.3 - 208.i	170.1 - 192.8i	156.1 - 179.9i	189.1 - 210.1i	172. - 191.1i	156.7 - 179.4i	206.7 - 191.8i	175.3 - 189.i	170. - 167.5i
2100	187.7 - 205.1i	170. - 188.8i	155.8 - 176.3i	189.1 - 203.8i	170. - 188.8i	154.8 - 177.2i	206.8 - 186.2i	178. - 180.7i	162.4 - 169.8i
2200	187. - 200.2i	168.3 - 184.7i	154.9 - 172.7i	186.3 - 200.8i	167.2 - 185.7i	152.6 - 174.7i	203.3 - 183.i	172.5 - 180.4i	157.3 - 169.6i
2300	184.1 - 197.3i	166.2 - 181.4i	152.8 - 169.7i	183.6 - 197.9i	167.4 - 180.4i	152.8 - 169.7i	192.3 - 189.5i	175.2 - 172.6i	160. - 162.4i
2400	183.3 - 192.9i	164.9 - 178.i	150.3 - 167.3i	183.9 - 192.4i	165.1 - 177.9i	150.4 - 167.1i	194.7 - 180.7i	164.9 - 177.7i	155.6 - 162.7i
2500	181.5 - 189.2i	162.9 - 175.5i	149.4 - 163.9i	181.2 - 189.5i	162.9 - 175.5i	148.4 - 164.8i	175.1 - 194.4i	157.5 - 180.2i	153.2 - 160.3i
2600	178.3 - 186.3i	161.4 - 172.1i	149. - 160.5i	178.2 - 186.4i	160.5 - 173.i	148.9 - 160.5i	183.9 - 181.1i	165.5 - 168.i	157.8 - 150.9i
2700	177.4 - 182.5i	158.1 - 169.7i	146.8 - 158.6i	175.9 - 184.i	160.3 - 167.6i	147. - 158.4i	178.5 - 181.1i	165.9 - 163.4i	151.5 - 153.7i
2800	175.6 - 179.8i	157.7 - 166.6i	145.2 - 156.3i	176.4 - 179.i	158.5 - 165.8i	145.1 - 156.4i	170.8 - 184.i	161.1 - 163.5i	140.2 - 160.5i
2900	173.4 - 176.7i	156.2 - 164.i	143. - 154.i	173.7 - 176.4i	156.5 - 163.7i	142.9 - 154.i	168.4 - 181.5i	159. - 161.4i	145.4 - 152.1i
3000	172.1 - 173.7i	154.2 - 161.9i	142.4 - 151.1i	171.6 - 174.2i	154.5 - 161.6i	141.2 - 152.2i	174.1 - 171.5i	159.5 - 157.1i	141.1 - 152.1i
3100	170.8 - 171.i	153.4 - 158.4i	141.5 - 148.8i	169.6 - 172.2i	152.4 - 159.4i	139.7 - 150.5i	169.2 - 171.8i	154.8 - 157.1i	143.8 - 146.i
3200	168.7 - 168.3i	152.3 - 156.4i	139.6 - 146.6i	167.2 - 169.7i	150.9 - 157.8i	139.9 - 146.3i	161.9 - 174.5i	145.9 - 162.i	142. - 144.1i
3300	167.6 - 165.5i	150.1 - 154.3i	139. - 144.3i	167.8 - 165.3i	151.1 - 153.3i	138.5 - 144.8i	159.8 - 172.3i	151.3 - 153.5i	138.1 - 144.4i
3400	165.6 - 163.2i	148.8 - 151.8i	136.9 - 142.6i	165.6 - 163.2i	149.2 - 151.4i	136.6 - 142.9i	165.5 - 163.i	153.8 - 147.1i	130.1 - 148.9i
3500	163.6 - 160.5i	147.8 - 149.2i	136. - 140.4i	163.3 - 160.8i	147.4 - 149.7i	135.1 - 141.3i	163.4 - 160.9i	138.2 - 158.2i	135. - 141.2i
3600	163. - 157.8i	146.7 - 147.4i	134.4 - 138.5i	161.6 - 159.2i	145.9 - 148.1i	135.4 - 137.5i	161.3 - 158.9i	145.8 - 148.i	129.2 - 143.5i
3700	161.3 - 155.8i	145.3 - 145.3i	133.6 - 136.8i	162.1 - 155.i	144.2 - 146.4i	134.2 - 136.2i	161.9 - 154.8i	144.2 - 146.3i	125.7 - 143.9i
3800	159.1 - 153.6i	143.8 - 143.4i	132.1 - 135.2i	159.8 - 152.8i	144.7 - 142.5i	132.7 - 134.7i	157.8 - 155.4i	142.6 - 144.7i	130.7 - 136.7i
3900	158.5 - 151.5i	143. - 141.2i	131.1 - 133.3i	158.5 - 151.5i	143.2 - 141.i	131.2 - 133.2i	151.3 - 158.3i	136.5 - 147.2i	125.1 - 139.i
4000	157.4 - 149.1i	141.8 - 139.6i	130.5 - 131.4i	156.7 - 149.8i	141.8 - 139.7i	129.9 - 131.9i	156.5 - 149.6i	135.2 - 145.7i	127.8 - 133.6i
4100	155.8 - 147.5i	140.4 - 137.9i	128.5 - 129.9i	155.1 - 148.3i	140.2 - 138.1i	128.2 - 130.2i	152.7 - 150.4i	135.9 - 142.2i	126.5 - 132.3i
4200	154.1 - 145.6i	139.2 - 135.9i	128.3 - 128.1i	153.3 - 146.5i	138.6 - 136.5i	127.3 - 129.2i	155.5 - 144.3i	136.5 - 138.6i	127.1 - 129.i
4300	153.3 - 143.4i	138. - 134.5i	127.4 - 126.5i	153.9 - 142.8i	137.3 - 135.2i	127.9 - 126.i	144.9 - 151.6i	137.3 - 135.3i	127.7 - 125.8i
4400	152.2 - 141.7i	137.4 - 132.6i	126.2 - 125.i	152.4 - 141.4i	138. - 132.i	126.5 - 124.7i	147.9 - 145.7i	137.8 - 131.8i	122.7 - 128.3i
4500	151.4 - 139.4i	135.9 - 131.1i	125.3 - 123.7i	150.9 - 140.i	136.5 - 130.5i	125.4 - 123.5i	150.5 - 139.7i	132.5 - 134.5i	121.5 - 127.1i
4600	149.7 - 138.1i	134.4 - 129.6i	124.4 - 122.i	149.3 - 138.5i	134.9 - 129.i	124.1 - 122.3i	151.2 - 136.2i	133.2 - 131.3i	118.4 - 127.6i
4700	148.5 - 136.1i	134.3 - 127.8i	123.4 - 120.8i	147.7 - 137.i	134. - 128.1i	123. - 121.2i	149.7 - 134.8i	135.7 - 125.9i	122.9 - 121.1i
4800	147.8 - 134.4i	133.2 - 126.4i	122.7 - 119.4i	146.4 - 135.9i	132.7 - 126.9i	121.9 - 120.1i	140. - 142.1i	132.6 - 126.7i	118.1 - 123.5i
4900	146.5 - 133.i	132.1 - 124.9i	121.6 - 118.2i	147. - 132.4i	131.4 - 125.6i	120.8 - 119.i	144.9 - 134.4i	129.4 - 127.5i	120.7 - 118.9i
5000	145.1 - 131.6i	130.6 - 123.5i	120.6 - 116.8i	145.6 - 131.1i	131.8 - 122.2i	121.4 - 116.i	143.6 - 133.2i	130.1 - 124.4i	112.3 - 124.7i

Tabell 25: Den komplekse permeabiliteten funnet ved optimalisering, fra de transformerte B-H kurvene og fra de målte B-H kurvene for armeringstråd 2 ved 40 Hz, 50 Hz og 60 Hz når det påtrykkes H-felt mellom 100 og 5000 A/m.

Relativ kompleks permeabilitet for armeringstråd 2									
H $\frac{A}{m}$	$\mu_{Optimalisert}$			$\mu_{Transformert}$			$\mu_{m\ddot{a}lt}$		
	40 Hz	50 Hz	60 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz
100	119.4 - 65.8i	112.4 - 68.2i	103.3 - 69.3i	119.1 - 66.4i	111.9 - 69.1i	103.8 - 68.5i	121.8 - 60.9i	116.3 - 60.3i	107.2 - 64.1i
200	139.1 - 101.2i	128.1 - 103.i	117.7 - 99.5i	139.2 - 101.1i	128.5 - 102.5i	117.6 - 99.6i	144.9 - 92.6i	130.1 - 100.6i	130.8 - 80.8i
300	156.2 - 140.3i	141.5 - 136.7i	129.6 - 129.i	156. - 140.5i	142.2 - 136.i	128.3 - 130.3i	168.2 - 126.1i	152.4 - 125.3i	147.7 - 107.3i
400	171.9 - 188.1i	153.1 - 179.i	139.8 - 164.6i	173.3 - 186.8i	155. - 177.4i	139.6 - 164.7i	197.1 - 162.1i	189.1 - 141.8i	170.6 - 132.i
500	181.2 - 227.9i	162. - 212.3i	145.8 - 194.8i	181.5 - 227.6i	160.2 - 213.7i	146. - 194.7i	219.2 - 191.5i	187.3 - 189.9i	175.8 - 168.i
600	186. - 250.9i	165.6 - 232.1i	150.1 - 212.7i	187.3 - 249.9i	167.6 - 230.7i	149.9 - 212.9i	232.4 - 209.2i	203.3 - 200.3i	188. - 179.8i
700	189.3 - 266.4i	168.7 - 244.5i	152.4 - 224.3i	192.1 - 264.4i	167.3 - 245.4i	152.8 - 224.1i	219. - 243.2i	217.8 - 202.1i	184.6 - 198.9i
800	192.8 - 272.5i	171.4 - 251.2i	153.8 - 231.2i	192.1 - 272.9i	171.3 - 251.3i	156.4 - 229.4i	234.5 - 238.1i	234.9 - 193.2i	206.8 - 186.2i
900	195.4 - 275.2i	175.4 - 251.4i	156. - 234.i	194.3 - 276.i	172.7 - 253.3i	154.9 - 234.7i	257.5 - 218.3i	233.2 - 197.7i	197.6 - 200.5i
1000	197.6 - 275.6i	173.9 - 252.9i	158.9 - 232.8i	195.2 - 277.3i	176.7 - 251.i	158.8 - 232.8i	237.7 - 241.3i	198.7 - 234.5i	182. - 214.7i
1100	197.7 - 273.5i	177.6 - 249.1i	159.6 - 230.5i	198.4 - 273.i	176.1 - 250.2i	161.4 - 229.3i	229.7 - 247.5i	207.7 - 223.8i	187.6 - 208.4i
1200	198.6 - 270.5i	177.1 - 247.6i	160.3 - 229.i	197.3 - 271.5i	175.2 - 248.9i	160.9 - 228.6i	249.3 - 224.5i	196.6 - 232.i	164.2 - 226.i
1300	198.9 - 266.9i	178.4 - 243.8i	161.9 - 226.4i	199.7 - 266.3i	177.6 - 244.4i	160.2 - 227.6i	226.3 - 243.9i	214.6 - 211.5i	169.7 - 219.4i
1400	198.5 - 263.4i	177.9 - 241.3i	158.7 - 224.7i	197.8 - 263.9i	176.2 - 242.5i	161.7 - 222.6i	231.3 - 234.8i	196.8 - 225.2i	196.4 - 193.5i
1500	197.8 - 259.7i	174.9 - 238.6i	160. - 220.9i	195.8 - 261.2i	177.4 - 236.7i	160.3 - 220.7i	218.3 - 242.5i	204.9 - 214.3i	176.3 - 208.i
1600	198.2 - 254.9i	176.3 - 234.3i	159.4 - 217.4i	197.5 - 255.5i	175.9 - 234.6i	158.5 - 218.1i	226.2 - 229.6i	205.6 - 208.7i	192.1 - 189.2i
1700	197.5 - 251.i	175.8 - 230.2i	159.3 - 214.6i	195.4 - 252.6i	173.8 - 231.8i	157.1 - 216.2i	220.2 - 230.3i	196.8 - 212.1i	184.5 - 193.i
1800	195.3 - 247.4i	174.1 - 227.1i	158.6 - 211.1i	196.5 - 246.4i	175.1 - 226.4i	158.4 - 211.3i	203.8 - 240.4i	188.3 - 215.6i	170.6 - 201.3i
1900	192.7 - 243.5i	174.5 - 223.3i	157.7 - 207.8i	193.6 - 242.7i	173.3 - 224.2i	156.4 - 208.7i	211.8 - 228.3i	195.4 - 204.4i	174.5 - 193.8i
2000	193.2 - 239.1i	172.7 - 220.i	156.6 - 204.8i	191.6 - 240.3i	171.1 - 221.3i	157.7 - 203.9i	212.4 - 222.1i	183.9 - 210.5i	172.6 - 191.7i
2100	192.8 - 234.2i	171.2 - 216.4i	157.2 - 201.2i	192.7 - 234.3i	172. - 215.7i	156.2 - 202.i	212.6 - 215.8i	181.6 - 207.9i	161.8 - 196.7i
2200	190.6 - 230.3i	172. - 212.5i	154.9 - 198.9i	189.9 - 230.9i	170.5 - 213.8i	154.2 - 199.4i	210. - 213.1i	176.2 - 207.9i	148.2 - 204.i
2300	190.2 - 226.3i	170.1 - 209.2i	155.3 - 194.6i	191.1 - 225.5i	168.1 - 210.8i	155.3 - 194.7i	187.6 - 228.1i	180.2 - 200.1i	171.7 - 179.6i
2400	189.2 - 222.9i	169.7 - 205.9i	154.8 - 191.9i	189. - 223.i	169.5 - 206.1i	153.7 - 192.7i	204.8 - 207.9i	181. - 195.i	167.2 - 180.2i
2500	187.4 - 218.8i	166.6 - 202.6i	153.2 - 188.5i	186.3 - 219.7i	166.6 - 202.6i	151.5 - 189.9i	205.2 - 202.1i	181.6 - 190.i	167.7 - 175.4i
2600	185.8 - 215.3i	165.2 - 199.8i	151.4 - 186.7i	187.1 - 214.2i	167.6 - 197.8i	152.7 - 185.7i	196.6 - 205.7i	179.6 - 187.9i	168.7 - 171.3i
2700	185.4 - 211.8i	167.8 - 195.8i	149.7 - 183.8i	185.2 - 212.i	163.8 - 199.2i	150.5 - 183.1i	194.3 - 203.2i	174.4 - 187.9i	148.1 - 185.8i
2800	184.3 - 208.6i	165.2 - 193.1i	149.9 - 181.i	183.2 - 209.6i	164.3 - 193.8i	149.3 - 181.6i	185.9 - 206.5i	180.6 - 177.9i	159.8 - 172.2i
2900	183.3 - 205.i	163. - 190.4i	148.2 - 178.2i	180.9 - 207.1i	162.1 - 191.2i	149.9 - 176.8i	192.5 - 195.4i	173.3 - 181.2i	150.1 - 177.1i
3000	181.3 - 202.i	162.5 - 187.5i	147.4 - 175.8i	181.6 - 201.7i	163.3 - 186.9i	148.4 - 175.1i	193.2 - 190.3i	165.8 - 184.2i	153.7 - 170.7i
3100	179.4 - 199.1i	160.4 - 184.8i	147.2 - 173.3i	179.3 - 199.2i	161. - 184.3i	147. - 173.5i	191. - 188.2i	166.7 - 179.6i	149.4 - 171.1i
3200	177.6 - 196.4i	160. - 182.1i	146.3 - 170.4i	177.2 - 196.8i	159.5 - 182.5i	145.2 - 171.3i	186.1 - 189.i	159.4 - 182.4i	147.7 - 169.i
3300	177.5 - 192.7i	158.9 - 179.7i	144.2 - 169.i	178.2 - 192.1i	157.8 - 180.7i	146.1 - 167.3i	180.9 - 189.3i	165.7 - 173.3i	153.8 - 160.8i
3400	175.6 - 189.9i	157.6 - 176.9i	144.4 - 166.3i	176. - 189.6i	158.5 - 176.i	144.9 - 165.9i	178.9 - 187.1i	163.8 - 171.3i	144.8 - 165.7i
3500	175. - 187.1i	156.6 - 174.4i	143.3 - 164.1i	174.2 - 187.8i	156.9 - 174.2i	143.3 - 164.1i	176.9 - 185.i	159.4 - 171.8i	152.7 - 155.1i
3600	173.4 - 184.i	156.2 - 171.7i	142.3 - 161.9i	174.7 - 182.8i	155.3 - 172.5i	141.8 - 162.3i	177.5 - 180.2i	165.1 - 162.7i	146.6 - 158.i
3700	171.7 - 181.6i	155.1 - 169.6i	141.6 - 159.7i	172.7 - 180.6i	153.8 - 170.8i	140.4 - 160.7i	180.9 - 173.i	156.1 - 168.2i	145. - 156.3i
3800	171.2 - 178.4i	154.2 - 167.2i	140.3 - 157.8i	170.9 - 178.7i	154.7 - 166.7i	141.3 - 156.9i	181.3 - 168.2i	154.4 - 166.4i	145.9 - 152.7i
3900	170.5 - 175.9i	152.4 - 164.9i	139.8 - 155.5i	169.3 - 177.1i	152.8 - 164.6i	139.9 - 155.4i	171.7 - 174.3i	152.8 - 164.7i	144.4 - 151.i
4000	168.7 - 173.6i	151.5 - 162.7i	139. - 153.6i	169.9 - 172.5i	151.2 - 163.i	138.6 - 153.9i	170. - 172.5i	153.6 - 160.7i	147.4 - 145.2i
4100	168.3 - 170.8i	150.3 - 160.5i	138.3 - 151.5i	168.3 - 170.8i	149.6 - 161.2i	137.3 - 152.5i	180.3 - 157.5i	159.1 - 152.1i	132.4 - 156.2i
4200	167.2 - 168.3i	149.2 - 158.4i	137.3 - 149.6i	166.5 - 169.i	150.4 - 157.3i	135.9 - 150.9i	166.2 - 168.7i	152.9 - 155.2i	137.9 - 148.7i
4300	165.2 - 166.2i	148.7 - 156.5i	136.2 - 148.i	164.5 - 167.i	149.1 - 156.i	136.8 - 147.4i	172. - 159.6i	149.1 - 155.9i	136.7 - 147.3i
4400	164.8 - 163.6i	147.5 - 154.4i	135.4 - 145.9i	165.4 - 163.i	147.6 - 154.3i	135.4 - 145.9i	174.7 - 152.6i	152.2 - 149.9i	139.6 - 141.7i
4500	163.5 - 161.3i	147.1 - 152.2i	134.7 - 144.2i	163.7 - 161.2i	146.3 - 153.i	134.2 - 144.6i	166. - 158.7i	143.8 - 154.9i	136.2 - 142.5i
4600	161.9 - 159.5i	145.9 - 150.4i	133.3 - 142.8i	161.9 - 159.5i	144.8 - 151.4i	132.9 - 143.2i	171.4 - 149.7i	149.2 - 147.i	130.8 - 145.3i
4700	161.4 - 157.i	145.4 - 148.2i	132.8 - 140.9i	160.4 - 158.i	145.7 - 147.9i	131.7 - 141.9i	167.3 - 150.6i	147.7 - 145.5i	135.9 - 137.9i
4800	160.2 - 155.1i	144.3 - 146.6i	131.5 - 139.6i	161.1 - 154.1i	144.4 - 146.5i	132.5 - 138.6i	161.2 - 154.2i	148.5 - 142.i	124.1 - 146.5i
4900	159.6 - 152.6i	143.1 - 144.5i	131.6 - 137.4i	159.6 - 152.6i	142.7 - 144.9i	131.5 - 137.5i	168.3 - 142.7i	142.7 - 144.9i	135.3 - 133.3i
5000	159.1 - 150.4i	142.1 - 143.1i	131.1 - 135.9i	158.2 - 151.3i	141.5 - 143.7i	130.5 - 136.5i	162.4 - 146.2i	143.7 - 141.5i	136.1 - 130.2i

Tabell 26: Den komplekse permeabiliteten funnet ved optimalisering, fra de transformerte B-H kurvene og fra de målte B-H kurvene for armeringstråd 3 ved 40 Hz, 50 Hz og 60 Hz når det påtrykkes H-felt mellom 100 og 5000 A/m.

Relativ kompleks permeabilitet for armeringstråd 3									
H $\frac{A}{m}$	$\mu_{Optimalisert}$			$\mu_{Transformert}$			$\mu_{m\ddot{a}lt}$		
	40 Hz	50 Hz	60 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz
100	60.2 - 8.7i	62.3 - 11.5i	60.2 - 12.2i	60.1 - 9.1i	62.4 - 11.3i	60.1 - 12.8i	60.3 - 9.1i	62.5 - 10.4i	58.4 - 17.1i
200	65.0 - 11.7i	66.4 - 14.8i	65.4 - 16.2i	64.9 - 11.8i	66.3 - 15.1i	65.5 - 16.0i	65.1 - 9.8i	67.3 - 10.1i	65.2 - 14.9i
300	68.8 - 14.6i	70.1 - 18.0i	68.9 - 19.9i	68.8 - 14.6i	70.1 - 18.2i	68.9 - 20.1i	69.4 - 9.4i	71.0 - 14.0i	68.3 - 20.0i
400	73.9 - 19.5i	74.7 - 23.2i	72.7 - 24.5i	74.0 - 19.2i	74.7 - 23.0i	72.6 - 24.8i	74.6 - 17.0i	75.4 - 20.8i	71.9 - 25.7i
500	79.1 - 25.1i	79.2 - 28.7i	76.4 - 29.6i	79.3 - 24.4i	79.3 - 28.4i	76.2 - 29.9i	81.6 - 16.1i	82.3 - 17.5i	78.6 - 21.7i
600	83.8 - 30.4i	83.4 - 34.3i	80.0 - 35.5i	83.9 - 30.1i	83.4 - 34.2i	80.0 - 35.6i	87.4 - 15.9i	87.6 - 20.0i	84.9 - 20.7i
700	89.6 - 38.6i	88.0 - 42.0i	83.9 - 42.6i	89.7 - 38.4i	87.8 - 42.3i	83.5 - 43.4i	93.2 - 28.8i	89.9 - 36.9i	86.8 - 35.6i
800	94.4 - 46.0i	92.3 - 50.3i	87.3 - 49.9i	94.6 - 45.6i	92.5 - 49.8i	87.1 - 50.3i	99.9 - 32.5i	97.8 - 38.4i	94.6 - 33.9i
900	100.5 - 56.9i	96.1 - 59.3i	90.6 - 58.7i	100.9 - 56.2i	96.1 - 59.4i	91.0 - 58.1i	107.4 - 42.2i	104.1 - 44.5i	99.5 - 42.5i
1000	105.6 - 67.0i	100.6 - 69.7i	93.9 - 66.6i	105.4 - 67.3i	101.1 - 68.9i	94.2 - 66.3i	118.2 - 40.4i	112.6 - 48.1i	106. - 45.3i
1100	110.3 - 75.2i	104. - 76.5i	96.7 - 74.1i	110.3 - 75.2i	103.3 - 77.5i	96.3 - 74.5i	118. - 61.2i	115.2 - 57.6i	102.7 - 65.6i
1200	114.7 - 86.4i	107. - 87.7i	100. - 84.1i	114.9 - 86.1i	106.9 - 87.9i	99.6 - 84.4i	127.2 - 66.0i	124.1 - 62.1i	108.8 - 71.8i
1300	118.2 - 99.1i	110.4 - 97.8i	101.6 - 93.3i	119.1 - 98.0i	111. - 97.0i	102.5 - 92.3i	140.4 - 65.0i	124.3 - 79.4i	117.7 - 72.8i
1400	122.2 - 107.7i	112.9 - 107.i	104.7 - 99.9i	122.7 - 107.2i	112.5 - 107.5i	104.6 - 100.i	146.7 - 70.6i	132.4 - 81.8i	122.8 - 75.9i
1500	125.5 - 117.8i	115.4 - 116.i	106.2 - 109.6i	124.4 - 118.9i	114.8 - 116.6i	105.4 - 110.3i	144.9 - 92.5i	141.5 - 81.7i	128.5 - 82.1i
1600	127.9 - 126.2i	117. - 122.2i	107.4 - 114.7i	128. - 126.1i	116.9 - 122.3i	106.9 - 115.2i	160.6 - 80.3i	143.8 - 88.9i	129.9 - 88.5i
1700	130.4 - 133.4i	118.8 - 128.i	108.4 - 121.4i	128.9 - 134.9i	118.8 - 128.i	108.9 - 121.i	165.3 - 85.8i	142.6 - 100.4i	124.3 - 105.3i
1800	131.3 - 140.7i	119.3 - 134.i	110. - 126.2i	130.9 - 141.1i	120. - 133.3i	110.1 - 126.i	160.8 - 106.2i	148.4 - 101.2i	129.1 - 106.2i
1900	133.5 - 145.7i	120.5 - 138.6i	110. - 130.8i	132.2 - 146.9i	120.9 - 138.3i	110.5 - 130.3i	166.4 - 106.3i	150.3 - 105.8i	135.4 - 104.7i
2000	135. - 149.4i	122. - 141.6i	111.3 - 133.6i	134.7 - 149.6i	120.9 - 142.6i	110.4 - 134.3i	162.6 - 118.2i	147.7 - 114.2i	142.2 - 100.1i
2100	135.5 - 153.7i	123. - 145.5i	112.1 - 137.1i	134.8 - 154.3i	123.2 - 145.3i	112.5 - 136.8i	172.7 - 110.3i	155.5 - 109.5i	141.6 - 106.1i
2200	135.8 - 156.i	124.5 - 146.5i	112.7 - 138.3i	136.1 - 155.8i	122.1 - 148.5i	113.3 - 137.8i	169.6 - 119.4i	164.4 - 98.2i	144.3 - 104.9i
2300	138.2 - 157.5i	123.6 - 149.6i	114.6 - 139.7i	137.8 - 157.8i	123.3 - 149.9i	112.6 - 141.3i	159.5 - 135.2i	155.4 - 116.5i	137.2 - 116.3i
2400	138.1 - 159.1i	125.7 - 149.7i	114.5 - 141.8i	138.6 - 158.6i	124.2 - 151.i	113.6 - 142.5i	179.4 - 110.9i	152.3 - 121.5i	138.7 - 117.6i
2500	140.1 - 159.9i	125.7 - 151.i	114.7 - 143.i	139.8 - 160.1i	124.8 - 151.8i	114.3 - 143.3i	175.2 - 119.5i	157. - 117.7i	148.1 - 107.6i
2600	140.7 - 160.9i	125.6 - 152.7i	115. - 143.5i	140.6 - 161.i	125.6 - 152.7i	114.6 - 143.8i	181.5 - 112.2i	163.4 - 111.4i	136.5 - 122.9i
2700	140.6 - 161.2i	126.3 - 152.3i	115.4 - 144.i	140.7 - 161.1i	125.7 - 152.9i	115.1 - 144.3i	176.8 - 120.6i	152.9 - 125.7i	144.2 - 115.i
2800	141.5 - 161.3i	125.8 - 153.2i	115.9 - 144.5i	141.1 - 161.5i	125.9 - 153.1i	115.5 - 144.8i	171.6 - 128.7i	160.8 - 116.8i	141.1 - 119.6i
2900	141.7 - 161.5i	127. - 152.8i	116.4 - 144.5i	141.4 - 161.8i	126.2 - 153.5i	115.7 - 145.1i	179.5 - 118.5i	160.8 - 116.9i	139.5 - 121.9i
3000	143.3 - 160.8i	127.1 - 152.9i	116.3 - 144.8i	141.7 - 162.2i	128.5 - 151.7i	115.8 - 145.2i	175.7 - 123.7i	155.7 - 124.1i	141.6 - 120.i
3100	143.2 - 160.7i	127.7 - 152.5i	116.7 - 144.4i	144. - 160.i	128.6 - 151.7i	115.7 - 145.1i	172.2 - 129.1i	153.7 - 126.4i	134.1 - 128.2i
3200	143.6 - 160.i	128.6 - 151.8i	117. - 143.9i	143.8 - 159.8i	128.6 - 151.8i	115.7 - 145.i	179.4 - 118.4i	153.5 - 126.2i	151.6 - 106.7i
3300	144.4 - 158.9i	127.9 - 151.6i	117.8 - 143.5i	143.7 - 159.6i	128.2 - 151.3i	117.9 - 143.4i	177.2 - 120.8i	159.1 - 119.2i	133.8 - 128.i
3400	145.2 - 157.8i	128.9 - 150.4i	117.7 - 143.1i	143.5 - 159.4i	128.1 - 151.1i	117.7 - 143.1i	178.5 - 117.9i	158.5 - 118.8i	135.7 - 125.9i
3500	145.1 - 157.1i	129.2 - 149.8i	117.9 - 142.2i	145.5 - 156.8i	130.1 - 149.i	117.3 - 142.7i	176.5 - 120.4i	154.6 - 123.3i	138.9 - 121.4i
3600	144.6 - 156.i	129.5 - 148.9i	117.3 - 141.8i	144.7 - 155.9i	129.9 - 148.7i	116.9 - 142.1i	170.5 - 127.8i	163. - 111.1i	144.1 - 114.9i
3700	145.5 - 154.7i	130.1 - 147.9i	118.1 - 141.3i	144.4 - 155.7i	129.6 - 148.4i	117. - 142.3i	173.7 - 122.3i	157.4 - 118.i	150.5 - 105.9i
3800	145.7 - 154.i	130.1 - 147.i	118. - 140.3i	146.5 - 153.2i	129.1 - 147.8i	118.5 - 139.8i	177. - 116.8i	156.9 - 117.6i	143.3 - 114.3i
3900	146.4 - 152.2i	130.5 - 145.9i	118.5 - 139.5i	145.9 - 152.6i	131. - 145.5i	118.4 - 139.7i	174.3 - 118.9i	158.2 - 114.9i	139.5 - 118.2i
4000	146.7 - 151.1i	130.4 - 145.i	119.1 - 138.7i	145.5 - 152.2i	130.5 - 144.9i	118.2 - 139.5i	172. - 121.1i	159.4 - 115.2i	140.8 - 115.8i
4100	146.8 - 149.8i	130.5 - 143.9i	119. - 137.9i	147.2 - 149.4i	130. - 144.4i	117.8 - 138.9i	178.3 - 110.2i	151.8 - 121.1i	138.7 - 117.5i
4200	146.5 - 148.7i	130.6 - 143.i	119. - 136.8i	146.5 - 148.7i	129.6 - 143.9i	119.3 - 136.5i	174.4 - 115.1i	156.6 - 113.8i	138.1 - 117.1i
4300	147. - 146.9i	130.7 - 141.9i	118.9 - 136.2i	148.1 - 145.9i	131.2 - 141.4i	119. - 136.2i	171.7 - 117.1i	154.4 - 115.7i	136. - 118.8i
4400	147.2 - 145.8i	131.1 - 140.7i	119. - 135.2i	147.6 - 145.4i	130.8 - 141.i	118.5 - 135.6i	171.2 - 116.7i	157.1 - 110.6i	142.4 - 110.1i
4500	147.7 - 144.2i	131.2 - 139.5i	118.9 - 134.4i	147.1 - 144.9i	130.3 - 140.4i	118.1 - 135.1i	178.6 - 103.1i	153.1 - 114.8i	136.8 - 116.i
4600	147.7 - 142.7i	131. - 138.6i	118.8 - 133.4i	148.4 - 141.9i	131.8 - 137.9i	119.5 - 132.7i	174.5 - 107.9i	147.3 - 121.1i	139.7 - 111.4i
4700	147.5 - 141.6i	131.4 - 137.i	119.1 - 132.5i	147.8 - 141.3i	131.2 - 137.2i	119.2 - 132.4i	173.9 - 107.5i	155.1 - 109.2i	142.4 - 106.8i
4800	147.9 - 139.9i	131.4 - 135.9i	119.5 - 131.3i	147.2 - 140.7i	130.7 - 136.7i	118.8 - 131.9i	173. - 106.9i	152.8 - 111.i	140.2 - 108.4i
4900	147.4 - 138.7i	131.6 - 135.i	119.2 - 130.3i	148.4 - 137.7i	130.3 - 136.2i	118.2 - 131.2i	170.7 - 109.1i	152.3 - 110.7i	139.6 - 108.i
5000	147.9 - 137.i	131.1 - 133.7i	119.3 - 129.3i	147.7 - 137.1i	131.5 - 133.4i	119.7 - 129.i	175.9 - 98.1i	148.3 - 114.6i	134.1 - 113.6i

Tabell 27: Den komplekse permeabiliteten funnet ved optimalisering, fra de transformerte B-H kurvene og fra de målte B-H kurvene for armeringstråd 8 ved 40 Hz, 50 Hz og 60 Hz når det påtrykkes H-felt mellom 100 og 5000 A/m.

Relativ kompleks permeabilitet for armeringstråd 8									
H	$\mu_{Optimalisert}$			$\mu_{Transformert}$			$\mu_{Målt}$		
$\frac{A}{m}$	40 Hz	50 Hz	60 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz
100	0.104 - 0.009i	0.165 - 0.044i	0.133 - 0.035i	0.104 - 0.009i	0.165 - 0.045i	0.133 - 0.035i	-0.102 + 0.02i	-0.163 - 0.047i	-0.135 - 0.025i
200	0.173 - 0.004i	0.115 - 0.01i	0.135 - 0.016i	0.173 - 0.005i	0.115 - 0.009i	0.135 - 0.016i	-0.157 - 0.067i	-0.098 - 0.066i	-0.133 - 0.022i
300	0.114 - 0.006i	0.129 - 0.01i	0.134 - 0.013i	0.114 - 0.005i	0.129 - 0.01i	0.134 - 0.012i	-0.114 - 0.002i	-0.126 - 0.031i	-0.136 - 0.01i
400	0.105 - 0.003i	0.134 - 0.008i	0.098 - 0.004i	0.105 - 0.003i	0.134 - 0.008i	0.098 - 0.004i	-0.103 - 0.019i	-0.133 + 0.022i	-0.096 - 0.02i
500	0.132 - 0.008i	0.121 - 0.002i	0.124 - 0.005i	0.132 - 0.008i	0.121 - 0.002i	0.124 - 0.004i	-0.133 - 0.008i	-0.122 - 0.005i	-0.124 - 0.007i
600	0.112 - 0.008i	0.123 - 0.001i	0.116 - 0.004i	0.112 - 0.008i	0.123 - 0.002i	0.116 - 0.003i	-0.111 + 0.003i	-0.123 - 0.013i	-0.114 - 0.007i
700	0.116 - 0.003i	0.124 - 0.002i	0.111 - 0.006i	0.116 - 0.003i	0.124 - 0.002i	0.111 - 0.007i	-0.116 + -0.0i	-0.121 + 0.026i	-0.11 - 0.012i
800	0.109 - 0.003i	0.121 - 0.006i	0.104 - 0.002i	0.109 - 0.003i	0.121 - 0.005i	0.104 - 0.002i	-0.107 + 0.016i	-0.122 + 0.009i	-0.104 - 0.003i
900	0.115 - 0.003i	0.119 - 0.008i	0.109 + -0.0i	0.115 - 0.003i	0.119 - 0.009i	0.109 + 0.0i	-0.11 + 0.034i	-0.118 + 0.016i	-0.108 + -0.0i
1000	0.111 - 0.004i	0.105 - 0.002i	0.109 - 0.001i	0.111 - 0.003i	0.105 - 0.002i	0.109 - 0.002i	-0.111 + 0.007i	-0.101 - 0.026i	-0.108 - 0.018i
1100	0.107 - 0.003i	0.113 - 0.004i	0.111 - 0.002i	0.107 - 0.003i	0.113 - 0.003i	0.111 - 0.002i	-0.106 - 0.006i	-0.112 - 0.008i	-0.11 + 0.012i
1200	0.104 - 0.003i	0.108 - 0.003i	0.108 - 0.007i	0.104 - 0.003i	0.108 - 0.003i	0.108 - 0.006i	-0.104 + 0.006i	-0.104 + 0.034i	-0.106 - 0.023i
1300	0.109 - 0.004i	0.107 + -0.0i	0.113 - 0.005i	0.109 - 0.003i	0.107 + 0.0i	0.113 - 0.005i	-0.108 + 0.008i	-0.105 + 0.019i	-0.113 - 0.007i
1400	0.108 - 0.001i	0.108 - 0.002i	0.111 - 0.001i	0.108 - 0.002i	0.108 - 0.002i	0.111 - 0.002i	-0.107 + 0.014i	-0.107 + 0.005i	-0.11 + 0.002i
1500	0.106 - 0.003i	0.108 - 0.001i	0.107 + -0.0i	0.106 - 0.003i	0.108 - 0.002i	0.107 + 0.0i	-0.106 + -0.0i	-0.105 + 0.024i	-0.106 + 0.006i
1600	0.107 - 0.001i	0.106 + -0.0i	0.113 - 0.004i	0.107 - 0.002i	0.106 + 0.0i	0.113 - 0.003i	-0.107 - 0.002i	-0.103 - 0.024i	-0.113 - 0.01i
1700	0.103 - 0.002i	0.107 - 0.004i	0.106 - 0.001i	0.103 - 0.002i	0.107 - 0.003i	0.106 - 0.002i	-0.103 + 0.003i	-0.106 - 0.005i	-0.105 - 0.013i
1800	0.107 - 0.002i	0.103 - 0.003i	0.105 - 0.003i	0.107 - 0.002i	0.103 - 0.003i	0.105 - 0.003i	-0.107 - 0.003i	-0.101 - 0.021i	-0.102 + 0.02i
1900	0.107 + -0.0i	0.104 + -0.0i	0.11 - 0.001i	0.107 + 0.0i	0.104 + 0.0i	0.11 - 0.002i	-0.106 - 0.014i	-0.104 + 0.003i	-0.11 + 0.008i
2000	0.108 - 0.002i	0.105 - 0.004i	0.107 - 0.004i	0.108 - 0.002i	0.105 - 0.005i	0.107 - 0.003i	-0.108 + 0.006i	-0.104 + 0.013i	-0.106 + 0.01i
2100	0.11 - 0.002i	0.107 - 0.004i	0.11 - 0.001i	0.11 - 0.002i	0.107 - 0.003i	0.11 + 0.0i	-0.11 - 0.002i	-0.107 - 0.003i	-0.109 + 0.013i
2200	0.105 + -0.0i	0.108 - 0.004i	0.104 - 0.003i	0.105 + 0.0i	0.108 - 0.003i	0.104 - 0.003i	-0.105 + 0.013i	-0.107 + 0.013i	-0.104 + 0.009i
2300	0.103 - 0.001i	0.103 - 0.003i	0.106 - 0.001i	0.103 - 0.002i	0.103 - 0.003i	0.106 - 0.002i	-0.103 + 0.003i	-0.103 + 0.009i	-0.105 + -0.0i
2400	0.103 - 0.001i	0.104 - 0.002i	0.108 - 0.004i	0.103 - 0.002i	0.104 - 0.002i	0.108 - 0.005i	-0.103 + 0.008i	-0.104 + 0.011i	-0.108 - 0.002i
2500	0.104 + -0.0i	0.104 - 0.001i	0.105 - 0.004i	0.104 + 0.0i	0.104 - 0.002i	0.105 - 0.003i	-0.104 + 0.009i	-0.103 - 0.011i	-0.105 - 0.002i
2600	0.106 + -0.0i	0.107 - 0.002i	0.108 - 0.002i	0.106 + 0.0i	0.107 - 0.003i	0.108 - 0.003i	-0.105 - 0.017i	-0.107 - 0.008i	-0.107 + 0.002i
2700	0.106 - 0.001i	0.103 - 0.002i	0.107 - 0.001i	0.106 + 0.0i	0.103 - 0.002i	0.107 - 0.002i	-0.106 - 0.002i	-0.103 - 0.006i	-0.107 - 0.003i
2800	0.105 - 0.001i	0.106 - 0.002i	0.105 - 0.002i	0.105 - 0.002i	0.106 - 0.002i	0.105 - 0.003i	-0.106 + 0.003i	-0.106 - 0.006i	-0.104 + 0.013i
2900	0.104 - 0.002i	0.103 - 0.001i	0.104 - 0.003i	0.104 - 0.002i	0.103 - 0.002i	0.104 - 0.003i	-0.104 + -0.0i	-0.103 + 0.005i	-0.104 - 0.009i
3000	0.105 - 0.002i	0.105 - 0.002i	0.107 - 0.002i	0.105 - 0.002i	0.105 - 0.002i	0.107 - 0.002i	-0.104 - 0.017i	-0.105 - 0.005i	-0.106 + 0.013i
3100	0.106 - 0.003i	0.104 - 0.001i	0.105 - 0.002i	0.106 - 0.003i	0.104 - 0.002i	0.105 - 0.002i	-0.106 + 0.005i	-0.104 - 0.009i	-0.104 + 0.014i
3200	0.104 - 0.001i	0.105 - 0.003i	0.105 - 0.002i	0.104 + 0.0i	0.105 - 0.003i	0.105 - 0.002i	-0.104 - 0.008i	-0.104 + 0.019i	-0.105 + 0.008i
3300	0.104 - 0.001i	0.106 - 0.002i	0.101 - 0.003i	0.104 - 0.002i	0.106 - 0.002i	0.101 - 0.003i	-0.103 - 0.011i	-0.106 + -0.0i	-0.10 - 0.014i
3400	0.104 - 0.001i	0.104 - 0.002i	0.106 - 0.002i	0.104 - 0.002i	0.104 - 0.002i	0.106 - 0.002i	-0.104 - 0.005i	-0.104 + 0.008i	-0.106 - 0.002i
3500	0.103 + -0.0i	0.105 + -0.0i	0.103 - 0.004i	0.103 + 0.0i	0.105 + 0.0i	0.103 - 0.003i	-0.102 - 0.008i	-0.104 - 0.009i	-0.103 - 0.003i
3600	0.107 + -0.0i	0.105 - 0.001i	0.105 - 0.002i	0.107 + 0.0i	0.105 - 0.002i	0.105 - 0.002i	-0.107 - 0.002i	-0.104 - 0.008i	-0.104 - 0.005i
3700	0.104 - 0.001i	0.104 - 0.003i	0.104 - 0.004i	0.104 - 0.002i	0.104 - 0.003i	0.104 - 0.003i	-0.103 + 0.012i	-0.104 - 0.002i	-0.102 + 0.017i
3800	0.105 - 0.001i	0.102 - 0.001i	0.104 - 0.001i	0.105 - 0.002i	0.102 - 0.002i	0.104 - 0.002i	-0.105 + 0.0i	-0.101 - 0.015i	-0.104 - 0.002i
3900	0.105 - 0.002i	0.105 - 0.001i	0.104 - 0.003i	0.105 - 0.002i	0.105 - 0.002i	0.104 - 0.003i	-0.105 + 0.008i	-0.105 + 0.0i	-0.104 - 0.005i
4000	0.106 - 0.001i	0.105 - 0.002i	0.105 - 0.002i	0.106 + 0.0i	0.105 - 0.003i	0.105 - 0.002i	-0.106 + -0.0i	-0.105 - 0.002i	-0.105 + 0.002i
4100	0.105 - 0.003i	0.104 - 0.003i	0.105 - 0.002i	0.105 - 0.003i	0.104 - 0.003i	0.105 - 0.003i	-0.105 + 0.003i	-0.104 + 0.005i	-0.103 + 0.014i
4200	0.105 - 0.002i	0.104 - 0.002i	0.105 - 0.003i	0.105 - 0.002i	0.104 - 0.002i	0.105 - 0.003i	-0.105 + 0.009i	-0.104 + 0.003i	-0.105 - 0.002i
4300	0.105 - 0.001i	0.105 - 0.003i	0.105 - 0.002i	0.105 - 0.002i	0.105 - 0.003i	0.105 - 0.002i	-0.105 - 0.002i	-0.105 - 0.006i	-0.105 - 0.005i
4400	0.105 - 0.002i	0.105 - 0.001i	0.105 - 0.002i	0.105 - 0.002i	0.105 - 0.002i	0.105 - 0.002i	-0.105 + 0.006i	-0.105 + 0.006i	-0.105 - 0.003i
4500	0.105 - 0.001i	0.105 - 0.002i	0.102 - 0.003i	0.105 - 0.002i	0.105 - 0.002i	0.102 - 0.003i	-0.104 - 0.013i	-0.104 - 0.009i	-0.101 + 0.008i
4600	0.105 - 0.001i	0.103 - 0.002i	0.103 - 0.003i	0.105 + 0.0i	0.103 - 0.003i	0.103 - 0.003i	-0.105 + 0.006i	-0.103 - 0.012i	-0.102 - 0.015i
4700	0.105 - 0.002i	0.103 - 0.001i	0.104 - 0.002i	0.105 - 0.002i	0.103 - 0.002i	0.104 - 0.002i	-0.105 - 0.003i	-0.102 + 0.012i	-0.103 + 0.015i
4800	0.105 - 0.001i	0.103 - 0.002i	0.103 - 0.003i	0.105 - 0.002i	0.103 - 0.003i	0.103 - 0.003i	-0.105 + 0.002i	-0.103 - 0.003i	-0.103 + 0.005i
4900	0.104 - 0.001i	0.105 + -0.0i	0.105 - 0.002i	0.104 - 0.002i	0.105 + 0.0i	0.105 - 0.002i	-0.104 + 0.002i	-0.105 + 0.002i	-0.105 - 0.003i
5000	0.104 - 0.002i	0.104 - 0.002i	0.103 - 0.001i	0.104 - 0.002i	0.104 - 0.003i	0.103 - 0.002i	-0.104 - 0.003i	-0.104 + 0.006i	-0.103 + 0.006i

Vedlegg 5 - Tap

I dette vedlegget er de totale tapene beregnet med 4 ulike metoder lagt inn i tabeller med de tilsvarende målte totale tapene. De 4 ulike metodene er:

1. Totalt tap basert på B-H kurvens areal.
2. Totalt tap ved bruk av den analytiske formelen 25 som baserer seg på de optimaliserte komplekse permeabilitetene funnet i kapittel 4.3.1.
3. Totalt tap ved bruk av den analytiske formelen 25 som baserer seg på de analytisk beregna komplekse permeabilitetene basert på de transformerte B-H kurvene funnet i kapittel 4.3.2.
4. Totalt tap basert på FEM-beregninger i COMSOL med den optimaliserte komplekse permeabiliteten i kapittel 4.3.1 og med et fint, et medium og et grovt mesh.

Metode 2, 3 og 4 baserer seg kun på å benytte en kompleks permeabilitet μ og en konduktivitet σ tilnærmet 0.

De beregna totale tapene er vist i Tabell 28, 29, 30, 31 og 32 for armeringstråd 0, 1, 2, 3 og 8.

Tabell 28: Totalt tap armeringstråd 0.

Totalt tap: Armeringstråd 0 [W/kg]								
Målinger			Analytiske tap [$\frac{W}{kg}$]			FEM-tap mesher [$\frac{W}{kg}$]		
f [Hz]	H [$\frac{A}{m}$]	$P_{tot}^{målt}$ [$\frac{W}{kg}$]	Areal B-H kurve	$\mu_{Optimalisert}$	$\mu_{Analytisk}$	Fin	Medium	Grov
40	100	0.00259	0.00259	0.00259	0.00260	0.00259	0.00259	0.00259
40	200	0.01501	0.01501	0.01501	0.01544	0.01501	0.01501	0.01501
40	300	0.04611	0.04612	0.04612	0.04709	0.04612	0.04612	0.04611
40	400	0.10849	0.10852	0.10849	0.10975	0.10849	0.10849	0.10847
40	500	0.21528	0.21534	0.21527	0.21701	0.21527	0.21527	0.21523
40	600	0.38029	0.38039	0.38029	0.37588	0.38029	0.38029	0.38022
50	100	0.00390	0.00390	0.00390	0.00387	0.00390	0.00390	0.00390
50	200	0.02203	0.02203	0.02203	0.02161	0.02203	0.02203	0.02203
50	300	0.06386	0.06386	0.06386	0.06436	0.06386	0.06386	0.06385
50	400	0.14901	0.14901	0.14901	0.14669	0.14901	0.14901	0.14898
50	500	0.28643	0.28643	0.28643	0.28497	0.28643	0.28643	0.28637
50	600	0.49904	0.49914	0.49904	0.50016	0.49904	0.49904	0.49895
60	100	0.00518	0.00518	0.00518	0.00514	0.00518	0.00518	0.00518
60	200	0.02853	0.02853	0.02853	0.02806	0.02853	0.02853	0.02853
60	300	0.08193	0.08194	0.08193	0.08165	0.08193	0.08193	0.08192
60	400	0.18299	0.18302	0.18300	0.18225	0.18300	0.18300	0.18297
60	500	0.35128	0.35134	0.35128	0.34848	0.35128	0.35128	0.35121
60	600	0.60152	0.60152	0.60154	0.60388	0.60154	0.60154	0.60142

Tabell 29: Totalt tap armeringstråd 1.

Totalt tap: Armeringstråd 1 [W/kg]								
Målinger			Analytiske tap [$\frac{W}{kg}$]			FEM-tap mesher [$\frac{W}{kg}$]		
f [Hz]	H [$\frac{A}{m}$]	$P_{tot}^{m\ddot{a}lt}$ [$\frac{W}{kg}$]	Areal B-H kurve	$\mu_{Optimalisert}$	$\mu_{Analytisk}$	Fin	Medium	Grov
40	100	0.01215	0.01215	0.01215	0.01234	0.01215	0.01215	0.01215
40	200	0.07827	0.07827	0.07827	0.07873	0.07827	0.07827	0.07826
40	300	0.23382	0.23387	0.23382	0.23437	0.23382	0.23382	0.23378
40	400	0.54931	0.54945	0.54931	0.55254	0.54931	0.54931	0.54920
40	500	1.05930	1.05962	1.05931	1.05389	1.05931	1.05930	1.05910
40	600	1.70470	1.70508	1.70471	1.70306	1.70471	1.70470	1.70438
50	100	0.01755	0.01755	0.01755	0.01750	0.01755	0.01755	0.01755
50	200	0.10222	0.10222	0.10222	0.10332	0.10222	0.10222	0.10220
50	300	0.29869	0.29869	0.29870	0.29922	0.29870	0.29870	0.29864
50	400	0.68012	0.68012	0.68013	0.67702	0.68013	0.68013	0.68000
50	500	1.26840	1.26836	1.26837	1.26269	1.26837	1.26836	1.26812
50	600	1.99200	1.99204	1.99200	2.01339	1.99200	1.99199	1.99162
60	100	0.02019	0.02020	0.02019	0.01999	0.02019	0.02019	0.02019
60	200	0.11626	0.11628	0.11626	0.11728	0.11626	0.11626	0.11624
60	300	0.33700	0.33706	0.33699	0.33703	0.33699	0.33699	0.33693
60	400	0.76260	0.76273	0.76258	0.75975	0.76258	0.76258	0.76244
60	500	1.41000	1.41027	1.41001	1.40801	1.41001	1.41000	1.40973
60	600	2.21480	2.21522	2.21478	2.21767	2.21479	2.21478	2.21436

Tabell 30: Totalt tap armeringstråd 2.

Totalt tap: Armeringstråd 2 [W/kg]								
Målinger			Analytiske tap [$\frac{W}{kg}$]			FEM-tap mesher [$\frac{W}{kg}$]		
f [Hz]	H [$\frac{A}{m}$]	$P_{tot}^{m\ddot{a}lt}$ [$\frac{W}{kg}$]	Areal B-H kurve	$\mu_{Optimalisert}$	$\mu_{Analytisk}$	Fin	Medium	Grov
40	100	0.01326	0.01326	0.01326	0.01338	0.01326	0.01326	0.01326
40	200	0.08162	0.08163	0.08162	0.08152	0.08162	0.08162	0.08160
40	300	0.25446	0.25453	0.25446	0.25479	0.25446	0.25446	0.25442
40	400	0.60649	0.60664	0.60649	0.60238	0.60649	0.60649	0.60638
40	500	1.14820	1.14848	1.14822	1.14694	1.14822	1.14822	1.14800
40	600	1.82020	1.82024	1.82017	1.81309	1.82017	1.82017	1.81982
50	100	0.01719	0.01719	0.01719	0.01742	0.01719	0.01719	0.01719
50	200	0.10384	0.10384	0.10384	0.10328	0.10384	0.10384	0.10382
50	300	0.30987	0.30993	0.30987	0.30829	0.30987	0.30987	0.30981
50	400	0.72154	0.72154	0.72153	0.71492	0.72153	0.72153	0.72139
50	500	1.33690	1.33718	1.33687	1.34564	1.33687	1.33687	1.33661
50	600	2.10520	2.10560	2.10518	2.09221	2.10518	2.10517	2.10477
60	100	0.02094	0.02094	0.02094	0.02072	0.02094	0.02093	0.02093
60	200	0.12032	0.12034	0.12032	0.12050	0.12032	0.12032	0.12030
60	300	0.35091	0.35096	0.35091	0.35440	0.35091	0.35091	0.35084
60	400	0.79631	0.79644	0.79629	0.79683	0.79629	0.79629	0.79614
60	500	1.47260	1.47263	1.47258	1.47163	1.47258	1.47257	1.47229
60	600	2.31490	2.31488	2.31488	2.31703	2.31488	2.31487	2.31444

Tabell 31: Totalt tap armeringstråd 3.

Totalt tap: Armeringstråd 3 [W/kg]								
Målinger			Analytiske tap [$\frac{W}{kg}$]			FEM-tap mesher [$\frac{W}{kg}$]		
f [Hz]	H [$\frac{A}{m}$]	$P_{tot}^{m\ddot{a}lt}$ [$\frac{W}{kg}$]	Areal B-H kurve	$\mu_{Optimalisert}$	$\mu_{Analytisk}$	Fin	Medium	Grov
40	100	0.00196	0.00196	0.00196	0.00203	0.00196	0.00196	0.00195
40	200	0.01046	0.01046	0.01045	0.01056	0.01045	0.01045	0.01045
40	300	0.02935	0.02936	0.02936	0.02947	0.02936	0.02936	0.02935
40	400	0.06972	0.06974	0.06971	0.06892	0.06971	0.06971	0.06970
40	500	0.14044	0.14044	0.14043	0.13686	0.14043	0.14043	0.14040
40	600	0.24495	0.24495	0.24494	0.24229	0.24494	0.24494	0.24489
50	100	0.00321	0.00321	0.00321	0.00317	0.00321	0.00321	0.00321
50	200	0.01654	0.01654	0.01653	0.01695	0.01653	0.01653	0.01653
50	300	0.04547	0.04547	0.04547	0.04589	0.04547	0.04546	0.04546
50	400	0.10387	0.10390	0.10388	0.10321	0.10388	0.10388	0.10386
50	500	0.20053	0.20053	0.20053	0.19891	0.20053	0.20053	0.20049
50	600	0.34566	0.34573	0.34566	0.34457	0.34566	0.34566	0.34559
60	100	0.00408	0.00408	0.00408	0.00429	0.00408	0.00408	0.00408
60	200	0.02170	0.02170	0.02170	0.02146	0.02170	0.02170	0.02170
60	300	0.06026	0.06027	0.06026	0.06082	0.06026	0.06026	0.06025
60	400	0.13179	0.13182	0.13179	0.13325	0.13179	0.13179	0.13176
60	500	0.24819	0.24819	0.24818	0.25123	0.24818	0.24818	0.24813
60	600	0.42927	0.42927	0.42925	0.43058	0.42925	0.42924	0.42916

Tabell 32: Totalt tap armeringstråd 8.

Totalt tap: Armeringstråd 8 [W/kg]								
Målinger			Analytiske tap [$\frac{W}{kg}$]			FEM-tap mesher [$\frac{W}{kg}$]		
f [Hz]	H [$\frac{A}{m}$]	$P_{tot}^{m\ddot{a}lt}$ [$\frac{W}{kg}$]	Areal B-H kurve	$\mu_{Optimalisert}$	$\mu_{Analytisk}$	Fin	Medium	Grov
40	100	1.95e-6	1.95e-6	1.95e-6	2.09e-6	1.95e-6	1.95e-6	1.95e-6
40	200	3.84e-6	3.84e-6	3.84e-6	4.65e-6	3.84e-6	3.84e-6	3.84e-6
40	300	1.18e-5	1.18e-5	1.18e-5	1.03e-5	1.18e-5	1.18e-5	1.18e-5
40	400	1.23e-5	1.23e-5	1.23e-5	1.12e-5	1.23e-5	1.23e-5	1.23e-5
40	500	4.57e-5	4.57e-5	4.57e-5	4.43e-5	4.57e-5	4.57e-5	4.57e-5
40	600	6.12e-5	6.12e-5	6.12e-5	6.77e-5	6.12e-5	6.12e-5	6.12e-5
50	100	1.24e-5	1.24e-5	1.24e-5	1.27e-5	1.24e-5	1.24e-5	1.24e-5
50	200	1.08e-5	1.08e-5	1.08e-5	9.65e-6	1.08e-5	1.08e-5	1.08e-5
50	300	2.45e-5	2.45e-5	2.45e-5	2.43e-5	2.45e-5	2.45e-5	2.45e-5
50	400	3.55e-5	3.55e-5	3.55e-5	3.59e-5	3.55e-5	3.55e-5	3.55e-5
50	500	1.38e-5	1.38e-5	1.38e-5	1.26e-5	1.38e-5	1.38e-5	1.38e-5
50	600	1.15e-5	1.15e-5	1.15e-5	1.85e-5	1.15e-5	1.15e-5	1.15e-5
60	100	1.17e-5	1.17e-5	1.17e-5	1.16e-5	1.17e-5	1.17e-5	1.17e-5
60	200	2.12e-5	2.12e-5	2.12e-5	2.18e-5	2.12e-5	2.12e-5	2.12e-5
60	300	3.86e-5	3.87e-5	3.86e-5	3.65e-5	3.86e-5	3.86e-5	3.86e-5
60	400	2.08e-5	2.08e-5	2.08e-5	2.37e-5	2.08e-5	2.08e-5	2.08e-5
60	500	3.87e-5	3.87e-5	3.87e-5	3.11e-5	3.87e-5	3.87e-5	3.87e-5
60	600	4.55e-5	4.55e-5	4.55e-5	4.19e-5	4.55e-5	4.55e-5	4.55e-5

Vedlegg 6 - Brukermanual laget for Brockhaus Messtechnik

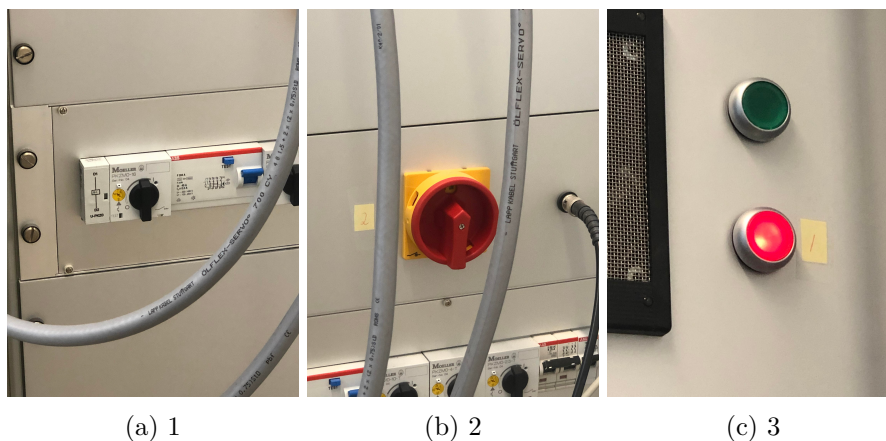
Denne manualen er laget basert på egne erfaringer og er laget som et hjelpemiddel til andre som skal bruke instrumentet. Manualen er på ingen måte en fasit og inkluderer ikke alt av nyttig informasjon, men den kan brukes som en veileder ved oppsett og utføring av målinger. Mer detaljer om instrumentet og ulike muligheter står i manualen [25].

Instrumentet er vist i Figur 46:



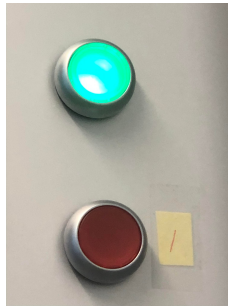
Figur 46: Instrumentets utseende

Instrumentet har 3 brytere disse er vist i Figur 47 i rekkefølgen de **skal** skrues på. Bryter 1 og 2 MÅ være på før du starter programmet, dersom dette ikke gjøres vil *Start measuring*-knappen ikke bli aktiv. Dersom bryter 1 og 2 er på vil bryter 3 slå seg på automatisk når målingene starter (når man trykker på *Start measuring*-knappen). Det betyr at det ikke nødvendig å slå på manuelt. Når man slår av instrumentet gjøres dette i motsatt rekkefølge.



Figur 47: Bryterne i rekkefølgen de må skrues på.

Når en måling starter, vil den tredje bryteren lyse **grønt**. Det betyr ikke at det foregår målinger bare fordi lyset er grønt, fordi lyset blir ikke rødt når en måling er ferdig.

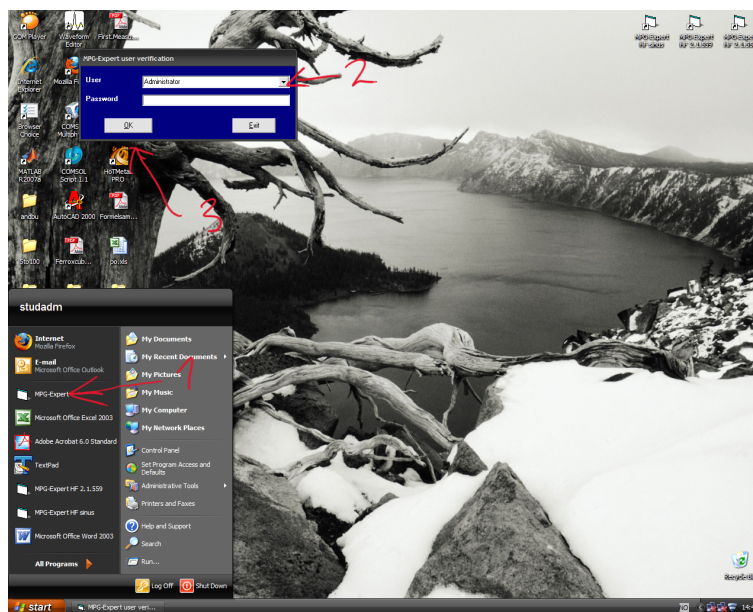


Figur 48: Grønt lys

For nye brukere

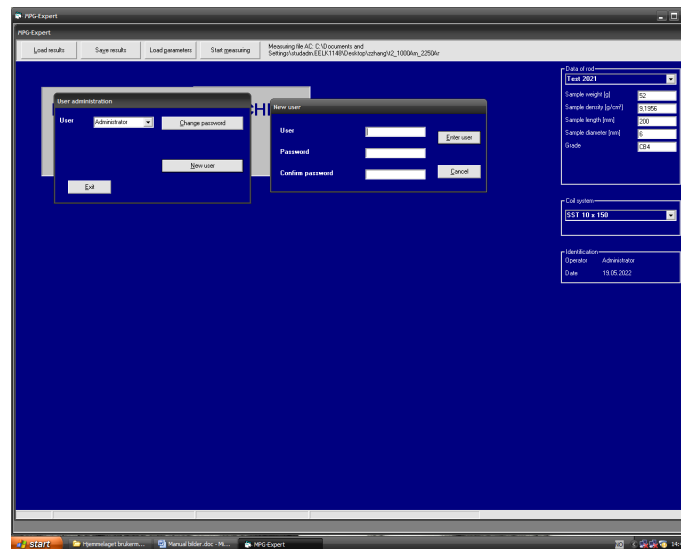
For nye brukere kan det være ønskelig å lage sin egen bruker i programvaren MPG Expert. Dette gjøres ved følgende steg

1. Åpne programvaren MPG Expert
2. Velg administrator brukeren og la passord ruten stå tom
3. Trykk ok



Figur 49: Nye brukere.

Når dette er gjort vil man få opp startskjermen vist under, hvor man først velger File → Options → New user. Her lager du et brukernavn og et passord. Når dette er gjort, lukk programmet og start det opp på nytt med egen bruker.

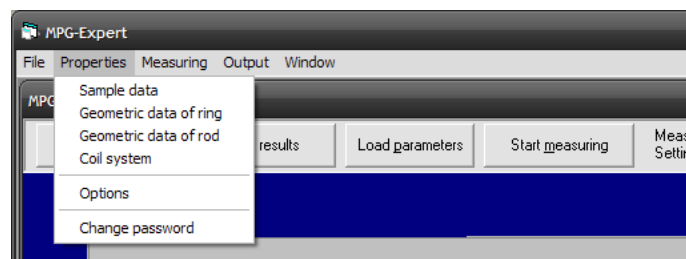


Figur 50: Lage egen bruker.

Definere testobjektene

For å definere et nytt testobjekt følg trinnene under:

1. Gå til *Properties* oppe i menyen



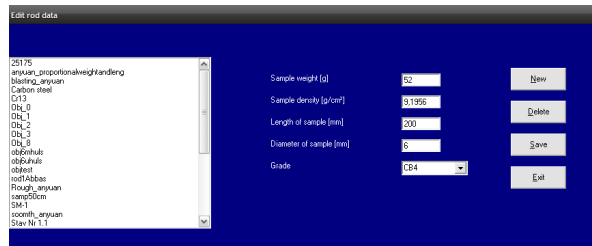
Figur 51: Properties i menyen.

2. Der kan man velge mellom *Sample data*, *Geometric data of ring* og *Geometric data of rod*
 - Sample data - Rektangulære objekter
 - Geometric data of ring - Ring objekter
 - Geometric data of rod - Runde objekter
3. Når typen testobjekt er valgt, legg inn parameterne det blir spurt etter i vinduet som dukker opp, disse er vist i Figur 52 under:



(a) Sheet

(b) Ring

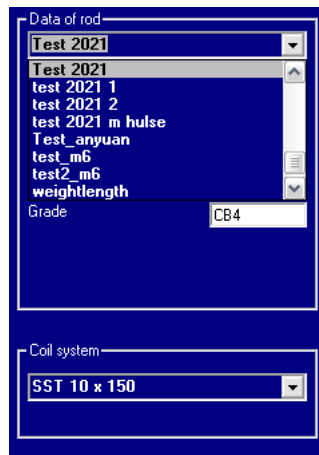


(c) Rod

Figur 52: Parametervinduene for de tre typene testobjekter.

Fra erfaring trenger man ikke/bør man ikke legge inn diameteren dersom man bruker Rod.

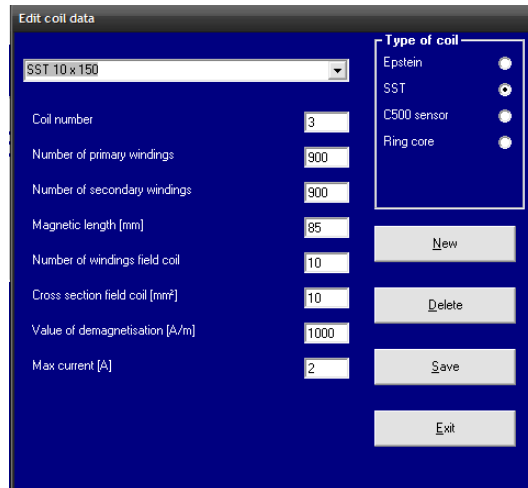
4. Lagre det definerte objektet og lukk vinduet. Ta deretter å velg det ønskede testobjektet på programmets startside, vist under:



Figur 53: Velg det ønskede testobjektet

Definere spolesystemene

I Figur 53 kan man også velge spole system. Spolesystemene benyttet ved NTNU er definert på forhånd, men om det skulle være ønskelig å gjøre endringer så gjøres dette ved å trykke *Properties* → *Coilsystem* i meny vinduet vist i Figur 51. Da vil vinduet i Figur 54 under dukke opp.

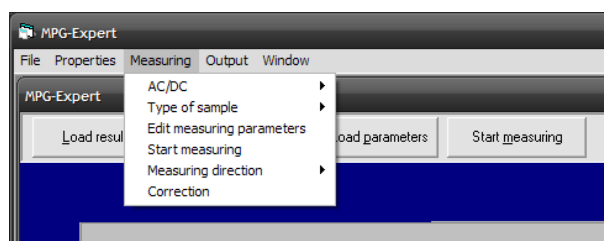


Figur 54: Velg det ønskede spolesystemet

På NTNU kan man velge mellom 2 system, dette er SST10x150 og SST50x150. SST10x150 brukes for runde objekt og SST 50x150 for rektangulære objekt.

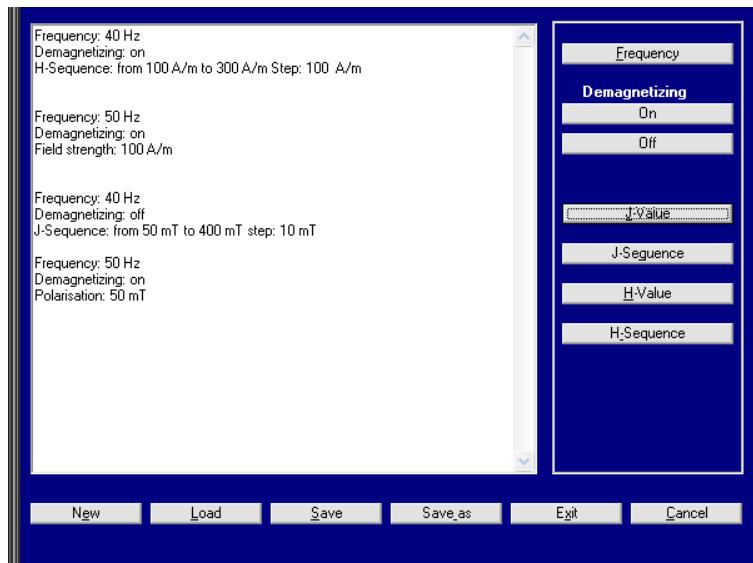
Definere ønsket målinger

Gå til *Measuring* i menyen:



Figur 55: Measuring i menyen.

1. Velg først om du ønsker å utføre AC eller DC målinger
2. Velg deretter hvilken type testobjekt du ønsker å benytte (Sheet, rod eller ring)
3. Velg measuring direction, denne har som standard stått som Mixing mode(Epstein)
4. Valg av Correction har ikke blitt benyttet



Figur 56: Definere ønsket måleverdier

5. Gå deretter til *Edit measuring parameters*

Her kan man velge om man vil definere J(magnetisk flukstetthet [mT]) eller H(magnetisk feltstyrke [$\frac{A}{m}$]) som enkelt verdier eller som sekvenser.

Dersom man ønsker å måle hystereseløp er man nødt til å definere J-sekvenser ved ulike frekvenser. Det vil ikke være mulig å få ut disse tapene riktig dersom man definerer H-sekvenser eller H-verdier.

Det maksimale tillatte H-feltet er $30\,000 \frac{A}{m}$, men ikke overstig $20\,000 \frac{A}{m}$. Maksimalt B-felt er 2T og maksimal strøm er 2A.

6. Lagre måleparameterne og lukk vinduet

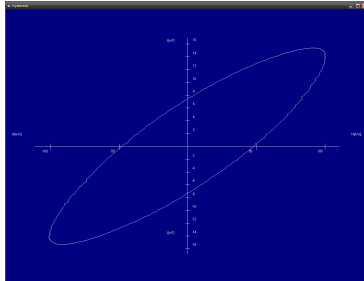
7. **NB!!!** DEFINER ALLTID H-VERDIER ELLER H-SEKVENSER FØRST FOR Å SJEKKE OM DU KAN OPPNÅ DET ØNSKEDE B-FELTET

8. Gjør gjerne en sjekk om at alle valg av parametere, testobjekt og spolesystem stemmer.

9. Start målingene ved å trykke *Start measuring*

Resultater og ønsket output

Som resultat vil man få ut B-H kurver og målte data som vist under:



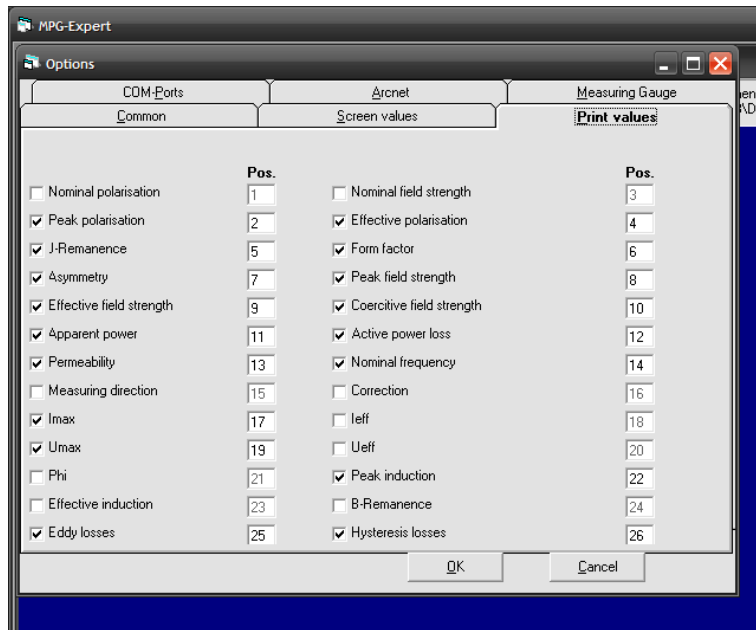
(a) B-H kurve

Measured	Peak/Val	Effective	Asymmetry	J-Re	phi	ff	DC/3	measured	Peak/Val	Effective	Asymmetry	measured	Peak/Val	Effective	Asymmetry	measured	Peak/Val	Effective	Asymmetry	measured	Peak/Val	Effective	Asymmetry	measured	Peak/Val	Effective	Asymmetry	measured	Peak/Val	Effective	Asymmetry	measured	Peak/Val	Effective	Asymmetry	measured	Peak/Val	Effective	Asymmetry	measured	Peak/Val	Effective	Asymmetry
1	0.01235	14.42	15.26	10.97	7.2599	1.112	0.1933	101.08	71.65	45.137	0.02059	135.91	50	without	0.00248	0.1249	0.22026	7.2599																									
2	0.42774	130.09	99.679	70.656	65.665	1.1136	0.02792	299.9	282.41	247.34	0.69774	198.35	50	without	0.02779	0.8021	0.10936	65.665																									
3	1.0796	228.49	227.91	193.5	183.74	1.1136	0.01019	793.26	493.35	482.64	2.711	252.79	50	without	0.06419	1.9429	0.05204	183.74																									
4	4.1276	348.26	347.95	246.26	269.58	1.1136	0.0575	998.02	687.75	633.15	5.7663	276.96	50	without	0.04258	2.8016	0.44308	269.58																									
5	7.0207	457.96	455.93	323.12	357.91	1.1133	0.10663	1301.8	881.41	815.89	9.7413	278.71	50	without	0.1228	3.6791	0.87521	357.91																									
6	19.386	554.36	553.04	391.93	434.14	1.1133	0.14485	1598.5	1074.3	993.39	14.286	275.32	50	without	0.19297	4.4762	1.44505	434.14																									
7	14.293	644.93	643.98	455.82	505.24	1.1129	0.14703	1999.1	1269.9	1176.9	19.762	269.59	50	without	0.17996	5.1746	1.84498	505.24																									
8	19.549	727.47	726.74	514.05	563.97	1.1137	0.02102	2300	1499.7	1347.8	26.636	262.92	50	without	0.0077	6.8903	0.33264	563.97																									
9	23.136	803.66	801.53	567.65	617.6	1.1126	0.04725	2495.4	1649	1526.5	31.961	265.6	50	without	0.2568	6.4401	1.96986	617.6																									
10	26.027	873.82	871.51	617.26	667.25	1.1136	0.01920	2796.6	1836.9	1696.6	38.731	247.99	50	without	0.54173	7.0209	4.33273	667.25																									
11	23.295	940.53	939.03	664.24	715.38	1.1124	0.068074	3090.6	2056.9	1880.2	45.957	240.9	50	without	0.26205	7.9344	4.32039	715.38																									
12	38.826	1002.7	1000.2	709.18	761.41	1.1123	0.019962	3403.1	2216.8	2021.8	53.638	233.9	50	without	0.324	8.0299	4.32943	761.41																									
13	44.348	1068.9	1066.2	757.79	798.97	1.1123	0.005014	3698.6	2396.1	2148.9	63.27	222.25	50	without	0.34931	8.4766	4.31697	798.97																									
14	50.207	1112.8	1110	795.97	838.31	1.1123	0.1863	3994.7	2582.8	2342.3	69.959	221.12	50	without	0.37228	8.9136	4.31495	838.31																									
15	56.8	1168.9	1163.9	824.07	877.09	1.1122	0.13668	4311.2	2778.3	2511.8	78.211	214.64	49.99	without	0.40716	9.3469	4.31167	877.09																									
16	62.234	1210.9	1207.7	865.14	906.38	1.1123	0.0838	4582.9	2944.6	2680.7	86.034	203.7	50	without	0.43293	9.7991	4.31091	906.38																									
17	68.782	1258.5	1255.2	888.73	939.73	1.1122	0.063219	4894.5	3134.9	2814.4	95.193	204.08	50	without	0.46226	10.26	4.31429	939.73																									
18	76.276	1302.2	1299.7	919.98	972.96	1.1123	0.10219	5196.8	3318.3	2971.3	104.28	199.67	50	without	0.49491	10.443	4.31495	972.96																									
19	82.027	1346	1344.3	950.2	1010.9	1.1102	0.080487	5500.6	3487.1	3084.1	113.2	194.48	50	without	0.5195	10.727	4.29138	1010.9																									
20	88.619	1397.4	1393.6	973.96	1039.9	1.1103	0.042305	5794.5	3666.1	3326.1	122.49	186.01	50	without	0.54226	11.093	4.29795	1039.9																									
21	95.429	1426	1422	1026	1067.3	1.1102	0.038064	6092.9	3847.1	3380.6	132.1	185.72	50	without	0.57544	11.527	4.30296	1067.3																									

(b) Data

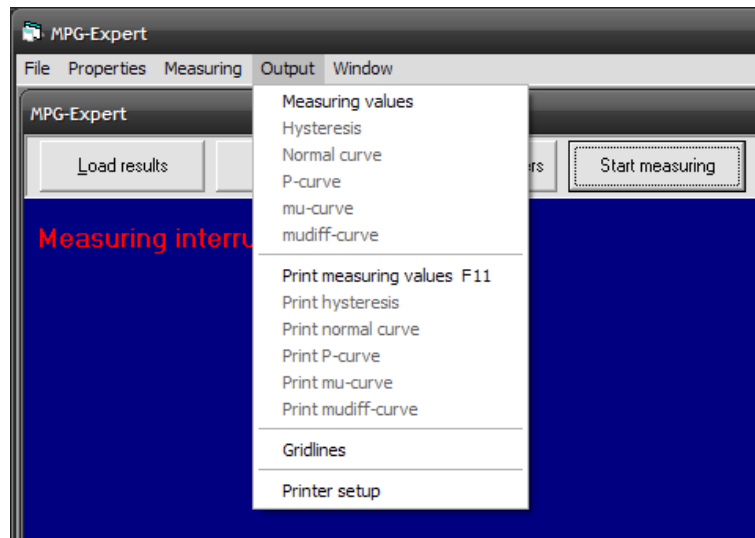
Figur 57: Typisk resultat.

Man kan selv bestemme hvilke output man vil få i tabellen vist i Figur 57b, det gjøres ved å gå inn på innstillingene under *File* i menyen, og huker av de parameterne man ønsker som vist under:



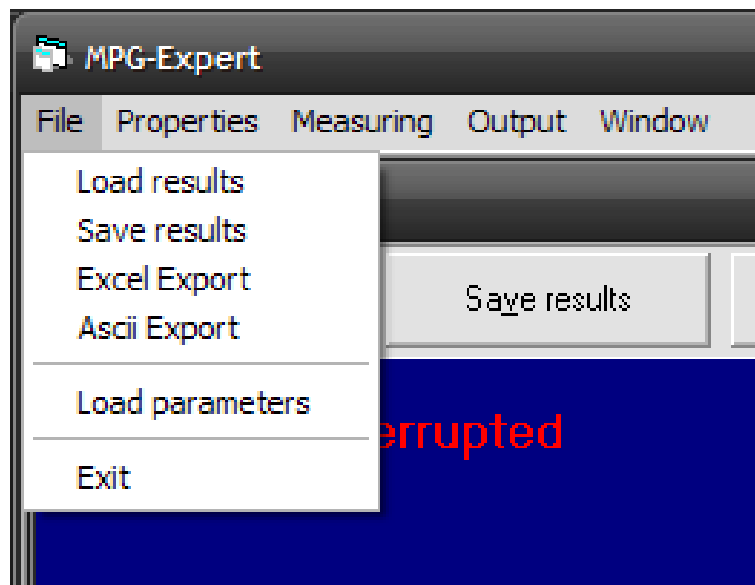
Figur 58: Bestemme output variabler

Det går også an å plote andre kurver enn B-H kurven, dette gjøres ved å gå på output i menyen og deretter velger man plottene man ønsker å få ut. Dette er vist i Figur 59 under.



Figur 59: Plotting av ulike interessante kurver

Dersom man eksportere resultatene til Excel vil man både få punktene for hver av B-H kurvene og dataen fra tabellen i Figur 60. Det maksimale antall B-H kurver man kan eksportere er 155, derfor anbefales det å unngå å overstige 155 målinger per målesekvens.



Figur 60: Eksportere fil

