

Ledningsförmåga och permabilitet hos armeringsjärn

Ledningsförmåga och permabilitet hos armeringsjärn

Publikationen har utarbetats av
Sven Garmland Emicon AB, Lund

Räddningsverkets kontaktperson:
Lars Berg, Enhet Tekniskt ledningsstöd

Innehåll

	SIDA
1. Bakgrund	5
2. Provobjekt	5
3. Provpersonal	5
4. Provtid	5
5. Mätningens genomförande	5
6. Mätuppställningar	6
6.1 Mätning av likströmsresistans	6
6.2 Mätning av impedans vid 50 Hz	7
6.3 Mätning av impedans vid andra frekvenser	7
7. Konsekvenser	13
8. Slutsatser	14

1. Bakgrund

Emicon har på uppdrag av Räddningsverket under många år studerat hur byggnadsarmering kan användas som elektromagnetisk skärm. Denna utgör ofta en del av skyddet mot störningar i exempelvis räddningscentraler. Störningarna kan härröra från exempelvis EMP från kärnladdningsexplosioner eller från åska.

På senare tid har en relativt omfattande teoretisk studie genomförts där skärmnings-effektivitetens beroende av armeringens uppbyggnad studerats. En kvarvarande osäkerhet är bristen på kunskap om armeringens materialegenskaper. De ur skärmningssynpunkt viktiga egenskaperna är materialets elektriska ledningsförmåga och permeabilitet.

Dessa egenskaper har nu mätts och resultaten redovisas nedan.

2. Provobjekt

Armeringsjärn typ Ks600ST och typ B 500BT, ϕ 20 mm.

3. Provpersonal

Mätningarna genomfördes av Torbjörn Karlsson och Sven Garmland, Emicon AB, Lund.
Rapport: Sven Garmland.

4. Provtid

Mätningarna genomfördes under våren 2003.

5. Mätningens genomförande

Någon vedertagen metod att mäta permeabilitet finns egentligen inte, varför en rad olika försök genomfördes för att finna en framkomlig väg. En försvårande omständighet var att inträngningsdjupet i materialet är relativt litet. Eftersom inträngningsdjupet minskar med ökande frekvens, resulterade detta i att mätningarna nödvändigtvis måste genomföras på mycket låg frekvens, för att säkerställa att ström flyter i hela materialet. Svårigheten med det är att magnetiska effekter såsom inverkan av induktans blir mycket små när frekvensen är låg och det blir svårt att åstadkomma tillräckligt låg resistans i uppkopplingarna. De induktiva effekterna drunknar därmed lätt i de resistiva.

Den metod som slutligen användes gick ut på att helt enkelt driva en ström genom ett 90 cm långt armeringsjärn och mäta spänningsfallet över järnet. Genom att variera strömmens frekvens kan den erhållna induktansen beräknas. I och med att induktansen beror på materialets permeabilitet kan man därefter även beräkna denna.

Vid likström, det vill säga då frekvensen är noll, erhålles järnets resistans. Är resistansen känd kan materialets ledningsförmåga enkelt beräknas:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$
$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

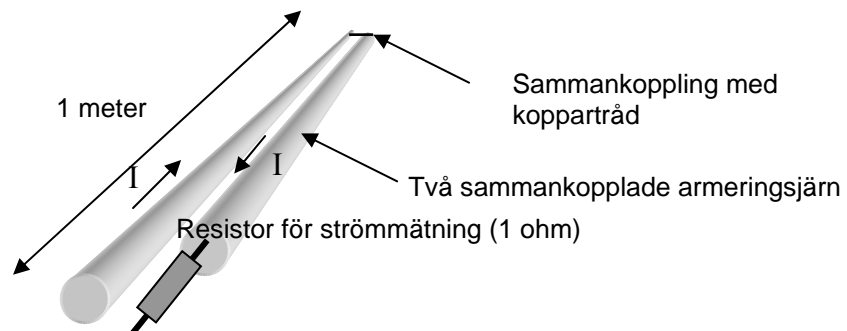
där ρ och σ är materialets resistivitet respektive ledningsförmåga och l och A är längden respektive tvärsnittsarean

Huvuddelen av mätningarna genomfördes på armeringsstål typ Ks600ST, men jämförande mätningar gjordes även på armeringsstål typ B 500BT. Någon signifikant skillnad mellan de två typerna kunde inte detekteras.

6. Mätuppställningar

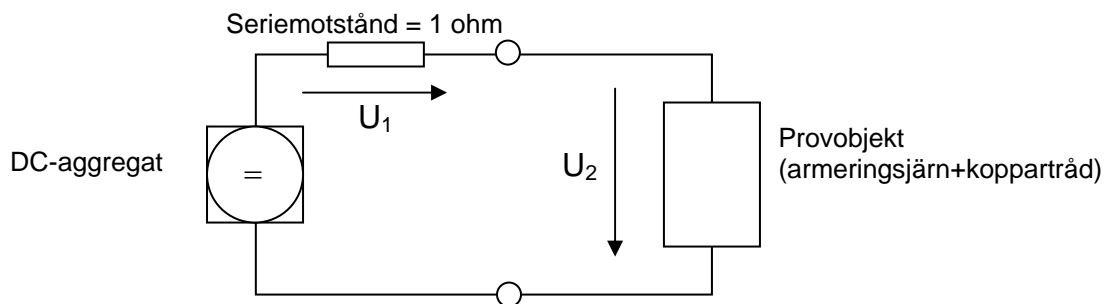
6.1 Mätning av likströmsresistans

Mätning av järnets ledningsförmåga gjordes genom att driva en likström genom två seriekopplade armeringsjärn med längderna 1,0 respektive 0,9 meter. Sammankopplingen gjordes med hjälp av en 35 mm lång koppartråd, ϕ 2 mm, vars resistans kunde beräknas och uppmätas till $0,2 \text{ m}\Omega$.



Figur 1. Provobjekt

Vid mätningen användes strömmen $I=1,3 \text{ A}$. Spänningen U_2 mättes, dels över vardera armeringsjärn och dels över den sammankopplande koppartråden, med universalinstrument såväl som med analog mV-meter.



Figur 2. Uppkoppling för mätning av likströmsresistans

$$U_{2 \text{ järn } 1 (1\text{m})} = 0,8 \text{ mV}$$

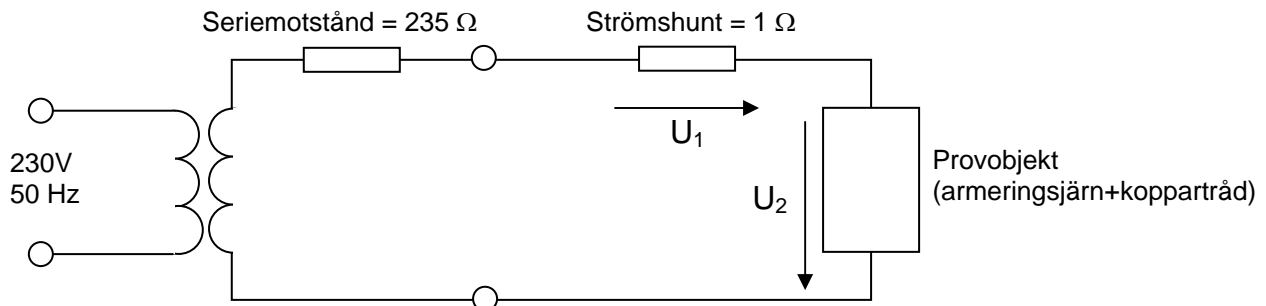
$$U_{2 \text{ järn } 2 (0,9\text{m})} = 0,7 \text{ mV}$$

$$U_{2 \text{ koppartråd}} = 0,3 \text{ mV}$$

Detta motsvarar en resistans på $0,62 \text{ m}\Omega$ i 1-meters järnet och $0,54 \text{ m}\Omega$ i 90 cm-järnet. Ur dessa värden kan ledningsförmågan beräknas till $\sigma = 5 \text{ MS/m}$.

6.2 Mätning av impedans vid 50 Hz

På motsvarande sätt mättes impedansen i kretsen vid frekvensen 50 Hz. Matningen åstadkoms då med hjälp av en transformator ansluten till elnätet.



Figur 3. Uppkoppling för mätning av impedans vid 50 Hz.

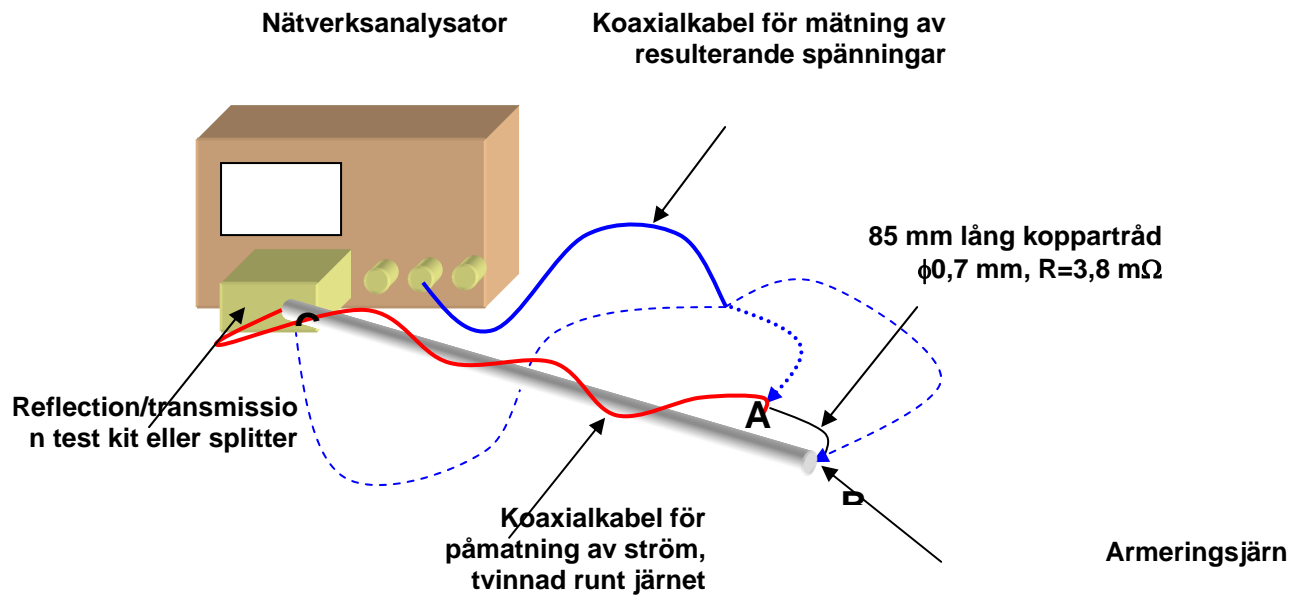
Mätningen gjordes med nätverksanalysator så att U_1 kopplades till referenskanalen och U_2 till testkanalen. Mätningen gjordes i nätverksmode, vilket resulterar i kvoten mellan de två signalerna. Eftersom U_1 är spänningen över 1 Ω är det också detsamma som strömmen i kretsen. Förhållandet mellan spänningarna är alltså impedansen i provobjektet. Strömmen i kretsen var vid mätningen 85 mA.

U_2 mätt över 1-metersjärnet gav amplituden 1,58 mV och fasvinkeln 35 grader. Realdelen var -1,37 mV och imaginärdelen -0,8 mV.

6.3 Mätning av impedans vid andra frekvenser

Motsvarande koppling utnyttjades även för mätning av järnets impedans vid andra frekvenser. Härvid användes nätverksanalysatorns generator som signalkälla. Det visade sig dock att bättre noggrannhet erhöles när mätkretsen bestod av enbart ett järn.

Järnets ena ände jordades därvid direkt i generatorns utgångskontakt. Strömmatningen skapades genom att en till generatorn ansluten koaxialkabel lindades runt järnet och ansluts till dess andra ände via en resistiv strömshunt. Strömshunten bestod av en 85 mm lång koppartråd, ϕ 0,7 mm. Resistansen i denna var 3,8 mV.

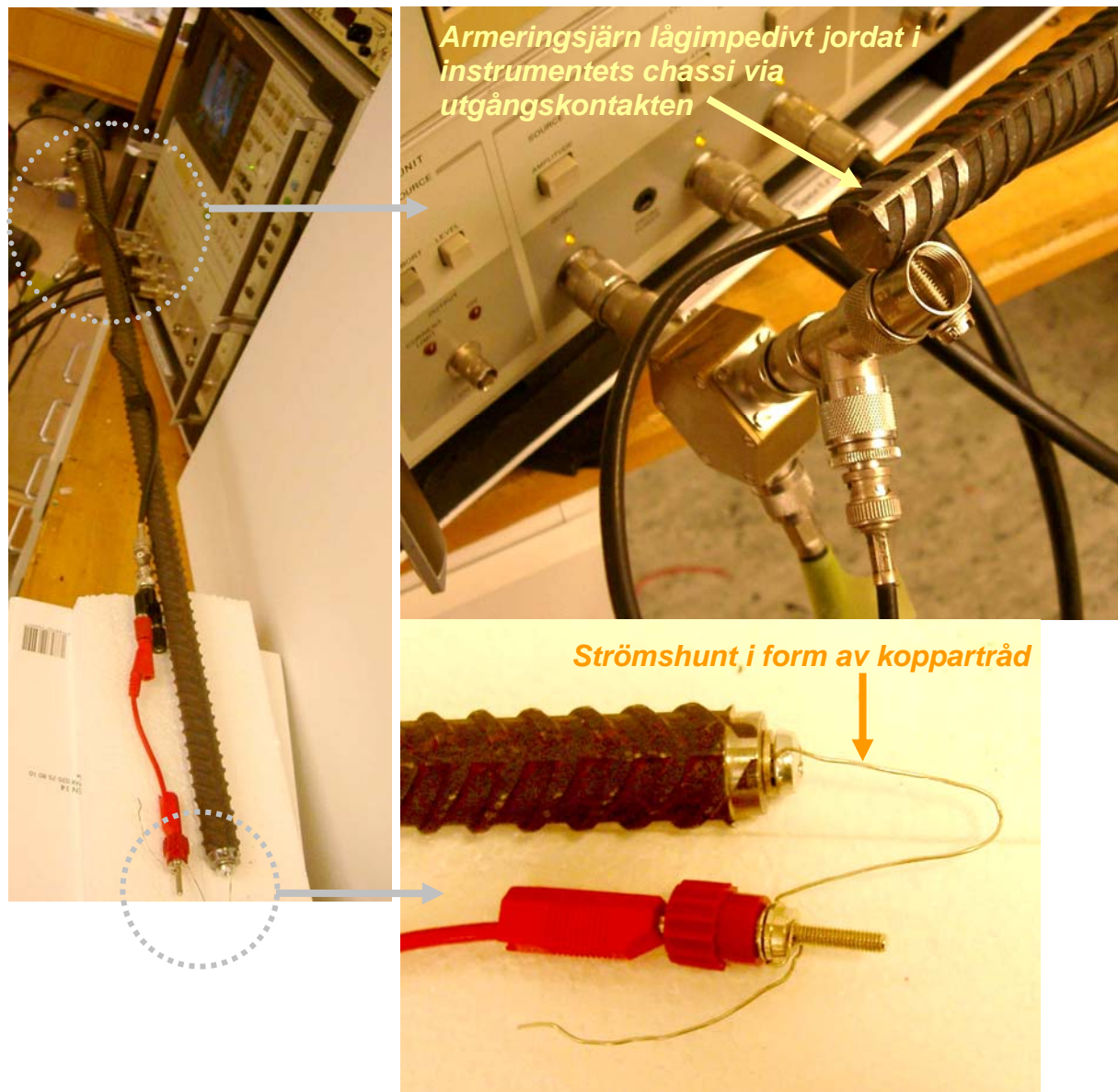


Figur 4. Uppkoppling för mätning av impedans vid andra frekvenser.

Spänningen mäts i 3 punkter, på ömse sidor om strömshunten (A och B) och i jordpunkten (C), där järnet anslutits till utgångskontaktens jordsida. Det kan tyckas märkligt att spänningen i punkt C inte är noll, eftersom detta är jordpunkten, men impedansnivåerna är så låga att instrumentets interna jordimpedans inverkar betydligt. Impedansen i järnet kan bestämmas enligt formeln:

$$Z = \frac{U_B - U_C}{U_A - U_B} \cdot Z_{shunt}, \text{ där } U_x \text{ är spänningarna i respektive punkt och } Z_{shunt} \text{ är strömshuntens}$$

impedans, som vid låga frekvenser är 3,8 m Ω , men även har en induktiv komponent.



Figur 5. Armeringsjärn uppkopplat för impedansmätning med nätverksanalysator

Utgående från impedansen kan materialets egenskaper bestämmas. Så länge objektet är mycket mindre än våglängden hos strömmen utgörs impedansen av resistans och induktans.

Vid likström, när frekvensen är noll bidrar inte induktansen alls, utan impedansen är identiskt lika med resistansen. Resistansen är i sin tur omvänt proportionell mot materialets ledningsförmåga.

Induktansen består av två delar, den inre och den yttre induktansen. Den inre bestäms helt av materialet och dess geometriska dimensioner. Den yttre induktansen bestäms av hela kretsens uppkoppling, där exempelvis avståndet till andra ledande föremål, såsom återledare, är av avgörande betydelse. Eftersom vi är intresserade av materialets egenskaper är det den inre induktansen som måste bestämmas. Anledningen till att matningskabeln tvinnades runt järnet var att hålla den yttre induktansen så låg som möjligt för att lättare kunna särskilja den inre induktansen.

Den inre impedansen för en tråd med cirkulärt tvärsnitt kan uttryckas:

$$Z_i = \frac{l}{\pi a^2 \sigma} \frac{ka}{2} \frac{J_0(ka)}{J_1(ka)}$$

där

$$k = \sqrt{-j\mu_r\mu_0\sigma 2\pi f}$$

j = imaginär enhet = $\sqrt{-1}$
 f = frekvens
 μ_r = relativa permeabilitetskonstanten
 σ = ledningsförmågan
 a = trådradie
 l = trådlängd
 J_0 och J_1 = Besselfunktioner

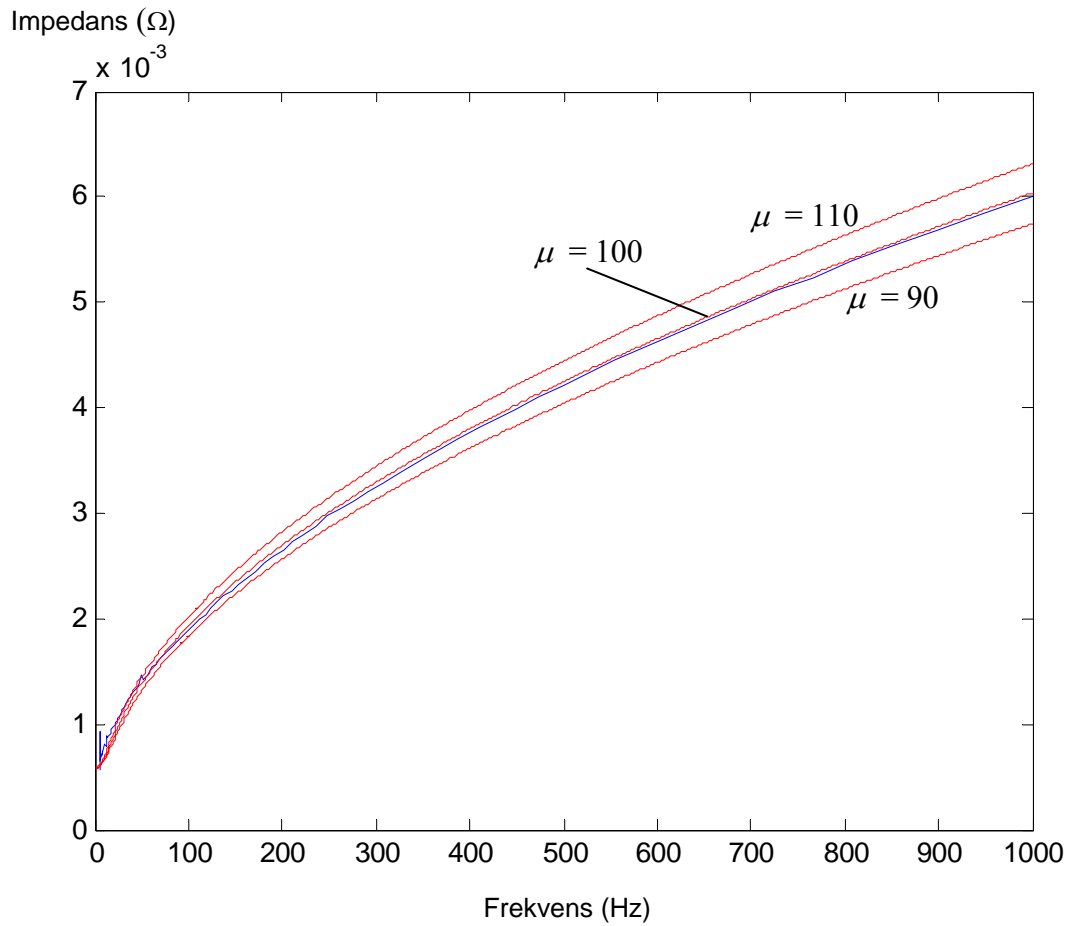
Allting är känt utom ledningsförmågan och relativa permeabiliteten. Ledningsförmågan kan bestämmas då frekvensen är noll varefter endast permeabiliteten är okänd.

Denna kan då bestämmas genom att jämföra uppmätt impedans med impedans beräknad enligt formeln ovan för olika värden på μ_r .

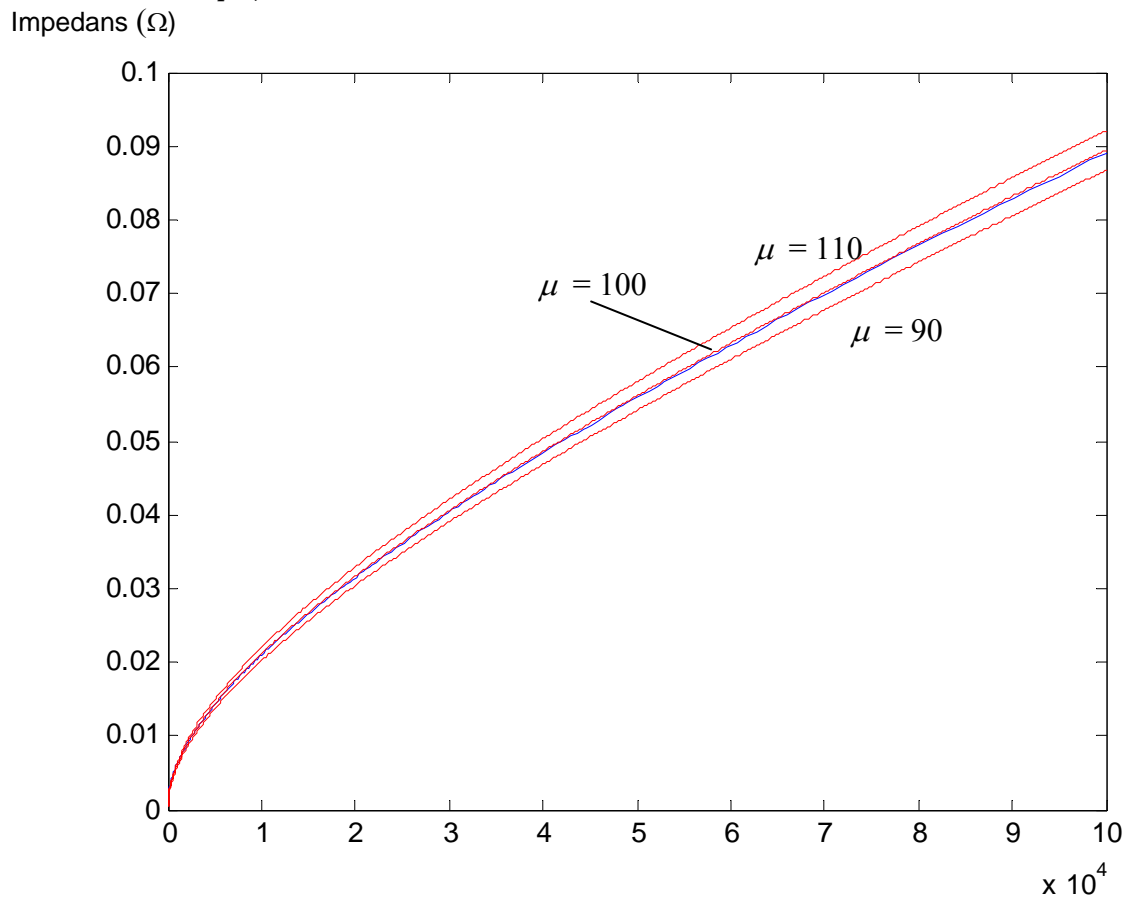
Svårigheten i sammanhanget är att man inte utan vidare kan särskilja den inre och den yttre impedansen. För låga frekvenser är den inre impedansen dominerande. När frekvensen stiger minskar inträngningsdjupet, strömmen går alltmer i ytan på järnet ju högre frekvensen blir. Detta medför att impedansen ökar proportionellt mot \sqrt{f} och kurvan böjer av och lutar allt mindre. (Inre induktansen avtar proportionellt med $\frac{1}{\sqrt{f}}$ och resistansen ökar proportionellt med \sqrt{f})

När frekvensen stiger kommer den yttre impedansen att bli helt dominerande eftersom den ger en impedans som är proportionell med frekvensen. Kurvan fortsätter att öka proportionellt med frekvensen och får konstant lutning. Detta fortgår så länge uppkopplingen är liten i förhållande till våglängden.

I figur 6 nedan visas uppmätt impedans jämförd med den inre impedansen beräknad enligt formeln ovan, $\mu_r = 90, 100$ och 110 . I figur 7 visas samma sak men för högre frekvenser. Här har även den yttre induktansen simulerats.



Figur 6. Uppmätt impedans i armeringsjärn (blå kurva) jämfört med teoretisk inre impedans beräknad med olika värden på μ_r .



Frekvens (Hz)

Figur 7. Uppmätt impedans i armeringsjärn (blå kurva) jämfört med teoretisk impedans, inklusive både inre och yttre induktans, beräknad med olika värden på μ_r .

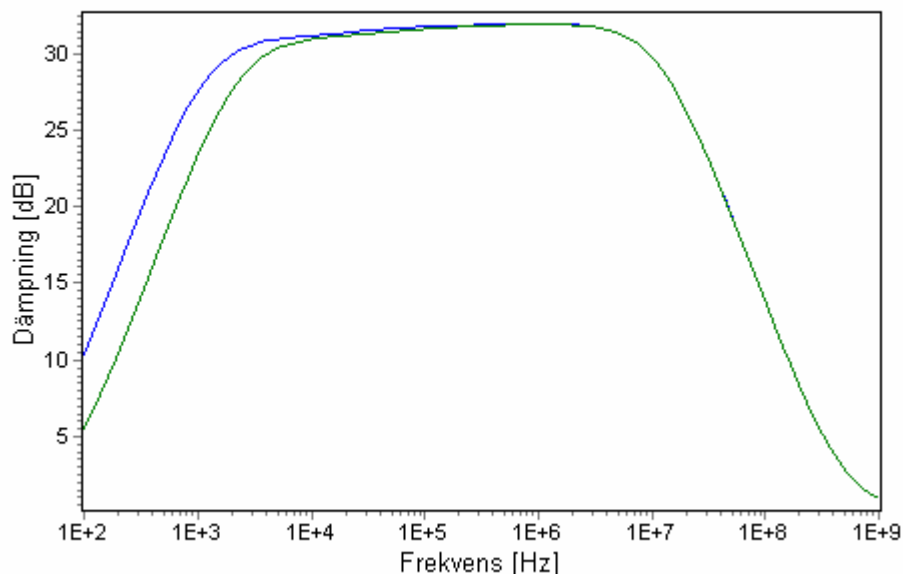
Motsvarande mätningar som presenterats ovan har även genomförts på två andra armeringsjärn, det ena av samma typ, Ks600ST, och det andra av typen B 500BT. Ingen signifikant skillnad kunde dock konstateras.

Mätresultaten ovan kan sammanfattas med följande värden på armeringsjärnets ledningsförmåga och relativ permeabilitet:

Ledningsförmåga:	$\sigma = 5 \text{ MS/m}$
Relativ permeabilitetskonstant:	$\mu_r = 100$

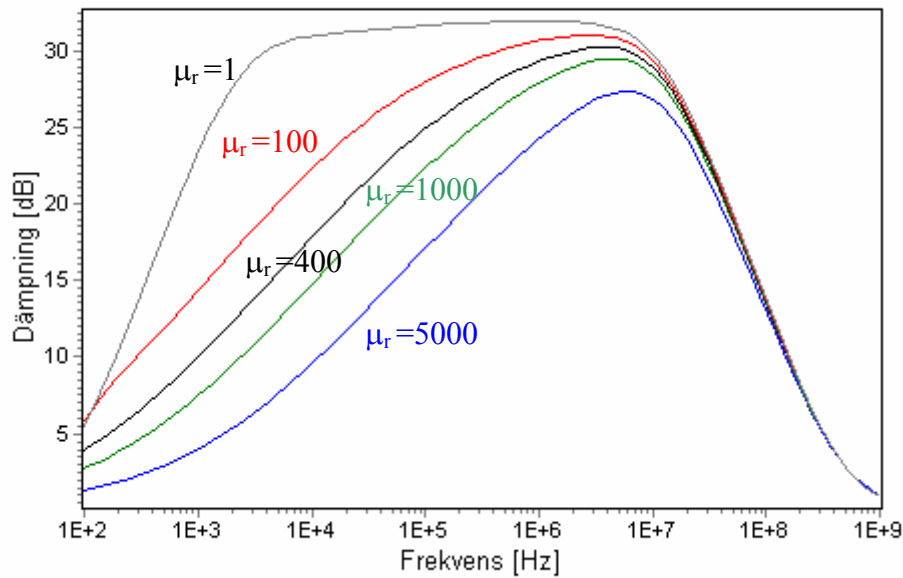
7. Konsekvenser

Ett vanligt använt värde på ledningsförmåga hos rent järn är 10,3 MS/m. Detta är dubbelt så högt som det nu erhållna resultatet för armeringsstålet och ger en bättre skärmning. I figur 8 nedan visas beräknad skärmning i en nätbur med måtten 20m×10m×10m (l×b×h), 150 mm maskstorlek och $\phi 12$ mm för de två fallen. Vi kan konstatera att för låga frekvenser blir dämpningen ungefär hälften så hög (-6 dB) med den lägre ledningsförmågan. Frekvenser över ca 10 kHz påverkas ej.



Figur 8. Dämpning i bur med $\sigma = 10,3$ MS/m (blå kurva) och $\sigma = 5$ MS/m (grön kurva)

Dämpningsberäkning har även genomförts på samma bur med varierande värde på relativa permeabilitetskonstanten. Stora osäkerheter har tidigare funnits angående armeringsjärns relativa permeabilitet. Vid beräkningar har värden på 400-1000 och ibland ännu högre ofta använts. Figur 9 nedan visar resultatet med några vanligt antagna värden på μ_r . Även en kurva för $\mu_r = 1$ är medtagen för att visa hur det skulle bli med helt omagnetiskt stål med samma ledningsförmåga. Vi kan konstatera att permeabilitetens betydelse är större än ledningsförmågans. Det nu erhållna värdet på μ_r ger bättre dämpning för frekvenser under ca 30 MHz.



Figur 9. Dämpning i bur med $\sigma = 5 \text{ MS/m}$ och några vanligt använda värden på μ_r

8. Slutsatser

Bestämningen av ledningsförmågan och relativa permeabilitetskonstanten hos armeringsjärn har visat på lägre värden än de som ofta antagits vid tidigare beräkningar. Konsekvenserna för detta är att ledningsförmågan ger en något sämre dämpning på riktigt låga frekvenser medan den lägre permeabiliteten ger en förbättrad dämpning på frekvenser upp till ca 30 MHz. Ur EMP-skyddssynpunkt är området under 10 kHz relativt ointressant och vi kan därför tolka de nya resultaten som att EMP-skärningen är något bättre än vad som tidigare beräknats med för höga värden på μ_r .

**Räddningsverket, 651 80 Karlstad
Telefon 054-13 50 00, telefax 054-13 56 00
Beställningsnummer T84-411/06
ISBN 91-7253-289-0**