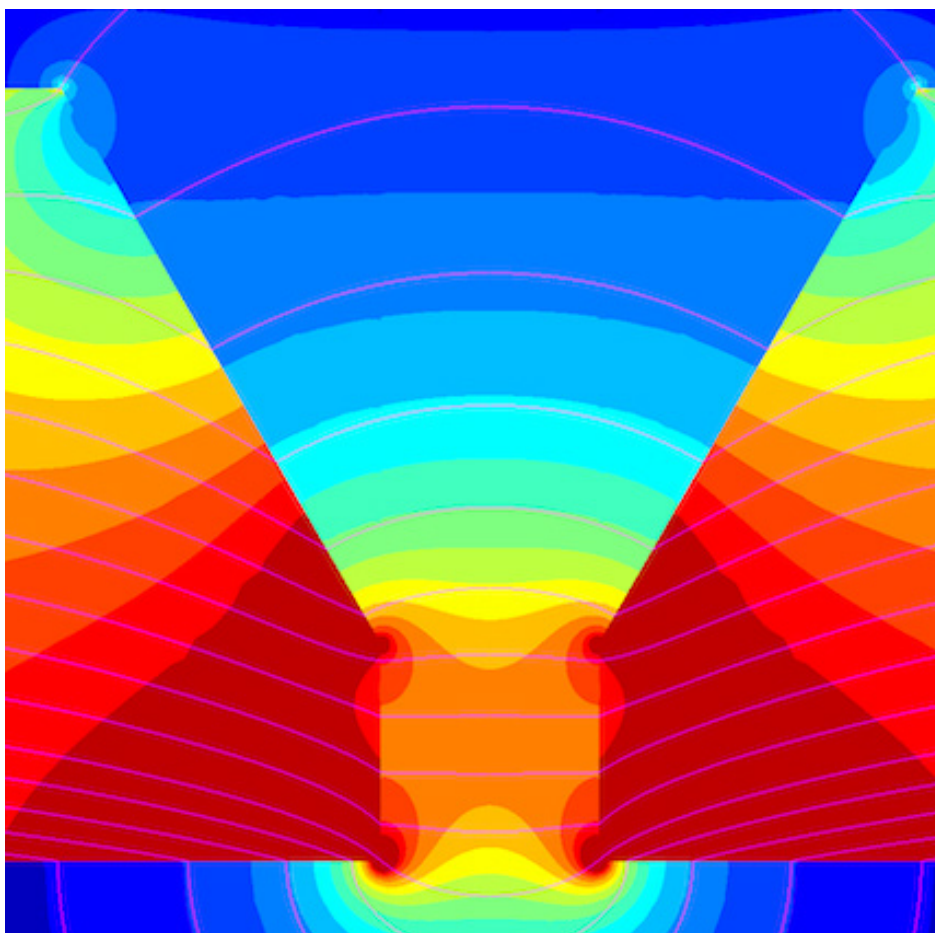


# SVETSBARHET AV FJÄRRVÄRMEAPPLIKATIONER

RAPPORT 2021:734





# Svetsbarhet av fjärrvärmeapplikationer

JOAR DRAXLER, LARS-ERIK STRIDH, JOEL ANDERSSON

ISBN 978-91-7673-734-7 | © Energiforsk mars 2021

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: [kontakt@energiforsk.se](mailto:kontakt@energiforsk.se) | [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)





## Förord

**Flera svenska fjärrvärmebolag har indikerat att de under de senaste åren upplever ett ökat problem att genomföra godkända svetsfogar vid svetsning av fjärrvärmerör. Inom projektet Svetsbarhet av fjärrvärmeapplikation utreds problematiken och dess orsaker och förslag på åtgärder presenteras.**

Projektet har letts och genomförts av Joel Andersson, Joar Draxler och Lars-Erik Stridh från Högskolan Väst.

En referensgrupp bestående av Magnus Ohlsson, Öresundskraft (sammanhållande); Martin Lindner, Tekniska Verken i Linköping; Anders Fransson, Göteborg Energi och Harald Svensson, E.ON har följt och kvalitetssäkrat projektet.

Projektet ingår i programmet Futureheat vars långsiktiga mål är att bidra till visionen om ett hållbart uppvärmningssystem med framgångsrika företag som utnyttjar nya tekniska möjligheter och där de samhällsinvesteringar som gjorts i fjärrvärme- och fjärrkyla tas till vara på bästa sätt. Detta projekt ingår i programmets andra etapp.

Programmet leds av en styrgrupp bestående av Jonas Cognell, Göteborg Energi (ordförande); Anders Moritz, Tekniska verken i Linköping; Anna Hinderson, Vattenfall AB; Charlotte Tengborg, E.ON Värme Sverige; Fabian Levihn, Stockholm Exergi; Holger Feurstein, Krafringen; Dan Bruhn, Jönköping Energi; Johan Brossberg, Borlänge Energi; Leif Bodinson, Söderenergi; Lena Olsson Ingvarson, Mölndal Energi; Magnus Ohlsson, Öresundskraft; Niklas Lindmark, Gävle Energi; Per Örvind, Eskilstuna Strängnäs Energi & Miljö; Petra Nilsson, Växjö Energi; Staffan Stymne, Norrenergi; Stefan Hjärtstam, Borås Energi och Miljö; Svante Carlsson, Skellefteå Kraft; Ulf Lindquist, Jämtkraft och Julia Kuylenstierna (adjungerande), Energiforsk.

Suppleanter utgörs av Ann Britt Larsson, Tekniska verken i Linköping; Patrik Grönbeck, Borlänge Energi och Peter Rosenkvist, Gävle Energi.



Julia Kuylenstierna, programansvarig FutureHeat

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

## Sammanfattning

**I denna rapport studeras restmagnetism i förisolerade fjärrvärmerör som kan leda till svårigheter då rören skall svetsas samman i fält, schakt eller på annan arbetsplats. Då restmagnetiseringen är stark nog kan den påverka svetsens ljusbåge, vilket kan leda till ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning. Detta gör ljusbågen svårkontrollerbar för svetsaren och kan därmed skapa svetsdefekter som bindfel, porositet och slagginneslutningar.**

I rapporten presenteras en numerisk beräkningsmodell som utvecklats för att studera magnetfält i och omkring stålrör. Modellen har kalibrerats mot flera magnetiska hysteres för P235GH, vilket är en vanligt förekommande stålsort till fjärrvärmerör. Modellen har använts för att undersöka styrkan som krävs hos ett externt magnetfält för att magnetisera ett fjärrvärmerör till en nivå som kan leda till ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning. Modellen har också använts för att beräkna förstärkningen som sker av magnetfältet i svetsspalten då två magnetiserade rör förs samman. Vidare har modellen använts för att undersöka graden av restmagnetism som kan uppstå i ett fjärrvärmerör på grund av jordens och elkraftledningars magnetfält. Beroendet av magnetfältets styrka i svetsspalten på variationer i rördimensioner och spaltgeometri har också simulerats.

Vidare presenteras en mätmetod för att snabbt och robust mäta magnetfältet vid rörändar och i svetsspalter mellan fjärrvärmerör. Metoden har använts för att mäta restmagnetismen i DN600, DN400 och DN300 rör. Mätningar har också utförts för att undersöka om restmagnetism kan uppstå på grund av rörisoleringsprocessen och sammansvetsningen av fjärrvärmerör. För de DN250 och DN150 rör som undersöktes hade båda dessa processer liten inverkan på restmagnetismen.

En försöksuppställning som utvecklats för att undersöka tröskelvärden för nivån av restmagnetism som krävs för att orsaka ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning presenteras också i rapporten. Med denna uppställning visades ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning uppstå i DN150 rör när restmagnetiseringen uppgick till ungefär 20 respektive 40 Gauss.

I rapporten presenteras en undersökning som visar att det finns stålverk i Europa (tillverkare av bland annat stålrör till fjärrvärmerör) som använder oförstörande provningsmetoder som kan ge upphov till stark restmagnetism. När sådana metoder används måste rören avmagnetiseras efteråt. Dock har det visat sig att de godkända nivåerna som det avmagnetiseras till är för höga för att helt kunna utesluta att ljusbågsavlänkning kan uppstå. För att åtgärda detta kommer en sänkning av den maximalt tillåtna nivån på restmagnetismen i den tekniska bestämmelsen D:211 att utföras. Förhoppningen är att detta kan leda till att stålverk avmagnetiserar till lägre nivåer än dagens nivåer, och att därmed problemen med restmagnetism i fjärrvärmerör kan minskas. Förändringsarbete med den tekniska bestämmelsen D:211 kommer att utföras i ett fortsättningsprojekt.

## Summary

**This report studies residual magnetism in pre-insulated district heating pipes that can lead to difficulties when the pipes are to be welded together at a field, shaft or other workplace. When the residual magnetization is strong enough, it can affect the arc of the weld, which can lead to arc instability and arc deflection. This makes the arc difficult to control for the welder and can thus create welding defects such as bonding errors, porosity and slag inclusions.**

The report presents a numerical model developed to study magnetic fields in and around steel pipes. The model has been calibrated against several magnetic hysteresis for P235GH, which is a common steel grade for district heating pipes. The model has been used to investigate the strength required of an external magnetic field to magnetize a district heating pipe to a level that can lead to arc instability and arc deflection. The model has also been used to calculate the amplification that takes place of the magnetic field in the weld groove when two magnetized pipes are brought together. Furthermore, the model has been used to investigate the degree of residual magnetism that can form in a district heating pipe due to the earth's and electric power lines' magnetic fields. The dependence of the magnetic field strength in the weld groove on variations in pipe dimensions and gap geometry has also been simulated.

Furthermore, a measuring method is presented for quickly and robustly measuring the magnetic field at pipe ends and in welding grooves between district heating pipes. The method has been used to measure the residual magnetism in DN600, DN400 and DN300 pipes. Measurements have also been done to investigate whether residual magnetism can form in district heating pipes due to the pipe insulation process and from the joining process by welding. For the DN250 and DN150 pipes examined, both processes had little effect on the residual magnetism.

An experimental set-up developed to investigate threshold values for the level of residual magnetism required to cause arc instability and arc deflection is also presented in the report. With this setup, arc instability and arc deflection were shown to occur in DN150 pipes when the residual magnetization reached to approximately 20 and 40 Gauss, respectively.

The report presents a study that shows that there are steel mills in Europe (manufacturers of, among other things, steel pipes for district heating pipes) that use non-destructive testing methods that can give rise to strong residual magnetism. When such methods are used, the pipes must be demagnetized afterwards. However, it has been shown that the approved levels to which it is demagnetized are too high to completely rule out that arc deflection can occur. To remedy this, a reduction of the maximum permissible level of residual magnetism in the technical regulation D: 211 will be carried out. The hope is that this can lead to steel mills demagnetizing to lower levels than current levels, and that the problems with residual magnetism in district heating pipes can thus be reduced. Modification work with the technical regulation D: 211 will be carried out in a continuation project.

## Summary (extended)

In this research project, the residual magnetism in pipes for district heating is studied. This can lead to difficulties when the pipes are welded together. When the residual magnetism is strong enough, it can interact with the electrical arc created by welding, which can result in arc instability and deflection of the arc. For the operator, this makes the welding difficult to control and can therefore create welding defects like lack of fusion, porosity and slag inclusions.

The report presents a numerical model, developed to study magnetic fields in, and around steel pipes. The model has been used to investigate the strength needed from an external magnetic field, in order to magnetise a pipe aimed for district heating, to a level that will result in arc instability and arc deflection. The model has also been used to calculate the reinforcement that occurs in the weld joint, when two magnetised pipes are brought together for welding. Figure 1 shows the field lines when the pipes have been joined to the proper root gap, 2 mm. As can be seen, the magnetic field is strongest at the corners of the root face.

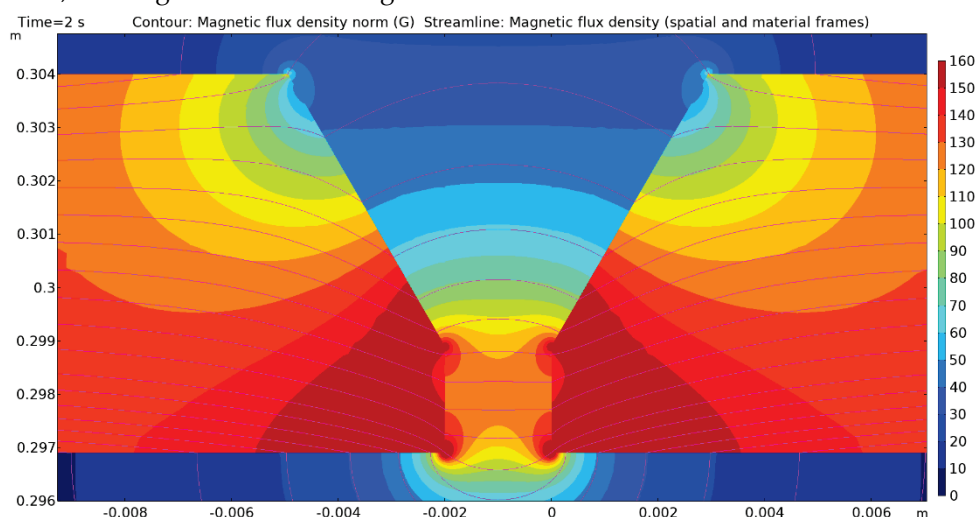
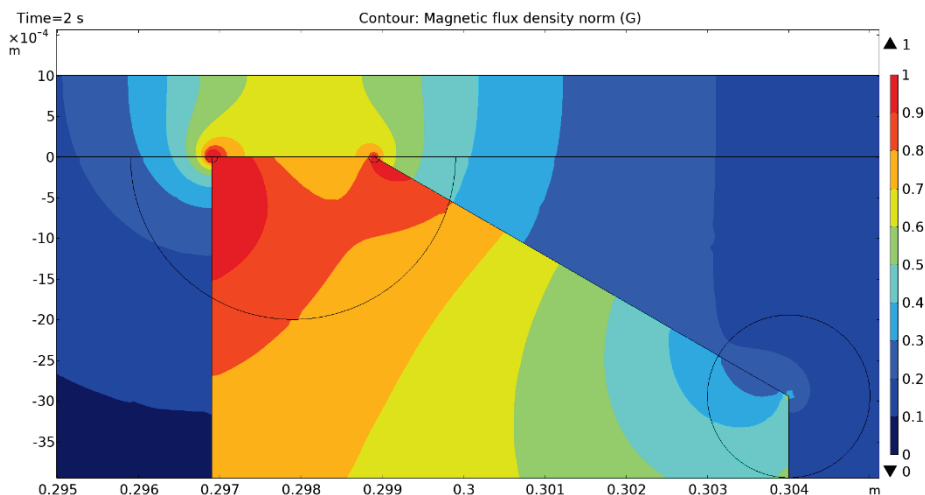


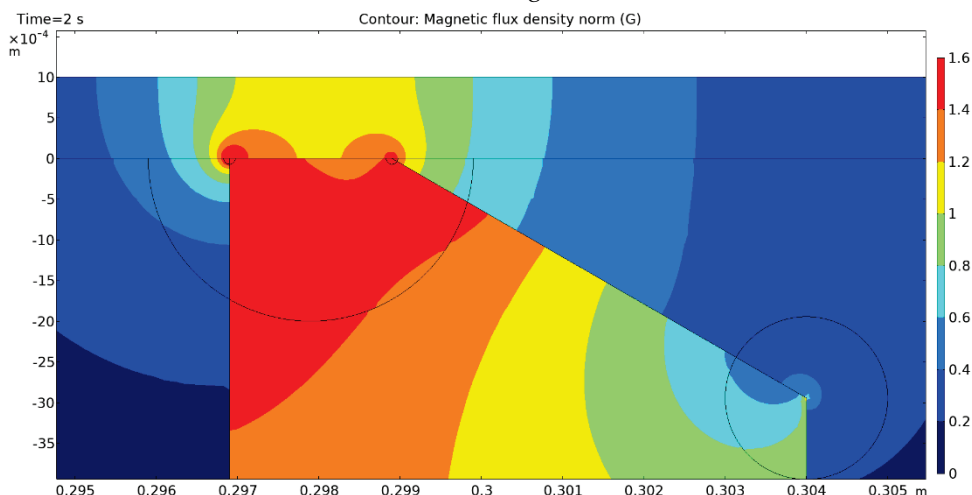
Figure 1. Contour plot and streamlines of the calculated magnetic field at weld groove.

Further on, the model has been used to investigate the degree of residual magnetism that can occur in a pipe for district heating due to the earth's magnetic field and the magnetic field around airborne electrical conduits. The model shows that if the pipe is oriented perpendicularly to the earth's meridian lines, then turned to align with the lines and then back to perpendicular again, the maximum strength in the root opening can reach just below 1 Gauss. Figure 2 below illustrates this result. Results from welding trials show that at the level of approximately 20 Gauss in the root opening, the operator starts to realise the influence of the magnetic field. It is still possible to handle but below this level it is no problem. Thus the magnetization from the earth's magnetic field should not influence the arc.



**Figure 2.** Contour plot of the computed magnetic field at the weld groove of a pipe that has been magnetized by the earth's magnetic field.

In the same way it has been investigated if airborne electrical conduits could result in residual magnetism in the pipes, when transported or parked underneath. The model is not really aimed for this purpose as the magnetic field from a high voltage line is time varying, in addition there is a time varying electrical field around the line, all of which our model does not take into consideration. Nevertheless, we have run simulations with a uniform background field, based on maximum current consumption during the month of February. This results in a maximum magnetic field of 1,5 Gauss in the root opening. This is far below any interference of the arc. This can be seen in Figure 3 below.



**Figure 3.** Contour plot of the computed magnetic field at the weld groove of a pipe that has been magnetized by a magnetic field from high power airborne electrical conduits.

The magnetic fields dependence of dimensional variations from the pipe and the joint geometry has also been investigate; the results from this can be found in chapter 3.6.

In order to measure the magnetic field at the pipe ends and in the weld joint, a robust method must be used due to high gradients in the magnetic field. For this

purpose, a stable and exact stand was designed and produced to hold the probe for the magnetic field meter (Magmeter MF300H+). The probe holder can be adjusted in height with the accuracy of a hundred of a mm, verified by a Mitutoyo micrometre built into the stand. The instrument can be seen in Figure 4 below.

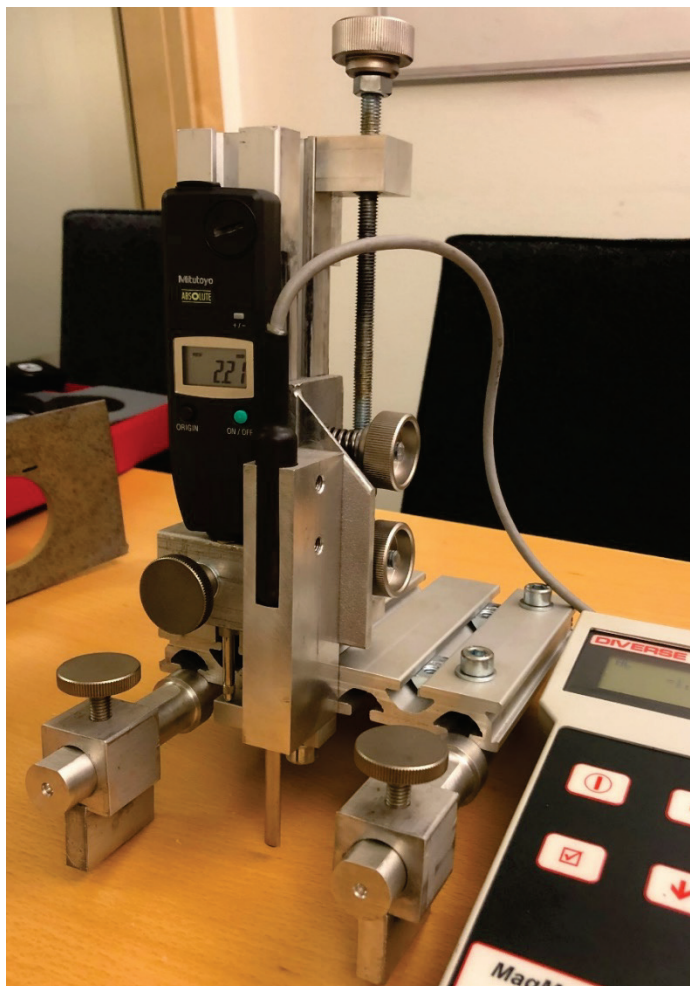


Figure 4. Probe holder.

Practical trials were developed to investigate the threshold values for the residual magnetism, in order to find the values, it takes to cause arc instability and arc deflection. This is presented in chapters 4.2 and 5.3. In Figure 5 below, the weld trial set up is shown. In the trials, we welded on DN150 pipes, residual magnetism of 0, 20, 30 and 40 Gauss were tested, results are also found in the report.



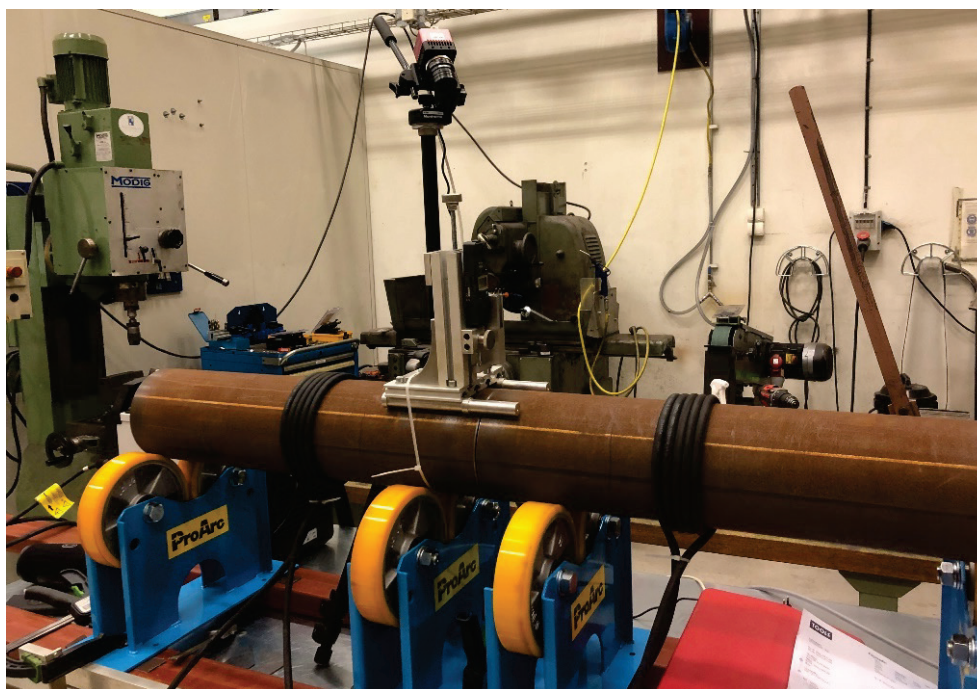


Figure 5. Weld trial set up.

In short, we used two spools around each pipe, these were fed with direct current from a power source (EWM Degauss 600), the current (Amp) was adjusted till the desired level of magnetism in the joint was reached. The magnetic field in the joint, created with this method only has very small variations in the circular direction; maximum variation of  $B_z$  in circular direction was only one or two Gauss when the magnetisation was between 5 – 100 Gauss. The created magnetic field had no time dependency: as soon as the magnetic field had been adjusted to a given level, that level was kept constant for more than 10 min (which were the control time) without having to adjust the current in the spools.

The process of insulating the pipes was also investigated by a visit to a district pipe insulating company. In this specific case five different DN250 pipes were tested by using the probe stand described earlier. The magnetic field were checked before the insulation process and after. Each pipe was carefully marked so we could assure that we made the measurements on the exact same pipes after the insulation process. The difference in the magnetic field before and after insulation for all five pipes were all within +/- 3 Gauss for both ends of the pipes. The conclusion of this is that the insulation process is not inducing any large magnetic field to the pipes.

Magnetisation as a result of welding has also been under discussion as the cause of creating residual magnetism. To investigate this, two 700 mm long DN 150 pipes were welded together. First the root run, then after cooling to room temperature, the magnetic field was measured at four location in each end of the pipes. Then the final run was made and again after cooling to room temperature, measurement of the magnetic field as done in exact the same spots. The result was that it varied only between 1- 2 Gauss, conclusion is that the welding process is not causing any magnetic fields.

This research project has clearly shown that residual magnetism is an issue that needs to be considered in a more serious way than it has been before. Looking at standards, very little can be found regarding recommendations and regulations of the residual magnetism. From the viewpoint of the pipe producers there is no standard to follow regarding the levels of residual magnetism. This is something that is the task of standardisation organs to take a deeper look into and possibly introduce in the standards for pipe production. There are equipment's available on the market to be used in pipe production with the aim to reduce magnetism to a specific level.

Future work within this research project is most certainly to do more practical experiments for pipes of different diameters and wall thicknesses to find their threshold values for residual magnetism that will cause welding problems.



# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>13</b>
1.1	Rapportens uppbyggnad	13
1.2	Bakgrund	14
1.3	Svetsning av fjärrvärmeapplikationer	14
1.4	Ljusbågsinstabilitet och Ljusbågsavlänkning	15
1.5	Restmagnetism	16
1.6	Stålrörstillverkning	17
1.6.1	Tillverkningsprocess	17
1.6.2	Svetsmetoder	19
1.6.3	Restmagnetism från rörtillverkningen	19
<b>2</b>	<b>Numerisk simulering</b>	<b>20</b>
2.1	Magnetostatik	20
2.2	Randvillkor	21
2.3	Bakgrundsfält	21
2.4	Konstitutivt samband	22
2.4.1	Kalibrering av numerisk modell	23
2.5	Finit element modell	28
2.5.1	Magnetisering	29
2.5.2	Sammanförning av två magnetiserade rör	30
2.5.3	Konvergensstudie	31
<b>3</b>	<b>Resultat från numerisk simulering</b>	<b>33</b>
3.1	Magnetfältslinjer	33
3.2	Ljusbågsavlänkning	34
3.3	Ljusbågsinstabilitet	36
3.4	Jordens magnetfält	36
3.5	Elkraftledning	38
3.6	Rördimension och spaltgeometri	39
3.6.1	Rörlängd	39
3.6.2	Rördiameter	40
3.6.3	Rätkant	41
3.6.4	Godstjocklek	41
3.6.5	Fogvinkel	42
3.6.6	Spaltbredd	42
3.7	Sammanfattning av resultat	43
<b>4</b>	<b>Experimentell utrustning och försökupställning</b>	<b>44</b>
4.1	Mätning av magnetfält	44
4.2	Försökupställning för undersökning av ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning	46
<b>5</b>	<b>Experimentella resultat</b>	<b>49</b>

5.1	Magnetfältsmätningar	49
5.1.1	DN600 rör	49
5.1.2	DN400 rör	50
5.1.3	DN300 rör	51
5.1.4	$B_{\vartheta}$ -komposant	52
5.2	Isoleringsprocessens inverkan på magnetiseringen	52
5.3	Tröskelvärden för ljusbågsavlänkning	52
5.3.1	Bedömning utifrån svetsaren	52
5.3.2	Bedömning utifrån filmad ljusbåge	53
5.3.3	Bedömning utifrån ström- och spänningslogg	53
5.4	Magnetisering på grund av svetsning	54
5.5	Sammanfattning av resultat	55
<b>6</b>	<b>Magnetisering hos stålrorstillverkare</b>	<b>56</b>
6.1	Magnetiserade oförstörande provning	56
6.2	Undersökning av Magnetisering hos stålrorstillverkare	56
<b>7</b>	<b>Åtgärdsförslag</b>	<b>59</b>
7.1	Ändring av teknisk bestämmelse	59
7.2	Magnetfältsmätning hos fjärrvärmerörstillverkare	59
7.3	Svetsning av rotsträngen med växelström	60
7.4	Användning av avmagnetiseringsutrustning	60
<b>8</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>61</b>
<b>9</b>	<b>Fortsatt arbete</b>	<b>63</b>
<b>10</b>	<b>Tack</b>	<b>66</b>
<b>11</b>	<b>Bilaga A</b>	<b>67</b>
11.1	Svar från stålverk 1	67
11.2	Svar från stålverk 2	68
11.3	Svar från stålverk 3	69
<b>12</b>	<b>Referenser</b>	<b>70</b>

# 1 Inledning

Metoden att genom smältsvetsning sammanfoga rörlängder till rörledningar har funnits mycket länge. Till en början var gassvetsningen, användandet av syrgas och acetylen, för att smälta fogytorna och ett tillsatsmaterial den förhärskande metoden. Men när den belagda elektroden utvecklades för elektrisk ljusbågssvetsning (1904), har man övergått till denna metod. Först användes växelström vid svetsning med belagda elektroder och härvid har man inga problem med magnetiska störningar på ljusbågen. Under senare delen av 1900-talet övergick man mer och mer till att svetsa med likström och idag sker i princip all svetsning med likström.

I och med denna övergång till likström fås ett magnetfält runt ljusbågen som till skillnad från magnetfältet runt en växelströmsljusbåge, inte byter riktning 50 ggr/sek (då frekvensen är 50 Hz), utan hela tiden har samma riktning. Det innebär att om restmagnetism finns i grundmaterial som skall skarvsvetsas kommer det ge en koncentration av fältlinjerna över svetsfogens rätkant, vilken kan bli så starkt att ljusbågen avlänkas och blir ostabil.

## 1.1 RAPPORTENS UPPBYGGNAD

Initialt beskrivs problemen och bakgrunden med ljusbågsinstabilitet och avlänkning och de konsekvenser det får för kvalitet och operatören. Möjliga orsaker till restmagnetismen i rör diskuteras och de två huvudkoncepten för tillverkning av rör beskrivs, möjliga orsaker till att restmagnetism induceras i rören vid de två metoderna lyfts fram. Svetsmetoderna har en betydelse och dessa beskrivs och diskuteras.

Den numeriska simuleringen vilken utvecklats för projektet redovisas i detalj med alla villkor, formler och modeller. Hur kalibrering mot experimentella data gått till förklaras noggrant. Detta simuleringsverktyg används i rapporten för att undersöka externa faktorer vilka varit diskuterade som orsaker till restmagnetismen, och redovisas. Även fysiska skillnader i rörens dimensioner och fogutformningen evalueras i simuleringsverktyget

Praktiska försök och undersökningar har utförts och redovisas i tabeller, bilder med förklaringar. Alla de processer rören utsätts för efter att de tillverkats har undersökts. Rörtillverkare har inte besökts men de har tillsänts ett frågeformulär och deras svar redovisas i rapporten.

Slutligen diskuteras olika åtgärdsförslag för att minimera problemen med ljusbågsavlänkning och instabiliteten plus att våra slutsatser redovisas med förslag på fortsatt arbete vilket inkluderar undersökning hos rörtillverkarna och större rördimensioner och godstjocklekar.

## 1.2 BAKGRUND

Den avlänkning och ostabilitet som beskrivs i inledningen, kan leda till att svetsoperatören inte klarar att kompensera för detta och det leder till svetsdefekter. De defekter vi kan råka ut för är bindfel, slaggineslutningar och smältdiken. Ett bindfel uppstår då ljusbågen avlänkas så att den inte smälter upp fogytan utan det smälta svetsgodset från elektroden bara lägger sig på ytan utan att metalliskt förenas med grundmaterialet. Under ett sådant fel finns ingen hållfasthet. En slaggineslutning kan uppkomma då den lättflytande slaggen, vilken bildas av elektrodens hölje, på grund av att ljusbågen blir ostabil, fladdrar, kan flyta in under smältan och fångas mellan smältan och grundmaterialet. Här fås heller ingen bindning mellan svetsgoods och grundmaterial. Ett smältdike är precis vad det låter som, ett dike, i övergångszonen mellan grundmaterial och svetsgoods. Det kan vara någon mm brett och lika djupt, det måste slipas ur och repareras annars uppstår en defekt då nästa sträng kommer över diket.

Men inga av dessa problem skulle uppstått om rören inte haft en restmagnetism. Det här fenomenet eller problemet är något som har ökat under de senaste 5 – 10 åren och frågan är varför. Det har ju inget att göra med elektroden (tillsatsmaterialet) i sig, det har inte förändrats på något sätt. Det har förmodligen inte heller något att göra med strömkällorna, även om dessa har genomgått en dramatisk förändring de senaste 20 åren, då de gått från svetsomformare via likriktare med diodbrygga till omformare med transistorlikriktare och idag helt elektroniska strömkällor.

Det som möjligen har förändrats är sätten som provningen görs på rören vid tillverkningen, idag används ofta magnetpulverprovning eller virvelströmsprovning. Båda dessa metoder kräver att rören avmagnetiseras efter provningen. Problemet är att standarder och normer inte specificerar till vilken grad de skall avmagnetiseras.

Ofta ligger restmagnetismen på 20 – 30 Gauss och detta har i våra experiment visat sig vara alldeles för högt.

## 1.3 SVETSNING AV FJÄRRVÄRMEAPPLIKATIONER

Som tidigare nämnts användes gassvetsning (oxygen och acetylen) för skarvsvetsning av rör vid läggning av rörledning i fält. Detta, förutom för de klenare dimensionerna, har ersatts av svetsning med belagda elektroder vilket med moderna lätta strömkällor är en mycket flexibel metod med mycket liten "ställtid". I vissa applikationer av svetsning av rörledningar används mekaniserad svetsning med endera TIG svetsning vilken är uppsatt i en orbitalsvetsutrustning. Liknade system finns för gasmetallbågs svetsning (MIG/MAG). Detta är en för svetsaren lättare process eftersom utrustningen bär svetsprocessen och operatören sköter och övervakar processen. Dock är det besvärligt utomhus eftersom svetsstället måste skyddas från väder och vind, plus att det blir mycket ställtid ute i en "rörgrav". Därför kommer troligen svetsning vid läggning av fjärrvärmerör ute i fält, ske med belagda elektroder under en tid framåt.

## 1.4 LJUSBÅGSINSTABILITET OCH LJUSBÅGS AVLÄNKNING

Vid ljusbågssvetsning bildas ett mycket hett plasma mellan katoden och anoden. Plasmata består av en joniserad gas som i sin tur består av positivt laddade joner och negativt laddade elektroner [1]. Dessa laddade partiklar rör sig med väldigt höga hastigheter i plasmata. Eftersom de laddade partiklarna är i rörelse bildar de en elektrisk ström i plasmata som inducerar ett magnetfält. Då arbetsstycket är magnetisk, dvs har en restmagnetism, kan detta magnetfält interagera med magnetfältet i plasmata. Om restmagnetismen är tillräckligt stark, kan dess interaktion med plasmata vara så kraftfullt att det gör plasmata instabilt, och därmed kan problem med ljusbågsinstabilitet uppstå. Restmagnetismen ger också upphov till en avlänkning (böjning) av plasmata genom  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -drift, där plasmata länkas av vinkelrät mot det elektriska fältet,  $\mathbf{E}$ , och vinkelrät mot det magnetiska fältet,  $\mathbf{B}$  [2]. Restmagnetismen ger också upphov till en diamagnetisk-drift som länkas av plasmata vinkelrät mot  $\mathbf{B}$ -fältet och  $\nabla p$  gradienten, där  $p$  är ett plasmatryck [2]. Om restmagnetismen är tillräckligt kraftfull kan detta leda till en kraftfull avlänkning av plasmata, vilket leder till problem med ljusbågsavlänkning.

Ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning gör det svårt för svetsaren att kontrollera ljusbågen. Detta kan leda till otillräcklig smältning av sidoväggarna, vilket i sin tur kan leda till bindfel. Den okontrollerbara ljusbågen kan även leda till slagginneslutningar, ojämn droppövergång och kraftigt svetsstrut. Då ljusbågen kraftigt länkas av kan det vara svårt att säkerställa fullgod skyddsgastäckning av smältan, vilket kan leda till problem med bland annat porositet.

Ljusbågens känslighet för att påverkas av ett externt magnetfält beror av svetsströmmen och svetsspänningen (bland annat). En högre svetsström och spänning ger en stabilare ljusbåge. Detta medför att olika svetsmetoder är olika känsliga för ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning. Tex tendera TIG-svetsning vara mer känsligt för ljusbågsavlänkning än MIG och MMA-svetsning på grund av den lägre bågspänningen. Fingervisningar för nivån på restmagnetismen som krävs för att orsaka ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning, för olika svetsmetoder, redovisas av bland annat av företagen Diverse Technologies & Systems Ltd [3], se Tabell 1 nedan, och EWM AG [4], se Tabell 2 nedan. Notera att detta är endast fingervisningar, de verkliga värdena beror av svetsströmmen, svetsspänningen, skyddsgasen/elektrod typen, svetsmetod (lik- eller växelström), materialsammansättning, etc.

Tabell 1. Tröskelvärden för ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavläkning för olika svetsmetoder, från Diverse Technologies & Systems Ltd [3].

Welding process	0 - 10 gauss	10 - 20 gauss	20 - 40 gauss	over 40 gauss
TIG	normal welding	arc instability	arc blow	severe arc blow
Manual metal arc	normal welding	normal welding	arc instability	arc blow
Submerged arc	normal welding	normal welding	normal welding	arc instability

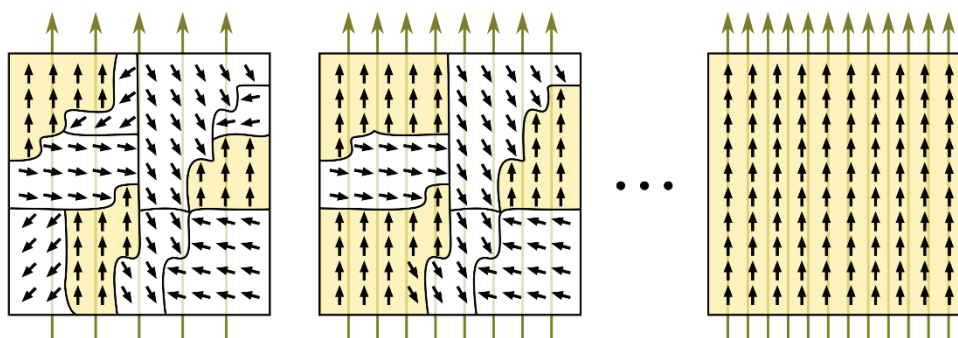
Tabell 2. Tröskelvärden för ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavläkning för olika svetsmetoder, från EWM AG [4].

Recommended values for TIG welding		Recommended values for MIG/MAG welding	
Field strength	Result	Field strength	Result
< 0,5 mT	★★★★	< 3 mT	★★★★
0,5-1 mT	★★★☆☆	3-4 mT	★★★☆☆
1-2 mT	★★☆☆☆	4-6 mT	★★☆☆☆
2-5 mT	★☆☆☆☆	6-8 mT	★☆☆☆☆
> 5 mT	☆☆☆☆☆	> 8 mT	☆☆☆☆☆

## 1.5 RESTMAGNETISM

Fjärrvärmerör är oftast tillverkade av låglegerade stål som är mjukt ferromagnetiska. Ferromagnetiska material kan ha en permanent magnetisering utan närvaro av ett extern magnetiskt fält [5]. Att ett material är *mjukt* ferromagnetiskt betyder att det kan avmagnetiseras med ett relativt svagt externt magnetiskt fält, jämfört med ett *hårt* ferromagnetiskt material, som tex permanentmagneter, som kräver ett starkt externt magnetiskt fält för att avmagnetiseras.

Ferromagnetiska material består av magnetiska domäner som är mikroskopiskt små områden. I en magnetisk domän är alla magnetiska moment parallella. De magnetiska momenten uppkommer från elektroners spinn, och i en magnetisk domän pekar alla spinnen i samma riktning. Ett ferromagnetiskt material är i sitt lägsta energitillstånd då dess magnetiska domäner är slumpvist orienterade. Den slumpvisa orienteringen gör att materialets makroskopiska magnetisering är noll. Genom att tex applicera ett externt magnetiskt fält kan de magnetiska domänerna orienteras sig efter fältets riktning. Detta sker genom domänrotation och genom att domäner som är gynnsamt riktad växer på bekostnad av ogynnsamt riktade domäner, se Figur 1 nedan.



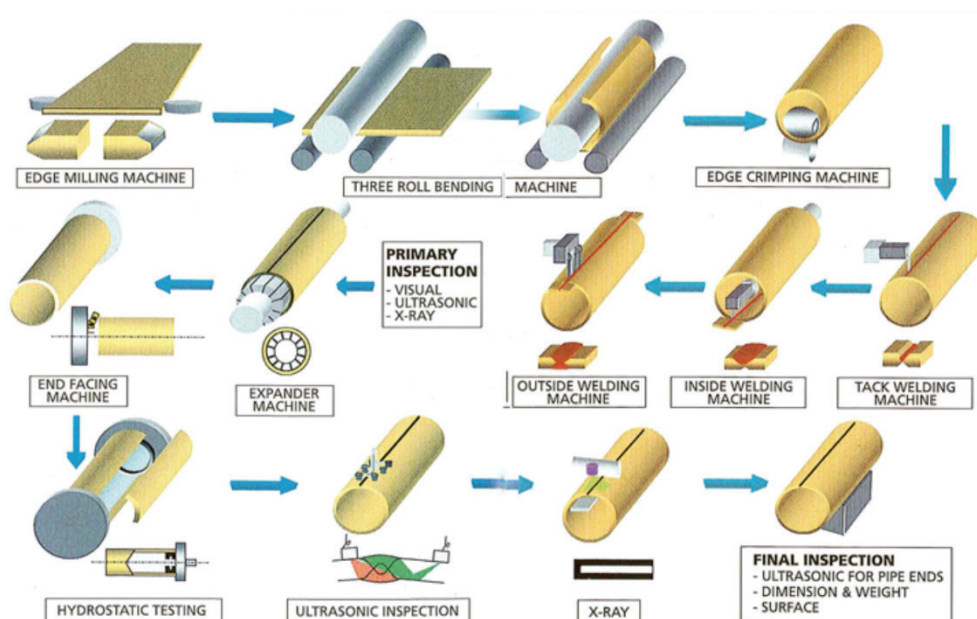
**Figur 1.** Rotation av orientering och ökad storlek på magnetiska domäner som respons på ett externt applicerat magnetiskt fält. Från [6].

När sedan det externa magnetfältet tas bort är materialet magnetiserat, ty netto magnetiseringen är inte längre noll. Detta tillstånd ger inte den lägsta energin och är därför kvasistatiskt, men det kan dröja mycket lång tid innan materialet går tillbaka till sitt lägsta energitillstånd och magnetiseringen därmed försvinner. Ett ferromagnetiskt material kan också magnetiseras genom tex plastiska deformationer.

## 1.6 STÅLRÖRSTILLVERKING

### 1.6.1 Tillverkningsprocess

De tillverkningskoncept som används för rör är endera längssvetsade rör eller spiralsvetsade rör. Om vi börjar med de längssvetsade rören, tillverkas de i specifika längder, normalt 6, 8, 10, 12 ända upp till 16 m. Det är vanligast att rör med en godstjocklek under 12 mm görs med denna metod. Principen är att man använder en mycket stor och lång press med en övervals och två undervalvar vilkas avstånd från varandra kan ställas steglöst. Den redan fogberedda och i rätt längd anpassade plåten förs in mellan valsarna och ett tryck läggs på övervalsen. Plåten valsas fram och tillbaka mellan valsarna med hela tiden ökat tryck på övervalsen. Efter att rätt diameter uppnåtts tas "röret" ut ur valsarna och bearbetas på olika sätt för att komma så nära formtoleransen som möjligt. Slutligen svetsas längsfogen beroende på plåttjocklek och diameter både från utsidan och insidan.

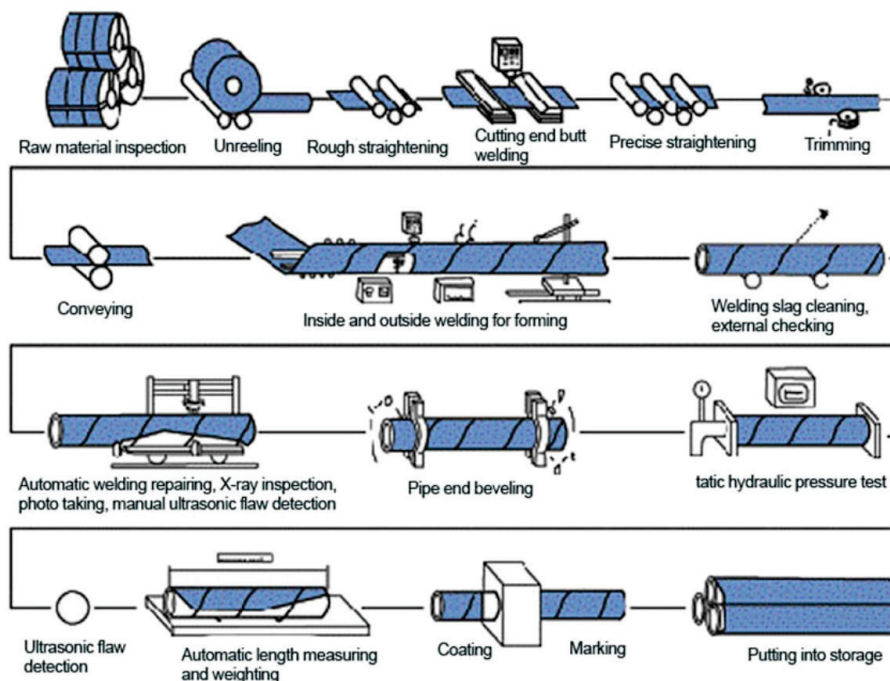


Figur 2. Tillverkningsprocess för längssvetsade stålrör. Från [7].

Spiralsvetsade rör görs i diametrar från c:a 100 mm upp till c:a 2 500 mm.

Godstjockleken är normalt begränsad till 25 mm. Det här är en process vilken ofta är kontinuerlig, d.v.s. röret görs oändligt långt och flygande kapar ser till att kapa röret i önskade längder. Man utgår ifrån en hasplad plåt som i en specifik vinkel, beroende på den diameter man vill ha, matas in i en plåtformningsmaskin där plåten formas av valsar till en cirkel. Både inuti och utanpå röret sitter svetsutrustningen som kontinuerligt svetsar först insidan och ett halvt varv därefter svetsar utsidan. När plåten i haspeln som matar in bandet i maskinen tar slut, lyfts snabbt en ny haspel på plats och skarvsvetsas under gång i den raka delen före valsningen, på detta sätt kan utrustningen köras kontinuerligt.





Figur 3. Tillverkningsprocess för spiralsvetsade stålrör. Från [8].

### 1.6.2 Svetsmetoder

Vid tillverkningen av rören används huvudsakligen två svetsmetoder. För häftsvetsningen av fogen och svetsning av tunnväggiga rör används gasmetallbågs svetsning med solid tråd eller metallpulverfylld tråd. Processen kan använda enkeltråd, twin eller tandemsystem. Vid godstjocklekar från c:a 10 mm och uppåt används huvudsakligen pulverbågs svetsning. Denna metod är verkligen produktiv och beroende på godstjockleken och diametern kan upp till 6 trådar i samma smältbad användas, vid den konfigurationen kan insvetstal på upp till 105 kg/h uppnås. I nyare rörverk används även lasersvetsning, kombination av laser och pulverbågs svetsning och i vissa fall laser med gasmetallbågs svetsning.

### 1.6.3 Restmagnetism från rörtillverkningen

Restmagnetism kan uppstå i stålrör på flera olika sätt, speciellt under tillverkningsprocessen av röret. En lista på några möjliga orsaker till uppkomst av restmagnetism är följande:

- Magnetiska kläm- och lyftverktyg.
- Plasmaskärning (används av vissa rörtillverkar för att kapa rören till rätt längd).
- Magnetiserade oförstörande provning. Provmeter som magnetisk partikelinspektion och mättad virvelströmsprovning kan ge upphov till en stark restmagnetism.
- Avhaspling och formning av stålplåten till ett rör. Detta är associerat med plastiska deformationer, vilket kan ge upphov till restmagnetism.
- Fogberedning, slipning och andra avverkande metoder.
- Längs- eller spiralsvetsning av stålröret.
- Direkt kontakt med kraftigt magnetiserade objekt så som bockningsvalsar.

## 2 Numerisk simulering

I detta kapitel beskrivs en numerisk modell som har utvecklats för att studera magnetfältet i svetsspalten mellan två fjärrvärmerör. Modellen bygger på Jiles-Arthertons konstitutiva samband, vilket har kalibrerats mot flera magnetiska hysteres till stålsorten P235GH. Modellen är magnetostatisk eftersom inga fria elektriska strömmar eller tidsvarierade magnetiska fält antas närvara. Modellen är också axisymmetrisk, vilket gör den väsentligt mindre beräkningstung än en full 3D modell. Detta möjliggör att en fin mesh kan användas för att lösa upp magnetfältet vid tex hörn där stora gradienter uppstår. Nedan beskrivs modellen i detalj och dess uppsättning i beräkningsprogrammet COMSOL [9], [10].

### 2.1 MAGNETOSTATIK

Betrakta ett magnetiserat stålrör utan några fria elektriska strömmar eller snabbt tidsvarierade magnetiska fält. Under dessa antaganden reduceras Maxwells ekvationer till [11]

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (2.1)$$

där  $\mathbf{B}$  är magnetiska flödestätheten och  $\mathbf{H}$  är magnetiseringsstyrkan. Enligt definition är  $\mathbf{B}$  och  $\mathbf{H}$  fälten relaterade till varandra enligt [11]

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} \quad (2.2)$$

där  $\mathbf{M}$  är magnetiseringens vektorfält, och  $\mu_0$  är permeabiliteten i vakuum. Vidare, enligt Helmholtz sats, kan varje slätt vektorfält skrivas som summan av ett virvelfritt vektorfält och ett källfritt vektorfält. På grund av att ett virvelfritt vektorfält har en skalärpotential och ett källfritt vektorfält har en vektorpotential ger Helmholtz sats att  $\mathbf{H}$  kan skrivas som [11]

$$\mathbf{H} = -\nabla V + \nabla \times \mathbf{A} \quad (2.3)$$

där  $V$  är en skalärpotential och  $\mathbf{A}$  är en vektorpotential. Eftersom  $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{0}$  enligt ekvation (2.1)b, dvs virvelfritt, måste  $\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{0}$  i ekvation (2.3), vilken då reduceras till

$$\mathbf{H} = -\nabla V \quad (2.4)$$

Låt oss nu betrakta ett givet bakgrundfält  $\mathbf{H}_b$  som används för att magnetisera stålrören.  $\mathbf{H}$  kan då skrivas som en summa av  $\mathbf{H}_b$  och ett reducerat fält  $\mathbf{H}_{red}$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_{red} + \mathbf{H}_b \quad (2.5)$$

där  $\mathbf{H}_{red}$  är okänt. Från ekvation (2.4) inses då att  $\mathbf{H}$  kan bestämmas från en reducerad skalärpotential enligt

$$\mathbf{H} = -\nabla V_{red} + \mathbf{H}_b \quad (2.6)$$

Genom att nu substituera ekvation (2.6) i ekvation (2.2), och sedan substituera ekvation (2.2) i ekvation (2.1)a fås

$$\mu_0 \nabla \cdot (-\nabla V_{red} + \mathbf{H}_b) + \mu_0 \nabla \cdot \mathbf{M} = 0 \quad (2.7)$$

I kapitel 2.4 visas ett konstitutivt samband där  $\mathbf{M}$  kan skrivas som en funktion av  $\mathbf{H}$ . Eftersom  $\mathbf{H}$  i sin tur kan skrivas som en funktion av  $V_{red}$  enligt ekvation (2.6), gör detta konstitutiva samband att  $V_{red}$  är den enda beroende variabel som är okänd i ekvation (2.7). Genom att lösa ekvation (2.7) för  $V_{red}$  kan sedan  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{M}$ , och  $\mathbf{B}$  bestämmas.

## 2.2 RANDVILLKOR

Vid gränsskiktet mellan stålröret och dess omgivande luften gäller att den tangentiella komponenten av  $\mathbf{H}$  är kontinuerlig [11], dvs

$$\mathbf{n}_{12} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \mathbf{0} \quad (2.8)$$

där  $\mathbf{H}_1$  och  $\mathbf{H}_2$  är magnetiseringsstyrkan vid gränsskiktet i stålröret respektive i luften.  $\mathbf{n}_{12}$  är en enhetsnormalvektor till gränsskiktet med riktning mot luften.

Storleken på luftdomänen som krävs för att bestämma magnetfältet i stålröret antas vara så stor att normalkomponenten av den reducerade magnetflödestätheten på dess yttre rand är noll [11], dvs

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{B} - \mathbf{B}_b) = 0 \quad (2.9)$$

där  $\mathbf{n}$  är en enhetsnormalvektor till den yttre randen av luftdomänen. Eftersom  $\mathbf{M} = \mathbf{0}$  i luften, kan ekvation (2.9), med hjälp av ekvationerna (2.2) och (2.5), uttryckas i  $\mathbf{H}$  som

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{H} - \mathbf{H}_b) = 0 \quad (2.10)$$

För att göra modellen mer beräkningseffektiv modelleras bara ett av de två rören. Detta görs genom att låta luftdomänen sluta på det geometriska symmetriplanet mellan de två rören. På dess rand längs detta plan låter vi

$$V_{red} = 0 \quad (2.11)$$

Detta gör att magnetfältet kommer vara antisymmetriskt kring det geometriska symmetriplanet mellan de två rören [11]. På detta sätt, när magnetfältet är antisymmetriskt, räcker det att endast modellera ett rör om randvillkoret i ekvation (2.11) används.

Genom att använda randvillkoren (2.8), (2.10) och (2.11) kan ekvation (2.7) lösas för  $V_{red}$ .

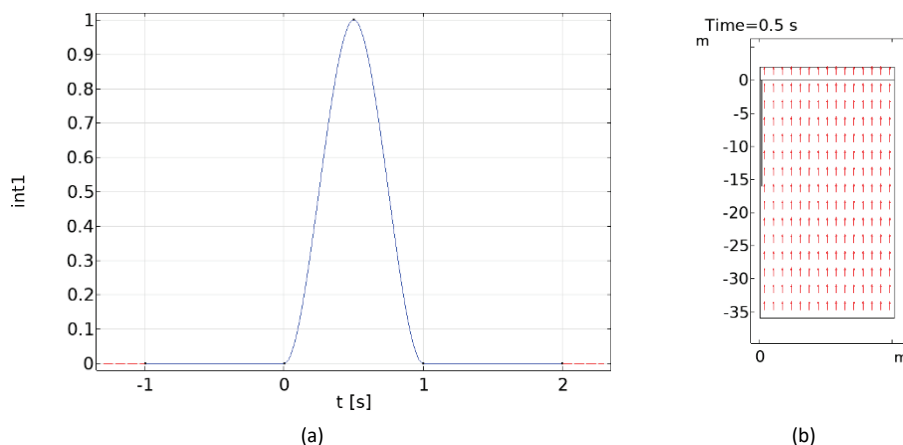
## 2.3 BAKGRUNDSFÄLT

Rören magnetiseras i beräkningsmodellen med ett axiellt bakgrundsfält som ges av

$$\mathbf{H}_b = H_{bp} \text{int1}(t) \hat{\mathbf{e}}_z \quad (2.12)$$

där  $H_{bp}$  är den maximala magnituden av bakgrundsfältet.  $\text{int1}(t)$  är en funktion av tiden,  $t$ , med formen av ett styckvist kubiskt polynom. Vid  $t = 0$  är  $\text{int1} = 0$ , för  $t = 0.5$  s är  $\text{int1} = 1$  som störst, och vid  $t > 1$  s är  $\text{int1} \equiv 0$ ; se Figur 4a nedan. Det

axiella bakgrundsfältet i den fulla beräkningsdomänen visas i Figur 4b. Den vertikala axeln i figuren är z-axeln.



Figur 4. (a)  $\text{int1}(t)$ , (b) bakgrundsfältet i beräkningsdomänen. Den vertikala axeln i figuren sammanfaller med rotationsaxeln hos den axisymmetriska modellen.

## 2.4 KONSTITUTIVT SAMBAND

För att lösa ekvation (2.7) måste  $\mathbf{M}$  beskrivas som en funktion av  $\mathbf{H}$ . Detta är trivialt för luften eftersom  $\mathbf{M} = \mathbf{0}$  i luft. För stålöröret är det mycket svårare. Flera konstitutiva samband har utvecklats för detta. I detta arbete har vi valt att använda Jiles-Athertons (JA) konstitutiva modell [12], som är en av de mest populära magnetiska hysteres modellerna. Denna modell är fysikaliskt baserad och kan användas för att beräkna både mindre (minor) och huvud (major) hysteres loopar. JA-modellen är implementerad i COMSOL enligt [9]

$$\begin{cases} \mathbf{H}_e = \mathbf{H} + \alpha \mathbf{M} \\ \chi = \frac{1}{k_p} (\mathbf{M}_{an} - \mathbf{M}) \\ \mathbf{M}_{an} = M_s \text{Lan} \left( \frac{\|\mathbf{H}_e\|}{a} \right) \frac{\mathbf{H}_e}{\|\mathbf{H}_e\|} \\ \frac{d\mathbf{M}}{dt} = c_r \frac{d\mathbf{M}_{an}}{dt} + \max \left( \chi \frac{d\mathbf{H}_e}{dt}, 0 \right) \frac{\chi}{|\chi|} \end{cases} \quad (2.13)$$

där

$$\text{Lan}(x) = \coth(x) - \frac{1}{x} \quad (2.14)$$

är Langevin funktionen.  $M_s$ ,  $a$ ,  $k_p$ ,  $c_r$  och  $\alpha$  är fysikaliska parametrar som är relaterade till materialets magnetiska egenskaper enligt följande.  $M_s$  anger mättningsmagnetiseringen hos materialet,  $a$  kvantifierar domänväggsdensiteten,  $k_p$  kvantifierar den genomsnittliga energi som krävs för att bryta fastlåsningsplatser av magnetiska domäner i materialet,  $c_r$  anger magnetiserings reversibiliteten, och  $\alpha$  kvantifierar interdomänkoppling i materialet [12].

### 2.4.1 Kalibrering av numerisk modell

Parametrarna  $M_s$ ,  $a$ ,  $k_p$ ,  $c_r$  och  $\alpha$  i JA-modellen måste bestämmas från kalibrering mot experimentella data. Den experimentella data framställdes från en toroid med rektangulärt tvärsnitt som vattenskurits från ett DN700 fjärrvärmerör med godstjockleken 8 mm, se Figur 5 nedan. Toroidens yttre och inre diameter är 55 respektive 45 mm.



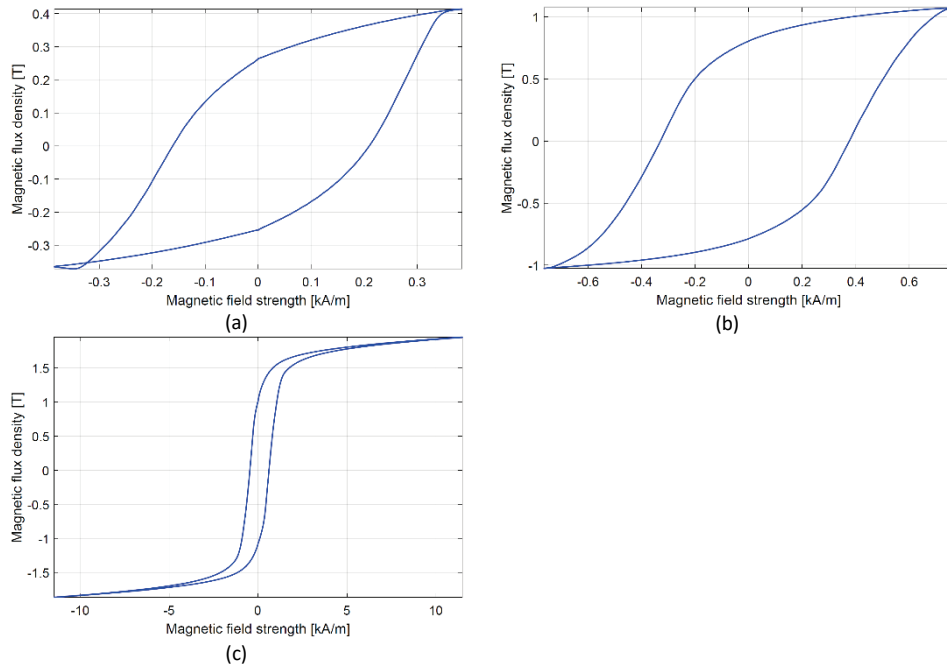
Figur 5. Toroid utskuren från ett DN700 rör.

Materialet är P235GH, vilket är ett låglegerat stål med kemisk sammansättning enligt Tabell 3 nedan. P235GH är ett vanligt förekommande material för fjärrvärmerör.

Tabell 3. Kemisk sammansättning för P235GH [13].

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
Wt%	≤0.16	0.35	0.6–1.2	≤0.025	≤0.01	≤0.3	≤0.3	≤0.08	≤0.3

Avdelningen för industriell produktion på Lunds Tekniska Högskola utförde kvasistatiska magnetiska hysteresmätningar på toroiden. Detta gjordes genom att linda toroiden med en 60 varvs primärspole och en 60 varvs sekundärspole, där primärspolen användes för att magnetisera toroiden och sekundärspolen användes för att bestämma magnetflödestätheten. Strömmen i primärspolen var växlande med frekvensen 0.5 Hz. Figur 6 nedan visar tre uppmätta  $BH$  – hysteres loopar för toroiden. De två första looparna är mindre (minior) hysteres loopar som framställets från den initialt avmagnetiserade toroiden. Primärspolen har sedan matas med en växlande ström som gör att  $H$ -fältet, vilken kan beräknas utifrån strömmen och antalet varv i primärspolen genom Ampers lag, växlar mellan extremvärdena  $\pm H_p$ , där  $H_p = 385$  A/m för hystereser i Figur 6a och  $H_p = 766$  A/m för hysteresen i Figur 6b. Båda dessa är stabiliserade hystereser, vilket sker efter att strömmen växlat riktning ett antal gånger. Figur 6c visar en mättad hysteres med  $H_p = 11475$  A/m.  $H_p = 385$  A/m är den minsta hysteres som det anlidade labbet kunde ta fram.



Figur 6. Experimentella hysteres mätningar för: (a)  $H_p = 385 \text{ A/m}$ , (b)  $H_p = 766 \text{ A/m}$ , och (c)  $H_p = 11475 \text{ A/m}$ .

Parametrarna till JA-modellen bestämdes nu genom att passa den mot de experimentella kurvorna i Figur 6. Detta görs genom att anta att stigningarna på primär och sekundär lindningarna av toroiden är så små att  $\mathbf{H}$  och  $\mathbf{M}$ -fälten är fullständigt inneslutna inuti toroiden. Betrakta nu ett polärt koordinatsystem med origo i mittpunkten av toroiden. Eftersom  $\mathbf{H}$  och  $\mathbf{M}$  är tangentiella till ekvatorn på toroiden (enligt det tidigare antagandet) är det endast  $\hat{\mathbf{e}}_\theta$  komponenterna av  $\mathbf{H}$  och  $\mathbf{M}$  som är skilda från noll då de uttrycks i det ovan nämnda polära koordinatsystemet. Uttryck i detta system kan den enda icke nollskilda komponenten till JA-modellen i ekvation (2.13) skrivas för toroiden som

$$\begin{cases} H_e = H_d \tilde{H} + \alpha_d \tilde{\alpha} M_d \tilde{M} \\ \chi = \frac{1}{k_{pd} \tilde{k}_p} (M_{an} - M_d \tilde{M}) \\ M_{an} = M_{sd} \tilde{M}_s \left[ \coth \left( \frac{H_e}{a_d \tilde{a}} \right) - \frac{a_d \tilde{a}}{H_e} \right] \\ \frac{d\tilde{M}}{d\tilde{t}} = \frac{1}{M_d} \left[ c_{rd} \tilde{c}_r \frac{dM_{an}}{d\tilde{t}} + \max \left( \chi \frac{dH_e}{d\tilde{t}}, 0 \right) \frac{\chi}{|\chi|} \right] \end{cases} \quad (2.15)$$

där

$$\frac{dH_e}{d\tilde{t}} = H_d \frac{d\tilde{H}}{d\tilde{t}} + \alpha_d \tilde{\alpha} M_d \frac{d\tilde{M}}{d\tilde{t}} \quad (2.16)$$

och

$$\frac{dM_{an}}{d\tilde{t}} = \frac{M_{sd} \tilde{M}_s}{a_d \tilde{a}} \frac{dH_e}{d\tilde{t}} \left[ 1 - \coth^2 \left( \frac{H_e}{a_d \tilde{a}} \right) + \frac{(a_d \tilde{a})^2}{H_e^2} \right] \quad (2.17)$$

I ekvationerna (2.15) - (2.17) har följande dimensionslösa variabler använts:

$$\tilde{H} = \frac{H}{H_d}, \quad \tilde{M} = \frac{M}{M_d}, \quad \tilde{t} = \frac{t}{2\pi n} \quad (2.18)$$

Detta har gjorts för att öka robustheten vid numerisk integration av dessa ekvationer. För att öka robustheten vid optimeringen av JA-parametrarna har även följande dimensionslösa parametrar använts i ekvationerna (2.15) - (2.17):

$$\tilde{M}_s = \frac{M_s}{M_{sd}}, \quad \tilde{a} = \frac{a}{a_d}, \quad \tilde{k}_p = \frac{k_p}{k_{pd}}, \quad \tilde{c}_r = \frac{c_r}{c_{rd}}, \quad \tilde{\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha_d} \quad (2.19)$$

Värdena på skalparametrarna som använts i (2.18) och (2.19) är angivna i Tabell 4 nedan. Dess värden är valda så att variablerna i (2.18) och (2.19) har en magnitud nära 1.

Tabell 4. Värden på skalparametrar.

$H_d$ [A/m]	$M_d$ [A/m]	$n$ [-]	$M_{sd}$ [A/m]	$a_d$ [A/m]	$k_{pd}$ [A/m]	$c_{rd}$ [-]	$\alpha_d$ [-]
1000	$10^6$	1 – 10	$10^6$	100	100	0.1	$10^{-4}$

Ekvation (2.15)c utgör en första ordningens implicit ordinär differentialekvation. Genom att driva  $\tilde{H}$  som sinusformad av tiden

$$\tilde{H} = \frac{H_p}{H_d} \sin(2\pi n \tilde{t}) \quad (2.20)$$

kan ekvation (2.15)c lösas med Matlabs implicita ODE-lösare *ode15i*. Som begynnelsevillkor används  $\tilde{M}(\tilde{t} = 0) = 0$ , vilket anger att den initiala magnetiseringen är noll. Parametern  $n$  i ekvation (2.20) är relaterad till integrationsintervallet enligt

$$\tilde{t} \in \left[ 0, \frac{4n + 1}{4n} \right] \quad (2.21)$$

där sluttiden i detta intervall motsvarar en initial magnetisering (som sker under tiden  $0 \leq t \leq \pi/2$ ) plus  $n$  stycken fulla hysteres loopar.

Notera att  $M_{an}$  i ekvation (2.15)c är singularär då  $H_e = 0$ . Dock är denna singularitet borttagbar, där det gäller att

$$\lim_{H_e \rightarrow 0} M_{an} = 0 \quad (2.22)$$

$dM_{an}/d\tilde{t}$  i ekvation (2.17) är också singularär för  $H_e = 0$ . Denna singularitet är borttagbar med

$$\lim_{H_e \rightarrow 0} \frac{dM_{an}}{d\tilde{t}} = \frac{1}{3} \frac{M_{sd} \tilde{M}_s}{a_d \tilde{a}} \frac{dH_e}{d\tilde{t}} \quad (2.23)$$

vilket beräknades med Matlabs symboliska toolbox. De borttagbara singulariteterna i (2.22) och (2.23) tas hänsyn till i ode-funktionen som går in i Matlabs *ode15i* genom if-satser.

Parametrarna i JA-modellen kan nu kalibreras mot de experimentella hystereserna i Figur 6. Detta görs genom att integrera ekvation (2.15)c för varje värde på  $H_p$  som den experimentella datan framställts med. Olika långa tidsintervall krävs för att uppnå en stabiliserad beräknad hysteres. Den minsta hysteres ( $H_p = 385$  A/m) är fullt stabiliserad efter 10 loopar ( $n = 10$ ), den mellersta ( $H_p = 766$  A/m) efter 5 loopar ( $n = 5$ ), och den största ( $H_p = 11475$  A/m) efter 1 loop ( $n = 1$ ). Den sista beräknade loopen (vilket svarar mot en stabiliserad hysteres) för vare  $H_p$  används sedan för att konstruera en residualvektor. Residualvektorn anger skillnaden mellan experimentella och beräknade hysteres, och är definierad som

$$\mathbf{R} = [\mathbf{R}_1 \quad \mathbf{R}_2 \quad \mathbf{R}_3] \quad (2.24)$$

där

$$\mathbf{R}_i = [d_{\perp 1} \quad d_{\perp 2} \quad \cdots \quad d_{\perp m_i}] \quad (2.25)$$

är residualvektorn för hysteres  $i = 1, 2, 3$  i Figur 6.  $d_{\perp j}$  anger det minsta avståndet mellan mätpunkt  $j$  på den experimentella hysteres och den sista beräknade loopen (dvs fullt stabiliserad hysteres).  $d_{\perp j}$  beräknas från en euklidisk norm i rummet  $\tilde{H} \times B$ . Notera igen att  $\mathbf{R}$  innehåller vinkelräta avstånd mellan experimentella och modellerade värden i det normerade rummet  $\tilde{H} \times B$ .

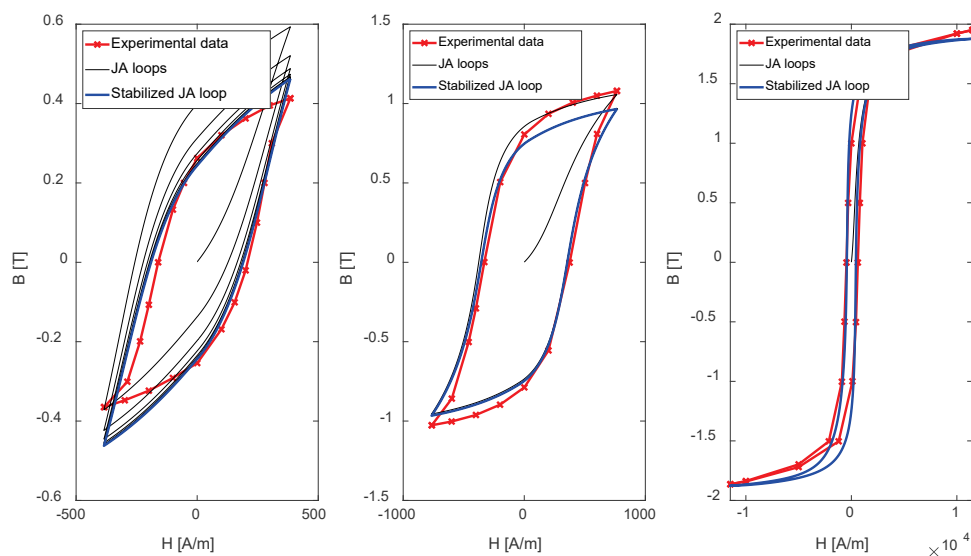
Residualvektorn  $\mathbf{R}$  minimeras med Matlabs ickelinjära minstakvadrat lösare *lsqnonlin*, för att beräkna de JA-parametrar som ger bäst passning. De optimerade parametrarna visas i Tabell 5 nedan.

Tabell 5. Kalibrerade parametrar till Jiles-Athertons modell.

$M_s$ [A/m]	$\alpha$ [A/m]	$k_p$ [A/m]	$c_r$ [-]	$\alpha$ [-]
$1.539 \times 10^6$	454.6	790.9	0.3434	$9.235 \times 10^{-4}$

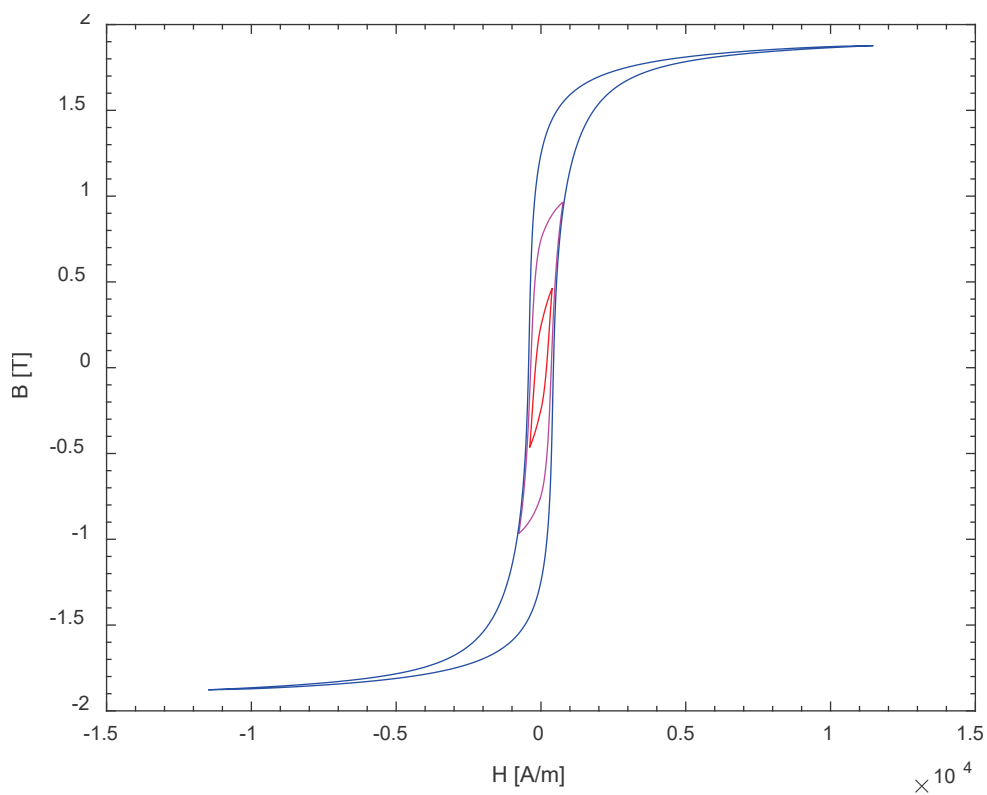
Figur 7 nedan visar beräknade hysteres loopar för de optimerade parametrarna i Tabell 5. Den svarta linjen i figuren visar  $BH$ -relationen beräknat för hela tidsintervallet (2.21). Notera att ungefär 7–8 loopar krävs innan den minsta hysteres i Figur 7a har stabiliserats. Den blå linjen visar den sista beräknade loopen i tidsintervallet (2.21) och svarar mot den stabiliserade hysteresen. De röda kryssen är experimentella data, tagna från hysteres i Figur 6, som använts för att skapa residualvektorn i (2.24). I idealfallet skall den blå linjen skära genom dessa kryss.





Figur 7. Beräknade hysteres för (a)  $H_p = 385 \text{ A/m}$ ,  $n = 10$ , (b)  $H_p = 766 \text{ A/m}$ ,  $n = 5$ , (c)  $H_p = 11475 \text{ A/m}$ ,  $n = 1$ . Den blå linjen visar den stabiliserade hysteres och de röda kryssen visar de experimentella mätvärdena.

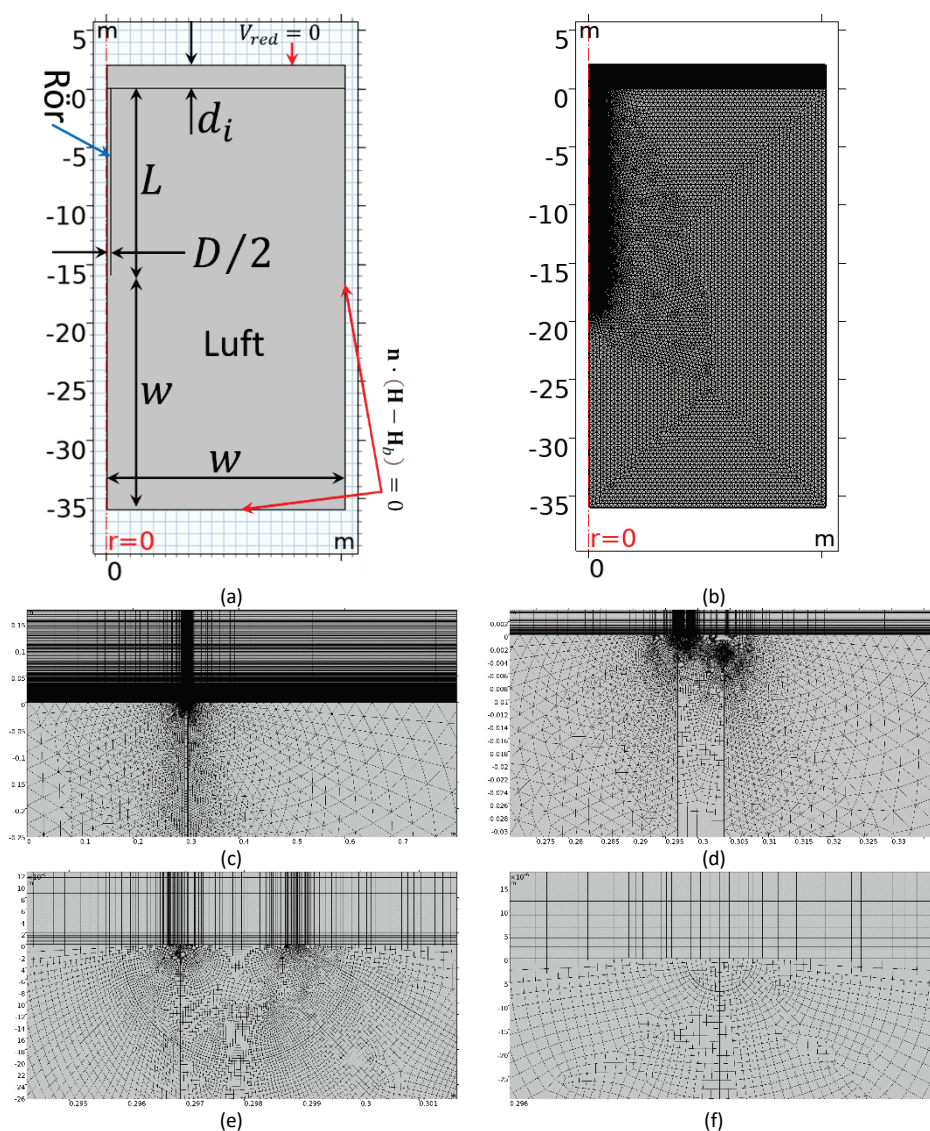
Figur 8 nedan visar de tre beräknade stabiliserade hysteresen i en och samma figur.



Figur 8. Beräknade stabiliserade hysteres för  $H_p = 385 \text{ A/m}$ ,  $H_p = 766 \text{ A/m}$ ,  $H_p = 11475 \text{ A/m}$ .

## 2.5 FINIT ELEMENT MODELL

Figur 9a visar beräkningsdomänen för den axisymmetriska rörmodellen som implementerats i programmet COMSOL [9]. Modellen bygger på två rör, vars axlar ligger på  $z$ -axeln i modellen, som magnetiseras av ett bakgrundsfält, och sedan förs samman längs  $z$ -axeln till dess att avståndet mellan rörändarna är samma som svetsens spaltavstånd. COMSOLs "Magnetic Fields, No Currents" interface har här använts, där ekvation (2.7) löses med finita elementmetoden. Det under röret av de två rören är placerat mellan  $z = -L$  och  $z = 0$ , se Figur 9a, där  $L$  är längden hos röret. Röret är omgivet av en luftdomän med radien  $w$ . Vidare sträcker sig också luftdomänen längden  $w$  i axiellt led utanför den nedre änden av röret, se Figur 9a. Rörets diameter är  $D$ , och dess godstjocklek är  $h$ . Svetsens rätkantslängd är  $u$ , halva fogberedningsvinkeln är  $\theta$ , och halva spaltbredden är  $d_f$ . Modellen är geometrisk symmetrisk kring  $z \equiv d_i$ , och  $\mathbf{B}$  och  $\mathbf{H}$ -fälten är antisymmetriska kring  $z \equiv d_i$ . Detta möjliggör att bara det ena av de två rören behöver modelleras (under villkoret att magnetiseringen är sådan att  $\mathbf{B}$  och  $\mathbf{H}$  är antisymmetriska). I Figur 9a visas också randvillkoren (2.10) och (2.11). Figur 9b-f visar meshen vid olika nivåer av inzoomning. Den minsta elementstorleken bestäms av parametern  $m_p$ .



Figur 9. (a) Beräkningsdomän och randvillkor, (b)-(f) olika nivåer av zoomning av meshen.

Alla beräkningar i denna rapport är tillämpade på DN600 rör (med dimensioner och foggeometri angivna i Tabell 6 nedan) om inget annat anges.

Tabell 6. Rördimensioner och foggeometri för DN600 rör.

$D$	$L$	$h$	$u$	$\theta$
608 mm	16 m	7.1 mm	2 mm	30°

### 2.5.1 Magnetisering

Modellen magnetiseras med bakgrundsfältet i ekvation (2.12) under tiden  $0 \leq t \leq 1$  s. Vid tiden noll är bakgrundsfältet noll, vid tiden 0.5 s nås det maximala värdet  $B_{bp} = H_{bp}/\mu_0$ , och vid tiden 1 s är bakgrundsfältet noll igen. Bakgrundsfältet antas variera så långsamt att antagandet om magnetostatik gäller. För tidsstegningen används en BDF (back differentiation formula) metod, där tidssteget,  $\Delta t$ , bestäms adaptivt. Tidssteget anses konvergerat då en beräknad residual understiger en given tolerans  $R_{tol}$ .

Under magnetiseringen ( $0 \leq t \leq 1$ ) är avståndet  $2d_i$  (vilket anger avståndet mellan två motsatta rörändar, se Figur 9a) konstant.  $d_i$  väljs vara så stort att magnetfältet från det ena röret inte påverkar magnetfältet i det andra röret under magnetiseringsfasen.

### 2.5.2 Sammanförning av två magnetiserade rör

Efter att rören magnetiserats förs de samman till spaltavståndet  $2d_f$ . Detta görs genom att kontinuerligt deformera luftdomänen  $\Omega_i = [0 w] \times [0 d_i]$  till  $\Omega_f = [0 w] \times [0 d_f]$  under tidsintervallet  $1 < t \leq 2$  s. Deformationen sker genom en ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) formulering som används för elementen i  $\Omega_i$ . Dessa element deformeras i vertikalled med den föreskrivna deformationen

$$\Delta Z = -Z_g + f \cdot g \quad (2.26)$$

där

$$\left\{ \begin{array}{l} g = \left(1 - \frac{Z_g}{f}\right) \text{int}2(t) + \frac{Z_g}{f} \\ f = \frac{2Z_g d_f}{N f_d \left(-1 + 2m_p - \frac{f_p}{2} + \sqrt{\frac{f_p^2}{4} + \frac{2Z_g(N-1)}{R_e m_p - m_p}}\right)} \end{array} \right. \quad (2.27)$$

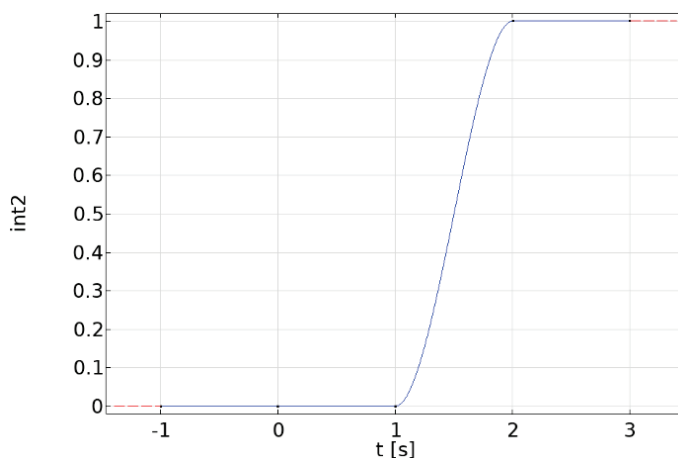
där

$$\left\{ \begin{array}{l} f_p = \frac{2(N-1)}{(R_e-1)} - 1 \\ f_d = \frac{m_p(R_e-1)}{(N-1)} \end{array} \right. \quad (2.28)$$

där

$$R_e = \frac{2d_i}{Nm_p} - 1 \quad (2.29)$$

Här är  $Z_g$  den vertikala komponenten i koordinatrummet för modellens geometri, och  $N$  är antalet elementrader i vertikalled som  $\Omega_i$  är uppdelad i. Elementuppdelningen av  $\Omega_i$  i vertikalled bestäms av en aritmetisk följd där kvoten mellan den längsta och kortaste vertikala elementlängden ges av  $R_e$ .  $\text{int}2(t)$  är en funktion som går från 0 till 1 i tidsintervallet  $1 < t \leq 2$  s enligt Figur 10 nedan.  $\Delta Z$  i (2.26) har egenskapen att elementen i luftspalten kommer ha en aritmetisk fördelning i vertikal led för  $0 \leq t \leq 1$ , där det minsta elementet har storleken  $m_p$ . Detta gör att elementstorleken varierar "kontinuerlig" i z-led vid  $z = 0$  (se Figur 9f), vilket förbättrar konvergens. Vidare har  $\Delta Z$  i (2.26) egenskapen att alla elementen i  $\Omega_f$  kommer att ha samma storlek i vertikalled då  $t = 2$  s, vilket också medför bättre konvergens då kraftigt tillplattade element kan undvikas när  $\Omega_i$  deformeras till  $\Omega_f$ .



Figur 10. Funktionen  $\text{int2}(t)$ .

### 2.5.3 Konvergenstudie

Alla beräkningar i detta arbete har utförts med modellparametervärdena angivna i Tabell 7 nedan (om inget annat angivits). Dessa parametervärden (utom spaltbredden  $2d_f$  och bakgrundsfältet  $B_{bp}$ ) har valts så att magnetfältet i svetsspalten har ett litet beroende av deras storlek. Tex har radien på luftdomänen,  $w$ , valts så stor att en ökning av dess magnitud endast ger en mycket liten förändring av magnetfältet i svetsspalten.

Tabell 7. Modellparametrar.

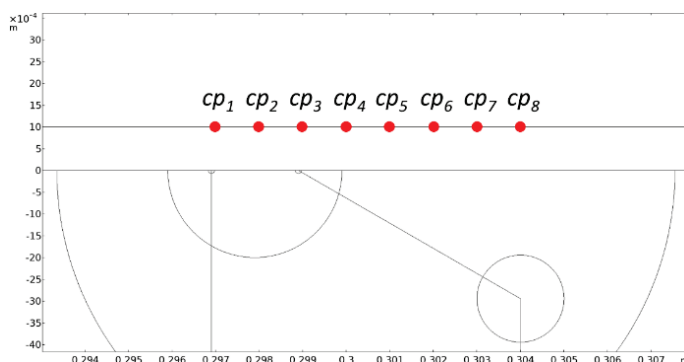
$\Delta t$	$R_{tol}$	$m_p$	$w$	$d_i$	$d_f$	$B_{bp}$
Adaptiv tidsstegskontroll	$10^{-3}$	0.01 mm	20 m	2 m	1 mm	2 G

För att studera känsligheten av parametervärdena i Tabell 7 definieras det relativa felet

$$\delta = \frac{\|\mathbf{B}\| - \|\mathbf{B}\|_{ref}}{\|\mathbf{B}\|_{ref}} \times 100\% \quad (2.30)$$

där  $\|\mathbf{B}\|_{ref}$  är beräknad utifrån värdena i Tabell 7, medan  $\|\mathbf{B}\|$  är beräknad med en ändring i ett av parametervärdena i Tabell 7.

I Tabell 8 nedan har  $\delta$  beräknats för flera olika variationer av modellparametrarna. Detta har gjorts då  $t = 2$  s, och i åtta punkter som är placerade mitt i svetsspalten enligt Figur 11 nedan.



Figur 11. Evalueringspunkter för  $\delta$ .

Från de andra och tredje kolumnerna i Tabell 8 kan det ses att om det fixa tidssteget 0.01 respektive 0.001 s används, ändras magnetfältet bara med några tiondels procent jämfört med den adaptiva tidstegningen. Den adaptiva tidstegningen anses därför ge ett konvergerat resultat med avseende på storleken av tidssteget. Vidare, från den fjärde kolumnen kan det se att när toleransen för residualen (som anger när ett tidssteg anses konvergerat) ändras från  $10^{-3}$  till  $10^{-4}$ , ändras bara magnetfältet med ca 0.5% i svetspaltens mitt.  $R_{tol} = 10^{-3}$  anses därför vara ett konvergerat värde. Från kolumn fem ses att när elementstorleken halveras, ändras bara magnetfältet med ca 0.05%. Då luftdomänens radie ökar från 20 till 30 m, ändras bara magnetfältet med någon procent, vilket ses i kolumn sex. Slutligen, då avstånden mellan rören är  $2d_i = 6$  m istället för 4 m under magnetiseringen ( $0 \leq t \leq 1$ ), ändras magnetfältet bara ca 0.5%.

Tabell 8.  $\delta$ -värden för olika variationer av modellparametrar, beräknade i punkterna angivna i Figur 11.

	$\Delta t = 0.01$ s	$\Delta t =$ 0.001 s	$R_{tol}$ $= 10^{-4}$	$m_p =$ 0.005 mm	$w = 30$ m	$d_i = 3$ m
$cp_1$	0.18	0.38	0.49	0.039	1.0	-0.41
$cp_2$	0.18	0.38	0.49	0.044	1.0	-0.41
$cp_3$	0.18	0.38	0.50	0.046	1.0	-0.41
$cp_4$	0.20	0.43	0.55	0.050	1.0	-0.39
$cp_5$	0.20	0.44	0.56	0.061	1.0	-0.39
$cp_6$	0.20	0.44	0.57	0.072	1.0	-0.39
$cp_7$	0.20	0.45	0.57	0.060	1.1	-0.40
$cp_8$	0.20	0.45	0.57	0.068	1.1	-0.40

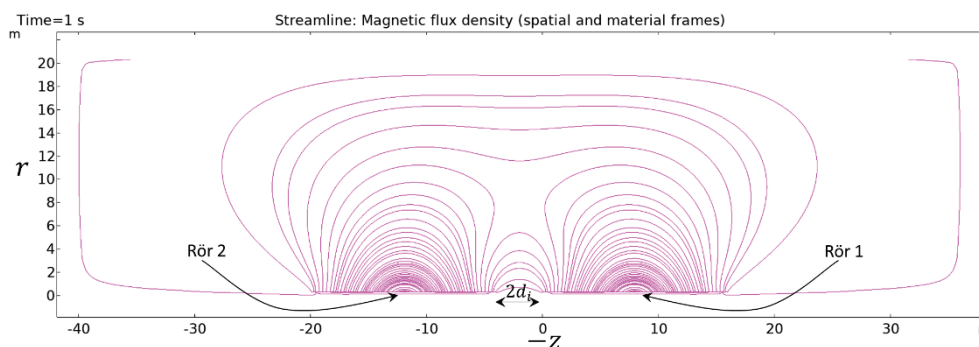
### 3 Resultat från numerisk simulering

I detta kapitel tillämpas den numeriska modellen, som utvecklats i det föregående kapitlet, för att studera magnetfältet i och omkring magnetiserade fjärrvärmerör enligt följande. Först beräknas magnetfältlinjer för att åskådliggöra magnetfältet kring två magnetiserade rör. Sedan bestäms storleken på bakgrundsfältet som krävs för att magnetisera ett fjärrvärmerör till en sådan nivå att problem med ljusbågsinstabilitet/ljusbågsavlänkning kan uppstå. Efter detta undersöks jordens och elkraftledningars magnetfälts påverkan på restmagnetismen i ett fjärrvärmerör. Slutligen studerades inverkan av rörens dimensioner, och spaltens geometri, på magnetfältet kring svetsspalten. Detta för att undersöka om det tex är lättare att magnetisera ett stort rör än ett litet rör till en sådan nivå att tex ljusbågsavlänkning kan uppstå.

För alla nedanstående beräkningar har rördimensionerna i Tabell 6, och modellparametrarna i Tabell 7, använts om inget annat angivits.

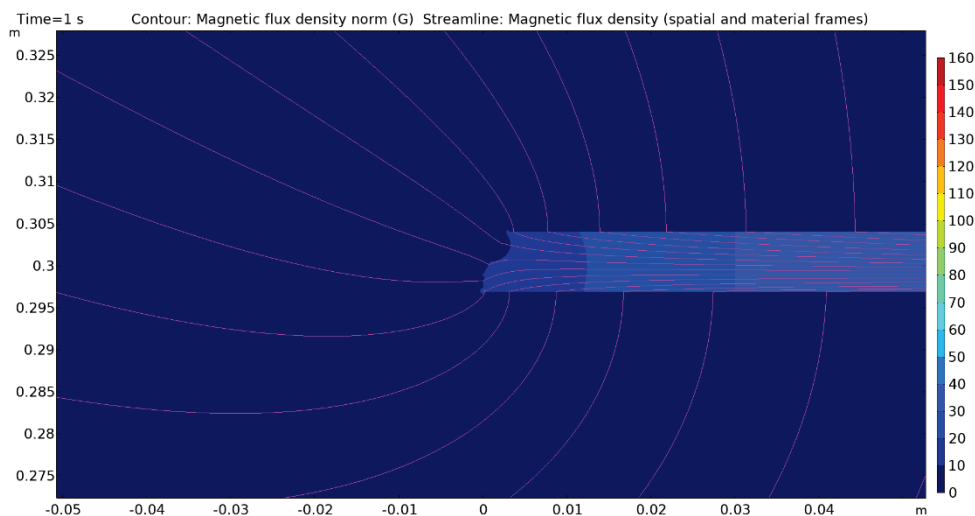
#### 3.1 MAGNETFÄLTSLINJER

Figur 12 nedan visar fältlinjerna till  $\mathbf{B}$ -fältet för två DN600 rör då  $t = 1$  s, som magnetiserats med  $B_{bp} = 2$  G. Tätheten mellan fältlinjerna beror av fältstyrkan, där hög täthet indikerar hög fältstyrka. Den vänstra delen av figuren har åstadkommit genom att spegla  $\mathbf{B}$ -fältet antisymmetriskt i  $z = d_i$ .



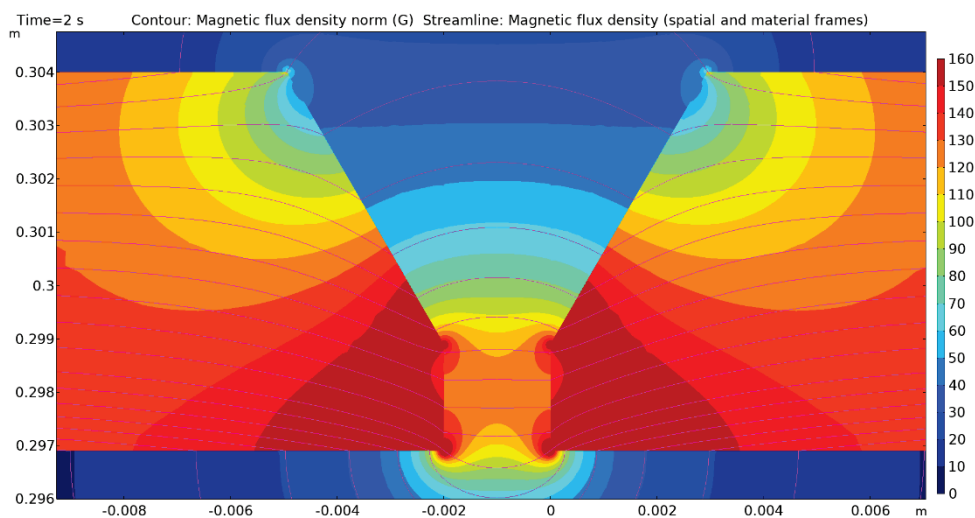
Figur 12. Fältlinjer till  $\mathbf{B}$ -fältet vid  $t = 1$  s och  $B_{bp} = 2$  G.

Figur 13 visar fältlinjerna mer detaljerat vid röränden  $z = 0$ . I figuren ses också en konturplot av  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet.



Figur 13 Fältlinjer till  $\mathbf{B}$ -fältet och konturplot av  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet vid  $t = 1$  s och  $B_{bp} = 2$  G.

Figur 14 visar fältlinjerna då  $t = 2$  s och rören har förts samman till det slutliga spaltavståndet  $2d_f = 2$  mm. I figuren ses också en konturplot till  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet. Från figuren ses att magnetfältet är störst vid hörnen på rätkanterna.

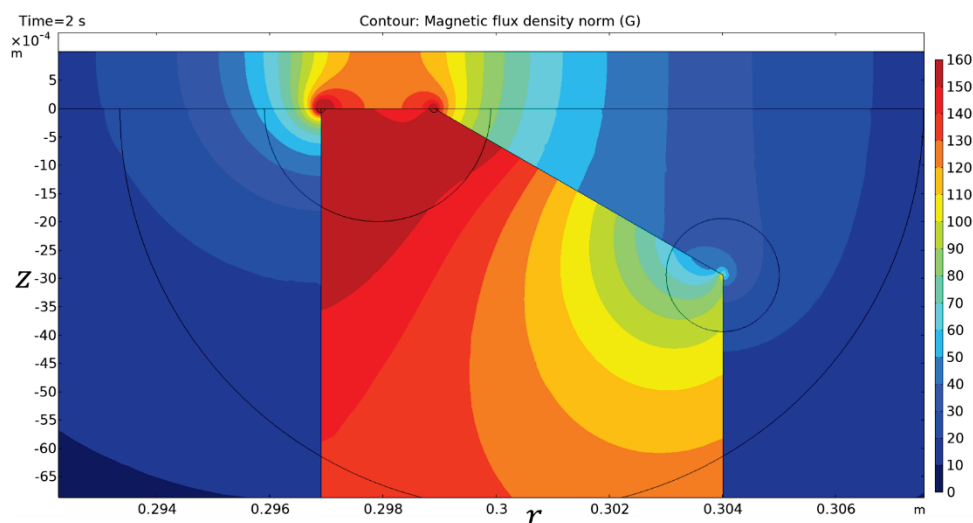


Figur 14. Fältlinjer till  $\mathbf{B}$ -fältet och konturplot till  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet vid  $t = 2$  s och  $B_{bp} = 2$  G.

### 3.2 LJUSBÅGSAVLÄNKNING

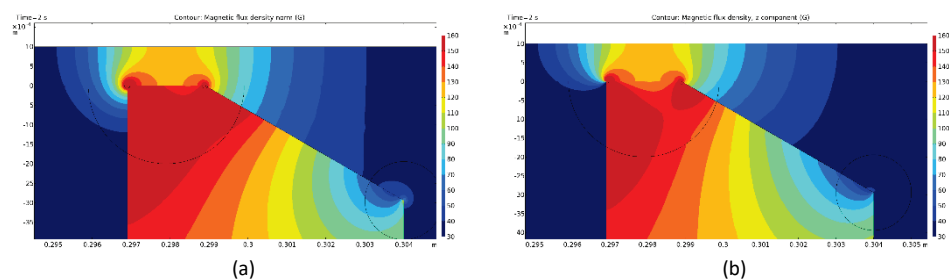
I kapitel 1.4 anges ljusbågsavlänkning för manuell ljusbågssvetsning uppstå då magnetiseringen når ungefär 40 G. Från Figur 15 ses att ett ca 10 mm stort område, ungefärligt centrerat kring rotspalten, uppstår där  $\|\mathbf{B}\| > 40$  G då DN600 röret magnetiseras med bakgrundsfältet  $B_{bp} = 2$  G.





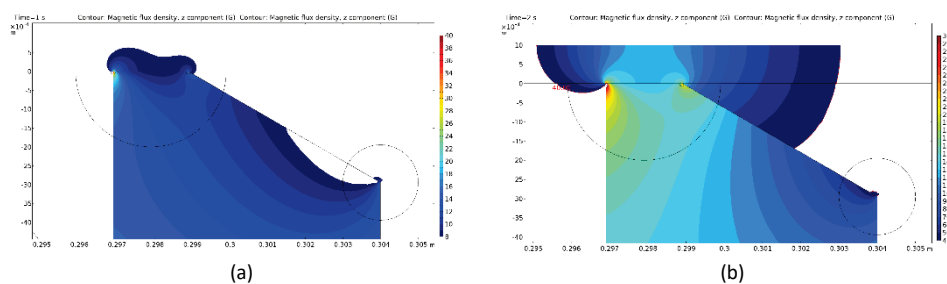
Figur 15.  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet vid  $t = 2$  s och  $B_{bp} = 2$  G.

I område där  $\|\mathbf{B}\| > 40$  G domineras  $\mathbf{B}$ -fältet av z-komponenten, vilket ses genom att jämföra Figur 16a och b. Här ses att området där  $B_z > 40$  G (högra figuren) är ungefär lika stort som området där  $\|\mathbf{B}\| > 40$  G (vänstra figuren). Detta medför att endast den axiella komponenten av magnetfältet behöver mätas då man undersöker om det finns risk för ljusbågsavlänkning, vilket förenklar mätningen.



Figur 16. (a)  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet och (b)  $B_z$  vid  $t = 2$  s och  $B_{bp} = 2$  G.

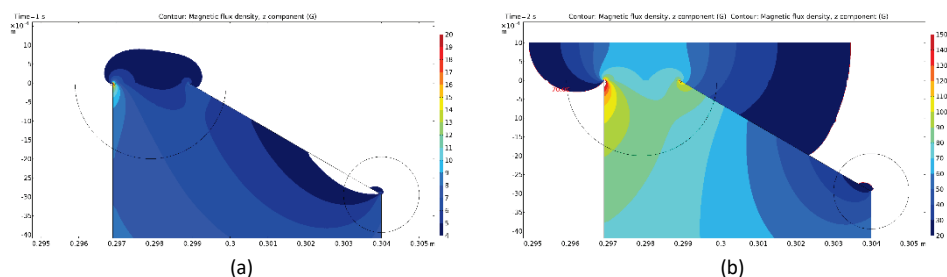
Figur 17 visar den kraftiga förstärkningen av magnetfältet i svetsspalten som sker då rören förs samman till spaltavståndet  $2d_f = 2$  mm efter att de magnetiserats med bakgrundsfältet  $B_{bp} = 2$  G. Den vänstra figuren visar området där  $B_z > 8$  G och  $t = 1$  s, dvs precis efter magnetiseringen och precis före då rören börjar föras samman. Den högra figuren visar området där  $B_z > 40$  G och  $t = 2$  s, dvs när spaltavståndet är  $2d_f = 2$  mm. Denna förstärkning är viktig att ta hänsyn till vid magnetfältsmätningar som görs för att upptäcka risk för ljusbågsavlänkning. Om rören inte är sammanförda, tex om de ligger på ett upplag, så är det inte tröskelvärdet 40 G man ska leta efter. Istället ska man leta efter värden kring  $|B_z| > 8$  G. Här, i det värsta fallet, om den ena rörändan har  $B_z > 8$  G (magnetisknordpol) och den andra rörändan har  $B_z < -8$  G (magnetisksydpol), kommer området där  $B_z > 40$  G då rören har förts samman vara lika stort eller större än det i Figur 17b.



Figur 17. (a)  $B_z > 8$  G vid  $t = 1$  s, (b)  $B_z > 40$  G vid  $t = 2$  s.  $B_{bp} = 2$  G.

### 3.3 LJUSBÄGSINSTABILITET

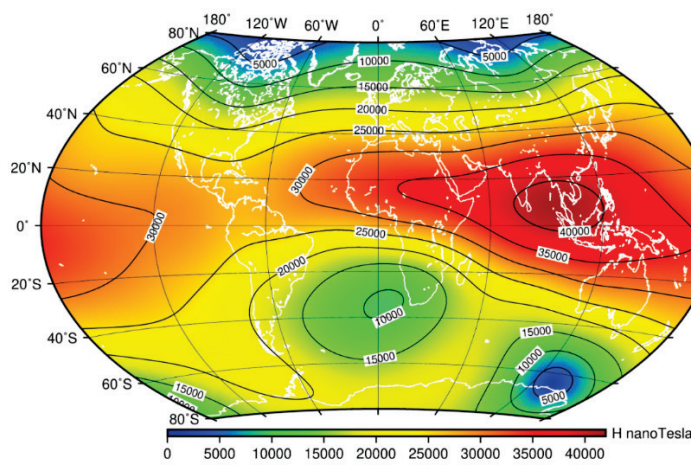
Ljusbågsinstabilitet angavs i kapitel 1.4 uppstå då  $\|\mathbf{B}\| > 20$  G. Figur 18b visar att ett ungefär 10 mm stort område där  $B_z > 20$  G uppstår med det magnetiserade bakgrundsfältet  $B_{bp} = 1.5$  G. Figur 18a visar området där  $B_z > 4$  G vid  $t = 1$  s för magnetiseringen  $B_{bp} = 1.5$  G. Från denna figur ses att en magnetfältsmätare skulle visa ungefär 4 – 5 G vid rätkanten innan sammanföringen.



Figur 18. (a)  $B_z > 4$  G vid  $t = 1$  s, (b)  $B_z > 20$  G vid  $t = 2$  s.  $B_{bp} = 1.5$  G.

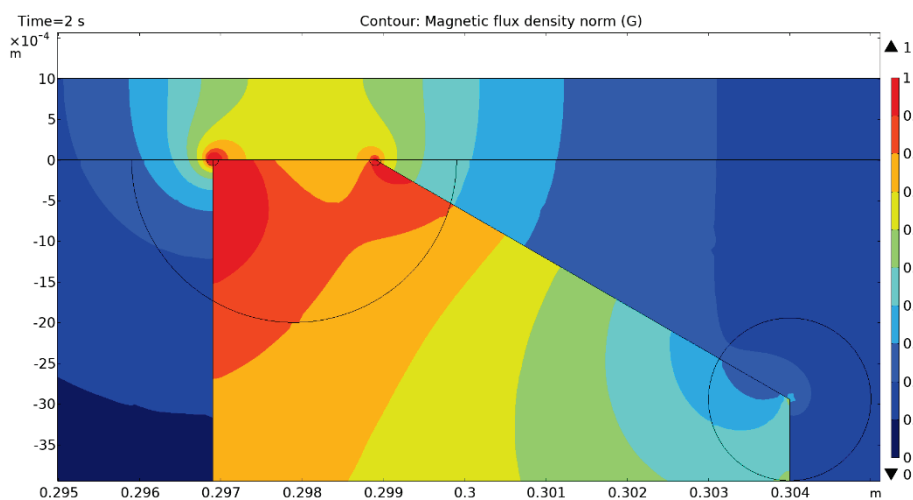
### 3.4 JORDENS MAGNETFÄLT

Det har diskuterats om jordens magnetfält kan ge upphov till en restmagnetism som kan leda till ljusbågsinstabilitet. För att undersöka detta kördes våran modell med  $B_{bp} = 0.15$  G, vilket motsvara den horisontella komponenten av jordens magnetfält i Sverige [14], se Figur 19.



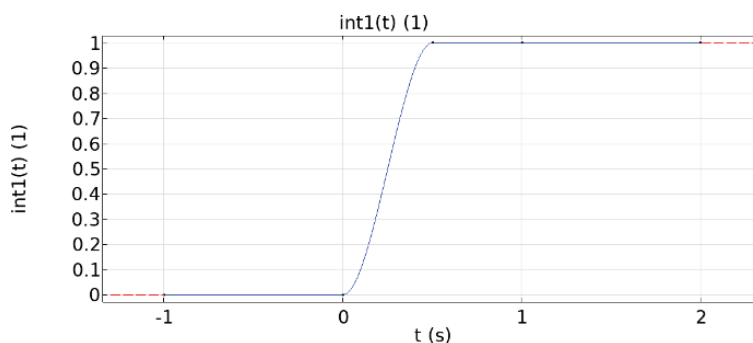
Figur 19. Horisontell komponent hos jordens magnetfält [14].

Figur 20 visar det beräknade  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet vid  $t = 2$  s för  $B_{bp} = 0.15$  G. Enligt magnetiseringscykeln, beskriven i kapitel 2.5.1, kan magnetiseringen i Figur 20 tänkas uppstå då röret först är orienterat vinkelrät mot en av jordens meridianlinjer, för att sedan roteras så att den linjeras upp med meridianlinjen, för att slutligen roteras tillbaka till ursprungsläget. Som ses från figuren resulterar detta i en magnetisering på under 1 G, och det är därför ingen risk att ljusbåginstabilitet kan uppstå.



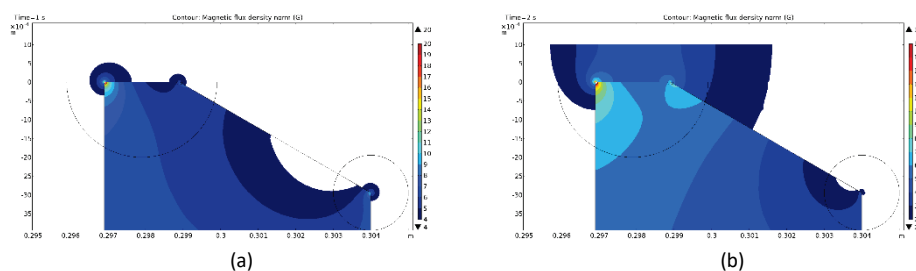
Figur 20.  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet vid  $t = 2$  s, magnetiserat från jordens magnetfält ( $B_{bp} = 0.15$  G).

En mycket starkare magnetisering uppstår om röret inte vrids tillbaka till sitt ursprungsläge, utan förblir tangentiell med meridianen. En sådan magnetisering kan åstadkommas genom att byta ut funktionen  $\text{int1}(t)$  i Figur 4a, och ekvation (2.12) mot  $\text{int1}(t)$  i Figur 21.



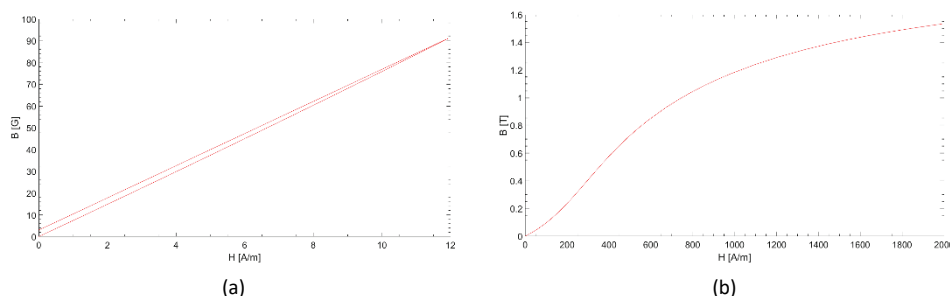
Figur 21. Modifierad  $\text{int1}(t)$  funktion.

Figur 22 visar det beräknade  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet för  $t = 1$  s och  $t = 2$  s, med  $B_{bp} = 0.15$  G och  $\text{int1}(t)$  enligt Figur 21. Magnetfältet är betydligt kraftigare nu när röret förblir linjerat med meridianen (jämför Figur 20 och Figur 22b). Ett 5 mm brett område kring svetspalten har en magnetisering som är större än 20 G, vilket kan innebära risk för ljusbåginstabilitet.



Figur 22. (a)  $\|B\| > 4 \text{ G}$  vid  $t = 1 \text{ s}$ , (b)  $\|B\| > 20 \text{ G}$  vid  $t = 2 \text{ s}$ .

För att förstå varför magnetiseringen är så mycket kraftigare när röret förblir tangentiellt med meridianen, jämför med när den vrids tillbaka till det vinkelräta läget, studeras  $BH$ -kurvan i Figur 23a. Denna  $BH$ -kurva har framställts från JA-modellen i (2.15) genom att öka  $H$ -fältet från noll till  $H = H_{bp} = B_{bp}/\mu_0 = 12 \text{ A/m}$ , och sedan tillbaka till noll igen. Efter denna cykel har en magnetisering på ca 3 G uppstått (se  $B$ -värdet för  $H = 0$  i Figur 23a). Denna cykel motsvarar magnetiseringscykeln till Figur 20. Om istället  $H$ -fältet ökas till  $H = H_{bp}$  och läses där så fås en magnetisering på ca 90 G. Detta är 30 ggr högre än i det tidigare fallet. Denna magnetiseringscykel motsvarar den till Figur 22, och förklarar varför magnetiseringen blir så mycket kraftfullare i det här fallet. Dock måste det påpekas att JA-modellen inte är kalibrerad för dessa små  $H$ -fältet, och kan därför ge stora fel. I Figur 23b visas den initiala magnetiseringskurvan då  $H$  går från noll till 2 kA/m. Denna kurva har en mycket kraftig lutning för små  $H$ -värden, vilket inte kanske är helt korrekt. Magnetfälten i Figur 22 kan därför vara för kraftiga.

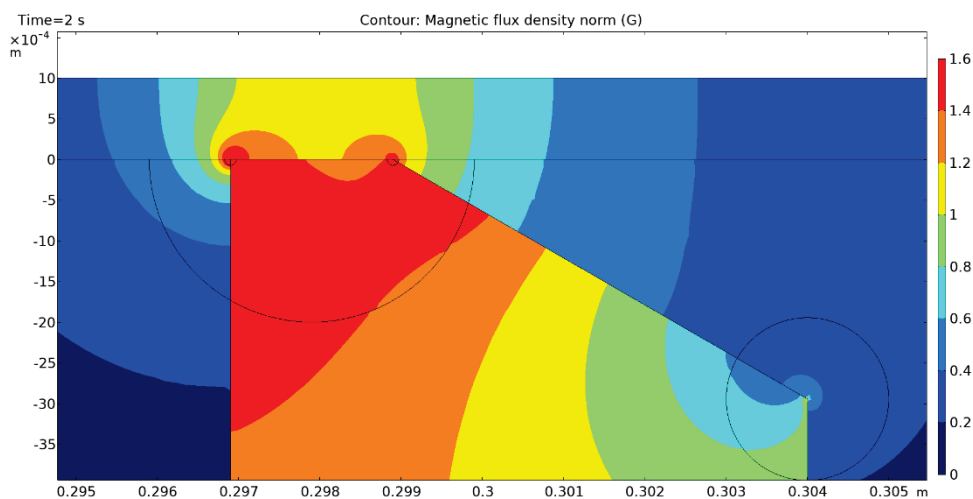


Figur 23. (a)  $BH$  samband beräknat med JA-modellen. Den undre kurvan visar den initiala magnetiseringen för  $0 < H < H_{bp} = 12 \text{ A/m}$ . Den övre kurva visar återgången till  $H = 0$ . (b)  $BH$  samband beräknat med JA-modellen för  $0 < H < 2 \text{ kA/m}$ .

### 3.5 ELKRAFTLEDNINGAR

Det har spekulerats i om elektriska högspänningsledningar kan ge upphov till restmagnetism då stålrören transporteras under dem. Detta är inget som kan beräknas direkt med vår magnetostatiskmodell eftersom magnetfältet från en högspänningsledning är tidsvarierade. Dessutom finns ett tidsvarierande elektriskt fält kring elledningen som är kopplat till det magnetiska fältet via Maxwells ekvationer, vilket inte heller tas hänsyn till i vår magnetostatiskmodell. Men för att grovt uppskatta en kraftlednings inverkan på restmagnetismen i ett stålrör, kör vi det uppmätta magnetfältet från ledningen som ett likformigt bakgrundsfält i vår modell. Mätningar har visat att i februari månad, då strömförbrukningen är som störst, är magnetfältet under 400 kV ledningar (vilket är de största kraftledningarna i Sverige) ca 0.1 – 0.2 G, 1.5 m ovanför marken [15]. När modellen

körs med  $B_{bp} = 0.2$  G fås magnetiseringen i Figur 24. Det maximala magnetfältet i spalten uppgår till ungefär 1.5 G, långt under gränsen för ljusbågsinstabilitet. Notera att detta är en grov uppskattning eftersom ingen hänsyn tagits till tidsvariationerna hos de elektriska och magnetiska fälten. Men det är möjligt att denna tidsvariation ger en lägre magnetisering eftersom fälten kommer hinna byta riktning flera gånger innan röret hunnit transporteras under ledningen.



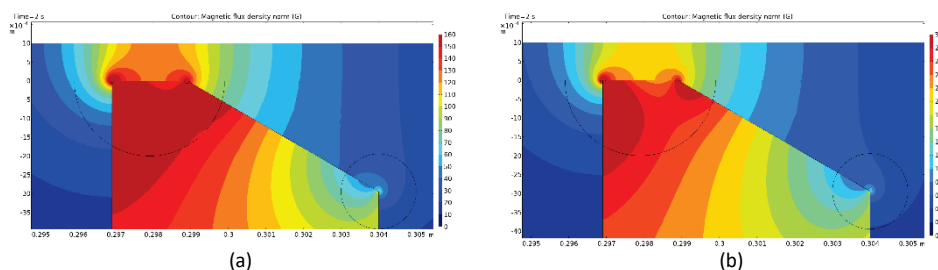
Figur 24.  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet vid  $t = 2$  s, magnetiserat från kraftledning ( $B_{bp} = 0.20$  G).

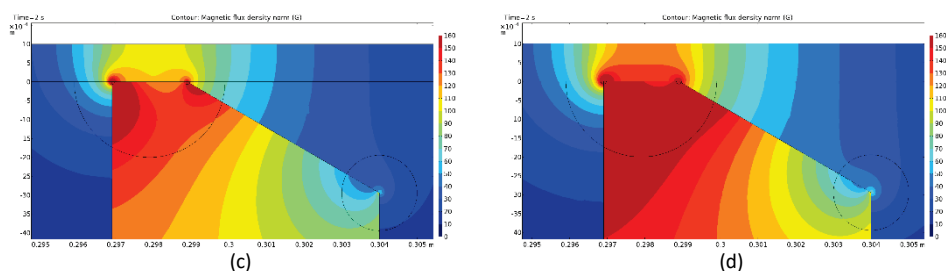
### 3.6 RÖRDIMENSION OCH SPALTGEOMETRI

I detta avsnitt studeras inverkan av rördimensioner och spaltgeometrin på styrkan av magnetfältet i svetspalten. Som jämförelserreferens används som tidigare rördimensionen i Tabell 6 och modelldatan i Tabell 7.

#### 3.6.1 Rörlängd

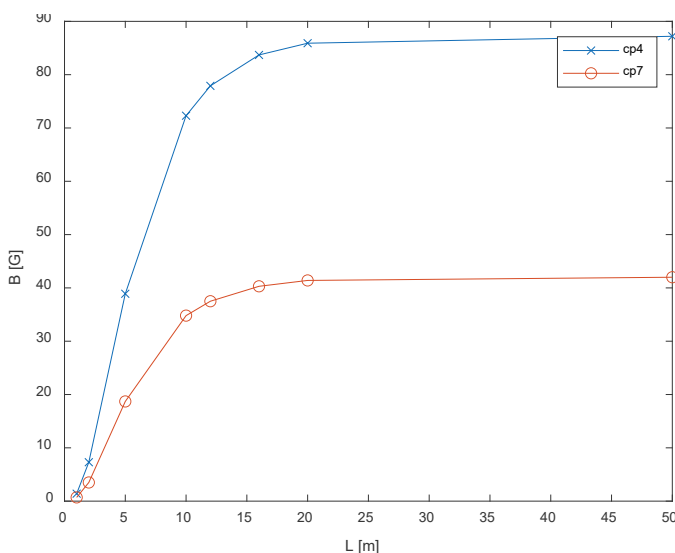
Figur 25 visar  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet vid svetspalten för fyra DN600 rör med längderna:  $L = 16$  (referens), 1, 10 och 20 m, som alla magnetiserats med samma bakgrundsfält ( $B_{bp} = 2$  G). Från figuren ses att det kortaste röret har en markant lägre magnetisering än de övriga rören. Området där  $\|\mathbf{B}\| > 40$  G är ungefär lika stort för rörlängderna 10, 16 och 20 m.





Figur 25.  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet för rörlängderna: a)  $L = 16$  m (referens), b)  $L = 1$  m, c)  $L = 10$  m, och d)  $L = 20$  m.  $t = 2$  s.

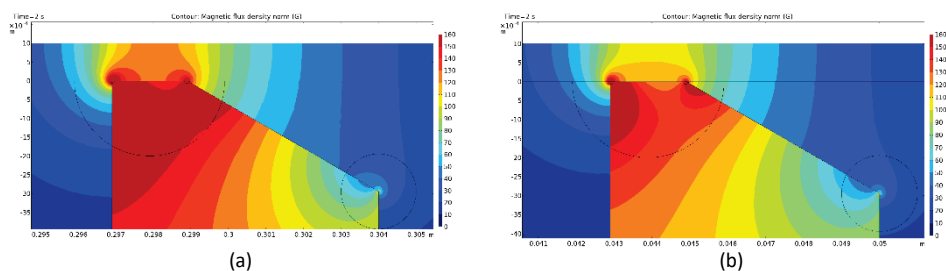
Figur 26 visar värdet av  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet vid  $t = 2$  s, i punkterna cp4 och cp5 (se Figur 11) som funktion av rörlängden  $L$ . Notera det intressanta att  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet blir konstant efter ungefär  $L = 15$  m.

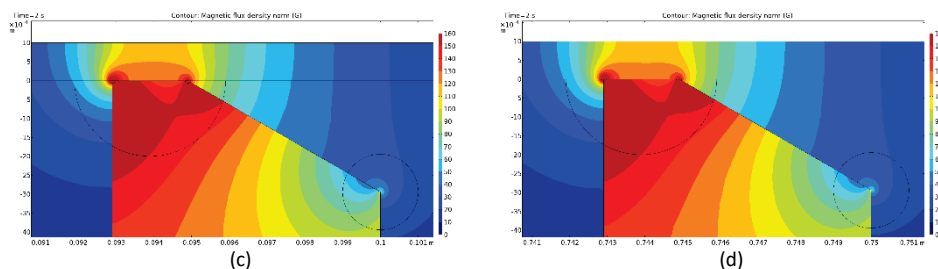


Figur 26. Värdet av  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet i punkterna cp4 och cp5 som funktion av rörlängden.

### 3.6.2 Rördiameter

I Figur 27 visas  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet vid svetspalten för fyra DN600 rör med diametrarna:  $D = 608$  (referens), 100, 200 och 750 mm, som alla magnetiserats med samma bakgrundsfält ( $B_{bp} = 2$  G). Från figuren ses att området där  $\|\mathbf{B}\| > 40$  G är ungefär lika stort för alla rören med de olika diametrarna. Magnetfältet vid rätkanten är också ungefär lika stort för de olika rören. Av detta dras slutsatsen att magnetfältet i svetspalten har liten påverkan av rördiametern.

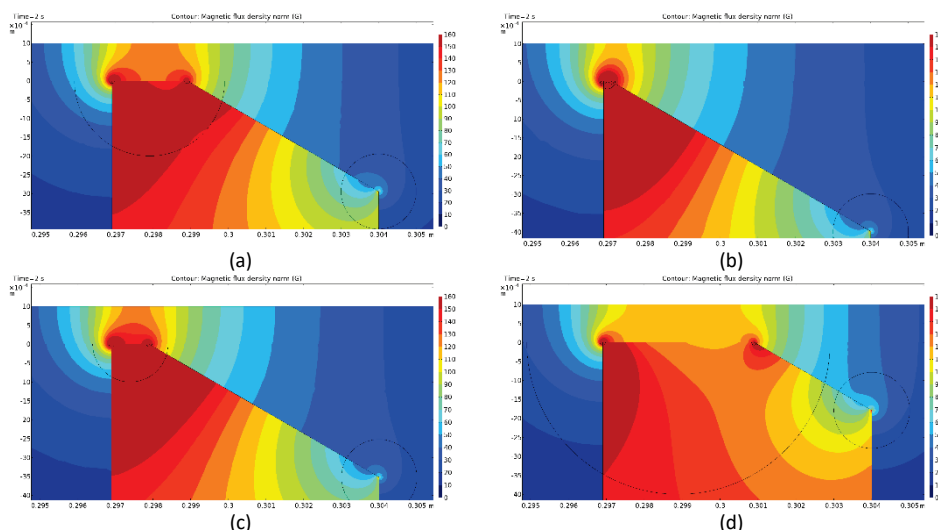




Figur 27.  $\|B\|$ -fältet för rördiametrarna: a)  $D = 608$  mm (referens), b)  $D = 100$  mm, c)  $D = 200$  m, och d)  $D = 750$  m.  $t = 2$  s.

### 3.6.3 Rätkant

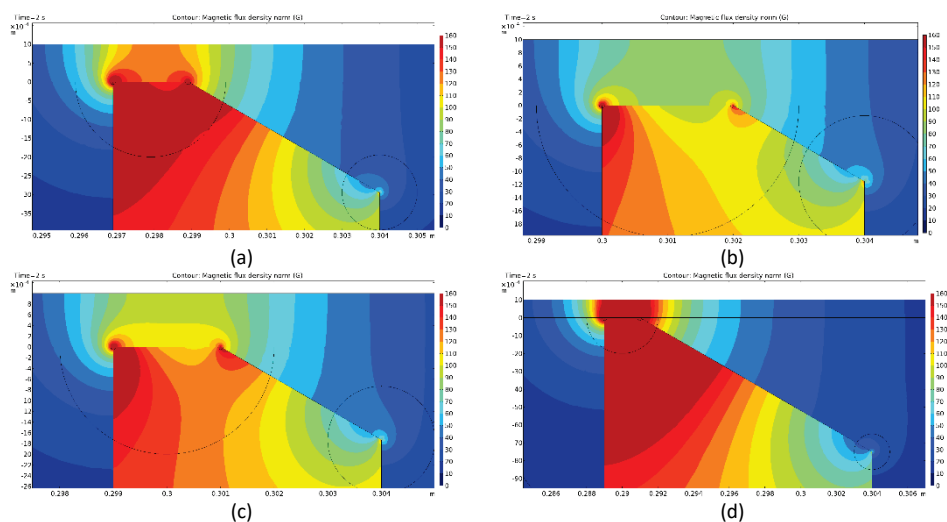
I Figur 28 visas  $\|B\|$ -fältet vid svetspalten för fyra DN600 rör med rätkanterna:  $u = 2$  (referens), 0.2, 1 och 4 mm, som alla magnetiserats med samma bakgrundsfält ( $B_{bp} = 2$  G). Från figuren ses att området där  $\|B\| > 40$  G är ungefär 40% större för röret med  $u = 4$  mm än för röret med  $u = 0.2$  mm. Dock är magnetfältet lite kraftigare i ändarna (hörnena) på rätkanterna då  $u = 0.2$  mm jämfört med  $u = 4$  mm.



Figur 28.  $\|B\|$ -fältet för rätkanterna: a)  $u = 2$  mm (referens), b)  $u = 0.2$  mm, c)  $u = 1$  mm, och d)  $u = 4$  mm.  $t = 2$  s.

### 3.6.4 Godstjocklek

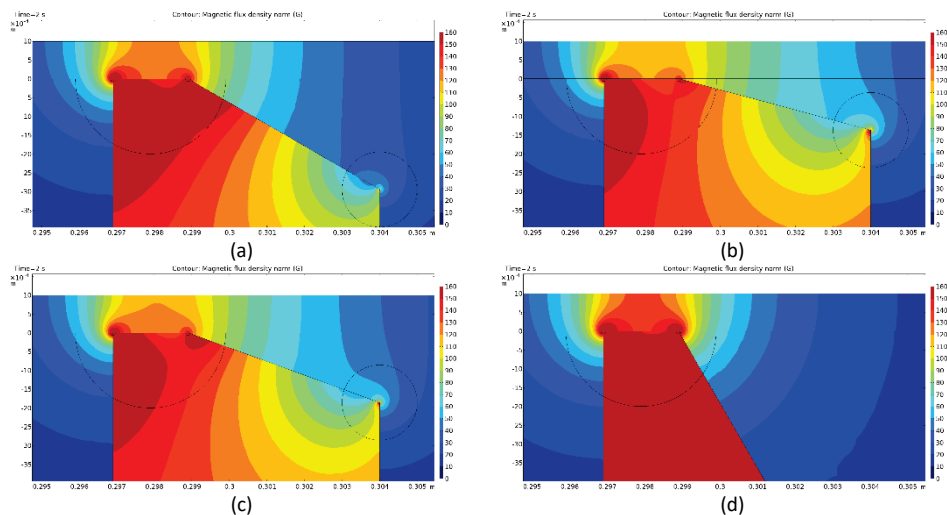
I Figur 29 visas  $\|B\|$ -fältet vid svetspalten för fyra DN600 rör med godstjocklekarna:  $h = 7.1$  (referens), 4, 5 och 15 mm, som alla magnetiserats med samma bakgrundsfält ( $B_{bp} = 2$  G). Från figuren ses att området där  $\|B\| > 40$  G är starkt beroende av godstjockleken. Detta område är ungefär 60% större för  $h = 15$  mm jämfört med  $h = 4$  mm. Magnetfältet ökar också i styrka vid rätkanten då godstjockleken ökar.



Figur 29.  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet för godstjocklekarna: a)  $h = 7.1$  mm (referens), b)  $h = 4$  mm, c)  $h = 5$  mm, och d)  $h = 15$  mm.  $t = 2$  s.

### 3.6.5 Fogvinkel

I Figur 30 visas  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet vid svetsspalten för fyra DN600 rör med fogvinklarna:  $2\theta = 60^\circ$  (referens),  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  och  $120^\circ$ , som alla magnetiserats med samma bakgrundsfält ( $B_{bp} = 2$  G). Från figuren ses att området där  $\|\mathbf{B}\| > 40$  G minskar då  $\theta$  ökas. Tex minskar detta områdes storlek med ungefär 30% då  $\theta$  ökas från  $15^\circ$  till  $60^\circ$ . Dock ökar styrkan litegrann på magnetfältet vid rätkanterna då  $\theta$  ökas.

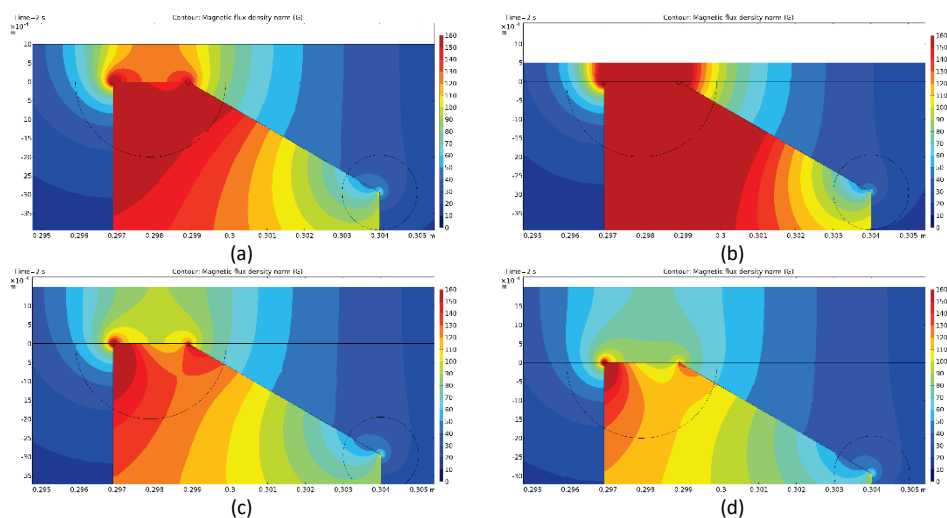


Figur 30.  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet för fogvinklarna: a)  $2\theta = 60^\circ$  (referens), b)  $2\theta = 30^\circ$ , c)  $2\theta = 40^\circ$ , och d)  $2\theta = 120^\circ$ .  $t = 2$  s.

### 3.6.6 Spaltbredd

I Figur 30 visas  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet vid svetsspalten för fyra DN600 rör med spaltbredderna:  $2d_f = 2$  (referens), 1, 3 och 4 mm, som alla magnetiserats med samma bakgrundsfält ( $B_{bp} = 2$  G). Från figuren ses att  $\|\mathbf{B}\|$ -fältet förstärks kraftigt i rotspalten då spaltbredden minskar. Dock minskar storleken på området där  $\|\mathbf{B}\| > 40$  G något när spaltbredden minskar.





Figur 31.  $\|B\|$ -fältet för spaltbredderna: a)  $2d_f = 2$  mm (referens), b)  $2d_f = 1$  mm, c)  $2d_f = 3$  mm, och d)  $2d_f = 4$  mm.  $t = 2$  s.

### 3.7 SAMMANFATTNING AV RESULTAT

Här sammanfattas de viktigaste resultaten från de numeriska beräkningarna i detta kapitel.

- Simulering visar att ett yttre magnetiskt fält med styrkan 2 Gauss eller högre kan magnetisera ett fjärrvärmerör till en sådan nivå att ljusbågsavlänkning kan uppstå.
- Simulering visar att magnetfältet i svetspalten, mellan två magnetiserade rör, kan vara många gånger större än vad det är vid de två motstående rörändarna innan rören förts samman till svetsens spaltavstånd. Detta är viktigt att ta hänsyn till då man mäter risken för ljusbågsavlänkning på fristående rör, ty det uppmätta värdet kan kraftigt ökas då röret förs samman med ett annat magnetiserat rör.
- Ett magnetfält är ett vektorfält med tre komponenter. Styrkan av magnetfältet representeras ofta av dess euklidiska norm, vilket kräver att alla tre komponenterna hos fältet är kända för att kunna bestämmas. Det krävs alltså tre mätningar för att bestämma fältstyrkan i en given punkt, vilket kan vara svårt att utföra. Dock visar numeriska simuleringar att magnetfältets styrka i svetspalten, och vid rörändarnas rätkanter, vilket är det område där ljusbågsavlänkning uppstår, representeras väl av beloppet hos den axiella komponenten hos magnetfältet. Detta medför att endast en mätning krävs för att bestämma fältstyrkan i en given punkt i detta område, vilket förenklar mätningproceduren väsentligt då man kontrollmäter för ljusbågsavlänkning.
- Numeriska beräkningar indikerar att jordens och elkraftledningars magnetfält har en liten inverkan på restmagnetismen i fjärrvärmerör. Deras magnetfält är för svagt för att ge upphov till ljusbågsavlänkning i fjärrvärmerör.
- Numeriska simuleringar visar att magnetfältet i svetspalten är måttligt beroende av rördiameter, rätkantens längd och fogvinkel. Däremot är den kraftigt beroende av godstjocklek och spaltbredd. Den är också kraftigt beroende av rörlängden då längden är mindre än 10 m, därefter avtar beroendet nästan helt.

## 4 Experimentell utrustning och försöksuppställning

I detta kapitel presenteras en robust metod för att mäta magnetfältet vid rörändar och i svetspalter mellan fjärrvärmerör. En försöksuppställning för att undersöka risken med ljusbågsavlänkning redovisas också.

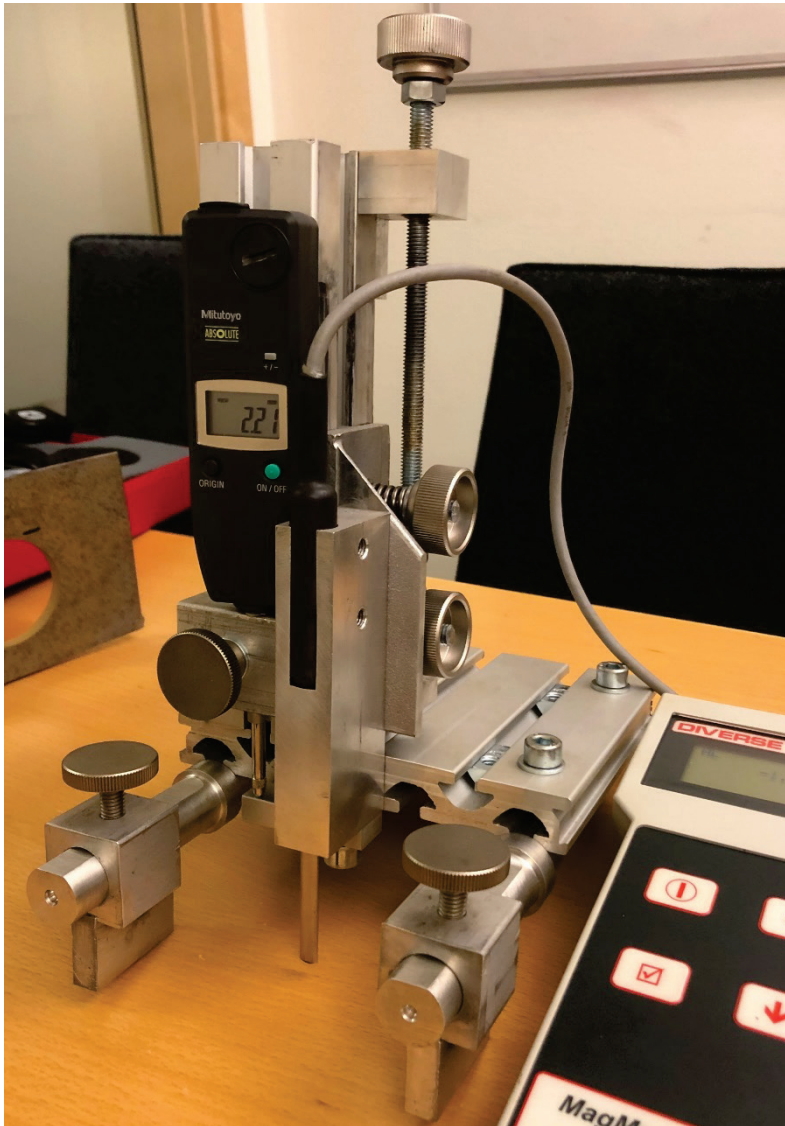
### 4.1 MÄTNING AV MAGNETFÄLT

Magnetfältsmätaren MAGMETER MF300H+, tillverkad av Diverse Technologies & Systems Ltd [16], användes i detta arbete för att utföra magnetfältsmätningar. Denna magnetfältsmätare har en 2 mm bred rostfri mätprobe som mäter **B**-fältets komponent vinkelrät mot mätproben. Detta möjliggör att mätaren kan användas för att mäta  $B_z$ -komponenten i svetspalter som är 2 mm eller bredare.



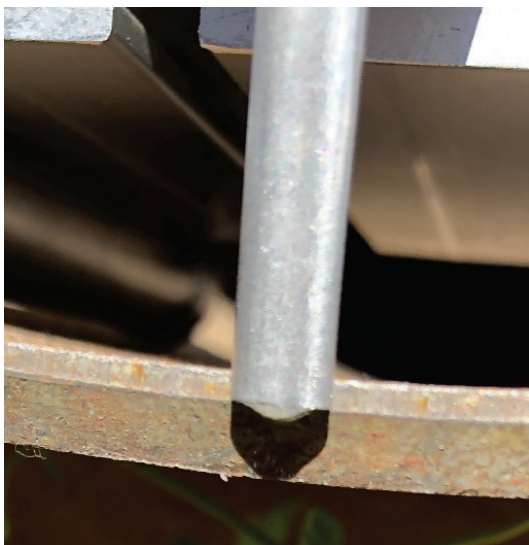
Figur 32. Magnetfältsmätare MAGMETER MF300H+ [16].

Från det föregående kapitlet kunde stora gradienter ses i magnetfältet vid en rörsände. Detta medför att när magnetfältet mäts vid en rörände är dess mätvärde starkt beroende av probens orientering och position. För att ha god kontroll på mätprobens orientering och position utvecklades ett mätstativ som proben kan monteras i, se Figur 33.



Figur 33. Mätstativ.

Med detta mätstativ kan både  $B_z$  (axiella komponenten) och  $B_\theta$  (komponenten i ringled) mätas med hög noggrannhet för en fri rörände, och  $B_z$  komponenten i en svetsspalt. Då mätningar utförs på en fri rörände kan mätstativet placeras både utvändigt och invändigt i röret (om rördiametern är stor nog). Två anslag möjliggör snabb positionering av mätstativet i rörets axiella riktning, och fyra fötter gör att mätproben är orienterad i rörets radiella riktning. Genom att vrida mätproben  $90^\circ$  i mätstativets hållare kan man välja att mäta  $B_z$  eller  $B_\theta$ -komponenten. Med hjälp av en skruv kan mätstativet förflytta mätproben i den radiella riktningen med en noggrannhet av en hundraedels mm.



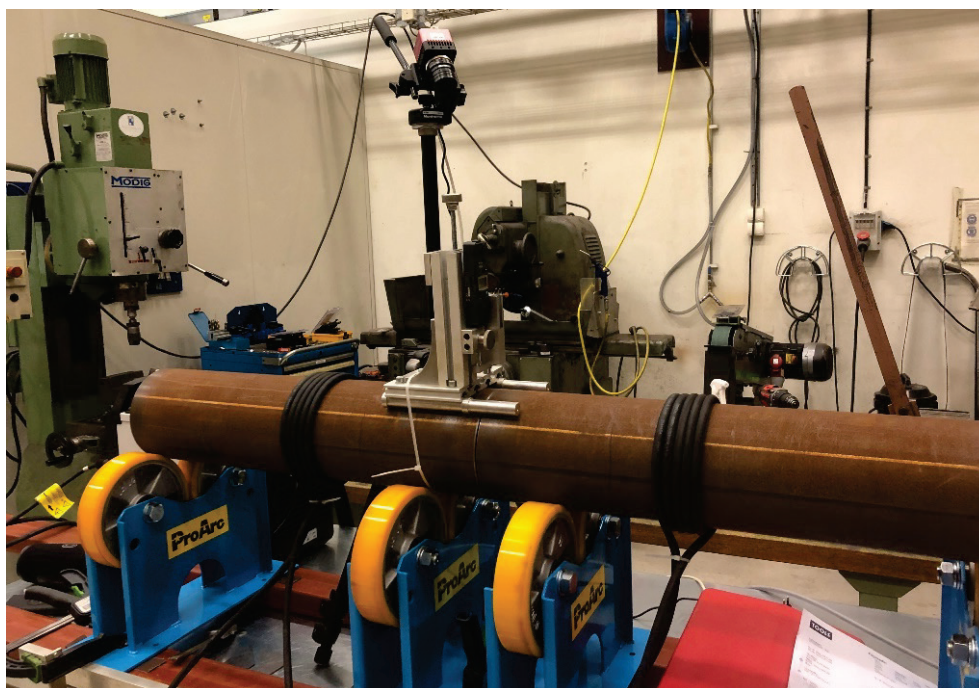
Figur 34. Mätprobe placerad på rättkanten av ett DN600 rör för mätning av  $B_z$ -komponenten. Genom att vrida proben  $90^\circ$  runt dess axel kan  $B_\theta$ -komponenten mätas. Mätstativet som håller proben är placerad inuti i röret.

#### 4.2 FÖRSÖKSUPPSTÄLLNING FÖR UNDERSÖKNING AV LJUSBÅGSINSTABILITET OCH LJUSBÅGSAVLÄNKNING

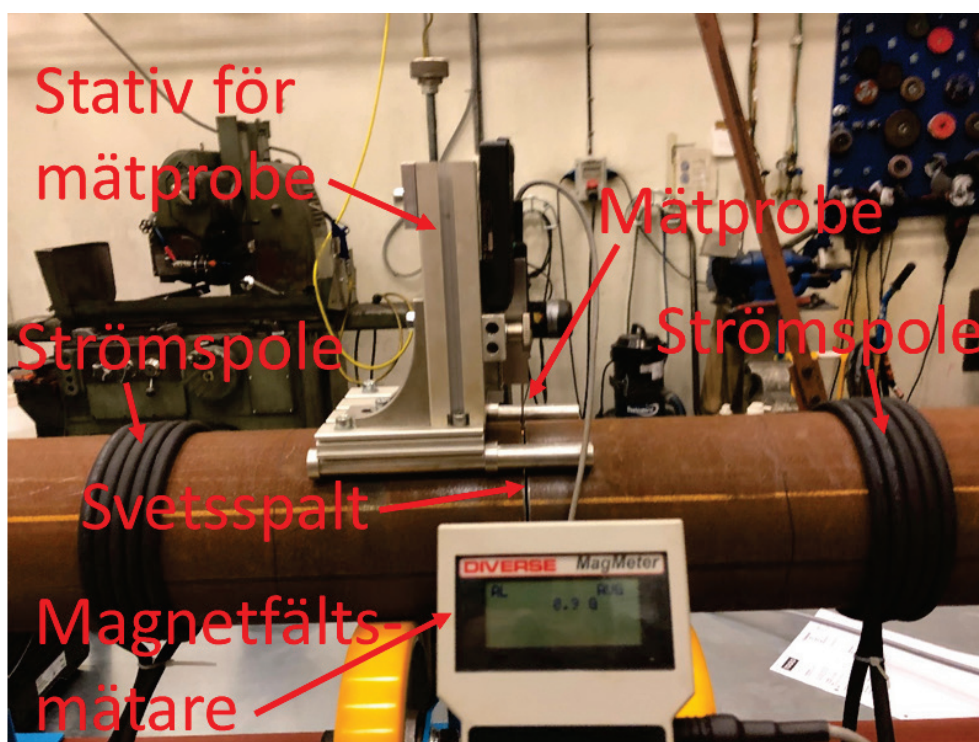
I kapitel 1.4 redovisas tröskelvärden för restmagnetism som kan ge upphov till ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning. Dessa värden är dock angivna inom ganska stora intervall, och är inte relaterade till: svetsströmmens styrka och typ (lik eller växelström), polariteten (då likström används), svetsströmmens spänning, typ av elektrod, typ av material, osv. För att undersöka tröskelvärdena mer noggrant för förhållanden som ofta gäller vid svetsning av fjärrvärmerör utfördes följande försök.

Två DN150 rör, 700 mm långa, magnetiserades till en given nivå, och svetsades sedan samman av en professionell MMA svetsare. Svetsningen utfördes med  $\varnothing 2.5$  mm ESAB OK 48 DC+ elektroder. Svetsmaskinen var en EWM Picotig 200 puls. Rörens godstjocklek var 4 mm och stålsorten P235GH. Rättkanten var 1.5 mm, spaltbredden 2 mm och fogvinkeln  $60^\circ$ . Magnetiseringen utfördes med två elektriska spolar, placerade mitt på rören, se Figur 35 och Figur 36.





Figur 35. Experimentelluppställning.



Figur 36. Experimentelluppställning.

Spolarna är kopplade i serie och lindade på sådant sätt att deras magnetfält som de skapar i rören är orienterade i samma riktning. Spolarna matades med en likström från strömkällan EWM Degauss 600 [17], se Figur 37. EWM Degauss 600 har en

inbyggd avmagnetiseringsfunktion där avmagnetiseringen sker genom att skicka en växelström med avtagande amplitud genom spolarna. Den funktionen användes för att initialt avmagnetisera rören före den föreskrivna magnetiseringen. Efter avmagnetiseringen kunde det maximala axiella magnetfältet i svetsspalten minskas till ett par Gauss. När avmagnetiseringen var färdig skickades en likström genom spolarna där strömstyrkan justerades tills det önskade värdet på magnetfältet i svetsspalten uppnåts. Den önskade magnetiseringen ansågs uppnådd då det maximala uppmätta  $B_z$ -värdet sammanföll med det önskade värdet. Magnetfältet i svetsspalten mätes med mätstativet beskrivet i kapitel 4.1.

Magnetfältet i svetsspalten som skapas med ovanstående metod har små variationer i ringled; maximala variationen av  $B_z$  i ringled är endast ett par Gauss då magnetiseringen är mellan 5 – 100 G. Vidare har det skapade magnetfältet inget tidsberoende; så fort magnetfältet justerats till en given nivå så höll sig denna nivå fix i mer än 10 min (vilket var kontrolltiden) utan att strömmen i spolarna behövde justeras.



Figur 37. EWM Degauss 600 [17].

Då en given magnetisering uppnåts svetsades rören ihop med fyra häftsvetsar. Därefter svetsades 100 mm av rotsträngen. Svetsaren bedömde sedan, utifrån den givna magnetiseringen, på en tiogradigskala hur svårt det var att utföra de olika häftsvetsarna samt rotsträngen.

För att ytterligare studera graden av ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning vid en viss magnetisering så filmades ljusbågen. Till detta användes kameran Photonfocus HD1-D1312-80-G2 med bildhastigheten 54 bilder per sekund. Som filter användes ett NE05A filter i serie med ett NE10A filter.

Även svetsströmmen och dess spänning loggades för att kunna analyseras och ge svar på när ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning uppstår.

## 5 Experimentella resultat

I detta kapitel presenteras resultat från experimentella studier som gjorts i detta projekt. Både resultat från olika magnetfältsmätningar och från prover av ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning redovisas.

### 5.1 MAGNETFÄLTSMÄTNINGAR

Magnetfältsmätningar har utförts på olika fjärrvärmerör hos E.ON i Stockholm. Mätningarna gjordes på tre olika rör: ett DN600 och ett DN400 rör från tillverkaren LOGSTOR, och ett DN300 rör från tillverkaren isoplus. Under mätningarna var rören placerade i ett rörställ, se Figur 38.



Figur 38. De tre olika rören som magnetfältsmätningarna utförts på.

#### 5.1.1 DN600 rör

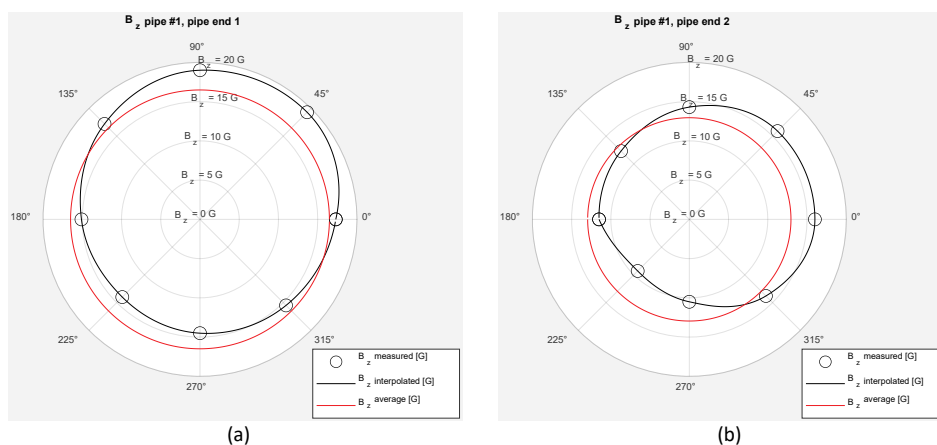
Data för DN600 röret är angivet i Tabell 9 nedan.

Tabell 9. Data för DN600 rör.

Rörtyp	DN600, spiralsvetsad
Tillverkare	LOGSTOR
Material	P235GH
Ytterdiameter	610 mm
Godstjocklek	7.1 mm
Längd	16 m
Rätkant	2 mm
Fogvinkel	60°

Figur 39 visar den uppmätta  $B_z$ -komponenten för åtta lägen (vinklar) i varje ände av röret. De angivna  $B_z$ -värdena är det maximala värdena som uppmäts för de

givna vinklarna. Det har bestämts genom att svepa proben över rätkanten i radiell led för en given vinkel tills maximala värdet funnits, vilket kan göras i inkrement om en hundradels mm med mätstativet i kapitel 4.1. De polära koordinatsystemen i Figur 39 har en positiv orientering (moturs) kring en axeln som pekar från rörände två mot rörände ett. Vidare är  $B_z$  positivt i Figur 39 om det axiella fältet pekar från rörände ett mot rörände två.



Figur 39. Uppmätta maximala värden på  $B_z$ -fältet för DN600 röret i åtta lägen för: (a) ände ett, och (b) ände två.

Från Figur 39 ses att  $B_z$ -fältet varierar något i ringled kring rörets båda ändar. Det maximala värdet ligger vid ungefär  $45^\circ$ , och det minimala värdet vid ungefär  $225^\circ$  för båda rörändarna. Maxvärdet och medelvärde är 19 respektive 17 G för ände ett, och 16 respektive 13 G för ände två. Notera att magnetfältet vid rörändarna på DN600 röret kan påverkas av de tätt omringliggande rören samt att röret ligger nära marken, se Figur 38.

### 5.1.2 DN400 rör

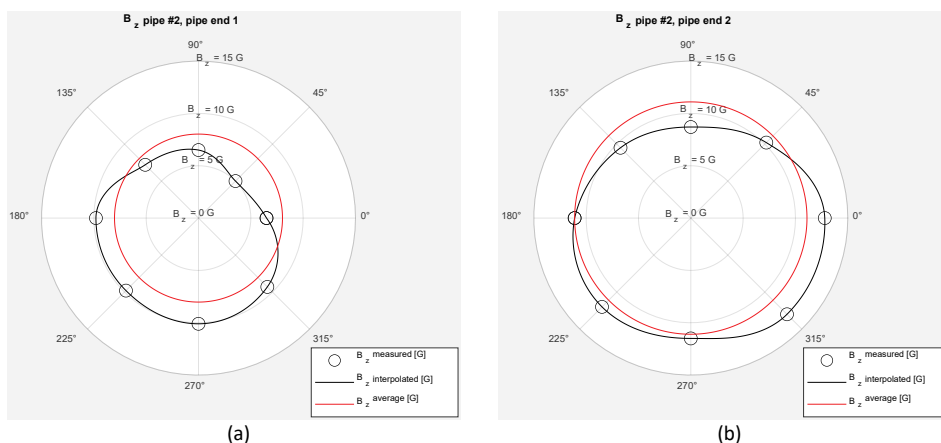
Data för DN400 röret visas i Tabell 10 nedan.

Tabell 10. Data för DN400 rör.

Rörtyp	DN400, raksvetsad
Tillverkare	LOGSTOR
Material	P235GH
Ytterdiameter	406 mm
Godstjocklek	6.3 mm
Längd	16 m
Rätkant	2 mm
Fogvinkel	$60^\circ$

Det uppmätta magnetfältet för DN400 röret visas i Figur 40. Det är svagare än för DN600 röret. Maxvärdet och medelvärde är 10 respektive 8 G för ände ett, och 13 respektive 11 G för ände två.





Figur 40. Uppmätta maximala värden på  $B_z$ -fältet för DN400 röret i åtta lägen för: (a) ände ett, och (b) ände två.

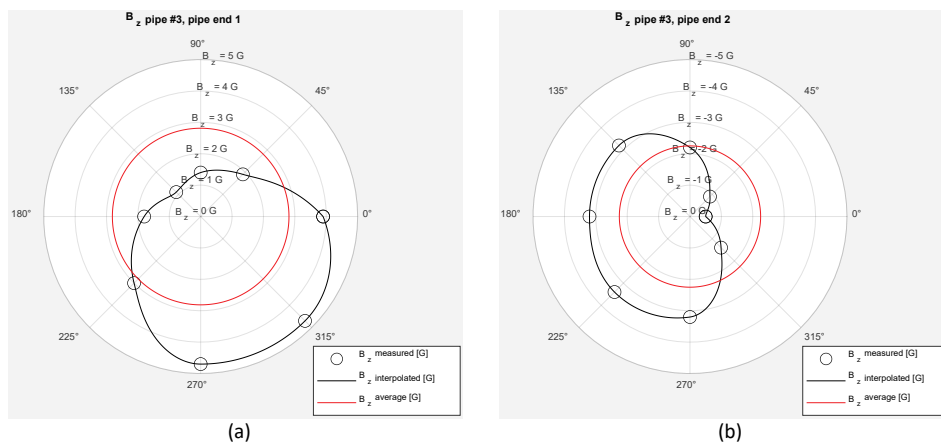
### 5.1.3 DN300 rör

Data för DN300 röret är angivet i Tabell 11 nedan.

Tabell 11. Data för DN300 rör.

Rörtyp	DN300, raxsvetsad
Tillverkare	isoplus
Material	P235GH
Ytterdiameter	324 mm
Godstjocklek	5.6 mm
Längd	12 m
Rätkant	2 mm
Fogvinkel	60°

DN300 röret är det av de tre rören som har lägst magnetisering. Den maximala magnetiseringen är under 5 G, se Figur 41.



Figur 41. Uppmätta maximala värden på  $B_z$ -fältet för DN300 röret i åtta lägen för: (a) ände ett, och (b) ände två.

#### 5.1.4 $B_{\theta}$ -komponent

Magnetfältets  $B_{\theta}$ -komponenten mättes också för de tre ovanstående rören. Den var dock alltid ungefär tre till fem gånger mindre än  $B_z$ -komponenten.

## 5.2 ISOLERINGSPROCESSENS INVERKAN PÅ MAGNETISERINGEN

Det var inte känt om magnetisering kan uppstå då fjärrvärmerören isoleras. För att undersöka detta gjordes mätningar hos fjärrvärmerörtillverkaren Powerpipe Systems AB som använder polyuretan skumisolering. Fem DN250 rör undersöktes, se Tabell 12 för rörspecifikation.

Tabell 12. Data för DN250 rör.

Rörtyp	DN250, raxsvetsad
Tillverkare	Powerpipe
Material	P235GH
Ytterdiameter	273 mm
Godstjocklek	5 mm
Längd	16 m
Rätkant	2 mm
Fogvinkel	60°

Innan rören isolerats mätes magnetfältet i båda ändarna på samma vis som tidigare beskrivits i kapitel 5.1 (men bara på ett ställe och inte åtta som tidigare). Rörid och mätställe märktes ut med en tuschpenna på varje rör. Efter isoleringen mätes magnetfältet igen på samma ställe som före isoleringen. För alla fem rören var skillnaden i magnetfältet före och efter isolering mindre än  $\pm 3$  G för båda ändarna, vilket ligger inom mätfel. Slutsatsen är därför att det inte kan konstateras någon magnetisering från denna isoleringsprocess av DN250 rör.

## 5.3 TRÖSKELVÄRDEN FÖR LJUSBÅGSAVLÄNKNING

I detta avsnitt presenteras resultat för undersökning av ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning i DN150 rör som svetsas DC+ med OK 48 elektroder. Försöksupställningen är redovisad i kapitel 4.2. Fyra olika grader av magnetisering betraktades: 0, 20, 30 och 40 G.

### 5.3.1 Bedömning utifrån svetsaren

Tabell 13 nedan anger på en tiogradig skala svetsarens bedömning av hur svårt det var att utföra varje häftsvets samt den 100 mm långa rotsträngen. Totalt gjordes fem försök med olika grader av magnetisering. När magnetiseringen var under 40 G var svetsströmmen 84 A och spänningen 21 V. Då magnetiseringen var 40 G höjde svetsaren svetsströmmen till 90 A (spänningen var som tidigare 21 V) för att få bättre kontroll på ljusbågen. Notera att svets elektroden ESAB OK 48, diameter 2.5 mm, har en rekommenderad strömstyrka på 70 – 100 A.

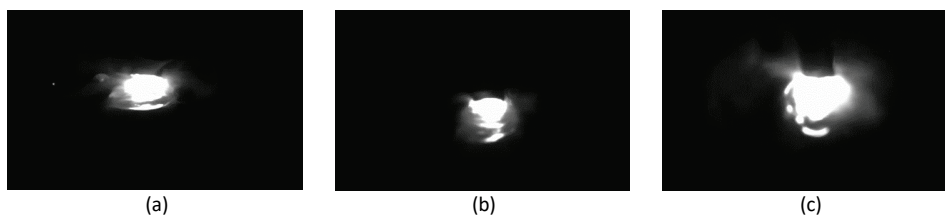
Tabell 13. Svetsarens svårighetsbedömning.

	Svårighetsgrad (1 - 10)				
	Restmagnetism (Gauss)				
	0	20	20	30	40
Häfta 1	1	4 - 5	4 - 5	5 - 6	6 - 7
Häfta 2	1	4 - 5	4 - 5	7 - 8	6 - 7
Häfta 3	1	4 - 5	4 - 5	7 - 8	6 - 7
Häfta 4	1	4 - 5	4 - 5	7 - 8	6 - 7
100 mm svets	1	2 - 3	2 - 3*	4 - 5	5 - 6
* Svårt i starten sedan 2 - 3					

Då magnetiseringen var 0 G (avmagnetiserade rör) kunde svetsaren med lätthet både häfta och svetsa 100 mm av rotsträngen, se första kolumnen i Tabell 13. När magnetiseringen var 20 G kunde svetsaren uppleva vissa problem med ljusbågsinstabilitet, framför allt vid häftsvetsningen och vid starten av den 100 mm långa rotsträngen, se kolumn två och tre i Tabell 13. Vid 30 G magnetisering upplevde svetsaren att häftsvetsningen var svår att utföra, se kolumn fyra i Tabell 13. Vid 40 G var häftsvetsningen så svår att svetsaren höjde svetsströmmen från 84 till 90 A. Detta underlättade häftsvetsningen som nu blev lättare att utföra än när magnetiseringen var 30 G, se kolumn fem i Tabell 13. Dock var det lite svårare att svetsa den 100 mm långa rotsträngen jämfört med 30 G magnetisering.

### 5.3.2 Bedömning utifrån filmad ljusbåge

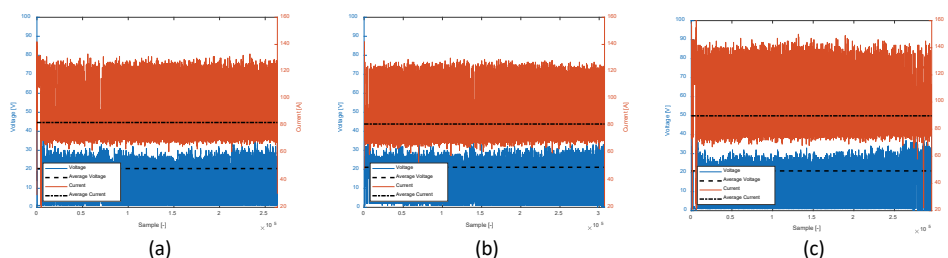
Ljusbågen filmades när den 100 mm långa rotsträngen svetsades för att kunna studera ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning. Från dessa filmer kunde en högre instabilitet hos ljusbågen ses, med mer svetsstänk och ojämn droppövergång, när magnetiseringen var 30 G eller högre. Vid 40 G magnetisering kunde det vid vissa tillfällen ses ljusbågsavlänkning. Den filmade Ljusbågen för 20 G magnetiseringen kunde ses vara lite mer orolig än för ljusbågen då magnetisering är noll. För att studera detta i mer detalj måste en kamera med högre bildhastighet och bättre bakgrundsbelysning användas, vilket kommer göras i ett fortsättningsprojekt.



Figur 42. Stillbilder från filmad ljusbåge vid: (a) 0 G, (b) 20 G, och (c) 40 G.

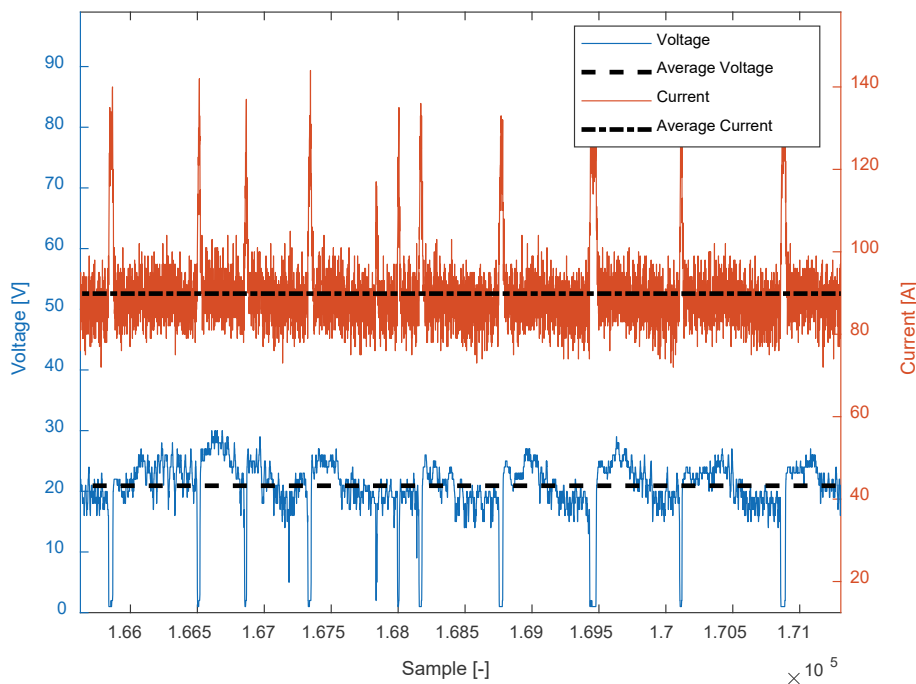
### 5.3.3 Bedömning utifrån ström- och spänningslogg

Svetsströmmen och spänningen loggades under svetsningen av den 100 mm långa rotsträngen. Figur 43 visar resultat av detta då samplingsfrekvensen är 4 kHz. Figur 44 visar en inzoomning av svetsströmmen och spänningen från Figur 43c.



Figur 43. Svetsström och spänning för restmagnetiseringen: (a) 0 G, (b) 20 G, och (c) 40 G.

Ljusbågsinstabilitet påverkar droppövergången och påverkar därför också svetsströmmen. Ljusbågsavlänkning påverkar ljusbåglängden, vilket i sin tur påverkar svetsspänningen. En spektralanalys av svetsströmmen och spänningen kan därför kanske ge värdefull information om graden av ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning. Tyvärr hann vi aldrig studera detta i det här projektet. Det kommer göras i ett fortsättningsprojekt.



Figur 44. Svetsström och spänning vid 40 G restmagnetisering.

#### 5.4 MAGNETISERING PÅ GRUND AV SVETSNING

Det har diskuterats om magnetisering kan uppstå då rören svetsas samman. För att undersöka detta svetsades två 700 mm långa DN150 rör samman med en rotsträng. Efter att svetsen svalnat till rumstemperatur mätes magnetfältet i fyra punkter på vardera änden av de två sammansvetsade rören. Därefter svetsades en andra svets på rotsträngen. Efter att svetsen svalnat mätes magnetfältet igen på samma ställen som tidigare. Tabell 14 visar resultatet av magnetfältsmätningarna före och efter den andra svetsen. Som ses från tabellen ändras magnetfältet bara med 1 – 2 G på grund av svetsningen. Detta är mindre än mätnoggrannheten och därför kan det

konstatera att svetsningen i detta fall inte verkar skapa någon kraftig magnetisering.

Tabell 14. Magnetisering före och efter svetsning av sträng nummer två.

Mätposition (grader)	Magnetism (Gauss)			
	Före svets två		Efter svets två	
	Vänster rörände	Höger rörände	Vänster rörände	Höger rörände
0	2	5	2	6
90	3	1	4	3
180	3	2	3	3
270	1	2	2	4

## 5.5 SAMMANFATTNING AV RESULTAT

Här sammanfattas de viktigaste experimentella resultaten från detta kapitel.

- Magnetfältmätningar gjorda på ett DN600 fjärrvärmerör visade en maximal fältstyrka på ca 20 Gauss vid ena rörändan. För ett DN400 rör uppmätes maximala fältstyrkan till ca 15 Gauss vid ena rörändan, och för ett DN300 rör till ca 5 Gauss vid en av rörändarna. För alla tre rören gällde det att fältstyrkan varierade i ringled. Magnetfältets komponent i ringled var tre till fem gånger mindre än komponenten i axialled för all tre rören.
- Magnetfältmätningar, gjorda före och efter rörisolering av DN250 rör hos Powerpipe, har inte kunnat påvisa att isoleringsprocessen kan ge upphov till stark restmagnetism.
- Magnetfältmätningar, utförda på DN150 rör, har indikerat att svetsprocessen inte ger upphov till stark restmagnetism.
- Experimentella försök har indikerat att ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavläkning uppstår ungefär vid 20 respektive 40 Gauss för DN150 rör.

## 6 Magnetisering hos stålrörstillverkare

De numeriska resultaten från kapitel 3 antyder att restmagnetism som bildas i fjärrvärmerör från jordens eller elektriska ledningars magnetfält inte är stark nog för att leda till problem med ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning. Det verkar också tvivelaktigt att tåg- och lastbilsvagnar, som rören transporteras med, kan vara så kraftig magnetiserade att de i sin tur magnetiserar rören till en nivå som kan leda till svetsproblem. Notera att numeriska simuleringar i kapitel 3 har indikerat att ett axiellt fält på 2 G, med en utsträckning på ett tiotal meter, krävs för att magnetisera ett rör till en nivå så att ljusbågsavlänkning kan uppstå. Det är oklart om en sådan orienterad och utsträckt magnetisering kan existera i tåg- och lastbilsvagnar. Vidare indikerar resultat från kapitel 5.4 att det också är tvivelaktigt att en gradvis magnetisering kan uppstå då flera rör svetsas samman. Resultat från kapitel 5.2 indikerar också att isoleringsprocessen av fjärrvärmerören inte ger upphov till någon större magnetisering. Om vi nu antar att inga magnetiska lyftverktyg använts efter att rören har lämnat stålrörstillverkaren, vilket gäller för rör från tex fjärrvärmerörstillverkaren Powerpipe, så indikerar det ovanstående att starkt magnetiserade fjärrvärmerör har fått sin magnetisering från stålrörstillverkningen. Detta studeras i det följande.

### 6.1 MAGNETISERADE OFÖRSTÖRANDE PROVNING

Som tidigare beskrivits i kapitel 1.6.3 kan restmagnetisering uppstå på flera olika sätt vid tillverkningen av stålrör. I detta kapitel ska vi titta närmare på magnetisering från oförstörande provning, vilket kan ge upphov till mycket stark restmagnetisering.

Stålrörens svetsar (spiral eller längsgående) kontrolleras med oförstörande provning. Även rörändarna kontrolleras med oförstörande provning för att upptäcka tex delaminering. Den oförstörande provningen kan utföras på flera olika vis, tex med: ultraljud, röntgen, virvelström eller magnetisk partikelinspektion. Olika stålrörstillverkare kan använda olika kombinationer av dessa metoder. En del tillverkare använder tex ultraljud och röntgen för att kontrollera rörsvetsen respektive rörändarna. Andra tillverkare använder tex virvelström och magnetisk partikelinspektion för att kontrollera svetsen respektive ändarna. Just virvelströmsprovningen och den magnetiska partikelinspektionen är extra intressanta eftersom de oftast kräver en stark förmagnetisering för att kunna utföras, dvs röret måste magnetiseras innan metoderna kan användas. Magnetiseringen kan uppgå till över 100 G, och det är därför viktigt att röret avmagnetiseras efter att kontrollen är färdig. Avmagnetiseringen kan göras genom att tex föra röret genom en avmagnetiseringstunnel.

### 6.2 UNDERSÖKNING AV MAGNETISERING HOS STÅLRÖRSTILLVERKARE

I Europa finns ett flertal stålrörstillverkare som levererar rör till bland annat fjärrvärmerör. För att undersöka om dessa rörtillverkare använder magnetiserade oförstörande provning, samt hur de hanterar avmagnetisering, skickades

nedanstående frågeformulär ut. Formuläret skickades ut till rörtillverkare som levererar stålror till fjärrvärmerörstillverkaren Poliurs.

#### Questions about the inspection methods for the pipe weld

1. Which method/methods are used to inspect the welds of the pipes?
2. Is every pipe's weld inspected?
3. If ultrasonic testing is performed, is a piezoelectric crystal transducer or an electromagnetic acoustic transducer used?
4. If eddy-current testing (ECT) is used:
  - a. is full saturation ECT used?
  - b. is it performed on every pipe, or just on some pipes per batch?
  - c. if saturated ECT is used, how is the magnetization performed: locally around the weld or all over the pipe?
5. If particle magnetic inspection is used:
  - a. is it performed on every pipe, or just on some pipes per batch?
  - b. how is the magnetization performed: locally around the weld or all over the pipe?
  - c. is the pipe magnetized in both longitudinal and circumferential directions?

#### Questions about demagnetization

1. Is every pipe demagnetized?
2. If demagnetization is performed:
  - a. how is the demagnetization performed: manually or automatically?
  - b. is the demagnetization performed locally around the weld, or all over the pipe? Is this different between spiral and straight welded pipes?
  - c. what is the name of the demagnetization equipment that is used in the plant?
  - d. is the residual magnetism measured after demagnetization? If so:
    - i. how often is it measured: on every pipe, or for some pipes per batch?
    - ii. are the different components of the magnetic field measured (i.e. longitudinal, circumferential, and radial components)?
    - iii. where on the pipe are the measurements done, and what are the maximum levels that are accepted?
    - iv. is beveling performed before or after demagnetization?
    - v. is the residual magnetism measured on the root face? If so, what are the maximum allowed value there?
    - vi. if the allowed residual magnetism on the root face is allowed to be larger than 5 – 7 Gauss, would it be possible with the existing demagnetization equipment to decrease it to 5 – 7 Gauss?
    - vii. are magnetic lifting tools used after demagnetization has been performed? If so, has it been checked how much the magnetic lifting tool magnetize the pipe?
3. Are magnetic lifting tools used during or after the manufacturing process?
4. Are there any steps in the pipe manufacturing process that are known to cause residual magnetization?

Tre av stålverken svarade på frågeformuläret; deras svar är bifogade i bilaga A till denna rapport. Vi har valt att hålla deras namn anonyma, och kallar dem därför stålverk 1, stålverk 2 och stålverk 3. En kort sammanfattning av svaren finns angivet i Tabell 15 nedan.

Tabell 15. Kort sammanfattning av stälverkens svar till frågeformuläret.

Frågor	Stälverk 1	Stälverk 2	Stälverk 3
Används mätad virvelströmsprovning?	Ja	Nej	Nej
Används magnetisk partikelinspektion (MPI)?	Ja	Ja	Nej
Avmagnetisering varje rör?	Ja	Nej, endast för varje MPI testat rör	Nej
Vilken är den maximalt tillåtna avmagnetiseringsnivå?	~20 Gauss	~30 Gauss	-
Finns det möjligt att avmagnetisera till en nivå av 5 - 7 Gauss?	Ja	Nej	-

Stälverk 1 anger att de både använder virvelströmsprovning och magnetiskpartikelinspektion, samt att de avmagnetiserar varje rör. Stälverk 2 anger att de använder magnetisk partikelinspektion och avmagnetiserar varje rör som blivit testad med denna metod. Stälverk 3 använder ingen magnetiserade oförstörande provning och har ingen avmagnetisering.

Från Tabell 15, och svaren i bilagan, ses att avmagnetiseringen efter den oförstörande provningen, kan ske till nivåer om 20 – 30 G. En liknande nivå hittades för ytterligare ett stälverk efter att ha granskat kontrollintyg från ett tiotal stälverk som vi fått tillgång till genom E.ON. Av dessa stälverk var det endast ett som angav en övre gräns för restmagnetiseringen i sitt kontrollintyg. Den gränsen var satt till 30 G. Notera att, i det värsta fallet, om en rörände som har magnetiseringen 20 G (nordpol), förs samman med ett annat rör vars ände är magnetiserat till -20 G (sydpol), kommer magnetfältet i svetsspalten vida överstiga 40 G, vilket inses från avsnitt 3.2. Vidare visar experimenten i avsnitt 5.3, att problem med ljusbågsavlänkning börjar uppstå vid ca 40 G. Maxgränserna om 20 – 30 G för restmagnetism som stälverken tillåter är alltså för höga om man vill vara helt säker på att inte få problem med ljusbågsavlänkning.



## 7 Åtgärdsförslag

I detta kapitel ges förslag på hur problem med ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning i fjärrvärmerör kan minskas.

### 7.1 ÄNDRING AV TEKNISK BESTÄMMELSE

I det föregående kapitlet visades att stålrorstillverkare kan tillåta restmagnetiseringar på upp till 30 G, vilket kan leda till problem med ljusbågsavlänkning. I dagsläget finns ingen standard där en maximalt tillåten gräns för restmagnetiseringen i fjärrvärmerör anges. Däremot anges det i energiföretagens tekniska bestämmelse D:211 Läggningsanvisningar [18]: *”Vidare bör den tilltänkta tillverkaren/leverantören kunna garantera att magnetfältet från eventuell restmagnetism i stälrören inte överstiger 20 Gauss”*. Vi anser att detta är en för hög magnetisering. Om, i värsta fall, en rörände som är en magnetisk nordpol med magnetiseringen 20 G förs samman med en rörände som är en magnetisk sydpol med magnetiseringen -20 G, kommer magnetfältet i svetspalten vara långt över 40 G, vilket kan ge problem med ljusbågsavlänkning (notera att fjärrvärmerör inte kan roteras hur som helst inbördes då de har fuktlarm som behöver passas ihop, därför kan man bli tvingad att montera rörändar med olika magnetiska polariteter). Experimentella försök i detta arbete har visat att ljusbågsavlänkning börjar bli ett problem kring 40 G i svetspalten (se avsnitt 5.3). Vidare, de numeriska beräkningarna i kapitel 3 visar att magnetfältet vid rätkanten förstärks mer än åtta gånger då rören förs samman. Alltså, för att undvika ljusbågsavlänkning får inte restmagnetismen vara högre än ungefär 5 G vid rätkanten (innan röret förts samman med det andra röret).

För att åtgärda detta problem kommer rekommendationer för maxgränser på den tillåtna restmagnetismen efter avmagnetisering att tas fram. Detta kommer ske i ett fortsättningsprojekt som blivit beviljat av Energiforsk. Maxgränser som beror av: rörtyp (diameter, godstjocklek, etc), typ av svets elektrod, svetsmetod (lik- eller växelström), med mera, kommer att bestämmas från försöksupställningen som utvecklats i avsnitt 4.2 i denna rapport. Här det viktigt att vidareutveckla försöksupställningen för att få bort den mänskliga bedömningsfaktorn som kan vara subjektiv. Detta kan göras genom att helt bestämma graden av ljusbågsinstabilitet/ljusbågsavlänkning från tex höghastighetsfilmning av ljusbågen, eller via spektralanalys av svetsströmmen och svetsspänningen, och inte låta svetsaren bedöma svårighetsgraden som vi gjort i avsnitt 5.3.1. Förhoppningen är att då stälverken avmagnetiserar till dessa framtagna maxgränser kommer problemen med ljusbågsavlänkning att minska.

### 7.2 MAGNETFÄLTSMÄTNING HOS FJÄRRVÄRMERÖRSTILLVERKARE

Om ett stälverk inte kan avmagnetisera till den rekommenderade nivån kan ett alternativ vara att fjärrvärmerörstillverkaren mäter magnetismen och märker ut den på röret. Detta kan göras mycket snabbt med mätstativet som utvecklats i denna rapport; att mäta magnetismen i fyra lägen på en rörände kan göras på ca 10 s. Utifrån uppmärkningen på röret av magnetiseringsgraden kan sedan svetsaren

bedöma hur svårt det kommer vara att utföra svetsningen redan innan han börjat med själva svetsningen. Om magnetiseringen är hög kan han då tex välja att använda någon av metoderna i avsnitt 7.3 eller 7.4 nedan.

### **7.3 SVETSNING AV ROTSTRÄNGEN MED VÄXELSTRÖM**

Då restmagnetismen är hög kan rotsträngen svetsas med växelström istället för likström. Detta eftersom växelströmssvetsning är mindre känslig för ljusbågsavlänkning än likströmssvetsning. Dock är växelströmssvetsning ett andra hands alternativ under normala förhållanden eftersom likströmssvetsningen då har en mer kontrollerbar ljusbåge, minder svetsstänk, mer lättstartad och är lättare att svetsa vertikalt med.

### **7.4 ANVÄNDNING AV AVMAGNETISERINGSUTRUSTNING**

Vid mycket höga nivåer av restmagnetism måste avmagnetiseringsutrustning, tex av den typ i försöksuppställningen i avsnitt 4.2, användas. Nackdelen är att sådan utrustning kan vara dyr, svår att transportera speciellt om svetsningen sker nere i en rörgrav, samt att det kan ta tid att sätta upp utrustning: tex att linda spolarna kring rören.

## 8 Slutsatser

I detta arbete har en numerisk beräkningsmodell utvecklats för att studera magnetfältet i och omkring stålrör. Ett mätstativ har utvecklats för att snabbt och robust mäta magnetfältet vid rörändar och i svetspalten mellan två fjärrvärmerör. En försöksuppställning har utvecklats för att undersöka tröskelvärden på restmagnetismen som krävs för att orsaka ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning. Några av de viktigaste resultaten från detta arbete kan sammanfattas enligt följande.

### Numeriska beräkningar:

- Numeriska beräkningar visar att magnetfältet i svetspalten är mycket kraftigare än vad det är vid rörändarna innan rören förts samman. Detta är viktigt att ta hänsyn till då man mäter risken för ljusbågsavlänkning på rör som ännu inte är sammanförda.
- Numeriska beräkningar visar att magnituden av magnetfältet i svetspalten och vid rätkanten representeras väl av beloppet av den axiella komponenten ( $B_z$ ) då rören har blivit magnetiserade av ett axiellt bakgrundsfält. Alltså, om magnetfältets komponent i ringled är liten jämfört med den i axialled (vilket stämt för alla experimentella mätningar i detta arbete), kan magnetfältet kvantifieras både i svetspalten och vid rätkanten genom att endast mäta den axiella komponenten.
- Numeriska beräkningar indikerar att jordens och elkraftledningars magnetfält har en liten inverkan på restmagnetismen i fjärrvärmerör.
- Numeriska simuleringar visar att magnetfältet i svetspalten är måttligt beroende av rördiameter, rätkantens längd och fogvinkel. Däremot är den kraftigt beroende av godstjockleken och spaltbredden. Den är också kraftigt beroende av rörlängden då längden är mindre än 10 m, därefter avtar beroendet nästan helt.

### Magnetfältsmätningar:

- Magnetfältsmätningar på DN250 rör har visat att isoleringsprocessen (som används vid Powerpipe, dvs polyuretan skumisolering) inte ger upphov till någon restmagnetism.
- Magnetfältsmätningar på DN150 rör har visat att när en andra svets läggs på rotsträngen så ger det ingen magnetisering. Alltså verkar inte själva svetsprocessen ge upphov till magnetisering.

### Experimentella undersökningar

- Experimentella försök har indikerat att ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning uppstår ungefär vid 20 respektive 40 G för DN150 rör. Detta när de svetsas med en OK 48 elektrod med diameter 2.5 mm.
- En undersökning visar att det finns stålverk som avmagnetisera sina rör ned till 20 – 30 G efter att ha utfört magnetiserade oförstörande provning. Detta är otillräckliga avmagnetiseringsnivåer för att ljusbågsavlänkning ska helt kunna undvikas.

### Åtgärdsförslag

- Maximala tillåtna gränser för restmagnetismen efter avmagnetisering kommer att tas fram i ett fortsättningsprojekt som beviljats av Energiforsk. Detta kommer att ske med metoder som utvecklats i detta projekt, och med avseende på rördimension och svetsmetod. Förhoppningen är att detta kan ge ett underlag till stålverken på de nivåer de bör avmagnetiserar till, så att problemen med ljusbågsavlänkning kan undvikas.

## 9 Fortsatt arbete

Arbetet i denna rapport har främst varit fokuserat på utveckling av en enkel numerisk beräkningsmodell som kan användas för att öka kunskapen om magnetfältet i svetspalten mellan magnetiserade stålrör. Detta för att utveckla mätmetoder för kontroll av risken för ljusbågsavläkning, men även för att utveckla försöksuppställningar för att finna tröskelvärden på fältstyrkan då ljusbågsavläkning uppstår. En projektfortsättning har blivit beviljat genom projektet "Futureheat - Svetsbarhet av fjärrvärmeapplikationer, en fortsättningsstudie". I fortsättningsprojektet kommer fokus flyttas mot kartläggning av restmagnetism i fjärrvärmerör samt framtagning av tröskelvärden för ljusbågsavläkning för flera olika rörsorter och svetsmetoder. Bland annat planeras följande saker studeras.

- *Kartläggning.* En omfattande kartläggning planeras utföras där fjärrvärmerör som har haft problem med ljusbågsavläkning kartläggs. Bland annat kommer det undersökas om det finns någon koppling mellan fjärrvärmerör med hög restmagnetisering och det följande:
  - *Stålrörstillverkare:* Vilka stålverk kommer rör med hög restmagnetism ifrån? Hur ser produktionen ut vid dessa stålverk?
    - Används magnetiserade oförstörande provning?
    - Avmagnetiseras rören, och om det görs, till vilken nivå?
    - Används magnetisk lyftutrustning, om det görs, har det kontrollerats att restmagnetisering inte kan uppstå på grund av detta?
  - *Transport:* Hur har rör med hög restmagnetism blivit transporterade?
    - Har rören transporterats med tåg, lastbil eller båda?
    - Har magnetiska lyftverktyg använts vid av eller pålastning, om det görs, har det kontrollerats att restmagnetisering inte kan uppstå på grund av dessa?
    - Har rören förvarats på ett mellanupplag?
  - *Isoleringstillverkare:* Vilka isoleringstillverkare kommer rör med hög restmagnetism ifrån? Hur ser produktionen ut vid dessa?
    - Kan isoleringsprocessen som använts ge upphov till restmagnetism?
    - Används magnetisk lyftutrustning, om det görs, har det kontrollerats att restmagnetisering inte kan uppstå?
- *Tröskelvärden för ljusbågsavläkning:* Robusta metoder som bygger på ljusbågsfilmning och spektralanalys av svetsströmmen kommer utvecklas

för att bestämma tröskelvärden då ljusbågsinstabilitet och ljusbågsavlänkning uppstår. Detta kommer göras med avseende på:

- Rörtyp (diameter, godstjocklek, osv), materialsort.
- Typ av svets elektrod.
- Svetsmetod: likström eller växelström.
- *Magnetfältsmätning och numerisk beräkning:*
  - Numeriska beräkningar i detta arbete visar att magnetfältets gradient vid tex hörnen på rätkanten kan vara mycket stor. Eftersom hallgivaren i proben till en magnetfältsmätare har en viss rymdutbredning, kommer denna mäta ett slags medelvärde av magnetfältet över dess volym. Därför är det osäkert hur väl en viss magnetfältprobe kan lösa upp magnetfältet. Detta är mycket viktigt att ha förståelse för då tröskelvärden för ljusbågsinstabilitet mäts. Tröskelvärden ska vara oberoende av vilken mätprobe som användes. Det här kommer att studeras i fortsättnings projektet. Det kommer också studeras vad som skall mätas för att bestämma tröskelvärdet: skall det var maxvärdet i svetspalten, skall det var ett värde från en fix punkt tex 1 mm ovanför det överta hörnet på rätkanten, eller ska det vara ett medelvärde beräknat över en viss volym?
  - I detta arbete har magnetiseringen som ger att ena röränden till svetspalten är magnetisk nordpol och den motstående röränden är magnetisk sydpol, betraktas som den värsta eftersom den anses ge mest avlänkning av plasmata. Men det är också mycket viktigt att betrakta fallet då de båda rörändarna till svetspalten har samma magnetiska polaritet (dvs nordpol-nordpol eller sydpol-sydpol).
  - Det är också viktigt att betrakta den magnetiska permeabilitetens temperaturberoendet vid undersökningen av tröskelvärden för ljusbågsavlänkning. Eftersom den magnetiska permeabiliteten minskar då temperaturen ökas kan detta leda till att magnetfältet förstärkas i det kalla området framför ljusbågen. Detta kan leda till mycket höga magnetfält tex precis innan slutet på rotsträngen. Detta fenomen måste ta hänsyn till då tröskelvärdena bestäms.
  - För att kontrollera om det finns risk för ljusbågsavlänkning kan man mäta magnetfältet på rörändarna innan de fört samman då man vet förstärkningsfaktorn. Rören är då ofta staplade på varandra eller ligger nära marken eller i ett rördike. När man då mäter på rörändar är det viktigt att veta hur dessa faktorer påverka mätresultaten.
  - Numeriska beräkningar från detta arbete har indikerat att jordens och elkraftledningars magnetfält har liten inverkan på magnetiseringen av fjärrvärmerör. Detta måste valideras. Här kan man tex mäta magnetfältet i röränden som funktion av

röretsvinkel mot en meridianlinje för att studera effekten av jordens magnetfält. Eller mäta magnetfältet före och efter att röret transporterats under en kraftledning.

- Den minsta hysteres som användes vid kalibreringen av den numeriska beräkningsmodellen i detta arbete hade värdet  $H_p = 385$  A/m, vilket var det lägsta värde som det anlitate laboratoriet klarade att utföra. Detta är ett ganska högt värde, och det skulle vara bra om modellen även blir kalibrerad mot hysteres med  $H_p = 100$  A/m och  $H_p = 10$  A/m, för att öka modellens noggrannhet vid låga magnetiseringar.
- Beräkningsmodellen i detta arbete har inget tidsberoende. Den kalibrerades mot hysteres kurvor som tagits fram från ett magnetfält som varierar med frekvensen 0.5 Hz. Tidsberoendet borde studera i en framtida studie genom att titta på hysteres framtagna med andra frekvenser.
- Magnetfältets tidsberoende i ett fjärrvärmerör har inte undersökts i detta arbete. I ett framtida arbete vore det mycket intressant att undersöka hur det varierar i tiden om dagar, veckor, månader och år.

## 10 Tack

Författarna är mycket tacksamma för finansieringen från Energiforsk, och vill rikta ett speciellt tack till följande personer:

- Projektets referensgrupp bestående av: Harald Andersson (E.ON), Anders Fransson (Göteborg energi), Martin Linder (Tekniska Verken) och ordförande Magnus Ohlsson (Öresundskraft), för alla intressanta och lärorika diskussioner, och för alla de trevliga mötena.
- Mattias Igestrand, forskningsingenjör på Högskolan Väst, för att delat sin djupa kunskap inom svetsning och för all hjälp med att sätta upp den experimentella utrustningen.
- Östen och Josefine Karlsson, Ställbergs Mekaniska AB, för att vi fick låna deras verkstad för att tillverka mätstativet.
- Peter Norberg, Svetsmaskinservice AB, för att lånat ut avmagnetiserings- och svetsutrustning, samt delat sin djupa kunskap kring svetsproblem relaterade till restmagnetism.
- Karin Liljegren, Powerpipe, för att delat sin djupa kunskap inom fjärrvärmerör och för det mycket trevliga besöket på Powerpipe. Och för alla trevliga och lärorika telefonsamtal. Mycket stort tack också för de rör som vi fick till experimenten, och för materialet som vi fick till toroiderna.
- Niclas De Lorenzi, Stockpipe AB, för intressanta diskussioner kring restmagnetism i fjärrvärmerör, för att skickat ut vårt frågeformulär om magnetism till stålrorstillverkare och för att givit oss svetsdatan som användes vid experimenten med ljusbågsavläkning. Mycket stort tack också för att gett oss kunskap om den tekniska bestämmelsen D:211.
- Stig Vikner, AB Alvenius Industries, för det mycket trevliga besöket på Alvenius där vi fick se hur spiralsvetsade rör tillverkas, och för att vi fick göra magnetfältsmätningar i produktionen.
- Elisabet Bredin Petterson, E.ON, för att ordnat så att vi kunde göra magnetfältsmätningar på fjärrvärmerör. Och för att gett oss tillgång till kontrollcertifikat från flera olika stålrorstillverkare.
- Jonas Ohlsson, Kjell Hurtig, Mats Högström, forskningsingenjörer på Högskolan Väst, för alla intressanta diskussioner, för all hjälp i verkstan och för hjälp med flera andra saker.
- Morgan Nilsen, universitetslektor på Högskolan Väst, för att lånat ut kameran till experimenten med ljusbågsavläkning och för hjälpen med att rigga den.



## 11 Bilaga A

Denna bilaga innehåller svar från de stålverk som svarade på frågeformuläret i avsnitt 6.2.

### 11.1 SVAR FRÅN STÅLVERK 1

#### Questions about the inspection methods for the pipe weld

1. Which method/methods are used to inspect the welds of the pipes? **UT/ET/VT**
2. Is every pipe's weld inspected? **Yes**
3. If ultrasonic testing is performed, is a piezoelectric crystal transducer or an electromagnetic acoustic transducer used? **Piezoelectric**
4. If eddy-current testing (ECT) is used:
  - a. is full saturation ECT used? **YES**
  - b. is it performed on every pipe, or just on some pipes per batch? **Every pipe**
  - c. if saturated ECT is used, how is the magnetization performed: locally around the weld or all over the pipe? **All over the pipe**
5. If particle magnetic inspection is used:
  - a. is it performed on every pipe, or just on some pipes per batch? **1 pipe per strip**
  - b. how is the magnetization performed: locally around the weld or all over the pipe? **All over the pipe**
  - c. is the pipe magnetized in both longitudinal and circumferential directions? **circumferential directions**

#### Questions about demagnetization

1. Is every pipe demagnetized? **Yes**
2. If demagnetization is performed:
  - a. how is the demagnetization performed: manually or automatically? **automatically**
  - b. is the demagnetization performed locally around the weld, or all over the pipe? Is this different between spiral and straight welded pipes? **all over the pipe, we don't have spiral welded pipes**
  - c. what is the name of the demagnetization equipment that is used in the plant? **Pruftechnik**
  - d. is the residual magnetism measured after demagnetization? If so: **Yes**
    - i. how often is it measured: on every pipe, or for some pipes per batch? **1 pipe per strip**
    - ii. are the different components of the magnetic field measured (i.e. longitudinal, circumferential, and radial components)? **not applicable**
    - iii. where on the pipe are the measurements done, and what are the maximum levels that are accepted? **at the end of the pipe, maximum levels that are accepted is according to customer's order**
    - iv. is beveling performed before or after demagnetization? **Before, but the measurements are after beveling**
    - v. is the residual magnetism measured on the root face? If so, what are the maximum allowed value there? **Yes, according to customer's order**
    - vi. if the allowed residual magnetism on the root face is allowed to be larger than 5 – 7 Gauss, would it be possible with the existing demagnetization equipment to decrease it to 5 – 7 Gauss? **Yes, but we don't confirm this to customers**
    - vii. are magnetic lifting tools used after demagnetization has been performed? If so, has it been checked how much the magnetic lifting tool magnetize the pipe? **No,**
3. Are magnetic lifting tools used during or after the manufacturing process? **No**

## 11.2 SVAR FRÅN STÅLVERK 2

### Questions about pipe weld inspection methods

1. What method / methods are used to inspect pipe welds? -

**Answer: ultrasonic testing method**

2. Is the weld seam of each pipe checked?

**Answer: weld inspection is performed on each pipe**

3. If ultrasonic testing is performed, is a piezoelectric crystal transducer or an electromagnetic acoustic transducer used?

**Answer: using a piezoelectric transducer**

4. If eddy current testing (ETC) is used:

**Answer: VTK is not used in the production of pipes at the 159-529 mill**

and. is full saturation ECT used?

b. is this done on every pipe or only on a few pipes in a batch?

c. If saturated ECT is used, how is magnetization performed: locally around the weld or throughout the pipe?

5. If magnetic particle control is used:

**Answer: magnetic particle inspection is used to control the base metal of the end sections (as agreed)**

and. is this done on every pipe or only on a few pipes in a batch?

**Answer: on each pipe**

b. How is magnetization performed: locally around the weld or throughout the pipe?

**Answer: local magnetization - at the end sections of the pipes**

c. Is the pipe magnetized in both the longitudinal and circumferential direction?

**Answer: longitudinal magnetization**

### Demagnetization questions

1. Is each pipe demagnetized?

**Answer: each pipe is demagnetized when using magnetic particle inspection.**

Equipment for demagnetizing pipes "PTS", produced in the Czech Republic, is installed at the site of magnetic particle inspection.

2. If demagnetization is in progress:

and. How is demagnetization performed: manually or automatically?

**Answer: automatically**

b. Is demagnetization performed locally around the weld or across the entire pipe? What is the difference between spiral and straight welded pipes?

### 11.3 SVAR FRÅN STÅLVERK 3

#### Questions about the inspection methods for the pipe weld

1. Which method/methods are used to inspect the welds of the pipes?  
 Round tubes: OD 60,3-114,3mm: ultrasonic testing on the weld seam (optional: full body eddy current testing) + high pressure hydrotesting  
 Round tubes: OD 114,3-219,1mm: ultrasonic testing on the weld seam + high pressure hydrotesting
2. Is every pipe's weld inspected?  
 Yes
3. If ultrasonic testing is performed, is a piezoelectric crystal transducer or an electromagnetic acoustic transducer used?
4. If eddy-current testing (ECT) is used:
  - a. is full saturation ECT used?  
 No, we are testing only ferritic/magnetic materials (black steel)
  - b. is it performed on every pipe, or just on some pipes per batch?  
 Every pipe
  - c. if saturated ECT is used, how is the magnetization performed: locally around the weld or all over the pipe?  
 ----
5. If particle magnetic inspection is used:
  - a. is it performed on every pipe, or just on some pipes per batch?
  - b. how is the magnetization performed: locally around the weld or all over the pipe?
  - c. is the pipe magnetized in both longitudinal and circumferential directions?

#### Questions about demagnetization

1. Is every pipe demagnetized?  
 No, it is not necessary.
2. If demagnetization is performed:
  - a. how is the demagnetization performed: manually or automatically?
  - b. is the demagnetization performed locally around the weld, or all over the pipe? Is this different between spiral and straight welded pipes?
  - c. what is the name of the demagnetization equipment that is used in the plant?
  - d. is the residual magnetism measured after demagnetization? If so:
    - i. how often is it measured: on every pipe, or for some pipes per batch?
    - ii. are the different components of the magnetic field measured (i.e. longitudinal, circumferential, and radial components)?
    - iii. where on the pipe are the measurements done, and what are the maximum levels that are accepted?
    - iv. is beveling performed before or after demagnetization?
    - v. is the residual magnetism measured on the root face? If so, what are the maximum allowed value there?
    - vi. if the allowed residual magnetism on the root face is allowed to be larger than 5 – 7 Gauss, would it be possible with the existing demagnetization equipment to decrease it to 5 – 7 Gauss?

## 12 Referenser

- [1] S. Kou, *Welding Metallurgy*, Wiley, 2002.
- [2] F. F. Chen, *Introduction to plasma physics and controlled fusion*, Springer, 2006.
- [3] Diverse Technologies, [Online]. Available: <https://diverse-technologies.net/arcblow-background/>.
- [4] EWM, [Online]. Available: [https://www.ewm-group.com/assets/docs/PracticalGuide\\_Degaussing\\_EN.pdf](https://www.ewm-group.com/assets/docs/PracticalGuide_Degaussing_EN.pdf).
- [5] J. Coey, *Magnetism and Magnetic Materials*, Cambridge University Press, 2019.
- [6] Wikipedia, [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_domain](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_domain).
- [7] National Pipe Company Ltd, [Online]. Available: [http://www.npc.com.sa/company/info/longitudinal\\_pipe/](http://www.npc.com.sa/company/info/longitudinal_pipe/).
- [8] IBSQ, [Online]. Available: <https://ibsqjsc.com/pipeline/>.
- [9] Comsol AC/DC Module User's Guide, Version: Comsol 5.5, Comsol AB, 2019.
- [10] J.-M. Jin, *The Finite Element Method in Electromagnetics 3rd Edition*, Wiley-IEEE Press, 2014.
- [11] D. J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics 4th Edition*, Cambridge University Press, 2017.
- [12] D. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials 3rd Edition*, CRC Press, 2015.
- [13] LINKUN, [Online]. Available: <http://se.lksteelpipe.com/news/what-s-p235gh-material-23439296.html>.
- [14] British Geological Survey, [Online]. Available: <http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/earthmag.html>.
- [15] Stuk, [Online]. Available: <https://www.stuk.fi/web/sv/teman/eloverforing-och-kraftledning/kraftledning-orsakar-elektriska-och-magnetiska-falt>.
- [16] Diverse Technologies, [Online]. Available: <https://diverse-technologies.net/magmeter-mf300h/>.
- [17] EWM, [Online]. Available: [https://www.ewm-sales.com/sv/Degaussing/Set\\_Degauss\\_600--091-002065-00502.html](https://www.ewm-sales.com/sv/Degaussing/Set_Degauss_600--091-002065-00502.html).
- [18] Energiföretagen, [Online]. Available: <https://www.energiforetagen.se/forlag/fjarrvarme/d211-laggningsanvisningar/>.

## Sökord

Ljusbågsavlänkning, Restmagnetism, Magnetfältsmätning, Rörsvetsning, Svetsbarhet, Fjärrvärmerör, Magnetostatik, Comsol, Jiles-Atherton, ALE.

# SVETSBARHET AV FJÄRRVÄRME- APPLIKATIONER

Restmagnetism kan orsaka stora problem vid svetsning av fjärrvärmeapplikationer. Om restmagnetismen är tillräckligt hög kan den påverka ljusbågen, och orsaka svetsdefekter, det vill säga fel som äventyrar svetsningens användbarhet. Eftersom svetsning är en av de viktigaste metoderna för att sammanfoga fjärrvärmeapplikationer, är det viktigt att ha kontroll på restmagnetismnivåerna för att undvika svetsdefekter.

Här har en numerisk beräkningsmodell utvecklats för att undersöka magnetiska fält i fjärrvärmerör. Modellen har bland annat använts för att undersöka styrkan av det magnetiserade fält som krävs för att magnetisera ett fjärrvärmerör till en sådan nivå att problem kan uppstå vid svetsningen. Modellen har också använts för att studera vilken inverkan som jordens och elkraftledningars magnetfält har på restmagnetismen i fjärrvärmerör.

Forskarna har också utvecklat en robust mätmetod som mäter magnetfältet vid rörändar och i svetsspalten mellan två fjärrvärmerör. Dessutom har en experimentell metod utvecklats för att undersöka vilka tröskelvärden på magnetfältstyrkan som krävs för att orsaka svetsproblem.

## Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin.