

# JERNKONTORETS FORSKNING

Serie	Nr	Datum	Forskningsuppgift nr
D	798	2003-11-13	44095/99

TO44-26  
(MEF03063)

## **OFÖRSTÖRANDE BEDÖMNING AV MATERIALEGENSKAPER**

**Slutrapport av Jan Levén, MEFOS**

**Keywords:** Oförstörande provning, Materialegenskaper, Mätteknik, Virvelström, Laserinducerat ultraljud, Energibesparing  
Nondestructive testing, Material properties, Measurement technology, Eddycurrent, Laser induced ultrasonics, Energy saving

### **SAMMANFATTNING**

En marknadsundersökning har gjorts för att finna instrument lämpliga för oförstörande mätning av materialegenskaper. Sökningen visade att utveckling pågår inom detta teknikområde och att ett antal mer eller mindre färdigutvecklade instrument finns.

Fyra företag har tagit fram materialprover med väldokumenterade materialegenskaper.

Tre virvelströmsinstrument och ett ultraljudsinstrument har utvärderats med hjälp av de framtagna materialproverna. Utvärderingarna visar att instrumenten i flera fall kan mäta den efterfrågade egenskapen. För något fall uppnås den noggrannhet som krävs medan noggrannheten för andra fall inte är tillräcklig.

Ingen av metoderna var dock som sådana lämpliga att testas "on-line" i produktionen. För detta skulle ha erfordrats ytterligare tester och anpassningar, för vilket ekonomiska resurser inte fanns i detta projekt.

Deltagande företag uppger att om ett tillförlitligt instrument finns att tillgå så kan installationen av ett sådant leda till signifikanta energibesparingar.

ISSN 0286-249X

TO44-26  
(MEF03063)

## **INNEHÅLLSFÖRTECKNING**

## **Sida**

<b>1</b>	<b>BAKGRUND</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>MÅL</b>	<b>6</b>
<b>2.1</b>	<b>ENERGIMÅL</b>	<b>6</b>
<b>2.2</b>	<b>ÖVRIGA MÅL</b>	<b>7</b>
<b>2.3</b>	<b>INDIVIDUELLA MÅL FÖR DELTAGANDE I PROJEKTET</b>	<b>7</b>
<b>2.4</b>	<b>ÖVRIG MÅLGRUPP</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>EKONOMI OCH KOMMITTÉARBETE</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>GENOMFÖRANDE</b>	<b>9</b>
<b>4.1</b>	<b>ETABLERING AV SAMARBETSPARTNERS</b>	<b>9</b>
4.1.1	IZFP (INSTITUT FÜR ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFVERFAHREN), SAARBRÜCKEN, TYSKLAND	9
4.1.1.1	Elektromagnetiska metoder	9
4.1.1.2	Ultraljudsmetoder	10
4.1.1.3	Tillämpningar	10
4.1.1.4	Allmänt	11
4.1.1.5	Samarbete	12
4.1.2	UPPSALA UNIVERSITET, INSTITUTIONEN FÖR MATERIALVETENSKAP, AVDELNINGEN SIGNALER OCH SYSTEM	12
4.1.2.2	ALLIN ultrasonic array system	13
4.1.2.3	Samarbete	13
4.1.3	INSTITUTET FÖR METALLFORSKNING AB (IM), STOCKHOLM	14
4.1.4	CONTEST AB, ÖSTERSUND	14
4.1.5	KMK INSTRUMENT AB, VÄSTERÅS	14
4.1.6	LARSON NDT AB, LERUM	15
4.1.7	INSTITUTET FÖR VERKSTADSTEKNISK FORSKNING (IVF), GÖTEBORG	15
4.1.8	JWEISS TECHNIK SWEDEN AB, VARBERG	15
4.1.9	K.J.LAW ENGINEERS INC., NOVI, USA	16
4.1.10	ROHMANN GMBH, FRANKENTHAL, TYSKLAND	16
4.1.11	ABB AUTOMATION TECHNOLOGY PRODUCTS AB, VÄSTERÅS	16

<b>4.2</b>	<b>FASTSTÄLLANDE AV PROVNINGSFÖRFARANDE. BESTÄMNING AV PROVNINGSMATERIAL OCH PROVNINGSUTFÖRANDE.</b>	<b>16</b>
4.2.1	VAL AV MÄTMETOD	16
4.2.2	PROVMATERIAL	17
<b>4.3</b>	<b>GENOMFÖRANDE AV PROVNING</b>	<b>17</b>
<b>4.4</b>	<b>ANALYS AV EXPERIMENTELLT FRAMTAGNA DATA.</b>	<b>18</b>
<b>4.5</b>	<b>FRAMTAGNING AV PROVNINGSMODELLER OCH PROVNINGSPARAMETRAR FÖR DE LÄMPLIGASTE PROVNINGSFALLEN</b>	<b>18</b>
<b>4.6</b>	<b>ETABLERING AV PILOTUTRUSTNING</b>	<b>18</b>
<b>4.7</b>	<b>DRIFTFÖRSÖK</b>	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>RESULTAT</b>	<b>19</b>
<b>5.1</b>	<b>MÄTINSTRUMENT</b>	<b>19</b>
5.1.1	MAGNATEST	19
5.1.2	ELOTTEST	19
5.1.3	VERIMET	20
5.1.4	LUS	20
<b>5.2</b>	<b>MÄTNINGAR</b>	<b>20</b>
5.2.1	AVKOLNINGSDJUP PÅ RÖR AV MJUKGLÖDGAT KULLAGERSTÅL	20
5.2.1.1	Magnatest	21
5.2.1.2	Elotest	22
5.2.1.3	Verimet	22
5.2.1.4	LUS	22
5.2.2	HÅLLFASTHETEN (RM) PÅ VARMVALSADE BAND	23
5.2.2.1	Magnatest	24
5.2.2.2	Elotest	26
5.2.2.3	Verimet	28
5.2.2.4	LUS	28
5.2.3	HÅLLFASTHETEN (Rp02) PÅ KALLVALSADE BAND	29
5.2.3.1	Magnatest	30
5.2.3.2	Elotest	32
5.2.3.3	Verimet	35
5.2.3.4	LUS	36
5.2.4	HÄRDDJUP PÅ CYLINDRISKA SÄTTHÄRDADE PROVSTAVAR	36
5.2.4.1	Magnatest S	37
5.2.4.2	Magnatest D	38

<b>6</b>	<b>DISKUSSION</b>	<b>40</b>
<b>6.1</b>	<b>MÄTNINGAR PÅ RÖR- OCH PLÅTPROVER MED VIRVELSTRÖMSTEKNIK</b>	<b>40</b>
<b>6.2</b>	<b>MÄTNINGAR PÅ RÖR- OCH PLÅTPROVER MED LUS-TEKNIK</b>	<b>40</b>
<b>6.3</b>	<b>MÄTNING PÅ SÄTTHÄRDADE PROVSTAVAR MED VIRVELSTRÖMSTEKNIK</b>	<b>41</b>
<b>7</b>	<b>INDUSTRINYTTA</b>	<b>42</b>
<b>8</b>	<b>ENERGIBESPARINGSASPEKTER</b>	<b>43</b>
<b>9</b>	<b>SLUTSATSER</b>	<b>44</b>
<b>10</b>	<b>TACK</b>	<b>45</b>

## 1 BAKGRUND

Metallografisk undersökning av material för att bestämma dess egenskaper kräver viss tid för uttag av provmaterial och beredning av detta samt är dessutom tidskrävande i sig. Detta innebär att denna form av undersökning blir relativt dyrbar samt att möjligheterna till styrning av pågående process är begränsad. Utförda litteraturundersökningar visar på att oförstörande metoder i allt större omfattning har visat sig experimentellt användbara för tillförlitlig bedömning av olika material-egenskaper.

Med de prestanda bl a snabbhet som dagens elektronikkomponenter erbjuder, finns möjligheterna att verkligen använda mätresultat för styrning av pågående såväl som direkt följande processer även i varmt tillstånd.

I nuläget tas provbitar från för- eller slutände av det processade materialet vilket ej är representativt för produktionen. Provbitar kan ej tas från representativa delar av produkten eftersom denna då förstörs. En oförstörande "on-line"-mätning skulle göra det möjligt att mäta på hela produkten samt se var icke representativa delar som inte uppfyller kraven börjar och slutar.

På MEFOS gjordes en litteraturstudie 1994-1995 med titeln "Styrning av material-egenskaper on-line" [1]. En Jernkontorskommitté vid namn JK4485/94 "Struktur-egenskaper" har berört ämnesområdet [2]. I ett EU-RP4 [3] projekt där IM, SSAB och Outokumpu deltagit har ultraljudsutrustning för egenskapsmätning på varmvalsade band provats.

## 2 MÅL

### 2.1 Energimål

Genom mätning av en produkts egenskaper under produktion fås en säkrare och snabbare kontroll av tillverkningsprocessen så att kassationer och returerna kan undvikas. Detta innebär högre utbyten och mindre recirkulation av material vilket sparar energi.

Genom att undvika att ett ämne med felaktiga materialegenskaper bearbetas kan energi sparas i valsverken.

Projektet ingår också som en verifierande del i projektet "Prediktering av slutegenskaper efter varmbandvalsning", med en energibesparingspotential på 10 GWh/år.

Undersökningar hos deltagande företag bekräftar de siffror gällande potentiell energibesparing som presenteras. Enskilda företags kalkyler är konfidentiella av konkurrensskäl.

Som exempel har ett företag meddelat att 3,5 % av deras produktion i en linje skrotas direkt pga oacceptabla materialegenskaper. Energibesparingen om denna andel i stället kunnat levereras till kund i stället för att tillverkas en gång till skulle bli 1,54 GWh. Ett annat företag har uppgett att 0,5 % av deras produktion kasseras pga felaktiga materialegenskaper som skulle ha kunnat detekteras med OFP-utrustning vilket motsvarar 0,15-0,30 GWh på årsbasis.

En energibesparing uppnås inte genom enbart mätning utav materialegenskaperna utan mätningen måste kopplas till styrning av produktionen på så sätt att uppmätta felaktigheter rättas till snabbt så att mängden tillverkad produkt med oacceptabla egenskaper minimeras.

Energibesparingen kan mätas genom att föra statistik över andelen kasserad produktion före och efter installation av ett mätsystem och i största möjliga mån isolera den inverkan som mätsystemet haft från andra inverkanse faktorer.

## **2.2 Övriga mål**

Att genom utvärdering och provning i verksmiljö fastställa vilka metoder och utrustning för bedömning av materialegenskaper som är möjliga att använda under produktionsmässiga förhållanden. Säkrare underlag för investeringar i tilltänkta utrustningar erhålls.

Förutom de energivinster som görs genom att tillverkning av sekunda eller osäljbart material minimeras leder detta även till att man får ett nytt verktyg för optimerad styrning av tillverkningsprocessen vilket ger utbytesvinster samt säkrare och högre kvalitet på levererade produkter.

## **2.3 Individuella mål för deltagande i projektet**

De deltagande företagen har som huvudmål att öka sin kunskap om OFP-metoder för egenskapsbedömning och att se vilka möjligheter som finns att tillämpa dessa i den egna produktionen. Avsikten är att minska produktionskostnaderna genom minskad energiförbrukning, högre utbyte och högre produktivitet. Dessutom skulle bättre kontroll på materialegenskaperna kunna leda till högre och jämnare kvalitet på de tillverkade produkterna vilket ger konkurrensfördelar.

## **2.4 Övrig målgrupp**

All industri som arbetar med förädling av metalliska material och där materialets inre egenskaper är viktiga.

### 3 EKONOMI OCH KOMMITTÉARBETE

Projektets totala budget var 2 600 kkr varav 800 kkr utgjordes av kontanter från Energimyndigheten och resten av industriinsatser från de deltagande företagen. Av kontantdelen har 50 kkr avsatts för Jernkontorets eget arbete och 750 kkr för forskartid och omkostnader vid MEFOS. Projektet ingick i ”Stålindustrins Värmnings-, Bearbetnings- och Materialpaket 1999-2003”.

Projektarbetet har styrts av en forskningskommitté med representanter från deltagande företag, Jernkontoret och MEFOS. Kommittén har sammanträtt elva gånger enligt Tabell 1. Projektet avslutas med ett seminarium.

Tabell 1 - Sammanställning av aktiviteter inom kommittén STEM4495/99.

<b>Aktivitet</b>	<b>Plats</b>
Möte 1	Jernkontoret, Stockholm
Möte 2	Jernkontoret, Stockholm
Möte 3	Telefonmöte
Möte 4	Telefonmöte
Möte 5	Telefonmöte
Möte 6	Scania, Södertälje
Möte 7	Telefonmöte
Möte 8	Telefonmöte
Möte 9	MEFOS, Luleå
Möte 10	Ovako Steel AB, Hofors
Möte 11	Telefonmöte
Möte 12	Sandvik Material Technology AB, Sandviken
Seminarium	Borlänge

Kommittén har haft följande sammansättning:

Göran Engberg, ordf	SSAB Tunnpå, Borlänge
Ingrid Bengtsson	Wirsbo Stålrör AB, Virsbo
Krister Johansson	Scania AB, Södertälje
Pekka Juuti	SKF AB, Göteborg
Christer Karlsson	SIS, Stockholm
Karin Lamell	Erasteel Kloster AB, Söderfors
Stig Larsson	Outokumpu Copper, Västerås
Bengt Moberg	CSM Materialteknik, Karlskoga
Lars-Ove Skogh	AB Sandvik Materials Technology, Sandviken
Sven Sundberg	Jernkontoret, Stockholm
Ketil Törresvoll	Ovako Steel AB, Hofors
Jan Levén, sekr	MEFOS, Luleå
Bevis Hutchinson, adj	IM, Stockholm



## **4 GENOMFÖRANDE**

Projektet genomfördes utgående från följande arbetsplan:

1. Etablering av samarbetspartners
2. Fastställande av provningsförfarande.
3. Bestämning av provningsmaterial och provningsutförande.
4. Genomförande av provning.
5. Analys av experimentellt framtagna data.
6. Framtagning av provningsmodeller och provningsparametrar för de lämpligaste provningsfallen.
7. Etablering av pilotutrustning.
8. Utföra förändringar, förbättringar av samt att optimera utrustning som är lämplig för fortsatt individuell anpassning hos intresserade verk.
9. Driftförsök.
10. Hos de verk där möjlighet finns inom givna ramar genomförs driftförsök med någon eller några av de funna mätutrustningarna.

### **4.1 Etablering av samarbetspartners**

Här redovisas vilka kontakter som tagits med företag, institut och/eller högskolor för utvärdering av de metoder och framtagning av den utrustning som har de största möjligheterna att ge tekniskt och ekonomiskt utbyte.

#### **4.1.1 IZFP (Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren), Saarbrücken, Tyskland**

Träffade: Dr Eckhardt Schneider och Dr Werner Theiner

IZFP har arbetat med oförstörande provning i mer än 10 år. Man arbetar både med ultraljudsbaserade mätmetoder och mätmetoder baserade på elektromagnetism. Olika mätmetoder kombineras också [4,5].

IZFP samarbetar med Volvo-DAF för att ta fram ett system för mätning av förspänning i skruvar.

IZFP framhöll att det i många fall inte är nödvändigt att ha hög noggrannhet på absolutvärden utan att gradienter och fördelningar ofta är viktigare.

##### **4.1.1.1 Elektromagnetiska metoder**

Följande elektromagnetiska metoder för mätning av materialegenskaper nämndes:

- Virvelström
- Barkhausenbrus

- Inkrementell permeabilitet
- ”Upper harmonics”

Gemensamt för dessa metoder är att de alltid måste kalibreras mot prover med kända värden på den storhet man vill mäta. Ett stort antal provbitar med egenskaper som täcker in hela mätområdet måste tas fram till kalibreringen.

Mätmetoderna är ofta även känsliga för vilket material man mäter på och geometrisk form på mätobjektet vilket måste beaktas vid kalibrering och mätning. Även materialets temperatur påverkar mätparametrarna så att kalibrering måste ske så att temperaturberoenden beaktas.

EMAT-tekniken och magnetiska metoder är endast effektiva upp till materialets Curie-punkt.

#### **4.1.1.2 Ultraljudsmetoder**

Ultraljudsbaserade metoder baseras på mätning av löptider vilka är ett mått på ljudhastigheten vilken är den storhet som har ett samband med den parameter man egentligen vill mäta.

Man påpekade att ljudhastigheten är hälften så hög för skjuvvågor jämfört med longitudinella vågor. Vid löptidsmätningar är därför skjuvvågor att föredra eftersom man med dessa får bättre upplösning i mätningarna.

#### **4.1.1.3 Tillämpningar**

För mätning av hållfasthetsegenskaper fungerar magnetiska metoder bäst på stål medan ultraljudsmetoder fungerar bäst för aluminium.

För Thyssen, Beckerwert har IZFP tagit fram ett system för mätning av anisotropi och flytspänning i kallvalsade band. Anisotropin mäts med ultraljud medan flytspänningen mäts med inkrementell permeabilitet. För flytspänningen har man uppnått en noggrannhet på 5 MPa inom intervallet 120-420 MPa.

IZFP har utvecklat en metod att använda EMAT-teknik (ElektroMagnetic Ultrasonic Testing) för mätning av textur på kalla band.

En vidareutveckling av EMAT-tekniken för restspänningsmätning pågår.

För mätning av hårdhet och härddjup finns inga standardiserade OFP-metoder. Härddjup kan mätas med bakåtspridning av ultraljud (Backscattering). Martensiten vid ytan ger ingen bakåtspridning av ultraljudet medan basmaterialet längre in ger sådan. Genom att mäta löptiden från pulsinduktion till att det bakåtspridda ljudet kommer tillbaka kan man beräkna härddjupet om man vet ljudhastigheten. Sådana

system har levererats till Hägglunds och Daimler-Chrysler. Bakåtspridning är endast lämpligt för mätning av hårdjup över 1 mm. Mätning av lägre hårdjup görs fördelaktigast med elektromagnetiska metoder.

Barkhausenbrus har använts för spänningsmätning. Åkers har köpt ett system för mätning av elastiska egenskaper. Detta system används för att mäta axiella och tangentiella spänningar i valsar. Vid slipningen av valsarna kan uppvärmningen orsaka deformationer så att tryckspänningar övergår i dragspänningar nära valsens yta.

För laserhårdade fyrkantrör hade man tagit fram en metod att mäta hårdhet och hårdjup.

När det gäller avkolning har IZFP inte gjort något utvecklingsarbete. Man nämnde att en fransk grupp försökt med mätningar baserade på inkrementell permeabilitet för ca 10 år sedan.

Fasandelar är lättare att mäta i aluminium än i stål. Man hade mätt andelen aluminiumoxidfibrer i vevaxlar av aluminium som armerats med sådana fibrer. Man kan mäta andelen av ett material som är spritt i ett mjukare basmaterial.

För stål bör det vara möjligt att mäta andelen av hårdare kristaller i ett mjukare basmaterial.

Man vet att fasfördelningen i ett stål påverkar stålets magnetiska egenskaper. En mätmetod som baserar sig på detta kan vara av intresse för framtida utvecklingsarbete.

För ca 10 år sedan utvecklade IZFP ett system för kornstorleksmätning. Systemet rönte magert intresse och man har inte upplevt något ökande behov från industrin.

Om man i glödgningsugnar kunde mäta rekristallisationsgraden skulle energiförbrukningen kunna sänkas genom optimering av glödgningstemperatur och glödgningstid.

IZFP har utvecklat en teknik att överföra och detektera ultraljud över ett luftgap för frekvenser mellan 1-10 MHz. Med hjälp av en luftkudde mellan sensor och mätobjekt kunde man förbättra signal-brusförhållandet med flera tiopotenser.

#### **4.1.1.4 Allmänt**

Geometrin hos mätobjektet kan påverka mätresultatet. Därför bör kalibrering göras för varje aktuell geometri. Om geometrin varierar stort måste olika skräddarsydda sensorer användas för olika geometrier.

#### **4.1.1.5 Samarbete**

IZFP ställde sig positiva till lån eller hyra av instrument. Villkoren för detta fastställs då den tilltänkta applikationen beslutats och beror av vilken mätmetod som bedöms ha störst utsikter att lyckas. IZFP såg det som nödvändigt att få vara med och diskutera mätapplikationen för att kunna ge rekommendationer och påverka valet av mätmetod. Mätapplikationen måste studeras i förhand så att mättekniken kan optimeras med avseende på mätmetod och givarutformning. IZFP angav priset 25000 DM för utvärdering av en materialtyp med något av deras mätsystem.

#### **4.1.2 UPPSALA UNIVERSITET, Institutionen för materialvetenskap, avdelningen signaler och system**

Träffade: Dr Tadeusz Stepinski

Beskrivningen av verksamheten är hämtad från universitetets hemsida.

Vid Signaler och System studerar man metoder och sensorer för oförstörande materialprovning, baserad främst på ultraljud och virvelström. Forskningen är fokuserad på utveckling av nya metoder för analys av de signaler och bilder som erhålls. Exempel på viktiga tillämpningsområden är provning av kritiska komponenter i kärnkraftverk och flygplan. Metoder utvecklade för OFP kan också i många fall användas för medicinska tillämpningar.

Inom BriteEuram-projektet Candia utvecklar man, tillsammans med europeiska flygplans- och helikoptertillverkare, avancerade OFP-metoder för att höja säkerheten hos civila flygplan. I samarbete med det franska företaget Aerospatiale utvecklas en teknik för att tolka resultat vid induktiv provning av nitade förband för flygplanstypen Airbus. EU och NUTEK finansierar projektet.

I samarbete med Svensk Kärnbränslehantering (SKB) utvecklar man metoder för att kontrollera förseglingen av de kapslar som skall användas för permanent lagring av utbränt kärnbränsle [6]. Forskarna har inom detta projekt till uppgift att utveckla nya provningsmetoder för ultraljud och virvelström och teknik för signalbehandling av provningsresultaten. SKB finansierar projektet.

Tillsammans med ABB TRC i Täby, som är en huvudaktör vad gäller provning och säkerhetskontroll av svenska kärnkraftsanläggningar, drivs projekt för utveckling av signalbehandlingsteknik för ultraljudsprovning. Statens kärnkraftinspektion (SKI) är finansiär i detta projekt.

CSM Materialteknik är ett företag som utvecklar nya material och provningsmetoder för flygplansindustrin. Inom ramen för ett flerårigt projekt samarbetar man med detta företag för att utveckla metoder för provning av kompositmaterial. CSM Materialteknik finansierar detta projekt tillsammans med TFR.

#### **4.1.2.1 Ultraljudspektroskopi**

Ultraljudspektroskopi går ut på att skicka ultraljud med olika frekvenser genom en provbit och se hur de olika frekvenserna propagerar och dämpas i materialet. Provbiten ska vara väldefinierad geometriskt.

Provningen går till så att en sändare monterad på ena sidan av materialbiten exciteras med en sinusgenerator vars frekvens varierar. Mottagaren på motsatt sida av provbiten registrerar signalstyrkan hos den transmitterade signalen för de olika frekvenserna och får så fram ett spektrum ur vilket slutsatser om materialkonstanter kan dras.

Provmetoden ger information om provmaterialets alla elastiska egenskaper d v s alla koefficienter i hela C-matrisen.

Uppsala Universitet kommer att under år 2001 införskaffa en sådan apparat från företaget Quasar International Inc.

Uppsala Universitet kan åta sig att göra mätningar på ett begränsat antal materialprover till rimlig kostnad.

#### **4.1.2.2 ALLIN ultrasonic array system**

Ultraljudsfält inducerade av en rad (array) med ultraljudsändare används för inspektion av kopparbehållare tänkta för slutförvaring av kärnbränsle. Av speciellt intresse är inspektionen av svetsfogarna.

#### **4.1.2.3 Samarbete**

Ultraljudsteknik har använts för att bestämma kornstorlek i kopparprover. Vid institutionen kan man tänka sig att för en smärre ersättning göra en analys av ca 10 materialprover med olika kornstorlek och jämföra mätresultat med mikroskopiundersökningar.

Under sommaren 2001 får institutionen sin utrustning för ultraljudspektroskopi. När den tagits i drift finns det möjlighet att göra analyser av materialprover med denna teknik.

Under början av år 2002 kommer institutionen att få en utrustning för ultraljudsmikroskopi vilken också skulle kunna provas efter överenskommelse.

Institutionen är positiv till ett samarbete. Ingen utrustning anpassad för inbyggnad i en tillverkningslinje finns tillgänglig men provbitar kan utvärderas med de utrustningar som finns tillgängliga på institutionen.

Uppsala Universitet erbjuder utvärderingar i sina utrustningar till självkostnadspris, troligen av doktorander.

#### **4.1.3 Institutet för metallforskning AB (IM), Stockholm**

IM kommer att delta i ett europeiskt samarbetsprojekt som syftar till mätning av egenskaper i en tillverkningslinje. Med anledning av detta, och förhoppningsvis andra tillämpningar, har IM investerat i en utrustning baserad på laserinducerat ultraljud (LUS) [7]. En liknande utrustning har provats i ett tidigare projekt där den installerades i SSAB Tunnbränsle bredbandverk. Dessa prov visade att mätprincipen fungerade så till vida att rimliga signaler erhöles och att dessa verkade ha ett samband med de önskade egenskapsparametrarna.

Instrumentet kommer till en början att vara stationerat på IM för upplärning och laboratorieprov. I ett senare skede är det tänkt att prova instrumentet i någon tillverkningslinje. IM är även positivt till att instrumentet så småningom provas även i andra projekt där det kan tänkas vara relevant.

#### **4.1.4 Contest AB, Östersund**

Magnetic Analysis Corp.(MAC) och Bergstrand Innovation AB har bildat Magnetic Analysis Nordic AB som tagit över Contest ABs verksamhet.

Contest har varit inriktat på detektering av ytfel med virvelström och inneslutningar med ultraljud.

MAC har instrument för mätning av egenskaper och är generösa vid lån och utvärdering av instrument. Exempel på egenskaper som kan detekteras är legering, hårdhet, härddjup, kornstorlek, värmebehandling, beläggningstjocklek mm.

#### **4.1.5 KMK instrument AB, Västerås**

KMK Instrument AB representerar Dr Förster i Sverige [8]. Man kan erbjuda följande system för mätning av egenskaper:

- **Magnatest** Etablerad metod för mätning av t ex härddjup, hårdhet och brottgräns. Ett nytt digitalt instrument är under introduktion som mäter upp till fyra egenskaper samtidigt.
- **Ultraljud** Detektering av sprickor och inneslutningar.
- **Magnetpulver** Detektering av sprickor på geometriskt komplicerade produkter.
- **Metorex** Spektrometersystem för materialanalys.

Magnatest ska kalibreras med 20 referensdetaljer som har kända egenskaper med god spridning. Metoden är känslig för variationer i legering och geometri. KMK

Instrument AB kan förmedla uthyrning av ett instrument samt erbjuda utbildning i handhavande av instrumentet.

KMK Instrument AB kan hyra ut mätsystem till priset 2 % av inköpspriset per hyrvecka. Upplärningstiden för instrumentet är 2-3 dagar.

#### **4.1.6 Larson NDT AB, Lerum**

Larson NDT AB har utvecklat ett nytt PC-baserat system för mätning av hårdhet och härddjup. Företaget har också levererat ett system för mätning av karbidtäthet i band till Sandvik. Ett projekt för mätning av hårdhet på bågfilmsbladständer pågår i samarbete med Bacho.

Larson NDT AB är positiva till att hyra ut ett instrument men måste ta ut full debitering för det arbete man lägger ned för att ta fram ett instrument och givare för den aktuella tillämpningen.

Larson NDT AB kan åta sig att utvärdera det nya PC-baserade mätsystemet mot en materialtyp till kostnaden 55 000 kr.

#### **4.1.7 Institutet för verkstadsteknisk forskning (IVF), Göteborg**

IVF använder röntgendiffraktion för restspänningsmätning. Mätning av härddjup och ythårdhet förekommer i något projekt. IVF meddelar att Hägglunds har en ultraljudanläggning från Fraunhofer-institutet (IZFP) för mätning av härddjup och att Scania har en Barkhausenutrustning som bl a används för att kontrollera slipade ytor och för att mäta grafitnodulstorlek i gjutjärn.

#### **4.1.8 JWeiss Technik Sweden AB, Varberg**

En intressant mätmetod kallad "Non Linear Harmonics Analysis" rapporterades av Stegemann m fl vid Institute of Nuclear Engineering and Non Destructive Testing (IKPH) vid universitetet i Hannover [9]. Med denna elektromagnetiska mätmetod som fungerar på magnetiskt material har man kunnat mäta brottgräns, flytspänning, anisotropi, hårdhet och härddjup.

JWeiss Technik Sweden AB har kontaktats som representant för den mätteknik som tagits fram vid Institute of Nuclear Engineering and Non Destructive Testing (IKPH) vid universitetet i Hannover. Ett företag vid namn DELTATEST i Hambühren i Tyskland marknadsförde också systemet.

Industriella referensinstallationer finns men systemet finns inte som serietillverkade enheter utan varje leverans måste skräddarsys för sin applikation. JWeiss Technik Sweden AB erbjuder sig att offerera en genomförbarhetsstudie omfattande en eller två

plåtmaterialdimensioner. I förhand uppskattades priset till intervallet 40 000-50 000 DM.

#### **4.1.9 K.J.Law Engineers Inc., Novi, USA**

K.J.Law Engineers Inc. tillverkar ett virvelströmbaserat instrument för provning av ferromagnetiska metaller och legeringar.

Bengt Moberg har erbjudit kommittén att komma med provmaterial till Karlskoga och göra prov med K.J.Laws instrument VERIMET 7700.

#### **4.1.10 Rohmann GmbH, Frankenthal, Tyskland**

Rohmann GmbH tillverkar också ett virvelströmbaserats instrument benämnt Elostest B1. Instrumentet ställdes till kommitténs förfogande av SKF för provning på befintligt provmaterial.

#### **4.1.11 ABB Automation Technology Products AB, Västerås**

Vid ABB pågår utveckling av elektromagnetisk mätteknik som mäter resistivitet och permeabilitet hos provmaterialet. Applikationer är tjockleks- och breddmätning på plåt samt dimensionsmätning på varmvalsad stång. Utvecklingen sker på lång sikt och för varje applikation måste stor möda läggas på signaltolkning och förståelse av hur signalvariationer hänger ihop med variationer hos den egenskap man vill mäta.

Metoden kallas "Pulsed Eddy Current Technique (PECT)" och innebär att man i stället för en kontinuerlig virvelströmsinduktion inducerar pulser och analyserar det elektromagnetiska svaret från dessa pulser [10].

### **4.2 Fastställande av provningsförfarande. Bestämning av provningsmaterial och provningsutförande.**

#### **4.2.1 Val av mätmetod**

Projektarbetet hade lett till kontakter med ett tiotal forskningsinstitut och företag. Inget företag hade en färdig produkt som man kunde garantera att den fungerade för den sökta tillämpningen. Samtliga metoder bygger på kalibrering mot provbitar med kända egenskaper. Metoderna kan också vara känsliga för störningar som varierande godstjocklek eller varierande materialsammansättning. För några av metoderna fanns artiklar som beskrev användning i tillverkningslinjer men ingen av kunde lova att det skulle fungera direkt utan ville att kalibrering skulle genomföras med väldokumenterade provbitar.



De institut där man ägnat störst möda åt utveckling av mätmetoderna för material-egenskapsanalys var IZFP i Saarbrücken och IKPH i Hannover. Tyvärr var kostnaden för att gå vidare och prova deras utrustningar för hög för att rymmas i föreliggande projekt.

Kommittén beslöt att låna eller hyra något av de virvelströmsinstrument som finns på marknaden och i första hand prova dem i lab-miljö på provbitar som tagits fram för detta ändamål.

Det visade sig också att några kommittémedlemmar hade virvelströmsinstrument som användes för andra ändamål men som kunde lånas ut för provning inom detta projekt.

Mot slutet av projektet blev IMs ultraljudsutrustning (LUS) tillgänglig och kommittén beslöt att även låta göra laboratorieprov med detta instrument.

#### **4.2.2 Provmaterial**

Tre av de deltagande företagen tillhandahöll provmaterial för provning på MEFOS:

- Ovako bidrog med 28 stycken provbitar från varmvalsade rör. Proverna hade längden 300 mm, ytterdiametern 88,6 mm och innerdiametern 72,7 mm. Proverna hade genom olika behandling fått olika avkolningsdjup. Några av proverna hade slipad yttersida men de flesta hade glödskaletsrester kvar.
- Sandvik bidrog med 24 stycken plåtbitar klippta från kallvalsade band. Plåtarna var klippta så att de täckte hela det ursprungliga bandets bredd på 330 mm eller 345 mm. Plåtbitarnas längd varierade mellan 50 till 300 ca 600 mm. Tjockleken var 0,6 mm ±0.02 mm.
- SSAB bidrog med 12 stycken plåtbitar klippta från varmvalsade band. Plåtarna var klippta så att de täckte hela det ursprungliga bandets bredd på 1000 mm. Plåtbitarnas längd var ca 300 mm. Tjockleken var ca 6 mm och plåtarna hade glödskaletsrester kvar.
- Scania har tagit fram provmaterial och genomfört provning i egen regi men vars resultat ställs till kommitténs förfogande.

#### **4.3 Genomförande av provning**

Provningen genomfördes enligt följande:

- MEFOS utförde provning med Dr Försters Magnatest- instrument och med Rohmanns Elotest- instrument.
- CSM Materialteknik utförde provning med K.J.Laws Verimet-instrument.
- IM utförde prov med sitt LUS- instrument.
- Scania tog i egen regi kontakt med instrumenttillverkare och genomförde provning på eget provmaterial.

#### **4.4 Analys av experimentellt framtagna data.**

Data från provningarna har analyserats och resultaten redovisas i kapitel 6 nedan.

#### **4.5 Framtagning av provningsmodeller och provningsparametrar för de lämpligaste provningsfallen**

Under labproven gjordes en anpassning av respektive instruments inställning så att bästa möjliga resultat erhöles för varje applikation. Detta innebar tester av olika mätprober samt prov vid olika signalfrekvenser. Dessutom testades känslighet för provmaterialets godstjocklek samt avstånd mellan mätprob och provmaterial.

#### **4.6 Etablering av pilotutrustning**

Tyvärr visade sig laboratorieproven med virvelströmsinstrumenten inte vara så framgångsrika att det var meningsfullt att gå vidare och konstruera en pilotutrustning för att genomföra driftförsök.

#### **4.7 Driftförsök**

Eftersom ingen tillräckligt lovande mätutrustning utmärkt sig vid laboratorieproven har inga driftförsök genomförts. Medlen som avsatts för driftförsök satsades i stället på laboratorieprov av ytterligare en mätutrustning med annan mätprincip (LUS) för att se om denna var mer lämpad för de valda applikationerna.

## **5 RESULTAT**

Det provmaterial som tagits fram av Ovako, Sandvik och SSAB har provats med fyra instrument, Magnatest från Institut Dr Förster, Elotest från Rohmann GmbH, Verimet från K.J. Law Engineers Inc och ett instrument för laserinducerat ultraljud som innehas av Institutet för Metallforskning (IM).

Instrumenten Magnatest, Elotest och Verimet bygger på att man med växelström genom en spole inducerar virvelströmmar i det aktuella provmaterialet. Virvelströmmarna i sin tur inducerar ett magnetfält som instrumentet kan avläsa genom en mätspole. Provmaterialets elektromagnetiska egenskaper påverkar virvelströmmarna och bestämmer fasvridning och amplitud hos det magnetfält som virvelströmmarna ger upphov till. Fasvridning och amplitudförändring ger utslag i signalen från mätspolen och redovisas av instrumenten som koordinater i ett impedansplan. Varje prov erhåller en x- och en y-koordinat.

Det är konstaterat att det finns ett samband mellan ett materials elektromagnetiska egenskaper och andra egenskaper t ex hållfasthetsegenskaper. På så vis kan mätningar som relaterar till materialets elektromagnetiska egenskaper även ge information om andra egenskaper.

Proven vid IM avser mätning av löptid samt andra egenskaper för en ultraljudspuls som skickas genom provmaterialet. Ultraljudet induceras genom att en kraftig laserpuls skjuts av mot materialet. Ljudpulsens avläses på ett annat ställe på provmaterialet också det med laserteknik. Även ultraljudsutbredningen i materialet har visat sig ha samband med materialets egenskaper vilket utnyttjas med denna mätmetod.

### **5.1 Mätinstrument**

#### **5.1.1 Magnatest**

Detta instrument ger information om hur mätsignalen förändras i förhållande till ett referensprov som instrumentet kalibreras mot. Vid denna kalibrering väljs förstärkning och frekvens på den signal som skickas till spolen så att bästa möjliga mätsignal erhålls utan överstyrning av mätaren.

Instrumentet har en funktion för regression vilket gör det möjligt att korrelera mätresultatet mot den egenskap man vill mäta.

#### **5.1.2 Elotest**

Elotest-instrumentet fungerade vad gäller handhavandet ungefär på samma sätt som Magnatestinstrumentet ovan. Regressionsfunktionen saknades vilket gjorde att regressionen fick göras externt i MS-Excel i stället.

### 5.1.3 Verimet

Verimet-instrumentet är även detta ett virvelströmsinstrument och fungerar vad gäller handhavandet ungefär på samma sätt som Magnatest- och Elotest-instrumenten.

### 5.1.4 LUS

LUS-instrumentet fungerar så att en laserpuls skjuts mot materialet och när denna träffar materialet framkallas en ultraljudpuls som utbreder sig i materialet. Ultraljudpulsens fångas upp av en mottagare och dess innehåll analyseras med avseende på frekvensinnehåll, löptid etc [7].

Flera publikationer [11,12,13] visar att den akustiska dämpningen (absorption)  $\alpha$  är kopplad till kornstorlek  $D$  och frekvens  $f$  enligt  $\alpha \propto f^n \cdot D^{n-1}$ , där  $n=4$  för våglängdsområdet  $\lambda \gg D$ . För stål är det senare villkoret uppfyllt då frekvenser i området 6-60 MHz ger våglängder i intervallet 1-0.1 mm.

Två material med kornstorlekar  $d_1 < d_2$  bör alltså uppvisa en stark skillnad i akustisk dämpning vid höga frekvenser samtidigt som skillnaden bör vara mycket mindre vid låga frekvenser. Studeras frekvensinnehållet i ultraljudsignalerna från dessa två material så är andelen högfrekvent innehåll större i material med kornstorlek  $d_1$  än i material med kornstorlek  $d_2$ .

Det praktiska tillvägagångssättet för signaler uppmätta med LUS är således att studera frekvensinnehållet i signalen. Ett mått på högfrekvent innehåll är att beräkna integralen  $I_{HF}$  över frekvensområdet  $f_{H1}$  till  $f_{H2}$ , t.ex.  $f_{H1}=15\text{MHz}$  och  $f_{H2}=60\text{MHz}$ . På samma sätt fås för lågfrekvent innehåll  $I_{LF}$  med t.ex.  $f_{L1}=2\text{MHz}$  och  $f_{L2}=5\text{MHz}$ .

Kvoten  $Q = \frac{I_{HF}}{I_{LF}}$  ger ett normaliserat mått på signalens högfrekventa innehåll, där  $Q$

bör ha en direkt koppling till kornstorlek. Metoden har tidigare visat sig fungera mycket bra vid analys av t.ex. kornstorlek i rostfria stål och koppar [14,15].

## 5.2 Mätningar

### 5.2.1 Avkolningsdjup på rör av mjukglödgat kullagerstål

Den egenskap som är intressant för rören är avkolningsdjupet. Rörproverna var alla av samma stålsort, **Ovako** 803J, och av sex olika kategorier där alla prover i samma kategori antogs ha samma avkolningsdjup enligt Tabell 2. Alla rör var av samma dimension med längden 300 mm, ytterdiametern 88.6 mm och innerdiametern 72.7 mm. Avkolningsdjupet var manuellt uppmätt för ett prov ur varje kategori med noggrannheten  $\pm 0,05$  mm. Kategori ett till fem var obehandlade med glödskalet kvar och innehöll fem prover var. Den sjätte kategorin innehöll tre prover som var slipade på ytterytan.

Tabell 2. Provkategorier.

Kategori	Antal prover	Avkolningsdjup (mm)
1	5	0,6
2	5	0,4
3	5	0,4
4	5	0,2
5	5	0,4
slipad	3	0,2

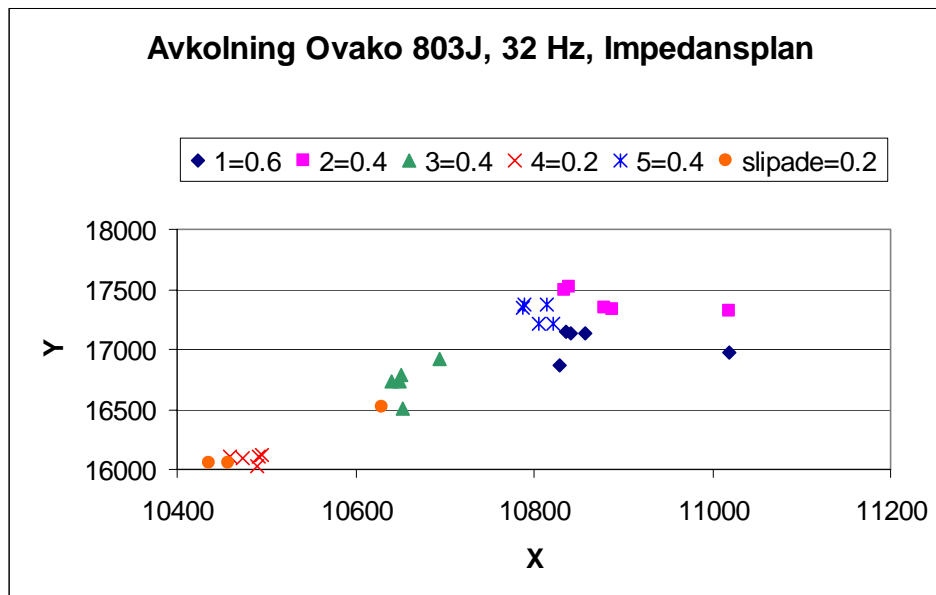
### 5.2.1.1 Magnatest

För mätning på Ovako rörprover hade instrumentet utrustats med en mätspole anpassad för den aktuella rördiametern.

Den grova upplösningen på mätningarna försvårade regressionen.

Mätningar med Magnatestinstrumentet gjordes vid flera mätfrekvenser. Bästa regressions sambandet erhöles vid 32 Hz.

Figur 1 visar hur rörproverna placerade sig i förhållande till varandra i impedansplanet.

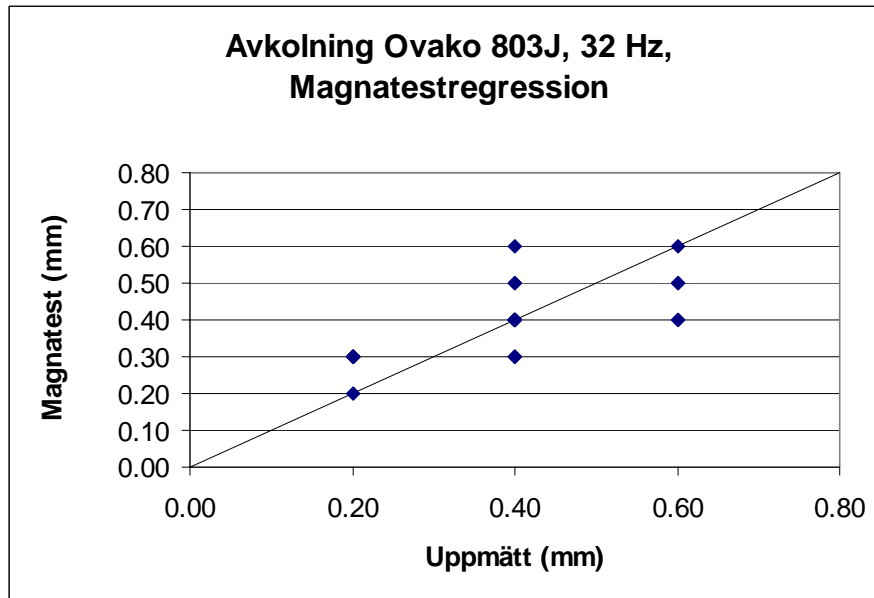


Figur 1. Rörprovernas placering i impedansplanet.

Figuren visar att proverna inom respektive kategori ligger relativt väl samlade vilket styrker antagandet att alla prover inom samma kategori har ungefär samma egen-

skaper. De olika kategorierna ligger placerade så i impedansplanet att sambandet mellan avkolningsdjup och placering i impedansplanet inte är helt uppenbart.

Figur 2 visar utfallet från instrumentets regressionsberäkningar där Magnatest-instrumentets predikterade avkolningsdjup plottats mot uppmätt avkolningsdjup.



Figur 2. Regressionsresultat.

Som framgår av diagrammet pekar regressionsresultatet åt rätt håll men spridningen är ganska stor. För prover med avkolningsdjupet 0,4 mm predikterar instrumentet värden mellan 0,3 och 0,6 mm.

### 5.2.1.2 Elotest

Till Elotest-instrumentet fanns ingen mätpole tillgänglig som lämpade sig för mätning på rör.

### 5.2.1.3 Verimet

CSM som gjorde provet meddelade att värdena varierade kraftigt på olika ställen på samma rör. Detta gjorde att det var svårt att få några mätvärden att lita på. Vid proven fanns endast en ytsond tillgänglig och den mäter på så liten yta i taget så att glödskalet m.m. påverkade resultatet. Proven avbröts därför.

### 5.2.1.4 LUS

En mängd olika typer av ultraljudsvågor kan utbreda sig i fasta kroppar. Rayleigh-vågen, som är en ytvåg vars penetrationsdjup är frekvensberoende, är en av dessa vågtyper.

Tanken med försöken på IM var att använda Rayleighvågor för att mäta avkolningsdjup hos rör. Liknande försök har tidigare rapporterats i samband med bestämning av uppkolningsdjup hos sätthärdade ytor [16].

Rören från Ovako Steel gav inga analyserbara signaler, trots många försök med olika parametrar. Troligtvis berodde detta på att samtliga rör, även de som slipats, hade grova ytor med fördjupningar där oxiden penetrerat. En preliminär slutsats är således att ytvågornas utbredning hindras av den grova ytan och därmed försvinner effekter av gradienter i mikrostrukturen helt.

### 5.2.2 Hållfastheten ( $R_m$ ) på varmvalsade band

SSAB hade tagit fram 14 provbitar klippta från varmvalsade band. Banden var ca 1000 mm breda och ca 400 mm långa provbitar var klippta över hela bandets bredd. Nio av provbitarna var ca 6 mm tjocka och de övriga ca 5 mm tjocka.

Proven va tagna från band med två olika stålanalyser enligt Tabell 3.

Tabell 3. Materialanalyser för SSAB-material.

Komponent	Material 1	Material 2
C	0,075	0,075
Mn	1,75	1,75
Si	0,1	0,1
Cr	0,35	0,35
Ni	0,20	0,20
Cu	0,20	0,20
Mo	0,25	0,25
Al	0,06	0,06
Nb	0,07	0,07
V	0,07	0,07
Ti	0,16	0,16
B	0,0010	0,0035

Den egenskap som bedömdes lättast att utvärdera var hållfastheten uttryckt i termen  $R_m$ .

På provbitar som klippts strax intill de som använts för instrumentproven hade SSAB skurit provstavar för dragprovning. 25 longitudinella provstavar hade tagits med jämna avstånd över bandbredden för åtta av proven. Dessutom hade ett antal transversella provstavar tagits vid ena kanten. För resterande sex prov hade tre longitudinella och tre transversella provstavar tagits, se Tabell 4. Noggrannheten hos dragproven uppgavs vara ca  $5 \text{ N/mm}^2$ .

Tabell 4. SSAB-prov.

Prov	Antal longitudinella prov	Material	Antal transversella prov	Plåttjocklek (mm)	Rm, longitudinellt vid bandmitt (N/mm <sup>2</sup> )
E51	25	1	4	6,1	717
E52	25	1	4	6,1	822
E53	25	1	2	6,1	844
E54	25	2	4	6,1	705
E55	25	2	2	6,1	809
E56	25	2	4	6,1	867
MG601	3	1	3	6,1	832
MG602	3	1	3	6,1	905
MG603	25	1	0	6,1	879
MG606	3	1	3	5,0	891
MG607	3	1	3	5,1	918
MG608	3	2	3	5,1	734
MG609	25	2	0	5,1	874
MG610	3	2	3	5,1	751

Eftersom spolarna som använts till virvelströmsinstrumenten är riktningsoberoende har signalerna genomgående korrelerats till longitudinella dragprov. För plåtar där endast tre eller fyra prov tagits gäller att proven tagits vid bandets mitt.

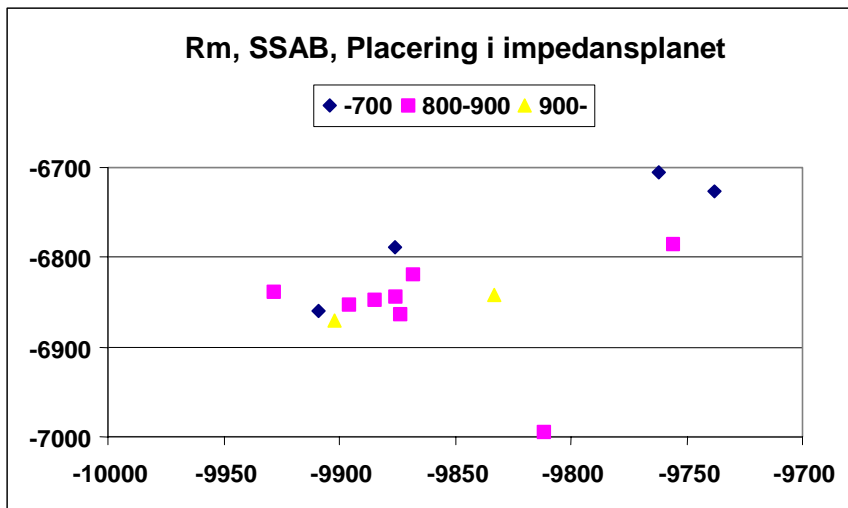
### 5.2.2.1 Magnatest

Vid mätning på SSABs prover provades två spolar avsedda för mätning på platt material. Den ena var avsedd för låga mätfrekvenser och den andra för höga. Vid en inledande provning visade det sig att mät känsligheten blev bäst vid höga frekvenser så därför användes endast högfrekvensspolen vid de fullständiga proven.

Provmätningar gjordes vid flera mätfrekvenser och bästa regressions sambandet erhöles vid 128 kHz.

Figur 3 visar hur proverna placerade sig i förhållande till varandra i impedansplanet.

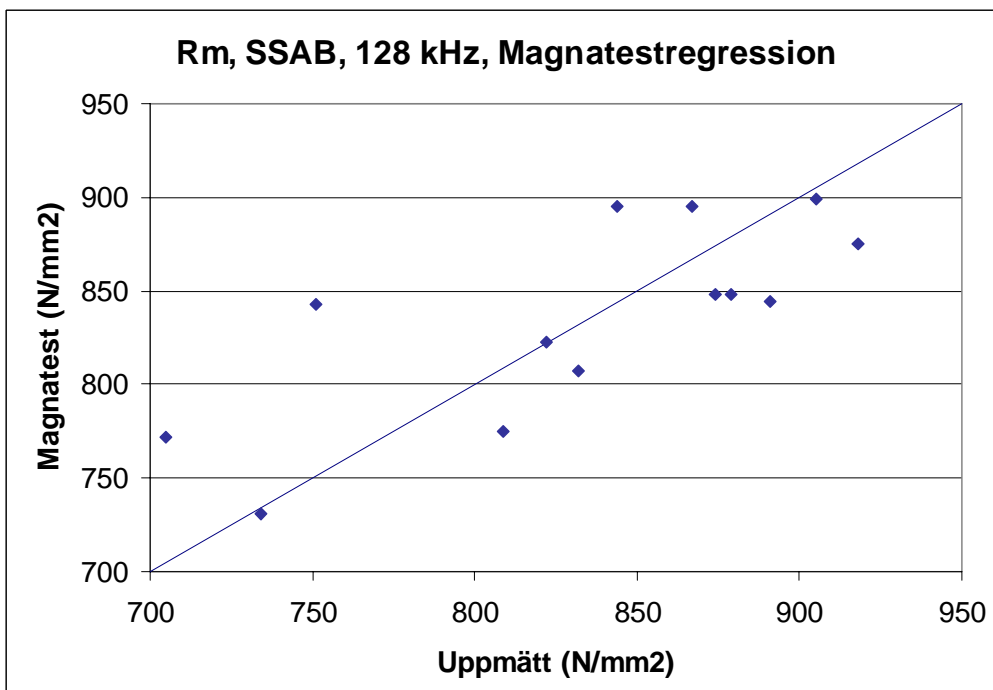




Figur 3. Provernas placering i impedansplanet.

Som framgår av figuren så är sambandet mellan hållfasthet och placering i impedansplanet inte är helt uppenbart.

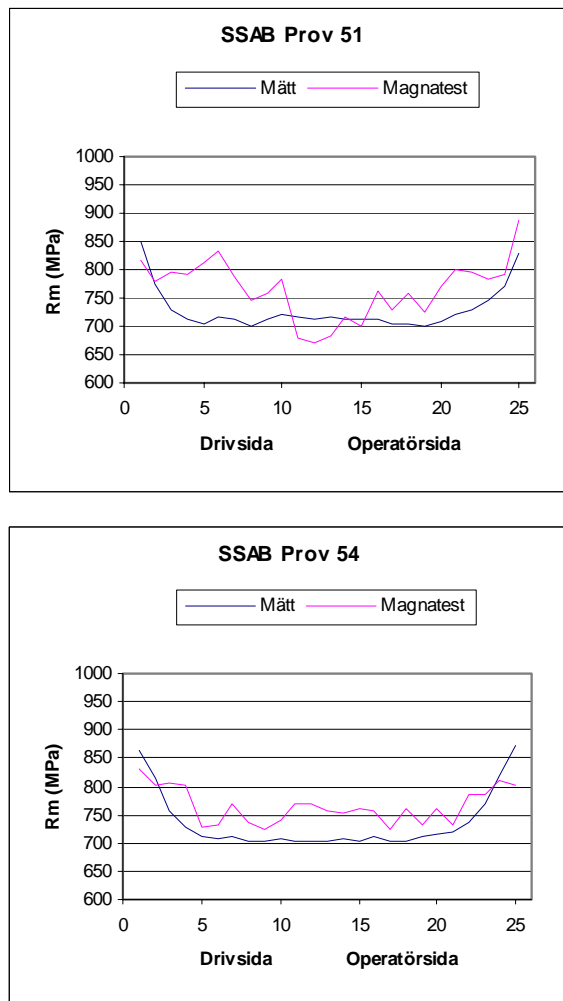
Figur 4 visar utfallet från instrumentets regressionsberäkningar där Magnatestinstrumentets predikterade hållfasthet plottats mot uppmätt hållfasthet.



Figur 4. Regressionsresultat.

Som framgår av diagrammet pekar regressionsresultatet åt rätt håll men spridningen är ganska stor. Standardavvikelsen är 43 N/mm<sup>2</sup> och avvikelser på upp emot 100 N/mm<sup>2</sup> förekommer.

För de plåtar där dragprovbitar tagits ut över hela bredden gjordes 25 ekvidistanta mätningar över provbitarnas bredd med instrumentet. Figur 5 visar resultatet från två av dessa mätningar.



Figur 5. Rp02 över bredden.

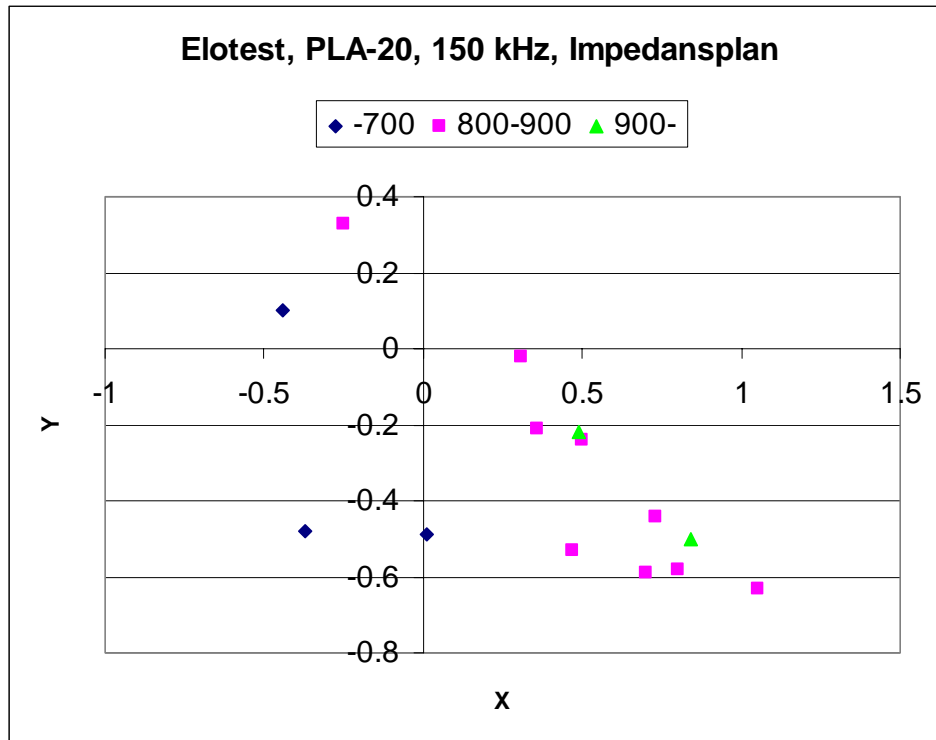
Kurvorna från instrumentet visar ungefär samma form som dragproverna men kvantitativa avvikelser på mer än 100 N/mm<sup>2</sup> förekommer.

### 5.2.2.2 Elotest

Även för detta instrument hade två spolar avsedda för mätning på platt material bifogats. Den ena var avsedd för lägre mätfrekvenser och den andra för högre. Vid en inledande provning visade det sig att mätkänsligheten blev bäst vid höga frekvenser så därför användes endast högfrekvensspolen vid de fullständiga proven.

Provmätningar gjordes vid flera mätfrekvenser och bästa regressions sambandet erhöles vid 150 kHz.

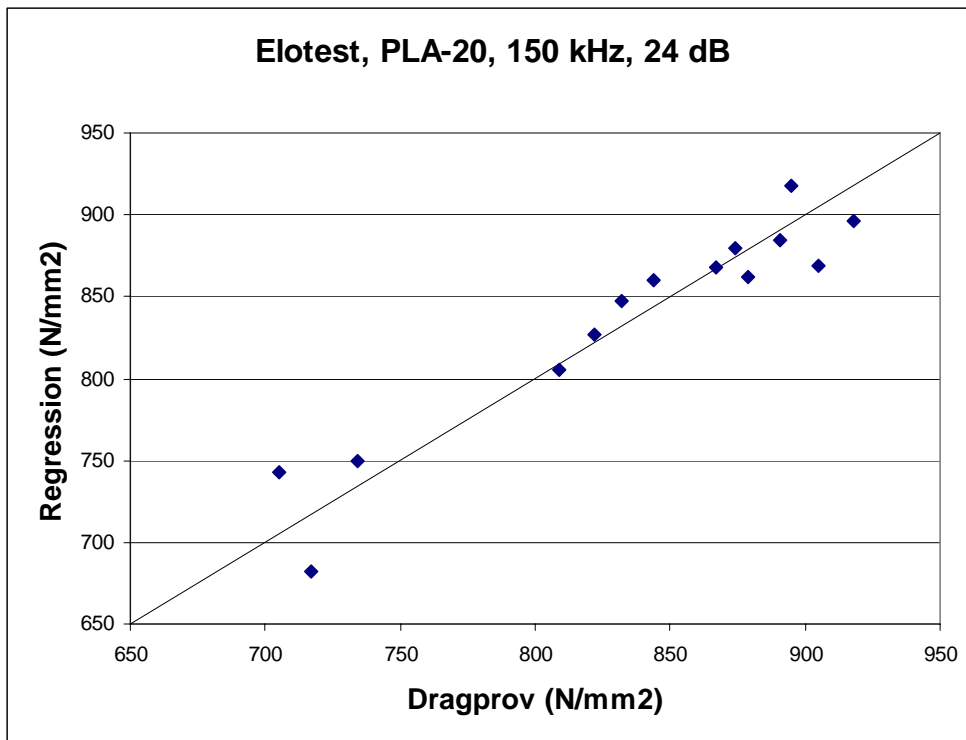
Figur 6 visar hur proverna placerade sig i förhållande till varandra i impedansplanet.



Figur 6. Provernas placering i impedansplanet.

Inte heller för detta instrument är sambandet mellan provernas hållfasthet ( $R_m$ ) och placering i impedansplanet helt uppenbart.

Figur 7 visar utfallet från regressionsberäkningarna där Elotestinstrumentets predikterade hållfasthet plottats mot uppmätt hållfasthet.



Figur 7. Regressionsresultat.

Regressionsresultatet är bättre än för Magnatestinstrumentet. Standardavvikelsen är  $21,5 \text{ N/mm}^2$  vilket är hälften så stor som för Magnatest. Detta innebär att det rätta värdet med 95 % sannolikhet ligger inom  $\pm 43 \text{ N/mm}^2$  från det uppmätta värdet.

### 5.2.2.3 Verimet

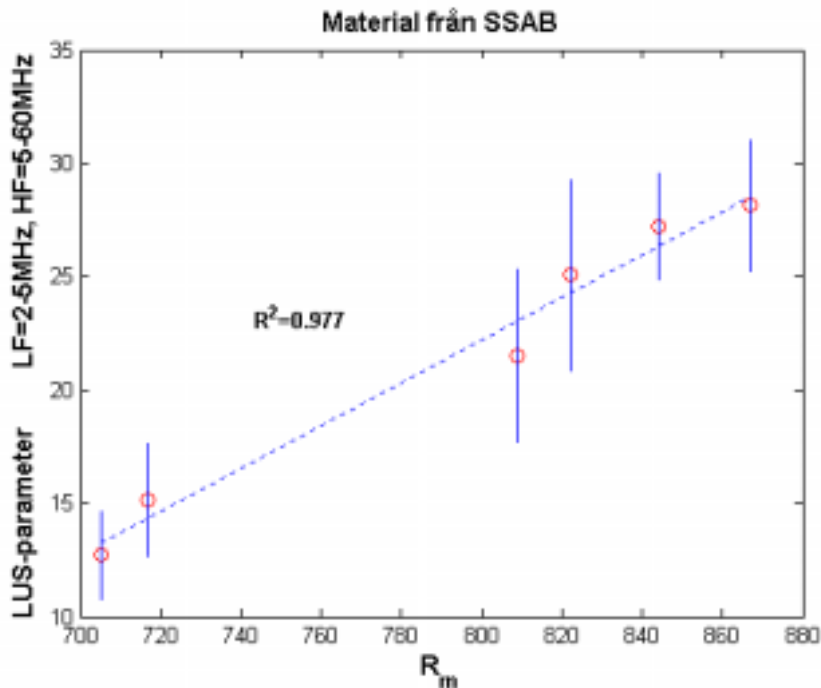
Inte heller på SSAB-materialet gick det att få tillförlitliga mätvärden med detta instrument så försöken avbröts.

### 5.2.2.4 LUS

Med avseende på märkning kan SSAB-proverna delas in i två grupper: E## samt MG###. Mittprov från samtliga material i båda grupper har analyserats med LUS och resultat för E##-gruppen visas i Figur 8. För serie MG### saknas konsekventa hållfasthetsdata från mittprov varför en jämförelse med LUS-data har utelämnats här.

Figur 8 visar LUS-parametern  $Q$  plottad mot brottgränsen för SSAB-prover från E##-gruppen. Varje LUS-mätning visar medelvärdet på 50 uppmätta spektra tillsammans med 95 % konfidensintervall på detta resultat. Sambandet mellan  $R_m$  och LUS-parameter är starkt med en korrelationsfaktor på 0,977. Frekvensintervallet som användes här var 2-5 MHz samt 5-60 MHz.

Den teori som använts i analys av LUS-data bygger huvudsakligen på kopplingen kornstorlek-dämpning. Möjligtvis finns även absorptionsbidrag från utskiljningshärdning men det är osäkert hur stor denna påverkan är. Resultaten indikerar att LUS-tekniken kan vara användbar för att mäta hållfasthet i den här typen av material.



Figur 8. LUS-parameter  $Q$  plottat mot brottgränsvärden för SSAB-prover ur serie E##.

### 5.2.3 Hållfastheten (Rp02) på kallvalsade band

**Sandvik** hade tagit fram 24 provbitar klippta från kallvalsade band. Provbitarna var av olika storlek men hade alla ungefär samma tjocklek, ca 0,6 mm. Proven var samtliga av samma stålsort, 16121 men hämtade från 10 olika charger.

Den egenskap som var mest intressant att utvärdera var hållfastheten uttryckt i termen Rp02.

För varje provbit angavs ett hållfasthetsvärde framtaget genom dragprov på ett prov taget från samma band som provbiten. Noggrannheten för dragprovsvärdena uppskattades vara  $\pm 50 \text{ N/mm}^2$ . Se Tabell 4.

Tabell 4. Sandvik-prov.

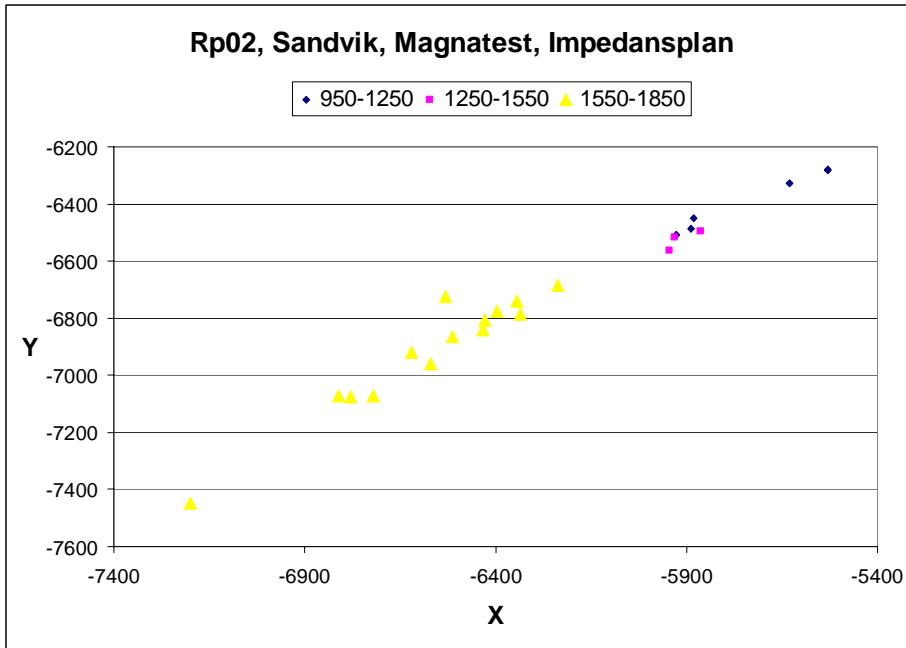
Prov	Tjocklek (mm)	Rp02 (N/mm <sup>2</sup> )
39482:1	0,618	1600
39482:2	0,62	1630
39482:3	0,608	1670
39482:4	0,613	1630
38701:3	0,596	1260
39658:4	0,608	1190
38847:1	0,602	1700
38847:4	0,604	1730
38848:1	0,59	1720
38848:3	0,594	1780
38848:6	0,6	1700
37939:1	0,602	1780
37939:2	0,602	1820
39279:1	0,597	1710
39279:2	0,596	1740
39279:3	0,6	1710
39279:4	0,6	1790
38494:1	0,586	990
38851:1	0,595	980
38851:2	0,6	990
39569	0,6	1390
38660	0,6	1210
39803	0,6	1180
37020:3	0,6	1290

### 5.2.3.1 Magnatest

Vid mätning på Sandviks prover visade det sig att endast högfrekvensspolen gav bra mätsignal.

Provmätningar gjordes vid flera mätfrekvenser och bästa regressions sambandet erhöles vid 4 kHz respektive 128 kHz. Med tanke på att plåtarna är tunna och att in-trängningsdjupet är lägre vid högre frekvenser redovisas resultaten vid frekvensen 128 kHz även om resultaten för 4 kHz är jämförbara.

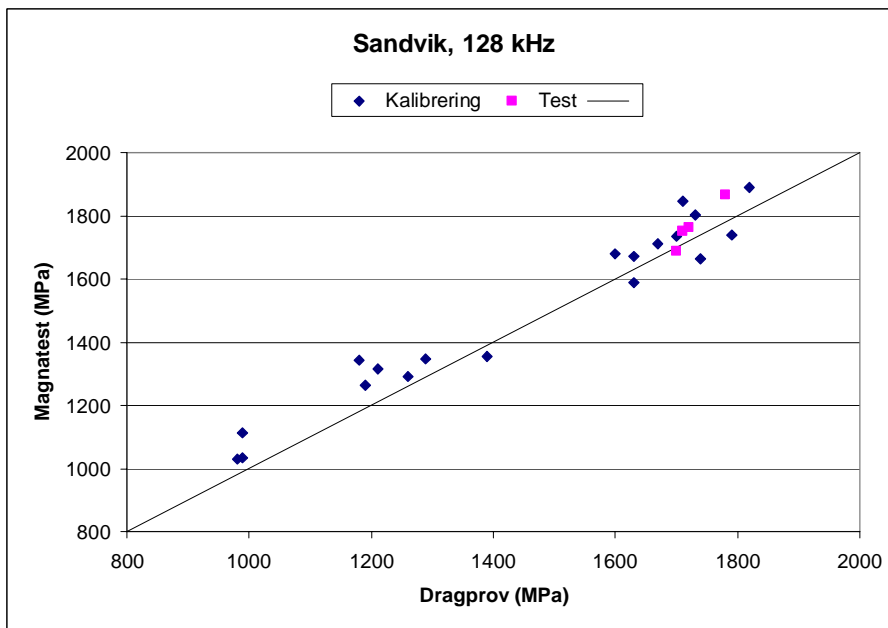
Figur 9 visar hur proverna placerade sig i förhållande till varandra i impedansplanet.



Figur 9. Provernas placering i impedansplanet.

Som framgår av figuren så är det ett ganska tydligt samband mellan hållfasthet och placering i impedansplanet. Prover med hög hållfasthet hamnar närmare planets nedre vänstra hörn.

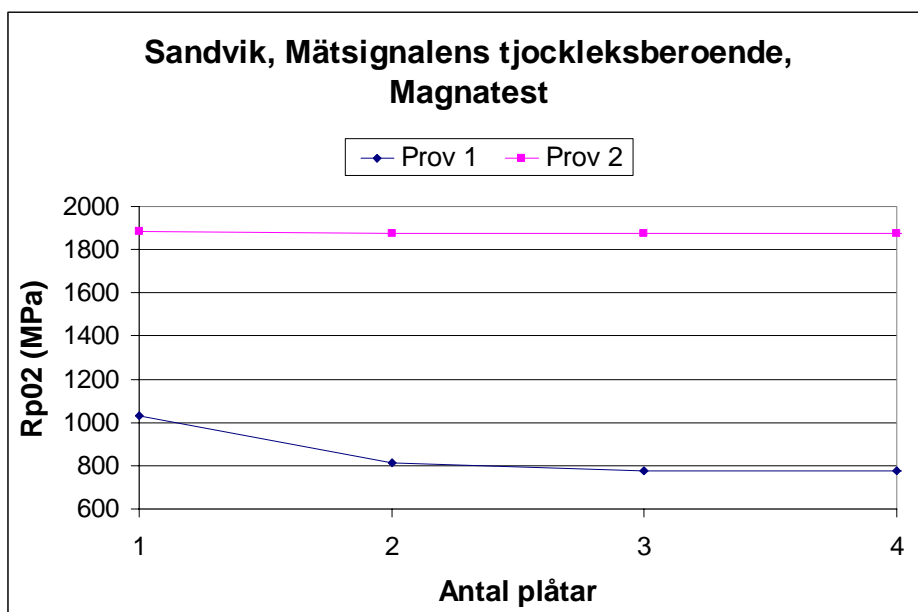
Figur 10 visar utfallet från instrumentets regressionsberäkningar där Magnatest-instrumentets predikterade hållfasthet plottats mot uppmätt hållfasthet.



Figur 10. Regressionsresultat.

För ögat ser punkterna ut att hamna ganska väl samlade runt diagonalen i diagrammet. Vid fullständig överensstämmelse hade alla punkter hamnat på diagonalen. Avvikelse på över  $100 \text{ N/mm}^2$  förekommer. Spridningen kring diagonalen kan uttryckas som standardavvikelsen vilken i detta fall är  $69 \text{ N/mm}^2$ . Detta innebär att en mätning med 95 % sannolikhet avviker mindre än  $138 \text{ N/mm}^2$  från det rätta värdet.

Det visade sig att proverna från Sandvik var så tunna att mätsignalen förändrades om man lade ytterligare ett prov direkt under det testade på motsatt sida som mätspolen. Detta antyder att fältet från mätspolen tränger in djupare än plåtens tjocklek och att signalen förändras om man mäter på tjockare material. Figur 11 visar för två olika prover hur mätsignalen förändrades när ett antal plåtar staplades under mätspolen.



Figur 11. Mätsignalens tjockleksberoende.

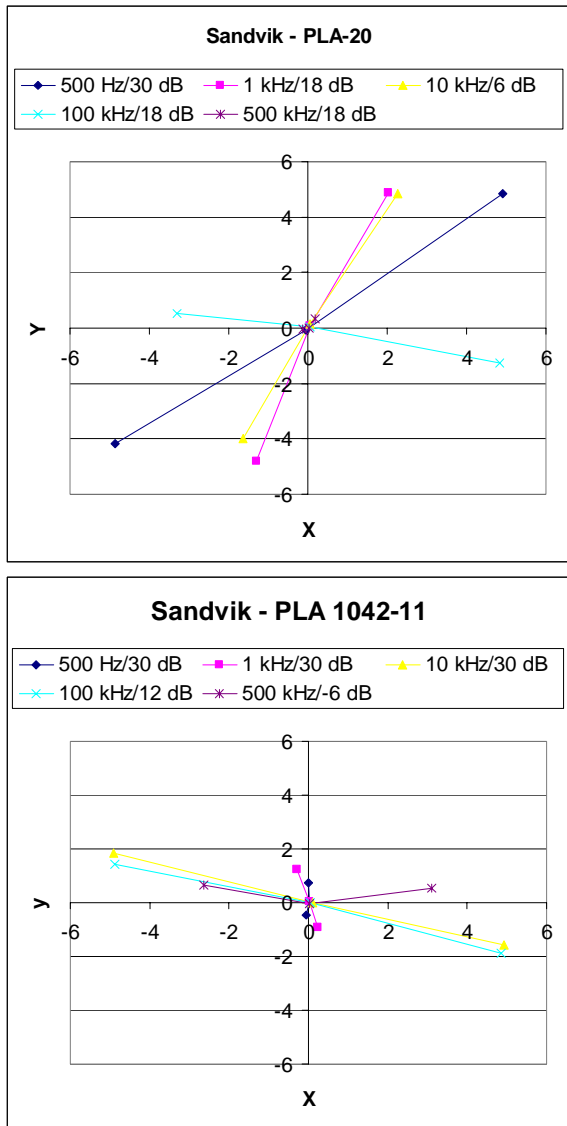
Figuren visar att signalen förändras mer om man staplar prover med låg hållfasthet än om man staplar prover med hög hållfasthet. Plåtar med låg hållfasthet har alltså större inträngningsdjup för fältet från mätspolen. Känsligheten för tjockleksförändringar hos materialet är högre vid de lägre hållfasthetsnivåerna.

### 5.2.3.2 Elotest

Även för detta instrument hade två spolar avsedda för mätning på platt material bifogats. Den ena var avsedd för lägre mätfrekvenser och den andra för högre. Utvärderingen av känsligheten gjordes genom provning på de prover som låg längst ifrån varandra i hållfasthet samt en i mitten av spannet. För några utvalda frekvenser testades vilken maximal förstärkning som kunde användas utan att överstyra instrumentet. Överstyrning visades av en röd lampa på instrumentet.



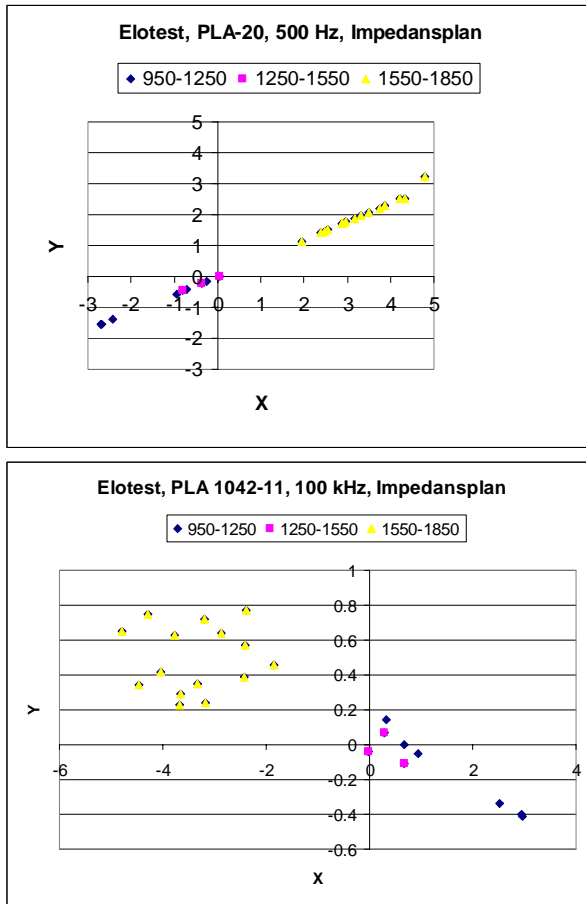
Figur 12 visar signalutslaget för olika mätfrekvenser, uttryckt i Hz, och den maximala förstärkning, uttryckt i dB, som kunde användas för respektive frekvens för de båda spolarna. De tre punkterna på varje kurva visar mätutslaget för tre prover för en frekvens. De tre punkterna representerar ett prov med låg hållfasthet, ett prov med hög hållfasthet och ett prov med medelhög hållfasthet. Avståndet mellan ytterpunkterna på respektive kurva visar känsligheten för den frekvensen med beaktande av den inställda förstärkningen.



Figur 12. Mätutslag vid olika mätfrekvens och förstärkning.

Som framgår av figuren var mätkänsligheten bäst vid 500 Hz för PLA-20 medan den för PLA 1042-11 var bäst vid 100 kHz.

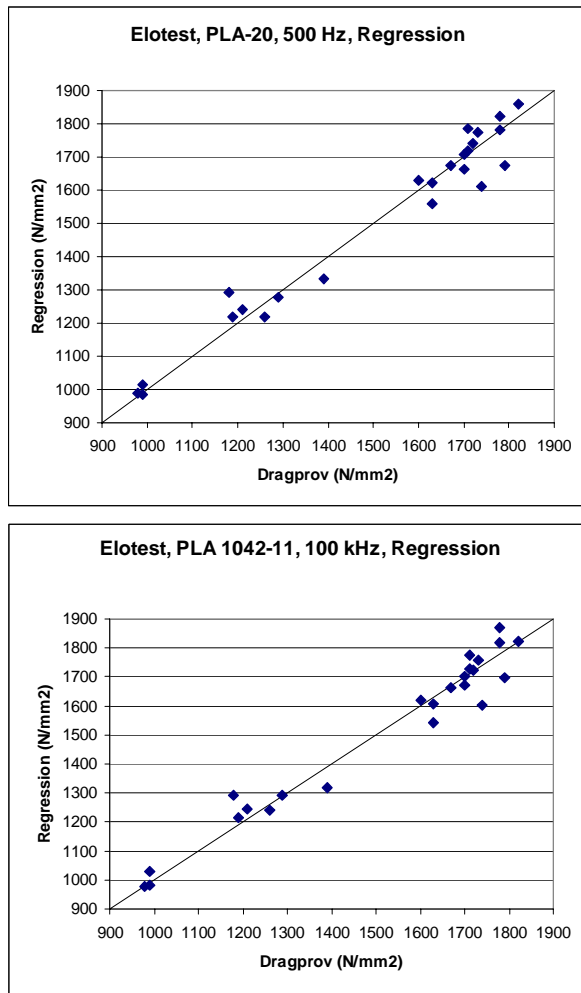
Figur 13 visar hur proverna placerade sig i förhållande till varandra i impedansplanet.



Figur 13. Provernas placering i impedansplanet.

Sambandet mellan hållfasthetsnivå och placering i planet är relativt tydligt i båda fallen. Den tydliga samlingen på en rät linje för PLA-20-givaren skulle kunna tyda på att denna mätkonfigurering är bäst. Efter regression visar de båda fallen nästan identisk standardavvikelse, 54,5 respektive 56,6 N/mm<sup>2</sup>.

Figur 14 visar utfallet från regressionsberäkningarna där Elotestinstrumentets predikterade hållfasthet plottats mot uppmätt hållfasthet.



Figur 14. Regressionsresultat.

Regressionsresultatet är något bättre än för Magnatestinstrumentet. Standardavvikelsen är som bäst  $54,5 \text{ N/mm}^2$  vilket är 21 % bättre än Magnatest. Detta innebär att det rätta värdet med 95 % sannolikhet ligger inom  $\pm 109 \text{ N/mm}^2$  från det uppmätta värdet.

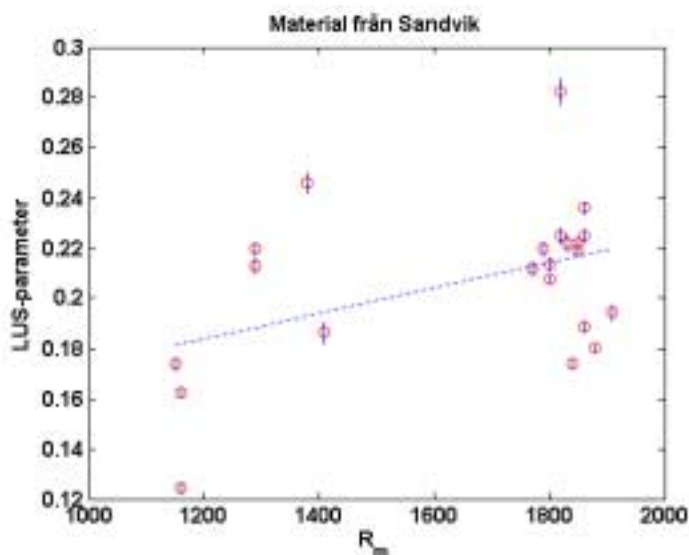
### 5.2.3.3 Verimet

För detta instrument gav mätningen på Sandvik-materialet gav något bättre utslag jämfört med de andra materialen. Mätningen gav liknande värden på olika punkter på samma plåt, och olika utslag på andra plåtar. Mätningarna bedömdes dock inte som tillförlitliga eftersom instrumentet använder så låga frekvenser att materialtjockleken spelade in. Därför avbröts mätningarna.

### 5.2.3.4 LUS

Figur 15 visar LUS-parametern  $Q$  plottad mot brottgränsen för samtliga Sandvik-prover. Varje LUS-mätning visar medelvärdet på 50 uppmätta spektra tillsammans med 95 % konfidensintervall på detta resultat. Varje mätning är reproducerbar som framgår av de mycket små 95 % konfidensintervallen men spridningen i relation till hållfastheten är stor (korrelationskoefficienten = 0.40). I figuren kan vissa grupperingar skönjas men då utförligare uppgifter om provmaterialen saknas så är eventuella samband svåra att extrahera.

Man måste konstatera att det som huvudsakligen styr hållfastheten i dessa kallvalsade material inte är detekterbart i LUS-mätningarna. Sannolikt har dislokationsstrukturer och inre restspänningar en överordnad roll och dessa påverkar bara svagt på absorption av ultraljud.



Figur 15. LUS-parameter  $Q$  plottat mot brottgränsvärden för samtliga Sandvik-prover.

### 5.2.4 Härd djup på cylindriska sätthärdade provstavar

Scania har utfört oförstörande försök att mäta härd djupet på cylindriska provstavar. Provstavarna hade diametern 33 mm och höjden 80 mm. Avsikten var att kontrollera härdresultatet vid sätthärdning. Provstavarna var tillverkade i stål 2511 från en och samma stålcharge.

Scania valde att testa instrument från Institut Dr Förster som tillverkar och marknadsför två instrumenttyper för denna tillämpning, Magnatest S samt Magnatest D.

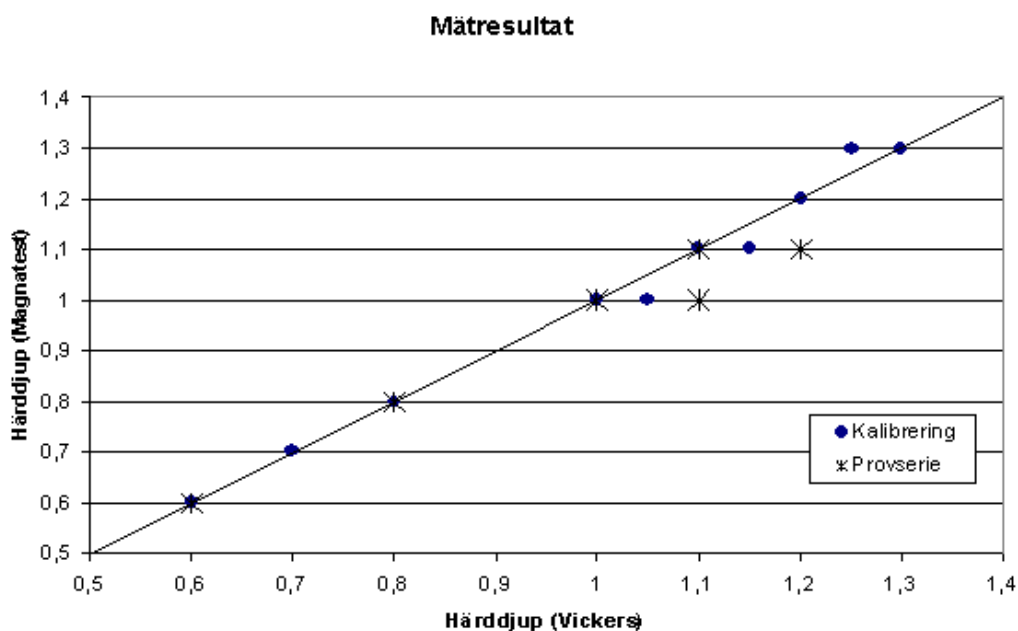
Magnatest S är en äldre utrustning där utvecklingsarbetet avstannat. Detta innebär att det inom några år kan bli problem att erhålla service och reservdelar på denna utrustning.

Magnatest D är en vidareutveckling av S-modellen där bland annat en MS-Windowsbaserad dator har integrerats i utrustningen. Utrustningen har en färgdisplay och menyalternativen är tydligare än på den äldre modellen.

#### 5.2.4.1 Magnatest S

En inledande provning utfördes genom att Institut Dr Förster erhöll 23 provstavar där härdjupet varierade mellan 0,6 och 1,3 mm. Av dessa användes 16 för att kalibrera instrumentet, en Magnatest S med en spole med innerdiametern 35 mm. Tre frekvenser användes vid provningen, 128, 256 och 512 Hz.

Kalibreringen utförs genom en linjär multiregressionsanalys där erhållen mätsignal korreleras till härdjupet. Den erhållna korrelationsgraden var 96,3 %. Se Figur 16.



Figur 16 . Mätresultat. Flera punkter överlappar varandra. Kalibreringsobservationerna visas som punkter och är 16 st. Det erhållna mätresultatet visas som stjärnor.

Vid mätning av de sju kvarvarande proverna erhöles en korrelation på 98 %. Den största absoluta skillnaden i mätresultat var 0,1 mm.

En utförligare provning är utförd med 49 provstavar där härdjupet varierar mellan 0,5 och 1,5 mm.

Till kalibrering valdes 21 provstavar där härdjupet varierar mellan 0,5 och 1,3 mm. Mätningen utfördes även här med en spole med diametern 35 mm och frekvenserna 1000, 512, 256 och 128 Hz. Vid kalibreringen erhöles korrelationsgraden 95,3 %.

Vid provningen av resterande 28 stavar erhöles korrelationsgraden 97 % mellan härdjup som uppmätts vid vickersmätning och med Magnatest S. Det största absoluta skillnaden mellan virvelströmsmätningen och vickersmätningen är 0,1 mm enligt Figur 17.

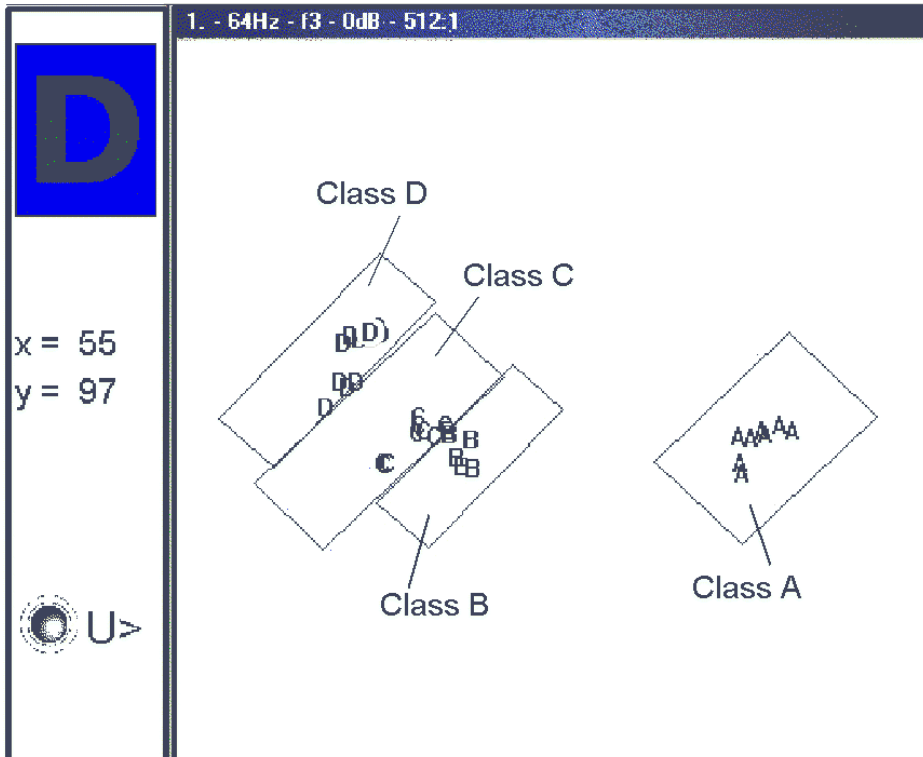


Figur 17. Jämförelse av härdjup som mäts upp med Magnatest S och med konventionell vickersmätning.

#### 5.2.4.2 Magnatest D

För Magnatest D finns inget regressionsverktyg utvecklat. Istället utvärderas mätpunktens läge i impedansplanet för varje frekvens varefter proverna klassas till olika grupper. Vid denna mätning har provningen utförts med frekvenserna 512, 256, 128 och 64 Hz.

Figur 18 visar ett exempel där klassningen har utförts till fyra grupper. Grupp A härrör från en och samma härdugn. Placeringen i impedansplanet kan skilja sig mellan olika ugnar. Detta visar att kalibreringsprover bör tas fram för varje enskild härdugn.



Test class A	= approx. DC	<b>0,52 - 0,78</b>	UGN 7
Test class B	= approx. DC	<b>0,8 - 1</b>	UGN 3
Test class C	= approx. DC	<b>1,1 - 1,28</b>	UGN 2,4,8
Test class D	= approx. DC	<b>1,3 - 1,4</b>	UGN 3,4,8

Figur 18. Klassificering i grupper.

För mätning med Magnatest D finns två möjligheter:

- Överföra punkterna i impedansplanet till Excel eller liknande program. Därefter kan en regression utföras så att ett siffervärde erhålls.
- Införa grupper med olika härdjupsintervall. Varje grupp kan kalibreras till intervallet 0,1 mm vilket ger tillräcklig information för en kvalitetskontroll. Upp till fem grupper kan klassificeras för varje kalibreringsinställning.

## 6 DISKUSSION

### 6.1 Mätningar på rör- och plåtprover med virvelströmsteknik

Endast ett av de tre virvelströmsinstrument som provats hade en mätspole anpassad för den rördimension som proverna från Ovako hade. Mätningarna med det instrumentet visar ett svagt samband mellan mätsignalen och avkolningsdjupet, som var den sökta storheten. Spridningen i mätresultat för proverna inom samma kategori antyder att dessa skiljer sig åt på något sätt. Om detta beror på variationer i avkolningsdjup eller någon annan faktor har inte kunnat utredas eftersom avkolningsdjupet endast mätts på ett prov i varje kategori. Antalet prov var också i minsta laget för kalibreringen av instrumentet.

Med fler och noggrannare dokumenterade prover med större spridning i avkolningsdjup är det möjligt att bättre regressions samband kunnat erhållas. Med befintligt underlag är det inte möjligt att ersätta nuvarande analysteknik med virvelströmsprovning.

Mätningarna på SSAB-materialet visar ett tydligare samband mellan mätsignal och hållfasthet för de två instrument som inlånats till MEFOS. Magnatest-instrumentet kunde kalibreras till en noggrannhet av  $\pm 86 \text{ N/mm}^2$  medan man med Elotest-instrumentet uppnådde  $\pm 43 \text{ N/mm}^2$ . Relaterat till det spann i hållfasthet som mätaren kalibrerats inom så blev noggrannheten  $\pm 40$  respektive  $\pm 20 \%$ .

En annan faktor som spelar in är noggrannheten för de förstörande prov som hållfasthetsvärdena baserar sig på. Instrumentkalibreringen kan inte bli noggrannare än så. SSAB uppgav att noggrannheten på de förstörande proven var  $\pm 5-10 \text{ N/mm}^2$ .

Spridningen i mätresultatet förklarades till en del med att materialstrukturen är komplicerad vilket kan göra mätningar med denna metod svåra.

Provbitarna från Sandvik hade en mycket större spridning i hållfasthet, från 980 till  $1820 \text{ N/mm}^2$ . Mätresultaten från Magnatest- och Elotest-instrumenten kunde ganska väl kopplas till hållfastheten. Noggrannheten blev drygt  $100 \text{ N/mm}^2$  vilket är minst dubbelt så mycket som önskad noggrannhet.

### 6.2 Mätningar på rör- och plåtprover med LUS-teknik

Tillämpningen av LUS tekniken på rörproverna måste bedömas som osäkert. Det är tveksamt om avkolningsdjupet kan bestämmas eftersom de grova ytorna med många gropar gör att signalen helt försvinner. Flera undersökningar vore intressanta om frågan aktualiseras i samband med produkter med finare ytform.



Den analysmetod som används till LUS-data baseras i huvudsak på kopplingen kornstorlek-dämpning. För SSAB-proverna fungerar denna metod mycket bra med en utmärkt korrelation som resultat. Däremot är resultatet för Sandviks material mycket svagt och förklaringen är troligen att hållfastheten i dessa material styrs av andra mekanismer.

Analysmetoden är således mest användbar i material vars hållfasthet påverkas av kornstorleken, exempelvis formbara tunnplåtprodukter, eller gentemot egenskaper som är starkt påverkade av kornstorlek, såsom segheten i kolstål.

### **6.3 Mätning på sätthärdade provstavar med virvelströmsteknik**

Mätningarna av provstavarna har utförts i två utrustningar, Magnatest S och D. Magnatest S har en integrerad regressionsmodul så att ett siffervärde erhålls. Den största absoluta skillnad som erhållits mellan vickers- och virvelströmsmätningen är 0,1 mm.

För D-modellen finns ingen regressionsmodul utvecklad utan proverna grupperas i olika härdklasser. Detta instrument innehåller en Windowsbaserad dator så regressionsmodellen bör kunna utvecklas relativt enkelt i Excel.

Den koppling som görs till härddjupet beror av hur väl kalibreringen utförs. Ett problem är att den mätosäkerhet som finns vid vickersmätningen överförs till virvelströmsmätningen. Denna osäkerhet är  $\pm 0,05$  mm. För att minska denna osäkerhet bör fler kalibreringsprover användas än vad som funnits tillgängliga vid denna undersökning.

En annan osäkerhet är att härddjupet på de undersökta provstavarna har mätts nära toppen. Mätningar visar att härddjupet är upp till 0,2 mm lägre på mitten av staven.

En tredje faktor som inverkat negativt på kalibreringsresultatet är att proverna är hämtade från samtliga ugnar. En kalibreringsinställning bör finnas för varje härdugn där proverna hämtas inom ett snävare härddjupsintervall.

Med virvelströmsinstrumenten kan dagens produktion av 21 provstavar mätas på mindre än 15 minuter. Detta skapar möjlighet till tätare provintervall, vilket möjliggör en förbättrad statistisk uppföljning av härddprocessen.

## 7 INDUSTRINYTTA

**Flera företag** uppger att projektet gett en möjlighet till inblick i olika mätmetoder och vad som är möjligt att åstadkomma i dagsläget med oförstörande bedömning av materialegenskaper.

**Ett företag** satte upp följande mål för deltagande i rubricerat projekt var att:

1. Erhålla kunskap om en oförstörande provningsmetod för att mäta härddjup.
2. Få en bredare kunskap om de mätmetoder som kan bli aktuella att använda i framtiden.

Detta skulle leda till:

- En förbättrad processövervakning, som innebär att processförändringar upptäcks snabbare.
- En möjlighet att optimera processen vilket leder till reducerade processtider.

Uppskattningsvis skulle detta innebära signifikanta kostnadsbesparingar för provberedning, underhåll och energianvändning.

Projektet har av **alla deltagande företag** bedömts varit till nytta så till vida att man fått reda på lämpliga leverantörer av mätsystem och att man inom projektets ram kunnat prova ett par modeller och fått underlag för inköp.

Önskemålet vid hållfasthetsmätning är en metod med noggrannhet bättre än  $\pm 50 \text{ N/mm}^2$  vilket kan jämföras med den nuvarande produktionsprovningen. I det perspektivet är den noggrannhet som nåtts i proven i detta projekt,  $\pm 50\text{-}100 \text{ N/mm}^2$ , fortfarande något för låg.

## **8 ENERGIBESPARINGSASPEKTER**

Eftersom mätmetoderna som provats inte ännu uppfyller de krav på noggrannhet som erfordras finns ingen verifiering av de vinster som skulle kunna uppnås med ett fungerande instrument. Några av medlemmarna har dock gjort vissa uppskattningar av förväntade energibesparingar vid lyckade installationer.

Ett företag bedömer att en total vikt ca 10-20 000 ton produkter per år skulle lämpa sig för provning med någon av de mätmetoder som testats i detta projekt. Ca 0,5 % av detta material kasseras pga felaktiga materialegenskaper. Den genomsnittliga energiförbrukningen är 0,003 MWh/kg vilket innebär att det felaktiga materialet kostar 150-300 GWh att tillverka. Om man under tillverkning kan detektera materialegenskaperna skulle det vara möjligt att ändra i processen så att rätt materialegenskaper uppnås. En halvering av kassationerna genom tidig detektering kopplat till åtgärder skulle sålunda ge en årlig energibesparing på 75-150 MWh.

Ett annat företag anger att ett införande av de undersökta metoderna, kan minska produktions-tiden med 3-5 % genom processoptimeringar och ökade möjligheter till förebyggande underhåll. Detta leder till en minskning av energiförbrukningen med 210-360 MWh per år.

## 9 SLUTSATSER

Projektets resultat kan kortfattat summeras i följande slutsatser:

- Utveckling av instrument för oförstörande mätning av materialegenskaper pågår vid ett flertal institut och företag.
- Det finns ingen generell metod för mätning av egenskaper utan mätmetoden måste anpassas efter applikationen.
- Prover med befintliga virvelströmsinstrument visar att det är möjligt att mäta hållfasthet med dessa metoder men att de inte ännu uppnått den tillförlitlighet och noggrannhet som krävs.
- Den nya LUS-tekniken visade sig potentiellt användbar i endast ett fall i detta projekt (varmvalsade band) men användarna anser sig ha lärt sig mycket om hur tekniken kan optimeras och till vad den är mest användbar.
- Den dag ett tillförlitligt instrument för mätning av materialegenskaper ”on-line” finns tillgängligt så är det möjligt att göra signifikanta energibesparingar per tillverkad prima produkt.

## **10 TACK**

Tack framförs till deltagande företag för hjälp med framtagning och dokumentation av provmaterial och till Jernkontoret för hjälp med projektadministrationen.

Tack också till Energimyndigheten för finansiellt stöd av projektet.

## 11 REFERENSER

- [1] Hansén T., Jarl M., ”Styrning av materialegenskaper on-line”, MEFOS TM95058, 1995.
- [2] Mörk T., ”En studie av OFP-metoder för härddjupsmätningar”, Serie TO, Nr 44-24, 2000.
- [3] Artymowicz D., Sundin S., Hutchinson B., Astill A., Nogues M., ”Effects of microstructure and texture on the propagation of ultrasonic waves in metals”, IM-2000-063.
- [4] Theiner W.A., ”Physical basis of micromagnetic methods and sensor systems and their application areas”, 1<sup>st</sup> International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing”, Hannover, Germany, 1998.
- [5] Kroos J., Borsutzki M., Schneider E., ”Magnetische und akustische Verfahren zur Materialcharakterisierung von Stahlblechen”, VDEh-DGZfP Seminar, Düsseldorf, 2000.
- [6] Wu p., Lingvall F., Stepinski T., ”Inspection of Cupper canisters for spent nuclear fuel by means of ultrasonic array system”, Uppsala University Technical report TR-99-43, 1999.
- [7] Ericsson M., Lindh-Ulmgren E., Artymowicz D., Hutchinson B., ”Laser-Ultrasonics (LUS) for microstructure characterisation”, IM-2003-113, 2003.
- [8] Lutz B., ”Zerstörungsfreie Prüfung der Materialeigenschaften erlaubt kontrollierte Blechbearbeitung”, Blech Rohre Profile 40, 1993.
- [9] Stegemann D., m fl, ”Characterization of Mechanical-Technological Steel Properties by Non Linear Harmonics Analysis within the Production Line”, 9<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials, Sydney, Australia, 1999.
- [10] ”Pulsed Eddy Current Technology – Operating principle”, 3BSE023469R0001, ABB Automation Products AB, Västerås, 2000.
- [11] Bhatia A.B., ”Scattering of high-frequency sound waves in polycrystalline materials”, J. Acoust. Soc. Am., 1959, 31, pp. 16.
- [12] Hirsekorn S., ”The scattering of ultrasonic waves by polycrystals”, J. Acoust. Soc. Am., 1982, 72, pp.1021.
- [13] Stanke F.E., Kino G.S., ”A unified theory for elastic wave propagation in polycrystalline materials”, J. Acoust. Soc. Am., 1984, 75, pp. 665.

- [14] Smith A.P., Moss B.C., Wattam B., Tweed J.H., Internal report, AEAT/51032/02, pp.1-22.
- [15] Baker G., Materials World, Jan 2003, pp. 22-23.
- [16] Safaeinili A., McKie A.D.W., Addison R.C., MRS Bulletin, Oct 1996, pp.53-57.