



LUNDS
UNIVERSITET

Detektion av rost i ingjuten tätplåt med avancerade ultraljudsmetoder

MARKUS NILSSON, TEKNISK GEOLOGI, LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA



Agenda

- Korrosion i ingjuten tätplåt
- Icke-linjära akustiska vågfenomen som kan tillämpas inom OFP
- Forskningsresultat



Strålsäkerhetsmyndigheten

Swedish Radiation Safety Authority



Energiforsk

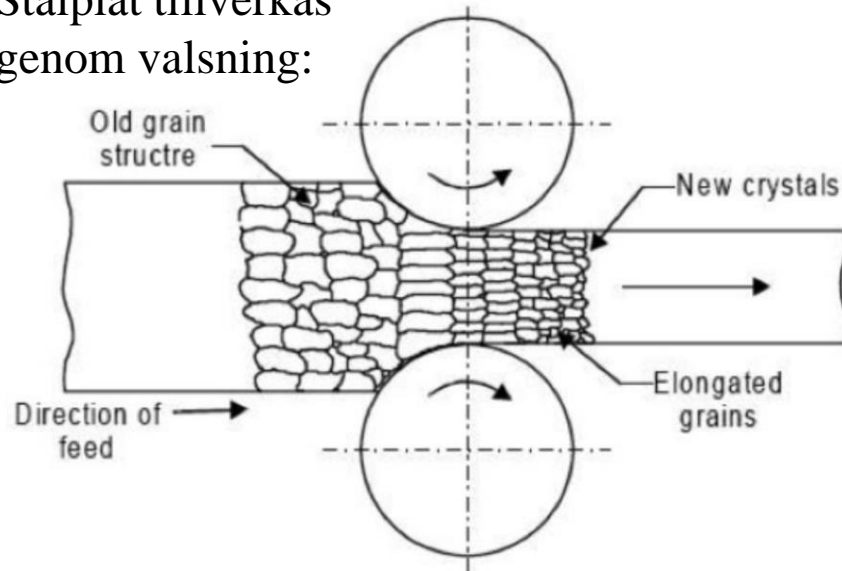


LUNDS
UNIVERSITET

Korrosion i ingjuten tätplåt

- Den alkaliska miljön i betong skyddar stål från att korrodera allvarligt.
- Allvarlig korrosion kan ske då ingjuten plåt är i kontakt med främmande föremål eller kaviteter.

Stålplåt tillverkas genom valsning:



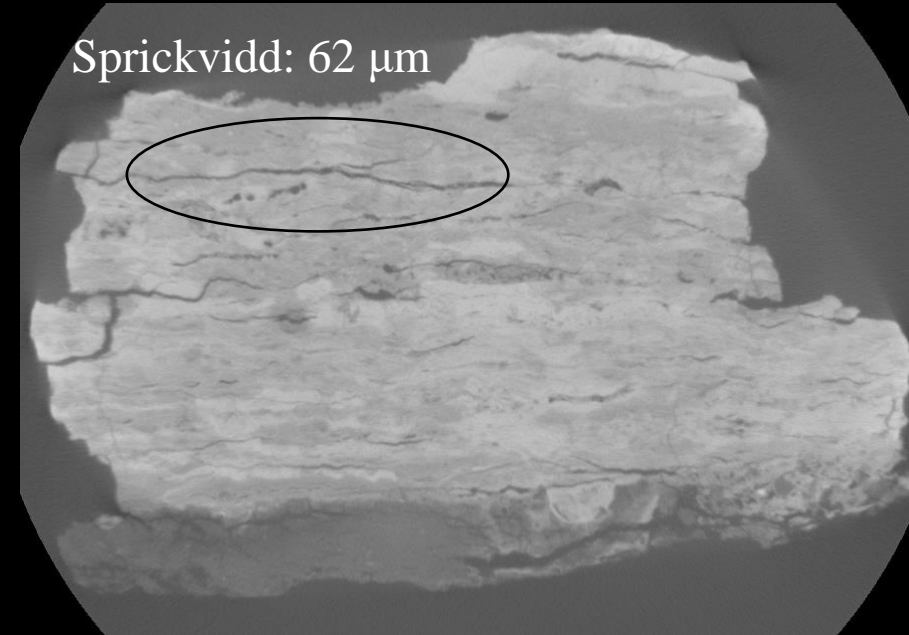
Korrosionsprodukt från Ringhals 3



Dimensioner tvärsnitt:

7 mm x 11 mm

Sprickvidd: 62 μm

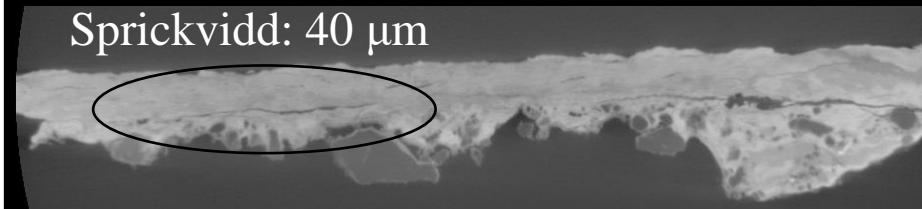


Korrosionsprodukt från metallskrot.
'Skalrost'

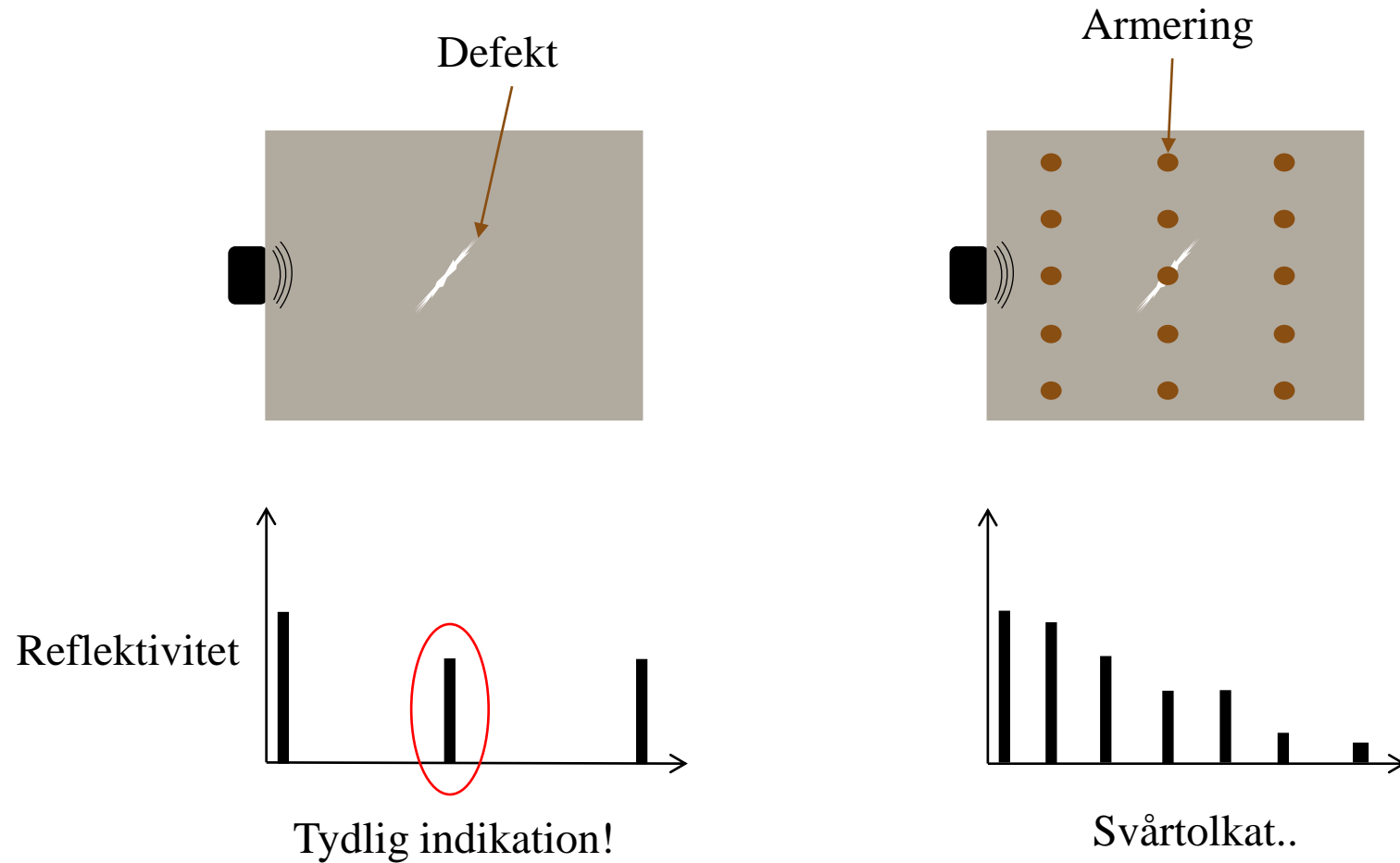


1.5 mm x 12 mm

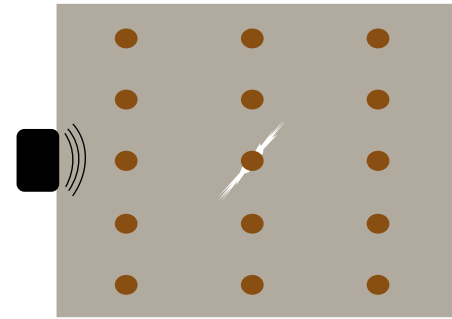
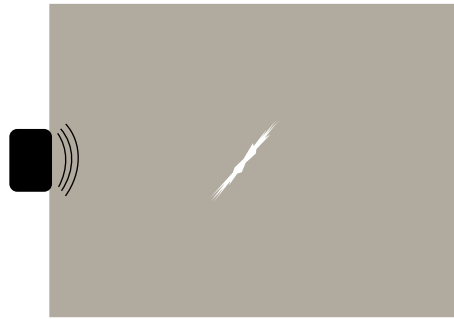
Sprickvidd: 40 μm



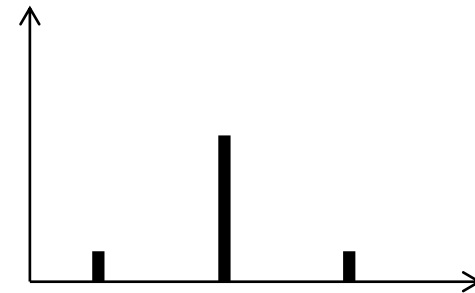
Konventionellt ultraljud



Icke-linjärt ultraljud



Icke-linjäritet



Icke-linjär akustik

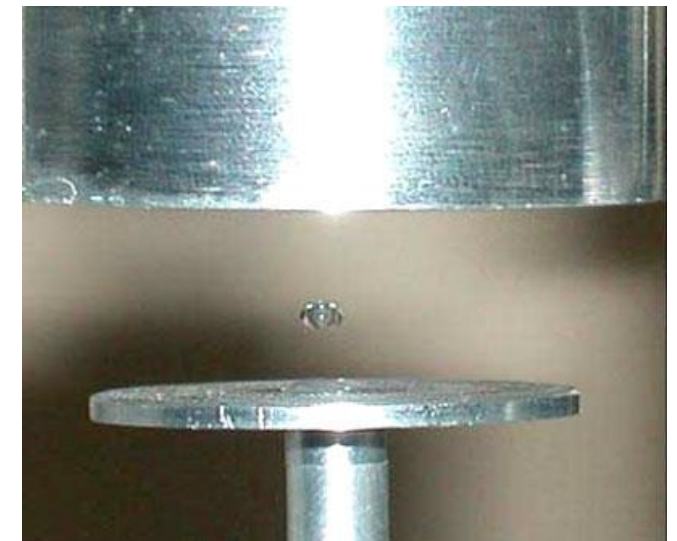
- Läran om amplitudberoende* akustiska fenomen i olika medium.
 - Fluider (fluidodynamik) och solider (elasticitetsteori).
 - * även somliga tidsberoende fenomen kan observeras.
- Fenomen som beskrivs av icke-linjär akustik:
 - Överljudsknallar (sonic boom).
 - Musik, deltoners övertoner.
 - Akustisk levitation.

”Time dependent effects cannot be ignored in many cases; care is needed in making any nonlinear measurement ... a rock (or fatigued material for that matter) does not respond instantaneously to the insult of being measured.”

J. A. TenCate, P. A. Johnson, “Nonlinear Resonant Ultrasound Spectroscopy: Assessing Global Damage,” in *Nonlinear Ultrasonic and Vibro-Acoustical Techniques for Nondestructive Evaluation*, T. Kundu, Ed. Springer Nature Switzerland, 2018, pp. 89–101.



När hastigheten på ljudets källa närmar sig ljudets hastighet skapas en stötvåg

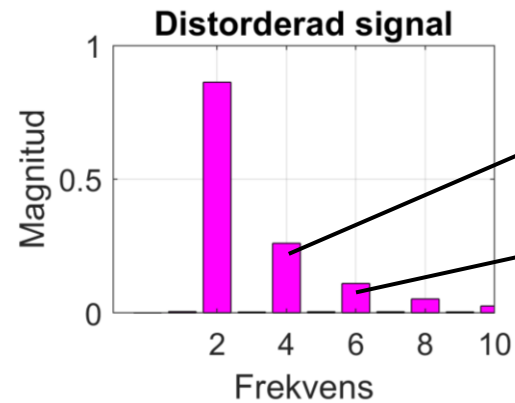
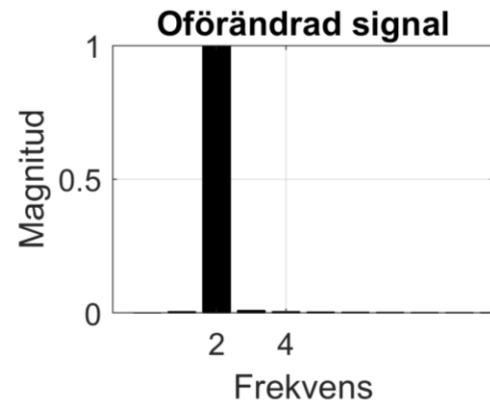
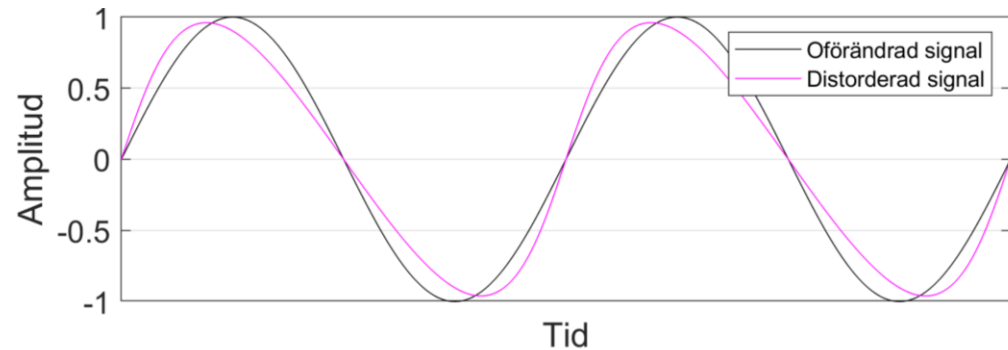


En vattenbubbla svävar genom akustisk levitation

Icke-linjära ultraljudsmetoder för OFP

Övertonsanalys

Signal med frekvens 2



Övertonernas amplitud i förhållande till grundtonen ger ett mått på icke-linjaritet

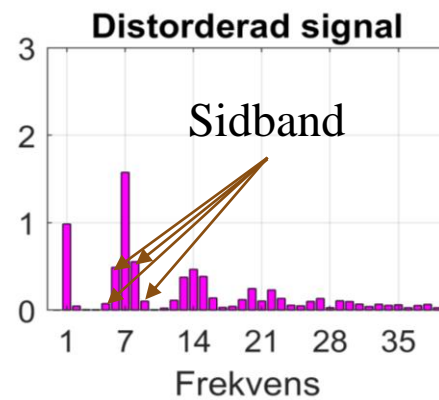
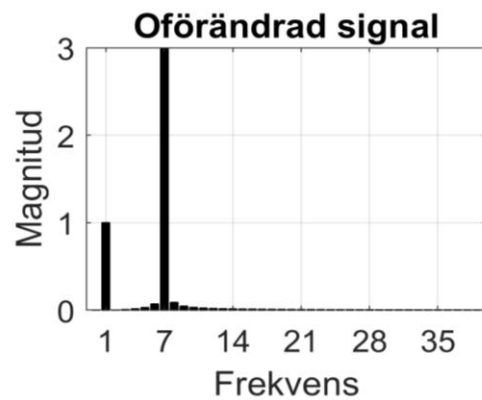
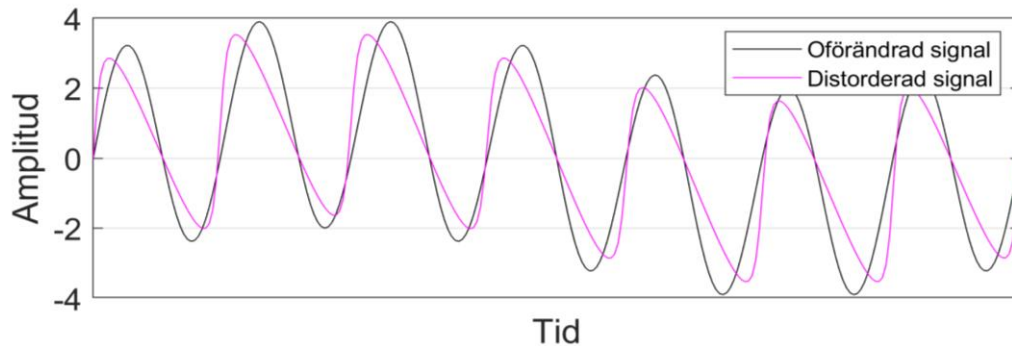
$$\beta = \frac{8A_2}{A_1^2 k^2 x} \propto \beta' = \frac{A'_2}{A_1'^2}$$

$$\delta = \frac{32A_3}{A_1^3 k^3 x} \propto \delta' = \frac{A'_3}{A_1'^3}$$

Icke-linjära ultraljudsmetoder för OFP

Modulationspektroskopi

Signal med frekvens 1 & 7



Sidbandens amplitud i förhållande till grundtonen ger ett mått på icke-linjaritet

$$\alpha = \frac{A_{sidband}}{A_{prob}}$$

Förutom analys i frekvensdomän kan amplitud- och frekvensmodulation analyseras separat genom Hilbert-transform

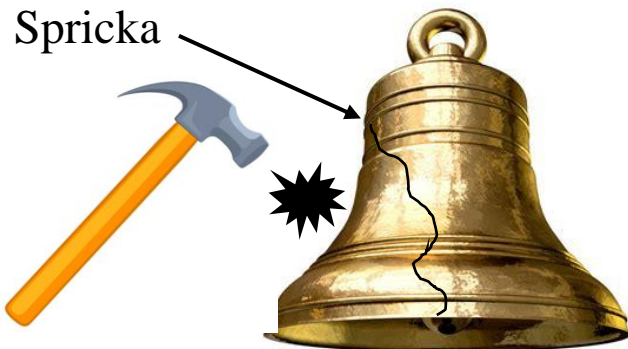
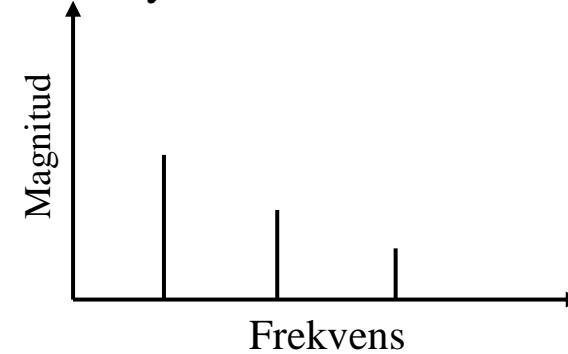


Icke-linjära ultraljudsmetoder för OFP

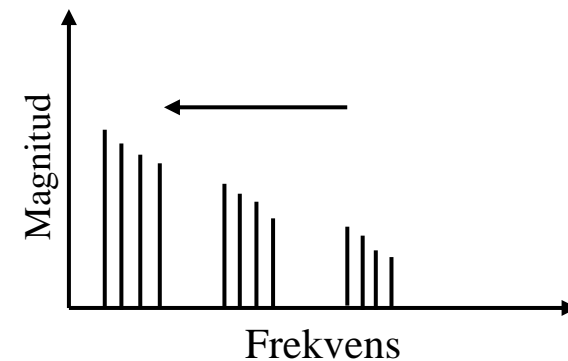
Resonansförskjutning



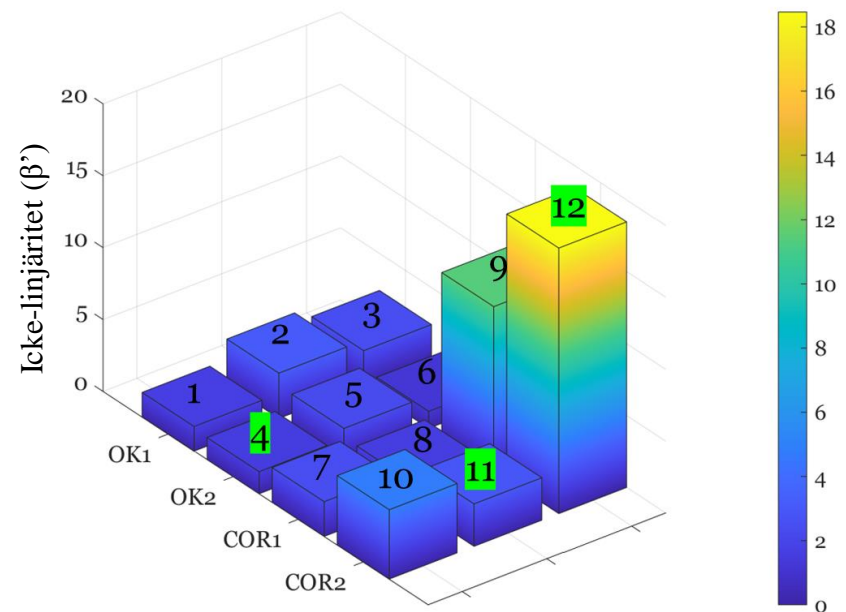
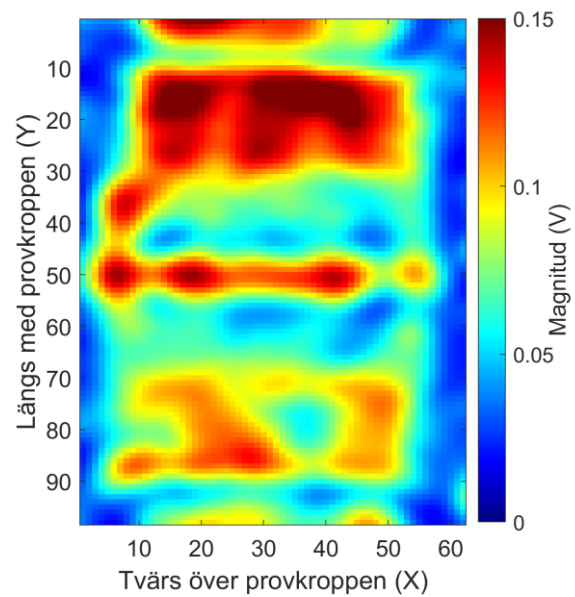
Hårdare slag ger högre volym men samma toner.



Hårdare slag ger andra toner.



Forskningsresultat

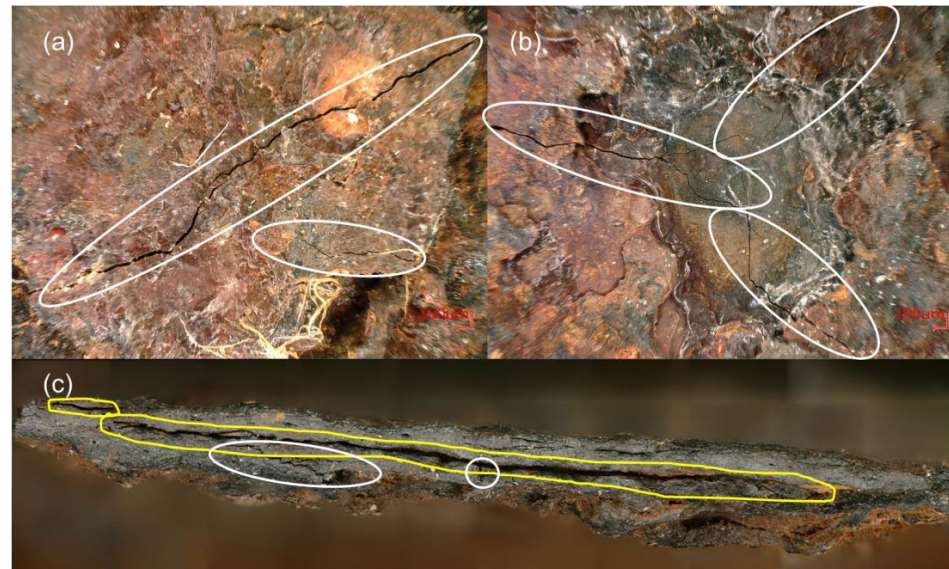


Delprojekt

- **Icke-linjära ultraljudsegenskaper hos en korroderad stålplåt.**
 - Resultat presenterade vid NDE NucCon 2023.
 - Publikation i vetenskaplig tidskrift: M. Nilsson, P. Ulriksen, and N. Rydén, “Nonlinear ultrasonic characteristics of a corroded steel plate,” *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 38, no. 3, pp. 456–479, 2022. doi:10.1080/10589759.2022.2123481
- **Utvärdering av korrosion i stålplåtar ingjutna i betong med användning av icke-linjära ultraljudsmetoder.**
 - Resultat presenterade vid NDE in Nuclear 2023.
 - Publikation i vetenskaplig tidskrift: M. Nilsson, E. Huttunen-Saarivirta, E. Bohner, and M. Ferreira, “Non-destructive evaluation of corrosion in steel liner plates embedded in concrete using nonlinear ultrasonics,” *Construction and Building Materials*, vol. 408, p. 133691, 2023. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.133691
- **Icke-linjär vågmodulering för detektering av korroderade stålplåtar ingjutna i betong.**
 - Delresultat presenterade vid NDE NucCon 2023.
 - Arbete med manuskript pågående.
- **Ultraljudsavsättning av korroderade stålplåtar ingjutna i betong med användning av både linjära och icke-linjära tekniker.**
 - Resultat presenterade vid SSM Forskningsdagar 2023.
 - Arbete med manuskript pågående.

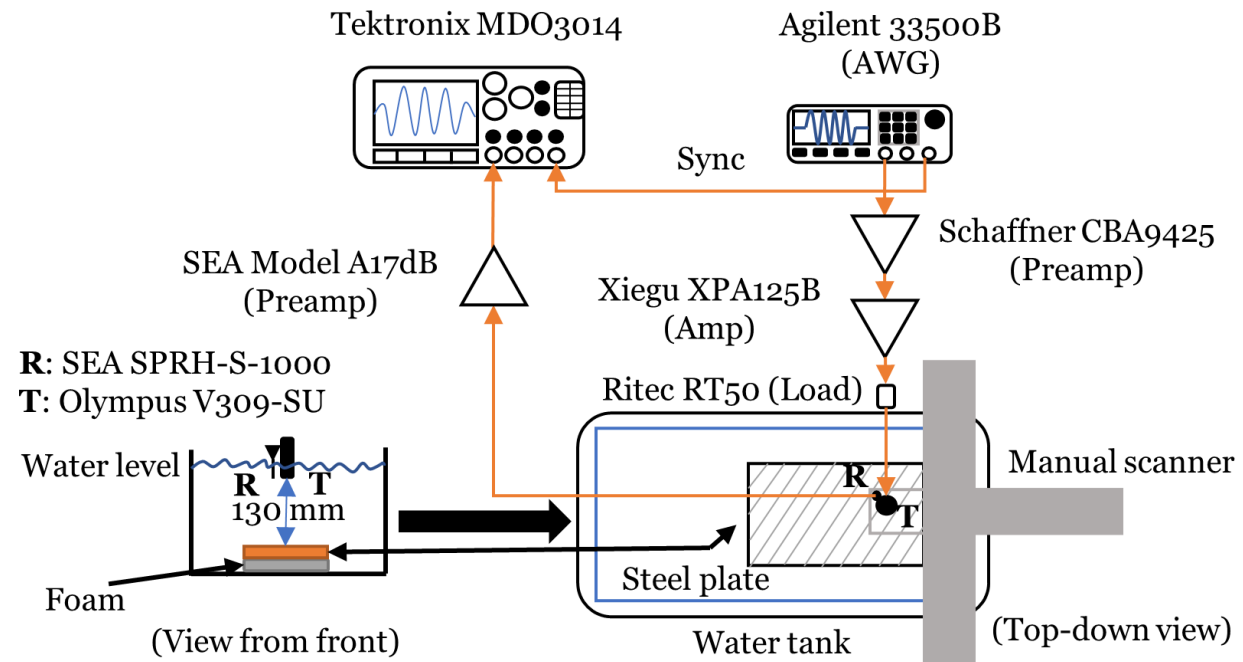


Icke-linjära ultraljudsegenskaper hos en korroderad stålplåt



Motivering

- Innan ingjutna plåtar kan undersökas bör problematiken renodlas.
 - Ger korroderad plåt upphov till mätbar ökning av icke-linjäritet?
- Mätningar genomförda med provkroppen nedsänkt i vatten eliminerar kopplingsproblematik mellan svängare/sökare och provkropp.



Undersökning av korroderad plåt

Skalrosten har sprickor i dess volym och yta

Undersökt provkropp

225 mm

260 mm

Skalrost

OK1

1

2

3

OK2

4

5

6

COR1

7

8

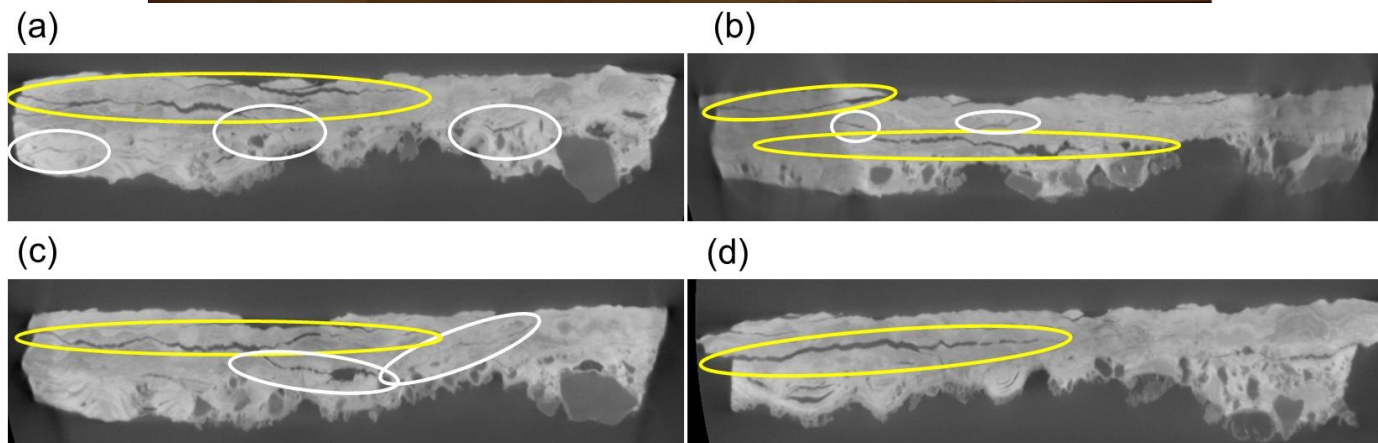
9

COR2

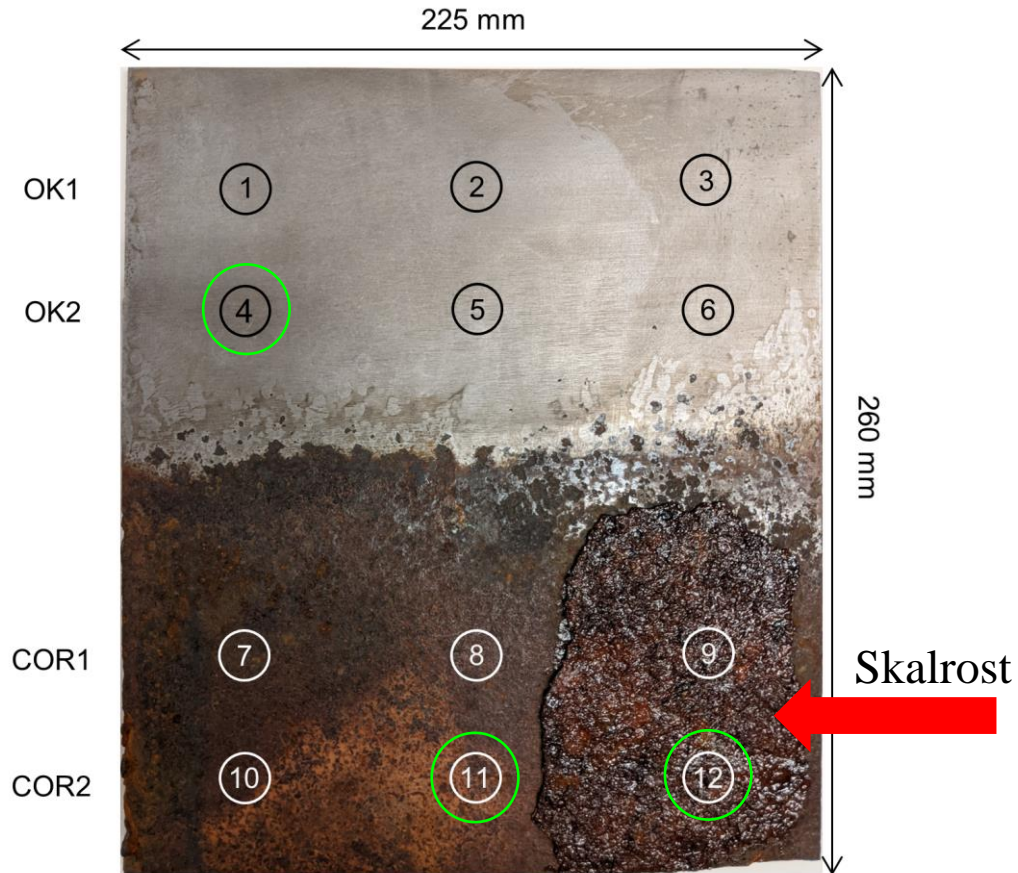
10

11

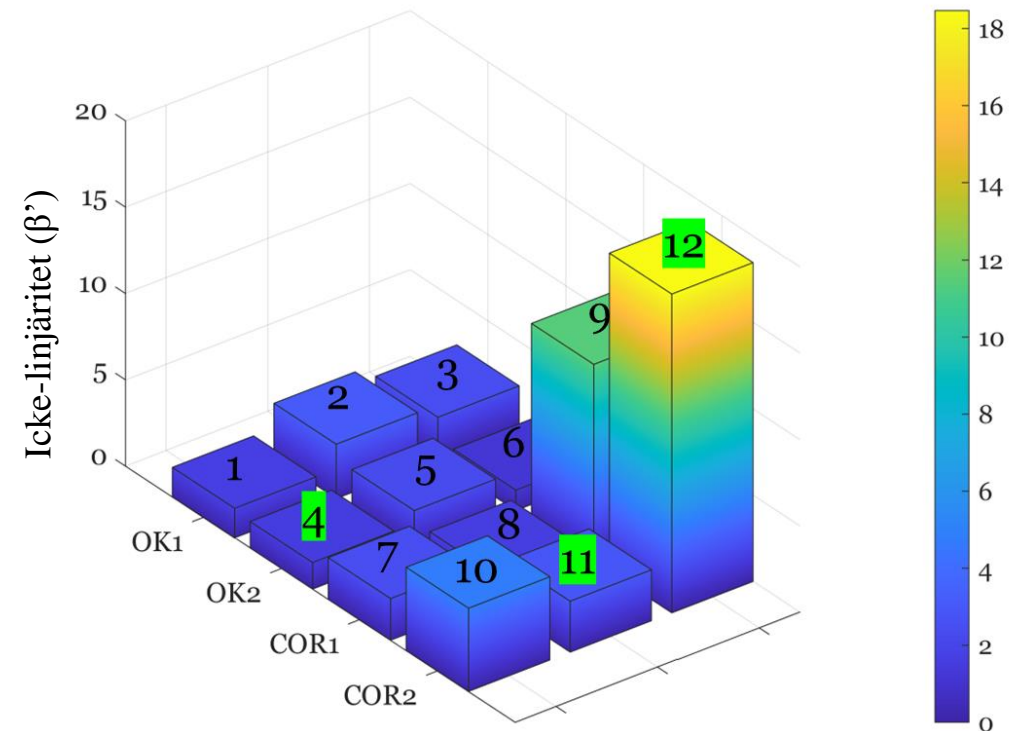
12



Övertonsanalys på korroderad plåt



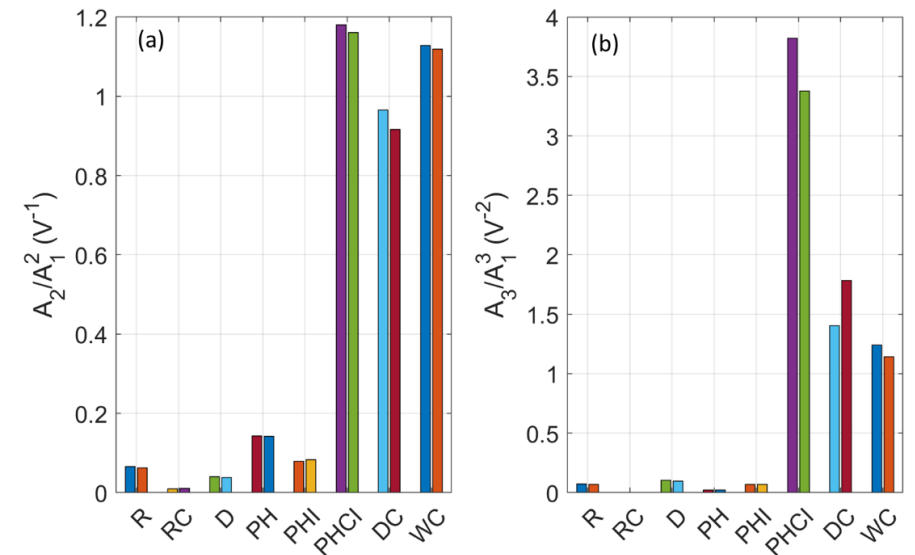
$$\beta' = \frac{A(2f)}{A(f)^2}$$



Resultat publicerade:

M. Nilsson, P. Ulriksen, and N. Rydén, "Nonlinear ultrasonic characteristics of a corroded steel plate," *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 38, no. 3, pp. 456–479, 2022. doi:10.1080/10589759.2022.2123481

Utvärdering av korrosion i stålplåtar ingjutna i betong med användning av icke- linjära ultraljudsmetoder



Motivering

- Korrosion av plåt i betong bör endast ske då det finns omständigheter som sänker pH-värdet lokalt.
 - Ger ingjutna plåtar som korroderar i betong upphov till förhöjd icke-linjäritet?
 - Ger ingjutna främmande föremål upphov till förhöjd icke-linjäritet?
 - Ger delamineringar mellan plåt och betong upphov till förhöjd icke-linjäritet?



Provkroppar utsatta för accelererad korrosion

Undersökta provkroppar

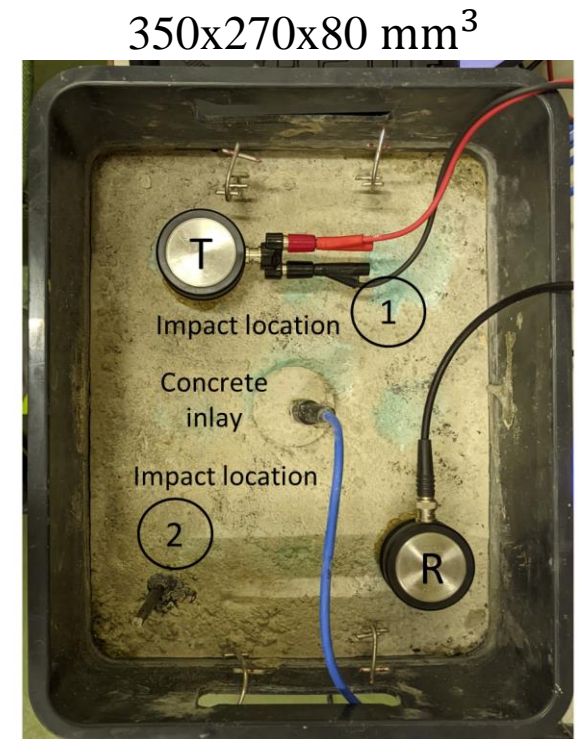
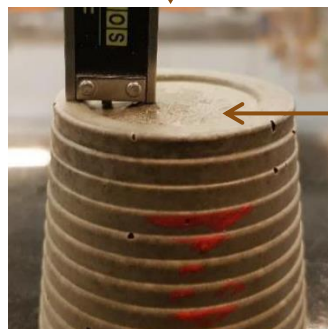
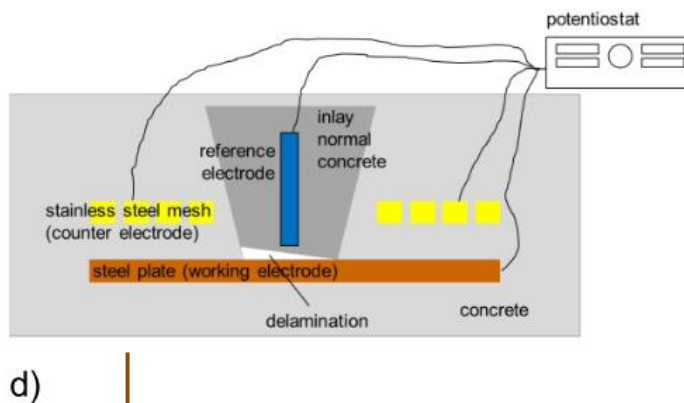
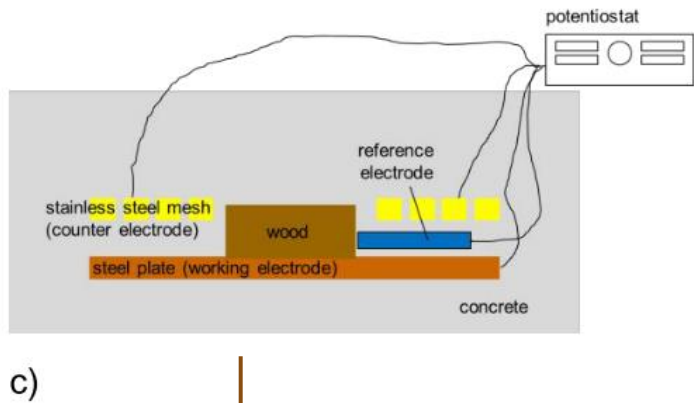
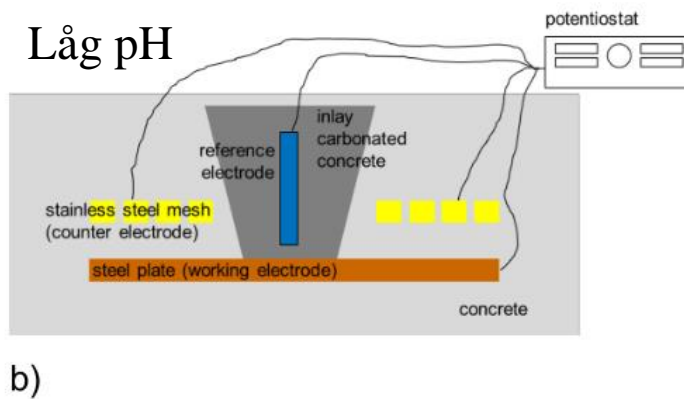
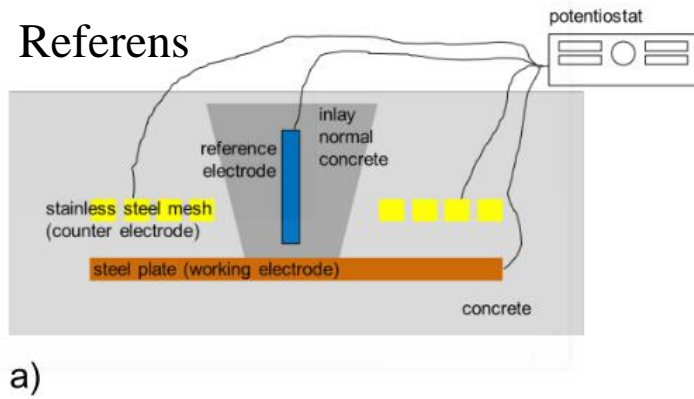
Benämning	Förutsättningar
R	Referens (inga tillsatser)
RC	Referens med tillsatt klorid
D	Delaminering mellan betong och plåt
PH	Låg pH (genom karbonatisering)
PHI	Låg pH + påtryckt ström
PHCI	Låg pH, tillsatt klorid, och påtryckt ström
DC	Delaminering med tillsatt klorid
WC	Ingjuten träbit med tillsatt klorid

Gemensamma förutsättningar:

- Lagrade i ett konstant klimat med 20° C och 65% RH under 2 år.
- Utsatta för periodvis blötning – torkning för att påskynda korrosion.
- Betongen avlägsnades mekaniskt efter ultraljudsmätningarna.

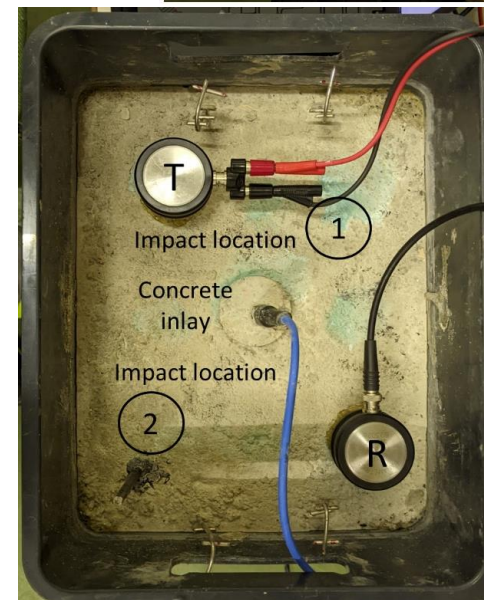
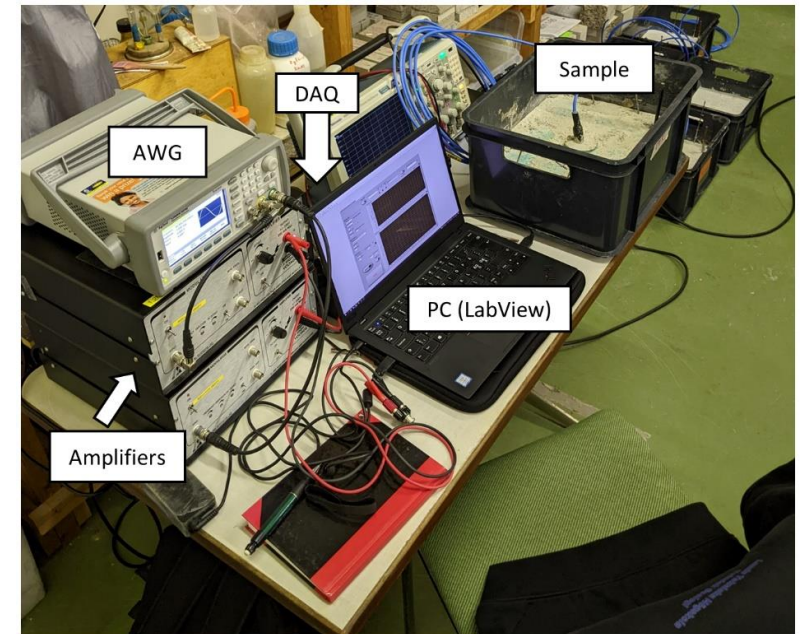


Provkroppar forts.

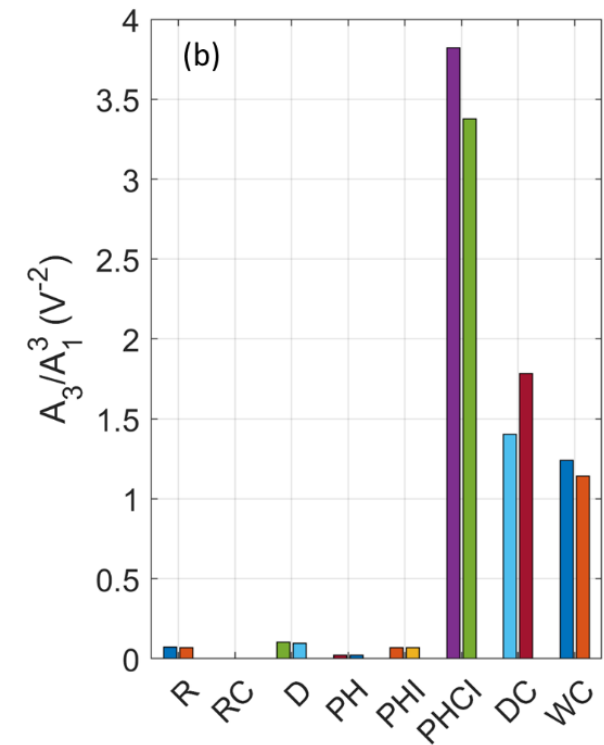
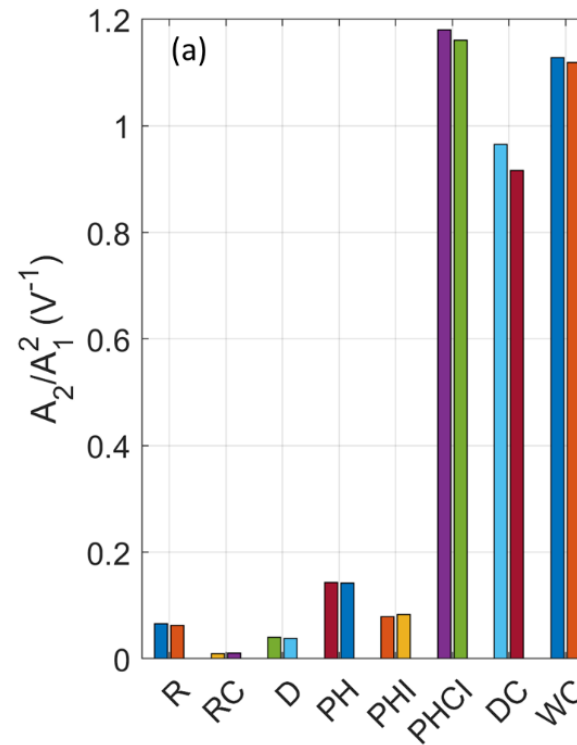
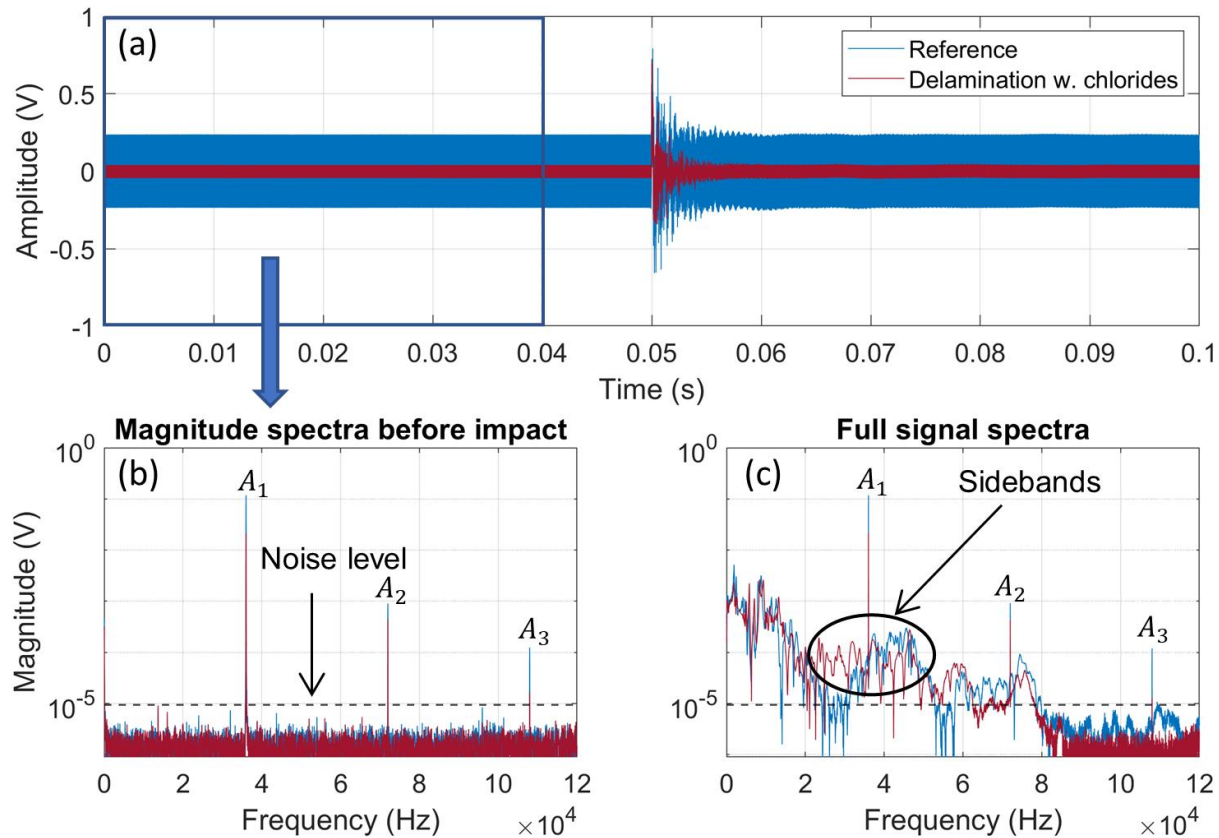


Metod(er)

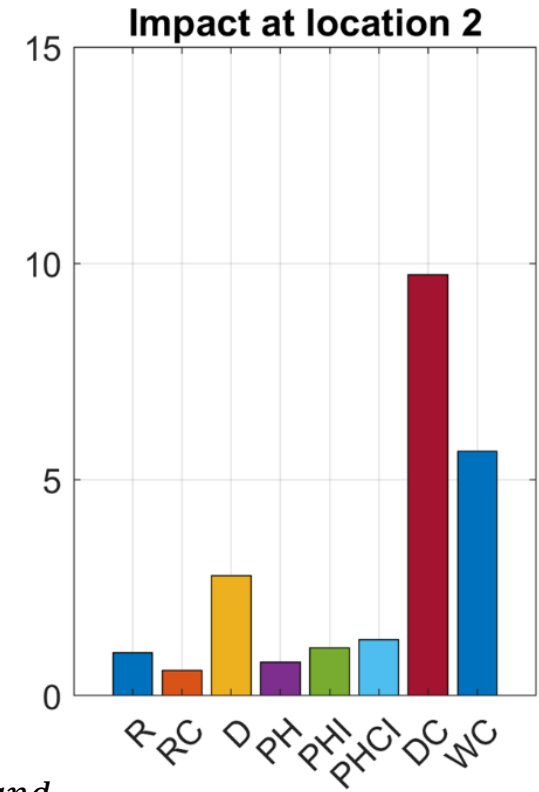
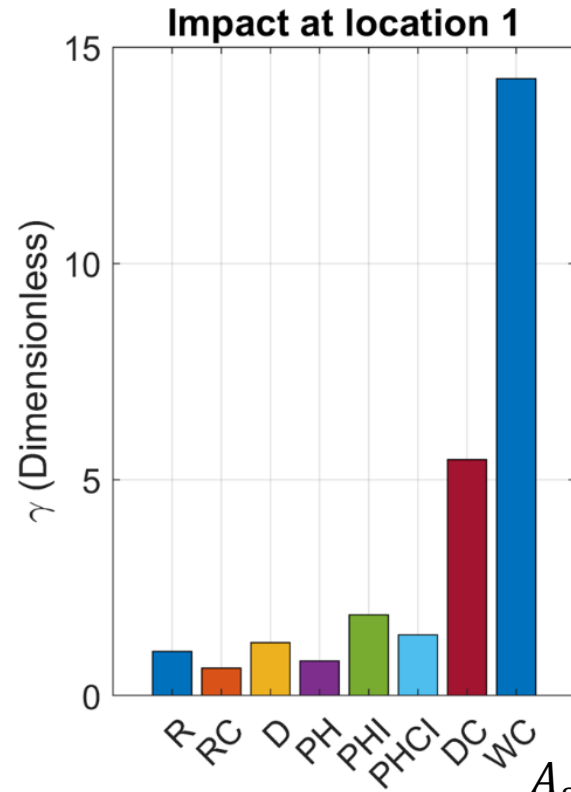
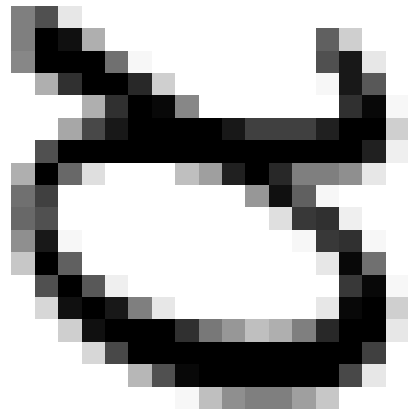
- En ultraljudsmätning där signalen ‘störs’ av ett hammarslag.
 - Övertonsanalys
 - $\frac{A_2}{A_1^2}$ & $\frac{A_3}{A_1^3}$
 - Modulationsanalys
 - Frekvensdomän $\alpha = \frac{A_{sidband}}{A_{prob}}$
 - Ögonblicklig modulationskaraktäristik med Hilbert-Huang Transform (HHT)
- Excitation:
 - Prob: kontinuerlig sinus, 36 kHz 35 Vpp
 - Impulskälla: M4.5x15 mm Phillips skruv, 370 mm buntband.



Spektralanalys – Övertoner



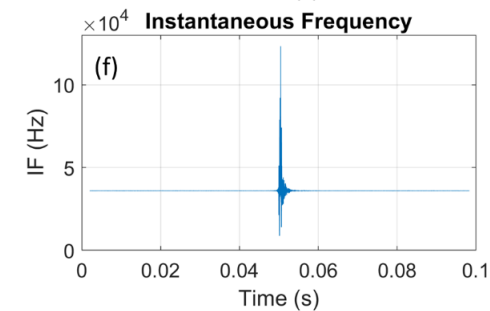
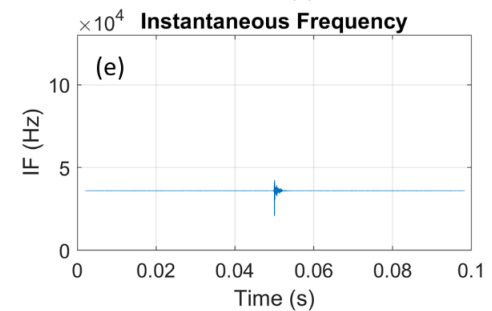
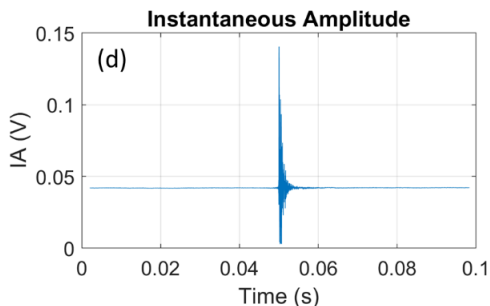
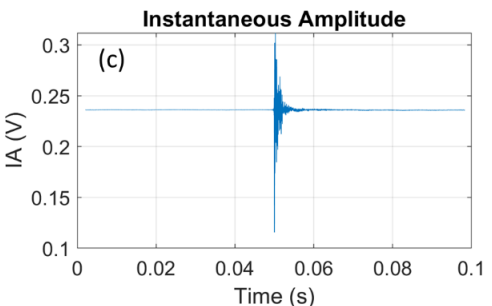
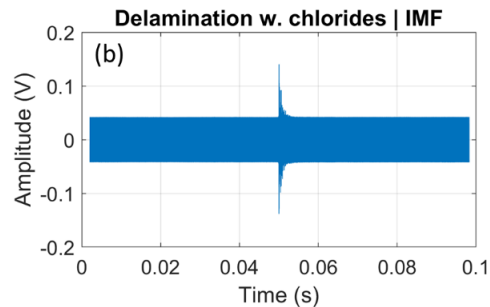
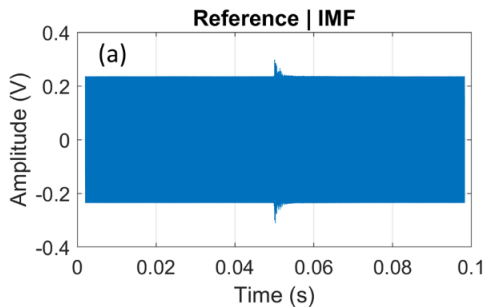
Spektralanalys – Modulation



$$\alpha = \frac{A_{sidband}}{A_{prob}}$$



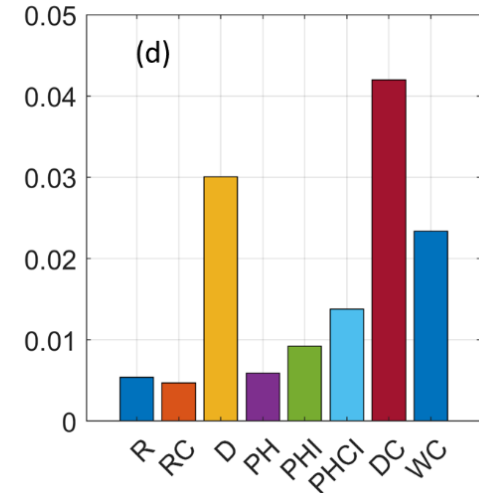
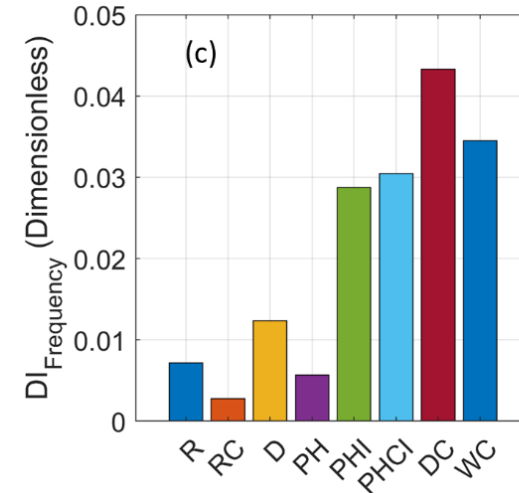
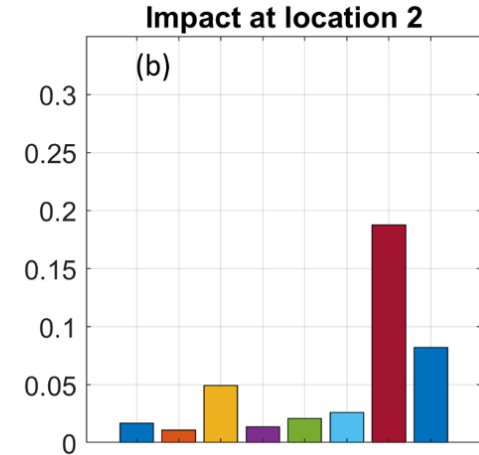
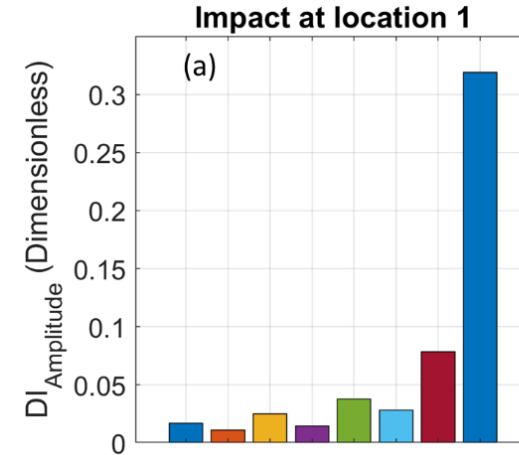
Modulationsanalys i tidsdomän



$$DI_A = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [IA(i) - \mu(IA)]^2}}{\mu(IA)}$$

$\mu(IA)$ = medelvärde IA före slag

$$DI_F = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [IF(i) - F_{probe}]^2}}{F_{probe}}$$

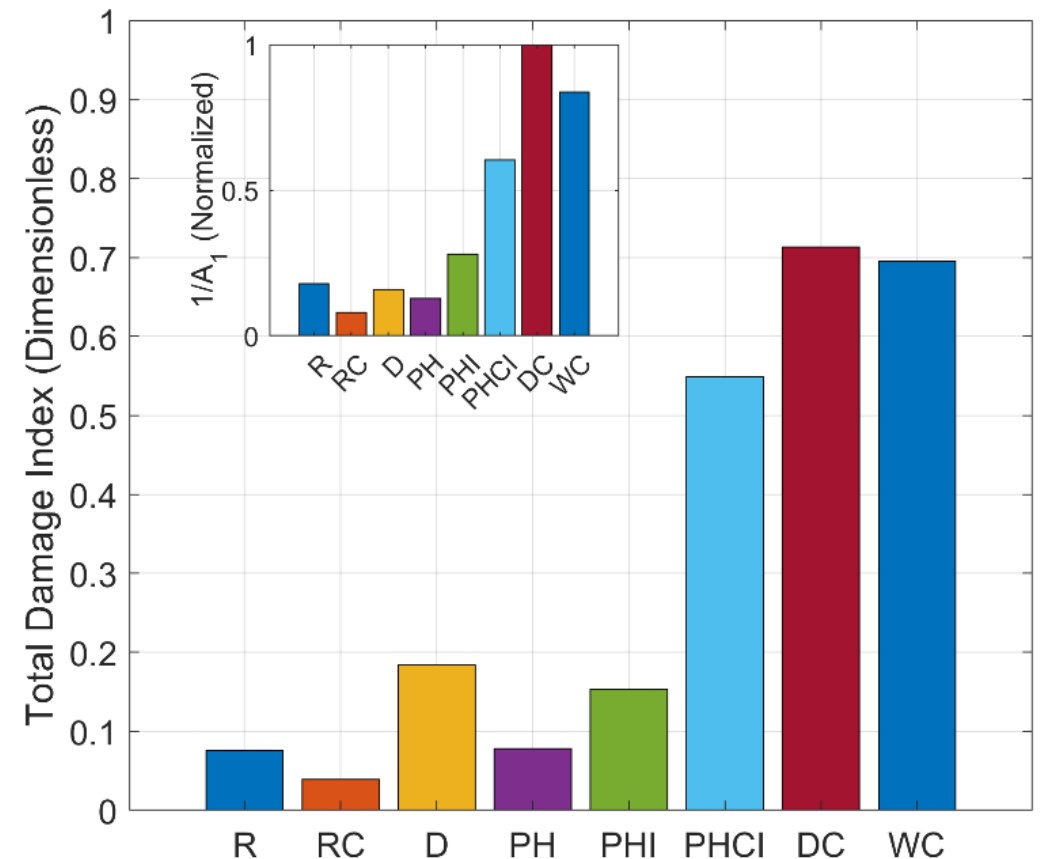


Sammanlagt resultat

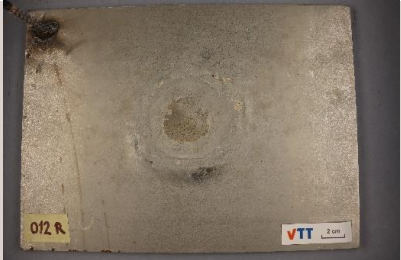



- Total Damage Index (TDI) är sammanslagningen av N st normaliserade skadevärden DI_i .

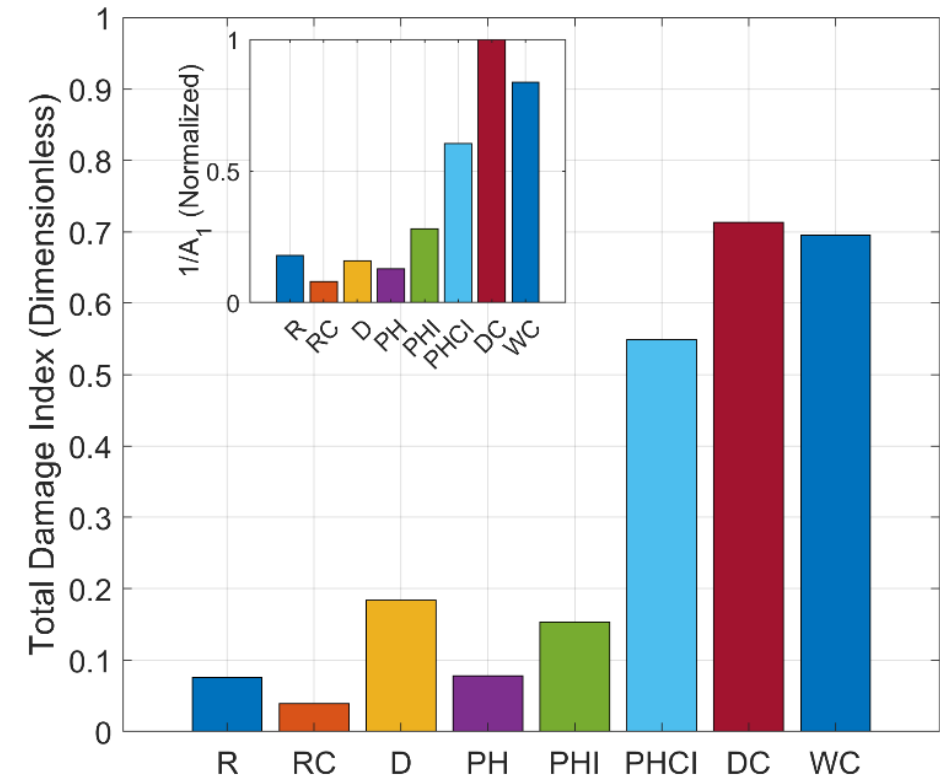
$$TDI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N DI_i$$

- Genom att kombinera flertalet skadevärden tas många olika fenomen i beaktning samtidigt.

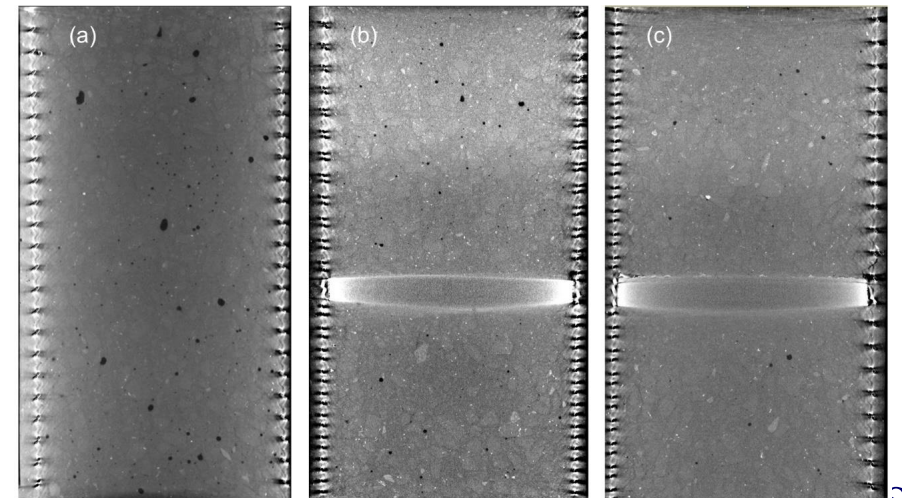
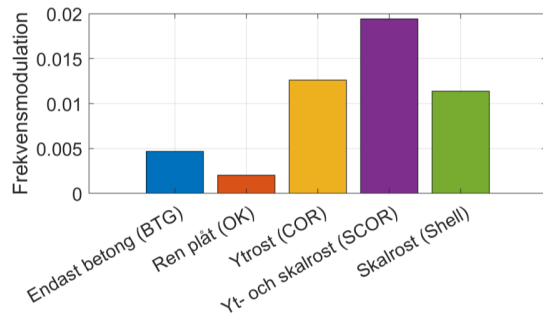
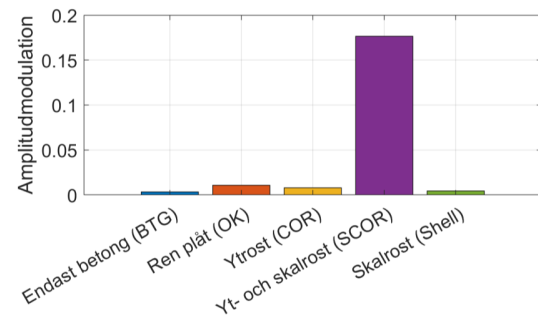


Korrosionskaraktärisering

Kategori	Maximal korrosion, % av total yta	Provkroppar inom kategorin	Exempel på platens yta efter korrosionsprocessen
Ingen corrosion	0.1	R, D	
Svag korrosion	1	RC, DC	
Måttlig korrosion	1-10	PH, WC	
Allvarlig korrosion	>50	PHI, PHCI	



Icke-linjär vågmodulering för detektering av korroderade stålplåtar ingjutna i betong.



Motivering

- Plåt som korroderat i betong kan ge upphov till icke-linjära utslag om kontakten mellan plåt och betong påverkas.
 - Ger endast förekomsten av korrosionsprodukter inuti betong upphov till förhöjd icke-linjäritet?
- Somliga icke-linjära fenomen kan ej förklaras genom traditionell elasticitetsteori.
 - Sprickliknande defekter ger upphov till sådana "icke-klassiska" fenomen .
 - Kan icke-klassisk modulation användas för att detektera allvarlig korrosion inuti betong?

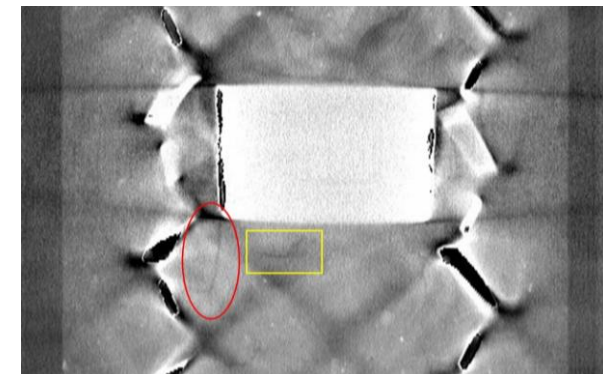
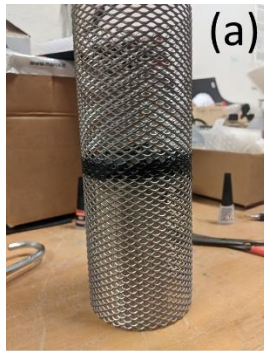
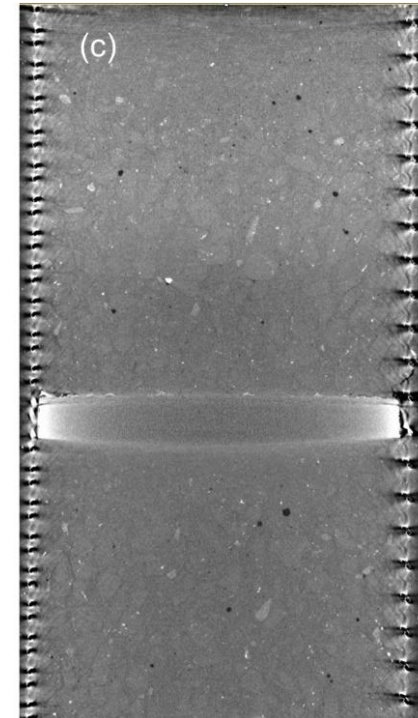
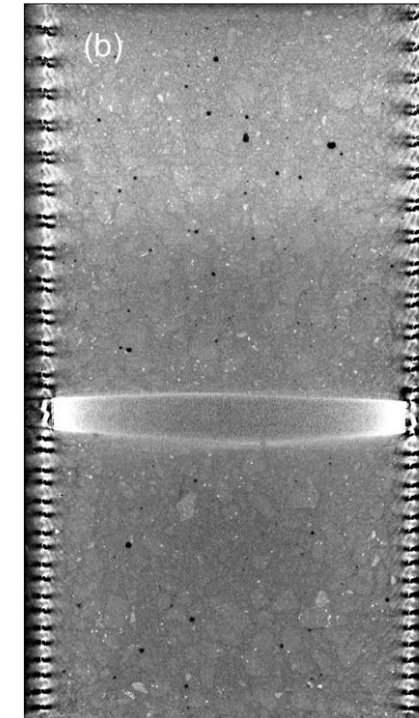
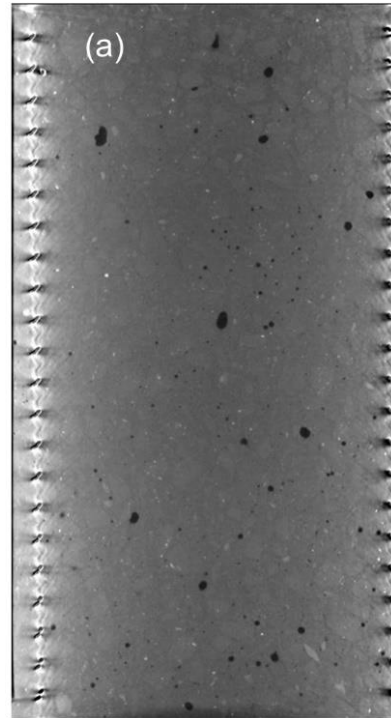
Undersökning av cylindriska provkroppar



Bara betong

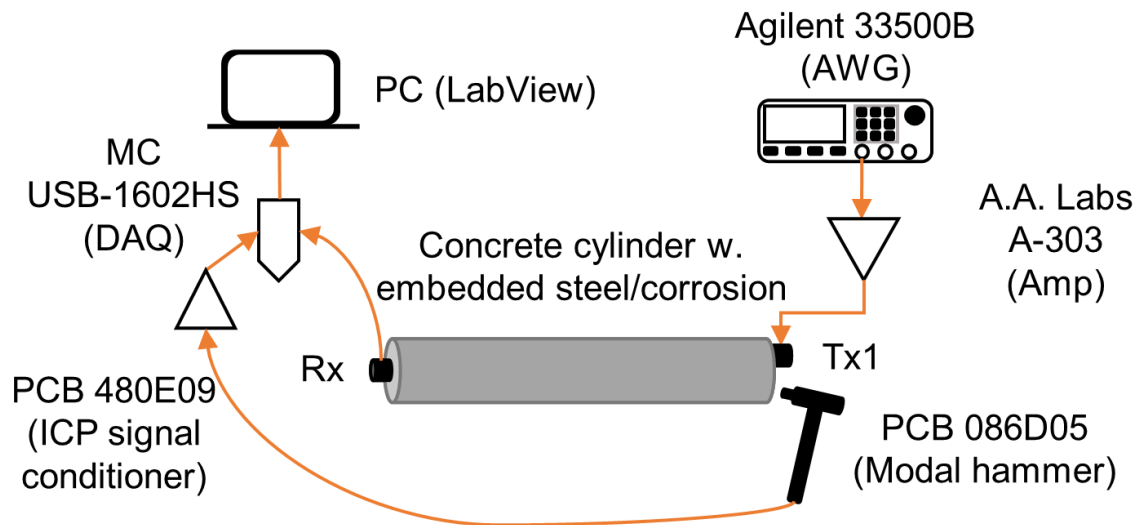
Ren plåt (OK)

Skalrostad (SCOR)



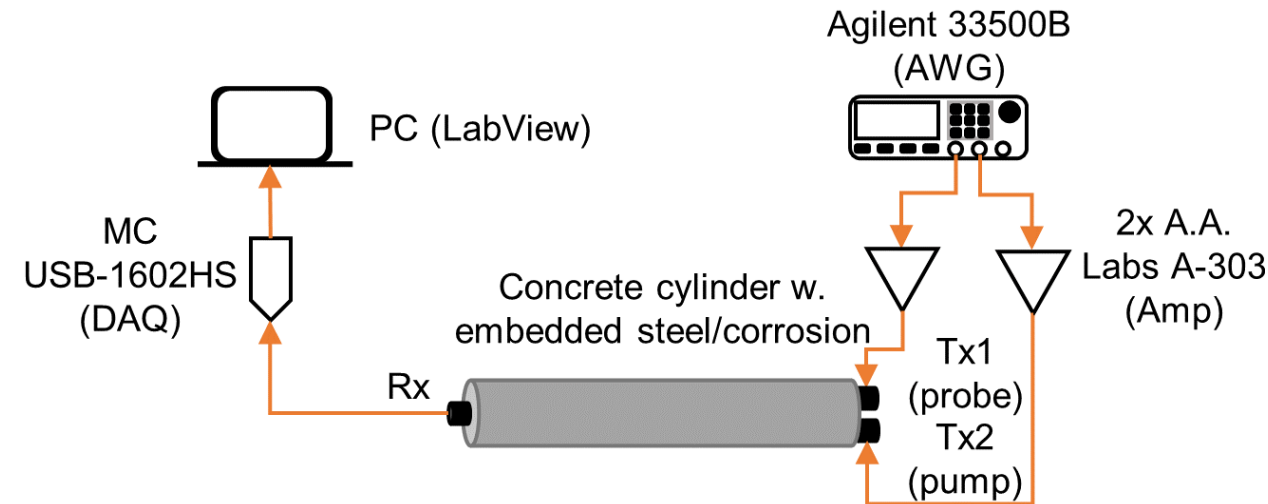
Metoder

Separation av modulationsfenomenen i tidsdomän



Tidigare arbete har indikerat att frekvensmodulation är synnerligen känsligt för korrosionsrelaterade defekter.

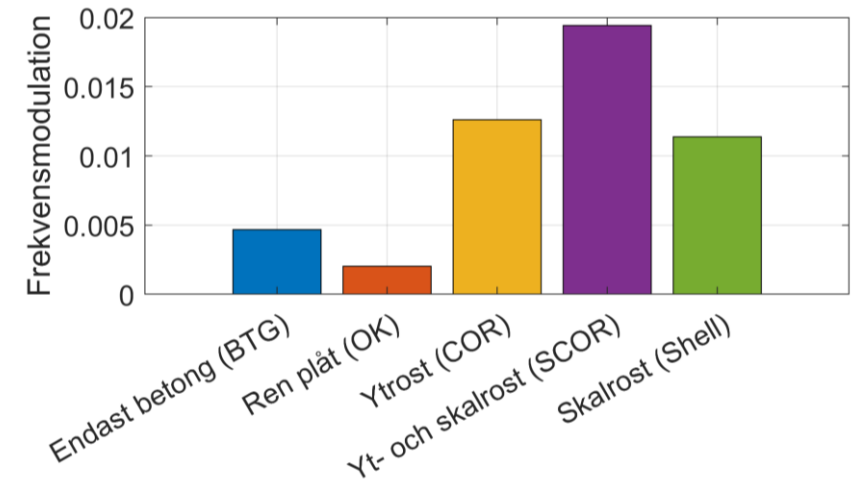
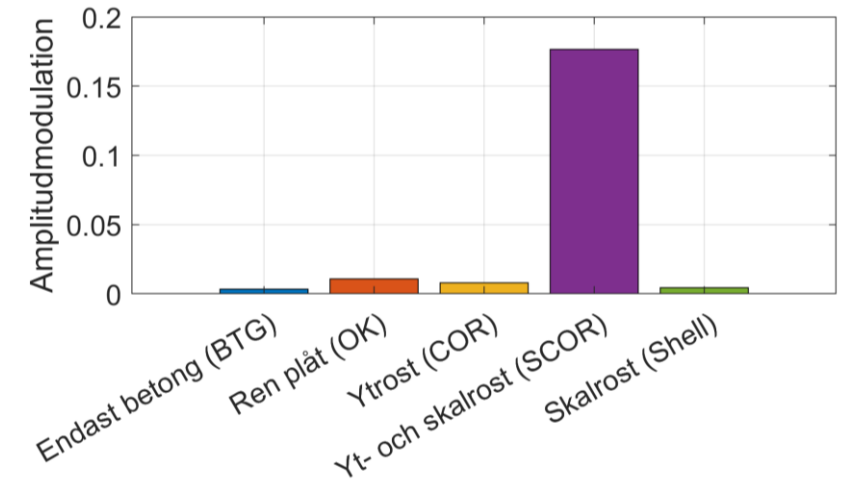
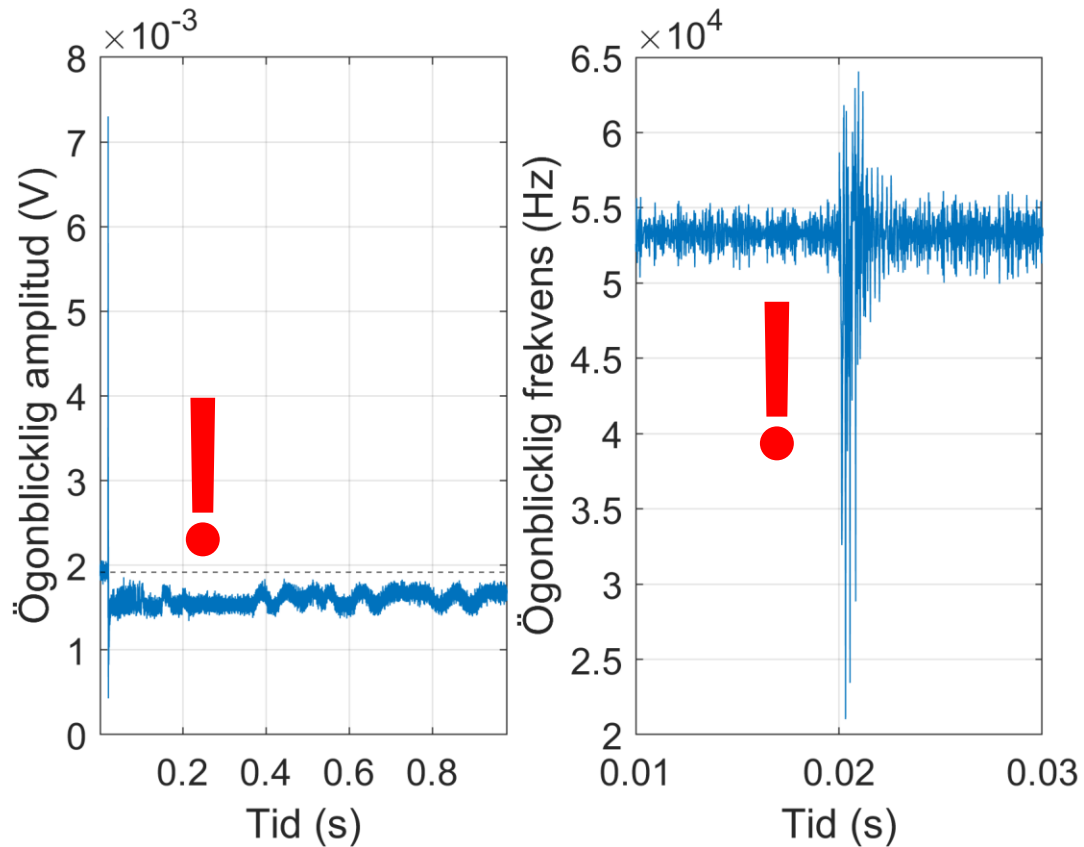
Icke-klassisk modulationspektroskopi



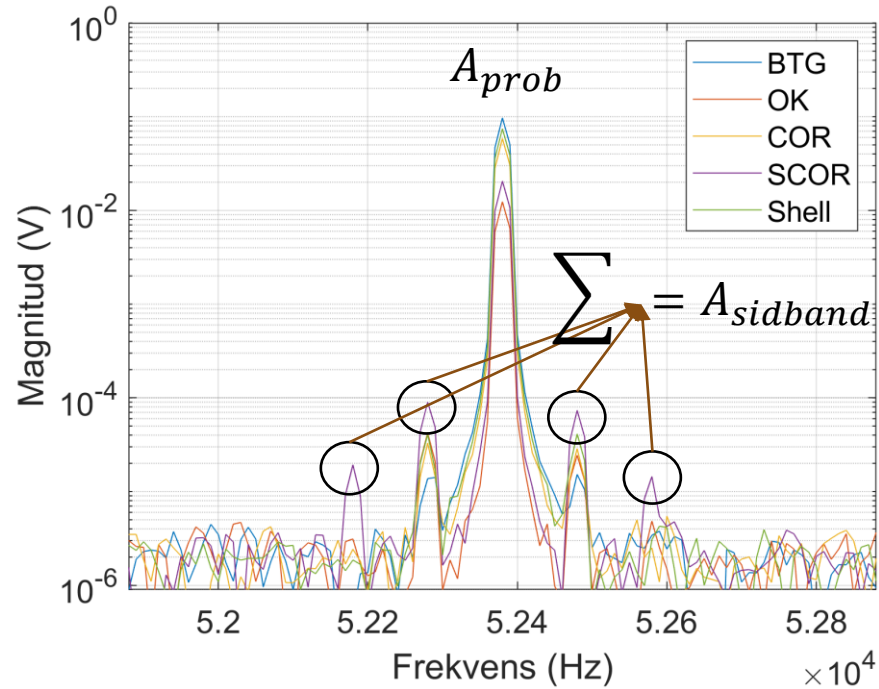
”Luxemburg-Gorky modulation”
Modulationsenergi överförs från en bärfrekvens till en probfrekvens.

Separation av modulationsfenomenen i tidsdomän

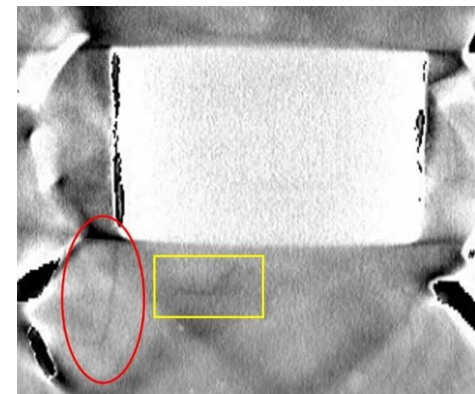
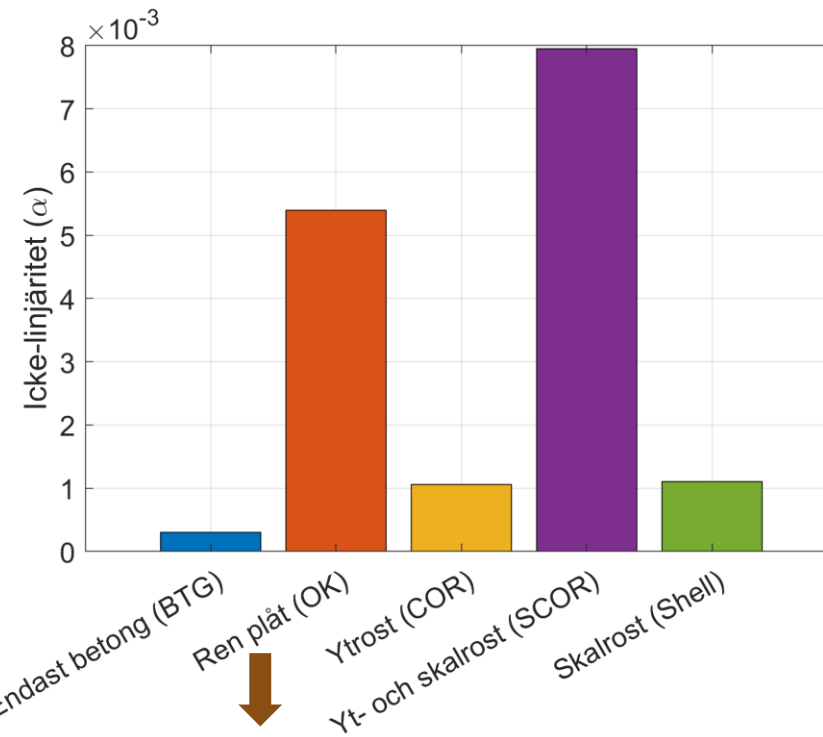
Yt- och skalrost (SCOR)



Icke-klassisk modulationspektroskopi



$$\alpha = \frac{A_{sidband}}{A_{prob}}$$

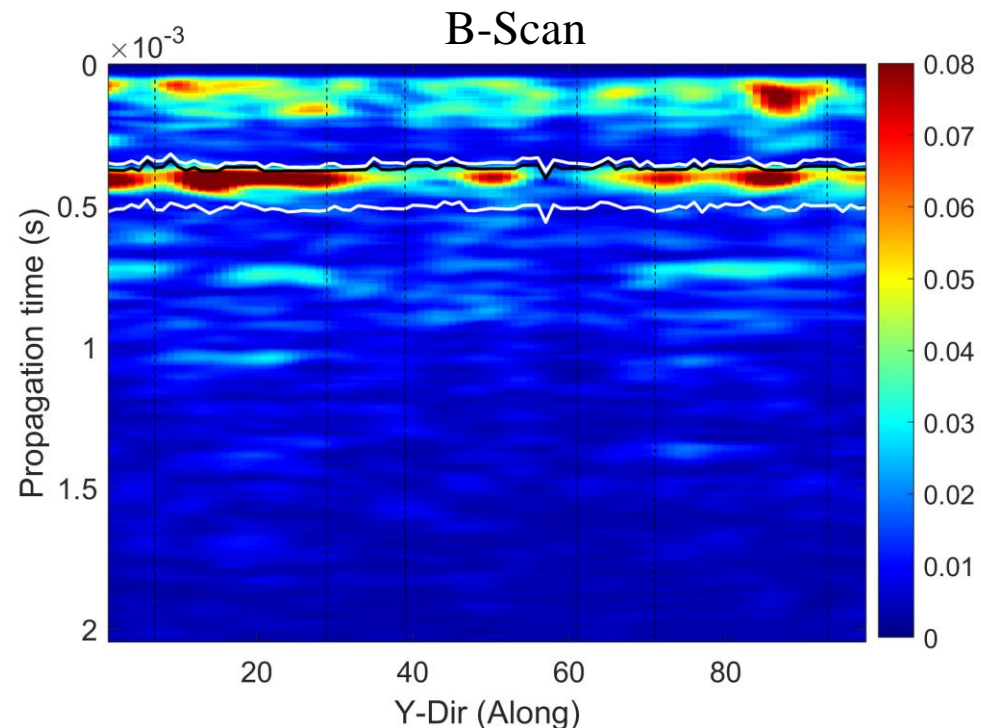


Ultraljudsavbildning av korroderade stålplåtar ingjutna i betong med användning av både linjära och icke- linjära tekniker

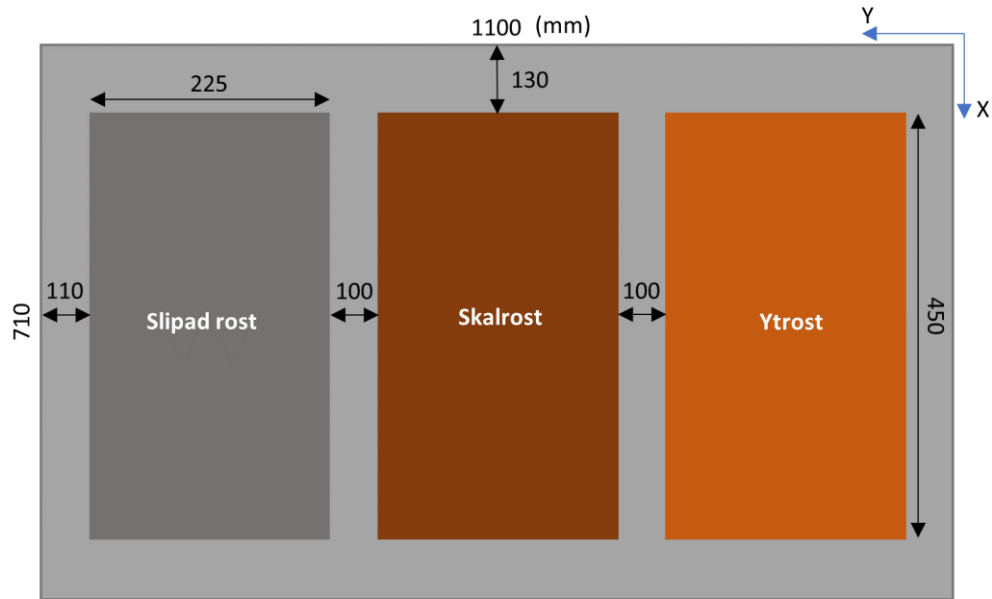


Motivering

- Tidigare arbete har indikerat att plåt som är ingjuten i betong ger upphov till ökad icke-linjäritet.
 - Även lokalt.
- Om spatial upplösning medges, ger signalerna från korroderad plåt i betong icke-linjära utslag?



Undersökt provkropp



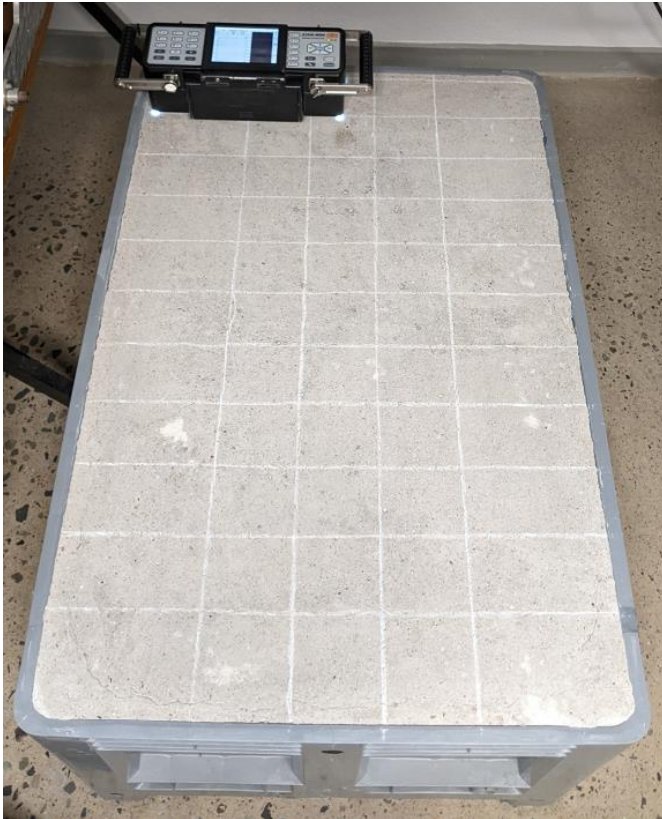
Linjära och icke-linjära tekniker

Utvärdering ACS 1040 MIRA

SAFT C-scan

4x12 element, 40 kHz

Stegning 10 cm x 4x11.



Utvärdering LTH Scanner

Linjär: Envelope C-scan

Icke-linjär: β' C-scan

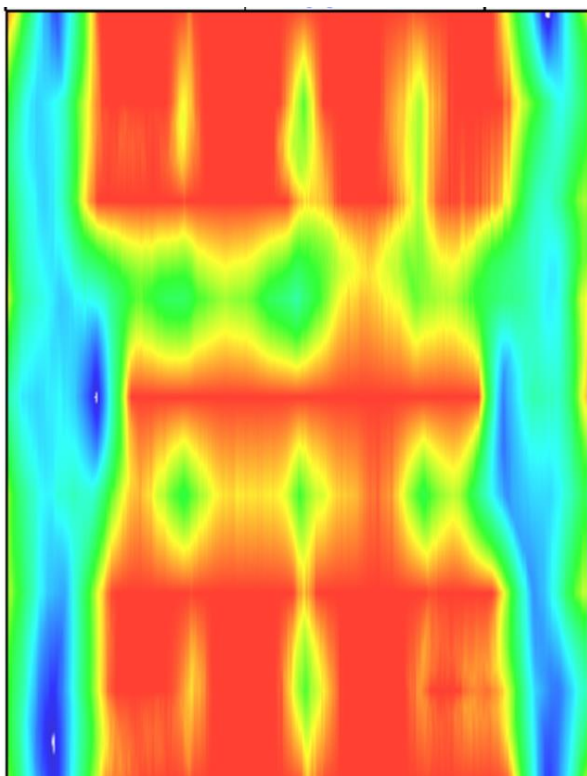
2x 3x4 element (en grupp sänder, en mottar parallellt), 40 kHz

Stegning: 1cm x 98x62

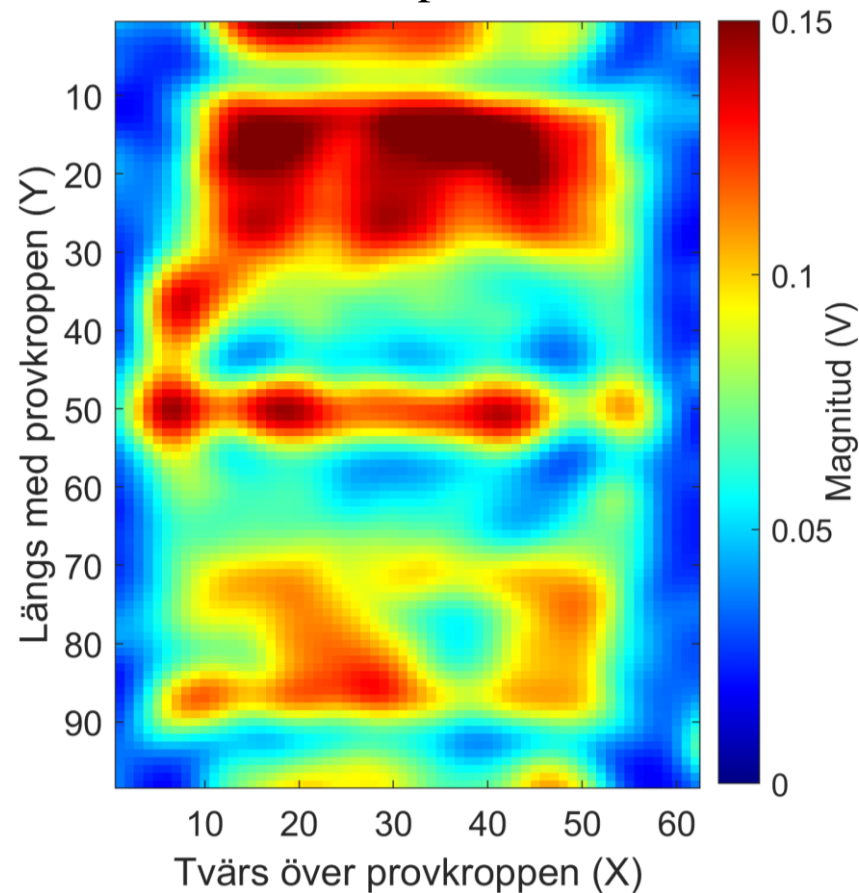


Skanningsresultat

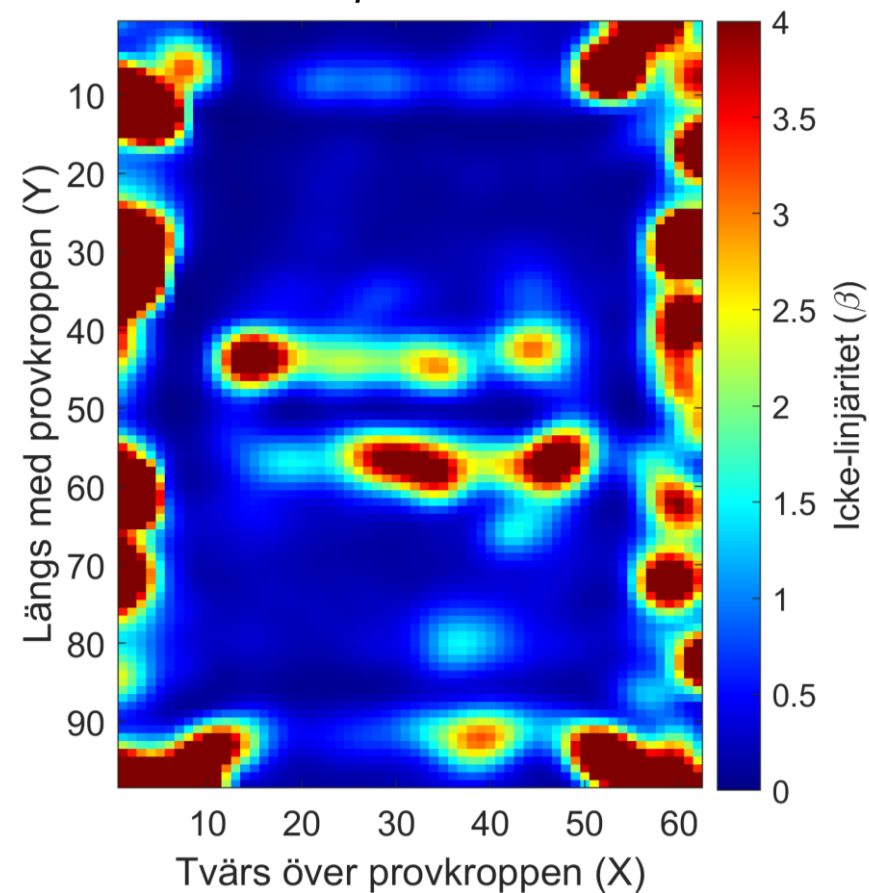
ACS A1040 MIRA
SAFT C-scan



LTH Skanner
Envelope C-scan



LTH Skanner
 β' C-scan



Slutsatser

- Allvarlig korrosion ger upphov till korrosionsprodukter innehållandes sprickor, delamineringar, och porer.
 - Kan även påverka den mekaniska kontakten mellan plåtens yta och betongen.
- Inledande undersökningar på småskaliga provkroppar ger indikationer på att korroderad plåt ingjuten i betong kan detekteras med ultraljud och icke-linjär utvärdering.
 - Även ingjutna föremål och delaminering.
- Framtida försök bör genomföras på väl armerade provkroppar av större skala där den ingjutna tätplåten utsätts för accelererad korrosion.
 - Övervakning under korrosionsprocessen kan ge nyttig information.



Tack!



Strålsäkerhetsmyndigheten

Swedish Radiation Safety Authority



Energiforsk



LUNDS
UNIVERSITET