



LUNDS
UNIVERSITET

Forskningsläget just nu – Trender och lärdomar från internationella konferenser

MARKUS NILSSON, TEKNISK GEOLOGI, LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA



Agenda

- Standarder inom OFP av betong.
- Aktuellt kunskapsläge inom avbildning av betongkonstruktioners interiör
- Detektion av korrosion i kärntekniska betongkonstruktioner.
- 'Smart' betong och ingjutna sensorer.



Standarder inom OFP av betong



LUNDS
UNIVERSITET

Standarder inom OFP av betong

- OFP är starkt operatörsberoende.
 - Val av mätmetod.
 - Genomförande.
 - Tolkning av data.
- Standarder för inspektion av betong är viktigt för att *reducera operatörsberoende osäkerheter*.
 - Obligatoriska referenser i lämpliga föreskrifter.
 - Möjliggör kvalificering av personal.

OFP-standarder enl. SIS

OFP: 194 st

NDT: 77 st

Totalt: 271 st

För betong: 4 st

Trots att betong är ett av de vanligaste byggnadsmaterialen för kritisk infrastruktur saknas övergripande standarder för OFP.



Nya DIN-standarder inom OFP för betong

DIN 4871

*”Non-destructive testing –
Qualification of NDT personnel
in Civil Engineering (NDT-CE)”*

Publicerad Sept. 2022

DIN 4873

*”Non-destructive testing –
Certification of NDT personnel
in Civil Engineering (NDT-CE)”*

Pågående arbete



Deutsches Zentrum für
Schienenverkehrsforschung beim



Technische Universität München



TFI-Institut für Bodensysteme
an der RWTH Aachen e.V.



LUNDS
UNIVERSITET

Tysk standard DIN 4871 – Överblick

Standarden kan delas in i tre moduler

Metoder

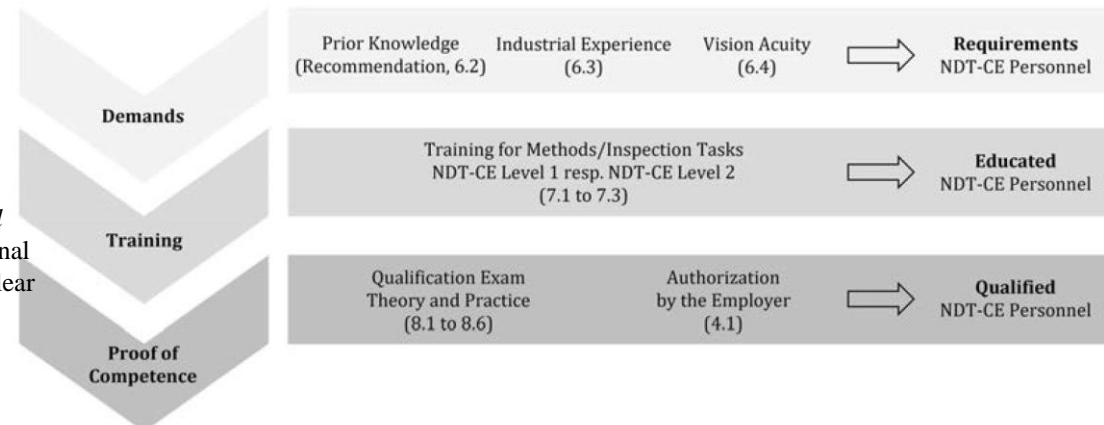
- a. Studshammare (rebound hammer)
- b. Magneto-induktiva metoder
- c. Potentialmappning
- d. Markradar
- e. Ultraljud
- f. Impact-echo

Inspektionsuppgifter

- g. Bestämma tryckhållfasthet
- h. Påvisa armering

Grundläggande kunskaper

- Överblick av NDT-CE
- Mätteknik
- Vågteori och grundläggande fysik
- Defektspecifika mekanismer
- Kvalitetskontroll
- Kombination av olika metoder



S. Feistkorn et al., “DIN 4871: Qualification of NDT Personnel in Civil Engineering (NDT-CE)”, Proceedings of the International Conference on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications, 2023, <https://www.ndt.net/?id=27810>

Tysk standard DIN 4871 – Inspektörsnivåer

Inspektionsmetod eller uppdrag	Inspektionserfarenhet i dagar*	
	NDT-CE Level 1	NDT-CE Level 2
Studshammare	5	20
Magneto-induktiva metoder	10	30
Potentialmappning	10	30
Markradar	10	30
Ultraljud	10	30
Impact-echo	10	30
Bestämning av tryckhållfasthet	15	30
Påvisning av armering	15	30

S. Feistkorn et al., “DIN 4871: Qualification of NDT Personnel in Civil Engineering (NDT-CE)”, Proceedings of the International Conference on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications, 2023, <https://www.ndt.net/?id=27810>

* Med en dag räknas 7 timmars arbetstid.

Inspektörsnivåer – Utbildning

Inspektionsmetod eller uppdrag	Utbildning i dagar	
	NDT-CE Level 1	NDT-CE Level 2
Studshammare	1	2
Magneto-induktiva metoder	2	2
Potentialmappning	1	2
Markradar	2	2
Ultraljud	2	2
Impact-echo	2	2
Bestämning av tryckhållfasthet	2	2
Påvisning av armering	2	2

S. Feistkorn et al., “DIN 4871: Qualification of NDT Personnel in Civil Engineering (NDT-CE)”, Proceedings of the International Conference on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications, 2023, <https://www.ndt.net/?id=27810>

Inspektörsnivåer – Utbildning för Level 2

Grundläggande moduler för NDT-CE Level 2*	Utbildning i dagar
Mätteknik	1
Vågteori och grundläggande fysik	1
Defektspecifika mekanismer	1
Kvalitetskontroll	1
Kombination av inspektionsmetoder	1
Totalt	5

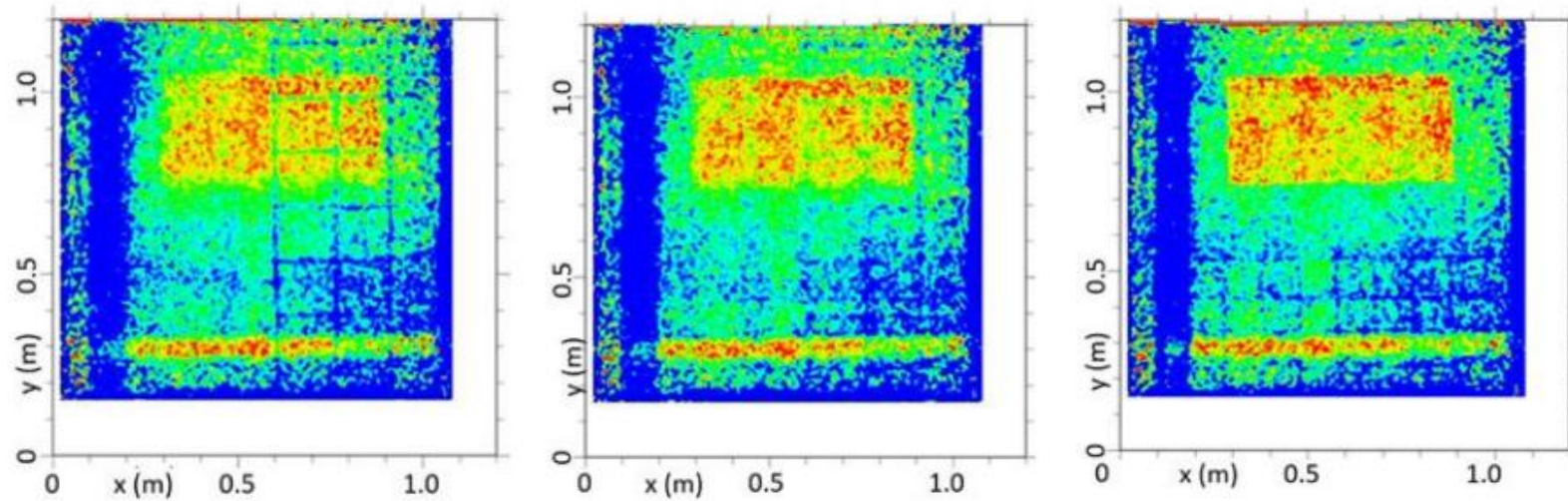
*För Level 1 krävs endast en överblickande endagarskurs

S. Feistkorn et al., “DIN 4871: Qualification of NDT Personnel in Civil Engineering (NDT-CE)”, Proceedings of the International Conference on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications, 2023, <https://www.ndt.net/?id=27810>

Sammanfattning NDT-CE DIN 4871

- Första internationella standarden för utbildning och kvalificering av inspektionspersonal riktat mot oförstörande provning av betongkonstruktioner.
 - Innefattar teoretisk och praktisk utbildning inom 6 provningsmetoder och 2 inspektionsuppgifter.
- Två utbildningsnivåer.
 - **Level 1:**
 - 1 dag grundutbildning, 1 – 2 utbildningsdagar per metod, 5 – 15 dagars erfarenhet per metod.
 - Får ej välja inspektionsmetod och får heller ej vara ansvarig för inspektionsarbetet.
 - **Level 2:**
 - 5 dagars grundutbildning, 2 – 3 utbildningsdagar per metod, 20 – 30 dagars erfarenhet per metod.
- Arbete pågår för att framställa en engelsk översättning av standarden.

Aktuellt kunskapsläge inom avbildning

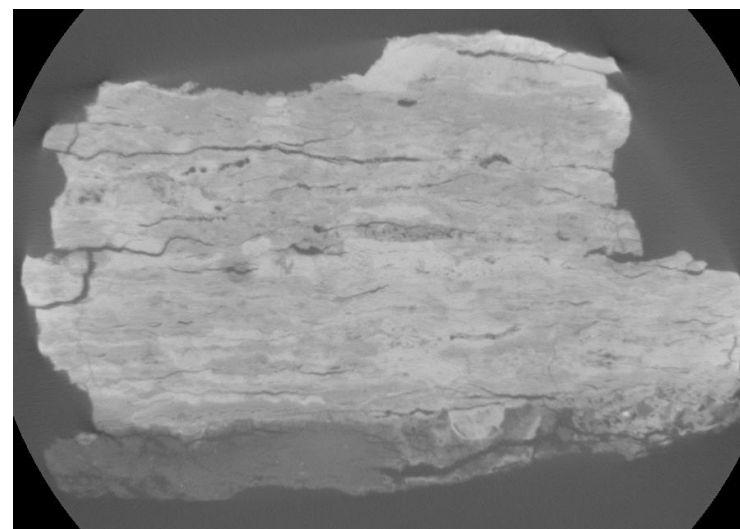


Vad är avbildning?

- Avbildning (imaging) avser tillämpningen tekniker som avbildar parametrar eller materialegenskaper i ett plan (2D) eller en volym (3D).
- Vanliga avbildningstekniker:
 - Röntgen
 - Ultraljud
 - Radar
- Nackdelar med konventionella tekniker:
 - Penetrationsdjup < 1 m
 - Stort penetrationsdjup minskar upplösningen.
 - Röntgen kräver stor försiktighet enligt strålskyddsföreskrifter.



Optisk avbildning av ytan på en korroderat tätplåt



Avbildning av tvärsnittet på en korroderat tätplåt med röntgen



Aktuellt kunskapsläge ultraljud

- Avbildning med skjuvvågspolariserat ultraljud med 3D-SAFT och FMC & TFM
 - Kommersiell utrustning:
 - ACS A1040 MIRA 3D
 - Pundit PD8050
 - Elop Insight (P-våg)
- Nonlinear Coda Wave Interferometry Imaging.
 - Spridning av ultraljud i betong skapar diffusa vågor.
 - Defekter skapar en förändring av spridningen.
 - Små defekter kan 'aktiveras' med en pumpexcitation.

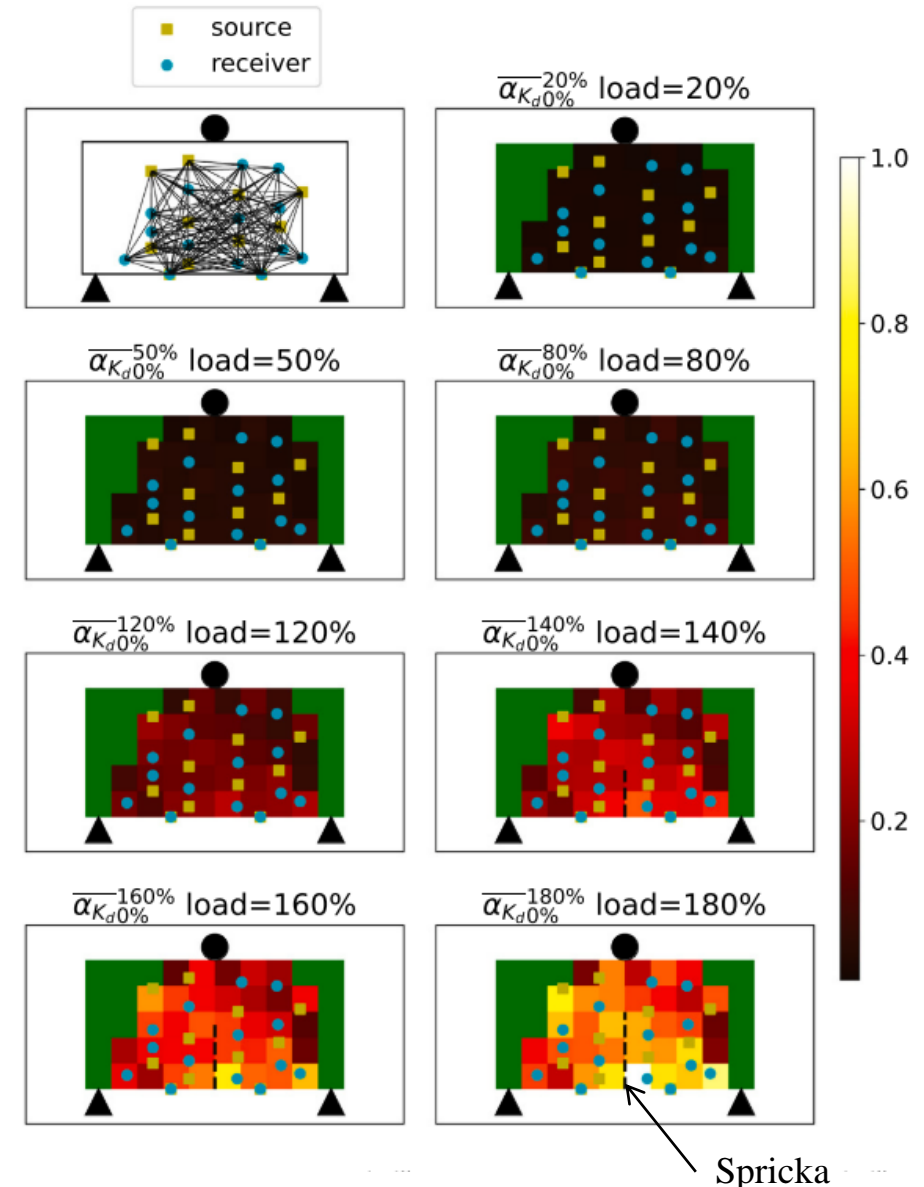
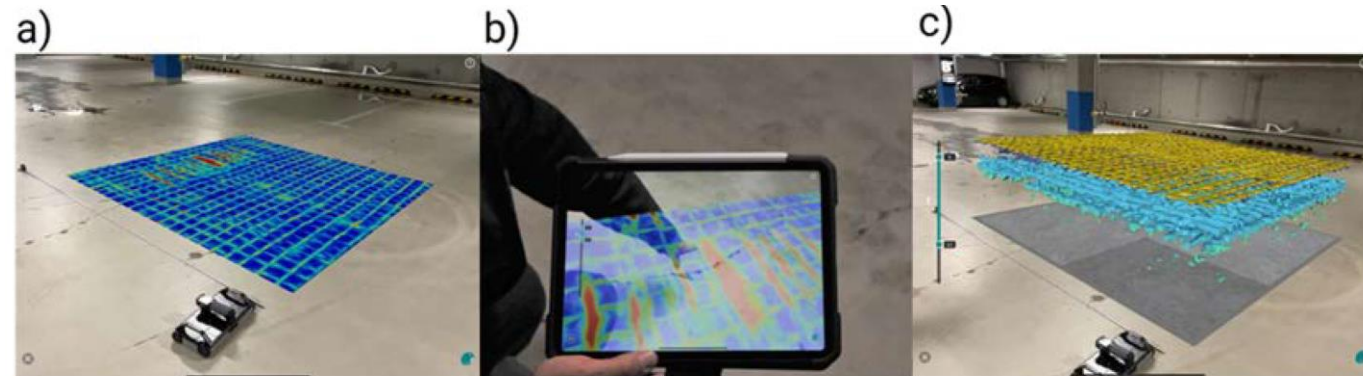
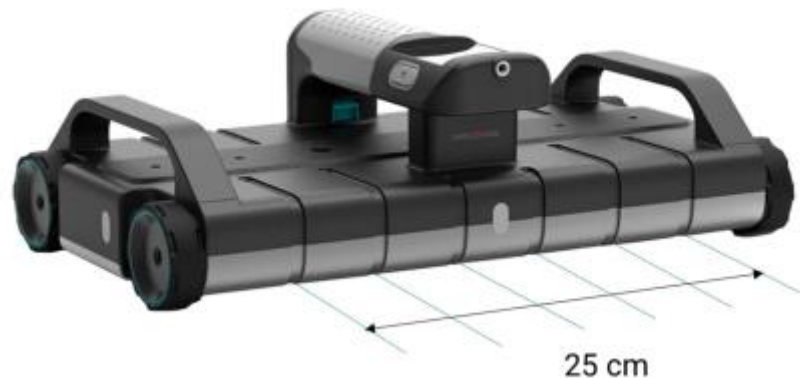
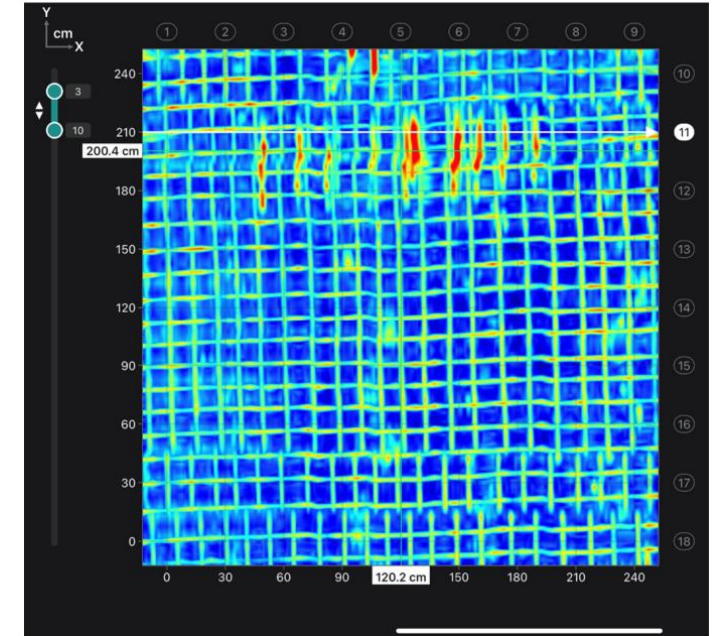


Bild från: S. Qu *et al.*, "Imaging concrete cracks using nonlinear coda wave interferometry (INCWI)," *Construction and Building Materials*, vol. 391, p. 131772, 2023. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.131772

Aktuellt kunskapsläge GPR

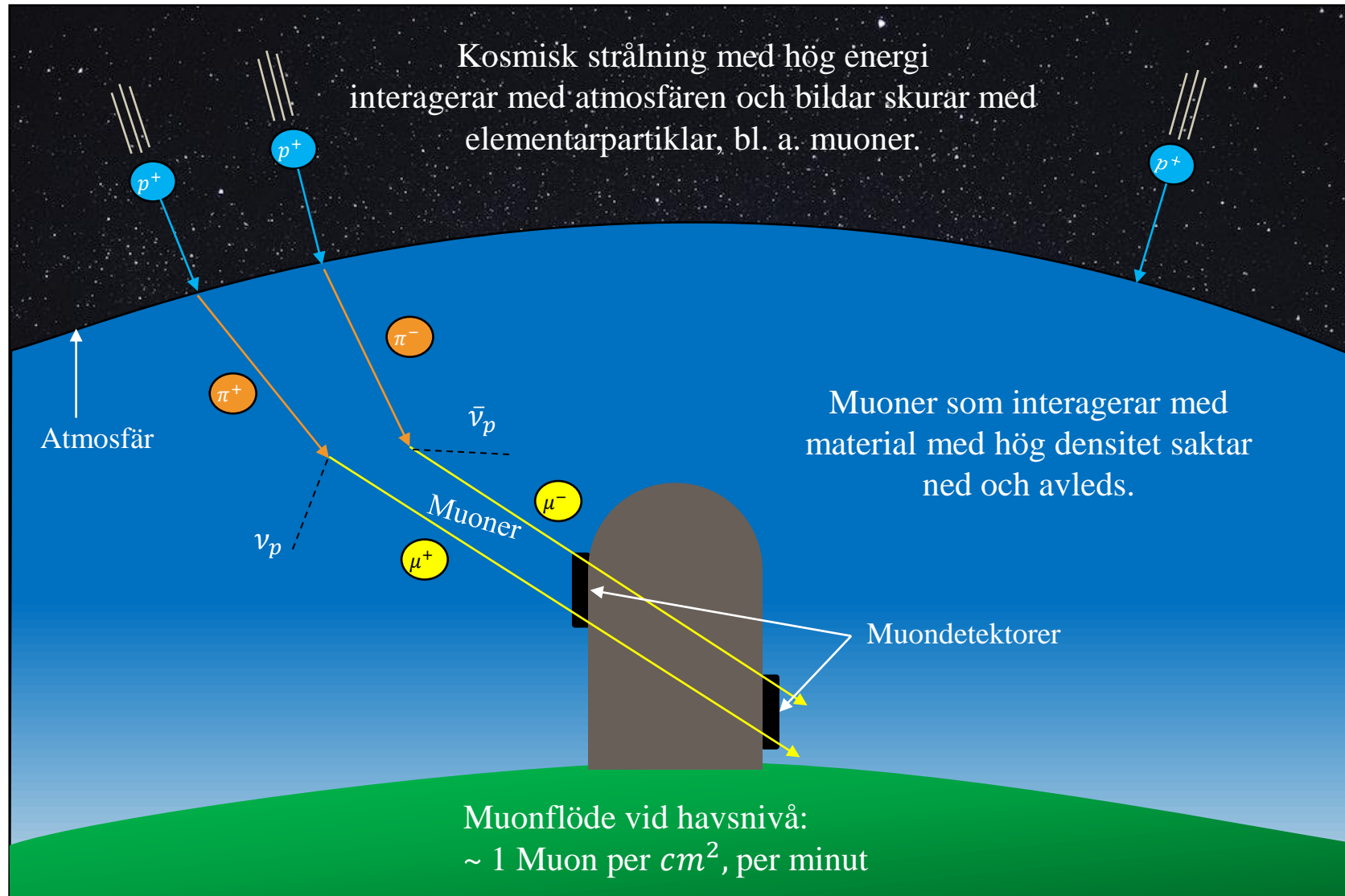
- Stepped Frequency Continuous Wave (SFCW) GPR
 - Radarmätningar med stegad frekvens.
 - God penetration med hög upplösning.
- Kommersiell utrustning:
 - Proceq GP8100

Bilder från: H. E. Ghanami et al., “SFCW GPR Array concrete inspection on nuclear sites”, Proceedings of the International Conference on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications, 2023, <https://www.ndt.net/?id=27839>



Avbildning med kosmisk strålning

Muontomografi



Muontomografi

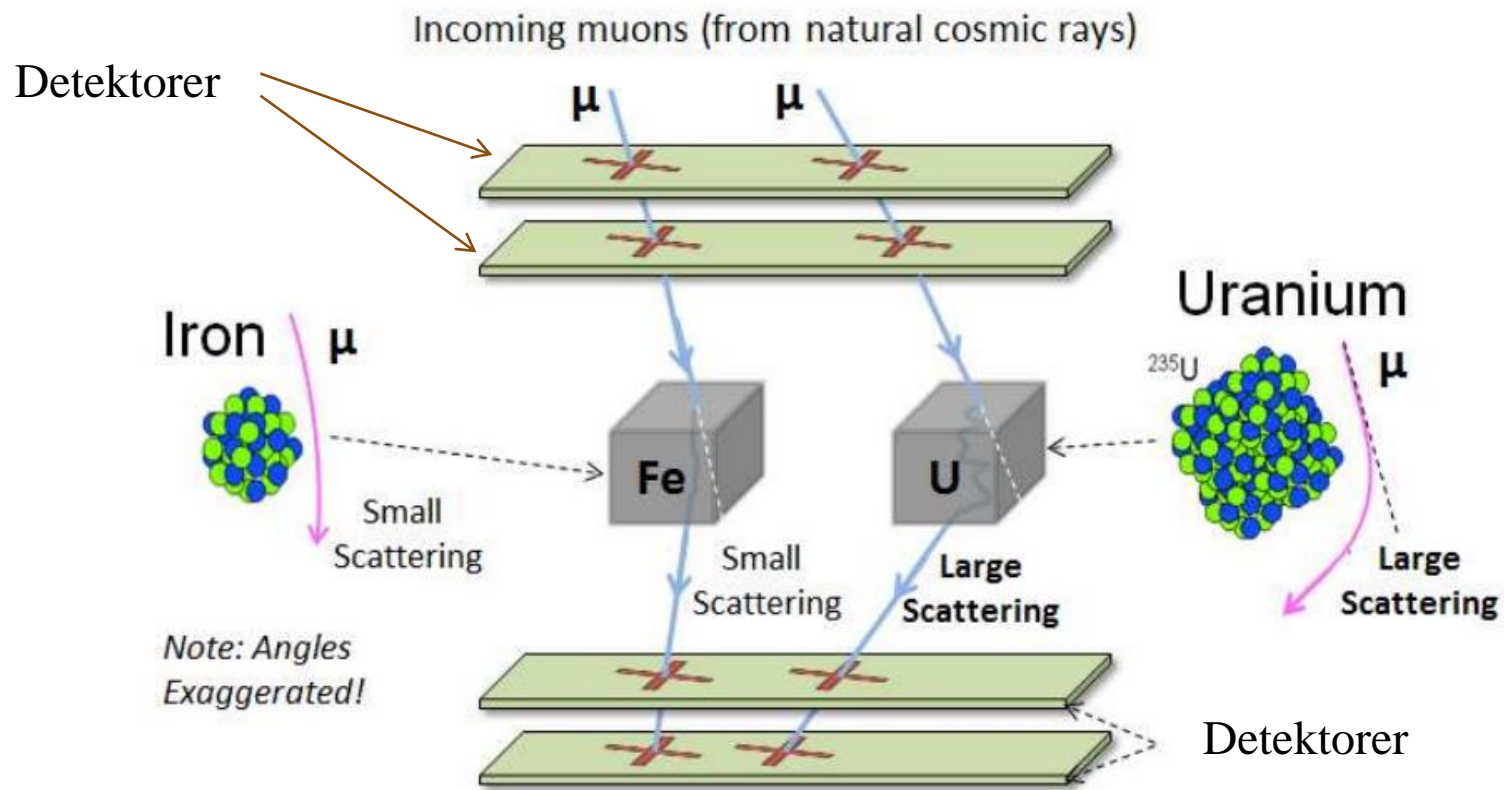
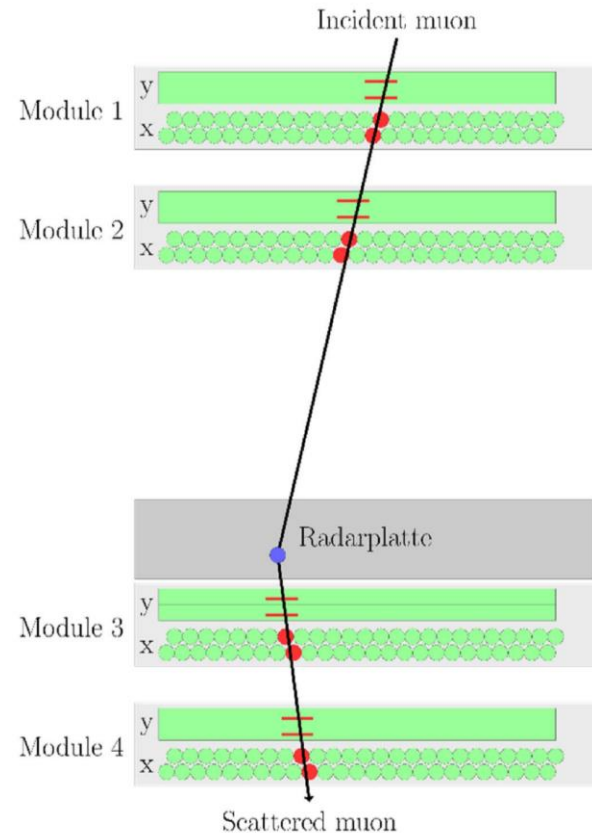
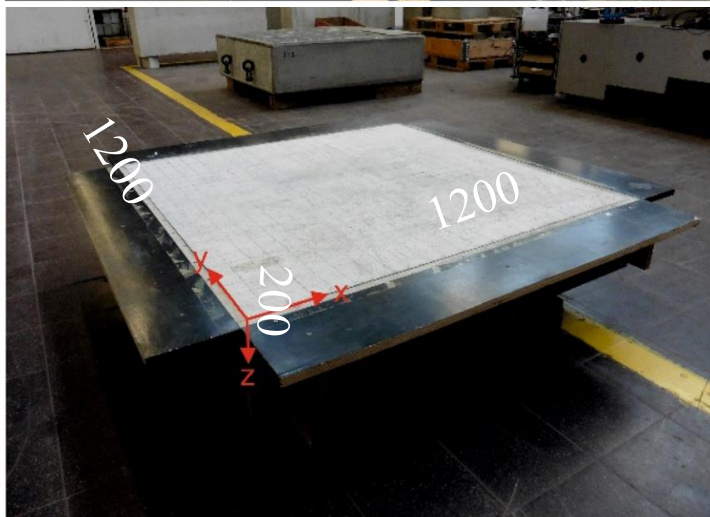
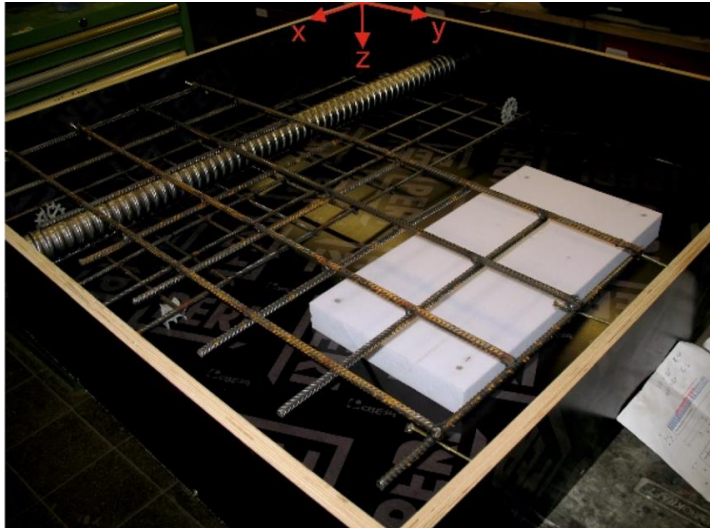


Bild från:
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Muon Imaging, IAEA-TECDOC-2012, IAEA, Wien (2022).

Mountomografi för betongkonstruktioner



Bilder från: E. Niederleithinger *et al.* (2021) 'Muon Tomography of the interior of a reinforced concrete block: First experimental proof of concept', *Journal of Nondestructive Evaluation*, 40(3). doi:10.1007/s10921-021-00797-3.

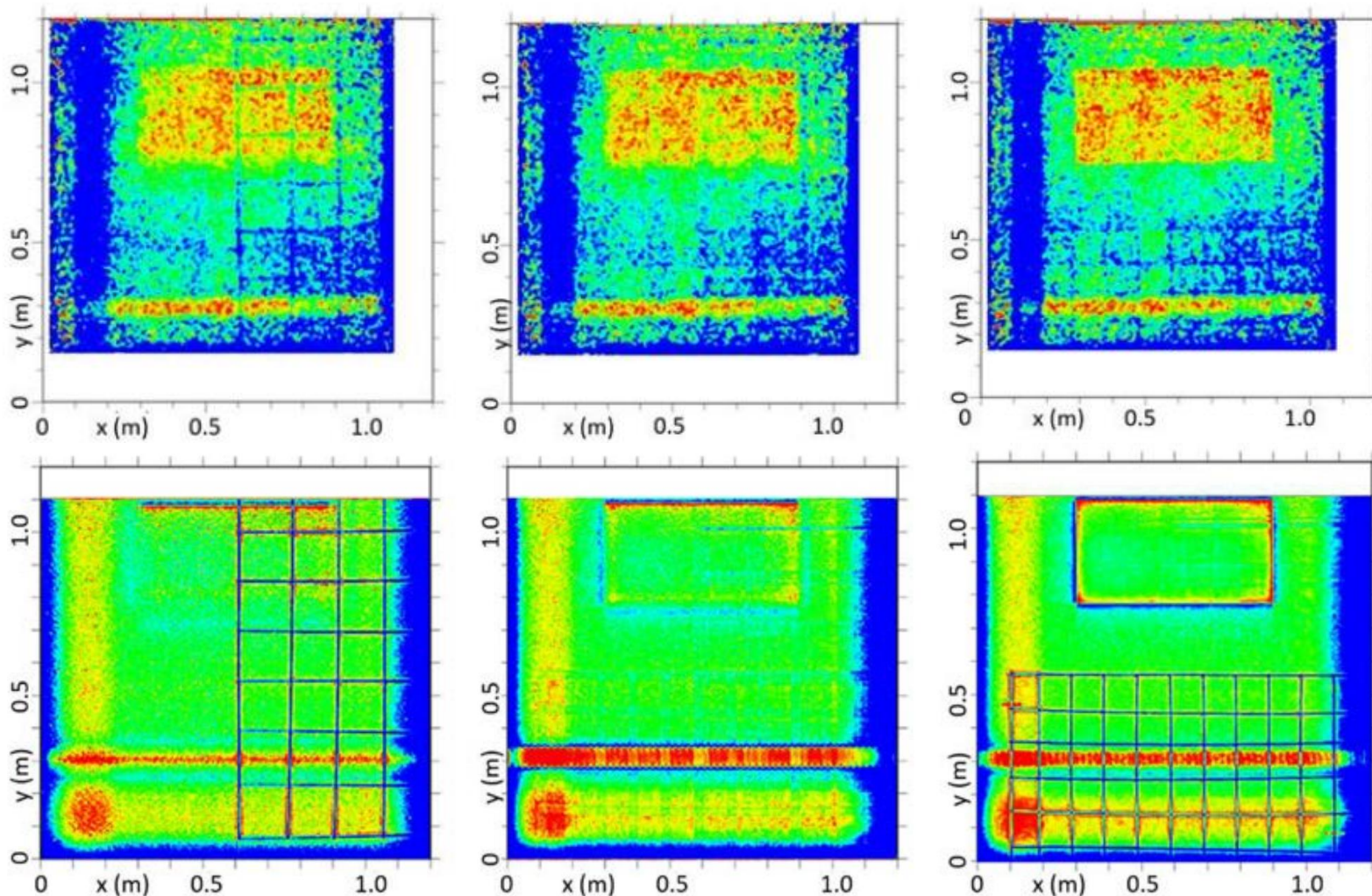


Mountomografi för betongkonstruktioner

Ökande djup →

Muon

Exponeringstid = 1203 h
Upplösning = ~2 mm



Bilder från:
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY
AGENCY, Muon Imaging, IAEA-
TECDOC-2012, IAEA, Wien (2022).

Med resultat från:
E. Niederleithinger *et al.* (2021) 'Muon
Tomography of the interior of a reinforced
concrete block: First experimental proof of
concept', *Journal of Nondestructive
Evaluation*, 40(3). doi:10.1007/s10921-
021-00797-3.

Röntgen

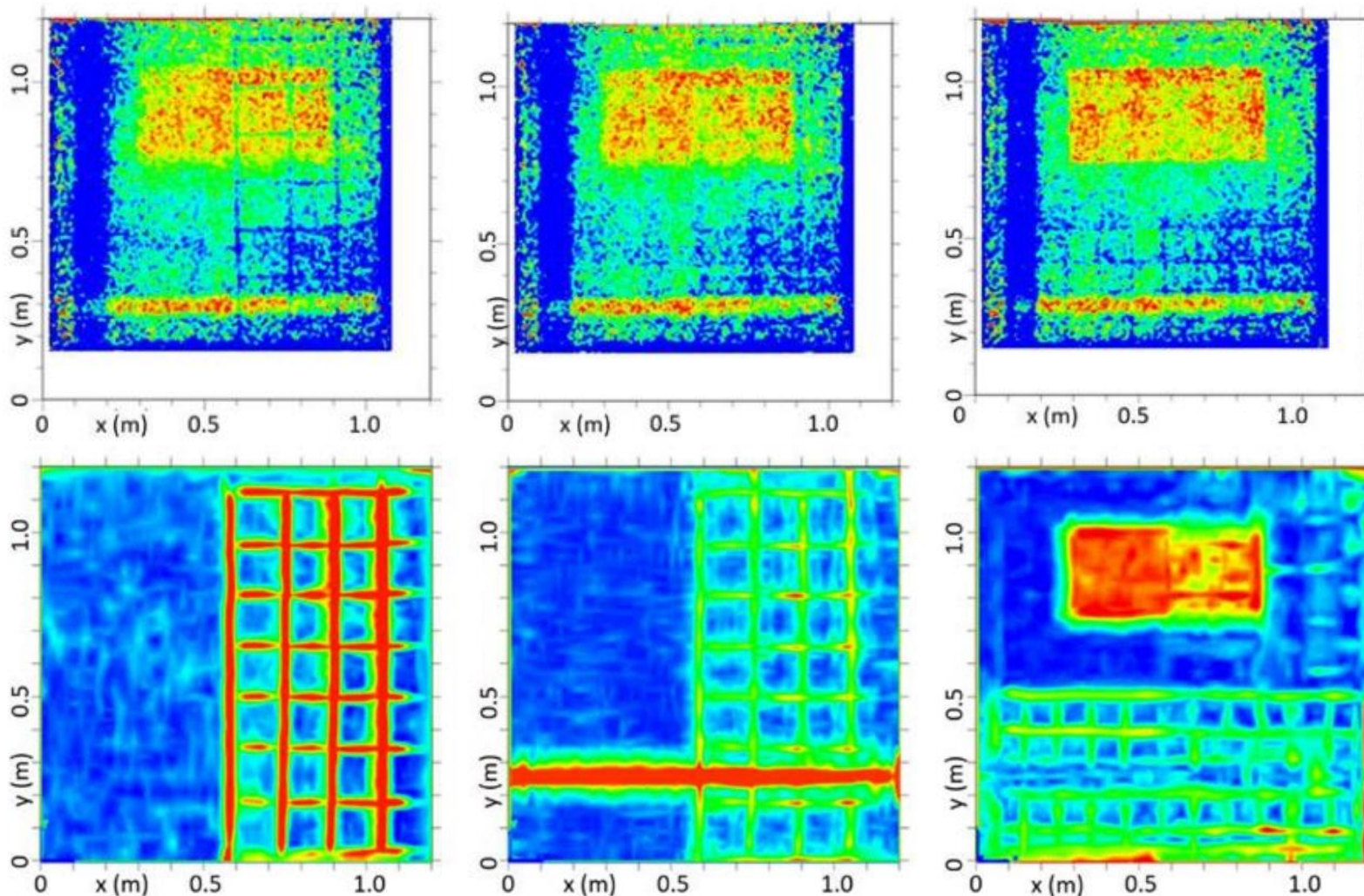
Exponeringstid = 1000 ms
Projektioner = 7300 st
Upplösning = 400 μm

Mountomografi för betongkonstruktioner

Ökande djup →

Muon

Exponeringstid = 1203 h
Upplösning = ~2 mm

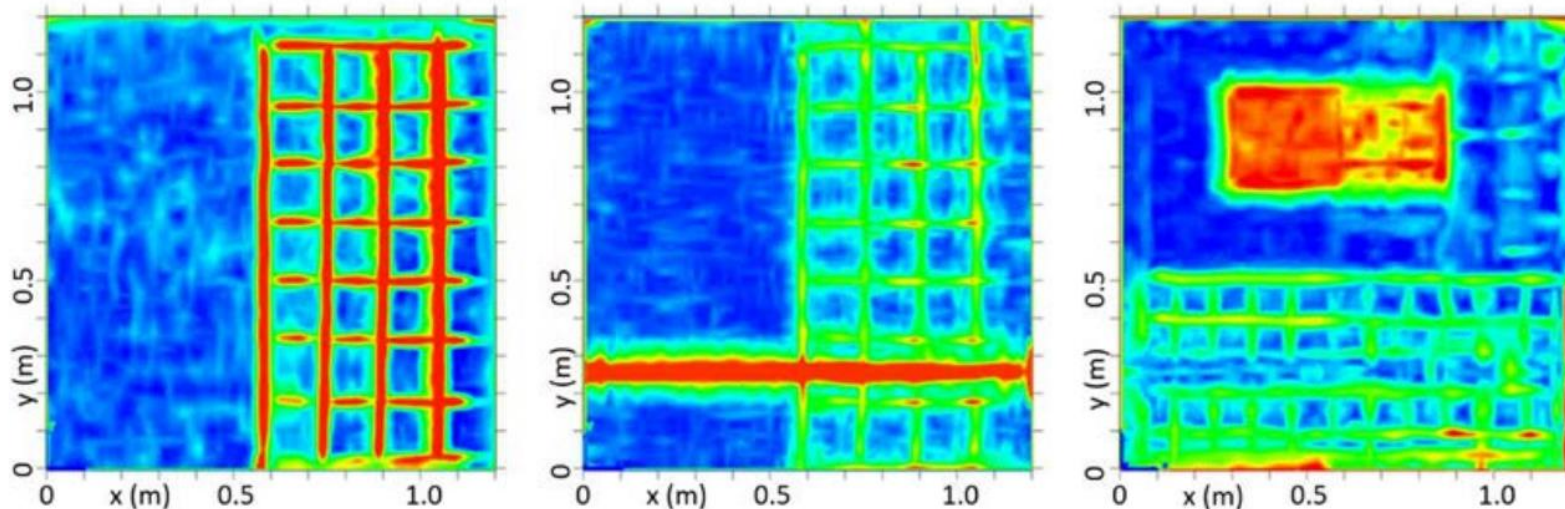


Bilder från:
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY
AGENCY, Muon Imaging, IAEA-
TECDOC-2012, IAEA, Wien (2022).

Med resultat från:
E. Niederleithinger *et al.* (2021) 'Muon
Tomography of the interior of a reinforced
concrete block: First experimental proof of
concept', *Journal of Nondestructive
Evaluation*, 40(3). doi:10.1007/s10921-
021-00797-3.

Radar

Frekvens = 2 GHz



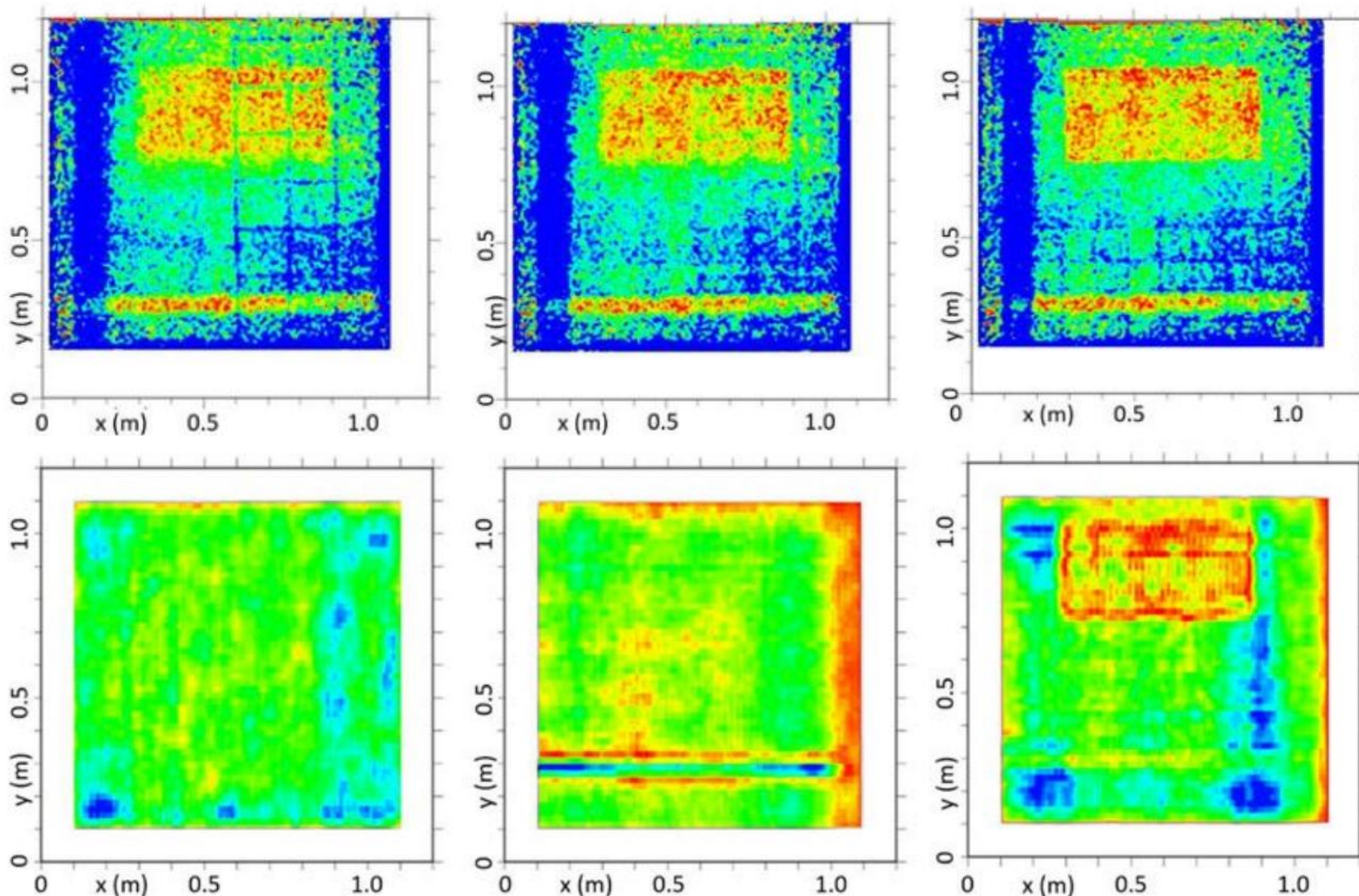
LUNDS
UNIVERSITET

Mountomografi för betongkonstruktioner

Ökande djup →

Muon

Exponeringstid = 1203 h
Upplösning = ~2 mm

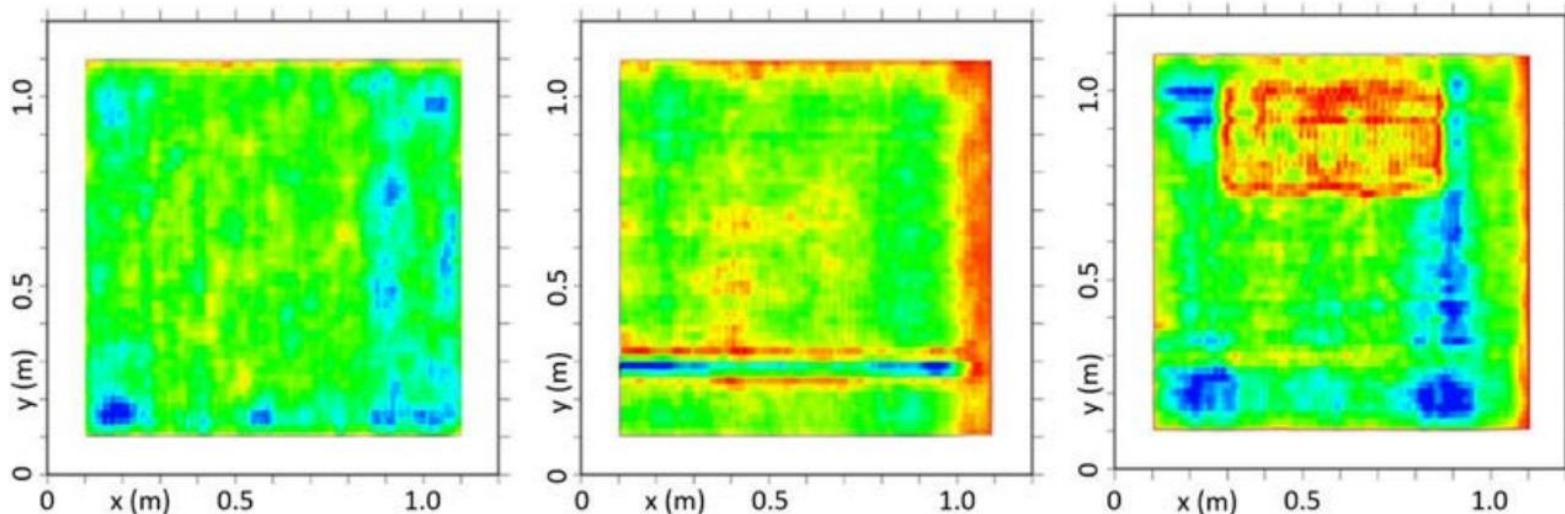


Bilder från:
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY
AGENCY, Muon Imaging, IAEA-
TECDOC-2012, IAEA, Wien (2022).

Med resultat från:
E. Niederleithinger *et al.* (2021) 'Muon
Tomography of the interior of a reinforced
concrete block: First experimental proof of
concept', *Journal of Nondestructive
Evaluation*, 40(3). doi:10.1007/s10921-
021-00797-3.

Ultraljud

Skjuvvågspolarisering
Frekvens = 50 kHz



LUNDS
UNIVERSITET

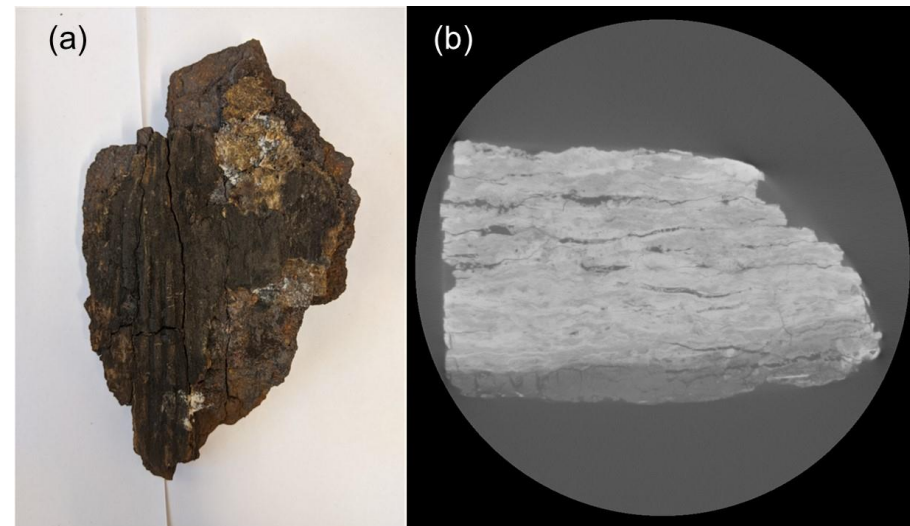
Sammanfattning avbildning

- Kommersiell utrustning för etablerade metoder ökar i komplexitet.
 - Avancerade rekonstruktionsalgoritmer.
 - Användning av AI.
 - Molntjänster.
- Utveckling av metoder fortsätter.
 - Icke-linjära akustiska metoder i synnerhet.
- Passiv avbildning med kosmisk strålning.
 - Muontomografi är starkt under utveckling.

Detektion av korrosion i kärntekniska betongkonstruktioner.



Plåt utsatt för accelererad korrosion



Korrosionsprodukt från Ringhals 3 tätplåt

Korrosion i kärntekniska betongkonstruktioner

Särskilt
intressant är
korrosion av
tätplåtar i olika
sammanhang!

Stålcylinder betongrör
Eng. Steel cylinder concrete pipes (SCCP)



Plåt

Reaktorinneslutningens tätplåt

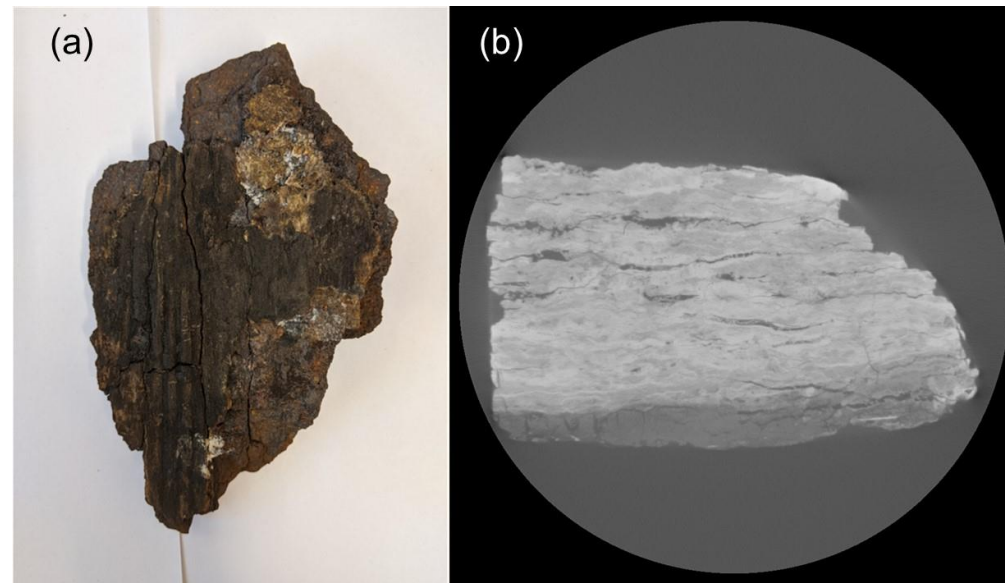


Bild från: T. Raveendran et al., “Inspection of corroded Concrete/Steel/Concrete pipes using ultrasound methods”, Proceedings of the International Conference on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications, 2023, <https://www.ndt.net/?id=27828>

Bild från: M. Nilsson, P. Ulriksen, & 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

Korrosion i SCCP

- Tätplåtens syfte är att säkerställa vattentätet.
- Vid transport av saltvatten genom rören kan Cl tränga genom betongen och provocera fram korrosion.
- Även karbonatisering genom CO_2 utgör risk.

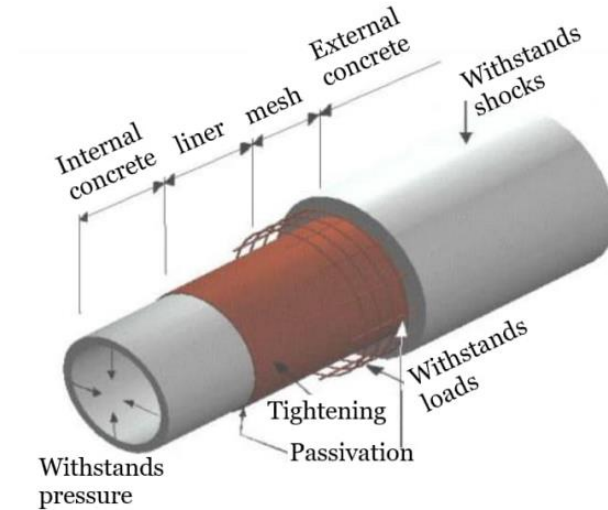


Bild från: S. N. Iliopoulos, W. Van Eesbeeck, "Towards corrosion assessment in steel cylinder concrete pipes using the Pulsed Eddy Current Technique", Proceedings of the International Conference on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications, 2023, <https://www.ndt.net/?id=27825>



(a)



(b)

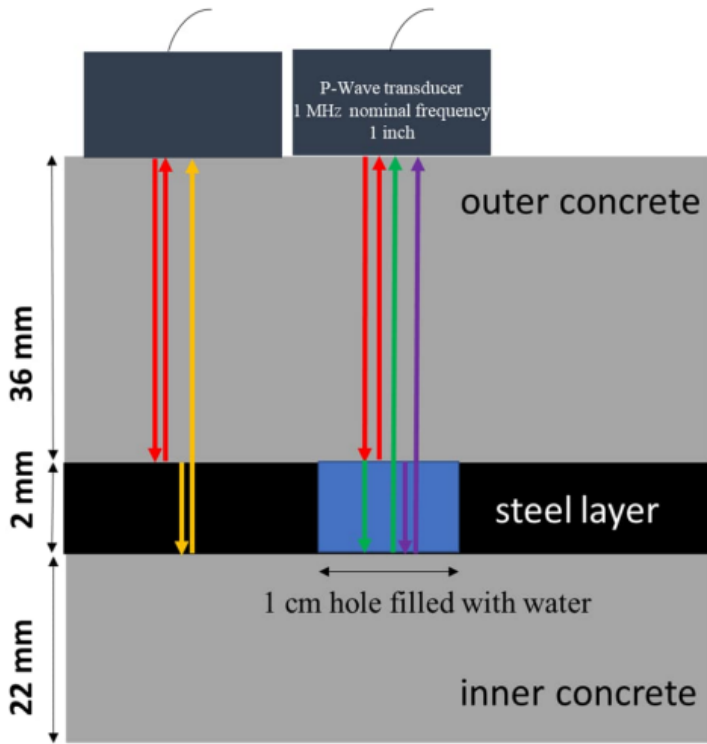
Bild från: T. Raveendran et al., "Inspection of corroded Concrete/Steel/Concrete pipes using ultrasound methods", Proceedings of the International Conference on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications, 2023, <https://www.ndt.net/?id=27828>

Detektion av korrosion i SCCP

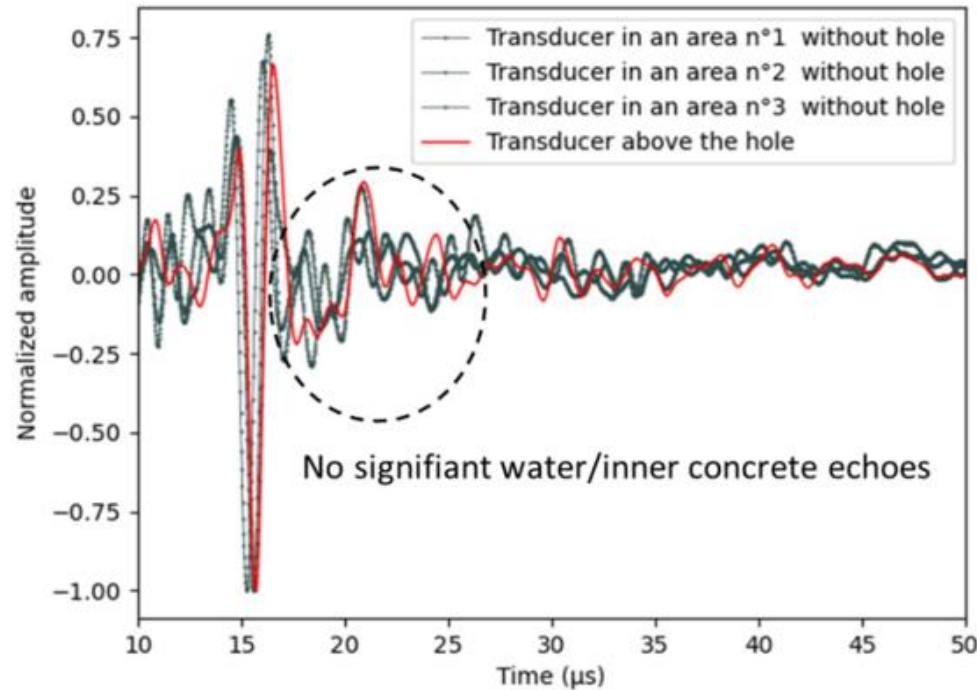
- Undersöks inom det EU-finansierade projektet ACES.
- Idag används kvalitativa elektrokemiska mätningar på rörens utsida.
- Utredning av tillämpningen av kvantitativa metoder pågår.
 - Ultraljud
 - Virvelström
- Robot för inspektionsarbete från rörens insida utvecklad vid CEA.



Ultraljud för inspektion av SCCP



Puls-eko



REFLEKTION

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

$$Z_{Betong} = 12 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$Z_{Stål} = 44.5 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

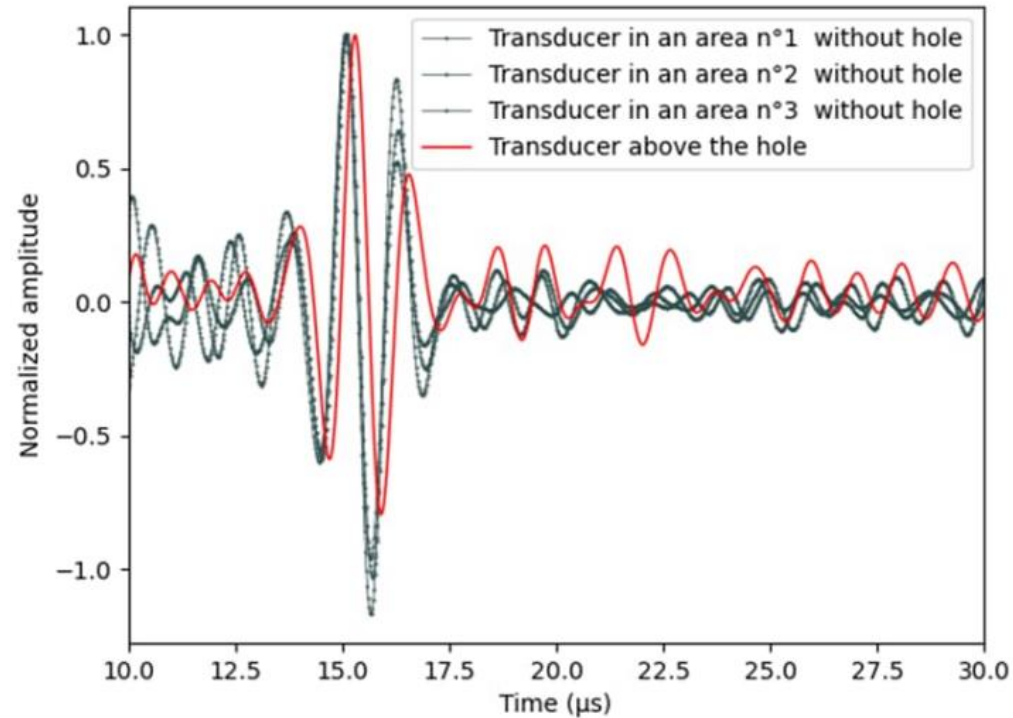
$$Z_{Vatten} = 1.5 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

För ljud från betong till stål reflekteras ca 33% av energin.

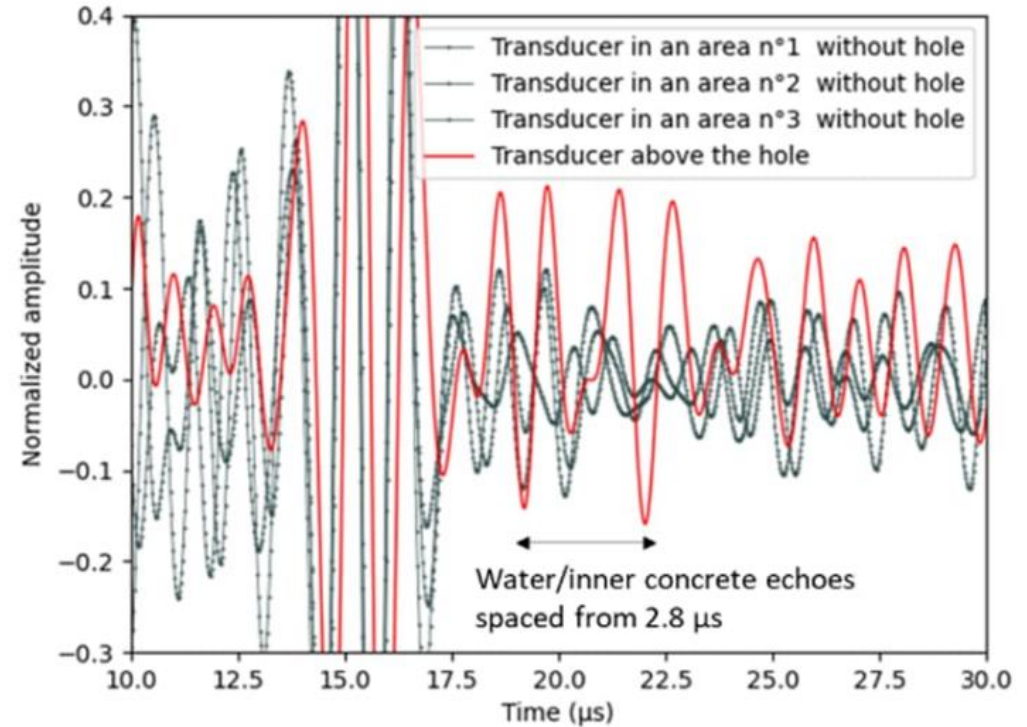
Betong till vatten ca 61%.

Ultraljud för inspektion av SCCP

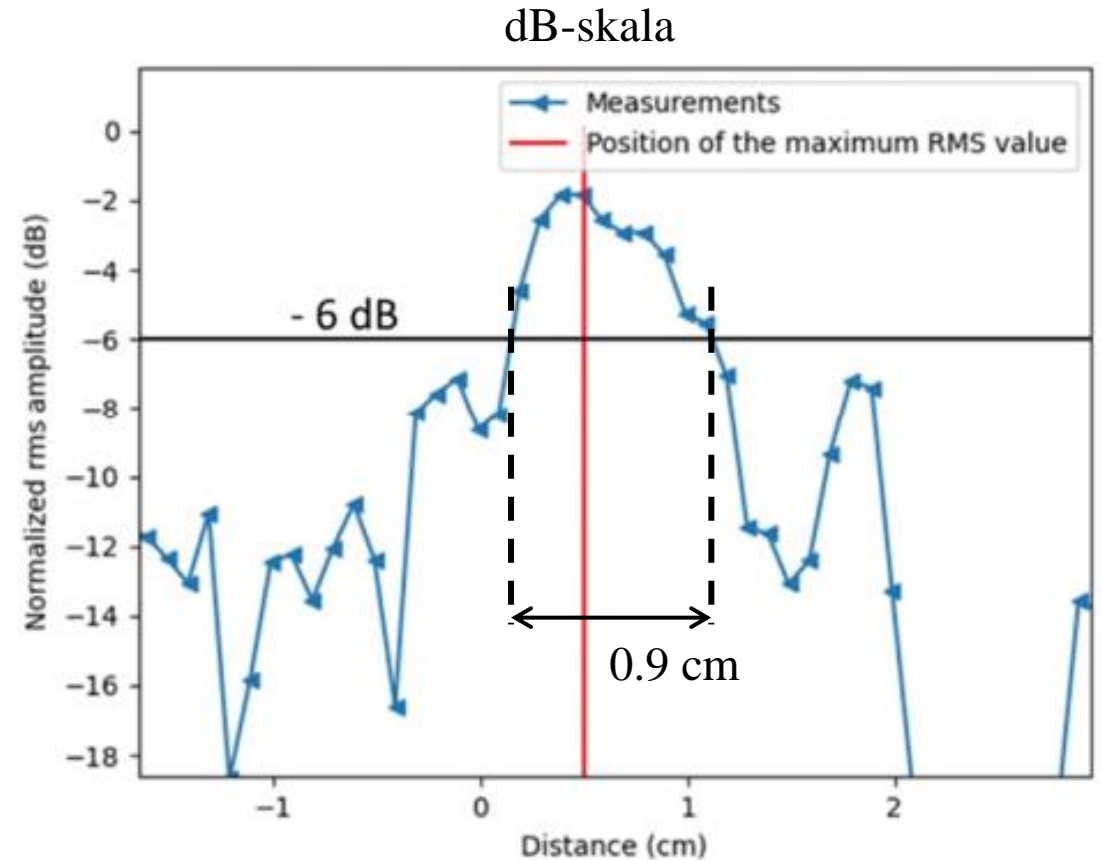
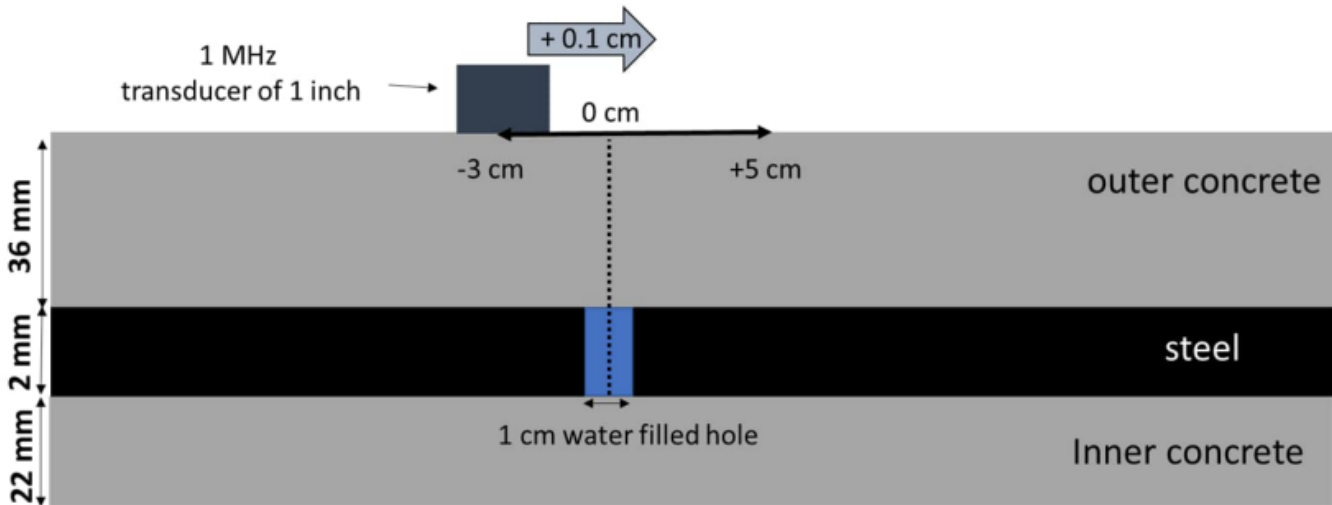
Pulskompression (CHIRP 100 kHz – 2 MHz)
Autokorrelation



Zoomad signal



Ultraljud för inspektion av SCCP

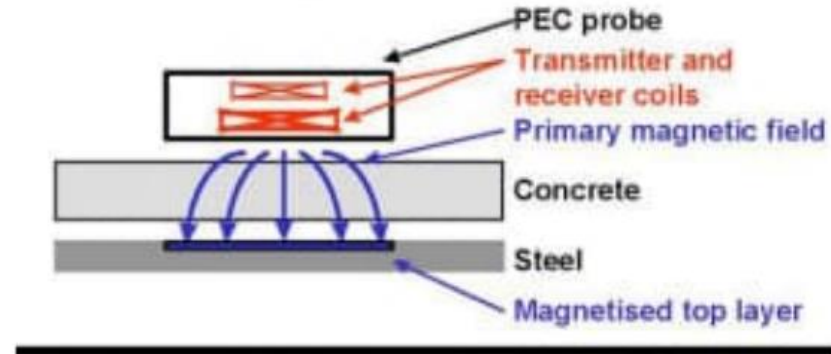


Virvelström för inspektion av SCCP

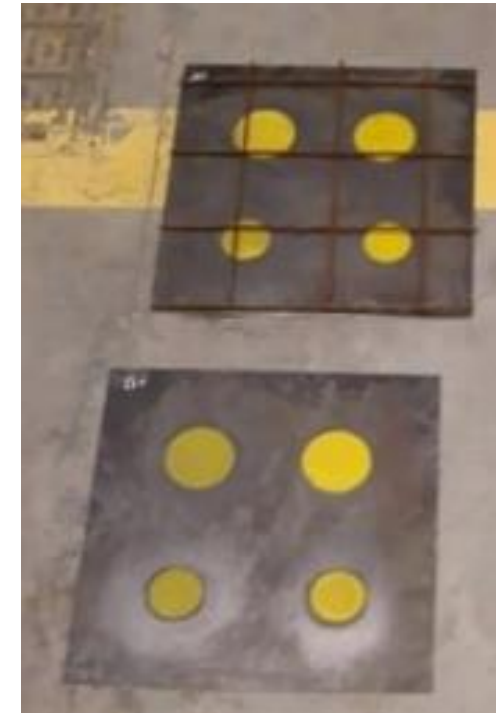
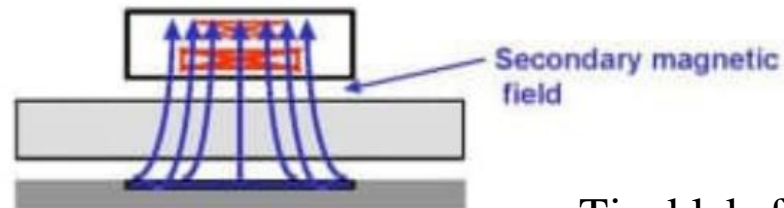
Pulsed Eddy Current (PEC)

Tätplåtar

Phase 1: Magnetisation of steel



Phase 2: Detecting secondary field



Ø 100 mm

Ø 50 mm

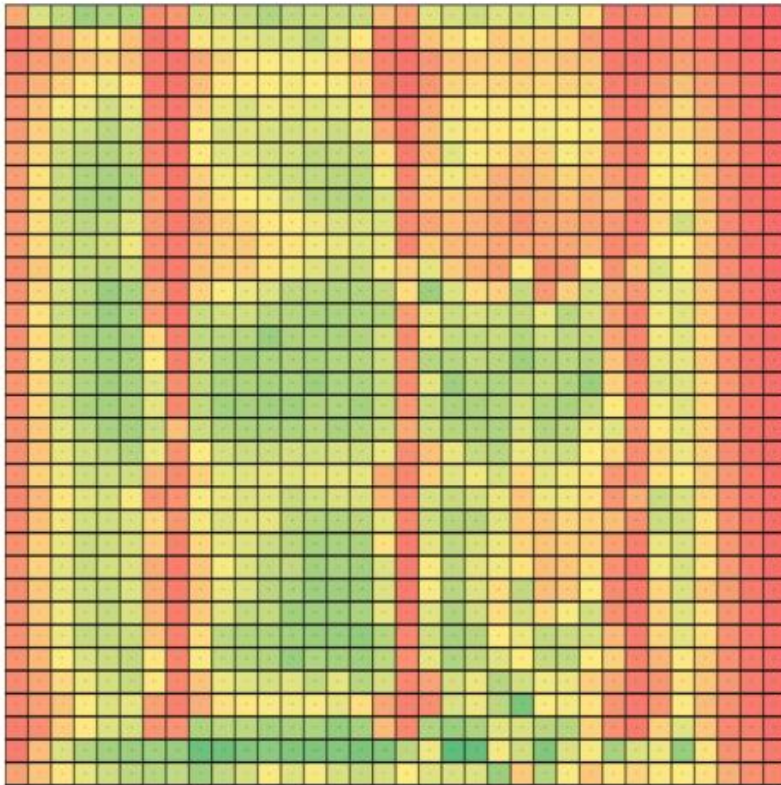
Tjockleksförändring: 1 mm 2 mm

Mäter virvelströmmens
avklingningstid.

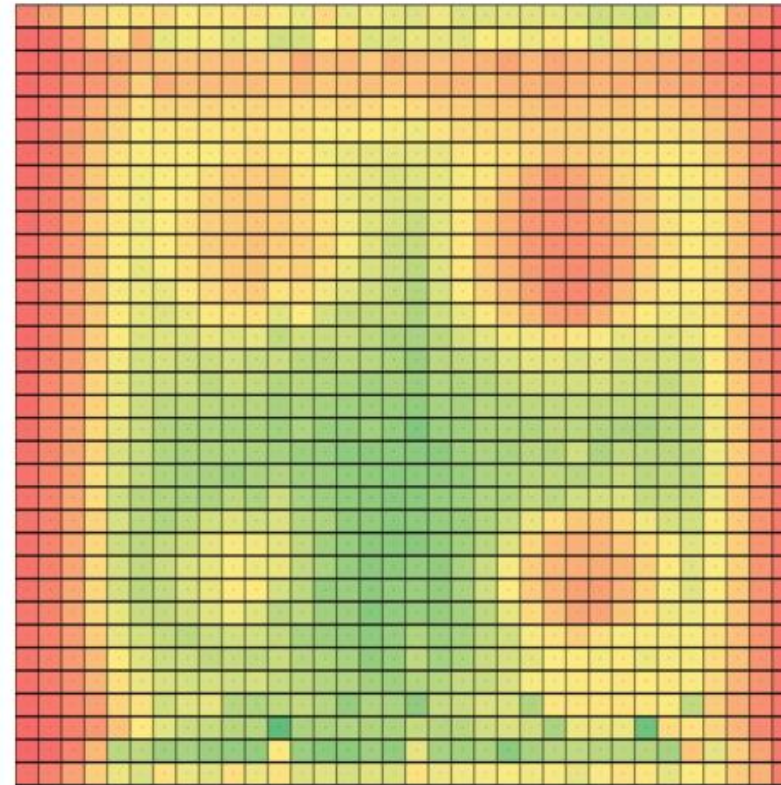
En indirekt mätning av
korrosion då stålets tjocklek
är vad som påverkar
avklingningstid.

Virvelström för inspektion av SCCP

Med armering



Utan armering



Inspektion av SCCP från rörets insida

Två OFP-tekniker i en plattform.
Pulsed Eddy Current
Half-cell potential mapping

Jackal UGV



Bild från:
<https://clearpathrobotics.com/jackal-small-unmanned-ground-vehicle/>

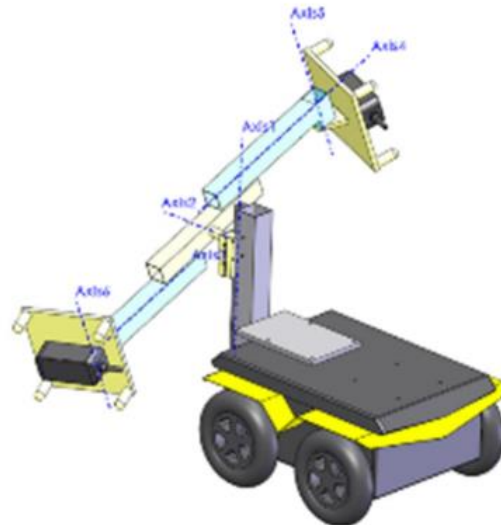


Bild från: E. Lucet & F. Kfoury, "ACES: A Teleoperated Robotic Solution to Pipe Inspection from the Inside", Proceedings of the International Conference on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications, 2023, <https://www.ndt.net/?id=27812>



Bild från: <https://aces-h2020.eu/advancing-corrosion-safety-assessment-for-concrete-structures-in-npps/>

Detektion av korrosion i inneslutningars tätplåt

- Utveckling och utvärdering av kvantitativa metoder pågår.
 - Halvcellspotential (ACES)
 - Icke-linjärt ultraljud (rost i tätplåt, LTH)



Bild från:
M. Nilsson et al., "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

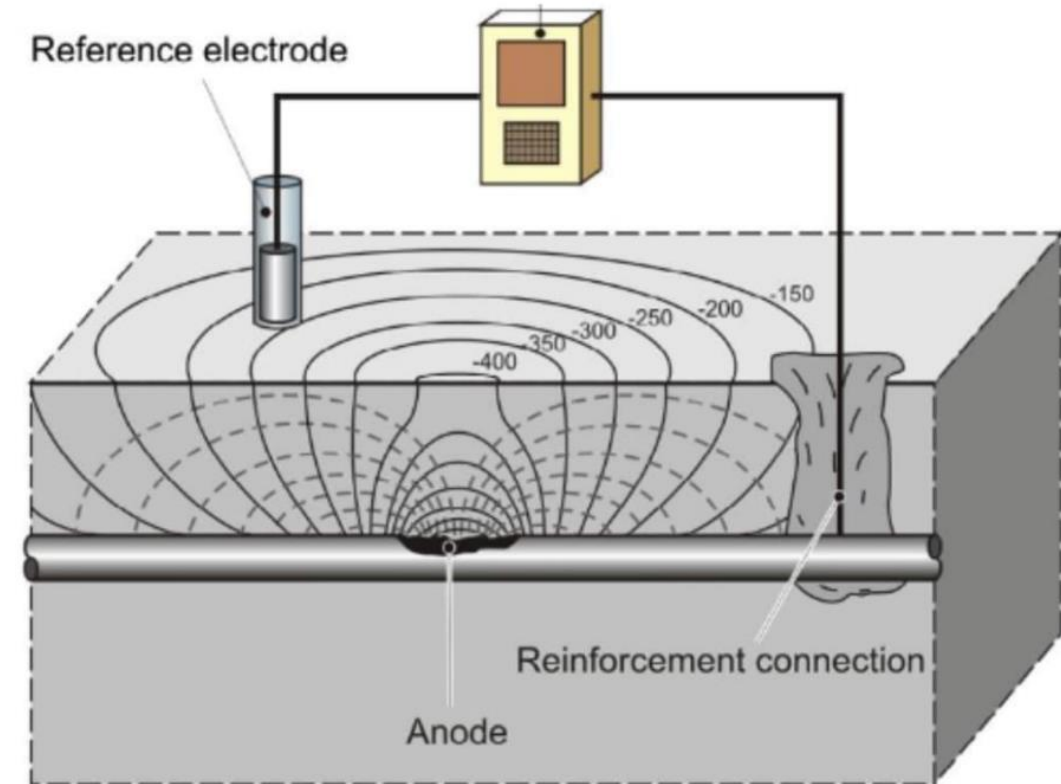
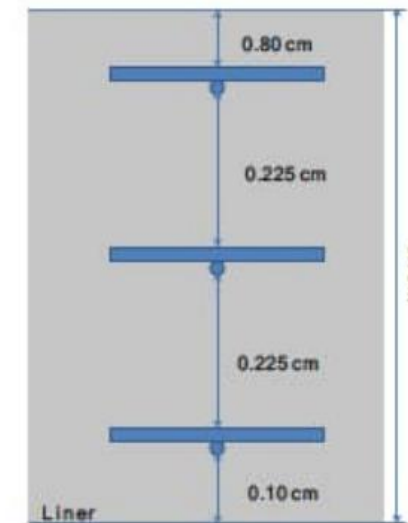
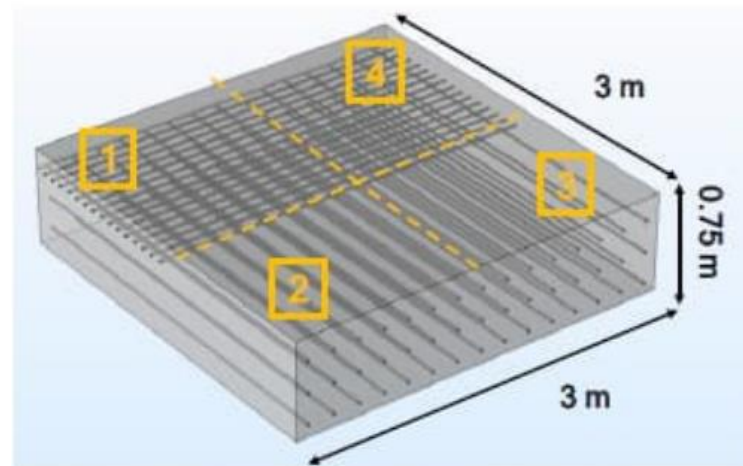


Bild från:
F. Taillade et al., "Diagnostic of corrosion in liner embedded into concrete", *Proceedings of the International Conference on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications*, 2023, <https://www.ndt.net/?id=27826>

Detektion av korrosion med halvcellspotential

Mätningar av halvcellspotential används för att mäta reduktion av elektrisk potential som sker genom elektrontransport från en anod (stål) till en katod (referenselektrod) vilket förekommer vid korrosion

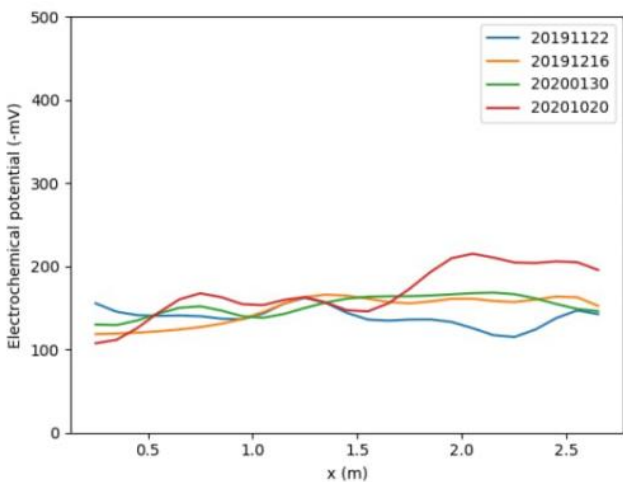


Område	Egenskap
1	Referens
2	Korroderad plåt
3	Första lager armering korroderad.
4	Tätplåt och första lager armering korroderad

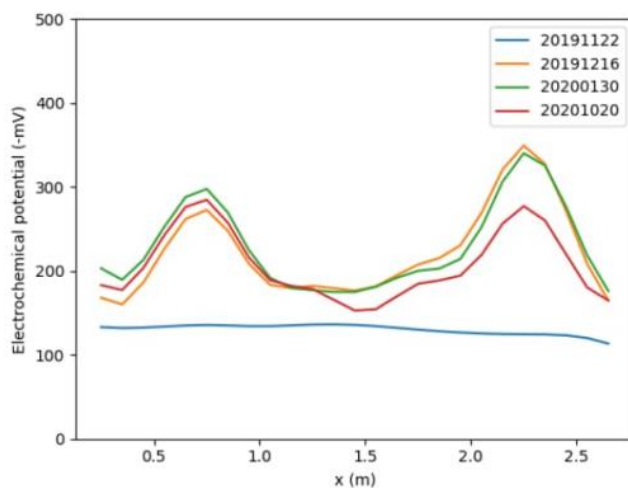
Innehåll från:

F. Taillade et al., "Diagnostic of corrosion in liner embedded into concrete", Proceedings of the International Conference on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications, 2023, <https://www.ndt.net/?id=27826>

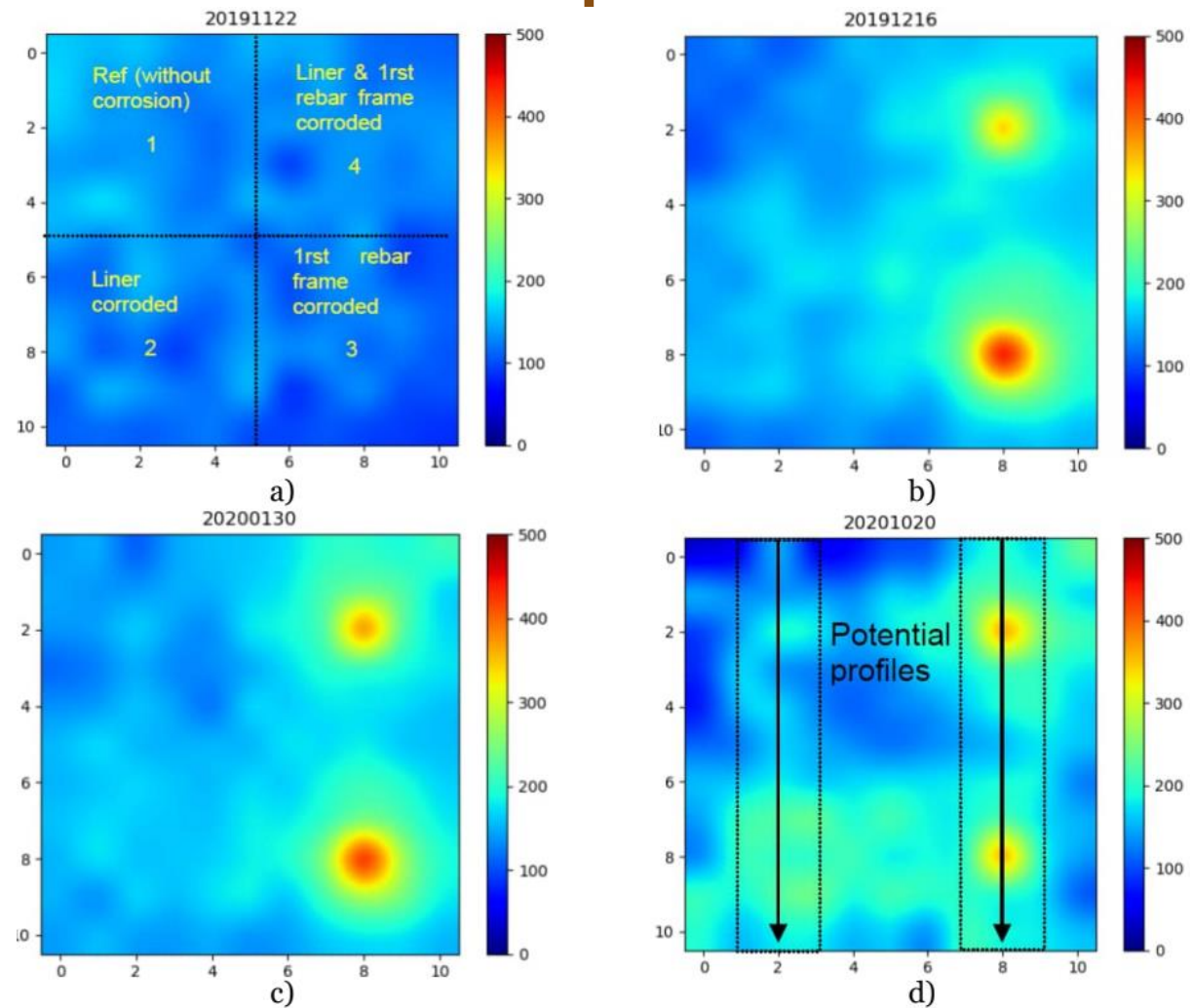
Detektion av korrosion med halvcellspotential



a) potential profile around areas 1 and 2



b) potential profile around areas 3 and 4



Sammanfattning detektion av korrosion

- Inom ACES har en robotplattform utvecklats för att genomföra inspektion av SCCP från rörens insida.
 - Virvelström (Pulsed Eddy Current) för tjockleksmätning av tätplåten.
 - Halvcellspotential (Half-cell potential mapping) för kvalitativ mätning av korrosionsrisk.
- Mock-up (3x3x0.8 m³) med ingjuten tätplåt vid EDF finns tillgänglig för provning med andra metoder.
 - Mätning av halvcellspotential har gett goda resultat.
- Utvärdering av icke-linjärt ultraljud i nästa föredrag!

'Smart' betong och ingjutna sensorer

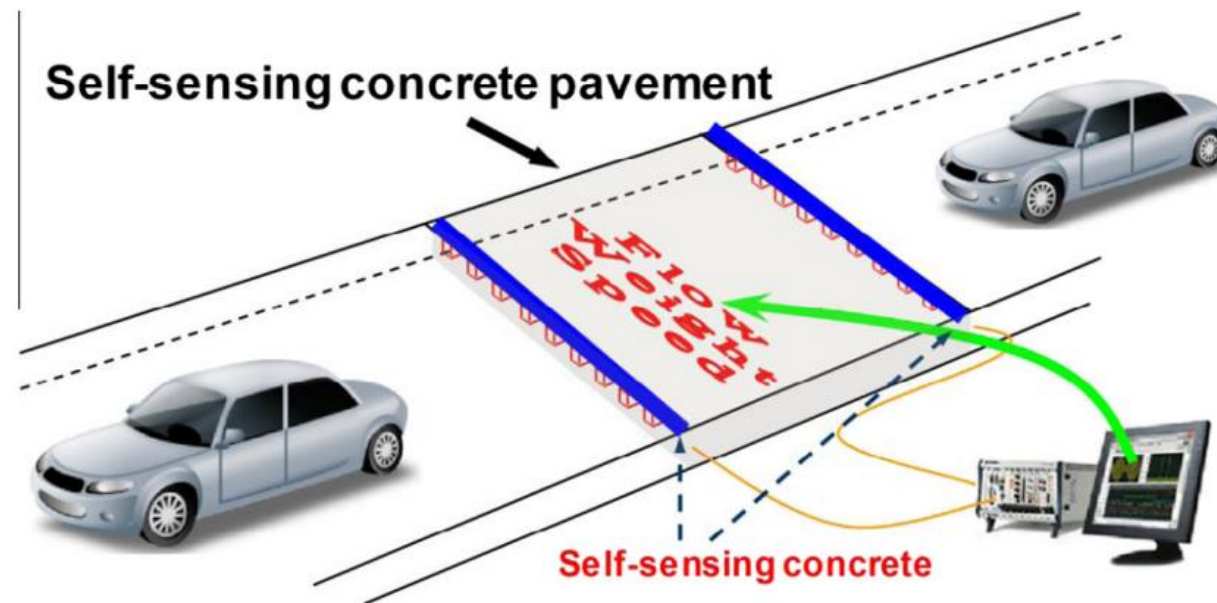
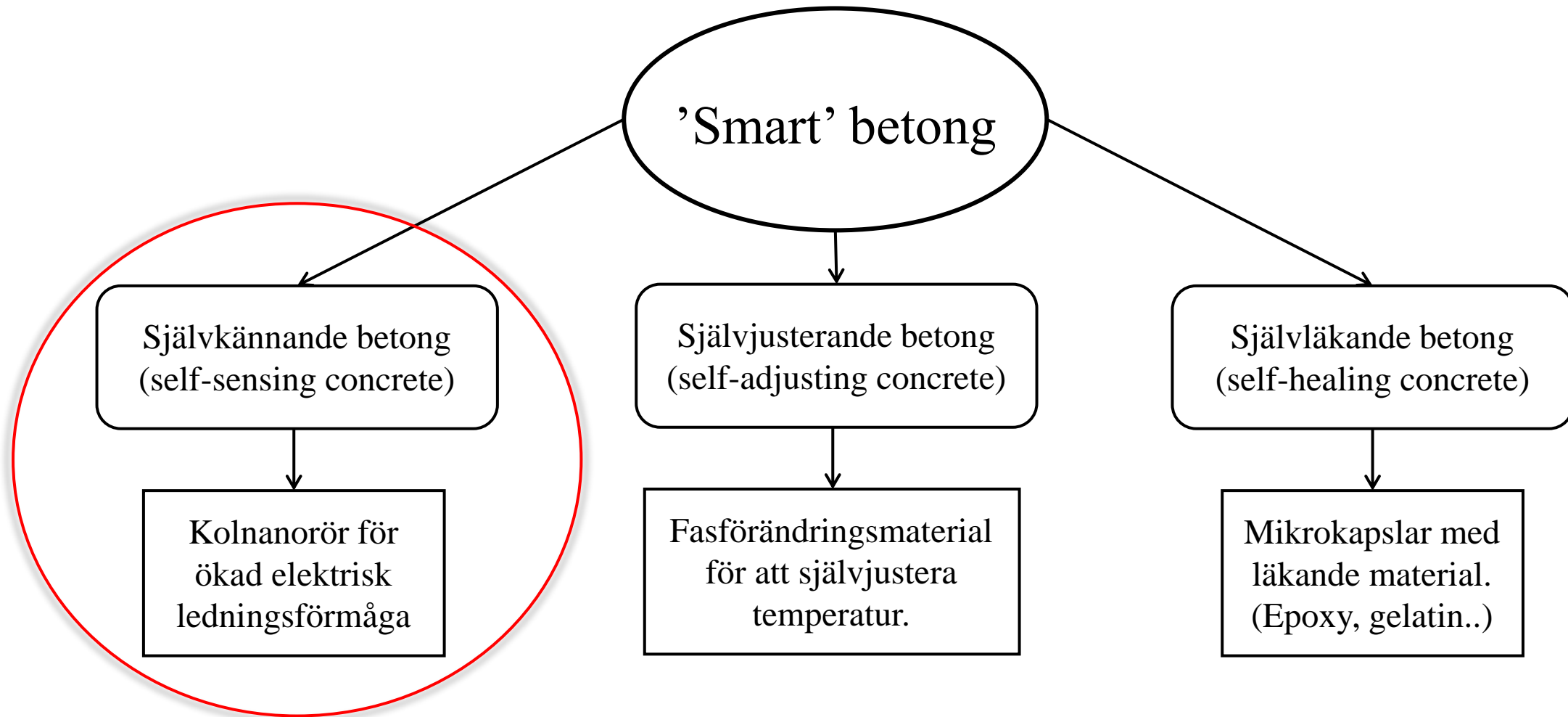
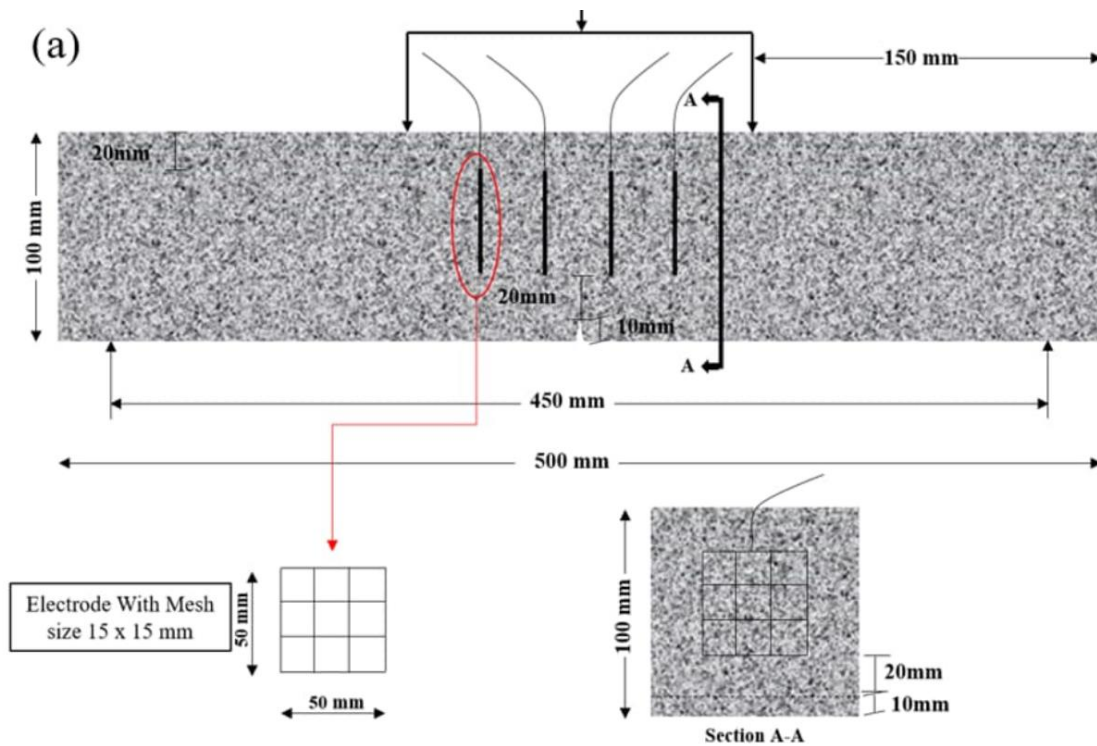


Bild från: B. Han, S. Ding, and X. Yu, "Intrinsic self-sensing concrete and structures: A Review," *Measurement*, vol. 59, pp. 110–128, 2015. doi:10.1016/j.measurement.2014.09.048

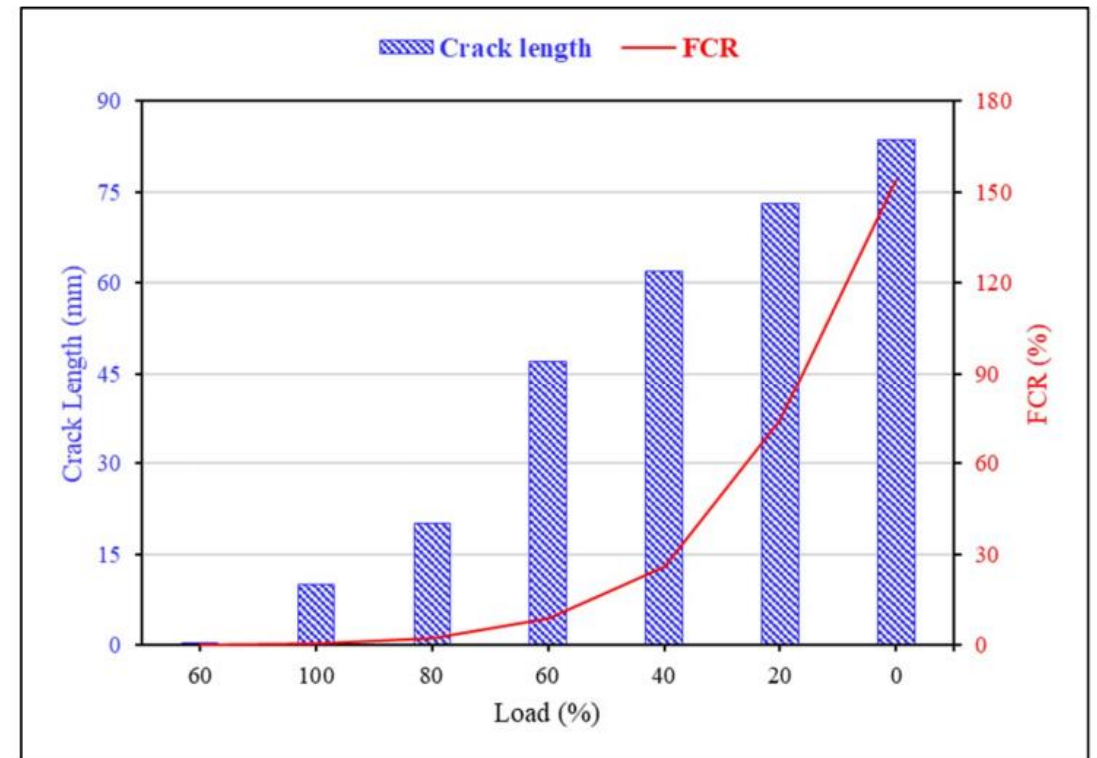
'Smart' betong



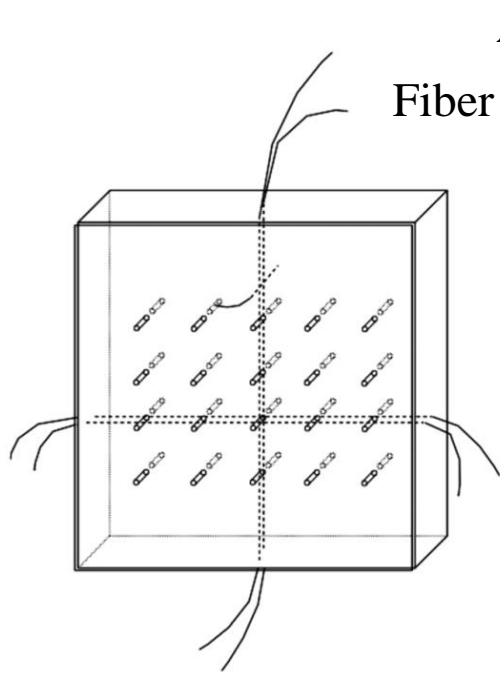
Självkännande betong med kolnanorör



FCR = Fractional Change of Resistance



Ultraljudsinsamling med ingjuten fiberoptik

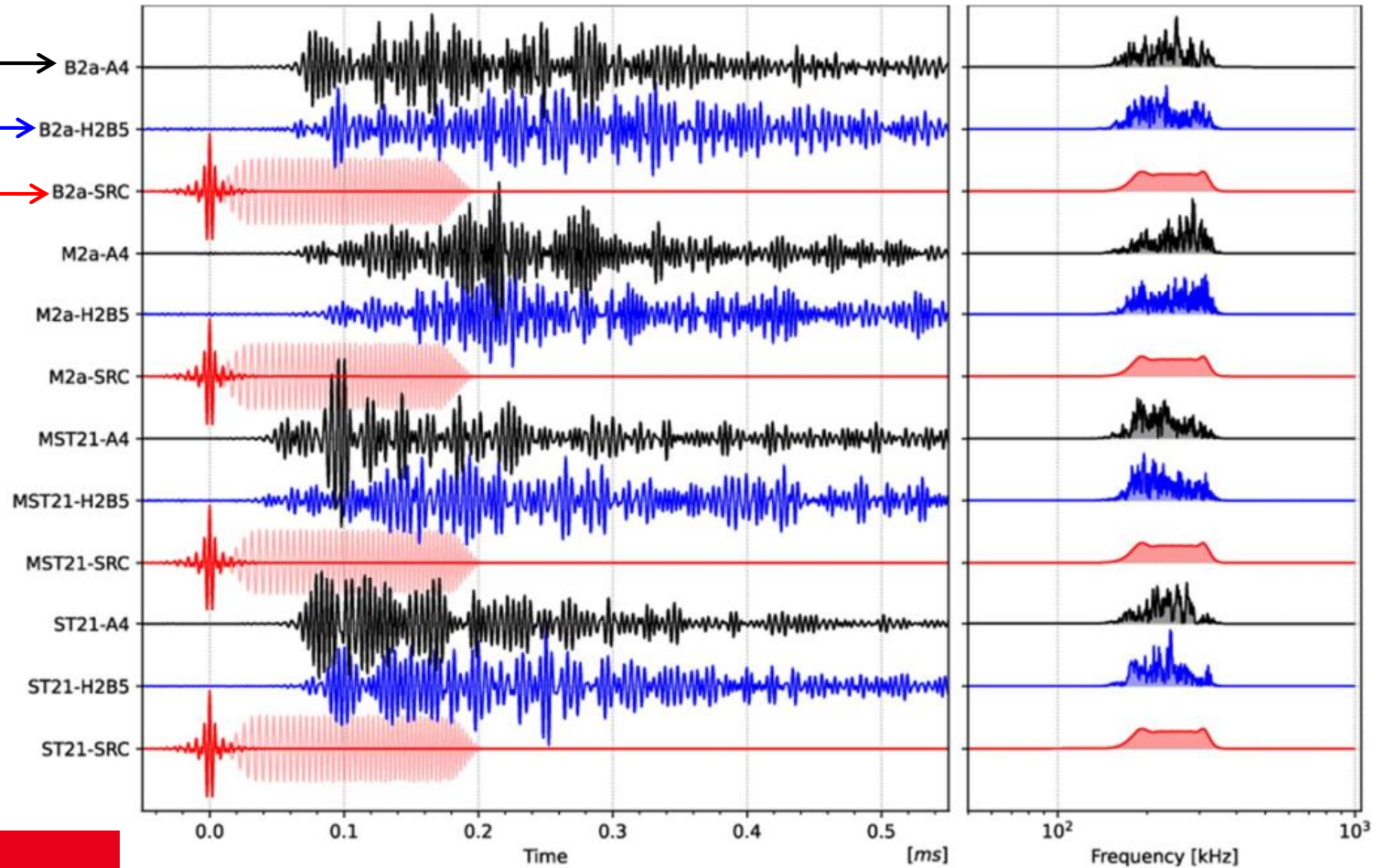


Accelerometer → B2a-A4

Fiber Bragg Grating → B2a-H2B5

Källa → B2a-SRC

Frekvenssvep
150 – 350 kHz



Sammanfattning av aktuellt läge

- Standardisering av OFP för betongkonstruktioner är ett steg mot pålitligare inspektion.
- Kommersiell utrustning inom avbildning lägger fokus på AI och molntjänster.
 - Användarvänlighet..?
 - Säkerhet..?
- Forskningen inom avbildningstekniker för ultraljud i betong starkt fokuserad på icke-linjära metoder.
- Detektion av korrosion i betong – ett område med stort fokus.
 - Utvärdering av konventionella tekniker.
 - Utveckling av avancerade manipulatörer.
 - Utveckling och utvärdering av icke-linjära metoder.. (nästa föredrag).



Energiforsk



LUNDS
UNIVERSITET

LTH

**LUNDS TEKNISKA
HÖGSKOLA**



LUNDS
UNIVERSITET