



Tuomo Koskela

## **MIRA-ULTRAÄÄNITOMOGRAFIN KÄYTTÖ JÄNNITETTYJEN SILTOJEN TUTKIMUKSIIN**

# **MIRA-ULTRAÄÄNITOMOGRAFIN KÄYTTÖ JÄNNITETTYJEN SILTOJEN TUTKIMUKSIIN**

Tuomo Koskela  
Opinnäytetyö  
Kevät 2011  
Rakennustekniikka / YAMK  
Oulun seudun ammattikorkea-  
koulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu

Tekniikan yksikkö, rakentamisen koulutusohjelma, ylempi ammattikorkeakoulututkinto

---

Tekijä: Tuomo Koskela

Opinnäytetyön nimi: MIRA-ULTRAÄÄNITOMOGRAFIN KÄYTTÖ JÄNNITETTYJEN SILTOJEN TUTKIMISEEN

Työn ohjaajat: Tekniikan lisensiaatti (Destia Oy) Torsten Lunabba, yliopettaja (OAMK) Pekka Nykyri

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2011 Sivumäärä: 54+25 liitesivua

---

Ulkomailla ja myös muutamissa kotimaisissa jännitetyissä silloissa on todettu vakavia korroosiovaurioita jänneteräksissä. Vaurioiden syynä oli usein huonosti onnistunut suojausputkien injektointi. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää matalataajuisen ultraäänitomografin käyttöä jännitettyjen siltojen ankkurialueiden kunto-  
tutkimuksissa. Tutkimustyö on aloitettu Destia Oy:n tuella ja sitä on jatkettu 1.1.2010 jälkeen Ramboll Finland Oy:lle.

MIRA-ultraäänitomografi on niin sanottu ainetta rikkomaton betonirakenteiden tutkimuslaite (NDT). MIRA käyttää matalataajuisista ultraääntä (~50 kHz). Tulosten tulkinta perustuu leikkausaallon heijastukseen rakenteen sisältä. Tiekoneohjelma muodostaa tuloksista graafisen 3D-kuvan.

Maastotutkimuksia tehtiin 10 sillalle. Osassa valituista kohteista oli todettu liikuntasaumalaitteiden vuotoa ja halkeilua ankkurialueiden jälkivaluissa. Siltapaikoilla skannattiin MIRAn avulla yleensä kaksi jänneterästen suojausputkea läheltä ankkurialuetta. Rakenne avattiin tulosten tulkinnan jälkeen voimakkaimman heijastuksen kohdalta. Tutkittavista siltakohteista ei löytynyt hälyttäviä vaurioita. Muutamista kohteista löytyi kuitenkin vakavia jänneterästen korroosiovaurioita ja korkeita kloridipitoisuuksia ankkurialueilla. Yhdestä sillasta löytyi kokonaan injektioimaton suojausputki.

Tämän tutkimustyön perusteella MIRA soveltuu hyvin jännitettyjen siltojen kunto-  
tutkimuksiin. Sen avulla voidaan löytää epäonnistuneet injektioinnit ja paikantaa tarkasti jänneterästen sijainti. Tutkimuskohteissa todettujen vaurioiden perusteella MIRA-tutkimus kannattaa tehdä muillekin vastaaville silloille viimeistään silloin, kun ne tulevat peruskorjattaviksi. MIRAA voidaan käyttää myös uudisrakentamisessa massiivisten betonirakenteiden ja jännitettyjen rakenteiden laadunvalvontaan.

---

Asiasanat: Ultraääni, jännitetyt sillat, betonirakenteet, NDT, kuntotutkimus, MIRA

# ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree programme in Civil Engineering, Master's Degree

---

Author(s): Tuomo Koskela

Title of thesis: THE USE OF ULTRASONIC TOMOGRAPHY MIRA IN STUDIES OF PRESTRESSED BRIDGES

Supervisor(s): Licentiate of Technology (Destia Oy) Torsten Lunabba, principal lecturer (OAMK) Pekka Nykyri

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2011

Number of pages: 45+17 pages of appendices

---

Some toughened bridges abroad and in Finland were found to have severe corrosion in prestressed steels. Most of the damage were often due to the failed safeguarding of the injection tubes. Aim of this study was to investigate the use of low-frequency ultrasonic tomography in condition research of prestressed bridges, especially near the anchor regions. The research was started under Destia OY and has been continued under Ramboll Finland Oy after 1.1.2010.

MIRA-ultrasonic tomography is the so-called non-destructive testing (NDT) device for concrete structures. MIRA uses low frequency (~ 50 kHz) ultrasound. Interpretation of the results is based on shear wave reflection from inside the structure. Software forms a 3D image of the results. Field studies were conducted at 10 bridges. At the location, the bridge research by MIRA was usually conducted in two tendon protective tubes by scanning near the anchor area. The point of the most intense reflection was then opened for structural interpretation of the results.

No alarming damages were found in the examined bridges. There were, however, serious corrosion of prestressed steels and high chloride in anchorage areas in some bridges. The protective pipe injection was not wholly successful in any of the bridges. One bridge was found to be completely empty of the grouting in the protective pipe.

MIRA is well suitable for condition inspection of prestressed bridges according to the results of this work. It can help finding the failures of injection and precisely locating the tendons. Based on MIRA's ability to track damages in bridges, MIRA research is worth doing for other similar bridges at the latest when they come from renovation is due. MIRA may also be used in new construction: in a quality control of massive concrete structures and prestressed concrete structures.

---

Keywords: Ultrasound, prestressed bridges, concrete structures, NDT, condition research, MIRA

## ALKUSANAT

Jännitettyjen siltojen tutkimiseen ei ole aiemmin ollut helppokäyttöistä ja luotettavaa menetelmää tai laitetta. Destia Oy hankki vuonna 2009 MIRA-ultraäänitomografin, jota käytettiin nyt ensimmäisen kerran jännitettyjen siltojen kuntotutkimuksissa.

Tässä tutkimustyössä on merkittävä osuus kollegallani ins. Guy Rapaportilla. Hän on ollut mukana kaikissa maastossa tehdyissä tutkimuksissa ja laatinut niistä tarkastusraportit. Haluan kiittää häntä suuresta panostuksesta tämän opinnäytetyön valmistumisessa.

Työtä on ohjannut oppilaitoksen puolesta yliopettaja Pekka Nykyri. Toisaalta työn toteutuksessa on ohjauksesta vastannut tekniikan lisensiaatti Torsten Lunabba Destia Oy:stä. Kiitän heitä hyvästä ja ammatillisesti korkeatasoisesta ohjauksesta. Lieviön sillan laskelmien tekemisessä olen saanut hyviä neuvoja DI Seppo Kokolta Ramboll Finland Oy:stä.

Ylivieskassa 7.4.2011

Tuomo Koskela

# SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ	
ABSTRACT	
ALKUSANAT	
SISÄLTÖ	
KÄSITTEITÄ	8
1 JOHDANTO	10
1.1 Taustaa	10
1.2 Aiheen valinta ja työn tavoitteet	11
2 ULTARAÄÄNITOMOGRAFI MIRA	13
2.1 MIRAn tekniikka ja toimintaperiaate	13
2.2 Betonirakenteiden tutkimukset MIRAlla	15
2.3 Käyttökohteet ja mittaustulokset	16
3 MAASTOTUTKIMUKSET	18
3.1 Jännitettyjen siltojen kuntotutkimusten tarve	18
3.2 Tutkimuskohteiden valinta jännitettyjen siltojen kuntotutkimuksessa	22
3.3 Mittausten teko siltapaikoilla	25
3.4 Tulosten tulkinta mittauspäikoilla	27
3.5 Muut kenttätutkimukset	29
4 MITTAUSTULOSTEN ARVIOINTI	30
4.1 Tutkimusraporttien sisältö	30
4.2 Johtopäätökset mittaustuloksista	35
4.3 Todettujen vaurioiden vaikutus rakenteisiin	36
4.4 Jatkotutkimukset ja markkinointi	40
5 MUITA NDT-TUTKIMUSMENETELMIÄ	42
5.1 Impact- Echo-jännitysaaltomittari	42
5.2 Maatutka	43
5.3 GalvaPulse-korroosionopeuden mittari	43
5.4 s'Mash-värähtelymittari	44

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO	46
6.1 MIRAn soveltuvuus siltojen kuntotutkimuksiin	46
6.2 Henkilöhaastattelu, asiantuntijan arvio, tekn.lis. Torsten Lunabba	47
6.3 Tulevaisuuden mahdollisuudet	51

LÄHTEET	52
---------	----

#### LIITTEET

Liite 1. Laskemaselostus, jännekaapelin vaurion vaikutus sillan kantavuuteen

Liite 2. Esitys, Jännitettyjen siltojen vauriot: Tutkiminen MIRA-tomografilla

## KÄSITTEITÄ

**Ultraääni** on ääntä, jonka taajuus on ihmisen korvan kuuloalueen yläpuolella (> 20 kHz). Nykyisillä laitteilla voidaan ultraääntä kehittää aina 1 000 MHz taajuuteen saakka. Ultraääni on atomien mekaanista aaltoliikettä ja tarvitsee siksi edetäkseen väliaineen toisin kuin sähkömagneettinen säteily. Ultraääni ei etene lainkaan tyhjiössä ja vaimenee kaasuissakin nopeasti - etenkin korkeilla taajuuksilla (> 1 MHz) - mutta etenee hyvin nesteissä ja useimmissa kiinteissä aineissa. (1.)

Betonin **karbonatisoituminen** on sen neutraloitumisreaktio, jonka seurauksena betonin huokosveden pH-arvo alenee. Tämän seurauksena betonin sisällä oleva teräs menettää korroosiolta suojaavan oksidikalvon. (2, s. 12.)

**Polarisaatio** on poikittaiseen aaltoliikkeeseen liittyvä käsite, jolla tarkoitetaan aaltoliikkeen värähtelyjen amplitudin suuntariippuvuutta aallon etenemissuuntaan nähden kohtisuorassa tasossa. Se kertoo, miten sähkökenttävektorin suunta käyttäytyy tässä tasossa. Polarisaation erikoistapauksia ovat mm. polarisoitumattomuus, lineaarinen- ja ympyräpolarisaatio. (3.)

**Kapasitanssi** on kappaleelle ominainen suure, ja se mittaa kappaleen sähkönsäilytyskykyä. SI-järjestelmässä kapasitanssin yksikkö on faradi (F), joka on yksi coulombi voltia kohti (C/V). (4, s. 51.)

Lyhytaikaisen jännityksen (iskun) aikaan saama **jännitysaalto** eli puristusaalto (P-aalto) leviää rakenteen sisällä aiheuttaen aallon suuntaista väliaineen partikkelien värähtelyä (5).

**Leikkausaalto** aiheuttaa aallon etenemissuuntaan nähden poikittaista värähtelyä (5).



**Kloridikorroosiolle** on ominaista, että raudoitteen korroosio tapahtuu pistemäisesti ja hyvin voimakkaana, varsinkin jos kloridit ovat tunkeutuneet kovettuneeseen betoniin (2. s 16).

# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on uuden matalataajuisen ultraäänitomografin, MIRAMittauslaitteiston, käyttöön perustuvan menetelmän soveltaminen paikalla valettujen jännitettyjen betonisiltojen kuntotutkimukseen. Tällä tutkimuksella pyritään selvittämään jännekaapeleiden kunto, injektoinnin onnistuminen ja mahdollisten vaurioiden vaikutus rakenteen säilyvyyteen ja kapasiteettiin. Tämä työ on aloitettu Destia Oy:n tuella ja sitä on jatkettu 1.1.2010 jälkeen Ramboll Finland Oy:lle.

## 1.1 Taustaa

Jännittämistä on käytetty betonirakenteissa jo 1930-luvulta lähtien. Taivutusrasitetun betonirakenteen jännittämisellä pyritään hoikempiin rakenteisiin. Tämä on määräävä peruste usein esimerkiksi risteyssilloissa, joissa rakennekorkeus on rajoitettu. Jännittämisen avulla päästään myös pitempiin jänneväleihin, ja näin säästetään materiaaleja. Lisäksi jännitetty betonirakenne on pääosin puristetussa tilassa eli siihen ei synny halkeilua ja tämä parantaa rakenteen säilyvyyttä. Suomessa ensimmäiset jännitetyt sillat on rakennettu 1950-luvulla. Tiehallinnon hoidossa yleisillä teillä on tällä hetkellä n. 1 050 jännitettyä siltaa. Ne ovat pääosin iältään alle 30 vuotta vanhoja ja sijaitsevat pääteillä. (Taulukko 1.)

TAULUKKO 1. Jännitettyjen siltojen ikäjakauma toiminnallisen luokan ja liikennemäärän mukaan (6, s. 8)

Jännitetyt betonisillat		> 1976		1966..1976		< 1966		Ei vuosilukua	
Tie	KVL	Kpl	m <sup>2</sup>	Kpl	m <sup>2</sup>	Kpl	m <sup>2</sup>	Kpl	m <sup>2</sup>
Vt, Kt, St	≥ 1500	250	202695	51	74207	24	27202	0	0
Yt	≥ 1500	67	66200	8	7532	7	2479	0	0
Vt, Kt	< 1500	16	5435	6	2991	4	1203	0	0
St, Yt	< 1500	209	120720	95	16234	21	4206	0	0
Vt, Kt, St, Yt	Ei tiedossa	47	20268	1	1628	0	0	0	0
Jc - pt	Kaikki	124	22077	3	395	0	0	0	0
Katu, Kaavali	Kaikki	3	2023	0	0	0	0	0	0
Yksitystie	Kaikki	45	10220	4	1224	0	0	0	0
Ramppi	Kaikki	48	46989	1	1570	0	0	0	0
Luokittamattomat tiel	Kaikki	4	1774	0	0	0	0	1	791
<b>Yhteensä</b>		<b>893</b>	<b>597818</b>	<b>109</b>	<b>105871</b>	<b>53</b>	<b>35140</b>	<b>1</b>	<b>791</b>

Silloissa jännittämiset tehdään yleensä ns. ankkurijännityksellä paikalla valettuihin rakenteisiin (jälkijännitys). Tässä menetelmässä jänneterästen jännitys tehdään betonoinnin jälkeen, kun betoni on jo saavuttanut riittävän lujuuden. Jännitetyt elementit valmistetaan sen sijaan ns. tartuntajännerakenteina (esijännitys). Niissä jänneteräksiin vedetään jännitys ennen betonointia ja ne "laukaistaan" betonin saavutettua riittävän lujuuden. Tässä työssä keskitytään vain paikalla valettuihin ankkurijännteillä tehtyihin rakenteisiin. Tällä menetelmällä tehtyjä siltoja on Suomessa yleisillä teillä n. 710 kpl (7).

## 1.2 Aiheen valinta ja työn tavoitteet

Betonisiltojen tavoitekäyttöikä on Tiehallinnon ja Ratahallinnon (nykyisin Liikennevirasto, 1.1.2010 lähtien) silloissa 100 vuotta (8). Vaatimus on johtanut muun muassa halkeilun entistä tiukempaan rajoittamiseen. Se tulee lisäämään entisestään jännittämisen käyttöä taivutusrasitetuissa betonirakenteissa. Työn laadulla on myös suuri vaikutus rakenteen säilyvyyteen. Tämä taas edellyttää hyviä menetelmiä ja laitteita tuotetun laadun mittaamiseen.

Tiehallinnon ylläpitämien siltojen kuntoa seurataan *vuositarkastuksilla*, noin 5 vuoden välein tehtävillä silmämääräiseen arviointiin perustuvilla *yleistarkastuksilla* ja ennen peruskorjausta tehtävillä *erikoistarkastuksilla*. Erikoistarkastuksissa käytetään erilaisia mitta- ja tutkimuslaitteita ja rakenteista otetaan näytekappaleita laboriotutkimuksia varten. Jänneterästen ja kaapeleiden kunnon tutkiminen on ollut erittäin hankalaa, koska ne sijaitsevat kohtalaisen syvällä rakenteessa (yleensä > 100 mm) ja pinnassa on vielä pehmeät teräkset.

Tässä opinnäytetyössä on arvioitu uuden matalataajuisen ultraäänitomografian, MIRA:n, avulla kerättyjä mittaus- ja kuntotietoja jännitettyjen siltojen ankkurialueilta. Tämä mittaustapa on yksi ns. ainetta rikkomaton betonirakenteiden tutkimusmenetelmä (NDT = non-destructive testing of concrete). MIRA-laitteella tehtyjen mittauksien avulla pyritään selvittämään jännekaapeleiden tarkka sijainti, mahdolliset poikkeamat ja vauriot niissä.

Rakenne on avattu MIRA-tutkimuksen jälkeen timanttikoralla mittaustuloksen tulkinnan perusteella poikkeavasta kohdasta. Vertaamalla mittaustuloksia ja avauksissa esiin tulleita tietoja on pyritty löytämään oikea tulkinta, jota voidaan käyttää laajempien alueiden tutkimiseen mahdollisimman vähäisillä rakenteiden avauksilla.

## 2. ULTARAÄÄNITOMOGRAFI MIRA

### 2.1 MIRAn tekniikka ja toimintaperiaate

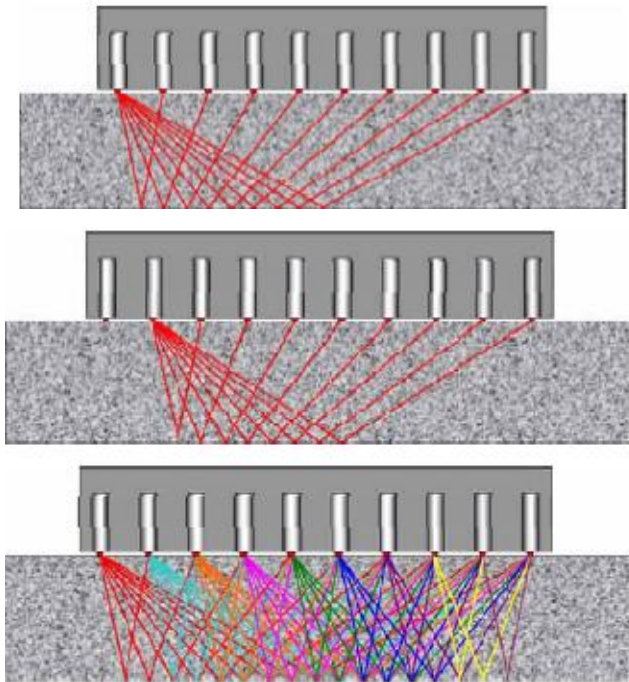
MIRA on matalataajuuksinen (~50 kHz) ultraäänitomografi (kuva 1) rakennetta rikkomattomaan betonirakenteiden tutkimukseen (NDT). Se toimii sykäyskaikutestausmenetelmällä (Pulse - Echo) ja tuottaa tietoja rakenteen sisältä jopa 1,5–2,0 metrin syvyyteen saakka. Se käyttää ns. leikkausaaltoja (S-aaltoja, shear waves). MIRA on kehitetty alun perin Saksassa BAM:ssa (Federal Institute for Materials Research and Testing). Kaupalliseen käyttöön sen on edelleen kehittänyt ja sitä myy Germann Instruments A/S Tanskasta. (9.)



*KUVA 1. MIRA-mittauslaite (9)*

Mittauksessa (eli skannauksessa) käytetään vaiheittaista sykäysten lähetystekniikkaa. Mittalaitteen antenniosassa on 10 rivissä kussakin 4 kappaletta kuivaneula-

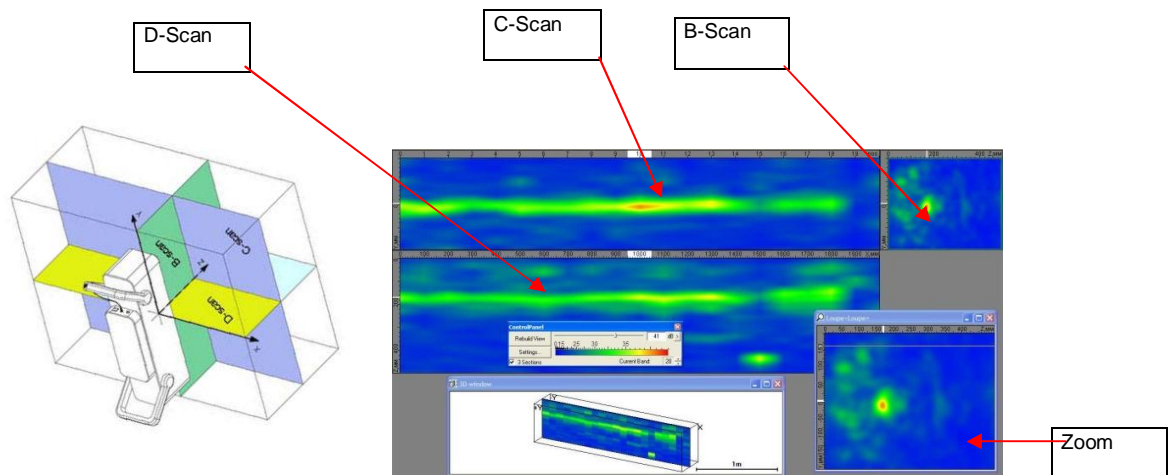
kontaktista (DPC = dry point contact) muunnin-lähetintä. Anturit lähettävät aaltoa viuhkamaisesti (kuva 2). Anturitekniikka on alun perin kehitetty Reasearch Institute of MSI:ssä Moskovassa 1980-luvun lopulla (10).



*KUVA 2. Anturien toimintaperiaate (9)*

Skannaus toimii siten, että ensimmäinen rivi lähettää ultraäänileikkausaaltoa ja muut rivit vastaanottavat, sitten seuraava rivi lähettää ja muut vastaanottavat jne. Mittaus tehdään rakenteen yhdeltä puolelta järjestelmällisesti etukäteen suunnitelluista ja merkityistä kohdista.

Antenniosa lähettää langattomasti keräämänsä tiedon kannettavaan tietokoneeseen, jossa on mittaustiedon käsittelyyn tehty ohjelma SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique). Ohjelma muodostaa skannauksesta 3D-värikuvan, josta voidaan tehdä eri syvyyksiltä ja eri suunnista 2D-poikki- ja pituusleikkauskuvia (B-, C- ja D-skan; kuva 3). Kuvien resoluutiota voidaan muuttaa tulosten tarkastelun aikana, ja näin saadaan esiin voimakkaimmat aaltojen heijastusten muutosalueet.



KUVA 3. MIRAn skannauskuvan leikkaustasot (9)

## 2.2 Betonirakenteiden tutkimukset MIRAlla

MIRA käyttää matalataajuista ultraääntä ja soveltuu siksi heterogeenisten materiaalien, kuten betonin, tutkimiseen. Lähetetyn ultraääniaallon nopeus betonissa on n. 2500 m/s ja taajuus on yleensä n. 50 kHz. Kun ultraääniaalto kohtaa rakenteessa epäjatkuvuuskohdan, siinä tapahtuu taittumista ja heijastamista. Havaittavan epäjatkuvuuskohdan on oltava noin lähetetyn aallon pituinen. Edellisen perusteella aalto palauttaa tietoa n. 25 mm:n välisin matkoin ( $d = C \cdot (\Delta t / 2)$ , missä  $C$  = nopeus). Tämä mittaväli on sopiva betonirakenteen tutkimiseen, kun tietoa halutaan myös syvemmältä rakenteesta (> 200 mm). Mikäli tutkitaan vain pintaosia, voidaan skannauksessa käyttää korkeampaa taajuutta. Taajuutta voidaan säätää välillä 15–150 kHz. (9.)

Betonirakenteiden pinta on usein hieman epätasainen. Tämän vuoksi MIRAn antennin antureissa on joustokiinnitys, mikä mahdollistaa mittauksen epätasaisesta-kin pinnasta (maksimi epätasaisuus on 8 mm antennin alueella).

MIRAn avulla voidaan löytää betonista valuviat (tyhjätilat, lajittumat) ja halkeamat rakenteen sisältä. Tällä menetelmällä voidaan myös paikallistaa jännekaapeleita ja raudoituksia, varmistaa injektoinnin onnistuminen ja löytää rakenteesta mahdolliset tyhjät suojaputket. Sillä voidaan määrittää myös rakenteen mitat ja arvioida eri aikoina tehtyjen betonointikerrosten tartunta (esim. sillan kansilaatan muotoiluvalu).

### **2.3 Käyttökohteet ja mittaustulokset**

MIRAA voidaan käyttää sekä betoni- että kivirakenteiden yleisen kunnon arviointiin. Siltojen kuntotutkimuksissa sitä käytetään mm. betonin sisällä olevien halkeamien ja tyhjätilojen (jännekaapeleiden suojaputket) etsimiseen. Korjausrakentamisessa sitä on käytetty rakenteessa olevien putkien, kaapeleiden yms. rakenneosien paikantamiseen. MIRAn etuna muihin vastaaviin menetelmiin on mm. se, että sen avulla voi ”nähdä” päällekkäisiä rakenneosia, koska anturit lähettävät leikkausaaltoja säteittäisesti.

Kun halutaan tarkastella jotain tiettyä syvyyttä rakenteessa, B-scan-kuvasta määritetään hiiren avulla syvyysväli, miltä alueelta halutaan mittaustulokset näkyviin C-scan-kuvaan. Kun esimerkiksi tiedetään, että jännekaapelin suojaputken keskiö on n. 200 mm:n syvyydessä ja sen halkaisija on 50 mm, yhdistellään skannaustiedot syvyysväliltä 170–260 mm.

Skannauskuvan tulkinta onkin vaativin osuus MIRAn avulla tehtävissä tutkimuksissa. Tulkinnan opiskelu vaatii paljon käytännön tutkimuksia ja rakenteiden avaamisia. BAM:ssa NDT-mittalaitteiden kehittämisessä, tulosten tulkinnan opettelemisessa ja kalibroinnissa käytetään laboratoriossa olevia rakennekoekappaleita, joihin on sijoitettu erikokoisia reikiä, putkia, terästankoja yms. tarkasti ennakkoon määrättyihin kohtiin.

Lisäksi BAM:lla on suuri testausalue maastossa lähellä Berliiniä, missä on mm. timanttisahalla leikattuja osia purettujen siltojen rakenteista. Siellä minulla oli mah-



dollisuus kokeilla BAM:n omalla MIRAlla koekappaleiden skannausta ja tulosten tulkintaa keväällä 2010. Koekappaleena oli jännepalkin pätkä ja kotelopalkkisillan osa (jännitetty kotelopalkkisilta, sillan kansilaatta, kuva 4 ).



*KUVA 4. Sillan jännepalkin pala BAM:n testausalueella*

MIRA-laitteita on käytössä kaikkiaan tällä hetkellä muutamia kymmeniä kappaleita. Pääosa laitteista on käytössä USA:ssa. Euroopassa niitä on 5–10 kpl, joista osa on tutkimuslaitosten ja yliopistojen käytössä. Suomessa on tällä hetkellä yksi MIRA-laitte, joka on Ramboll Finland Oy:n käytössä.

## 3 MAASTOTUTKIMUKSET

### 3.1 Jännitettyjen siltojen kuntotutkimusten tarve

Viime aikoina on tullut ilmi siltojen tarkastuksissa vakavia vaurioita jännitettyjen siltojen ankkurialueilla. Ankkurialueen jälkivalujen usein muuta rakennetta huonompi betonointityön laatu ja halkeilu on päästänyt kosteuden rakenteen sisään. Lisäksi vuotavat liikuntasaumalaitteet ovat mahdollistaneet veden pääsyn näille alueille. Kosteuden mukana rakenteisiin on saattanut joutua mm. liukkauden torjunnassa käytettäviä klorideja.

Vuonna 2004 tehdyssä tarkastuksessa havaittiin Savilahden sillassa (kolmiaukkoinen jännitetty betoninen jatkuva kotelopalkkisilta, Mikkeli) kotelon sivuseinässä kosteutta ja kalkkihärmää kohdassa, jossa jänteiden suojaputket ovat alimmassa pisteessä. Vuonna 2005 tehdyssä erikoistarkastuksessa avattiin kaksi jännekaapelia. Suojaputkista valui vettä. Injektointi oli epäonnistunut niin, että suojaputkessa oli tyhjätiloja, joihin vesi pääsi kulkeutumaan ilmeisesti vuotavan liikuntasaumalaitteen ja ankkurialueen halkeamien kautta. Jänneraudoitteessa ei kuitenkaan ollut vielä pahoja ruostevaurioita eikä suojaputkiin ollut päässyt klorideja. (11.)

Saimaan kanavan ylittävä Mälkiän silta purettiin talvella 2008–2009. Silta oli tyypiltään myös jännitetty betoninen jatkuva kotelopalkkisilta. Ennen purkua tehdyissä silmämääräisissä tarkastuksissa jännitetyt palkit oli todettu hyväkuntoisiksi. Purkutyön aikana palkkien jänneteräkset, ankkurit ja poikkijänteet tutkittiin. Pituussuuntaisten jänteiden suojaputkien injektointi oli osittain epäonnistunut. Suojaputkiin oli jäänyt tyhjätiloja, ja jänneteräkset vastasivat suojaputken kuoreen. Vuotavan saumalaitteen kautta ankkurialueelle oli päässyt liukkauden torjunnassa käytettyjä klorideja. Yhden ankkurin sisällä jännelankojen pinnassa todettiin vakavia kloridien aiheuttamia ruostumisvaurioita ja jo alkavia syöpymiä (kuva 5). (11.)

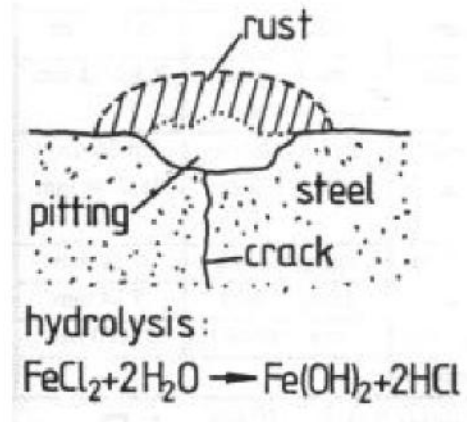


*KUVA 5. Ruostumisvaurioita ankkurissa, Mälkiän silta (11)*

Myös ulkomailla on tehty tästä asiasta tutkimuksia, mm. PIARC:n raportti. Tässä tutkimuksessa käytettiin useita eri menetelmiä jänneterästen kunnan tutkimiseen. Suojaputkissa havaittiin tyhjätiloja ja injektointilaastin laatu oli muutamissa kohteissa huono. (12.)

Kloridit ovat erittäin haitallisia betonille ja teräksille. Niiden vaikutuksesta teräsiä suojaava passiivikalvo tuhoutuu ja korroosio voi käynnistyä rakenteen sisällä. Jänneterästen korroosio on huomattavasti vakavampi vaurio kuin ns. pehmeiden terästen. Niissä oleva teräsjännitys on monikertainen (n. kolminkertainen) pehmeisiin teräsiin verrattuna, joten syöpymisen aiheuttama poikkileikkauksen pieneneminen vaikuttaa rakenteen kapasiteettiin vastaavasti enemmän.

Lisäksi jänneterästen korroosiovaurioiden vakavuudesta tehdyissä tutkimuksissa on ilmennyt, että korroosion aiheuttaman syöpymän (jännelangan poikkileikkauksen pieneneminen) kohdalle voi muodostua jännevoimasta väsymissäröjä (12, s. 19). Tämän vuoksi korroosion aiheuttamat syöpymisvauriot jänneteräksissä ovat aina hyvin vakavia (kuva 6).



*Fig. 3: Pitting induced stress corrosion cracking*

*KUVA 6. Syöpmisen aiheuttama halkeama jännteessä (13)*

Koska jänneteräkset ovat usein suhteellisen syvällä rakenteessa (yleensä >100 mm), ei karbonatisoitumisen käynnistämä teräskorroosio ole merkittävä uhka niille. Rakenteeseen syntyneet halkeamat, rakennusaikaiset valuviat ja injektoinnin epäonnistuminen mahdollistavat kuitenkin teräskorroosion käynnistymisen.

Jännitettyjen siltojen jännekaapeleiden kuntoa on tutkittu aiemmin mm. erilaisilla sähkövastus- ja sähkövirran mittaumenetelmillä (betonin ominaisvastuksen mittaaminen, potentiaalimittaus). Näillä menetelmillä ei voida kuitenkaan erottaa tavanomaisia teräksiä jänneteräksistä. Jänneteräkset ovat rakenteessa yleensä syvemmällä kuin tavanomaiset teräkset eli niiden takana.

Lisäksi jännitettyjä rakenteita on tutkittu röntgenlaitteilla. Röntgentutkimus antaa yleensä hyvän kuvan rakenteen sisästä ja sen avulla voidaan paljastaa esim. tyhjätilat (jänneiden suojaputkien injektoinnin puutteet). Röntgentutkimus on kuitenkin varsin raskas ja kallis menetelmä. Se vaatii pääsyn tutkittavan rakennososan molemmille puolille (röntgenlaite toiselle puolelle ja kuvalevy toiselle puolelle).

Rakenteita on myös avattu vesipiikkaamalla tai timanttiorauksella. Näissä tutkimuksissa avauskohta on määritetty jännepiirustuksen ja oletetun vaurioitumisalueen perusteella. Tutkittava alue on varsin suppea ja tulos sen perusteella ei välttämättä anna oikeaa kokonaiskuvaa jänteiden kunnosta.

Ultraäänimittauksen käyttö on mahdollistanut ainetta rikkomattoman ja nopean tutkimisen. Ensimmäiset betonirakenteiden tutkimiseen käytetyt ultraäänipulssilaitteet lähettivät ääniaaltoja kohtisuoraan tutkittavan rakenteen pintaa vasten. Tällainen mittauslaite on esimerkiksi Ultrasonic Pulse-Echo Flaw Detector, Germann Instruments (kuva 7). Tutkimustyö laitteella on kuitenkin hidasta, koska jokainen mittaus on pistekohtainen ja tulkittava erikseen. Tulkinta tehdään laitteeseen kuuluvan pienen näyttölaitteen avulla. Skannauksen kesto on noin 10 sekuntia / mittaus. Ultraäänien taajuutta ei voi säätää ja lähetysteho on pienempi kuin MIRAssa, eli skannaussyvyys on vain n. 600 mm.



*KUVA 7. Ultrasonic Pulse-Echo Flaw Detector (10)*

### 3.2 Tutkimuskohteiden valinta jännitettyjen siltojen kuntotutkimuksessa

Jännitettyjen siltojen ankkurialueiden kuntotutkimus-projektissa tutkittiin kymmenen sillan jännekappaleiden kuntoa MIRAn avulla. Kohteiden valinnassa käytettiin seuraavia kriteerejä:

- liikuntasaumalaitteet vuotavat suolattavalla tieosalla
- valitaan eri-ikäisiä siltoja
- halkeiluvaurioita ankkurialueen jälkivalussa.

Mittaukset kohdistettiin pelkästään jänneterästen ankkurialueille. Osassa kohteista koko sillalle tehtiin lisäksi täydellinen erikoistarkastus. Tämän tutkimustyön oli tilannut Tiehallinnon keskushallinto, nykyisin Liikenneviraston Infra-vastuualue ja kolme tiepiiriä (Uusimaa, Häme ja Keski-Suomi), nykyisin ELY-keskuksia, Destia Oy:ltä, ja tämän työn loppuun saattaminen siirtyi vuoden 2010 alusta Ramboll Finland Oy:lle.

Tutkimusten kohteiksi valittiin edellä esitetyn perusteella seuraavat sillat:

#### 1. U-1113 Lieviön risteyssilta, Lohja, Vt 1 Helsinki–Turku

- Siltatyyppe: jännitetty betoninen jatkuva kotelopalkkisilta
- Jännemitat: 23,88 + 33,78 + 24,00 m
- Kokonaispituus: 102 m
- Hyödyllinen leveys: 12,25 m
- Rakennusvuosi: 1971
- → valintakriteeri: liikuntasauvojen vesivuoto, suolattava tieosuus, halkeilua

2. U-1250 Sipoonlahden silta, Sipoo, Vt 7 Helsinki–Vaalimaa

- Siltatyyppe: jännitetty betoninen jatkuva palkkisilta
- Jännemitat: 28,10 + 8 x 34,00 + 19,70 m
- Kokonaispituus: 345 m
- Hyödyllinen leveys: 12,50 m
- Rakennusvuosi: 1975
- → valintakriteeri: liikuntasauvojen vesivuoto, suolattava tieosuus

3. U-975 Koskelan silta, Helsinki, Vt 4 Helsinki–Utsjoki

- Siltatyyppe: jännitetty betoninen jatkuva kotelopalkkisilta
- Jännemitat: 26,00 + 39,00 + 26,00 m
- Kokonaispituus: 107,9 m
- Hyödyllinen leveys: 16,40 m
- Rakennusvuosi: 1966
- → valintakriteeri: liikuntasauvojen vesivuoto, suolattava tieosuus

4. U-1796 Tervämäen risteyssilta, Hyvinkää, Mt 130 Vantaankoski–Tampere

- Siltatyyppe: jännitetty betoninen jatkuva kotelopalkkisilta
- Jännemitat: 48,00 + 54,00 + 48,00 + 40,00 m
- Kokonaispituus: 203,8 m
- Hyödyllinen leveys: 10,50 m
- Rakennusvuosi: 1991
- → valintakriteeri: uudehko silta, liikuntasauvojen vesivuoto, suolattava tieosuus

5. U-615 Södrikin risteyssilta, Espoo, Vt 1, Helsinki–Turku

- Siltatyyppe: jännitetty betoninen kotelopalkkisilta
- Jännemitta: 21,32 m
- Kokonaispituus: 37,4 m
- Hyödyllinen leveys: 28,64 m
- Rakennusvuosi: 1960

- → valintakriteeri: vanha silta, liikuntasaumojen vesivuoto, suolattava tieosuus

6. U-1062 Kerkkoon silta, Kerkkoo, Mt 1602 Strömsberg–Kerkkoo

- Siltatyyppe: jännitetty betoninen palkkisilta
- Jännemitta: 26,00 m
- Kokonaispituus: 33,6 m
- Hyödyllinen leveys: 10,50 m
- Rakennusvuosi: 1969
- → valintakriteeri: vanha silta, liikuntasaumojen vesivuoto, suolattava tieosuus

7. H-1037 (U-2497) Vanajan silta, Hämeenlinna, Vt 10 Turku–Tuulos

- Siltatyyppe: jännitetty betoninen jatkuva palkkisilta
- Jännemitat: 26,00 + 33,00 + 26,00 m
- Kokonaispituus: 95,5 m
- Hyödyllinen leveys: 10,10 m
- Rakennusvuosi: 1965
- → valintakriteeri: halkeilua, liikuntasaumojen vesivuoto, suolattava tieosuus

8. H-1176 Pyhänavan silta, Lempäälä, Mt 190 Kylmäkoski–Lempäälä

- Siltatyyppe: jännitetty betoninen jatkuva kotelopalkkisilta
- Jännemitat: 26,00 + 58,00 + 26,00 m
- Kokonaispituus: 118,9 m
- Hyödyllinen leveys: 14,05 m
- Rakennusvuosi: 1975
- → valintakriteeri: halkeilua, liikuntasaumojen vesivuoto, suolattava tieosuus



9. KeS-860 Naiskosken silta, Jyväskylä, Vt 4 Helsinki–Utsjoki

- Siltatyyppe: jännitetty betoninen palkkisilta
- Jännemitta: 40,00 m
- Kokonaispituus: 61,6 m
- Hyödyllinen leveys: 15,00 m
- Rakennusvuosi: 1969
- → valintakriteeri: halkeilua, liikuntasauojen vesivuoto, suolattava tieosuus

10. KeS-1245 Kotkansalmen silta, Jämsä, Kt 58 Kangasala–Keuruu–Kärsämäki

- Siltatyyppe: jännitetty betoninen jatkuva kotelopalkkisilta
- Jännemitat: 40,00 + 71,50 + 40,00 m
- Kokonaispituus: 162,4 m
- Hyödyllinen leveys: 9,05 m
- Rakennusvuosi: 1965
- → valintakriteeri: halkeilua, liikuntasauojen vesivuoto, suolattava tieosuus

MIRA-tutkimusten maastotyöt tehtiin kahden hengen työryhmässä. Osallistuin näiden kohteiden maastotutkimukseen lukuun ottamatta kohteita 4 ja 8. Tutkimustyössä toisena päätarkastajana oli insinööri Guy Rapaport Ramboll Finland OY:stä. Hän on laatinut myös näiden kohteiden tarkastusraportit mittaustulosten ja niiden tulkinasta käymiemme keskustelujen pohjalta. Tarkastusraporttien laatimisessa ja koko tutkimustyön ohjauksessa on ollut mukana tekniikan lisensiaatti Torsten Lunabba Destia OY:stä.

### **3.2 Mittausten teko siltapaikoilla**

Maastotutkimuksissa tehtiin ensin MIRAn kalibrointi tekemällä 8–20 mittausta tutkittavasta betonirakenteesta. Näin saatiin keskimääräinen aallon nopeus rakenteessa, jota mittari sitten käytti varsinaisessa tutkimuksessa. Tutkittavat jännekaa-

pelit valittiin suunnitelman jännepiirustusten perusteella siten, että ne olivat lähimpänä ulkopintaa olevia jänteitä ja niiden tutkiminen skannaamalla ja tarvittaessa rakenteen avaaminen oli mahdollista suorittaa. Tämän jälkeen niiden sijainti ja skannauspisteet merkittiin rakenteeseen tussilla (kuva 8). Skannauspisteet nimettiin etukäteen juoksevilla numeroinnilla. Mittaukset tehtiin 100 mm:n porrastuksella (MIRAn antennin leveys mitaussuunnassa, y-suunta) merkittyä linjaa pitkin. Yhden skannauksen leveys oli antennin leveys eli 400 mm (x-suunta).

Yhden pisteen skannaus kestää noin 0,5 sekuntia. Mittauspisteitä otettiin yhdestä tutkittavasta jännekaapelista yleensä 20 kpl (= 2 metrin matka). Mittaus aloitettiin mahdollisimman läheltä ankkureita. Osassa tutkimuskohteista ankkurit olivat tukirakenteiden takana, ja näissä mittaus aloitettiin ensimmäisestä mahdollisesta mitauspisteestä.



*KUVA 8. Tutkimuslinjat on merkitty sillan jännepalkkiin.*

### 3.3 Tulosten tulkinta mittauspaikoilla

Jokainen skannaus tulkittiin alustavasti heti mittauksen jälkeen. MIRA-ohjelman muodostamasta 3D-kuvasta otettiin poikkileikkaus voimakkaimman heijastuksen kohdalta. Poikkileikkauksen avulla määritettiin syvyysväli (jännekaapelin suoja-putken syvyys), josta yhdistettiin pituusleikkaukset (C- ja D-scan). Resoluutiota muuttamalla haettiin vielä tarkemmin kohdat, joissa heijastus tulee ensimmäisenä näkyviin. Tämä kohta merkittiin rakenteeseen ja kuvasta määritettiin mahdollisimman tarkasti suoja-putken sijainti ja syvyys. Kun kaikki skannaukset siltapaikalla oli tehty ja tulkittu, valittiin avattava kohta rakenteesta.

Avaus tehtiin timanttiporauksella (kuva 9). Lieriöporan koko oli yleensä 100 mm. Poraus piti suorittaa hyvin varovasti, kun lähestyttiin suoja-putken syvyyttä. Kun suoja-putki oli saatu näkyviin, tutkittiin ensin sen kunto (ruostuneisuus) päältä päin. Tämän jälkeen suoja-putki avattiin taltan avulla. Putken sisällä olevasta injektointi-laastista otettiin näyte kloridipitoisuuden tutkimusta varten, jos laastia oli riittävästi. Jätteiden kunto arvioitiin ensin puhdistamattomana ja sen jälkeen puhdistettuna.

Jänneraudoitusten korroosioarvioinnissa käytettiin Tiehallinnon selvitystä 48/2003 *Raudoitteiden korroosioasteen määrittäminen* (14). Tässä on esitetty jänneraudoitteiden korroosioasteet ja korroosioasteiden määrittämismenetelmät. Korroosioaste määritetään vertaamalla tutkittavaa kohtaa jänneraudoitteiden mallikuviin ennen ja jälkeen puhdistuksen sekä tarvittaessa mittaamalla syöpymsyvyys. Jänneraudoitteen korroosioasteen määrittämistä varten jänneraudoitteen pintaruoste poistetaan 50–100 mm:n matkalta (esim. Scotch-Brite 190 -karhunkielellä) siten, että jäljelle jäävät ainoastaan korroosioasteet.



*KUVA 9. Rakenne on avattu timanttikorauksella, Lieviön silta*

Useimmissa tutkimusprojektiin kuuluneissa 10 sillassa suojaputkien injektointi oli onnistunut tyydyttävästi, mutta ei yhdessäkään täydellisesti. Yleisenä havaintona oli, että suojaputken koko on liian pieni verrattuna jännekaapeleiden vaatimaan tilaan. Näin injektointimassalle on jäänyt vain hyvin vähän tilaa (yleensä 1–5 mm :n kerros). Tämä on vaikuttanut myös injektoinnin onnistumiseen. Lisäksi jänneteräksät siirtyvät jännityksen voimasta suojaputken toiseen reunaan. Terästen kosketus suojaputkeen mahdollistaa korroosion käynnistymisen (tyhjätila, kosteus). Yhdessä tutkituista kohteista suojaputken injektointi puuttui kokonaan avatusta kohdasta (kuva 10).



*KUVA 10. Injektointimassa puuttuu kokonaan suojaputkesta*

### 3.4 Muut kenttätutkimukset

Syksyllä 2009 tehtiin MIRA-laitteella tutkimuksia mm. sillankorjauskohteessa (H-210 Kuusjoen silta, Ypäjä) muotoiluvalun tartunnasta (kuva 11). Skannaus osoittaa, onko alkuperäisen valun ja uuden muotoiluvalun välissä tyhjätillaa (ilmaa). Tässä kohteessa ei todettu huonoa tartuntaa. Tartunta mitattiin lisäksi vielä tartuntavetokokeella (Dyna Z16 -vetolaite). Vastaavat tutkimukset on tehty myös Professorintien sillalle Helsingissä ja Suonenjoen sillalle Suonenjoella.

MIRAn avulla on tutkittu myös injektoinnin onnistumista luonnon kivillä verhotun sillan välituen sisällä (Torniojoen ratasilta). Tässä kohteessa skannaussyvyys oli 2000 mm, ja tutkimus tehtiin välituen molemmilta sivuilta erikseen.



*KUVA 11. Muotoiluvalun kunnan tutkimista MIRAn avulla*

Keväällä 2010 MIRA:lla G. Rapaport Ramboll Finland Oy:stä tutki Kööpenhaminassa Bella-hotellin rakennustyömaalla pilarielementtien liitostappien jälkivalun onnistumista.

## 4 MITTAUSTULOSTEN ARVIOINTI

### 4.1 Tutkimusraporttien sisältö

Tässä on tarkemmin esitelty vain niiden kohteiden tulokset, joissa todettiin vakavia vaurioita jänneteräksissä.

#### Kohde 1 Lieviön silta

Lieviön sillan mittauksissa todettiin, että toisesta tutkittavasta jännekaapelin suoja-putkesta (SP 5) injektointi puuttui kokonaan. Rakenne avattiin kohdasta, jossa skannauksen heijastus oli voimakkain (noin 1000 mm ankkurista). Poraussyvyudeksi arvioitiin MIRA-tutkimuksen poikkileikkauskuvan (B-Scan) avulla 135 mm.

Suojaputken keskilinja oli noin 80 mm ylempänä ja noin 20 mm lähempänä rakenteen pintaa verrattuna suunnitelman mukaiseen sijaintiin. Suojaputki on ohutseinäistä profiloitua sinkittyä teräsputkea. Se oli ruosteessa sekä ulko- että sisäpinnasta, mutta vielä ehjä.

Suojaputki avattiin taltalla ja todettiin, että injektointimassa puuttui kokonaan. Suojaputki oli sisältä kuiva. Sitä tutkittiin myös endoskoopin avulla noin 1 metrin matkalla sillan aukkoon päin. Endoskoopin päässä oli kamera, ja sillä otetuissa kuvissa näkyy kalkkikertymiä putkessa (kuva 12). Kalkkikertymä voi viitata siihen, että putkeen on päässyt ulkopuolelta kosteutta.





*KUVA 12. Kalkkia suojaputken pohjalla*

Jänneteräket ovat punoksia, joiden halkaisija on noin 15 mm. Punos koostuu  $\varnothing$  4 mm:n langoista. Työvirheen vuoksi teräksiltä puuttuu injektointimassan antama korroosiosuoja ja toiminta on myös rakenteellisesti puutteellista, sillä voiman siirto toimii vain ankkureiden kautta. Säikeiden pinnoissa todettiin voimakasta ruostumista ja jo vähäisiä syöpymiäkin. Korroosioaste oli ennen puhdistusta 3A ja puhdistuksen jälkeen myös 3A (kuva 13).



*KUVA 13. Jänneterästen korroosioaste puhdistettuna 3A*

Ankkurialueelta otettiin myös kloridipitoisuusnäytteitä betonin pinnasta syvyyksiltä 0–20 mm, 20–40 mm ja 40–60 mm. Pitoisuudet (happoliukoinen mitta) olivat pinnassa erittäin korkeita (0,15–0,19 CL<sup>-</sup> paino-%) ja syvemmilläkin yli ns. kriittisen raja-arvon 0,015–0,035 CL<sup>-</sup> paino-%. Ankkurialueen jälkivaluun on syntynyt halkeamia ja vuotavan liikuntasaumalaitteen kautta valunut kloridipitoinen vesi on päässyt sisälle rakenteeseen. Korkea kloridipitoisuus on erittäin vakava uhka rakenteessa olevien terästen säilyvyydelle, koska kloridikorrosio etenee nopeasti ja se on pistemäistä (syöpymät / väsytyksen mahdollisesti aiheuttamat säröt).

Tämän kohteen muissa skannauksissa ei havaittu lisää yhtä voimakkaita ja jatkuvia heijastuksia. Syvemmillä rakenteessa olevien suoja-putkien (SP 1 ja SP 3) heijastuksissa todettiin kuitenkin selvä ero, vaikka ne sijaitsevat lähes yhtä syväällä. Ero voi johtua lähempänä pintaa olevien terästen ja suoja-putkien aiheuttamasta leikkausaallon vaimenemisesta. Asia tulisi kuitenkin selvittää esimerkiksi poraamalla suoja-putkiin pienellä kovapalaterällä (d ~20 mm). Näin voitaisiin selvittää, ettei se johdu injektoinnin epäonnistumisesta ko. kohdassa.

#### Kohde 5 Södrikin risteyssilta

Södrikin risteyssilta on valmistunut liikenteelle v. 1960 eli se on ensimmäisiä jännitettyjä siltoja Suomessa. Päälysrakenteen muodostaa 10 jännitettyä pituussuuntaista palkkia, poikkipalkki ja kansilaatta. Jännemitta on vain 21,32 m, mutta kokonaisleveys on varsin suuri, 29,1 m. Keskimääräinen liikennemäärä on sillan kohdalla n. 60 000 ajoneuvoa/vrk, valtatie 1 Helsinki–Turku.

Jokaisessa jännitettyssä palkissa on 10 kpl jännekaapeleiden suoja-putkea. Ankkurien jälkivalusauma ei ole näkyvässä ja sen kuntoa ja valusauman eheyttä ei voitu tutkia. Tässä kohteessa skannattiin kaksi suoja-putkea (SP 1 ja SP 5). Kummastakaan skannauksesta ei havaittu voimakkaita heijastuksia, mitkä viittaisivat injektoinnin epäonnistumiseen. SP 1 avattiin skannaustulosten tulkinnan jälkeen voi-



makkaimman heijastuksen kohdalta, noin 800 mm etäisyydeltä etumuurista. Suojaputki oli suunnitelman mukaisella syvyydellä, mutta pystysuunnassa noin 25 mm teoreettista linjaa alempana.

Teräksinen kierresaumattu suojaputki oli ruosteessa. Ruoste oli tarttunut sisäpuolen injektointimassaan. Injektointimassa oli haurasta ja sitä oli vain noin 1 mm:n paksuinen kerros jännetangon ympärillä. Suojaputkessa oli vain yksi sileä tanko, halkaisija noin 26 mm (todennäköisesti ST 80/105). Tanko- ja lankatyypinen jänne on tyypillinen vanhemmissa jännitetyissä silloissa. Tangossa oli pintaruostetta ja korroosioaste oli ennen puhdistusta 2 ja puhdistuksen jälkeen 2. Huonolaatuinen injektointilaasti on todennäköisesti mahdollistanut teräskorroosion etenemisen rakenteessa.

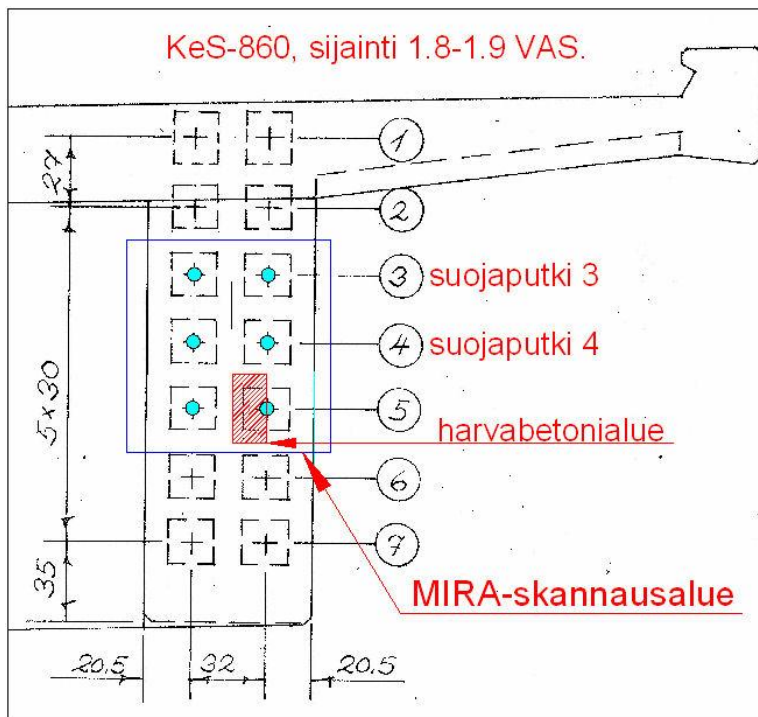
Ankkurialueelta betonin pinnasta syvyyksiltä 0–20 mm ja 20–40 mm otettiin kloridipitoisuusnäytteet ja ne määritettiin happoliukoisina pitoisuuksina. Pitoisuudet olivat alhaisia (<0,01 CL<sup>-</sup> paino-%).

#### Kohde 9 Naiskosken silta

Naiskosken silta on valmistunut liikenteelle v. 1967 eli sekin on ns. vanhempia jännitetyjä siltoja. Päällysrakenteen muodostaa neljä jännitettyä palkkia ja kansilaatta. Jännemitta on 40 m ja hyödyllinen leveys 15 m. Silta sijaitsee Jyväskylän kaupungin keskustan eteläpuolella Helsinki–Utsjoki -valtatiellä 4. Liikennemäärä on noin 16 000 ajoneuvoa/vrk.

Jokaisessa palkissa on 14 kpl jännekaapeleiden suojaputkia. Skannaukset tehtiin tuen 1 (eteläpää) läheltä oikealta puolelta reunimmaisesta palkista. Tästä kohteesta skannattiin kolme suojaputkea (SP3 , SP4 ja SP5). Sillan liikuntasaumalaite oli vuotanut tutkimusalueen lähellä.

MIRA-tutkimuksen perusteella tutkituissa suoja-putkissa ei havaittu voimakkaita jatkuvia heijastuksia, jotka viittaisivat injektointin epäonnistumiseen. SP4:n kohdalla todettiin yksittäinen voimakas heijastus noin 1400–1800 mm ankkurin päästä. SP5:n kohdalla lähellä ankkureita oli voimakkaita yksittäisiä heijastuksia, mitkä viittaavat harvavaluun ankkureiden välialueilla (kuva 11).



KUVA 11. Todennäköinen harvavalukohta ankkureiden välialueilla

Rakenteen avaus tehtiin noin 1,8 metriä palkin päästä SP3:n kohdalta. Suoja-putki oli vähän päältä ruosteessa, injektointimassa oli hyvin kiinni jänteissä ja suoja-putkessa. Massan paksuus suoja-putken ja jänteiden välillä oli hyvin pieni (~3 mm). Jänteiden tyyppi oli muutettu rakennusvaiheessa ja käytetty jännetyyppi oli todennäköisesti 44 x Ø 6 mm BBRL ST 150/170. Jänneterästen pinnoissa oli kohtalaisesti ruostetta ja jo vähän syöpymiäkin, ruostumisaste ennen puhdistusta 2 ja puhdistuksen jälkeen 3A (kuva 12).



*KUVA 12. Ruostetta ja syöpymiä jänneteräksissä*

Korroosion syy ei selvinnyt tutkimuksissa. Mahdollisesti vauriot ovat syntyneet rakennusvaiheessa. Vaurioiden vakavuus edellyttää kuitenkin lisätutkimuksia. Ankkurialueilta otetuissa betonijauhenäytteissä ei todettu klorideja.

## **4.2 Johtopäätökset mittaustuloksista**

Tehtyjen tutkimusten perusteella voidaan todeta, että jännitetyissä silloissa Suomessa ei ole vielä sortumille altistavia vakavia vaurioita.

Injektointityön laatu ja injektointimassan laatu vaihtelevat kohteittain kuitenkin paljon. Ahdas suojaputki ja laastin korkea vesi-sementtisuhde on mahdollistanut tyhjätilojen syntymisen suojaputkeen. Tyhjätilassa on aina sen verran ilmaa ja kosteutta, että se riittää jänneteräksen korroosion käynnistymiseen. Korroosion aiheuttamat syöpymät pienentävät jänneterästen kapasiteettia merkittävästi (14).

Liikuntasaumalaitteiden vuoto mahdollistaa kloridipitoisen veden valumisen ankkurialueen betonipintoihin. Ankkureiden päälle tehtyjen jälkivalujen saumoihin on usein syntynyt halkeilua. Tämä mahdollistaa vuotoveden ja sen mukana mahdollisesti olevien kloridien pääsyn suoraan ankkurirakenteisiin. Kloridien käynnistämä korroosio on usein pistemäistä ja johtaa nopeasti syöpymiin teräksessä.

Tutkimuksissa esille tulleet vauriot ja puutteet osoittavat selvästi sen, että tällainen tutkimus olisi hyvä tehdä kaikille merkittävillä jännitetyille silloille. Tarkastus tulisi tehdä viimeistään ennen sillan peruskorjausta tehtävän erikoistarkastuksen yhteydessä.

### **4.3 Todettujen vaurioiden vaikutus rakenteisiin**

Kuten lähteestä 12 ilmenee, vaikuttaa jänneteräksen korroosiovaurio merkittävästi sen vetokestävyyteen. Tästä on tehty myös kokeellinen tutkimus Midbayn sillalle Nicevillessä Floridassa. Sillan jännekaapeleista oli otettu tutkittavaksi kaksi jänneterästä, joista toisessa oli merkittäviä korroosiovaurioita ja toinen oli pääosin kunnossa (vertailukappale). Kun ruoste puhdistettiin vaurioituneesta jänneteräksestä, mitattiin syöpymän maksimi syvyydeksi noin 0,04 mm. (15.)

Jänteille tehtiin vetokokeet laboratoriossa. Tulosten perusteella myötörajat olivat suurin piirtein samat molemmissa tutkituissa jänteissä. Murtolujuudet olivat vaurioituneessa jänteessä yli 10 % huonompia. Kahdessa vaurioituneessa jännelangassa murto tapahtui jo ennen myötöä. Tutkimuksen tulokset on esitetty taulukoissa 2 ja 3. (15.)

**TAULUKKO 2. Vetokokeiden tulokset, joissa myötörajat ja murtolujuudet (14, s. 3)**

**Test Results**

The following table summarizes the results observed during the test:

Specimen Number	Initial Condition	Yield Strength $f_y$ (ksi)	Ultimate Strength $f_u$ (ksi)
CONT-1	OK – Control Specimen	246.6	279.4
CONT-2	OK – Control Specimen	244.7	278.8
CORR-1	light pitting, corrosion	245.9	248.0
CORR-2	light pitting, corrosion	Not achieved	240.7
CORR-3	light pitting, corrosion	Not achieved	240.4
CORR-4	mild corrosion	253.1	264.4
CORR-5	light pitting, corrosion	240.1	250.7
CORR-6	light pitting, corrosion	246.1	246.8
CORR-7	light pitting, corrosion	245.0	245.0

*TABLE 1 – Test Result Summary*

**TAULUKKO 3. Vetokokeiden tulokset, joissa myötörajat ja murtolujuudet, keskiarvot (14, s. 3)**

The average results are as follows:

Specimen Type	Yield Strength $f_y$ (ksi)	Ultimate Strength $f_u$ (ksi)
Control	245.65	279.1
Corroded	246.04*	248.0

*TABLE 2 – Test Result Averages*

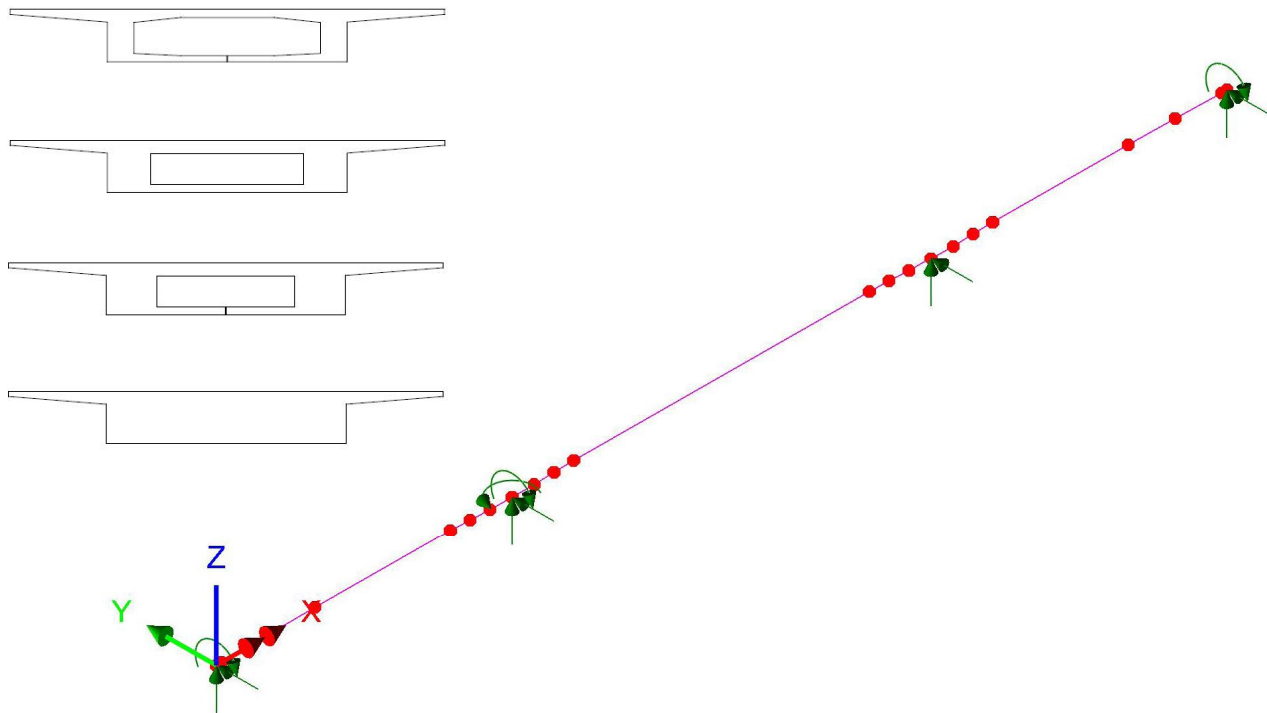
Kohteen 1, Lieviön silta, jännitetyn kotelopalkin alkuperäistä taivutuslujuutta verrattiin kahteen kuvitteelliseen vauriotapaukseen eli

1. alkuperäinen tilanne
2. 1/3 jänneteräksistä on murtunut
3. 2/3 jänneteräksistä on murtunut.

Tätä varten kyseinen rakenne mallinnettiin (kuva 13) siltarakenteiden mitoituksessa käytettävään FEM-ohjelmaan, Lusas Bridge (laskelmaselostus liite 2). Tässä tutkittiin vain taivutusta, eikä esimerkiksi väännön tai leikkausvoiman vaikutusta huomioitu laskelmissa ollenkaan. Kuormien oletettiin vaikuttavan palkkiin keskeisesti.

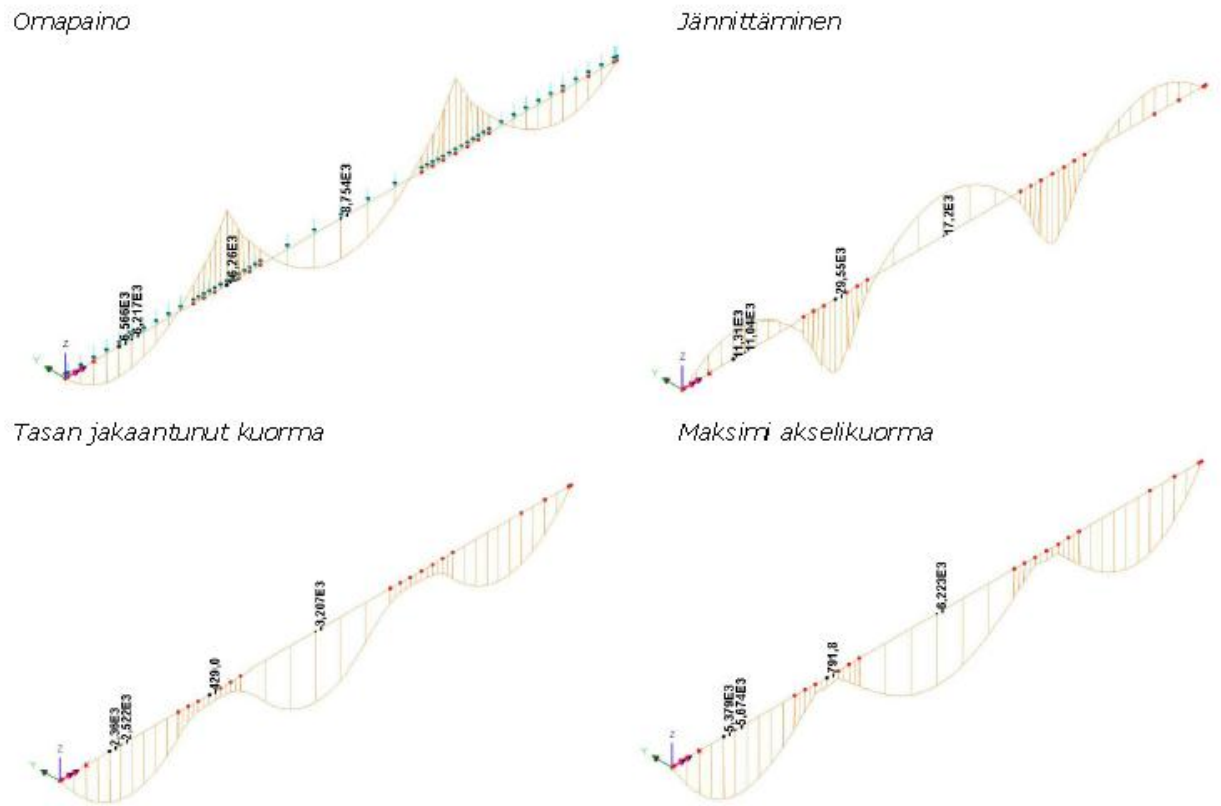
Pysyvinä kuormina huomioitiin omapaino ja pintarakenteiden paino sekä jännevoima. Liikennekuomana käytettiin LM1:n mukaista yhdistelmää. (16.)

Murtuneista jänneteräksistä oletettiin, että ne sijaitsivat injektioimattomassa suoja-putkessa. Jännevoiman on oletettu vaikuttavan niin, että omalla painolla koko palkin poikkileikkaus on puristettu. Mallin eri vauriovaihtoehtojen perusteella arvioitiin kestävyuden muutosta ja seurauksia rakenteelle. Määrääväksi poikkileikkaukseksi tuli kaikissa tapauksissa sillan laita-aukon kenttämomentti.



KUVA 13. Laskentamalli ja poikkileikkaukset (liite 1)

Kuvassa on esitetty laskennasta saadut momenttikäyrät eri kuormituksille.



KUVA 14. Kuormitustapausten momenttikäyrät (liite 1)

Laskelmien tulosten perusteella rakenteen kapasiteetti riittää vielä, vaikka 1/3 jänneteräksistä on tarkasteltavassa poikkileikkauksessa murtunut. Tällöin poikkileikkauksen taivutuskestävyydestä on käytössä noin 80 %. Rakenne ei kuitenkaan kestä, jos 2/3 jänneteräksistä on murtunut (taulukko 4). Tässä tapauksessa taivutuskestävyys ylittyy jo noin 32 %.

Ennen rajatilamitoitukseen siirtymistä jännitetyt sillat suunniteltiin yleensä niin, että betonissa ei esiintynyt vetojännityksiä käyttötilan kuormilla. Tästä johtuen sillassa on selvästi ylikapasiteettia taivutukselle, koska betoniteräsmäärä on tavallaan reservinä rakenteessa.

TAULUKKO 4. Murtotilan momentit 1-aukossa (liite 1)

<b>MURTOTILA</b>			
<b>Md=</b>	<b>21,050888</b>	f <sub>pd</sub> =	1418
Nd=	6,5508271	f <sub>yd</sub> =	454
		f <sub>cd</sub> =	25,19
<b>POIKKILEIKKAUS</b>			
b=	11,080		
d=	1,482		
b <sup>*</sup> =	0		
H <sup>*</sup> =	0		
A <sub>p</sub> =	6050,6062		
A <sub>s</sub> =	10073		
ep-es=	0,179		
A <sub>s</sub> <sup>*</sup> =	0		
d <sup>*</sup> =	0		
y>H <sup>*</sup>			
y=	0,3073787		
JAN.TER.VEN=	13,921568		
TER.VEN=	9,9999614		
<b>Mu=</b>	<b>15,935201</b>		

→ Rakenteen kapasiteetti ei riitä (murto)

#### 4.4 Jatkotutkimukset ja markkinointi

Tutkimuksen kohteena olleiden 10 sillan MIRA-mittausten pohjalta tullaan tekemään vuoden 2011 aikana lisätutkimuksia ainakin kohteelle 1 (Lieviön silta), kohteelle 9 (Naiskosken silta) ja kohteelle 10 (Kotkansalmen silta). Lisätutkimuksissa skannataan MIRAlla jännekaapeleita myös sillan aukkojen keskivaiheilta ja välitukien kohdilta. Näin pyritään selvittämään jo todettujen vaurioiden laajuus ja korjaustarve. Ramboll Finland Oy:ssä tehdään jo korjaussuunnitelmaa kohteelle 5 (Vanajan silta). Työn tilaajana on Uudenmaan ELY-keskus. Korjaussuunnitelmassa on huomioitu myös ankkurialueiden mahdollisten vaurioiden lisätutkimukset. Tässä ne toteutetaan vesipiikkaamalla osa ankkureista näkyviin.



Kesällä 2010 tehtiin MIRAn avulla vielä 7 jännitetyn sillan ankkurialueen kuntotutkimukset. Kohteet olivat Lapin, Pohjois-Pohjanmaan, Savo-Karjalan, Etelä-Pohjanmaan, Pirkanmaan ja Varsinais-Suomen ELY-keskusten alueilla. Näissä tutkimuksissakin tuli esille muutamia vakavia vaurioita. Injektointimassan ja suoja-putkien välillä oli useissa kohteissa tyhjätila. Kloridipitoisuudet olivat yhdessä kohteessa hyvin korkeita. Vakavia ruostumisvaurioita ei havaittu näissä tutkimuksissa.

Markkinoinnissa tavoitteena on ollut antaa tilaajille tietoa jännitettyjen siltojen ongelmista. Toisaalta on esitetty matalataajuisen ultraäänen käyttöön perustuvan tutkimuksen mahdollisuuksia löytää nämä mahdolliset ongelmakohdat. Tätä varten tehtiin esite, jossa on kerrottu tässä tutkimuksessa löydetyistä vakavista vaurioista ja myös MIRAn toimintaperiaatteista. Sitä on esitelty muun muassa kaikkien ELY-keskusten siltainsinööreille ja suurempien kaupunkien (Helsinki, Tampere, Turku, Jyväskylä) siltavastaaville. Esittelin tämän tutkimuksen tuloksia vuoden 2011 Betoniyhdistyksen ja Liikenneviraston järjestämällä Siltatekniikan neuvottelupäivillä Helsingissä (liite 2).

## 5 MUITA NDT-TUTKIMUSMENETELMIÄ

### 5.1 Impact-Echo-jännitysaaltomittari

Impact-Echo eli isku-kaiku-menetelmä perustuu iskun aikaansaamien matalataajuuksisten puristusaaltojen (ns. P-aalto) etenemiseen rakenteeseen ja rakenteen sisällä eri rajapintojen aiheuttamien heijastusten mittaukseen. Iskun aikaansaamiseen käytetään erikokoisia pieniä teräskuulia (yleensä 2–15 mm). Kuulan koon valintaan vaikuttaa tutkittavan rakenteen paksuus tai mahdollisen vaurion syvyys rakenteessa. Kuulan ja betonin välisen niin sanotun kontaktiajan pituus tulisi olla pienempi kuin mittaussiskun aikaansaaman aallon pituus.

Impact-Echo-menetelmää käytetään betonirakenteessa olevien tyhjätilojen, valuviikojen ja halkeamien tutkimiseen. Kaupalliseen käyttöön tätä menetelmää käyttävän laitteen on valmistanut mm. Germann Instruments A/S Tanskasta. Laitteen tuotenimi on DOCTer (kuva 13). (10, s. 45.)



KUVA 13. DOCTer Impact-Echo-mittauslaite (16)

## 5.2 Maatutka

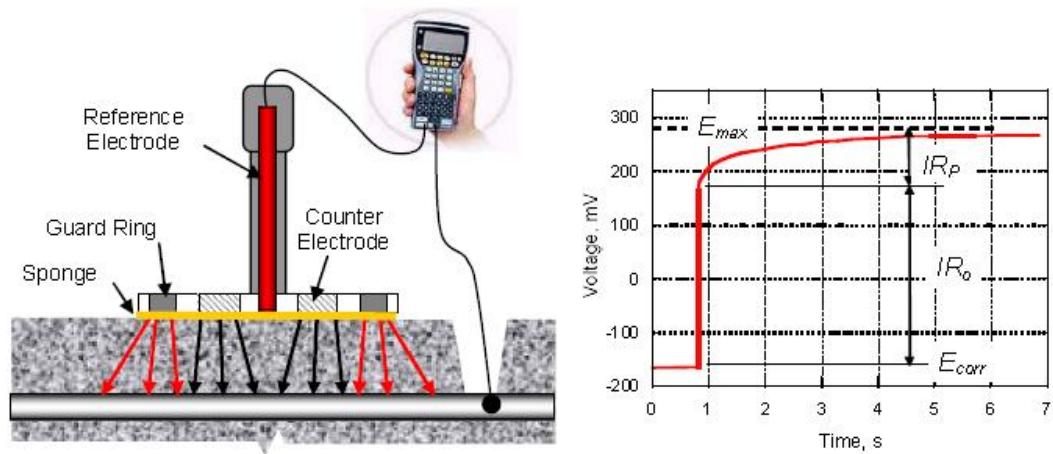
Maatutka perustuu samantapaiseen aaltojen etenemisen mittaukseen kuin MIRA- ja Impact-Echo-menetelmät. Maatutka käyttää sähkömagneetista korkeataajuista (500 MHz – 1 GHz) säteilyä. Se on alun perin kehitetty maaperän eri maalajien ja kallion pinnan tutkimiseen. Betonirakenteiden tutkimiseen sitä on sovellettu pääasiassa raudoitusten ja jännekaapeleiden paikantamiseen. (17, s 38–40.)

## 5.3 GalvaPulse-korroosionopeuden mittari

Terästen korrosio on sähkökemiallinen ilmiö. Tämän vuoksi rakenteen korrosiotilan mittausrakenteet perustuvat siihen liittyvien dimensioiden mittaamiseen. Yleisesti mitataan terästen potentiaalia (mV), betonin ominaisvastusta ( $k\Omega\text{cm}$ ) ja terästen korroosionopeutta ( $\mu\text{m}/\text{v}$ ). Teräksen korroosionopeuteen vaikuttaa määräävästi teräksen pinnan lähellä olevan betonikerroksen johtavuus (polarisaatio-ominaisuus mm. suuri kapasitanssi). Korroosionopeuden mittaaminen perustuu polarisaatiovastuksen mittaamiseen. Yksinkertaistettuna tässä menetelmässä mitataan sitä virtamäärää, millä ns. korroosiovirran suunta saadaan muutettua. (17, s. 27.)

GalvaPulse (kuva 14) käyttää galvanostaattista menetelmää teräksen korroosionopeuden mittaamiseen. Siinä mitataan virtapulssin aiheuttamia polarisaatiopotentiaaleja, jolloin saadaan polarisaatiopotentiaalimuutos ajan funktiona. Tutkiminen vaatii teräksen paljastamista sähköistä kontaktia varten ja mitattavan alueen kastelua. (10, s. 61.)

The **GalvaPulse** evaluates the corrosion rate of reinforcement by measuring polarization resistance using the **galvanostatic pulse** technique, as described below.

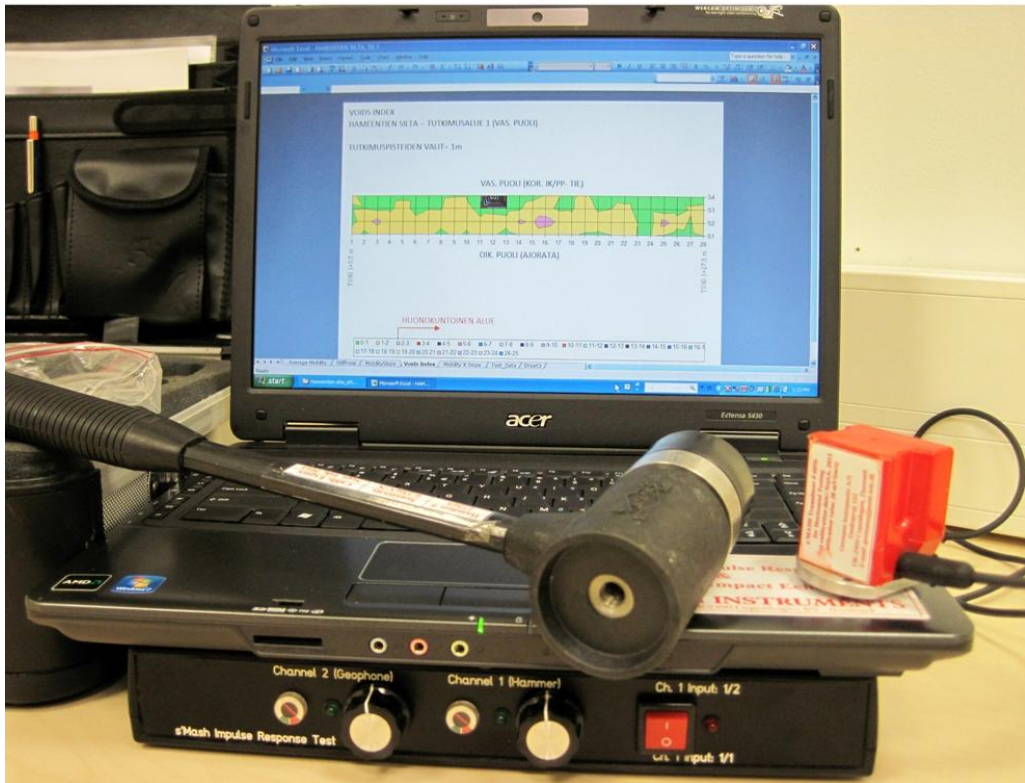


KUVA 14, GalvaPulse-mittauslaite (10)

#### 5.4 s'Mash-värähtelymittari

Sillan kansilaatan yläpinnan kunto ja sen korjaaminen tulee lähes aina korjaussuunnittelussa määrääväksi sekä työn ajoituksen että kustannusten kannalta. Tämän vuoksi betonin kunnan selvittäminen ennen korjaustyötä on oleellisen tärkeää. Normaalisti sillan erikoistarkastuksessa se perustuu kuitenkin satunnaiseen rakenteiden avaamiseen lieriöporalla ( $\varnothing$  100–200 mm) ja palanäytteiden ottamiseen näistä kohdista. Näytteistä tehdään sitten laboratoriossa joko ohut- tai pintahietutkimus betonin laadun määrittämiseksi.

S'Mashin (kuva 15) avulla voidaan kartoittaa nopeasti kansilaatan kunto (pinnan rapautuminen, valuviat, rakennekerrosten välisten tartuntojen kunto yms.). Mittaus perustuu värähtelyn voimakkuuteen ja etenemisnopeuteen. S'Mashin tulosten perusteella saadaan myös tietoa mahdollisten vaurioiden laajuudesta. Mittari tuottaa tietoa, josta mittariin liittyvä ohjelma muodostaa graafista kuvaa. Sitä voidaan myös käyttää muidenkin sillan betonirakenteiden kunnan alustavaan selvittämiseen ja tarkentaa tietoa esimerkiksi MIRAn avulla. (19, s. 116).



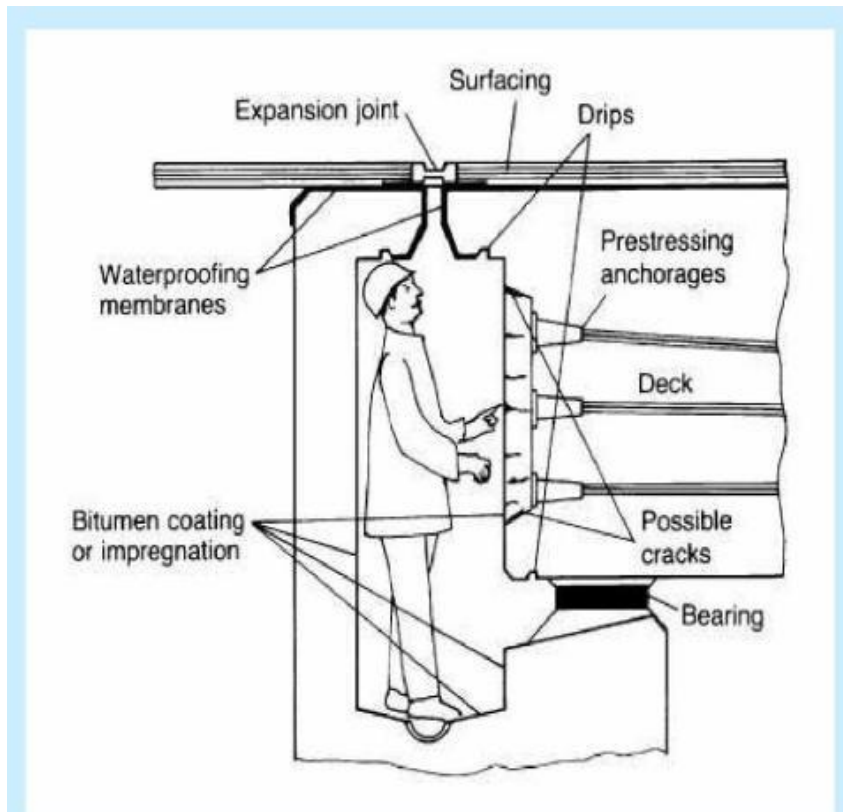
KUVA 15. s'Mash-mittauslaite

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

### 6.1 MIRAn soveltuvuus siltojen kuntotutkimuksiin

Suomen yleisillä teillä on noin 150 jännitettyä siltaa, joiden ikä on jo yli 35 vuotta. Tässä iässä silloille tehdään yleensä ensimmäinen peruskorjaus. Ennen peruskorjausta tehdään erikoistarkastus vaurioiden vakavuuden ja laajuuden selvittämiseksi. Jännitetyissä silloissa tulisi erikoistarkastuksessa selvittää jänneterästen kunto ja niiden suojaputkien injektoinnin onnistuminen. MIRA soveltuu hyvin tämän tyyppiin tutkimuksiin ja myös uusien rakenteiden laadunvalvontaan. Sen avulla jänneteräket voidaan paikantaa luotettavasti. Leikkausaallon käyttöön perustuvana mitausmenetelmänä sillä on mahdollista paikantaa myös eri syvyyksillä olevia päällekkäisiä rakenteita. Tähän tarkoitukseen se on tällä hetkellä ainoa NDT-tutkimuslaite.

Maastossa tehtävillä tutkimuksille edellytyksenä on hyvät olosuhteet. Lämpötilan on oltava selvästi plussan puolella. Pääsy rakenteiden lähelle skannausta varten edellyttää usein siltakurkiauton käyttöä. Koska ankkurialueiden tutkiminen on tärkeintä, tulisi se ottaa huomioon jo suunnittelussa. Erityisesti ankkureiden päälle tehdyn jälkivalun kunnon tutkiminen on lähes mahdotonta, koska se on usein muiden rakenneosien takana. Tämä tulisi ottaa jatkossa huomioon suunniteltaessa uusia jännitettyjä siltoja. Kuvassa 16 on esitetty malliratkaisu tätä ajatellen (19, s. 80).



KUVA 16. Jännitetyn sillan ankkurialueen suunnittelu (19)

## 6.2 Henkilöhaastattelu, asiantuntijan arvio, tekniikan lisensiaatti Torsten Lunabba

Tekniikan lisensiaatti Torsten Lunabba työskentelee Destia Oy:n vaativissa silta-suunnittelu-, siltojenkorjaussuunnittelu tehtävissä ja näihin liittyvissä kehitysprojekteissa. Hänellä on pitkä kokemus näistä tehtävistä Destia Oy:ssä ja sitä edeltäneissä Tielaitoksessa ja TVH:ssa. Hän on ollut mukana myös lukuisissa kansainvälisissä siltasuunnitteluprojekteissa. Tämä haastattelu on tehty 23.12.2010 sähköpostin välityksellä. Kysymykset on toimitettu muutamia päiviä aiemmin.

1. Mistä sait tiedon MIRAst ja sen käyttömahdollisuuksista?

*Sain tiedot tanskalaisilta kollegoilteni. Tanskassa 20-30 vuotta sitten huomattu, että injektioinnit ovat olleet puutteelliset useissa silloissa. Vuosien aikana on kokeiltu*

erilaisia menetelmiä jänneiden tutkimiseen. Röntgentutkimukset ovat olleet liian raskaita. Käytännössä tarkastaminen on tehty jänneitä avaamalla ja Ultrasonic Pulse-Echo Flaw Detector laitteella (GERMANN INSTRUMENTS). Tämä laite lähettää ultraääniäallon kohtisuoraan betonipintaa vasten. Heijastumat paljastavat mahdolliset tyhjät tilat jänneissä. Tanskassa on Mira-laite tunnettu sen ensimmäisestä versiosta alkaen. Konsultit eivät kuitenkaan ole ottaneet sitä käyttöön siltojen jänneiden tutkimiseen. Laite on tilaajapuolella koettu liian kalliiksi. Vanhalla ja halvemmalla laitteella on harjaantuneita käyttäjiä ja tilaajat ovat katsoneet, että tilanne on hallinnassa.

2. Tunsitko aikaisemmin ultraääneen perustuvaa rakenteiden NDT-tutkimusta?
  - a. Mitä laitteita?

*Ultrasonic Pulse-Echo Flaw Detector-laite*

- b. Mitä materiaaleja on tutkittu (onko myös betonirakenteita)?

*Tiettävästi kiveä ja terästä.*

3. Miksi jännitetyjen siltojen ankkurialueiden tutkiminen nousi MIRA-tutkimusten kohteeksi ja oliko se mielestäsi oikea valinta?

*Tiehallinnolla on ollut käynnissä laajempi betonitutkimus ja sen osana on haluttu ottaa siltojen jänneitä tarkempaan syyniin. Ennen Mira-laitteen hankintaa tehtiin selvitys jänneiden kunnosta Mälkiän sillassa samalla kun silta purettiin. Näitä tutkimuksia oli tarkoitus jatkaa tavalla tai toisella. Selvitysten perusteella näytti Mira-laite meille kaikkein sopivimmalta. Muut halvemmat laitteet tuntuivat turhalta, koska olisi pitänyt harjoitella kauan ennen kuin työ olisi osattu tehdä oikein. Mira-laitteen tuottama 3-ulotteinen kuva selkeytti työtä merkittävästi.*

4. Ovatko siltojen ankkurialueiden tutkimustulokset vastanneet odotuksiasi?



*Tutkimukset vastasivat odotuksia. Laitteella voitiin osoittaa epäilyttävät kohdat. Toisaalta puutteita ei jänteissä ollut niin paljon kuin olisi voinut pelätä. Suurimmas-  
sa osassa siltoja asiat ovat jokseenkin kunnossa.*

5. Miten mielestäsi tutkimuksia tulisi kehittää?

a. Pitäisikö rinnalla käyttää muita menetelmiä, mitä?

*Kyllä, kosteus seuranta jänteiden ankkurialueiden ympärillä varsinkin siellä missä on liikuntasaumalaite.*

b. Riittääkö ankkurialueiden tutkiminen vai olisiko muita "kriittisiä" alueita, joita tulisi tutkia näissä kohteissa?

*Jänneprofiilien alimmat kohdat varsinkin jos havaitaan vuotoja, ylimmät kohdat mikäli niissä voi olla kohtia mihin injektointin aikana on voinut syntyä ilmapusseja.*

c. Kuinka laajasti ja millä kriteereillä jatkossa tulisi mielestäsi valita vastaavat tutkimuskohteet?

*Erikoistarkastusten yhteydessä aina ankkurialueet ja vuotoalueet Mira-laitteella niin laajasti kuin on mahdollista, aukaisut vain harkinnan mukaan, aina kuitenkin vähintään 2 kpl.*

d. Soveltuuko MIRA-tutkimus myös muun tyyppisiin siltarakenteisiin ja vaurioihin?

*Rakenteellisesti kriittiset työsaumat, liittopalkin ja kansilaatan välinen sauma sekä betonin alapinta teräspalkin vierestä poikkirakenteiden kohdalla, missä laatta pyrkii repeytymään irti palkista, verhousten ja paikkavalujen työsauman halkeamattomuus.*

6. Uudet sillat, soveltuuko MIRA laadunvalvontaa ja missä tapauksissa sitä kannattaisi käyttää?

*Injektioinnin laadunvalvonta ja kohdan 5 asiat takuuajan lopussa.*

7. Tunnetko muita NDT-laitteita, jotka soveltuvat ja joita käytetään siltojen betonirakenteiden tutkimiseen?

*Chalmersin Teknillisessä korkeakoulussa on kehitteillä laite, jolla on tarkoitus tutkia asfalttia. Ilmeisesti myös pintarakenteet voisivat tulla kysymykseen. En tiedä miten pitkällä kehitystyö on.*

8. Mitä mieltä olet yleensä NDT-menetelmien käytöstä siltojen kuntotutkimuksissa (erikoistarkastuksissa)?

*Soveltuvat erittäin hyvin. Näytteidenotot voidaan kohdistaa oikein vaikkakin vähentämiseen ei liene mahdollisuuksia, koska tilaaja ei ole koskaan raskinut tilata niitä riittävästi.*

9. Miten mielestäsi tulisi jatkossa ohjeistaa siltojen kuntotutkimusta suhteessa NDT-menetelmiin?

*Määrätä pakolliseksi.*

10. Soveltuuko MIRA muiden kuin siltojen tutkimiseen, jos mielestäsi soveltuu, mihin erityisesti?

*Mahdollisesti kallion eheyden tutkimiseen, ruiskubetonin tartunnan varmistamiseen.*

### **6.3 Tulevaisuuden mahdollisuudet**

Betonirakenteiden tutkiminen NDT-laitteita käyttämällä yleistyy tulevaisuudessa. Nämä laitteet ovat kehittyneet viime aikoina merkittävästi ja niiden saatavuus on parantunut. Toisaalta teräsbetoni- ja jännitettyjä betonirakenteita käytetään edelleen paljon uudisrakentamisessa: talonrakentamisessa, silloissa ja teollisuudessa. Tämä mahdollistaa esimerkiksi MIRAn käyttämisen uudisrakentamisen laadunvalvonnassa.

Sellaisia rakennuskohteita, joihin MIRAn käyttö soveltuu erityisen hyvin, ovat massiivisia betonirakenteita sisältävät teollisuus- ja voimalaitosrakenteet, joissa rakenteen eheydellä on merkittävä vaikutus turvallisuuteen. Suomessa ollaan suunnittelemassa uusia suuria voimalaitoksia, jotka käyttävät ydinpolttoainetta. MIRA:n käyttöä näihin laitoksiin liittyvien betonirakenteiden tutkimiseen tullaan markkinoimaan laitoksia toteuttaville tilaajille ja rakennusliikkeille.

## LÄHTEET

1. Ultraääni. 2011.  
Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Ultra%C3%A4%C3%A4ni>. Hakupäivä 7.3.2011.
2. Betonijulkisivun kuntotutkimus by 42. 1997. Suomen Betoniyhdistys.
3. Polarisaatio. 2011. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Polarisaatio>. Hakupäivä 12.3.2011.
4. Lehto, Heikki – Luoma, Tapani 1996. Fysiikka 4 Sähkö ja Sähkömagnetismi. Tammi.
5. Carino Nicholas J. 2011. Workshop on Stress-Weave Methods for Evaluation for Concrete Structures, 16-17.2.2011, Kööpenhamina.
6. Siltojen korjausohjeet. 2007. SILKO 1.201. Tiehallinto.
7. Siltarekisteri, Tiehallinto. Tieto on haettu 1.10.2009.
8. Betonirakenneohjeet, Tiehallinto 2006.
9. Catalog NDT 2010, Germann Instruments A/S.
10. Michaux Christophe–Grill Michel, NDT 3D tomographic testing cases on concrete and national heritage buildings. 2009. Saatavissa: <http://www.google.com/> -> NDT 3D tomographic testing cases on concrete and national heritage buildings. Hakupäivä 30.12.2010.

11. Lunabba, Torsten. 2010. Jännitettyjen siltojen vauriot. Yhteenvetoraportti. Destia Oy.
12. Practical Considerations of Inspecting Post-tensioned bridges. 2000. PIARC Committee on Road bridges. Saatavissa: <http://www.google.com/> -> Practical Considerations of Inspecting Post-tensioned bridges 2000. Hakupäivä 30.12.2010.
13. Nürnberger, Ulf 2002. Corrosion induced failures of prestressing Steel. Saatavissa: <http://www.google.com/> -> Corrosion induced failures of prestressing Steel. Hakupäivä 30.12.2010.
14. Raudoitteiden korroosioasteen määrittäminen. 2003. Tiehallinnon selvityksiä 48/2003, Liite 2.
15. Tensile Test Results of Post Tensioning Cables From the Midbay bridge. 2000. Florida Department of Transportation Structures Research Center. Saatavissa: <http://www.google.com/> -> Tensile Test Results of Post Tensioning Cables From the Midbay bridge. Hakupäivä 29.12.2010.
16. Eurokoodin sovellusohje, Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - NCCI<sub>1</sub>. 2010. Liikennevirasto.
17. Korroosion ainetta rikkomattomat tutkimusmenetelmät. 2006. VTT.
18. Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures ACI 228.2R-98. 1998. Reported by ACI Committee 228. Saatavissa: <http://www.google.com/> -> Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures ACI 228.2R-98. Hakupäivä 29.12.2010.

19. Feast, Dick. Effective Inspection and Monitoring of Post-tensioned Structures and a Review of Preventative Maintenance Issues. Saatavissa: <http://www.google.com/> -> Effective Inspection and Monitoring of Post-tensioned Structures and a Review of Preventative Maintenance Issues. Hakupäivä 29.12.2010.

## Lieviön risteyssilta, Lohja

Helsinki-Turku valtatie 1-10-1009

Laskelma jänneterästen mahdollisten vaurioiden vaikutuksista

### LASKELMAT

Jännitetty betoninen jatkuva kotelopalkkisilta (Jbjkp)

Jm 23,88 + 33,78 + 24,00 m

HI 12,25 m

Vinous 0 gon

Kuormitus AI + teli

Laati:

Ylivieska, 12.3.2011

Ins. Tuomo Koskela

Tarkasti:

Espoo, 14.3.2011

DI Seppo Kokko

## SISÄLLYSLUETTELO

Laskelmaselostus	3	
A	Kohdetta koskevat tiedot	
1.	Siltapaikka	4
2.	Silta	4
3.	Mitoitusperusteet	4
	3.1 Normit ja ohjeet	
	3.2 Rakennelaskelmien oletukset	
4.	Laskentamalli	6
C	Päällysrakenne	
5.	Mallit, kolme vaihtoehtoa	7
	5.1 Kaikki jänneteräkset toimivat	
	5.2 1/3 jänneteräksistä murtunut	
	5.3 2/3 jänneteräksistä murtunut	



## LIEVIÖN RISTEYSSILTA, LASKELMASELOSTUS

Lieviön risteyssilta sijaitsee Lohjan kaupungissa, Helsinki-Turku valtatiellä 1 (E18), jossa se ylittää rampin valtatielle 1 (Helsingin suuntaan). Tie on sillan kohdalla moottoritie ja nopeusrajoitus on 120 km/h. Sillan suunnittelukuorma on AI + teli ja kantavuusluokka 5.

Silta on tyyppiltään jännitetty betoninen jatkuva kotelopalkkisilta (JBjkp) ja se on valmistunut liikenteelle vuonna 1971. Suunnitelma on laadittu Orrje & Co Siltaosastolla 1966.

Tässä laskelmassa on käytetty Eurokoodin mukaisia kuormia (Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet NCCI1). Sillan rakenteiden mitoitus on tehty mallintamalla kotelopalkki kuormineen 3D ohjelman laskentamallilla (Lusas Bridge) ja tarkistamalla rakenteen taivutuskestävyyttä saatujen rasiitusten pohjalta. Tässä on tarkasteltu vain taivutusta, leikkausta tai vääntöä ei ole huomioitu (kuormat ovat keskeisesti palkilla). Laskelmissa on tarkistettu kolme eri tapausta: 1. palkin kaikki jänneteräkset toimivat, 2. 1/3 jänneteräksistä on murtunut ja 3. 2/3 jänneteräksistä on murtunut. Murtuneiden jänneterästen osalta on oletettu, että ne ovat olleet injektoimattomassa suojaputkessa eli jännitys on poistunut murtumassa koko tarkasteltavan jänteen osalta.

### KUORMAT

- betonin omapaino  $\gamma = 25 \text{ kN/m}^2$
- jännevoima  $P (t=0) \sim 20700 \text{ kN}$
- pintarakenteet  $\gamma = 25 \text{ kN/m}^2$
- liikennekuorma; kuormakaavio LM<sub>1</sub>

## A. KOHDETTAKOSKEVAT TIEDOT

## 1. SILTAPAIKKA

Silta on kaareva ja sen pituuskaltevuus nousee Turkuun päin ( $i \sim 0,02$ ). Kansilaa-  
talla on kaksipuolinen kaltevuus, ajoradalla  $\sim 0,03\%$  ja oikealla pientareella  
 $\sim 0,043\%$ .

Liikennemäärä sillan kohdalla on 9 782 ajoneuvoa/vrk, joista raskaan liikenteen  
osuus 6,8% (laskettu v. 2008).

## 2. SILTA

## Siltatyyppi

Silta on jännitetty betoninen jatkuva kotelopalkkisilta.

## 3. MITOITUSPERUSTEET

## 3.1 Normit ja ohjeet

Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI<sub>1</sub>  
Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI<sub>2</sub>

## 3.2 Rasitusluokat

Silta sijaitsee tiellä, jota suolataan, rasitusluokka R2

Kotelopalkki

Ro22 R2 C40/50-3

## 3.3 Rakennusaineet

		fctk,0,05=	2,456
Betoni C40/50-3		Ecm=	35220
fck=	40	Ep=	199000
fcm=	48	ecs=	0,238
fctm=	3,51	fo=	1,82
fcd=	25,19	REL %	2,5

Betoniteräs

A400H-1

fyk

400 N/mm<sup>2</sup>

fyd

363 N/mm<sup>2</sup>

Jänneteräs

st 160/180

### 3.4 Rakennelaskelmien oletukset

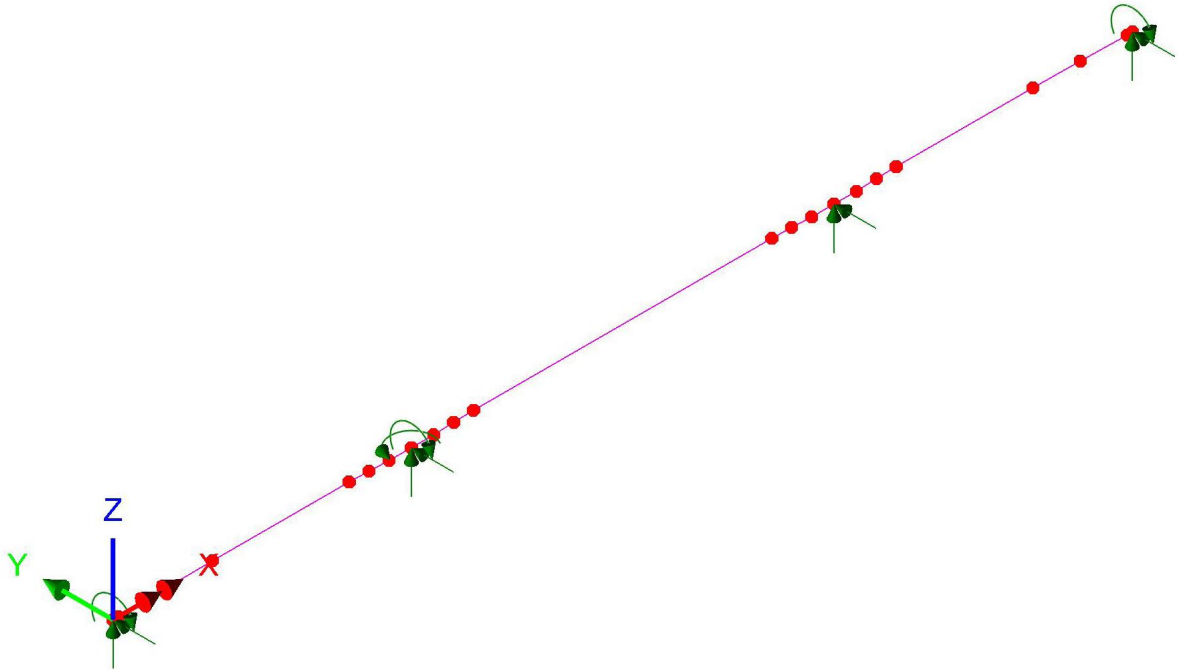
Sillan voimasuureet lasketaan LUSAS 3D-mallilla (FEM). Kuormitustapausten yhdistely tehdään LUSAS ohjelmalla, jolloin tuloksena saadaan mitoitusmomentit  $M_{x_{\max}}$  ja  $M_{x_{\min}}$ .

Kaikkien kuormien on oletettu vaikuttavan keskeisesti. Pysyvänä kuormana on pintarakenteiden paino. Jännevoima on arvioitu alkuperäisten suunnitelmien perusteella.

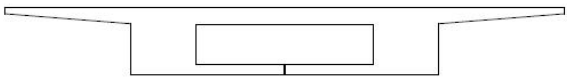
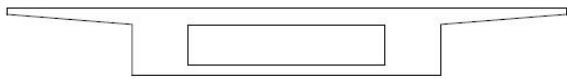
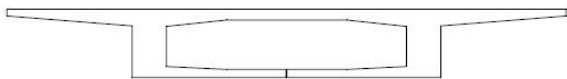
Murtuneiksi oletetuissa jänteissä oletuksena on, että ne ovat olleet injektoimattomissa suojaputkissa.

4. LASKENTAMALLI

Lievion risteysilta, Lohja  
Lusas laskentamalli



Poikkileikkaukset: kenttä, päätytuen vieressä, välituen vieressä ja tuen kohdalla



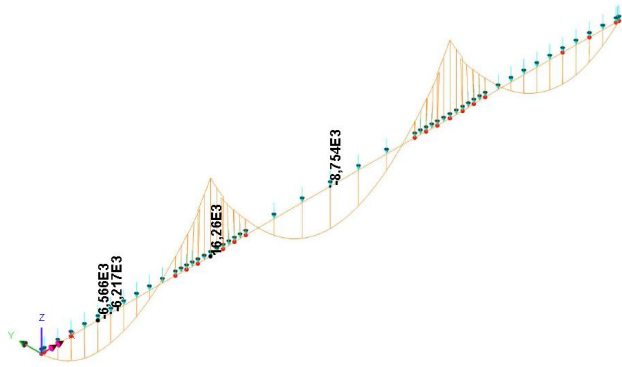
## B PÄÄLLYSRAKENNE

## 6. MALLIT, KOLME VAIHTOEHTOA

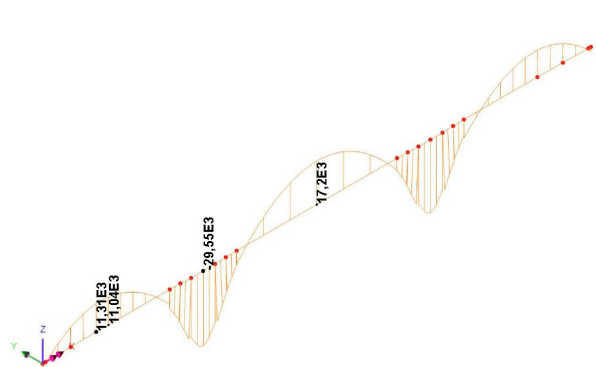
Tässä on tarkasteltu vain kriittiset poikkileikkaukset.

Kuvassa alla on Lusas -mallista saadut rasitukset murtotilassa.

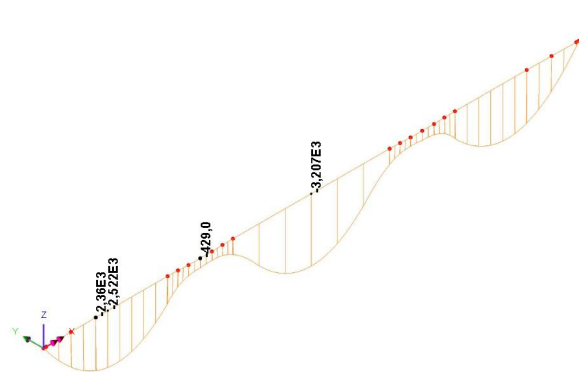
Omapaino



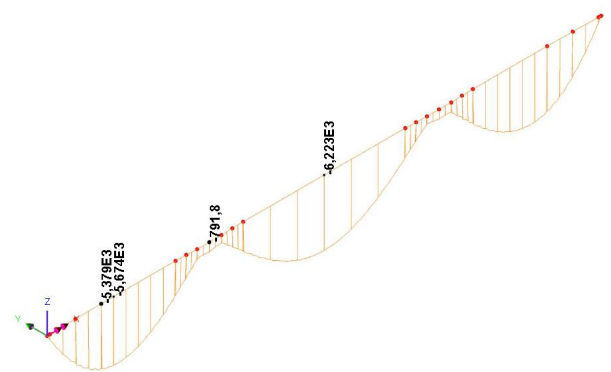
Jännittäminen



Tasan jakaantunut kuorma



Maksimi akselikuorma



## 6.1 KAIKKI JÄNNETERÄKSET TOIMIVAT

1-aukko, keskikohta

**HALKEAMALEVEYS TAVALLINEN YHDISTELY**

Lieviön SILTA

Maksimimomentit

Positiivinen momentti 0  
 Piste 1 kenttä  
 Mmit= 15,914399  
 Nmit= 17,895995

ctrue=	68	Es=	200000
cmin,dur=	40	Ecm=	35220
c=	56	fctm=	3,51

## POIKKILEIKKAUS

b= 1,600  
 h= 1,600  
 d= 1,482  
 b'= 12,25  
 H'= 0,3  
 Ap= 18152

X= -0,077  
 d(s+p)= 1,367  
 sc= -1,305  
 ss= -149,131  
 sp= 853,883

As=	10073	As leveys	7,200	rp,eff	0,0047
ep-es=	0,179			Sr,max	728,109
Es/Ecm=	5,679			k1=	0,800
teras	15	K	126	k2=	0,500
c=	56	kpl	57,00	kt=	0,600
As'=	0			wk=	-0,326
d'=	0			wk sall	0,280
Minimiteräs (9,1)	19469				

**MURTOTILA**

<b>Md=</b>	<b>22,896164</b>	fpd=	1418
Nd=	19,024822	fyd=	454
		fcd=	25,19

**POIKKILEIKKAUS**

b=	11,080
d=	1,482
b'=	0
H'=	0
Ap=	18152
As=	10073
ep-es=	0,179
As'=	0
d'=	0
y>H'	
y=	0,3073787
JAN.TER.VEN=	13,744189
TER.VEN=	9,9999614
<b>Mu=</b>	<b>35,657115</b>

→ Rakenteen kapasiteetti on OK!

**6.2 1/3 JÄNNETERÄKSISTÄ ON MURTUNUT**

1-aukko, keskikohta

**HALKEAMALEVEYS TAVALLINEN YHDISTELY**

Lieviön SILTA

Maksimimomentit

Positiivinen momentti 0

Piste	1 kenttä
Mmit=	15,090357
Nmit=	12,135699

ctrue=	68	Es=	200000
cmin,dur=	40	Ecm=	35220
c=	56	fctm=	3,51

**POIKKILEIKKAUS**

b=	1,600	X=	0,514
h=	1,600	d(s+p)=	1,384
d=	1,482		
b'=	12,25	sc=	-4,334
H'=	0,3	ss=	46,362

Ap=	12102			sp=	1040,580
As=	10073	As leveys	7,200	rp,eff	0,0047
ep-es=	0,179			Sr,max	728,109
Es/Ecm=	5,679			k1=	0,800
teras	15	K	126	k2=	0,500
c=	56	kpl	57,00	kt=	0,600
As'=	0			wk=	0,169
d'=	0			wk sall	0,280
Minimiteräs (9,1)	19469				

**MURTOTILA**

<b>Md=</b>	<b>21,989718</b>	fpd=	1418
Nd=	12,888289	fyd=	454
		fcd=	25,19

**POIKKILEIKKAUS**

b=	11,080
d=	1,482
b'=	0
H'=	0
Ap=	12101,938
As=	10073
ep-es=	0,179
As'=	0
d'=	0
y>H'	
y=	0,3073787
JAN.TER.VEN=	13,830821
TER.VEN=	9,9999614
<b>Mu=</b>	<b>25,797193</b>

→ Rakenteen kapasiteetti riittää vielä (~80 % käytössä)

**6.3 2/3 JÄNNETERÄKSISTÄ ON MURTUNUT**

1-aukko, keskikohta

**HALKEAMALEVEYS TAVALLINEN YHDISTELY**

Lieviön SILTA

Maksimimomentit

Positiivinen momentti

Piste	1 kenttä
Mmit=	14,236875
Nmit=	6,174555

ctrue=	68	Es=	200000
cmin,dur=	40	Ecm=	35220
c=	56	fctm=	3,51

**POIKKILEIKKAUS**

		X=	0,205
b=	1,600	d(s+p)=	1,415
h=	1,600		
d=	1,482		

b'=	12,25			sc=	-10,203
H'=	0,3			ss=	361,459
Ap=	6051			sp=	1331,288
As=	10073	As leveys	7,200	rp,eff	0,0047
ep-es=	0,179			Sr,max	728,109
Es/Ecm=	5,679			k1=	0,800
teras	15	K	126	k2=	0,500
c=	56	kpl	57,00	kt=	0,600
As' =	0			wk=	1,316
d' =	0			wk sall	0,280
Minimiteräs (9,1)	19469				

**MURTOTILA**

<b>Md=</b>	<b>21,050888</b>	fpd=	1418
Nd=	6,5508271	fyd=	454
		fcd=	25,19

**POIKKILEIKKAUS**

b=	11,080
d=	1,482
b' =	0
H' =	0
Ap=	6050,6062
As=	10073
ep-es=	0,179
As' =	0
d' =	0
y>H'	
y=	0,3073787
JAN.TER.VEN=	13,921568
TER.VEN=	9,9999614
<b>Mu=</b>	<b>15,935201</b>

→ Rakenteen kapasiteetti ei riitä (murto)

Yhteenvedona tuloksesta voidaan todeta, että sillassa on alkuperäisessä tilanteessa selvästi ylikapasiteettiä taivutukselle. Ennen rajatilamitoitukseen siirtymistä 70-luvulla jännitetyt sillat suunniteltiin yleensä niin, että betonissa ei esiintynyt lainkaan vetojännityksiä käyttötilan kuormilla. Tästä johtuen rakenteessa oleva normaali betoniteräs on tavallaan reservinä.



# JÄNNITETTYJEN SILTOJEN VAURIOT: TUTKIMINEN MIRA -tomografilla



MIRA –  
ULTRAÄÄNI 3D  
TOMOGRAFI

# MIRA

- MIRA-TOMOGRAFI ON MATALATAAJUISTA ULTRAÄÄNTÄ (~50 kHz) KÄYTTÄVÄ NDT-MITTAUSLAITE BETONIRAKENTEIDEN TUTKIMISEEN
- SE ON KEHITETTY SAKSASSA BAM:SSA. KAUPALLISEEN KÄYTTÖÖN SEN ON VALMISTANUT GERMANN INSTRUMENTS A/S TANSKASTA
- LAITE ON HANKITTU KÄYTTÖÖMME VUONNA 2009
- SE ON TÄLLÄ HETKELLÄ AINUT KAPPALE SUOMESSA



## TUTKIMUKSET TEHTIIN 2008-2010

**TEKIJÄT:** DESTIA OY, T. LUNABBA;  
RAMBOLL FINLAND OY, G. RAPAPORT JA T. KOSKELA

### TEHTÄVÄ

- INJEKTOINNIN ONNISTUMISEN SELVITTÄMINEN JÄNNITETTYJEN SILTOJEN ANKKURIALUEILLA
- TUTKITTIIN 10 SILTAKOHDETTA, NIITÄ OLI ENTISTEN UUDENMAAN PIIRIN, HÄMEEN PIIRIN JA KESKI-SUOMEN PIIRIN ALUEILLA
- MAASTOTYÖT TEHTIIN 2009 KESÄLLÄ – SYKSYLLÄ, RAPORTIT 2010/03 MENNESSÄ TILAAJILLE
- KOHTEIDEN VALINNASSA KRITEREINÄ OLIVAT MM:
  - VUOTAVA LIIKUNTA SAUMALAITE
  - ERI IKÄISIÄ KOHTEITA
  - HALKEILUA ANKKURIALUEILLA (KLORIDIT)



## MIKSI TEHTIIN, ONGELMAT?

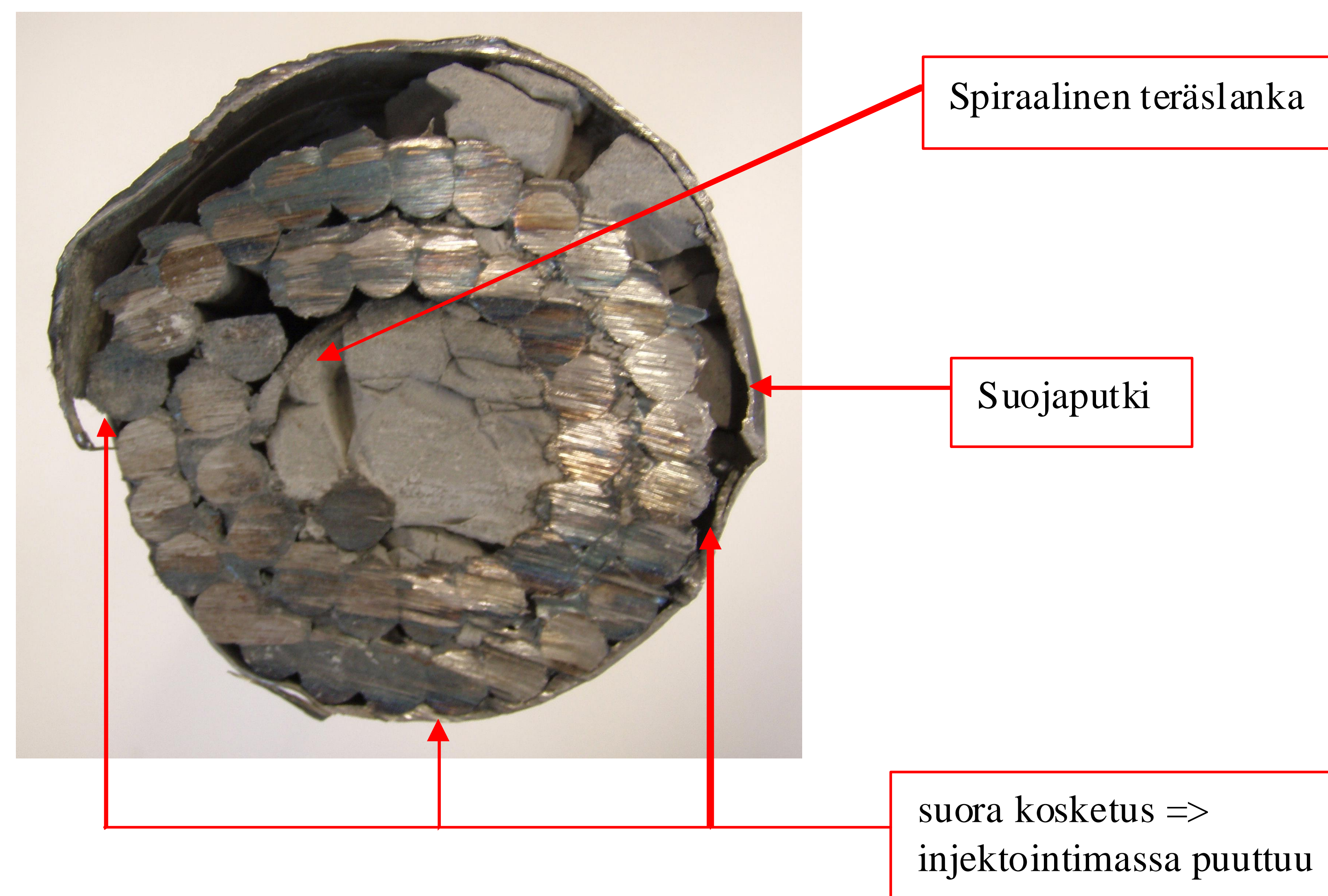
- ULKOMAILLA TEHDYISSÄ TUTKIMUKSISSA OLI TODETTU VAKAVIA VAURIOITA JÄNNERAUDOITTEISSA (INJEKTOINNIN EPÄONNISTUMINEN)
- VUOTAVAT LIKUNTASAUMALAITTEET MAHDOLLISTAVAT KLOORIDIEN PÄÄSYN ANKKURIALUEELLE, LISÄKSI JÄLKIVALUSAUMASSA ON USEIN HALKEILUA (SAVILAHDEN SILTA, MIKKELI, KUVA 1)



KUVA 1. VESIVUOTO SUOJAPUTKEN KOHDALLA KOTELOPALKISSA



- MÄLKIÄN SILLAN PURKAMISEN YHTEYDESSÄ TUTKITTIIN JÄNTEIDEN JA ANKKURIEN KUNTOA JA TUTKIMUKSESSA TODETTIIN MM.:
  - PITUUSSUUNTAISTEN JÄNTEIDEN INJEKTOINTI OLI PAHASTI EPÄONNISTUNUT (KUVA 2)
  - YHDEN ANKKURIN KOHDALLA JÄNNELANGOISSA OLI VAKAVIA RUOSTUMISVAURIOITA (VUOTAVA SAUMALAITE + KLORIDIT, KUVA 3)



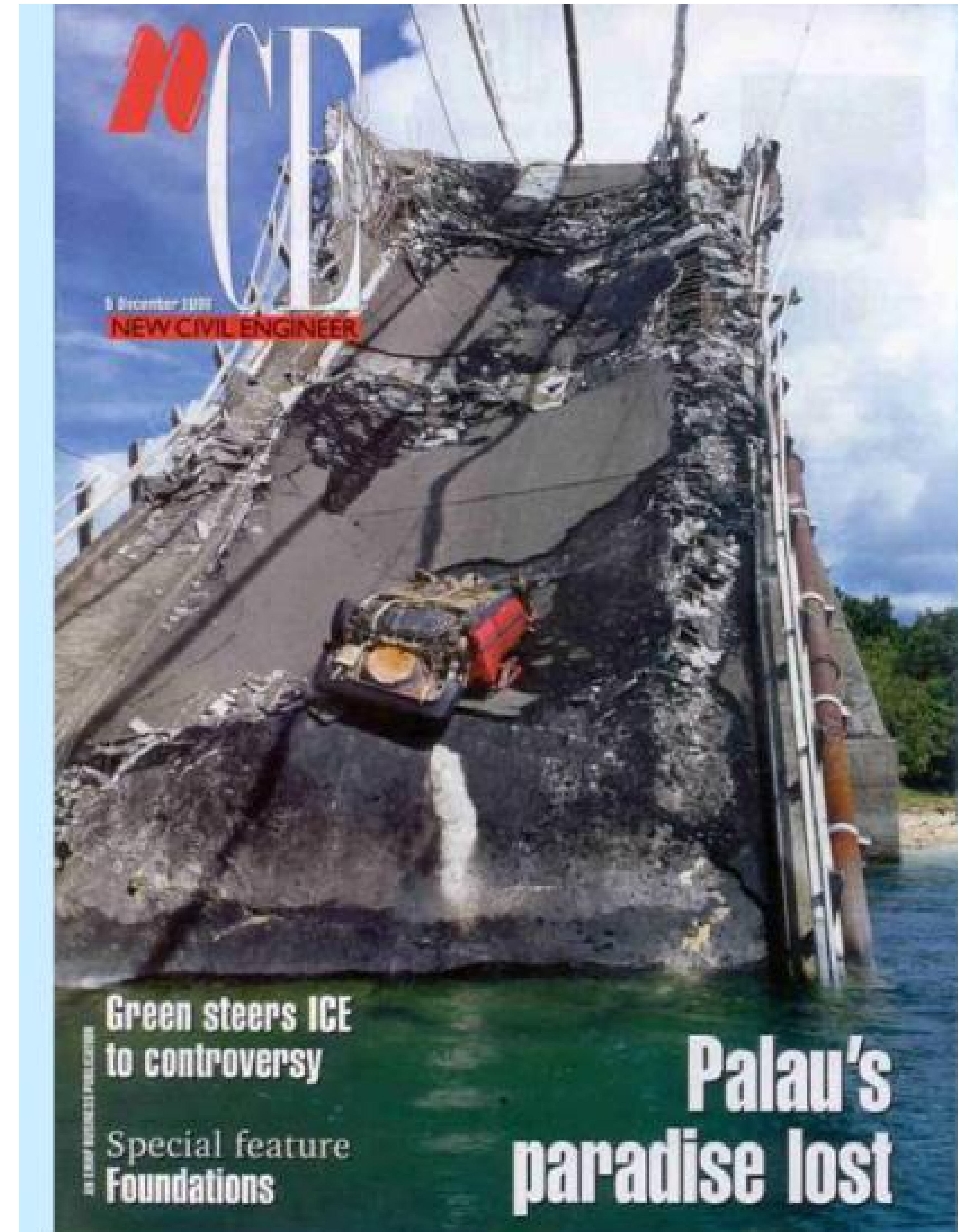
KUVA 2. EPÄONNISTUNUT INJEKTOINTI



KUVA 3. RUOSTUNUT ANKKURI



# "KAUHUKUVIA" VAURIOISTA JA SEURAUKSISTA ULKOMAILTA



KUVAT 4, 5 JA 6 (Effective Inspection and Monitoring of Post-tensioned Structures and a Review of Preventative Maintenance Issues)

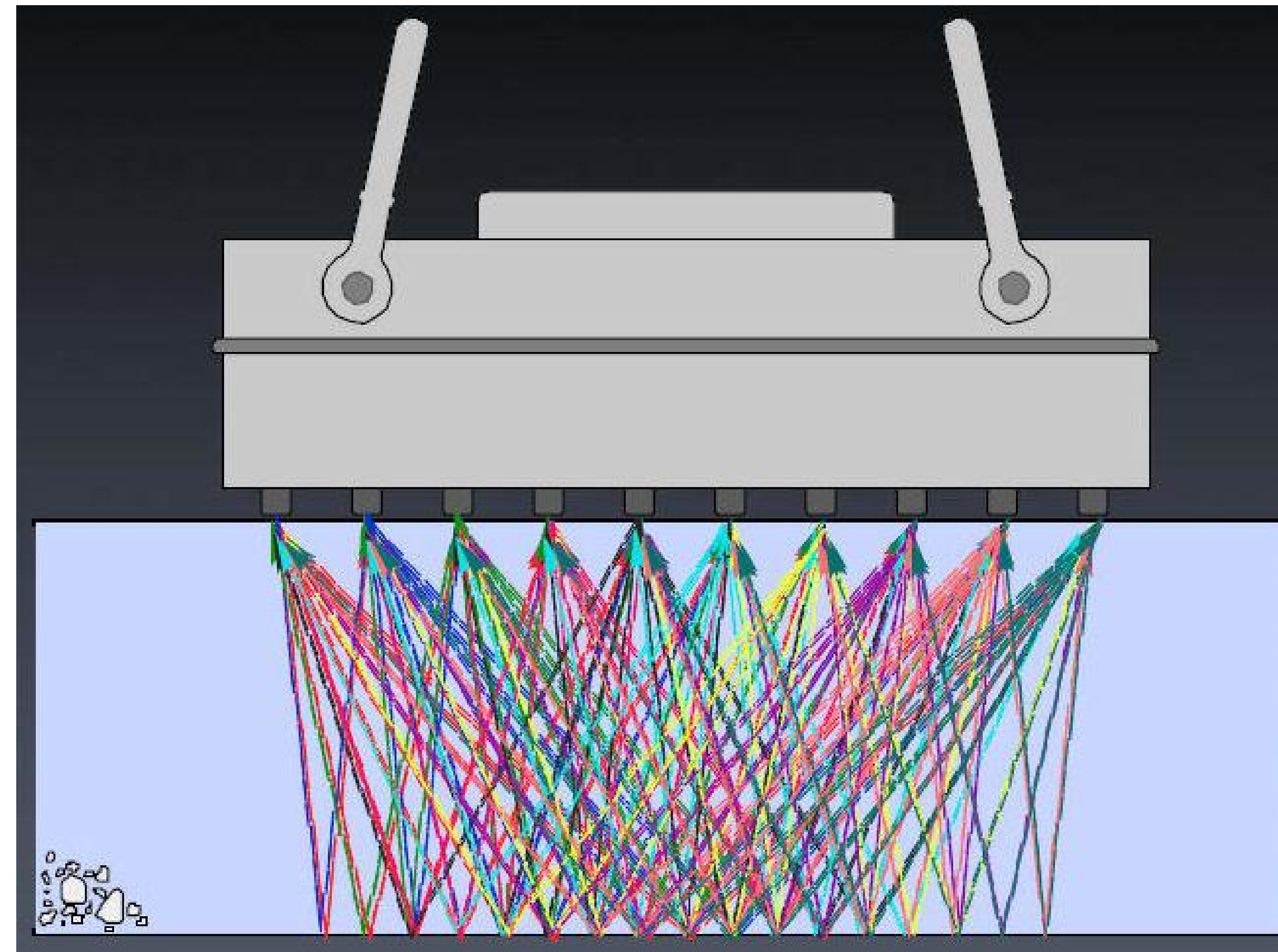


## MIRA –JÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT

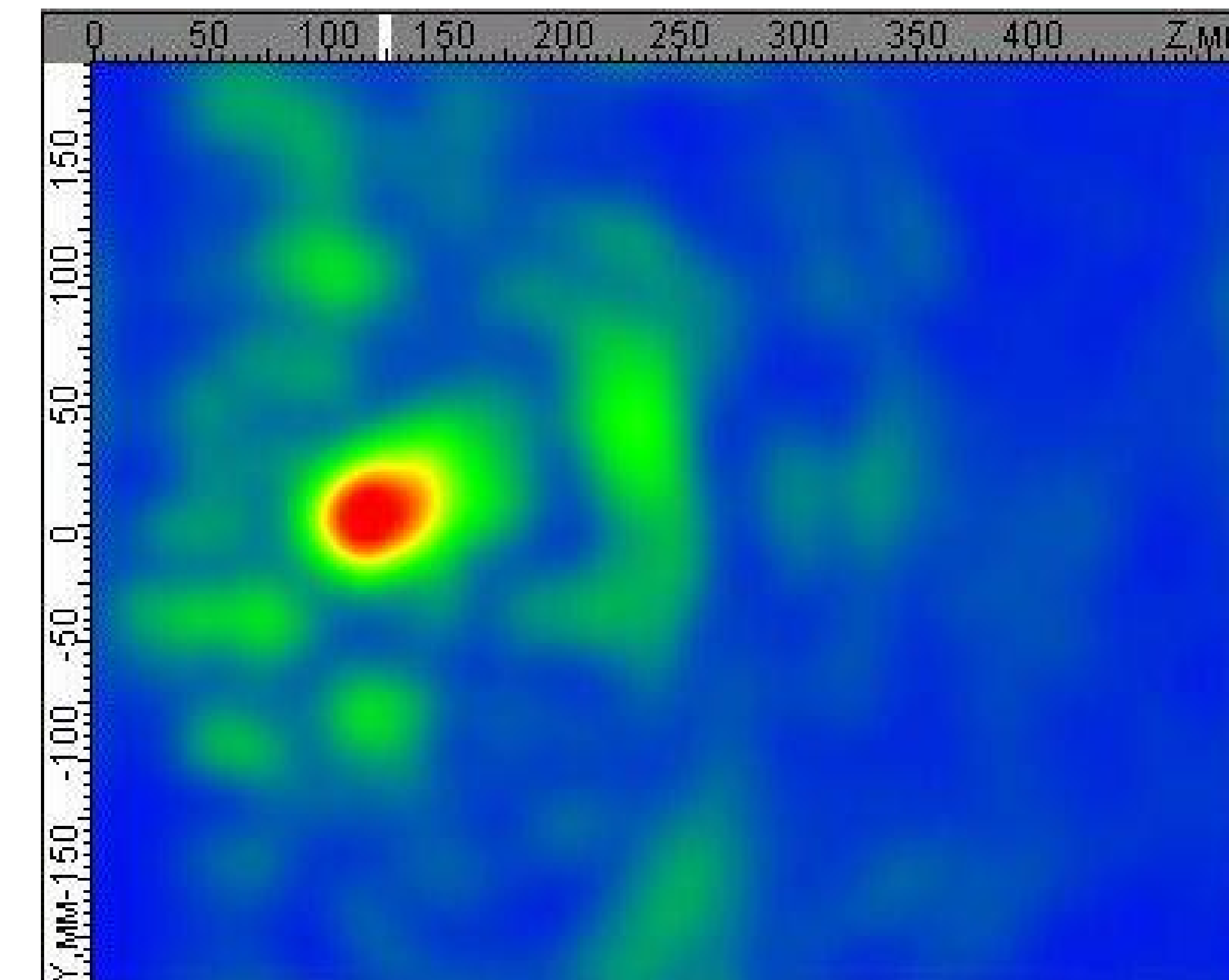
- ANTENNIMATRIISI JOSSA 10 MITTAUSYKSIKÖÄ (4 X 10 MUUTINTA) + LAITTEISTO
- KANNETTAVA TIETOKONE JOSSA MIRA –OHJELMA (SAFT SOFTWARE)
- ANTENNIN VIRTALÄHDE JA LANGATON NETTIYHTEYS



- VAIHEITTAINEN  
ANTENNIMATRIISI



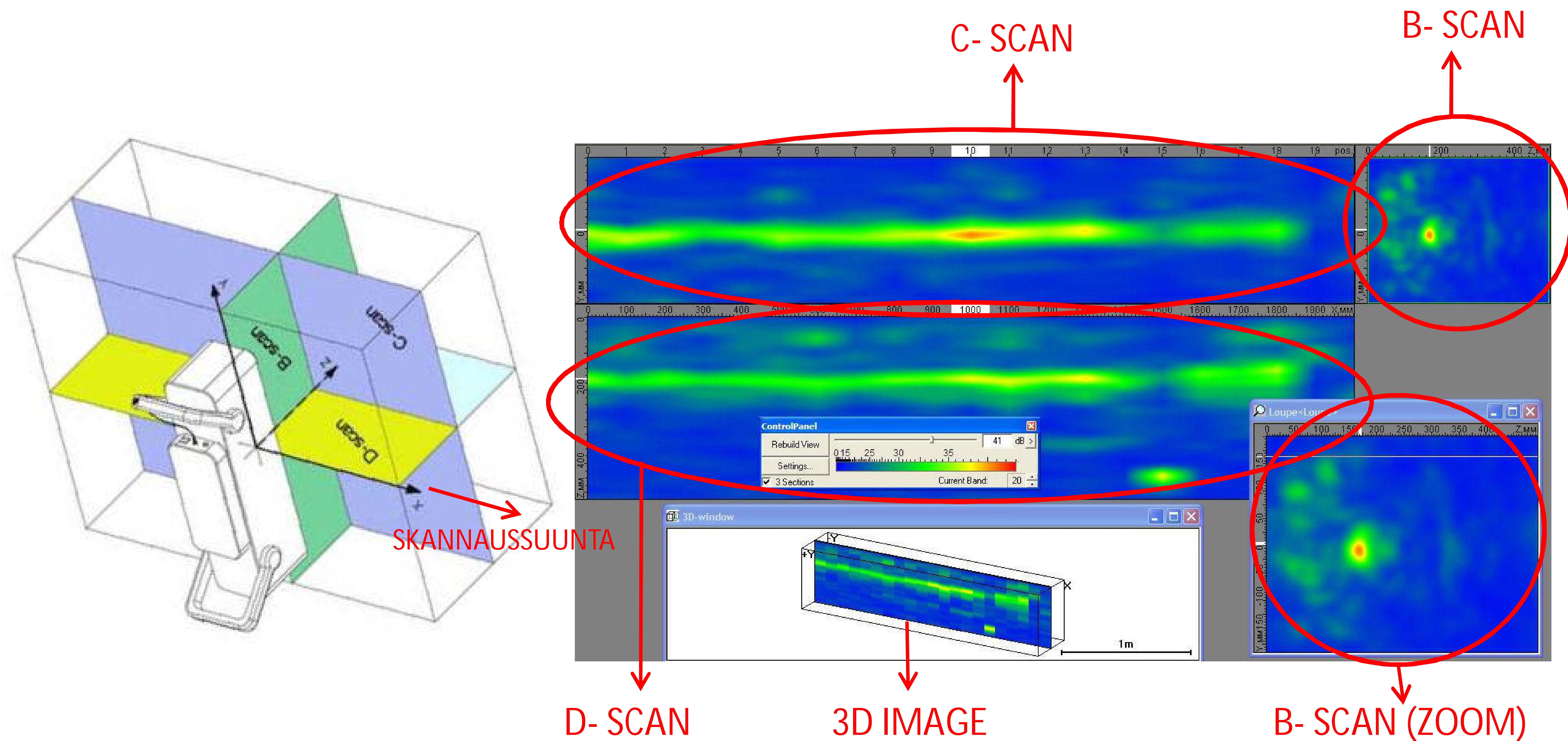
- SAFT – 3D REKONSTRUKTIOALGORYTMI  
SUUREN DATAMÄÄRÄN NOPEA  
ANALYYSI + GRAAFINEN ESITYS





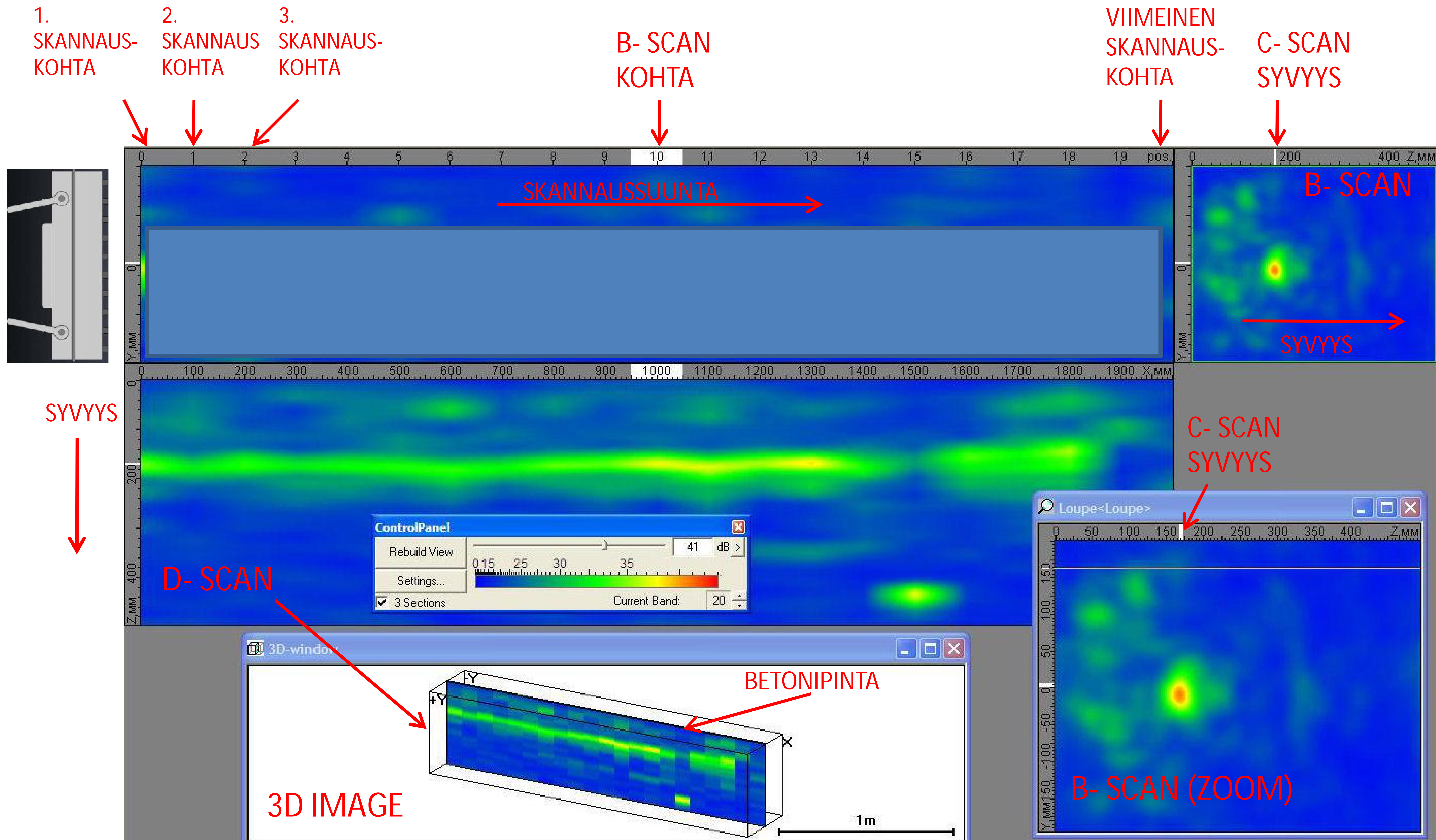
# TOMOGRAFIN DATAESITYS

- SKANNAUS 2D LÄPILEIKKAUKSINA JA 3D KUVINA





# TOMOGRAFIN DATAESITYS, JATKUU



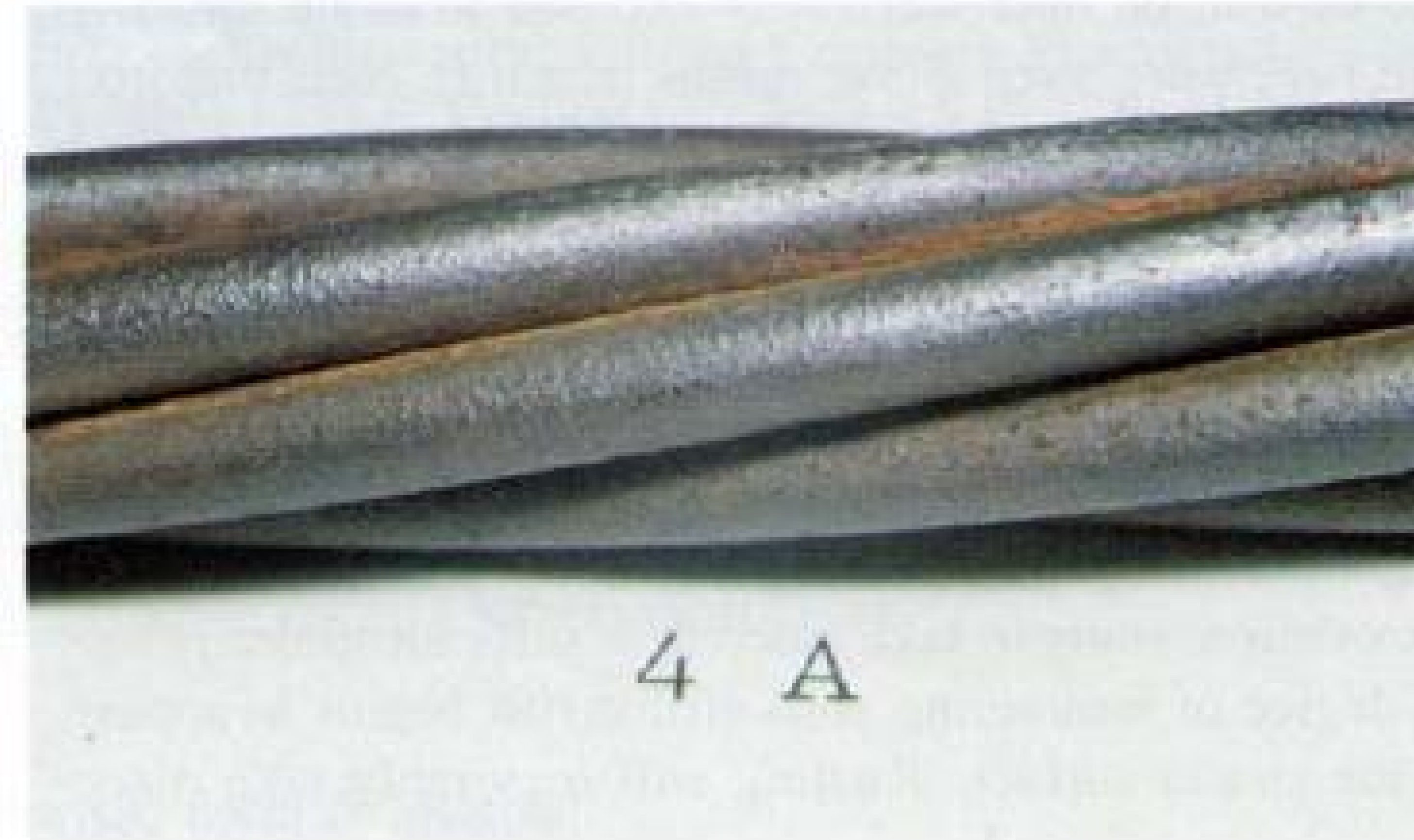
## YHTEENVETO TULOKSISTA

- MIRA –SKANNAUKSIA TEHTIIN YLEENSÄ 2 – 3 JÄNNEKAAPELILLE / SILTAKOHDE
- TULOSTEN PERUSTEELLA RAKENNE AVATTIIN VOIMAKKAIMMAN HEIJASTUKSEN KOHDALTA
- YLEISESTI VOIDAAN TODETA, ETTÄ TUTKIMUKSESSA EI TULLUT ESIIN HÄLYYTTÄVIÄ VAURIOITA, MUTTA JOITAKIN VAKAVIAKIN VAURIOITA LÖYTYI:
  - JÄNNERAUDOITTEET OLIVAT VIRHEETTÖMÄT (KORROOSIOASTE 0) VAIN YHDESSÄ SILLASSA, VIIDESSÄ KORROOSIOASTE OLI 1, KAHDESSA 2 JA KAHDESSA 3. <sup>1)</sup>
  - MUUTAMISSA KOHTEISSA TODETTIIN KORKEITA KLOORIDIPITOISUUKSIA ANKKURIALUEILLA (VUOTAVAT SAUMALAITTEET). TÄMÄ TULISI HUOMIOIDA MYÖS YLEISTARKASTUKSISSA (TARKENNUS SILLANTARKASTUSKÄSIKIRJAAN, VAURIOLUOKKA, KIIREELLISYYSLUOKKA)
  - USEISSA KOHTEISSA OLI VALUVIKOJA VOIMAKKAASTI RAUDOITETUILLA ANKKURIALUEILLA
  - SUOJAPUTKET OLIVAT LIIAN PIENIÄ JÄNNEPUNOSTEN MÄÄRÄÄN NÄHDEN → INJEKTOINTIMASSAKERROKSEN PAKSUUS USEIN VAIN 1 ... 2 MM





Korroosioaste 3A.  
Ennen puhdistusta.



Korroosioaste 3A.  
Puhdistuksen jälkeen.

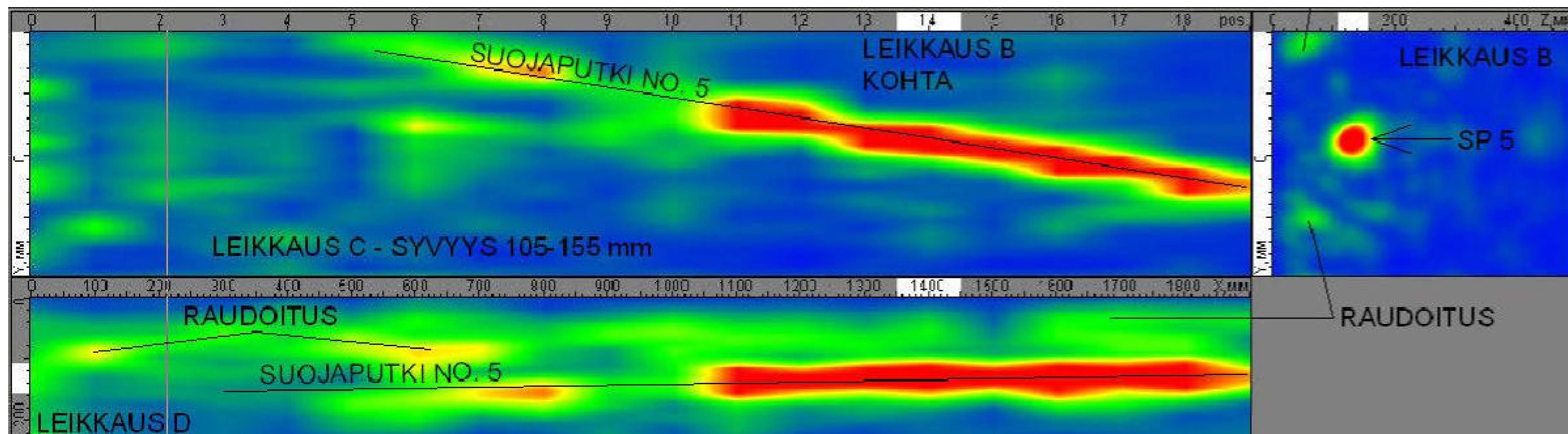
1) KUVA 7. KORROOSIOASTEEN MÄÄRITYS: RAUDOITTEIDEN KORROOSIOASTEEN MÄÄRITYS (TIEH 3200835), ESIMERKKIKUVA

- INJEKTOINTIMASSAN LAADUSSA OLI SUURIA VAIHTELUJA
- YHDESTÄ KOHTEESTA LÖYTYI SUOJAPUTKI, JOSTA INJEKTOINTI PUUTTUI KOKONAAN (KUVAT 8, 9 JA 10), TÄYSIN ONNISTUNEENA INJEKTOINTIA EI VOITU PITÄÄ YHDESSÄKÄÄN KOHTEESSA
  - RAKOJA SUOJAPUTKEN INJEKTOINTILAASTIN VÄLISSÄ
  - SUORA KOSKETUS JÄNNETERÄKSEN JA SUOJAPUTKEN VÄLILLÄ





KUVAT 8 JA 9



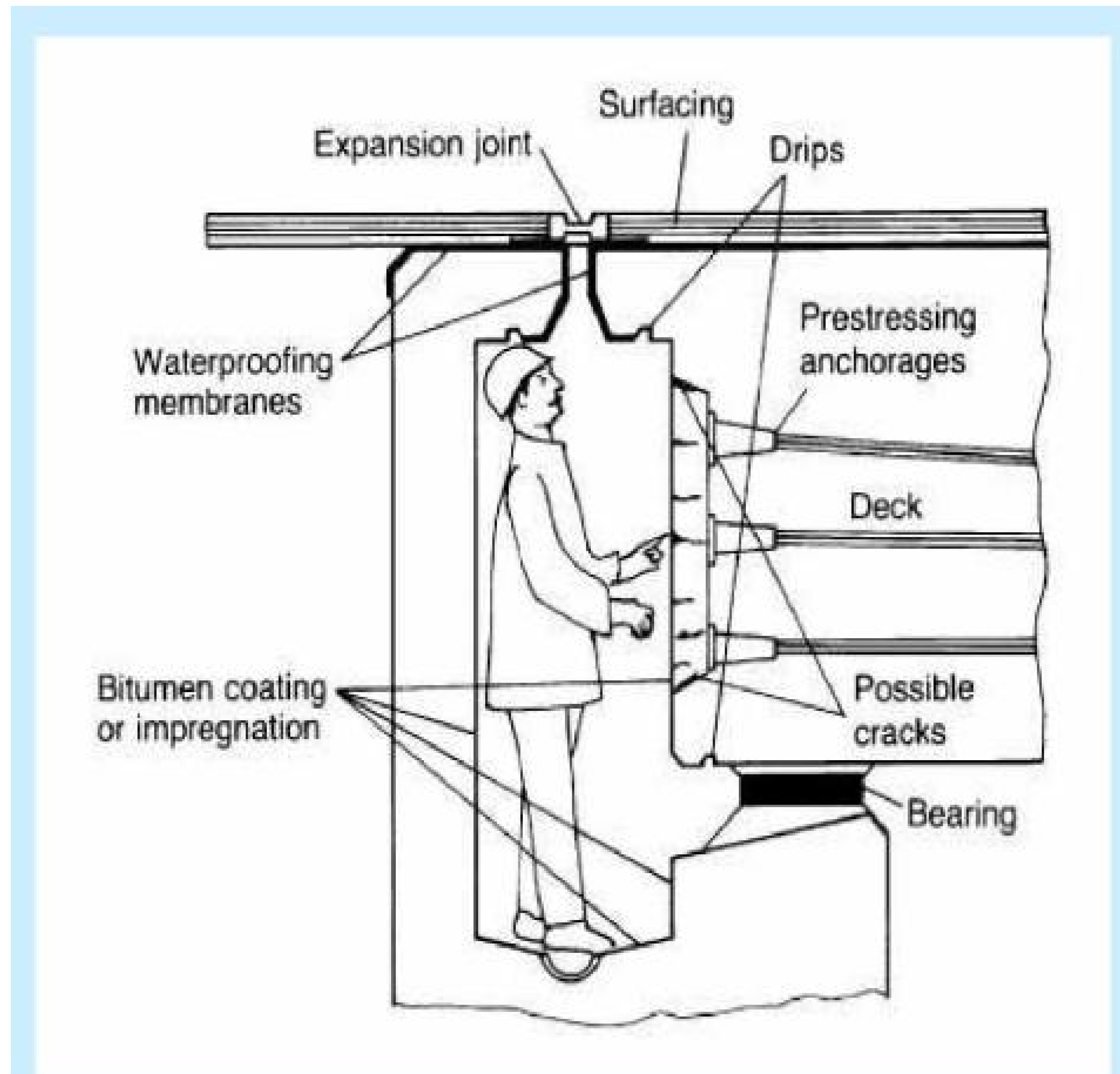
KUVA 10. INJEKTOIMATON SUOJAPUTKI EROTTUU, VOIMAKAS HEIJASTUS



## → MIRA SOVELTUU HYVIN TÄMÄN TYYPPISIIN TUTKIMUKSIIN JA MYÖS UUSIEN RAKENTEIDEN LAADUNVALVONTAAN

- JÄNNETERÄKSET VOIDAAN PAIKANTAA LUOTETTAVASTI
- VOIDAAN "NÄHDÄ" MYÖS SYVEMMÄLLÄ OLEVAT SUOJAPUTKET (TOISTEN SUOJAPUTKIEN TAKANA)
- EDELLYTTÄÄ HYVIÄ TYÖSKENTELYOLOSUHTEITA, SILTAKURKI, LÄMPÖTILA PLUSAN PUOLELLA
- ANKKURIALUEEN TUTKIMINEN SILTAPAIKALLA VIE AIKAA NOIN 1 TYÖPÄIVÄN, 2 HENKILÖÄ
- TULOSTEN TULKINTA ON VAATIVAA

# ANKKURIALUIDEN TUKIMINEN, HUOMIOIMINEN SUUNNITTELUSSA



KUVA 11. TARKASTUSTILA JÄNNEPALKIN PÄÄSSÄ (Effective Inspection and Monitoring of Post-tensioned Structures and a Review of Preventative Maintenance Issues)