

Oförstörande provning av efterspända betongbroar

– Nya metoder för tillståndsbedömning och ökad säkerhet



Figur 1: "Översiktsvy av en efterspänd betongbro (Gisund - Norge). Många nordiska broar från 1960-70-talen är betydelsefulla för regional trafik och närmar sig eller har redan passerat sin dimensionerande livslängd."

Efterspända betongbroar har varit och är avgörande för utvecklingen av transportinfrastrukturen. Tekniken med spännarmering introducerades i stor skala i Norden under 1950-talet och fick sitt verkliga genombrott två decennier senare, när vägnätet byggdes ut och kraven på längre spanns och resurssnålare konstruktioner ökade. Genom att utnyttja betongens tryckhållfasthet och stålets draghållfasthet tillsammans med spänntekniken kan man bygga slanka och effektiva broar som bär stora trafikflöden.

Eugène Freyssinet brukar nämnas som förspänningens portalfigur; hans arbete på 1930-talet ledde till de första kommersiella spännarmerade systemen för betongkonstruktioner. Efter andra världskriget spreds tekniken snabbt i Europa och därefter till USA, där den främst kom att användas i större broar och byggnader. I Norden byggdes de första efter-

spända broarna under 1950-talet, men den stora volymen kom på 1960- och 1970-talen. Måløybron i Vestland fylke och Gisundbron i Tromsø fylke är norska exempel från denna tidsepok. I Sverige kan nämnas bland annat Angredsbron i Göteborgstrakten och broarna på Essingeleden samt Fredhällsbron i Stockholmstrakten. Broarna är fortfarande i drift och är mycket betydelsefulla för transportinfrastrukturen.

Samtidigt präglades perioden av andra material- och utförandestandarder än dagens. Injekteringsbruk som innehöll klorider kunde förekomma, vilket visar

sig accelerera korrosion. Foderrören kring kablarna var ofta tunnare än enligt modern standard. Det gör att broar från tiden före 1980 kan ha inneboende svagheter som först nu, efter ett halvt sekels drift, framträder.

I dag utsätts många av dessa konstruktioner för högre axellaster, tätare trafikflöden och ett tuffare klimat med fler fryscyklar och i vissa fall mer vägsalt. Många broar har också passerat den beräknade tekniska livslängden. Risken för skador i efterspänningssystemet är därmed förhöjd. Problemet är att skadorna ofta utvecklas dolt; kablarna ligger ingjutna i foderrör, och om injekteringsbruket inte fyller foderrören helt kan fukt, syre och även klorider tränga in och initiera korrosion som i sin tur i värsta fall om inget görs kan leda till kabelbrott och i förlängningen minskad bärförmåga – utan att detta initialt visuellt kan noteras.

Historiska haverier understryker behovet av avancerad inspektion. Exempel på spännarmerade broar som kollapsat är Ynys-y-Gwas-bron i Wales, 1985 efter kabelbrott, Melle bron i Belgien, 1992, Hammersmith flyover i England, 2011, Genua-bron i Italien 2018; Carlo bron i Tyskland, 2024, bara för att nämna några. Gemensamt för dessa kollapsar var bristande underhåll och korrosion i spännsystemen ofta orsakade av klorider, men inte alltid. Även frånvaron av lämpliga undersökningsmetoder lyfts upp som en sekundär orsak vilket lett till undermåliga eller till och med felaktiga slutsatser när det gäller fortlöpande underhåll.

Tillståndsbedömning med oförstörande provning

Eftersom skador hos efterspända system är svåra att upptäcka i tidiga skeden är det väsentligt att det finns trovärdiga, förhållandevis enkla och kostnadseffektiva system för tillståndsbedömning. Det måste också finnas kunniga personer som kan genomföra dessa typer av undersökningar. Det räcker inte med att enbart kunna hantera utrustning och teknik, man måste



Björn Täljsten
Professor, Tekn. Dr., Invator AB/
Luleå tekniska universitet



Cosmin Popescu
Tekn. Dr., Invator AB/Sintef AS



Mats Holmqvist
Byggingenjör, Invator AB

också förstå nedbrytningsmekanismer hos betong samt hur betongkonstruktioner uppför sig konstruktivt. Att dessutom sätta detta i ett livslängdsperspektiv är också en fördel.

I Norge har Statens Vegvesen tagit fram en särskild manual för inspektion av efterspända betongbroar. Invator AB har varit delaktig i detta arbete och undersökningar i fält har varit ett viktigt steg i att anpassa undersökningsmetodik till verkliga förhållanden. Sammantaget är behovet av säkra och effektiva metoder större än någonsin, och projekten i Norge och Sverige, vilka två stycken kortfattat presenteras nedan, visar att spännsystemens tillstånd kan kartläggas med hög precision – om flera oförstörande provningsmetodiker kombineras och resultaten verifieras.

Eftersom spännkablar är dolda i foderrör räcker inte visuella inspektioner. Här föreslås då en metodkedja en med oförstörande provning (OFP) för att först lokalisera slakarmering, foderrör och spännkablar därefter kartlägga eventuella hålrum och skador, innan ett fåtal väl valda kärnboringar görs för att verifiera diagnosen och bedöma hålrum, korrosion och injekteringsbrukets kvalitet.

Arbetet inleds normalt med en genomgång av ritningar, eventuellt tidigare undersökningar och foton för att identifiera riskzoner, inte minst i ändzoner och partier i foderrören där bristfällig injektering kan befaras eller vatten ansamlas. Det kan också vara bra med en visuell undersökning för att notera eventuella rostutfällningar, sprickor eller andra anomalier. Här kan man i så fall redan kartlägga täckskikt hos betongen och slakarmeringens placering. Därefter används vanligtvis en täckskiktsmätare för att fastställa läget av slakarmering, mätprincipen bygger på elektromagnetisk induktion, och huvudsyftet är att minska risken för feltolkningar i senare steg och undvika risken att träffa armering vid eventuell kärnboring.

Foderrörens utsträckning kartläggs med georadar (GPR), se figur 2a. Elektromagnetiska pulser skickas ner i betongen och reflekteras vid gränser mellan material med olika dielektriska egenskaper, exempelvis stål/betong eller luft/bruk. Normalt kombineras två olika system: ett för större ytor och ett kompaktare instrument som kommer åt i trängre områden som till exempel hörn. Linjeskanningar ger reflektioner som tolkas till placeringar av foderrör. GPR är snabbt och kräver bara åtkomst från en yta, men i fuktig betong och vid tät armering minskar räckvidd och tolkningsbarhet. Metoden kan inte heller



Figur 2: a) GPR (Proseq) samt b) Tomografi (Ultraljud), (MIRA)

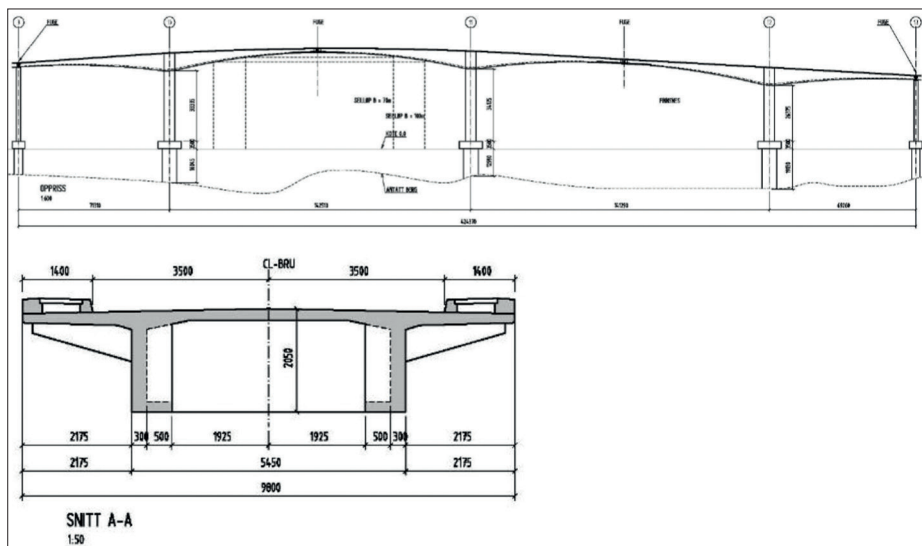


Figur 3: Borring i samband med verifiering. Normalt används en 80-100 mm kärnborr. I den högra delen visas frilagda kablar och hur det kan se ut i samband med hålrum i foderrören där fukt och syre kan komma åt.

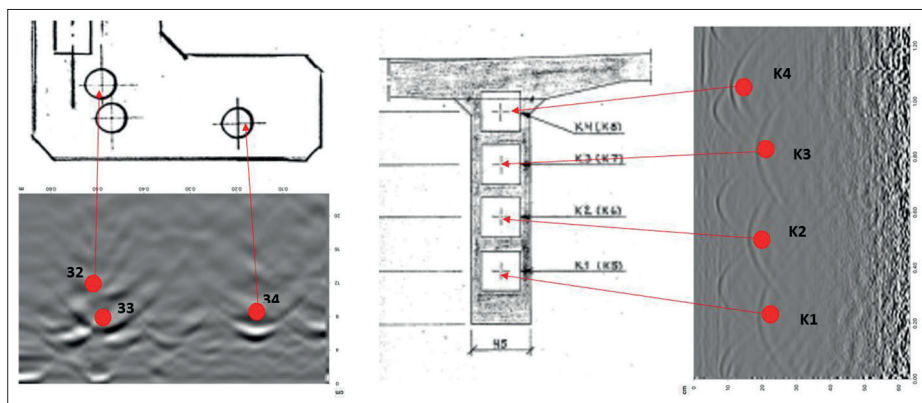
klargöra om ett foderrör är injekterat eller har hålrum. I visas exempel på resultat från en skanning med GPR:

För att därefter preliminärt bedöma hålrum i foderrören används därför ultraljud av typen UPE (Ultrasonic Pulse Echo), till exempel MIRA-utrustning (finns även andra leverantörer), se figur 2b. Antennen, med många torrpunktsgivare, skickar in skjuvvågor i betongen och samlar data som 2D-scanningar var tionde centimeter längs mätsträckan. Genom att kombinera dessa sektioner skapas 3D-modeller som

visar var kontinuiteter bryts. I tolkningen associeras låga amplituder med homogena, fullt injekterade partier, medan höga amplituder tyder på diskontinuiteter såsom luftfickor. Metoden ger en detaljerad bild av inre tillstånd men kräver god ytkontakt och kan störas av delamineringar och sprickor, till exempel om man har ASR (alkali-kisel-reaktion), vilket kan ge starka reflektioner. Det kräver också en hög kompetens av den som genomför undersökningen och utvärderar resultaten.



Figur 4: Längd- och tvärsnitt av Gisundsbron.



Figur 5: Skanningar för kartläggning av foderrörens placering.



Figur 6: Undersökning med MIRA och IE.

Impact Echo (IE) kan i vissa fall användas som verifierande komplement. Ett kort slag genom vanligtvis en stålkula mot betongkonstruktionen genererar elastiska vågor. I frekvensdomänen kan man särskilja om den uppkomna reflektionen kommer från baksidan av en intakt betongsektion eller från en närmare gräns, vilket avslöjar ett hålrum. Exempelvis kan en frekvenstopp som motsvarar ett djup av 190 mm i ett element som borde ge en topp vid 400 mm indikera en luftficka i foderröret. IE är relativt enkelt att tillämpa och ger djupinformation, men kräver täta mätpunkter längs foderröret och är svårt att genomföra nära hörn och på ojämna ytor. IE används endast i kombination

med UPE i samband med utvärdering av hålrum i foderrör.

Därefter kan man genomföra en selektiv kärnbörning och använda videskop för närmare undersökning. Borrhål med typiskt 80 - 100 mm i diameter borrar 10-15 mm framför foderröret. Först sonderas med en smalare borrar, vanligen diameter 16 mm, för att bekräfta avståndet. När sedan foderröret är frilagt öppnas det upp. En kamera, videskop, dokumenterar insidan av foderröret och den faktiska injekteringen, eventuella korrosionsprodukter och fukt-tillstånd kan kartläggas samt insamling av injekteringsbruk och även korrosionsprodukter kan genomföras. Öppningen repareras sedan med lämpligt cementbruk,

i vissa fall i kombination med epoxi. Borrning ger den avgörande visuella bekräftelsen men är tidskrävande, samt lokalt destruktiv och får därför begränsas till strategiska positioner som valts ut från den oförstörande provningen samt i överläggning med broägaren. Borrning för verifiering samt upplagning visas i figur 3.

Fallstudier

Invator AB har genomfört ett flertal tillståndsbedömningar av efterspända betongbroar. Nedan redovisas två av dessa, en i Norge – Gisundsbron, samt en fallstudie i Sverige, Vallbybroarna i Västerås.

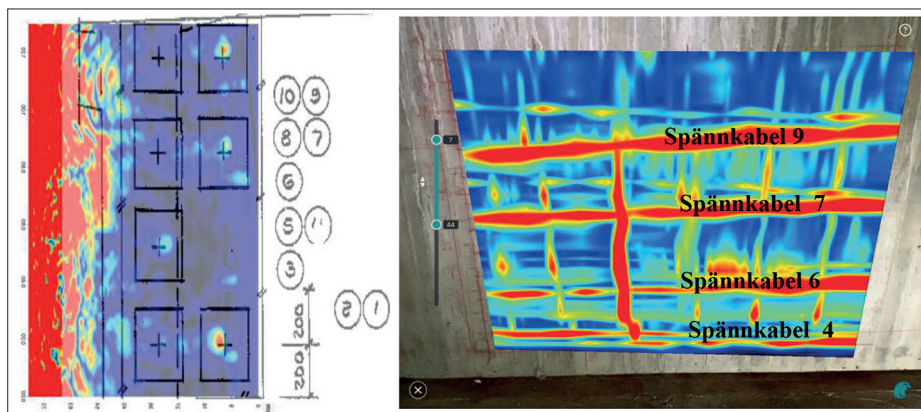
Gisundsbron

Gisundsbron, se figur 1, korsar Gisundet från staden Finnsnes på fastlandet till byn Silsand på ön Senja. Gisundsbron i Tromsø fylke är en 147 meter lång frittframbyggd bro från 1972, med ett största spann på 143 m. Konstruktionen består av två huvudbalkar i platsgjuten betong med omfattande efterspänning. En längdsektion och tvärsnitt av bron visas i figur 4. Bron hade sedan tidigare sprickbildning som kopplats till ASR, vilket försvårade tolkning av mätdata och därför krävde en särskilt genomtänkt metodik. Inspektionen planerades som fyra insatser i fält under ett års tid, med inledande GPR-skanningar, därefter större MIRA-insatser och till sist verifierande borrningar.

Lokaliseringen genomfördes med täcksikt-mätare för armering och två GPR-system – ett för stora ytor och ett mindre system för trängre utrymmen. Över 200 GPR-linjer togs upp och kablarna markerades på ytan av betongbalkarna. I figur 5 visas en typisk skanning med GPR av foderrör i underflänsen. Här är skanningarna utförda från undersidan respektive från sidan av livet. De bågar som syns i figur 5 är reflektioner från armering och foderrör.

Ultraljudsarbetet blev omfattande: omkring 4000 skanningar samlades och processades till 3D-grafik som färgkodades efter amplitud. Grönt/gult tolkades som fyllda partier; rött pekade på diskontinuitet. En kabel i både norra och södra balken gav tydliga röda zoner mellan stöd 9-10. IE-mätningar på dessa lägen visade reflektioner vid kortare avstånd än elementets fulla tjocklek, vilket styrkte hypotesen om hålrum. I figur 6 visas inspektion med MIRA och IE. I figur 7 visas resultat från skanningen av ett foderrör där det sannolikt finns hålrum.

I verifieringssteget öppnades totalt 27 borrhål i 15 kablar. Insidan dokumenterades med videskop. På flera stäl-



Figur 11: Placering av foderrör kartlagda med GPR.

påbörjas. Totalt skannades 34 stycken kablar fördelat på de 4 olika brolådor. Totalt mättes upp 136 meter vilket innebär cirka 1400 skanningar. Exempel från skanningarna med ultraljud visas i figur 12. Erfarenhetsmässigt är de största riskerna för hålrum i kablarna närmast förankringarna då dessa är placerade i högzonerna. Denna inspektion har därför fokuserat på områdena från stöden och 4-5 meter in mot centrum av brolådorna.

För ett otränat öga kan det vara svårt att dra slutsatser från dessa ultraljudsskanningar, men vid undermålig injektering eller hålrum visar sig detta som större röda områden i spännkablarna, de små röda områden som syns i mätningarna nedanför är inte några tecken på hålrum. Undersökningen visade då att det inte förekommer några hålrum i spännkablarna.

För att verifiera detta togs tre områden upp där kablar frilades, därtill togs injekteringsbruk ut för vidare undersökning gällande kloridinnehåll.

Inga hålrum kunde detekteras i samband med undersökningen dock noterades höga kloridhalter i injekteringsbruket nära och över kritiska nivåer, > 0.4% av cementvikt, i brolåda 2 i bottenflänsen samt en kabel i brolåda 4 SO. Dock noterades ingen korrosion i kablarna. Kablarna i det öppnade foderröret skyddades med epoxi, foderröret veks tillbaka över kablar och borrhålet gjöts igen med högvärdig betongbruk.

Metodikerna att kartlägga och inspektera befintliga spännkablar i Vallbybroarna fungerade bra och var effektiv. I det aktuella fallet har de aktuella foderrören och spännkablarna undersökts från insidan av lådorna, det vill säga inga kablar placerade mot utsidan har undersökts. Detta motiverades genom att klorider trängt in från

manluckor i brobanepattan. En fullständig kartläggning hade fodrat ställningar från utsidan.

Eftersom kloridhalter i injekteringsbruket översteg kritiska nivåer, trots att betongkonstruktionen i övrigt såg bra ut rekommenderades ytterligare undersökningar av injekteringsbruket, det vill säga att fler områden friläggs och prover tas ut.

Diskussion

Den presenterade metodiken och de presenterade fältstudierna ger tillsammans en nyanserad bild hur tillståndet hos efterspända broar kan bedömas. Den första iakttagelsen är att injekteringskvaliteten varierar avsevärt, inte bara mellan olika broar utan även mellan foderrör i samma bro och längs en och samma kabel. I Gisund var kabel 31 tom över längre sträckor, medan kablar 33 och 34 var väl injekterade. I Valbybroarna noterades inga hålrum, men däremot höga kloridhalter i vissa delar av injekteringsbruket.

Korrosion påträffades främst i områden med undermålig injektering. Detta överensstämmer med internationella erfarenheter där även enstaka defekta kablar kan få stor betydelse för bärförmågan och säkerheten.

Metodernas roller framstår tydligt. GPR är snabb och effektiv för lokalisering men säger lite om fyllnadskvaliteten; MIRA/ UPE ger den djupare avbildningen av injekteringen men är känslig för sprickor och ytkontakt; IE ger enkel och robust verifiering av hålrum – dock väldigt tidskrävande. Kärnborring är fortfarande det enda sättet att visuellt bekräfta resultaten. Kombinationen är därför avgörande, liksom en medvetenhet om störningar såsom ASR, som på Gisund genererade reflektioner och risk för falska positiva

signaler. Det gör att OFP alltid måste tolkas i ljuset av den övriga skadebilden.

Praktiskt visade projekten betydelsen av god åtkomst, säker arbetsmiljö, tillräcklig tid och en tydlig plan för datahantering. Ekonomiskt och miljömässigt pekar allt på att systematisk OFP kan ge stora vinster med riktade åtgärder där det verkligen behövs och ger en avsevärd ökad förståelse av en spännarmerad konstruktions status. Utifrån dessa typer av undersökningar kan man sedan ta fram lämpliga åtgärder. Detta kan vara utökad tillståndsbedömning, registrering genom mätning av rörelser, deformationer och till exempel dynamiska effekter från vilka man kan beräkna naturliga frekvenser. Det finns även tekniker där man kan mäta upp kvarvarande spännkraft.

Utmaningar

Även om vi i denna artikel presenterat lyckosamma resultat från tillståndsbedömningen och att korrekta resultat kan bedömas med stor sannolikhet så finns det många utmaningar, dessa kan kortfattat sammanfattas nedan;

Skuggeffekter: Med nuvarande metodik är det svårt att kartlägga placering av foderrör bakom ett annat foderrör. Signalen från det första foderröret är dominerande.

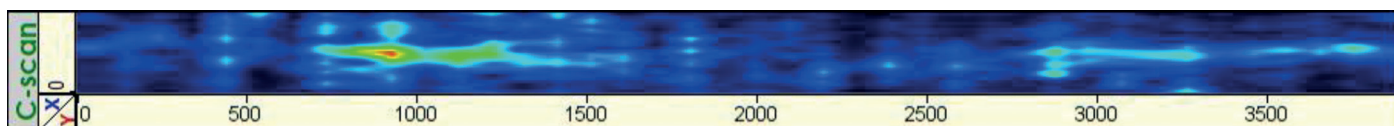
Defekter som sprickor eller ASR: Sprickor bryter kontinuiteten och reflekterar tillbaka vågorna. Detta kräver stor erfarenhet att tolka denna data.

Dåligt vibrerad betong eller delamineringar: På samma sätt som defekter och sprickor bryter hålrum, till exempel rättbon, i betongen kontinuiteten av vågorna.

Tidsåtgång: Även med moderna verktyg är tidsåtgången för undersökningarna ganska omfattande och det är viktigt att koncentrera sig på de sektioner som är mest kritiska ut konstruktiv synpunkt.

Svårighet att tolka data: Data kan vara svåra att tolka om man inte har stor erfarenhet från dessa typer av konstruktioner

Brist på forskning och utveckling: Forskning och utveckling inom detta område har varit relativt bristfällig och utvecklingen drivs i huvudsak genom projekt. Det skulle behövas en samlad kraft för att systematiskt förstå hur defekterna effektivt kan kartläggas, hur de påverkar konstruktionen och hur man kan reparera eller förstärka för de behov som föreligger.



Figur 12: Ultraljudsmätningar Brolåda 1, Norra sidan.

Framtida behov

För att metodiken presenterad ovan skall kunna användas kostnadseffektivt och över stora områden behöver tidsåtgången för tillståndsbedömning kortas ner samtidigt som tillförlitligheten i tolkning av data öka.

För närvarande arbetar Invator Sverige AB med datadrivna analysflöden inom ett utvecklingsprojekt finansierat av FORMAS – Smart Built Environment – Innovationsidén. Tekniker med maskininlärning utvecklas för att kombinera georadar och ultraljud för en samlad klassning av foderrörs/spännkabla tillstånd. De första resultaten pekar på avsevärd minskad tolkningsosäkerhet och mer enhetliga bedömningar, vilket är särskilt värdefullt om många broar ska bedömas inom kort tid. Projektets ansats är att ingen metod ensam räcker, att AI-stöd kan effektivisera analysen och att fälttesterna bekräftar att metodiken fungerar. En målsättning är här att skissa på riktlinjer till stöd för tillståndsbedömning av spännarmerade betongkonstruktioner och speciellt spännarmerade betongbroar.

Sammanfattning

Behovet av oförstörande provning är akut för broar byggda före 1980. Bristfällig

injektering och dolda korrosionsangrepp kan annars gå under radarn tills trådbrott och bärformågeförlust uppträder. Erfarenheterna från undersökningar i fält på ett flertal efterspända betongbroar visar att metodkedjan med GPR för lokalisering, MIRA/UPE för avbildning, IE för verifiering och selektiv kärnbörning för validering fungerar väl. Huvudproblemet är variationen – både mellan och inom foderrör i samma konstruktion – vilket kräver systematiska undersökningar och snarare än punktvisa kontroller. ASR och andra skador kan störa OFP-signaler och måste vägas in i tolkningen. AI och robotik pekar ut en väg mot mer proaktivt underhåll, där risker upptäcks och åtgärdas tidigare än vad idag är möjligt. De ekonomiska och klimatmässiga vinsterna är betydande: varje förlängt år av säker drift sparar resurser och minskade koldioxidutsläpp. Framåt rekommenderas att särskilt äldre efterspända broar inventeras med OFP enligt en fast metodik, att nationella riktlinjer tas fram och att datahanteringen professionaliseras med digitala plattformar och AI-stöd. Kompetensuppbyggnad är central; metoderna kräver erfarna operatörer, men med bättre verktyg kan fler nå tillförlitliga resultat. ■

Referenser

- [1] Täljsten, B., Popescu, C., Holmqvist, M. (2024). *Non-destructive testing of a post-tensioned concrete bridge in Norway (Herøysund Bridge)*. ICCRRR 2024.
- [2] Holmqvist, M., Popescu, C., O'Sadnick, M., Täljsten, B. (2024). *Special Inspection of PT-ducts on Gisund Bridge*. SINTEF Report 2024:01252.
- [3] Trafikverket (2022). *Handbok för tillståndsbedömning av betongbroar*. Stockholm.
- [4] Statens Vegvesen (2021). *Etterspente betongbruer – Inspeksjonsmanual, Rapport nr. 718*. Oslo.
- [5] fib Bulletin 88 (2019). *Condition Assessment of Concrete Structures*. Fédération internationale du béton (fib).
- [6] ACI 228.2R-13 (2013). *Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*. American Concrete Institute.
- [7] Broomfield, J.P. (2007). *Corrosion of Steel in Concrete – Understanding, Investigation and Repair*. CRC Press.
- [8] Helene, P., Andrade, C. (1993). *Durability of Concrete Structures: Investigation, Repair and Protection*. Chapman & Hall.
- [9] Breyse, D. (2012). *Nondestructive Evaluation of Concrete Structures: State of the Art and Future Trends*. RILEM State-of-the-Art Reports.