

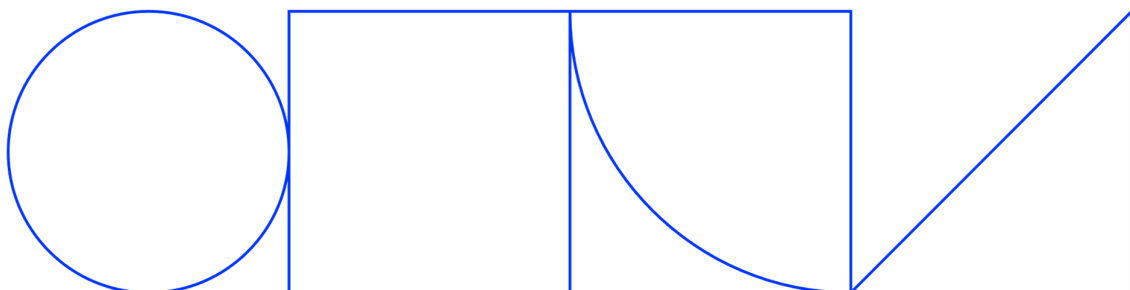
Broars kapacitet och behov av förstärkningsåtgärder

Slutrapport

Silvia Sarmiento, Gabriel Sas, Jaime Gonzalez-Libreros, Chao Wang, Lennart Elfgrén
Luleå tekniska Universitet

Charlotte Svensson Tengberg, Hans Hedlund
Skanska Sverige AB

2026-06-01



Förord

Denna rapport sammanfattar resultaten från forskningsprojektet Broars kapacitet och behov av förstärkningsåtgärder, finansierat av SBUF och Trafikverket genom forskningsprogrammet BBT. Projektet genomfördes vid Institutionen för byggkonstruktion- och brand vid Luleå tekniska universitet (LTU).

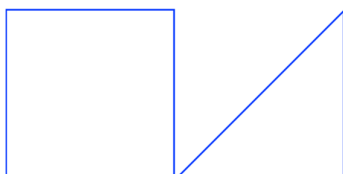
Projektet fokuserade på att förbättra bedömningen av befintliga brokonstruktioner genom att kombinera probabilistiska tillförlitlighetsmetoder, finita elementanalys (FEA), fullskaliga experimentella tester, övervakning och tidsberoende tillförlitlighetsmetoder. Forskningen tog upp det ökande behovet av tillförlitliga och hållbara bedömningsmetoder för åldrande infrastruktur, särskilt armerade och förspända betongbroar som utsätts för långsiktig nedbrytning och ökande trafikkrav.

Projektet genomfördes främst genom Silvia Sarmientos doktorsarbete och resulterade i en doktorsavhandling med titeln "*Remaining service life estimation of existing concrete bridges through probabilistic and reliability analyses*". Projektet genererade också flera expertgranskade tidskriftsartiklar, konferenspublikationer och tekniska rapporter.

Författarna tackar för det ekonomiska stödet från SBUF och Trafikverket, samt för bidrag från alla projektdeltagare, laboratoriepersonal, samarbetspartners och medlemmar i referensgruppen.

Luleå, 2026

Silvia Sarmiento, Gabriel Sas, Jaime Gonzalez-Libreros, Chao Wang, Lennart Elfgren
Charlotte Svensson Tengberg, Hans Hedlund



Sammanfattning

Detta projekt undersökte förbättrade metoder för att bedöma den verkliga bärförmågan och återstående livslängden (RSL) hos befintliga betongbroar. Forskningen kombinerade probabilistiska och tillförlitlighetsbaserade metoder, icke-linjär finit elementanalys (NLFEA), fullskaleprovningarr, övervakningsdata och tidsberoende tillförlitlighetsanalys.

Projektet antog en kritisk utmaning som infrastrukturägare i Sverige och internationellt står inför: en stor del av brobeståndet närmar sig eller överskrider sin avsedda livslängd samtidigt som trafikbehov och hållbarhetskrav fortsätter att öka. Traditionella bedömningsmetoder är ofta konservativa och tar inte full hänsyn till faktiskt beteende, redundans, reservkapacitet eller uppmätt prestanda.

Arbetet fokuserade på två representativa brotyper som är vanligt förekommande i Sverige: (i) en 66 år gammal betongbro med förspända lådbalkar över Kalixälven, och (ii) en ny järnvägsbro i form av ett armerat betongtråg som är representativ för broarna längs Malmбанan i norra Sverige.

Arbetet omfattade kalibrering av finita elementmodeller (FE-modeller) med hjälp av experimentella data och övervakningsdata, utveckling av förbättrade metamodellbaserade tillförlitlighetsalgoritmer lämpliga för integration med finit elementmodellering (FEM), kvantifiering av återstående livslängd och tillåtna axellaster med hjälp av probabilistiska metoder samt utvärdering av hur uppdaterade materialegenskaper och mätningar av kvarvarande förspänning påverkar konstruktionens tillförlitlighet.

Utmattningsprov i laboratorium i full skala utfördes på trågbron, där man simulerade cirka 48 års järnvägstrafikbelastning motsvarande 10 miljoner belastningscykler. Bron instrumenterades med hjälp av distribuerade fiberoptiska sensorer (FOS), traditionella trådtöjningsgivare, linjära variabla differentialtransformatorer (LVDT) och Fiber Bragg Grating (FBG)-sensorer. Övervakningssystemet möjliggjorde kontinuerlig observation av styvhetsförsämring, sprickutveckling, töjningsutveckling och lastomfördelning under hela utmattningsprocessen, vilket gav värdefulla insikter i långtidsbeteendet hos järnvägsbroar av armerad betong.

För Kalixbron genomfördes omfattande destruktiva och icke-destruktiva provningskampanjer för att uppskatta kvarvarande förspänningsnivåer, utvärdera materialegenskaper och validera brons funktionsduglighet. Bayesianska uppdateringsmetoder implementerades för att integrera övervaknings- och experimentdata i tillförlitlighetsanalyserna, vilket avsevärt minskade osäkerheterna kopplade till materialegenskaper, förspänningsförluster och strukturell respons.

Ett av projektets viktigaste vetenskapliga bidrag var utvecklingen av en förbättrad metamodellbaserad tillförlitlighetsalgoritm som integrerar Kriging-surrogatmodellering, inlärningsfunktioner och Kopulateori. Metodiken minskade avsevärt beräkningsinsatsen i samband med koppling av tillförlitlighetsanalys och finit elementmodellering, samtidigt som hög noggrannhet och effektiv konvergens bibehölls.

Resultaten visade att införlivandet av övervaknings- och experimentdata avsevärt förbättrar tillförlitlighetsuppskattningar och prognoser för återstående livslängd. För Kalixbron ökade den uppdaterade informationen det uppskattade tillförlitlighetsindexet med upp till 264 %, beroende på vilken förspänningsmätningss metod som användes. För trågbron förlängde de övervakningsbaserade analyserna den uppskattade återstående livslängden med cirka 39 år och möjliggjorde högre tillåtna axellaster jämfört med konventionella bedömningsmetoder. Härigenom minskade behovet av förstärkningsåtgärder.

De fyra viktigaste slutsatserna av projektet är:

- De provade broarna hade betydligt **högre bärighet** än vad traditionella tillståndsbedömningar ger och förstärkningsåtgärder kan därför vara onödiga.
- För **Kalixbron tredubblades säkerhetsindex** β från 0,8 till 2,4 genom beaktande av **aktuell betonghållfasthet** och bestämning av **kvarvarande spännkraft**.
- För **Järnvägstrågbron** mer än **fördubblades livslängden** från 35 till 75 år för utmattningsbelastning med ökade axellaster.
- De använda metoderna med **mätningar** och **förfinade beräkningar** kan därför **rekommenderas för fortsatt tillämpning**.

Innehåll

Bakgrund	4
Syfte och mål	6
Omfattning	7
Metod	8
Allmänt ramverk	8
Tidsberoende tillförlitlighetsanalys	10
Bayesiansk uppdatering	11
Metamodellbaserad tillförlitlighetsanalys	11
Finit elementmodellering (FEM)	12
Experimentellt arbete	13
Undersökningar av Kalixbron	13
Utmattningsprovning av trågbroar	15
Finit elementmodellering och tillförlitlighetsanalys	17
Kalibrering av FE-modeller	17
Tillförlitlighetsanalyser för Kalixbron	18
Utmattningsanalyser för trågbroar	19
Studier av betydelse, redundans och robusthet	21
Huvudresultat	23
Experimentell validering av broars beteende	23
Förbättrade metoder för tillförlitlighet	24
Förbättrad metamodellbaserad algoritm	25
Praktiska implikationer	25
Vetenskapliga resultat och spridning	27
Doktorsavhandling	27
Vetenskapliga tidskrifts- och konferensartiklar	27
Slutsatser	28
Rekommendationer och framtida arbete	30
Industriell implementering	30
Allmänna rekommendationer	31
Referenser	31

Bakgrund

Broinfrastrukturen utgör en av de viktigaste komponenterna i det svenska transportnätet och spelar en avgörande roll för den ekonomiska aktiviteten, den industriella logistiken och de regionala förbindelserna (Sarmiento, 2026). En betydande del av det befintliga brobeståndet byggdes under den stora infrastrukturutbyggnaden på 1950- till 1970-talet och närmar sig nu eller har redan överskridit sin avsedda livslängd. Många av dessa konstruktioner utformades utifrån historiska trafikförhållanden och konstruktionsstandarder som skiljer sig väsentligt från dagens driftskrav. Idag utsätts broar för ökade trafikvolym, tyngre axellaster, mer intensiv godstransport samt långsiktiga förstörande processer som utmattning, korrosion, frostsador och förluster av förspänning (Šomodíková et al., 2016; Elfgren, 2015; Bell et al., 2023; Liu et al. 2023; Galik och Calvi, 2024).

Samtidigt står infrastrukturägare inför ett ökande tryck att minska miljöpåverkan och optimera underhållsresurserna samtidigt som man säkerställer konstruktionens säkerhet och funktionsduglighet. Storskaliga program för utbyte av broar är ekonomiskt orealistiska och miljömässigt ohållbara på grund av de betydande kostnaderna, materialförbrukningen, trafikstörningarna och de därmed förknippade koldioxidutsläppen (Biondini och Frangopol, 2016). Följaktligen har förlängningen av livslängden för befintlig broinfrastruktur genom förbättrade bedömningsmetoder blivit en kritisk teknisk och samhällelig utmaning.

Konventionella metoder för brobedömning bygger vanligtvis på deterministiska tillvägagångssätt och förenklade normformuleringar. Dessa metoder utgår ofta från konservativa antaganden om materialegenskaper, randvillkor, lastfördelning och nedbrytningsmekanismer. I många fall utförs bedömningarna på elementnivå i stället för att betrakta bron som ett komplett konstruktionssystem. Som ett resultat av detta fångas inte viktiga konstruktionsfenomen såsom redundans, reservkapacitet, omfördelning av spänningar efter lokala skador och icke-linjärt konstruktionsbeteende upp fullt ut (Sarmiento et al., 2024). Dessutom bortser traditionella metoder i allmänhet från uppmätt beteende som erhållits genom övervakning och provning, och de behandlar ofta nedbrytningsprocesser med hjälp av förenklade antaganden snarare än med realistiska tidsberoende stokastiska modeller (Chen och Omenzetter, 2013; Cheung och Kyle, 1996).

Tidigare experimentella undersökningar och studier av brohaverier har visat att förenklade, normbaserade bedömningsförfaranden både kan underskatta brokonstruktioners faktiska bärförmåga och misslyckas med att korrekt återge långsiktigt nedbrytningsbeteende (Plos och Gylltoft, 2006; Bagge et al., 2017; Elfgren et al., 2018; Jing et al., 2026). Detta skapar osäkerhet i underhållsplaneringen och kan leda antingen till onödiga ingrepp eller till otillräcklig förståelse av befintliga risker. Flera historiska brohaverier, däribland Morandibron i Genua 2018 och Carolabron i Dresden 2024, har ytterligare belyst vikten av förbättrad övervakning, tillförlitlighetsbedömning och förståelse av nedbrytningsmekanismer i åldrande broinfrastruktur (Galik och Calvi, 2024; Marx, 2024).

Under de senaste åren har probabilistiska metoder, teori om strukturell tillförlitlighet, finit elementanalys (FEA) och strukturell hälsoövervakning (SHM) blivit allt viktigare verktyg för infrastrukturbedömning (Rackwitz, 2000; Casas och Cruz, 2003). Probabilistiska metoder gör det möjligt att explicit inkludera osäkerheter kopplade till belastningar, materialegenskaper, försämring och miljöpåverkan i utvärderingsprocessen. Samtidigt möjliggör icke-linjär finit elementmodellering en mer realistisk återgivning av konstruktionens beteende, inklusive sprickbildning, omfördelning av inre krafter, försämrade styvhet och progressiv skador (Cervenka, 2013). Övervakningssystem och mätningar förbättrar bedömningsnoggrannheten ytterligare genom att tillhandahålla information om befintliga konstruktioners faktiska tillstånd och respons (Sanayei et al., 2015; Ereiz et al., 2022).

Trots dessa framsteg är den praktiska tillämpningen av avancerade tillförlitlighetsbaserade metoder fortfarande begränsad. En av de största utmaningarna är den höga beräkningskostnaden, som är förknippad med att koppla samman finit elementanalys och probabilistiska tillförlitlighetsmetoder, särskilt när icke-linjärt strukturellt beteende och tidsberoende förändringar beaktas (Teixeira et al., 2021; Sarmiento et al., 2025a). Dessutom är integrationen av övervakningsdata i probabilistiska analyser fortfarande komplex, och validerade experimentella studier i full skala är relativt sällsynta. Många avancerade metoder förblir därför främst akademiska och är inte lätt överförbara till praktiska arbetsflöden för brobedömning (Chen et al., 2025). Befintliga studier indikerar också att probabilistiska utmattnings- och nedbrytningsmodeller kan bli beräkningsmässigt krävande och svåra att implementera för verkliga brosystem när de kombineras med icke-linjär FE-analys och stokastiska nedbrytningsprocesser (Wang et al., 2021; Sarmiento et al., 2026).

Detta projekt initierades för att ta itu med dessa utmaningar genom utveckling och validering av integrerade experimentella, numeriska och probabilistiska metoder tillämpade på representativa svenska brokonstruktioner. Genom att kombinera fullskaleförsök, övervakning, finit elementmodellering, bayesiansk uppdatering och tidsberoende tillförlitlighetsanalys syftade projektet till att förbättra uppskattningen av återstående livslängd och bärförmåga samtidigt som osäkerheterna i samband med traditionell tillståndsbedömning minskades.

Syfte och mål

Det övergripande målet för projektet var att förbättra bedömningen av befintliga betongbroar genom utveckling och validering av metoder som integrerar materialprovning, deformationsmätningar vid provbelastning, probabilistisk tillförlitlighets- och tillståndsbedömning, tidsberoende nedbrytningsmodellering samt icke-linjär finit elementanalys. Projektet syftade till att utveckla ett tvärvetenskapligt ramverk för utvärdering av faktisk kapacitet och återstående livslängd hos befintliga brokonstruktioner genom att kombinera övervakningsdata, experimentellt validerade numeriska modeller med probabilistiska metoder som kan ta hänsyn till osäkerheter, nedbrytningsprocesser och tidsberoende deformationer. Det slutgiltiga målet var att stödja en mer tillförlitlig, hållbar och kostnadseffektiv broförvaltning som inkluderar underhållsplanering med strategier för renovering.

Projektets mål var att:

- Utveckla och validera förbättrade metoder för bedömning av befintliga betongbroar genom att kombinera experimentella undersökningar, övervakning, avancerad numerisk modellering och probabilistiska tillförlitlighetsmetoder. Ett centralt mål var att förbättra förståelsen av nedbrytningsmekanismer, återstående bärförmåga och tidsberoende tillförlitlighet i åldrande brosystem som utsätts för utmattning, förluster av förspänning och ökande trafikkrav.
- Utveckla och kalibrera finita elementmodeller med hjälp av fullskaliga experimentella data och övervakningsdata från representativa brokonstruktioner. Projektet syftade till att integrera icke-linjär finit elementanalys med probabilistiska metoder för att uppnå mer realistiska förutsägelser av beteende, lastomfördelning, reservkapacitet och nedbrytningsprocesser än vad konventionella deterministiska metoder ger.
- Upprätta praktiska ramverk för tillförlitlighets- och riskbedömning av befintliga broar, inklusive metoder som kan införliva övervakningsdata, experimentella uppdateringar och stokastiska nedbrytningsmodeller i uppskattningar av återstående livslängd. Särskild tonvikt lades på att minska osäkerheterna i samband med materialegenskaper, kvarvarande förspänning, utmattningsnedbrytning och bärförmåga.
- Utveckla effektiva modellbaserade tillförlitlighetsmetoder som är lämpliga för FEM-baserade analyser, inklusive implementering av bayesianska uppdateringstekniker och avancerade surrogatmodelleringsmetoder. Målet var att förbättra beräkningseffektiviteten samtidigt som hög noggrannhet bibehölls vid koppling av probabilistiska tillförlitlighetsanalyser med beräkningskrävande finita elementmodeller.
- Sprida den genererade kunskapen genom publikationer i vetenskapliga tidskrifter, konferensbidrag, tekniska rapporter och Silvia Sarmientos doktorsavhandling, och därmed stödja både akademisk forskning och praktisk tillämpning inom brotekniksektorn.

Omfattning

Arbetet fokuserade främst på två representativa fallstudier (se figur 1):

- Förspänd betongbro: En 66 år gammal konsolutbygd förspänd betonglådbalkbro över Kalixälven i norra Sverige.
- Trågbro i armerad betong: En fullskalig järnvägsbro i armerad betong, gjuten vid LTU:s laboratorier som en representativ replik av broarna längs Malmбанan.



Figur 1. a) Den gamla E4-bron över Kalixälven, en förspänd betonglångbro byggd med balanserad konsolutkrågning. Den undersöktes inom projektet före rivning; b) Trågbro i full skala gjuten och testad vid LTU

Projektet beaktade utmattning, förluster av förspänning, tillförlitlighet, återstående livslängd, integration av övervaknings- och experimentella data, kalibrering av finita elementmodeller samt utvärdering av funktionsduglighet och övergripande prestanda hos befintliga brosystem. Forskningen fokuserade på att utveckla metoder som kan integrera dessa aspekter i ett enhetligt probabilistiskt bedömningsramverk för befintliga betongbroar. Bredare ämnen såsom livscykelkostnadsanalys och broförvaltning på nätverksnivå beaktades utanför projektets omfattning. Rivningen av Kalixbron behandlades i ett särskilt SBUF-projekt, Nr 13939, Larsson et al., 2023; Daescu et al., 2025.

Metod

Allmänt ramverk

Inom projektet utvecklades ett ramverk för att uppskatta återstående livslängd hos befintliga broar genom att integrera flera kompletterande metoder och bedömningstekniker. Ramverket kombinerade övervakning och provning med avancerade numeriska och probabilistiska metoder i syfte att minska osäkerheterna och förbättra noggrannheten i konstruktionsbedömningarna av åldrande brosystem.

Ramverket integrerade:

1. Övervakning och provning, inklusive både destruktiva och icke-destruktiva experimentella metoder, för att erhålla information om det faktiska tillståndet, materialegenskaper, återstående förspänningsnivåer, töjningsutveckling, förskjutningar, sprickbeteende och utmattning hos befintliga brokonstruktioner.
2. Finit elementmodellering, inklusive linjära och icke-linjära FE-analyser, för att realistiskt simulera brobeteendet under drifts- och utmattningsförhållanden. FE-modellerna kalibrerades med hjälp av uppmätta experimentella data för att

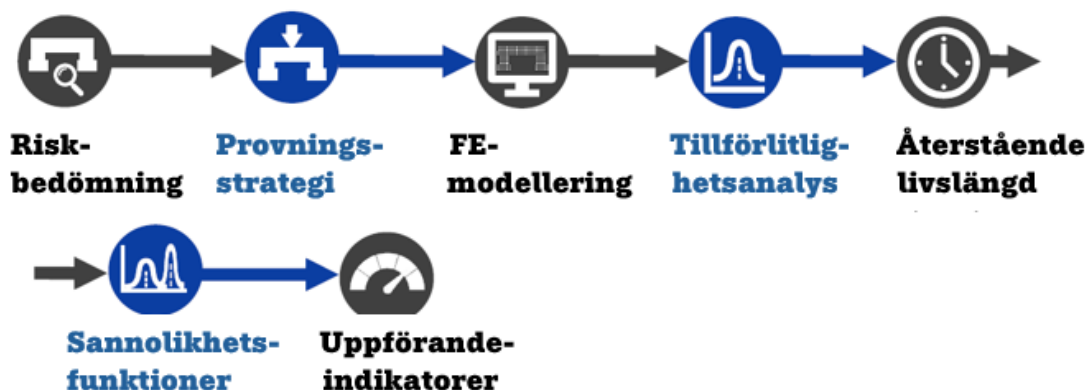
förbättra representationen av styvhet, randvillkor, lastomfördelning och nedbrytningseffekter.

3. Probabilistisk analys och tillförlitlighetsanalys, vilket gör det möjligt att explicit införliva osäkerheter kopplade till belastningar, materialegenskaper, nedbrytningsmekanismer och last-deformations-respons i utvärderingsprocessen. Tillförlitlighetsbaserade metoder användes för att utvärdera strukturell säkerhet och uppskatta sannolikheten för brott över tid.
4. Modellering av tidsberoende försämring, som användes för att representera den gradvisa försämringen av brokonstruktioner på grund av mekanismer som utmattningsskador och förluster av förspänning. Metodiken möjliggjorde en utvärdering av hur konstruktionens tillförlitlighet utvecklas under brons livslängd.
5. Bayesiansk uppdatering, som införlivade övervaknings- och experimentell information i de probabilistiska modellerna för att förfina osäkerhetsfördelningarna och förbättra noggrannheten i prognoserna för tillförlitlighet och återstående livslängd.
6. Experimentell validering, genom fullskaliga brotester och övervakningskampanjer, för att validera de utvecklade numeriska och probabilistiska metoderna och säkerställa att modellerna på ett realistiskt sätt återgav det faktiska beteendet.

Det utvecklade ramverket bestod av flera huvudsteg som tillämpades sekventiellt under hela projektet (se figur 2):

- Risk- och tillståndsbedömning, där brons tillstånd, nedbrytningsmekanismer, belastningsförhållanden och potentiella sårbarheter identifierades och utvärderades för att definiera de kritiska bedömningsparametrarna.
- Övervaknings- och teststrategi, där instrumenteringslayouter, övervakningssystem och experimentella testförfaranden utformades för att samla in de data som krävdes för modellkalibrering och utvärdering. Detta innefattade implementering av distribuerade fiberoptiska sensorer, töjningsgivare, LVDT:er och materialprovningförfaranden.
- FE-modellering, där finita elementmodeller av brosystemen utvecklades och kalibrerades med hjälp av experimentella data. De kalibrerade modellerna användes sedan för att simulera beteende, nedbrytningsprocesser och lastomfördelning under olika belastningsscenarier.
- Tillförlitlighetsanalys, där probabilistiska metoder implementerades för att kvantifiera säkerhetsnivåer och utvärdera osäkerheter förknippade med motstånd, belastningar och nedbrytningsprocesser. Tidsberoende tillförlitlighetsanalyser användes för att uppskatta utvecklingen över tid.
- Beräkning av återstående livslängd, där de kalibrerade probabilistiska modellerna och nedbrytningsprocesserna användes för att uppskatta framtida prestanda och den återstående livslängden för brokonstruktionerna.

- Uppdatering av sannolikhetsdensitetsfunktioner, där bayesianska uppdateringsmetoder användes för att förfina de statistiska fördelningarna av viktiga parametrar. Arbetet baserades på försöksresultat, vilket minskade osäkerheterna i analyserna.
- Prestationsutvärdering, där det övergripande beteendet, tillförlitlighetsnivåerna, reservkapaciteten och tillåtna belastningsförhållanden utvärderades för att stödja underhållsplanering och långsiktiga beslut om broförvaltning.



Figur 2. Huvudsteg i det föreslagna ramverket

Tidsberoende tillförlitlighetsanalys

Tidsberoende tillförlitlighetsmetoder implementerades för att utvärdera prestanda- och säkerhetsutvecklingen hos befintliga brosystem under hela deras livslängd, samtidigt som man uttryckligen tog hänsyn till stokastiska nedbrytningsprocesser och osäkerheter förknippade med både motståndskraft och belastningsförhållanden. Analyserna beaktade den progressiva försämringen av den kapaciteten orsakad av mekanismer såsom utmattningsinducerad skadeackumulering i armerade betongelement och långsiktiga förluster av förspänning i förspända betongbroar. Dessa nedbrytningsmekanismer modellerades som tidsberoende stokastiska processer som påverkar utvecklingen av bärigheten över tid.

Metodiken införlivade även osäkerheter relaterade till materialegenskaper, belastningseffekter, miljöexponering och respons. Trafikpåverkan behandlades som tidsvarierande belastningar som återspeglar den långsiktiga ökningen av järnvägs- och vägtrafikbehovet, inklusive förändringar i axellast, trafikintensitet och belastningsfrekvens under brons hela livslängd. Miljöeffekter som temperaturvariationer, fuktexponering och försämring i samband med långsiktiga driftsförhållanden beaktades också i det probabilistiska ramverket.

Analyserna av konstruktionens tillförlitlighet formulerades genom tidsberoende gränstillståndsfunktioner där både motstånd och belastning utvecklades över tid. Detta möjliggjorde beräkning av tillförlitlighetsindex och sannolikheter för fel som funktioner av tiden snarare än som enskilda deterministiska värden. Följaktligen gav metodiken en

mer realistisk uppskattning av återstående livslängd genom att beakta samspelet mellan nedbrytningsprocesser, strukturella osäkerheter och föränderliga belastningsförhållanden under brokonstruktionernas hela driftslivslängd. Analyserna beaktade både tidigare uppskattningar baserade på antaganden i normer och senare uppskattningar uppdaterade med hjälp av experimentella data.

Bayesiansk uppdatering

Bayesianska uppdateringsmetoder implementerades för att förfinas de probabilistiska modellerna och minska osäkerheterna i samband med den bedömningen av befintliga broar genom att införliva data från försök i analyserna. Istället för att uteslutande förlita sig på tidigare antaganden härledda från konstruktionsritningar, normformuleringar eller generiska materialegenskaper, integrerade metodiken uppmätta responser och för att uppdatera sannolikhetsfördelningarna för nyckelvariabler som påverkar den tillförlitligheten.

Uppdateringsprocedurerna tillämpades på materialegenskaper såsom betonghållfasthet, styvhetsegenskaper och kvarvarande förspänningsnivåer som erhållits från destruktiva och icke-destruktiva provningskampanjer. För Kalixbron införlivades uppmätta förspänningsförluster erhållna genom metoder med armeringskapning respektive betongsågning i de probabilistiska analyserna. De ersatte de förenklade uppskattningar av förspänningsförluster som vanligtvis används i konventionella bedömningar. På samma sätt användes övervakningsdata från töjningsmätningar, förskjutningsregistreringar och provbelastningar för att förbättra återgivningen av det faktiska beteendet och randvillkoren i de numeriska modellerna.

Genom att integrera denna information i tillförlitlighetsramverket minskade metodiken avsevärt osäkerheterna vid bedömning av bärförmåga, nedbrytningsmekanismer och funktionsduglighet. De uppdaterade probabilistiska modellerna resulterade i väsentligt förbättrade tillförlitlighetsprognoser och mer realistiska uppskattningar av återstående livslängd jämfört med analyser som enbart baserades på tidigare antaganden. Den bayesianska uppdateringsprocessen tillhandahöll därför en robust metodik för att kombinera experimentella data och probabilistisk bedömning vid utvärderingen av åldrande broinfrastruktur.

Metamodellbaserad tillförlitlighetsanalys

Ett viktigt metodologiskt bidrag från projektet var utvecklingen av en förbättrad metamodellbaserad tillförlitlighetsalgoritm som specifikt utformats för tillförlitlighetsproblem som involverar beräkningskrävande finita elementmodeller. Konventionella tillförlitlighetsanalyser i kombination med icke-linjär finita elementanalys kräver ofta ett mycket stort antal simuleringar för att uppskatta felsannolikheter korrekt, vilket gör den praktiska implementeringen beräkningsmässigt kostsam och i många fall omöjlig för stora konstruktioner. Den utvecklade metodiken hanterade denna utmaning genom att införa en adaptiv surrogatmodelleringsmetod som kan minska antalet FE-utvärderingar avsevärt samtidigt som hög noggrannhet i uppskattningen av tillförlitlighet bibehålls.

Den föreslagna metoden integrerade Kriging-surrogatmodeller, inlärningsfunktioner, kopulateori, adaptiva provtagningsförfaranden och FEM-baserade prestandafunktioner i ett enhetligt tillförlitlighetsramverk. Kriging-modeller (uppkallade efter den sydafrikanske gruvingenjören mm Danie G Krige, 1919-2013, som använde dem för att utvärdera guldmalmsförekomster) användes för att konstruera surrogat-representationer av de ursprungliga gränstillståndsfunktionerna för finita element, vilket möjliggjorde en effektiv approximation av starkt icke-linjärt beteende. Inlärningsfunktioner implementerades för att identifiera de mest informativa områdena inom tillförlitlighetsdomänen och styra den adaptiva beräkningen av försöksupplägget. Kopulateori införlivades för att noggrant representera statistiskt beroende mellan korrelerade slumpvariabler, vilket är särskilt viktigt för realistiska strukturella tillförlitlighetsproblem som involverar materialegenskaper, belastningar och nedbrytningsparametrar. Adaptiva samplingsprocedurer koncentrerade beräkningsinsatsen till områden nära gränstillståndsytan och den mest sannolika felpunkten, vilket förbättrade effektiviteten utan att kompromissa med förutsägelsens kvalitet.

Metodiken validerades med hjälp av flera analytiska exempel, inklusive tillämpningar på armerade betongbroar modellerade med finit elementanalys. Resultaten visade att den föreslagna metoden avsevärt minskade beräkningsbehovet i samband med tillförlitlighetsanalyser kopplade till FEM. För de undersökta valideringsfallen minskade metodiken antalet FE-simuleringar med cirka 67 % jämfört med referensalgoritmerna, samtidigt som jämförbar noggrannhet i tillförlitlighetsuppskattningarna bibehölls. Det utvecklade ramverket utgör därför ett viktigt bidrag till den praktiska implementeringen av probabilistiska, finita elementbaserade metodiker för brobedömning.

Finit elementmodellering (FEM)

Avancerade finita elementmodeller utvecklades för båda brofallstudierna och kalibrerades med hjälp av experimentella data som erhöles från fullskaliga testkampanjer. FE-analyserna syftade till att realistiskt återge brokonstruktionernas beteende under drift, provbelastning och utmattningsbelastning, samtidigt som man tog hänsyn till materialförsämring och icke-linjär respons.

De numeriska analyserna omfattade både linjära och icke-linjära finita elementmodelleringsmetoder beroende på det specifika utvärderingsmålet. Material-icke-linjäriteter förknippade med betong med armering och förspänning införlivades för att simulera sprickbildning, försämrade styvhet, omfördelning av inre krafter och progressiv skadeutveckling under ökande belastning och långvariga cykliska påfrestningar. För järnvägsbron användes FE-modellerna även för att utvärdera utmattningsinducerade nedbrytningsmekanismer och utvecklingen av det strukturella beteendet efter miljontals belastningscykler som representerar långsiktiga järnvägstrafikförhållanden. I fallet med Kalixbron införlivade de numeriska modellerna effekterna av långsiktiga förluster av förspänning och uppdaterade materialegenskaper erhållna från experimentella undersökningar.

FE-modellerna kalibrerades med hjälp av uppmätta töjningar, förskjutningar och belastningsresponser som erhöles från distribuerade fiberoptiska sensorer, töjningsgivare, LVDT:er och provbelastningar. Denna kalibreringsprocess möjliggjorde

en förfining av materialegenskaper, styvhetsegenskaper och randvillkor för att säkerställa att de numeriska simuleringarna på ett realistiskt sätt återgav det observerade strukturella beteendet. De kalibrerade modellerna integrerades därefter i det probabilistiska tillförlitlighetsramverket för att utvärdera återstående livslängd, utvecklingen av konstruktionens tillförlitlighet, reservkapacitet och tillåtna belastningsförhållanden för de undersökta brosystemen.

Experimentellt arbete

Undersökningar av Kalixbron

Kalixbron genomgick en omfattande experimentell undersökningskampanj före rivningen för att utvärdera dess faktiska tillstånd, återstående förspänningsnivåer, funktionsduglighet och långsiktiga nedbrytningsmekanismer. Bron var en förspänd betonglådbalkbro byggd med balanserad konsolutkragningsmetod och hade varit i kontinuerlig drift i cirka 66 år under nordiska miljö- och trafikförhållanden. Undersökningsprogrammet utformades inte bara för att karakterisera konstruktionens aktuella tillstånd, utan också för att tillhandahålla högkvalitativa data för kalibrering av finita elementmodeller och probabilistiska tillförlitlighetsanalyser.

Undersökningsprogrammet kombinerade destruktiva provningar (DT), icke-destruktiva provningar (NDT), övervakning, provbelastning och materialkaraktäriseringsmetoder för att få en heltäckande förståelse av broens beteende och nedbrytning.

Projektet omfattade:

- Mätningar av kvarvarande förspänning, utförda för att uppskatta den faktiska kvarvarande förspänningskraften i brokablarna efter årtionden i drift. Eftersom förluster av förspänning starkt påverkar driftsdugligheten och bärigheten, implementerades flera kompletterande tekniker för att förbättra tillförlitligheten i uppskattningarna.
- Materialprovning och karakterisering, inklusive betongprovtagning och laborietester för att bestämma faktisk tryckhållfasthet, styvhetsegenskaper och andra relevanta materialparametrar. Dessa tester möjliggjorde en jämförelse mellan konstruktionsantaganden och det faktiska materialbeteendet efter långvarig åldring.
- Provb belastning och bärighetsvärdering, där kontrollerade belastningsscenarier tillämpades på bron samtidigt som töjningar, förskjutningar och strukturell respons mättes. Dessa tester användes för att utvärdera den faktiska styvheten och verifiera funktionsdugligheten under kända belastningsnivåer.
- Övervakning under trafik, där brons respons mättes under driftsförhållanden för att fånga upp realistiska töjningsfördelningar, förskjutningsmönster och dynamiskt beteende orsakat av faktisk trafikbelastning.
- Icke-destruktiva testmetoder, inklusive tekniker som används för att bedöma det inre tillståndet, integriteten och förspänningsnivåerna utan att orsaka betydande skador på strukturen.

- Destruktiva provningsmetoder, som genomfördes lokalt i utvalda delar av bron för att direkt utvärdera kvarvarande förspänning och validera de icke-destruktiva mätningarna.
- Instrumenterings- och övervakningssystem, inklusive töjningsmätningar och förskjutningsövervakning som användes under hela testkampanjen för att registrera svaret under belastnings- och avlastningsfaserna.

Ett huvudfokus för undersökningarna av Kalixbron var uppskattningen av kvarvarande förspänning i det förspända betonglådbalk-systemet. Förspänningsförluster ackumuleras över tid på grund av krypning, krympning, relaxation av förspänningsstål och miljöeffekter, vilket gör en noggrann bedömning av kvarvarande förspänning avgörande för utvärderingen av brons långtidsprestanda.

Flera kompletterande metoder tillämpades:

- Kapning av spännarmering, där kontrollerade snitt gjordes lokalt i betongytan för att frigöra spänningar i det omgivande materialet. Den resulterande spänningsavlastningen mättes och användes för att uppskatta nivåerna av kvarvarande förspänning i förspänningskablar och den omgivande betongen.
- Betongkapningsmetoder, där utvalda förspänningstrådar försiktigt frigjordes från omgivande betong under kontrollerade förhållanden samtidigt som den resulterande töjningsförändringen övervakades. Detta gav direkt information om kvarvarande förspänningskrafter och möjliggjorde jämförelse med teoretiska uppskattningar.
- Övervakningsbaserade utvärderingar, där uppmätta reaktioner från provbelastning och trafikförhållanden under drift jämfördes med numeriska simuleringar för att bakåtberäkna troliga förspänningsnivåer och kalibrera FE-modellerna.

Resultaten visade på betydande skillnader mellan de förspänningsförluster som uppskattats enligt EU-normer och de experimentellt uppmätta kvarvarande förspänningsnivåerna. Detta belyste begränsningarna hos förenklade modeller för förspänningsförluster och visade vikten av fältmätningar och övervakningsbaserade bedömningsmetoder för åldrande förspända konstruktioner.

Betongens materialegenskaper utvärderades med hjälp av både destruktiva och icke-destruktiva metoder för att fastställa det faktiska tillståndet hos bromaterialen efter årtionden i drift. Kärnprover och laborietester användes för att utvärdera betongens tryckhållfasthet, styvhetsegenskaper och mekaniska beteende. Ytterligare icke-destruktiva metoder tillämpades för att bedöma materialets homogenitet och konstruktionens tillstånd utan omfattande ingrepp i bron.

De erhållna materialegenskaperna införlivades därefter i FE-modellerna och de probabilistiska tillförlitlighetsanalyserna genom bayesianska uppdateringsprocedurer, vilket möjliggjorde en mer realistisk återgivning av det faktiska strukturella beteendet och en minskning av osäkerheterna i samband med materialparametrarna.

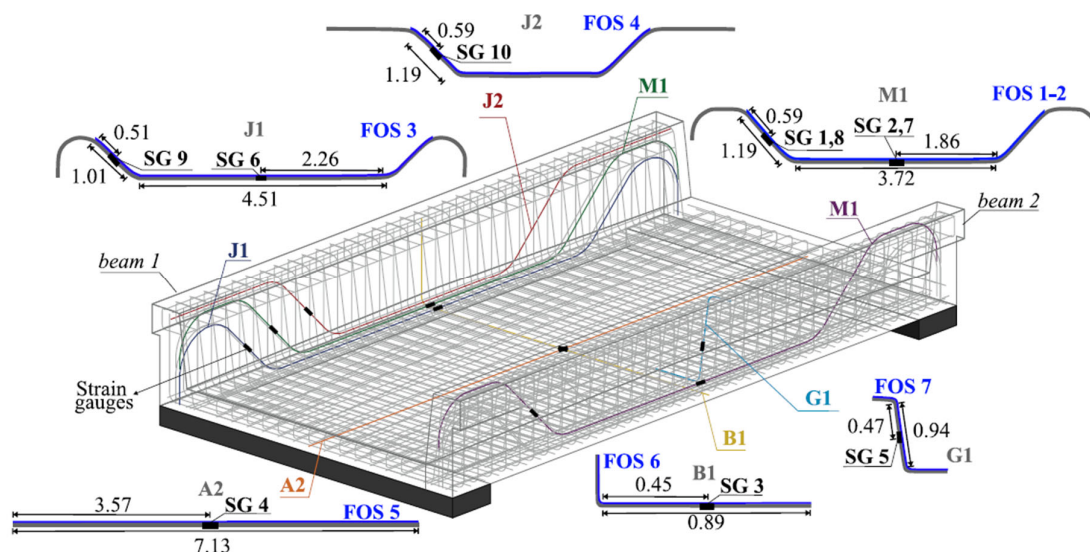
En järnvägsbro i form av en betongtrågbro gjöts full skala och provbelastades vid Luleå tekniska universitets laboratorier. Bron konstruerades som en kopia av de betongtrågbroar som ofta förekommer längs Malmbanan i norra Sverige, en av Europas mest trafikerade godstågskorridorer.

Broprovkroppen bestod av en fullskalig järnvägsbro av armerad betong med en spännvidd på 7,2 m och en bredd på 4,0 m. Bron inkluderade ett komplett järnvägsspårssystem med ballast, förspända betongslipers och järnvägsskenor för att återskapa realistiska förhållanden och belastningsfördelning.

Bron utsattes för cyklisk belastning som motsvarade de faktiska trafikförhållandena på Malbanan, inklusive realistiska axellaster och belastningsfrekvenser som motsvarar långvarig godstrafik.

Bron var utrustad med ett stort antal mätinstrument i form av flera kompletterande övervakningssystem för att kontinuerligt utvärdera det beteendet under hela tiden utmattningsprovning pågick.

Instrumenteringen omfattade (se figur 3):



Figur 3. Instrumenteringslayout inklusive distribuerade fiberoptiska sensorer, töjningsgivare, FBG-sensorer och LVDT:er.

- Distribuerade fiberoptiska sensorer (FOS) inbäddade i utvalda armeringsjärn för att mäta utvecklingen av den distribuerade töjningen med hög rumslig upplösning längs kritiska områden. Dessa sensorer möjliggjorde detaljerad observation av töjningslokalisering och utmattningsinducerad spänningsomfördelning.
- Traditionella töjningsgivare installerade i armerings- och betongområden för att validera töjningsmätningar och övervaka lokal spänningsutveckling under cyklisk belastning.
- Fiber Bragg Grating (FBG)-sensorer monterade på betongytor för att övervaka töjningsvariationer i betongen och utvärdera förändringar i tvärsnittsbeteende och styvhet över tid.
- LVDT-givare (Linear Variable Differential Transformers) användes för att kontinuerligt mäta brons vertikala och horisontella förskjutningar under belastningscykler och utvärdera styvhetsförsämringen.

Instrumenteringen möjliggjorde detaljerad övervakning av:

- Utvecklingen av töjningar i armering och betong under utmattningsbelastning.
- Sprickbildning och sprickutbredning i kritiska dragområden.
- Progressiv försämring av styvheten i plattor och längsgående balkar.
- Utvecklingen av vertikala förskjutningar under hela belastningskampanjen.
- Omfördelning av spänningar och inre krafter orsakade av lokal försämring och sprickbildning.

Bron utsattes i projektet för cirka 10 miljoner belastningscykler, vilket motsvarar ungefär 48 års järnvägstrafik på Malmbanan. Programmet för cyklisk belastning utformades för att återskapa realistiska spänningsintervall och trafikförhållanden som förekommer på järnvägsbroar i drift.

I försökskampanjen utvärderades:

- Ackumulering av utmattningsskador i armering och betong.
- Utveckling av nedböjning över tid.
- Förändringar i styvhet och respons.
- Återstående bärförmåga efter långvarig cyklisk belastning.
- Tillförlitlighetens utveckling under den simulerade livslängden.

De experimentella resultaten visade en progressiv utveckling av utmattningsskador i armeringen i kritiska dragområden i plattan och balkarna. Sprickbildning utvecklades gradvis under belastningskampanjen och åtföljdes av mätbar försämring av styvheten och ökade förskjutningar.

Övervakningssystemen visade att lokal försämring orsakade omfördelning av spänningar och inre krafter till angränsande strukturella områden, vilket illustrerar vikten av redundans och beteende på systemnivå i brokonstruktioner av armerad betong. Trots effekterna av lokal försämring bibehöll bron betydande global styvhet och integritet under hela testkampanjen.

En viktig iakttagelse var att bron fortsatte att uppvisa betydande bärförmåga och bevarade sin övergripande funktionalitet även efter att ha utsatts för belastningar som motsvarade cirka fem decenniers järnvägsdrift. Dessa resultat visade att befintliga broar av armerad betong kan ha väsentligt högre reservkapacitet och utmattningsmotstånd än vad som förutses av förenklade deterministiska, normbaserade metoder.

Finit elementmodellering och tillförlitlighetsanalys

Kalibrering av FE-modeller

Avancerade finita elementmodeller utvecklades för båda brofallstudierna och kalibrerades med hjälp av experimentella data och övervakningsdata som erhöles under fullskaliga testkampanjer. Syftet med kalibreringsprocessen var att säkerställa att de numeriska modellerna på ett realistiskt sätt återgav det observerade beteendet hos broarna under drift, provbelastning och utmattningsbelastning.

Kalibreringsförfarandet omfattade flera aspekter. Materialegenskaper som erhållits från laborietester och undersökningar på plats implementerades i de numeriska modellerna för att förbättra återgivningen av betongens styvhet, armeringens beteende och förspänningseffekter. Gränsvillkor och stödbeteende förfinades också med hjälp av uppmätta förskjutnings- och töjningsresponser som erhöles under provbelastning och driftsövervakning. Detta var särskilt viktigt för Kalixbron, där de faktiska stöd- och kontinuitetsförhållandena skilde sig från de förenklade antaganden som vanligtvis används i konventionella bedömningsförfaranden.

Kalibreringsprocessen omfattade även en jämförelse mellan uppmätta och simulerade responser, inklusive:

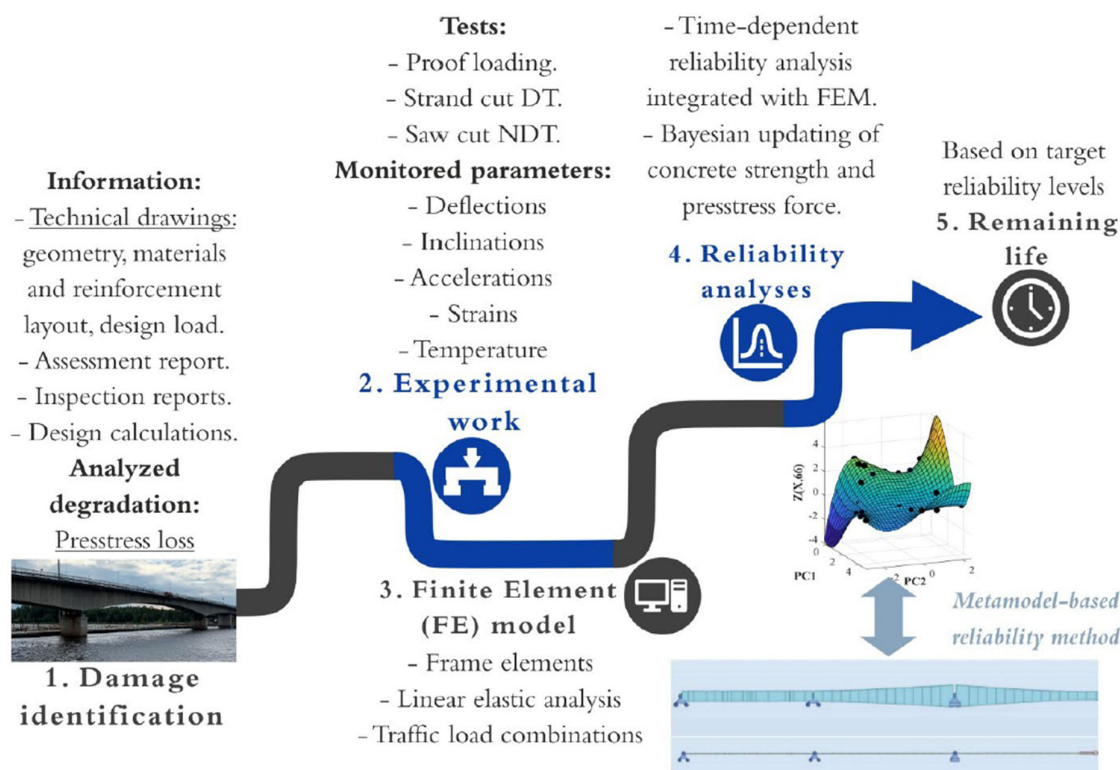
- Globalt förskjutningsbeteende under belastning.
- Lokala töjningsfördelningar i betong och armering.
- Styvhetsgenskaper hos plattor och balkar.
- Effekter av lastomfördelning efter sprickbildning och nedbrytning.
- Respons under cyklisk belastning.

För trågbron införlivades data från hela utmattningsbelastningen i kalibreringsprocessen, vilket gjorde det möjligt för FE-modellerna att återge den progressiva styvhetsförsämringen och sprickbildningen som observerats experimentellt. För Kalixbron uppdaterades modellerna med hjälp av mätningar av kvarvarande förspänning och experimentellt erhållna materialegenskaper.

De kalibrerade FE-modellerna visade god överensstämmelse med de uppmätta värden och integrerades därefter i de probabilistiska tillförlitlighetsanalyserna. Detta möjliggjorde en mer realistisk uppskattning av kapacitet, återstående livslängd, reservkapacitet och tillförlitlighetsutveckling över tid.

Tillförlitlighetsanalyser för Kalixbron

Tillförlitlighetsanalyserna för Kalixbron inriktades på den förspända betonglångbalkbrons långsiktiga funktionsduglighet, samtidigt som man uttryckligen beaktade förspänningsförluster, materialnedbrytning och osäkerheter kopplade till konstruktionens långtidsbeteende. Eftersom förspänningsförluster i hög grad påverkar funktionsdugligheten och bärigheten hos förspända betongbroar, syftade analyserna till att utvärdera hur uppdaterad information från fältmätningar påverkar den uppskattade tillförlitligheten hos konstruktionen. Figur 4 visar det ramverk som användes för Kalixbron:



Figur 4. Ramverk som användes för Kalixbron

Två huvudsakliga tillvägagångssätt jämfördes under hela studien. Det första bestod av en tidigare tillförlitlighetsanalys baserad på konventionella Eurokod-antaganden för förspänningsförluster, materialegenskaper och strukturellt beteende. I detta fall baserades de probabilistiska modellerna främst på teoretiska långtidsprognoser och standardmässiga konstruktionsantaganden. Det andra tillvägagångssättet bestod av en efterhandsanalys av tillförlitligheten, där övervaknings- och experimentella data som erhållits från broundersökningarna införlivades genom bayesianska uppdateringsprocedurer.

A posteriori-analyserna inkluderade uppdaterad information som erhöles från:

- Mätningar av kvarvarande förspänning med hjälp av armeringskapning och betongsågning.
- Materialkaraktisering genom destruktiva och icke-destruktiva provningar.
- Provbastningar och uppmätta deformationer.
- Uppdaterade uppskattningar av styvhet och randvillkor från kalibrering av FE-modellen.

Tillförlitlighetsanalyserna visade att integreringen av experimentellt erhöles information avsevärt förbättrade den uppskattade tillförlitligheten. De uppdaterade materialegenskaperna resulterade i betydande öknigar av tillförlitlighetsindex jämfört med de initiala analyserna som enbart baserades på konstruktionsantaganden. Resultaten visade särskilt att uppdateringen av betongens materialegenskaper ungefär fördubblade det uppskattade tillförlitlighetsindexet för de utvärderade gränstillstånden för användbarhet.

Införlivandet av mätningar av kvarvarande förspänning hade en ännu större inverkan på resultaten. Analyserna visade att den uppskattade tillförlitligheten ökade med cirka 201–264 % beroende på vilken mätteknik för förspänning och vilken uppdateringsstrategi som användes. Dessa resultat visade att konventionella förenklade metoder underskattade broens faktiska prestanda och bärighet.

Analyserna belyste också vikten av att införliva uppmätt information på plats i bedömningen av befintliga förspända betongbroar. De uppdaterade tillförlitlighetsanalyserna gav en mer realistisk bild av det faktiska tillståndet och visade att övervakningsbaserade metoder avsevärt kan minska osäkerheterna i samband med långsiktiga förspänningsförluster och nedbrytningsbeteende.

Utmattningsanalyser för trågbroar

Utmattningsanalyserna för den förstärkta betongtrågbron fokuserade på att utvärdera långtidsegenskaper, utmattningen och den återstående livslängden hos järnvägsbroar som utsätts för upprepade cykliska belastningar som är representativa för de verkliga trafikförhållandena längs Malmbanan.

Den föreslagna metodiken bestod av ett flernivåramverk för tillförlitlighet med successivt ökande nivåer av komplexitet och realism (se figur 4). Ramverket utvecklades för att utvärdera hur olika nivåer av information och modelleringsdetaljer påverkar prognoser för återstående livslängd och tillförlitlighetsuppskattningar.

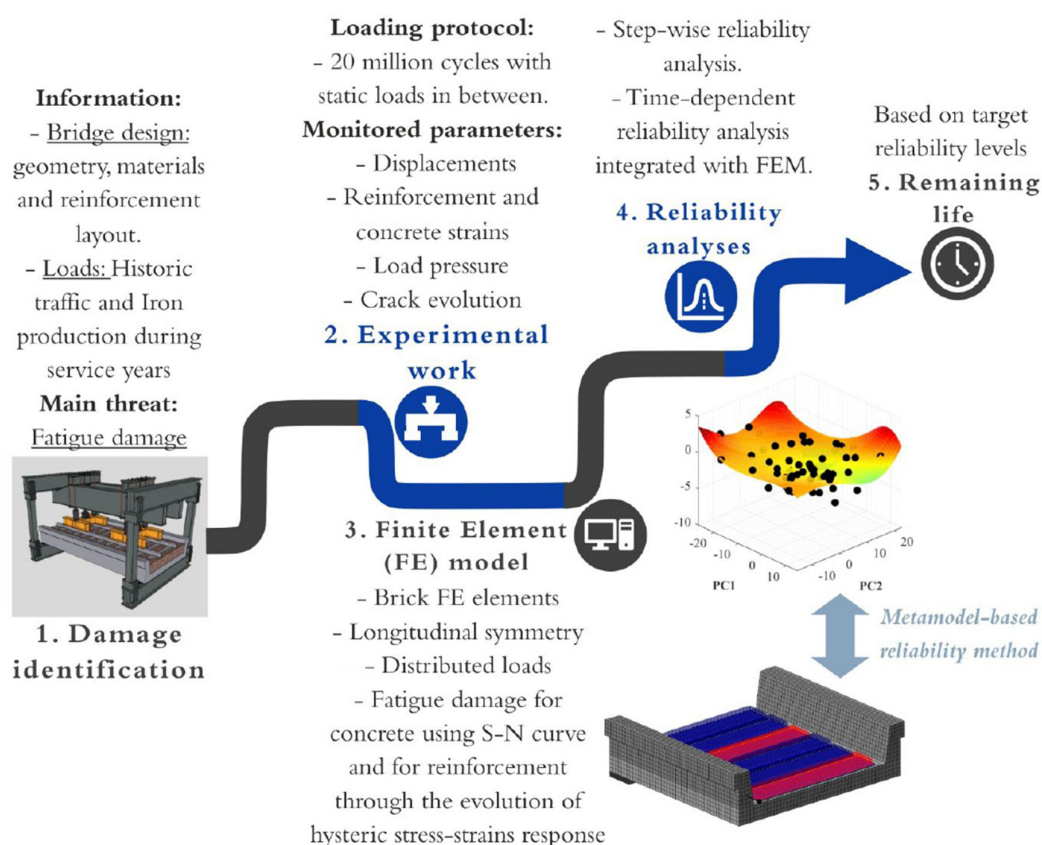
Den första nivån bestod av en analytisk S–N-kurvmetod baserad på konventionella utmattningsformler och Palmgren–Miners regel för skadeackumulering. I detta skede uppskattades utmattningslivslängden med hjälp av förenklade beräkningar av spänningsintervall och probabilistiska S–N-relationer för armeringens utmattningsbeteende.

Den andra nivån innefattade övervakningsbaserad spänningsutvärdering med hjälp av uppmätta töjningsdata som erhöles under försökskampanjen. Istället för att enbart förlita

sig på förenklade analytiska antaganden användes uppmätta armeringstöjningar och nedböjningar för att förfinas spänningssuppskattningarna och förbättra återgivningen av de faktiska belastningseffekterna som verkar på brokonstruktionen.

Den tredje nivån bestod av en FE-baserad tillförlitlighetsbedömning, där kalibrerade finita elementmodeller integrerades i det probabilistiska utmattningsanalysramverket. De kalibrerade FE-modellerna möjliggjorde simulering av realistiskt beteende, inklusive sprickbildning, försämrad styvhet, omfördelning av spänningar och progressiv ackumulering av utmattningsskador under cykliska belastningsförhållanden. Detta steg gav en betydligt mer detaljerad representation av brons beteende jämfört med analytiska metoder.

Den fjärde nivån introducerade tillförlitlighetsanalyser baserade på den information som erhöles från utmattningsförsöken. Eftersom bron framgångsrikt motstod cirka 10 miljoner belastningscykler utan kollaps eller kritiska fel, införlivades den observerade överlevnadsinformationen i det probabilistiska ramverket genom bayesianska uppdateringsprocedurer. Detta möjliggjorde ytterligare förfining av tillförlitlighetsuppskattningarna och prognoserna för återstående livslängd.



Figur 5. Ramverk som användes för fallet med trågbron

Resultaten visade att integreringen av övervakningsdata och kalibrerade FE-modeller avsevärt förbättrade prognosen för återstående utmattninglivslängd och tillåtna

trafikbelastningsförhållanden. Jämfört med förenklade analytiska metoder gav de övervakningsbaserade och FE-baserade metoderna:

- Förbättrad förståelse av mekanismerna för utmattnings och styvhetsutveckling.
- En mer realistisk återgivning av osäkerheterna i samband med utmattningen
- Mer exakt uppskattning av tillåtna axellaster.
- Förbättrad prognos av återstående livslängd.

Det slutliga tillförlitlighetsramverket förlängde den uppskattade återstående livslängden för bron med cirka 39 år jämfört med de initiala analytiska uppskattningarna och möjliggjorde en ökning av tillåtna axellaster med cirka 20 %. Dessa resultat visade vikten av att kombinera experimentell övervakning, FE-modellering och probabilistiska metoder vid utvärdering av åldrande järnvägsbroar som utsätts för långvarig utmattningsbelastning.

Studier av betydelse, redundans och robusthet

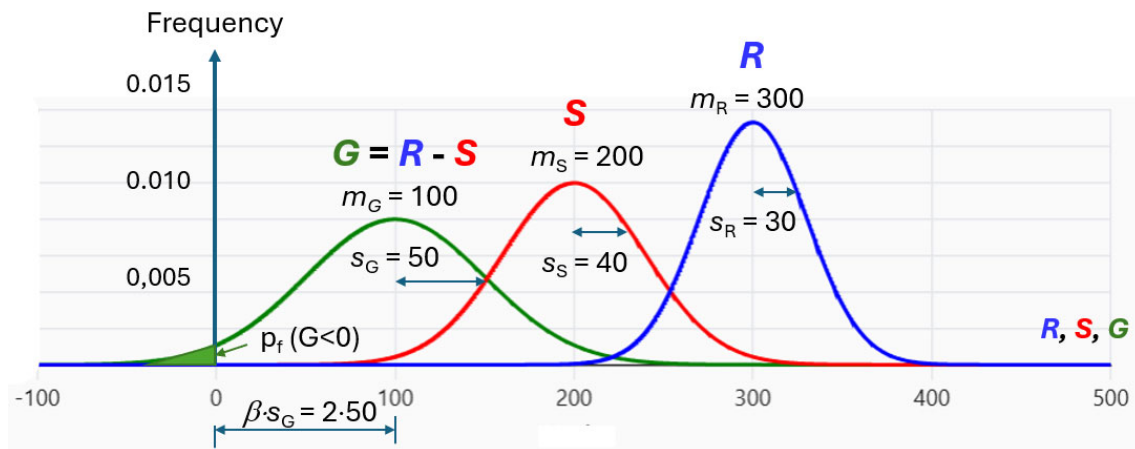
Utöver undersökningarna av återstående livslängd studerade projektet även sambandet mellan redundans, robusthet, tillförlitlighet och risk i åldrande brosystem som utsätts för progressiv nedbrytning. Syftet med denna del av projektet var att utvärdera hur olika prestationsindikatorer kan användas för att karakterisera sårbarhet och säkerhet hos befintliga brosystem.

En förspänd betongbro utsatt för kloridinducerad korrosion användes som den primära fallstudien för dessa analyser. Metodiken kombinerade icke-linjär finit elementanalys med metamodellbaserade tillförlitlighetsmetoder för att utvärdera både intakta och progressivt skadade bärlagssystem. Analyserna undersökte hur försämringen av enskilda komponenter påverkade brons totala prestanda och systemets tillförlitlighet.

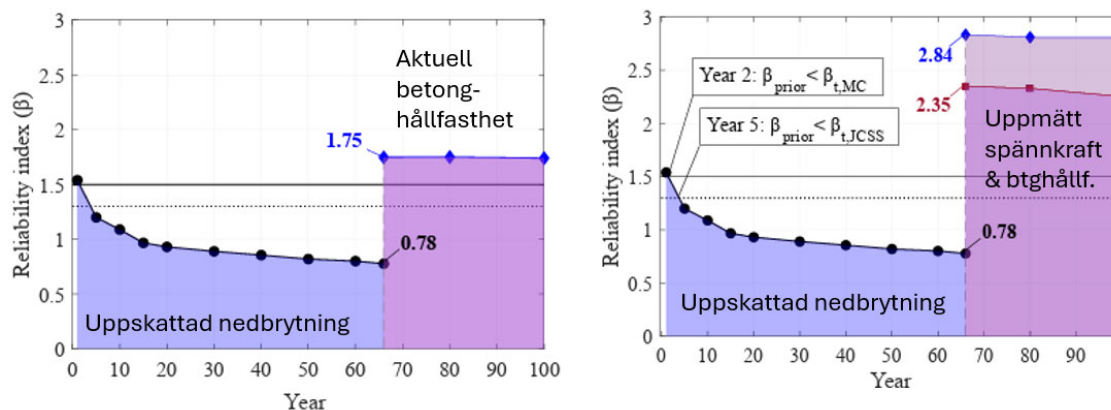
Olika deterministiska, tillförlitlighetsbaserade och riskbaserade indikatorer utvärderades och jämfördes under hela studien. Analyserna visade att olika indikatorformuleringar kan leda till väsentligt olika tolkningar av prestanda beroende på den valda metodiken och de underliggande antagandena. Resultaten visade särskilt att deterministiska indikatorer kanske inte fullt ut fångar upp osäkerheter och stokastiska nedbrytningseffekter, medan tillförlitlighets- och riskbaserade indikatorer ger en mer omfattande bild av systemets beteende och sårbarhet. I Figur 6, definieras begreppet säkerhetsindex β och i Figur 7 exemplifierar hur det har bestämts för Kalixbron

Arbetet belyste behovet av:

- Mer enhetliga formuleringar av indikatorer för redundans och robusthet.
- En tydlig tolkning och fysisk betydelse av de utvärderade indikatorerna.
- Överenskomna målvärden och bedömningskriterier för utvärdering av robusthet och redundans.



Figur 6. Säkerhetsindexet β definieras som medelvärdet delat med standardavvikelsen för Gränstillståndet (eller "Gapet") $G = R - S$, där R är bärförmågan (Resistansen) och S är lasten (från franska "Sollicitation"), dvs $\beta = m_G/s_G$. Funktionerna R , S och $G = R - S$ antas vara normalfördelade sannolikheter med medelvärdena m , standardavvikelserna s och ytan 1. För exemplet i figuren med $m_R = 300$, $m_S = 200$, $m_G = m_R - m_S = 100$ och $s_R = 30$, $s_S = 40$ och $s_G = (s_R^2 + s_S^2)^{1/2} = (2500)^{1/2} = 50$ erhålls att $\beta = m_G/s_G = 100/50 = 2$, vilket motsvarar att sannolikheten för brott (den gröna ytan där $G < 0$) är $p_f = 0,0228$ eller 2,28 fall av 100.



Figur 7. Säkerhetsindex β för Kalixbron som funktion av ålder. Kraven på $\beta \geq 1,5$ enligt *fib* Model Code (2010) underskrids redan efter 2 år och kraven enligt JCSS på $\beta \geq 1,3$ underskrids efter 5 år. Till vänster har bronns första 66 år beräknats med traditionella metoder fram till nutid (66 år). Därefter har den aktuella provade betonghållfastheten (63 MPa) beaktats i stället för den som mättes när bron byggdes (38 MPa). Detta medför att β ökar från 0,78 till 1,75. Till höger beaktas även att den kvarvarande förspänningskraften, istället för att enligt EU-norm beräknas till 212 kN, bestäms till 245 kN med stångkapningsmetod och till 233 kN med betongsågning. Detta höjer β ytterligare till 2,35 respektive 2,84. Sarmiento, 2025, 2026.

Resultaten visade också vikten av att betrakta brokonstruktioner som kompletta system snarare än isolerade element. Lastomfördelningsmekanismer, reservkapacitet och strukturell redundans visade sig spela en viktig roll för den övergripande säkerheten och robustheten hos åldrande brosystem som utsätts för progressiv försämring.

Huvudresultat

Projektet ledde till flera viktiga vetenskapliga och praktiska resultat.

Experimentell validering av broars beteende

Testkampanjerna i full skala gav värdefull information om flera kritiska fenomen som är svåra att fånga upp enbart med förenklade analytiska eller normbaserade metoder.

- **Utmattning:** De cykliska belastningsförsöken på järnvägsbron möjliggjorde kontinuerlig observation av hur utmattningsskador utvecklas i armerade betongbroar under miljontals belastningscykler. Genom att övervaka töjningsutvecklingen, sprickbildningen och styvhetsminskningen under hela belastningsprocessen gav projektet insikt i hur skador ackumuleras gradvis snarare än omedelbart. Testerna visade hur armeringsspänningarna ökade lokalt i kritiska områden medan den totala konstruktionen bibehöll en betydande global styvhet och bärförmåga. Detta bidrog till att förbättra förståelsen för hur utmattning påverkar brokonstruktioner i armerad betong som utsätts för realistisk järnvägstrafik.
- **Förluster av förspänning:** För Kalixbron gav försökskampanjerna sällsynt information i full skala om kvarvarande förspänningsnivåer i en befintlig 66 år gammal lådbalksbro. Genom att använda både destruktiva och icke-destruktiva metoder kunde man jämföra uppmätta förluster av förspänning med teoretiska uppskattningar baserade på konventionella normformler. Resultaten visade att de faktiska förlusterna av förspänning skilde sig avsevärt från förenklade antaganden, vilket understryker vikten av fältmätningar vid utvärdering av åldrande förspända konstruktioner.
- **Bärförmåga:** Experimenten gav detaljerad information om den verkliga bärförmågan under drift och vid cyklisk belastning. De uppmätta töjningsfördelningarna, förskjutningsmönstren och mekanismerna för lastomfördelning visade hur befintliga brosystem beter sig som kompletta system snarare än isolerade element. I synnerhet visade experimenten att lastomfördelning och redundans väsentligt bidrag till brons totala kapacitet.
- **Förlust av styvhet:** De upprepade cykliska testerna av trågbron möjliggjorde direkt observation av förlusten av styvhet över tid. De uppmätta förskjutningarna och töjningarna visade hur lokal försämring gradvis påverkade funktionen. Experimenten visade att även om lokala minskningar av styvheten inträffade på grund av sprickbildning och utmattningseffekter, behöll det totala brosystemet en betydande integritet och funktionalitet efter 10 miljoner belastningscykler.
- **Sprickutveckling:** Instrumenterings- och övervakningssystemen möjliggjorde kontinuerlig spårning av sprickbildning och sprickutbredning under hela utmattningsprocessen. Detta gav värdefull information om spricklokalisering,

tillväxthastigheter och samband mellan sprickbildning och töjningsutveckling i armering och betong. Observationerna förbättrade förståelsen för hur utmattningsskador utvecklas rumsligt i trågbroar av armerad betong.

- Lastomfördelning: En viktig iakttagelse från experimenten var brokonstruktionernas förmåga att omfördela laster efter att lokal försämring inträffat. När styvheten förändrades lokalt på grund av sprickbildning och utmattningseffekter omfördelades spänningar och krafter till angränsande konstruktionsområden. Denna iakttagelse visade vikten av redundans och reservkapacitet i befintliga brokonstruktioner och förklarade varför förenklade elementbaserade bedömningsmetoder kan underskatta den verkliga konstruktionsprestandan.

Sammantaget visade försökskampanjerna att befintliga broar kan ha betydligt högre reservkapacitet än vad som förutses av förenklade, normbaserade metoder. Resultaten visade också vikten av att integrera övervakning, experimentella data och analys på systemnivå vid utvärdering av den återstående livslängden för åldrande infrastruktur.

Förbättrade metoder för tillförlitlighet

De utvecklade metoderna visade flera viktiga fördelar jämfört med traditionella deterministiska metoder för brobedömning.

- Övervakningsbaserade tillförlitlighetsprognoser: Integreringen av övervakningsdata förbättrade tillförlitlighetsprognoserna avsevärt genom att minska osäkerheterna i samband med materialegenskaper, randvillkor, lastfördelningar och respons. Istället för att enbart förlita sig på konstruktionsantaganden eller konservativa normbaserade uppskattningar införlivade projektet uppmätta töjningar, förskjutningar och data om kvarvarande förspänning i tillförlitlighetsanalyserna. Detta resulterade i uppskattningar av tillförlitlighet som bättre återspeglade broarnas faktiska beteende.
- Bayesiansk uppdatering och minskning av osäkerhet: De bayesianska uppdateringsprocedurerna visade sig vara mycket effektiva för att minska osäkerheten i kritiska modellparametrar. Genom att kombinera tidigare antaganden med experimentella observationer förfinade analyserna sannolikhetsfördelningarna kopplade till betonghållfasthet, förspänningsförluster och bärighet. De uppdaterade modellerna visade väsentligt förbättrade tillförlitlighetsuppskattningar, vilket visade det praktiska värdet av att kombinera probabilistiska metoder med experimentella tester.
- FE-baserad tillförlitlighetsanalys: Projektet visade att tillförlitlighetsmetoder baserade på finita element ger betydligt mer realistiska bedömningar än förenklade beräkningar på elementnivå.
- Tidsberoende tillförlitlighetsanalys: Implementeringen av tidsberoende tillförlitlighetsanalys möjliggjorde en utvärdering av hur tillförlitligheten utvecklas över tid på grund av nedbrytningsprocesser som utmattning och förluster av förspänning. Istället för att utvärdera konstruktionen endast vid en enda tidpunkt kvantifierade det utvecklade ramverket utvecklingen av felprobabiliteten under hela den återstående livslängden. Detta gav en mer realistisk grund för underhållsplanering och uppskattning av återstående livslängd.

Förbättrad metamodellbaserad algoritm

Ett av projektets viktigaste metodologiska bidrag var utvecklingen av en förbättrad metamodellbaserad tillförlitlighetsalgoritm, specifikt utformad för tillförlitlighetsproblem som involverar beräkningskrävande finita elementmodeller. Traditionella tillförlitlighetsanalyser i kombination med icke-linjär finita elementanalys kräver ofta ett mycket stort antal FE-simuleringar för att noggrant uppskatta sannolikheter, vilket kan göra den praktiska implementeringen alltför tidskrävande och beräkningsmässigt kostsam, särskilt för komplexa brosystem.

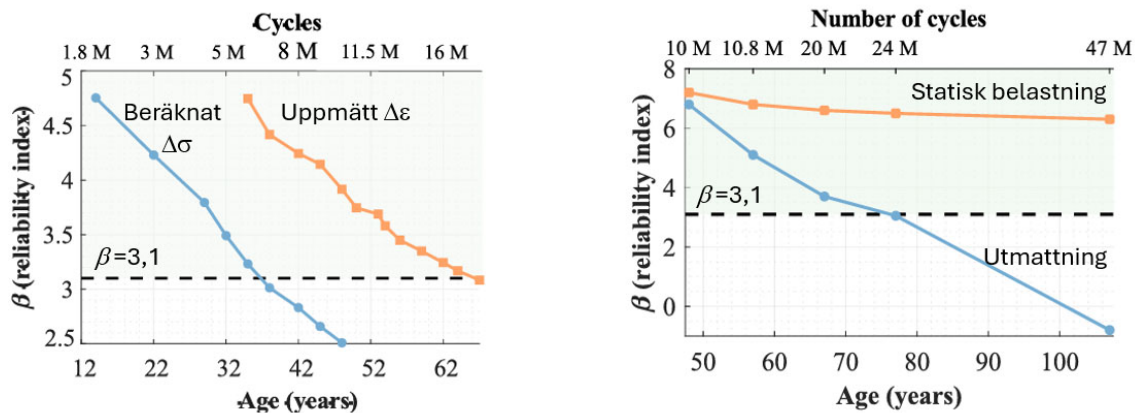
Den utvecklade metodiken hanterade dessa begränsningar genom att kombinera kriging-surrogatmodeller, adaptiva inlärningsfunktioner, kopulateori och adaptiva samplingsstrategier i ett enhetligt tillförlitlighetsramverk. Kriging-surrogatmodellerna användes för att approximera den strukturella responsen som erhöles från detaljerade FE-analyser, vilket därmed avsevärt minskade antalet direkta finita element-utvärderingar som krävdes under de probabilistiska simuleringarna. Adaptiva inlärningsfunktioner styrde beräkningen av surrogatmodellen genom att koncentrera ytterligare provtagningar till områden nära gränstillståndsytan och det mest sannolika felområdet, vilket förbättrade både konvergens och förutsägelens noggrannhet.

Ett viktigt bidrag från metodiken var införlivandet av kopulateori för att modellera statistiskt beroende mellan slumpvariabler. Detta möjliggjorde en mer realistisk representation av korrelerade osäkerheter associerade med materialegenskaper, belastningar och nedbrytningsparametrar, vilka är vanliga i praktiska brotekniska problem men ofta försummas i förenklade tillförlitlighetsanalyser.

Den föreslagna algoritmen visade en väsentligt förbättrad beräkningseffektivitet jämfört med konventionella metoder. Valideringsstudier visade att metodiken minskade antalet FE-simuleringar med cirka 67 % samtidigt som jämförbar noggrannhet i tillförlitlighetsuppskattningarna bibehölls. Det förbättrade konvergensbeteendet och den minskade beräkningskravet gör metodiken särskilt lämplig för tillförlitlighetsanalyser som involverar icke-linjära finita elementmodeller med implicita gränstillståndsfunktioner, där direkta Monte Carlo-baserade metoder annars skulle vara opraktiska.

Praktiska implikationer

Projektet visade att integrationen av övervakningssystem, kalibrerade finita elementmodeller och probabilistiska tillförlitlighetsmetoder kan ge betydande praktiska fördelar för infrastrukturägare, konsulter, entreprenörer och broförvaltare som ansvarar för bedömning och underhåll av åldrande broinfrastruktur, se Figur 8.



Figur 8. Säkerhetsindex β för betongtrågbron beräknat som funktion av ålder och antal belastningscykler. Till vänster från 12 år (1,8 Mcykler) till 62 år (16 Mcykler) med traditionella metoder med en **blå** lägre kurva från beräknade spänningsvidder $\Delta\sigma$ och en **orange** övre kurva från verkliga uppmätta töjningsvidder $\Delta\epsilon$. Till höger från 48 år (10 Mcykler) till 107 år (47 Mcykler) med nyutvecklade tillförlitlighetsmetoder. Den **orange** övre kurvan beaktar enbart statisk belastning (och är därför inte tillämplar). Den **blå** lägre kurvan sjunker under tillåtet värde $\beta = 3,1$ vid cirka 75 år och baseras på Palmgren-Miners delskadehypotes för utmattning. Sarmiento 2026, Sarmiento et al. 2026.

Ett av de viktigaste praktiska resultaten är möjligheten att få mer realistiska uppskattningar av återstående livslängd för befintliga brokonstruktioner. Konventionella deterministiska bedömningsmetoder bygger ofta på konservativa antaganden som kan underskatta den faktiska kapaciteten och leda till förhastade beslut om förstärkning eller utbyte. Genom att integrera övervakningsdata, experimentellt kalibrerade FE-modeller och probabilistiska analyser ger de utvecklade metoderna en mer exakt bild av broarnas faktiska tillstånd och bärighet. Detta gör det möjligt för infrastrukturägare att fatta bättre underbyggda beslut om underhåll, förstärkningsarbeten och driftsledning.

Metoderna har också direkta konsekvenser för underhållsplanering och resursfördelning. Mer tillförlitliga uppskattningar av nedbrytningshastigheter, utmattningsutveckling och tillförlitlighet gör det möjligt för broägare att prioritera ingrepp baserade på faktiska strukturella behov snarare än rent konservativa antaganden. Detta kan bidra till att optimera underhållsscheman för broar, minska onödiga ingrepp och förbättra fördelningen av ekonomiska resurser över bron.

För konsulter och ingenjörer som arbetar med brobedömning erbjuder de utvecklade metoderna förbättrade verktyg för att utvärdera prestanda och reservkapacitet. Integrationen av övervakningsbaserad FE-modellering och probabilistisk bedömning möjliggör en mer realistisk utvärdering av lastomfördelning, redundans och nedbrytningsbeteende, vilket ofta är svårt att fånga upp med förenklade normbaserade procedurer. Detta är särskilt viktigt för åldrande brosystem som utsätts för ökande trafikkrav och fortgående nedbrytning.

Projektet visade också att metoderna kan stödja högre tillåtna trafikbelastningar när detta motiveras av övervakning och tillförlitlighetsanalyser. I praktiken kan detta möjliggöra fortsatt drift av strategiskt viktig broinfrastruktur utan omedelbart utbyte, förutsatt att tillräcklig reservkapacitet och tillförlitlighetsnivåer kan påvisas genom avancerade bedömningsmetoder. För hårt trafikerade transportkorridorer som Malmbanan har detta viktiga ekonomiska och driftsmässiga konsekvenser.

Ur ett hållbarhetsperspektiv bidrar metoderna till en mer effektiv användning av befintlig infrastruktur genom att minska onödiga brobyten och förlänga livslängden för befintliga konstruktioner när så är lämpligt. Detta minskar materialförbrukning, byggrelaterade utsläpp och trafikstörningar i samband med stora brobytesprojekt.

Sammantaget visade projektet att avancerade, övervakningsbaserade tillförlitlighetsmetoder kan stödja säkrare, mer hållbara och mer kostnadseffektiva strategier för broförvaltning, samtidigt som de förser broteknikbranschen med praktiska verktyg för bedömning av åldrande infrastruktursystem.

Vetenskapliga resultat och spridning

Doktorsavhandling

Projektets huvudsakliga resultat var doktorsavhandlingen:

Sarmiento, S., 2026. *Remaining service life estimation of existing concrete bridges through probabilistic and reliability analyses*. Doctoral Thesis. Luleå University of Technology, Sweden..

Tillgänglig på:

<https://ltu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A2016004&dswid=718>

Vetenskapliga tidskrifts- och konferensartiklar

Projektet resulterade i flera fackgranskade tidskriftspublikationer, bland annat:

- Sarmiento, S., Thöns, S., Björnsson, I., González-Libreros, J. and Sas, G., 2024. *Comparison and Joint Evaluation of Importance, Redundancy and Robustness Indicators Applied to Aging Prestressed Concrete Bridges*. Nordic Concrete Research, 70(1), pp.147–171. <https://doi.org/10.2478/ncr-2024-0008>
- Sarmiento S, González-Libreros J, Sas G, Enoksson O & Højsten T. (2024). *Experimental determination of trough bridges pressure distribution*. IABMAS 2022, Bridge Safety, Maintenance, Management, Lifecycle, Resilience and Sustainability. Copenhagen, Denmark.
- Sarmiento, S., O'Connor, A., González-Libreros, J. and Sas, G., 2025. *An Improved Metamodel-Based Algorithm Using Copula Theory for Assessing Reliability Analysis of Structures using FEM*. Structural Engineering International. <https://doi.org/10.1080/10168664.2025.2517059>
- Sarmiento, S., Agredo-Chávez, A., Thiery, F., González-Libreros, J., Wang, C. and Sas, G., 2025. *Time-dependent reliability of a prestressed concrete bridge*

incorporating residual prestress and material properties updates for service limit state assessment. Structure and Infrastructure Engineering.
<https://doi.org/10.1080/15732479.2025.2571887>

- Sarmiento, S., González-Libreros, J., Wang, C., Elfgren, L., Enoksson, O., Höjsten, T., Andersson, L.-O. and Sas, G., 2025. *Experimental and reliability analyses for fatigue-induced damage in reinforced concrete trough bridges.* Case Studies in Construction Materials, 23, e05319. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05319>
- Sarmiento, S., González-Libreros, J., Wang, C., Elfgren, L., Enoksson, O., Höjsten, T., Andersson, L.-O. and Sas, G., 2026. *Multi-level fatigue reliability assessment of reinforced concrete railway bridges.* Structural Concrete. <https://doi.org/10.1002/suco.70562>

Slutsatser

I detta projekt utvecklades och validerades avancerade metoder för att bedöma återstående livslängd och strukturell tillförlitlighet hos befintliga betongbroar genom integration av fullskaleförsök, övervaknings- och instrumenteringssystem, finit elementmodellering, tidsberoende tillförlitlighetsanalys, bayesianska uppdaterings-tekniker och metamodellbaserade probabilistiska metoder. Kombinationen av dessa tillvägagångssätt möjliggjorde en mer realistisk representation av beteende, nedbrytningsprocesser och osäkerheter som påverkar åldrande brosystem som utsätts för långvarig driftbelastning.

Forskningen visade att konventionella deterministiska brobedömningsförfaranden kan underskatta den faktiska kapaciteten och tillförlitligheten hos befintliga brosystem avsevärt. Däremot möjliggjorde integrationen av övervakningsdata, experimentellt kalibrerade numeriska modeller och probabilistiska tillförlitlighetsmetoder en mer exakt uppskattning av strukturell prestanda och återstående livslängd genom att uttryckligen beakta osäkerheter förknippade med materialegenskaper, nedbrytningsmekanismer, trafikbelastning och miljöeffekter.

En av de viktigaste slutsatserna från projektet var att befintliga brosystem kan ha en betydligt högre reservkapacitet än vad som förutses med förenklade, normbaserade metoder. Detta var särskilt tydligt i fullskaliga utmattningsprovningar av den armerade betongtrågbron, där konstruktionen bibehöll sin övergripande funktionalitet och integritet även efter att ha utsatts för cyklisk belastning motsvarande cirka 48 års järnvägstrafik. Resultaten visade att beteendet på systemnivå, mekanismer för lastomfördelning och redundans bidrar väsentligt till brokonstruktionernas faktiska kapacitet och motståndskraft och inte fångas upp på ett adekvat sätt i traditionella elementbaserade bedömningar.

Projektet visade också att tillförlitlighetsanalyser baserade på övervakningsdata avsevärt förbättrar förutsägelsernas noggrannhet. Genom att införliva uppmätta töjningar, förskjutningar, data om kvarvarande förspänning och experimentellt erhållna materialegenskaper i de probabilistiska analyserna minskades osäkerheterna kring motståndskraft och nedbrytningsprocesser avsevärt. I undersökningarna av Kalixbron gav de uppdaterade tillförlitlighetsanalyserna betydligt högre och mer realistiska

tillförlitlighetsuppskattningar jämfört med analyser som enbart baserades på konventionella konstruktionsantaganden och teoretiska beräkningar av förspänningsförlust.

Integrationen av finita elementmodellering med probabilistisk tillförlitlighetsanalys visade sig vara en särskilt värdefull metod för praktisk brobedömning. De kalibrerade FE-modellerna möjliggjorde realistisk simulering av icke-linjärt strukturellt beteende, sprickbildning, försämrad styvhet, omfördelning av inre krafter och progressiv utmattningsskada. I kombination med probabilistiska metoder gav dessa modeller en bättre förståelse för hur tillförlitlighet utvecklas över tid på grund av nedbrytningsprocesser. De metoder som utvecklats inom projektet erbjuder därför praktiska verktyg för infrastrukturägare och konsulter att utvärdera befintliga brosystem mer realistiskt och stödja mer hållbara strategier för broförvaltning. Genom att minska onödig konservatism kan metoderna bidra till att förlänga broars livslängd när det är motiverat, förbättra prioriteringen av underhåll, optimera fördelningen av underhållsresurser och möjliggöra mer exakta uppskattningar av tillåtna trafikbelastningar för strategiskt viktig infrastruktur.

Projektet lyfte vidare fram den väsentliga roll som fullskale-provningar spelar för valideringen av avancerade metoder för brobedömning. De experimentella kampanjerna gav detaljerad information om faktiskt strukturellt beteende, mekanismer för utmattningsförsämring, styvhetsutveckling, sprickbildning och effekter av lastomfördelning som skulle ha varit svåra att återge enbart med hjälp av förenklade analytiska antaganden. De fullskaliga experimenten möjliggjorde också kalibrering och validering av finita elementmodeller och probabilistiska nedbrytningsmodeller, vilket avsevärt förbättrade tillförlitligheten hos de numeriska analyserna.

Tillämpningen av bayesianska uppdateringsmetoder visade att experimentella data och övervakningsdata avsevärt kan minska osäkerheten vid uppskattningen av återstående livslängd. Genom att uppdatera sannolikhetsfördelningarna för viktiga parametrar med hjälp av mätdata blev tillförlitlighetsanalyserna mer representativa för broarnas faktiska skick. Detta visade sig vara särskilt viktigt för åldrande broar av förspänd betong, där osäkerheter kopplade till långtidsförluster av förspänning har stor inverkan på funktionsduglighet och tillförlitlighet.

Ett annat viktigt bidrag från projektet var utvecklingen av en förbättrad metamodellbaserad tillförlitlighetsmetodik som effektivt kan koppla samman sannolikhetsanalyser med beräkningskrävande finita elementmodeller. Metodiken minskade beräkningsbehovet avsevärt samtidigt som hög noggrannhet bibehölls, vilket visade på en stark potential för praktisk tillämpning i avancerade brobedömningsapplikationer som involverar icke-linjär FE-modellering och implicita gränstillståndsfunktioner.

Sammantaget bidrog projektet till en förbättrad förståelse av utmattningsbeteendet hos järnvägsbroar av armerad betong, förluster av förspänning i åldrande förspända betongkonstruktioner, tillförlitlighetens utveckling över tid, strukturell redundans och robusthet samt probabilistisk uppskattning av återstående livslängd. De metoder som utvecklats inom projektet stödjer en mer tillförlitlig, hållbar och kostnadseffektiv infrastrukturförvaltning genom att möjliggöra förbättrad underhållsplanering med

mindre behov av förstärkningsåtgärder, och bättre underlag för beslut om renovering och utformning av drift av åldrande brosystem.

Rekommendationer och framtida arbete

Projektet identifierade flera viktiga områden där ytterligare forskning och metodutveckling behövs för att förbättra bedömningen och den långsiktiga förvaltningen av befintlig broinfrastruktur. En viktig inriktning gäller integrationen av mer avancerade miljöförstörelsemodeller som kan representera kombinerade försämringsmekanismer som korrosion, frostsador, fuktinträngning, alkali-silicereaktioner och utmattnings effekter. Framtida studier bör också undersöka hur stokastiska miljöfaktorer och klimatrelaterade förändringar påverkar broarnas långsiktiga tillförlitlighet och funktionsduglighet.

En annan viktig forskningsinriktning handlar om att utvidga de utvecklade metoderna från enskilda brobedömningar till tillförlitlighet på nätverksnivå och tillämpningar för broförvaltning. En sådan utveckling skulle göra det möjligt för infrastrukturägare att utvärdera tillförlitlighet, risk och underhållsprioriteringar för stora brobestånd samtidigt som man tar hänsyn till begränsade budgetar och driftsmässiga begränsningar. Genom att koppla samman tillförlitlighetsanalyser med metoder för optimering av livscykelkostnader skulle beslutsfattandet kunna förbättras ytterligare genom att man balanserar strukturell säkerhet, underhållskostnader, miljöpåverkan och strategier för förlängning av livslängden.

Projektet identifierade också en stor potential för att integrera metoder för artificiell intelligens och maskininlärning med probabilistiska tillförlitlighetsanalyser och strukturella övervakningssystem. AI-stödda metoder skulle kunna stödja automatiserad tolkning av övervakningsdata, identifiering av nedbrytningsmönster, förutsägelse av framtida beteende och optimering av underhållsplanering. Dessutom bör framtida forskning fokusera på integration av realtidsövervakning och utveckling av digitala tvillingmetoder för brobedömning, vilket möjliggör kontinuerlig uppdatering av modeller och tillförlitlighetsprognoser under brokonstruktionernas hela livslängd.

Det krävs också vidareutveckling av utmattningsmodeller för brokonstruktioner i armerad betong, särskilt för broar som utsätts för mycket varierande trafikförhållanden och kombinerade nedbrytningsmekanismer. Slutligen bör de metoder som utvecklats inom detta projekt utvidgas och valideras för ytterligare typer av broar och konstruktionssystem för att utvärdera deras bredare tillämplighet inom praktisk broteknik och infrastrukturförvaltning.

Industriell implementering

För praktisk implementering inom broteknikbranschen bör framtida insatser fokusera på att förenkla integrationen av avancerade probabilistiska metoder i befintliga tekniska arbetsflöden och broförvaltningsrutiner. Även om de metoder som utvecklats inom projektet visade betydande fördelar jämfört med traditionella deterministiska tillvägagångssätt, kräver praktisk tillämpning tekniska verktyg och arbetsflöden som är tillgängliga, beräkningsmässigt effektiva och kompatibla med nuvarande branschpraxis.

Ett viktigt steg framöver är därför utvecklingen av mer användarvänliga tillförlitlighets- och bedömningsverktyg som gör det möjligt för infrastrukturägare, konsulter och entreprenörer att genomföra probabilistiska och övervakningsbaserade analyser utan att behöva omfattande expertis inom tillförlitlighetsteori eller avancerade numeriska metoder. Standardisering av övervakningsrutiner, instrumenteringsstrategier och databehandlingsmetoder är också nödvändig för att underlätta en bredare implementering av övervakningsbaserade metoder för brobedömning.

Dessutom finns det ett behov av praktiska riktlinjer och rekommendationer avseende FE-baserade metodiker för brobedömning, särskilt för icke-linjär finita elementmodellering av befintliga konstruktioner som utsätts för nedbrytning och utmattningsbelastning. Sådana riktlinjer skulle hjälpa broingenjörer att implementera avancerade bedömningstekniker på ett mer konsekvent och tillförlitligt sätt. Framtida arbete bör också fokusera på integration av probabilistiska metodiker och övervakningssystem i befintliga brohanteringssystem för att stödja långsiktig infrastrukturplanering och underhållsoptimering på både projekt- och nätverksnivå.

Allmänna rekommendationer

Baserat på projektets resultat rekommenderas att framtida strategier för brobedömning och förvaltning i allt högre grad införlivar övervakning, probabilistiska tillförlitlighetsmetoder, fullskalig experimentell validering och FE-baserade tillförlitlighetsanalyser. Projektet visade tydligt att övervakningsbaserade metoder ger betydligt mer realistiska uppskattningar av prestanda, återstående livslängd och reservkapacitet än konventionella deterministiska metoder som enbart baseras på konstruktionsantaganden.

Forskningen lyfte också fram vikten av att kombinera övervakningsdata, experimentella tester och kalibrerade numeriska modeller för att minska osäkerheterna kring materialegenskaper, nedbrytningsprocesser, förluster av förspänning och strukturellt beteende. Underhållsplanering baserad på övervakning kan därför förbättra både säkerheten och hållbarheten hos broinfrastrukturen genom att möjliggöra en mer exakt identifiering av kritiska strukturer och en mer effektiv fördelning av underhållsresurser.

Sammantaget visar de metoder som utvecklats inom detta projekt på en stor potential att förbättra den långsiktiga förvaltningen av åldrande broinfrastruktur genom mer tillförlitliga bedömningsförfaranden, optimerad underhållsplanering och en mer hållbar användning av befintliga konstruktionstillgångar.

Referenser

- Bagge, N., Popescu, C. and Elfgren, L., 2017. *Structural assessment procedures for existing bridges: Experiences from failure tests of the Kiruna Bridge*. PhD Thesis. Luleå University of Technology.
- Bell B, Bien J, Cremona C, Feltrin G, Jensen, J S, Kiviluoma R, Niederleithinger E, Olofsson J, Paulsson B, Täljsten B, Sas G & Elfgren L, 2023. Sustainable Bridges – Past and Future. Reflections on a European Project 2003 – 2007. IABSE

- Congress New Delhi 2023, p. 690–698, <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1819409/FULLTEXT01.pdf>
- Biondini, F. and Frangopol, D.M., 2016. Life-cycle performance of deteriorating structures and infrastructure systems. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(1), pp.1–3.
 - Casas, J.R. and Cruz, P.J.S., 2003. Fiber optic sensors for bridge monitoring. *Journal of Bridge Engineering*, 8(6), pp.362–373.
 - Cervenka, V., 2013. Reliability-based non-linear analysis according to fib Model Code 2010. *Structural Concrete*, 14(1), pp.19–28.
 - Chen, X. and Omenzetter, P., 2013. A framework for reliability assessment of an in-service bridge using structural health monitoring data. *Key Engineering Materials*, 558, pp.39–51.
 - Chen, Y., Yang, H., Fu, W., Luo, Y., Ma, Z. and Zheng, B., 2025. Gaussian processes-based Bayesian updating framework for time-dependent reliability assessment of aging bridges with limited inspection data. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 81.
 - Cheung, M.S. and Kyle, B.R., 1996. Service life prediction of concrete structures by reliability analysis. *Construction and Building Materials*.
 - Daescu, C., Gonzalez-Libreros, J., Wang, C., Agredo-Chavez, A., Kovarc, J., Nilsson, L., Larsson, T., Elfgren, L., Cervenka, J., and Sas, G., 2025, Multilevel evaluation procedure for the demolition of prestressed concrete bridges: the case of the Kalix bridge in Northern Sweden. *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 21, Nos. 7–8, 1234–1251, <https://doi.org/10.1080/15732479.2025.2474695>
 - Elfgren, Lennart, 2015, Fatigue Capacity of Concrete Structures: Assessment of Railway Bridges. Research Report, Luleå University of Technology, 103 p. <https://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:997704/FULLTEXT02.pdf>
 - Elfgren L, Täljsten, B, Blanksvärd T, Sas G, Nilimaa J, Bagge N, Tu Y, Puurula A, Häggström J & Paulsson B, 2018, Load testing used for quality control of bridges. COST TU 1406, Wroclaw. <https://www.divaportal.org/smash/get/diva2:1177454/FULLTEXT02>
 - Ereiz, S., Duvnjak, I. and Fernando Jiménez-Alonso, J., 2022. Review of finite element model updating methods for structural applications. *Structures*, 41, pp.684–723.
 - Galik, W.D. and Calvi, P.M., 2024. Corrosion and fatigue coupling: Assessment of a prestressed concrete cable stay. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 38(1), 04023064.
 - Jing J, Guo T, Wang C, Gonzalez-Libreros J, Elfgren L, Sas G, 2026, "Fatigue Properties and Degradation Models for Steel Reinforced Concrete Structures: A Review," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* (2026): 1–34, <https://doi.org/10.1111/ffe.70301>.
 - Larsson, T., Nilsson, L., Sas, G., Gonzalez-Libreros, J., Ohlsson, U., Daescu, C., & Elfgren, L., 2023, Demontering av E4-bron över Kalix älv. Erfarenhetsåterföring för underhåll och nybyggnad av förspända betongbroar, *SBUF projekt 13939*. <https://www.sbuf.se/projekresultat/projekt?id=5440543b-e3bf-4ebc-a76c-2dffd81d2909>
 - Liu D, Wang C, Gonzalez-Libreros J, Guo T, Cao J, Tu Y, Elfgren L, Sas G, 2023. "A Review of Concrete Properties Under the Combined Effect of Fatigue and Corrosion from a Material Perspective," *Construction and Building Materials* **369** (2023): 130489. <https://doi.org.10.1016/j.conbuildmat.2023.130489>

- Marx M. 2024, Carola Bridge collapse and implications for infrastructure assessment.
https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/die_fakultaet/news/gutachten-zum-einsturz-der-carolabruecke-prof-steffen-marx-stellt-untersuchungsergebnisse-vor?set_language=en
- Plos, M. and Gylltoft, K., 2006. Evaluation of shear capacity of a prestressed concrete box girder bridge using non-linear FEM. *Structural Engineering International*, 16(3), pp.213–221.
- Rackwitz, R., 2000. Optimization – the basis of code-making and reliability verification. *Structural Safety*, 22(1), pp.27–60.
- Sanayei, M., Khaloo, A., Gul, M. and Catbas, F.N., 2015. Automated finite element model updating of a scale bridge model using measured static and modal test data. *Engineering Structures*, 102, pp.66–79.
- Sarmiento, S., 2026. *Remaining service life estimation of existing concrete bridges through probabilistic and reliability analyses*. Doctoral Thesis. Luleå University of Technology, Sweden. <https://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:2016004/FULLTEXT01.pdf>
- Sarmiento, S., Thöns, S., Björnsson, I., González-Libreros, J. and Sas, G., 2024. Comparison and Joint Evaluation of Importance, Redundancy and Robustness Indicators Applied to Aging Prestressed Concrete Bridges. *Nordic Concrete Research*, 70(1), pp.147–171.
- Sarmiento, S., O'Connor, A., González-Libreros, J. and Sas, G., 2025a. An Improved Metamodel-Based Algorithm Using Copula Theory for Assessing Reliability Analysis of Structures using FEM. *Structural Engineering International*.
- Sarmiento, S., González-Libreros, J., Wang, C., Elfgren, L., Enoksson, O., Højsten, T., Andersson, L.-O. and Sas, G., 2026. Multi-level fatigue reliability assessment of reinforced concrete railway bridges. *Structural Concrete*.
- Sas, G., Gonzalez-Libreros, J., Elfgren, L., 2022, Gamla bron över Kalix älv – Kalibrering av mät- och analysmetoder, *Bygg & Teknik*, årg 114,4, 3 sid.
- Sas, G., Gonzalez-Libreros, J., Wang, C., Pinar, M., Editors (2024). Condition assessment of existing bridges. A Case study of the Kalix bridge. *Research Report, Luleå University of Technology*, 228p. <https://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1859871/FULLTEXT01.pdf>
- Šomodíková, M., Lehký, D., Doležel, J. and Novák, D., 2016. Modeling of degradation processes in concrete: Probabilistic lifetime and load-bearing capacity assessment of existing reinforced concrete bridges. *Engineering Structures*, 119, pp.49–60.
- Teixeira, R., Nogal, M. and O'Connor, A., 2021. Support vector machine in structural reliability analysis: A review. *Reliability Engineering & System Safety*.
- Wang, C., Frangopol, D.M. and others, 2021. Time-dependent reliability assessment methodologies for deteriorating bridge structures. *Structural Safety*. Springer, Cham, Switzerland.