

Dokumentstyrning:	
Projektnamn	iBridge - Digitala och uppkopplade broar för en effektiv och intelligent förvaltning
Organisation	IoTBridge AB
Organisationsnummer	559205-0156
Adress	Svärdvägen 3A,
Projektledare/kontaktperson	Gunnar Johansson
E-post	gunnar.johansson@iotbridge.se
Telefonnummer	004794506521
Firmatecknare/ansvarig chef	Peter Rosengren
Handläggare på Vinnova	Lejla Cengic
Vinnova Ärendenummer	Diarienummer: 2020-00376

iBridge - Digitala och uppkopplade broar för en effektiv och intelligent förvaltning

1 Projektets bakgrund och syfte

Trafikverket och Sveriges kommuner förvaltar tillsammans över 29 000 broar, därtill kommer enskilt ägda broar samt broar ägda av svenskt näringsliv. Statusen på vår broinfrastruktur har stor betydelse för svensk industris konkurrenskraft. En analys av åldersfördelningen visar att nästan 50% av våra broar är äldre än 50 år och att antalet broar som uppnår sin förväntade livslängd ökar för varje år. Kostnaderna för inspektioner och underhållsåtgärder väntas stiga, en trend som redan nu syns i Trafikverkets data som en brist på kapitalvärde för brobeståndet i vägnätet (Trafikverket, 2020c).

Fysiska inspektioner är dyra och för med sig kostnader för trafikregleringar och trafikstörningar. I dag inrapporteras resultat av fysiska inspektioner och åtgärdsplaner manuellt in i Trafikverkets broförvaltningssystem BaTMan (Trafikverket 2020a). Manuella arbetsprocesser är tidskrävande, dyra och resulterar ofta i ofullständiga eller otillförlitliga beslutsunderlag. Med uppkopplade sensorer möjliggörs en kontinuerlig informationsförsörjning och automatisk analys och rapportering. Dessutom möjliggörs användning av avancerade algoritmer och maskinlärning som ger en djupare insikt om varje specifik bro-objekts status och åtgärdsbehov. Resultaten väntas leda till lägre kostnader vid förvaltning av det åldrande brobeståndet, förlängning av broarnas uppskattade livslängd och minskad klimatpåverkan.

Att ändra inarbetade arbetsprocesser är krävande. Ett specifikt mål med projektet har varit att bereda väg för introduktion av digital sensorbaserad lösning genom fullskalig demonstration vid Västerbron i Stockholm, se Figur 1. Västerbron förvaltas av Stockholms Stad och är ett exempel på en bro med oviss bärförmåga och där underhållsarbeten medför stora konsekvenser för trafiken.



Figur 1. Västerbron i Stockholm mellan Kungsholmen och Södermalm.

Projektet förväntas resultera i en påskyndad industrialisering av ny teknologi som bidrar till ökad effektivitet och klimatneutralitet.

iBridge har koordinerats av IoT Bridge AB, med KTH Brobyggnad, CNet Svenska AB, Stockholm stad och Trafikverket som samarbetspartners. Resultaten är av direkt strategisk betydelse för behovsägarna Trafikverket, Sveriges kommuner och svensk industri.

2 Kartläggning av besiktningsverksamhet för broinfrastruktur i Stockholm

Inledning och syfte

Broar är en ofta en kritisk del av det urbana trafiksystemet. Broar kopplar samman regional eller nationell transportinfrastruktur till en helhet som möjliggör värdeskapande resor och transporter.

Broarna i Stockholmsregionen ägs antingen av Trafikverket, Region Stockholm eller Stockholm stad, beroende av om bron är en del av det nationella trafikinätet, regionala kollektivtrafiksystemet eller det kommunala trafikinätet. Ägarna ansvarar för att infrastrukturen är säker och att dess funktion upprätthålls genom att bedriva en långsiktig och effektiv förvaltning.

Informationsinsamling sker genom regelbundna fysiska inspektioner och utredningar, som beslutsunderlag. Trafikverket utvecklar anvisningar för broinspektioner och dokumentation registreras i Trafikverkets bro- och tunnelförvaltningssystem "BaTMan", oberoende av vem som äger bron.



Kostnaden för förvaltningsverksamheten utgörs av kostnader för inspektörer samt eventuell trafikregleringar och möjligen störningar i trafiksystemet. Det finns även kostnader förknippade med administration och upphandlingar. Genom att instrumentera broar med uppkopplade sensorer kan ett digitalt informationsflöde genereras som underlag för en automatiserad bedömning. En digital informationsprocess ger en annan typ av information, en annan kostnadsbild och förutsätter en annan arbetsprocess i verksamheten.

Det övergripande målet med projektet iBridge är att i samverkan med behovsägare analysera hur en digital instrumentering och automatiserad analys bäst kan komplettera dagens manuella besiktnings-verksamhet. Projektets målsättning är att bidra till en lägre långsiktig kostnad för förvaltning av vår broinfrastruktur.



Kartläggningen av stadens besiktningsverksamhet baseras på relevanta dokument, genomförda djupintervjuer med representanter från Trafikkontoret Stockholm, leverantörer av inspektions- och utrednings-tjänster samt Trafikverket. Avslutningsvis har projektet hämtat information ut Trafikverkets förvaltningssystem BaTMan.

Verksamheten i staden

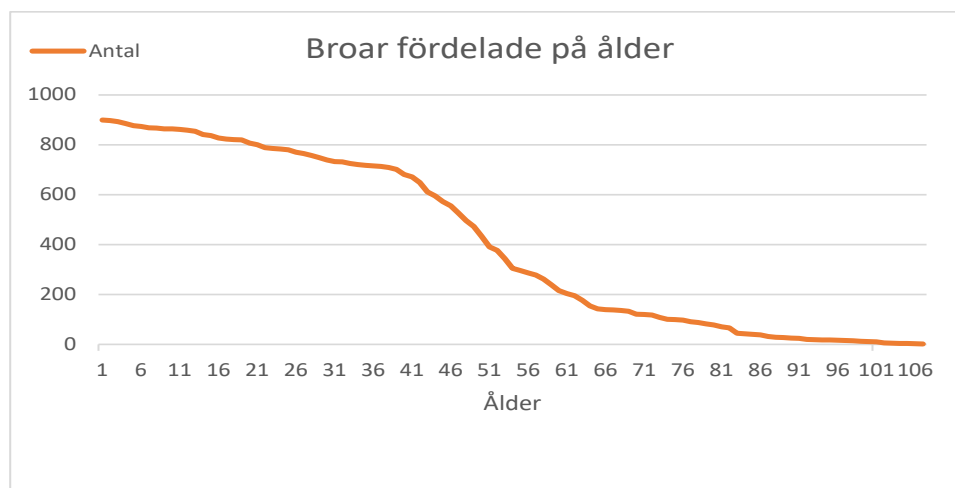
Stockholms broar är en kritisk del av stadens infrastruktur och dessutom ofta viktiga landmärken för staden. Många broar byggdes under 1930-talet samt under stadens expansion under 1960-1970-talet. Ålder i kombination med förslitning, typ av byggnadsteknik, material och produktionsmetod har stor betydelse för underhållsbehovet av stadens broar. Det höga markutnyttjande i Stockholm har resulterat i svårtillgängliga och i vissa fall tekniskt komplexa konstruktioner. Avstängningar för att möjliggöra besiktning eller åtgärder kan leda till betydande negativ påverkan på trafiksystemet eller komma i konflikt med andra verksamheter eller ansvarsområden.

Staden äger och förvaltar 928 konstruktioner registrerade i förvaltningssystemet BaTMan. Tabell 1 nedan visar dess fördelning på olika konstruktionstyper¹.

Tabell 1. Stockholms stads konstruktioner registrerade i BaTMan (2020-10-20)

Typ	Antal	Andel (%)
Vägbro	534	58 %
Gång- & cykelbro	248	27 %
Gatudäck	135	15 %
Vägport	5	1 %
Fastighetsdäck	2	0 %
Faunabro	2	0 %
Järnvägsbro	1	0 %
Spårvägsbro	1	0 %
Summa	928	100 %

Antalet broar i Stockholm ökar stadigt i takt med regionens växt. Under perioden 1960 till 1980 byggdes mycket av den infrastruktur vi har i dag. I Figur 2 nedan framgår antalet broar som uppnått en vis ålder, eller är ännu äldre. Man kan utläsa av figuren att staden har ca 200 broar som är äldre än 60 år, och ca 100 broar som är äldre än 80 år. Man kan utläsa att antalet broar i åldersintervallet 60 och 40 ökar kraftigt. Antalet broar som behöver frekventa inspektioner i syfte att optimera kostsamma åtgärds paket kommer att öka över tiden.



Figur 2. Åldersfördelning för Stockholms stads broar.

Underhållsbehovet för stadens broar bedömdes år 2006 vara ca 140 mkr per år, under perioden 2006-2015, se Tabell 2. Enligt denna analys är underhåll av brobanelplattor den mest kostnadskrävande skadetypen. Kostnaden för inspektioner utgör bara 4% av den totala underhållskostnaden. Notera att bedömningen gjordes år 2006², en mer aktuell bedömning saknas.

¹ BaTMan utdrag daterat 2020-10-20

² Trafikkontorets drift- och underhållsverksamhet - Delområde Teknik, Trafikkontoret Stockholm, 2006-05-08.

Tabell 2. Stockholms stads kostnader för underhåll under åren 2006-2015.

Bedömt underhållsbehov per skade-område och år, perioden 2006-2015	Kostnad per år (mkr)	Fördelning (%)
Brobanepplattor	79	55 %
Kantbalkar	5,7	4 %
Räcken	2,5	2 %
Fogar	2,6	2 %
Avloppsanordning	0,5	0 %
Grusskift, lager mm	1	1 %
Pelare och landfästen	2	1 %
Brostöd i vatten	2	1 %
Rostskydd	9,9	7 %
Öppningsbara broar	13,4	9 %
Löpande underhåll	5	4 %
Preventivt underhåll	6	4 %
Inspektion, undersökning	6	4 %
Projektering, förstudie	7	5 %
Totalt	142,6	100 %

I Tabell 3 redovisas den samlade faktiska kostnaden för stadens brounderhåll, respektive år. Kostnaderna för åren 2017 och 2018 är av olika skäl undantag. Kostnadsnivå per normalår uppgår till ca 60 mkr. Stadens faktiska kostnad för brounderhåll är hälften av det bedömda underhållsbehovet.

Tabell 3. Årliga kostnader för Stockholms stadsbrounderhåll.

	2015	2016	2017	2018	2019
Årlig kostnad, mkr	62	59	45	50	61

Det finns flera möjliga förklaringar till skillnaden mellan bedömt behov av resurser och de faktiskt tilldelade. Det kan vara ett utslag av hårda prioriteringar av allmänna medel i Stockholms stad eftersom en stad har många verksamhetsområden och politikernas beslut beror på en mängd olika faktorer. En annan möjlig förklaring är att underlaget och metodiken vid bedömning av underhållsbehovet har svagheter, vilket politikernas prioritering kan ha påverkats av.

Etablerade nationella verksamhetsprocesser

Trafikverket förvaltar anvisningar för hur inspektioner ska genomföras och hur skador ska klassificeras och registreras. Dessa dokumenteras i tekniska handböcker³. Trafikkontoret har utöver dessa egna tekniska handböcker (trafikverket, 2015). Tillsammans är dessa grunden för definitioner, klassificeringar samt hur informationsinhämtning om anläggningarnas tillstånd ska genomföras och registreras.

³ <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/teknik/Tekniska-dokument/Bro-och-tunnel/>

Staden upphandlar samtliga inspektioner och utredningar på marknaden. Inspektörer anlitas genom ramavtal vilka upphandlas vart 4:e år. Översiktliga besiktningar genomförs årligen av samtliga broar. Huvudinspektioner genomförs var 6:e år och är den stora kostnaden. Vid inspektioner kan det framkomma behov av fördjupade utredningar. Dessa genomförs av andra leverantörer som har upphandlats separat för detta.

Staden har under 2020 etablerat en "Driftportal", ett ärendehanteringssystem för förvaltning av stadens tekniska anläggningar. Där registreras information om brister och skador på anläggningen som ska åtgärdas. Staden är inblandad i initiativ som har i målsättning att utveckla digitala modeller av stadens system, så kallade digitala tvillingar. På sikt kan broinfrastruktur bli en naturlig integrerad del av dessa modeller.

Broförvaltningssystemet BaTMan

Tidigare förvaltades stadens broar i det så kallade BMS-registret och brojournalen men sedan en tid har staden ett samarbete med Trafikverket om förvaltningssystemet BaTMan (Trafikverket, 2020a). Trafikverket är den största användaren och förvaltar över 20 000 broar i systemet. Utöver Trafikkontoret Stockholms stad använder ca 100 andra kommuner BaTMan i sin förvaltning. Ett övergripande mål med BaTMan är att dela systemförvaltningskostnaden mellan flera aktörer.

I BaTMan registreras konstruktionsritningar, inspektionsplaner, skaderapporter, reparationsåtgärder m.m. Som en del av systemet finns även planeringsverktyg som underlättar analyser och prioritering av åtgärdspaket, baserad på samhällsekonomiska kalkyler. BaTMan⁴ är ett av Trafikverkets större IT-system som utvecklas kontinuerligt. För närvarande finns inga planer på ett ersätta BaTMan med en annan lösning. Men, Trafikverkets verksamhet genomgår en digital transformering. På sikt förväntas att förvaltningen av anläggningen stegvis transformeras och att Trafikverket inte längre kommer ha ett intresse av att underhålla detta IT-system.

Trafikverket genomförde hösten 2019 en workshop för att kartlägga framtida behov av funktionalitet. De områden som identifierades var integration med BIM, samt ökad mobilitet och utvecklat stöd för "ordning och reda". Integration med övervakningssystem finns också med på bruttolistan.

Teknologidrivna innovation

Nya teknologier driver innovation inom alla industrier. Inom media och processindustri har denna utveckling kommit relativt långt. Anläggningsindustrin har kritiserats för att ha en långsammare produktivitetsutveckling och att vara sena med en digital transformation.

Både Trafikverket och Vinnova har omfattande innovationsprogram i syfte att utveckla nya digitala arbetsmetoder som både kan bidra till ökad effektivitet och klimatneutralitet. Det finns en lång rad innovationsprojekt med potential att bidra till nya digitala arbetsmetoder. Trots detta finns det få nya digitala verktyg som har implementerats och det finns ingen etablerad strategi för detta, utöver den nämnda vidareutvecklingen av BaTMan.

Inom Trafikverket pågår flera stora digitala transformationsprojekt. Gemensamt underhållsstöd⁵ (GUS) är ett systemstöd för underhållsarbeten på väg och järnväg. Tillsammans med ett nytt arbetssätt ska detta system ge ett effektivare underhåll, bättre koll på anläggningen och ökade

⁴ <https://batman.trafikverket.se/externportal>

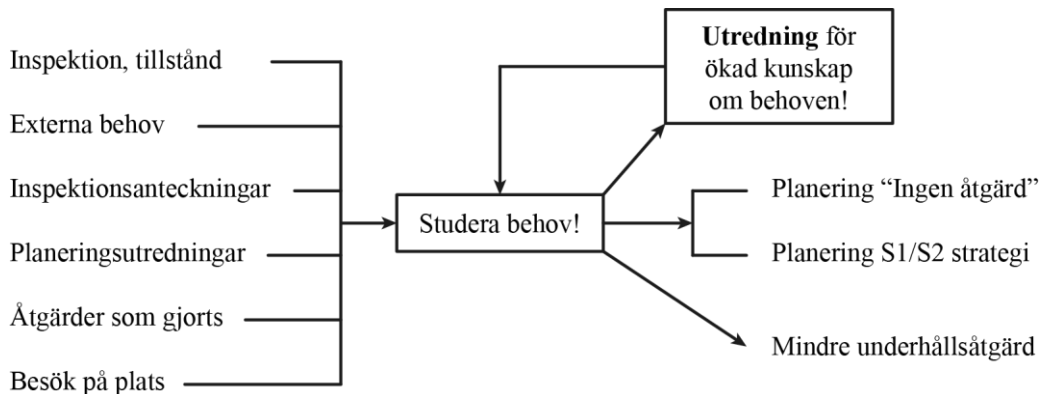
⁵ <https://www.trafikverket.se/tjanster/system-och-verktyg/forvaltning-och-underhall/gus---gemensamt-underhallsstod/>

möjligheter att arbeta förebyggande. Systemet är avsett att användas av Trafikverkets beställare tillsammans med deras upphandlade underhållsentreprenörer för väg och järnväg. GUS är baserat på Maximo som är ett internetbaserat, internationellt och standardiserat underhållssystem.

Målsättningen är att Trafikverkets ska erhålla bättre kontroll över våra anläggningar, kunna styra och genomföra effektiv planering och utförande av underhåll kunna följa upp underhållsarbetena.

3 Metodik för sensorbaserad tillståndsbedömning

Som beskrivet i de tidigare avsnitten är manuella inspektioner och teoretiska utredningar grunden för beslut om underhållsåtgärder. Dessa aktiviteter beskrivs av förvaltningssystemet BaTMan respektive Trafikverkets föreskrift om bärighetsberäkning av broar (Trafikverket, 2020b). Även de flesta andra broägare har anammat dessa system i sin verksamhet. Aktiviteterna för informationsinsamling görs i regel av olika aktörer som bildar ett underlag för beslutsfattare att väga samman till beslut om åtgärder. Figur 3 är återskapad efter BaTMan-handboken (Trafikverket, 2022) och beskriver planeringsarbetet för broförvaltaren.



Figur 3. Flödesschema för insamling av information för beslutsprocessen. Återskapad efter BaTMan-handboken (Trafikverket 2022, Avsnitt 2.2.3.1).

Listan till vänster i Figur 3 beskriver aktiviteter för informationsinsamling som efter utvärdering ska leda till beslut om inga åtgärder eller underhållsstrategier (S1 eller S2). Sensorbaserade metoder för informationsinsamling finns inte upptaget i dagens rutiner, vilket gör det svårt för förvaltare att ens överväga sådana. Digital informationsinsamling med sensorer kan dock utnyttjas i syfte att komplettera och i viss mån ersätta inspektioner för tillståndsbedömning. Dessutom i syfte att göra mer ingående utredningar av bärformåga och behov.

Mätteknik för datainsamling är ett väl utvecklat fält och kommersiella produkter finns tillgängliga för att samla data. Den snabba tekniska utvecklingen med sensorer och Sakernas Internet (Internet of Things – IoT) är grunden till koncepten Smarta Städer (Albino et al. 2015; Alavi et al., 2018) och Smart Infrastruktur (Berglund et al., 2020). Trots det används sensorer och mätteknik sällan i syfte att stödja förvaltningen av broar och andra stora anläggningskonstruktioner. Orsaker till detta är dels att det är svårt att kombinera med de etablerade broförvaltningssystemen (se Figur 3), och dels att implementeringen av sensorsystem ofta bedöms vara kostsam. Det bör också påpekas att ett sensorsystem i sig kräver förvaltning och underhåll.

Ett stort europeiskt forskningsprojekt, *COST Action TU 1402 – Quantifying the value of structural health monitoring*, har genomförts för att stödja beslut om när övervakning kan vara fördelaktigt. Ett ramverk för ett risk-baserat beslutsstöd om nyttan med övervakning togs fram och finns redovisat av bl.a. Straub et al. (2017). I anslutning till det europeiska projektet genomfördes BIG BRO – ett svenskt forskningsprojekt med inriktning på broförvaltning (Honfi et al., 2018; Leander et al., 2018; Björnsson et al., 2019).

Resultaten av fallstudier och känslighetsanalyser från de nämnda projekten visar att digital datainsamling ger ett kvantifierbart värde:

- För kritiska broar med kända brister där ett informationsvärde kan beräknas utifrån minskade kostnader för manuella inspektioner, konsekvenser av trafikomläggningar, senareläggning av reparationsåtgärder, eller uppskjutande av ett brobyte.
- Då sensorsystemet är billigare i inköp och underhåll än en reparationsåtgärd. En fysisk reparation eller förstärkning är i vissa fall en billig och enkel åtgärd. I andra fall kan de vara omfattande och orsaka stora störningar i trafikflöden vilket kan motivera ett sensorsystem.
- Dock inte för nya broar och anläggningar som uppfyller standardernas säkerhetskrav. Konstruktioner som teoretiskt uppfyller kraven i regelverken har en låg brottsannolikhet vilket medför att informationsvärdet av ett sensorsystem är försumbar.

Varje bro är unik med olika miljöbetingelser, lastsituation och ofta med specifika konstruktionslösningar. Därav är det nödvändigt att också sensorsystemen anpassas till den bro som ska övervakas. I följande avsnitt delas beskrivningarna mellan monitorering av skador och bristfällig funktion, samt datainsamling för bedömning av bärförmåga och livslängd.

I projektet iBridge utvecklades en generell skalbar plattform för att hantera alla typer av monitoreringsprojekt och sensortyper. Beskrivningen av plattformen ligger som ett separat avsnitt. De följande avsnitten har en inriktning mot praktisk implementering för att visa på hur sensorteknik kan inkorporeras i de system som redan finns för tillståndsbedömning av broar.

Sensorsystem för skador och bristfällig funktion

Broförvaltningssystem bygger på kvalitativa klassificeringar av det fysiska tillståndet. En internationell genomgång kartläggning visar att olika förvaltare har valt olika skalor och benämningar i klassificeringen (de Freitas Bello, 2021). I Sverige används tillståndsklasser 0 till 3 som tillskrivs av inspektörerna för enskilda konstruktionsdelar beroende på i vilken grad de uppfyller funktionskraven vid inspektionstidpunkten. Tabell 4 beskriver tillståndsklasserna och kopplingen till det funktionella tillståndet.

Tabell 4. Tillståndsklasser och relationen till det funktionella tillståndet (Trafikverket, 2022).

Klass	Funktionellt tillstånd	Nästa inspektion/utredning
TK3	Bristfällig funktion vid inspektionstillfället.	Inom 3 månader.
TK2	Bristfällig funktion inom 3 år.	Inom 3 år eller innan vid behov.
TK1	Bristfällig funktion inom 10 år.	Nästa huvudinspektion eller innan vid behov.
TK0	Bristfällig funktion bortom 10 år.	Nästa huvudinspektion.

Tillståndsklassen för skador och nedbrytningsfenomen baseras i vissa fall på kvalitativa bedömningar men i andra på givna mätvärden. Ett exempel på det förra är metod 30b som ska användas för bedömning av skruvförband, där det fysiska tillståndet (r) ska beräknas som förhållandet mellan antalet överksamma skruvar och ursprungligt antal skruvar. Gränsvärdet $r = 5\%$ ska för detta fall användas som riktvärde för TK3. Vilka skruvar i ett förband som är överksamma eller inte är en bedömning som inspektören måste göra. I vissa fall kan det vara tydligt som i Figur 4(a) men i andra mer oklart.

Ett exempel på värden som bestäms genom direkt mätning är sprickor i huvudbärverksdelar av betong. Där anger metod 15b att sprickvidden (d) ska mätas och jämföras mot gränsvärdet $d < 0,6$ mm för TK3. Ett annat exempel är sprickor i stålkonstruktioner, som i Figur 4(b), där förekomsten av en spricka oavsett storlek ska ge TK3.

De direkta mätningarna av identifierade skador, som idag ofta görs med manuella metoder, kan ersättas med fast installerade sensorer. Det är motiverat för små skador som befaras växa med tiden. Ett installerat sensorsystem redovisar resultat kontinuerligt, vilket ger en tillförlitlig uppföljning över tid som också fångar miljöbetingade omständigheter. Genom att analysera data löpande kan verifieringen mot gränsvärden göras kontinuerligt eller på begäran när så önskas, utan att inspektioner behöver göras på den fysiska bron.



(a) Overksam skruv.



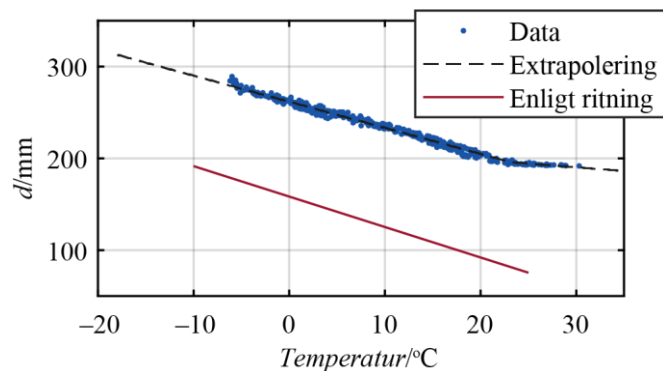
(b) Spricka i balkliv vid svets.

Figur 4. Exempel på skadefall från broar.

Ett exempel på kontinuerlig övervakning av fogrörelser på Strängnäsbron visas i Figur 5. En förskjutningsgivare registrerar förskjutningarna kontinuerligt samtidigt som temperaturen i betongen mäts. Resultatet i Figur 5(b) visar en utvärdering av relationen mellan betonglådans temperatur och fogrörelserna. Samma teknik kan användas för att mäta t.ex. sprickbredd i en betongkonstruktion och verifieras mot ett gränsvärde.



(a) En installerad förskjutningsgivare.



(b) Uppmätt förskjutning över temperatur.

Figur 5. Mätningar av fogrörelser och temperatur på Strängnäsbron längs väg 55. Figurerna är återskapade efter Leander och Karoumi (2021a).

Mätningar av tidsberoende nedbrytningsprocesser kan också göras med konventionella trådtöjningsgivare, till exempel för att registrera omfördelning av töjningar orsakade av korrosion, delaminering eller sprickbildning.

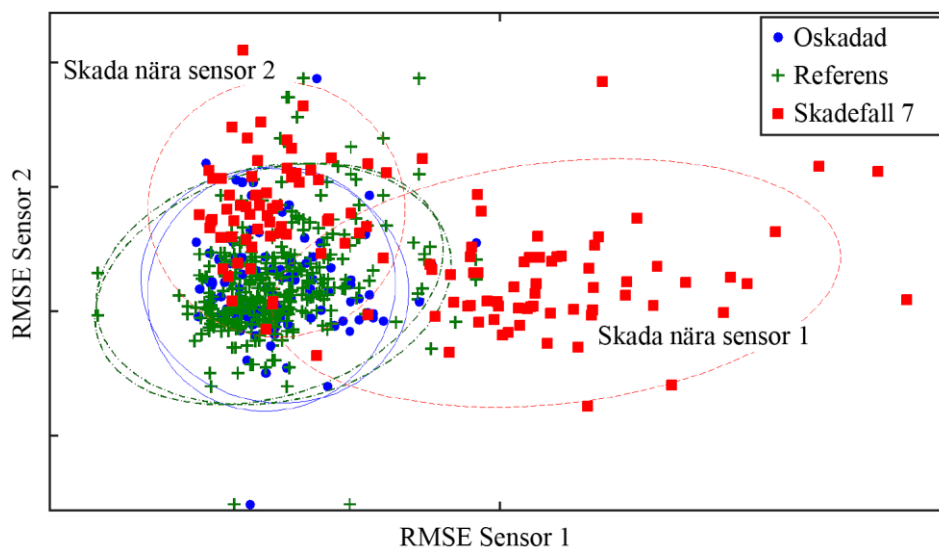
Vidare finns det sensorer på marknaden som är dedikerade till vissa nedbrytningsprocesser. Två exempel är korrosionsgivare (Wright et al., 2019) och spricksensorer (Papazian et al. 2007). Dessa har dock praktiska begränsningar i att de måste monteras direkt på eller nära skadans placering, vilket för broar kan innebära orimligt stora ytor och antal positioner. Dessutom är det en förutsättning att skadan är känd eller att dess läge kan förutsägas.

Autonom skadedetektering

Med ett sensorsystem installerat kan maskininlärning användas för att träna en modell för automatisk detektering av avvikelser (anomalier), som i sin tur kan vara indikationer på skador i konstruktionen. Artificiell intelligens och i synnerhet maskininlärning bygger på att data finns tillgänglig för att träna den modell som används. För broar måste träningsperioden utgöras av skadefria data men täcka de varierande last- och miljöförutsättningar som bron utsätts för under drift. Det är eftersträvansvärt att träna modellen även för de skadefall som sedan ska detekteras. Det är dock inte möjligt att utsätta broar i drift för åverkan som äventyrar bronns säkerhet. Därav måste principen för oövervakad (unsupervised) träning beaktas och detekteringsfasen bygger på att identifiera anomalier.

Autonom skadedetektering kan i teorin baseras på vilken mätdata som helst, så länge den registrerar förändringar i konstruktionens beteende. Piezoelektriska accelerometrar är dock med marginal den mest vanligt förekommande sensortypen i publicerade studier (Noel et al., 2017). Tillförlitlig skadedetektering (prognostisering) är ett öppet forskningsområde med få exempel på tillämningar med broar under drift. Då brott sannolikheten för en bro är låg och antalet broar som faktiskt är satta under långtidsmonitorering är få, kommer det även i framtiden att vara svårt att verifiera sensorsystemens effektivitet att identifiera skador i ett tidigt skede, innan bronns säkerhet äventyras.

Neves (2020) har presenterat ett flertal numeriska exempel för utvärdering av artificiella neurala nätverk (ANN) för identifiering av skador. Analyserna baserades på accelerationssignaler för tågpassager på broar. Figur 6 visar ett exempel på resultat som felen i förutsägelser med ett ANN där stora avvikelser från referensfallet antyder anomalier. Resultatet gäller för ett av flera testade artificiella skadefall.



Figur 6. Exempel på skadedetektering genom jämförelser av prediktionsfel (Root Mean Square Error – RMSE) för ett av flera artificiella skadefall. Återskapad efter Neves et al. (2019).

iBridge-projektet har inte innefattat någon forskningsdel inom autonom skadedetektering. Den plattform som har utvecklats kan dock innehålla maskininlärningsmoduler för skadedetektering motsvarande de rutiner som t.ex. utvecklats av Neves (2020).

Sensorsystem för bedömning av bärförmåga och livslängd

Detta avsnitt behandlar bärförmåga och livslängdsbedömningar med inriktning på den information som sensorsystem kan bidra med. En konstruktions säkerhet är i grunden reglerad av Plan- och bygglagens krav på *bärförmåga, stadga och beständighet*, och styrs i detalj av publikationer som eurokoderna (CEN, 2010) och Transportstyrelsens tillämpningsdokument (Transportstyrelsen, 2018).

I föreskrifterna saknas specifika riktlinjer om hur data från sensorsystem kan användas i beräkningar av bärförmåga, vilket är en av orsakerna till att det sällan tillämpas i praktiken. Det går dock att hitta viss vägledning i Bilaga D i eurokoden SS-EN 1990 som behandlar *dimensionering genom provning*. För bärighetsberäkning av stålbroar med avseende på utmattning tillåter Trafikverket (2020b) delskadeanalys genom mätning av spänningar. Riktlinjer angående mätperiodens längd ges men inga ingående beskrivningar av sensortyper eller genomförande.

Ett sensorsystem ger data för lasteffekten i mätpunkterna där den totala inverkan av fordon, dynamik och miljöbetingade egenskaper ingår. Däremot är det i regel inte möjligt att mäta de permanenta lasternas bidrag under driftskedet. Den totala lasteffekten kan tecknas som

$$E_d = \xi \gamma_G G + \sum_i \gamma_{Q,i} \psi_{Q,i} Q_{k,i} \quad (1)$$

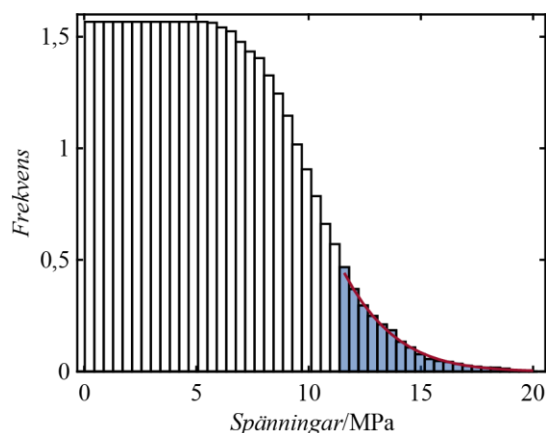
där G representerar permanenta laster, Q de variabla lasterna och de tillhörande faktorerna beskrivs av Transportstyrelsen (2018) för lastkombinering. Med en tillräckligt lång mätperiod och statistisk extrapolering kan hela summatermen för de variabla lasterna bestämmas med ett sensorsystem för datainsamling. Eftersom den verkliga lasteffekten då bestäms kan modellosäkerheten som representeras av γ_Q reduceras och faktorn ψ försummas om samtliga variabla lasteffekter registreras i mätningarna.

För verifiering mot utmattning och nedböjning är det endast de variabla lasternas bidrag som eftersöks. Då kan sensordata användas direkt för bestämning av lasteffekten.

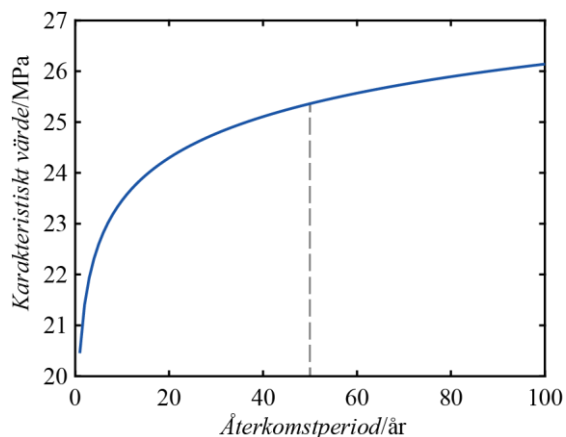
Om en verifiering ska göras i brottgränstillstånd, där den maximala lasteffekten jämförs mot en konstruktionsdels bärförmåga, måste ett representativt lastvärde beräknas. För variabla laster bestäms lastvärdet i svenska föreskrifter för en återkomstperiod av 50 år. För en referensperiod av ett år motsvarar det 98-procentsfraktilen. Då det i praktiken är omöjligt att samla data under en period som med hög tillförlitlighet kan registrera 50-årslasten krävs statistiska extrapoleringar.

För trafiklast utnyttjas ofta PoT-metoden (Peaks Over Threshold) för extrapolering men det finns även exempel där Rice formel för stokastiska processer (Rice, 1945) har använts. Dessa och ett flertal andra metoder går igenom och utvärderas av OBrien et al. (2015). För simulerade data visar de att Rice formel överlag visar på bäst skattningar av lastvärden.

Principen för extrapolering med Rice formel visas i Figur 7 för spänningsvidder från mätningar på Västerbron i Stockholm. Det första steget är att skapa ett histogram med antal händelser över nivån $x > 0$, se Figur 7(b). Därefter görs en kurvanpassning av Rice formel till svansen på histogrammet vilket visas med den röda linjen i figuren. Därefter kan lasteffekten för valfri återkomstperiod beräknas analytiskt. Resultatet för spänningsvidderna visas i Figur 7(b). Alla uppmätta spänningsvidder är under 20 MPa enligt Figur 7(a). Extrapoleringen till en återkomstperiod av 50 år ger ett maxvärde av ca 25 MPa enligt Figur 7(b).



(a) Histogram för nivåöverskridande.



(b) Extrapolering för återkomstperiod.

Figur 7. Statistisk extrapolering av sensordata genom Rice formel för stokastiska processer. Exemplet baseras på uppmätta töjningar från Västerbron i Stockholm.

Motsvarande analyser som visas med exemplet i Figur 7 kan göras för alla mätstorheter från ett sensorsystem. Därigenom går det att generera underlag för lasteffekt att inkorporera i formaten för verifiering av bärförmåga som föreskrifterna bygger på.

För bedömning av livslängd måste nedbrytningsmekanismerna beaktas i den teoretiska modellen. Ett typexempel är utmattning av stålbroar där nedbrytningen består av sprickinitiering, propagering och det slutliga brottet. De dominerande sprickdrivande effekterna är spänningsvidden och antal lastcykler – som båda kan bestämmas genom lastcykelräkning av tidsförlopp från sensordata. En gränsvärd funktion som uppfyller eurokodens säkerhetsformat baserat på partialkoefficienter kan formuleras som (Leander et al., 2015)

$$G = D - \frac{(\gamma_{FF} \gamma_{MF})^3}{2 \cdot 10^6 \Delta\sigma_C^3} \sum_i n_i \Delta\sigma_i^3 - \frac{(\gamma_{FF} \gamma_{MF})^5}{5 \cdot 10^6 \Delta\sigma_D^5} \sum_j n_j \Delta\sigma_j^5 \quad (2)$$

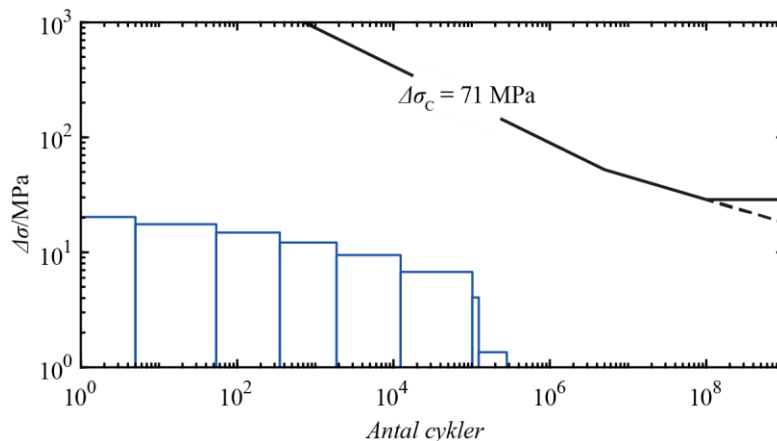
där $G \leq 0$ definierar brott, D är gränsvärdet för delskada som vanligtvis sätts till ett, $\Delta\sigma$ är spänningsvidden och n är antal lastcykler med tillhörande spänningsvidd. De två summatermerna räknar spänningsvidderna för respektive gren i eurokodens bilinjära kurva för utmattningshållfasthet. De övriga variablerna i (2) finns definierade i eurokoden SS-EN 1993-1-9 (CEN, 2008).

Ett exempel på en beräkning av livslängd utifrån sensordata visas i Figur 8 som baseras på töjningsmätning på Västerbron. Tidsförloppen från sensorerna räknas först om till spänningar genom Hookes lag, därefter görs en lastcykelräkning med regndroppsmetoden (Amzallag et al., 1994) som ger spänningsvidder och antal cykler. Resultatet är det spänningskollektiv som visas med blå staplar i Figur 8. Dessa värden sätts in i (2) för att verifiera gränsvärdet G vilket görs grafiskt i figuren mot en utmattningshållfasthet av $\Delta\sigma_C = 71$ MPa.

Grunden för (2) är Palmgren-Miners delskadehypotes (Palmgren, 1924; Miner, 1945) som bygger på linjär skadeackumulering över antal lastcykler. Livslängden kan då proportioneras mot G som

$$T_{\text{tot}} = \frac{D}{(D - G)} T_{\text{mon}} \quad (3)$$

där T_{tot} är den totala förväntade livslängden och T_{mon} är den tid som mätningarna pågått. Relationen är dock giltig endast om belastningen under mätperioden är representativ för hela livslängden. I annat fall bör förändringar i trafikmängd och lastvärden beaktas i proportioneringen.



Figur 8. Exempel på spänningskollektiv för beräkning av delskada och uppskattning av återstående livslängd. Återskapad efter Leander och Karoumi (2021b).

För exemplet i Figur 8 är spänningskollektivet med god marginal under hållfastheten som representeras av linjen $\Delta\sigma_c = 71$ MPa. Det betyder att G är större än noll och därmed visar verifieringen att säkerheten är tillräcklig. För de specifika siffrorna från exemplet fås $D = 1$ och $D - G = 1,42 \cdot 10^{-6}$ över en mätperiod av $T_{\text{mon}} = 224$ dygn, vilket ger en återstående livslängd av betydligt mer än 100 år.

Exemplen på verifiering i brottgränstillstånd och för livslängdsbedömning är anpassade efter de gällande byggreglernas säkerhetsformat baserat på partialkoefficientmetoden. För en ingående utvärdering av säkerheten är sannolikhetsbaserade metoder att föredra, vilket behandlas av t.ex. Leander et al. (2015) och Björnsson et al. (2019).

Plattform för sensorbaserad tillståndsbedömning

Det huvudsakliga utvecklingsarbetet inom iBridge utgjordes av skapandet av en molnbaserad plattform, som möjliggör en bearbetning av rå sensordata till underlag för beslut om underhållsåtgärder. Utmaningarna i detta bestod av:

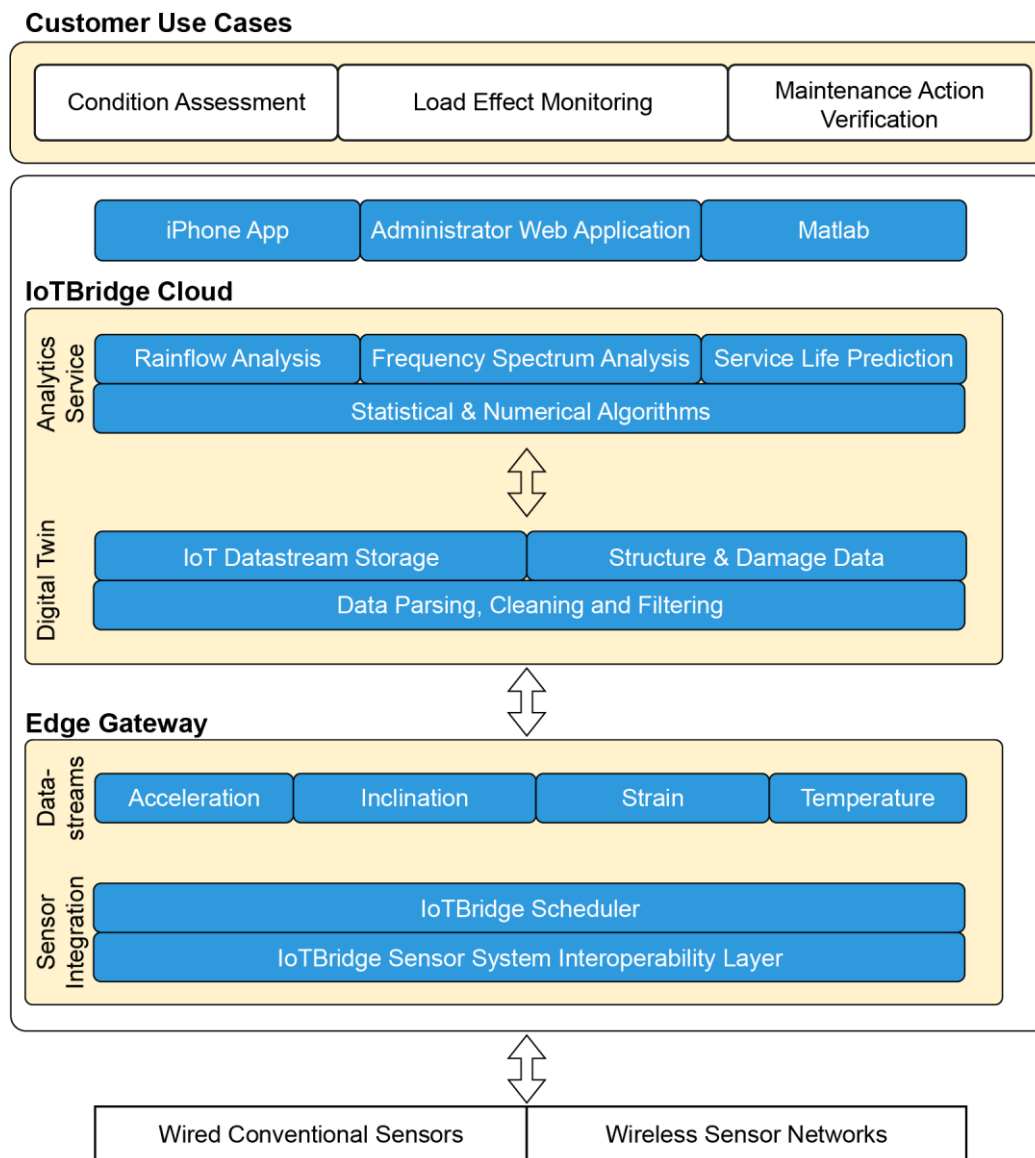
Kompatibilitet med olika sensortyper. Plattformen måste kunna hantera strömmande data från olika sensortyper och med olika samplingsfrekvenser. Det kan handla om traditionella givare som accelerometrar och trådtöjningsgivare, men också smarta sensorer med egen analyskapacitet som t.ex. väderstationer.

Skalbara databaser för strömmande data. Trafikbelastningen på broar är i regel kortvariga transienta förlopp som måste samplas med hög frekvens för att kunna registreras. Ett exempel är en tågpassage i hög hastighet över en konstruktionsdel med kort influenslängd. Både dynamiken och den höga hastigheten ställer krav på att tillräckligt många mätningar görs per sekund för att lasteffekten ska kunna bestämmas med hög tillförlitlighet. En hög samplingsfrekvens genererar stora mängder data som måste kunna hanteras i databasen.

Kapacitet för beräkningsintensiva operationer. Sensordata är i regel inte relevant i sitt råa format utan måste analyseras och användas i prediktionsmodeller för att tolkas i en tillståndsbedömning. Plattformen måste därför kunna innehålla allt från enkla statistiska modeller till avancerade rutiner för bearbetning av sensordata. Det ställer krav på programmeringsmiljön i plattformen och datorkraft för analyser.

Verktyg för beslutsstöd. De resultat som genereras måste presenteras i ett för beslutsfattaren användbart format. Samtidigt som vissa användare kan vara intresserade av detaljerade presentationer av rådata kommer andra att vilja se processade resultat anpassade efter redan befintliga förvaltningssystem. Beslutsstödet måste vara anpassningsbart för att kunna tilltala beslutsfattarnas preferenser.

En grafisk presentation av den plattform som skapades visas i Figur 9. Rutorna längst ner i figuren representerar rådata från sensorer. Plattformen är utformad för att hantera data från såväl trådade som trådlösa sensornoder. Den gula rutan som benämns "Edge Gateway" är en enhet som typiskt placeras på bron och som tar emot och skickar vidare dataströmmarna från sensorerna. Redan denna enhet är anpassad för att göra plattformen skalbar både vad gäller sensordata och samplingsfrekvenser.



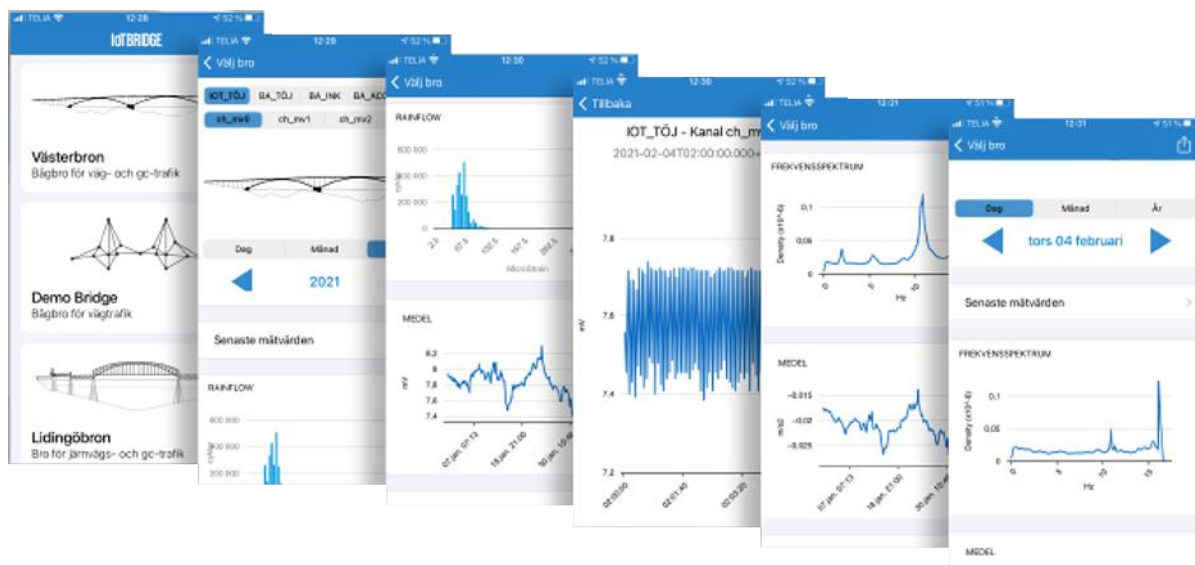
Figur 9. Grafisk presentation av plattformen för sensorbaserad tillståndsbedömning.

Från den gateway som placeras på bron skickas dataströmmar till en molntjänst benämnd "IoTBridge Cloud" i Figur 9. Aggregering av data till en eller flera databaser görs i molnet liksom identifiering av typiska händelser på bron. Det kan handla om händelser som fordonspassager, broöppningar, ett givet temperaturintervall eller en vindriktning.

Analyser av data som grundläggande statistisk inferens och t.ex. verifiering eller livslängdsbedömning görs också i molnet, se rutorna "Analytic Service". Rutiner för lastcykelräkning (rainflow-analys),

frekvensspektrum och utmattningsanalys finns redan implementerade. Denna modul är utbyggbar och kan anpassas till det objekt som studeras. För beslutsstöd kan resultatet redovisas i en applikation för smarta telefoner, ett webbaserat verktyg, och genom export av data till programvaran Matlab. Alla delar av plattformen kan anpassas till det "Customer Use Case" som är aktuellt för den bro som ska övervakas. I den översta rutan i Figur 9 ges exempel som tillståndsklassificering (condition assessment), mätning av lasteffekt (load effect monitoring), och verifiering av underhållsåtgärder (maintenance action verification).

Skärmdumpar från den utvecklade mobilapplikationen visas i Figur 10. I sitt nuvarande utförande kan resultat som statistiska egenskaper, spänningskollektiv och frekvensspektrum redovisas. Dessutom kan rådata granskas och exporteras via e-post. Det finns också möjlighet att lägga in larmnivåer.



Figur 10. Skärmdumpar från IoTBridge mobilapplikation för redovisning av utvärderade sensordata.

Det webbaserade verktyget (IoTBridge Dashboard) visas i Figur 11. Här erbjuds samma funktioner som i mobilapplikationen men också fler analysmöjligheter. Rutiner för autonom skadedetektering genom maskininlärning finns implementerade i verktyget. Här finns också möjlighet att exportera rådata från mätsystemen för vidare analys i t.ex. Matlab eller Excel.



Figur 11. Skärmdump från IoTBridge Dashboard för redovisning och hantering av utvärderade sensordata.

4 Fallstudie Västerbron

För att testa den utvecklade plattformen gav Trafikkontoret Stockholms stad tillgång till Västerbron för montering av ett enkelt trådlöst sensorsystem. Instrumenteringen samordnades med Ramböll Sverige AB som tillsammans med Betong & Stålteknik i Stockholm AB (Bostek) genomförde ett större mätprogram med traditionella trådade sensorer. Syftet med Rambölls uppdrag var att genomföra en utmattningskontroll för aktuella spänningsnivåer under inverkan av trafik. Mätprogrammet finns beskrivet av Ramböll (2019) och utmattningskontrollen redovisas av Leander och Karoumi (2021b).

Bro över Riddarfjärden

Västerbron består egentligen av två separata broar: Bro över Riddarfjärden som med två bågspann spänner mellan Kungsholmen och Långholmen, samt Bro över Pålsundet mellan Långholmen och Södermalm, se Figur 12. Förbindelsen med de båda broarna invigdes 1935.

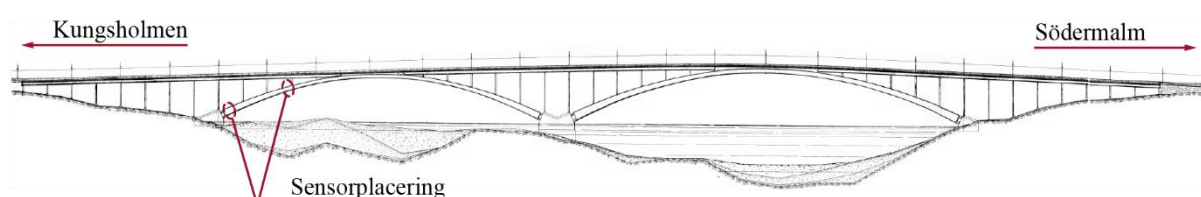


Figur 12. Vy över Västerbron och Riddarfjärden i Stockholm.

Broarnas farbana består av betong som vilar på balkar, pelare och bågar i stål. Medan ståldelarna i bron över Riddarfjärden är sammansatta av nitar, svetsades de bärande balkarna och bågen på bron över Pålsundet. Bron är enligt Wallin (1973) en av världens första svetsade "storbroar", tillsammans med brobanebalkarna i den ursprungliga Tranebergsbron från 1934 och Götaälvbron i Göteborg från 1939.

Sensorsystem

Det experimentella mätsystem som användes i iBridge-projektet monterades på Bro över Riddarfjärden nära bågans anfang på Kungsholmen. Placeringen av sensorsystemets noder visas i Figur 13.



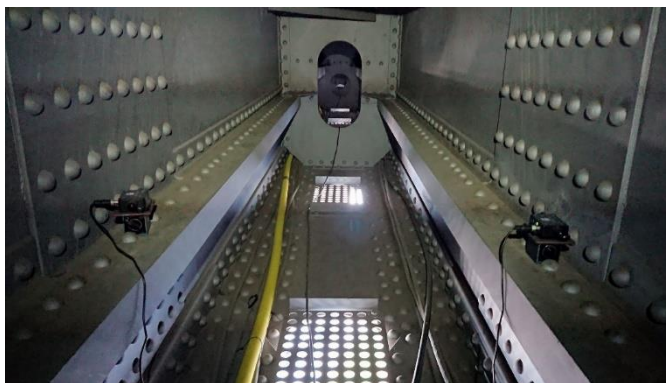
Figur 13. Placeringen av noderna i det experimentella sensorsystemet.

Systemet bestod av en tøjningsnod med fyra trådtøjningsgivare, två treaxliga acceleromernoder, en tvåaxlig inklinometer, och en temperatursensor, alla av fabrikat BeanAir. Se Tabell 5 för en mer ingående beskrivning av sensornoderna. En datainsamlingsenhet av typen BeanGateway från BeanAir och en bärbar dator användes för att kommunicera med sensornoderna. För extern kommunikation och delning av data placerades en 4G-router i bågen nära anfanget.

Tabell 5. Sensornoder monterade på Bro över Riddarfjärden. Alla enheter var av fabrikat BeanAir.

Sensortyp	Antal	Beteckning
Nod för trådtøjningsgivare	1 (med 4 kanaler)	BND-2.4GHZ-ANMV-4CH
Treaxlig accelerometer	2	BND-2.4GHZ-AX-3D-2G-XR
Tvåaxlig inklinometer	1	BND-2.4GHZ-HI-INC-15B-XR-RB
Temperatur	1	BND-ONE-T-ST-25

De två accelerometrarna var placerade nära bågens fjärdedelspunkt medan de övriga sensorerna placerades när anfanget. Syftet med instrumenteringen var först och främst att testa plattformen och trådlös kommunikation i en relevant miljö. I detta fall var inte syftet att genomföra en tillståndsbedömning av bron. Fotografier på några av sensorerna visas i Figur 14.



(a) Två acceleromernoder.



(b) En av acceleromernoderna.

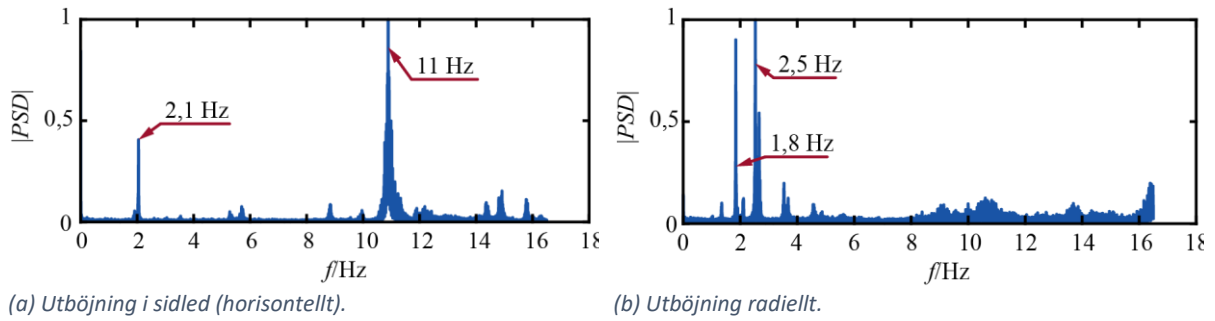
Figur 14. Några av sensornoderna placerade i bågen på Bro över Riddarfjärden.

Det trådlösa sensornätverket testades och utvärderades återkommande under projektiden. Data registrerades i detta projekt på begäran. Ingen kontinuerlig långtidsmätning genomfördes.

Resultat

Exemplen som visas med Figur 7 och Figur 8 baseras på de långtidsmätningar av tøjningar som Ramböll tillsammans med Bostek genomförde på Västerbron. Resultaten från de trådtøjningsgivare som anslöts till den trådlösa sensornoden visade vid jämförelser på exakt överensstämmelse med det konventionella trådade systemet. Detta var att vänta eftersom själva givarna som monterades på bron var av samma typ.

Exempel på utvärderade resultat acceleromernoderna visas i Figur 15 i form av frekvensspektrum. Topparna i figurerna anger bågens egenfrekvenser med en låg dominant topp vid 1,8 Hz för utböjning i bågens plan (radiellt) och 2,1 Hz för utböjning i sidled. Resultatet kan i detta fall inte användas direkt för en bedömning av brons tillstånd men förändringar i egenfrekvenser kan tyda på förändringar i styvhet och indikera oönskade händelser. För gång- och cykelbroar kan uppmätta accelerationer användas direkt för att verifiera komfortkrav i bruksgränstillstånd.



Figur 15. Utvärderade accelerationssignaler i form av frekvensspektra.

Det reella resultatet av iBridge-projektet är utvecklingen av plattformen för sensorbaserad tillståndsbedömning och användargränssnitten i form av mobilapplikationen och det webbaserade verktyget. Fallstudien på Västerbron visar att plattformen kan hantera flödet av information från sensor till slutanvändaren.

5 Sammanfattande konklusioner

- Av de totala förvaltningskostnaderna utgör kostnad för inspektion och utredning en mindre del. Huvuddelen går till åtgärder. Nya digitala verktyg och arbetsmetoder bör därför i första hand inriktas på lösningar som ger bättre beslut om utformning och tidpunkt av underhållsåtgärder. Digitala verktyg för inspektioner är därför följaktligen mest motiverade för broar med konstruktioner av sådan typ eller ålder att de behöver hög frekvens av inspektioner eller i de fall infrastrukturen är svårtillgänglig för besiktningspersonal.
- De huvudsakliga verktygen vid inspektioner och utredningar är i dag pappersritningar, bom-hammare och kameror. Digitala hjälpmedel som uppkopplade sensorer, fasta eller mobila kameror, fotogrammetri, AR-teknologi⁶ eller digitala modeller används sällan eller aldrig. Resultat av genomförda besiktningar rapporteras manuellt in i förvaltningssystem. De manuella arbetsmetoderna gör att informationen som arkiveras är en förenklad bild av den mångdimensionella och komplexa verkligheten. Det är inte ovanligt att information aldrig inrapporteras, blir felaktig eller ofullständig. Det är motiverat att utveckla digitala hjälpmedel verktyg som underlättar korrekt registrering av relevant och rik informationsmängd.
- De ekonomiska resurserna är begränsande och prioriteringen mellan olika verksamhetsområde är oftast hård, detta gäller i hög grad i kommunala verksamheter. Det är då av stor vikt att beslutsunderlag har hög kvalitet, vilar på väl dokumenterade analysmetodik samt kan redovisas på ett tydligt sätt för beslutsfattare som inte alltid har den djupa fackkompetens som tjänstemännen besitter. Ekonomiska och tekniska konsekvenser av olika åtgärdsalternativ måste kunna redovisas och illustreras på ett tydligt sätt. Det behövs bättre digitala stödsystem för analys och prioritering av alternativa åtgärder, främst i kommunala verksamheter.
- Stockholms kommun och många andra kommuner använder Trafikverkets broförvaltningssystem BaTMan. En anledning till detta är att fördela utvecklings- och underhållskostnaden på flera användare. Kravet på beslutsstödsystem skiljer sig åt dock mellan en kommunal verksamhet och statlig myndighet. Medborgare, media och politiker är i kommuner närmre besluten och försöker ofta påverka prioriteringar, vilket ökar kravet på att ha en tydlig, väl förankrad men flexibel beslutsprocess. Det finns ett ökat intresse för digitala stödsystem som möjliggör en mer dynamisk drift av stadens knappa men samhällskritiska resurser, som exempelvis gaturum. Både Stockholm och Göteborg är engagerade i att utveckla digitala lösningar för att övervaka och styra stadens, komplexa och uppkopplade infrastruktur. Det är viktigt att möta de regionala behoven och då kanske inte BaTMan är den lösning som Staden behöver på längre sikt.
- De arbetsprocesser som tillämpas vid broförvaltning är väl dokumenterade i anvisningar. Upphandling av leverantörer genomförs regelbundet med relativt långa löptider. Det finns flera lovande forsknings- och utvecklingsprojekt (sensorer, drönare, bildanalys, akustisk analys, avancerade algoritmer). Det är krävande att ändra inarbetade arbetsrutiner och det saknas ofta incitament att utveckla nya arbetsmetoder. Både behovsägare och leverantörer har ett gemensamt ansvar för att inte fastna i föråldrade metoder. Innovationsupphandling av ännu inte väl etablerade lösningar är troligen avgörande för att nya standarder ska kunna utvecklas.

⁶ Augmented Reality (AR) är ett begrepp inom informationsteknik som på svenska ofta översätts till förstärkt verklighet. Se vidare; https://sv.wikipedia.org/wiki/F%C3%B6rst%C3%A4rkt_verklighet

- Hela kedjan från sensorer, datainsamling och analyser måste kunna anpassas efter brotyp och beslutsscenario. Till exempel kräver en klassificering av det fysiska tillståndet andra beslutsunderlag än uppskattningar av bärförmågan (säkerheten). Exempelen i rapporten visar på redan existerande metoder som finns tillgängliga redan nu att implementera, men det finns också behov av vidare utveckling för mer intelligenta autonoma system.
- Den utvecklade molnbaserade plattformen består av ett antal fasta moduler som representerar flödet av information från sensorer via analytiska funktioner till verktyg för beslutsstöd. Dessa moduler kan skalas och anpassas internt för att hantera olika dataströmmar beroende på tillämpning. Resultaten består huvudsakligen av de utvecklade tekniska lösningarna som redovisas bäst genom demonstration.
- Fallstudien på Västerbron användes för att utveckla plattformen och testa flödet av information från ett trådlöst sensornätverk till verktyg för slutanvändaren. Detta projekt och andra har visat att sensorernas funktion och installationen i fält är kritisk för generering av tillförlitliga data.

Bilaga 1. Notat vid intervjuer

Intervju med tjänsteman vid Trafikkontoret Stockholm stad

Organisationen för broförvaltning inom Trafikkontoret är nyligen omorganiserad. Nu är verksamheten och processer i högre grad kartlagda och dokumenterade. Trafikverkets metodik och BaTMan är ryggraden. En av arbetsuppgifterna är att stärka stadens kompetens och kapacitet runt broförvaltning "brogruppen".

Stockholm är tätt av konstruktioner många är lätt tillgängliga andra kräver att trafiksystemet måste stängas med.

Trafikkontoret upphandlar konsulter för alla inspektioner och alla utredning.

- Inspektörer anlitas genom ramavtal vilka upphandlas var 4:e år. Alla inspektioner genomförs av samma leverantör.
- Översiktliga besiktningar sker varje år av alla broar. Då ser man påkörda räcken efter snöröjning.
- Huvudinspektioner genomförs var 6:e år och är den stora kostnaden.
- Vid inspektioner kan det framkomma behov av fördjupade utredningar. Dessa genomförs av andra leverantörer som har upphandlats separat för detta.

Staden har nyligen (augusti 2020) etablerat en "Driftportal", ett ärendehanteringssystem. Här registreras information om det saknas ett brunnslock eller liknande saker som ska åtgärdas.

Kommentarer och funderingar:

- Inspektörerna saknar incitament att använda nya teknologier som tex drönare. Broar stängs av vilket kan skapa trafikstörningar för medborgarna, men konsulterna får bra betalt.
- Sensorer som mäter vibrationer kan inte ersätta inspektioner, de ger en annan typ av insikt än inspektioner.
- Vad krävs som underlag för beslut om åtgärder? Ofta räcker det med bilder, ofta inte så mycket och snacka om. Allt måste åtgärdas, det handlar om att prioritera åtgärder vid rätt tidpunkt.
- Exempel på felgrepp: Vi genomförde en gång ett byte av tätskikt på en bro. Men, det visade sig att den ska rivas. Vi hade inte koll på det. Vi var på väg att omisolera två broar, men så kom någon på att det nog redan var gjort, och det visade sig vara så.
- Underhåll av läckande fogar har vi nog missat. Det orsakar andra problem. Vi måste stänga av t-banan och gjuta nytt.
- Tidigare gjöt man in av-vattningsrör, som samlade löv och vatten. Senare frös allt och sprängde sönder betongrören.
- Man kan säkert skippa 90% av inspektionerna, men det är ju en försäkring. All infrastruktur är inte kritisk.
- Gamla Danviksbron, inspekteras 4 ggr per år. Den måste vi ha extra koll på. Där vore det bra med en digital monitorering.
- Också infrastruktur som är otillgänglig, så vi inte behöver stänga tunnelbanan för att vi ska komma till.

Intervju med tjänsteman vid Trafikkontoret Stockholm stad

I BaTMan finns redskap för planering av åtgärder samt och standardvärden för prioritering av objekt. Men behoven på planeringsunderlag skiljer sig åt mellan en broar i det nationella trafiksystemet och de broar Stockholm förvaltar. De aspekter som skiljer sig åt är främst i) kostnadsnivåer, ii) typ av kostnader samt iii) prioriteringar med hänsyn till komplexiteten i omgivande transportsystem. Kostnaden för åtgärder är högre i Stockholm. Kostnaden för att säkra arbetsmiljön samt trafikantstörning kan vara stora. Vissa åtgärder kan bara genomföras på nätter eller helger.

Framkomligheten i Stockholms trafiksystem är begränsat så trafikanordningar måste förberedas, samordnas och godkännas av en central gruppering inom Trafikkontoret. Syftet är att säkra en så bra framkomlighet som möjligt. Objektsplanering på Trafikkontoret utgår från uttag av data från BaTMan därefter kompletterar vi med information, uppskattningar och gör prioriteringar.

Befintligt budgettak är ca 60 miljoner per år. Så som för Trafikverket, finns det bedömningar att det finns ett betydande eftersatt underhåll, en underhålls-skuld. Men vi förhåller oss till en budgetram på 60 miljoner. Det är oklart vad som skulle krävas för att denna budget skulle ökas betydligt. Den regionala marknaden för både inspektionstjänster och åtgärdsarbete är också en begränsande faktor. Det tar tid att utveckla kapaciteten.

Chefen för Trafikkontoret är bemyndigad att fatta beslut om åtgärder upp till 5 miljoner, Trafiknämnden upp till 50 miljoner, därefter är det kommunstyrelsen. Det krävs mer omfattande underlag för mer omfattande åtgärder. I den nu pågående objektplaneringen har vi inga så omfattande projekt, men vi drar igång utredningar som ett första steg.

De flesta åtgärderna har vi god kontroll på genom väl beprövade och inarbetade inspektionsrutiner. De osäkerheter som jag menar vi gärna skulle minska med nya digitala mätmetoder är när vi står inför beslut om en brokonstruktion har den bärighet som krävs, för den högre last som finns i dag. Ska vi lappa och laga eller förbereda för en ny bro? Ny infrastruktur kräver lång planeringshorisont och stor budget. Och då ska vi inte slänga bort pengar på andra åtgärder.

Det behövs bättre underlag för att beräkna bärförmågan för stora broar med spännkabel, så kallade spännarmerade konstruktioner. I dessa är det linor av stål som skapar den lastbärande förmågan. Om isoleringen av linorna inte lyckats börjar det rosta efter ett tag. Då uppstår korrosion som över tiden ger en svaghet i brons bärande del. I de fall man har rivit broar kan man se att dessa skador kan ha gått långt, utan att upptäckas. Det saknas i dag metoder för att inspektera dessa broars bärförmåga. Den italienska bro som rasade för några år sedan var av denna typ, den var bara 50 år. I Stockholm finns det överraskande många (10-tals) broar av denna konstruktion.

En annan typ av konstruktion där vi behöver bättre underlag är äldre stålbroar, från 30-talet. Gammalt stål är sprött och har ofta dåliga svetsar. Vi har problem med sprickbildningar, i synnerhet vid låga temperaturer. I dag tar vi ut provbitar som vi analyserar i laboratorier för att beräkna bärförmågan. Det vore utmärkt om vi kunde luta oss mot beräkningar baserade på sensordata. Skanska levererar bara 3D-konstruktionsritningar för Slussen, men vi saknar kapacitet att förvalta 3D-modeller. Vem på Trafikkontoret ska bemanna och driva en sådan utveckling? Hur ska vi säkra bakåt kompatibilitet? (exemplet dokumenthanteringssystem Hummingbird / Collaboration som lades ned efter 10 år). Hur ska vi scanna in äldre broar, som i dag kräver vår uppmärksamhet. Exempelvis Huvudstabron, Djurgårdsbron, Centralbron-komplexet, klarabergsbron, och kanske Västerbron.

Intervju med leverantör av besiktningstjänster

Arbetsuppgifterna inkluderar inspektioner av broar, analys samt rapportering. De rutiner som inspektören följer är dokumenterade i TRV styrdokument BaTMan handbok, samt tekniska handböcker. Resultatet rapporteras in i BaTMan, bara BaTMan. Inspektören använder inga tekniska hjälpmedel vid besiktningen. En besiktning kan resultera i 0-100-tals bilder. Inspektören har med sig pappersritningar ut i fält för att läsa detaljer i konstruktionen, samt att markera avvikelser. Verktygen är ögonen. Ibland görs trådtöjningsmätningar (samarbete med KTH).

Vanliga utmaningar:

- Konstruktionen är klädd (inbyggda), så man inte kommer åt, eller inte nå dit. Det vore väldigt bra att ha tillgång till 3D konstruktionsritning, typ digital tvilling. Drönare har en uppenbar fördel, då kan man "se" från andra vinklar och har lättare att komma åt.
- Korrosion på bärande balkar, kan gå väldigt fort.
- Broar över järnväg och t-bana kan vara svåra då de är svåra att komma till. Det får så stora följd effekter att stänga ner trafiken.

Intervju med konsult

Skillnaden mellan att arbeta inom fastigheter och brobyggnad är att det inom brobyggnad finns en större förståelse för processer. Detta kan troligen förklaras av att TRV ställer större krav på en stabil förvaltningsprocess än Boverkets.

Mitt uppdrag är objektplanering, dvs att förvalta strategin för mindre reoveringar av stadens broar. Strategin ska rymmas inom en budgetram på ca 35 miljoner per år för mindre reinvesteringar. Större reinvesteringar hanteras inom en separat budget. Drift, dvs små underhåll har en budget på 5 msek. Vi arbetar med en planeringshorisont på 2021-2029. Det borde egentligen vara 10 år. Vissa typer av åtgärder återkommer med viss regelbundenhet (tex impregnera kantbalkar var 20 år).

Information om inspektioner och skador finns i BaTMan, men strategiarbetet genomförs utanför i Excell. I BaTMan är formaten är relativt låsta (skadeklasser) och användarvänligheten är inte på topp så det är svårt att få den överblick man behöver. I Excell kan man nyansera informationen lägga in egna vikter inför prioriteringar. Flexibelt och bra. Men inspektioner och historiken av "hårda fakta" som lagras i BaTMan.

De utmaningar vi har är att bedöma risker. Vi måste prioritera åtgärder inom budgetramen. Om vi har otur kan det falla ner en betongkaka på vägbanan. Broar i miljöer med mycket folk prioriteras före miljöer i förorterna där det inte är så många. Ibland kan politiker ge oss detaljerade direktiv som påverkar vår prioritering. Det kan vara kulturella initiativ eller saker som uppmärksammas av media. Den höga trafikbelastningen ger oss ofta restriktioner som vi måste förhålla oss till i strategiarbetet. Vi kan inte orsaka trafik kaos genom att begränsa framkomligheten.

Det finns många TK3 skador, som enligt handboken ska åtgärdas inom 3 månader. Men, det saknas riskanalys. Ett exempel på där sensorer har bidragit med viktig insikt är en stål-bro längs Ringvägen. Där fanns en KT3 skada, en 10 mm spricka. En sådan spricka kan vara en indikation på något som är riktigt dåligt eller helt obetydligt. Trådtöjningsmätning visade att skadan inte var avgörande. Vi sparade 1,5 miljon och klarade oss med en åtgärd på 250kkr.

Ett annat område där vi kan behöva digitala verktyg är vid beslut om att vidta åtgärder samtidigt, för att spara kostnader för att anlägga arbetsplatser. I vilka tillfällen ska vi åtgärda flera skador för att vi har relevant kapacitet på plats, eller ska vi vänta med det. Det är svåra beslut.

Process vid prioritering av åtgärder

- Underlag vid utformning av åtgärdspaket samt prioritering
- Typiska kostnadsfördelningar mellan besiktningar, trafikavstängningar/störningar och åtgärder
- I vilka tillfällen skulle mer precist underlag kunna påverka åtgärderna och dess prioriteringar

Intervju med tjänsteman vid Trafikkontoret Stockholm stad

Det saknas digitala verktyg för ett effektivt informationsflöde i besiktningsverksamheten. Översiktlig arbetsprocess:

- Inspektioner sker enligt fastställda planer.
- Besiktningsresultat inklusive bilder (som underlag) rapporteras in i BaTMan.
- Uttag av data från BaTMan sker årligen under hösten inför verksamhetsplanering och budget för kommande år.
- Analys och prioritering av planerade förvaltningsåtgärder för stadens 2-3000 objekt görs av staden i Excell, baserad på data från BaTMan.

Hur kan inrapportering av inspektionsresultat göras mer effektivt? Exempelvis; kan digitala verktyg utvecklas som återanvänder digitala konstruktionsritningar (BIM) och kopplar bilder och besiktningsanalyser till olika delar av konstruktionen. Analysen görs i dag av besiktningsmannen baserad på den information som är tillgänglig i fält (front-end), bilder används som verifikat. Om analys i ökad grad ska digitaliseras, ska den göras med algoritmer i front-end, eller back-end (BaTMan), eller både och?

Staden har 900 broar och hundratals kajer, stödmurar och trappor som är registrerade i BaTMan. TRV gjorde en granskning av sina olika IT applikationer förra året. Man beslöt då att fortsätta utveckla BaTMan. Vi har redovisat stadens behov för Trafikverket, men vi har ingen aning om av vad som sker. Vi vet därför inte om BaTMan är det bästa verktyget för oss i framtiden?

Intervju med leverantör av tekniska utredningar

Utifrån kontext som levereras av kunden/ägaren levererar inspektören ett paket av åtgärder att utföra. Med kontext avses information om planer på att ersätta en bron inom 10 år, 50 år, eller liknande övergripande scenario.

Relevanta underlag vid analys är:

- Konstruktionsritningar
- Tidigare inspektionsrapporter inkl bilder
- Nivå på rapporterade skador
- Ålder på delar av konstruktion (tätskiktet beräknas hålla 30 år, kantbalk 20 år)
- Fysiska provtagningar, tätskikt, fältundersökningar, betongundersökning, läckage, kalkutfällning, korrosion, spjälkas bort, salt runt armering, delaminering i betongen.
- Har vi problem med hela överbyggnaden, eller bara kantbalken.
- Olika byggstandarder vid olika byggepoker.
- Brottsäkerhetsprover på stålbroar. Utmattningssprickor.

Vilka verktyg används:

- Jag sätter mig in i konstruktionsritningar och underlag innan jag går ut i fält.
- Vid bron använder jag pappersritningar.
- Bomhammare och kamera är de främsta verktygen.

Särskilda utmaningar:

- Tillgängligheten till bron är alltid ett stort problem. Vissa broar kommer vi inte åt utan att stanna tunnelbanan eller göra andra betydande avstängningar. I vissa fall måste vi brygga temprära konstruktioner, det blir väldigt dyrt.
- Exempel på svårtillgängliga broar.
 - St: Eriksbron. Där måste man ha tre olika avstigningar för att komma åt. Extremt dyrt.
 - Nockebybanan går in under en tunnelbanebro, med luftledning som måste stängas av. Krävs mer än 5 personer. Kan kosta 50kr för tre timmar
- Gamla stålbroar, särskilt nitade är de mest svårbedömda konstruktionerna. Dessa konstruktioner kan vara spröda, särskilt om de kan vara påkörda. Alla fackverksbroar, tex.
- Vissa åtgärder som blästring kan ha betydande miljökonsekvenser som man måste beakta. Om produkter kommer i vatten är det inte bra.

Vilka digitala lösningar tror du på?

- Digitalt stöd som ger oss koll på alla ritningar, det vore bra. Men det blir säkert utmaningar att ha med ute i fält. Det är så skitig miljö.
- 3D ritningar och digitala tvillingar kan vara bra för att se kunna orientera sig, visualisera och se konflikter. Också för att koppla bilder till ritningar och arkivera. Det blir ofta många bilder som ska bifogas rapporter in i BaTMan. Svårhanterligt i dag.
- Töjningsgivare. Inspektören arbetar med sensorer för trådtöjning. Verklig spänningsnivå skiljer sig från den teoretiska. Elektroniska givare över sprickor. Larm.
- Drönare med kameror. Då kan man komma åt och se. Det finns många svårtillgängliga ställen där man behöver både se och använda bom-hammare där drönare vara bra.
- Nackdel med ingjutna töjningsgivare är underhåll av denna utrustning. Hur funkar dessa efter 50 år. Men om man sätter upp.

Hur använder du BaTMan?

- Både SL och Staden är anslutna till BaTMan.
- Jag hämtar inspektionsprotokoll, registrerade skador som lösa skruvar mm, tidigare utförda åtgärder, samt konstruktionsritningar. Men alla ligger inte där. Trafikkontorets ritningsarkiv är

extremt bra, om det saknas information i BaTMan, går jag dit. SL:s ritningar ligger ofta också i TK ritningsarkiv.

- Sedan rapporterar jag in utredningar, rekommenderade åtgärder in i BaTMan. Men, ca 20% hamnar av olika skäl aldrig där.
- Jag använder inte de olika analytiska delar som kan finnas i BaTMan.

Intervju med tjänsteman vid Trafikverket

Trafikverket förvaltar processen att samla in och bearbeta grunddata och information om anläggningarnas tillstånd. Trafikverket organiserar forum för kunskapsspridning samt förvaltar styrande och stödjande dokument för inspektion och planering inkl. rutinbeskrivningar.

Trafikverket förvaltar över 20 000 broar i BaTMan och är den största användaren. I BaTMan finns ett planeringsverktyg där man kan analysera och prioritera mellan åtgärds paket, baserad på samhällsekonomiska kalkyler. De som gör objektsplaneringen sitter ute på regionerna, de gör en planering.

Men det finns ett 100-tal kommuner som är användare, t.e.x. Trafikkontoret Stockholm. I mindre kommuner är det problem med kompetensen. De köper in kompetens från marknaden. Alla användare bidrar med finansiering

Trafikverket har tagit ställning till att BaTMan ska vara kvar och vidareutvecklas. Det så kallade Anda-projektet är på paus. Det är oklart vad som sker. NVDB⁷ finns nu kvar, men skulle behöva uppgraderas. Gemensamt Underhålls System (GUS) som bygger på en utrullning av Maximo har sin hemvist inom Infrasytem (teknikområdesgrupp). Prioritering av förvaltningsverktyg ligger hos Ulrika Honauer Enhetschef.

Relevanta initiativ och utmaningar:

- Utvärdering av inspektion via drönare. Se Haggström TRV FOI
- Tillsammans med förbifarten arbetar TRV med att ta emot digitala modeller, i stället för ritningar. TRV måste komma vidare med hur vi ska förvalta modeller. Vi kan då utveckla nuvarande prioriteringsverktyg i systemet till att genomföra scenarionanalys; "får vi en viss skada, händer detta".
- iBridge-projektet är intressant. Uppkopplad anläggning av sensorer. Ofta broar i slutskedet av livslängden, eller bärighetsproblematik. Med hjälp av sensorer får vi bättre koll.
- "Cyber security" datalagring i molnet. Vi använder vi oss inte av molntjänster, all information ligger i BaTMan. Vi har styrt upp hanteringen av behörighetskontroll. När det gäller data från drönare och andra sensorer måste vi se hur detta ska hanteras. Vi måste klassificera datats känslighet.

⁷ Nationell vägdatabas (NVDB)

Intervju med tjänsteman vid Trafikverket

Tjänstemannen är teknisk specialist inom underhåll, trafik och miljö. Fokus på broar, bärighetsrelaterade frågor, digitalisering. Han leder ett projekt som undersöker hur Trafikverket kan använda drönare vid inspektioner.

Vi vet att det finns organisationer som kommit längre än vi inom området, men vi valde att börja med ett blankt papper. Vi vill lära oss så vi kan ställa krav vid upphandlingar. Projektets fokus är stora broar, ökad säkerhet för inspektörer samt att komma åt delar vi annars inte når.

Projektet testar om vi kan använda drönare vid huvudinspektioner för stora broar. Vi valde ut fem broar. Vid upphandling av leverantörer, fick vi in 15 anbud. Varje leverantör fick max två broar. Resultatet vara att Svack (?) och Skysmart (<https://www.xn--drnarinspektioner-0zb.se/blogg>) fick två broar var och WSP en fick en. WSP fick i uppdrag att skapa modeller genom fotogrammetri i neutralt modellformat. Pixel-storlek på 0,5 mm, 100 gig per 3D modell per hel bro. Inte kopplad till konstruktionsmodell, tex en BIM modell. Där är vi inte i dag. WSP gör avslutningsvis manuell inspektion baserad på fotogrammetrisk modell. LTH ansvarar för rapportering. Projektet klart årsskiftet, troligen förlängt till feb.

Kommentarer:

- Man kommer inte åt hela bron med drönare. Vegetation kraftledning mm.
- Testade drönare inne i konstruktionen, men det gick inte så bra. Svårt att sätta ihop modellen (bristande orienteringsförmåga). Också damm som drogs upp.
- Målet är att se om man kan använda drönare i Huvudinspektionen. Men svaret är nej. Kan funka som komplement, för att komma åt.

Nästa steg:

- Automatisera bildanalys. Structinspect, Street-inspect.
- Leadar, värmekameror (kan se delaminering)

Intervju med tjänsteman vid Trafikverket

BaTMan är ett av Trafikverkets största it-system räknat i kodrader. Uppdatering av kod sker kontinuerligt. Likaså vad gäller det som i Trafikverket kallas för "Mindre vidareutveckling, MVU". Inom MVU inryms mindre förbättringar och justeringar av systemet. Även detta sker kontinuerligt. Några planer på ett komplett utbyte av it-systemet eller någon stor uppgradering av plattformen föreligger inte i nuläget.

Trafikverket genomförde i höstas en workshop där framtidens behov av funktionalitet för byggnadsverksförvaltning diskuterades. Resultatet av det var flera små nya önskemål om utökad funktionalitet och någon/några större. De stora områdena vi ser är integration med BIM, ökad mobilitet och utvecklat stöd för "ordning och reda". Integration med övervakningssystem finns också med på bruttolistan.