

CHALMERS



Sustainable Bridges

Tillämpning av erfarenheter från ett EU-projekt, slutrapport

INGVAR OLOFSSON, JAN OLOFSSON,
MARIO PLOS, HANS HEDLUND, BJÖRN TÄLJSTEN

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
Betongbyggnad
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2008
Rapport 2008:9

RAPPORT 2008:9

Sustainable Bridges

Tillämpning av erfarenheter från ett EU-projekt

Slutrapport

INGVAR OLOFSSON, JAN OLOFSSON, MARIO PLOS,
HANS HEDLUND, BJÖRN TÄLJSTEN

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
Betongbyggnad
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2008

Sustainable Bridges

Tillämpning av erfarenheter från ett EU-projekt

Slutrapport

INGVAR OLOFSSON, JAN OLOFSSON, MARIO PLOS, HANS HEDLUND,
BJÖRN TÄLJSTEN

© CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA AB, 2008

ISSN 1652-9162

Rapport 2008:9

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för konstruktionsteknik

Betongbyggnad

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Tryck: Avdelningen för konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola
Göteborg, Sverige 2008

Sustainable Bridges

Tillämpning av erfarenheter från ett EU-projekt, Slutrapport

INGVAR OLOFSSON, JAN OLOFSSON, MARIO PLOS, HANS HEDLUND, BJÖRN TÅLSTEN

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för konstruktionsteknik

Betongbyggnad

Chalmers tekniska högskola

SUMMARY

The aim of the project is to systematically collect and analyse knowledge about the weaknesses and identified problems of the present European stock of railway bridges. The intention is to further analyse, develop and use this knowledge as a basis for improved design and construction methods of new bridges in Sweden, railway bridges as well as road bridges.

Basic background data is collected within the European project “Sustainable Bridges”, funded by the European Commission within its sixth framework programme, where the project members are actively participating in areas of strategic importance. Background data regarding the Swedish bridges is collected also through the recently launched Swedish bridge management system BaTMan, which is developed, owned and managed by the Swedish Road Administration and The Swedish Railway Authorities. The system is not a final system and some suggestions for improvement are presented.

The results of the present project (enhanced methods for design and construction, improved detailing, proposals for amendments to standards etc) may be directly applied by contractors and design consultants and will be beneficial to the end users of the products, i.e. the owners of the bridges.

The activities within “Sustainable Bridges” were started 1st of December 2003, with a superficial identification of “lack of knowledge”, as defined by the European railway owners. A mapping of the European bridge demography was carried out and reported together with a specification of the most frequent problems of the existing bridges. Development work for enhanced assessment methods and improved methods for inspection and monitoring of the bridges followed. In the final phases of “Sustainable Bridges” the activities were concentrated on the identified problem areas and the degree of detailing was at the same time increased.

The identified problem areas, as specified by the European railway owners, appear to be very similar to the needs of the Swedish bridge owners in spite of the fact that the studied bridges are geographically distributed over all Europe and its major climate zones. The same conclusion is valid for the defined improvement areas. The results achieved within “Sustainable Bridges” are therefore highly relevant for further development and application also to Swedish bridges and to the design and construction of new Swedish bridges.

Innehåll

| | |
|---|------|
| SUMMARY | V |
| INNEHÅLL | V |
| FÖRORD | VIII |
| 1 INLEDNING | 1 |
| 2 BAKGRUND | 2 |
| 3 SYFTE | 3 |
| 4 GENOMFÖRANDE | 4 |
| 5 SB-PROJEKTET | 5 |
| 5.1 Sammanfattning av projektet | 5 |
| 5.2 Klassifikation (WP 1) | 8 |
| 5.2.1 Demografi | 8 |
| 5.2.2 Identifierade problem och behov | 9 |
| 5.2.3 Resultatens relevans för svenska förhållanden | 10 |
| 5.3 Tillståndsbedömning och inspektion (WP 3) | 10 |
| 5.3.1 Skadetyper | 13 |
| 5.4 Laster och bärighet (WP 4) | 16 |
| 5.4.1 Arbetet inom WP 4 | 17 |
| 5.4.2 Handboken | 18 |
| 5.4.3 Forskning | 27 |
| 5.5 Mätmetoder (WP 5) | 38 |
| 5.5.1 Inledning | 38 |
| 5.5.2 Mätsensorer | 42 |
| 5.6 Reparation och förstärkning (WP 6) | 51 |
| 5.6.1 Inledning | 51 |
| 5.6.2 Rapport 1: Grafiskt Index - Guideline | 52 |
| 5.6.3 Rapport 2: Sammanställning av Litteratur och Forskning | 54 |
| 5.6.4 Rapport 3: Fältförsök | 55 |
| 5.6.5 Rapport 4: Metodbeskrivning – Arbetsutförande och Kvalitetskontroll | 55 |
| 5.6.6 Sammanfattning WP6 | 56 |
| 5.7 Fältprovning av broar (WP 7) | 56 |
| 5.7.1 Allmänt | 56 |
| 5.7.2 Fältprovning av bro i Örnsköldsvik – Sverige | 57 |
| 5.7.3 Diskussion och sammanfattning | 62 |
| 5.7.4 Fältprovning av bro i Frövi – Sverige | 62 |
| 5.8 Provning av mätsystem (WP 8) | 67 |
| 5.9 Informationsspridning (WP 9) | 67 |
| 6 ERFARENHETER FRÅN SVENSKA BROAR | 68 |

| | | |
|-------|---|----|
| 6.1 | Presentation av BaTMan | 68 |
| 6.2 | Användning av BaTMan i projektet | 68 |
| 6.3 | Möjligheterna i BaTMan | 69 |
| 6.4 | Preliminära slutsatser | 69 |
| 7 | TILLÄMPNING AV ERFARENHETER FÖR NYPRODUKTION | 73 |
| 7.1 | Inledning | 73 |
| 7.2 | Tillståndsbedömning och inspektion (WP 3) | 74 |
| 7.2.1 | Relevans för nyproduktion och svenska förhållanden | 74 |
| 7.3 | Laster och bärligheter (WP 4) | 74 |
| 7.3.1 | Relevans för nyproduktion och svenska förhållanden | 75 |
| 7.3.2 | Noggrann beräkning av dynamisk förstöringsfaktor | 76 |
| 7.3.3 | Omfördelning av linjärt bestämda snittkrafter i betongplattor | 77 |
| 7.3.4 | Kombinerad böjning, skjuvning och vridning i betongbroar | 79 |
| 7.3.5 | Olinjära analyser av betongkonstruktioner | 80 |
| 7.3.6 | Robust utförande med hänsyn till armeringskorrosion | 80 |
| 7.4 | Mätning (WP 5, WP 8) | 81 |
| 7.4.1 | Relevans för nyproduktion och svenska förhållanden | 81 |
| 7.4.2 | Fiberoptiska sensorer | 82 |
| 7.4.3 | Sladdlös mätning | 82 |
| 7.4.4 | Mätning under produktionsfasen | 82 |
| 7.4.5 | Mätning under driftskedet | 82 |
| 7.4.6 | Tillämpningar av projektresultat | 82 |
| 7.5 | Nya material (WP 6) | 83 |
| 7.5.1 | Relevans för nyproduktion och svenska förhållanden | 83 |
| 7.5.2 | Tillämpningar av projektresultat | 83 |
| 7.6 | Fullskaleprovning (WP 7) | 84 |
| 7.6.1 | Relevans för nyproduktion och svenska förhållanden | 84 |
| 7.6.2 | Tillämpningar av projektresultat | 84 |
| 8 | SLUTSATSER OCH SAMMANFATTNING | 85 |
| 9 | FORTSATT ARBETE | 86 |
| 10 | REFERENSER | 87 |

Förord

Föreliggande rapport är slutrapporten inom projektet ”Tillämpning av erfarenheter inom Sustainable Bridges”. Projektet har genomförts parallellt med det fyraåriga projektet ”Sustainable Bridges”, vilket finansierats av EU inom dess sjätte ramprogram.

EU-projektet har bestått av 32 partner från 12 europeiska länder. Utöver Skanska Teknik och Chalmers, har även Banverket, Vägverket, LTU, LTH, SGI, Sto samt Designtech deltagit från Sverige. Det gör att det svenska intresset och inflytandet har varit förhållandevis stort i EU-projektet.

”Sustainable Bridges” har genererat en omfattande kunskap om nuvarande brister och svagheter i de europeiska brobestånden. I SBUF-projektet har detta bearbetats och relevanta resultat som kan förväntas få betydelse för framtida konstruktion och produktion av svenska väg- och järnvägsbroar rapporteras här.

Rapporten och arbetet bakom denna har delfinansierats av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF.

Projektet har genomförts i samverkan mellan institutionen för bygg- och miljöteknik vid Chalmers tekniska högskola, Luleå tekniska universitet och Skanska Teknik, som alla aktivt deltar i EU-projektet inom olika ansvarsområden och där Skanska Teknik också är koordinator. Från och med det andra projektåret har Jan Olofsson efterträtt Ingvar Olofsson som projektledare för såväl för SBUF-projektet som för EU-projektet ”Sustainable Bridges”.

Uppdatering av slutrapporten har utförts av Mario Plos, Konstruktionsteknik, Bygg- och miljöteknik vid Chalmers med bidrag från Jan Olofsson och Hans Hedlund, Skanska Teknik och Björn Täljsten, Luleå Tekniska Universitet. Värdefulla synpunkter beträffande projektets uppläggning och innehåll har inhämtats från bl a Ingvar Olofsson, Auxiliary Support, samt professor Kent Gylltoft, Chalmers tekniska högskola

Om inte annat anges har material till denna rapport, inklusive figurer, foton och andra illustrationer, hämtats från den omfattande slutdokumentationen från ”Sustainable Bridges”. För mer information om detta projekt hänvisas till projektportalen www.sustainablebridges.net, där även projektrapporterna finns tillgängliga.

Göteborg i augusti 2008

Jan Olofsson

Skanska Sverige AB

Skanska Teknik, Bro och Anläggning

1 Inledning

”Sustainable Bridges” har varit ett fyraårigt integrerat projekt (2003-2007) som utförts inom EU:s sjätte ramprogram, där metoder för att uppgradera och förstärka befintliga järnvägsbroar för kommande krav på högre hastigheter, större lastkapaciteter och ökad livslängd studerats och utvecklats.

(För undvikande av missförstånd benämns i den följande texten projektet ”Sustainable Bridges” alltid ”SB-projektet”, medan det här aktuella SBUF-projektet benämns ”projektet”).

En av EU:s visioner för att skapa ett hållbart samhälle är att andelen järnvägstrafik skall fördubblas under den närmaste 20-årsperioden. Detta ställer stora krav på befintliga järnvägsbanor och broar. Europas 300 000 järnvägsbroar kan antas ha ett värde av minst 500 miljarder kronor. Med en ökning av bärförmågan eller livslängden med endast 2 % kan ca 10 miljarder kronor sparas, förutsatt att de resultat som kommit fram inom SB-projektets utnyttjas. De metoder som tagits fram har haft som kriterier att endast medföra minimala åtgärder på nuvarande broar och att pågående trafik ska störas så lite som möjligt. Eftersom vägbroar i mångt och mycket liknar järnvägsbroar kommer resultaten även att kunna vara till nytta för Europas vägbroar, långt fler till antalet, vilket mer än fördubblar nyttan med projektet.

Målet för SB-projektet är att öka tillåten bärighet och tåghastighet på de existerande järnvägsbroarna i Europa genom att utveckla bättre metoder för

- klassningsberäkning
- mätningar av broars tillstånd och funktion
- reparationer och förstärkningar

De utarbetade och rekommenderade metoderna är konkreta och direkt tillämpbara för berörda ägare, myndigheter, normansvariga, konsulter och entreprenörer.

I SB-projektet, som startades den 1 december 2003, har 32 olika företag och organisationer deltagit och samverkat inom SB-projektets ramar. Från Sverige har Banverket, Vägverket, SGI, några mindre branschföretag samt alla de fyra tekniska universiteten, däribland Chalmers, institutionen för bygg- och miljöteknik, deltagit. SB-projektet har letts och samordnats av Skanska Teknik.

SB-projektets deltagare, innehåll och målsättningar beskrivs närmare på dess projektportal www.sustainablebridges.net.

2 Bakgrund

Projektet ”Sustainable Bridges” (SB-projektet) har varit inriktat på uppgradering och förstärkning av befintliga broar, men har indirekt genererat en omfattande kunskap och insikt om befintliga broars begränsningar, brister och svagheter beträffande tillämpade dimensioneringsmetoder, byggmetoder, använda material, underhållsmetoder och detaljutformning men också beträffande reell kapacitet och återstående livslängd.

Kunskapsmängden har blivit mycket omfattande, eftersom stora delar av Europas nuvarande brobestånd med alla dess förekommande brotyper har studerats. Resultaten är också till stora delar tillämpliga för vägbroar, då använd teknik i många avseenden är densamma eller snarlik.

SB-projektet har i första hand syftat till att förbättra mätmetoder och analysverktyg för bestämning av broars reella kapacitet och livslängd samt att utveckla metoder för uppgradering av broarna t ex genom förstärkning. Metoder och verktyg har systematiserats och presenterats i form av fyra huvudmanualer (Guidelines). Dessutom har projektresultaten presenterats i artiklar, på konferenser och seminarier. Därutöver finns rekommendationer till normansvariga.

Någon systematisk uppföljning och redovisning av erfarenheter, med särskild inriktning på förbättring eller optimering av nuvarande konstruktions- och utförandemetoder eller förändrat materialutnyttjande vid nyproduktion, ingår emellertid inte i SB-projektet. Det här aktuella projektet kompletterar SB-projektet inom dessa områden med särskild hänsyn till svenska förhållanden.

Resultatet av det här projektet baseras till stor del på detaljeringsgraden i det underlag, som levereras av järnvägsbolagen i SB-projektets inledande skeden och på de kompletterande insikter som de i SB-projektet deltagande parterna har gett. Resultaten av de stora antal försök (fullskaleförsök och laborieförsök) som genomförts inom ramen för SB-projektet har även gett värdefull information.

3 Syfte

Det här aktuella projektet syftar till att systematiskt tillvarata kunskap om svagheterna i nuvarande järnvägsbrobestånd i Sverige och i övriga Europa, och analysera och bearbeta dessa. Målsättningen är att förbättra nuvarande metoder för konstruktion, detaljutformning, materialanvändning och utförande i nyproduktion av broar, såväl väg- som järnvägsbroar.

Skanska Teknik, Chalmers och LTU har genom sin position som projektkoordinator för "Sustainable Bridges" respektive deltagare i några av SB-projektets nyckelaktiviteter haft en unik möjlighet att, som komplement till projektarbetet, systematiskt extrahera sådan kunskap och sådana iakttagelser och erfarenheter som efter bearbetning direkt kan återföras i form av förbättringar i kommande nykonstruktion och nyproduktion.

En betydande kunskap om det svenska brobeståndet är redan tillgänglig via den brodatabas, som för närvarande håller på att byggas upp i broförvaltningssystemet BaTMan *. I projektet utvärderas och kommenteras de möjligheter BaTMan ger för att på ett systematiskt sätt lyfta fram egenskaper, goda och dåliga, i det svenska brobeståndet. Även om BaTMan är i ett utvecklingsskede, finns där redan idag en stor mängd information inmatad om det svenska brobeståndet och vilka befintliga skador som existerar. Med hjälp av resultaten kan man prioritera vilka åtgärder som kommer att vara till störst nytta vid konstruktion och produktion av nya broar. Projektresultaten kan därför direkt tjäna som underlag för utveckling av förbättrade regler, standard och praxis beträffande broars konstruktion och utförande.

Projektresultaten förväntas bli direkt användbara av konsulter och entreprenörer. I förlängningen blir det ägare och förvaltare som kommer att tillgodogöras nytta från projektet i form av ökad livslängd och minskat underhållsbehov för förvaltningsobjekten.

* BaTMan är en databank och ett förvaltningsverktyg, som avser innehålla väsentliga tekniska data beträffande broar, hamnkonstruktioner och andra byggnadsverk vilka förvaltas av Vägverket, Banverket, kommuner, hamnar m fl. Systemet, som utvecklas av Vägverket och Banverket, är i drift och uppdateras kontinuerligt även med nyproducerade objekt. Om man köper en licens är det redan idag tillgängligt över Internet för intresserade aktörer på marknaden.

4 Genomförande

Projektet har bedrivits parallellt med aktiviteterna i ”Sustainable Bridges” och framförallt i de skeden då skadeinventering och utredningar pågått beträffande nuvarande brobestånds status. Skador och avvikelser på nuvarande brobestånd har i SB-projektet bedömts med utgångspunkt från möjligheterna till förstärkning och uppgradering av befintliga broar, men har i det här aktuella projektet bedömts med hänsyn till möjligheterna att åstadkomma förbättringar i samband med byggande av nya broar i Sverige.

Dokumentation av iakttagelserna har skett på ett systematiskt sätt, (med relevans t ex för viss brotyp, konstruktionsdetalj, armeringssätt, materialkvalitet, grundläggningssätt etc.) så att den samtidigt utgör ett underlag för kommande rekommendationer.

Projektarbetet har uppdelats i etapper med delredovisningar och pågått under drygt fyra år, från våren 2004 till sommaren 2008.

Planering och utförande av projektet redovisas nedan.

Första året: Övergripande sammanställning av identifierade konstruktions- och underhållsproblem på det europeiska järnvägsbrobeståndet. Delrapport 1 till SBUF, vilken har avrapporterats i juni 2005.

Andra året: Fortsatt sammanställning av konstruktions- och underhållsproblem. Klassificering av iakttagelser med avseende på brotyper, material, brodetaljer, miljöpåverkan, orsakssammanhang (projektering, konstruktion, utförande, bristande underhåll, miljö) etc. Uppdaterad delrapport 2 avrapporterades till SBUF i juni 2006.

Tredje året: Analys och utvärdering av resultat med inriktning på nyproduktion av broar. Utredningsarbete, förslag till åtgärder. Delrapport 3 inkluderad i slutrapporteringen.

Fjärde året: Uppföljning och sammanställning av resultat från år ett t o m tre. Slutsatser och rekommendationer. Slutrapport till SBUF (denna rapport). Presentation av resultat i artiklar samt vid seminarier och konferenser t ex i Väg- och Vattenbyggaren Nr 3, 2008 samt på Brobyggardagen den 29 januari 2007.

En viktig förutsättning för ett gott projektresultat har varit att projektdeltagarna varit väl förtrogna med det pågående arbetet i SB-projektet och haft tillgång till resultaten i SB-projektet, bl a via en internetbaserad projektportal. Arbetsgruppen har därför rekryterats från Skanska Teknik och Chalmers, institutionen för Bygg- och miljöteknik samt för slutrapporten även från Luleå tekniska universitet.

5 SB-projektet

5.1 Sammanfattning av projektet

Arbetet inom SB-projektet har varit organiserat i nio delprojekt (Work Packages, WP) med följande parter som delprojektledare:

WP 1 – Uppstart och klassifikation – Network Rail, England

Detta arbete avslutades och avrapporterades efter de två första projektåren. Sammanfattning av de viktigaste resultaten redovisas i detta kapitel och visar vad som är de mest prioriterade förbättringsområdena. Det ger därmed vägledning till vilka problem som man måste försöka hitta bättre lösningar på än de som används idag vid konstruktion och produktion av olika brotyper. För att få ett ännu mer komplett underlag med svenskt perspektiv på skadetyper och skadeorsaker på broar, har även den svenska brodatabasen BaTMan använts i SBUF-projektet, se kapitel 6.

WP 2 – Ledning och granskning - Banverket, Sverige

I denna del av projektet deltog alla järnvägsbolag. De har deltagit aktivt i samtliga faser i projektet för att vägleda och se till att de övergripande projektmålen, och därmed deras behov som broägare och broförvaltare, tillgodosetts på bästa sätt. De har även fungerat som projektets interna remissinstans och deltagit samt påverkat de nationella och internationella arbetena (UIC m m) med normer och bestämmelser.

WP 3 - Tillståndsbedömning och inspektion - BAM, Tyskland

I detta delprojekt studerades och utvecklades en mängd metoder för att kunna identifiera och klassificera olika skadetyper på befintliga broar och hur allvarliga dessa skador är för bärigheten och beständigheten. Undersökningarna har sedan bl a legat till grund för indata som används för modellering av broar i WP 4.

WP 4 - Laster och bärighet - COWI, Danmark

Genom olika framtagna typer av förbättrade analysmetoder kan den verkliga bärförmågan för olika brotyper uppskattas på ett bättre sätt än tidigare. Verifiering av modeller har delvis skett genom mätningarna i WP 5 och resultaten från WP 8. För att minimera osäkerheter, och därmed alltför ogynnsamma förutsättningar i analyserna, ska den aktuella uppmätta statusen matas in (mätdata från WP 3 och resultaten från WP 7).

Som slutresultat av arbetet i WP 4 har en utförlig och användarvänlig handbok eller "Guideline" upprättats. Detta delprojekt är det största och kanske viktigaste i projektet och är även det delprojekt som varit till störst nytta för det aktuella SBUF-projektet.

WP 5 - Mätmetoder - EMPA, Schweiz

För att verifiera att broar uppträder på det sätt som man har analyserat dem på är det viktigt att mäta och följa upp den strukturella respons man får vid olika typer av laster på verkliga broar. Mätning kan även användas för att verifiera förstärkningseffekter eller i de fall man befärrar att man har skador som kan ge nedsatt bärförmåga. I detta

delprojekt studerades olika mätmetoder och mätutrustningar för att kunna genomföra mätningar på järnvägsbroar med stor tillförlitlighet. Här utvecklades bl a metoder för trådlös töjningsmätning och användning av fiberoptik. Ett speciellt viktigt område för mätningarna har varit dynamisk respons för olika strukturer, och hur dessa data ska användas för att skapa bättre analysmodeller.

WP 6 - Reparation och förstärkning - LTU, Sverige

I SB-projektet anses detta delprojekt tillsammans med WP 4 vara de viktigaste för att uppnå de övergripande projektmålen att öka tåglaster och/eller tåghastigheter på befintliga europeiska järnvägsbroar. Framförallt fokuserades det på användningen av avancerade kompositer som förstärkningsåtgärder. Olika förstärkningssystem undersöktes och ett par nya metoder för förstärkning vidareutvecklades och tillämpades inom projektet.

I detta SBUF-projekt föreslås nya material, t ex avancerade kompositer för armering, som ett alternativ till dagens armeringslösningar för tillämpning på vissa brotyper eller konstruktionsdelar i aggressiv miljö, t ex delar som utsätts för tölsalter, se mer utförlig beskrivning i kapitel 7.5.

WP 7 – Fältprovning av broar - LCPC, Frankrike

Här har fullskaleförsök på tre olika typer av broar, en stålbro, en betongbro och en murverksbro, genomförts för att studera deras beteende och identifiera eventuella dolda kapaciteter och svagheter. I Sverige genomfördes ett fullskaleförsök av en trågbro i betong. Bron förstärktes med kolfiberstänger i underkant av trågbalkarna för att öka dess böjmomentkapacitet och på så sätt kunde bron belastas till skjubbrott. Erfarenheterna från denna provning är många och resultaten från enbart denna provning har varit av stort värde för projektet.

WP 8 – Provning av mätsystem - WSP, Finland

I denna del av projektet studerades hur olika mätsystem och mätsensorer fungerade i praktisk drift under verkliga förhållanden på fem utvalda broar.

Resultaten från testerna har gett en ökad kunskap om hur olika brotyper fungerar i olika belastningssituationer, d v s hur de strukturellt tar upp laster, hur de deformeras m m. Denna kunskap hjälper till att förstå hur man ska förbättra dagens analysmodeller.

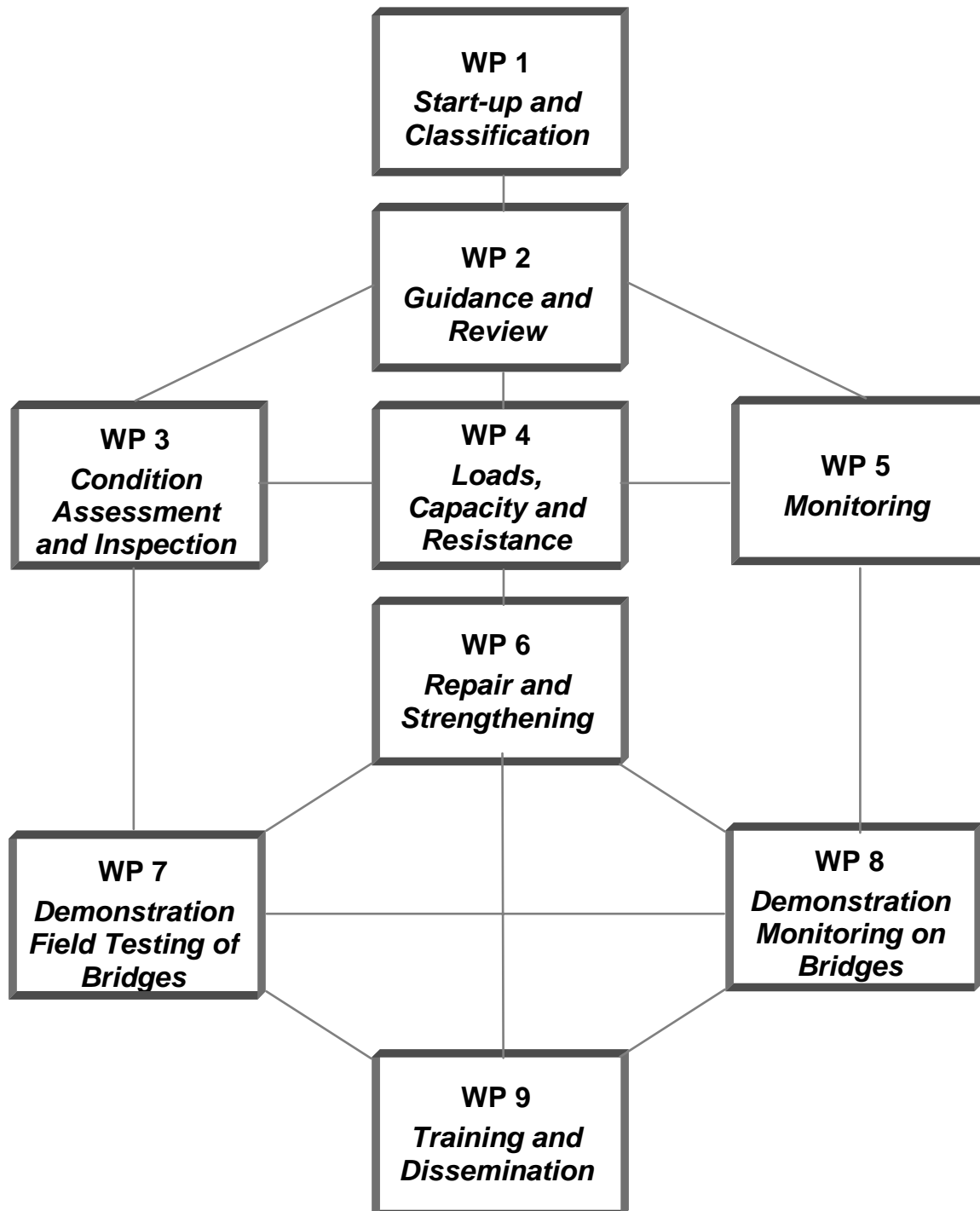
WP 9 – Informationsspridning – Wroclaw University, Polen

Här har ansvar och underhåll för projektets webbsida – www.sustainablebridges.net – legat, där all extern och intern information lagrats. Projektportalen har utvecklats av Designtech Projektsamverkan AB i Luleå, ett avknopningsföretag från LTU och ett av partnerföretagen inom SB-projektet.

I denna del låg även ansvaret för kommunikation med myndigheter beträffande påverkan på normer och föreskrifter tillsammans med representanter för järnvägbolagen i WP2. En viktig rapport är den ”User Guide” som tagits fram här och som ger en översiktlig beskrivning av projektet och dess resultat.

Projektstruktur

Delprojekten bygger på varandra och samverkar enligt Figur 5:1.



Figur 5:1 Organisationsplan för SB-projektet med nio delområden (Work Packages)

5.2 Klassifikation (WP 1)

Inventeringsarbetena inom WP 1, som utfördes efter anvisningar och ledning av de deltagande järnvägsbolagen och övriga parter inom WP 2, har avrapporterats i totalt fem rapporter. Inventeringen av det europeiska brobeståndet syftade till att ge en uppfattning om det europeiska järnvägsbrobeståndets demografi och dominerande skadetyper för olika sorters broar. Ett väsentligt syfte med inventeringen var också att sammanställa en specifikation över de europeiska järnvägsbolagens grundläggande behov beträffande mätmetoder, uppgradering, reparation, underhåll och ny kunskap för brobeståndets förvaltning.

Följande länders järnvägsbolag har deltagit i inventeringsarbetet och besvarat enkäterna: Österrike, Belgien, Tjeckien, Danmark, Irland, Finland, Frankrike, Tyskland, Ungern, Italien, Polen, Portugal, Slovakien, Spanien, Sverige, Schweiz och UK.

Huvudresultaten, som har tjänat som ett väsentligt underlag för arbetet inom detta projekt, finns redovisade i de två huvudrapporterna ”D 1.2 European Railway Bridge Demography” och ”D 1.3 European Railway Problems”. Ansvarig för inventeringsarbetets genomförande och rapportering har varit Brian Bell, forskningsledare vid det engelska järnvägsbolaget Network Rail.

En sammanfattning av resultaten ges nedan.

5.2.1 Demografi

Det finns ca 300 000 järnvägsbroar i Europa. Av dem är andelen valv- och bågbroar högst. Bland Sveriges knappt 4000 järnvägsbroar är betongbroar den vanligaste brotypen, se tabell 5:1.

Tabell 5:1. Järnvägsbrotyper i Sverige och Europa

| | Sverige | Europa |
|----------------------------------|----------------|---------------|
| Armerade betongbroar | 80 % | 23 % |
| Stålbroar | 15 % | 21 % |
| Valv- och bågbroar | 4 % | 41 % |
| Samverkansbroar och övriga broar | 1 % | 15 % |

Av järnvägsbroarna i Europa är endast 11 % yngre än 10 år och 35 % är mer 100 år gamla. Motsvarande siffror i Sverige är 33 % och 3 %, vilket innebär att Sverige har förhållandevis yngre broar. En omständighet som måste beaktas i detta sammanhang är att vi i Sverige ofta endast byter ut överbyggnaden och behåller övriga delar, som alltså kan vara av äldre datum. De flesta broar är korta broar. I Europa är 62 % (63 % i Sverige) av broarna kortare än 10 m och endast 5 % (2 %) är längre än 40 m.

Valv- och bågbroar av typen murade sten- eller tegelvalvsbroar är en dominerande brotyp i Europa. Broar av denna typ med dess speciella problem (bl a saknas ofta vetenskapligt underbyggda dimensioneringsmetoder) har vi i Sverige relativt få av. Det

dominerande inslaget i det europeiska brobeståndet har medfört att sk ”Masonry Arch Bridges” är föremål för pågående speciella utredningar stödda av den internationella järnvägsorganisationen UIC. Murade valvbroar har också behandlats inom SB-projektets olika Work Packages eftersom det varit ett prioriterat arbete.

5.2.2 Identifierade problem och behov

För att få en uppfattning om karaktären och omfattningen av de skador, som av järnvägsbolagen bedöms som allvarliga, ombads de redovisa typen av pågående underhållsarbeten på broarna. Med underhållsarbete avses då såväl återställande till ursprungligt skick som förstärkningsåtgärder eller utbyte av hel bro eller brodelar.

Resultaten har uppdelats mellan brotyperna betongbroar, stålbroar, murade valvbroar, andra typer av båg- och valvbroar och komposit- (samverkans-) broar.

Sammanfattningsvis pågår underhållsarbeten huvudsakligen i form av reparation (dvs återställande till ursprungligt skick) och som utbyte av broar eller brodelar. Utbyte av betongbroar sker i första hand i östra Europa medan utbyte av samverkansbroar (helt eller delvis) sker i första hand i Centraleuropa. För övrigt är de lokala variationerna mellan olika typer av uppträdande fel och reparationsbehov små. Förstärkningsarbeten pågår huvudsakligen på stålbroar och båg- och valvbroar.

De vanligast förekommande skadetyperna är sammanfattningsvis:

- Defekt vattenisolering
- Korrosion på armering (inklusive spännarmering) samt problem med sprickbildning i betong och avspjälkning av det täckande betongskiktet
- Degradering av betong och murverk för valv- och bågbroar
- Korrosionsskador och utmattningssprickor för stålbrodelar
- Sprickor eller minskad rörlighet i lager
- Sättningar av landfästen, t ex på grund av ruttnande träpålar
- Erosion kring landfästen och stöd i vatten .

De deltagande järnvägsbolagen uppgav prioriterade kunskapsbehov inom följande områden:

- Förbättrade analysmetoder
- Metoder som inte stör pågående trafik
- Dynamiska lastfaktorer
- Utmattning (stål och betong)
- Användning av nya material

- System för diagnos och underhåll
- Nedbrytning av betongbroar
- Bättre provningsmetoder (icke förstörande)
- Reparations- och förstärkningsmetoder
- System för diagnos, analys och underhåll av murverksbroar

5.2.3 Resultatens relevans för svenska förhållanden

Av tillfrågade järnvägsbolag i 24 europeiska länder har svar inrapporterats från 17 bolag. De länder, som inte rapporterat svar är alla mindre betydelsefulla i detta sammanhang, varför uteblivna svar knappast kommer att påverka vare sig analys eller slutsatser. Erhållna data täcker geografiskt större delen av Europa med dess olika klimatzoner. Vid en jämförelse av de rapporterade pågående underhållsarbetena mellan de olika länderna kan endast små lokala skillnader konstateras. Uppträdande skador och prioriterade områden för ökad kunskap och insatser är i många delar de samma i de europeiska länderna.

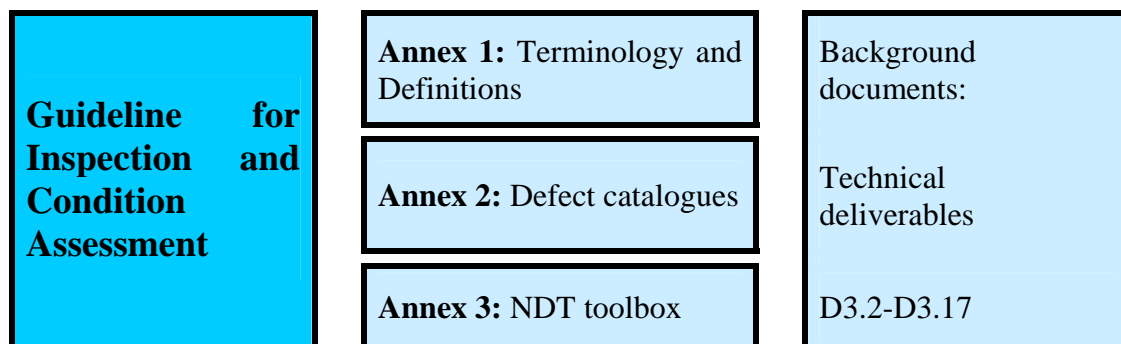
Det framgår dock av resultaten att vi i Sverige har en större andel problem med grundläggning (sättningar, erosion) än vad som rapporteras från andra länder, medan sprickor i stålbroar p g a utmattnings är relativt sett mindre förekommande på svenska järnvägsbroar.

Av naturliga skäl har vi i Sverige inte heller några prioriterade problem med murade valv- och bågbroar, p g a av att vi har ett mycket litet antal av denna brotyp. Vi har dessutom betydligt beständigare material (god kvalitet på stenmaterialet) i broarna av detta slag än i de flesta andra länder. Det har dessutom framkommit att murade valv- och bågbroar är generellt sett ett större problem i Storbritannien än i övriga europeiska länder. En avgörande orsak till detta är problem med s.k. ringseparation, vilket inte är vanligt i övriga Europa. Det visar sig att man i Storbritannien utfört broarna i separata ringar eller lager ovanpå varandra, medan det i övriga länder varit vanligare att man ställt några stenar på högkant. Dessa stenar på högkant är viktiga för att hålla samman hela strukturen, dvs. de hindrar de olika lagren eller ringarna att förskjuta sig i förhållande till varandra.

Med undantag av de murade valvbroarna kan man konstatera att de resultat beträffande skadetyper, skadeorsaker och tillhörande åtgärder som framkommit inom SB-projektet kommer att ha en hög relevans för svenska broar. Då flera av problemtyperna är gemensamma för järnvägs- och vägbroar kommer relevansen att vara hög för alla typer av svenska broar.

5.3 Tillståndsbedömning och inspektion (WP 3)



Projektresultaten i WP 3 har sammanställts i en omfattande Guideline, med en struktur enligt figur 5.2 nedan.

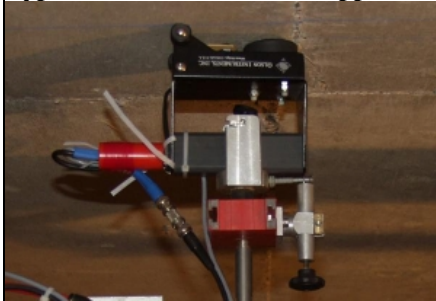
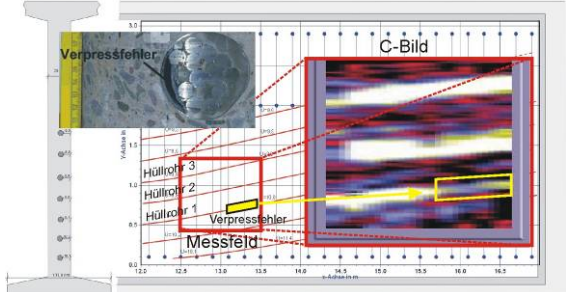


Figur 5.2 Strukturell uppbyggnad av "Guideline on Inspection and condition assessment"

Inom WP 3 har avancerade och tillförlitliga metoder utvecklats för att identifiera och analysera vanliga typer av skademekanismer på olika brotyper, bl a för att mäta kloridinträngning, sprickbildning samt armeringskorrosion på betongbroar. En övergripande målsättning har varit att metoderna i så stor utsträckning som möjligt ska vara ickeförstörande metoder (NDT, Non-Destructive Testing) och att de vid utförandet ska ge minimal störning för pågående trafik.

För att undvika missförstånd och ge enhetliga benämningar redovisas terminologi och definitioner i appendix 1. I appendix 2 finns en omfattande beskrivning och katalogisering av olika skadetyper. En översiktlig sammanställning med exempel på skadetyper finns redovisad i kapitel 5.3.1. Beskrivningar på hur man använder moderna ickeförstörande inspektionsmetoder finns redovisat i appendix 3. Exempel på hur en metod presenteras, se figur 5.3 nedan.

| Impact Echo (IE) RC | |  |  |
|-----------------------------|---|---|---|
| Field of application | Thickness determination, localisation of delamination, voids, inhomogeneities, hollows in tendon ducts mainly in concrete structures | | |
| Description | An impactor generates an acoustic wave. Waves propagate, flaws and boundary surfaces with different acoustic impedance reflect them. Transducers record surface displacements caused by multiple reflections versus time. | | |
| Physical principle | Short mechanical impact causes stress waves. Multiple reflections between surface and reflector (boundaries: back wall or void) are recorded and their frequency spectrum is transferred from time domain to frequency domain (FFT), The depth of the target is calculated with the validated the wave speed. | | |
| Limitation | Minimum detectable target size varies according to the depth of the target, Very effective test method for a depth from 0.1 m up to about 1.2 m. | | |


| | | |
|---|--|--|
| Characterisation | | |
| Physical principle | <input type="checkbox"/> Visual <input type="checkbox"/> Electrical/Electromagnetic <input checked="" type="checkbox"/> Acoustic <input type="checkbox"/> Chemical <input type="checkbox"/> Other | |
| NDT/ destructive | <input checked="" type="checkbox"/> Non-Destructive <input type="checkbox"/> Minor destructive <input type="checkbox"/> Destructive | |
| Type of test | <input checked="" type="checkbox"/> Single test <input type="checkbox"/> Monitoring | |
| Equipment Cost | <input type="checkbox"/> High <input checked="" type="checkbox"/> Medium <input type="checkbox"/> Low | |
| Required education | <input type="checkbox"/> High <input checked="" type="checkbox"/> Medium <input type="checkbox"/> Low | |
| Examination level | <input type="checkbox"/> Inspector alone <input type="checkbox"/> Inspector + specialist <input checked="" type="checkbox"/> Specialised laboratory | |
| Accuracy | Thickness of concrete slabs may be obtained to $\pm 3\%$ (ref. to BA 86/04), detectable size and approximate relationship between all influences: Germann | |
| Required equipment | IE-Test equipment (commercial systems available): Electro-magnetically enhanced or ball bearing impactor, response transducer, computer | |
| Advantages | No restriction because of risky waves (as X-ray), access only from one side of element needed, easy to handle equipment, quick results are obtained on site | |
| Disadvantages | Uncoated surface must be directly accessible. Roughness of surface may impair the coupling of the sensor. Data need to be post-processed (3-D-image) | |
| Time consumption | Manual measurements: high cost for small areas. Advised procedure: automated scanning system: Detailed investigation of areas, questionable after radar measurement, simultaneous IE + US: ca. 11s per point \rightarrow 5 cm-grid: 80 min per 1m ² . | |
| Comments | Thickness and delamination measurements are well approved. Knowledge of geometry details (shape and size of tendon ducts) is necessary to reliably model the impact echo response; method for tendon duct detection is on research level. | |
| Standardisation | e.g. BA 86/04, Ri-ZfP-TU (Tunnel-guideline, German Highway agency) | |
| Typical application: | Typical result: | |
|  |  | |
| Links, references | www.bam.de/ZfPbau-kompndium.htm ; www.germann.org http://www.bam.de/service/publikationen/zfp_kompndium/geraete/g109/g109.html | |
| Author: BAM | Contributors: USUTT | Last revision: 8/20/2008 2:53:00 PM |
| <input type="checkbox"/> Method is/will be used in project <input type="checkbox"/> Method is/ will be optimized in project by: | | |

Figur 5.3 Exempel på beskrivning av ickeförstörande provning


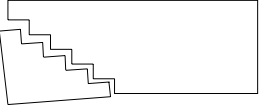
5.3.1 Skadetyper

Skador på broar klassificeras i olika skadetyper, se exempel nedan.


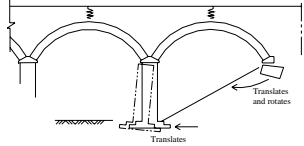
- Nedbrytning, t ex frostangrepp eller kemiska angrepp

| | | | |
|-------------|--|--|--|
| Destruction |  | <p>Deterioration of the inner physical or chemical parameters of the concrete (Concrete)</p> <p>Strength reduction, embrittlement, loosening riveted connection (Steel)</p> <p>Destruction of the inner structure of the bricks in superstructure (Masonry Arch)</p> | <p>Low freeze-thaw resistance</p> <p>Deterioration from aggressive environmental conditions</p> <p>Low water proof concrete</p> <p>Corrosion, aging, environmental influence</p> <p>Low freeze-thaw resistance, Deterioration from environmental conditions.</p> |
|-------------|--|--|--|

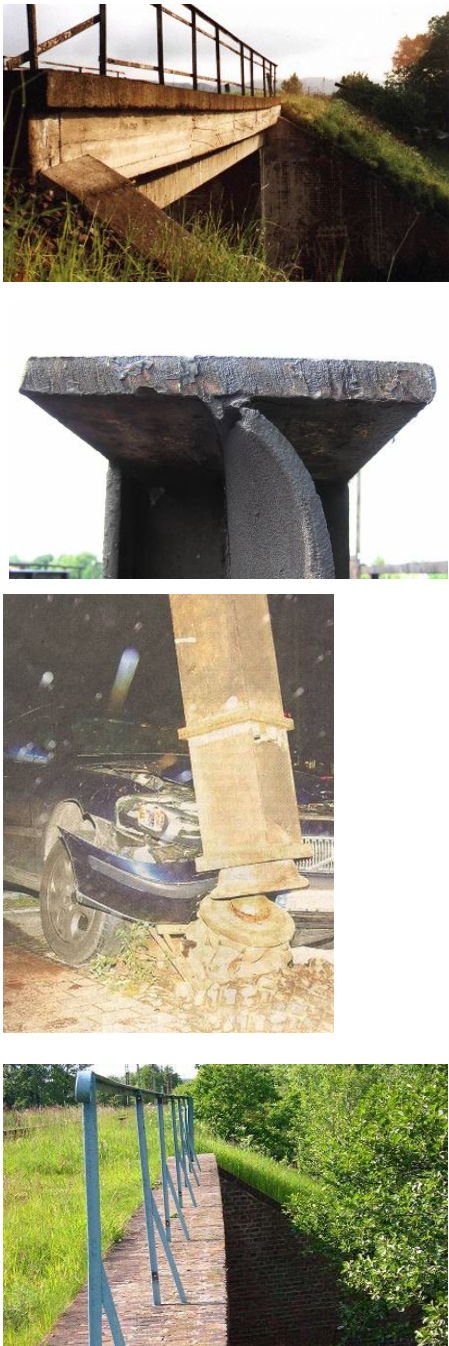
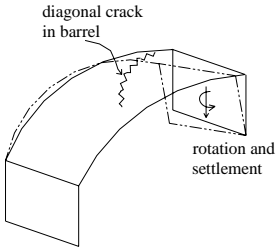
- Diskontinuitet, t ex utmattningssprickor eller sättningssprickor

| | | | |
|---------------|---|---|--|
| Discontinuity |  | <p>Break in the continuity of the structural material (Concrete and Steel)</p> <p>Fracture in piers, no load transfer possible anymore (Masonry Arch)</p> | <p>Cracks, delamination and spalling (concrete).</p> <p>Fatigue cracks at changes of cross section, i.e. increase of stiffness, caused from secondary stresses, at frozen joints, web breathing, (steel).</p> <p>Rotation, Cyclic load, Local different settlement</p>  |
|---------------|---|---|--|



- Materialförlust, t ex bortspjälkat täckande betongskikt eller genomrostade svetsar, nitar eller bultar

| | | | |
|---------------|--|---|---|
| <p>Losses</p> |  | <p>Significant reduction of cross section (Concrete)</p> <p>Riveted connection, weld defects (Steel)</p> <p>Losses in block and in joint (Masonry Arch)</p> | <p>Fracture and loss of concrete due to heavy corrosion or after chemical attack)</p> <p>Impact failure, extreme loading (earthquake), war damages</p> <p>Differential settlement</p>  |
|---------------|--|---|---|

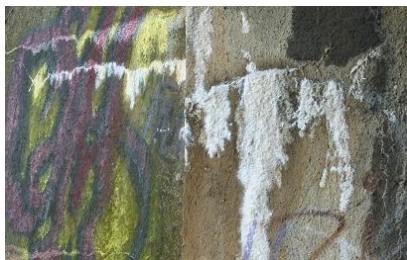

- Deformation eller förskjutning, t ex på grund av överlast, påkörning eller sättning

| | | | |
|--|--|---|--|
| <p>Deformation or Displacement</p> |  | <p>Change of the geometry in macro scale or structural element are not in their designed place (Concrete))</p> <p>Deflection, torsion, dilatation, slip, distorsion, swell (Steel)</p> <p>Translation, rotation (Concrete and Steel)</p> <p>Transverse settlements of abutment (Masonry Arch)</p> | <p>Significant change of the designed geometry, distortion, deflection, slip dilatation</p> <p>Dysfunction of joints, frozen joints, translation</p> <p>Static or dynamic overload, dislocation, failure of connection</p> <p>Impact, soil change, settlement</p> <p>Combination of causes</p>  |
|--|--|---|--|

- Skadat skyddslager, t ex isolering eller rostskydd

| | | | |
|----------------------|---|--|---|
| Damage of protection |  | Thickness decrease, cracks, (Concrete and Steel) | Loss of protection, peel off, low freeze thaw resistance, fading, aging of cover material (Concrete) |
| |  | Delamination of the plaster layer (Masonry Arch) | Low maintenance level, regular repaint, vandalism, fumes (Steel) Moisture saturation, low freeze thaw resistance |

- Förorening, t ex nedsmutsning eller organisk påväxt

| | | | |
|---------------|---|--|--|
| Contamination |  | Penetrating plant vegetation, salt efflorescence from bricks, mortar or due to environmental influences (Concrete and Steel) | Vegetation, animal caused contamination (e.g. doves) |
| |  | Penetrating plant vegetation, salt efflorescence from bricks, mortar or due to environmental influences (Masonry Arch) | Vegetation |

5.4 Laster och bärighet (WP 4)

Det övergripande målet för WP 4 har varit att ta fram riktlinjer för utvärdering av laster och bärförmåga för befintliga järnvägsbroar i Europa. Dessa har samlats i en handbok: *Guideline for Load and Resistance Assessment of Existing European Railway Bridges*, SB-LRA (2007). Riktlinjerna baseras på befintlig kunskap, men har kompletterats med riktade forskningsinsatser inom prioriterade områden. Riktlinjerna omfattar metoder för att bestämma broars bärförmåga med hänsyn till deras verkliga tillstånd, liksom metoder för att bestämma vilken verklig tåglast som verkar på järnvägsbroar.

5.4.1 Arbetet inom WP 4

Arbetet inom WP4 har främst varit inriktat på att ta fram handboken. Målet med handboken har varit att presentera riktlinjer och rekommendationer för tillämpning av de mest avancerade och nyttiga metoderna, modellerna och verktygen för att utvärdera bärförmågan hos befintliga järnvägsbroar. För att åstadkomma detta har befintlig kunskap sammanställts samt kompletterats, anpassats och vidareutvecklats genom ett antal forskningsaktiviteter inom utvalda områden. Forskningsaktiviteterna har organiserats och genomförts i fem grupper inom följande områden:

- Laster
- Säkerhetsaspekter och probabilistisk modellering
- Betongbroar
- Stålbroad
- Murverksbågbroad.

Resultaten av de olika forskningsaktiviteterna har redovisats i separata rapporter eller ”bakgrundsdocument”. I varje grupp har forskare och utförare från flera olika europeiska länder deltagit och de tekniska resultaten har presenterats, diskuterats och förankrats vid regelbundet återkommande möten inom grupperna.

Resultaten av forskningsaktiviteterna har, tillsammans med de deltagande parternas kunskap och erfarenheter, arbetas in i den slutliga versionen av handboken som färdigställdes hösten 2007. Målet har varit att skriva handboken så att den kan användas av verksamma brokonstruktörer med erfarenhet från utvärdering av järnvägsbroar i deras dagliga arbete, utan att de skall behöva gå till bakomliggande forskningsdokumentation. Handboken skall utgöra ett komplement till övriga handböcker inom området, och är tänkt att ta vid där mer grundläggande och allmänna beskrivningar inte räcker till.

Sammanlagt har 18 partners från 10 Europeiska länder deltagit i arbetet med att ta fram handboken och bakomliggande forskningsrapporter. Arbetet har letts av Cowi A/S, Danmark. Chalmers har lett arbetet i arbetsgruppen om betongbroar och har varit huvudansvarigt för kapitel 4 och 6 i handboken och deltagit i arbetet med de flesta övriga kapitel. Skanska har medverkat i arbetet med handboken och har granskat samtliga kapitel.

Förutom Chalmers och Skanska har 7 partners från Sverige deltagit: Vägverket, Kungliga tekniska högskolan (KTH), Lunds tekniska högskola (LTH), Luleå tekniska universitet (LTU) och Statens geotekniska institut (SGI). Övriga partners har varit: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) och Société Nationale des Chemins de Fer Français (SNCF), Frankrike, Wrocław University of Technology (WUT), Polen, University of Salford, Storbritannien, Deutsche Bahn AG, DB Systemtechnik (DB) och Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH), Tyskland, Swiss Federal Institute of Technology (EMPA), Schweiz, Universidade do Minho, Portugal, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Spanien och Cervenka Consulting, Tjeckien.

5.4.2 Handboken

5.4.2.1 Bakgrund, målsättning och omfattning

Idag utvärderas befintliga broars bärförmåga genom att använda normer och handböcker framtagna för nykonstruktion. Även om såväl nykonstruktion som bärighetsutvärderingar baseras på samma principer är en väsentlig skillnad att det ofta är välmotiverat med konservativa lösningar ("på säker sida") vid nykonstruktion, då dessa kan åstadkommas till en relativt låg kostnad. Vid utvärderingar av befintliga konstruktioner är det däremot ofta mycket viktigt att undvika onödigt konservativa åtgärder, eftersom dessa kan bli mycket kostsamma och leda till att broar byts ut eller förstärks i onödan. I Sverige, liksom i en del andra Europeiska länder finns särskilda normer eller handböcker för bärighetsutvärdering av befintliga broar, men även dessa är baserade på normerna för nykonstruktion och därmed ganska konservativa och oftast inte uppdaterade med hänsyn till dagens kunskapsnivå.

Handboken, *Guideline for Load and Resistance Assessment of Existing European Railway Bridges*, SB-LRA (2007), avser därför att erbjuda vägledning och rekommendationer för att kunna använda de mest avancerade och gynnsamma metoderna, modellerna och verktygen för utvärdering av bärförmågan hos existerande järnvägsbroar. Detta inkluderar bl.a. en systematisk metodik för stegvis utvärdering, avancerade säkerhetsformat (såsom probabilistisk utvärdering), förfinade metoder för strukturanalys (såsom olinjära och dynamiska analysmetoder), noggrannare bestämning av laster och hållfasthetsparametrar (baserade på t.ex. mätning och provning) och metoder för att kunna utnyttja övervakning och fältförsök. Den försöker också täcka de vanligaste problemen och mest prioriterade kunskapsbehoven för järnvägsbroar, vilka framkom i WP 1, se 5.2.

Huvudsyftet med handboken är att erbjuda brokonstruktörer (d v s brokonstruktörer som arbetar med bärighetsutvärdering av broar) bästa möjliga kunskap om metoder, modeller och verktyg, så att en så realistisk bedömning som möjligt kan göras av broarnas bärförmåga och återstående livslängd. Handboken tar sin utgångspunkt i Eurokoderna, de gemensamma europeiska bestämmelserna för nykonstruktion. Till stora delar har handboken baserats på befintlig kunskap och erfarenheter. I andra delar har det varit nödvändigt att utveckla nya metoder eller att omsätta befintlig kunskap i praktiska metoder för utvärdering av järnvägsbroar.

De flesta kapitel i handboken är generella med avseende på brotyp. Aspekter som specifika för de tre identifierade huvudkategorierna av järnvägsbroar, det vill säga betong-, stål- respektive murverksbågbroar, behandlas dock separat i kapitlen 6, 7 och 8. Dessa kapitel har samma övergripande struktur, men skiljer sig åt innehållsmässigt eftersom olika aspekter är av överordnat intresse och olika åtgärder kan leda till en ökning av respektive brotyps bärförmåga. Handboken består av följande delar, vilka beskrivs mer utförligt i följande avsnitt:

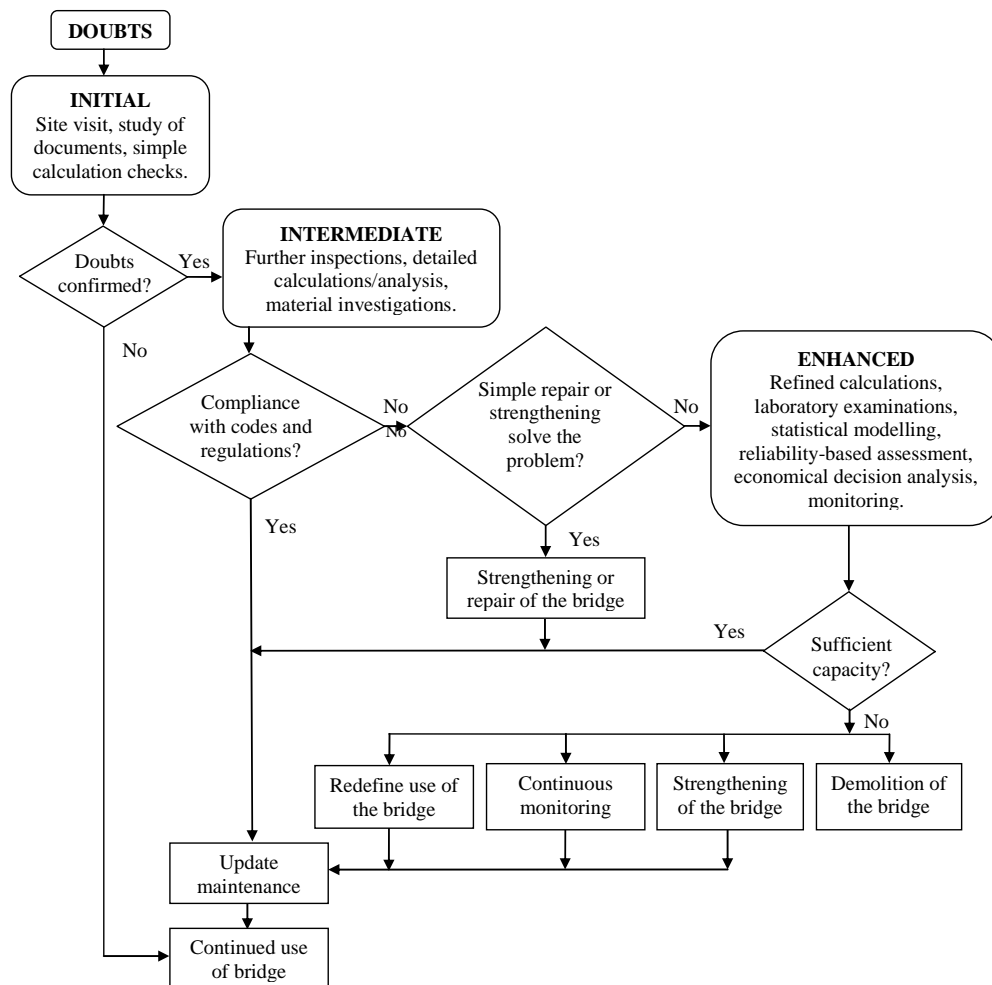
1. **Introduction.** Här presenteras bakgrund, motiv, målsättning och omfattning.
2. **Assessment Procedure.** Den övergripande metodiken för bärighetsutvärderingar beskrivs, med utvärdering på successivt allt högre detaljeringsgrad och med alltmer avancerade metoder.

3. **Requirements.** Kraven med avseende på säkerhet, funktion och beständighet behandlas, och nödvändiga säkerhetsformat och gränstillstånd presenteras.
4. **Basic information for bridge assessment.** Här beskrivs vilken information som krävs för bärighetsutvärdering på olika nivåer.
5. **Loads and dynamic effects.** Detta kapitel behandlar fr.a. tåglaster och deras dynamiska effekter, och hur dessa kan bestämmas.
6. **Concrete bridges.** Här presenteras avancerade metoder för beräkning av bärförmåga och respons hos betongbroar, inklusive bestämning av materialegenskaper och med hänsyn till nedbrytning genom korrosion och utmattning.
7. **Metal bridges.** Här presenteras avancerade beräkningsmetoder för fr.a. nitade järnvägsbroar och för utmattning. Vidare behandlas materialegenskaper för äldre typer av järn, stål och svetsar.
8. **Masonry arch bridges.** Kapitlet presenterar metoder för utvärdering av material och broarnas tillstånd, och olika typer av beräkningsmetoder behandlas, liksom hur nedbrytning och defekter kan beaktas.
9. **Foundations and Transition Zones.** Här behandlas broarnas grundläggning och interaktion med mark och jordfyllning.
10. **Improvement of assessment using information from testing and monitoring.** Ett speciellt kapitel har införts om hur mätningar från provning och övervakning kan användas för att förbättra utvärderingen.

5.4.2.2 Utvärderingsmetodik (Assessment Procedure)

I detta kapitel introduceras begrepp och tillvägagångssätt för utvärdering av befintliga broars säkerhet och funktion. Här presenteras en övergripande metodik för utvärdering av broar, se figur 5.4. En sådan utvärdering bör ske stegvis och integreras med insamling av information från dokumentation, inspektion, mätningar och provningar. Utvärderingen bör vara en del av beslutsprocessen, vars mål är att komma fram till beslut om brons status och vilka eventuella åtgärder som krävs. Vid fördjupad utvärdering används successivt alltmer noggranna och sofistikerade utvärderingsmetoder och -modeller. Här kan mer avancerade analysmetoder användas för att bestämma säkerhet, bärförmåga och respons hos bron, och för att noggrannare utvärdera lasteffekterna på bron.

Utvärderingen kan ske övergripande för alla broar på en järnvägslinje (line assessment), för en bro i sin helhet (bridge assessment) eller för ett broelement (element assessment). En svensk klassningsberäkning är normalt en utvärdering av en hel bro. I kapitlet diskuteras olika metoder för strukturanalys och några generella råd för val av analysmetoder presenteras. Detta beskrivs dock mer i detalj i kapitlen om respektive brotyp.



Figur 5.4 Flödesdiagram för utvärdering av befintliga broar.

5.4.2.3 Krav (Requirements)

I detta kapitel behandlas de krav som ställs vid utvärderingen av en befintlig bro. I synnerhet behandlas krav på säkerhet, funktion och beständighet då mer avancerade metoder används för utvärderingen. Vidare definieras och beskrivs aktuella gränstillstånd vid utvärdering.

Vid nykonstruktion används vanligen partialkoefficientmetoden för att säkerställa att kraven på säkerhet uppfylls. Denna används också vid bärighetsutvärdering. Vid mer avancerad utvärdering finns dock möjlighet att utnyttja mer nyanserade säkerhetsformat. Probabilistiska metoder kan användas för att beakta spridningen hos olika parametrar på ett noggrannare sätt och det finns möjlighet att tillgodoräkna sig ökad kunskap från till exempel mätningar. Probabilistiska metoder kan användas både för noggrannare utvärdering av bärförmågan, men också för noggrannare bestämning av brospecifika laster och lasteffekter.

Vid olinjära analyser av bärförmågan är partialkoefficientmetoden inte direkt tillämpbar, och att kombinera fullständig probabilistisk analys med olinjär analys är mycket krävande. Därför presenteras också förenklade probabilistiska metoder. En

möjlighet är att använda en global säkerhetsfaktor för bärförmågan som beräknas eller uppskattas med förenklade probabilistiska metoder utgående från icke-linjära analyser. Här presenteras också förenklade probabilistiska metoder för olika specialfall med kända brottmoder.

Säkerhetsnivån vid bärighetsutvärdering måste alltid bestämmas av den myndighet som är ansvarig för brons säkerhet. Säkerhetsnivån enligt olika länder och olika bestämmelser jämförs och diskuteras. Olika överväganden som kan påverka den valda säkerhetsnivån diskuteras, såsom skillnaden mellan nykonstruktion och utvärdering av en befintlig konstruktion, kostnaden för åtgärder som höjer säkerheten och konsekvenser av brott, inklusive inverkan av redundans i systemet. Vidare diskuteras säkerhetsformat och säkerhetsnivå vid utvärdering av återstående livslängd.

I kapitlet definieras aktuella gränstillstånd för utvärdering av broar. I tillägg till brott- och bruksgränstillstånd, införs ett särskilt gränstillstånd för utmattning. Utmattning hänförs oftast annars till antingen brott- och bruksgränstillstånd. Vidare införs ett särskilt gränstillstånd för beständighet (durability limit state) för utvärdering av livslängd.

5.4.2.4 Underlag för utvärdering av broar (Basic information for bridge assessment)

I detta kapitel ges vägledning för att identifiera och samla in nödvändig information för utvärdering av en bro. För många länder i Europa finns mycket begränsad dokumentation om gamla järnvägsbroar i brodatabaser och broarkiv. Här beskrivs vilken information som krävs och hur den kan erhållas. Beroende på vilken noggrannhetsnivå utvärderingen genomförs på, krävs olika uppgifter och olika noggrann beskrivning av dessa.

I kapitlet visas vanliga typer av järnvägsbroar. Vidare beskrivs inverkan av och vikten av information om produktionsprocessen, tidsberoende aspekter, geometri, grundläggning och randvillkor, materialegenskaper och brons kondition med avseende på nedbrytning, skador och utförda åtgärder.

5.4.2.5 Laster och dynamiska effekter (Loads and dynamic effects)

Här beskrivs vilka laster som måste beaktas vid utvärdering av järnvägsbroar och hur laster på spåren sprids genom räls, slipers och ballast. Tåglastmodeller för såväl deterministisk som probabilistisk säkerhetsutvärdering beskrivs.

På grund av dynamiska effekter blir lasteffekten på bron större än vad som erhålls ur en statisk strukturanalys. I kapitlet presenteras metoder för att ta hänsyn till detta på såväl förenklat sätt som med mer avancerade metoder. Förenklade värden för dynamisk förstöringsfaktor presenteras för såväl brottgränstillstånd som utmattnings- och bruksgränstillstånd. För utvärdering på de noggrannare nivåerna enligt figur 5.4, i samband med ökning av axellaster eller tågastigheter, är det ofta välmotiverat med en noggrannare dynamisk utvärdering. Anvisningar ges därför för dynamisk analys av bron. Olika faktorer som påverkar den dynamiska responsen beskrivs liksom hur det

sammansatta systemet med bro och tåg kan modelleras och analyseras analytiskt och numeriskt.

Här beskrivs också hur mätningar på bron kan användas för att bestämma viktiga indataparametrar till den dynamiska analysen. Axellaster från tågen kan bestämmas med s.k. WIM (Weight In Motion) genom instrumentering av spår eller bro. Metoder för att bestämma dynamiska egenskaper såsom dämpning och egenfrekvenser hos bron beskrivs också, liksom bestämning av spårstyvhet och tåghastighet.

5.4.2.6 Betongbroar (Concrete Bridges)

Kapitlet fokuserar på avancerade metoder för den mest detaljerade utvärderingsnivån enligt figur 5.4, d.v.s. mer avancerade metoder än vad som normalt används vid dimensionering och konventionell klassningsberäkning. Speciellt framhålls olinjära analyser eftersom dessa har störst potential för att kunna påvisa ökad bärförmåga. Vilka metoder som är mest lämpliga måste dock avgöras individuellt för varje bro med hänsyn till syftet med utvärderingen och bronns svagheter. Utvärdering på de grundläggande nivåerna förutsätts vara välbekant för läsaren.

För utvärdering på den mest avancerade nivån måste bronns egenskaper bestämmas noggrant. För befintliga betongbroar är tillståndet med hänsyn till skador och nedbrytning väldigt viktigt. För en korrekt strukturanalys av bron är dess randvillkor och samverkan mellan olika bärverksdelar mycket viktig, och för en del brotyper kan även produktionsmetoden och utbyggnadsförloppet ha stor inverkan. För betongbroar är materialegenskaperna i konstruktionen av speciellt intresse. En metod för att utvärdera hållfastheter och andra materialegenskaperna *in situ* för såväl betong som armering har därför utvecklats. Den omfattar såväl betong som slakarmering och förspänningsarmering, och materialegenskaper för såväl deterministisk som probabilistisk utvärdering behandlas.



Figur 5.5 Järnvägsbro av armerad betong. Loussajock-bron i Kiruna.

Avancerade metoder för strukturanalyser presenteras. Systemberäkningar på olika nivåer med hänsyn till materialets respons, i enlighet med Eurokoderna, presenteras. Rekommendationer angående omfördelning av moment från linjära tredimensionella analyser av plattbroar har utvecklats och presenteras. Avancerade modeller för lokal beräkning av bärförmåga behandlas, t.ex. för kombinerad skjuvning, vridning och böjning.

Ett av huvudsyftena var att underlätta användandet av olinjära analysmetoder. Olinjär analys med finit elementmetod (FEM) framhålls som den beräkningsmetod som oftast har störst potential att avslöja ytterligare källor till ökad bärförmåga. Detta har påvisats genom praktisk tillämpning på ett antal broar. Olinjära analyser ger också en ökad förståelse för konstruktionens beteende, vilket ger ett bättre beslutsunderlag för beslut i utvärderingsprocessen. Olinjär analys med FEM beskrivs i kapitlet och rekommendationer för praktisk användning ges.

Ett annat huvudsyfte var att ge metoder för att utvärdera återstående bärförmåga för broar utsatta för nedbrytning. Korrosionspåverkan behandlas utförligt. Baserat på detaljerade analyser med olinjär FEM ges en översikt över korrosionens inverkan på armeringens vidhäftning till betongen. Rekommendationer ges därefter för utvärdering av bärförmågan hos betongbroar med korroderande armering med hänsyn till förankringskapaciteten.

Livslängden hos järnvägsbroar begränsas ofta av utmattning. De metoder som används för att utvärdera säkerheten med hänsyn till utmattning och broarnas återstående livslängd är ofta dock mycket konservativa, och baseras på begränsad kunskap jämfört med andra beräkningsmodeller för armerad betong. I projektet har därför en metodik för förbättrad utvärdering med hänsyn till utmattning i betongbroar tagits fram. Tyngdpunkten har legat på broar med korta spann och på sekundära bärverksdelar. Genom att kombinera beräkningar med mätningar på bron, och genom att utnyttja den stora redundansen hos armerade betongbroar kan livslängden med hänsyn till utmattning förlängas avsevärt.

5.4.2.7 Stålbroad (Metal Bridges)

Kapitlet behandlar broar av olika historiska järnbaserade material, från gjutjärn över tidiga spröda stålsorter till dagens moderna konstruktionsstål. Materialegenskaper och hur dessa kan bestämmas behandlas ingående. Stålbroad kan sammanfogas på olika sätt och de senaste 50 åren har det framför allt skett genom att svetsa. De allra flesta järnvägsbroar av stål är dock äldre än så, och kapitlet fokuserar på nitade stålbroad, eftersom detta är den vanligast förekommande typen. Nitade konstruktioner är historiska och byggs i princip inte längre, och utvecklingen av beräkningsmetoder för dessa har inte varit prioriterade. I projektet har därför avancerade utvärderingsmetoder för dessa tagits fram och presenteras i kapitlet. Ofta är hållfastheten med avseende på utmattning avgörande för stålbroad, och avancerade analysmetoder för utvärdering av återstående livslängd har utvecklats.



Figur 5.6 Järnvägsbro av nitade stålprofiler. Forsmobron.

För en avancerad utvärdering är det viktigt att bestämma förutsättningarna noggrant. För stålbroar är det viktigt att ta hänsyn till hur de är byggda och sammanfogade. För nitade broar har detaljer som nitarnas klämkraft och hur nithålen i stålplåtarna åstadkommit stor betydelse för fr.a. utmattningshållfastheten. Randvillkor och styvheter i knutpunkter är viktiga för strukturanalysen. För äldre järn och stål är materialegenskaperna av speciellt intresse. Anvisningar ges för bestämning av en rad materialegenskaper, såsom den kemiska sammansättningen, hållfasthet och arbetskurva, utmattningsegenskaper (såsom Wöhler-kurvor), brottmekaniska egenskaper och svetsbarhet. Det ges också utförliga anvisningar för provning av materialegenskaper. För utvärdering med hänsyn till utmattning måste dessutom brons lasthistoria undersökas och karakteriseras. Brons kondition med hänsyn till skador och nedbrytning är också viktig, och här behandlas framför allt korrosion och defekter hos nitförband.

Modellering och analys behandlas med fokus på nitade broar: Här ges anvisningar för bestämning av bärförmåga för nitar. Vidare behandlas tvärsnittsklasser för nitade liksom för svetsade konstruktionsdelar. Möjligheten till omfördelning av moment genom plastisk deformation behandlas också, liksom beräkning av rotationsförmåga. Metoder för beräkning av återstående livslängd med hänsyn till utmattning behandlas utförligt. Metoderna är givna för de olika noggrannhetsnivåerna för utvärdering enligt figur 5.2, och går från förenklade metoder enligt befintliga normer till avancerade metoder baserade på probabilistisk analys. Vidare behandlas beräkningsmodeller för att bedöma behov och effekt av förstärkning av nitade stålbroar

5.4.2.8 Murverksbågbroar (Masonry Arch Bridges)

Över 40 % av Europas järnvägsbroar är båg- och valvböar av murverk. Till skillnad från de flesta andra brotyper är det framför allt deras massa och form som ger stabilitet och förmåga att bära laster. Trots att broarna är så vanliga är beräkningsmetoder och kunskap om verkningssätt sämre utvecklade än för andra vanliga brotyper. Hittills har utvärdering av murverksbågbroar framför allt skett med starkt förenklade och

formaliserade metoder som inte är direkt baserade på strukturberäkningar. Istället har kvalitativa ingenjörsmässiga bedömningar och stor erfarenhet hos utvärderarna varit viktiga.

I handboken presenteras en utvärderingsmetodik där utvärderingen av murverksbågbroar kan ske med successivt ökande noggrannhet enligt figur 5.4. Beskrivningen av utvärderingsmetoderna börjar för murverksbågbroar på en mer grundläggande nivå jämfört med andra brotyper och inkluderar samtliga noggrannhetsnivåer. Utvärderingen sker i 7 steg, men med olika avancerade metoder för de olika noggrannhetsnivåerna:

1. Undersökning av geometri och uppbyggnad
2. Bestämning av belastning
3. Bestämning av material och materialegenskaper
4. Strukturanalys
5. Kontroll i brottgänstillstånd
6. Kontroll i "tillåtlighetsgränstillstånd" ("permissible limit state")
7. Utvärdering av återstående livslängd.

Undersökning av geometri och uppbyggnad är en viktig del för murverksbågbroar eftersom noggrann dokumentation ofta saknas och delar av konstruktionen normalt är dold genom överfyllnaden på valven. Det är också viktigt att få en god uppfattning av materialegenskaperna, speciellt vid ökande noggrannhetsnivå. Detta omfattar såväl sten, tegel och fogmaterial i murverket som kompositen murverk och egenskaperna hos överfyllnadsmassorna. Det är också av största vikt att ta hänsyn till nedbrytning och brons tillstånd, såväl vid utvärdering av materialegenskaper som vid bestämning av geometri och uppbyggnad.



Figur 5.7 Järnvägsbro i form av murverksbåge. Olesnica, Polen.

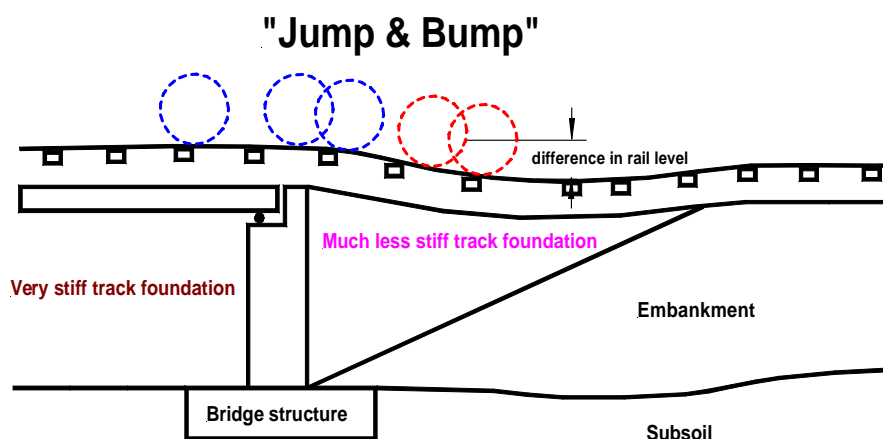
Som grund för strukturanalysen ges en beskrivning av verkningsätt och möjliga brottmoder för denna typ av broar. Vid utvärdering på grundläggande nivå görs inga egentliga strukturberäkningar, utan en metod benämnd MEXE används för att relatera bärförmågan hos den aktuella bron till en "standardvalvbåge". Noggrannare nivåer innebär beräkningar med gränslastmetoder eller metoder baserade på kontinuumsmekanik och olinjär analys, t.ex. med finit elementmetod.

Brottgränstillstånd kan sägas vara entydigt bestämt som tillståndet när bron är på gränsen till kollaps. När det gäller murverksbågbroar finns dock inte någon samsyn på övriga gränstillstånd (bruks- utmattnings- och beständighetsgränstillstånd) och det är svårt att sätta upp utvärderingskriterier på samma sätt som för stål- och betongbroar. Istället har man infört ett sammanfattande gränstillstånd, "permissible limit state" (PLS). Detta definieras, fritt översatt, som ett tillstånd då bronns möjligheter att bära sina brukslaster under den förväntade livstiden är på gränsen att kunna uppfyllas.

5.4.2.9 Grundläggning och övergångszoner (Foundations and Transition Zones)

Vid utvärdering av befintliga broar är det viktigt att ta hänsyn till hur grundläggning och övergångszoner påverkar bronns verkningsätt och belastningen på bron, i synnerhet för framtidens tyngre och snabbare tågtrafik. I detta kapitel behandlas de geotekniska frågeställningarna för broarnas grundläggning och övergångszoner. Generella rekommendationer presenteras och exempel på utvärderingsmetoder presenteras. Metoderna är generella för alla brotyper, men inverkan av jordens respons har ofta störst inverkan på murverksbågbroar.

Övergångszonen mellan bak och bro är en av de mest komplicerade delarna av en spårunderbyggnad. Här uppträder koncentrerade spänningar och lokaliserade deformationer till följd av dynamisk och cyklisk belastning och den stora styvhetskillnaden mellan bro och anslutande bank. Många av de problem som uppstår har att göra med den allt tyngre och snabbare tågtrafiken och beror på sättningar i bank och underliggande jordlager. I kapitlet beskrivs metoder för att utvärdera övergångszonen och beräkna sättningarna, och numeriska analyser för att utvärdera deformationer och belastningar på bron beskrivs.



Figur 5.8 Illustration av problem vid övergångszonen mellan bro och bank.

Metoder för att utvärdera bärförmåga hos befintlig grundläggning presenteras också. Dessa är främst tagna från resultaten av ett annat EU-projekt, RuFUS. Liksom för övergångszoner är det viktigt med inspektion och fältmätningar för att bestämma förutsättningarna för den enskilda bron.

5.4.2.10 Förbättrad utvärdering genom provning och övervakning

(Improvement of assessment using information from testing and monitoring)

Ett speciellt kapitel har införts om förbättring av strukturmodeller genom mätningar vid provning och övervakning. Här behandlas hur information från icke-förstörande provning och provtagning kan användas för att få bättre underlag för strukturberäkningar. En viktig aspekt som behandlas här är bestämning av närvaro och omfattning av skador och nedbrytning. Ett speciellt avsnitt behandlar bayesiansk uppdatering där resultaten från provning används för att uppskatta spridningen i mätta parametrar så att de kan användas för probabilistisk utvärdering.

Här beskrivs också provbelastning av broar. Dessa kan vara av två konceptuellt olika typer: syftet kan antingen vara att genom provbelastningen påvisa erforderlig bärförmåga (proof testing) eller att undersöka brons respons för mer normala ”brukslaster” (diagnostic testing). ”Proof testing” kan användas om man har väldigt lite information om bron och följden av en eventuell skada eller ett brott i bron inte bedöms vara alltför kostsam t.ex. till följd av störd trafik. ”Diagnostic testing” syftar till att få en ökad kunskap om brons respons och kan kombineras med uppdatering av strukturmodellen. På detta sätt kan parametrar som inte kan mätas direkt bestämmas, som t.ex. egenskaper hos randvillkor och knutpunkter eller effekter av skador.

5.4.3 Forskning

Forskningen inom WP4 har organiserats och genomförts i fem grupper enligt avsnitt 5.4.1. Den redovisas i separata rapporter eller ”bakgrundsdokument” på sammanlagt över 1000 sidor. Nedan beskrivs resultaten av forskningen inom varje undergrupp.

Forskningsaktiviteterna har som regel bestått av att sammanställa kunskapsläget inom ett område där den utförande partnern är väl insatt, att komplettera den befintliga kunskapen genom riktade forskningsinsatser och att omsätta kunskapen i praktiska metoder för utvärdering av järnvägsbroar.

5.4.3.1 Säkerhetsaspekter och probabilistisk modellering.

Inom denna grupp har man genomfört forskningsaktiviteter inom fem områden, beskrivna nedan. Huvudsyftet var att överbrygga kunskapsgapet mellan de mest avancerade utvärderingsmetoderna baserade på probabilistiska metoder och de som används i det dagliga arbetet av brotvärderare ansvariga för utvärdering av broars bärförmåga och respons. Bakgrundsdokumentet *Safety and Probabilistic Modelling*, SB 4.4 (2007), förklarar och sammanfattar därför grunden till säkerhetsutvärdering

med probabilistiska angreppssätt, och erbjuder förenklade metoder när detta är möjligt. Här presenteras också tillämpningsexempel för att underlätta förståelsen av metoderna.

I den första forskningsaktiviteten har bakgrunden till de **säkerhetsformat och säkerhetsnivåer** som presenteras och rekommenderas i kapitel 3 i handboken sammanställts. Säkerhetsformaten spänner från enkla format som är enkla att tillämpa till de mest avancerade och noggranna. Säkerhetsformaten delas upp på utvärdering på komponentnivå respektive utvärdering på systemnivå. Vid dimensionering används normalt linjär strukturanalys och konstruktionens säkerhet kontrolleras på komponentnivå genom lokal analys av bärförmågan (för respektive tvärsnitt). Detta är rationellt men innebär att konstruktionens redundans inte utnyttjas. Vid kontroll av säkerheten på systemnivå tar man hänsyn till konstruktionens verkliga respons och olinjära analysmetoder används. För säkerhetsutvärdering på såväl komponent- som systemnivå presenteras tre olika säkerhetsformat: partialkoefficientmetoden, probabilistisk utvärdering och förenklade probabilistiska metoder. På systemnivå presenteras dessutom metoder med global säkerhetsfaktor. Vidare jämförs säkerhetsnivån mellan olika länder och olika normer. I ett appendix visas i ett praktiskt exempel på Brunna-bron, en järnvägsbro i Sverige, hur de olika säkerhetsformaten kan användas vid utvärdering.

För att underlätta användandet av probabilistiska metoder har en metodik för **förenklad probabilistisk utvärdering** utarbetats för specialfallen böj- och tvärkraftsbrott i armerade och förspända betongbroar och i stålbroar. Konstruktören som genomför utvärderingen behöver endast beräkna nominell bärförmåga för respektive respons enligt norm på vanligt sätt. De parametrar som behövs för den probabilistiska utvärderingen, såsom variationskoefficienten, kan sedan bestämmas med hjälp av tabeller och diagram som tagits fram och som presenteras i bakgrundsrapporten baserat på bronns karakteristiska variabler (som exempelvis armeringsmängder, förspänningsnivå och materialegenskaper). Tabellerna har tagits fram för att representera typiska tvärsnitt hos Europeiska järnvägsbroar. I ett appendix presenteras en undersökning av järnvägsbrotyper som gjordes med hjälp av fem europeiska ”banverk”.

Den tredje forskningsaktiviteten behandlar **probabilistisk olinjär analys**. Här presenteras metoder för olinjär strukturanalys och probabilistiska analysmetoder lämpliga för olinjär analys med finit elementmetod. Dessa omfattar Monte Carlo-simulering, metoder baserade på responsytor (response surface methods) och känslighetsbaserad analys (sensitivity based analysis). Praktisk tillämpning av probabilistisk olinjär analys demonstreras med hjälp av två exempel, redovisade i var sitt appendix. Det första exemplet visar utvärderingen av en befintlig betongbro, medan det andra är av en stålbro.

Den fjärde forskningsaktiviteten behandlar utvärdering av **säkerhet och återstående livslängd med avseende på utmattning** av järnvägsbroar av stål eller armerad betong med hjälp av probabilistiska metoder. En metodik med successivt förfinade steg har tagits fram. Man börjar med en förenklad deterministisk kontroll för identifiering av kritiska bärverksdelar. En detaljerad probabilistisk metod används sedan vid inspektion av de kritiska delarna. Utmattningssäkerheten uttrycks sedan om trafiklast som funktion av antal framtida tågpassager. Återstående livslängd kan delas in i tre tidsperioder, för vilka lämpliga säkerhetsåtgärder föreslås.

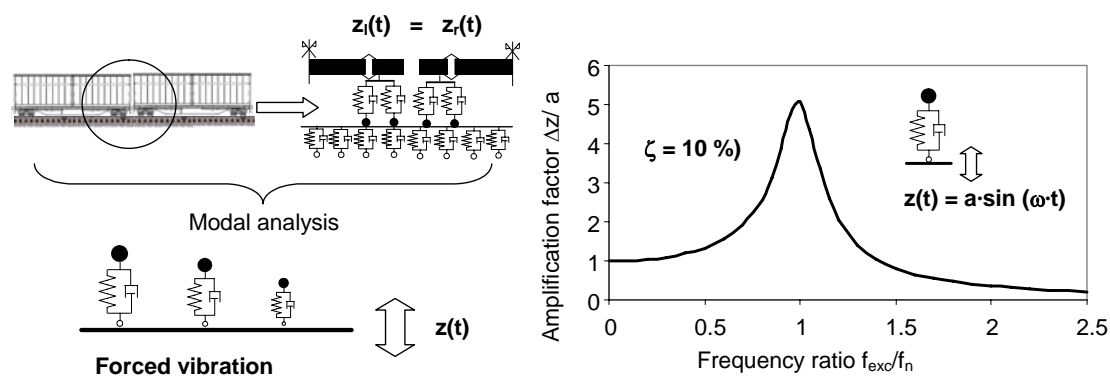
Broars övergång till bank är en av de mest komplicerad delarna för befintliga järnvägsbroar, på grund av olika styvheter i responsen och den dynamiska och cykliska lasten från trafiken. allt Den femte forskningsaktiviteten behandlar långtidsegenskaper hos undergrunden under järnvägsbankar. Här presenteras en **förenklad probabilistisk metod att förutsäga sättningar**. Rekommendationer ges för hur metoden kan användas för utvärdering av befintliga broar utsatta för högre hastigheter och ökade trafiklaster. Metoden är tillämpbar för järnvägsbroar på eftergivliga jordarter och har kalibrerats mot långtidsmätningar av sättningar hos järnvägsbanker.

5.4.3.2 Laster och dynamiska effekter

Forskningen inom denna grupp har varit inriktad på dynamiska effekter av trafiklast på järnvägsbroar och metoder för utvärdering av verkliga trafiklaster. Resultaten av de tre forskningsaktiviteterna har arbetats in i kapitel 5 i handboken och redovisas i detalj i bakgrundsdokumentet *Loads and Dynamic Effects*, SB 4.3 (2007).

En första forskningsaktivitet innebar en **sammanställning av europeiska bestämmelser för bärighetsutvärdering**. Här har några av de nationella bestämmelserna för järnvägsbroar gått igenom med fokus på trafiklastens vertikala belastning. Syftet har varit att granska filosofin bakom bestämningen av trafiklastens effekt snarare än att sammanställa siffror och regler, för att om möjligt kunna utnyttja befintliga metoder i det fortsatta arbetet.

I en andra forskningsaktivitet har metoder sammanställts och utvecklats för att kunna **utvärdera den verkliga trafiklasten på järnvägsbroar**. I rapporten beskrivs hur man, utgående från insamlad mätdata, kan beräkna verkliga trafiklaster med metoder för B-WIM (Bridge Weigh-in-Motion), och hur man kan bestämma tåghastigheter och bronns influenslinjer. Dessutom beskrivs en metod för hur uppmätta data på axellaster kan användas för att bestämma en brospecifik karakteristisk trafiklast. Dessutom har en teoretisk studie om probabilistiska dynamiska förstöringsfaktorer genomförts. För att demonstrera metoderna redovisas hur verkliga trafiklaster har bestämts för två järnvägsbroar.



Figur 5.9 Exempel på modellering av dynamisk last från järnväg.

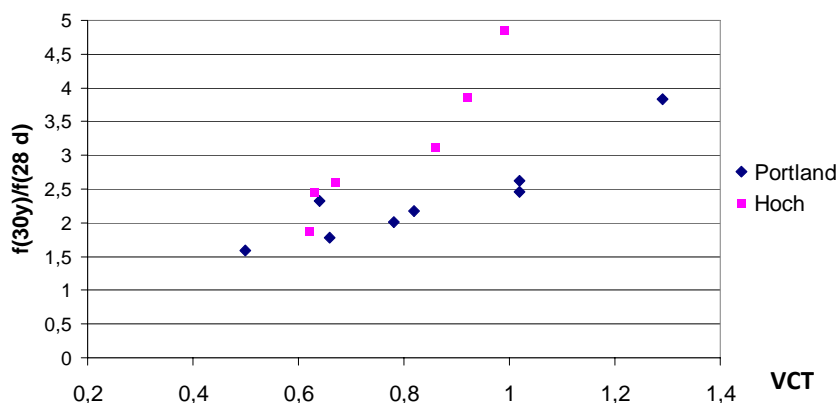
Den tredje forskningsaktiviteten behandlar **dynamiska effekter av järnvägstrafik-laster på broelement**. Man skiljer här på den dynamiska interaktionen i brottgränstillstånd, då i bron har en olinjär respons, och i bruksgränstillstånd då linjär respons kan antas. Inverkan av olika dynamiska fenomen i de olika gränstillstånden diskuteras och inverkan av de avgörande parametrarna demonstreras med hjälp av enkla dynamiska modeller. Lämpliga dynamiska förstoringfaktorer föreslås för vart och ett av gränstillstånden.

5.4.3.3 Betongbroar

Avsikten med forskningen var att sammanfatta och utveckla metoder som kan användas för att påvisa högre bärförmåga och ökad livslängd för betongbroar. Resultaten är inarbetade i kapitel 6 i handboken och redovisas i detalj i bakgrundsdokumentet *Non-Linear Analysis and Remaining Fatigue Life of Reinforced Concrete Bridges*, SB 4.5 (2007). Ett av huvudmålen var att främja användandet av mer avancerade metoder för strukturanalys och bärförmåga. Olinjära analyser framhålls eftersom dessa har störst potential att kunna visa på orsaker till att broar har högre bärförmåga. De ger även ökad förståelse för broarnas verkningssätt och därigenom en bättre grund för beslut i utvärderingsprocessen. Ett annat huvudmål var att erbjuda metoder för utvärdering av återstående bärförmåga och livstid för broar utsatta för nedbrytning genom korrosion och utmattnings. Forskningen har genomförts i sex olika forskningsaktiviteter vilka redovisas nedan.

Metoder för **förbättrad utvärdering av materialegenskaper** har tagits fram. Syftet var att kunna göra en så god uppskattning som möjligt om relevanta materialparametrar för en specifik bro, och dessutom att kunna beskriva parametrarnas osäkerheter som underlag för probabilistisk utvärdering. Som underlag är specifikationerna från ritningar och annan dokumentation viktig, liksom provning av materialegenskaperna *in situ*.

Metodik och rekommendationer för utvärdering av betongens materialegenskaper i bron baseras på såväl ursprungligt angivna hållfasthetsklasser som på materialprovning. Med denna kan hänsyn tas till aspekter som materialparametrarnas



Figur 5.10 Exempel på relativ ökning med tiden (från 28 dygn till 30 år) av tryckhållfastheten för äldre betongkvaliteter.

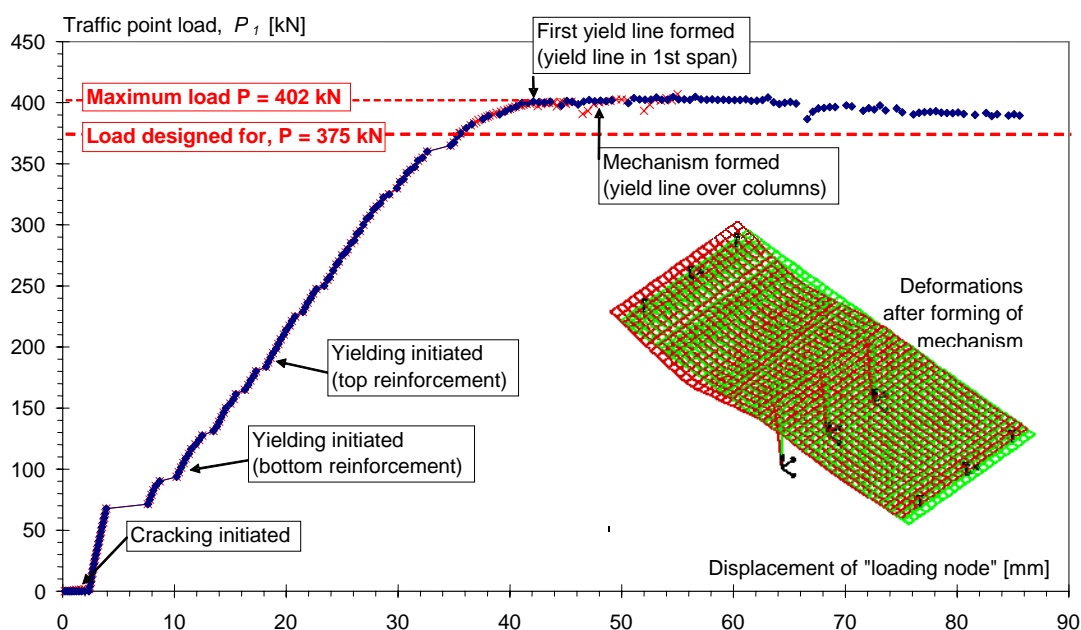
förändring med tiden på grund av kontinuerlig hydratation och nedbrytning, skillnaden mellan hållfastheten i bron och i standardprovkroppar och inverkan av storlek och form på provkroppar. För järnvägsbroar kan även inverkan av dynamiska effekter på hållfastheter och styvheter beaktas. Som referensegenskap för betongen används oftast tryckhållfastheten, och andra egenskaper såsom elasticitetsmodul, draghållfasthet, brottenergi, vidhäftningshållfasthet och betongens arbetskurva relateras till denna.

Armeringens flythållfasthet och spännarmeringens arbetskurva kan normalt bestämmas med god precision från angiven hållfasthetsklass eller baserat på tillverkarens specifikationer. Arbetskurvan för slakarmering kan bestämmas baserat på duktilitetsklassen. Provning kan användas för att förbättra underlaget, och för framförallt äldre armeringsstål kan ofta ett betydligt större hårdnande påvisas.

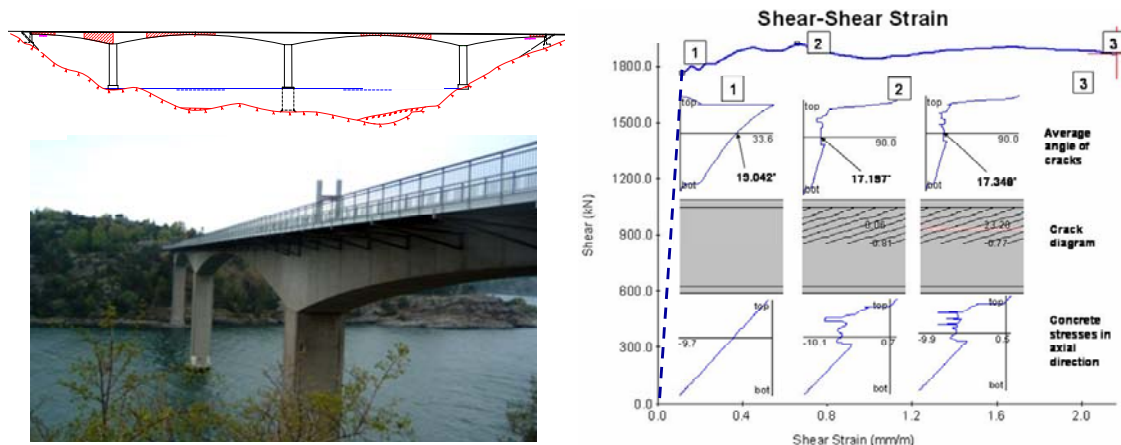
Tredimensionella analyser med finit elementmetod (FEM) blir allt vanligare, både för dimensionering och analys av broar. För plattbroar med koncentrerade stöd fås stora momentkoncentrationer i plattan över stöden. Möjligheten till **omfördelning av snittmoment och -krafter från linjär analys** har därför studerats och rekommendationer för detta tagits fram. I projektet har en typisk plattbro studerats och olinjära analyser utförts med armeringen dimensionerade enligt olika principer.

Studien visar på två huvudsakliga orsaker till koncentrationer av snittmoment och snittkrafter. Den ena är att plattor i FE-modeller ofta understöds i en enda punkt, t.ex vid ett upplag eller av en pelare. Om elementnätet är tillräckligt finmaskigt invid stödjepunkten kan momenten och tvärkrafterna från de kritiska snitten runt exempelvis en pelare användas och de högre toppvärdena innanför dessa snitt ignoreras.

Den andra huvudorsaken till att momentkoncentrationer uppstår är att materialet modelleras med linjär respons, medan en betongplatta i verkligheten får uppsprickning



Figur 5.11 Exempel på resultat från olinjär analys av en typisk plattbro.



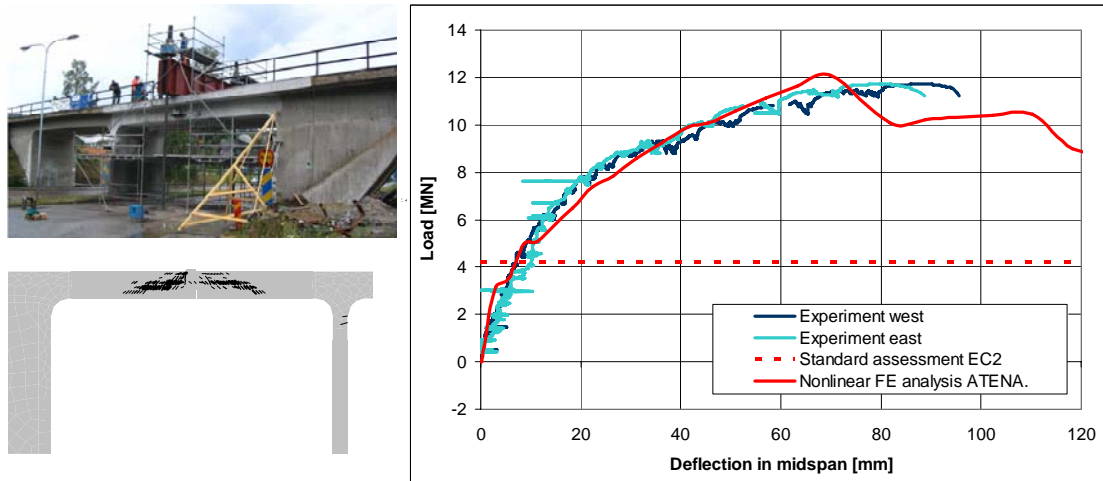
Figur 5.12 Exempel på analys av tvärkraftskapacitet med Modified Compression Field Theory, Källönsbron, Sverige .

och plasticering av armeringen. Studien visar att möjligheten till omlagring i transversell riktning (i förhållande till armeringsstängerna) är god. Den transversella riktningen (i förhållande till armeringsstängerna) är god. Den rotationskapacitet som krävs skiljer sig inte mycket mellan fall med mer koncentrerad armering över stöd och fall då armeringen fördelats jämnt över stora strimlebredder. I exemplen var det tvärtom nödvändigt att tillgodoräkna sig all armering, oavsett hur den var fördelad i tvärriktning, för att inte underskatta bärförmågan kraftigt.

Det finns idag väl underbyggda och verifierade modeller för att ta hänsyn till **kombinerad böjning, skjuvning och vridning** på ett noggrannare sätt än med de metoder som presenteras i t.ex. Eurokoderna. Sådana metoder, t.ex. baserade på den modifierade tryckfältsteorin (Modified Compression Field Theory), presenteras och exemplifieras i rapporten. Vidare behandlas sprickbildning och beräkning av sprickvidder vid kombinerad böjning, skjuvning och vridning. Metoderna exemplifieras på tre olika broar.

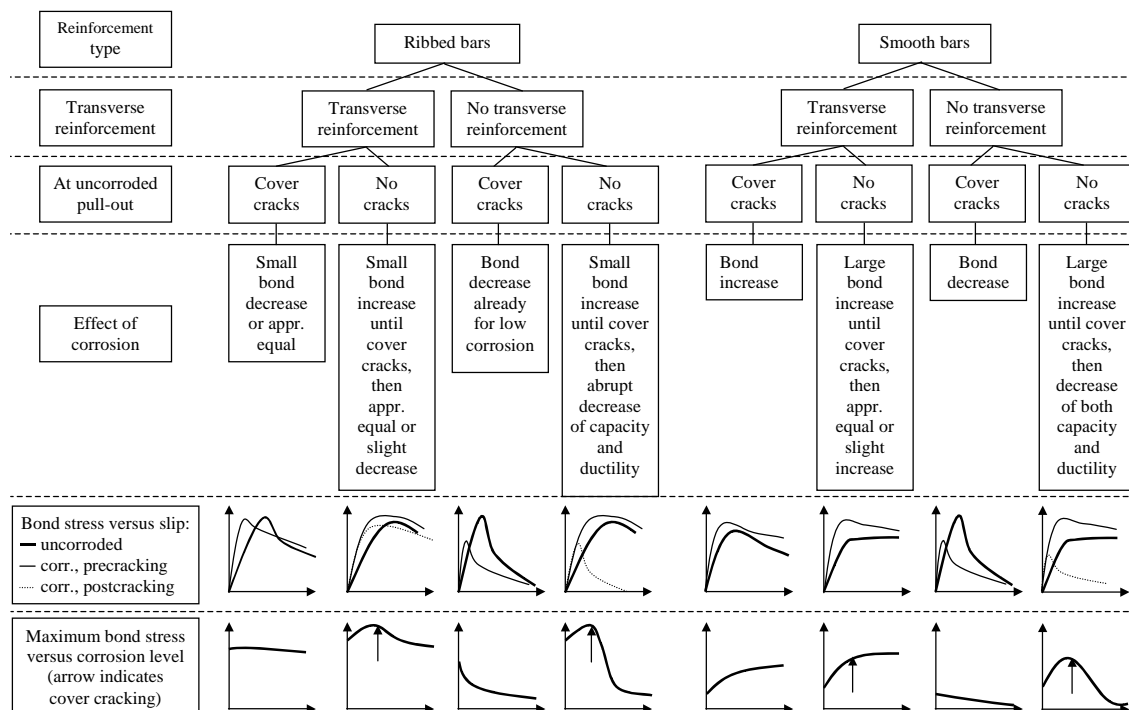
Utvärdering av betongbroar genom olinjär analys med FEM presenteras i en annan av forskningsaktiviteterna. Sådana metoder förklaras och rekommendationer ges rörande materialmodeller för betong och armering. Olika sätt att modellera armeringen och samverkan med betongen behandlas. Vidare behandlas validering och verifiering av modeller och rekommendationer ges för när olinjära analyser kan förväntas bidra till att påvisa ökad bärförmåga. Här behandlas också säkerhetsformat för olinjära analyser, och speciellt föreslås en metod för bestämning av global säkerhetsfaktor baserat på en variationskoefficient för bärförmågan uppskattad genom olinjära analyser. Genom ett antal exempel valideras föreslagna metoder, såväl på material-, komponent- och strukturnivå.

Korrosion är ett huvudproblem för beständigheten hos järnvägsbroar av betong. Den första och kanske allvarligaste påverkan på bärförmågan är **effekten av armeringens korrosionens på vidhäftning och förankring**. I projektet har de viktigaste parametrarna för korrosionens inverkan på vidhäftningsegenskaperna bestämts, och deras principiella inverkan har bestämts genom en kombination av olinjära FE-analyser och försök från litteraturen. Studien visar att armeringstyp (kamstänger eller släta stänger), närvaron av omslutande transversell armering och typ av



Figur 5.13 Exempel på analys av tvärkraftsbrott för validerng av olinjär FEM, fullskaleprovad järnvägsbro Örnsköldsvik, Sverige .

förankringsbrott är avgörande för effekten av korrosion på förankringskapaciteten. Baserat på detta ges rekommendationer för hur allvarlig armeringskorrosion i en förankrings- eller skarvzon är för bronns bärförmåga. Exempelvis finns för kamstänger utan omslutande tvärarmering risk för förankringsbrott utan föregående varning i form av spjälksprickor, medan det för släta stänger med omslutande tvärarmering inte kan förväntas uppstå förankringsbrott ens då täcksiktet spjälkar loss.



Figur 5.14 Översikt över korrosionens inverkan på vidhäftningen. Skalorna i vidhäftning-glidningsdiagrammen är olika för att kurvorna skall bli tydliga. Skalorna i diagrammen över maximal vidhäftningshållfasthet kontra korrosionsgrad är dock samma för att möjliggöra jämförelse

Slutligen har en metod för att utvärdera **återstående livslängd med avseende utmattning hos betongbroar** utvecklats. Befintlig kunskap visar på att en utvärdering av en järnvägsbro i betong med avseende på utmattning i praktiken innebär att säkerheten mot utmattning endast behöver kontrolleras för armeringen, såvida inte betongen är utsatt för allvarlig nedbrytning till följd av armeringskorrosion, frost eller alkali-silika reaktion. Utvärdering av en järnvägsbro med avseende på utmattning innebär därför att (1) bronns konstruktion och armeringsutförning studeras, (2) bron inspekteras och dess lasthistoria utreds och (3) säkerheten med avseende på utmattning bestäms.

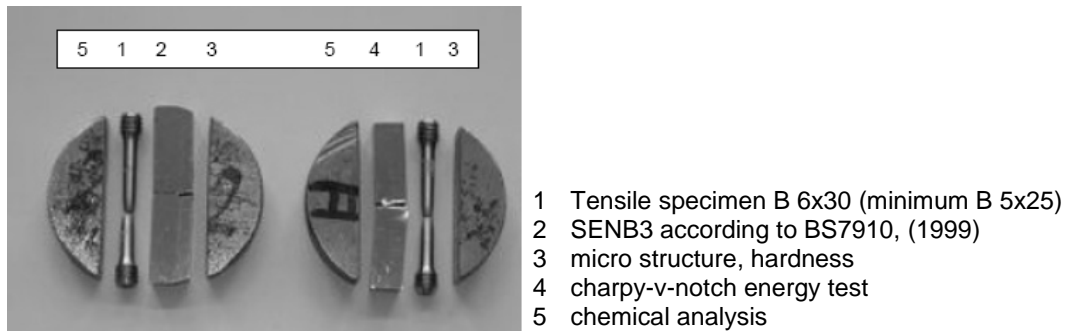
Studien av konstruktion och armeringsutförning syftar i första hand till att identifiera möjliga svaga punkter, t.ex. överallt där armeringen är svetsad, där stänger eller förspänningsarmering har mekaniska kopplingar eller förankringsanordningar eller där armeringen har allvarliga korrosionsskador. Inspektion av bron skall ske med avseende på sprickbildning och deformationer som kan tyda på begynnande utmattningsbrott. Kontrollen av säkerheten med avseende på utmattning sker i första hand för armeringen, varvid samma principer som för stålkonstruktioner kan användas.

Genom övervakning finns möjlighet att förlänga en bros återstående livslängd med avseende på utmattning. Med ett övervakningssystem som kan detektera utmattningsbrott i enskilda armeringsstänger kan bron fortsätta att trafikeras till dess att utmattningsbrott verkligen börjar uppstå. På grund av den stora redundans som erhålls av det vanligtvis stora antalet armeringsstänger kan åtgärder i praktiken skjutas fram till dess att utmattningsbrott inträffar i de första stängerna. På grund av den stora spridningen i utmattningsegenskaperna kan detta innebära en avsevärd förlängning av livstiden.

5.4.3.4 Stålbroar

Forskningen inom stålbroar omfattade materialegenskaper för främst äldre stål och järnlegeringar, utmattning respektive förbättrade utvärderingsmetoder för nitade stålbroar samt oförstörande provningsmetoder för bärighetsutvärdering av svetsade broar. Resultaten är inarbetade i kapitel 7 i handboken. Arbetet var indelat i fyra forskningsaktiviteter, vilka beskrivs nedan och redovisas i bakgrundsdokumentet *Improved Assessment Methods for Static and Fatigue Resistance of Old Steel Railway Bridges*, SB 4.5 (2007).

En databank med information om **materialegenskaper hos äldre järnvägsbroar** av metall har tagits fram, omfattande äldre järn- och stålqualitéer. För många järnvägsbroar byggda fram till runt 1940 är inte materialegenskaperna tillräckligt väl dokumenterade. Utvärderingen av dessa broar kräver dock ofta en god kännedom om materialegenskaperna. De viktigaste materialegenskaperna är den kemiska sammansättningen, hållfasthetsegenskaper för statisk belastning och utmattning, seghetsegenskaper och brottmekaniska egenskaper. Dessa måste därför bestämmas med hjälp av provning och rekommendationer för hur dessa skall bestämmas baserat på provtagning från aktuell bro har därför inarbetats i handboken.

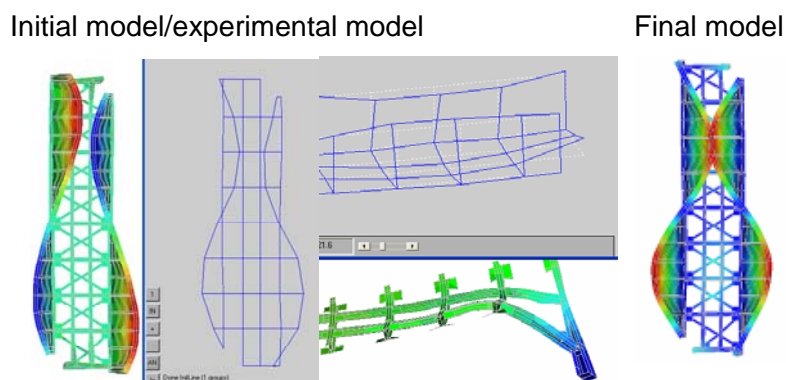


Figur 5.15 Möjlighet till uppdelning av borrhärna för materialprov.

Inom aktiviteten **utmattning hos nitade konstruktioner** har nya utvärderingsmetoder för bärförmågan hos nitade förband tagits fram. De flesta äldre järnvägsbroar av stål, byggda fram till 1950-talet, är nitade. Den främsta risken för brott i dessa är på grund av utmattning. Det är dock mycket oekonomiskt att döma ut dessa broar då livslängden med hänsyn till utmattning uppnås enligt konventionella beräkningsmetoder, och det finns stor potential till förbättrad utvärdering.

Befintliga normer såsom t ex Eurokoderna är i princip tillämpliga även för nitade stålkonstruktioner. Eftersom sådana inte längre utförs som nykonstruktion finns det dock en del informationsluckor och tolkningssvårigheter i de normerna. I forskningsaktiviteten **uppdaterade utvärderingsmetoder för nitade konstruktioner** har sådana frågeställningar utretts och rekommendationer för användning av Eurokod 3 tagits fram. Detta omfattar t.ex. buckling och plastisk deformationsförmåga hos sammansatta nitade tvärsnitt.

Inom forskningsaktiviteten om **användning av oförstörande provning för utvärdering av bärförmåga** har en metod för utvärdering av svetsade stålbroar tagits fram. Från 1950-talet blev svetsning den dominerande metoden för att sätta samman stålbroar. Svetsar kan dock innehålla defekter som på grund av utmattning kan leda till sprickor vilka, beroende på konstruktionens redundans, kan leda till utmattningsbrott. Här har en metod tagits fram för att utvärdera säkerheten med hänsyn till utmattning baserat på oförstörande provning och probabilistiska metoder.



Figur 5.16 Uppdatering av finit elementmodell med dynamisk provning.

5.4.3.5 Valv- eller bågbroar av murverk

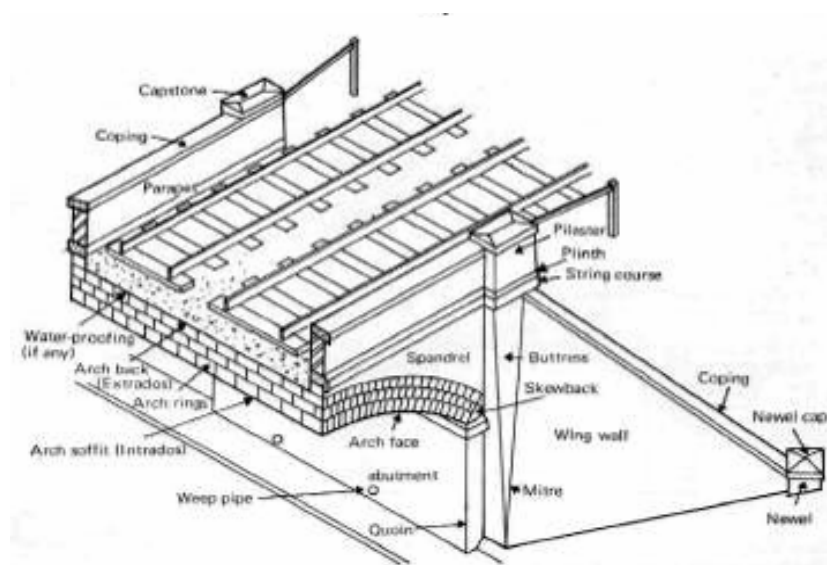
Över 40 % av alla järnvägsbroar i Europa är av typen murade valv- och bågbroar, och ca 60 % av dessa är över 100 år. Samtidigt är kunskapsnivån om murverksbågbroar generellt sett betydligt lägre än för stål- och betongbroar, eftersom denna typ av broar länge varit mycket ovanlig för nykonstruktion. En stor del av arbetet har därför bestått av ganska grundläggande studier av verkningssättet med bl.a. fullskaleförsök av ett antal murade bågar. Tidigare har bärförmågan för dessa broar oftast utvärderats med en semi-empirisk metod benämnd MEXE. Med hjälp av numeriska metoder finns nu möjlighet till förbättrade strukturberäkningar, exempelvis med FEM, och här har arbetet främst varit inriktat på indata, modellering och tolkningen av resultaten.

Forskningsarbetet redovisas i bakgrundsdokumentet *Masonry Arch Bridges*, SB 4.5 (2007). Det har varit uppdelat i fyra aktiviteter och inriktat på fem forskningsområden: modellering av lastvägen från axellasterna till valvbågen, samverkan mellan jod (fyllning) och båge, modellering av skador och defekter, effekten av cyklisk belastning och probabilistiska metoder för bestämning av bärförmågan.

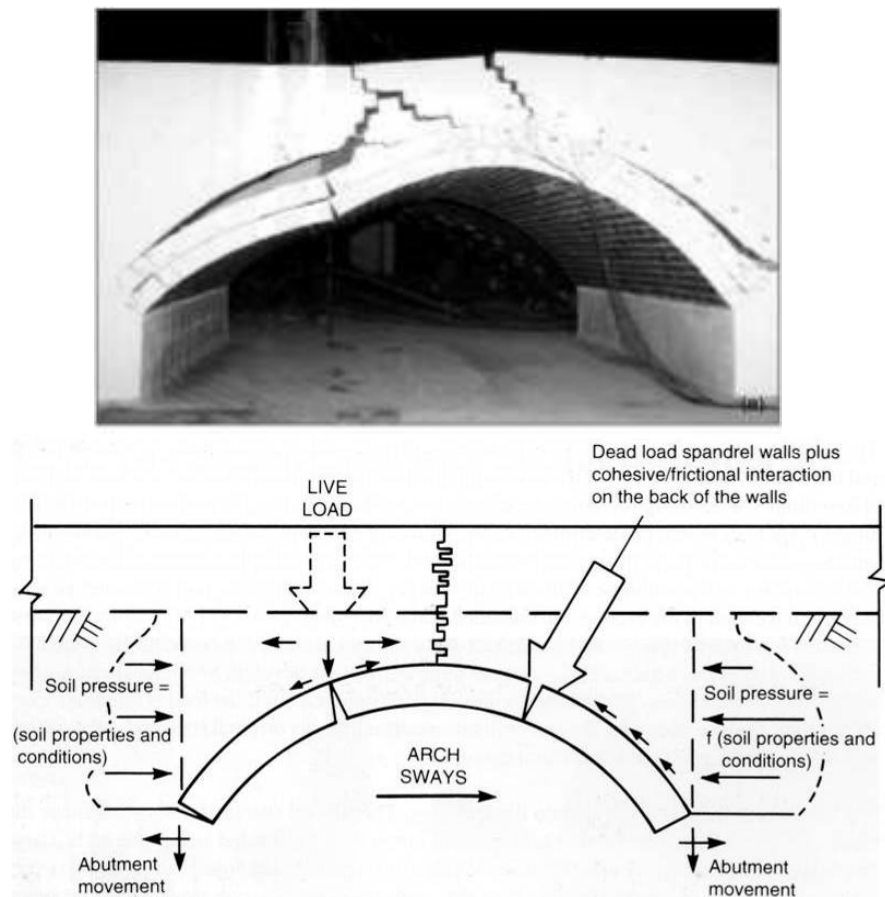
I forskningsaktiviteten **bärighetsutvärdering av murverksbågbroar** har brottmekanismer och utmattningsprestanda studerats hos murade bågar med valv bestående av flera murverksslagrar utan tvärförbindningar. Nedbrytning hos materialen har här stor betydelse, och utmattning kan leda till andra brottmekanismer än vid statisk belastning och ökar risken för separation mellan murverksslagren.

I nästa forskningsaktivitet användes numeriska analyser för att studera **lastfördelning och deformationer i broarnas övergångszoner** vid tågpassager. Metoden är tillämplig såväl för valvbroar som för rambroar.

I en forskningsaktivitet visas hur **effekten av skador** kan beaktas vid **analys av bågbroar**. Är visas hur olika typer av skador kan beaktas och begränsningen hos olika metoder att modellera dem.



Figur 5.17 Typisk uppbyggnad av murad valvbågbro.



Figur 5.18 Brottmekanism med fyra leder i bågbro: försök (över) och teoretisk idealisering (under).

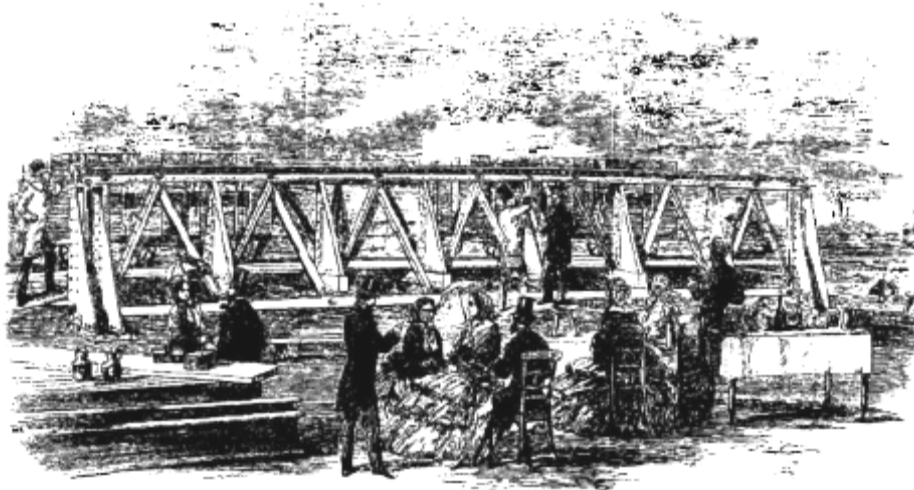
Den fjärde forskningsaktiviteten innehåller en studie av möjligheten att tillämpa **probabilistiska metoder** för bärighetsutvärdering av murverksbågbroar, och visar hur detta an göras där metoden är tillämplig.

Baserat på det arbete som utförts presenterades en metodik i 7 steg för bärighetsutvärdering av murverksbågbroar. Råd ges för hur metodiken kan följas för utvärdering på de tre olika noggrannhetsnivåerna som definieras i handboken, se figur 5.4.

5.5 Mätmetoder (WP 5)

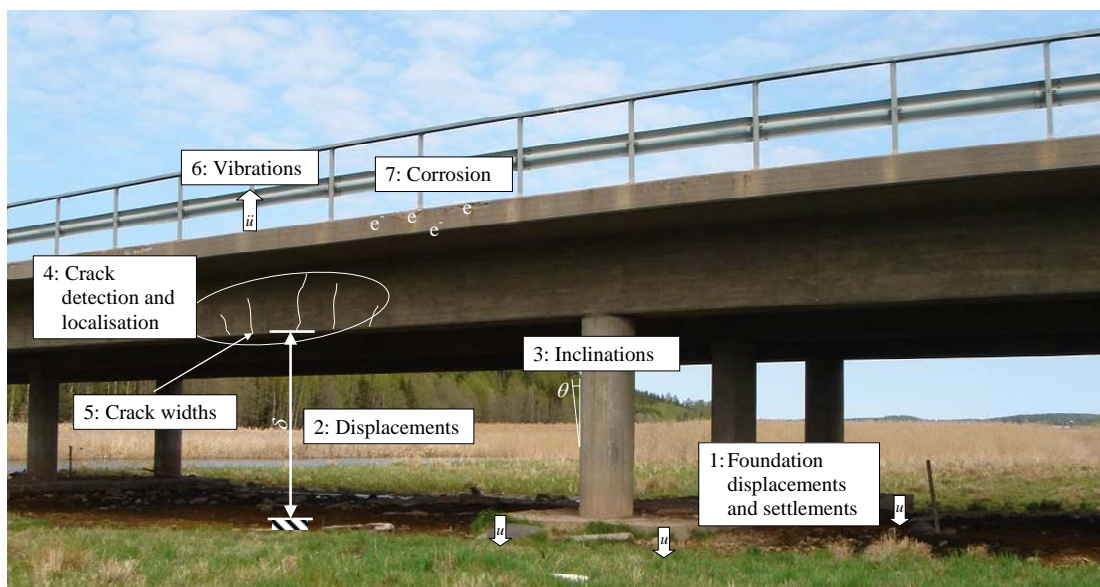
5.5.1 Inledning

Mätning på konstruktioner är inte nytt, redan under 1800-talet genomfördes mätningar för att verifiera bärförmåga av nya konstruktioner. I figur 5.19 visas en bro där nedböjningar registreras under belastning, ISIS Canada, 2001. Bron packades därefter ner i trälådor och skeppades till Indien där den senare byggdes upp. Detta visar på exempel med såväl mätning för verifiering samt industrialiserat byggande. Idag har vi utvecklat relativt avancerade metoder för mätning och uppföljning och även om syftena idag delvis är desamma som för över 100 år sedan kan mätning av på konstruktioner användas till oerhört mycket mer. Tillståndsbedömning genom mätning har internationellt getts definitionen SHM, Structural Health Monitoring, eller CSHM, Civil Structural Health Monitoring. för att skilja applikationer i byggbranschen från andra industrier, CSHM kommer uteslutande att användas i detta avsnitt.



Figur 5.19 Provning av ett stålfackverk för en bro i mitten av 1800-talet (ISIS Canada, 2001).

En av huvudmålsättningarna med en CSHM insats är att övervaka utveckling eller uppkomst av specifika strukturella fenomen i en konstruktion. Beroende på vilka laster som inverkar och hur konstruktionen kan hantera dessa laster kan olika fenomen uppstå. Typiska fenomen visas i figur 5.20.

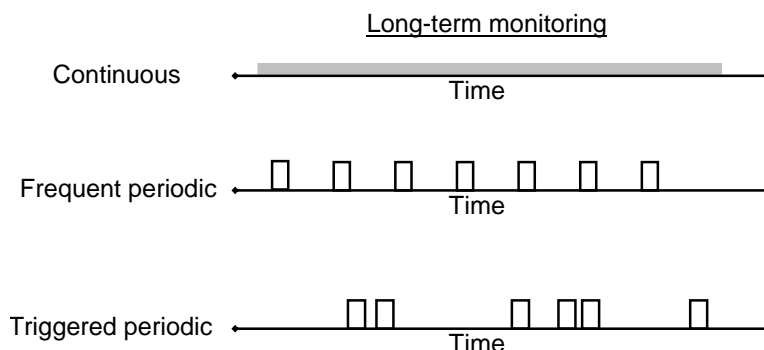


Figur 5.20 Typiska fenomen som kan uppstå i samband med belastning på en vägbro, foto taget av B. Täljsten, 2006

Den troliga orsaken till dessa fenomen behöver identifieras för att man ska kunna bestämma vilka parametrar man ska mäta. Exempel på parametrar är kraft, spänningar, förskjutningar, rotationer, vibrationer och töjningar. Även yttre parametrar kan påverka, t ex temperatur, fukt, nederbörd, trafik etc. (Atkan m fl, 2003). Där temperaturen ofta kan ha en stor påverkan och kan ge betydligt större påkänningar än trafiklasten.

Normalt delar man in CSHM i olika strategier beroende på hur man ska mäta, dessa fördelar sig på tidsstrategier, tillståndsstrategier och laststrategier.

Tidsstrategierna beskriver tidsrymden och frekvensen på mätningen. Här kan t ex korttid, långtid, periodisk och triggad mätning lyftas fram. Vald tidstrategi beror på vilket fenomen man vill studera I samband med mätning av sprickvidder i en betongkonstruktion kan ett program för långtidsmätning rekommenderas, men om man är intresserad av maximala påkänningar av en känd last använder man sig av korttidsmätning. I figur 5.21 visas tidsstrategierna schematiskt.



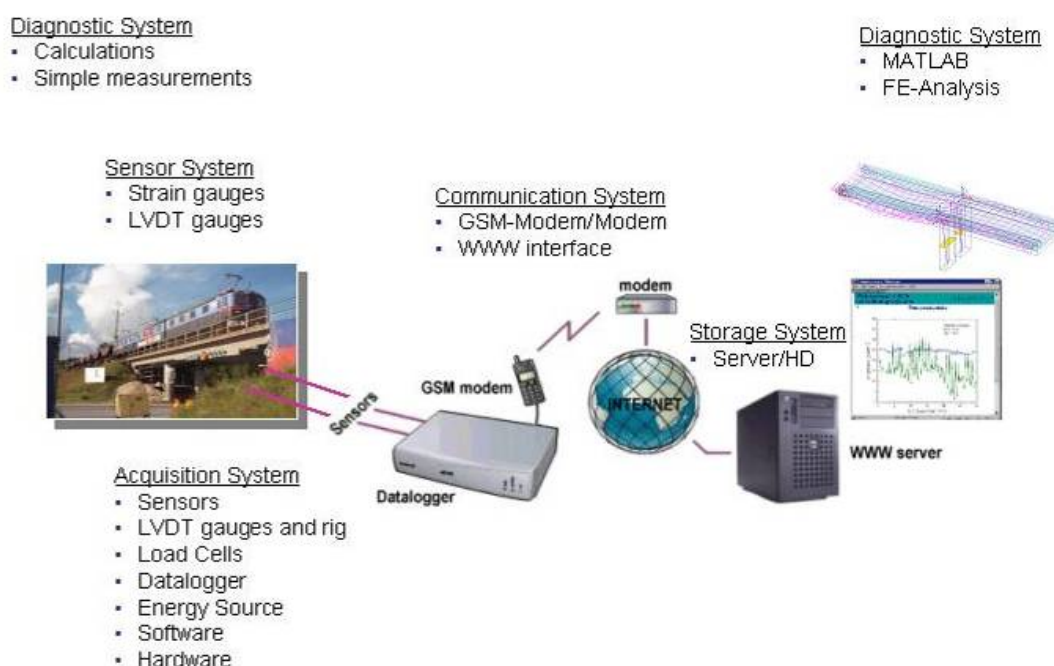
Figur 5.21 Kontinuerlig, frekvent periodisk och triggad mätning, Hejll, 2007.

Tillståndsstrategier fördelar sig på lokal mätning, global mätning eller skadedetektering. Global mätning används när man vill mäta nedböjningar, lokal mätning tøjningar i ett förutbestämt tvärsnitt och skadedetektering om man misstänker skador eller vill mäta över längre tid för att upptäcka eventuella skador, för den sistnämnda strategin används ofta ska modalparametrar.

Strategier med avseende på lasteffekt är antingen statisk eller dynamisk mätning.

De förstås då att de olika strategierna kan och ska kombineras för att man ska få ut mesta möjliga information från sin mätning samt kunna göra detta på ett systematiskt och strukturerat sätt.

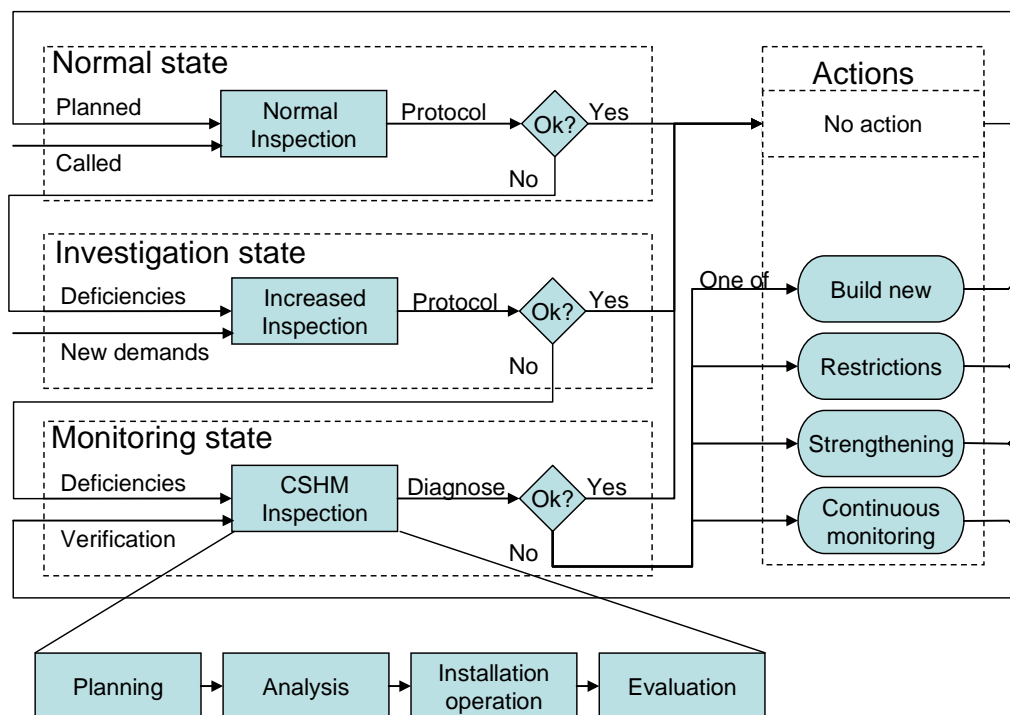
Inom WP 5 har vi utvecklats innovativa, pålitliga och kostnadseffektiva system för uppföljning av broars tillstånd där ovanstående strategier kan tillämpas, Behovet att förstå hur konstruktioner fungerar, både när de byggs och under driftsskedet, har fått ett ökat intresse i samband med livslängdsfrågor har kommit alltmer i fokus. Det möjliggör en bättre tillståndsbestämning av en bro när man ska bedöma om den kan klara ökade belastningskrav. Det gör även att man kan förbättra underhållsprocessen när man ska avgöra när det är aktuellt med förstärkning eller reparation. En illustration på hur ett strukturerat mätsystem kan byggas upp visas i Figur 5.22.



Figur 5.22 Förslag på mätsystem för "brodiagnostik", SB projektet WP5

I figur 5.23 visas i samband med olika inspektionsskeden av en bro, Här visas tre stadier, Stadium I, Normal State, omfattar planlagda inspektioner med förutbestämda tidsintervall. I detta stadium utförs visuella inspektioner på plats. Om något inträffar som förändrar säkerheten eller om man t ex ökar kraven på en befintlig konstruktion kan mer detaljerade beräkningar eller undersökningar behöva göras, detta utförs då under Stadium II, Investigation State. I detta stadium utförs även teoretiska beräkningar vilka kan omfatta såväl modellering som probabilistiska utvärderingar.

Visar det sig att konstruktionen är säker efter denna utredning förs den därefter tillbaka till Stadium I. Visar sig dock beräkningarna att säkerheten är otillräcklig flyttas konstruktionen ner i Stadium III, Monitoring State. I detta stadium används mätning som ett komplement till analytiska och numeriska beräkningar. Visar det efter mätning och kalibrering av modeller att säkerheten är tillräcklig förs konstruktionen tillbaka till Stadium I annars bör man överväga ett eller flera av fyra angivna alternativ; bygga en ny bro, införa restriktioner, förstärka konstruktionen införa kontinuerlig övervakning och mätning. Detta sätt att arbeta är i dag inte vedertaget men torde bli allt vanligare i och med att kostnader för mätning och uppföljning av såväl gamla som nya konstruktioner torde sjunka i framtiden.



Figur 5.23 Inspektionsskeden av en bro – avancerad metod, Hejll, 2007

I en rapport av Hejll & Täljsten, 2005, nämns tre huvudorsaker till varför mätmetoder har blivit alltmer intressanta idag. En orsak är de ständigt ökande kraven på brokonstruktioner att klara ökande trafikvolym och laster, en annan att övervaka den ständigt pågående nedbrytningen av konstruktionerna, t ex armeringskorrosion, och en tredje att vi idag bygger alltmer komplicerade strukturer. Dessa avancerade konstruktioner kan ibland kräva att applicerade beräkningsmodeller och analyser verifieras genom inbyggda mätsystem. Därför är det väldigt viktigt att de utformas, installeras och utvärderas så att de verkligen mäter det som var avsett. En mycket viktig aspekt vid övervakning är att använda sig av en tydlig struktur under såväl uppbyggande av mätsystemen som i samband med installation och uppföljning. Sensorer i allmänhet används för att förvandla fysikaliska storheter till information som vi människor kan förstå och utvärdera. Ett bra exempel är en termometer som visar expansionen av kvicksilver eller annan vätska när temperaturen ökar. För mätningar på anläggningskonstruktioner finns en mängd olika sensorer. Systemet av sensorer måste vara anpassat speciellt för det ändamålet med mätningen.

5.5.2 Mätsensorer

Inom SB projektet presenteras och har utvecklats ett flertal olika typer av sensorer för mätning och registrering. För att erhålla mesta möjliga information från mätningen är det viktigt att rätt typ av sensor används för det fenomen man avser att mäta. Huvuddelen av informationen i detta avsnitt är hämtat från Sustainable Bridges och WP 5. I tabell 5.1 har sammanställts fysiska storheter som används inom CSHM – karakteriserat efter mätbehov och i tabell 5.2 beskrivs de vanligaste sensorerna anpassade för mätningar på anläggningskonstruktioner. Många av de nämnda sensorerna är dock inte anpassade för långtidsmätningar. Dock är det en sensor som kan mäta över såväl kort som lång tid och lokalt samt lokalt, dessutom detektera skador, t ex sprickor i betongkonstruktioner. Detta är den fiberoptiska sensorn.

Tabell 5.1 Fysiska storheter – karakteriserat efter mätbehov

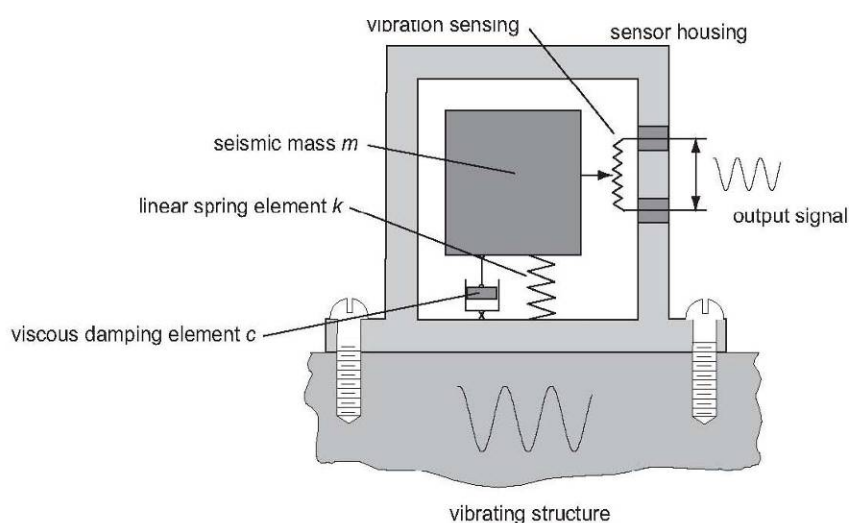
| | Sensor |
|---------------------|---|
| Förskjutning | LVDT (Linear Variable Differential Transformer) Långa fiberoptiska givare (interferometry) Accelerometrar och tidsbaserad numerisk integrering (transienta signaler) Optisk laser triangulering GPS |
| Hastighet | Accelerometrar och tidsbaserad numerisk integrering (transienta signaler) Geofoner |
| Acceleration | Piezoelektriska accelerometrar Kraft-balanserade accelerometrar Kapacitansfria accelerometrar |
| Töjning | Traditionella elektriska töjningsgivare Fiberoptik (Bragg gratings) Långa fiberoptiska givare (interferometry) |
| Kraft | Traditionella elektriska töjningsgivare Piezoelektriska givare |
| Temperatur | Termometrar Termoelement Termistor |
| Fukt | MEMS sensorer |

Tabell 5.2 Sensorer nyttjade inom mätning på anläggningskonstruktioner

| Sensor | Global | Lokal | Skador | Korttid | Långtid |
|--------------------------------|--------|-------|--------|---------|---------|
| Accelerometrar | x | - | x | (x) | (x) |
| Töjningsgivare, limmad | - | x | - | x | - |
| Töjningsgivare, svetsad | - | x | - | x | (x) |
| Vibrerande sträng | (x) | x | - | x | x |
| Nedböjning, LVDT | x | - | - | x | (x) |
| Akustisk emission | x | - | x | x | (x) |
| Fiberoptiska sensorer | (x) | x | x | x | x |

5.5.2.1 Accelerometrar

Accelerometrar används för att mäta vibrationer och snabba rörelser i konstruktioner. Dessa data används i sin tur i modalanalys och skadeidentifiering. Sensorns uppgift är att förvandla acceleration till spänning (Volt). Enligt ISIS Canada (2001) är den vanligaste accelerometern av typen piezo-elektrisk kristall som skapar en spänning under tryck, böjning eller skjuvning. En accelerometer är förenklat uppbyggd av en sk. seismisk massa vilken är fäst till en elastiskt upplag (balk, membran etc.). När givaren utsätts för acceleration, skapar den massan, m , en signifikant inre kraft som verkar mot det elastiska upplaget. Denna kraft motsvarar produkten av massan och accelerationen, enligt Newtons välkända samband: $F=ma$. Tack vare denna kraft påbörjas en mekanisk vibrering. Denna vibrering registreras och omvandlas därefter till en utsignal. I figur 5.24 visas en mekanisk modell av en accelerometer,



Figur 5.24 Mekanisk modell av accelerometer

I figur 5.24 är massan fastsatt till omgivande skyddshöljet som i sin tur följer rörelserna hos konstruktionen man mäter på. Massan, m , har kontakt genom ett fjäderelement, k , och en dämpare, c . Kraften som påverkar massan skapas således genom rörelser hos konstruktionen. Normalt kan accelerometrar detektera rörelser med väldigt små frekvenser. Vid små rörelser hos massan deformerar sensorns yta något vilket sker som små intryckningar på den piezo-elektriska kristallen vilken i sin tur sänder ut en elektrisk utsignal. Vilken är proportionell mot accelerationen.

Normalt är massan kopplad till det piezo-elektriska elementet och ger upphov till en kraft under acceleration. Accelerometrarna kan ha olika konstruktion för att skapa överföringen mellan massa och element. Normalt benämns accelerometrarna i relation till hur denna överföring sker. De vanligaste konstruktionerna är tryck-, böj- och skjuvaccelerometrar. Där prestanda för den sistnämnda oftast är bäst. I fotot i figur 5.25 visas en accelerometer av skjuvtyp.

Känslighet, upplösning, amplitud och frekvensområde beror förutom på konstruktionen på massan. Ju större massa desto större känslighet och desto högre upplösning men med det följer också en lägre frekvens och minskad amplitud.



Figur 5.25 Mekanisk modell av accelerometer

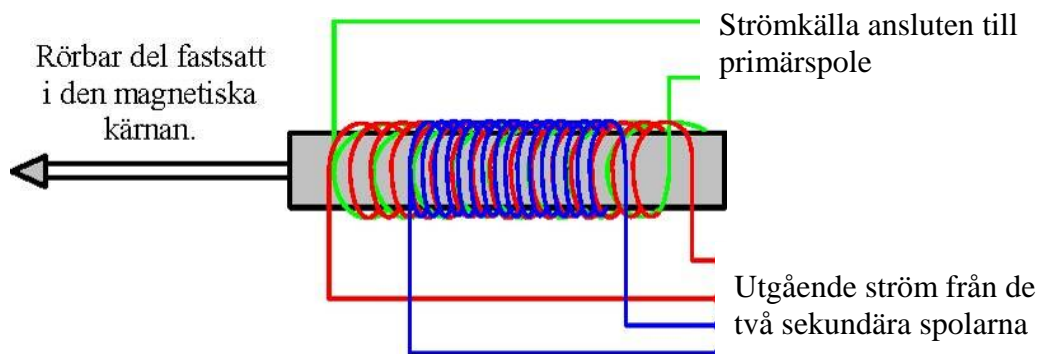
I tabell 5.3 har typisk prestanda för accelerometrar sammanställts.

Tabell 5.3 Prestanda för accelerometrar

| Prestanda | Karaktäristik |
|---------------------------|--|
| <i>Mätområde</i> | <i>Mellan ca $\pm 5 \text{ m/s}^2$ och $\pm 10000 \text{ m/s}^2$</i> |
| <i>Frekvensområde</i> | <i>0.1 Hz till 50 kHz</i> |
| <i>Temperaturområde</i> | <i>Användbara i temperaturer från $-200 \text{ }^\circ\text{C}$ – $100 \text{ }^\circ\text{C}$, beroende på typ av accelerometer och behov av upplösning</i> |
| <i>Mätavvikelse</i> | <i>Refereras till amplitud, 2 – 5 % avvikelse</i> |
| <i>Storlek och vikt</i> | <i>Stor variation, men typiskt ca 60 mm bredd och 80 mm höjd, de största väger upp till 1 kg.</i> |
| <i>Långtidsegenskaper</i> | <i>Piezoelektriska accelerometrar är stabila över många år. Man kan dock behöva genomföra periodisk kalibrering om mycket hög noggrannhet krävs.</i> |
| <i>Kostnad</i> | <i>Ca 5 000 – 15 000 kr beroende på typ av accelerometer och krav på upplösning</i> |

5.5.2.2 LVDT

LVDT står för engelskan "Linearly Varying Displacement Transducer", eller "Linear Variable Differential Transformer" vilket kan översättas till linjärt varierande nedböjningsomvandlare, se figur 5.26. I figur 5.27 visas ett foto av en LVDT givare för att mäta över en spricka i en betongkonstruktion. Här är givaren fast monterad på ena sidan och en mätplatta på den andra sidan av sprickan. Givaren skall också placeras så att mätarmen kan föras i rät vinkel. Till givaren kopplas vanligen en koaxialkabel. Det är också viktigt att kabeln är fixerad så att inga rörelser överförs till givaren. Kablarna måste också vara skyddade mot elektromagnetiska störningar. I tabell 5.4 redovisas prestanda för en typisk LVDT givare.



Figur 5.26 Schematisk skiss av en LVDT



Figur 5.27 Foto av en typiskt LVDT

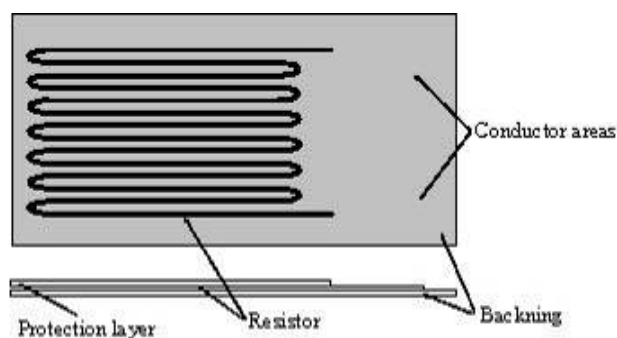
Tabell 5.4 Prestanda för en LVDT givare

| Prestanda | Karaktäristik |
|--------------------|---|
| Mätområde | Mellan ± 0.1 mm och ± 500 mm |
| Frekvensområde | Ca 100 – 3000 Hz, vanligtvis ca 500 Hz |
| Temperaturområde | Användbara i temperaturer från -20 °C- $+ 150$ °C |
| Mätavvikelse | 0.5 % |
| Storlek och vikt | Ca 50 mm – 2.2 m, diameter 20 – 30 mm, väger ca 15 g upp till 2.5 kg. |
| Långtidsegenskaper | Lämpliga för långtidsmätning (robusta) om de är korrekt monterade och används på rätt sätt. |
| Kostnad | Ca 5 000 – 15 000 kr beroende på typ av givare |

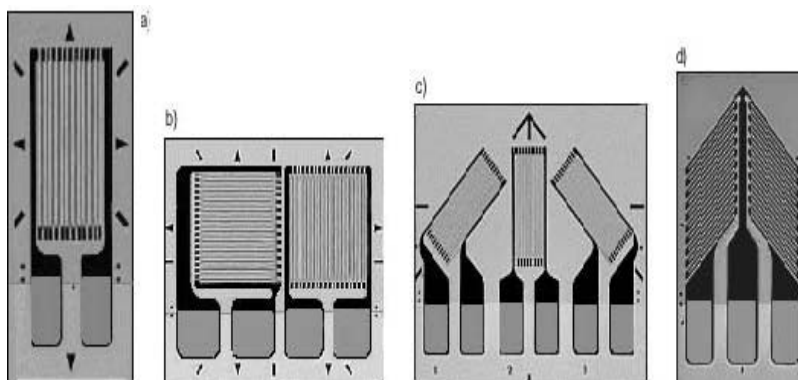
5.5.2.3 Folietöjningsgivare

Resistentatöjningsgivare baseras på den fysiska effekten att motståndet i en metallisk tråd ändras när den utsätts för mekanisk töjning. Om givaren tänjs blir den lägre med en mindre tvärsnittsytta. Eftersom motståndet hos en elektrisk ledare varierar i enlighet med motståndet hos materialet och längden samt tvärsnittsarean hos den elektriska ledaren ger töjningen en motståndsförändring. För varje typ av givare anges en givarfaktor. Där givarfaktorn anger känsligheten för givaren. Olika material har olika givarfaktorer.

För små töjningar är givarfaktorn relativt konstant så att motståndet är proportionellt mot töjningen. Värdet på motståndet och givarfaktorn ges av leverantören av själva givaren. Den mest använda och kända töjningsgivaren består av en tunn etsad metallfolie vilken är monterad på ett tunt material som bär upp folien. Folien är krökt fram och tillbaka ett flertal gånger för att på så sätt öka den effektiva längden av mätelelementet, se figur 5.28 och 5.29. Prestanda hos folietöjningsgivare styrs av metallfolien, hur den är utformad, typ av bärmaterial, hur det fästs mot underlaget, hur den är skyddad och hur strömkretsarna är anslutna, se tabell 5.5.



Figur 5.28 Exempel på en töjningsgivare och dess sammansättning



Figur 5.29 Olika typer av töjningsgivare: a) enaxiala, b) biaxiella, c) triaxiell rosett, d) skjuvmönstrade

Tabell 5.5 Prestanda för folietöjningsgivare

| Prestanda | Karaktäristik |
|--------------------|--|
| Mätområde | Normalt (- 5% - 5 %), vissa ± 10 % |
| Frekvensområde | Ingen specifik nivå – tester ger > 4 MHz |
| Temperaturområde | Användbara i temperaturer från -250 °C- $+ 650$ °C |
| Mätavvikelse | 1-2 %, måste kompenseras för temperatur |
| Storlek och vikt | 0.2 mm – ca 300mm, väger några gram |
| Långtidsegenskaper | Driver över tiden, ej alltid lämpliga för lång tid |
| Kostnad | Ca 150 – 1000 kr beroende på typ av givare |

5.5.2.4 Temperaturgivare

Temperatur är troligen den mest förekommande parametern att mäta, orsaken är att temperaturen påverkar mer eller mindre alla fysiska processer. Mätning av töjning och förskjutning hos en konstruktion är i stort meningslös utan korrekt information om temperaturförändringarna under tiden man mäter. Den vanligast förekommande temperatursensorn för CSHM är resistanstermometrar och termoelement.

Resistanstermometrar (RDT) består av en sensor som har förmågan att ändra ett elektriskt motstånd med förändring i temperatur. En grupp av element med resistans och som är känsliga för temperaturfluktuationer är metaller med god ledningsförmåga, exempel är nickel, koppar, platina och silver. En resistanstermometer uppvisar nära linjärt beteende mellan resistans och temperatur över ett stort temperaturspann. Motstånd av platina uppvisar bäst linjärt beteende. En annan typ av resistanstermometer är sådana tillverkade av halvledarmaterial och benämns termistorer. Dessa har normalt icke linjärt samband mellan temperatur och resistans. I tabell 5.6 redovisas prestanda för resistanstermometrar. Termometrarna kopplas till mätutrustningen med kablar som i sin ur måste temperaturkompenseras för att minska drift och felavläsning. Kalibrering görs normalt i ett vätskebad.

Tabell 5.6 Prestanda för resistanstermometrar

| Prestanda | Karaktäristik |
|---------------------------|--|
| <i>Mätområde</i> | <i>Mellan -250 °C till 650 °C, termistorer ca -100 °C till 275 °C.</i> |
| <i>Frekvensområde</i> | <i>Från ca 1 sekund upp till flera 100 sekunder</i> |
| <i>Mätavvikelse</i> | <i>0.3 °C</i> |
| <i>Storlek och vikt</i> | <i>Ca 4 – 70 mm med en diameter av 1-5 mm och en vikt av några få gram.</i> |
| <i>Långtidsegenskaper</i> | <i>Lämpliga för långtidsmätning om de är korrekt skyddade mot föroreningar</i> |
| <i>Kostnad</i> | <i>Låg kostnad</i> |

Termoelement är temperatursensorer som består av två olika material i kontakt med varandra. Kontakten eller kopplingen kan utföras genom att man virar materialen kring varandra, att de svetsas, löds ihop eller att man hårdlöder ihop materialen. Funktionen hos termoelement baseras på en termoelektrisk effekt vilken genererar en liten öppen strömkrets när två termoelements förgreningspunkt befinner sig vid olika temperaturer. Termoelementets krets används för att känna av en okänd temperatur i den varmare förgreningspunkten, medan temperaturen i referenspunkten eller den kalla förgreningspunkten är känd. Utsignalen beror på temperaturskillnaden mellan de två förgreningspunkterna. Normalt är denna skillnad i högsta grad icke linjär och behöver kalibreras.

Tabell 5.7 Prestanda för termoelement

| Prestanda | Karaktäristik |
|---------------------------|--|
| <i>Mätområde</i> | <i>Mellan -250 °C till ca 1700 °C, beroende på vilka material som kombineras</i> |
| <i>Frekvensområde</i> | <i>Från sekunder till flera minuter</i> |
| <i>Temperaturområde</i> | <i>Användbara i temperaturer från -20 °C- + 150 °C</i> |
| <i>Mätavvikelse</i> | <i>0.5 C</i> |
| <i>Storlek och vikt</i> | <i>Ca 4 to 50 mm, diametern varierar från ca 0.25 till 5 mm. Vikten är några gram</i> |
| <i>Långtidsegenskaper</i> | <i>Lämpliga för långtidsmätning (robusta) förändringen är normalt liten över tiden. Dock om de används vid mycket höga temperaturer kan de genomgå kemiska och fysiska förändringar vilket innebär en större drift som måste kalibreras.</i> |
| <i>Kostnad</i> | <i>Låg kostnad</i> |

5.5.2.5 Fiberoptiska sensorer

De fundamentala kraven för att tillverka optiska fibrer kan till synes verka enkelt. Man behöver ett material som är transparent och som kan dras ut till långa tunna fibrer med en tydlig kontaktyta mellan kärnan och höljet som är enhetligt längs hela fiberns längd och vill motstå den miljö den ska användas i. De flesta fibrer tillverkas av glas av mycket hög renhet, med någon grad av förorening för att anpassas till korrekt brytningsindex. Över åren har glas baserat på kisel och även plastmaterial visat sig vara de bästa materialen för optiska fibrer. Glas är det mest använda men optiska fibrer tillverkade av plast är lättare och billigare, mer flexibla och enklare att hantera, dock har plast betydligt högre förluster än glas.

För bygg- och anläggningskonstruktioner kommer en fiberoptisk kabel att förutom mekanisk töjning utsättas för externa påfrestningar som hög och låg temperatur, fuktighet och kemisk påverkan. En typisk konstruktion har vid byggande en förväntad livslängd av ca 50 – 150 år. Optiska fiber har inte funnits så länge och normalt förlitar man sig på accelererande åldringsförsök. För att kunna göra en fullständig bedömning måste man ta hänsyn till den miljö där fibern skall användas. Försök har påvisat att brytningsindex hos en optisk fiber påverkas minimalt upp till temperaturer av ca 300° C och accelererande åldringsförsök har visat att man kan förvänta sig livslängder upp till ca 50 år om brukartemperaturen är under 80° C,. Detta betyder att optiska fiber och sensorer har en betydligt längre livslängd än de normalt traditionella mätsystemen

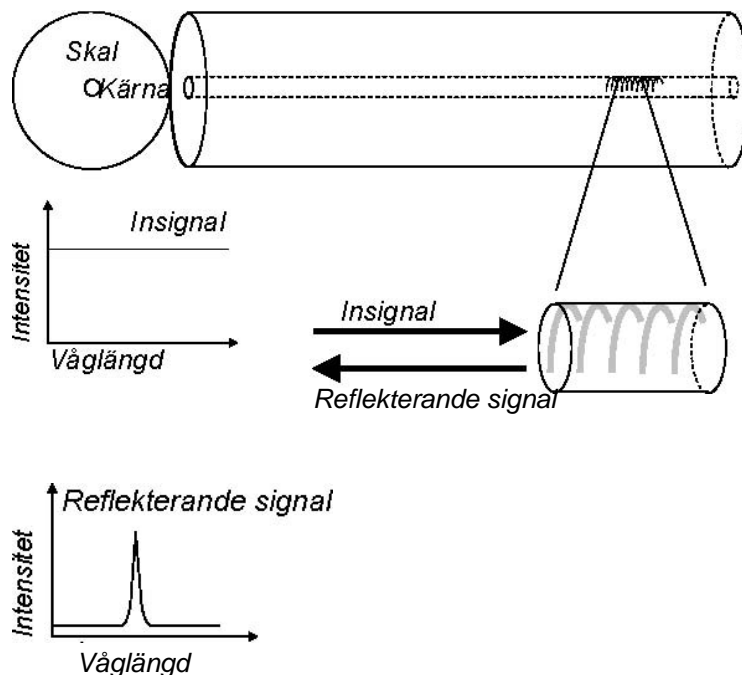
Fysiska effekter påverkar egenskaperna av det ljuset och ljusvågorna i en optisk fiber. t.ex. en förändring i temperatur hos fibern motsvarar en motsvarande förändring av våglängden hos det reflekterande ljuset i fibern. Fiberoptiska sensorer (FOS) används i många mätapplikationer men de vanligaste typerna är hydrofoner, temperatur-, tryck- och töjningsmätning. Andra lyckade uppfinningar med fiberoptik är det fiberoptiska gyroskopet (FOG) och olika typer av kemiska och biomedicinska sensorer som inte behandlas här.

I jämförelse med traditionella sensorer har FOS följande fördelar:

- Geometriskt formbara
- Hög känslighet och stor bandvidd
- Små – kräver litet utrymme
- Immuna mot elektrisk- och elektromagnetiska störningar
- Kan användas som sensor och signalväg
- Enkla att installera i andra material pga dimensioner och materialegenskaper
- Lågt brus
- Hög stabilitet
- Lång livslängd

De tre sista punkterna är de viktigaste egenskaperna som gör FOS till en användbar sensor för CSHM. Största nackdelen med konventionella FOS är att de är punktsensorer eller lokala sensorer. Lokala sensorer kan ge användbar information om en konstruktions tillstånd eller för korrelering av antaganden för modeller. För CSHM är de dock bara användbara om de kritiska områdena där mätning ger mest information är välkända. Vid t ex en mätning av tillståndet på en betongkonstruktion måste sensorerna ge information om både placering och storlek på eventuella sprickor samt om de propagerar. Antalet sensorer måste täcka in hela konstruktionen eller så måste en annan typ av sensor användas. Vid mätning på stora konstruktioner är det därför nödvändigt att sprida sensorer som kan observera skador oavsett var de uppkommer.

Den vanligaste, enklaste och kanske mest använda fiber optiska sensorn inom bygg och anläggningstillämpningar är den så kallade Fibre Bragg Grating (FBG) (sv. gitter) sensorn. Små gitter ristats in på fibern, oftast med UV ljus. Man kan skapa olika periodiska avstånd mellan risporna sk gitter. Avståndet mellan risporna ger olika våglängd på den reflekterande signalen enligt figur 5.30. Detta gör att flera sensorer kan appliceras på samma fiber, > 100. Detta benämns också multiplexing. Antalet sensorer och upplösningen är starkt sammanknipat, ju fler sensorer desto mer begränsas mätområdet. Vid ca 5 sensorer kan man mäta upp till 10 000 Ps per sensor – detta är också av görande på det system som används.



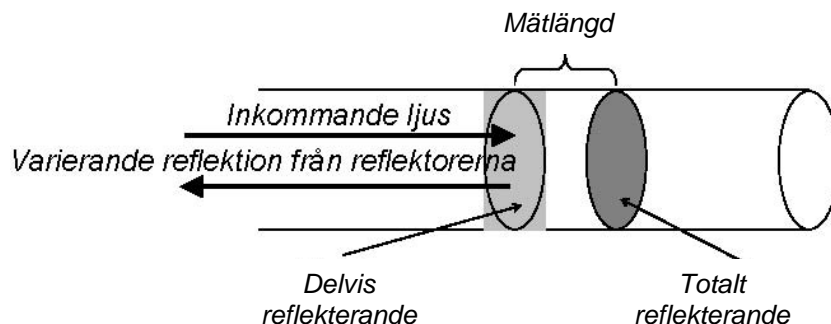
Figur 5.30 Fibre Bragg Grating (gitter) sensor

I de fall ett bredbandsljus skickas in i fibern med dessa gitter, kommer ett smalt område av ljuset (en specifik våglängd) att reflekteras när det träffar på gittret medan alla andra våglängder kommer att passera obehindrat. Sensorerna används för att mäta temperatur och töjning. En känd ändring i våglängd motsvarar en viss töjning eller temperaturförändring. I tabell 5.8 redovisas prestanda för FBG sensor.

Tabell 5.8 Prestanda för FBG sensor

| Prestanda | Karaktäristik |
|--------------------|--|
| Mätområde | Normalt ca 1 Ps upp till ca 50 000 Ps |
| Frekvensområde | Upp till nivån kHz, normalt upp till ca 200 Hz |
| Temperaturområde | Användbara i spannet ca -40°C - $+100^{\circ}\text{C}$ |
| Mätavvikelse | 0.01 – 0.05 % beroende på system |
| Storlek och vikt | Låg vikt, beror på fiberns längd och skyddshölje |
| Långtidsegenskaper | Lämpliga för långtidsmätningar > 25 år (beräknat) |
| Kostnad | Sensorer från ca 100 kr, grundinvestering hög i utrustning. |

En annan vanlig typ av fiberoptisk sensor är den så kallade Fabry-Perot sensorn. Detta är en typ av fiberoptisk töjningsgivare som förenklat baseras på interferometri av förändring i längd av en luftspalt placerad mellan två reflektorer inom ett hårrör. Luftspaltsavståndet är också sensorlängden, se figur 5.31. Den första reflektorn reflekterar delvis och den andra är en totalreflektor. Vid töjning ökar avståndet mellan reflektorerna och luftspalten blir större. Töjning och temperatur beräknas från färförskjutning av det reflekterande ljuset. Endast en sensor per fiber kan appliceras. I tabell 5.9 visas typiska prestanda för en Fabry-Perot sensor.



Figur 5.31 Fabry-Perot sensor

Tabell 5.9 Prestanda för en Fabry-Perot sensor

| Prestanda | Karaktäristik |
|--------------------|---|
| Mätområde | Normalt ca 1 Ps upp till ca 10 000 Ps |
| Frekvensområde | 20 Hz – 200 kHz |
| Temperaturområde | Användbara i spannet ca -40 °C - + 100 °C |
| Mätavvikelse | 0.01 – 0.025 %, beroende på system |
| Storlek och vikt | < 100 gram |
| Långtidsegenskaper | Lämpliga för långtidsmätningar > 25 år (beräknat) |
| Kostnad | Sensorer från ca 5 000 kr |

Inom WP5 togs även fram rekommendationer gällande användning av sensorer och hur mätning av byggnads- och anläggningskonstruktioner kan genomföras på bästa sätt, se www.sustainablebridges.net. Resultaten från WP5 har använts i ett flertal fullskaleprojekt, bl a i samband med förstärkning av en järnvägsbro utanför Örebro i Sverige. Resultaten från WP5 är också intressanta ur nyproduktionssynpunkt då det blir allt vanligare att man installerar sensorer och mätutrustning för att följa en konstruktions prestanda över tiden. Detta diskuteras närmare nedan.

Det viktigaste att sammanfatta från detta avsnitt är att man måste ha ett tydligt mål med sin mätning, d v s vad är syftet, vad ska resultaten användas till och hur länge ska man mäta? Det gäller att välja rätt typ av sensorer och också även strategier för mätning.

5.6 Reparation och förstärkning (WP 6)

5.6.1 Inledning

Ett av de viktigaste delprojekten inom Sustainable bridges är området reparation och förstärkning. I huvudsak fokuserades på metoder som i så liten utsträckning som möjligt inte stör pågående trafik är kostnadseffektiva och till största möjliga mån miljövänliga. Förstärkning av såväl betong, stål (metall) som båg- och valvbroar studerades. Tillkommer gör också förstärkning av för broar närliggande mark, t ex jordvallar. Tyngdpunkten är placerad på reparation och förstärkning av betongbroar. Vissa av dessa tekniker går dock också att applicera på stål samt även båg- och valvbroar.

I WP6 deltog från Sverige Luleå tekniska universitet, Chalmers tekniska högskola, Sveriges geotekniska institut, Sto Scandinavia AB, Skanska Teknik och Banverket.

Det övergripande målet för WP6 var att ta fram en ”verktygslåda” med olika reparations- och förstärkningsmetoder att användas på järnvägsbroar i Europa. Dessa rekommendationer baserar sig på dagens kunskap samtidigt som ny framtagen kunskap inom projektet används. Även om WP6 har varit inriktat mot reparation och förstärkning finns det även delområden som kan vara intressanta ur nyproduktion vilket diskuteras närmare under avsnitt 7. Här presenteras kortfattat det genomförda arbetet inom WP6.

Work Package 6 fokuserade på reparation och förstärkning av järnvägsbroar. Det har varit 13 partners i projektet; Luleå tekniska universitet (LTU) som även lett WP6, Skanska Sverige AB, Chalmers, Sto Scandinavia, Statens Geotekniska Institut (SGI) och Banverket, samtliga från Sverige. Dessutom har Norut Teknologi A/S från Norge, BAM och RWTH från Tyskland, COWI från Danmark, City University och Salford University från England och slutligen EMPA från Schweiz deltagit.

Målsättningen i projektet var att betrakta järnvägsbroarna ur en materialoberoende synvinkel och försöka finna generella metodiker för reparation och förstärkning. Metoderna skulle dessutom i minsta möjliga utsträckning inverka på pågående tågtrafik och i största möjliga mån vara miljövänliga. I projektet har traditionella metoder som använts över längre tid fått underordnad plats, medan nya och innovativa lösningar lyfts fram. En stor fokus har också varit att tillämpa de utvecklade metoderna inom projektet. Detta har också varit möjligt och tre fältförsök har genomförts där WP6 varit delaktiga, två med förstärkningar på betongbroar och ett med förstärkning av undergrunden i anslutning till järnväg.

Störst utrymme av alla reparation och förstärkningsmetoder som studerats har getts metoden med kolfiberkomposit. Dels för att den är relativt ny och innovativ, dels för att kunskapen hos järnvägsorganisationerna för dessa metoder är bristfällig. Framförallt motiveras detta med att metoderna oftast kan användas under trafik och att de har en låg miljöpåverkan.

Totalt har fyra separata rapporter sammanställts från det genomförda arbetet i WP6. Stora delar av dessa rapporter är sammanfattningar från omfattande bakgrundsdokument baserade på litteraturstudier och laboratorieförsök. Nedan ges en kortfattad sammanställning från de fyra rapporterna.

5.6.2 Rapport 1: Grafiskt Index - Guideline

För att kunna betrakta järnvägsbroar på ett likvärdigt sätt ur reparations och förstärkningshänseende krävs en tydlig struktur och systematik. Rapporten beskriver först komplexiteten i samband med reparation och förstärkning av konstruktioner, sedan principen för nedbrytning. Generella principer för förstärkning diskuteras också. Rapporten övergår sedan till vad vi benämner grafiskt index. I WP6 skapades en struktur som utgår från material, brotyp och sedan behov av åtgärd. När man väl identifierat problemet får man förslag på olika åtgärder som är kopplade till metodbeskrivningar och erfarenhetsbeskrivningar genom ”Case Studies”. Allt detta baseras på tydliga bilder, tabeller och exempel, därav benämningen grafiskt index. Nedan ges en kort beskrivning hur det grafiska indexet är avsett att användas.

Antag att vi har en balkbro i betong enligt figur 5.32. Bron är uppbyggd av en betongplatta med tre understödjande betongbalkar. Under en normal inspektion har sprickor i balklivet noterats hos en av balkarna nära upplaget hittats. Det antas då att dessa sprickor indikerar behov av förstärkning. Den framtagna metodiken med grafiskt index används då för att finna den mest lämpliga förstärkningsmetoden enligt följande:

Först och främst är det klart att bron är byggd av armerad betong. Genom att använda sig av ett tabellsystem identifieras problemet som "C", se mer detaljerad information i projektrapporterna på www.sustainablebridges.net.



Figur 5.32 Balkbro i betong

De noterade sprickorna indikerar på otillräcklig tvärkraftskapacitet. Inga krosskador i betongen hade noterats, detta tyder på att metoder för att öka tvärkraften med extra armering kan vara alternativ för att lyfta upp bärförmågan. Tabellen i figur 5.33 ger exempel på ett flertal olika metoder. Beroende på erfarenhet, teknik och kunskap studeras de olika metoderna närmare. Här refereras då till metodbeskrivningar (MD) och fallstudier, se figur 5.34. Den mest lämpliga metoden ur tekniskt, utförande, produktions och ekonomiskt hänseende skall då väljas, Där stor hänsyn tas till trafikstörningar och miljö.

| Problem | | | |
|--|--------------------|------------|------------------|
| Deficient shear bearing capacity of beam-like structural elements. The problem may be addressed by calculations or inclined cracks in middle of the beams height, close to support or where amount of shear reinforcement changes. . | | | |
| Strengthening method | Method Description | Case Study | Other references |
| External CFRP Plate | MD001 | CS001 | D6.2, D6.4 |
| External CFRP Sheet | MD002 | CS002 | D6.2, D6.4 |
| MBC | MD003 | | D6.2 |
| NSMR | MD004 | | D6.2, D6.4 |
| External prestressing, longitudinal | MD005 | CS005 | D6.2 |
| External prestressing, transverse | MD005 | | D6.2 |
| New stirrups and concrete casting* | | | |
| Internal steel/CFRP stays* | | | |
| Stiching* | | | |
| Fibre reinforced shotcrete | | | |

* The method exists, even though not further studied within the project.

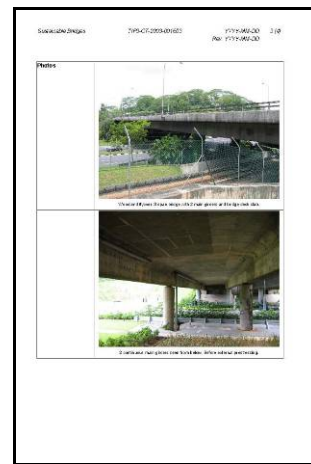
Figur 5.33 Benämning och olika alternative för förstärkning.

| Method Description | |
|-----------------------|---|
| Skäny | Sustainable Bridges |
| Date: 20070305 | |
| Method | External Prestressing of Concrete Structures |
| Objectives: | <input type="checkbox"/> Structural Repair <input type="checkbox"/> Structural Upgrading <input type="checkbox"/> Safety and Comfort |
| Field of application: | Concrete <input type="checkbox"/> The method is suitable for 20, 30, 40 and 50 years old |
| General description: | Provision of an additional degree of prestressing in structural elements in order to: a) reduce or transfer axial stress in concrete in SLG b) increase of load capacity in ULS, limiting axial stress capacity |
| Work description: | External anchor blocks are installed. Internally concrete anchor blocks are installed. Concrete in the existing bridge is drilled to bring in reinforcement bars into the existing concrete. After provision of cast steel reinforcement and installation of external prestressing system, anchorage the anchor block is casted into. Also steel anchor units may be installed. Due to the prestressing cables are embedded between the reinforcement. Prestressing cables are installed in the ducts and are fixed at the one end, the "fixed end". Ducts may be installed using the cables to provide a curved cable line. The anchor block construction between the anchor blocks and the existing concrete element may be strengthened by prestressing of non-stress bars. The prestressing cables are stressed by use of a normal prestressing process. The prestressing cables are fixed at the "fixed end". The ducts are grouted and the anchor blocks are completed by casting of concrete covering the anchor ends. The anchor blocks may be treated with coating/painting. |
| Traffic regulations: | The construction works have no or minor influence on the bridge deck and hence no or minor influence on the traffic on the bridge – the ordinary traffic. The influence on the traffic of the prestressing is normally very limited as it is limited to the areas where the active ducts are installed. As the concrete is cast in the ducts the traffic passing under at the middle of the spans is only minimally influenced. |

Metodbeskrivning

| Case Study | |
|--|--|
| Skäny | Sustainable Bridges |
| Date: 20070306 | |
| Method | External Prestressing of Concrete Structures |
| Project definition: | Strengthening of railway bridge in Singapore, Woodlands, Phase 1 |
| Structural elements to be rehabilitated: | A 3 span railway bridge with continuous superstructure. The superstructure consists of two sets of prestressed main girders and a mid span reinforced bridge deck. |
| Main objectives: | To meet the updated requirements stated by the bridge owner: - to achieve an axle stress in SLG as the live load is increased by 20% compared to the original design live load - to achieve sufficient load bearing capacity as the live load is increased by 20% compared to the original design live load |
| Rehabilitation works: | The longitudinal girders were strengthened. The stresses in SLG as well as the load capacity in sections of the span were used as a first step were selected. The ordinary prestressing system VSL was used with ordinary prestressing cables, ducts, anchorage and prestressing equipment was used. For each girder up to six cables were provided and prestressed on each side of the girder. The amount of additional prestressing was of the same magnitude as the existing prestressing. Formal bridge design in the concrete of slab & deck was balanced by the external prestressing. The load bearing capacity in critical sections was increased by approx. 15%. |
| Traffic Management: | No traffic management needed as all construction works were above non-traffic areas |
| Standards and Codes: | SLS: SLS1 requirement by the local (Land Transport Authority, Singapore) Bridge Design Code and VLS: normal guidelines for use of VLS prestressing cables |
| Relevant alternatives: | Installation of a third main girder: CFRP using prestressed tendons at the underside of the main girders |
| Comments: | |

Fallstudie



Figur 5.34 Metodbeskrivning och fallstudie

I detta specifika fall, när olika metoder har studerats, ledde det till att de bästa möjliga lösningarna var “External CFRP Sheet, MD002” och “MBC, MD003”. Efter det att också fallstudierna hade gått igenom mer noggrant valdes det att metoden med utanpåliggande kolfiberväv, CFRP Sheets, skulle användas eftersom mest erfarenhet fanns från denna metod.

5.6.3 Rapport 2: Sammanställning av Litteratur och Forskning

Den andra rapporten från WP6 är en sammanställning från utförda litteraturstudier samt utförd forskning. Huvudrapporten är en sammanfattning av allt genomfört arbete. Arbetet delades upp i 8 undergrupper;

1. Reparationer och förstärkningsmetoder för undergrunden
2. Elektrokemiska metoder för reparation och förstärkning
3. Användning av termografi för kvalitetskontroll av limning
4. Förstärkning av stålkonstruktioner med avancerade kompositmaterial
5. Förstärkning av betongkonstruktioner med mineralbaserade kompositmaterial
6. Förstärkning av konstruktioner med hjälp av extern förspänning
7. Integrerade sensorsystem för kompositmaterial
8. Förstärkning av bågbroar

Del 1 omfattade förstärkningsmetoder i anliggande jord i övergångszonen mellan järnvägsbank och bro. Ett stort antal metoder för förstärkning undersöktes där fokus placerades på metoder som inte störde den pågående järnvägstrafiken nämnvärt. Arbetet är sammanfattat i en delrapport. I del 2 undersöktes möjligheten att använda elektrokemiska metoder, läs katodiskt skydd, som integrerats i förstärkningssystem av kolfiber. Ett flertal laboratorieförsök genomfördes, dock utan större framgång. En rapport sammanställdes som beskriver funktionen hos katodiska skyddssystem, vanliga system och hur de används – dessutom sammanfattades resultaten från laboratorieförsöken. Under del 3 utvecklades ett system för kvalitetskontroll med syfte att undersöka kvalitén av limmad förstärkning. Ett flertal laboratorieförsök genomfördes med lyckade resultat och tekniken har också delvis använts i fältförsök. Inom del 4 studerades effekten av att förstärka stålkonstruktioner (metall). Även här utfördes omfattande laboratorieförsök. Kortfattat visade denna provning på att

förstärkningseffekten för normala stålkonstruktioner är låg, men att äldre konstruktioner tillverkade av t ex gjutjärn med framgång kan förstärkas. Dessutom erhålls väldigt gynnsamma förstärkningseffekter med avseende på utmattning om kolfiberlaminat används för förstärkning. Även i delprojekt 5 var den experimentella delen stor. Här har ett förstärkningssystem utvecklats där man använder sig av ett kolfibernät som appliceras mot betongkonstruktioner med en polymerbetong, antingen för hand eller genom sprutning. En bra förstärkningseffekt uppnås och metoden kan bruka normal produktionsutrustning. Del 6 studerade möjligheten med extern förspänning. Både traditionella system och system där stål kabel ersatts med kolfiberkabel studerades. Förspänning av kompositmaterial ger ett större utnyttjande av kompositen. En fortsatt utveckling efter SB projektet har idag lett fram till ett fullt användbart system för extern efterspänning av betongkonstruktioner. För att kunna följa upp t ex en förstärkning över tiden utvecklades inom SB projektet en ”intelligent” mätstav av kolfiber där en fiberoptisk kabel är integrerad. Detta system utvecklades från teoretiska diskussioner, genom laborieförsök till en prototyp som användes i de genomförda fältförsöken. Detta arbete fortgår. Den sista delen, del 8, redovisar ett antal metoder för förstärkning av bågbroar, murverk. Detta är ett komplicerat område och det finns ingen metod som genomgående klarar av att lösa de problem som är förknippat med bågbroar.

Stora delar av de resultat som kom fram genom detta arbete har sedan använts i fältförsöken och även integrerats i metodbeskrivningar, arbetsutförande och kvalitetskontroll.

Från denna del i WP6 och SB projektet är det i första hand erfarenheten av användningen av nya material som kan komma till nytta i SBUF projektet. Fyra specifika områden kan vara aktuella

- Sprickarmering med kolfibernät
- Utanpåliggande spännkablar av kolfiber
- Integrering av fiberoptik i ”Intelligent armering” samt
- Användning av kompositmaterial för ersättning av traditionell stål armering i betongkonstruktioner med stark miljöbelastning.

5.6.4 Rapport 3: Fältförsök

WP6 var involverade i tre fältförsök, 1) Förstärkning av undergrunden, 2) Förstärkning och belastning till brott av järnvägsbro i Örnköldsvik samt 3) Förstärkning och mätning av järnvägsbro i Frövi. Erfarenhet från de två sista fältförsöken presenteras i avsnitt 5.7.

5.6.5 Rapport 4: Metodbeskrivning – Arbetsutförande och Kvalitetskontroll

Metodbeskrivning, arbetsutförande och kvalitetskontroll är helt med fokus på kompositmaterial och hur de ska hanteras användas och följas upp i samband med förstärkning av betong eller stålkonstruktioner. Här diskuteras då hur vilket förarbete som krävs för bra resultat, hur limning och montering utförs med olika metoder, dvs

laminat, väv, NSMR (Near Surface Mounted Reinforcement) samt mineralbaserade förstärkningssystem, samt hur förstärkningen ska följas upp. I tillägg bifogas checklistor och kontrollplaner till rapporten. Beskrivningarna baseras delvis på försök utförda i lab, men framförallt på erfarenheter från utförda projekt i fält.

5.6.6 Sammanfattning WP6

Arbetet inom WP6 har i det stora fungerat bra, ett problem har varit att det varit relativt få partners och att utav dessa partners var det endast ett fåtal som bidrog aktivt till arbetet. Detta har då delvis medfört att den från början avsedda bredden i projektet var tvungen att begränsas. Det slutliga utfallet har dock varit bra och mycket av det underliggande arbetet har till stor del bidragit till en ökad kunskapsmängd för de inblandade. Den direkta tillämpningen i fältförsök visar att inriktningen i projektet varit efterfrågad. Det bör här nämnas att förstärkningen av Frövibron utanför Örebro sparade in hela budgeten i Sustainable Bridges för WP6 om bron hade bytts ut istället för förstärkts.

Det framarbetade Grafiska Indexet är en mycket lovade metodik att användas i samband med reparationer och förstärkningar, här skulle dock fler metoder och ”Case Studies” öka värdet. Metoden lämpar sig för databashantering och det skulle vara relativt enkelt att lägga till dimensioneringsanvisningar och utförandeföreskrifter för fler metoder och system.

WP6 deltagande i fältförsök har varit lyckosamt, framförallt i samband med det fullskaleförsök som genomfördes av en järnvägsbro i Örnköldsvik 2006. Utan den förstärkning som utfördes skulle provet inte kunnat vara möjligt. Kunskapsmässigt har också fältförsöken gett mycket till de metoder som utvecklats i projektet, inte minst när det gäller föreskrifter för utförande och kvalitetskontroll.

5.7 Fältprovning av broar (WP 7)

5.7.1 Allmänt

Tre broar, en stålbro i Frankrike, en betongbro i Örnköldsvik i Sverige och en valvbro i Polen, valdes ut för att testa olika metoder och utrustningar som tagits fram i projektet. I tillägg till detta genomfördes även en test av en befintlig järnvägsbro av betong som förstärktes med kolfiberkompositier för att öka dess bärförmåga.

Stålbron testades under drift innan den togs bort till en testplats där ytterligare tester genomfördes på hela och delar av strukturen. Resultaten från denna bro rapporteras dock inte här, se istället separat rapport om detta på projektets hemsida www.sustainablebridges.net.

Betongbron i Örnköldsvik, som är en trågbro, belastades belastas till brott för att undersöka verklig brottkapacitet. Belastning skedde först genom ballasten till plattan för att undersöka lastspridning och därefter utfördes belastning direkt på balkarna, först till uppsprickning och därefter till brott. För att uppnå önskvärt skjubbrott behövde bron förstärkas för böjning. Förstärkningen utfördes med kolfiberstavar inlimmade i uppsågade spår i betongbalkarnas underkant.

Undersökningar och tester på en valvbro i Polen har också genomförts även för denna bro hänvisas till hemsidan.

5.7.2 Fältprovning av bro i Örnsköldsvik – Sverige

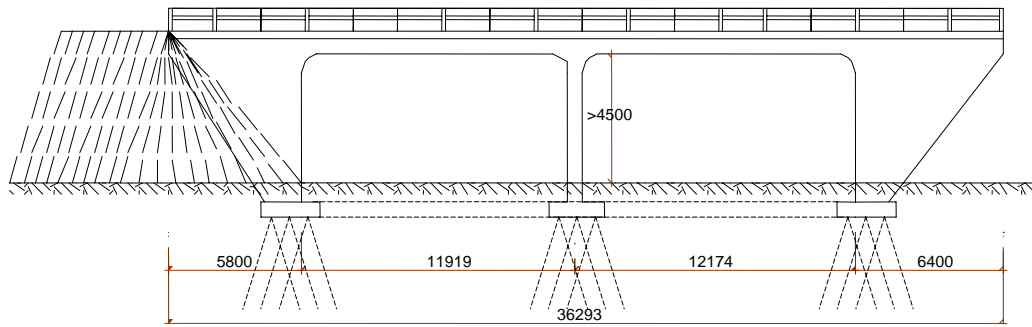
Viktiga mål har varit att öka transportkapaciteten och livslängden av existerande järnvägsbroar. För att demonstrera nya och förfinade metoder och system utvecklade inom SB projektet har fältförsök av broar genomförts. En av dessa fältförsök omfattar en 50-år gammal slakarmerad järnvägsbro i Örnsköldsvik. Förutom metoder för icke förstörande provning, undersöktes en nyutvecklad förstärkningsmetod och mätsystem. En viktig del i fullskaleförsöket vara att undersöka hur väl existerande analytiska metoder överensstämde med verklighet samt om det var möjligt att använda sig av numeriska metoder för att förstå beteendet av bron vid brott. I denna rapport ges endast en kort sammanfattning av provningen, se projektrapporten för mer detaljerad information. Primärt intresse var att undersöka bronns tvärkraftskapacitet. Det visade sig dock under de inledande beräkningarna att bron skulle erhålla böjbrott för samtliga realistiska placeringar av lasten. Det beslöts därför att bron skulle förstärkas i böjning. Här valdes då en förstärkningsmetod som vidareutvecklats inom SB-projektet, nämligen förstärkning med kolfiberstavar inlimmade i uppsågade spår i brobalkarnas underkant.

Belastningen utfördes med en stål balk placerad tvärs bron. Lasten påfördes med domkrafter fästa på stålkablar injekterade i bergrunden – bron drogs således ner.

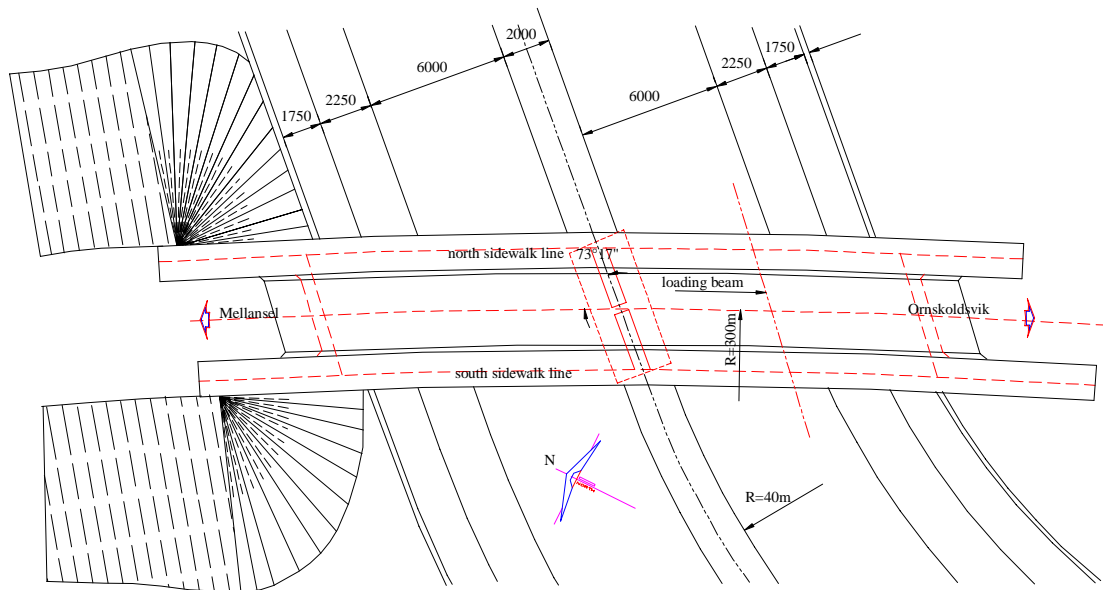
Bron var en trågbro i armerad betong i två spann, 12+12 m, se figur 5.35 – 5.38. Bron var byggd 1955 och togs ur drift 2005 på grund av byggandet av en ny järnvägslinje. Det var planerat att riva bron 2006 vilket medförde att möjligheten att prova den till brott kom upp.



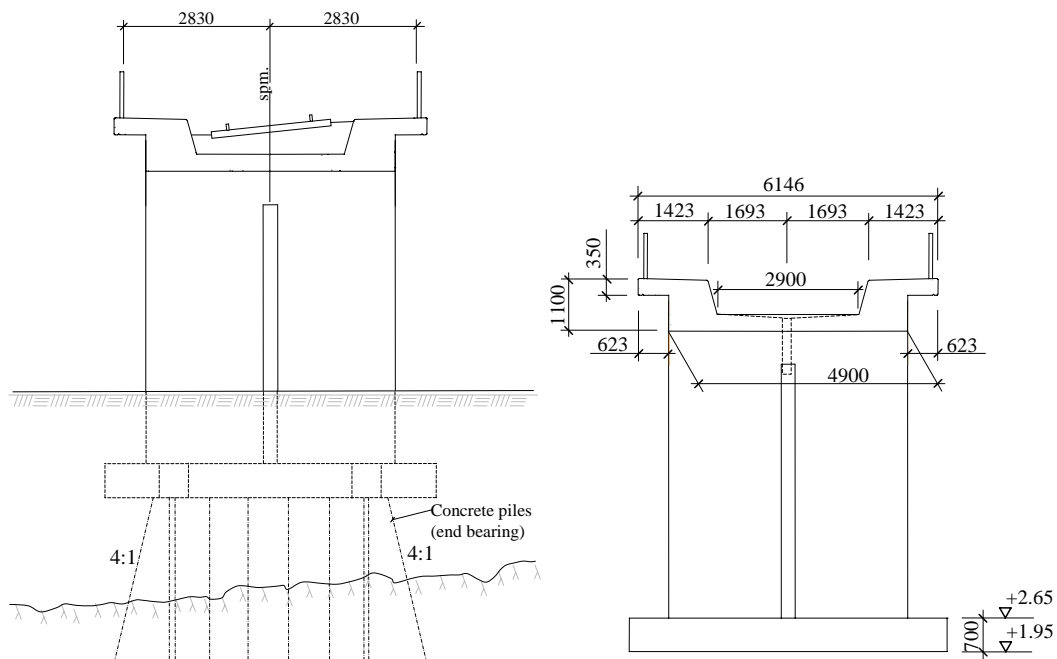
Figur 5.35 Foto av bron taget från Norra sidan ca 1 år innan provningen genomfördes



Figur 5.36 Sidovy av bron med jorden borttagen vid den sydöstra vingmuren

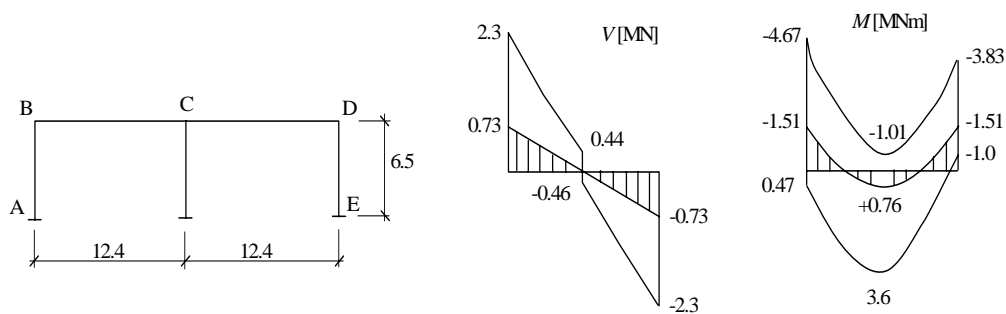


Figur 5.37 Plan av bron med jorden borttagen vid den sydöstra vingmuren



Figur 5.38 Sektioner av bron i Örnköldsvik

Bron var dimensionerad för en axellast av 200 kN. Maximal tvärkraft var beräknad till 2.3 MN varav 0.7 MN är att hänföra till egenvikten. Maximalt böjmoment var beräknat till 3.6 MNm varav 0.8 MNm är att hänföra till egenvikten. Stödmomentet är 4.7 MNm varav 1.5 MNm kommer från egenvikten. Den totala böjmomentkapaciteten i mitten av det provade spannet kan grovt beräknas till 10 MNm och tvärkraftskapaciteten till 4 MN, se också figur 5.39. Tvärkraften bärs i huvudsak av uppböjd längsarmering vid upplag och av vertikala byglar i de centrala delarna av spannet.



Figur 5.39 Dimensionerande sektioner för ett brospann

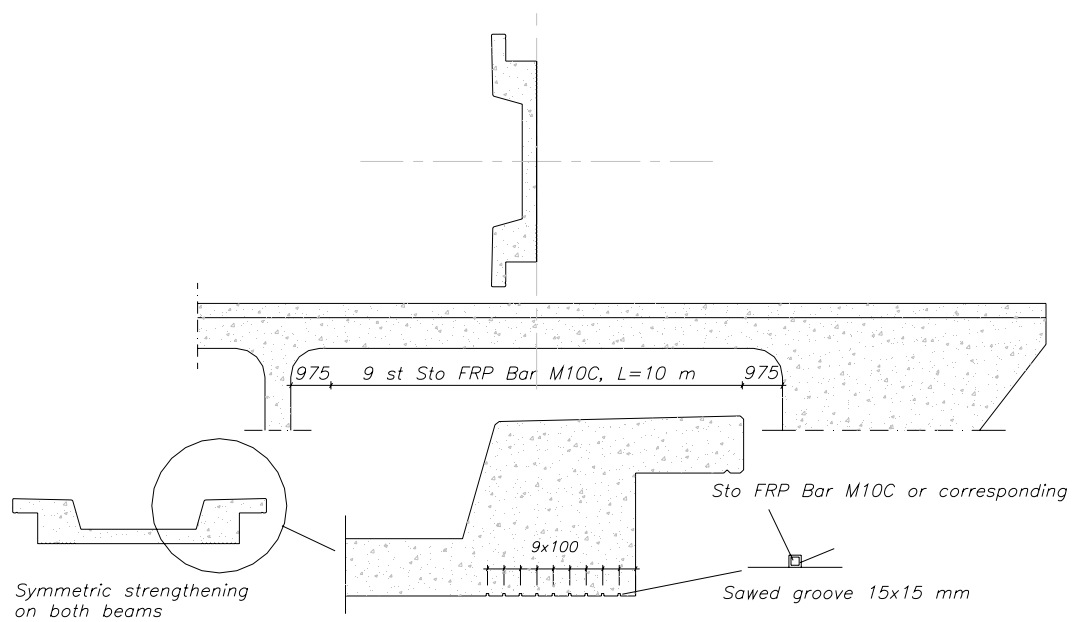
År 2005, innan beslutet togs att den skulle testas, inspekterades bron. Följande år inspekterades igen, först av LTU (Luleå tekniska universitet) och senare av BAM och COWI.

Ett flertal olika icke förstörande provningsmetoder, studerade och vidareutvecklade i WP3, har demonstrerats på bron, bl a ultraljud, radar, elektrokemiska potentialmätare. Radarmetoderna verifierade placeringen av underkantsarmering och även delar av tvärkraftsarmeringen. Ultraljudsmätningen fallerade på grund av stor ballast.

Samtidigt som den icke förstörande provningen fortgick genomförde en annan grupp preparering för förstärkning. Här användes förstärkningsteknik som vidareutvecklats inom WP6, Förstärkningsdimensioneringen baserades på ursprunglig beräknad bärförmåga vilket medförde ett ungefärligt förstärkningsbehov av 40 % i böjning, eller ca 4 MNm. Detta motsvarades av 18 stycken rektangulära kolfiberstavar, sk NSMR (Near Surface Mounted Reinforcement). Elasticitetsmodulen för dessa stavar uppgick till 250 GPa med en brottöjning av ca 11 %. Kolfiberstavarna placerades i balkarnas underkant med ett centrumavstånd av 100 mm, se också figur 5.40 och 5.41.



Figur 5.40 Sågning av spår för NSMR stavar



Figur 5.41 Placering av NSMR stavar i underkant av brobalkarna

Erfarenheterna från WP5 användes när det gällde att planera mätningen samt välja och installera mätsensorer. Förutom traditionella deformationsgivare (LVDT) och töjningsgivare användes fiberoptiska FBG givare integrerade i kolfiberstavarna samt för att registrera sprickutveckling i brofärbaneplattan under belastning.

Bron belastades i tre steg. Först belastades brofarbanepattan upp till spricklasten, därefter omfördelades lasten till brobalkarna som också belastades upp till spricklast. Därefter förstärktes bron och belastades slutligen till brott. Slutligt brott uppkom vid 11.7 MN. I figur 5.42 visas det slutliga böj-skjuvbrottet och i figur 5.43 flytning med slutligt brott i bygel noteras.



Figur 5.42 Slutligt böj-skjuvbrott



Figur 5.43 Detalj av vertikal 16 mm bygel efter brott i en sektion där bygeln omsluter en 25 mm längsgående armeringsstång.

I fotot i figur 5.44 visas hur kolfiberstången har glidit och ett sk fiskbensmönster kan noteras. Glidningen uppstod efter själva brottet.



Figur 5.44 Foto av kolfiberstång efter brott.

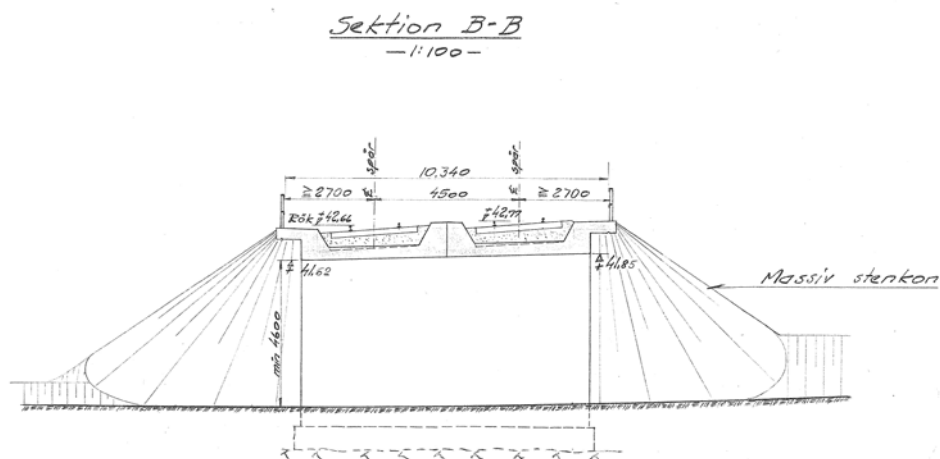
5.7.3 Diskussion och sammanfattning

Metoderna som utvecklades inom SB projektet visade sig vara trovärdiga både ur teknisk och produktionsmässiga synvinklar. De olika typerna av inspektioner som genomfördes visade att bron var av bra kvalitet. Undersökta analytiska beräkningsmodeller gav olika resultat där den modifierade tryckfältsteorin presterade bäst, dock fortfarande ca 30 % från verkligt brott. Utav numeriska genomförda beräkningar erhöles bäst resultat med FE-mjukvaran Athena som med icke linjär beräkning väldigt nära uppskattade den uppnådda brottlasten på 11.7 MN. Mätmetoder och förstärkningsmetoder fungerade som avsett.

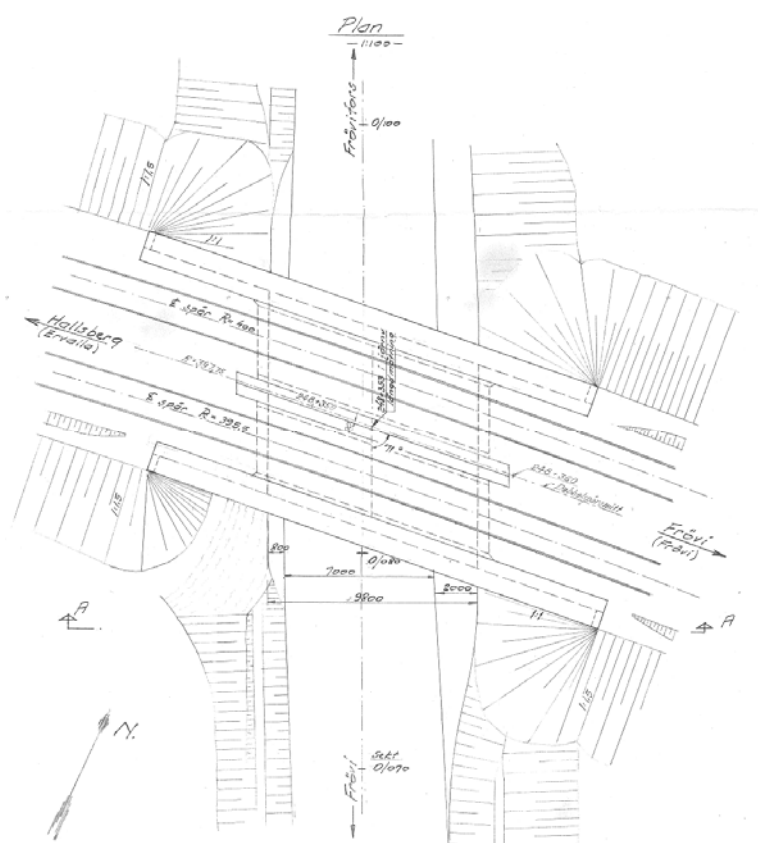
5.7.4 Fältprovning av bro i Frövi – Sverige

I följande avsnitt redovisas kortfattat resultaten från den utförda provningen av Frövibron belägen i Frövifors utanför Örebro.

I figur 5.45 visas en situationsplan över Frövibron. Bron är belägen där det står ”Ny Vägport” och i figur 5.46 visas en sidovy. I figur 5.47 visas ett tvärsnitt av bron och i figur 5.48 en planvy.

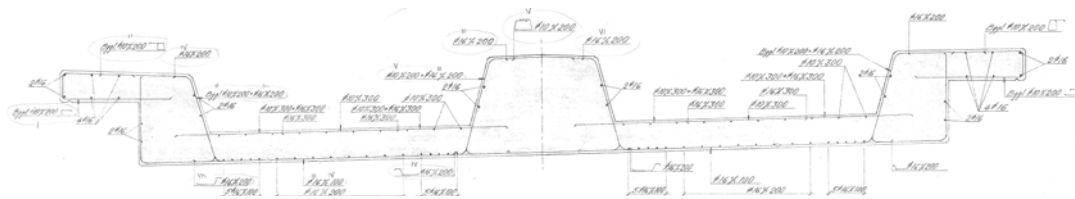


Figur 5.47 Tvärsnitt



Figur 5.48 Plan

Från ritningarna framgår det att broslängden är 22.3 meter med en fri öppning under bron på 9.8 meter. Bredden på bron uppgår till 10.3 meter inklusive balkar och överflänsar. Längden på balkarna uppgår till ca 10.4 m. Tjockleken på trågbotten varierar i mitten från 350 mm ner till 300 mm vid ramben och lutningen på undersida av trågbotten är 1.3° i tvärlid. Den betong som enligt handlingarna ska vara i bron är K40 vilket då motsvarar karaktäristiska värden på tryckhållfasthet, draghållfasthet och elasticitetsmodul av 32.0 MPa, 1.95 MPa och 32.0 GPa, respektive. Armeringens karaktäristiska hållfasthet är 400 MPa med en elasticitetsmodul av 205 GPa. I figur 5.49 visas armering i platta och balk i tvärlid



Figur 5.49 Armering i platta och balkar

Bron förstärktes i underkant av platta med sk NSMR (Near Surface Mounted Reinforcement) stavar i underkant. Vilket kortfattat innebär att spår av lämplig storlek sågas upp i täckskiktet. Spåren rengörs, lim appliceras och stavarna monteras. I överkant platta förstärktes bron med en helt nyutvecklade förstärkningsteknik. Här användes kolfiberrör som limmades i utborrade hål. Hålen hade således borrats horisontellt och tvärs bron. Hålen rengjordes, rören monterades och lim injekterades mellan betong och yttersida av rör. För att mäta eventuell effekt av förstärkningen installerades töjningsgivare på armeringsstål samt på kolfiber. Såväl traditionella elektriska trådtöjningsgivare som fiberoptiska sensorer användes. Vi utökade också tillståndskontrollen av bron genom ultraljudsmätning och noggrann kartläggning av armering. Ultraljudsmätningen användes även som kvalitetskontroll för limningen av NSMR stavarna. I figur 5.50 visas principiellt förstärkningen av brofärdplattan. I figuren noteras att det är spår sågade i underkant och hål borrade på sidan av bron. Såväl sågspår som hål sträcker sig tvärs bron. Stavarna limmades med ett tixotropt epoxilim underifrån och upp medans kolfiberstavarna injekterades fast med ett lågvisköst epoxilim.



Figur 5.50 Principiell förstärkning av brofärdplatta

Det genomförda projektet hade flera mål, där det övergripande målet var att förstärka bron i brottgränstillståndet i över- och underkant av platta samt att använda förstärkningsteknik där man inte behövde stänga av trafiken under själva förstärkningens genomförande. Här valdes att använda limning med kolfiberkompositer, i underkant sk NSMR stavar som limmades in i uppsågade spår och i överkant kolfiberrör som limmades in i borrade hål. NSMR tekniken har tidigare använts med framgång i olika projekt. Tekniken med kolfiberrör är dock ny.

En viktig del i projektet var att följa upp produktionsarbetet, framförallt borrning och limning av rör. Detta arbete gick över förväntan och endast mindre störningar uppstod, t ex i samband med att armeringsjärn påträffades i inledningen av arbetet vilket medförde att borrhålens position justerades något. Innan borrning av hål och fräsning täcksiktet för stavar utfördes en omfattande kartläggning av armeringen placering. Limningen utfördes utan några problem och ur produktionsteknisk synpunkt var projektet mycket lyckosamt även om ett antal armeringsjärn kapades i samband med borrningen. Tekniken för icke förstörande provning visade sig mycket användbar där vi kunde kartlägga underkantsarmeringen mycket detaljerat, både i horisontal- och vertikalled. Denna kartläggning visade bl a att armeringens utformning inte stämde överrens med ritningar. Icke förstörande provning användes också i för att lokalisera armeringsplacering på de södra och norra balkarna för att på så sätt minimera risken för att borra av armering, åtminstone i in- och utgångshål.

Installation av givare och mätutrustning var betydligt mer omfattande än vad som från början hade förutsatts. Tidsåtgången var ungefär den dubbla mot planerad. Installation av töjningsgivare på stålarmering gick bra, likaså monteringen på kolfiberstavar. Tyvärr var leveransen av kolfiberrören flera veckor försenad vilket medförde ett stressmoment när töjningsgivarna installerades på kolfiberrören, detta kan också ha bidragit till att denna installation inte blev helt lyckad. Registrering av nedböjningar fungerade bra och enligt plan, likaså registrering av förändring i spricköppning. Installationen av de fiberoptiska sensorerna i kolfiberstav och rör var relativt okomplicerat, dock försvårades installationen även här av den sena leveransen av kolfiberrören. För att kunna följa mätningen över tiden utvecklades i projektet ett fjärrstyrningssystem över 3G nätet. Här pågår en kontinuerlig periodisk uppföljning. Preliminärt fungerar systemet enligt krav och önskan, dock ser vi på de tidiga mätningarna att effekten av temperatur är stor, dessutom hade det varit önskvärt med att bygga ut det befintliga mätsystemet med ett system som automatiskt triggar tågöverfarter.

Resultaten från de traditionella mätningarna är mycket bra och stabila. De fiberoptiska mätningarna var dock inte kalibrerade för de låga töjningsnivåer som mäts upp. Dock ger en jämförelse med traditionella givare samma mätnivåer. Resultaten från mätningen är relativt svårvärderade, framförallt på grund av små belastningar, små töjningar, och att inget referenståg med känd vikt fanns att tillgå. I projektet har då istället Reginatågen använts som referens, dessa torde inte variera alltför mycket mellan olika tåg. Resultatet från mätningen ger att bron beter sig som en monolit, vilket var en förutsättning för förstärkningsberäkningen. Resultaten ger också att påkänningarna är mycket små i bruksgränstillståndet. Vidare ser man en marginell effekt av förstärkningen, ca 10-15 % i bruksgränstillståndet. Dock är det helt tydligt att kolfiberstavarna tar last. Denna effekt kommer att bli än tydligare vid högre lastnivåer.

Slutsatsen blir att projektet var lyckat och att mätning för att följa upp en konstruktion över tiden kan vara ett sätt att kanske minimera underhållsinsatser samt erhålla mer information om konstruktionens uppförande.

5.8 Provning av mätsystem (WP 8)

Totalt fem broar, två i Finland, en i respektive Polen, Schweiz och Sverige, valdes ut där olika typer av kontinuerlig mätning har utförts. Utvärdering av dessa resultat har skett i samarbete med WP 5 och därmed stöttat utvärdering och verifiering av sensorer och mätsystem som tagits fram i projektet, se vidare kapitel 5.5 och för mer detaljerad information slutrapporten från WP 8.

5.9 Informationspridning (WP 9)

Fyra olika ”trainings/workshops” har hållits i WP9 samt den avslutande internationella konferensen den 10-11 oktober 2007 i Wroclaw, Polen. Konferenspresentationerna och dokumentationer från alla workshops kan laddas ned via externa delen av projektets hemsida. På hemsidan har även alla projektrapporter, inklusive de fyra huvuddokumenterna (”Guidelines”) lagts ut. För att få en översikt och sammanfattning hänvisas till projektets ”User Guide” som även finns tillgänglig.

6 Erfarenheter från svenska broar

6.1 Presentation av BaTMan

BaTMan är ett IT-baserat hjälpmedel för förvaltning av broar, tunnlar och andra konstruktioner. Förvaltningshjälpmedlet är framtaget i ett samverkansprojekt mellan Vägverket, Banverket, Gatu- och fastighetskontoret i Stockholm, Storstockholms lokaltrafik, Göteborgs hamn och Sveriges kommuner och landsting. Vägverket ägar och förvaltar managementsystemet och ansvarar för systemets vidareutveckling. Förkortningen BaTMan står för Bridge and Tunnel Management. Dokumentationen i detta kapitel baseras på *Handbok för BaTMan*, se Vägverket (2005), och på egen användning av systemet. Dessutom har två exjobb gjorts på avdelningen med användning av BaTMan, Karlsson och Mathiasson (2004) och Andrés (2004).

BaTMan innehåller information om ca 30 000 svenska broar som är i drift och har ca 600 användare. Med BaTMan förvaltas såväl enskilda konstruktioner som bestånd av konstruktioner. Systemet är ett hjälpmedel för att organisera och utföra aktiviteter inom förvaltningen. Det är därför uppdelat baserat på förvaltningens olika delprocesser:

- **Operativ förvaltning.** Här finns fakta om enskilda konstruktioner, dess utformning, tillstånd, bärighet, utförda åtgärder (t.ex reparationer och ombyggnader) mm, samt dokument och ritningar. Systemet stödjer förvaltningen under brons hela livstid, från att den planeras tills den rivs. Processen ”operativ förvaltning” innehåller aktiviteterna planering, projektering, upphandling, inspektion, åtgärd och uppföljning.
- **Operativ förvaltning av grupper och bestånd.** Under brons livstid finns även behov att kunna arbeta med bestånd av broar, t ex vid upphandling av åtgärder för ett driftområde eller upphandlingsgrupp, eller för inspektion av grupper av broar. Processen ”förvaltning av grupper och bestånd” innehåller aktiviteterna planering, upphandling och åtgärd.
- **Verksamhetsplanering.** Delen verksamhetsplanering i BaTMan kommer i och med driftsättningen av version 3.1 (2008-04-08) att utvecklas till ett komplett verktyg för verksamhetsplaneringen av konstruktionerna. Någon dokumentation för processen finns ännu inte.

I tillägg till detta finns en modul som kallas **Rapporter**, och som innehåller sammanställningar över antal broar, bärighetsklassning, åtgärdsplaner, historik över kostnader för olika typer av åtgärder etc.

6.2 Användning av BaTMan i projektet

BaTMan har i detta projekt användas för sammanställning av konstruktions- och underhållsproblem hos Svenska (järnvägs-) broar. Dessa har sammanställts med avseende på brotyper, material, brodetaljer, miljöpåverkan och orsakssammanhang (projektering, konstruktion, utförande, underhåll, miljö) etc.

Resultaten kan jämföras med förhållandena i övriga Europa, dokumenterade i SB-projektet. Resultaten kan användas för att, tillsammans med den nya kunskap som tas

fram inom SB-projektet, ge underlag för förbättrad nykonstruktion och nyproduktion av broar.

6.3 Möjligheterna i BaTMan

En preliminär utvärdering av möjligheterna att åstadkomma den nödvändiga sammanställningen i BaTMan har därför gjorts:

- I modulen **Förvaltning** kan dokumenterade skador och underhållsproblem studeras för en individuell bro, och kopplas till aktuell brotyp, material, konstruktionsdetalj, miljöpåverkan och eventuellt kan orsaken till skadan utläsas eller härledas. En förutsättning är naturligtvis att nödvändig information finns lagrad för den aktuella bron, i form av dokumentation från projektering och byggande, inspektion och eventuella åtgärder. Användaren måste också ha behörighet för alla broar som uppgifter söks för.

Möjligheterna att söka i brodatabasen efter specifik information har utvecklats mycket sedan managementsystemet sjösattes. Sökfunktionen stöder i princip att man söker efter en specifik bro med sökkriterierna ägare/förvaltare, geografiskt område och huvudbrotyp (väg-, järnvägs-, gc-bro etc). Man kan alltså söka på t ex konstruktionstyp (exempelvis 2-leds plattrambro), en viss typ av detalj eller en viss typ av skada, trots att dessa begrepp är klassificerade och kan anges för respektive bro i BaTMan.

En stor andel av alla järnvägsbroar tycks finnas med i databasen. För många broar är dock hittills inlagda uppgifter mycket begränsade, och dokumentation i form av t ex ritningar tycks oftast saknas.

- Modulen **Förvaltning av grupper och bestånd** verkar inte vara aktuell för projektets syften.
- I modulen **Rapporter** kan vissa övergripande sammanställningar göras. En sammanställning av antal broar fördelade på ägare och funktion kan göras, men det går inte att få mer detaljerade sammanställningar (konstruktionstyp, skador etc):

I övrigt kan man ta ut sammanställningar över antalet planerade och utförda inspektioner, planerade och utförda åtgärder (inkl. kostnader) och antalet broar i olika bärighetsklasser (Vägverket). Det skall också vara möjligt att ta ut årsrapporter med liknande statistik.

| Antal broar | | | | |
|-------------------------------|--------------|-------------|------------|-------------|
| Antal broar per funktionstyp. | | | | |
| Ägare | Funktionstyp | | | Total |
| | GC bro | Jvg bro | Vägbro | |
| BRM | 33 | 594 | 17 | 644 |
| BRN | | 263 | | 263 |
| BRS | 5 | 832 | 42 | 879 |
| BRV | 23 | 857 | 140 | 1020 |
| BRÖ | 74 | 548 | 130 | 752 |
| Total | 135 | 3094 | 329 | 3558 |

6.4 Preliminära slutsatser

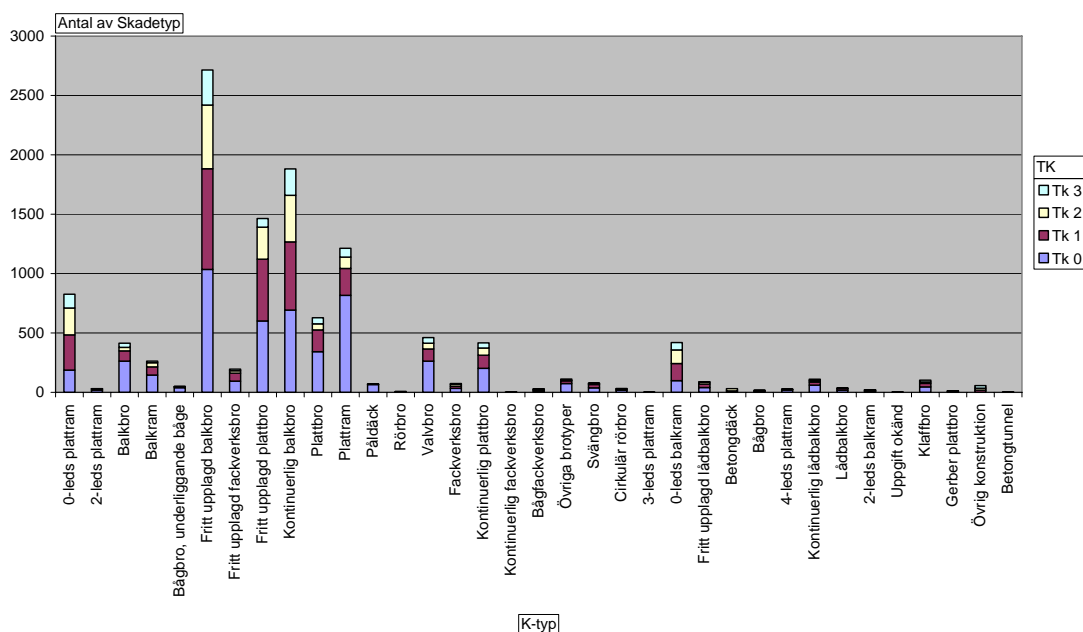
Att göra en fullständig översikt och sammanställning av konstruktions- och underhållsproblem hos Svenska (järnvägs-) broar har visat sig vara mycket svårt med de begränsade möjligheter som finns i BaTMan idag. Dels är databasen fortfarande under uppbyggnad och utveckling, vilket medför att möjligheterna att söka och sammanställa sökresultat begränsas. Det pågår dock efterhand fler inmatningar av väg

och järnvägsbroar. Det är också möjligt att ta ut datalistor med hjälp av specialprogram och sedan ”manuellt” sammanställa konstruktions- och underhållsproblemen, om erforderliga uppgifter finns tillgängliga. Gemensamma koder för inspektion av olika byggnadsverk håller på att tas fram. Kodsystemet består av en gemensam del (del 1) och sju elementspecifika delar för broar, tunnlar, färjelägen och kajer, stödkonstruktioner, tråg, vägtrummor och bullerskärmar. I dagsläget finns endast den gemensamma delen (del 1), broar (del 2) och tunnlar (del 3) framtaget, men översyn och utveckling pågår av övriga delar.

Preliminära resultat från sammanställningar av skador i vägbroar av betong har utförts av Andrés (2004), där ett antal utvalda broar undersökts. Sammanställningarna har skett med underlag från BaTMan. I databasen har broinspektörer inrapporterat befintliga och bedömt kommande skador/brister enligt ett klassificeringssystem med gränsvärden. För sprickbildning i betongkonstruktioner anses att risken för allvarliga konsekvenser för konstruktionens framtida funktion ökar om sprickvidden överstiger 0.3mm. Mindre sprickvidder anses vara mindre harmfula eller endast ge en försumbart negativ konsekvens för konstruktionens funktion och tekniska livslängd.

Klassificeringssystemet för skador/brister är; TK 0: Bristande funktion om mer än 10 år, TK 1: Bristande funktion inom 10 år, TK 2: Bristande funktion inom 3 år och TK 3: Bristande funktion vid inspektion. Klassificeringen sker subjektivt av respektive inspektör, vilket medför att bedömd skadeorsak kan variera.

Vid sammanställning av svenska järnvägsbroar ses det att fritt upplagda balkbroar tillsammans med platttribroar är de konstruktioner som har störst andel skador och brister, vilket erfordrar åtgärder, se figur 6.1.

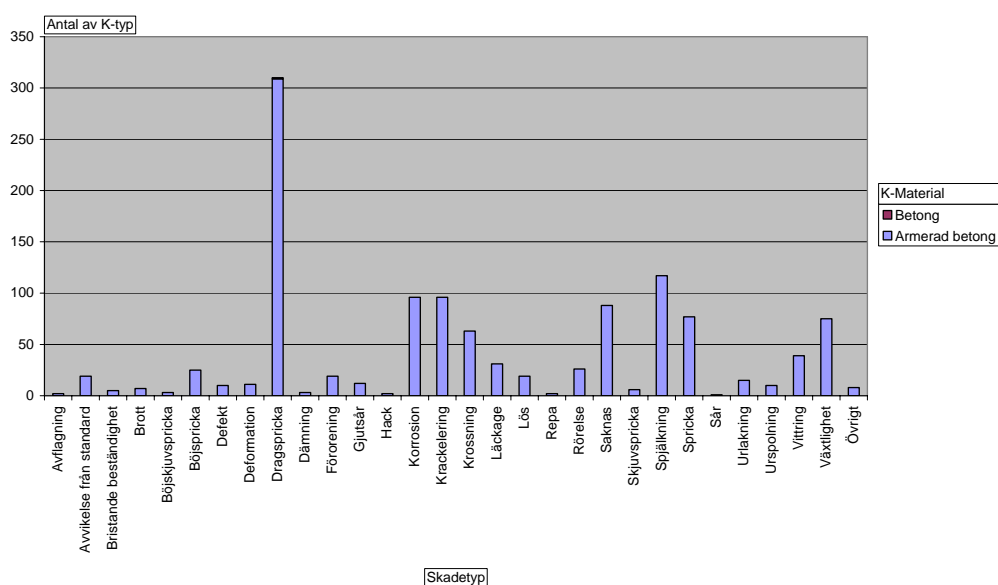


Figur 6.1 Sammanställning av skadeklasser för järnvägsbroar.

Förståelsen av orsaken till sprickbildning är en viktig del för att kunna föreslå förbättringsåtgärder för en konstruktionstyp. Det är dock inte möjligt att dra entydiga slutsatser från angiven skadeorsak i BaTMan då underlag för skadeorsak är subjektivt

bedömt av respektive inspektör. Dock är den skadade konstruktionsdelen och omfattningen objektivt angiven, vilket medför att skadefrekventa konstruktionsdelar kan identifieras. Enligt Andrés (2004) kan sprickorna delas in i två huvudgrupper - brister vid utförande respektive brister under drift (belastning, omgivning, långtidseffekter som krympning och krypning etc.). Brister vid utförandet beror vanligtvis på felaktig hantering av gjutskedet och den efterföljande härdningen medan brister under drift t ex kan bero på att det varit otillräckligt med inlagd så kallad spickfördelade sekundärarmering.

För uppföljda plattrambroar (vägbroar) av betong är de mest förekommande skadorna (sprickbildning) att hänföra till konstruktionsdelarna; ramben, kantbalkar, vingmurar och plattor. I likhet med vägbroar har uppföljning av skett för järnvägsbroar av samma konstruktionstyp där det visar på att likartad sprickbildning även förekommer för dessa järnvägsbroarna, se figur 6.2.



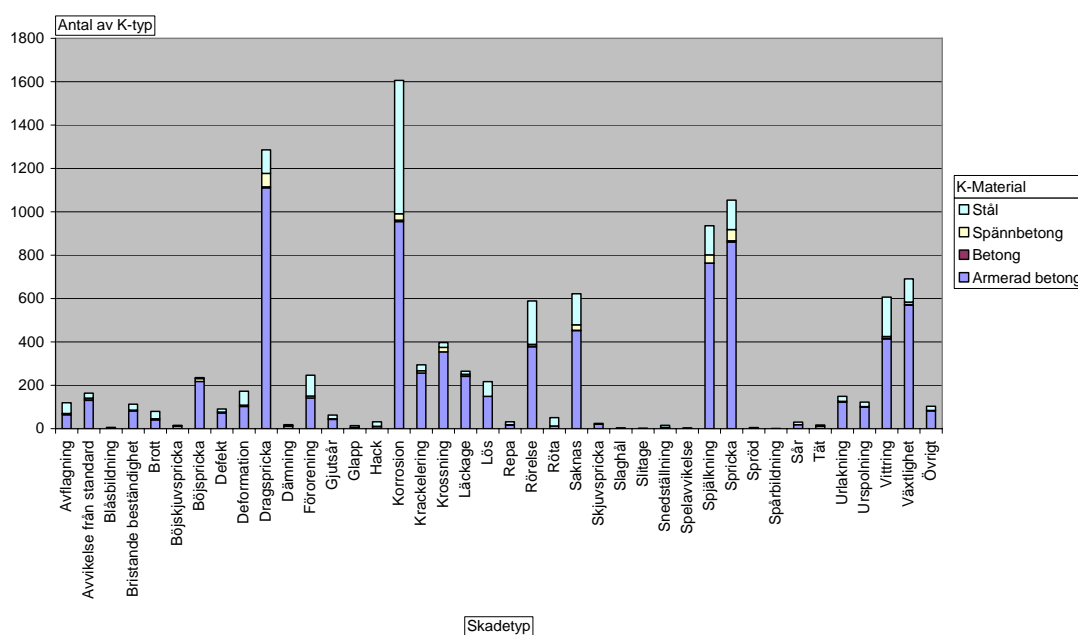
Figur 6.2 Sammanställning av skadetyper för plattrambroar (järnväg).

Övervägande del av sprickbildningen i brokonstruktioner av betong som sker i murar och kantbalkar är skador som uppstått redan under utförandet av konstruktionen. Dessa är oftast orsakade av stora tvång till följd av långa gjutlängder och otillräckliga åtgärder mot temperatursprickbildning. Sprickorna ligger vinkelrätt mot gjutfogen (tvånget) och är genomgående. Ett typexempel på dessa sprickor är vertikala sprickor i ramben. Sprickbildningen kan sedan förvärras och sprickvidderna tillväxa på grund av tillkommande effekter av krympning. Om sprickvidderna blir för stora kan det dessutom bero på att det inte lagts in tillräcklig mängd armering i sekundärriktningen av väggen för att fördela krympsprickor. För kantbalkar kan skadorna även bli större av belastning (deformationer över stöd) under driftskedet. En vanlig spricktyp i vingmurar är krackeleringssprickor som beror på att avformning har skett för tidigt (tidig uttorkning av ytor). En annan vanlig skada är sprickor i överkant av vingmuren nära inspänningssnittet som beror på att det varit otillräckligt med sprick- och lastfördelade armeringsjärn i överkant av murarna.

Från sammanställning av information som tagits ut och bearbetats från BaTMan för broar av stål har det visat sig att skadorna till största delen är relaterade till korrosion,

se Karlsson och Mathiasson (2004). Dessa iakttagelser bekräftas av de preliminära inledande studier i BaTMan som gjorts i projektet.

Vid sammanställning av resultat från informationssökning i BaTMan över Banverkets inmatade broar i december 2006 visar det sig att sprickbildning, korrosion och spjälkning är de mest förekommande skadetyperna för armerade betong- och stålkonstruktioner, se figur 6.3. Jämförelser mellan de preliminära resultaten från utsökningsar i BaTMan och utförd inventering av det europeiska brobeståndet visar att det i huvudsak föreligger samma skador förekommer på balkbroar av betong, dvs sprickbildning, armeringskorrosion och spjälkning av täcksikt. För de europeiska metallbroarna är korrosion och sprickbildning till följd av utmattning de vanligaste skadorna.



Figur 6.3 Sammanställning av olika skadetyper för olika brotyper (järnväg).

Förvaltningshjälpmedlet BaTMan har en framtida potential till konstruktionsförbättringar genom att databasen möjliggöra en systematisk sammanställning av skadedrabbade brotyper eller konstruktionsdelar. Dock finns idag fortfarande osäkerheter i de framtagna resultaten eftersom inmatning av konstruktioner fortfarande pågår, vilket därmed medför att säkra slutsatser inte kan dras. Dock kan resultaten med stor sannolikhet användas för att, tillsammans med den nya kunskap som har tagits fram inom SB-projektet, ge underlag för förbättrad konstruktion och nyproduktion av broar.

7 Tillämpning av erfarenheter för nyproduktion

7.1 Inledning

Det är uppenbart att utvecklingsarbetet inom SB-projektet och de erhållna resultaten inom de olika delområdena kan ha stor betydelse för uppgraderingen av befintliga broar även under svenska förhållanden. En målsättning inom SB-projektet, och ett uttalat krav på SB-projektet från EU, var att resultaten skall vara generellt användbara (om än med lokala anpassningar, där så är motiverat) och att de skall vara direkt tillämpbara utan kompletterande forsknings- eller utredningsarbete. Därför har de centrala forsknings- och utvecklingsdelarna i WP 3-6 sammanfattat sina resultat i var sin huvudrapport som ingår i en manual (Guideline).

Av intresse i det här aktuella projektet är att göra ett sådant urval och att behandla resultaten på ett sådant sätt att de kan tillföra en större kunskap och insikt i samband med projektering, konstruktion och produktion av nya broar i Sverige.

Nedanstående är exempel på sådan ny kunskap, som kan extraheras ur SB-projektet för tillämpning i samband med nya broprojekt i Sverige och som redovisas i övriga delar i kapitel 7:

- Påverkan på utformning av beräkningsnormer och utförandep Praxis genom större kunskap om lastpåverkan, skadeutveckling och skadeorsaker.
- Dagens dimensioneringsmetoder för broar är i vissa fall konservativa. De provningar och analyser, som genomförts i SB-projektet, kan identifiera områden och anvisa metoder för mera noggrann analys och därmed bättre och säkrare materialutnyttjande.
- Identifieringen av skadefall och skadeorsaker på broar av olika ålder ger underlag för bedömning av brokonstruktioners svagheter i ett livslängdperspektiv, vilket kan påverka utförandep Praxis eller material- och metodval.
- Anpassning av broars konstruktion till rekommenderade framtida inspektions- och underhållsmetoder.
- Installation av permanenta mätsystem för uppföljning av broars tillstånd (sprickbildning, korrosion etc.) och trådlös överföring av inspektionsdata, t ex till BaTMan.
- Användning av nya material som inte korroderar, t ex polymera kompositmaterial. Speciellt i områden för aggressiv miljö.
- Ökad förståelse av faktorer som styr reparations- och förstärkningsbehov kan medföra nya konstruktionsutformningar där olika insatser över livslängden beaktas på ett annat sätt än vad som idag görs vid nyproduktion
- För kontroll att kvalitetskrav och funktionskrav uppfylls på nya broar

7.2 Tillståndsbedömning och inspektion (WP 3)

De undersökningsmetoder som utvecklats inom WP 3 kan givetvis även användas för kontroll och verifiering av nyproducerade broar. De ickeförstörande metoderna är speciellt användbara eftersom de inte förstör den nya bron. En annan fördel är att många av metoderna dessutom är framtagna för att inte störa pågående trafik.

7.2.1 Relevans för nyproduktion och svenska förhållanden

Ett användningsområde för de undersökningsmetoder som utvecklats inom WP 3 är om man vet eller misstänker att någonting blivit fel utfört när man byggt en bro och vill kontrollera detta. Det kan vara att man vill kontrollera t ex det täckande betongskiktet, betongkvaliteten eller att rätt armering ligger inlagd (armeringsdimension eller antal armeringsjärn). Andra skäl kan vara att man vill kontrollera positionerna på ingjutna spännkablar, att kontrollera så att det inte uppkommit håligheter (s k råttbon) i hårt armerade konstruktionsdelar, att kontrollera svetsar i stålkonstruktioner m m.

Om man inför privatfinansierade lösningar för upphandling av vägar och broar med driftansvar under ett visst antal år innan överlämnande sker till ursprunglig beställare, finns det ett stort behov att verifiera att konstruktionerna har underhållits på ett bra sätt så att deras status inte försämrats till en oacceptabelt låg nivå. Då kan de framtagna undersökningsmetoderna användas för denna verifiering, eventuellt kopplad till ersättningsmodeller som är kopplade till hur bra kvalitet konstruktionerna har.

7.3 Laster och bärigheter (WP 4)

Mycket av det som presenteras i handbok och bakgrundsdokument från WP4 bedöms vara relevant även för konstruktion och produktion av nya broar och andra byggnadsverk. Eftersom det ofta finns stora summor att spara genom noggrannare utvärdering av bärigheten, kan forskning på detta område vara teknikdrivande och leda till ökad kunskap, vilken sedan kan utnyttjas även vid nyproduktion. Nyttan vid nyproduktion behöver inte endast bestå av minskade produktionskostnader, utan kan också innebära skärpta krav från beställarna vid nyproduktion för att minska den totala livscykelkostnaden för bron. Att kunna bedöma bärförmåga och funktion i ett längre tidsperspektiv är också väsentligt vid t ex BOT-projekt.

Några områden som anses vara av särskilt relevans för nyproduktion har identifierats. Dessa beskrivs mer detaljerat nedan och de resultat som är särskilt intressanta för projektering, konstruktion och produktion av nya broar lyfts fram.

7.3.1 Relevans för nyproduktion och svenska förhållanden

Inom området för **säkerhetsaspekter och probabilistisk modellering** avser mycket av arbetet mer avancerade säkerhetsformat än vad som normalt är motiverat vid nykonstruktion. Probabilistisk modellering och hur säkerheten kan hanteras vid t ex olinjära beräkningar och utmattning är ytterst relevant för utvärdering av befintliga broar, men är av mer begränsat intresse för nyproduktion. I ett appendix i bakgrundsdokumentet SB 4.4 (2007) redovisas en fördjupad studie av befintliga brotyper (mer detaljerad än den som sammanställts av WP 1) baserat på svar från de medverkande järnvägsbroförvaltarna i Storbritannien, Sverige, Frankrike, Tyskland och Finland.

Inom **laster och dynamiska effekter** är bestämning av aktuella tåglaster främst av intresse för utvärdering av befintliga broar. Möjligheterna till ***noggrannare bestämning av dynamisk förstöringsfaktor*** är intressant även med tanke på nyproduktion, varför detta beskrivs mer i detalj nedan.

Inom området för **betongbroar** finns mycket som är relevant även för nykonstruktion. Utvärdering av befintliga materialegenskaper är inte direkt relevant för nyproduktion. Olinjära analyser är fortfarande alltför tidskrävande för att användas mer generellt vid nykonstruktion, men potential finns för att kunna optimera t ex standardiserade konstruktioner eller konstruktionsdelar. Den ökade förståelsen för betongbroars verkliga respons som sådana olinjära analyser kan ge kan också komma att påverka dagens krav och dimensioneringsmetoder. Arbetet om ***omfördelning av snittkrafter i betongplattor*** är lika relevant för nykonstruktion som för utvärdering av befintliga broar och är därför närmare beskrivet. Mer avancerade dimensioneringsmetoder för ***kombinerad böjning, skjuvning och vridning*** är även tillämpbara vid nykonstruktion och används redan i vissa länder och beskrivs därför mer detaljerat nedan. Resultaten från arbetet om ***armeringskorrosion*** ger värdefull information om hur armeringen bör utformas för att dessa inte skall bli alltför känsliga för korrosion. Slutsatser om rekommendationer för armeringsutformning vid byggandet av nya broar har därför tagits fram. Arbetet om återstående livslängd med hänsyn till utmattning skulle på motsvarande sätt kunna tänkas leda till råd om hur broar bör utformas, men sådana har inte lika tydligt kunnat utläsas ur resultaten.

Materialegenskaper för äldre **stålbroar** är inte direkt relevant för nyproduktion då inte samma stålqualiteter används idag. Det samma kan sägas om studierna av nitade järnvägsbroar eftersom denna produktionsmetod inte längre används. Resultaten kan dock vara av intresse om äldre broar skall förstärkas. Vad som redovisas av oförstörande provningsmetoder är fokuserat på detektering och tillväxt av utmattningsprickor. Eftersom sådana inte skall uppträda i nya broar, och inte heller är känt som ett problem här, är arbetet av litet intresse för nyproduktion.

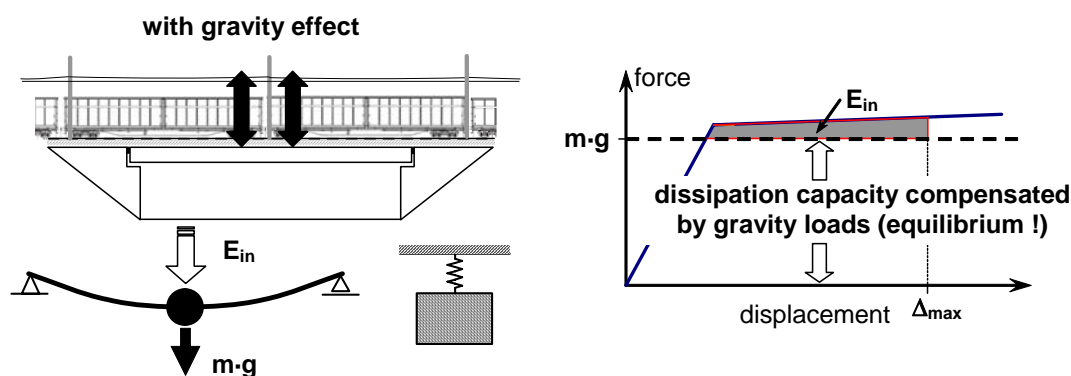
Nya broar av typen **valv- eller bågbroar av murverk** är mycket ovanliga. Detta gör att arbetet inom denna grupp är av begränsat intresse för nykonstruktion. Förbättrade beräkningsmodeller som bygger på ökad förståelse för samverkan mellan bro och täckande/omgivande jordmaterial kan leda till att denna typ av konstruktion kan förbättras och optimeras så att de i högre grad kan bli aktuella även för nya broar. Här kan jämföras med den starka utvecklingen för rörbroar.

7.3.2 Noggrann beräkning av dynamisk förstöringsfaktor

Dagens schablonmässiga metoder för beräkning av dynamiska förstöringsfaktorer leder ofta till en väsentlig ökning av trafiklasten. En noggrannare bestämning av den dynamiska förstöringsfaktorn för en specifik bro eller brodel är därför intressant även vid nyproduktion.

Resultaten av denna forskningsaktivitet visar att det är viktigt att särskilja den dynamiska förstöringsfaktorn för brottgränstillstånd, bruksgränstillstånd respektive för kontroll med hänsyn till utmattning. För konstruktioner med segt brottbeteende finns i brottgränstillstånd i praktiken tillräcklig plastisk energiupptagningsförmåga för att de dynamiska effekterna skall kunna tas upp. Man har funnit att befintliga järnvägsbroar av såväl armerad och förspänd betong som av stål har tillräcklig plastisk deformationsförmåga för att nödvändig dynamisk energi skall konsumeras utan att den statiska lasten i brottgränstillstånd behöver ökas. Med andra ord rekommenderas att den dynamiska förstöringsfaktorn sätts till 1,0 i brottgränstillstånd.

För bruksgränstillstånd konstateras att befintliga uttryck för beräkning av dynamisk förstöringsfaktor har visat sig vara konservativa eftersom de har bestämts som de högsta förekommande dynamiska förstöringarna för hela lastspektrat av trafiklaster. För de högsta lasterna är dock den dynamiska ökningen av lasten relativt sett mindre. Detta gäller i synnerhet den delen av den dynamiska effekten som härrör från spårregelbundenheter. Denna del är ofta dominerande för broar och broelement med korta spännvidder.



Figur 7.1 Gravitationseffekten påverkar den dissiperade energin (visad som last-deformationskurva)

I bruksgränstillstånd rekommenderar man generellt ändå att dynamiska förstöringsfaktorer i enlighet med Eurokod, EN 1991-2 (2003), används. Här måste man beakta *tillfälligt förekommande* (extrema) värden på den dynamiska förstöringen. För utmattning är det dock *vanligt förekommande* värden på den dynamiska förstöringen som ger upphov till ackumulerande utmattningsskador. Man har här därför tagit fram ett uttryck med reducerade värden på den dynamiska förstöringen.

Motsvarande värden skulle rimligtvis även kunna användas vid nykonstruktion. Detta skulle innebära att den dynamiska förstöringsfaktorn i brottgränstillstånd skulle kunna sättas till

$$\varphi_{ULS} = 1,0$$

Detta förutsätter dock att den dynamiska effekten behandlas separat i bruksgränstillstånd och för utmattning, och att man kontrollerar att konstruktionen har ett segt beteende i brottgränstillstånd. Detta är t.ex. uppfyllt för betongkonstruktioner om böjning är kritiskt och tvärsnittet har seg respons.

I bruksgränstillstånd bestäms den dynamiska förstöringsfaktorn enligt Eurokode:

$$\varphi_{SLS} = 1 + \varphi' + 0,3\varphi''$$

För kontroll av utmattning skulle dock det framtagna uttrycket med ett reducerat värde kunna användas:

$$\varphi_{FLS} = 1 + 0,5(\varphi' + 0,3\varphi'')$$

Faktorerna φ' och φ'' bestäms därvid enligt Eurokod, EN 1991-2 (2003).

7.3.3 Omfördelning av linjärt bestämda snittkrafter i betongplattor

Relevans

Strukturanalys med FEM kan rationalisera och förbättra konstruktionen av broar, i synnerhet vid komplicerad geometri där modellering i tre dimensioner är nödvändig. Till följd av belastning med rörliga trafiklaster och många möjliga lastkombinationer används normalt linjära analyser för broar. Linjära tredimensionella analyser leder dock ofta till höga spänningskoncentrationer, t.ex. vid koncentrerade upplag eller anslutning mellan platta och pelare. Dessa uttrycks vanligen som koncentrerade snittmoment och tvärkrafter.

De spänningskoncentrationer som erhålls linjära analyser av betongkonstruktioner existerar dock oftast inte i verkligheten. Det beror på att betongen spricker, ofta redan för brukslaster, och på att armeringen plasticerar för högre laster så att stora omfördelningar sker av snittmoment och tvärkrafter innan brottgränstillstånd uppnås. Ytterligare en orsak till orealistiska spänningskoncentrationer är att geometrin ofta förenklas när strukturelement som skal- och balkelement används för att modellera bron.

Osäkerheten rörande de linjärt framtagna snittmomenten och tvärkrafterna och hur dessa skall omfördelas är något som vållar problem vid brodimensionering idag och som utgör ett hinder för praktisk tillämpning av moderna beräkningshjälpmedel.

Målsättning

Målsättningen med forskningsaktiviteten var att ta fram rekommendationer för hur snittmoment och tvärkrafter som erhålls från linjära FE-analyser kan omfördelas när bärförmåga och respons för plattbroar av armerad betong utvärderas. De resultat som har framkommit har dock lika stor relevans för dimensionering av nya broar. Arbetet

fokuserade på plattbroar och på snittmoment och tvärkrafter vid koncentrerade stöd eller pelare.

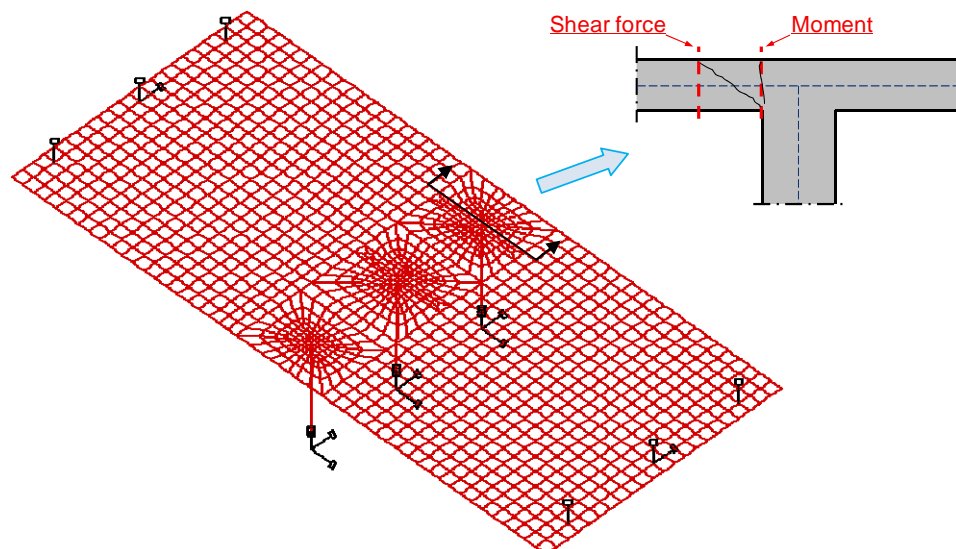
Metod

En litteraturstudie och undersökning av kunskapsläget gjordes, och olika befintliga rekommendationer om fördelning av armering i pelarunderstödda plattor jämfördes. Linjära FE-analyser gjordes för att studera effekten av förenklad modellering av geometrin. En typisk pelarunderstödd plattbro analyserades därefter med olinjär FEM som fallstudie och strukturens respons jämfördes. Armeringen i bron dimensionerades enligt tre olika principer, vilka jämfördes:

1. Tvådimensionell ramanalys, med lika armeringsfördelning över filbredden,
2. Strimlemetod, med strimlebredder enligt rekommendationer i Hillerborg (1996)
3. Tredimensionell linjär FE-analys, med strimlebredder enligt Vägverket (2004).

Resultat

Under arbetet framkom att de principiellt olika orsakerna till att spänningskoncentrationer uppstår måste behandlas på olika sätt. Koncentrationer till följd av förenklad modellering av geometrin kan hanteras genom att använda ett tillräckligt finmaskigt elementnät och använda snittkrafter och moment från kritiska snitt. Snittmoment och tvärkrafter i en platta tenderar att gå mot oändligheten när elementnätet förfinas om plattan understöds i en koncentrerad punkt. I verkligheten däremot erhålls de största spänningarna i det kritiska snittet runtom upplaget eller anslutningen mellan platta och pelare. Genom känslighetsanalyser kunde det



Figur 7.2 Med tillräckligt finmaskigt FE-nät kan toppvärdena innanför de kritiska snitten ignoreras då anslutning mellan platta och pelare modelleras med skal- och balkelement som möts i en enda nod.

konstateras att snittmoment och tvärkrafter i de kritiska snitten inte påverkades av förenklingen av geometrin om elementnätet var tillräckligt finmaskigt omkring den singulära punkten. Studien visade att det krävs minst två skalelement av första

ordningen (eller ett skalelement av andra ordningen) mellan upplags- eller anslutningspunkten och det kritiska snittet. De högre toppvärdena innanför det kritiska snittet har då ingen meningsfull fysikalisk innebörd och kan ignoreras.

Koncentrationer till följd av förenklad modellering av materialet, d.v.s. att linjär respons antas, måste omfördelas. I synnerhet är det nödvändigt att omfördela snittmomenten i tvärled, d.v.s. vinkelrätt mot armeringsriktningen, så att armeringen kan anordnas i strimlor med konstanta avstånd mellan stängerna. Det som i brottgränstillstånd begränsar vidden på de strimlor som armeringen fördelas jämnt över är plattans behov av plastisk rotation så att alla armeringsstängerna plasticeras. Från de olinjära analyser som genomfördes framträdde inget klart samband mellan vilka strimlevidder som användes och vilken plastisk rotation som krävdes. Såväl fördelningen mellan stöd- och fältmoment som den övergripande fördelningen i tvärled över hela plattans bredd hade större inflytande på rotationsbehovet än bredden av strimlorna. I fallstudien var det tvärtemot vad som förväntades, bron med armeringen dimensionerad med tvådimensionell ramberäkning och med mycket stora strimlebredder som hade minst rotationsbehov. För brukslaster är istället sprickvidden av störst intresse. Här kunde ingen signifikant skillnad i sprickvidder utläsas ur resultaten mellan de olika armeringsfördelningarna

Slutsatser

Då en plattbro understödd av pelare och koncentrerade upplag skall dimensioneras rekommenderas att böjarmeringen anordnas i ”pelarstrimlor” och ”mittstrimlor” på samma sätt som rekommenderas för pelarunderstödda plattor i många handböcker. De rekommendationer om strimlevidder (fördelningsbredder) som ges av Vägverket (2004) kan betraktas som konservativa (på säker sida).

Då istället bärförmågan hos befintliga plattbroar skall utvärderas måste omfördelning av snittmoment över hela bronns bredd medräknas. Det finns en uppenbar risk att många broars bärförmåga underskattas grovt om inte momenten tillåts omfördelas över hela plattans bredd. Momentet måste istället tillåtas omfördelas så att det motsvarar den tillgängliga armeringens kapacitet. Rekommendationerna i handböcker kan här vara alltför konservativa och bör inte begränsa omfördelningen i tvärled i plattan.

Både vid dimensionering och utvärdering är det viktigt att försäkra sig om att plattan har tillräcklig duktilitet, exempelvis enligt Eurokod 2 (2004).

7.3.4 Kombinerad böjning, skjuvning och vridning i betongbroar

Dimensionering av betongkonstruktioner för böjning, skjuvning respektive vridning sker vanligen med separata beräkningsmodeller och samverkan mellan dessa beaktas normalt inte vid nykonstruktion. Genom införandet av fackverksmodeller i Eurokoderna blir det dock uppenbart för konstruktörerna att dessa snittkrafter och moment samverkar. Detta är också något som man forskat mycket på, och olika modeller för att beakta detta redovisas. En möjlighet är att använda plasticitetsteori.

Ett noggrannare sätt att beakta kombinerad böjning, skjuvning och vridning är med hjälp av modifierad tryckfältsteori (Modified Compression Field Theory). Denna modell finns redan idag implementerad i många nationella normer, och bör i framtiden även kunna användas vid dimensionering av broar i Sverige. I bakgrundsdokumentet, SB4.5 (2007), ges flera praktiska exempel på utvärdering av bärförmåga hos olika broar med denna metod. Här har ett datorprogram, Response-2000, utarbetat för sådana beräkningar, använts. Se Bentz (2000).

7.3.5 Olinjära analyser av betongkonstruktioner

Olinjära analyser framhålls som den metod som har störst potential att kunna påvisa högre bärförmåga för befintliga konstruktioner. Dessa metoder kan naturligtvis användas för att optimera konstruktioner bättre även vid nykonstruktion. Att genomföra detaljerade olinjära analyser på det sätt som visas i en del av exemplen är dock mycket tidskrävande och kräver stor kunskap och insikt av konstruktören. Dessutom innebär en sådan analys att dimensioner, armeringsmängder etc. är kända när analysen utförs.

Förbättrade anvisningar och regler vid användande av olinjära analyser för betongbroar är av intresse även för dimensioneringsskedet. För standardiserade konstruktioner eller konstruktionselement kan sådana metoder användas för att bättre optimera utförandet och därmed kunna genomföra besparingar, se exempelvis Broo (2008). Dessutom är möjligheten till användning av förenklade olinjära analyser mycket intressant. En ökad förståelse för linjär respektive olinjär respons och dimensionering borde kunna leda till att förenklade metoder i ökad utsträckning kan användas för brottränksdimensionering, men att mer avancerade analyser kan bli intressanta för bruksgrännsdimensionering.


7.3.6 Robust utförande med hänsyn till armeringskorrosion

Allvarlig armeringskorrosion leder till spjälkning av täckande betongskikt och till att armeringen så småningom kan rosta av. Dock kan korrosionen redan på ett mycket tidigt stadium påverka armeringens vidhäftning till betongen, och därigenom förankringskapaciteten. För att utreda vilka faktorer som påverkar korrosionens inverkan på vidhäftningen genomfördes denna forskningsaktivitet. Resultaten sammanfattas i figur 5.11.

De faktorer som har störst inverkan på hur allvarlig korrosionen är för armeringens förankringskapacitet är vilken typ av armering (kamstänger eller släta stänger) som används och huruvida det finns omslutande armering som kan överbrygga de spjälksprickor som kan uppstå. Effekten av dessa faktorer på förankringskapaciteten sammanfattas i figur 7.1. Framförallt visar resultaten på vikten av omslutande armering för att korrosion inte skall kunna leda till plötsliga och oförutsedda brott i förankrings- och skarvzoner.

Kamstänger används idag alltid vid nykonstruktion, så resultaten för släta stänger är av mindre intresse. Man kan dock konstatera att kamstångers förankring är mer känslig för korrosion. Vad som är intressant är att omslutande armering har mycket stor

inverkan på förankringskapaciteten och på den korrosionsgrad för vilken förankringen blir kritisk. För kamstänger utan omslutande armering kan förankringskapaciteten reduceras redan innan det täckande betongskiktet spricker på grund av korrosionen. Dessutom kan förankringskapaciteten minska kraftigt samtidigt som en spjälkspricka uppstår, speciellt vid tjocka täcksikt. Detta betyder att förankringskapaciteten kan förloras utan förvarning såvida man inte har ett övervakningssystem för karbonatisering och kloridinträngning. I så fall kan åtgärder vidtas redan när korrosionen initieras.

| | | |
|---|--|--|
| <p>Corrosion becomes more critical for anchorage</p>  <p>Corrosion becomes less critical for anchorage</p> | Ribbed bars, no transverse reinforcement | Critical already for smaller corrosion levels than what causes cracking of the cover |
| | Smooth bars, no transverse reinforcement | Critical when corrosion causes cracking of the cover |
| | Ribbed bars, transverse reinforcement | Mainly area reduction that is critical |
| | Smooth bars, transverse reinforcement | |

Figur 7.3 Översikt över hur kritisk korrosion är för förankringskapaciteten. Observera att den omslutande armeringen måste korsa möjliga sprickor för att vara verksam.

Om det däremot finns verksam omslutande armering i tillräcklig mängd, så blir inte förankringskapaciteten kritisk förrän efter spjälksprickor har uppstått, och det finns därför möjlighet att genom inspektion upptäcka korrosionen i tid för att genomföra nödvändiga åtgärder innan förankringskapaciteten drastiskt minskar. Det är viktigt att den omslutande armeringen verkligen korsar alla möjliga spjälksprickor. Det måste också finnas tillräcklig mängd tvärarmering för att hålla ihop spjälksprickorna och tvärarmering får själv inte vara alltför korroderad.

Baserat på dessa resultat rekommenderas att omslutande armering alltid används i förankrings- och skarvzoner för all armering som krävs för att bära last i brottgränstillstånd.

7.4 Mätning (WP 5, WP 8)

7.4.1 Relevans för nyproduktion och svenska förhållanden

De erfarenheter som man erhållit genom SB-projektet kan till stora delar direkt översättas och användas för produktionsfasen samt under driftskedet. Metodiken är mer eller mindre den samma oavsett om mätning skall ske för att följa upp en befintlig konstruktion eller om man ska följa en konstruktion under driftskedet. Vikt bör då läggas vid robustheten hos sensorerna och planeringen av datainsamling samt hur man ska använda insamlad data. För mätning under produktionsfasen kan man vara mer kortsiktig och långtidsaspekten är inte lika viktig – om man inte avser att använda sensorerna även under driftskedet. Det är dock mycket väsentligt att en mätning under

produktionsfasen är integrerad med produktionen i övrigt. Några områden som kan ha relevans för nyproduktion och svenska förhållanden beskrivs nedan.

7.4.2 Fiberoptiska sensorer

Det var inte förrän under senare delen av 1980-talet som forskare inom byggnadsdisciplinen började experimentera med idén att använda fiberoptiska sensorer i kombination med byggnadsmaterial och konstruktioner. Förutom mätning av töjningar och temperatur kan fiberoptiska sensorer användas till att mäta kloridhalter och sprickor i betong. En stor fördel med fiberoptik är förutom tidigare beskrivna fördelar att de enkelt kan integreras i konstruktioner. Den största fördelen i jämförelse med traditionella sensorer är dock att den förväntade livslängden överstiger 25 år vilket bör vara ett minimikrav om sensorer skall installeras i nyproduktion.

7.4.3 Sladdlös mätning

Ett stort arbete i samband med installation av mätutrustning är kabeldragning och alla kablar som ska anslutas. För traditionella mätmetoder som t ex töjningsgivare, accelerometrar och vibrerande strängar krävs minst en kabel per sensor. Med de sladdlösa sensorer som utvecklades i SB-projektet kan en stor del av denna kabeldragning undvikas.

7.4.4 Mätning under produktionsfasen

Trots att det ofta uppkommer frågeställningar kring olika tekniska aspekter under produktionsfasen, speciellt för stora anläggningskonstruktioner, är mätning inte vanligt förekommande. Det föreslås att erfarenheterna som kom från under SB-projektet tas till vara och tillämpas under ett eller flera projekt i produktionsfasen. Exakt hur detta ska utföras måste planeras utifrån specifika projektförutsättningar och önskemål från beställare och utförare. Ett typiskt projekt skulle dock kunna vara att studera spännkrafterna och hur dessa krafter överförs till betongen under produktion.

7.4.5 Mätning under driftskedet

Mätning under driftskedet är vanligt förekommande när det gäller CSHM (Civil Structural Health Monitoring) och har idag blivit relativt vanligt i samband med byggande av stora anläggningskonstruktioner i Asien. I Sverige är detta dock fortfarande relativt sällsynt. Mätning under driftskedet skulle kunna ge väsentlig information om anläggningens beteende över lång tid. Mätning skulle också kunna kalibreras mot beräkningsmodeller och det skulle kunna vara relativt enkelt att uppgradera t ex en bro efter halva livslängden. Mätningar inriktade mot korrosion samt sprickbildning skulle kunna minska de löpande fysiska inspektionsintervallerna.

7.4.6 Tillämpningar av projektresultat

Några forskningsaktiviteter som ger resultat som kan utnyttjas vid nyproduktion är:

- Metoder och system för sladdlös samt fiberoptisk mätning
- Kontroll av laster, påkänningar och deformationer i samband med nyproduktion
- Övervakning för att reducera antalet fysiska inspektioner på broar

7.5 Nya material (WP 6)

7.5.1 Relevans för nyproduktion och svenska förhållanden

En stor del av det arbete som utförts inom WP6 är idag redan kommersiellt gångbart, framförallt metoder för förstärkning. Det finns dock ett flertal intressanta områden där WP6 genererat kunskap som kan komma till användning inom nyproduktion. Dessa områden beskrivs kortfattat nedan:

7.5.1.1 Sprickarmering

Idag är det inte ovanligt med tjocka täckschikt för att skydda stålarmingen. Om man använder sig av kompositarmering som sprickarmering skulle man kunna minska täckschikten till ca 10 mm och troligen även få en betydligt bättre sprickfördelningseffekt eftersom kompositmaterialen är linjärelastiska.

7.5.1.2 Utanpåliggande spännkablar av kolfiberkomposit

Användning av utanpåliggande spännkablar av kolfiber kan vara ett beständigt alternativ till traditionella stålkablar. Här skulle man då kunna tänka sig nya typer av konstruktionslösningar med tunnväggiga tvärsnitt och kablar på utsidan.

7.5.1.3 Intelligent armering

För att följa upp nyproducerade broar kan man integrera mätsystem. Här skulle man kunna gjuta in kompositfiberstänger integrerade med fiberoptik i betongkonstruktionen för att följa upp en konstruktions beteende över tiden.

7.5.1.4 Armering av kompositmaterial

För konstruktioner eller konstruktionselement utsatta för kraftig miljöbelastning kan armering av kompositmaterial vara ett alternativ till traditionell stålarmering. Dessa material skulle kunna ersätta stål i t ex kantbalkar och skvalpzonen.

7.5.2 Tillämpningar av projektresultat

Några forskningsaktiviteter som ger resultat som kan utnyttjas vid nyproduktion är:

- Sprickarmering genom användning av kompositmaterial
- Kompositmaterial som armeringsmaterial, bl a anpassning av normer till svenska förhållanden.
- Produktionsmetoder och tekniker som underlättar framtida underhåll av konstruktioner, t ex utbytbara komponenter.

7.6 Fullskaleprovning (WP 7)

7.6.1 Relevans för nyproduktion och svenska förhållanden

Fullskaleprovning av betongbroar kan delas in i tre skeden, osprucket tillstånd, sprucket tillstånd och brottillstånd. I samband med belastning kan man gå igenom dessa olika stadier samt de beräkningsmodeller och antaganden man normalt gör. I osprucket tillstånd fungerar beräkningsmodellerna normalt väl, i sprucket tillstånd och i brottgränstillståndet är detta inte alltid fallet och djupare studier är motiverat.

De utförda fullskaleprovningarna inom SB-projektet har gett ökad förståelse för konstruktionernas verkningsätt och kapaciteter. Genom fullskaleförsök har man kunnat kalibrera beräkningsmodeller samt erhållit en förståelse för hur de verkliga konstruktionerna uppför sig.

7.6.2 Tillämpningar av projektresultat

Några forskningsaktiviteter som ger resultat som kan utnyttjas vid nyproduktion är:

- Analytiska beräkningsmodeller för tvärkraftskapacitet hos betongbroar.
- Numerisk modellering av tvärkraftskapacitet för trågbroar av betong – användning av icke linjära modeller.

8 Slutsatser och sammanfattning

Utredningsarbetet i SB-projektet har varit fokuserat på att övergripande identifiera kunskapsbehov samt de brister i de europeiska brobestånden, som orsakar reparations- och underhållsbehov. Detta behov har sedan styrt SB-arbetet och därmed direkt påverkat de metoder och resultat som tagits fram, se mer information om SB-resultaten i kapitel 5. De problemområden för vidare utveckling, som prioriteras av de europeiska järnvägsbolagen, har visat sig förvånansvärt likartade trots den geografiska spridningen. Detsamma gäller prioriteringen av kunskapsbehov. Därför är de resultat som har uppnåtts inom SB-projektet relevanta även för svenska broar.

Kunskap om det svenska brobeståndet byggs för närvarande upp i den databas som ingår i broförvaltningssystemet BaTMan, vilket beskrivits i kapitel 6. Systemet är under uppbyggnad, men redan nu har det kompletterat de resultat som kommit från SB-projektet och bidragit till att ge en mer detaljerad och samlad bild av egenskaperna, goda och dåliga, i det svenska brobeståndet. Eftersom även nyproducerade broar successivt läggs in i BaTMan kommer denna databas framöver att vara en väsentlig källa till information vid kommande studier på svenska broar. Det har dock visat sig vara svårt att på ett enkelt sätt göra större sammanställningar och statistikbearbeta information i databasen. En annan svårighet är att man även måste hantera de delvis subjektiva bedömningar som finns inmatade av olika broinspektörer om skadeorsaker.

Detta SBUF-projekt har syftat till att systematiskt tillvarata kunskap om svagheter i nuvarande järnvägsbrobestånd i Sverige och i övriga Europa för att ge underlag till förbättrade metoder för konstruktion, detaljutformning, materialanvändning och utförande i nyproduktion av svenska broar, såväl väg- som järnvägsbroar. I förlängningen kommer ägare och förvaltare att ha störst nytta av projektet i form av ökad livslängd och minskat underhållsbehov för deras förvaltningsobjekt. Metoder och råd om utförande och utformning som bedömts vara speciellt lämpade för produktion och konstruktion av svenska broar finns redovisat i kapitel 7.

9 Fortsatt arbete

Eftersom BaTMan har varit i ett uppbyggnadsskede under projektiden har inte databasens potential kunnat användas fullt ut. Därför har möjligheten att identifiera svenska broproblem och dess orsaker till viss del begränsats. Om databasen byggs ut och kompletteras kommer den att kunna användas på ett mer optimalt sätt i en framtid. Då kommer man på ett bättre sätt att kunna identifiera skadeorsaker och förbättringspotential för olika konstruktionsdelar.

För att resultaten från SB-projektet ska kunna uppnå ekonomisk relevans är det viktigt att ägarna till konstruktionerna börjar tillämpa resultaten. Detta kan utföras som delar i planerade projekt eller på befintliga konstruktioner. I ett första skede kan detta vara lämpligt att genomföras med partners som var delaktiga i SB-projektet och på så sätt lyfta in denna kunskap in i nya projekt.

Det finns flera delar från SB-projektet där vidare utveckling skulle kunna gynna såväl svensk industri, forskning och ägare till befintliga och nya anläggningar. Här kan bl a nämnas vidareutveckling av modern mätteknik för praktisk och långsiktig användning

Inom SB-projektet identifierades några områden där det finns behov av fortsatt utveckling och forskning. Det forskningsområde som har mest relevans för detta projekt är troligen hur de olika disciplinerna ska kunna sammankopplas på ett för anläggningsägaren tydligt och effektivt sätt som visar på ökad livslängd, bärförmåga och sparade resurser. Här krävs då en avsevärt ökad kunskap om livscykelkostnad (LCC), eftersom ett sådant projekt kan ge viktig information om olika brotypers och detaljkonstruktioners effektivitet i ett livslängdsperspektiv.

.

10 Referenser

- Bentz, E. C. (2000). *Sectional Analysis of Reinforced Concrete Members*. A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Graduate Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto 2000, www.ecf.utoronto.ca/~bentz
- Broo H. (2008) *Shear and Torsion in Concrete Structures: Non-linear Finite Element Analysis in Design and Assessment*. Doctoral Thesis Ny serie 2786, Concrete Structures, Division of Structural Engineering and Mechanics, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden,.
- Hemsidan för "Sustainable Bridges" www.sustainablebridges.net
- Hillerborg, A. (1996): *Strip Method Design Handbook*. E & FN Spon, London, Great Britain.
- EN 1991-2 (2003): *Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges*. European Standard, Brussels: CEN.
- EN 1992-2 (2005): *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 2: Concrete bridges - Design and detailing rules*. European Standard, Brussels: CEN.
- ERRAC 2002. Strategic Rail Research Agenda 2020. *European Rail Research Advisory Council, ERRAC, September 2002*. 25+54 pp, tillgänglig via <http://www.errac.org/reftexts.htm>).
- Paulsson, Björn; Töyrä, Björn; Elfgrén, Lennart; Ohlsson, Ulf and Danielsson, Georg 1997. Increased Loads on Railway Bridges of Concrete. *Advanced Design of Concrete Structures (Ed. By K Gylltoft et al), Cimne, Barcelona, 1997*. pp 201-206 (ISBN 84-87867-94-4).
- Paulsson, Björn 1998. Assessing the track costs of 30 tonne axle loads. *Railway Gazette International*, vol 154, no 11, 1998. pp 785-788 (3 pages). See also Lundén, Roger 1998. LKAB invests in 30 tonne axle loads. *Railway Gazette International*, vol 154, no 9, 1998. pp 585-588 (3 sidor).
- Olofsson, Ingvar and Elfgrén Lennart 2004. Sustainable Bridges - Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives. *IABMAS04*, Oktober 19-22, 2004, Kyoto Japan.
- Andrés, Alberto Hernández 2004. Cracking of existing concrete bridges, Master's Thesis 04:11, Chalmers University of Technology.
- Karlsson, Nicklas and Mathiasson, Morgan 2004. Feedback using computer based maintenance system, Master's Thesis 04:16, Chalmers University of Technology.
- Elfgrén, Lennart; Olofsson, Ingvar; Olofsson, Jan and Paulsson, Björn, 2005. Hållbara broar - ett europeiskt forskningsprojekt. *Betong* nr 1, 2005 pp 61-63

Hejll, Arvid och Täljsten, Björn, 2005. Civil Structural Health Monitoring (CSHM). Tillståndsbedömning genom mätning anpassad för anläggningskonstruktioner. *Tekniks rapport 2005:33*, Luleå Tekniska Universitet.

SB-ICA (2007): *Guideline for Inspection and Condition Assessment of Railway Bridges*. Prepared by Sustainable Bridges- a project within EU FP6. Available from: www.sustainablebridges.net

SB-LRA (2007): *Guideline for Load and Resistance Assessment of Existing European Railway Bridges*. Prepared by Sustainable Bridges- a project within EU FP6. Available from: www.sustainablebridges.net

SB-MON (2007): *Monitoring Guidelines for Railway Bridges - Methodology*. Prepared by Sustainable Bridges - a project within EU FP6. Available from: www.sustainablebridges.net

SB-STR (2007): *Guideline for Use of Repair and Strengthening Methods*. Prepared by Sustainable Bridges - a project within EU FP6. Available from: www.sustainablebridges.net

SB4.3 (2007): *Loads and Dynamic Effects*. Background document D4.3 to “Guideline for Load and Resistance Assessment of Railway Bridges”. Prepared by Sustainable Bridges- a project within EU FP6. Available from: www.sustainablebridges.net.

SB4.4 (2007): *Safety and Probabilistic Modelling*. Background document D4.4 to “Guideline for Load and Resistance Assessment of Railway Bridges”. Prepared by Sustainable Bridges- a project within EU FP6. Available from: www.sustainablebridges.net.

SB4.5 (2007): *Non-Linear Analysis and Remaining Fatigue Life of Reinforced Concrete Bridges*. Background document D4.5 to “Guideline for Load and Resistance Assessment of Railway Bridges”. Prepared by Sustainable Bridges- a project within EU FP6. Available from: www.sustainablebridges.net.

SB4.6 (2007): *Improved Assessment Methods for Static and Fatigue Resistance of Old Steel Railway Bridges*. Background document D4.6 to “Guideline for Load and Resistance Assessment of Railway Bridges”. Prepared by Sustainable Bridges- a project within EU FP6. Available from: www.sustainablebridges.net.

SB4.7 (2007): *Masonry Arch Bridges*. Background document D4.7 to “Guideline for Load and Resistance Assessment of Railway Bridges”. Prepared by Sustainable Bridges- a project within EU FP6. Available from: www.sustainablebridges.net.

Vägverket (2004): *Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av broar, Bro 2004*. Vägverket, Publikation 2004:56, Borlänge, Sweden.