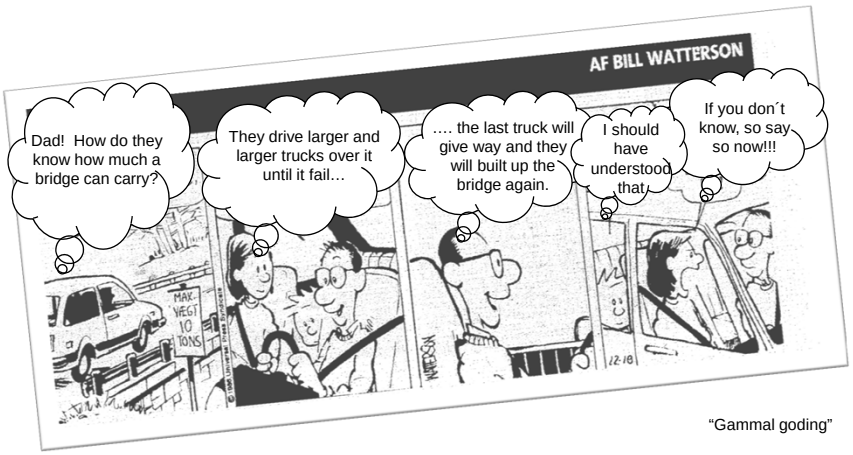
BBT-Workshop – Innovativa metoder för effektivare broförvaltning

KTH 29:e maj kl 09:30-17:00

Professor Björn Täljsten
Luleå Tekniska Universitet, LTU
Trafikverket, TRV



"Gammal goding"

LULEÅ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Agenda

- Bakgrund - behov
- Tillståndsbedömning i allmänhet (Assessment)
- SHM – Structural Health Monitoring
- Uppgradering – (t ex Förstärkning)
- Exempel från fältprovningar
- Sammanfattning
- Fortsatt arbete – framtida förvaltning

Bakgrund

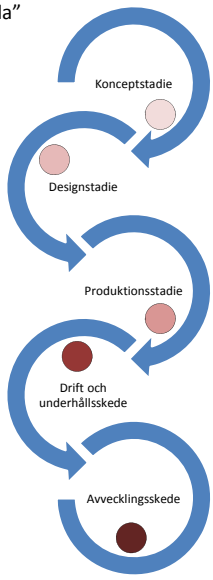
Säkerhet och prestanda

En ägare till en anläggning vill veta om den är säker, hur länge den är det (tid) och om inte, vad det kostar (kr) att åtgärda den samt när ska det göras (tid/kr)?

Bristande underhåll i USA

Bakgrund

"Få bollen att rulla"
i processen



Beständighet
Miljöpåverkan
Förlängning av livslängd – driftskede

Traditionell byggnadsprocess

- Många partners, även inom varje skede
- Fokusering på att optimera sin egen insats/fördel
- Många kontaktytor (project interfaces)
- Inte alltid tydliga ansvarsområden
- Kan liknas vid ett stafettlopp där en del projektet förs över till nästa part tills man är i mål.
- Dokumentering görs inte alltid med helheten som mål
- Svårt att följa ändringar under en anläggnings livstid (historia)

Drift och underhållsskede

- Ofta otillräcklig historik och dokumentation
- Beslut tas på antaganden och teoretiska samband
- Ofta ingen data från byggnadsskedet
- Modellering utifrån antaganden
- Verifiering genom provning – kanske "proof loading"
- Utmaning att ha en totalkostnads fokus på anläggning

Bakgrund

Vad är det som driver behovet/forskningen?

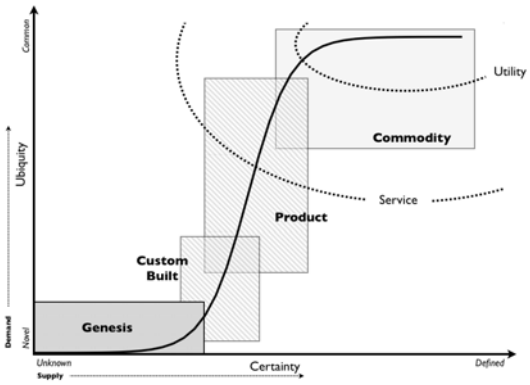
- Ökat behov att se till anläggningars kostnader, och alla dess delar under hela livstiden
- Ökat behov av tillgänglighet
- Ökade laster, ökad intensitet
- Önskan om längre livslängder
- Nedbrytningsprocesser
- Större och mer komplexa anläggningar
- Ökade kostnader för inspektion och underhåll
- Nya sätt att se på byggnadsprocessen
- Snabb teknisk utveckling – digitalisering
- Generationsskiften - kompetens
- Samlad kunskap om anläggningars tillstånd

Bakgrund

Vad är det som driver behovet/forskningen?

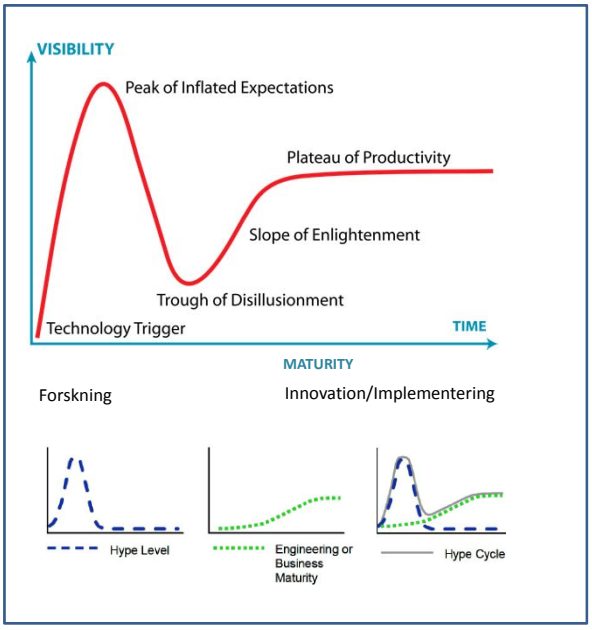
- Lång och kortsiktiga behov
  - Forskning
  - Innovation
- Förståelse vad man ”beställer”
  - Forskning
  - Färdig produkt/system för implementering
- S-kurvan
  - Beskriver normalt utvecklingen över tid gällande forskningsfasen till implementeringsfasen
- Hype Cycle
  - Liknande som S-kurvan, men tar även hänsyn till omgivningens förväntningar (media, allmänheten, i viss mån okunskap)

Bakgrund



Forskning Innovation/Implementering

Bakgrund



Exempel

- FE-Modellering
- FRP Förstärkning/armering
- SHM
- Big Data?

Detta är viktigt att ta med sig när vi nu står för stora utmaningar gällande framtida utmaningar för broförvaltning.

En viktig frågeställningar är: Vad är universitetens och vad är industrins uppgifter i detta?

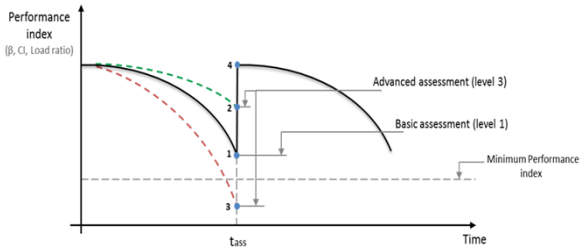
Forskning på LTU

Tillståndsbedömning och Förstärkning

- Tillståndsbedömning – sedan 80-talet
  - Laster
  - Material
  - Geometri
  - Mätning
  - Modellering
- SHM (Stuctural Health Monitoring) – mitten av 90-talet
  - Metodik
  - Optiska metoder
  - Sladdlösa system
  - Traditionella system
- Förstärkning – slutet av 80-talet
  - Böjning
  - Tvärkraft
  - Utmattning
- Fullskaleprovning i fält – sedan 80 talet
  - Mer är 30-års erfarenhet
  - Både stål- och betongbroar

Tillståndsbedömning

LCA perspektiv - En enkel modell för förklaring



Prestanda: kan hänföras till antingen bärförmåga, funktion, beständighet eller estetik

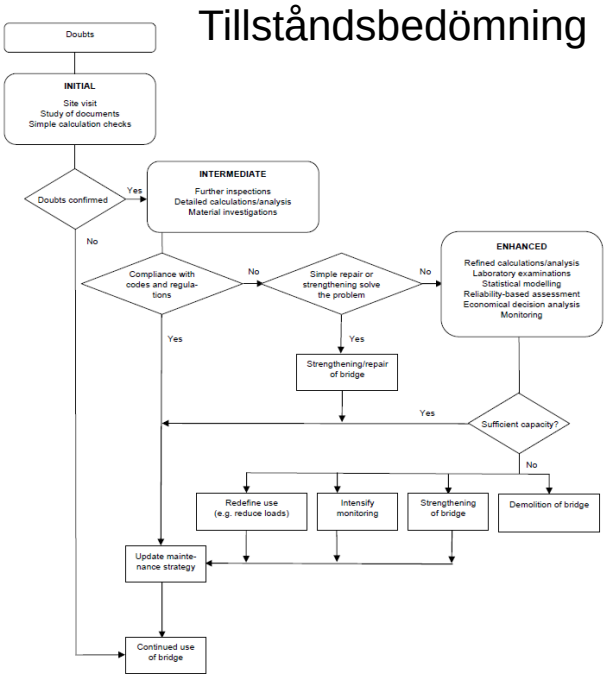
Underhåll: för att bibehålla ursprunglig prestanda

Reparation: för att åtgärda en konstruktion så den når upp till ursprunglig prestanda

Uppgradering: åtgärd för att uppnå prestanda utöver den ursprungliga

Förebyggande underhåll: Är underhåll som görs regelbundet/planerat för att förebygga uppkomst av fel. Kan jämföras med service av en bil

Tillståndsbedömning



Finns många förslag till flödesscheman. Detta är en princip som togs fram i samband med Sustainable Bridges projektet.

Tillståndsbedömning

Örnsköldsvik/Frövifors järnvägsbroar i armerad betong – 2006/2007

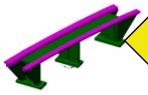
S1: Survey

Bridge owner/Consultant

Structural Assessment

S2: Condition assessment

Visual Inspections



S2: Simple Calculations

Consultant

S2: Non destructive tests

Radar, ultrasonic tests etc.

S2: Material samples

Drilling of cores, pull-off etc.

S3: Laboratory testing

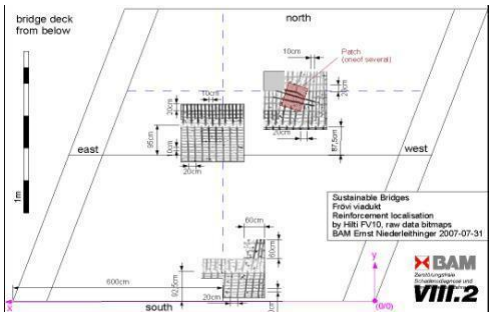
Concrete, Steel etc.

SB Project

Tillståndsbedömning

Frövifors/Örnsköldsvik Railway Bridges - 2007

Scanning for steel reinforcement, BAM



Placement of bottom steel reinforcement

SB Project

LULEÅ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Tillståndsbedömning

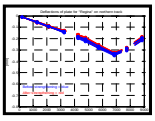
Frövifors/Örnsköldsvik Railway Bridges - 2007

S3: Sensor installation

Specialist consultant

S4: Load test 1

Testing institutes

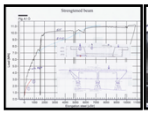


S4: Strengthening

Specialist contractors

S4: Load test 2

Testing institutes



S4: Detailed evaluation

SB Project

LULEÅ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Structural Health Monitoring

Varför SHM

- Huvudanledningen måste vara att öka den totala nyttan för kunden
- Detta ska göras med tanke på säkerhet, tillgänglighet, beständighet och brukartid (service life)
- Vi måste vara säkra på att vi mäter "rätt sak" vid "rätt tidpunkt"
- Man måste också ha ett konkret mål med mätningen
- Mätning har endast värde i samband med tillståndsbedömning och underhåll

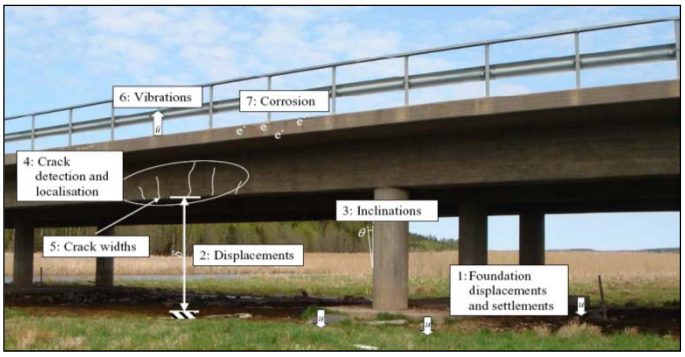
Tillstånd definieras här som:

- Ultimate limit state, ULS
- Service limit state, SLS
- Fatigue limit state, FLS
- Durability limit state, DLS

Structural Health Monitoring

Varför mätning?

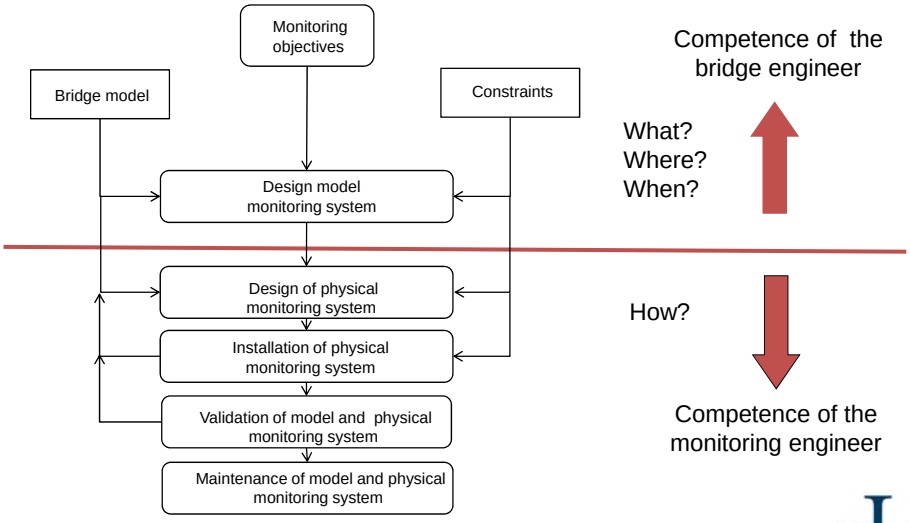
En anledning kan vara om ett fysiskt fenomen behöver följas upp eller om osäkerheter föreligger i beräkningsmodeller



Men också om man vill verifiera förstärkningseffekter och för tillståndsbedömning och framtida underhållsinsatser

Structural Health Monitoring

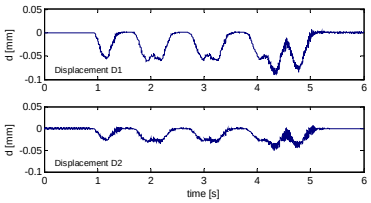
Metodik



After Glauco Feltrin, EMPA, 2007

Structural Health Monitoring

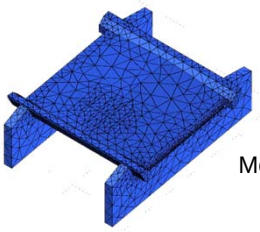
Principer



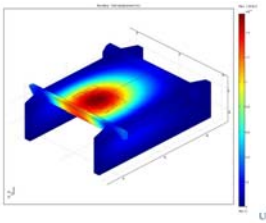
Improved correlation

Interaction bridge model/monitoring

Do model results match with monitoring results?



Modification of model



Structural Health Monitoring

Utveckling av sladdlösa system

1) Verifiera förstärkningen (eller vad man nu är intresserad av)
2) Utprovas för att kunna användas i otillgängliga områden

Utmaningen är att montera rätt typ av sensorer på rätt plats. Att systemet är ”självförsörjande” på energi och att mätdata kan nås via fjärrkoppling.

LULEÅ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Structural Health Monitoring

Ett exempel på ett fungerande system som utvecklats under 2016 för tillämpningar inom byggsektorn på svårtillgängliga anläggningar

Structural Health Monitoring

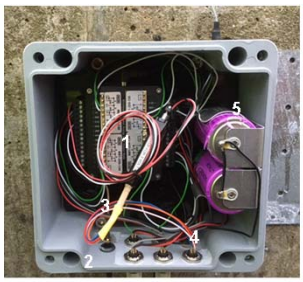
Rundstrålande antenn med 10 m förlängning.

Figur 5.4 Översikt av mätsystem

1: ASUS router med SIM-kort/telia
2: WSDA-LXRS Basstation
3: SMS-Relä med SIM-kort
4: Batteri samt laddare kopplat mellan ström in och WSDA för redundans
5: Strömadapter

Structural Health Monitoring

Riktad antenn



Figur 5.6 Nod A utan lock

1: 4 st halvbryggor kopplade med kompletteringsmotstånd till 4 st individuella kanaler i en V-Link, ch1-4

2: Ingång för antenn

3: 1 st Lägesgivare kopplad till V-Link via analog port (ej aktiv) – ch5

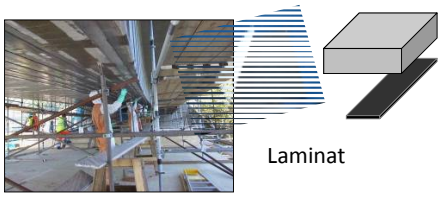
4: Ingång för sensorer (ch1-5)

5: 2 st Litium Batterier på 19000 mAh vardera.

Dessutom integrerad temp givare, ch8

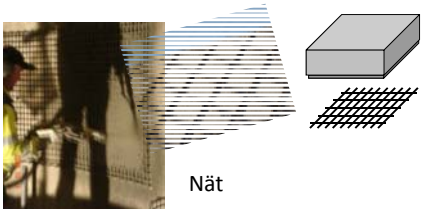
Förstärkning

Forskning på Ltu började i slutet av 1980-talet. Lång tradition och stort kunnande inom området.

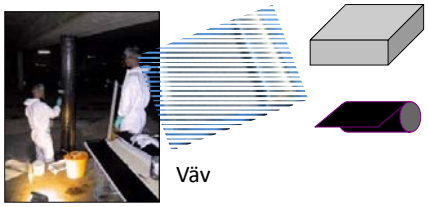


Laminat

NSM/Stavar



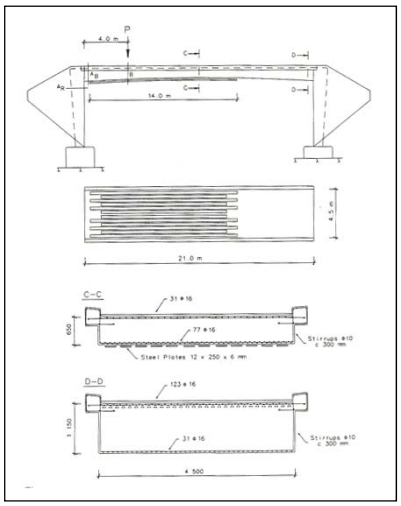
Nät



Väv

Förstärkning

Stora Höga - 1989



- Stora Höga var en bro på gamla E6:an norr om Göteborg. Byggd 1980.
- Man ville undersöka tvärkraftskapaciteten. För all realistiska placeringar av lasten skulle dock ett böjbrott uppstå.
- För att undvika böjbrott förstärktes bron på pålimmade stålplåtar. Förstärkning från 200 ton till 600 ton i böjning i belastningssnittet
- Ungefär 2/3 av bron var förstärkt med stålplåtar, A_s = 250 x 6 mm, vikt ca: 12 kg/m.
- Bron belastades ca 4.0 från det vänstra (västra) upplaget. Endast belastning efter förstärkning

Förstärkning

Stora Höga - 1989

Förstärkning

Förstärkning

Stora Höga - 1989

Mätning

Töjningsgivare på stålplåtar och på stålarmering

Nedböjning

Förstärkning

Stora Höga - 1989

Belastning

Belastningsbalkar

”Mätcentral”

Förstärkning
Stora Höga - 1989

Belastning

Stålstag förankrade i berggrunden

"Skjuvbrott" vid ca 460 ton

Förstärkning
Stora Höga - 1989
Vad lärde vi oss?

- Förstörande provning – väldigt intressant – inte lätt
- Teoretiska modeller i normerna kunde inte förutse brottlasten korrekt
- Stålplåtar gav en avsevärd förstärkningseffekt i brottgränstillståndet.
- Praktisk erfarenhet gällande förstärkningsmetodiken
- Alla installerade sensorer fungerade som förväntat, dock väldigt mycket kabel
- Ingen focus på tillståndsbedömning som helhet – bara belastning till brott – studera brottmod
- Slutligen var provet väldigt givande då såväl analytiska som numeriska modeller kunde användas som jämförelse.
- **Detta försök lade grunden till det som sedan skulle bli stora delar av Ltu (konstruktionstekniks framtida arbete)**

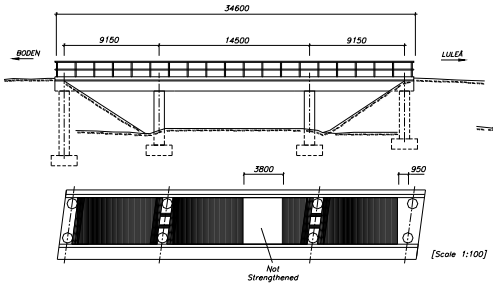
Förstärkning

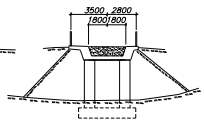
Kallkällan - 1998

Den första bron i Sverige som förstärktes med CFRP

Huvudsakliga mål:

- Att verifiera förstärkningseffekten
- Att utvärdera produktionstekniken

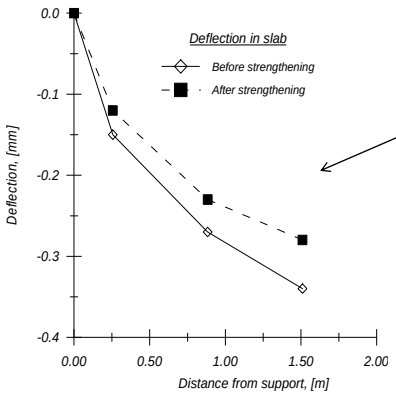


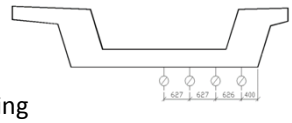


Förstärkning

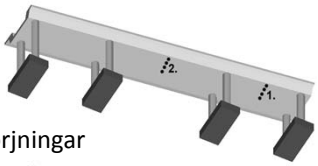
Kallkällan - 1998

Periodisk korttidsmätning

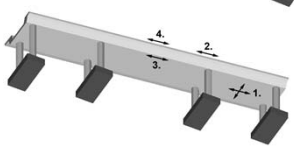




Nedböjning



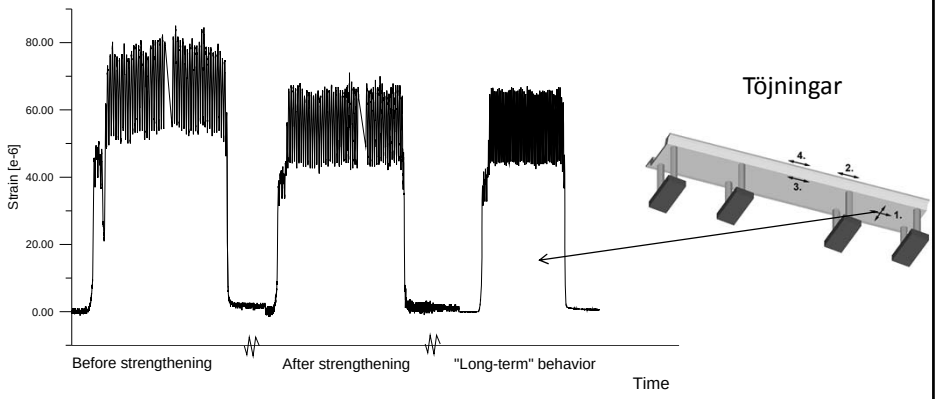
Törjningar



Förstärkning

Kallkällan - 1998

Periodisk långtidsmätning



Förstärkning

Kallkällan - 1998

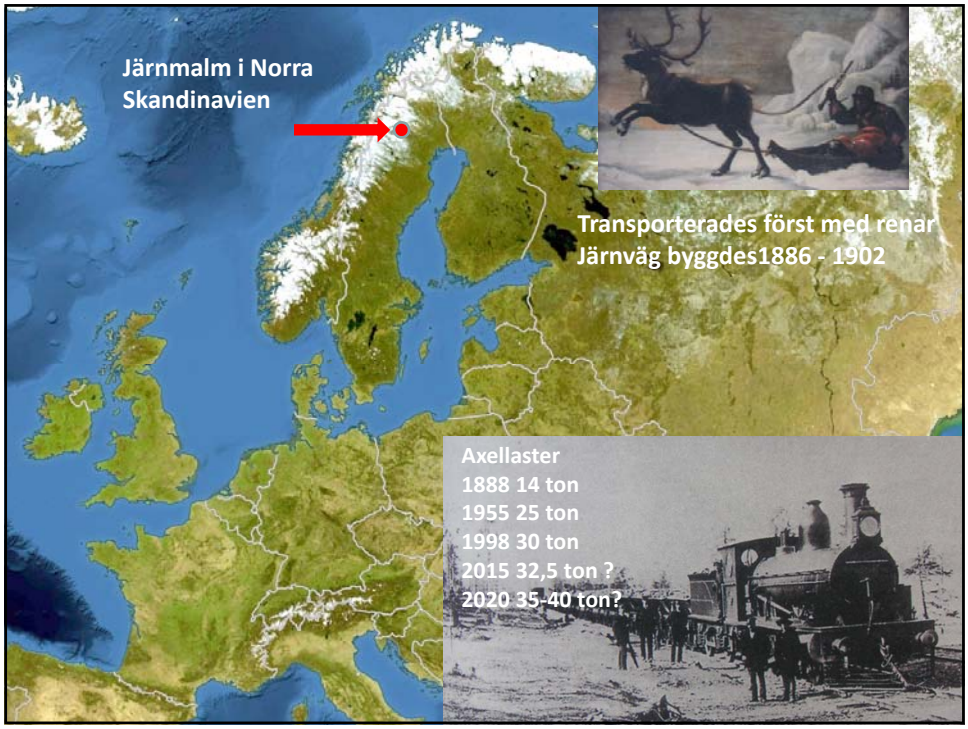
Vad lärde vi oss?

- Icke förstörande provning, provat i SLS
- En detaljerad mätplan ställdes samman
- Ingen tillståndsbedömning – endast verifiering av förstärkning
- Målet med projektet uppnåddes
- Dimensioneringen av förstärkningen stämde väl med mätningen

Fältprovningar

- Komplext
- Kostsamt
- Tvärdisciplinärt
- Måste veta vad man är ute efter
- Omfattande mängd data att bearbeta
- Randvillkor
- Geometrier
- Material
- Mätteknik, sensorer, sampling etc.
- Modellering
- Värdefullt för verifiering
- ”Proof-Loading” - bruksgränstillstånd
- Provning till brott - brottgränstillstånd
- Kunskapsuppbyggnad
- Varje anläggning är unik

LULEÅ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

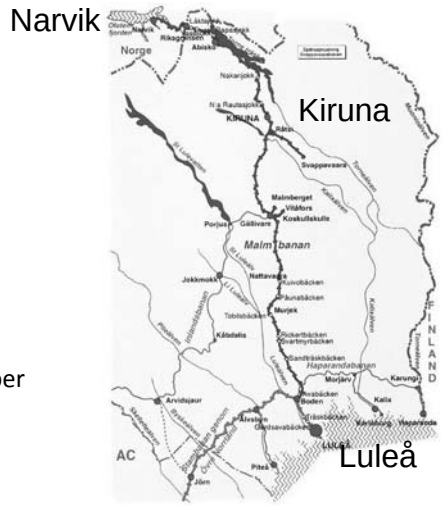


Fältprovningar

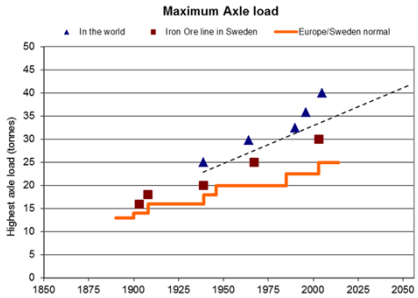
Malmbanan
- Mer än 100 år gammal
- Längd ca 500 km
- Fler än100 broar

För ökad konkurrenskraft, LKAB behöver transportera mer malm per vagn.

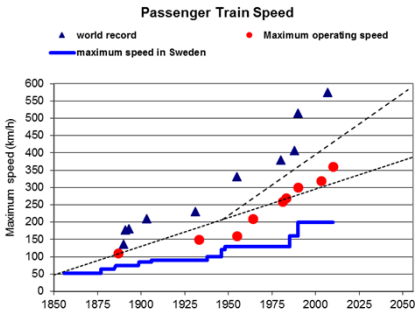
→ Öka axellasten



Fältprovningar



Axellaster och hastigheter – en internationell jämförelse

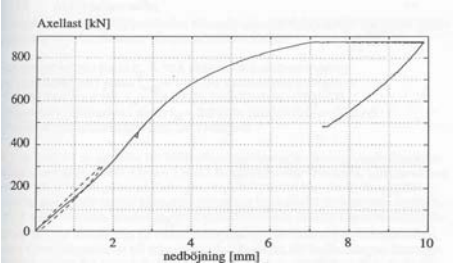


Björn Paulsson et al (2015):
Upgrading of Infrastructure
EU 7FP, Capacity for Rail, C4R. Based on Fröidh-Nelldal, KTH

LULEÅ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Fältprovningar

Lautajokk bron
Vi provade, 1996, en 20 år gammal bro. Försöket visade att vi inte hade några problem med utmattning i skjuvning.



LULEÅ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Fältprovningar

Fältprovningar

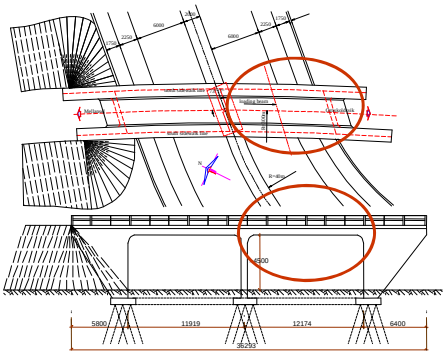
Örnsköldsviksbron - 2006

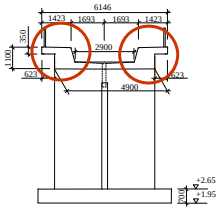
- Trågbro i armerad betong – byggd 1955
- Skulle rivas med anledning av den nybyggda Botnia banan
- Primärt var vi intresserade av tvärkraftskapaciteten
- Böjbrott innan tvärkraftsbrott – behövdes förstärkning
- Förstärkning med CFRP NSM i underkant av balkar
- Provning före och efter förstärkning
- Belastning (drag) genom stållinor förankrade i berggrunden

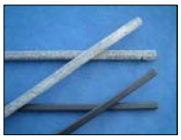
Fältprovningar

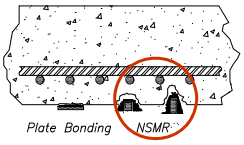
Örnsköldsviksbron - 2006

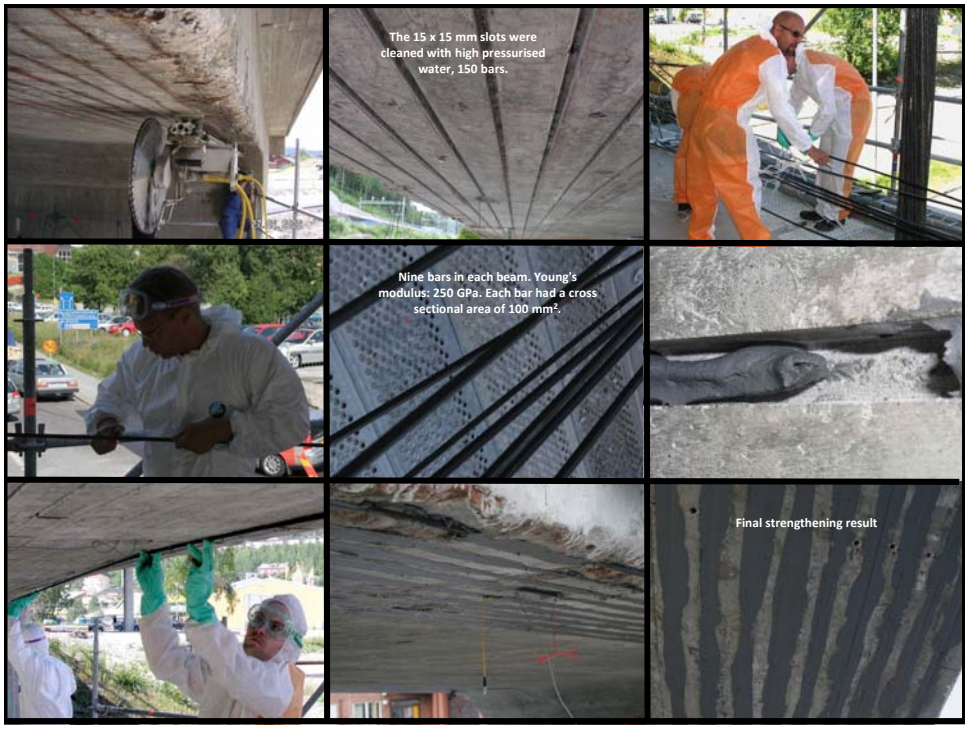
Förstärkning med NSM







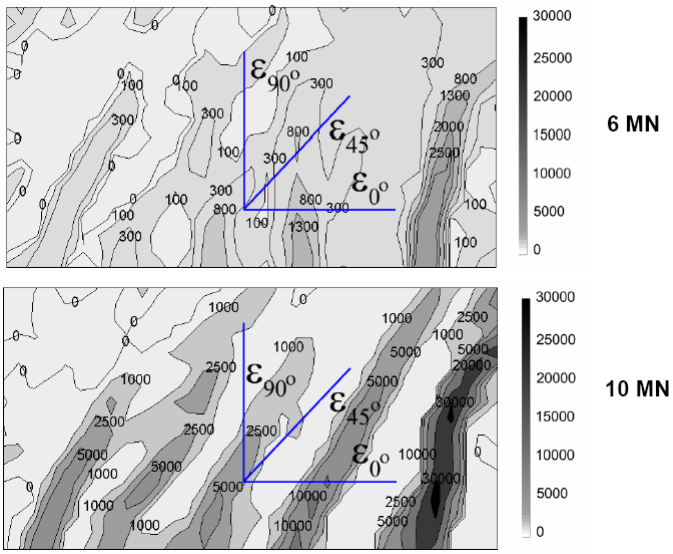



The 15 x 15 mm slots were cleaned with high pressurised water, 150 bars.
Nine bars in each beam. Young's modulus: 250 GPa. Each bar had a cross sectional area of 100 mm².
Final strengthening result

Final test - July 6, 2006
Shear Failure
Photographic Strain Measurement
11 07 2006

Fältprovningar

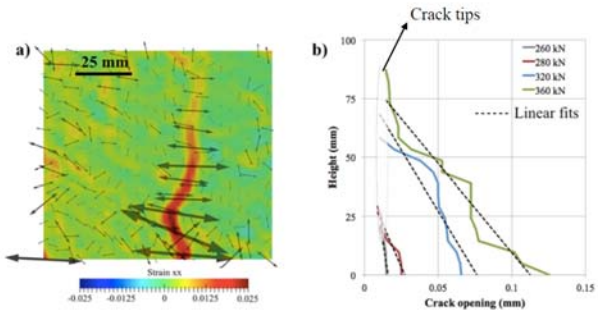
Photographic Strain Measurements



Fältprovningar

Photographic Strain Measurements

Direct information that can be extracted from DIC measurements: **crack depth**

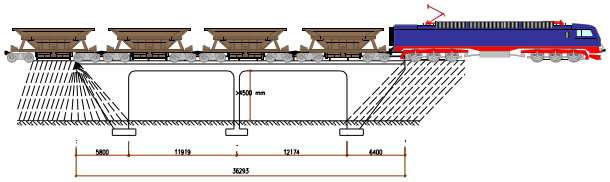


Contactless safety evaluation of damaged structures through energetic criteria. Luis Saucedo-Mora et al.

Fältprovningar
Örnsköldsviksbron - 2006

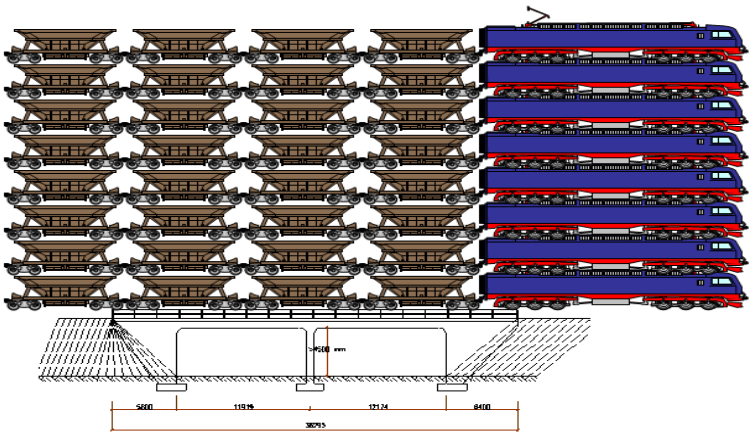
- Brottlasten på 1170 ton motsvarar 1170 ton / 25 ton ≈ 47 axlar
- Spannet på 12 m har endast plats för 4 axlar
- 47 axlar/4=11,7 vagnar ovanpå varandra

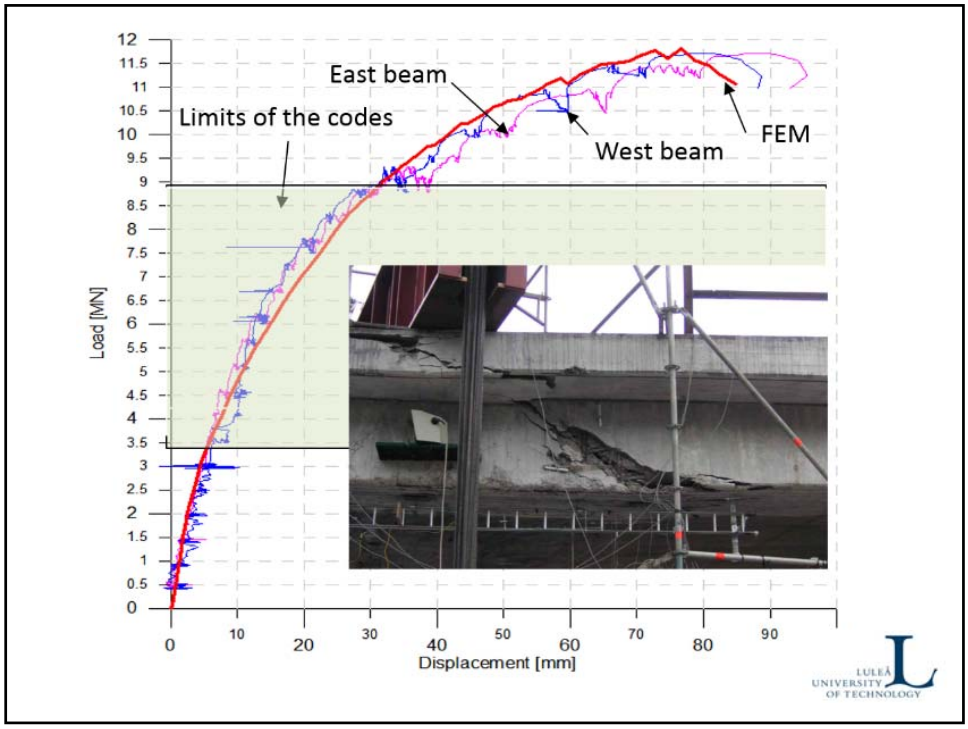
- Förstärkningen gav ca 25% ökad kapacitet, så utan förstärkning hade vi en kapacitet av ca 34/4 = 8,5 vagnar



Fältprovningar
Örnsköldsviksbron - 2006

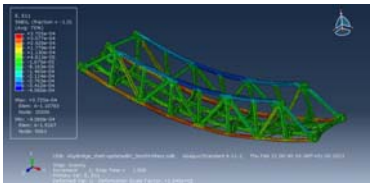
”Lite mer än dimensionerande last”



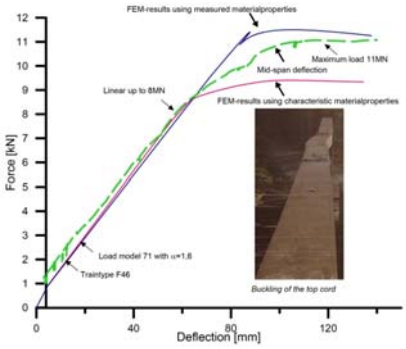

East beam
Limits of the codes
West beam
FEM
Load [MN]
Displacement [mm]
LULEÅ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

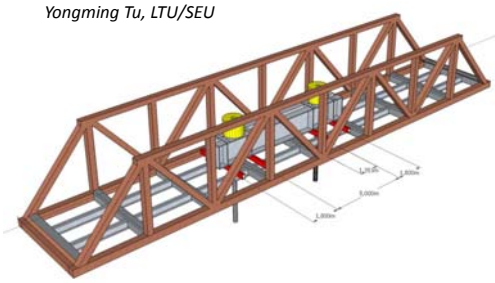
y Älv
km W Piteå
94, truss 1957

Fältprovningar



Global view of the E11 strain of deformed Åby Bridge under 250 kN axle load (including self-weight)
Yongming Tu, LTU/SEU





Fältprovningar

Four examples of monitoring of composite bridges

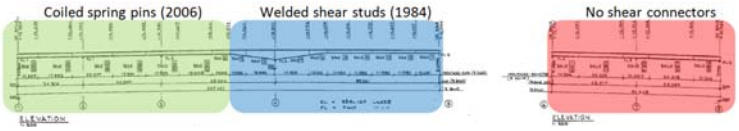
European R&D Project	Bridge	Bridge type	Year	Purpose/Focus
INTAB	Leduån	Integral composite bridge	2007-2008	Short+long term monitoring for steel piles and girders
BRIFAG	Vårby	Composite bridge	2009	Stresses from exc. traffic
ELEM	Rokån	Element bridge with dry joints	2011	Composite action, load distribution between I-girders
ProLife	Pitsund	Bridge from 1985, composite action, from 2006	2016	Composite action, slip steel-concrete

Fältprovningar

In-situ measurement and evaluation of the Pitsund-bridge

Pitsund-bridge

- constructed 1984
- steel-concrete bridge, mainly without composite action
- 7 span (one moveable span)



- 1200 coiled spring connectors were installed year 2006
  ⇒ in order to create composite-action

LULEÅ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

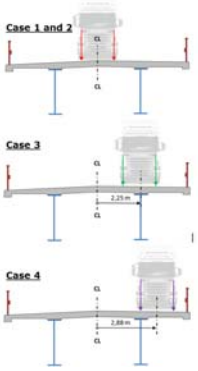
Fältprovningar

In-situ measurement and evaluation of the Pitsund-bridge

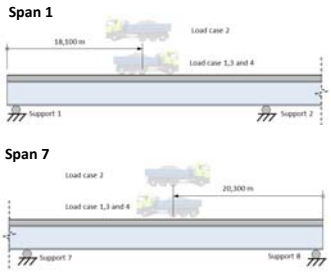
Load positions

- 4 load cases on each of the spans that were measured

Transversal positions



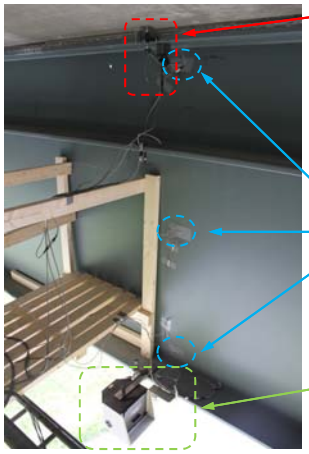
Longitudinal positions



LULEÅ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Fältprovningar

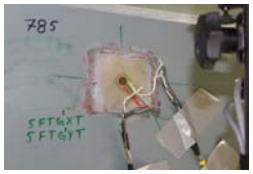
Test set-up



2 LVDT:s

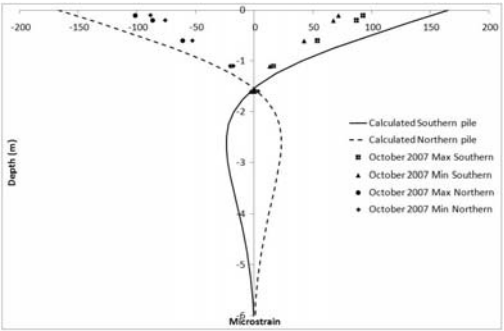
3 strain gauges

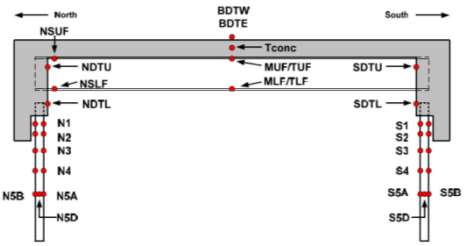
2 deflection measurement systems
- wire strain gauges
- laser (Noptel-system)



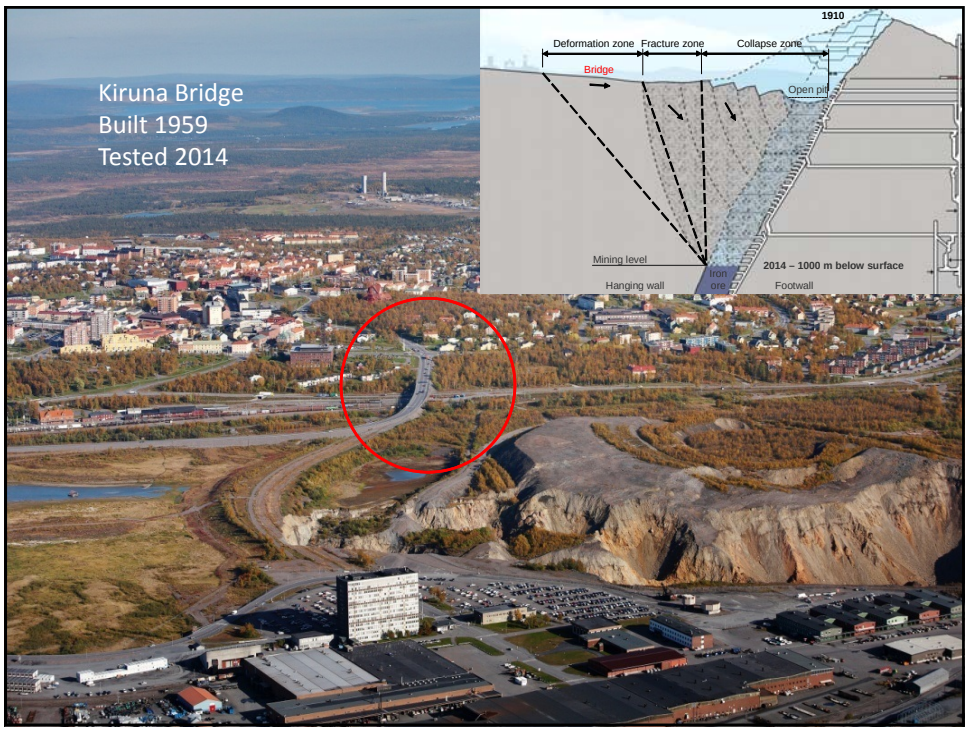
LULEÅ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Fältprovningar

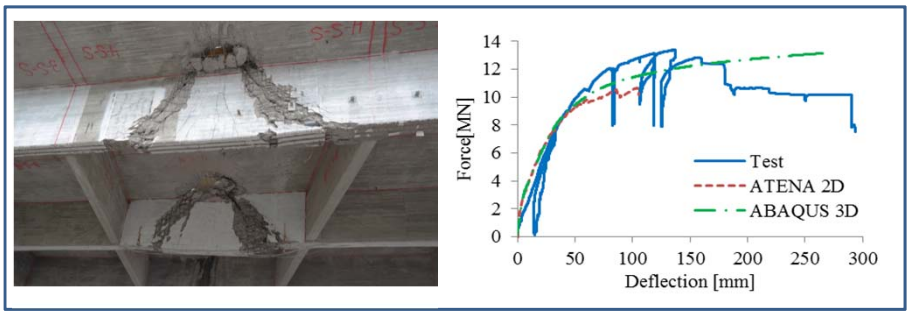




LULEÅ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

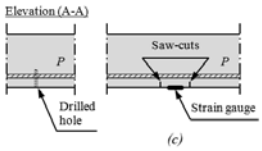


Fältprovningar



Tvärkraft och stansning

Fältprovningar



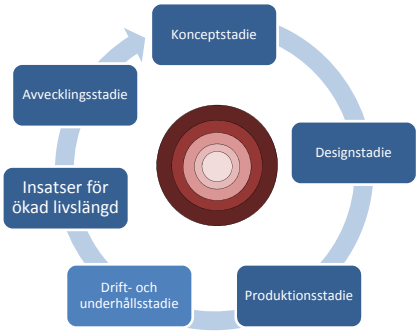
Provning av spännkraft i fält – icke förstörande prov.
Niklas Bagge. Dr. avhandling 2017-06-08.

Sammanfattning

- Kontinuerligt ökad behov av underhåll
- Ökat fokus på vad som behöver göras - prioriteringar
- Övervakning mätning kompletterar manuella undersökningar. Ger input till analyser. Kalibrering
- Lägre tidsspann mellan undersökningar
- Fältförsök är värdefullt
  - Stegvis ökning av kunskap
  - Oftast betydlig högre bärförmåga än beräknat
  - Randvillkor
  - Nödvändigt för att kalibrera modeller samt öka förståelse
- Insamling av stora mängder data (Big Data) är en utmaning – överföring till information – förståelse - automatisering
- Ökade teoretiska angreppssätt – sannolikhetsbaserade undersökningar, FE-beräkningar
- Optimalt underhåll. Samordna underhållsinsatser över olika discipliner

Framtida förvaltning

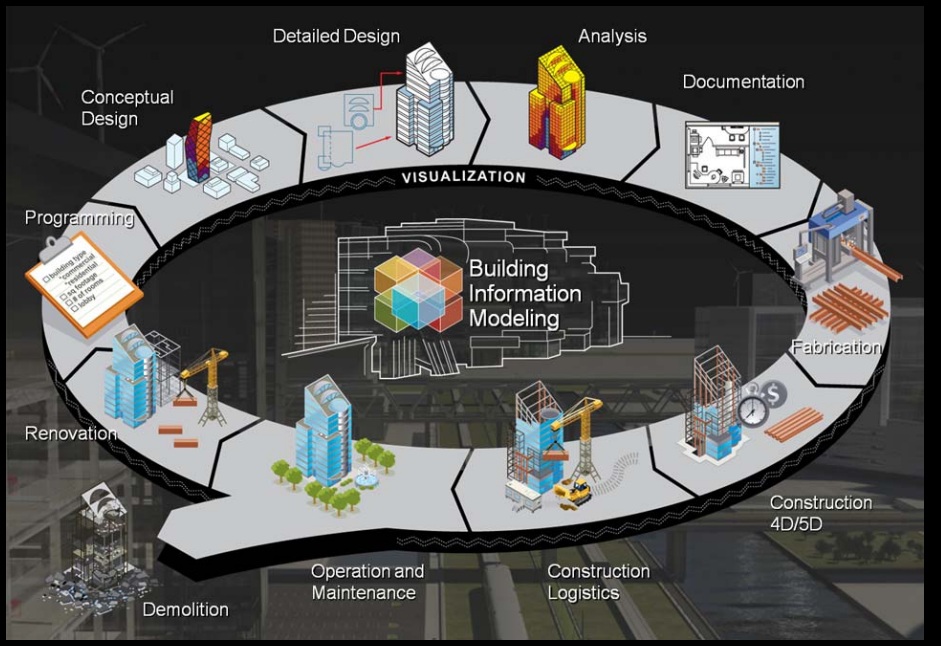
Totalt projektfokus
Digital modell



Framtida byggnadsprocess

- Många partners
- Fokus på att optimera resultatet i projektet
- En kontaktyta i projektet (project interface)
- Tydliga ansvar
- Stor vilja att samarbeta
- Tydlig och förbättrad dokumentation
- Lättare att följa förändringar över tid om systemen uppdateras
- Behöver en systemadministratör för projektet
- Behöver längre administrationstid

Drift och underhållsstadie

- Förbättrad historik och dokumentation
- Insatser kan baseras på existerande digital modell
- Kalibrering från verklig data
- Förbättrade beslutsunderlag
- Enklare att se till totalkostnaden för anläggningen

Beständighet
Miljöpåverkan
Förlängning av livslängd – driftskede