

Robustare brobanepplatta

State-of-the-art och förslag till FUD program

Preliminär rapport utarbetad av konstruktionsgruppen inom Sveriges Bygguniversitet på uppdrag av Trafikverket.

Håkan Sundquist, redaktör



TRITA-BKN. Report 140,
Structural Engineering &
Bridges, KTH, 2011
ISSN 1103-4289
ISRN KTH/BKN/R -- 140 –
SE
<http://www.byv.kth.se/>



CHALMERS

Department of Civil and Environ-
mental Engineering
Division of Structural
Engineering
Report 2011:13, ISSN 1652-
9162
<http://www.chalmers.se/cee/EN/>



ISBN 978-91-7439-307-1
Div. of Structural
Engineering
Luleå University of
Technology
SE-971 87 Luleå, Sweden
<http://www.ltu.se/shb>

Förord

Föreliggande rapport har utarbetats av en delgrupp inom samverkansorganisationen Sveriges Bygguniversitet – konstruktionsgruppen. Följande forskare har varit huvudansvariga för de olika avsnitten:

Kapitel 1. Håkan Sundquist

Kapitel 2. Håkan Sundquist

Medförfattare: Mario Plos, Kent Gylltoft

Kapitel 3. Ylva Edwards

Kapitel 4. Johan Silfwerbrand, Mats Emborg,

Medförfattare: Jonas Carlswärd, Mario Plos, Kent Gylltoft

Kapitel 5. Håkan Sundquist

Professor Mats Emborg har varit projektledare och Håkan Sundquist har varit redaktör för rapporten.

Luleå i augusti 2011

Mats Emborg

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och avgränsningar	1
1.3 Brobaneplatta definition	2
2. Betongplattan som konstruktionselement	9
2.1 Allmänt	9
2.2 Lokal lastfördelning i en brobaneplatta	9
2.3 Lastspridning i betongplattan	11
2.4 Kantbalkar	12
2.4.1 Allmänt	12
2.4.2 Integrerad kantbalk	15
2.4.3 Brokappa.....	20
2.4.4 Lastspridning och bärförmåga med hänsyn till olinjär respons hos kantbalkar	21
2.4.5 Nedbrytning av kantbalkar	23
2.4.6 Åtgärder för ökad livslängd för kantbalkar	24
2.5 Räcke och räckesinfästning	26
2.5.1 Inledning.....	26
2.5.2 Olika system	26
2.6 Övergångskonstruktioner	28
2.6.1 Vanliga typer av övergångskonstruktioner.....	28
2.6.2 Underhållsproblem	30
2.6.3 Broar utan övergångskonstruktioner	31
2.7 Förslag till forsknings- och utvecklingsprojekt.....	33
3. Tätskikt och beläggning	37
3.1 Inledning.....	37
3.2 Varför tätskikt?	37
3.3 Olika typer av tätskikt/tätskiktssystem.....	38
3.3.1 Tätskiktsmatta.....	38
3.3.2 Asfaltmastix.....	39
3.3.3 Flytapplicerade material av härdplasttyp.....	39
3.4 System (tätskikt och beläggning)	42
3.4.1 Gjutasfalt	43
3.5 Problem och möjligheter	45
3.5.1 Blåsbildning.....	45
3.5.2 Behandling av underlag.....	46
3.5.3 För- och nackdelar med olika system.....	48
3.5.4 Asfaltmastix.....	50

3.5.5	Nedbrytning och livslängd	53
3.6	Regelverk.....	56
3.6.1	Sverige.....	56
3.6.2	Andra europeiska länder.....	59
3.7	Kanada och USA	65
3.8	Forsknings- och utvecklingsarbete	66
3.9	Standarder och specifikationer	67
3.9.1	ETAG 033	68
3.10	Förslag till FoU.....	68
3.10.1	Blåsbildning.....	68
3.10.2	Uppföljning av befintliga tätskiktssystem	69
3.10.3	Val av sprutapplicerade system	69
3.10.4	Inverkan av betongkvalitet på tätskiktets funktion över tiden.....	70
3.10.5	Metodik för provning av spricköverbryggande förmåga.....	70
3.10.6	Värmebeständighet hos asfaltmastix	70
3.10.7	Underlag för jämförande LCC analyser	70
3.11	Slutsatser och rekommendationer.....	72
4.	Systemet brobaneplatta utan tätskikt.....	73
4.1	Översikt	73
4.1.1	Historik, allmänt	73
4.1.2	Inventering med data enligt BaTMan.....	73
4.1.3	Uppföljning broar med direktgjuten slitbetong.....	77
4.1.4	Intressanta frågeställningar vid djupinventering för varje bro separat.....	79
4.2	Kravspecifikation och funktion	79
4.2.1	Allmänt	79
4.2.2	Betongfarbana i slitbetong.....	79
4.2.3	För- och nackdelar med slitbetong utan tätskikt.....	80
4.2.4	Spårbildning	81
4.3	Dimensioneringsfilosofi	81
4.3.1	Tjocklek	81
4.3.2	Betongmatris.....	81
4.3.3	Konventionell armering.....	82
4.3.4	Stålfiberinnehåll	83
4.3.5	Residualhållfasthetsfaktor	83
4.3.6	Alternativa fibrer	83
4.4	Utformning	84
4.5	Utförande.....	85
4.5.1	Allmänt	85
4.5.2	Kontroll.....	86

4.6	Extremt högpresterande fiberarmerad betong	87
4.7	FoU-behov	89
5.	Ekonomi och LCC-analys för systemet brobaneplatta	91
5.1	Definitioner och principer	91
5.2	LCC-analys.....	92
5.2.1	Nytta av en konstruktion	92
5.3	LCC-modeller som inkluderar trafikantkostnader.....	101
5.4	Mer kompletta LCC modeller.....	102
5.5	Hur kan LCC analyser användas för systemet brobaneplatta.....	102
5.5.1	LCC jämförelser för olika tekniska lösningar av systemet brobaneplatta.....	103
5.5.2	Planering av reparationsmetoder för en population av likartade tekniska lösningar	105
5.6	Förslag till forskning	106
6.	Sammanfattning och prioriterade forskningsprojekt.....	109
6.1	Kompilering av inkomna förslag.....	109
6.2	Preliminär prioritering	110
7.	Referenser och Litteratur	113
7.1	Allmänt	113
7.2	Betongplattan som konstruktionselement.....	113
7.3	Tätskikt och beläggning	115
7.4	Systemet brobaneplatta utan tätskikt	119
7.5	Livscykelkostnadsanalyser	122

Robustare brobaneplatta

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Inom den virtuella organisationen Sveriges Bygguniversitet (SBU) har forsknings- och undervisningssamarbete börjat organiseras. Undergruppen Byggkonstruktion med avdelningarna Konstruktionsteknik LTH och Chalmers, Byggkonstruktion LTU, Bro och Stålbyggnad KTH samt Betongbyggnad KTH har kommit långt i det praktiska arbetet med ökad samordning och gemensamma forskningsprogram har börjat formuleras.

Dessutom sker nära samarbete med övriga konstellationer inom och utanför Sveriges Bygguniversitet t.ex. pågår redan samarbete med LTH, Byggmaterial, LTU, Byggproduktion och CBI Betonginstitutet eftersom varken materialfrågor eller utförande frågor kan utelämnas.

Med anledning av Trafikverkets ökade ambitioner att öka hållbarheten hos brobaneplattor och att minska koldioxidutsläpp generellt är det av intresse att undersöka hur man med gemensamma satsningar inom grupperna ovan kan bidra till att fullfölja ambitionerna. Varje år går det åt mycket stora resurser till drift, underhåll och reparationer av brofarbanor eftersom vissa för trafik-, väder och annan miljöpåverkan särskilt utsatta konstruktionselement inte har tillräckligt god beständighet. Detta gäller inte minst brobaneplattan och anslutande element, såsom kantbalkar, räcken, övergångskonstruktioner, tätskikt, beläggning m.m. Dessa problem förorsakar därmed höga livscykelkostnader (LCC).

Syftet med projektet är att i två steg – en förstudie och en slutrapport – ta fram rätt kombinationer av materialtekniska och konstruktionstekniska lösningar samt rätt utförandeteknik för slitlager och övriga delar ingående i betongfarbanan. Detta innebär bland annat att klargöra de laster och den kravspecifikation som finns, att utveckla materialtekniska prestanda för t.ex. högpresterande betongkvaliteter, att klargöra vidhäftning mellan ny och gammal konstruktionsbetong, att studera sprickfördelningseffekter av armering samt förhållanden vid anslutning slitbana-kantbalk och andra detaljer.

Förhoppningen är därmed att resurser för drift, underhåll och reparation ska kunna minskas vilket bör leda till lägre LCC-kostnader till förmån för samhället.

1.2 Syfte och avgränsningar

Initialt behandlas de primära frågeställningarna som gäller för brobaneplatta och tillhörande delar. Från Trafikverket har erhållits dokumentation av funktionskrav utgörande bas för formulering av forskningsfrågor. Trafikverket har betonat denna probleminventeringsfas.

Det har framförts att det är viktigt att projektet studerar brobaneplattans helhetsfunktion, d.v.s. ett holistiskt betraktelsesätt är önskvärt, men det har också framförts att helheten är svår att få ihop om man inte har information om detaljerna. Forskningsfrågor kan därför enklare definieras för varje del av brobaneplattan, exempelvis

- hur kantbalken samverkar med plattan,
- vilka fenomen orsakar problemen med tätskikten och
- vilka primära svårigheter det finns vid utförande av den direktgjutna/pågjutna slitbetongen?

Många frågor kan bli mycket omfattande. T.ex. är frågan om hur man ska dokumentera tät-skiktets skick genom oförstörande provning ett område som penetrerats i flera tiotals år utan att någon lösning har påvisats.

Vidare är kantbalkens funktion ofta omdiskuterad. Ska den medverka i bärligheten eller är en optimal lösning att dess lastbärande funktion är noll eller mycket liten så att enklare, utbytbara konstruktioner kan utformas? Det är t.ex. fullt möjligt att konstruera broar utan kantbalkar, d.v.s. med s.k. brokappor för räckesinfästning vilket har visats i Trafikverkets egna undersökningar.

Projektet utformas som en tvåstegsaktivitet där en förstudie genomförs under vinterhalvåret 2010/11 vilken tjäna som underlag för fortsatta utförligare studier. Start av huvudprojekt beräknas kunna ske 2011.

Förstudien fokuserar på själva betongplattan, skyddet för denna (tätskikt) och kantbalk. Dessutom ingår i studien montageanordningar för räcken, avvattningsystem och övergångskonstruktion men detaljutformningar av dessa anordningar berörs inte primärt.

1.3 Brobaneplatta definition

Med brobaneplatta, inklusive dess olika delar, avses det system som säkert och med god komfort för trafiken för över laster från trafiken, huvudsakligen i brons tvärläng, till de strukturer som i sin tur överför trafiklasterna till den övriga broöverbyggnaden. **Figur 1.1** visar en klassisk utformning av en bro. För broar med mindre spännvidder som t.ex. platt- och platt-rambroar kan plattan i sig utgöra det konstruktionselement som för över lasterna såväl i brons tvär- som i dess längdled.

De konstruktions- och andra element som ingår i hela systemet ”brobaneplattan” är vad som behövs för att åstadkomma en säker och för trafiken komfortabel brobana som trafiken färdas på inklusive tillhörande delar såsom

- konstruktionselement, se Kapitel 2,
- räcke,
- eventuell kantbalk,
- eventuella övergångskonstruktioner,
- eventuella skydd för betongplattan d.v.s. beläggning och tätskikt,
- eventuella avvattningsystem m.m.

Nedan följer en kort sammanställning över beteckningar och de viktigaste funktionskraven för de viktigaste delarna i systemet brobaneplatta:

Brobana är en tänkt yta som skiljer trafiken från systemet brobaneplatta. Sett ur ett totalperspektiv ska denna yta vara

- säker,
- utformad på ett sådant sätt att vattenavrinnig från bron kan ske på ett för trafiken säkert sätt,

- ha minst samma jämnhet som anslutande väg samt
- ha sådan beständighet att brobanan inte behöver stängas av mer ofta än att livscykelkostnaden inkl. användarkostnaden blir optimal.

Strukturen brobaneplatta inkl. kantbalk i de fall då kantbalken utgör en integrerad strukturell del av brobaneplattan har som uppgift att kunna fördela krafter från trafiken till huvudbärssystemet eller i de fall det handlar om s.k. platt- eller plattrambroar kunna föra över krafter från trafiken till landfästen eller grundläggning.

För elementet kantbalk i de fall då denna är en separat konstruktionsdel utan avsedd statisk samverkan med brobaneplattan gäller ett antal funktionskrav som är de samma som för integrerade kantbalkar utom kravet på att vara en del av lastfördelningen. Dessa funktionskrav kan för båda fallen sammanfattas till att

- vara infästning för räcke,
- vara stöd för beläggning samt att
- förhindra att vatten rinner av bron.

Räckets funktion är att på ett trafiksäkert sätt

- förhindra avkörning av tunga fordon,
- förmå personbilar att återgå till sin plats på brobanan samt att
- förhindra att cyklister och fotgängare faller av bron

Vad som menas med trafiksäkert sätt framgår av SS-EN 1317 och tilläggskraven i TK Bro.

Räcket har ibland tilläggsfunktioner som bland annat innebär att de ska förses med hopp-skydd, skyddsnet och skyddstak över järnväg samt t.ex. bullerskärmar.

Beläggning och tätskikt används normalt i Sverige för att skydda brobaneplattan. I de fall skydd behövs, är dess funktion främst att

- vara vattentät och
- kunna brygga över eventuella sprickor

Vidare måste beläggning och tätskikt kunna motstå påkänningar från trafiken utan att deformeras så att brobanan i sin tur inte deformeras och att de krav som finns på denna innehålls.

Systemet beläggning och tätskikt byggs normalt upp av ett tätskikt närmast konstruktionsbetongen och en överliggande beläggning. Systemet kan också ersättas med ett eller flera lager s.k. slitbetong.

Den klassiska utformningen av broar, se **Figur 1.1**, innebär att en övergångskonstruktion mellan över- och underbyggnad erfordras. I de fall övergångskonstruktion behövs är dess viktigaste funktion att

- medge nödvändig längd- och vinkelrörelse,
- vara vattentät,
- ha minst samma bärlighet som bron i övrigt har,

- vara utformad så att motorcyklar och cyklar kan framföras på ett trafiksäkert sätt,
- delelement som nöts mer än hela övergångskonstruktionen kan bytas på ett enkelt sätt,
- anslutningen mellan bro och väg är jämn så att trafikanterna har god komfort och
- så att minsta möjliga bulleremissioner uppstår av trafiken.

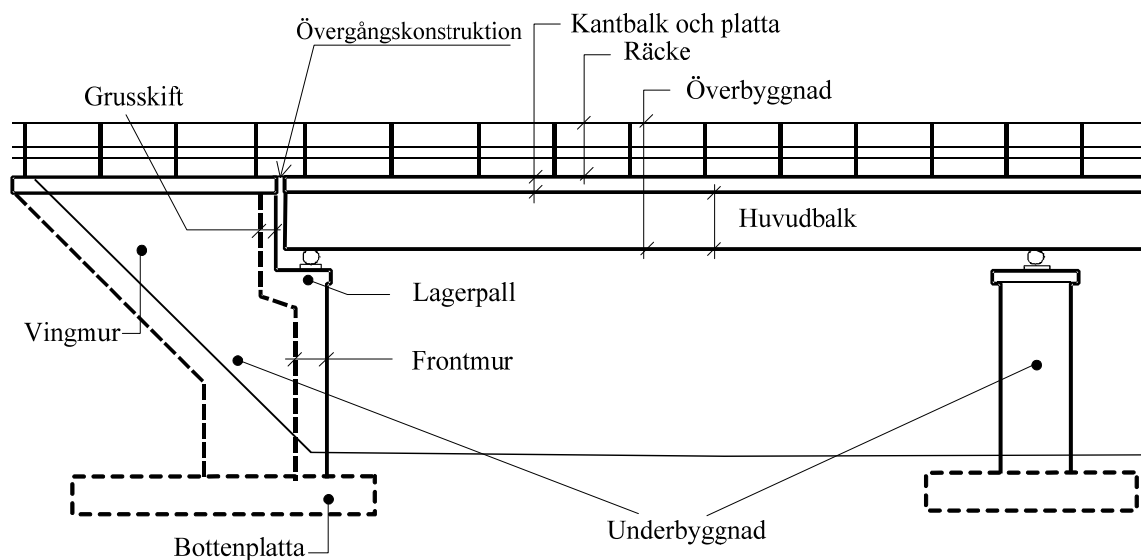
S.k. integrala broar, se **Figur 1.4**, utformas utan övergångskonstruktioner vilket är gynnsamt ur underhållssynpunkt eftersom övergångskonstruktioner ofta kräver mycket underhåll. Nackdelen med integrala broar är de rörelser som uppkommer i anslutningen mellan ändskärm och vägbank, vilket kan leda till sättningar och därmed ojämnheter i väg-/brobanan.

Vatten på brobanan måste avledas ur trafiksäkerhetssynpunkt. Detta åstadkoms med avvattningssystem som dels består av brobanans utformning dels av speciella avvattningsanordningar. Särskilda brunnar måste anordnas och rör genomföringar kan behövas. Anslutningen mellan beläggning och isolering är ofta känsliga detaljer som kan läcka och därmed skapa underhållsbehov. Kraven på avvattningssystemet är att

- avleda vatten från brobanan så att fordon kan framföras på ett trafiksäkert sätt och
- leda vatten från bron till lämplig mottagningsanordning.

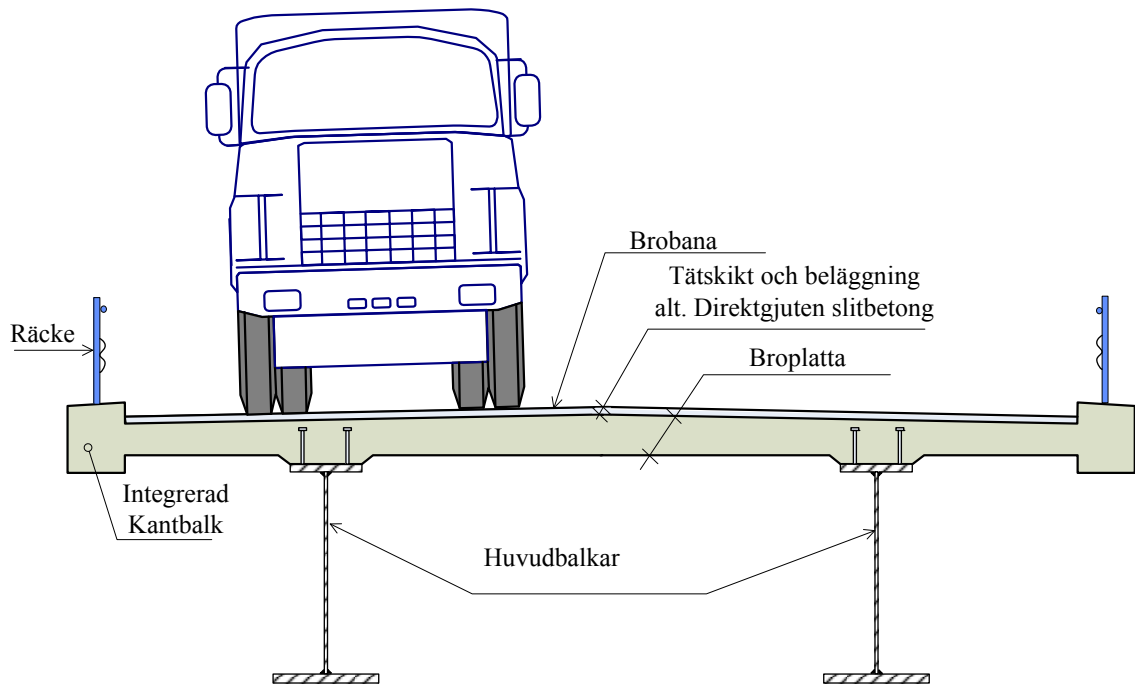
Avledningen bör ske på ett sådant sätt att brokonstruktionen inte skadas, t.ex. genom olämpligt utformade eller byggda genomföringar.

I denna rapport kommer inte övergångskonstruktioner och avvattningssystem att behandlas annat än översiktligt. Endast problem som har koppling till täthet vid isolering kommer kort att diskuteras i kapitel 3, se **Figur 1.5**.

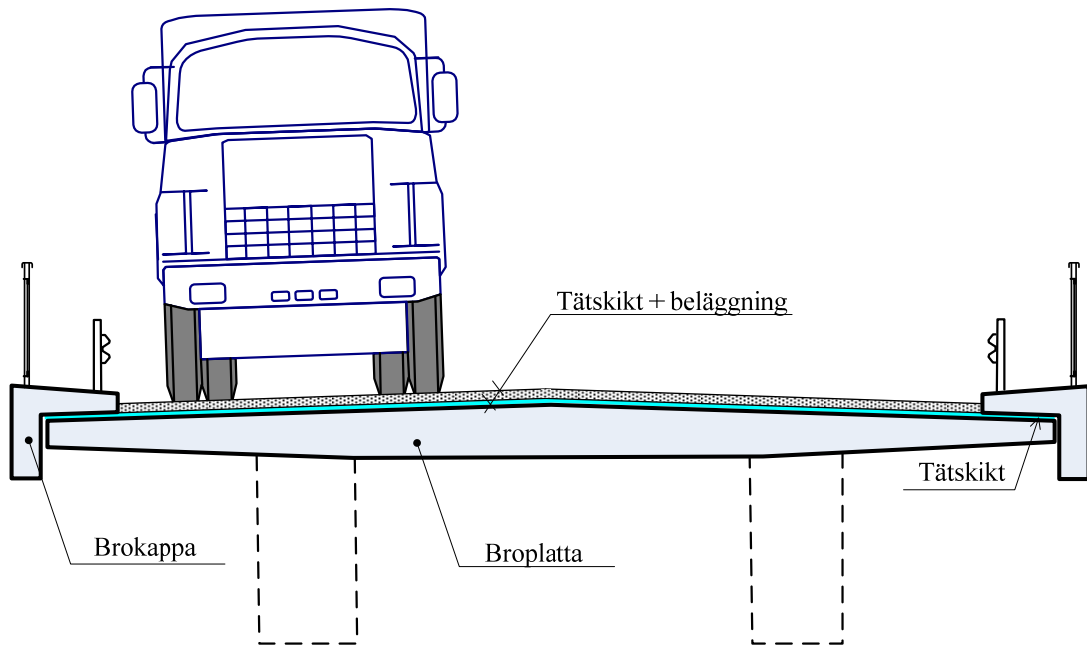


Figur 1.1 *Beteckningar för en bros olika delar vid den klassiska utformningen med lager och övergångskonstruktioner.*

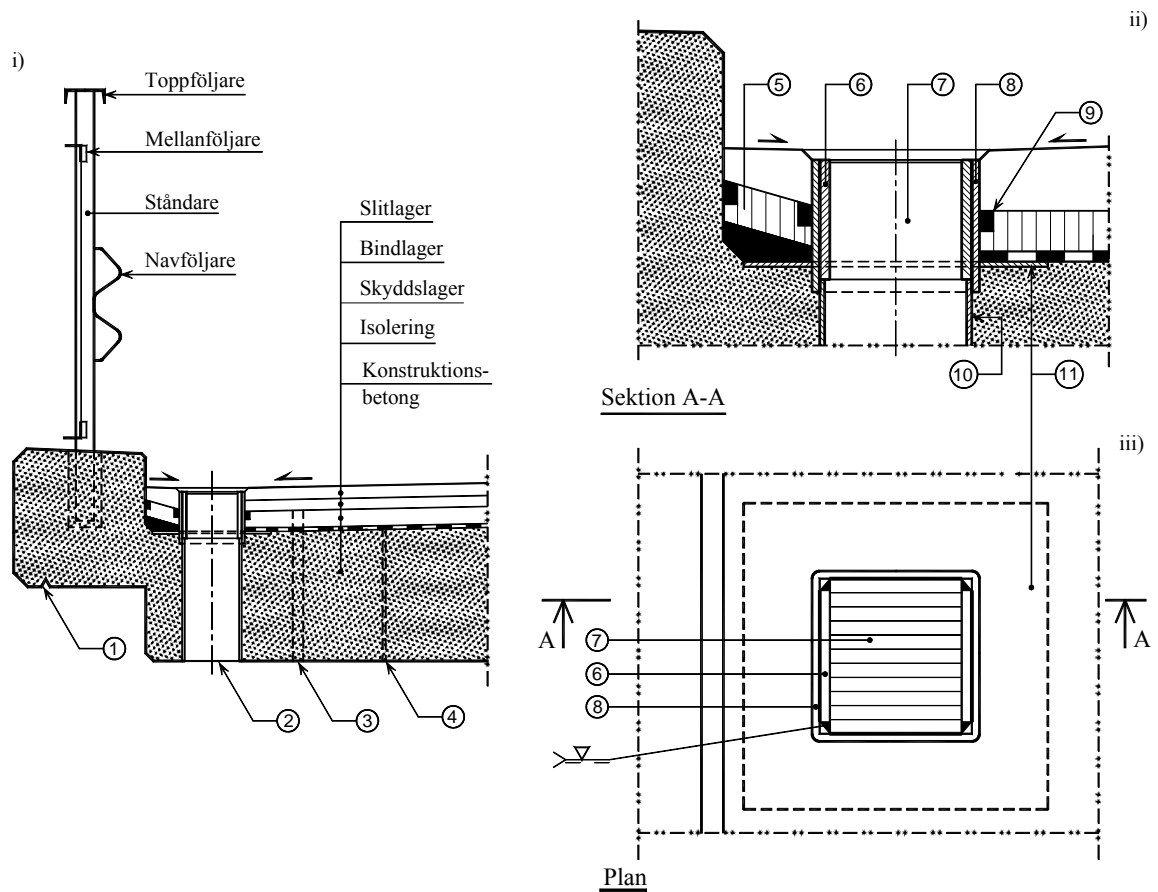
Figur 1.2 visar en s.k. stål- betong samverkansbro i tvärsnitt.



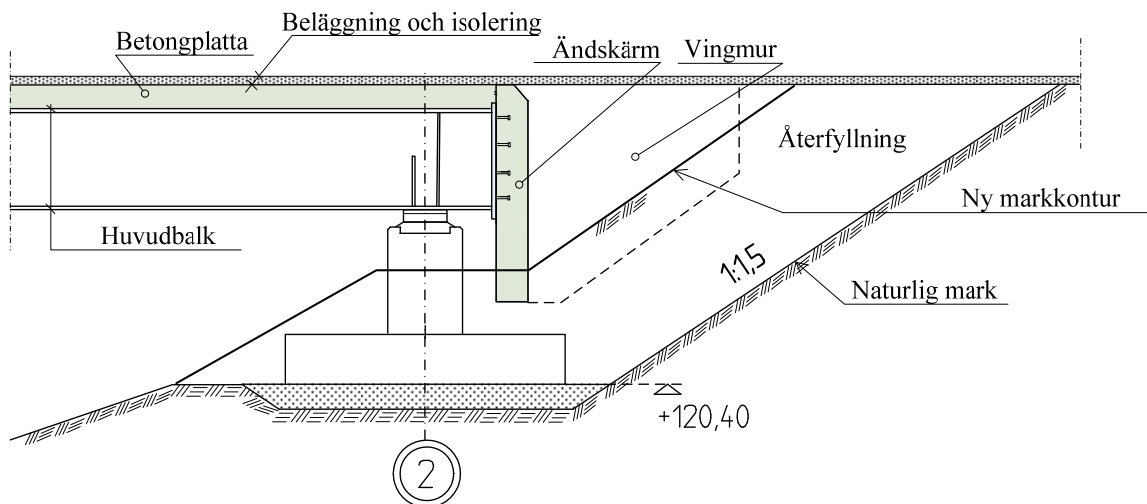
Figur 1.2 Beteckningar för en bros olika delar i tvärsektion exemplifierad med en stål betong samverkansbro.



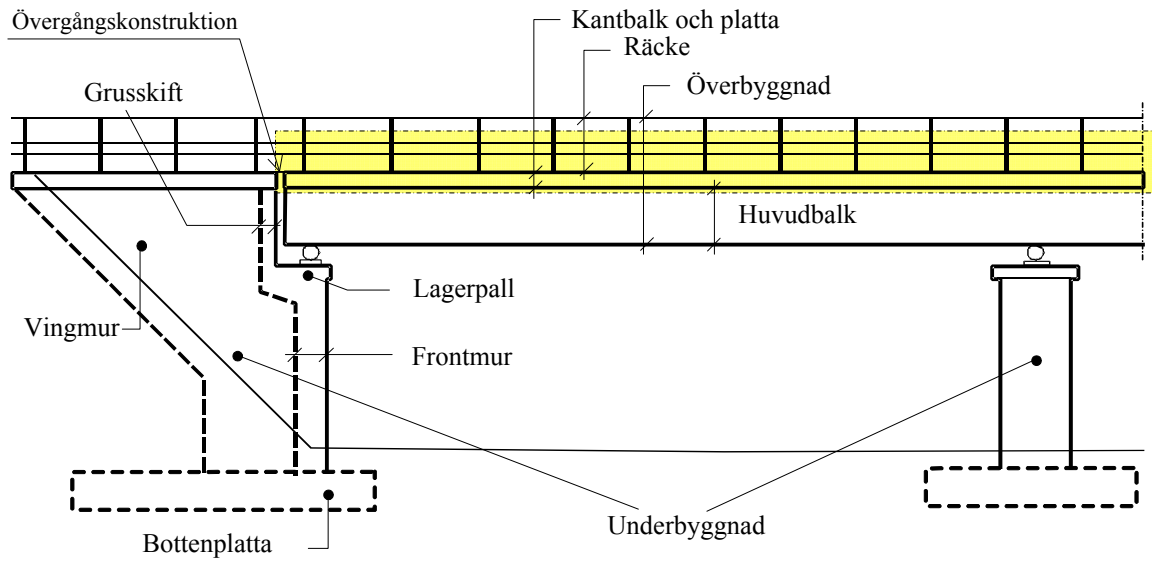
Figur 1.3 Olika delar i en farbaneplatta på betongbalkar med icke integrerade kantbalkar, s.k. brokappor.



Figur 1.4 Exempel på utformning av räcken, beläggning och avvattning. Den beläggning som visas är en typ där vattenisoleringen är skyddad av ett betonglager ⑤ som i sin tur skyddas av asfaltbeläggning. ② Avvattning med löstagbar sil ⑥, ⑦, ④ gasutlopp och ③ dränering. ⑨ och ⑪ visar tätningsanordningar.



Figur 1.5 Detalj av en s.k. integral bro med ändskärm.



Figur 1.6 *Föreliggande utredning behandlar i huvudsak endast brobaneplattan med sina olika delsystem. De särskilda problem som har att göra med övergångskonstruktioner behandlas inte i denna utredning.*

Robustare brobaneplatta

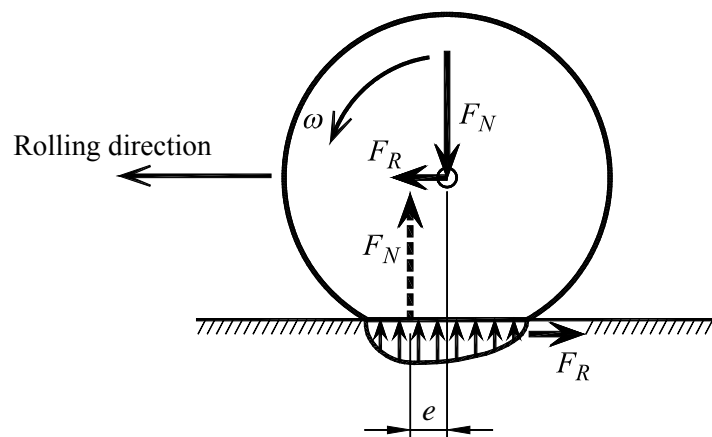
2. Betongplattan som konstruktionselement

2.1 Allmänt

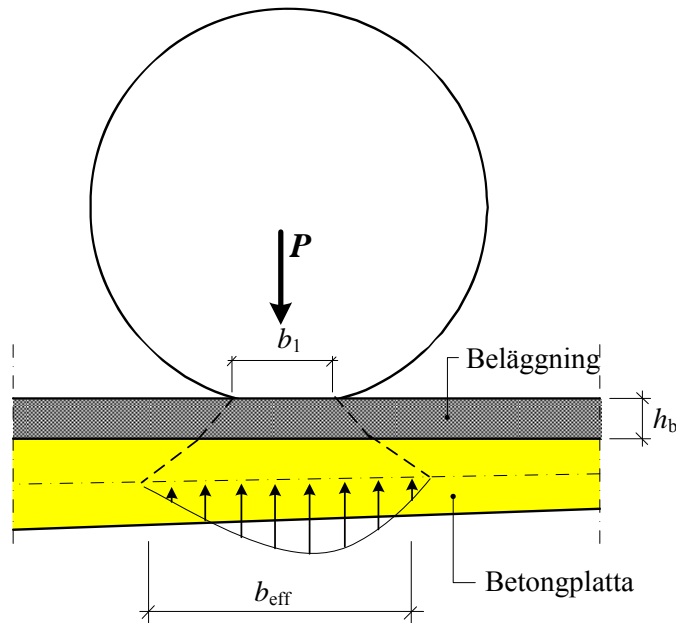
Broplattan har som huvuduppgift att kunna fördela de laster som rör sig på brobanan ner och vidare till de konstruktionselement som för lasterna till system där lasterna kan föras ner till fast grund. Utformning av dessa bärsystem är själva essensen i brokonstruktörens arbete. Det finns naturligtvis en mycket omfattande litteratur om detta. Exempel på sådan litteratur av handbokskaraktär är *Bakht & Jaeger (1985)*, *Cusens & Pama (1975)*, *Hambly (1991)*, *Menn (1990)*, *O'Connor (1971)*, *Schlaich & Scheef (1982)*, *Sundquist, (2007, 2008)*. Som framgår är dessa lite äldre litteratur och skälet är nog att det idag går att lösa många lastfördelningsproblem med moderna FE-metoder. Fördelen med de metoder som presenteras i litteraturen enligt ovan är att de har som syfte att förklara betongplattans verkningssätt vid variation av olika parametrar.

2.2 Lokal lastfördelning i en brobaneplatta

Kontaktytan mellan trafiken och bron ”brobanan” blir hårt belastad av trafiken på bron. Stora såväl vertikala som horisontella krafter uppstår som belastar och nöter ner de översta skikten av brobaneplattan, se **Figur 2.1**. Fördelning av de lokala lasterna sker via eventuell beläggning och med vidare spridning i betongplattan, se **Figur 2.2**.

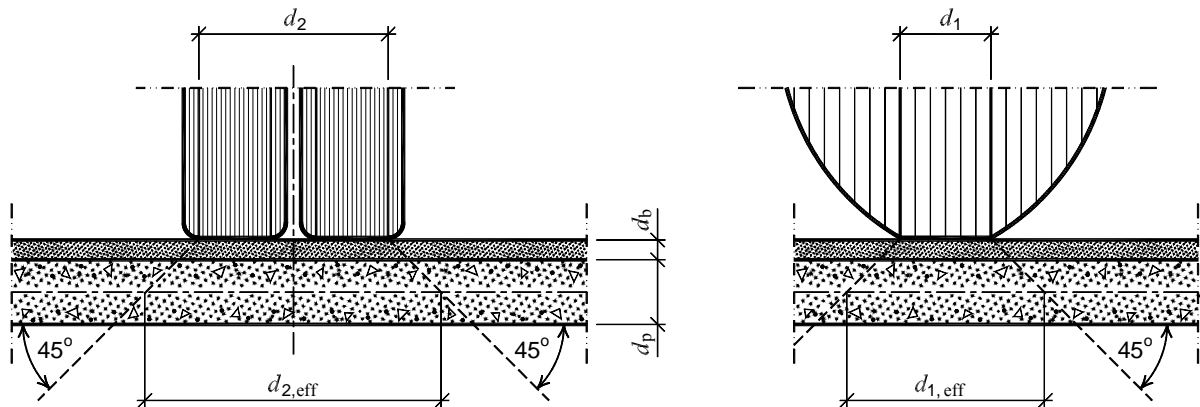


Figur 2.1 Fördelning av laster från hjulen till en tung lastbil beror på ringtryck, däckens styvhet och hjulets rörelse.



Figur 2.2 Under tåghjul och tunga lastbilshjul uppstår stora koncentrerade krafter. Dessa stora koncentrerade krafter fördelas ut via olika konstruktiva element till brons huvudbärsystem och ner till grundläggningen.

Vanligtvis baseras analyser av momentfördelning på enkel s.k. tunn platteori, s.k. Kirchoffs platteori. Det betyder att tvärkrafternas arbete försummas. Detta betyder i sin tur att det också sker en lastfördelning i plattan och vanligtvis räknar man lastspridningen ner till centrum av plattan, se **Figur 2.2** och **Figur 2.3**. En vanlig metod är att förutsätta en lastspridning av 45° enligt **Figur 2.4**.



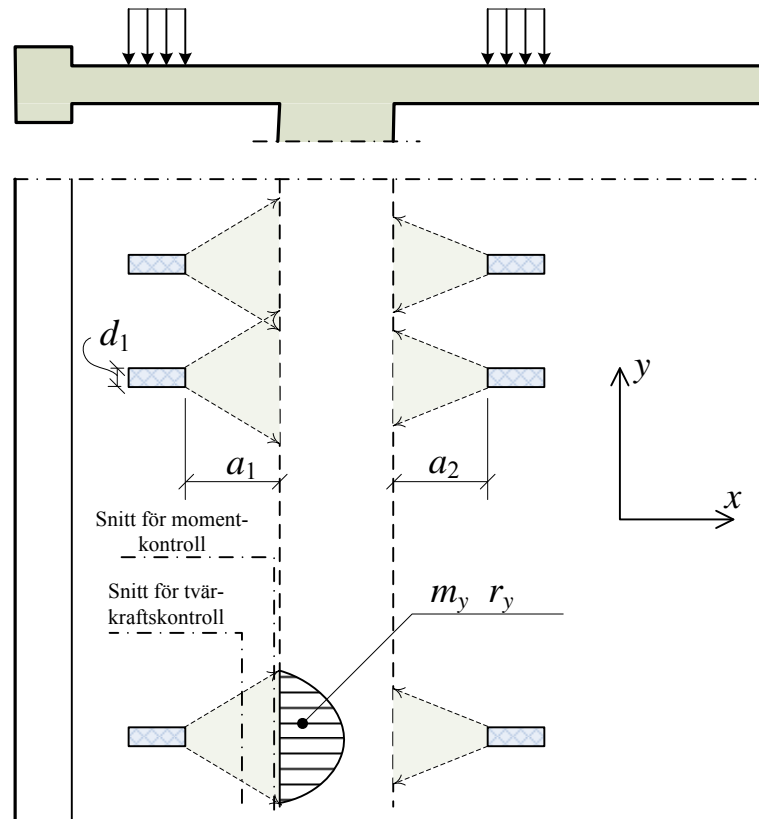
Princip enligt Eurocode: $d_{2,eff} = d_2 + 2h_b + h_p$; $d_{1,eff} = d_1 + 2h_b + h_p$

Figur 2.3 Princip för lastfördelning på en brobaneplatta enligt gängse principer i handböcker. I vissa fall kan det vara motiverat att minska lastspridningen i beläggningen.

Naturligtvis kan en noggrannare analys göras t.ex. enligt Mindlins teori för tjocka plattor. Detta blir analytiskt komplicerat, men kan göras med hjälp av lämpliga FEM verktyg.

2.3 Lastspridning i betongplattan

Figur 2.4 visar principiellt aktuella fall av lastspridning från en eller flera boggis som belastar plattan mellan huvudbalkar och/eller på konsol utanför huvudbalkarna.



Figur 2.4 *Figuren visar principiellt hur koncentrerade laster från en eller flera boggis sprids ut. Hur krafterna sprids ut beror på avstånd, plattans lastfördelande egenskaper. Man bör beakta att moment och tvärkrafter sprids ut på olika sätt.*

Man har normalt att beakta att moment och tvärkrafter sprids ut på olika sätt. Dimensionering för tvärkrafter och moment sker därmed med olika metoder. För tvärkrafter har man särskilt att beakta, att lastspridningen som ju är beroende av avstånden a enligt figuren, påverkar tvärkraftsbärförmågan. Den kombinerade effekten av tvärkraftsspridningen och tvärkraftsbärförmågan behandlas i BBK 04, avsnitt 6.5.4. Den metod som där beskrivs har sitt ursprung i provningar utförda av Anders Losberg och Ove Hedman med en preliminär rapport, *Hedman & Losberg (1976)*, se i övrigt *Hedman & Losberg (1975)*.

Momentspridning kan baseras på mer konventionella metoder, se *Sundquist (2007)* och de referenser som ges där; några av dessa återfinns i Sektion 8.2. Lastspridning och dimensionering av konsolplattan utanför huvudbalkarna, är beroende av den integrerade kantbalkens egenskaper i de fall då det finns en sådan kantbalk, se avsnitt 2.4.2.

2.4 Kantbalkar

2.4.1 Allmänt

I Sverige har kantbalkar utformats på i stort sätt samma sätt under mycket lång tid och för utformningen har det tidigare funnits standardritningar. Även om dessa standardritningar inte formellt gäller så utformas kantbalkarna ändå efter de principer som gavs i standardritningarna. Trots att kantbalkarna hör till de konstruktionselement som kräver mest underhållsinsatser, har den utveckling som gjorts fortfarande inte lett fram till optimala lösningar.

Det finns två grundläggande typer av kantbalkar, nämligen s.k. integrerade kantbalkar där kantbalken förutom andra krav, se nedan, även är en integrerad del av brobaneplattan som i många fall hjälper till för fördelning av lokala laster. Den andra typen av kantbalkar, kommer vi i fortsättningen att kalla brokappor och dessa element är inte statiskt sammangjutna med plattan och deltar därför normalt inte i lastfördelningen, även om lastfördelning skulle kunna åstadkommas och kanske i praktiken även gör detta.

De grundläggande kraven för bägge typer av kantbalk är att

- vara infästning för räcke,
- vara stöd för beläggningen och att
- förhindra att vatten rinner av bron.

Det finns en nära koppling till de krav som finns för räcket vars funktion är att på ett trafik-säkert sätt

- förhindra avkörning av tunga fordon
- förmå personbilar att återgå till sin plats på brobanan samt att
- förhindra att cyklister och fotgängare faller av bron.

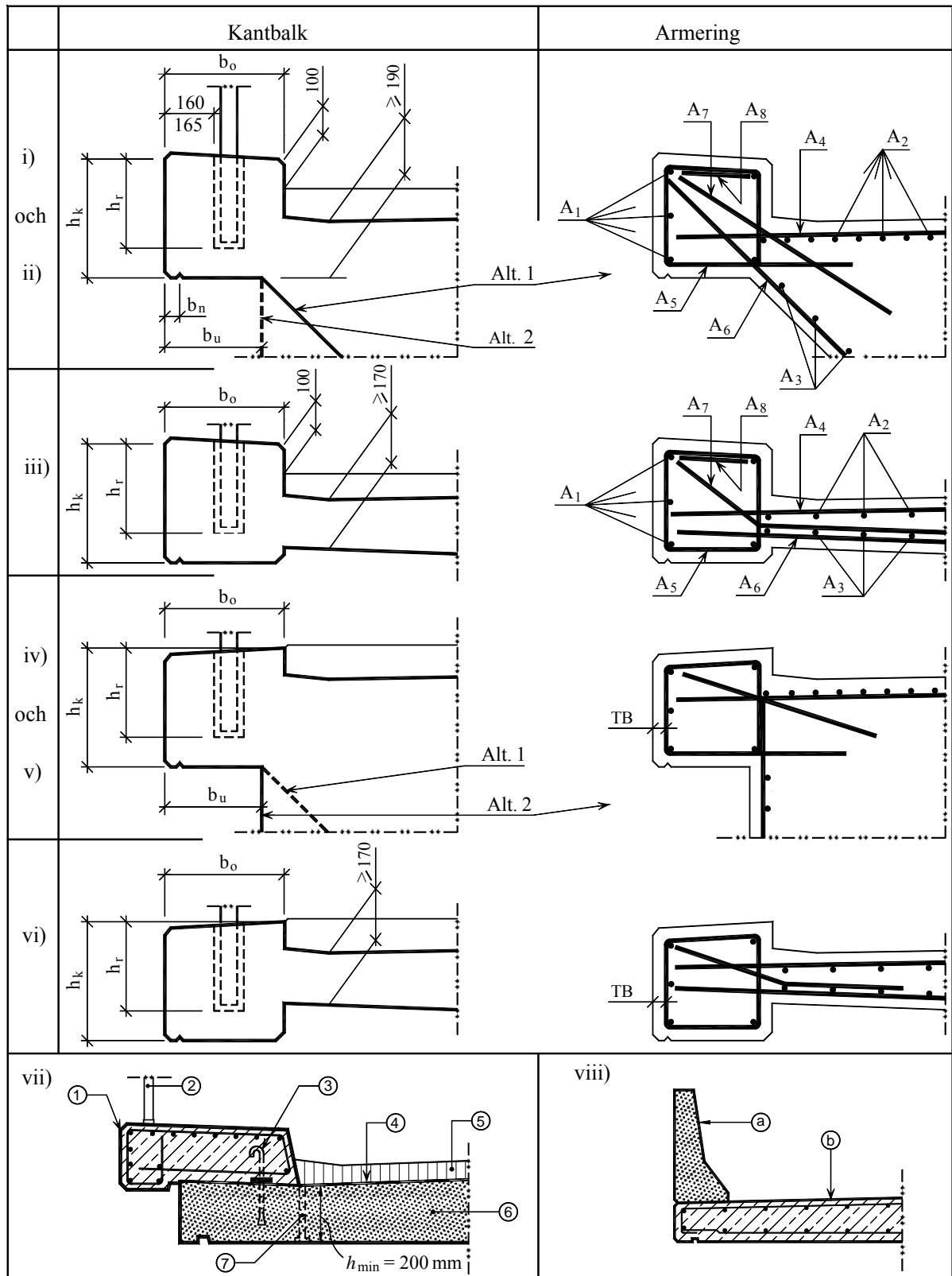
Vad som menas med trafiksäkert sätt framgår av SS-EN 1317 och tilläggskraven i TK Bro. Räcket har ibland tilläggsfunktioner som bland annat innebär att de ska förses med hopp-skydd, skyddsnet och skyddstak över järnväg samt t.ex. bullerskärmar.

Exempel på utformning av kantbalkar visas i **Figur 1.2**, **Figur 1.3** och i **Figur 2.5** nedan.

Tidigare kunde och kan i vissa fall fortfarande kantbalkar utformas som en s.k. ej förhöjd kantbalk, varvid menades att kantbalkens överyta var lägre än beläggningens överyta, vilket möjliggjorde att vatten på bron kunde rinna av kanten längs hela bronns längd, se **Figur 2.5**, delfigurerna iv), v) och vi). Denna lösning är ofta inte längre godtagbar av miljöskäl men kan ibland godtas. För- och nackdelar med denna lösning jämfört med den vanliga lösningen med förhöjd kantbalk har diskuterats, se **Tabell 2.1** nedan, av Vägverkets kantbalksgrupp, se *Troive (2002)*. (**Tabell 2.1** är något reviderad jämfört med tabellen i referensen.)

Tabell 2.1 För- och nackdelar med utförande av brobaneplattor med s.k. icke förhöjd kantbalk jämfört med förhöjd kantbalkar. (I huvudsak enligt Troive (2002)).

Fördelar med icke förhöjd kantbalk	Nackdelar med icke förhöjd kantbalk
Vatten kan rinna över kanten, vilket medför att mängden vatten på brobanan minskar. Detta medför i sin tur att avrinningen blir bättre och stänk från däckens minskar.	Mängden saltvatten på kantbalkens överyta ökas. Miljön för räckesinfästningen blir sämre. I många fall behövs rännor för att ta hand om vattnet för att klara miljökraven.
Lättare att konstatera skador på tätskiktet.	Dålig avslutning av tätskikt och beläggning, vilket ökar risken för skador på brobaneplattan och stödet för beläggningen kan bli sämre.
Ytavlopp behövs inte.	Brokappan tar plats och kommer att öka den totala brobredden. Detta kan påverka utformningen och därmed kostnaden för hela bron.
Räcket blir förhållandevis högre vilket kan ge ett mer eftergivligt skydd för avkörning vilket kan vara en fördel.	Räcket blir förhållandevis högre vilket vid given påkörningskraft kan ge ökade krav på räckets och kantbalkens styrka.



Figur 2.5 Exempel på utformning av kantbalkar och armering i dessa. Bilderna är i princip förenklade från Vägverkets standardritningar som också angav de angivna minimimåtten. Armering A₇ avser att ta upp krafter från räcket. Delfiguren vii) (brokappa) och viii) visar kantbalkar av prefabricerad typ varvid en s.k. "Jerseybarriär" visas med (a) i delfigur viii).

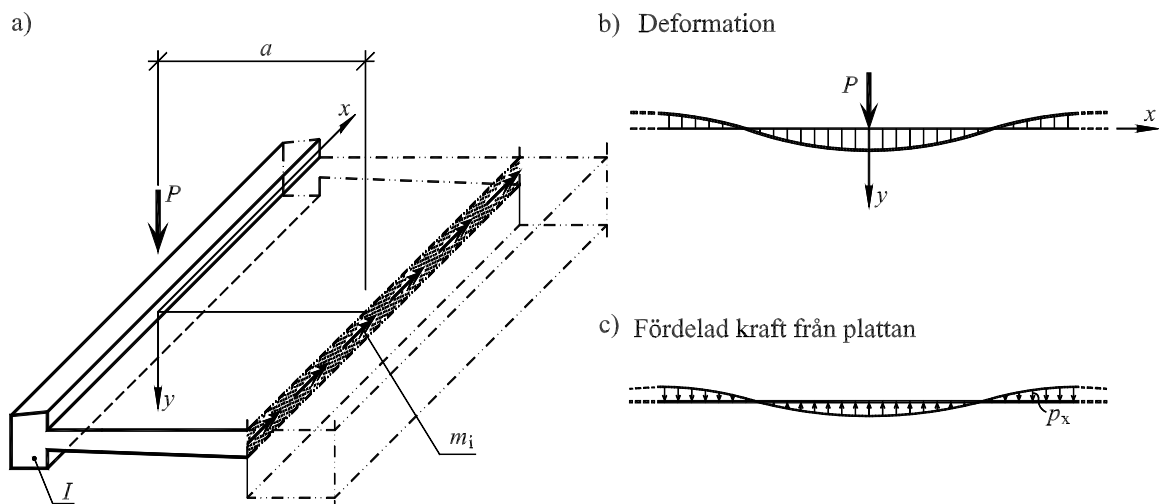
2.4.2 Integrerad kantbalk

Den integrerade kantbalken, i de fall då bronns tvärsnitt innehåller konsolplattor (se **Figur 2.5 iii)** och **vi)** - har som extra funktion att också fördela koncentrerade laster på konsolplattorna, så att dessa kan göras tunnare och därmed möjliggöra materialbesparing. För övriga typer i figuren behövs inte denna funktion.

Vid beräkning av inspänningsmomentet på grund av en punktlast måste hänsyn tas till den lastfördelande verkan som plattan och en eventuellt samverkande kantbalk kan ge.

Har kantbalken stor styvhet blir dess lastfördelande inverkan stor och vi kan då tillämpa en "klassisk" beräkningsmetod som använts i Sverige under lång tid och som finns härledd i *Wästlund (1964)*. En mer utvecklad variant av denna teori återfinns i *Sundquist (2008)*.

Vi antar att plattan kan approximeras som ett antal balkstrimlor med styvhet i [m^4/m] vid böjning i y -led. Kantbalken ges styvheten I [m^4] vid böjning i x -led. Vi försummar kantbalkens vridstyvhet. Den beräkningsmodell som blir resultatet av dessa antaganden utgörs av en balk på elastiskt underlag och där det elastiska underlaget utgörs av de plattstrimlor som vi approximerat plattan med. Vi studerar **Figur 2.6**.



Figur 2.6 För beräkning av den lastfördelande inverkan av en kantbalk längs kanten på en konsol tillämpar vi en beräkningsmodell enligt figuren. Metoden är approximativ, men kan tillämpas när kantbalkens styvhet är relativt stor.

Om vi tänker oss att placera punktlasten P på kantbalken, så uppstår en fördelad reaktionskraft p_x [N/m] mellan balk och plattstrimlorna. Med beteckningar enligt **Figur 2.6** erhålls

$$p_x = \frac{3k_t Ei}{a^3} y(x) = \chi y \quad (2-1)$$

Faktorn k_t i ekv. (2-1) avser att korrigera för de fall då konsolen ej har konstant böjstyvhet. Mer om detta nedan.

Faktorn χ som får enheten [N/m²] kan tecknas $3k_t Ei / a^3$. Nu uppställs elastiska linjens ekvation för kantbalken

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -p_x$$

som med insatt värde för p_x kan tecknas

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + 4\lambda^4 y = 0 \quad (2-2)$$

I ekv. (2-2) har införts beteckningen

$$\lambda^4 = \frac{3 k_t i}{4 a^3 I} \quad (2-3)$$

Lösningen av differentialekvationen är trivial och resultatet kan uttryckas på följande sätt:

helt i analogi med ekv. (4-49).

$$y(x) = \frac{\lambda P}{2\chi} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \quad (2-8,9)$$

$$M_x(x) = \frac{P}{4\lambda} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x)$$

Inspänningsmomentet i plattan i snittet mot huvudbalkarna kan med utgångspunkt från ekvationerna (2-1) och (2-8) tecknas

$$m_i(x) = ap_x = a\chi y(x) = \frac{Pa\lambda}{2} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \quad (2-10)$$

Såväl momentet i kantbalken som inspänningsmomentet har sina absoluta maxvärden för $x = 0$.

$$\frac{M_{x,\max}}{Pa} = \frac{1}{4\lambda a} = \frac{0,25}{\lambda a} \quad \text{för } x = 0 \quad (2-11)$$

$$\frac{m_{i,\max}}{P} = \frac{\lambda a}{2} \quad \text{för } x = 0, \text{ samt} \quad (2-12)$$

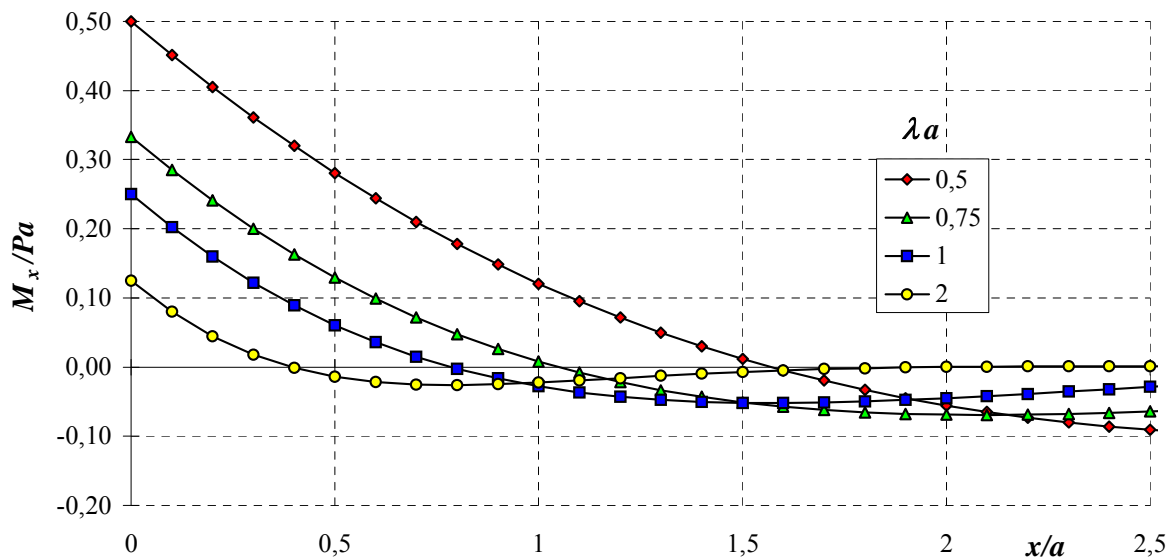
$$\frac{M_{x,\min}}{Pa} = -\frac{1}{4\lambda a} e^{-\frac{\pi}{2}} = -\frac{0,052}{\lambda a} \quad \text{för } x/a = \frac{\pi}{2\lambda a} \quad (2-13)$$

För varierande värden på λa visas i **Figur 2.7** och **Figur 2.8** hur momenten i kantbalken resp. i plattans inspänningsnitt varierar i längdriktningen.

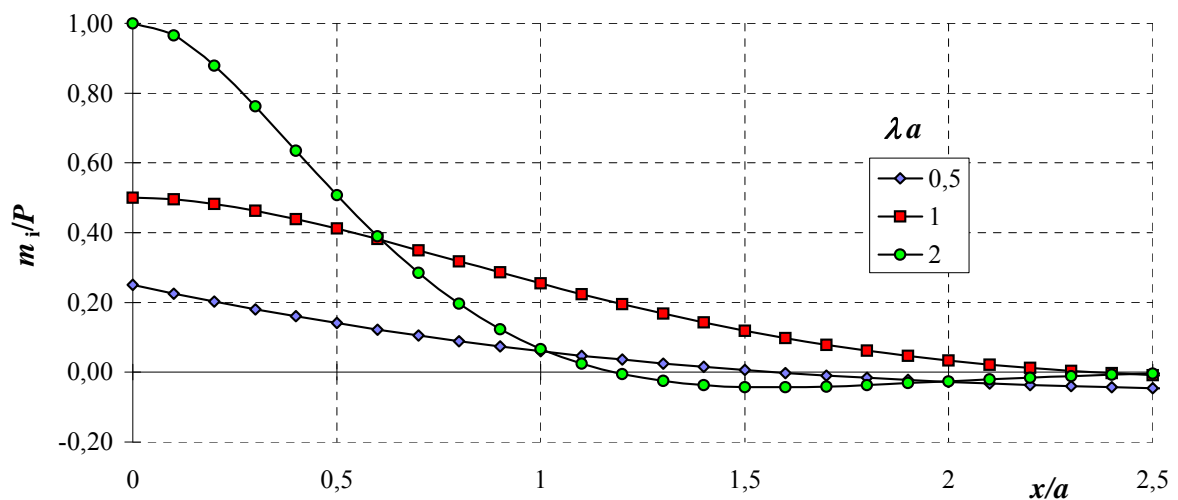
Ekv. (2-12) kan tolkas så att momentet Pa [kNm] från punktlasten P [kN] sprids jämnt på en sträcka av $2/\lambda$.

Vid två punktlaster nära varandra och med avståndet b_b från varandra kan man approximativt fördela dessa två laster på en sträcka av $b_b + 2/\lambda$, varvid medelmomentet, $m_{i,2}$, på denna sträcka blir

$$\frac{m_{i,2}}{m_{i,1}} = 2 \frac{2/\lambda}{b_b + 2/\lambda} > 1 \text{ om } b_b < 2/\lambda \text{ och där } m_{i,1} \text{ är momentet vid en punktlast}$$

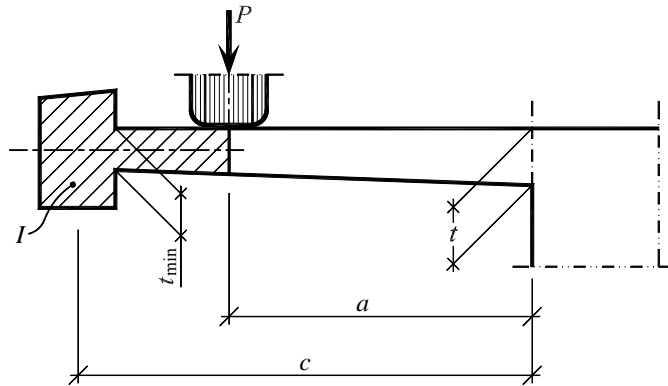


Figur 2.7 Momentet i en kantbalk till en brokonsol enligt Figur 2.5 och beräknad enligt ovanstående mycket approximativa metod varierar enligt figuren.



Figur 2.8 Inspänningsmoment i plattan enligt Figur 2.5 som funktion av x/a och vid varierende värde på faktorn λa definierad ovan.

Ovanstående beräkningsmetod är som sagt approximativ, men visar några egenskaper vid lastfördelning, även om plattans lastfördelning i längsled försummas. Ett sätt att ta hänsyn till detta är att räkna in en del av plattan i kantbalkens styvhet, vilket är särskilt aktuellt när punktlasten står en bit in på plattan enligt **Figur 2.9**.

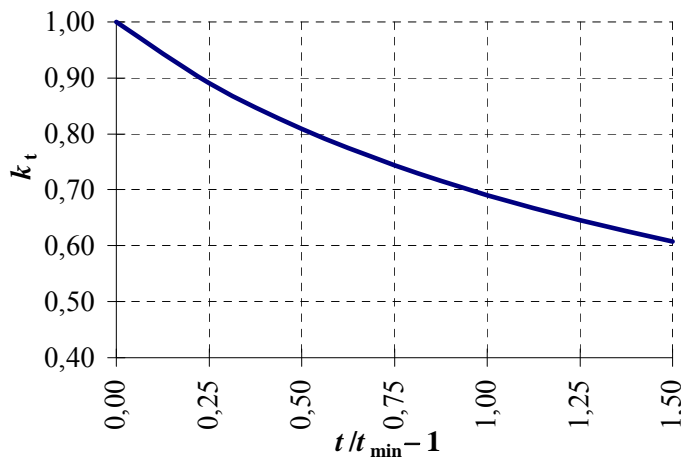


Figur 2.9 När punktlasten står en bit in på plattan kan en del av plattans böjstyvhet i längsled räknas in i kantbalkens styvhet enligt figuren.

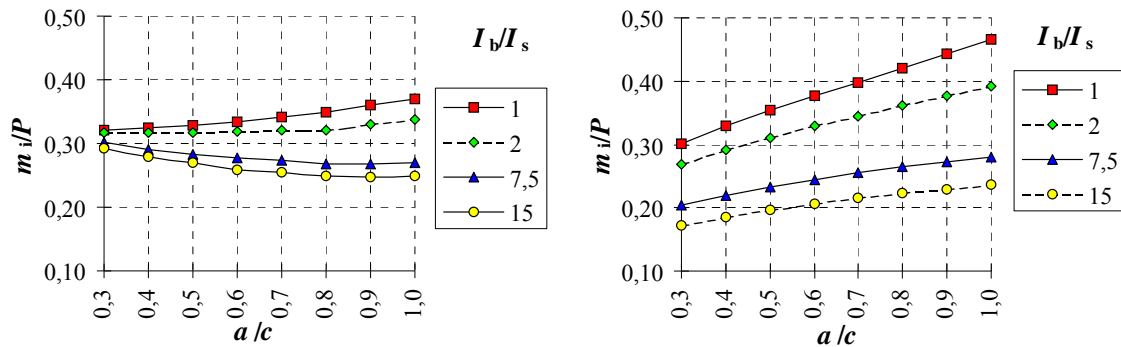
När konsolen har varierande tjocklek enligt **Figur 2.9** kan hänsyn till detta tas med faktorn k_t enligt ovan. Denna faktor kan beräknas på konventionellt sätt (nedböjning för en konsol med varierande höjd) och resultatet framgår av **Figur 2.10** nedan.

Ekv. (5-12) ovan kan formuleras om enligt nedan

$$\frac{m_{i,\max}}{P} = \frac{\lambda a}{2} = \frac{a}{2} \sqrt[4]{\frac{3k_t i}{4a^3 I}} = \frac{a}{2} \sqrt[4]{\frac{3k_t t^3}{48a^3 I}} = \frac{t}{4} \sqrt[4]{\frac{k_t a}{tI}} \quad (2-14)$$



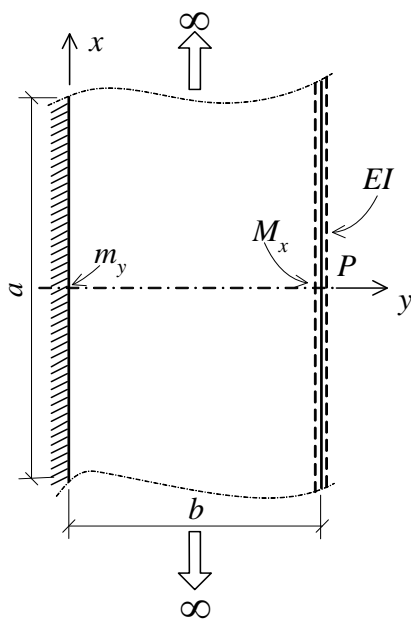
Figur 2.10 Reduktionsfaktorn k_t att användas vid beräkning av faktorn c resp. λ i ekv. (2-1) och (2-3) ovan. För definition av t och t_{\min} hänvisas till **Figur 2.7** ovan.



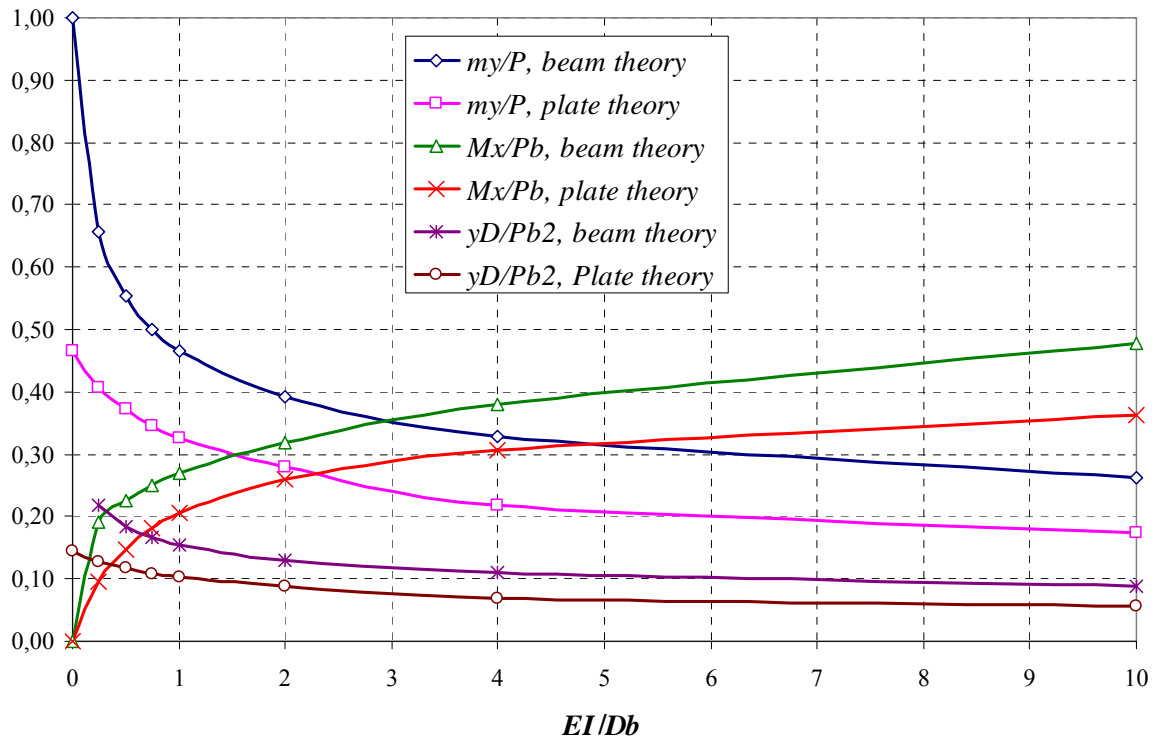
Figur 2.11 Inspänningsmoment i konsol förstyvad med kantbalk enligt Bakht & Jaeger (1985) (vänster) och enligt förenklad metod (höger) ovan. I diagrammen har beteckningen $I_s = at^3 / 12$ använts.

Formel (2-14) ovan återfinns i gamla svenska normer och används ofta fortfarande vid brodimensionering. Det inses dock att hänsyn till plattans lastfördelning verkar ej tagits i ekv. (2-14), eftersom formeln ej kan vara giltig när kantbalkens styvhet I är noll. Som jämförelse med värdena ovan redovisas i **Figur 2.11** det maximala inspänningsmomentet beräknat enligt formel ovan och enligt Bakht & Jaeger (1985). Vi ser att speciellt för de fall då kantbalkens styvhet är liten blir avvikelserna mellan teorierna stora. Av resultat enligt Bakht & Jaeger (1985) ser vi att inspänningsmomentet vid last ett stycke från kantbalken ($c/a \leq 0,7$ à $0,9$) ej avviker mycket från värdet $0,3P$ vilket kan tjäna som ett approximativt värde att användas vid ingenjörsmässig dimensionering.

I Sundquist (2008) visas också en noggrannare lösning av det behandlade problemet enligt konventionell plattteori och med fourierserielösningar för fallet $b/a \rightarrow 0$. En jämförelse mellan de två teorierna framgår av **Figur 2.13**. Naturligtvis blir lastfördelningen mycket effektivare enligt den noggrannare metoden, såväl när det gäller momentinspänning mot huvudbalkarna som när det gäller moment i kantbalkarna.



Figur 2.12 Med fourierserier kan platt-ekvationen lösas för det fall som visas i figuren med hänsyn till kantbalkens vridstyvhet GK_v och böjstyvhet, EI .



Figur 2.13 Samband mellan maximalt inspänningsmoment (m_y), maximal nedböjning y i platta med styvhet D och moment i kantbalk med styvhet EI för en konsol med bredd b , se Figur 2.11. Beräkningarna är gjorda enligt den klassiska metoden med balkteori och enligt platteori. Sundquist (2007b).

2.4.3 Brokappa

Broar med s.k. brokappa i princip enligt **Figur 1.3** används i många länder. För- och nackdelar med brokappa, d.v.s. där kantbalken inte integreras med broplattan diskuteras i *Troive (2008)*, *Ekengren (2000)* och *Vägverket, Kantbalksgruppen (2000)*. En sammanfattning av för- och nackdelar med de två principiellt olika lösningarna ges i **Tabell 2.2**. Brokappar kan utföras såväl i platsgjutet som i prefabricerat utförande.

Tabell 2.2 För- och nackdelar med utförande av broar med s.k. brokappa.

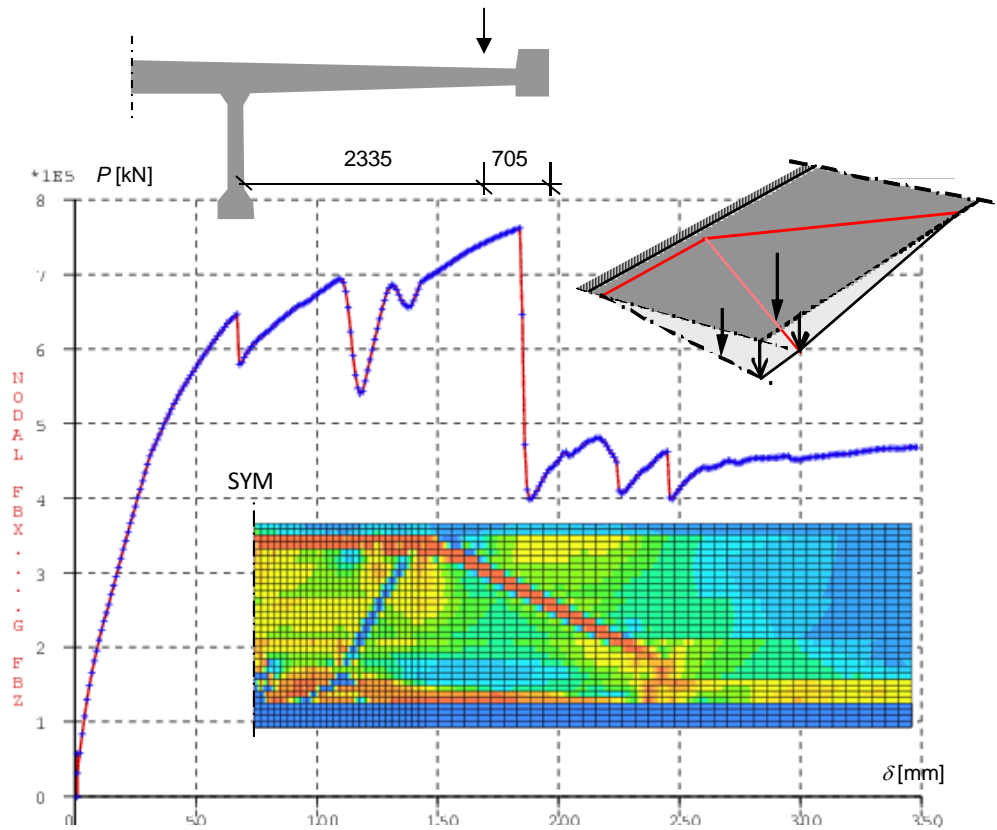
Fördelar med icke integrerad kantbalk	Nackdelar med icke integrerad kantbalk
Mindre känslig för påkörningsskador.	Brokappan kanske ändå blir en del av konsolens bärande system och spricker ändå.
Lättare att reparera.	Kräver ökad styrka och styvhet hos broplattan vilket kan leda till ökad tjocklek och mer armering i plattan.
Enklare att utföra en mindre brobreddning.	Brokappan tar plats och kommer att öka den totala brobredden. Detta kan påverka utformningen och därmed kostnaden för hela bron.
Det ger möjlighet till att ha lägre eller högre hållfasthet i kantbalken.	Vid prefabricerade brokappor erfordras komplicerade infästningar som kan vara känsliga för skador och nedbrytning.
En lösning med integrerad kantbalk innebär att den totala brobredden blir minimal i relation till den fria bredden.	Brons totala bredd blir normalt sett större, vilket dels leder till ökade kostnader, dels kan leda till inskränkningar vid projekteringen.

2.4.4 Lastspridning och bärförmåga med hänsyn till olinjär respons hos kantbalkar

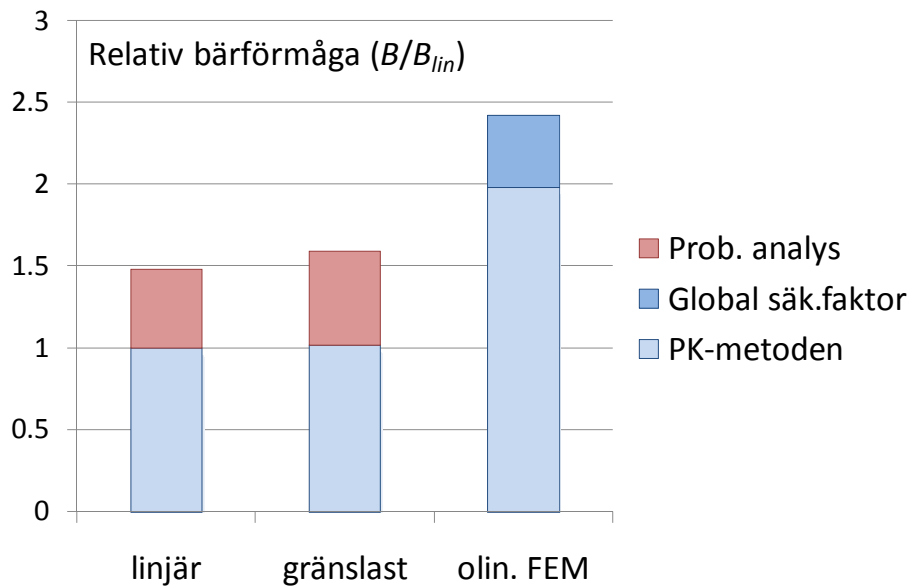
Genom numeriska beräkningar med icke-linjär finit elementanalys (FE-analys) kan brottet vid belastning med koncentrerade laster på brofarbanan simuleras. I analysen återspeglas betongens uppsprickning och armeringens plasticering. Tredimensionella (3D) effekter som båg- och membranverkan återspeglas också i analysen.

Angriper de koncentrerade lasterna tillräckligt långt från stöd för att momentbrott och inte tvärkraftsbrott avgör bärförmågan kan betongplattan modelleras med skalelement. Om även tvärkraftsbrott skall kunna återspeglas i analysen krävs att plattan modelleras med kontinuumelement i 3D.

Figur 2.14 visar modell och analysresultat från en olinjär analys med icke-linjär finit elementmetod (FEM) av den utkragande delen av Ölandsbrons farbaneplatta, *Carlsson et al.* (2008). Analysen visade på en betydligt högre bärförmåga än vad som erhålls med förenklade beräkningar, se **Figur 2.15**. En anledning till detta är att huvudarmeringen bidrar till bärförmågan längs en längre del av farbanan i FE-analysen, genom den utsträckta brottlinjefiguren. En bidragande orsak kan även vara bågverkan i plattans längsled.



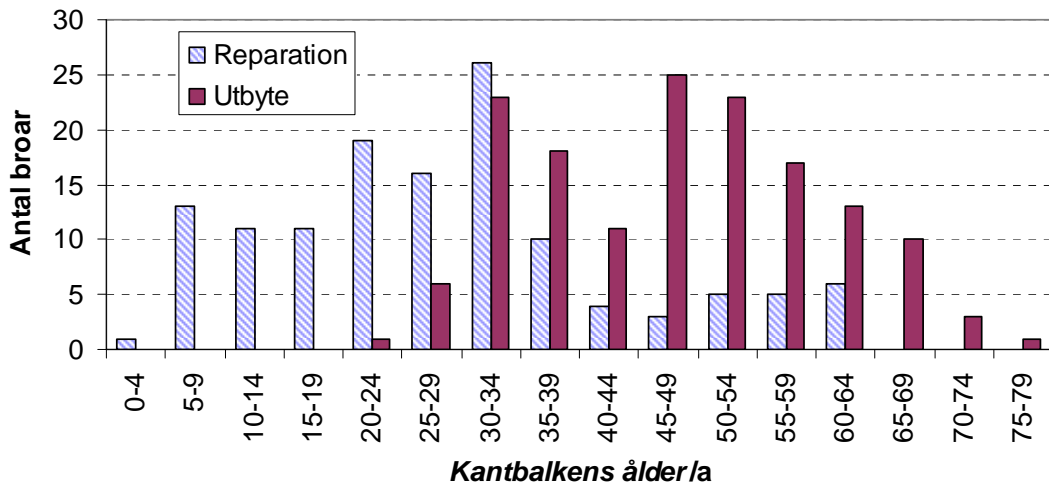
Figur 2.14 Respons vid belastning av Ölandsbrons farbaneplatta med kantbalk. Analys med olinjär finit elementmetod, Carlsson et al. (2008).



Figur 2.15 Relativ bärförmåga för Ölandsbrons konsoler, beräknad med elasticitetsteori, plasticitetsteori (strimlementod) och med olinjär finit elementmetod (med olika säkerhetsformat; partialkoefficientmetod, probabilistisk analys och global säkerhetsfaktor), Carlsson et al. (2008).

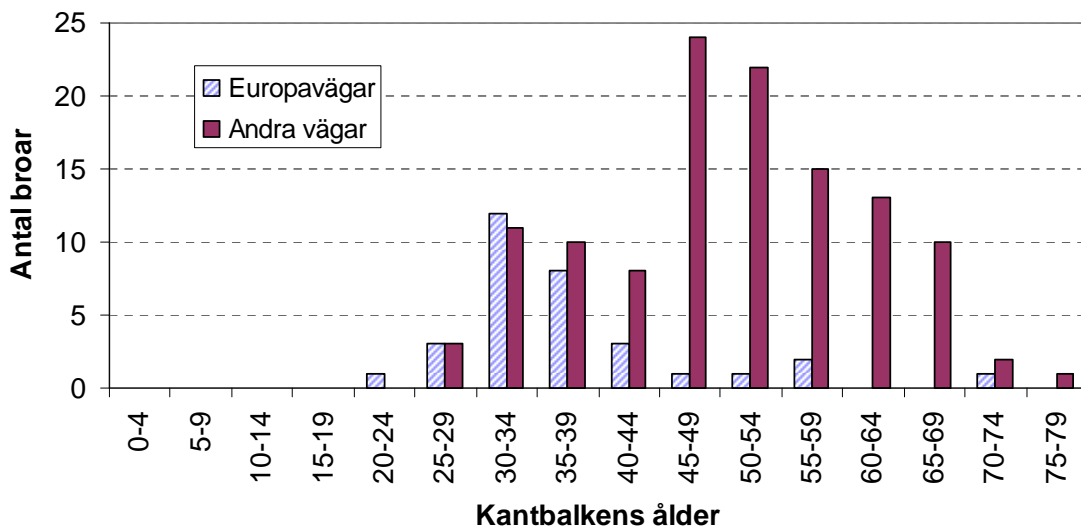
2.4.5 Nedbrytning av kantbalkar

Kantbalkar inkl. infästning av räcke hör till de konstruktionsdelar som behöver åtgärdas oftast och som drar stora kostnader. I *Mattsson et al. (2007)* har baserat på uppgifter i BaTMan studerats hur många kantbalkar som reparerats eller bytts ut inom ett delområde av Trafikverkets vägbroar., se **Figur 2.16**. Vid avd. för brobyggnad har tidigare *Racutanu (2000)* gjorts sammanställningar och analyser av nedbrytning och livslängd och för närvarande pågår liknade utredningar som underlag för LCC.



Figur 2.16 Utbytta resp. reparerade kantbalkar sorterade efter ålder. Materialet är baserat på 135 utbytta och 125 reparerade kantbalkar i mellersta Sverige, *Mattsson et al. (2007)*.

Intressanta resultat erhålls vid jämförelse av reparerade och utbytta kantbalkar för mindre trafikerade vägar jämfört med Europavägar, se **Figur 2.17**.



Figur 2.17 Jämförelse av ålder för 135 utbytta kantbalkar i Mellansverige på Europavägar och övriga vägar, *Mattsson et al. (2007)*.

Resultatet visat i **Figur 2.15** innebär att medelåldern för utbytta kantbalkar för broar på Europavägar var 37 år och för övriga broar 48 år.

2.4.6 Åtgärder för ökad livslängd för kantbalkar

Eftersom nedbrytning och därmed följande kostnader för kantbalkar är ett stort problem, har olika åtgärder för ökad livslängd utvecklats och diskuterat. Exempel på åtgärder är

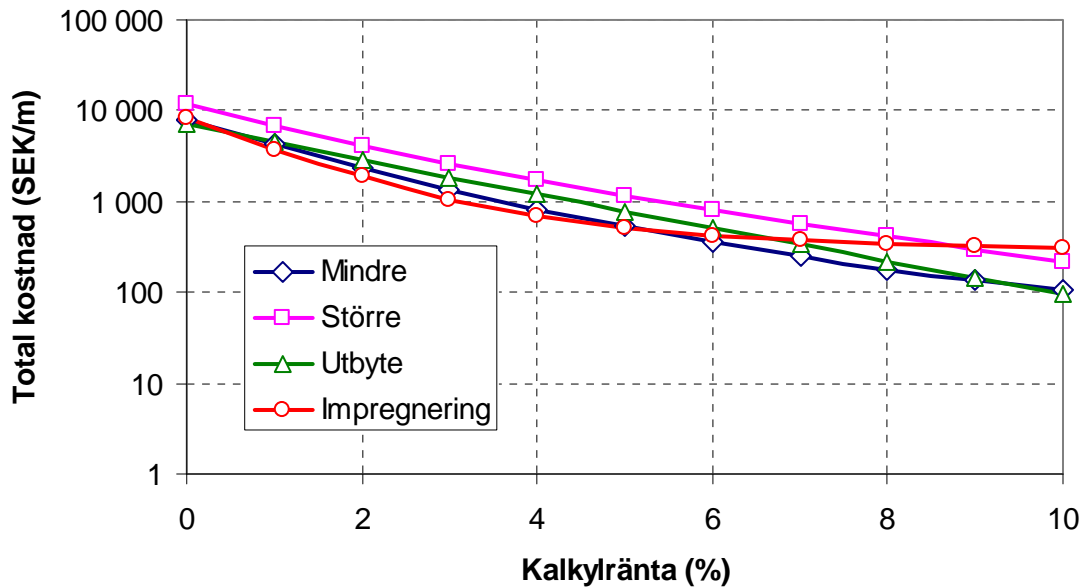
- extra hög betongkvalitet,
- extra stora täcksikt,
- rostfri armering,
- impregnering,
- katodiskt skydd,
- speciell fiberbetong, se avsnitt 4.6,
- m.m.

Impregnering

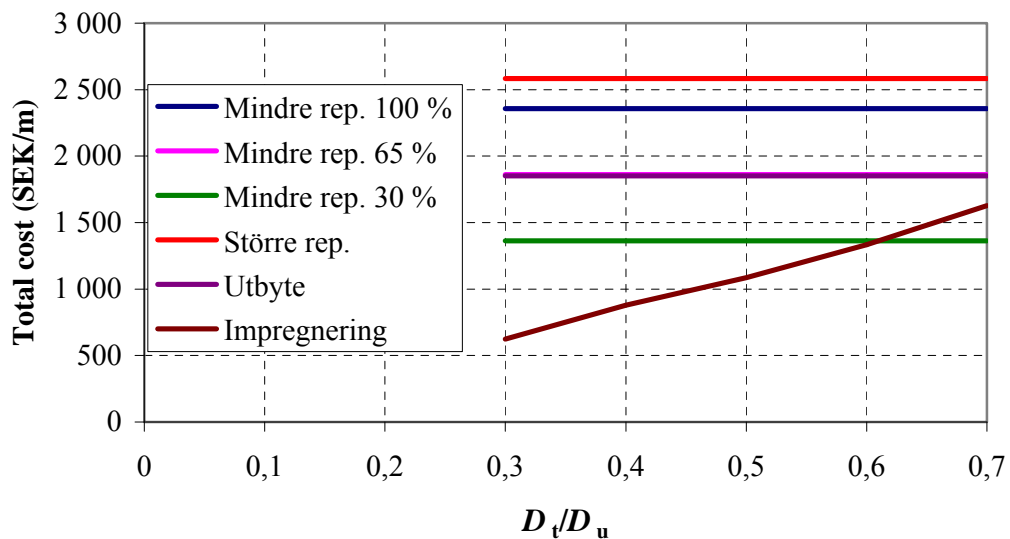
Enligt Trafikverket skall konstruktionsdelar som är speciellt utsatta för tölsalter impregneras. Impregneringen leder till ett ökat skydd mot kloridinträngning och armeringskorrosion. Vid nyproduktion av broar skall betongelementen dock förses med ett tätskikt med sådan tjocklek och kvalitet att man ändå uppnår 120 års livslängd. Man kan då fråga sig ifall det är lönsamt att impregnera. CBI Betonginstitutet *Silfwerbrand*, (2008) har genomfört en livscykelkostnadsanalys som behandlar impregnering av kantbalkar. Fyra strategier jämfördes:

1. Konstruktion – mindre reparation (0 - 30 mm) – utbyte
2. Konstruktion – större reparation (30 - 70 mm) – utbyte
3. Konstruktion – utbyte
4. Konstruktion – impregnering – utbyte

Jämförelsen omfattade betong med olika v_{ct} (med tillhörande diffusionskoefficienter D), impregneringsintervall, ålder vid mindre reparation, ålder vid större reparation, procentuell andel av yta för ”mindre reparation” samt kalkylränta. Kostnaderna för impregnering, mindre reparation, större reparation och utbyte hämtades ur *BaTMan* (2007). Beräkningarna visar dels att kalkylräntan har stor betydelse för valet av optimal strategi, **Figur 2.18**, dels att impregneringen i första hand är lönsam för äldre broar där skillnaden i kloridinträngningsfart mellan impregnerad och icke-impregnerad är betydande (i exemplet uttryckt som kvoten D_t/D_u , där D_t = diffusionskoefficienten för impregnerad betong och D_u = dito för obehandlad betong), se **Figur 2.19**.



Figur 2.18 Totala reparations- och underhållskostnader under 120 år för en betong med kvalitet motsvarande en äldre betong Silfwerbrand (2008). Konstruktionskostnaden är identisk för de fyra alternativen i figuren och har därför inte medräknats. Impregnering är den mest lönsamma åtgärden för kalkylräntor mellan 1 % och 5 %.



Figur 2.19 Totala reparations- och underhållskostnader under 120 år för en betong med kvalitet motsvarande en äldre betong Silfwerbrand (2008). Konstruktionskostnaden är identisk för de fyra alternativen i figuren och har därför inte medräknats. Här visas inverkan av olika värden på diffusionskoefficienten och olika procentuella andelar av ytan som är föremål för "mindre reparation". Impregnering är den mest lönsamma åtgärden så länge $D_t/D_u < 0,6$.

Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink

Armeringskorrosion på kantbalkar medför ständiga reparations- och underhållskostnader för samhället. För att skydda mot armeringskorrosion används i några fall katodiskt skydd med påtryckt ström, till exempel på Ölandsbron och Tingstatunneln. Ett alternativ till katodiskt skydd med påtryckt ström är att använda galvaniskt katodiskt skydd. Inom kärnkraftindustrin i Sverige, och på brokonstruktioner utomlands (t.ex. USA), används katodiskt skydd med termiskt sprutade offeranoder av zink för att lokalt skydda stålarmingen i betong mot korrosionsangrepp. Exempel på användningen av termiskt sprutade Zn-skikt i Sverige är Forsmark kylvattentunnlar och Ölandsbrons kantbalk. Zinkanoden appliceras på betongen genom att den smälta zinken sprutas på en noggrant rengjord och torr betongyta. De vanligaste sprutmetoderna vid applicering av zinkanod på betongyta är flamsprutning eller ljusbågssprutning. Det påsprutade zinkskiktets tjocklek varierar normalt mellan 200 och 500 µm.

Fördelen med att använda ett galvaniskt katodiskt skydd med termiskt sprutade offeranoder av zink jämfört med ett katodiskt skydd med påtryckt ström är att den sprutade zinkanoden är betydligt enklare och billigare att installera än ett anodsystem med påtryckt ström. Dessutom fordras ingen övervakning av det galvaniska skyddet. Nackdelen med sprutade offeranoder av zink är dock att den galvaniska skyddsströmmen från anoden inte kan regleras utan är helt beroende av anodskiktets kemiska sammansättning, skiktjocklek, sprutmetod och vidhäftning samt betongens resistivitet. Fuktinnehåll, karbonatisering och kloridhalt misstänks ha en positiv betydelse för det galvaniska skyddet, vilket gör att metoden kan vara lämplig för äldre brokonstruktioner som har ett ytligt karbonatiserat skikt och varit utsatta för tösaltning.

Undersökningar utförda på kantbalken på Ölandsbron visade att användningen av termiskt sprutad offeranod av zink på kantbalken minskade korrosionshastigheten hos stålarmingen med 95 % jämfört med oskyddad armering, *Sederholm (2002)*. Den goda skyddsförmågan antogs bero på betongens låga resistivitet orsakad av höga fuktnivåer och att en viss kloridhalt fanns i betongens täckskikt.

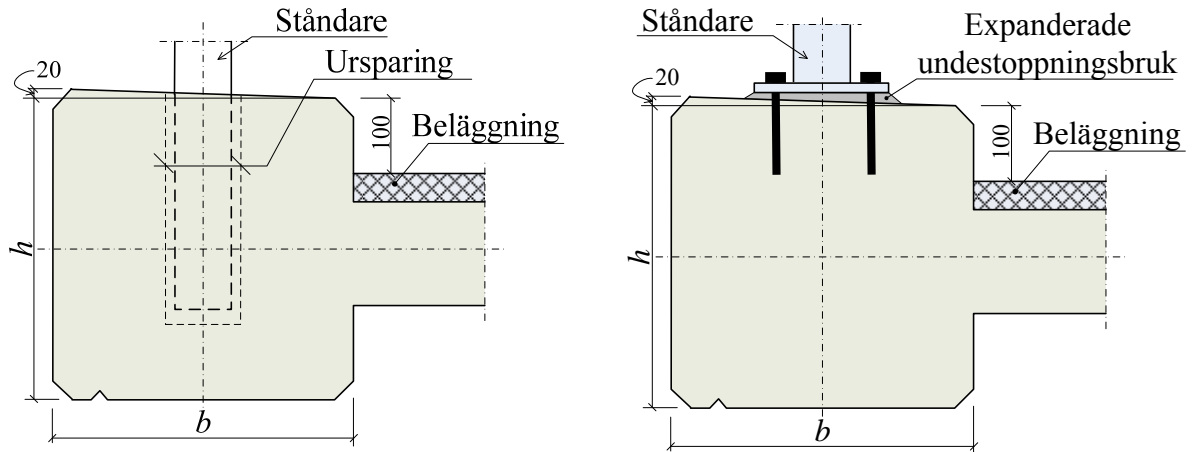
2.5 Räcke och räckesinfästning

2.5.1 Inledning

De grundläggande kraven för räcket diskuteras i avsnitt 1.3. Utformning av själva räcket, ur estetisk, hållfasthets, deformationssynpunkt m.m., ingår inte i föreliggande projekt. Däremot ingår själva infästningen av räcket eftersom denna påverkar kantbalken och därmed hela systemet brobanepatta.

2.5.2 Olika system

I Sverige används i princip endast två typer av infästningar, nämligen skruvade eller ingjutna infästningar, se de schematiska bilderna i **Figur 2.20**.



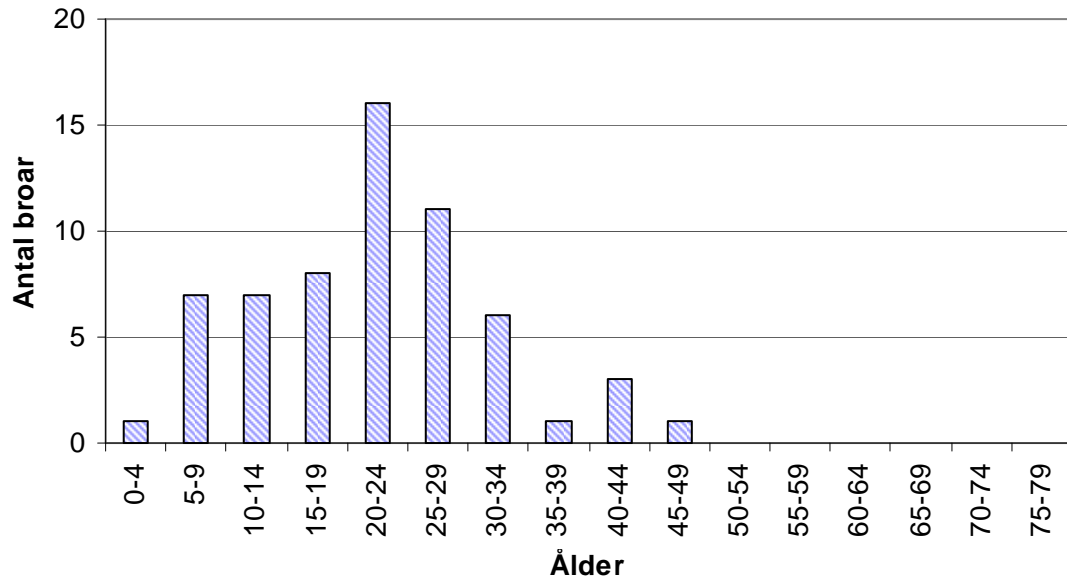
Figur 2.20 De två vanligaste infästningarna av räcken i kantbalkar i Sverige. Typ a) är ingjutning av ståndarna i en ursparing i kantbalken med diameter c :a $\phi 110$. Vid typ b) förses ståndaren med en svetsad bottenplåt som fästs med skruv i kantbalken. Bredd och höjd $b \times h$ har traditionellt varit $400 \times 400 \text{ mm}^2$, men ökade krav på täckskikt m.m. har inneburit att måtten på senare tid ökats upp emot $500 \times 500 \text{ mm}^2$.

Räcket, som den vanligen utförs i Sverige, är ur funktions- och underhållssynpunkt en integrerad del av kantbalken. Mindre goda lösningar för infästningen kan medföra nedbrytning av kantbalken, och därmed reducera systemets livslängd. Enligt Troive (2008) så har Kantbalksgruppen kommit fram till att för- och nackdelar för skruvade resp. icke ingjutna räcken kan sammanfattas enligt **Tabell 2.3**.

Tabell 2.3 För- och nackdelar med skruvat respektive ingjutet räcke.

Fördelar med skruvat räcke	Nackdelar med skruvat räcke
+ lättare att byta	– mindre estetiskt gynnsam
+ mindre risk för sprickor i kantbalken	– undergjutningen spricker ofta
+ mindre mängd ingjutningsbruk erfordras och expanderskruv kan användas	– förseglingen bryts vid användning av expanderskruv

I Mattsson *et al.* (2007) finns några resultat beträffande hur ofta räckesinfästningar reparerats. Som i övriga resultat i den undersökningen baseras utvärderingen, se **Figur 2.21**, på material ur BaTMan från Vägverket VMN.



Figur 2.21 Ålder för reparation av 61 räcketinfästningar för broar i VMN Mattsson et al. (2007).

Tyvär har inte resultatet delats upp på olika typer av räcketinfästningar, men enligt Troive (2008) använder VMN endast ingjutna infästningar.

I flera länder använder man räckten i form av speciellt utformade betongelement, se **Figur 2.5** viii).

2.6 Övergångskonstruktioner

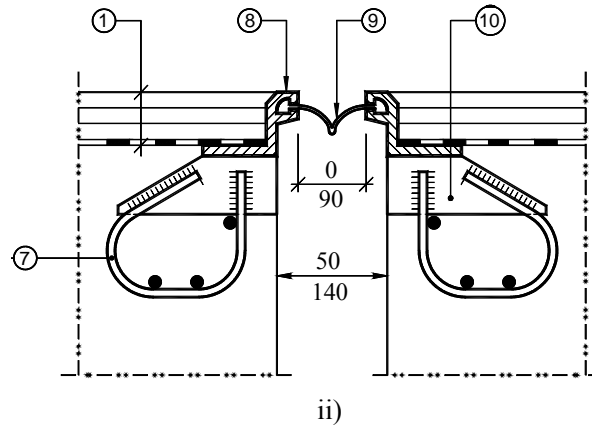
Övergångskonstruktioner används för att ge brobanan en kontinuerlig och jämn övergång till anslutande vägbana när broöverbyggnaden tillåts röra sig i förhållande till landfästena. Till- sammans med brons lager skall övergångskonstruktionen möjliggöra rörelser till följd av framför allt temperaturändringar, krympning, krypning och sättningar. På så sätt får broöverbyggnaden väldefinierade randvillkor och tvångspåkänningar i broöverbyggnaden undviks. De generella kraven på övergångskonstruktioner beskrivs i avsnitt 1.3.

På grund av underhållsproblem finns en önskan att så långt som möjligt undvika övergångskonstruktioner. För rambroar eller broar som avslutas med ändskärm är det idag vanligt att undvika övergångskonstruktioner upp till en spännvidd av 50 – 60 meter. Med integrerade landfästen kan även lagerkonstruktioner i vissa fall undvikas

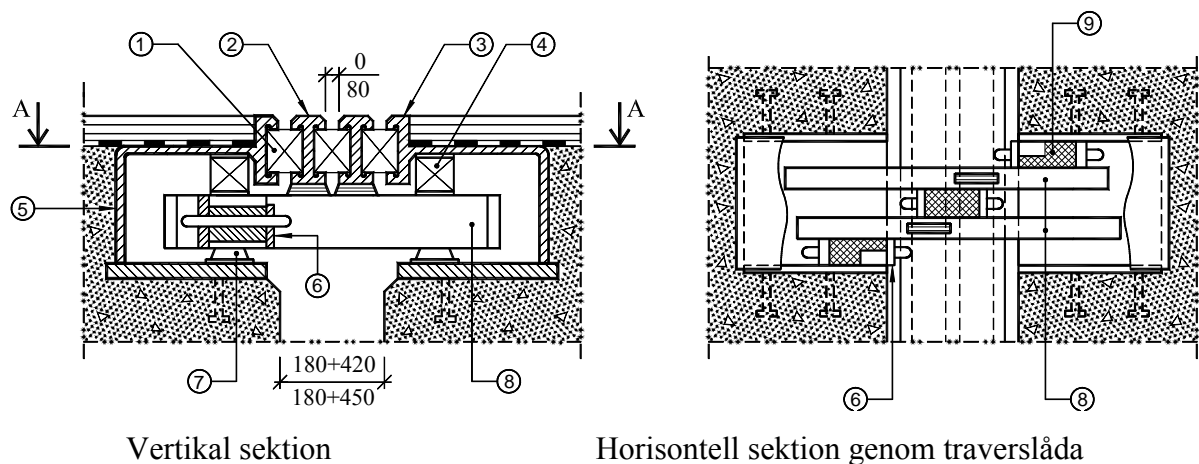
2.6.1 Vanliga typer av övergångskonstruktioner

För fogar med begränsat rörelsebehov, upp till 90 mm enligt Vägverket (1996), används övergångskonstruktioner med en gummiprofil eller ett tätningmembran infäst i stålprofiler på ömse sida av fogen, se **Figur 2.22**. Då rörelsebehovet är större, upp till 2000 mm enligt Vägverket (1996), används övergångskonstruktioner med flera längsgående stålprofiler med

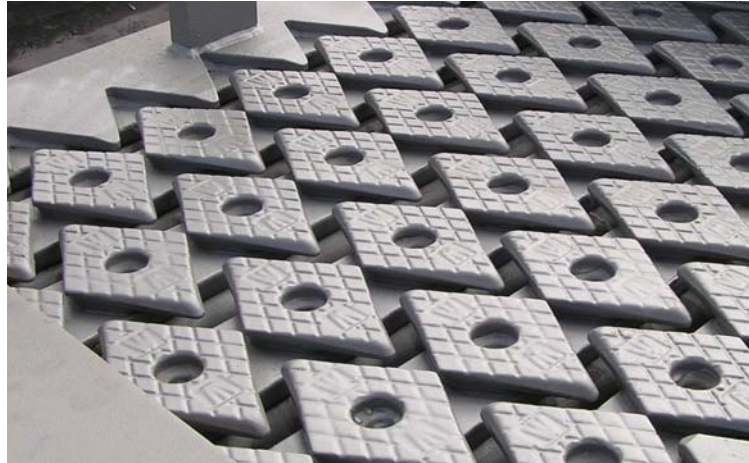
gummiprofiler emellan, se **Figur 2.23**. De längsgående stålprofilerna är understödda av tvärgående traversbalkar som i sin tur är upplagda på lagerkonstruktioner i ursparingar i broöverbyggnad och landfästen. Med hjälp av mekaniska styranordningar eller fjädrar hålls jämna avstånd mellan stålprofilerna. För att få jämnare vägbana och lägre bulleremissioner kan stålplattor fästas i diagonala rutmönster på stålprofilernas översidor, se **Figur 2.24**.



Figur 2.22 En i Sverige vanlig typ av övergångskonstruktion med tät gummiprofil, ① infäst i en särskilt utformad stålprofil ⑧. Sundquist (1995) eller Sundquist (2008).



Figur 2.23 Tät övergångskonstruktion för större rörelser. Rörelserna tas upp av gummiprofiler ①. För att öppningarna ej skall bli för stora insätts stålprofiler ② mellan gummiprofilerna så att rörelserna i dessa ej behöver vara större än vad som kan vara lämpligt för trafiken på bron. Stålprofilerna bärs av s.k. traverser ⑧ som vilar på lager ⑦ som klämmer fast traverserna så mycket att dessa ej vibrerar av trafiken. Antalet gummilister blir beroende av rörelsebehovet för bron. Sundquist (1995) och Sundquist (2008).

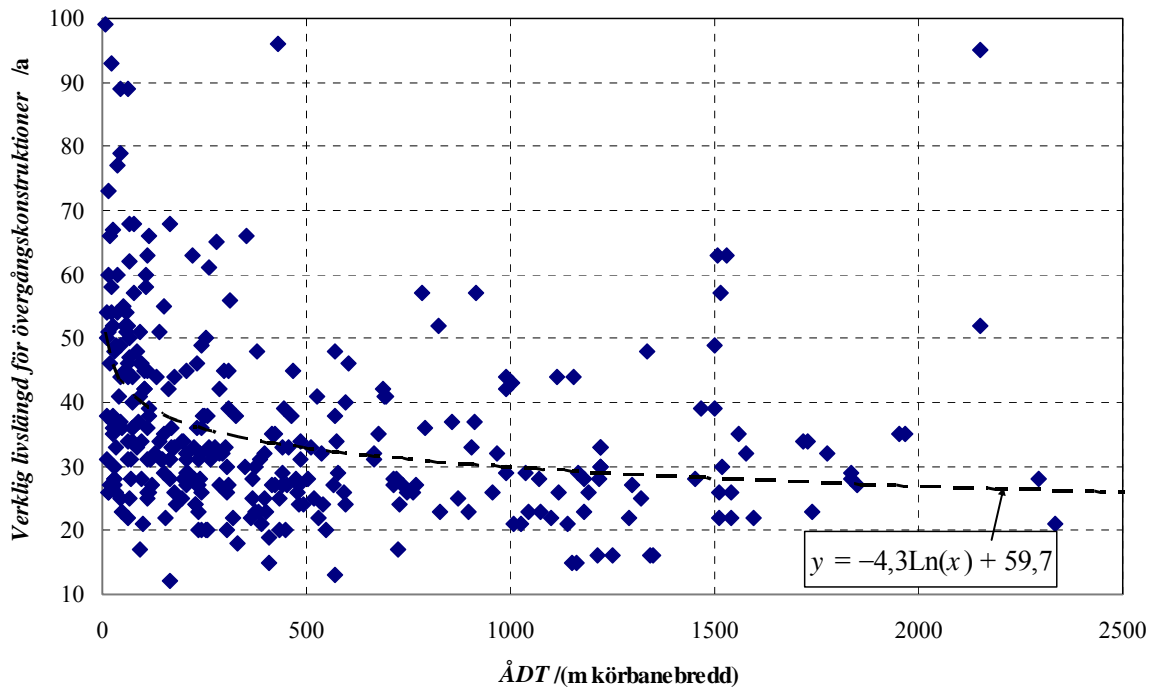


Figur 2.24 Övergångskonstruktion med flera stålprofiler och stålplattor i överytan, för bättre trafikantkomfort och mindre buller. (Från nya Svinesundsbron, innan montering.)

2.6.2 Underhållsproblem

Övergångskonstruktioner har visat sig vara underhållskrävande och det är vanligt med brister i funktionen. Nödvändig rörelseförmåga kan förhindras av smuts och is och av skador på övergångskonstruktionen. Övergångskonstruktionerna har kortare livslängd än bron i övrigt och delar eller hela konstruktionen behöver därför repareras eller bytas ut med vissa intervall, med trafikstörningar som följd. Utmattning kan vara ett problem för ståldetaljerna, *Crocetti (1998)*. Bristande täthet leder till läckage till underliggande brodelar och det kan vara svårt att få fullgod anslutning till brobaneplattans tätskikt. Det är därför vanligt med korrosion och andra nedbrytningskador i brokonstruktionen i anslutning till eller under övergångskonstruktioner. Det kan också vara svårt att få brobanan tillräckligt jämn över fogen, med dålig komfort och buller som följd. Övergångskonstruktioner bör därför så långt som möjligt undvikas.

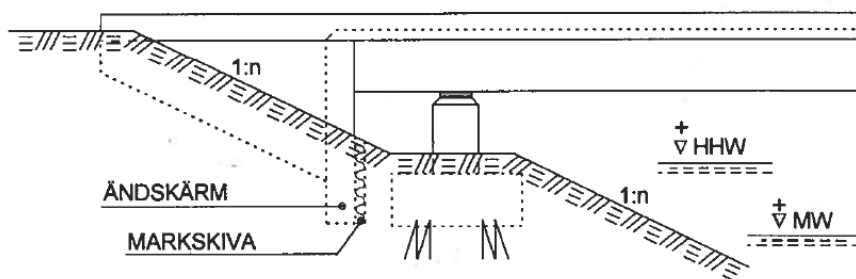
En utvärdering ur BaTMan på 714 utförda utbyten av övergångskonstruktioner visas i **Figur 2.25**. Materialet i databasen baseras på det första utbytet av övergångskonstruktion på broar med bara övergångskonstruktioner i broändar. Intressant, men som ej visas i figuren är att tidsavståndet till utbyte nummer två är mycket kortare än den tid det tar till det första utbytet. För att få ett samband mellan utbytetestid och bron utnyttjande har på x -axeln avsatts ÅDT dividerad med körbanebredden. Som syns är spridningen mycket stor, men ett tydligt samband verkar finnas mellan livslängd och trafikintensitet.



Figur 2.25 Samband mellan tid till första utbyte av övergångskonstruktion och trafik per körbanebredd. (Materialet är baserat på 714 utbyten på broar i Sverige)

2.6.3 Broar utan övergångskonstruktioner

Broar med kortare spännvidder såsom rambroar och valvbroar har länge byggts utan några övergångskonstruktioner. Under senare decennier har balkbroar med motfyllda ändskärmar blivit allt vanligare, se **Figur 2.26**. Dessa utförs utan övergångskonstruktioner med total längd upp till 50 – 60 m. De är som regel upplagda på stöd med lager innanför ändskärmen. Olika sättning hos vägbanan bredvid bron och hos brobanan kan vara ett problem som blir större på grund av brons rörelser mot och från anslutande vägbank, och som begränsar den möjliga längden hos broar utan övergångskonstruktioner. Ett sätt att begränsa dessa problem är att använda länkplatta.



Figur 2.26 Balkbro med ändskärm, principfigur, från Vägverket (1996).

Broar med integrerade landfästen, där själva landfästet är en integrerad del av överbyggnaden, har varit vanlig i Nordamerika även för broar med längre spännvidd under lång tid. Exempel-

vis har myndigheterna i Tennessee länge arbetat för att eliminera övergångskonstruktioner och sedan 1980-talet tillåtit broar med spännvidder upp till 245 m för betongbroar och 120 m för stålbroar utan några fogar, *Bettigole & Robison (1997)*. Enligt *White et al. (2010)* har över 9 000 broar med integrerade landfästen byggts i USA och ytterligare 4 000 broar utan övergångskonstruktioner men med lager.

På senare år har broar med integrerade landfästen blivit allt vanligare i Europa. I olika länder har dock delvis olika designfilosofi och praxis utvecklats, *Collin et al. (2006)*, *White et al. (2010)*, *INTAB (2010)*. I Sverige har broar med integrerade landfästen framför allt använts för samverkansbroar, *Petursson (2000)*, *Collin et al. (2005)*. Broarna har grundlagts på en rad med pålar med lågt böjmotstånd i varje broände, och pålarna har gjutits in i en förstärkt ändtvärbalk. Designfilosofin har varit att göra pålarna så vecka med avseende på rotationer och horisontell förskjutning att systemberäkningen kan göras under antagande att broöverbyggnaden är fritt upplagd på pålarna och i princip beter sig på samma sätt som de etablerade ändskärmsbroarna. Jordtrycket mot ändskärmen används för att ta upp horisontella laster och stabilisera bron i horisontalplanet. Det ger också viss inspänning med avseende på horisontell förskjutning och rotation, vilket kan medräknas i systemberäkningen. För att säkerställa att pålarna får tillräckligt låg styvhet med avseende på sidoförskjutning av påltoppen har eftergivligt material använts runt pålens övre del. Systemberäkningen av broöverbyggnaden blir härigenom relativt enkel, men pålarna utsätts för tvångsdeformationer som kan bli stora och risk för lågcykelutmattning måste beaktas, *Collin et al. (2005)*.

I andra länder i Europa har delvis annan dimensioneringspraxis utvecklats. I t.ex. Tyskland använder man ofta kraftiga grävpålar, och genom att dessa samverkar med ändstöden uppnås ramverkan, *Collin et al. (2006)*, *White et al. (2010)*. De kraftigare pålarna ger också ett större motstånd mot horisontella förskjutningar. I vissa fall grundläggs även vingmurarna på pålar och en ännu kraftigare inspänning kan åstadkommas. I framför allt Tyskland har broar med integrerade landfästen dimensionerats med hänsyn till ramverkan i ändstöden. Detta gör att konstruktionshöjden i spannmitt kan reduceras och ett slankare utseende på bron kan åstadkommas. I systemberäkningen måste samverkan med undergrunden medräknas och temperaturändringar och långtidseffekter ger tvångskrafter i överbyggnaden och på grundläggningen snarare än rörelser i broändarna.

I Storbritannien är det vanligt att grundläggning av broar med integrerade landfästen sker med hjälp av på grundsula snarare än på pålar. Syftet med detta är att brobanan skall få samma sättningar som vägbanan på anslutande vägbank. Några problem med denna typ av grundläggning har inte rapporterats, *White et al. (2010)*.



Figur 2.27 *Sunnibergbrücke i Schweiz.*

Vid grundläggning på slanka pålar enligt den ”svenska” designfilosofin förutsätts vid dimensioneringen att horisontella rörelser uppstår, och genom detaljutformningen tillser man att inspänning i grundläggningen som förhindrar dessa undviks. Motfyllnaden mot ändskärmarna begränsar visserligen rörelserna, men de rörelser som uppstår begränsar ändå hur långa broarna kan göras utan övergångskonstruktioner. Med en grundläggning som mer eller mindre förhindrar horisontella rörelser, enligt den ”tyska” designfilosofin, leder istället temperaturändringar och långtidseffekter till krafter i konstruktionen. Så länge man dimensionerar bron för dessa krafter finns ingen egentlig gräns för hur långa broar som kan byggas utan övergångskonstruktioner. Ett exempel på en lång bro utan lager och övergångskonstruktioner är den 526 m långa och krökta Sunnibergbrücke i Schweiz, se **Figur 2.27**.

2.7 Förslag till forsknings- och utvecklingsprojekt

Konstruktiv utformning av brobaneplattor har varit föremål för mycket omfattande forskning. Fortfarande finns en del frågor särskilt när det gäller dimensioneringen som bör studeras ytterligare.

Lastfördelning och dimensionering av broplatta för skjuvning från punktlaster

Som diskuterats i texten ovan så är särskilt dimensioneringen med avseende på skjuvning – speciellt vid lastangrepp nära bärande balkar – fortfarande mycket grov och kanske onödigt på säkra sidan. Troligtvis finns metoder och system att finna i den internationella litteraturen, som skulle kunna integreras i stället för den metod som används idag i Sverige.

Kontroll av verklig kapacitet hos brobaneplattor vid koncentrerade lastangrepp

Med hjälp av olinjär FE-analys studeras bärförmågan för brobaneplattor av armerad betong vid belastning med koncentrerade laster. Speciellt studeras kantbalkens bidrag till bärförmågan vid belastning nära kantbalken. Modelleringsmetoden verifieras och kalibreras om möjligt mot försök från litteraturen. Eventuellt måste kompletterande försök utföras. Genom parameterstudier i FE-modellen studeras inverkan av olika parametrar och möjliga förbättringar till förenklade beräkningsmetoder föreslås.

Optimerade och minskade armeringsmängder i brobaneplattor

Kostnader för brobaneplattor har ökat över tid, se avsnitt 5.5.1 och 5.6. I ovanstående två projektförslag diskuteras möjliga sätt för nya beräkningsmetoder som skulle kunna reducera kostnaderna. En optimering t.ex. genom ökad betongtjocklek och minskad mängd armering i kombination med förfinad analys skulle kunna reducerad produktionskostnaden.

Brokappor kontra integrerade kantbalkar

Även om denna fråga penetrerats i tidigare utredningar, se t.ex. Troive (2008), finns kanske anledning att förnyat studera frågan och särskilt söka internationella erfarenheter av lösningar med brokappor

Längre broar utan övergångskonstruktioner

Erfarenheten från andra länder visar att betydligt längre broar än vad som idag är praxis i Sverige kan utföras utan övergångskonstruktioner. Dessa behöver dock grundläggas så att rörelser till följd av temperaturändringar och långtidseffekter förhindras eller starkt begränsas. Istället måste de tvångskrafter som uppstår i broöverbyggnaden beaktas i systemberäkningen.

Frågeställningar att studera närmare är samverkan mellan konstruktion och undergrund och hur denna skall beaktas i systemberäkningarna.

Kostnader och underlag för LCC analyser

Se avsnitt om LCC, kapitel 5.6.

Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink

Det är viktigt att ta fram och kvantifiera både zinkanodens egenskaper, sprutparametrar och de betongparametrar som har stor betydelse för utmatningen av galvanisk skyddsström för att uppnå ett fullgott katodiskt skydd med termiskt sprutade offeranoder av zink. Termiskt sprutade zinkanodskikt förbrukas med tiden på grund av strömvavgivning till det ingjutna armeringsstålet och genom egenkorrosion. Anodens livslängd är sålunda beroende av anodens egenkorrosion och strömvavgivning till den korroderande ingjutna stålarmingen.

Följande forskningsbehov kan identifieras:

- Utvärdera långtidsegenskaperna hos termiskt sprutade zinkskikt på befintliga brokonstruktioner (kantbalkar).

- Definiera de parametrar som är viktiga för ett lyckat resultat och utifrån dessa, om möjligt, ta fram riktlinjer för användning av termiskt sprutade offeranoder av zink på t.ex. kantbalkar.
- Ta fram en mätmetodik utifrån resultat från laboriestudier och installationer i fält för bestämning av skyddsförmågan hos termiskt sprutade offeranoder av zink på betongkonstruktioner.

Robustare brobaneplatta

3. Tätskikt och beläggning

3.1 Inledning

Skador på brobaneplattor av betong, främst till följd av kloridinducerad korrosion, är ett kostsamt problem över hela världen och har under lång tid varit föremål för omfattande forsknings- och utvecklingsinsatser. Insatserna har resulterat i ett stort antal vetenskapliga/tekniska publikationer och en stor material- och konstruktionssektor med otaliga metoder och material för skydd och reparation av dessa betongkonstruktioner.

Att förse brobaneplattan med högkvalitativ isolering är en viktig åtgärd för längre livslängd hos betongbroar. Av Trafikverkets vägbroar är uppskattningsvis cirka 5 % brobaneyta utan isolering och övriga broar försedda med membranisolering och skyddsbetong (cirka 13 %), asfaltmastix (nästan 50 %, med eller utan polymer och i vissa fall på matta) eller polymermodifierad tätskiktsmatta (knappt 30 %).

Slitlager av betong anses vara ett alternativ om slitbetongen kan göras tillräckligt tät och sprickfri, se även kapitel 4. I norra Sverige, där vägarna normalt inte saltas vintertid, finns ett stort antal broar med slitbetong, mest i Västerbotten. Tjockleken kan variera mellan 30 och 200 mm.

Andra möjligheter som provats som korrosionshämmande åtgärd, en hel del i t.ex. USA och Kanada, är epoxibehandlade armeringsjärn och katodiskt skydd, *Colldin (1988)*. Även skyddsbehandling av armering med zink och nickel förekommer, liksom rostfri armering (rostfritt stål) och armering av fiberförstärkt polymer, *Emery (2010)*.

3.2 Varför tätskikt?

Betongen i en brokonstruktion utsätts för trafikens inverkan (olika belastningar), klimatets inverkan (t.ex. stora temperaturvariationer) samt nedbrytningsprocesser av varierande slag (under inverkan av t.ex. vatten, vägsalt och luftföroreningar), vilket kan resultera i betongskador och armeringskorrosion. Tätskiktets uppgift är således att skydda betongen från i huvudsak vatten- och vägsaltinträngning, så att inte betong eller armering skadas och brons bärlighet därmed reduceras.

Vissa basegenskaper krävs för alla typer av tätskikt. De ska vara vattentäta, beständiga mot vissa kemikalier (som vägsalt och alkali), klara höga och låga temperaturer samt vara åldringsbeständiga. De ska också passa ihop med underlaget (betongdäck och primer) liksom överliggande lager. Appliceringsprocessen är av avgörande betydelse för slutresultatet.

Det är också mycket viktigt vid val av system att ta hänsyn till, inte bara potentiella egenskaper och initiala kostnader, utan också (om möjligt) jämförande livslängder och kostnader (LCCA), se Kapitel 6.

Att förse en brobaneplatta, som redan innehåller klorider, med tätskikt kan inte stoppa armeringskorrosionen (möjligen reducera farten) men kan mycket väl vara en mer kostnadseffektiv åtgärd jämfört med totalreovering.

3.3 Olika typer av tätskikt/tätskiktssystem

De idag vanligast förekommande typerna av material för tätskikt till brobaneplattor av betong har sammanställts i **Tabell 3.1**. Mer detaljerade beskrivningar ges i de därefter följande avsnitten. För- och nackdelar med de olika typerna av tätskiktssystem beskrivs i avsnitt 3.4.3.

Tabell 3.1 *Material för tätskikt till brobaneplattor av betong.*

Tätskikt	Typer	Tjocklekar	Beskrivning
Bitumenbaserad armerad tätskiktsmatta	Med eller utan polymer (SBS, APP)*	Cirka 3 - 5 mm	Svetsas eller klistras mot primerbehandlat underlag i 1 - 3 skikt
Asfaltmastix	Med eller utan polymer (SBS) eller annan tillsats	10 - 15 mm	Appliceras på gasavledande nät
Flytapplicerade material av härdplasttyp	Epoxi, polyuretan, polyurea, akrylat samt kombinationer av dessa	≥ 2 mm	Sprutappliceras, rollas eller rakas ut på primerbehandlat underlag

* SBS = styren-butadien-styren; APP = ataktiskt polypropylen

3.3.1 Tätskiktsmatta

Tätskiktsmattan är oftast SBS-modifierad med armerande stomme av polyester, och polymerbitumen på båda sidor. Stommen är impregnerad med passande impregneringsbitumen. Fyllmedel (filler) är vanligt förekommande i bindemedlet. Bindemedlets egenskaper har avgörande betydelse för tätskiktets egenskaper och bestäms till stor del av polymertyp och halten polymer, men också av basbitumenets sammansättning. Rätt blandningsteknik i kombination med tid och temperatur är viktiga faktorer vid tillverkningen av polymerbitumen.

Vad gäller basbitumenets sammansättning är aromathalt, asfaltenhalt och medelmolekylvikt viktiga parametrar i sammanhanget. Polymerbitumenets viskositet vid hög temperatur påverkas t.ex. i hög grad av utgångsbitumenets medelmolekylvikt, liksom förhållandet mellan malten- och asfaltenfas.

Olika SBS-polymerer skiljer sig vidare från varandra med avseende på molekylvikt, molekylviktsfördelning och molekylstruktur (linjär eller radiell/grenad). I blandningsprocessen kontrolleras dispergeringsgraden ofta med hjälp av fluorescensmikroskopi. Vid god dispergeringsgrad bildar polymeren ett kontinuerligt nätverk i bitumenet, och i annat fall framstår den som öar eller fält. Vid modifieringen är det butadienblocken som svället i bitumenets maltenfas, och stabiliteten hos produkten beror på hur finfördelad strukturen är. Vid högre polymerhalter (över cirka 5 %) erhålls en kontinuerlig polymerfas med en dispergerad asfaltenrik fas i polymerfasen. Polymerhalten för polymerbitumen till tätskiktsmattor ligger som regel över 10 %.

För tätskikt med isoleringsmatta enligt *VVTBT Tätskikt på broar* föreskrivs en 5 mm tjock SBS-modifierad bitumenmatta som normalt svetsas i ett skikt mot det primerbehandlade underlaget. (Se avsnitt 3.5.1.)

3.3.2 Asfaltmastix

Asfaltmastix är en blandning av bitumen, kalkstensfiller och sand. Bitumenet kan vara polymermodifierat eller innehålla tillsats av t.ex. Trinidadasfalt (naturasfalt).

För tätskikt med tätskiktsmatta enligt *VVTBT Tätskikt på broar* föreskrivs ett 5 mm tjockt skikt av polymermodifierad (SBS) asfaltmastix på gasavledande glasfibernät. (Se avsnitt 3.6.1.1) Polymermodifierad asfaltmastix som isoleringsalternativ introducerades med BRO 94, och Trinidad används inte längre, varken i asfaltmastix eller i gjutasfalt. Med polymermodifiering istället för Trinidadtillsats introducerades en mer miljövänlig tillverkningsprocess (mindre rökgaser), vilket upplevdes som positivt i branschen. Med polymermodifierat bindemedel kan egenskaperna hos slutprodukten förbättras vid såväl lägre som högre temperatur. Polymermodifierad asfaltmastix är mindre sprickbenägen vid låga temperaturer och mer stabil vid högre temperaturer än icke polymermodifierad asfaltmastix.

I Sverige används i huvudsak asfaltmastix modifierad med polymer av SBS-typ. Även polymermodifierade produkter med Styrelf respektive EVA (etylen-vinyl-acetat) har förekommit, dock inte på broar under Vägverkets/Trafikverkets ansvar.

3.3.3 Flytapplicerade material av härdplasttyp

Olika typer av härdplastbaserade material som också används som tätskikt på broar beskrivs i avsnitten nedan. Erfarenheten av flytande/sprutapplicerade tätskiktssystem på betongunderlag i Sverige är begränsad, och inga egentliga kravspecifikationen finns idag för vägbroar under Trafikverkets ansvar.

3.3.3.1 Epoxi

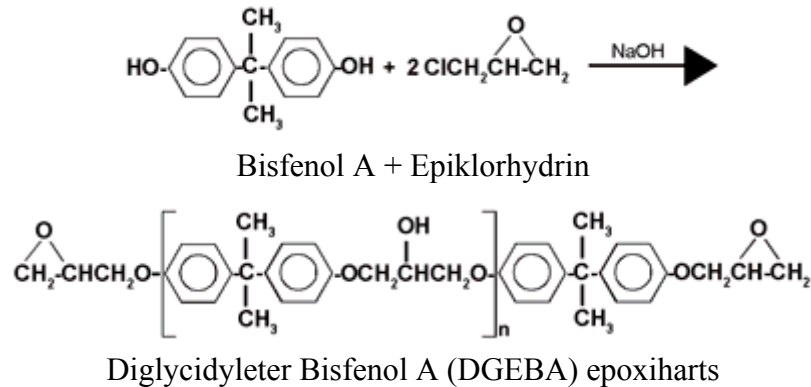
Epoxiharts framställs ur epiklorhydrin och bisfenol A, och hartsets molekylvikt (eller rättare sagt medelmolekylvikt) beror av förhållandet mellan dessa båda komponenter. **Figur 3.1** visar den avslutande kemiska reaktionsformeln för framställning av epoxi. Det är främst molekylvikten som avgör vad epoxiharts kan användas till. Lågmolekylära hartser kan hanteras utan tillsats av lösningsmedel och används i första hand till gjutningar, tjocka beläggningar etc. De högmolekylära hartserna, däremot, löses som regel i organiskt lösningsmedel, och används till färg och lack.

För att omvandla epoxiharts till epoxiplast tillsätts en härdare, som aminer. Reaktionen mellan epoxiharts och härdare är en exoterm irreversibel polyaddition, och typen av härdare är avgörande för reaktionshastigheten eller produktens s.k. potlife. Som tumregel gäller att epoxi som härdar vid rumstemperatur behöver cirka 7 dygn vid +20 °C för att uppnå maximala slutegenskaper.

Epoxiplaster kan modifieras med hjälp av spädmedel (för lägre viskositet), högmolekylära isocyanater, pigment (metalloxider) och fyllnadsmedel.

Epoxi utmärks kanske främst av sin förmåga att verka som ett mycket starkt lim mot olika typer av underlag.

Epoxi är tyvärr starkt allergiframkallande varför hudkontakt ska undvikas och skydd för händer, ögon etc. användas vid hantering. För epoxiharts med lågmolekylärt innehåll är allergirisken större än för epoxiharts utan lågmolekylärt innehåll.



Figur 3.1 *Kemiska formler för framställning av epoxiharts Augustsson (2004).*

3.3.3.2 Polyurea och polyuretan

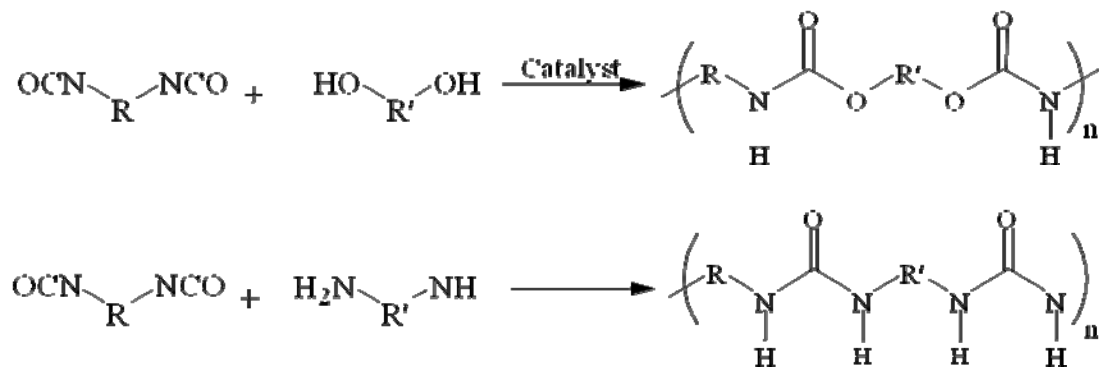
Sprutapplicerad uretan kan kemiskt indelas i tre kategorier, polyuretan (PU), polyurea (PUA) och blandningskombinationer av dessa (PU-PUA hybrider). För samtliga system gäller att de kan vara alifatiska, aromatiska eller både alifatiska och aromatiska. Pigment, filler, lösningsmedel och/eller additiv kan tillsättas.

Polyuretaner fås genom polyaddition av di- eller polyisocyanater med en di- eller polyfunktionell alkohol (polyol). De flesta polyuretaner är gjorda från tre startmaterial: långkedjiga polyoler, diisocyanat och kedjeförlängare. Katalysatorer krävs som regel.

Sprutapplicerad polyurea fås när isocyanat reagerar med polyamin. Isocyanaten kan vara monomerbaserad, utgöras av en s.k. prepolymer, en polymer eller en blandning av dessa. Prepolymeren kan innehålla både amin och/eller hydroxylgrupper, medan den andra komponenten (polyamin) bara får innehålla amingrupper. A-komponenten är alltid den del som innehåller isocyanat, och B-komponenten den aminbaserade delen.

En hybrid av polyuretan och polyurea i samma produkt erhålls vid reaktion mellan en polyisocyanatkomponent och en blandningskomponent som kan innehålla både hydroxyl- och/eller amingrupper. En eller flera katalysatorer ingår också.

Figur 3.2 visar kemiska formler för polyuretan respektive polyurea.



Figur 3.2 Kemiska formler för framställning av polyuretan (överst) och polyurea (underst).

Teknologin för sprutapplicerad polyurea introducerades under slutet av 1980-talet och användes inledningsvis som skyddslager på polyuretanisolering för tak. PDA (Polyurea Development Association som bildades år 2000) är branschorganisationen som representerar polyureaindustrin över hela världen.

Råmaterial som påverkar polyureans egenskaper är typ av isocyanat, amin och additiv. En isocyanat är en molekyl utrustad med reaktiv grupp bestående av kväve, kol och syre (NCO). Denna grupp reagerar gärna med andra molekyler såsom aminer, vatten, hydroxyl- och karboxylgrupper. Aromatiska isocyanater är i allmänhet billigare och mer mångsidiga. Alifatiska isocyanater används om UV-stabilitet krävs, men är dyrare, reagerar långsammare och är potentiellt mer giftiga än aromatiska isocyanater. Den mest vanliga isocyanaten är MDI (difenylmetan diisocyanat) som är aromatisk och används i standardprodukter av polyurea. Beträffande olika typer av aminkomponent används t.ex. alifatisk polyeteramin för mer mjuka och töjbara material, och sekundära aminer för lite längre gelningstider, bättre vidhäftning och utflytning, *Hanson (2010)*. Som kedjeförlängare i aromatisk polyurea till sprayprodukter används ofta DETDA (dietyl-toluendiamin). Kedjeförlängaren bidrar till polyureans styvhet och värmebeständighet.

Lämpliga primerprodukter för polyurea på betongunderlag kan utgöras av akryl, epoxi eller polyuretan. Akrylatbaserad primer har visat sig fungera bäst för fuktigt betongunderlag *Broekaert (2004)*.

3.3.3.3 Akrylatbaserade produkter

MMA (metylmetakrylat) är en färglös, flyktig och lättantändlig vätska med stark lukt som kan vara mycket irriterande för ögon, näsa och hals. Den kemiska formeln för monomeren är:



MMA-produkten härdar genom tillsats av en peroxid som sätter igång en s.k. radikalreaktion. I ren form utvecklar akrylaten då endast koldioxid och vatten.

Elastiska akrylater kan ha tillsats av polyuretan. Härdningstiden är kort men reaktionen kan inhiberas av fukt och luft. Eftersom flampunkten är låg (under 23 °C) betraktas produkten

som brandfarlig i samband med applicering. Uppvärmning och kontakt med öppen eld ska således undvikas helt.

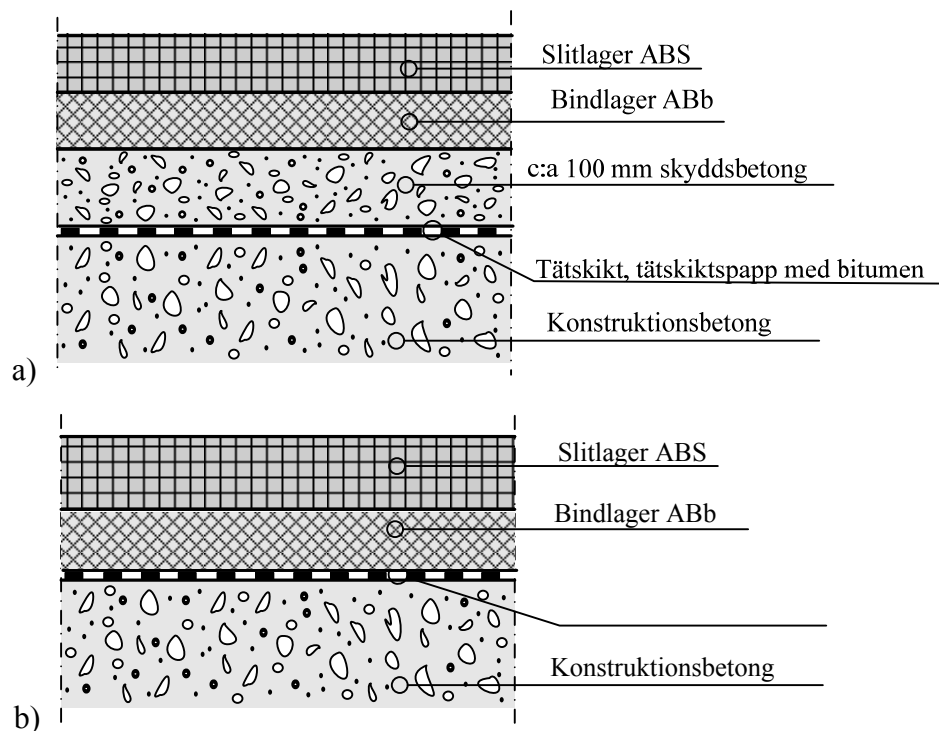
Lämplig primerprodukt till MMA beläggning är som regel MMA. Rekommenderad utläggningstemperatur kan variera mellan 0 och 50 °C.

3.3.3.4 Andra möjligheter

Andra produkter som ibland nämns som tätskikt på betong är fenolbaserade produkter, polyester och djupimpregnering med vattenglas (silikat). Dessa behandlas inte i rapporten.

3.4 System (tätskikt och beläggning)

Som inledningsvis nämnts kan brobaneplattan antingen sakna tätskikt, eller ska vara försedd men någon typ av tätskikts- och/eller skyddsbeläggning, se **Figur 3.3**.



Figur 3.3 Exempel på typbeläggningar på brobaneplatta av betong. I variant a) innehåller systemet en skyddande betongplatta. (ABS = asfaltbetong, stenrik, ABb = bindlager av asfaltbetong, medan skyddet i variant b) utgörs av asfaltskikt.

I ett tätskikts- och beläggningssystem ingår som regel primer eller förseglingskikt, tätskikt samt överliggande eventuella skydds-, bind- och beläggningsskikt. Matta eller mastix beläggs som regel med gjutasfalt eller asfaltbetong. Förekommande/möjliga kombinationer har sammanställts i **Tabell 3.2**.

Tabell 3.2 Täckskikts- och beläggningsystem till brobaneplattor av betong.

Täckskikt	Primer/försegling	Beläggningslager	Kommentar
Bitumenbaserad armerad täckskiktsmatta	- bitumenlösning, - epoxi, epoxiförsegling med avsandning, - akrylat	- gjutasfalt, - asfaltbetong	Epoxiförsegling och beläggningslager av gjutasfalt ger det säkraste och mest hållbara systemet.
Asfaltmastix på gasavledande glasfibernet	- bitumenlösning	- gjutasfalt, - asfaltbetong	Primerbehandling endast längs kanter.
Epoxi	- epoxi	- gjutasfalt, - asfaltbetong,	Kravspecifikation saknas.
Polyuretan	- epoxi	- polyuretan - gjutasfalt, - asfaltbetong,	Kravspecifikation saknas.
Polyurea	- akrylat, epoxi, polyuretan	- polyurea, - gjutasfalt, - asfaltbetong,	Kravspecifikation saknas.
Akrylat	- akrylat	- akrylat, - gjutasfalt, - asfaltbetong,	Kravspecifikation saknas.

I ett system med gjutasfalt som skydds- och/eller beläggningslager på täckskiktet kan även gjutasfalten räknas som täckskikt. Gjutasfalt beskrivs därför kortfattat i nästa avsnitt.

3.4.1 Gjutasfalt

Till skillnad från konventionell asfaltbetong gjuts gjutasfalt i täta skikt (ingen vältning) till en tät beläggning med hög slitstyrka på t.ex. broar och parkeringsdäck. Andra användningsområden är till golvbeläggning, isolering, takbeläggning, beläggningar på gator och trottoarer, m.m. Gjutningen kan utföras för hand eller med hjälp av gjutasfaltläggare. Tjockleken hos ett gjutasfaltlager varierar som regel mellan 25 och 40 mm. Gjutasfalt som beläggningslager specificeras enligt EN 13108-6.

Gjutasfalt har högt bindemedelsinnehåll vilket bidrar till goda vidhäftnings- och åldringsegenskaper. God vidhäftning och täthet medför också mindre risk för stensläpp och skador i beläggningen till följd av vatten. God stabilitet och deformationsresistens uppnås med styvare mastix (hög fillerhalt) och bindemedel samt optimerad stenmaterialgradering. Naturasfalt (Trinidadasfalt) har länge använts som förstyvande bindemedelstillsats i gjutasfalt (och asfaltmastix). Tillsatsen utgörs av en raffinerad mycket hård naturasfaltprodukt bestående av bitumen, mineraler och en del andra organiska föreningar. Även polymerer ger som regel en förstyvande effekt vid högre brukstemperaturer och har under senare tid ersatt naturasfalten i svensk gjutasfalttillverkning. Den vanligaste polymeren i gjutasfalt är SBS. Att polymeren är

beständig vid höga tillverknings- och utläggningstemperaturer är speciellt viktigt för gjutasfalt. Vanligast i Sverige är ett polymerbitumen med produktnamnet Pmb 32 från Nynas AB. Polymerhalten hos produkten förväntas uppgå till cirka 4 vikt-%.

Flyttillsatsmedel kan tillsättas för att kunna sänka temperaturen vid tillverkning och utläggning av asfaltmassa. För gjutasfalt, som normalt läggs ut vid högre temperatur än konventionell asfaltmassa, är temperaturreducerande åtgärder av speciellt stort intresse. Asfaltbetong med standardbitumen (70/100 eller 50/70) eller med polymermodifierat bitumen tillverkas och bearbetas som regel vid temperaturer på 160-180 °C, medan gjutasfalt som nämnts kräver högre temperatur. I Tyskland förekommer utläggning av gjutasfalt vid temperaturer upp till 250 °C, och bindemedel med vaxtillsats används för att kunna sänka utläggningstemperaturen. I Sverige används gjutasfalt mest för broar och parkeringsdäck, och tillverkas då med polymermodifierat bitumen. Utläggningstemperaturen ligger som regel kring 200°C.

Typiska viskositetssänkande additiv för bitumen är paraffinvaxer, olika montanvax-baserade produkter, oxiderat polyetylenvax, termoplastiska hartser och fettsyra-amid. Molekylviktsfördelningen för dessa produkter varierar, liksom den uppnådda effekten på asfaltbeläggningens eller gjutasfaltens egenskaper. Mest använt i praktiken är FT-paraffin och montanvaxer. Energivinster anses vara en av de stora fördelarna med vaxmodifiering. Reducerad tillverkningsstemperatur medför också mindre emissioner, som vid tillverkning och utläggning under vissa förhållanden kan vara besvärande eller t.o.m. hälsovådligt.

Som resultat av ett SBUF samarbetsprojekt mellan KTH och GAFS (Gjutasfaltföreningen i Sverige) sen 2007 används nu upp till 4 % vaxtillsats i alltmer ökande omfattning i Sverige. Tillsatsen har gjort det möjligt att sänka utläggningstemperaturen med 20 - 40 °C med bibehållna goda funktionsegenskaper hos gjutasfaltens *Edwards, Butt och Tasdemir (2010), Miderman och Mizanur (2009), Butt (2009)*. Vaxet köps, enligt uppgift, in till gjutasfaltverket för mellan 100 och 200 kr per ton. Drygt 14 % av all gjutasfalt las i Sverige 2010 var med vaxtillsats.

Utläggning av gjutasfalt från Högakustenbron (1992) visas i **Figur 3.4**.



Figur 3.4 Utläggning av gjutasfalt på bro. Foto: Domiflex AB.

3.5 Problem och möjligheter

Avsnitten i detta kapitel behandlar en del viktiga aspekter rörande tätskikt till betongbroar. Problem som blåsbildning och dåligt underlag tas upp, liksom för- och nackdelar med olika typer av system.

3.5.1 Blåsbildning

Blåsbildning vid isolering av betongbroar har diskuterats och beskrivits i ett stort antal publikationer under de senaste mer än 60 åren *Schütz (1945), Vater (1983), Sjöholm (1998), Lagerblad (1998, 1999), Hedenblad (1999), Edwards (1999), Nilsson (2006), Wolff (2009)*. Flera olika processer och fenomen är inblandade och problematiken är ännu inte till fullo klarlagd. Även på träbroar kan under vissa omständigheter mycket kraftig blåsbildning uppstå, *Edwards (2003)*.

Blåsbildning i asfaltlager på broar, eller i tunnlar och tråg, *Edwards (2000)*, kan ibland uppstå för tätskiktssystem med tätskiktsmatta på betongunderlag. Betongens kvalitet och fukttinhåll, liksom väderförhållanden och utförande, är viktiga parametrar som har betydelse för uppkomsten av blåsor mellan betong och tätskikt. En möjlig orsak är höga tryck mellan tätskikt och betong som kan uppstå till följd av höga temperaturer i samband med utläggning av ett asfaltlager ovanpå mattan, speciellt med gjutasfalt som kräver högre utläggningstemperatur än konventionell asfaltmassa (jfr. avsnitt 3.4.1). Fukt i betongen kan ha förödande inverkan och primerbehandlingen är av avgörande betydelse. Detta är känt sedan länge.

Enligt Trafikverkets specifikationer för betongbroar ska betongen alltid primerbehandlas före applicering av mattan. Ytdraghållfastheten mellan matta och det primerbehandlade betongunderlaget ska uppgå till minst 0,5 MPa vid 20 °C. Vid högre temperaturer kommer vidhäft-

ningen att sjunka (vid 30 °C är motsvarande värde 0,2 MPa). Överbyggnadens belastning förväntas tillsammans med vidhäftningsstyrkan mellan matta och betong överstiga den totala påverkan från vattentryck, ångtryck och lufttryck som kan uppstå under mattan. Med en total beläggningstjocklek på maximalt 90 mm (för svenska broar) blir beläggningens bidrag cirka 0,002 MPa och vidhäftningen därmed av helt avgörande betydelse. I fallet tunnlar och tråg har grundvattentrycket på en betongplatta i ett speciellt fall beräknats uppgå till 0,04 MPa *Hedenblad (1999)*.

Försegling med epoxi (två lager) minskar risken för blåsbildning liksom tjockare beläggningsslager på mattan (värmeisolerande effekt). Dagens betongkvaliteter är mycket täta och additiv tillsätts ibland, med möjlig negativ effekt på vidhäftningen.

Blåsbildningsproblematik med tätskikt på betongbroar har tagits upp och behandlats vid en rad seminarier i Sverige. Några listas nedan.

- Seminarium, GAFS, Stockholm 2003;
- Tätskikt och beläggning på broar – Kunskapsutbyte, Vägverket, Borlänge 2004;
- Broteknikdag, Vägverket, Söderköping 2005;
- Tätskikt och beläggning på broar, Vägverket, Göteborg 2007;
- Betongunderlag och tätskikt på broar, CBI/GAFS/Trafikverket, Stockholm 2010.

Blåsbildning på en mindre bro visas i **Figur 3.5**.



Figur 3.5 *Blåsbildning på betongbro. a) Blåsor har markerats. b) Reparationsarbetet har inletts, Edwards och Westergren (1999).*

3.5.2 Behandling av underlag

Vidhäftningen till betongen blir aldrig bättre än betongens egen ytdraghållfasthet, och förarbetet är därför av avgörande betydelse. Alla föroreningar (som damm, olja, fett och kemikalier) måste avlägsnas liksom eventuell betonghud och betonghårdare. Detta kan genomföras med slipning, fräsning och/eller blästring. Dammsugning eller vattenspolning kan vara nödvändigt för att få en riktigt ren betongyta med god möjlighet för en primerprodukt att tränga ner i betongen. Även lagning av skador i betongen är problematiskt och måste utföras

med stor noggrannhet och anpassade reparationsprodukter. Ett sätt kan vara med hjälp av specialkomponerat epoxilim och nytt reparationsbruk. Avjämning av betongöverytor kan vid reparationsarbeten göras med asfaltspackel eller polymermodifierad asfaltmastix.

Betongytan måste vidare vara stark nog för tätskiktet, så att t.ex. inte eventuella spänningar som kan uppstå i gränsskiktet mellan en skyddsbeläggning och betong ger upphov till vidhäftningsförlust, och beläggningen därmed lossnar från betongen. Ytdraghållfastheten hos betongunderlaget ska därför bestämmas på plats.

Yttemperatur och fuktförhållanden är andra viktiga faktorer att ta hänsyn till i strävan mot ett gott beläggningsresultat. Yttemperaturen kan i många fall ha avgörande betydelse för härdningstiden hos ett plastmaterial. Beträffande primerprodukter i det aktuella sammanhanget är epoxi vanligtvis mest temperaturkänsligt och akrylprimer minst känsligt. För att inte riskera att fukt bildas på en betongyta under utläggningsarbetes gång bör yttemperaturen ligga minst 3 °C över daggpunkten (den temperatur vid vilken luften är fuktmättad och fukten därmed kondenserar som vatten).

Betong ska som regel alltid primerbehandlas/förseglas före tätskikt eller skyddsbeläggning av något slag genomförs. Behandlingen utförs för att öka vidhäftningen mot underlaget. Primern förväntas tränga ner i betongen och väta underlaget, ha en viss fuktavvisande och dammbindande effekt samt eventuellt kunna reducera blåsbildning. Primer och tätskikt/skyddsbeläggning ska vara anpassade till varandra och utgöra ett fullt utprovat system.

Det finns en rad olika typer av primerprodukter för skyddsbehandling av betong, såsom epoxiprimer, uretanprimer och akrylprimer. Bitumenbaserade primerprodukter används för bituminösa tätskiktssystem.

Bitumenprimer har länge använts till tätskikts- och beläggningsmaterial med bitumenmatta eller asfaltmastix. Bitumenprimern består som regel av polymermodifierad bitumen, lösningsmedel och vidhäftningsmedel.

Epoxiprimer är vanligtvis ett tvåkomponentsystem. Primerprodukten kan vara lösningsmedelsfri, innehålla lösningsmedel eller vara vattenemulgerad. (Det finns för- och nackdelar för samtliga varianter.) Generellt för epoxiprimer gäller att härdningstiden är starkt beroende av temperaturen, och att denna bör ligga på minst cirka 10 °C. Om epoxiprimer används tillsammans med beläggningsskikt av polyurea formuleras den ofta så att den är kemiskt reaktiv tillsammans med polyurea för att öka vidhäftningen, *Abbott (2010)*.

Uretanprimer kan utgöras av en eller två komponenter och, liksom epoxiprimer, vara lösningsmedelsfri, innehålla lösningsmedel eller vara vattenemulgerad. Primern härdar, till skillnad från epoxi, bra även vid låga temperaturer, men är ändå starkt beroende av både fukt och temperatur.

Akrylprimer utgörs av en komponent och kan vara antingen lösningsmedelsbaserad eller vattenbaserad. Den torkar mycket snabbt, men har som regel sämre vidhäftning än epoxiprimer såväl som uretanprimer. Den är billigare än epoxi och uretan.

Råheten/makrostrukturen hos betongen är således en viktig parameter och ska därför, enligt Trafikverkets föreskrifter, kontrolleras av tätskiktsentreprenören före arbetets start. Medeltexturdjupet ska vid denna kontroll ligga inom intervallet 0,6 till 0,8 mm. Kontrollen genom-

förs enligt standardiserad volymetrisk metod (s.k. Sand-pach metod) och föreskriven frekvens på bron. Det åligger därefter tätskiktsentreprenören att blåstra betongytan innan primer och tätskikt appliceras. Blästringen genomförs för att få bort smuts och rugga upp underlaget, men kan inte användas för att justera ojämnheter som uppstått vid betonggjutningen. Betongytan hos en brobaneplatta, som ska förses med tätskikt och beläggning, förutsätts således ha en viss godkänd makrostruktur. I praktiken händer emellertid förhållandevis ofta att kravet på makrostruktur hos betongytan som överlämnas till tätskiktsentreprenören är långt ifrån uppfyllt, och att slipning eller fräsning skulle behövas för att justera detta. Som regel finns ingen tid för denna typ av åtgärd och tätskiktsentreprenören tvingas spackla upp, ibland mycket omfattande delar av brobaneplattan, för att över huvud taget kunna lägga ut tätskiktet på bron. Problem som kan uppstå med tätskikt som applicerats på undermåligt underlag är framförallt blåsbildning till följd av dålig vidhäftning mot underlaget. Exempel på undermåligt förarbete på en bro visas i **Figur 3.6**.



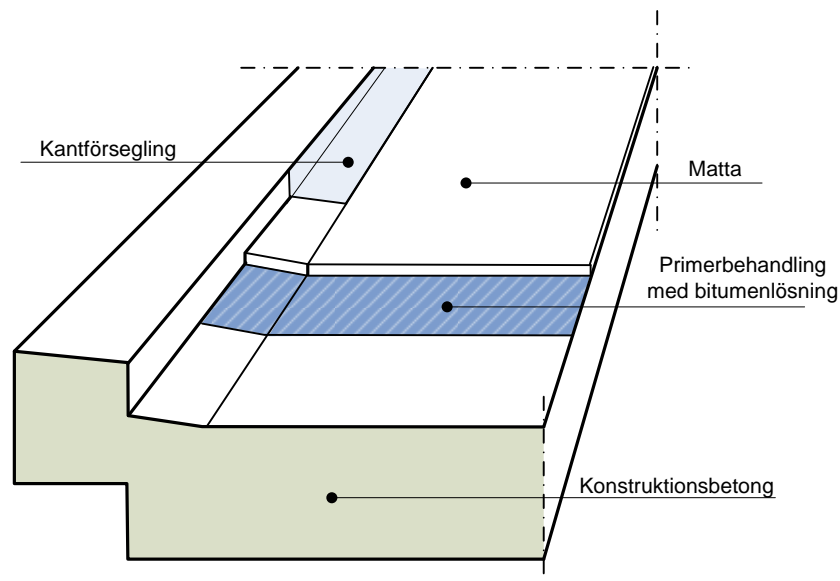
Figur 3.6 Nymonterat grundavlopp på renoveringsbro och sprickor i nygjuten brokonstruktion Edwards & Kinnmark (2010).

3.5.3 För- och nackdelar med olika system

Inget tätskiktssystem är idealt, utan alla har sina för- och nackdelar av mer eller mindre avgörande funktionell betydelse. En del väsentliga för- och nackdelar sammanfattas i avsnitten nedan för system med tätskiktsmatta, asfaltmastix och flytapplicerat material av hårdplasttyp. Tabell 3 ger en generell överblick.

3.5.3.1 Polymerbitumenmatta

Prefabricerade polymerbitumenmattor är mycket vanligt förekommande i Europa. I Sverige introducerades tätskiktssystem med polymerbitumenmatta med Bronorm 88 (se vidare avsnitt 3.6.1.1). Se också **Figur 3.7**.



Figur 3.7 Exempel på tätskikt som består av en 5 mm tjock SBS-modifierad bitumenmatta som svetsas i ett skikt mot det primerbehandlade underlaget.

Till systemets fördelar kan speciellt nämnas att produkten är förtillverkad. Den blir därmed lätt att kontrollera och kvaliteten sannolikt bättre och jämnare. Efterkontroll och eventuella reparationer är också förhållandevis lätt att genomföra. Tätskiktets spricköverbyggande förmåga är en mycket viktig egenskap, speciellt i klimat med låga temperaturer, men förmågan varierar beroende på typ av polymerbitumen och stomme. För en SBS-modifierad tätskiktsmatta med polyesterstomme är den spricköverbyggande förmågan mycket god. Tätskikt med polymerbitumenmatta ger också god vidhäftning till underlaget och skjuvhållfasta förbindelser med underlag och överliggande asfaltlager.

Systemet kräver fackmannamässig applicering och betongytans kvalitet och jämnhet har avgörande betydelse för slutresultatet. Överlappning är ett känsligt moment och svetsningen måste utföras så att varken matta eller betong överhettas. Blåsbildning är, som redan nämnts, ett problem och tätskiktet bör därför inte ligga oskyddat under längre tid än nödvändigt. Om tätskiktsmattan är belagd med granulat kan fukt dessutom lätt ansamlas i hålrum mellan granulat, och blåsbildning kan uppstå vid utläggning av skyddslagret, om detta är gjutasfalt.

Tätskiktsmattor av oxiderat bitumen används idag nästan inte alls (jfr. **Tabell 3.4**).

Svetsapplicering av tätskiktsmatta på Öresundsbron (1997) visas i **Figur 3.8**.



Figur 3.8 Polymermodifierad tätskiktsmatta svetsappliceras på betongbro.

3.5.4 Asfaltmastix

Asfaltmastix på gasavledande glasfibernät är ett vanligt förekommande isoleringssystem på svenska broar, men inte lika vanligt i övriga delar av Europa, jfr. **Tabell 3.4**. Mastixen förseglas som regel mot underlaget vid kantbalkar och fogar. Svenska erfarenheter av systemet är i huvudsak goda. Till systemets fördelar räknas speciellt skarvlöshet. Problem med tätskikt av asfaltmastix kan uppstå om glasfiberväven blir inbäddad i tätskiktet eller om gasutloppen är täta så att de inte får avsedd gasavledande verkan.

Asfaltmastix måste dock betraktas som en färskvara, vilket innebär att långa transporter och lång uppvärmningstid kan försämra produktens kvalitet. Eventuell blåsbildning är, liksom för tätskiktsmatta, en nackdel. Asfaltmastix utan polymertillsats är sprickbenägen vid låga temperaturer, men kan med polymertillsats göras mindre sprickbenägen och mer stabil. Med polymertillsats blir emellertid produkten mer transportkänslig (och dyrare).

Olika typer av tätskikt med asfaltmastix- eller gjutasfaltisolering har under åren förekommit i andra europeiska länder. Om tätskiktet läggs på gasavledande skikt av t.ex. glasfiberfilt (istället för glasfibernät) blir tätskiktssystemet ”löst liggande” på brobaneplattan och får därmed bättre spricköverbryggande förmåga. Men risken för att vatten ska sprida sig under tätskiktet, om lokala skador uppstår, ökar liksom risken för att förskjutningar av tätskikt och beläggning ska uppstå.

Manuell utläggning av asfaltmastix på glasfibernät visas i **Figur 3.9**.



Figur 3.9 Asfaltmastix läggs ut på betongbro.

3.5.4.1 Flytapplicerat material av härdplasttyp

Som förhoppningsvis har framgått av tidigare avsnitt (3.3.3) handlar det här om olika teknologier som kan anpassas beroende på typ av applikation. Det är därför svårt att behandla produkterna/systemen under samma rubrik. Generellt för produkterna gäller att de är fria från skarvar, vilket räknas som en fördel. Produkterna tillverkas emellertid på platsen, vilket ställer stora krav på blandnings- och applikationsteknik. Kvalitetskontroll blir följaktligen svårt att utföra och tätskiktets tjocklek kan variera över brobaneplattan. Hälsoriskerna kan vara betydande och arbetet därför kräva speciella säkerhetsåtgärder och specialutbildad personal. Systemen blir som regel dyrare än motsvarande bituminösa system.

Epoxi

Till positiva egenskaper för epoxi räknas (förutom vattentätthet) kemikalieresistens och mycket goda vidhäftningsegenskaper. Den spricköverbryggande förmågan är däremot som regel liten och brukar tas upp som en svag sida hos epoxi. Epoxi är starkt allergiframkallande varför hudkontakt ska undvikas och skydd för händer, ögon etc. användas vid hantering. Rätt blandningsförhållande är avgörande för produktens slutegenskaper liksom goda väderförhållanden.

Polyuretan och polyurea

Till fördelar med tätskikt av polyuretan eller polyurea räknas spricköverbryggande förmåga. Standardprodukter av polyurea är generellt uttryckt hårda och flexibla, har hög smältpunkt och är som regel resistent mot nedbrytning av olika slag, kemisk attack och oxidation. Produkten härdar snabbt, även vid mycket låga temperaturer, och är inte fuktkänslig.

Polyuretan har emellertid begränsad användning som tätskikt på grund av produktens fuktkänslighet och bör inte användas om fukthalten på underlaget överstiger 5 % och/eller vid fuktig väderlek *Broekaert (2004)*. Isolering med polyuretan på en betongbro provades i Sverige 1988 med dåligt resultat *Colldin (1990)*. Tätskiktet som avlägsnades redan efter två år hade efter hand lossnat från underlaget (polyuretanprimer). Vidhäftningen mellan tätskikt och skyddslager av asfaltbetong respektive gjutasfalt var vidare undermålig och i fallet gjutasfalt

hade dessutom kraftig blåsbildning uppstått till följd av den fukt tätskiktet absorberat under natten mellan tätskikts- och skyddslagerutläggning. (Enligt laboratorieprovning absorberade det härdade tätskiktet 3-4 vikt-% vatten.)

Kostnaden för system med polyurea (och även polyuretan) betraktas som ett problem, eftersom råmaterialens pris är högt, och dyr initial investering i utrustning dessutom krävs *Broekaert (2004)*. Ett exempel på användning i Sverige är nya Botniabanan (där en produkt från Elmico använts).

Blandningsprocessen är av oerhört stor betydelse för sprutapplicerad polyurea. Eftersom blandningstiden är kort, och produktens härdningshastighet mycket hög, krävs att blandningen utförs under tryck (mellan 150 och 250 bar), liksom att viskositeten är tillräckligt låg (under 100 mPa s) vid appliceringstemperatur *Broekaert (2004)*. Specialutbildad personal iförd adekvat skyddsutrustning är ett måste i sammanhanget. Detta gäller även polyuretanbaserade produkter (se avsnitt 3.3.3.2). Vid sprutappliceringen utsätts utföraren för isocyanatångor eller aerosol. **Figur 3.10** visar hur det kan se ut vid en kurs för utförare av polyureasystem.

Akrylat

Till akrylatproduktens starka sidor räknas hög rephållfasthet och slitstyrka, snabb härdningstid samt mycket god färgstabilitet. Till produktens svagare sidor brukar räknas stark lukt, känslighet för höga temperaturer och fukt samt risk för krympspänningar. Produkter med fyllmedel förekommer för att uppnå bättre vidhäftning.



Figur 3.10 Utbildning för utförare av polyureasystem (PDA The Hanson Group, USA).

Tabell 3.3 Olika typer av tätskikt till betongbroar – Fördelar och nackdelar.

Tätskiktssystem	Fördelar	Nackdelar
Polymerbitumenmatta	<ul style="list-style-type: none"> - Förtillverkad - Lätt med efterkontroll och eventuella reparationer - Spricköverbryggande 	<ul style="list-style-type: none"> - Överlappning - Svetsning (överhettning av tätskikt och betong) - Blåsbildning - Tätskiktet bör ej ligga oskyddat
Asfaltmastix (med polymer)	<ul style="list-style-type: none"> - Skarvlöst 	<ul style="list-style-type: none"> - Färskvara - Blåsbildning
Flytapplicerat system av hårdplasttyp - Generellt	<ul style="list-style-type: none"> - Skarvlöst 	<ul style="list-style-type: none"> - Blåsbildning - Svår kontroll - Flera skikt, tjocklek - Exakta blandningsförhållanden, speciell teknik - Hälsospekter - Kostnad
Epoxi		<ul style="list-style-type: none"> - Ej spricköverbryggande
Polyuretan	<ul style="list-style-type: none"> - Spricköverbryggande 	<ul style="list-style-type: none"> - Fuktkänsligt
Polyurea	<ul style="list-style-type: none"> - Spricköverbryggande - Snabb härdning - Ej klimatkänsligt 	
Akrylat	<ul style="list-style-type: none"> - Snabb härdning 	<ul style="list-style-type: none"> - Krympspänningar - Stark lukt - Brandrisk

3.5.5 Nedbrytning och livslängd

Livslängden hos en betongbro varierar beroende på inre och yttre nedbrytningsmekanismer relaterade till design, materialkvaliteter, utförande, skyddsbehandling, miljö, påkänning samt inspektions- och underhållskvalitet. Brodetaljer som tätskikt och beläggning spelar en viktig roll för brons beständighet (jfr. avsnitt 3.1). Medellivslängden för det äldre brobeståndet beräknades för ett tjugotal år sedan uppgå till cirka 65 år, men har sedan förväntats stiga genom en rad kvalitetsförbättrande åtgärder såsom bättre tätskikt- och beläggningssystem. Livslängden för tätskiktet på en bro har uppskattats till 15-20 år *Jeppsson (1994)*, men kan i många fall bli betydligt längre. Skador kan med tiden uppstå i form av t.ex. sprickbildning, vidhäftningsförlust och uttorkning. Slitlagrets livstid är normalt kortare, men varierar kraftigt med trafikbelastningen. Om tätskiktet är försett med skyddslager av gjutasfalt skadas det inte vid eventuella byten och/eller reparationer av slitlagret.

Läckage genom själva tätskiktet (under en beläggning) är emellertid inte vanligt och kan i förekommande fall bero på skador som uppkommit redan i byggskedet. Känsliga ställen för läckage på en bro är däremot vid kantbalk och mot ytavlopp eller andra genomföringar.

Risken för att läckage ska uppstå bör emellertid öka över tiden och det behövs därför metoder för att avgöra om tätskiktet fortfarande är tätt.

3.5.5.1 Tillståndsbedömning och oförstörande provning på bron

Skador på tätskiktet kan vara svårt att upptäcka och oförstörande provning (NDT, Non-Destructive Testing) av tätskiktets funktion på bron har efterlysts. En kartläggning av status och möjligheter till detta genomfördes för några år sedan vid KTH *Karlsson (2005)*. I rapporten föreslås GPR (Ground Penetrating Radar) och potentialmätning som möjliga indikativa metoder.

Efter kontakt med författaren kan konstateras att försök därefter genomförts med GPR på en bro 5-132-1, längs väg 752 i Östergötland under hösten 2008. Tyvärr visar det sig svårt att från dessa försök bedöma huruvida georadar är en lämplig metod för detektering av läckage på broar. Anledningen till detta kan härledas till bl.a. brons mindre lyckade uppbyggnad, misslyckad tillsats av fukt, dålig detektering samt problem med utsläckning av radarpuls till följd av salttillsats. Emellertid visade sig metoden bra för att studera brons struktur ned till armeringen. Ingen rapport har ännu publicerats om detta *Karlsson (2011)*.

Utvecklingen av GPR beskrivs ingående i *Jol (2009)*, Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Här nämns bland annat det arbete som utfördes av Ulriksen vid LTH på 1980-talet.

Omfattande studier med GPR har pågått under många år vid EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology). En del av arbete beskrivs i en nyligen publicerad doktorsavhandling *Hugenschmidt (2010)*. Detektering av fukt och klorider med hjälp av GPR ingår också i ett pågående projekt som finansieras av Swiss National Science Foundation (Non-destructive detection of chlorides and moisture in multi-layer-structural elements such as concrete bridge decks using high frequency electromagnetic waves). GPR data behandlas med avancerade metoder, och fältstudier ingår i projektet. Avancerat arbete pågår även inom EU-projekt ISTIMES – Integrated System for Transport Infrastructures surveillance and Monitoring by Electromagnetic Sensing, Joint Call FP7-ICT-SEC-2007-1, grant 225663.

Under 1998 genomfördes tester med IR termografi på fyra broar i Schweiz med olika typer av tätskikts- och beläggningssystem. Ett nytt s.k. EMPA Mobile IR-measurement system (EMIR) användes för detta. Resultaten visar att icke synliga skador som blåsor och håligheter kan upptäckas i asfaltkonstruktionen under förutsättning att mätningar genomförs under pågående temperaturväxling i fält. Man detekterade blåsor mellan olika lager ner till som mest 60 mm i konstruktionen. För optimala resultat, d.v.s. för maximal termisk kontrast och temperaturgradient vid mätningarna, bör dessa utföras på torra ytor mellan klockan 12 och 14 för beläggningar och mellan klockan 11 och 12 för tätskikt, konkluderas i studien. Resultaten bör även verifieras genom borrhärnor eller visuell bedömning *Oba & Partl (2000)*.

NDT används idag för att lokalisera befintlig armeringskorrosion eller skador i betongen. Mindre omfattande betongskador kan som regel inte upptäckas. Delaminering/vidhäftningsförlust i ett tätskikt kan lokaliseras, men om denna ligger mellan tätskiktsmatta och över-

liggande beläggningsslager eller om delamineringen innehåller vatten, t.ex. beroende på läckage, kan inte avgöras i dagsläget, *Møller (2011)*.

3.5.5.2 Åldring hos asfaltmastix på Stockholms broar

Ett omfattande undersökningsprogram med bl.a. fönsterundersökning startades upp inom Stockholms gatukontor under mitten av 1980-talet för att försöka få en uppfattning om tillståndet hos bl.a. tätskiktet på stadens äldre broar och viadukter. Konventionell asfaltmastix började användas på vissa broar i Stockholm redan på 1910-talet, under skyddsbetong, och infördes generellt på 1940-talet *Bjurholm (2010)*. Skyddslager med asfaltbeläggning (ABT 6, 15 mm) ersatte skyddslager av betong kring 1975, och prefabricerade tätskiktsmattor började användas 1990. Undersökningen omfattar således asfaltmastix under skyddsbetong och mastixens eventuella nedbrytning/försprödning till följd av i huvudsak vatten, salt och syre. Som undersökningsmetod fram till 2002 ingick konventionell mjukpunkt och brytpunktsbestämning på återvunnet bitumen från mastixen. Från 2003 gick man över till BBR (Bending Beam Rheometer) -analys på mastixen. Utveckling av provningsmetodik genomfördes vid VTI *Edwards & Salomonsson (2000)*. Enligt den aktuella undersökningen har asfaltmastix under skyddsbetong en genomsnittlig livslängd på minst 40 år. Den asfaltmastix som numera läggs som tätskikt på Stockholms broar är polymermodifierad.

Fönsterupptagning visas i **Figur 3.11**.



Figur 3.11 Fönsterupptagning på bro i Stockholm.

Tätskiktsmaterial av hårdplasttyp anses generellt ha mycket god åldringsbeständighet (mot vatten salt och syre), men svenska erfarenheter saknas.

3.6 Regelverk

Tätskiktens uppbyggnad har varierat från land till land i Europa, liksom kravspecifikationer och provningsprogram. Anledningar till detta har att göra med olika klimatförhållanden, tidigare erfarenheter, ekonomiska aspekter och (inte minst) tradition och filosofi. I detta avsnitt beskrivs i någon mån utvecklingen av tätskikt och regelverk i Sverige.

3.6.1 Sverige

De i Sverige tidigast förekommande typerna av tätskikt på betongbroar är asfaltstrykning, epoxitjära och membranisolering. Kring 1970 blev asfaltmastix på gasavledande glasfibernät mest vanligt, och med Bronorm 88 infördes tätskiktssystem med polymerbitumenmatta.

Asfaltstrykning innebar förbehandling av betongunderlaget med bitumenlösning följt av en eller två strykningar med bitumen. Även impregnering och strykning med asfaltemulsion förekom. Dessa metoder används inte längre.

Epoxitjära på hela brobaneytor har tidigare förekommit, men används numera endast för kantförsegling. Svenska erfarenheter från laboratorieprovning och fält har visat att epoxi är mindre lämpligt som tätskikt på betongbroar, kanske mest på grund av otillräckliga lågtemperaturegenskaper (jfr. avsnitt 3.5.3).

Membranisolering bestående av två lager mineralfiberfilt (YAM 1200/50), klistrad med bitumen samt skyddsbetong, var relativt vanligt förekommande före 1970. Tätskiktstypen förekommer fortfarande men används sällan. Enligt VVTBT utförs själva tätskiktet med tre bitumenlager (B 70/100) och två mellanliggande lager av tätskiktspapp.

Membranisolering utan skyddsbetong är den benämning som använts för prefabricerade tätskiktsmattor som Bituthene (självhäftande). Bituthene har använts mest på mindre broar och används inte längre.

Asfaltmastix, även kallat gjutasfaltisolering, användes redan under andra delen av 1800-talet på ett stort antal valvbroar i Europa, men fick med tiden dåligt rykte och fick stå åt sidan för olika typer av membranisolering. Gjutasfalt kom däremot att användas allt mer som gatu-beläggning med gott resultat, och nya försök gjordes med gjutasfalt för tätskiktssändamål, speciellt i Storbritannien. I Sverige kom tekniken att utvecklas under 1940-talet. Blåsbildning i gjutasfalt blev inledningsvis ett stort problem och olika typer av gasavledande skikt (t.ex. öppen asfaltbetong och impregnerad papp) provades utan framgång. Gjutasfalten/asfaltmastixen lades i annat fall direkt på betongunderlaget som förbehandlats med bitumenlösning.

Konventionell asfaltmastix (bestående av bitumen B85/B60, Trinidad Epuré, kalkstensfiller och sand) började användas på Vägverkets broar omkring 1970. Erfarenheterna har i stort varit goda, utom i Norrland där beläggning och isolering spruckit under speciellt kalla vinterperioder.

3.6.1.1 Tätskiktssystem enligt VVTBT

I Sverige används idag huvudsakligen två typer av tätskikt på vägbroar av betong, nämligen polymermodifierad asfaltmastix eller polymerbitumenmatta. I ett system med polymermodi-

fierad gjutasfalt (PGJA) på polymermodifierad tätskiktsmatta eller mastix räknas också gjutasfalten som ett tätskikt. Tätskikten och kravspecifikationer för dessa beskrivs nedan. De beskrivna systemen gäller för betongbroar under Trafikverkets ansvar samt broar inom Stockholm stad men används också av de flesta kommunerna i Sverige.

Andra typer av system med tätskikt av t.ex. polyuretan har provats i begränsad omfattning till vägbroar, men bedömts som otillfredsställande för svenska förhållanden. Ett tätskiktssystem med polymermodifierad asfaltmastix på en polymermodifierad isoleringsmatta har också använts i större omfattning under några år men togs bort (ur BRO 2002) då systemet erfarenhetsmässigt visade upp fler blåsor än övriga system.

Krav beträffande de respektive produkternas sammansättning och egenskaper anges i *VVTBT Tätskikt på broar 09* (tidigare BRO 2004) som används tillsammans med AMA Anläggning 07.

Flytande tätskikt av sprutapplicerad typ har normalt inte använts på vägbroar av betong i Sverige. Detta grundar sig delvis på negativ erfarenhet från provläggning (jfr. avsnitt 3.5.4.1), men också på det faktum att ingen relevant teknisk kravspecifikation existerat (motsvarande den för tätskiktsmattor).

På brobaneplattor av stål kan däremot tätskiktet utformas som epoxi, akrylat eller isoleringsmatta. Ingen egentlig kravspecifikation finns för akrylat-, polyuretan- eller polyureabaserade produkter.

Efter Trafikverkets bildande, samordnas specifikationerna för väg- och järnvägsbroar. F.d. Banverkets tekniska specifikation för sprutapplicerade tätskikt på järnvägsbroar var under många år endast allmänt formulerad kring ett antal funktionskrav som skulle uppfyllas genom provning enligt ”vedertagna” provningsmetoder, vilket gjorde det svårt att utvärdera olika produkters lämplighet. Olika provningsmetoder kunde således användas av tillverkare för olika system, och redovisade provningsresultat var som regel inte direkt jämförbara.

En ny specifikation formulerades senare kring i huvudsak samma funktionskrav. För flytande/sprutapplicerade system togs en helt ny specifikation fram *Edwards (2006)*, medan Vägverkets kravspecifikation(er) tillämpades för andra typer av tätskikt till broar. Den nya kravspecifikationen för flytapplicerade elastiska tätskikt kom att ingå som Bilaga BV 6-1 i BV Bro, utgåva 9.

3.6.1.2 Prefabricerade isoleringsmattor

För tätskikt med tätskiktsmatta enligt Trafikverkets specifikation föreskrivs en matta bestående av armerande stomme med polymerbitumen på båda sidor. Specifikationen i *VVTBT* baseras på europeisk standard enligt SS EN 14695.

Polymermodifierade bitumenmattor med tillhörande kravspecifikation introducerades i Sverige med Bronorm 88, som ett resultat av ett omfattande forskningsprojekt mellan Vägverket och VTI under perioden 1985 - 1988 *Colldin (1991/1991)*. Samtliga av Vägverket idag godtagna mattor är högkvalitativa 5 mm tjocka SBS-modifierade bitumenmattor som svetsas i ett skikt mot det primerbehandlade underlaget.

Enligt BRO 2004 utfördes förbehandling av betongen som regel med primer av bitumenlösning. Försegling med epoxi i två skikt ger emellertid avsevärt mindre risk för blåsbildning, men har på senare tid fasats ut på grund av hälso- och miljöskäl. I entreprenader med utförandeavtal från och med april 2010 ska primer av metylmetakrylat användas.

Resultatet har enligt Trafikverkets bedömning hitintills varit bra, med något undantag, då porer (pinholes) och blåsor uppstod i stor omfattning. MMA-primer och bitumenprimer (både med nafta respektive xylen) får samma miljöbedömning (B) enligt BASTA-systemet, medan epoxi får en sämre bedömning (D) beroende på innehåll av Bisfenol A, och får därmed inte användas som primer på Trafikverkets broar.

3.6.1.3 Asfaltmastix

För tätskikt med asfaltmastix enligt Trafikverkets specifikation föreskrivs ett 10 mm tjockt skikt av polymermodifierad (SBS) asfaltmastix på gasavledande glasfibernet. Krav beträffande produktens sammansättning anges bl.a. i form av fastlagda gränsvärden vid proportionering av asfaltmastixprodukten. Mastixen ska uppfylla krav enligt SS-EN 12970 (som emellertid står inför omarbetning).

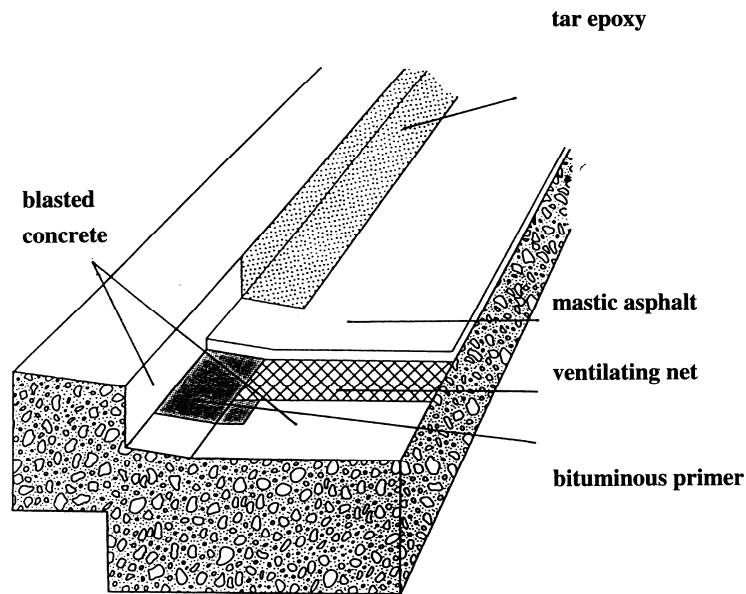
Polymermodifierad asfaltmastix har som redan nämnts numera helt ersatt den traditionella asfaltmastixisoleringen i Sverige. För polymermodifierad asfaltmastix finns speciella krav sedan BRO 2002. Föreskrivna krav grundar sig på laboratorieprovning samt praktiska erfarenheter från tillverkning och utläggning i fält *Edwards & Westergren (1999)*.

I samband med tillverkning, transport och utläggning är den polymermodifierade asfaltmastixprodukten emellertid mer värmekänslig än konventionell asfaltmastix. Vid höga temperaturer och/eller lång uppvärmningstid kan polymer och polymerbindemedel förändras, med försämrade eller varierande egenskaper hos asfaltmastixen som följd. Förhöjda stämpelvärden ger för polymerasfaltmastix inte samma indikation på förändringar i bindemedlet under uppvärmning som för konventionell asfaltmastix. Bitumenets förhårdnande inverkan på stämpelbelastningsvärdet under uppvärmning kompenseras ofta av motsvarande mjukgörande effekt från polymeren, då denna bryts ner i mindre molekyllängder. Stämpelbelastning är därför inte relevant som enda kontrollprovning, varför ytterligare provning, med avseende på formstabilitet (värmestabilitet), infördes i BRO 2002. Stämpelbelastningsvärde bestäms enligt FAS metod 447 och formstabilitet på samma kuber enligt SS-EN 12970.

Även ett långtidslagringsförsök föreskrivs. Försöket utförs för att prova om den aktuella polymerasfaltmastixprodukten klarar uppvärmning under lång tid (som t.ex. vid transporter).

Värmeåldringens inverkan på polymerbindemedlet kan i viss mån följas genom provning på återvunnet bindemedel, med avseende på traditionella reologiska parametrar som mjukpunkt, penetration, brytpunkt, duktilitet och elastisk återgång. Återvinningsprocessen kan i sig medföra ”oönskade” förändringar i polymerbitumenet. Det är därför av största betydelse att viss enkel och snabb provning på den egentliga tätskiktsprodukten kan utföras i samband med tillverkning och utläggning. Med vaxinblandning i asfaltmastix (och gjutasfalt) kan emellertid tillverknings- och utläggningstemperaturerna reduceras och långtidslagringsförsök kan därmed eventuellt uteslutas i framtida specifikationer (jfr. avsnitt 3.4.1). Samma polymerbitumen används som regel av alla tillverkare i Sverige (Pmb 32).

Figur 3.12 visar tätskiktssystem med asfaltmastix enligt Trafikverkets specifikation.



Figur 3.12 Asfaltmastix på gasavledande glasfibernät.

3.6.1.4 Kantförsegling

Tätskiktet kompletteras vid kantbalk och på andra från tätskiktet uppstickande detaljer med kantförsegling av epoxi, tätskiktsmatta eller bitumen.

Kantförsegling med epoxi utförs i minst två skikt till en total tjocklek på minst 0,5 mm. Förseglingen appliceras ovanpå isoleringen och på insidan av t.ex. kantbalken. Krav beträffande produkten anges i VVTBT. Även i detta sammanhang är epoxi en icke önskvärd produkt som Trafikverket har för avsikt att i framtiden ersätta med t.ex. MMA.

3.6.1.5 Beläggning

Beläggningen ovanpå tätskiktet utförs med skyddslager, bindlager (eller kombinerat skydds/bindlager) samt slitlager av olika slag beroende på val av kvalitetsklass.

3.6.2 Andra europeiska länder

I detta kapitel behandlas kortfattat tätskikt och regelverk i Europa samt det europeiska harmoniseringsarbetet med standarder för bitumenmattor till betongbroar. Ett avsnitt om Kanada och USA ingår även.

CEN TC 254 WG6 "Flexible sheets for waterproofing of concrete bridge decks and other trafficked areas of concrete" startade på initiativ från svenska Vägverket, med sekretariat i Sverige. Det första mötet var i Stockholm i juni 1993. Avsikten från Vägverkets sida var att i största möjliga omfattning få gehör för de metoder och krav som några år tidigare introducerats i Vägverkets tekniska beskrivningar, d.v.s. dåvarande BRO 2004. Inför första mötet gjordes ett "Document on the state of the art" över aktuella tätskiktssystem i de deltagande

europiska länderna. Denna nu mer än 17 år gamla översiktstabellen från dokumentet visas i **Tabell 3.4**. Av översikten framgår att användningen av polymermodifierade bitumenmattor var omfattande och förekom i samtliga länder, medan flytapplicerade system (liquids) förekom i mycket begränsad omfattning, undantaget Storbritannien och Tyskland. Utförliga beskrivningar av respektive system med tillhörande kravspecifikation och provningsprogram från den tiden ingår också i dokumentationen till detta möte *Colldin (1992/1993)*.

En omfattande jämförande studie av provningsprogram och testmetoder för tätskiktssystem med polymerbitumenmatta genomfördes mellan Sverige och Danmark inför arbetet i WG6 *Wegan och Colldin (1993)*.

Tabell 3.4 Använda tätskiktssystem i Europa 1993.

COUNTRY	WATERPROOFING SYSTEMS				Liquids
	Bitumen sheets		Mastic asphalt		
	pol.modified	unmodified	unmodified	pol.modified	
AUSTRIA	SBS; APP 2 layers 90 %	8-9 %		<1 %	1 %
DENMARK	SBS 1-2 layers	1-3 layers 90 %	-	-	(tests)
FINLAND	SBS 1-2 layers 80 %	-	-	SBS min. 14 mm 1-2 layers 18 %	Polyurethane 2 %
FRANCE	"Waterproofing systems with asphalte coulé" (B3A)				Polyurethane Epoxy <10 %
GERMANY	SBS; APP 1-2 layers epoxy primer 50 %	type B3A 1 layer	No longer recommended		Polyurethane
GREAT BRITAIN	Used		Used		Polyurethane Epoxy Acrylic
NORWAY	SBS 1-2 layers	- (No longer used)	Mastic asphalt on epoxy	SBS 12 mm (no ventilating net or fleece)	Polyurethane (small amounts)
SWEDEN	SBS 1 layer 40 %	- (No longer used)	Mastic asphalt 10 mm (on ventilating glassfibre net)	SBS 10 mm (on ventilating glassfibre net)	-
SWITZERLAND	SBS; APP 1 layer <60 %	1-2 layers (Used)	Mastic Asphalt 10 mm (on ventilating fleece, "loose" system)	"Weichmastix" 1-2 layers (on ventilating net)	Polyurethane special cases

En uppdatering av översiktstabellen har sammanställts med hjälp från bl.a. nuvarande och före detta medlemmar i WG6. Den nya tabellen presenteras nedan, **Tabell 3.5**. En mer fullständig tabell finns i **Bilaga 1**. Texterna som ingår där har formulerats av respektive lands företrädare och har inte justerats. Diagram över användningen 1993 respektive 2010 framgår av **Figur 3.13** och **Figur 3.14**.

Av **Tabell 3.5** framgår att endast polymermodifierade tätskiktssystem numera används i Europa. SBS-modifierade mattor är mest vanligt, men även APP förekommer, dock inte i nordiskt klimat. I Belgien används även TPO (thermoplastic polyolefin). Den nationella specifikationen baseras i samtliga fall på EN 14695, men kraven varierar från land till land.

Asfaltmastix med polymerbitumen är vanligare än asfaltmastix utan polymer, och används i Belgien, Finland, Norge, Sverige och Schweiz. I Spanien används epoximodifierad asfaltmastix. Asfaltmastix utan polymertillsats förekommer endast i Belgien och Schweiz. Förekommande specifikationer baseras på EN 12970.

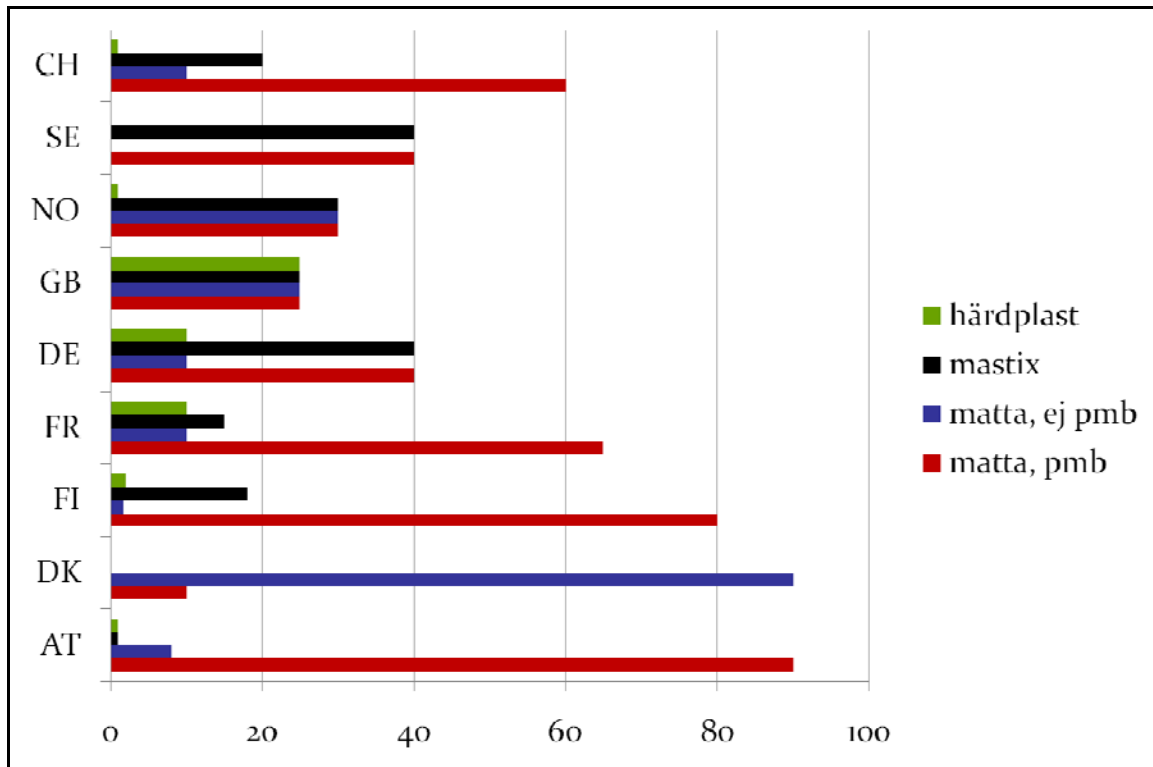
Flytapplicerade system har ökat i omfattning och används eller provas nu i så gott som samtliga länder. Specifikationen baseras på ETAG 033. Beträffande primer uppges epoxy-primer/försegling, bitumenprimer eller annan lämplig primer. I Portugal och Norge används bitumenemulsion.

Nederländerna avviker från övriga europeiska länder så till vida att det inte finns några specificerade tätskiktssystem för betongbroar där. Den statliga myndigheten (Rijkswaterstaat RWS) efterfrågar endast en viss täthet hos asfaltbeläggningen och förutsätter att brobaneplattan är tillräckligt vattentät för brons beständighet. Utan tätskikt kan betongen andas och ingen blåsbildning uppstå, menar man. Diskussioner har pågått under lång tid kring tätskikt, men RWS föredrar att behålla sin ståndpunkt. Det finns för övrigt få broar i Nederländerna, varav de flesta är rörliga och av stål. I praktiken förekommer emellertid tätskiktsbehandling med modifierad bitumenemulsion eller med något system från Tyskland, Belgien, Frankrike eller Österrike. Entreprenören hålls ansvarig för brobeläggningens funktion.

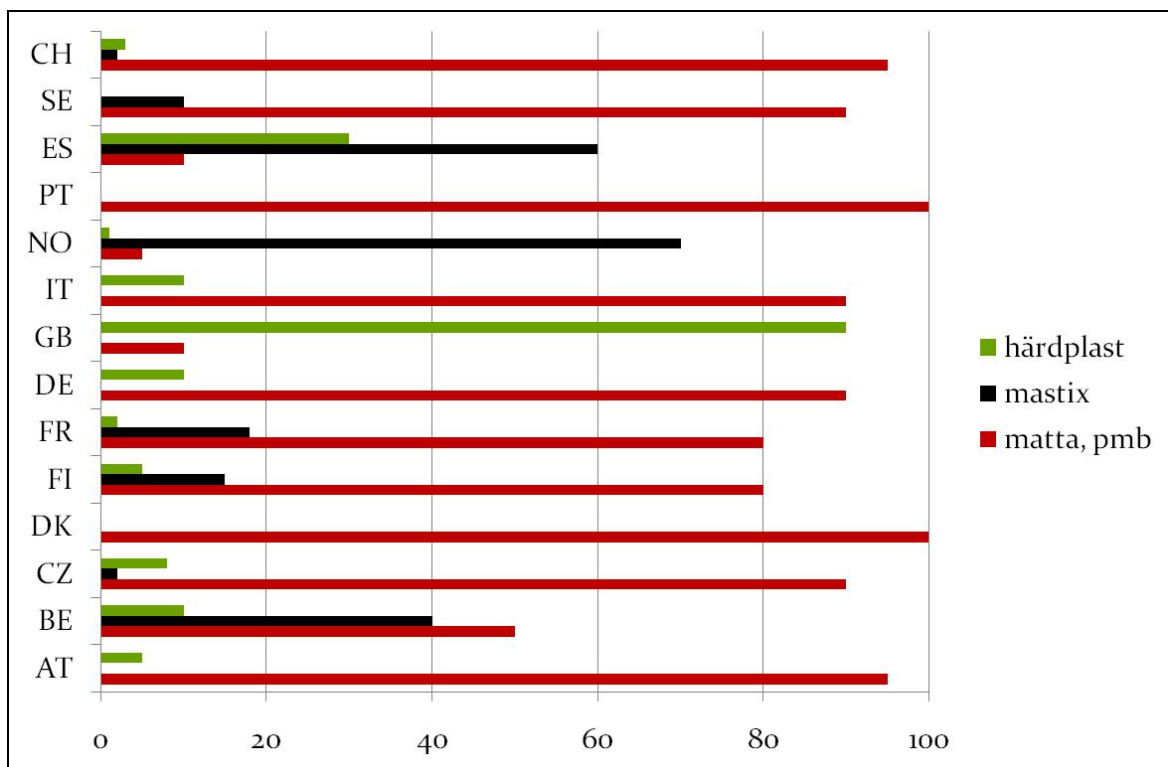
Tabell 3.5 Använda tätskiktssystem i Europa 2010. (Obs tabellen går över två sidor)

Country	Bitumen sheets	Mastic asphalt		Liquids
	Pol. mod	Pol. mod	Unmod.	
AT	SBS, APP 2 layers	-	-	PU
Spec.	RVS 15.03.12 (rev based on EN 14695 in prep)			RVS 15.03.13 (rev based on ETAG 033 in prep)
BE	SBS, APP, TPO 1 layer	EVA On glassfibre 1 layer, 10 mm 2 layers, 15 mm)	On glassfibre 1 layer, 10 mm 2 layers, 15 mm	PMMA, PU-PUE, UP with reinforcement 2 layers, 2.5/3 mm
Spec.	Guide d'agrément G0001 based on EN 14695 with additional requirements	MA type 1, EN 12970	MA type 1, EN 12970	Guide d'agrément G0003 based on ETAG 033
CZ	SBS, APP 1 layer 85-90%	No	Mainly for steel bridge decks (max 5%)	PU (<10%)
Spec.	Czech standard ČSN 73 6242 (based on EN 14695)			Ministry of Transp. Directive.
DK	SBS 2 layers			Test
Spec.	AAB afsnit 10. Fugtisolering, oktober 2010 based on EN 14695			
FI	SBS 1-2 layers 80%	SBS on glassfibre net, 20 mm 15%	No	5 % Polyurethane, polyurea 2,5 mm
Spec.	InfraRYL 2006 osa 3: Sillat. Approving based on EN 14695	InfraRYL 2006 osa 3: Sillat. Approving based on EN 12970		InfraRYL 2006 osa 3: Sillat. Approving based on ETAG 033
FR	SBS 1 layer	Used		PUR, PUR bitumen
Spec.	French Technical Agreement			
DE	SBS, APP 1-2 layers			Acrylate based

Spec.	ZTV Ing, Part 7 Chapter 1 and 2 To be revised acc. to DIN EN 14695 and DIN V 20000-203 (Adaption Standard)			ZTV Ing, Part 7, Chapter 3
GB Spec.	Used BD47	No	No	MMA, PU BD47 / HAPAS
IT Spec.	APP 1-2 layers Technical prescriptions by ANAS or Società Autostrade or Railway	No		SBS bit, hot applied with polyester and non woven inlayer. PU or Epoxy-Tar
NL Spec.	*			
NO Spec.	SBS 1-2 layers Handbook 026 (026E) Norwegian Public Roads Administration	SBS 12 mm Handbook 026 (026E) Norwegian Public Roads Administration	No	MMA, PUA, PU 2-4 mm. Handbook 026 (026E)
PT Spec.	APP, SBS 1 layer Portuguese Agreement certificates	No	No	No
ES Spec.	SBS 1 layer EN 14695	Epoxy modified	No	Epoxy 2 layers ETAG 033
SE Spec.	SBS 1 layer VVTBT Tätskikt på broar 09 (based on EN 14695)	SBS on glassfibre net 10 mm VVTBT Tätskikt på broar 09 and EN 12970	No	Only on railway bridges yet (MMA, PUA, PU) BV Bro, utgåva 9, Annex 6-1 (based on ETAG 033 and EN 14695)
CH Spec.	SBS, APP 1 layer SN 640 450a (based on EN 14695)	SBS 8-10 mm 12-20 mm 20-30 mm 30-45 mm SN 640 450a (based on EN 12790)	8-10 mm 12-20 mm 20-30 mm 30-45 mm SN 640 450a (based on EN 12790)	PU, PMMA SN 640 450a (based on ETAG 033)



Figur 3.13 Tätskiktssystem i Europa 1993, procentuella andelar.



Figur 3.14 Tätskiktssystem i Europa 2010, procentuella andelar.

3.7 Kanada och USA

En motsvarande studie som den föreliggande, med fokus på just tätskiktssystem, har nyligen genomförts inom Transportation Association of Canada (TAC) *Emery (2010)*. Inledningsvis i den kanadensiska rapporten listas en lång rad rekommenderade tekniska rapporter, regelverk och handböcker som används i Kanada och delar av USA (med liknande klimat).

I USA ligger fokus på s.k. multipla skyddssystem mot korrosion (såsom högpresterande betong med silika i kombination med epoxibehandlad armering och förseglad yta) och med liten förekommande användning av tätskiktssystem på nya broar. Armeringskorrosion och betongskador är ett stort problem i USA alltsedan 1960-talet.

Sex olika typer av tätskikt (membranes) används eller har använts i Kanada. Dessa beskrivs och bedöms i rapporten. Valda delar från rapporten behandlas i följande avsnitt. Angivna kostnader avser belopp i kanadensisk valuta CAD.

- *Hot-applied rubberized mastic membrane*. Gammal typ av gummimodifierad asfaltmastic som läggs ut i ett tunt lager (5 mm) på bitumenprimer. Produkten började användas på 1960-talet men har numera ersatts av andra bättre typer av tätskikt. Tätskiktet åldras fort, spricker och är utmattningsbenäget. Beräknad livslängd uppgår till max. 10 år.
- *Hot-applied (poured) rubberized asphalt membrane (plain and reinforced) with protection boards*. Produktsystemet som använts mycket sen 1970-talet består av ett flytande polymermodifierat bitumentätskikt som levereras i block till arbetsplatsen där de smälts ner (vid cirka 200 °C) och sedan appliceras på primerbehandlad (bitumenprimer) betong till en tjocklek av cirka 5 mm. Medan tätskiktet ännu är klabbigt täcks det sedan med skyddsplattor (3,6 mm tjocka och 1 m × 1,5 m) av bitumenimpregnerad glasfiberfilt. Skyddsplattorna ska läggas ut med visst överlapp samt därefter behandlas med emulsion innan beläggningslagret av asfaltbetong läggs ut. Man bedömer att erfarenheterna i stort sett varit goda och att tätskiktssystemet bör kunna hålla minst 40 år. Beräknad total kostnad (2007): 48 - 54 CAD/m². (Författarens kommentar: Under en studieresa i USA och Kanada introducerades vi bl.a. för detta system vid MTC i Toronto, Ontario *Colldin (1988)*. Vi blev **inte** imponerade.)
- *Liquid applied polymer membrane*. Här avses material som MMA, polyuretan och polyurea, som appliceras i två skikt till en total tjocklek på 2 - 3 mm. Tätskiktet avsandades för att få god vidhäftning till beläggningslagret av asfaltbetong som sedan läggs ut. Två lager asfaltbetong på minst 40 mm vardera rekommenderas. Beräknad livslängd är 40 år. Beräknad total kostnad (2007): 125 - 135 CAD/m².
- *Self-adhering manufactured sheet membrane with integral protection layer*. Den självklistrande mattan är 1,5-2 mm tjock (typ Bituthene) och har använts i Kanada sen 1970-talet, men har numera ersatts av andra bättre system. Beräknad livslängd är 15-20 år. Beräknad total kostnad (2007): 43 - 49 CAD/m².
- *Torch-on manufactured sheet membrane with integral reinforcement and protection layer*. Typen av system överensstämmer med motsvarande enligt Trafikverkets kravspecifikation, d.v.s. polymermodifierad armerad bitumenmatta som svetsas fast till

primerbehandlat underlag. Två lager asfaltbetong på totalt minst 80 mm rekommenderas. Beräknad livslängd är 40 år. Beräknad total kostnad (2007): 40 - 58 CAD/m².

- *Spray-applied polymer-modified asphalt membrane*. Här avses ett patenterat system med beteckning Etanplast, som utvecklats i Frankrike. Systemet är EVA-modifierat och sprutappliceras. Etanplast används för närvarande inte i Kanada.

För samtliga systems livslängd gäller att denna styrs av beläggningsöverbyggnaden som ligger ovanpå tätskiktet. Kostnaden för ett system inkluderar förbehandling, material och utförande. Asfaltbeläggning verkar ingå i priset.

En s.k. illustrativ livscykelkostanalys (LCCA) har genomförts för fyra av systemen baserat på nettonuvärde (100 år och 4 % diskonteringsränta). Den sammanfattas i **Tabell 3.6** som bl.a. visar att tätskiktssystem med härdplastteknologi förväntas bli mer än dubbelt så dyrt som t.ex. tätskiktssystem med polymermodifierad bitumenmatta.

Tabell 3.6 Livscykelkostanalys för kanadensiska tätskikts- och beläggningssystem.

Tätskiktssystem	CAD (Kanadadollar) per 100 m ²
<i>Hot-applied rubberized mastic membrane</i>	8232
<i>Torch-on manufactured sheet membrane</i>	8608
<i>Self-adhering manufactured sheet membrane</i>	9567
<i>Liquid applied polymer membrane</i>	18240

3.8 Forsknings- och utvecklingsarbete

I detta kapitel sammanfattas forsknings- och utvecklingsarbete som genomförts i **dåvarande Vägverkets regi** rörande tätskikt till broar, med start kring 1985.

En del **studieresor för erfarenhetsutbyte** genomfördes och har dokumenterats i ett antal VTI notat eller KTH publikationer.

- USA och Kanada 1988 *Colldin (1988)*
- Österrike och Tyskland 1989 *Colldin (1989)*
- Nederländerna, Belgien, Frankrike och Schweiz 1990 *Colldin (1990)*
- Japan 1992 *Colldin (1992)*
- BASt och Elf 1993 *Colldin (1993)*

Inledningsvis gjordes **studier och uppföljning i fält** av de tätskiktssystem med polymermodifierad bitumenmatta som användes i Vägverkets regi. Utläggningar och laboratorieprovning har dokumenterats i en rad utlåtanden och VTI-notat:

- Bro Y95 över Indalsälven, väg 86 vid Kävsta, *Colldin och Nilsson (1989)*
- Bro D14 vid Stallarholmen, *Colldin och Nilsson (1990)*
- Bro F301 vid Sjunnen, *Colldin och Nilsson (1991)*

- Broarna P772 vid Steneby och O656:8 i Göteborg, O1325 i Mölndal och W983 vid Brintbodarna *Colldin och Nilsson (1992)*
- Broarna U116 i Surahammar, G556 mellan Konga och Dångebo och X895 i Järbo, Y. *Colldin och Nilsson (1992)*
- Bro BD 1377 vid Pitsund, *Colldin och Nilsson (1995)*

Omfattande utvecklings- och provningsarbete föregick utförande och beläggningsarbetet på Högakustenbron som genomfördes 1992 *Colldin och Nilsson (1995)*, *Colldin (1995/1996)*, *Edwards och Westergren (1999/2001)*.

Blåsbildning för tätskikt med polymermodifierad bitumenmatta har även behandlats inom Vägverksprojekt, *Colldin (1995)*, *Edwards och Westergren (1999)*. Se även avsnitt 3.5.1.

Vidhäftningsprovning för kontroll i fält har studerats och kalibreringskurvor tagits fram *Colldin (1991)*, *Colldin och Nilsson (1993)*.

Värmebeständighet hos asfaltmastix har studerats *Colldin & Westergren (1996)*, *Edwards och Westergren (1999)*.

Även **spackel** för avjämning av betongunderlag har studerats i laboratoriet, *Colldin & Åström (1991/1992)* liksom **kantförseglingsprodukter** *Colldin och Salomonsson (1991)*. Studierna mynnade ut i provningsprogram med kravspecifikation som därefter använts och modifierats.

3.9 Standarder och specifikationer

Europeiska standarder och specifikationer som ligger till grund för Trafikverkets nuvarande regelverk tas upp i följande avsnitt.

Det finns en serie europeiska standarder rörande produkter och system för skydd och reparation av betongkonstruktioner (EN 1504, Del 1-10). I en av delarna (EN 1504-9) behandlas allmänna principer för val av produkter och system. Beträffande skyddsbehandling hänvisas till EN 1504-2 *Surface protection systems for concrete*. Inom EN 1504-2 finns en mängd standarder för karaktärisering av olika typer av system, varav många kan hänföras till produktionskontroll. Det finns emellertid även t.ex. olika trafikbelastningsklasser, liksom olika klasser för ånggenomsläpplighet, vidhäftning, spricköverbryggande förmåga samt slagålig-het.

Det finns därutöver en rad standarder för tätskikts- och/eller skyddsbeläggning till betong inom olika mer specifika användningsområden som till vägbroar och järnvägsbroar. Specifikationen i VVTBT för tätskikt med tätskiktsmatta (polymermodifierad bitumenmatta) baseras i huvudsak på europeisk produktstandard enligt SS EN 14695 *Flexible sheets for waterproofing – Reinforced bitumen sheets for waterproofing of concrete bridge decks and other trafficked areas of concrete – Definitions and characteristics* med tillhörande metodstandarder. För asfaltmastix gäller krav enligt SS EN 12970 *Mastic asphalt for waterproofing – Definitions, requirements and test methods* (jfr avsnitt 3.6.1.3).

3.9.1 ETAG 033

Både CEN (Comité Européen de Normalisation) och EOTA (European Organisation for Technical Approvals) är involverade i arbete med att harmonisera specifikationer och provningsmetodik inom området tätskikt för brodäck av betong. En ETA (European Technical Approval) kan tas fram för en viss produkt om ingen motsvarande harmoniserad EN-standard finns eller planeras för produkten. Skillnaden mellan EOTA och CEN vad gäller tätskikt för broar är att EOTA behandlar flytande system medan CEN behandlar prefabricerade mattsystem.

ETAG 033 är ett sådant regelverk som har tagits fram inom EOTA för flytande tätskiktssystem som sprutas eller sprids ut på annat sätt på brodäcket i ett eller fler lager. Normalt förväntas tätskiktet inte bli utsatt för direkt trafik eller ballast. Riktlinjerna baseras på relevant existerande kunskap och provningserfarenhet för den aktuella typen av produkt. Existerande EN-metoder från CEN TC 254 WG6 anges i största möjliga omfattning, men även andra EN- eller ISO-metoder har tagits med. Ett antal tekniska rapporter (EOTA TR) har sammanställts som stöd- och referensdokument till riktlinjerna. Tätskiktets livslängd antas uppgå till minst 25 år, baserat på vad man vet idag, men kan i verkligheten bli betydligt längre.

System som används under ballast ingår inte, men systemen kan inkludera skyddslager, armering (som väv) och andra nödvändiga produkter (som primer och tack coat). Akrylat, epoxi, polyester, polyurea och polyuretan är produkter som ingår och systemen indelas i olika användningskategorier:

- A, med överliggande bituminöst beläggninglager (tre olika typer) alternativt ett icke bituminöst lager, samt i samtliga fall avsett för trafikbelastning;
- B, utan överliggande lager (exponerat) och avsett bara för fotgängare och cykeltrafik;
- C, utan överliggande lager (exponerat) och ingen trafik.

Avsett temperaturområde under användning ligger mellan -40 och $+60$ °C. Överlag är denna Guideline mycket generellt utformad och därför något svår att använda.

3.10 Förslag till FoU

Ett antal förslag till forskningsprojekt inom området tätskikt för hållbara brobaneplattor har sammanställts.

3.10.1 Blåsbildning

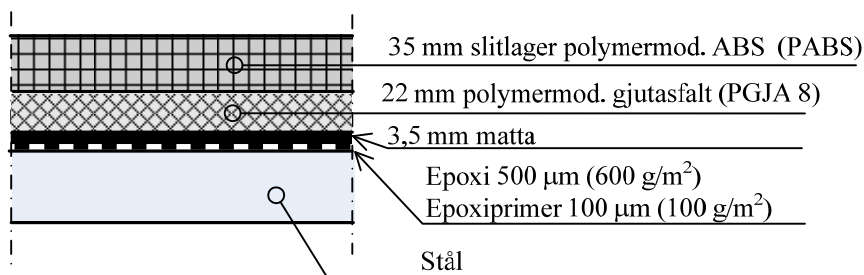
Isoleringens huvudsakliga uppgift är, som redan nämnts, att skydda betongen från vatten- och vägsaltinträngning eftersom detta kan försämra konstruktionens beständighet på flera sätt. Blåsbildning i isoleringssystemet kan emellertid utvecklas till bulor och stora ojämnheter i vägbeläggningen, med trafikproblem som följd. Återkommande reparationsarbeten med vägvastängning blir dyra åtgärder för samhället och ska om möjligt undvikas. Projektet kommer att bidra till detta genom rekommendationer som kan reducera eller rentav eliminera risken för blåsbildning på betongkonstruktioner i framtiden.

Syftet med projektet skulle vara att få djupare förståelse och kunskap om fenomenet blåsbildning i tätskikt och skyddsbeläggning på betongkonstruktioner till broar, tunnlar och tråg, och målet att reda ut och förklara de olika mekanismerna bakom blåsbildning under olika omständigheter. Projektet föreslås innefatta litteraturstudier och uppföljning av pågående forskning inom området i andra delar av världen. Laboratorieförsök kan genomföras vid CBI i samarbete med andra institut och laboratorier. Fältförsök bör ingå.

3.10.2 Uppföljning av befintliga tätskiktssystem

Ett antal betongbroar har under de senaste 30 åren försetts med tätskikts- och beläggningssystem enligt Trafikverkets specifikation. De flesta har fungerat väl och en uppföljning av systemens nuvarande standard bör vara av intresse för framtida beslut och satsningar på mer hållbara brobaneplattor. Högakustenbron är visserligen en stålbro men tätskikt, beläggning och utförande är i huvudsak samma som för betongbroar. Systemet är mycket väl dokumenterat och kan utgöra bas för en mer eller mindre omfattande utvärdering av dess nuvarande status och förväntade fortsatta livstid på bron. **Figur 3.15** visar tätskikts- och beläggningssystem på Högakustenbron.

Andra möjliga broar är de som ingått i provläggningsförsök under tidigt 1990-tal (se avsnitt 3.8).



Figur 3.15 *Tätskikts- och beläggningssystem på Högakustenbron, Edwards & Westergren (1999).*

3.10.3 Val av sprutapplicerade system

Olika typer av hårdplastbaserade material används som tätskikt och skyddsbeläggning på broar i flera europeiska länder (jfr avsnitt 3.3.3 och avsnitt 3.6.2). Erfarenheten av flytande/sprutapplicerade tätskiktssystem på betongunderlag i Sverige är emellertid begränsad och inga egentliga kravspecifikationen finns idag för vägbroar under Trafikverkets ansvar.

Projektet föreslås innefatta

- litteraturstudier och uppföljning av pågående forskning inom området i andra delar av världen,
- kartläggning av lämpliga produkter och system,
- erfarenheter,
- referensobjekt samt

- provningsprogram och kravspecifikation anpassad till vägbroar.

Laboratorieförsök kan genomföras vid CBI i samarbete med andra institut och laboratorier. Fältförsök bör ingå.

Ett bra nätverk (Europa och USA) har byggts upp under 2010 inom SP-projektet *Waste Refinery 34* som behandlar tätskikt- och beläggningssystem för skydd av betong i biologiska behandlingsanläggningar med mycket aggressiv miljö *Edwards & Henriksson (2010)*.

3.10.4 Inverkan av betongkvalitet på tätskiktets funktion över tiden

Betongens inverkan på tätskiktets funktion över tiden behöver utredas. Den viktigaste funktionella egenskapen som avses här är tätskiktets vidhäftning och vidhäftningens beständighet under inverkan av tid och temperatur. Relevant betong med olika sammansättning och täthet föreslås ingå och utvärderingen genomförs som laboratorieförsök. Studien kan samordnas med förslaget i avsnitt 3.10.1 om blåsbildning.

3.10.5 Metodik för provning av spricköverbryggande förmåga

Den spricköverbryggande förmågan hos tätskikt på betong provas enligt specificerad metodik i SS EN 14695. Provningsmetoden, SS EN 14224, är emellertid mycket omdiskuterad, och i sin nuvarande utformning troligen inte tillämpbar. Ny metodik bör utvecklas.

3.10.6 Värmebeständighet hos asfalmastix

Värmebeständighet hos asfalmastix och gjutasfalt provas enligt Trafikverkets specifikation genom långtidslagringsförsök (se avsnitt 3.6.1.3). Metodens relevans är i dagsläget oklar och behöver redas ut. En uppdatering av metoden bör genomföras och/eller mer anpassad metodik tas fram.

3.10.7 Underlag för jämförande LCC analyser

I avsnitten nedan listas en del grundläggande parametrar för olika typer av tätskiktssystem och lösningar som kan användas vid jämförande analyser och bedömning av brobaneplattans robusthet. Här ingår material- och utförandekostnader (inklusive vattenbilning för direktgjuten slitbetong och fräsmassor), lite om reparationsåtgärder samt uppskattade livslängder. Informationen är i huvudsak hämtad från redovisningar vid ett seminarium om tätskikt beläggning och direktgjuten slitbetong. Seminariet anordnades av Trafikverket 16 mars 2011.

Brons lokalisering i landet liksom typ av bro kan ha avgörande stor betydelse för vilken typ av lösning som bör väljas. Detta behandlas emellertid inte närmare här.

3.10.7.1 Material- och utförandekostnader

Material- och utförandekostnader för olika typer av tätskiktssystem framgår av **Tabell 3.7**. Materialkostnaden för matta respektive mastix är ungefär densamma, men mattan blir dyrare om primer med t.ex. MMA används istället för bitumenlösning. System med flytapplicerat

tätskikt blir däremot avsevärt dyrare och kräver dessutom tack coat för att vidhäftningen mellan tätskikt och beläggning ska bli god. Val av övrig beläggningsuppbyggnad inverkar också. Beläggningsystem med kombinerat skydds-/bindlager av gjutasfalt (PGJA) är dyrare än en uppbyggnad med skyddslager respektive bindlager av asfaltbetong. I länder som Schweiz och Österrike, där avsevärt mycket mer gjutasfalt tillverkas och används än i Sverige, är materialpriset uppskattningsvis 30 % lägre.

Uppgifterna har erhållits från företrädare från asfaltbranschen.

Tabell 3.7 *Kostnader och beräknad livslängd för tätskikt och slitbetong på svenska broar.*

Tätskikt	Primer	Beläggning	Kostnad (kr/m ²)	Beräknad livslängd (år)
Matta	bitumenlösning		150	30-40
Matta	MMA		250	
Mastix			150	30-40
Flytapplicerat	inkl. primer		650 + tack coat	Cirka 30
		ABT, ABb & ABS	220	
		PGJA, ABS	465	
Matta	BL / MMA	ABT, ABb & ABS	370/470	
Matta	BL / MMA	PGJA, ABS	615/715	
Mastix		ABT, ABb & ABS	370	
Mastix		PGJA, ABS	615	
Flytapplicerat	inkl. primer	ABT, ABb & ABS	870 + tack coat	
Flytapplicerat	inkl. primer	PGJA, ABS	1125 + tack coat	
ingen	ingen	Direktgjuten slitbetong	1800 inklusive vattenbilning	30-40

Direktgjuten slitbetong verkar ur material- och utförandesynvinkel vara det dyraste alternativet, men vattenbilning ingår som en viktig post och kan variera avsevärt beroende på brons storlek, bilningsdjup och betongkvalitet. Även fräsningskostnader för asfaltmassor varierar mycket.

3.10.7.2 Livslängd

Beträffande livslängder för de olika typerna av tätskikt förväntas denna ligga på minst 30-40 år under förutsättning att utförandet genomförts på tillfredsställande sätt. Med PGJA på tätskiktet ökar livslängden för tätskiktet som då inte skadas vid t ex reparationsåtgärder på slitlagret.

För direktgjuten slitbetong beräknas den totala uppbyggnaden också ha en livslängd på 30-40 år, men fräsning av hjulspår kan krävas med 5 till 20 års mellanrum. På lågtrafikerade broar kan slitbetongen klara sig upp till 50 år utan åtgärd.

3.11 Slutsatser och rekommendationer

Mot bakgrund av denna rapport kan följande konstateras:

- Att förse brobaneplattan med högkvalitativ isolering är en viktig åtgärd för längre livslängd hos betongbroar. Slitlager av betong anses vara ett alternativ om slitbetongen kan göras tillräckligt tät och sprickfri, åtminstone där vägnätet normalt inte saltas vintertid och trafiken är låg.
- Vid val av tätskiktssystem bör hänsyn tas, inte bara till potentiella egenskaper och initiala kostnader, utan också (om möjligt) jämförande livslängder och kostnader (LCCA).
- Vissa basegenskaper krävs för alla typer av tätskikt. De ska vara vattentäta, beständiga mot vissa kemikalier (som vägsalt och alkali), klara höga och låga temperaturer samt vara åldringsbeständiga. De ska också passa ihop med underlaget (betongdäck och primer) liksom överliggande lager. Appliceringsprocessen är av avgörande betydelse för slutresultatet.
- Den vanligast förekommande typen av tätskikt i Europa idag är polymermodifierade bitumenmattor, ett system som ökat i användning under de senaste 20 åren. Även flyt-applikerade system med hårdplast ökar.
- Erfarenheten av flytande/sprutapplikerade tätskiktssystem på betongunderlag i Sverige är begränsad, och inga egentliga kravspecifikationen finns idag för vägbroar under Trafikverkets ansvar.
- Det vanligaste problemet med tätskikt på betong är blåsbildning och dåligt förbehandlat underlag. Beträffande blåsbildning är flera olika processer och fenomen inblandade och problematiken är ännu inte till fullo klarlagd. Försegling med epoxi (två lager) minskar risken för blåsbildning liksom tjockare beläggningsslag på mattan (värmeisolerande effekt).
- Tätskikts- och beläggningssystem med epoxiförsegling, tätskiktsmatta och beläggningsslag av gjutasfalt ger det säkraste och mest hållbara systemet (under förutsättning att appliceringsarbetet utförs enligt gällande regler).
- Det finns ett behov av ytterligare forskning inom området tätskikt för hållbara brobaneplattor. Blåsbildning, uppföljning av befintliga tätskiktssystem, val av sprutapplikerade system, inverkan av betongkvalitet på tätskiktets funktion över tiden samt vidareutveckling av en del provningsmetodik, är förslag som tas upp i rapporten.

4. Systemet brobaneplatta utan tätskikt

4.1 Översikt

4.1.1 Historik, allmänt

Som ett alternativ till brobaneplattor med tätskikt av bitumenbaserat material har brobaneplattor utförts av betong utan tätskikt (slitbetong) dels som en efterföljande pågjutning på konstruktionsbetongen, den reparerade konstruktionsbetongen och som en direktgjuten slitbetong på den underliggande betongen.

I Sverige har under åren utförts många brobaneplattor av betong; totalt 11 588 st. varav drygt 10 000 är uppförda 1940 och senare. Av dessa har 547 utformats med slitbetong varav drygt 400 har utförts fr.o.m. 1940.

Betongfarbanor eliminerar riskerna med brister/skador i en broisolering som man ofta inte kan inspektera okulärt. Gängse uppfattning är att brofarbanor av betong ger ett lägre underhållsbehov jämfört med en underhållsintensiv asfaltbeläggning. Slitbetong är således att föredra vid t.ex. stora geografiska avstånd där både inspektioner och underhåll kräver långa resor, vid ett klimat som innebär dubbdäcksslitage under lång tid samt även vid broar där underhåll försvåras på grund av hög trafikintensitet.

Betongfarbanor utan tätskikt blev speciellt populära vid reparationer under mitten av 80-talet i och med att vattenbilning introducerades. Läckande membranisolering och vittrad skyddsbetong avlägsnas mekaniskt och konstruktionsbetongen vattenbilas ned till frisk betong på ett effektivt sätt. Därefter sker pågjutningen.

4.1.2 Inventering med data enligt BaTMan

En omfattande inventering av brofarbanor utförda av betong har genomförts inom ramen för förstudien *Hassan, (2011)*. Genomgång har skett av data enligt broregister i BaTMan och efterföljande analyser har gett information enligt vissa urvalskrav. Viss utsortering har skett av farbanor som inte uppfyller uppställda förutsättningar (t.ex. mycket korta GC-broar).

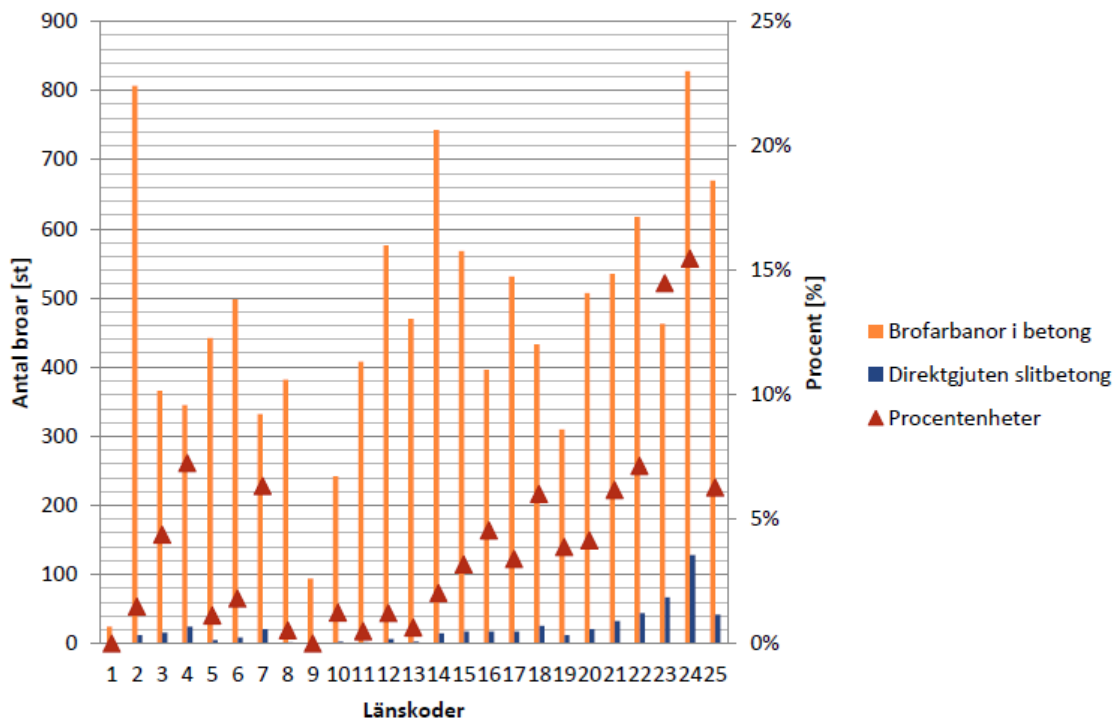
I en första analys har indelning skett i antal, storlek och spännvidder på broar sorterade i olika regioner. Dessutom har antal skador på brofarbanor studerats och indelning har skett efter skadetyper.

BaTMan ger snabbt omfattande data på antal broar sorterade på brotyper, lägen etc. Ska man inhämta detaljinformation måste varje bro studeras separat. Sådan detaljinformation kan vara tjocklek på slitbetong, om det är en pågjutning utförd vid reparation av bitumenbaserat tätskikt eller om den är gjuten direkt på färsk betong, vald betongkvalitet, förbehandling av tidigare gjuten yta (vid pågjutning), förutsättningar vid gjutning etc. Detta arbete blir som inses mycket omfattande och får ses som ambition i ett fortsatt arbete, d.v.s. i en andra analysomgång. Då bör lämpligen ett antal utvalda broar studeras separat för att få detaljinformation.

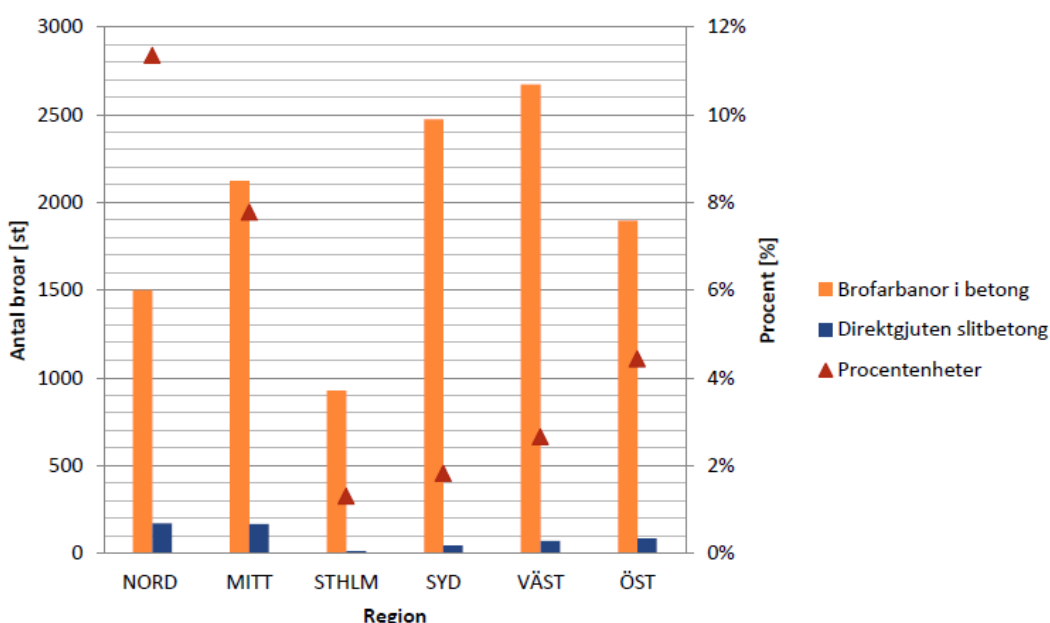
En första inledande inventering har utförts och redovisas i följande avsnitt.

Betongfarbanor

Totalt finns i Sverige 11 588 broar där brofarbanan är utförd av betong. Fördelningen mellan de olika länen framgår av **Figur 4.1 a)**. Fördelningen mellan Trafikverkets regioner är följande: Nord 1498 st., Mitt 2122 st., Sthlm 926 st., Syd 2473 st., Väst 2673 st., Öst 1896 st., d.v.s. en ganska jämn fördelning mellan regionerna, se **Figur 4.1 b)**.



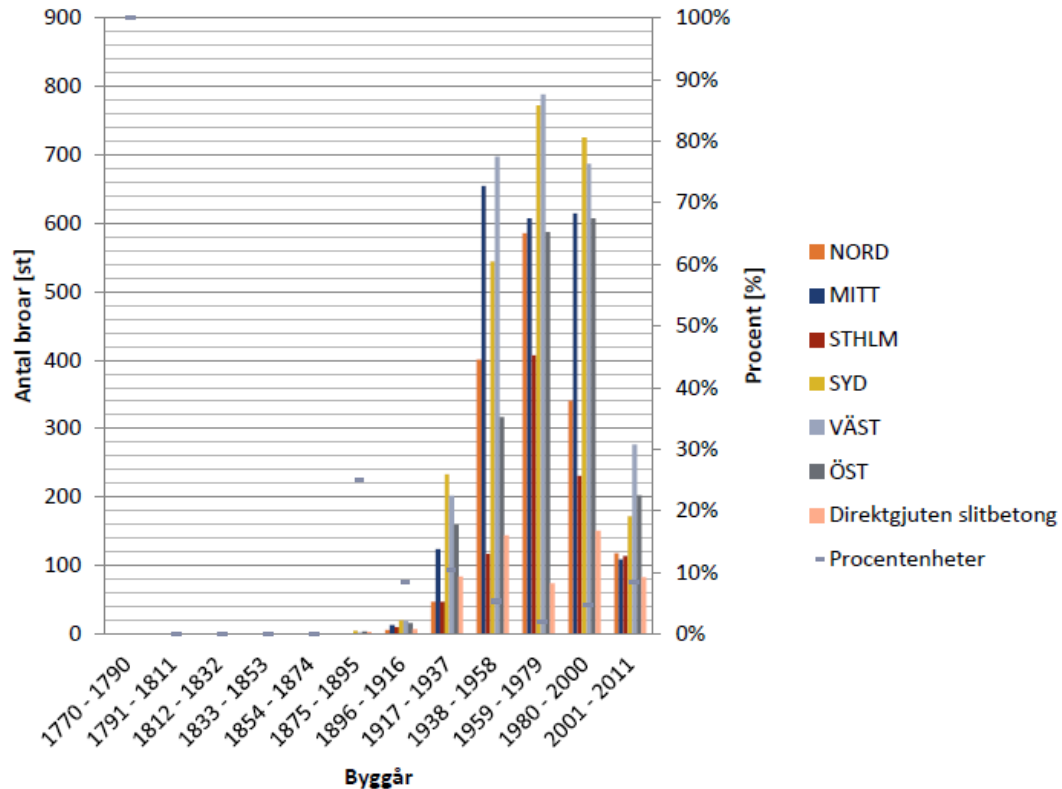
Figur 4.1a) Antalet broar med betongfarbanor respektive med direktgjuten slitbetong samt procentandel broar med direktgjuten slitbetong fördelade per län. Hassan (2011)



Figur 4.1b) Antalet broar med betongfarbanor respektive med direktgjuten slitbetong samt procentandel broar med direktgjuten slitbetong fördelade per region. Hassan (2011)

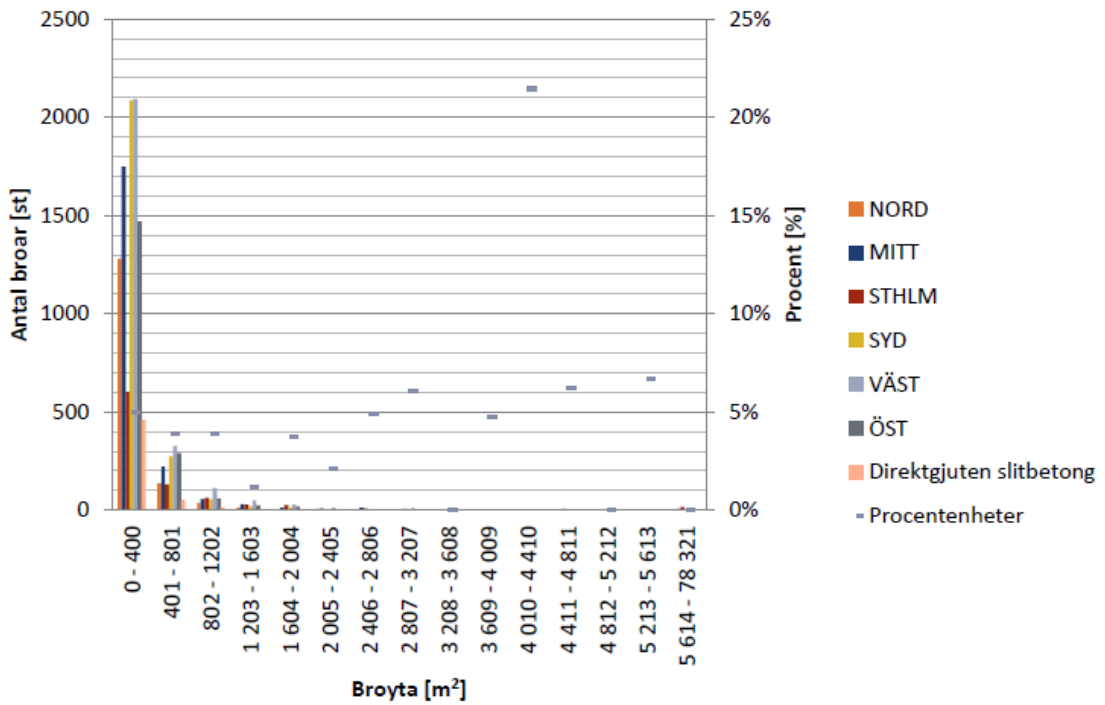
Beträffande byggår kan följande iakttas:

Före 1900 (före år 1896) finns 17 st. broar utförda med betongfarbana, se **Figur 4.2**. Under 1900-talet fram till 1938 är 897 broar byggda med denna lösning och mellan 1938 och 1958 är 2730 broar utförda med betongfarbanor. Under efterföljande 20 år uppgår antalet till 3746 och mellan 1980 och 2000 är 3205 broar byggda med betongfarbanor. Under de sista 10 åren har 993 broar byggts med denna lösning.

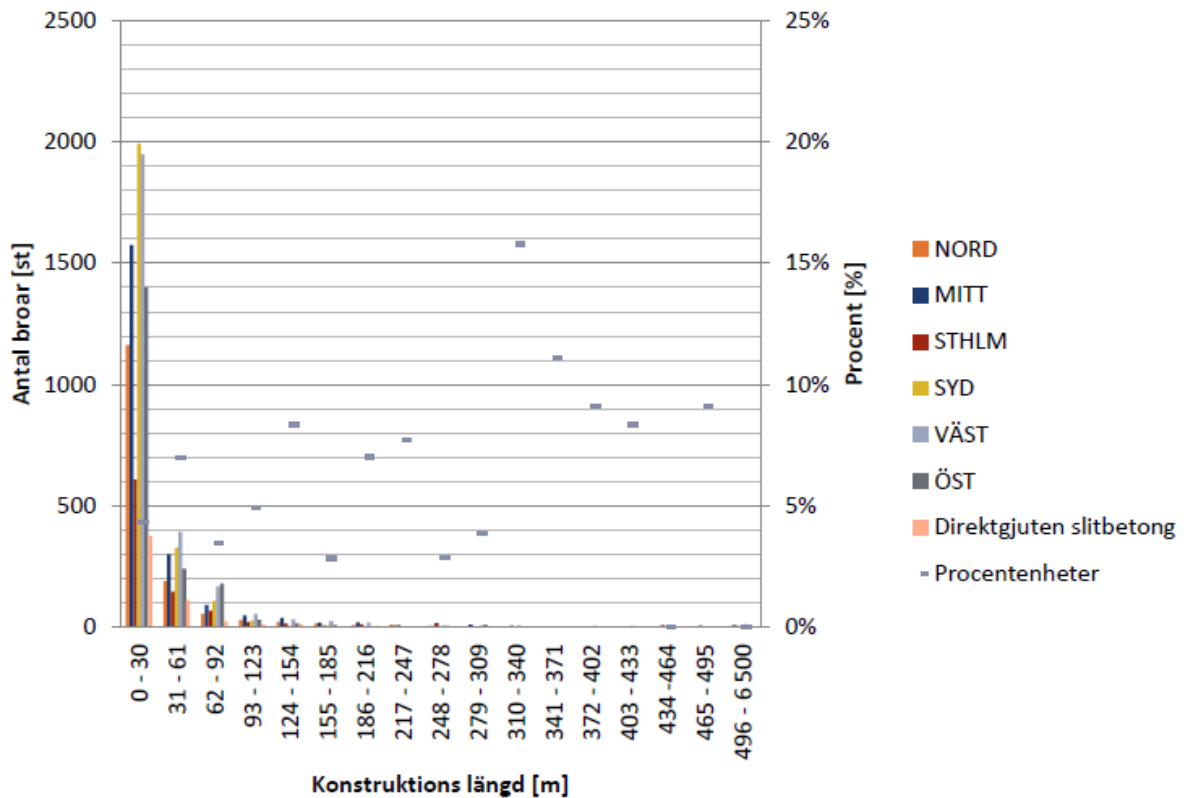


Figur 4.2 Byggår för broar med betongfarbanor respektive med direktgjuten slitbetong samt procentandel broar med direktgjuten slitbetong fördelade per region, Hassan (2011)

När det gäller storlek observeras att de flesta broarna är rätt små, se **Figur 4.3 a)**. De flesta (9277 st.) är utförda på broar med 0 - 400 m² konstruktionsarea. För konstruktionsareor mellan 401 - 801 m² uppgår antalet till 1385 st. och i intervallet 802 - 1202 m² area uppgår antalet till 386 st. För areor större än dessa sjunker antalet i intervall av 400 m² area. För broareor över 5600 m² finns faktiskt 50 tal broar utförda med betongfarbana. Om man betraktar spännvidder istället är tendensen densamma d.v.s., det flesta broarna är utförda med spännvidder 0 - 30 m, (8600 st.) och 31- 61 m (1600 st.).



Figur 4.3 a) Area hos broar med betongfarbanor respektive med direktgjuten slitbetong samt procentandel broar med direktgjuten slitbetong fördelade per region, Hassan (2011).



Figur 4.3 b) Spännvidd (b) hos broar med betongfarbanor respektive med direktgjuten slitbetong samt procentandel broar med direktgjuten slitbetong fördelade per region, Hassan (2011).

Slitbetong (direktgjuten slitbetong)

För den direktgjutna slitbetongen (DS), som alltså utgör en undergrupp till den ovan, iakttas följande:

Det totala antalet broar med DS är 547 st. med en fördelning mellan regionerna enligt följande: Nord 170 st. (11 % av totala antalet betongfarbanor), Mitt 165 st. (8 %), Sthlm 12 st. (1 %), Syd 45 st. (2 %), Väst 71 st. (3 %), Öst 84 st. (4,5 %), d.v.s. andelen DS varierar betydligt mellan regionerna, se **Figur 4.1** och **Figur 4.2**.

Det finns faktiskt ett antal broar utförda med DS (11 st.) före 1916 och då som pågjutning vid senare reparation. De flesta broarna med DS är utförda under de senaste 70 åren; 144 st. mellan 1938 och 1958, 74 st. mellan 1959 och 1979, 151 st. under perioden 1980 – 2000 och 83 st. utförda under de sista 10 åren.

När det gäller fördelningen i storlek iakttas att den dominerade storleken är mellan 0 och 400 m² konstruktionsarea respektive 0 – 30 m spännvidd, se **Figur 4.3**.

I studien har även skador på brofarbanorna studerats. Det kommenteras att i BaTMan finns endast i en första nivå, data om skador som fortfarande är aktuella d.v.s. skador som är ”öppna”. Ska man studera skador som reparerats och åtgärdats till ursprungligt skick måste man söka information på detaljnivå för varje bro. Detta skulle kunna utföras i framtida studier.

I förstudien i BaTMan har för typen direktgjuten slitbetong påträffats 48 broar med skador *Hassan (2011)*. Följande skadetyper är noterade i Batman på broarna: dragspricka (13 st.), spricka (10 st.), vittring (4 st.), krackelering (4 st.), slaghål (3 st.), spjälkning (3 st.), spårbildning (2 st.), sår (2 st.) samt med notering av skadetyper: böjspricka, repa, defekt, gjutsår, avvikelser från standard och övrigt.

Inom region Nord har 10 % av de utförda broarna (totalt 170 st. någon form av skada. Ungefär 4 % har skador i form av sprickbildning. Intressant är att utreda skillnader mellan dragspricka och spricka i undersökningen. Det har nyligen gjorts försök att genom studiebesök studera skillnaden, men broarna var (mars 2011) fortfarande mer eller mindre i vinterskrud. Sprickbildning är ett fenomen som fokuseras i design av brobanepattor av betong och det kan vara intressant att speciellt utröna orsaken till detta för aktuella broar. Det noteras att antalet öppna skador är relativt litet i relation till det totala antalet broar utförda av DS.

4.1.3 Uppföljning broar med direktgjuten slitbetong

Ett exempel på detaljgranskning av utförda broar med betongfarbanor är rapporterat av *Lindqvist (1999)*. Undersökningen är utförd på slitbetongbroar byggda under 90-talets senare del i region Nord (Norr- och Västerbotten). Brofarbanans skick har dokumenterats genom visuell observation, mätning av jämnhet och allmänna skick. Även uppgifter om materialval, arbetsmetoder, entreprenörer har insamlats i de fall där detta finns dokumenterat. Totalt har 23 broar studerats. Huvudsyftet med undersökningen var att utreda om problem med uppstickande fibrer förekom i någon form men undersökningen hade även som mål att studera allmän kvalitet hos brobanorna.

Resultatet visar att uppstickande fibrer förekommer i flera av broarna och att fibrerna inte rostar av med en gång, d.v.s. problemet är inte snabbt övergående. En något större andel uppstickande fibrer förekom vid bron båda ändar eftersom det, enligt Lindqvist, inte går att dra vibrobryggan ända ut till kanten. Huruvida uppstickande fibrer är något problem diskuteras i undersökningen och det konstateras att de i någon mån kan skada vissa trafikanter (fotgängare och djur) samt orsaka punktering av cykeldäck, speciellt om bron är förlagd i närheten av bebyggelse t.ex. inne i ett samhälle, se vidare avsnitt 4.2.3.

Undersökningen visar att beträffande jämnhet så uppfyller flera broar inte kravet enligt VÄG 94. Det noteras att även om en yta, som enligt mätning med rätskiva är ojämn, behöver den inte orsaka dålig åkkomfort.

Det kommenteras att om en slitbetong gjuts och inte uppnår tillämplig jämnhet bör den fräsas. Detta har ofta visat sig medföra andra olägenheter t.ex. att fibrer och ballastkorn rivs upp. En fräst slitbetong ger dock ofta en god åkkomfort och ett estetiskt tilltalande utseende. Cirka hälften av broarna i undersökningen är frästa.

Det har i rapporten noterats eventuell förekomst av sprickor och andra olägenheter relaterade till krymprörelser och temperatureffekter. För en del av broarna, c:a 30 %, noteras att sprickor finns på brobaneplattan. De förekommer i så fall mestadels lokalt på delar av bron, har en sprickvidd 0,5 - 1,0 mm, en längd av någon dm och ofta i form av ett krackeleringsmönster. Ibland är sprickorna orienterade i 45 graders vinkel relativt bron längdriktning. I de flesta fall är sprickorna dokumenterade med fotografier.

Intressant är den 45 gradiga sprickorienteringen längs bron – ett fenomen som ofta förekommer på slitbetonger. Frågan är om huvuddragsspänningarna är 45 gradigt orienterade på brobaneplattan beroende på någon tvångssituation eller om det är andra fenomen som påverkar orienteringen.

När liknande sprickor har uppstått i andra sammanhang med sådan orientering har det varit fråga om tidiga torksprickor, d.v.s. plastiska krympsprickor, uppkommande under första 12 timmarna efter gjutningen.

I rapporten finns inte helt fullständiga data om det konstruktiva utförandet d.v.s. tjocklek på slitbetongen, vilken betongkvalitet som valts etc. Information om hur betongen göts, avjämnats och härdats finns inte fullständigt redovisat i rapporten, säkerligen beroende på svårigheter att hitta grunddata.

Från dessa något ofullständiga data kan man i alla fall observera tendensen att om täckning eller membranhärdning utfördes kunde tidiga sprickor undvikas även om gjutningen skedde under perioder med torr luft och blåsig väder.

Betongens *vct* varierade mellan 0,37 och 0,45 trots att den beställda kvaliteten var K40. Frostbeständigheten varierade mellan ”godkänd” och ”mycket god”. Fibermängden var i de flesta fall 55 kg/m³; i något fall hade 65 kg/m³ doserats. Fibertypen verkar vara Dramix 30 mm även om den visuella observationen i några fall noterade längre fibrer.

4.1.4 Intressanta frågeställningar vid djupinventering för varje bro separat

Den generella frågan i sammanhanget är, enligt ovan, hur slitbetongen utformats för broarna d.v.s. tjocklek, betongkvalitet, armeringsinnehåll, fiberinnehåll, fibertyp, utförandet, väderlek, etc.

Vid en utförlig inventering kan det dessutom utredas hur stora trafikmängderna har varit uttrycka som $\dot{A}DT$ och $\dot{A}DT/körfält$. Intressant är att dokumentera om saltning har skett vintertid.

En väsentlig fråga att utreda för broarna är om det rör sig om nyproduktion eller reparation. En djupinventering bör ge svar på om det finns data från kontrollprovning, speciellt vidhäftning mellan konstruktionsbetong och slitbetong.

Intressant är att studera hur man har skapat vidhäftning. Har det varit frågan om enbart ett ”gott utförande” eller har man valt primer, slamning, epoxi, dymlingar etc?

Det hade även varit av värde att studera om man har nått tillräcklig jämnhet i broarna enligt BaTMan och hur man i så fall har åstadkommit detta? Var man nöjd från början eller har man slipat ytan? Finns det information om slitage, d.v.s. spårbildning, i utförligare studier i BaTMan.

4.2 Kravspecifikation och funktion

4.2.1 Allmänt

En vägbros farbana har flera funktioner:

- a) jämnhet för trafikanternas komfort,
- b) föreskriven planhet och lutning för vattenavrinning,
- c) friktion för väggrepp och halksäkerhet,
- d) skydd för konstruktionsbetongen mot vatten, fukt och salt,
- e) slitstyrka och deformationsmotstånd samt
- f) beständighet.

Vidare tillkommer värdefulla funktioner som

- g) liten bulleralstring vid trafikering,
- h) ljushet för synbarhet och minskade energikostnader för belysning (inom tätbebyggt område) samt
- i) lägre partikelalstring.

4.2.2 Betongfarbana i slitbetong

Beträffande slitbetong gäller enligt BRO 2002 följande krav:

- Utförande betongklass I, betong, delmaterial och tillverkning motsvarande konstruktionsbetong för broar t.ex. Anläggningscement
- Betongens ballast uppfyller krav angående kornfördelning, kulkvarnsvärde (ATB Väg kap G)
- Minsta tjocklek 70 mm
- Mängd stålfibrer enligt omräkning från motsvarande mängd slakarmering.
- Motgjutning mot färsk yta alternativt minst 45 % av fordrad hållfasthet av konstruktionsbetongen. Vid pågjutning ska gjuthuden avlägsnas liksom ojämnheter ned till 2 mm djup i genomsnitt
- Färdig betongbeläggning ska ha en rå yta med god friktion
- Toleranser för färdig yta enligt ATB VÄG kapitel A och BRO 2002 62.411 och 61.412.

Kommentarer kring funktionskraven är många, se t.ex. *Jannok (2005)*.

4.2.3 För- och nackdelar med slitbetong utan tätskikt

För slitbetongen är de största fördelarna slitstyrka, deformationsmotstånd och beständighet. I **Tabell 4.1** finns det ofta omtalade problemet med utstickande fibrer omnämnt. Enligt fiberbetongens kritiker skall utstickande fibrer kunna orsaka både punktering på cyklar och skador på hundars tassar. CBI Betonginstitutet är dock av den uppfattningen att dessa eventuella nackdelar i stor utsträckning är en myt. Utstickande fibrer lägger sig ned och rostar dessutom bort tämligen snabbt. Det finns vidare tekniker att ytvibrera betongen så att fibrerna inte behöver sticka upp ur den färska betongen. Ett examensarbete från KTH stöder detta, *Pajander (1995)*.

Tabell 4.1 För- och nackdelar med slitkikt för brobaneplattor.

Fördelar	Nackdelar
Stor slitstyrka.	Svårighet att åstadkomma jämnhet utan kostsam slipning.
Stort motstånd mot deformationer.	Många entreprenörer saknar erfarenhet.
God beständighet.	(Om av fiberbetong) uppstickande fibrer.

4.2.4 Spårbildning

Beträffande spårbildning bör gränser för största maximalt tillåtna spårdjup anges med hänsyn till komfort och trafiksäkerhet. Gränsen har diskuterats i olika sammanhang och olika nivåer föreslås innan omfräsning bör ske. T.ex. föreslår *Jannok (2004)* att vid ett medelspårdjup på 15 mm bör omfräsning ske. Man bör här iaktta att omfräsning kan medföra nedsatt slitstyrka och frostmotstånd på grund av uppkomst av mikrosprickor vid ytan. Diamantslipning kan vara ett alternativ eftersom denna metod ger mindre åverkan på ytan, *Hultqvist och Carlsson (2002)*.

4.3 Dimensioneringsfilosofi

I det följande presenteras CBI Betonginstitutets förslag till rekommendationer. Det bygger i huvudsak på resonemang i en rapport som CBI Betonginstitutet skrivit på uppdrag av dåvarande Vägverket, *Silfwerbrand, (2009b)*, d.v.s. ytterst på följande tre kunskapskällor:

1. Vägverkets publikation nr 56:2004, *Vägverket (2004)*.
2. Svenska Betongföreningens golvrappport, *Svenska Betongföreningen, (2009)*.
3. Författarens erfarenhet och kunskap kring pågjutningar, se t.ex. *Silfwerbrand (1997)* och *Silfwerbrand (2009a)*.

4.3.1 Tjocklek

Slitbetongens tjocklek h_1 bör vara minst 70 mm. Minimivärdet är medvetet valt relativt stort. Orsaken är att man då kan använda ballast med maximal stenstorlek upp till $d_{\max} = 18$ mm vilket ger förutsättningar för att skapa en betong med hög slitstyrka och begränsad krympning. En slitbetong med denna tjocklek kan vid behov (spårbundet slitage) även slipas 25 mm och ändå fungera väl.

Väljer man en större maximal ballaststorlek, d_{\max} , bör tjockleken ökas så att villkoret $h_1 > 4d_{\max}$ uppfylls.

4.3.2 Betongmatris

Aktuell betong skall uppfylla ställda krav på beständighet, slitstyrka, styvhet, begränsad krympning, friktion, känslighet för frosthalka, jämnhet, buller och ljushet. I många faller ställs krav enbart på beständighet. Betongen skall uppfylla material- och utförandekraven enligt

del 4 i Bro 2004, *Vägverket, (2004)*. Krav för de strängaste exponeringsklasserna XD3 och XF4 i livslängdsklass L 100 skall uppfyllas.

Väsentligt för betongens slitstyrka är hög stenhalt, största möjliga d_{\max} , hög hållfasthetsklass och utvald ballast av bergart med hög slitstyrka. Det är fel att ställa krav på receptet, men $d_{\max} = 18$ mm, C 45/55 och bergarter som diabas, hälleflinta eller porfyr ger vägledning. Hög hållfasthetsklass ger automatiskt även hög elasticitetsmodul och styvhet. Hög stenhalt ger förutsättningar för begränsad krympning. Ljusheten påverkas av cementpastans och ballastmaterialets ljushet samt ifall ballasten är exponerad eller inte. Genom val av ljus ballast och friläggning av ballasten kan man nå långt, *Löfsjögård, (2003)*.

Övriga krav handlar inte enbart om betongen utan också om utförandet. Även om det finns vissa motsättningar mellan t.ex. slitstyrka och friktion å ena sidan och jämnhet och bullerbegränsning å den andra finns det möjligheter att optimera betongrecept och utförande för att nå alla krav, *Löfsjögård, (2003)*.

4.3.3 Konventionell armering

Vi förutsätter fullständig vidhäftning mellan konstruktionsbetong och slitbetong. Metoder för att säkerställa fullständig vidhäftning redovisas i *Svenska Betongföreningen (2009)*, avsnitt 8.3. Erforderlig armering kan bestämmas på två sätt; (1) med hjälp av en ekvation för minimiarmering och (2) med utgångspunkt från spricksäkerhetskrav. I det första fallet bestäms armeringsmängden som $0,7 \cdot \rho_{\min}$, där $\rho_{\min} =$ minimiarmeringen enligt *BBK 04 (2004)*¹ och 0,7 är en faktor som beaktar att vi har fullständig vidhäftning (i BBK 04 talar man om friktion med friktionskoefficienten $\mu \geq 1,0$, men det kravet är automatiskt uppfyllt eftersom mothållet från fullständig vidhäftning är större än det från en aldrig så hög friktion) mellan de båda betongskikten. Minimiarmeringen bestäms i sin tur med följande ekvation:

$$\rho_{\min} = \frac{f_{\text{cth}}}{\sigma_s} \quad (4-1)$$

där $f_{\text{cth}} =$ högt värde på betongens draghållfasthet, räknat som $1,5 \cdot f_{\text{ctk}}$ för aktuell betong, och $\sigma_s =$ dragspänningen i armeringen, begränsad till 420 MPa.

Det andra sättet – som även kan användas för en tunn, oarmerad pågjutning – innebär att vi beräknar en sannolik sprickbredd och jämför den med ett krav på sprickbredd m.h.t. beständighet och trafikanternas komfort. Franska, *Laurence m.fl. (2000)*, och svenska försök, *Carlsvärd (2006)* visar att sprickavståndet i en vidhäftande pågjutning blir av storleken $n \cdot h_1$, där $h_1 =$ pågjutningens tjocklek och $n =$ multipel nära $n = 3$. Vi kan skriva kriteriet enligt följande:

$$w = 4,5 \cdot h_1 \cdot \varepsilon_{\text{cs}} < w_{\text{krav}} \quad (4-2)$$

där $w =$ beräknad sprickbredd, $h_1 =$ pågjutningens tjocklek, $\varepsilon_{\text{cs}} =$ slutvärde för betongens fria krympning i aktuell utomhusmiljö samt $w_{\text{krav}} =$ maximal tillåten sprickbredd, normalt $w_{\text{krav}} =$

¹ I slutrapporten kan vi ta fram en ekvation som baseras på EK 2, men i pilotrapporten behåller vi BBK 04.

0,05 mm. Här har faktorn 4,5 använts i stället för faktorn 3 som används i *Svenska Betongföreningen (2009)*. Orsaken är att inte bara begränsa medelsprickbredden under den önskade kravnivån utan även att säkerställa att antalet övertramp statistiskt sett blir få. Av ekvationen framgår att det är gynnsamt att begränsa krympningen. Utomhus borde man kunna få ned den fria krympningen till 0,3 % ifall man ställer krav på betongleverantören. Ett krav $w < 0,10$ mm kan då uppnås för en 75 mm tjock slitbetong (även utan armering).

4.3.4 Stålfiberinnehåll

Erforderlig mängd stålfibrer är beroende av fibertyp och betongmatrix. Något generellt värde kan därför inte ges. Erforderligt fiberinnehåll måste bestämmas genom förprovning av tänkt betongrecept för att harmonisera med krav på verkningsätt, i synnerhet maximal sprickbredd. Förprovningsen skall utföras som böjprovning av fiberbetongbalkar. Krav ställs på uppmätt residualhållfasthetsfaktor och erforderligt fiberinnehåll är den minsta mängd fibrer som ger en betong som uppfyller kravet.

4.3.5 Residualhållfasthetsfaktor

Den residualhållfasthetsfaktor som bestäms genom förprovning skall dels uppfylla generella krav, dels specifika krav. Det generella kravet syftar till att säkerställa en viss grad av seghet, det specifika kravet syftar till att säkerställa sprickfördelning.

Det generella kravet lyder:

$$R \geq 50 \% \quad (4-3)$$

Det specifika kravet kan uppfyllas på två olika sätt:

$$R \geq 70 \% \quad (4-4a)$$

$$w = 4,5 \cdot (1 - R/100) \cdot h_1 \cdot \varepsilon_{cs} < w_{krav} \quad (4-4b)$$

där w , h_1 , ε_{cs} och w_{krav} har samma betydelse som för den konventionellt armerade slitbetongen.

Ekvation (4-3) skall alltså alltid uppfyllas. Utöver det gäller att antingen ekvation (4-4a) eller (4-4b) skall uppfyllas. Konkret innebär det att en betong med $R = 60$ % kan vara tillfyllest ifall sprickbredden w enligt ekvation (4-4b) uppfyller ställda krav ($w < w_{krav}$).

I normalfallet skall residualhållfasthetsfaktorn R bestämmas som $R_{10,20}$ enligt *Svenska Betongföreningen (1997)*. Alternativt kan faktorn R_1 bestämd enligt *SS-EN 14651 (2005)* användas. Resultatet blir i stort detsamma, se bilaga E i *Svenska Betongföreningen (2009)*.

4.3.6 Alternativa fibrer

Fibrer av konventionellt stål dominerar marknaden, men det finns även varmförzinkade fibrer, fibrer av rostfritt (läs: rosttrögt) stål, glasfibrer, kolfibrer och olika typer av plastfibrer (nu-

mera efter engelskt inflytande vanligen kallade syntetiska fibrer). Det finns inget generellt hinder för att använda dessa fibrer. Det man behöver beakta är följande:

- Olika fibrer har helt olika egenskaper (t.ex. hållfasthet, styvhet, längd, slankhet, form, ändkrokar) och verkar på olika sätt och olika effektivt i betongen. De har också starkt varierande densitet. Man kan därför inte byta en fibertyp mot en annan utan omfattande provning och förändring av fiberinnehållet.
- Alla fibrer är inte beständiga i betong. Vi vet att vanliga stålfibrer visserligen korroderar i betongytan och i sprickor ifall fuktigheten är tillräckligt hög, men att de i grunden är mer beständiga än vanlig armering. Zinken i galvaniseringen reagerar i färsk betong p.g.a. den alkaliska miljön och en del av skyddet försvinner därför direkt (ofta levereras galvaniserade stålfibrer i flak som hålls ihop av ett lim innehållande en inhiberare för att förhindra vätgasutveckling, *Silfwerbrand (2009c)*). Glasfibrer bryts så småningom ned i den alkaliska miljön (nedbrytningen kan bromsas och t.o.m. förhindras genom tillsats av silika som sänker pH under den kritiska nivån).
- Långtidsegenskaperna är olika. Fiberbetong med syntetiska fibrer kryper mer än fiberbetong med stålfibrer. Detta behöver inte vara något problem i pågjutningar men förhållandet bör ändå nämnas.

Om man beaktar ovanstående punkter, finns inga hinder för användning av t.ex. syntetiska fibrer. Kraven på betongmatris och residualhållfasthetsfaktor skall vara desamma. Det kan påpekas att de syntetiska fibrer som idag finns på marknaden behöver tillsättas i ungefär dubbelt så höga doser som vanliga stålfibrer för att ge likvärdig seghet (= residualhållfasthetsfaktor), *Silfwerbrand, (2005); Døssland, (2008)*. Anta att stålfiberinnehållet 40 kg/m^3 uppfyller kraven. Volymprocenten är då 0,5. Med tanke på att syntetiska fibrer har densiteten 900 kg/m^3 skulle det motsvara ett fiberinnehåll av $2 \times 0,005 \times 900 = 9 \text{ kg/m}^3$. Så stora halter kan vara svåra att blanda in i betongen. Tilläggas kan att det enbart är den grupp av syntetiska fibrer som kallas makrofibrer som hittills visat sig ge någon effekt på bärförmågan och segheten. Mikro-fibrer ger vissa andra positiva effekter som minskad risk för plastiska krympsprickor och bättre motstånd mot avspjälkning vid brand.

4.4 Utformning

Som tidigare nämnts utförs betongfarbanor som pågjutning på tidigare gjuten (gammal vattenbilad) betong eller som direktgjuten pågjutning på färsk betong.

Beträffande direktgjuten slitbetong har krav listats i avsnitt 4.2. Följande kan kommenteras, se t.ex. *Jannok (2004)*:

- Avseende materialval och utförande för slitbetongen hänvisas endast till bronormen för konstruktionsbetong. Det finns således inga särskilda krav för t.ex. parametern krympning och andra viktiga förhållanden såsom att åstadkomma jämn öppethållandetid hos cementet/betongen vilket har stor betydelse för vidhäftning och ytfinish.
- Det noteras att ballast för slitbetong ska uppfylla krav på nötningsmotstånd och begränsat buller. Kulkvarnsvärdet alternativt slipvärde och sprödhetstal relateras därvid till förväntad maximal trafik under de närmaste 10 åren (ABT Väg 2003). Dessutom finns rekommendationer om 50 % passerande mängd på 8 mm sikt. Med hänsyn till bullernivå begränsas maximal stenstorlek till 16 mm.

- Behandling av färsk slitbetong är något oklart specificerad. Det föreskrivs att ytan ska gjutas och brädrivas så att ytan blir jämn och vattenavrinning tillfredsställande. Brädrivning av en slitlageryta är svår att praktiskt genomföra i och med att man då måste gå i den redan gjutna betongen. Brädrivning förekommer sällan idag.
- Det bör ställas krav på att arbetsmetoder verkar för att minimera mängden cementpasta som arbetas upp i ytan. Detta eftersom stor andel cementpasta i ytan minskar nötningsmotståndet mot t.ex. dubbdäck och tung trafik.
- Huruvida man ska begränsa uppstick av stålfibrer i ytan är oklart/inte alls beskrivet i normen. Ska något specificeras bör man särskilja på ytor för biltrafik och för gående och cyklister. Eventuellt kan stålfibrer bytas ut mot polymerfibrer el.dyl. om dessa har säkerställd sprickfördelningseffekt mot bl.a. effekter av långtidskrympning.
- Ett krav att betongrecept ska förprovas innan arbetena påbörjas. Ett sådant krav skulle förbättra slutresultaten avsevärt. Något sådant krav finns inte idag.
- Metod för efterbehandling bör redovisas innan arbetena startas. Normmässigt får man använda membranhärdare men effekten av membranhärdare på ythållfastheten är inte utredd.
- Effekt av stålfibrer, enligt avsnitt 4.3.4 – 4.3.6 bör dokumenteras.
- Det bör tydliggöras hur den färdiga pågjutningen ska kontrolleras avseende vidhäftning mot konstruktionsbetongen d.v.s. antalet dragprov per gjuten yta, se avsnitt 4.5.2.

4.5 Utförande

4.5.1 Allmänt

Utförande ska säkerställas så att man erhåller god vidhäftning mot konstruktionsbetong, god homogenitet i den färska betongen men framförallt så att man åstadkommer en slitstark betong utan sprickor och andra olägenheter.

Allmänt gäller vid avjämningen av betongen att tillse att ojämnheter/vågigheter inte uppkommer i bron. Detta ses som något som inte accepteras av trafikanterna bl.a. med hänsyn till komfort. Vågigheterna uppstår bl.a. när vibrobryggan körs i omgångar eller när den stannas upp för lång tid. Dessutom bör beaktas att ju mer betongen bearbetas, t.ex. för att åtgärda ojämnheter, desto mer cementpasta arbetas upp till ytan.

Det är som tidigare nämnts mycket viktigt att förprovning utförs av slitbetongen för att förutom de sedvanliga betongparametrarna även säkerställa konsistens och öppethållandetid. Gränsvärden för acceptans av betonglass fastställs. Fiberinblandning ger förändringar av betongens konsistens vilket dokumenteras.

En arbetsbeskrivning upprättas beträffande överenskommen gjuthastighet, utläggningssätt, härdningsförfarande etc. Här kan en provgjutning utföras där man simulerar de verkliga förhållandena.

En god vidhäftning mellan konstruktionsbetong och överbetong kan inte förbises. I de fall vattenbilning av tidigare betong/ytbeläggning sker, är det viktigt att all gammal betong och eventuella isoleringsrester avlägsnas. Den vattenbilade ytan bör högtrycksspolas så alla lösa

betongkorn försvinner och så att ytan är helt ren. Därefter ska den gamla betongen hållas fuktig. Ingen fordonstrafik eller dylikt ska därefter förekomma på konstruktionsbetongen.

Stor omsorg läggs vid avdragsbanor så att rätt nivå erhålls mot kantbalk och mot bromitt. (Ofta sker gjutning av halva bron i taget, d.v.s. ena färdriktningen)

I de fall direktgjutning sker på färsk betong ställs krav på undergjutningens styvhet. Denna får inte vara för lös och ytan ska vara slät. En tumregel är att när konstruktionsbetongen är så pass styv att man kan gå på den utan att göra alltför stora märken är den mogen för att slitbetongen skall kunna gjas. Undergjutningens karaktär är beroende på tid mellan undergjutningen och pågjutningen d.v.s. hur lång tid som kan accepteras mellan de båda skikten beroende på väder, konsistens etc. Vid en mindre gjutning bör säkerställande av underbetongens karaktär inte innebära något problem men för en större gjutning kan fall inträffa då pågjutningens gjutfront ”hinner ikapp” undergjutningen.

Vid gjutningen säkerställs en homogen betong genom en väl anpassad gjuttakt så att utläggning, vibrering om sådan utförs, och avjämning hinns med. Provtagning sker på betong innan gjutansvarig godkänner leverans från enskilt lass.

Vibrering sker i så fall med vibrobalk/brygga och om nödvändigt vibrostav. Viktigt är att hitta rätt metodik hur bryggan ska dras över betongen. Den ska dras över all utlagd betong även om gjutfronten inte är rak. Det är även väsentligt att man har lagom mycket betongmassa framför bryggan d.v.s. det ska finnas ett betongöverskott på någon/några cm. Bryggan dras förbi fronten utan att den slås av.

Efter avdragning av ett lass lyfts bryggan upp och backas bakåt förbi gjutfronten och 1 – 2 m ytterligare. Därefter kan bryggan slås på för avdragning av nästa lass.

Start och stopp kan ge lokala vågor i betongen genom att bryggan står still på en för lös betong när den startas/stoppas.

Observera att man vid direktgjutning på färsk betong inte ska vibrera ihop de två olika betongtyperna d.v.s. slitbetongen ska inte blandas ihop med konstruktionsbetongen av lägre kvalitet och utan fibrer.

En slodning utförs tvärs färdriktning med magnesiumsloda el.dyl. för att uppnå en jämn yta utan ryggar o.s.v. Eventuellt utförs kvastning el.dyl. av ytan för att åstadkomma önskad ytstruktur.

Härdning sker omedelbart efter gjutning. Vid behov sker fuktning med dimspruta och applicering av membranhärdare. Vattning av den nygjutna betongytan påbörjas så snart betongen hårdnat tillräckligt för att inte skadas vid vattningen. Därefter täcks ytan med plast och presenning. Vintertid kompletteras vattenförseglingen med betongtäckmatta. Vatten påförs med jämna mellanrum så att inte uttorkning sker under presenningarna. Tidigast 5 dygn efter gjutningen avtäckes ytan. Vintertid värmehärdas betongen.

4.5.2 Kontroll

Vägverkets krav att den färdiga pågjutningen skall bomknäckas, *Vägverket (2004)*, bör kvarstå. Bomknäckning är en ypperlig metod för att snabbt få en uppfattning om ytor utan

vidhäftning ("bom"). Den tidigare ekvationen för utvärdering (baserad på medelvärde och standardavvikelse) bör dock ersättas med följande villkor:

$$0,9 \cdot m_{\text{lågsta } 1/3} \geq f_v \quad (4-5)$$

där f_v = fordrad hållfasthet och $m_{\text{lågsta } 1/3}$ = medelvärde för den tredjedel av provkropparna som fått lägst brottvärde vid provningen. För tre prov är $m_{\text{lågsta } 1/3}$ = lägsta mätvärde, för sex prov är $m_{\text{lågsta } 1/3}$ = medelvärdet för de två lägsta mätvärdena o.s.v. Ifall provningen genomförs som ren dragprovning bör fordrat värde $f_v = 0,8$ MPa, ifall provningen genomförs som vridprovning bör fordrat värde sättas till $f_v = 1,5$ MPa.

En utförligare diskussion om kvalitetssäkring av vidhäftning finns i *Silfwerbrand (2009b)*. Där presenteras och motiveras även detta förslag mer ingående.

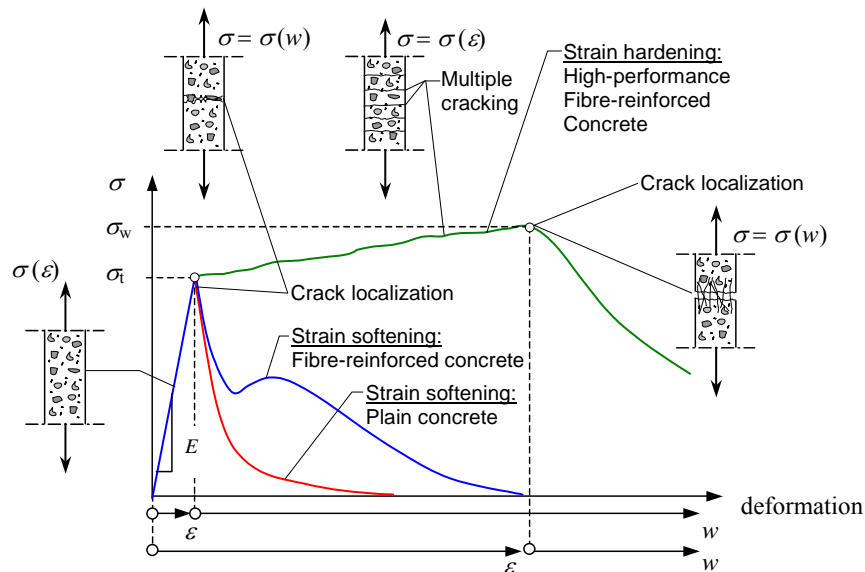
4.6 Extremt högpresterande fiberarmerad betong

Under det senaste decenniet har en hel del forskning genomförts rörande mycket högpresterande fiberarmerad betong. Denna typ av material har också funnit allt fler tillämpningar i industrin. Det har också använts i pilotprojekt för förstärkning och reparation av broar. Exempel på sådana material är den "UHPFRC" (Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete) som utvecklades i EU-projektet SAMARIS (20xx) och "Densit" som utvecklats i Danmark (20xx).

Några av de egenskaper som utmärker extremt höghållfast fiberarmerad betong är:

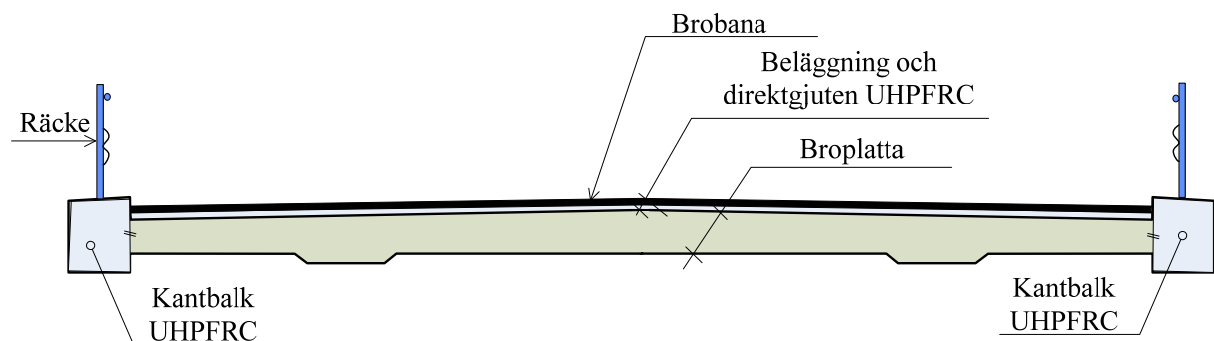
- Mycket hög hållfasthet (tryckhållfasthet > 150 MPa och draghållfasthet > 10 MPa)
- Töjningshårdnande efter initiering av mikrosprickor vid dragbelastning, se Figur 4.3. Den höga draghållfastheten erhålls genom inblandning av en stor mängd stålfibrer, typiskt 6 % ≈ 450 kg/m³
- Mycket låg permeabilitet, även efter mikrosprickbildning
- Goda vidhäftningsegenskaper till armering och befintlig betong
- God nötningsbeständighet
- Självkompakterande

Vid dragbelastning uppvisar material ett töjningshårdnande under utveckling av mycket tunna och väl distribuerade mikrosprickor, se **Figur 4.4**. Töjningsmjuknande och lokalisering av sprickbildningen sker först vid en töjning av samma storleksordning som vid lokalisering i tryck för ordinär betong. Detta betyder att materialet bibehåller en mycket låg permeabilitet även efter det att mikrosprickbildning initierats i betongmatrisen.



Figur 4.4 Responsen hos oarmerad och fiberarmerad betong av olika typer, från Löfgren (2005).

Extremt högpresterande fiberarmerad betong har använts för att förstärka, reparera och skydda broar i flera pilotstudier. Exempel på förstärkning och reparation av brobaneplattor, kantbalkar, betongbarriärer, bropelare och industrigolv redovisas av *Brühwiler och Denarié (2008)*. Permeabiliteten och hållbarheten i aggressiv miljö hos materialet har studerats av t.ex. *Charron et al. (2007)* respektive *Pimienta och Chanvillard (2005)*. En utformning av en ”svensk” brobaneplatta skulle kunna tillverkas och se ut som i **Figur 4.4**.



Figur 4.5 Exempel på tillämpning av extremt högpresterande fiberarmerad betong (UHPFRC) för ökad beständighet hos broar och hur metoden skulle kunna tillämpas på en ny svensk brobaneplatta.

De moment som skulle ingå vid denna utformning är gjutning av den vanliga betongplattan, som kanske kan göras några cm tunnare, lätt vattenbilning av betongens överyta, gjutning av kantbalkar och ett 30 mm skikt UHPFRC samt utförande ett asfaltbaserat slitskikt. Eftersom det anges att kostnaden för UHPFRC är av storleksordningen 20 gånger kostnaden för vanlig betong handlar denna utformning en tilläggskostnad av 5000 à 7000 kr extra per m².

Extremt högpresterande fiberarmerad betong kan också vara mycket lämpligt för sammanfogning av prefabricerade broelement vid elementbyggnad av broar. Försök vid Chalmers har

visat att fullständig samverkan mellan betongelement kan åstadkommas med betydligt mindre fogar och enklare armeringsutformning mellan elementen än vad som används idag.

Material, beräkningsmetoder och produktionsmetoder behöver dock utvecklas ytterligare för att bli praktiskt tillämpbara. Frågeställningar att titta närmare på kan vara

- materialsammansättning och -tillverkning,
- produktionsmetoder och gjutbarhet,
- konstruktionens prestanda med avseende på täthet, hållfasthet och beständighet,
- vidhäftning till befintlig betong och till armering samt
- beräknings- och analysmetoder.

Extremt högpresterande fiberarmerad betong kan vara intressant för ett flertal tillämpningsområden:

- Reparation, förstärkning, och uppgradering av befintliga broar
- Platsbyggda broar: övre skikt och kantbalkar som samverkar fullständigt med underliggande konstruktionsbetong och som ger dessa delar samma livslängd som bron i övrigt.
- Elementbyggda broar: sammanfogning och miljöskydd av prefabricerade broelement

4.7 FoU-behov

Följande punkter för forskningsbehov identifierades av Svenska Betongföreningens kommitté för industrigolv *Svenska Betongföreningen, (2009)* under rubriken ”Pågjutningar” och återfinns i kapitel 9 av den rapporten. Dessa gäller även i hög grad för brobaneplattor. Texten nedan är i stor utsträckning ett citat från den rapporten men några smärre strykningar och ändringar har införts.

- God rengöring är den enskilt viktigaste faktorn för att främja god vidhäftning mellan underlagsbetong och pågjutning, men vi behöver kunskap om kostnadseffektiva rengöringsmetoder och hur vidhäftningen påverkas om rengöringen inte är fullständig.
- Mikrosprickor, som vissa avverkningsmetoder ger upphov till, reducerar vidhäftningen men till vilken grad?
- När man gjuter underlagsbetongen måste man sträva efter att förhindra uppkomsten av ett svagt ytskikt kallat cementskikt eller laitanceskikt. Skiktet orsakas av separation i betongen, varför kunskapen om metoder som förhindrar separation behöver öka.
- Kompaktering är en annan viktig faktor för god vidhäftning. Vilka är de bästa verktygen för olika betongtjocklekar? Hur står sig självkompakterande betong i konkurrensen?
- God härdning är gynnsamt för många betongegenskaper inklusive vidhäftning. Mer kunskap behövs för att kvantifiera det gynnsamma sambandet mellan härdning och risken för krympsprickor.
- Motgjutningsytans fuktinnehåll vid pågjutningstillfället har en viss betydelse för vidhäftningen. Hur ser sambandet ut och finns det någon optimal fukthalt?

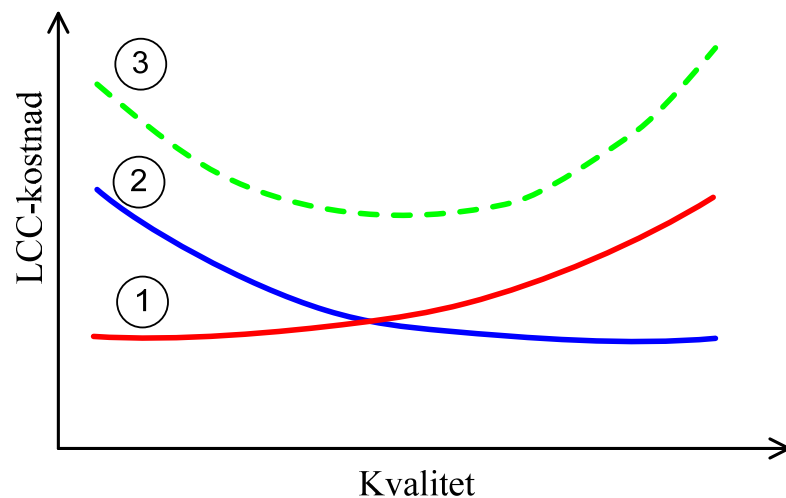
- De flesta forskningsrapporter framhåller att motgjutningsytans råhet enbart har en mindre betydelse för vidhäftningen, men många praktiskt verksamma ingenjörer delar inte denna uppfattning. Vem har rätt? Finns det ett tröskelvärde som definierar gränsen mellan inverkan och ingen inverkan, d.v.s. att släta ytor har betydelse för vidhäftningen (den sjunker) medan råheten över gränsvärdet inte ytterligare ökar vidhäftningen?
- Hur stor vidhäftning krävs för att säkerställa monolitisk samverkan mellan underlagsbetong och pågjutning? Är denna vidhäftning beroende av belastningsfallet och spänningstillståndet i den pågjutna konstruktionen?
- Differenskrypning har sysselsatt forskarsamhället i mer än 50 år, men fortfarande saknas en mekanisk modell som accepteras av alla. Utvecklas nya modeller måste dessa verifieras genom fältförsök.
- I speciellt Frankrike pågår omfattande forskning kring ”debonding” varmed menas fenomenet att vidhäftningen successivt bryts. Existerar detta fenomen i sinnevärden ifall alla förutsättningar för god vidhäftning är uppfyllda? Även om fenomenets omfattning skulle visa sig vara begränsad är det vetenskapligt intressant att studera, inte minst för att öka kunskapen om mekanismerna för vidhäftning.
- Pågjutningar armeras ofta. Betongföreningens rapport innehåller delvis nya rekommendationer om dimensioneringsmetoder. Hur pass bra är de och vilka säkerhetsmarginaler är inbyggda? Är fibrer bättre ur sprickfördelningssynpunkt än armeringsnät och lösa armeringsstänger? Utgör BBK 04 en bättre utgångspunkt för dimensioneringen än Eurokod 2?
- Pågjutningens och det pågjutna systemets beständighet är ett viktigt område. Frågor kring vidhäftningens beständighet, kompatibilitet mellan underlagsbetong och pågjutning samt armeringskorrosion i och i närheten av övergångszonen mellan de båda betongerna är viktiga att belysa.
- Utveckling av brobaneplattor med övre lager av extremt högpresterande fiberbetong. Material, beräkningsmetoder och produktionsmetoder behöver utvecklas ytterligare för att bli praktiskt tillämpbara. Frågor att studera kan vara materialsammansättning och -tillverkning, produktionsmetoder och gjutbarhet, samt konstruktionens prestanda med avseende på täthet, hållfasthet, beständighet och vidhäftning.
- Kostnader och underlag för LCC-analyser.

5. Ekonomi och LCC-analys för systemet brobaneplatta

5.1 Definitioner och principer

Liksom i all verksamhet gäller att tekniska åtgärder ska mätas mot ekonomiska krav. Underhåll ska optimeras så att nyttan med underhållsåtgärderna står i proportion till kostnaderna. Detta låter sig lätt sägas men är i praktiken mycket svårt. Få anläggningsägare är beredda att planera och ställa ekonomiska och organisatoriska resurser till förfogande så att underhållsåtgärderna kan optimeras efter strikt tekniska och ekonomiska principer. Tillgång till medel beror t.ex. ofta på politiska och arbetsmarknadsmässiga hänsyn och det är långt ifrån självklart att dessa stämmer med de verkliga behoven. Inom ramen för denna rapport är dock målet att diskutera underhåll och underhållsplanering efter rent tekniskt ekonomiska principer. Indirekt måste dock, liksom i alla verksamhet hänsyn tas till miljömål. Vi tänker oss dock att vi kan omräkna sådana mål i ekonomiska termer via s.k. LCA analyser så att de kan ingå i den totala kalkylen.

I det här aktuella fallet handlar det om att utforma det totala systemet brobaneplatta så att, för samhället optimal utformning erhålls. Rent principiellt så gäller troligen ett förhållande enligt **Figur 5.1**, vilken avser visa att ökad kvalitet vanligtvis ökar investeringskostnaden, men minskar underhållskostnaden och vice versa. Enligt denna idé finns också en optimal utformning som ger den lägsta totala kostnaden och maximala nyttan, allt mätt med s.k. LCC metoder. LCC metoder kommer att diskuteras i det följande.



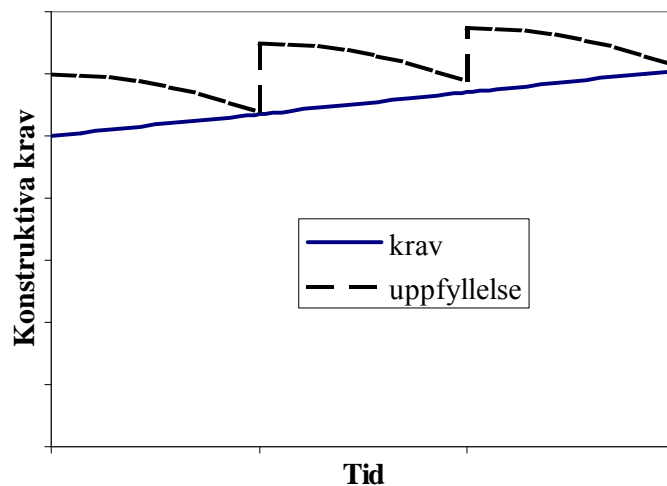
Figur 5.1 Schematiska kurvor som avser visa att ökad kvalitet ökar investeringskostnaden ①, men minskar underhållskostnaden ② och att det finns ett optimum för den totala kostnaden ③.

Vi kommer således att i detta kapitel att översiktligt diskutera ekonomiska aspekter på investering och underhåll samt val av olika åtgärder för underhåll, reparation och förstärkning av systemet brobaneplatta. Detta system är det som kräver mest underhållskostnader för Sveriges broar och är därmed det viktigaste för planering av konstruktion och underhåll för normala broar.

Vi kommer speciellt att diskutera LCC-analys som vi här definierar som totalkostnad för en anläggning för hela dess livslängd. Denna kostnad ska i en LCC-analys mötas av nyttan av konstruktionen under dess livstid.

Kraven på en konstruktionsdel som ingår i en konstbyggnad ökar ofta med tiden, t.ex. beroende på ökade krav på laster eller förbättrad funktion i övrigt. När den först konstrueras ges den därför ofta en viss överstyrka. Denna överstyrka definieras i gällande normer. Miljö- och funktionsbetingad nedbrytning minskar delens förmåga att uppfylla krav varför den repareras. Vid reparationen ges den ofta en större styrka än ursprungligt (förbättring) för att den skall kunna möta nya krav på motståndskraft mot laster och miljönedbrytning. Detta sker ofta automatiskt eftersom man normalt vid reparationstillfället tillämpar den norm som då gäller och kraven enligt normerna historiskt sett har visat sig öka med tiden.

I **Figur 5.2** visas principiellt hur en konstbyggnads livscykel kan te sig om den utsätts för nedbrytning och om den repareras/förbättras.



Figur 5.2 *Kraven på en konstruktionsdel som ingår i en konstbyggnad ökar ofta med tiden, t.ex. beroende på ökade krav på laster och liknande. När den först konstrueras ges den därför ofta en viss överstyrka. Miljö- och funktionsbetingad nedbrytning minskar delens förmåga att uppfylla krav varför den repareras. Vid reparationen ges den ofta en större styrka än ursprungligt (förbättring) för att den ska kunna möta nya krav på motståndskraft mot laster och miljönedbrytning.*

5.2 LCC-analys

5.2.1 Nyttan av en konstruktion

Det finns många krav på en konstruktion som ingår i den trafiktekniska infrastrukturen. Vi skulle kunna göra följande kravsystematik

- 1) hållfasthet
- 2) ekonomi)

- 3) beständighet
- 4) miljö
- 5) uthållig utveckling
- 6) estetik
- 7) socialt ansvar

Med utgångspunkt från ovanstående aspekter skulle man kunna gradera vad som kan ingå i begreppet ”optimal konstruktion”.

Hållfasthet och ekonomi

Kombinerar man de två första två aspekterna 1) och 2) får man den klassiska uppgiften för en konstruktör, nämligen att konstruera en bro med tillräcklig hållfasthet till lägsta investeringskostnad, se **Figur 5.3**.

Eftersom denna arbetsuppgift är konventionell kommer den inte att behandlas mer omfattande i denna rapport. Några idéer kommer dock att presenteras.



Figur 5.3 *En klassisk uppgift för konstruktörer är att konstruera broar till lägsta anläggningskostnad.*

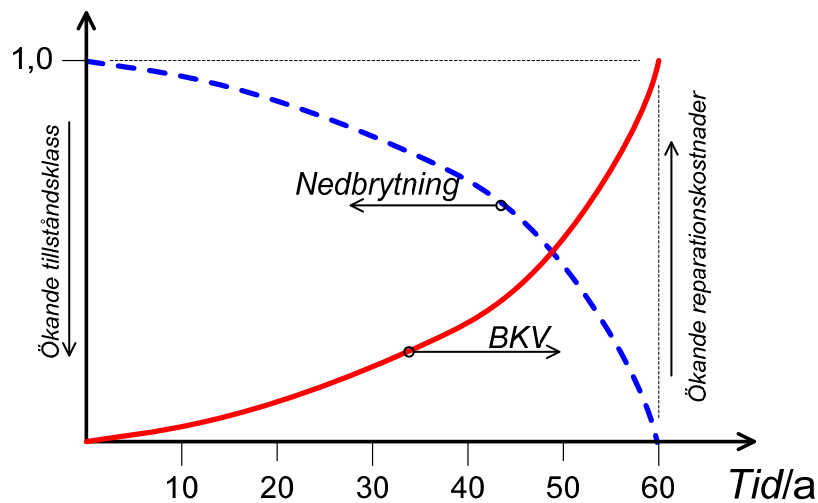
Vi har inte gjort någon särskild sökning inom detta område, men några referenser med nordisk anknytning är *Correialopes Jutila (1999)*, *Rautakorpi (1988)* och *Sylwest, Lämsä, Öderud, Lindblad (1996)* och *Sundquist (1999)*. Vägverkets publikationer 1996:63 och 1998:114 presenterar indirekt vilka brotyper som visat sig mest gynnsamma i praktiken. I läroböcker eller i state-of-the-art-böcker i brobyggnad såsom *Leonhardt (1982)*, *Liebenberg (1992)*, *Menn (1990)*, *Pritchard (1992)*, *Troitsky (1994)*, *Taly 1998* och *Xanthakos (1994)* ges allmänna principer för hur broar ska utformas för att vara ekonomiska.

Hållfasthet, ekonomi och beständighet

Lägger man till kravet 3) ovan får man behov av att analyserna också skall inkludera kostnader för drift, underhåll och reparation under brons livstid.

Under den senaste 30-årsperioden har mycket möda lagts ner för att studera broars nedbrytning av last och miljö. Detta har lett till att man skapat regler för ökad livslängd för broarna. Ofta har dessa regler givits utan att konsekvenserna beträffande kostnader och övriga bivillkor beaktats.

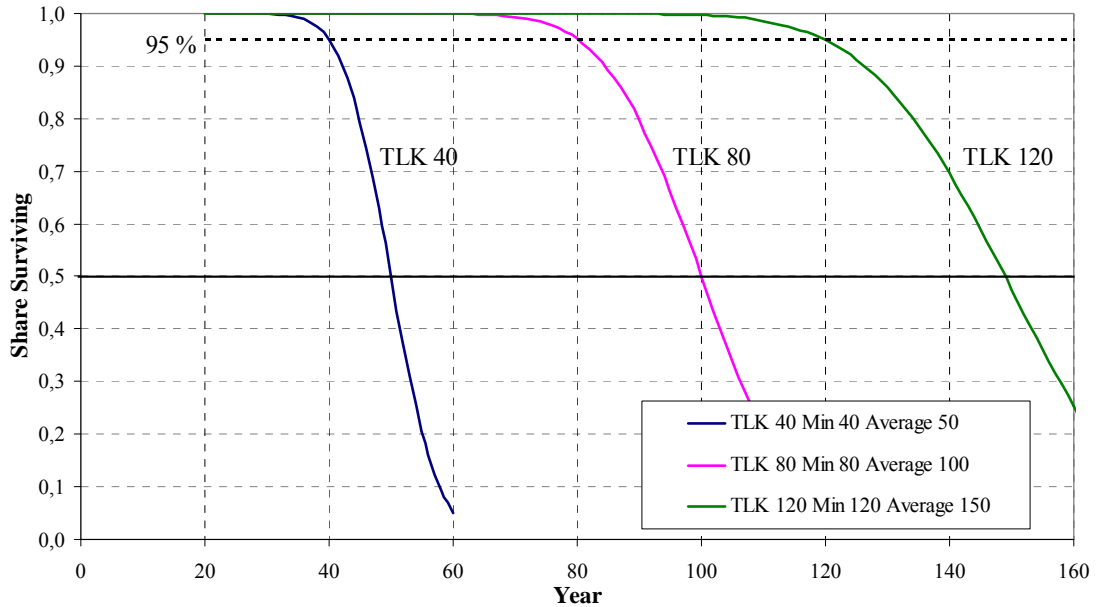
Typiska nedbrytningskurvor för konstruktionselement kan se ut som i **Figur 5.4**. En typisk brobaneplatta kanske har en total livslängd av säg 60 år. Nedbrytningsfarten ökar med tiden och om ingen reparation görs kan själva broplattan vara skadad så att hela systemet brobaneplatta måste bytas ut. Denna process kan också beskrivas i ekonomiska termer, där nedbrytningen beskrivs som kostnaden i ett visst ögonblick för att reparera bron till ”nyskick”. Denna kostnad kan betecknas BKV ”Brist i Kapital Värde” och kan också kallas underhållsskuld. På något intuitivt sätt är en BKV kurva inversen av nedbrytningskurvan.



Figur 5.4 *En produkt utsatt för olika typer av påverkningar kommer med tiden att brytas ner. Detta kan mätas dels som just "nedbrytning" men också mätas som kostnaden att reparera produkten till "nyvärde". Den kostnaden brukar kallas brist i kapitalvärde BKV.*

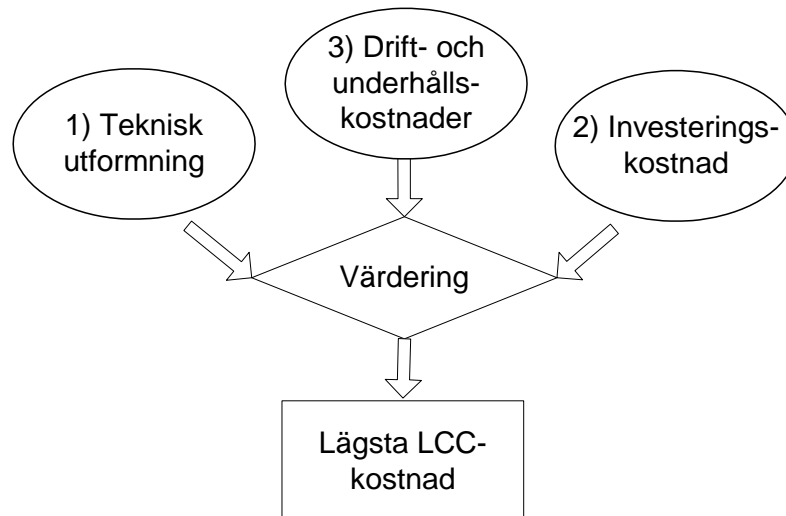
Ett viktigt och ofta missbrukat begrepp är ”livslängd”. Krav på livslängd brukar anges i standarder som fixa tal. Så kan det naturligtvis inte vara utan verkliga livslängder har naturligtvis en statistisk spridning på samma sätt som last och hållfasthet.

Ett rimligt synsätt är att ange krav på livslängd som den nedre percentilen av en fördelningskurva på ungefär det sätt som illustreras i **Figur 5.5**.



Figur 5.5 En möjlig metod för definition av begreppet livslängd. Naturligtvis handlar det om tänkta fördelningar för en större population av broar eller broelement.

Ekonomisk värdering av broar med hänsyn till deras hela livslängd brukar kallas LCC^2 (livscykelkostnad).



Figur 5.6 I en LCC-analys värderar man in kostnader för framtida drift, underhåll och rivning av bron.

En LCC-analys av enklare slag innebär att man till investeringskostnaderna adderar kostnader för drift och underhåll, se **Figur 5.3** och **Figur 5.4**. Vanligtvis nuvärdesberäknas alla framtida kostnader och kostnad för rivning till tidpunkten för investeringen enligt ekv. (5-1)

² I denna rapport skiljer vi på LCC , d.v.s. livscykelkostnad och LCI livscykelintäkt.

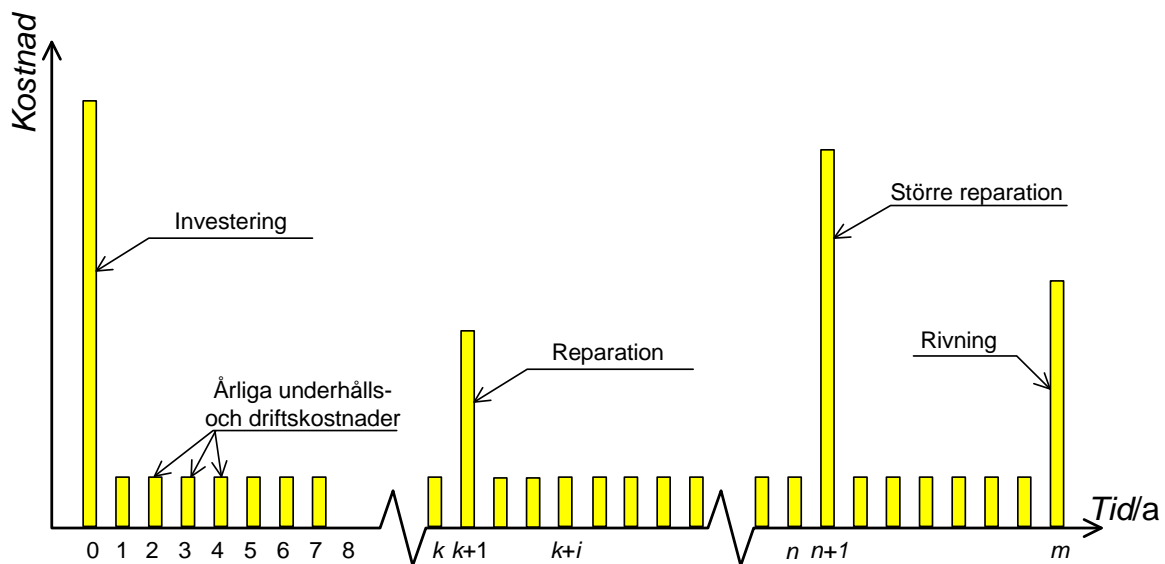
$$LCC = \sum_{i=0}^m f_i K_i \quad (5-1)$$

I ekv. (5-1) är K_i den årliga kostnaden från investeringsåret år 0³ inklusive den totala investeringskostnaden till rivningsåret m och f_i nuvärdesfaktorn som beror på den aktuella kalkylräntan.

Om man säkert vet vilken livslängd som man önskar och man känner nedbrytningsförloppet, t.ex. som det visas i **Figur 5.4** blir beräkningarna ganska enkla och rakt på sak. I en sådan LCC-kostnad finns möjlighet att välja material som håller hela livslängden eller att välja lösningar som innebär utbyte av delar och material under den tilltänkta livslängden. Exempel på referenser ges i *Jutila & Sundquist (2007)* och *Solokangas (2009)*.

I *Troive (1998)* diskuteras optimering även av livslängden utifrån nedbrytningsmodeller för i bron ingående material.

En viktig fråga är vilka livslängder som ska appliceras vid beräkning av livstidskostnaden. Denna fråga är nära kopplad till samhällsutvecklingen och de förändringar som kan förväntas. I den brotekniska litteraturen finns denna fråga inte mycket diskuterad. Den enda litteratur där denna fråga diskuterats kopplat till konstruktion av broar är *Troive (1998)*. Vanligtvis antas broars livslängd given och bestämd i normer och liknade, men i trafikverkets anvisningar anges olika livslängder för olika brotyper, men på vilka grunder dessa ska bestämmas diskuteras inte mer i detalj och dessutom måste man på något sätt ta hänsyn till en rimlig variation av den livslängd som bör inarbetas i kalkylen.



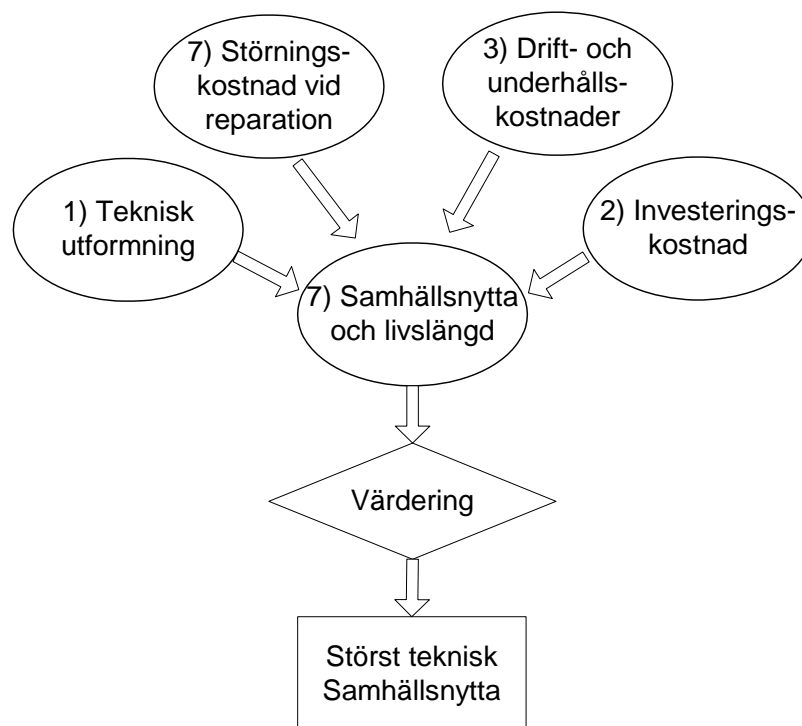
Figur 5.7 I en traditionell LCC-analys för en bro räknar man ihop alla kostnader, t.ex. investering, drift, underhåll, reparation och rivning, som uppstår för bron under hela dess livslängd. Vanligen diskonterar man dessa kostnader med hjälp av nuvärdesanalys till investeringstidpunkten.

³ Schematiskt och för pedagogikens skull tänker vi oss analysen baserad på hela år. I verkligheten är ju många av delarna i denna typ av analys bråkdelar av år.

LCC-analys av broar kommer att behandlas i en särskild förstudie och diskuteras därför ej mer djupgående i denna rapport.

Hållfasthet, ekonomi, beständighet och trafikstörningar

Vid ombyggnader uppstår störningar för den trafik som bron är till för att betjäna. Dessa kostnader kan bli mycket stora. Normalt ingår dock inte dessa kostnader i förutsättningarna, eftersom de uppstår utanför den organisation som ansvarar för byggandet av bron. Naturligtvis är denna typ av kostnader beroende av många faktorer som kan vara mycket svåra att beakta i samband med projekteringen av en ny bro. Prissättning av samhällskostnader blir i mångt och mycket en politisk fråga där värdering av olika faktorer beror på ur vilket synsätt de betraktas. Enkla analyser som t.ex. jämförelser mellan olika alternativ vid ombyggnad är dock fullt möjliga att utföra direkt.



Figur 5.8 *Lägger man utöver krav på lägsta LCC även till kostnader för trafikstörningar, minskad tillgänglighet och liknade får man ytterligare variabler att beakta.*

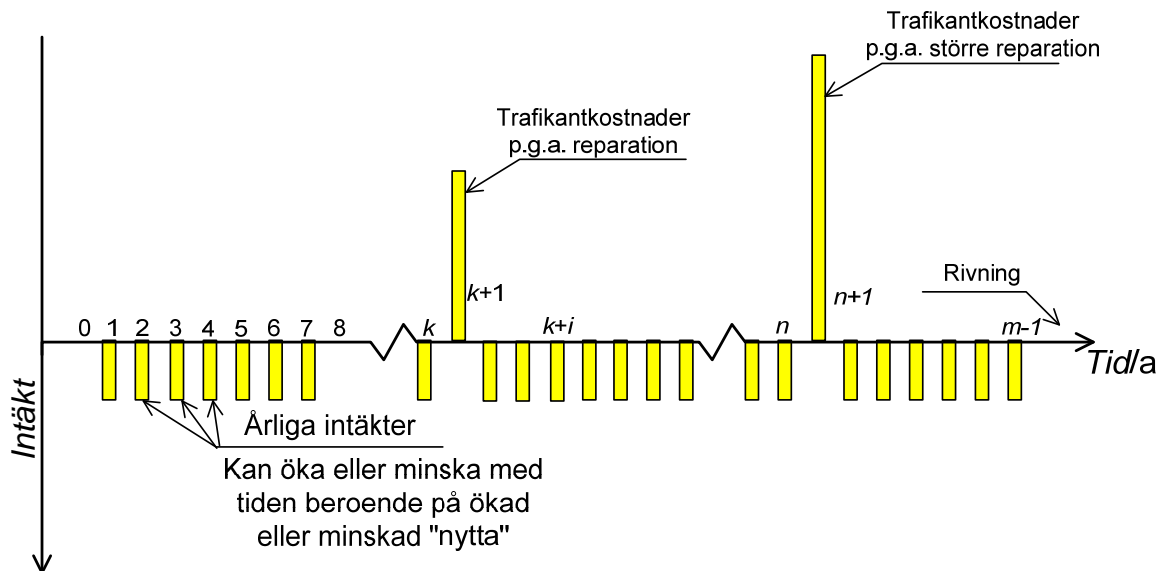
Principen vid hänsynstagande till trafikantstörningar och liknade är att man på liknade sätt som vid bestämning av LCC-kostnad tar fram en *livscykelintäkt*, *LCI*, se **Figur 5.8**.

Livscykelintäkten kan t.ex. skrivas

$$LCI = \sum_{i=1}^{m-1} f_i I_i \quad (5-2)$$

I ekv. (5-2) är I_i den årliga intäkten från öppningsåret för vägen med tillhörande bro och till det sista året $m - 1^4$ då bron är i drift. Trafik- och andra störningar insätts i analysen med negativa värden. f_i är nuvärdesfaktorn som beror på den aktuella kalkylräntan.

En bro är till för att betjäna trafiken. Detta kan tolkas som en intäkt för samhället och ekonomin för detta beräknas med hjälp av s.k. samhällsekonomiska kalkyler. I "samhällsnyttan" kan man inkludera en lång rad faktorer utöver de rent tekniskt-ekonomiska aspekterna såsom kulturella, sociala och estetiska negativa eller positiva värden.



Figur 5.9 En bro är till för att betjäna trafiken. Uppstår reparationsbehov minskar intäkterna och trafikantstörningar uppstår som ger negativa bidrag i den samhällsekonomiska kalkylen.

Behöver bron repareras uppstår störningar som dels kan tolkas som minskad samhällsintäkt under reparationstiden eller sett från trafikanterna synpunkt som en störning. Olika metoder för denna typ av beräkningar finns. Finns bron på plats och fungerar på avsett sätt, men reparationen medför störningar och dessa störningar värderas ur trafikanternas synpunkt uppstår mycket höga kostnader för trafiken och samhället.

Nuvärdesfaktorn f_i överför en framtida kostnad eller intäkt till invigningsåret. Denna beräknas enligt formeln

$$f_i = \frac{1}{(1+r)^i} \quad (5-3)$$

I ekv. (5-3) är r en ränta med vilken nuvärdet ska bedömas.

⁴ Se fotnot till LCC-analysen, sid 4.

Sett strikt ekonomiskt och under stationära förhållanden kan denna ränta (p) baseras på den s.k. realräntan som utgör skillnaden mellan den ränta man får betala för lån på lång sikt, den s.k. 'långa räntan' (r_L) minus inflationen (r_i) mätt i procent. Vi erhåller då

$$r = r_L - r_i \quad (5-4)$$

Nu är dock inte förhållandena stationära eftersom värdet för vår konstruktion ändras med tiden. Ändringen kan vara både positiv och negativ. Den blir positiv om bron med tiden får ökad nytta genom att mer trafik använder vår bro. Nyttoförändringen kan dock vara negativ om vi byggt bron och vägen på fel plats, i de fall då samhällsutvecklingen bäst skulle gynnas av en bro på annan plats eller byggd på annat sätt. Normalt har vi dock att räkna med ökad nytta med tiden. Denna ökade nytta sätter vi ett räntevärde (p_0) i procent. Vi får då

$$r = r_L - r_i - r_0^5 \quad (5-5)$$

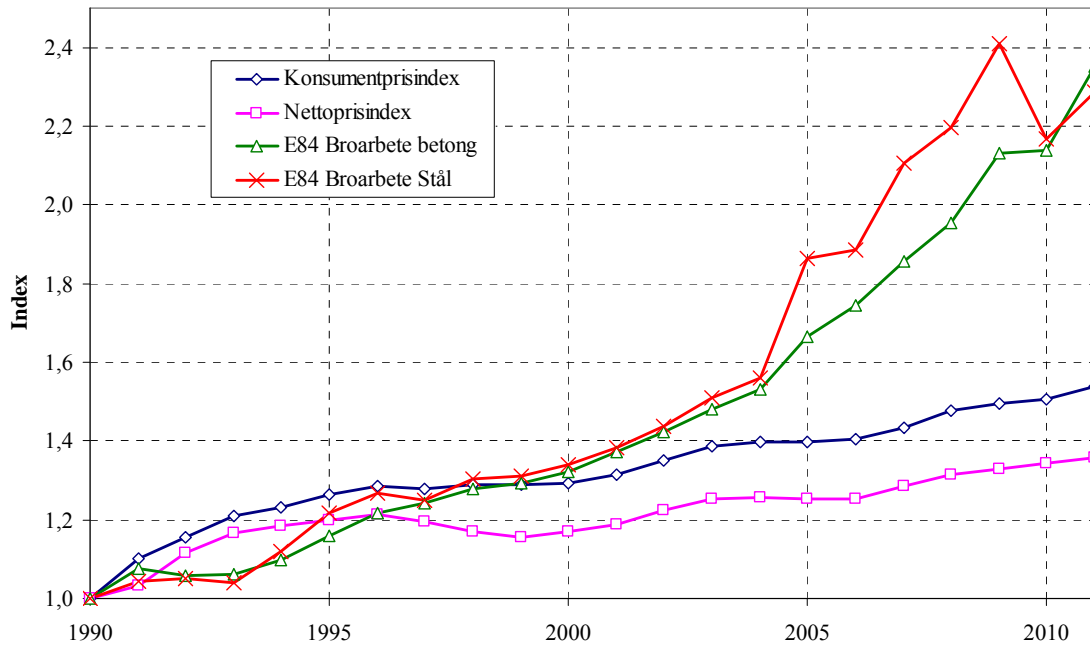
och där således sammanfattningsvis

- r_L är ränta på långa lån,
- r_i är inflationen samt där
- r_0 är den ökade eller minskade nytta (mätt i %) som konstruktionen medför. Vi kan t.ex. tänka oss att trafiken ökar med någon viss procent per år och att vår konstruktion därmed blir mer värdefull med tiden.

Vanligtvis brukar man vid kalkyler sätta in, r_i , som den allmänna inflationen i samhället t.ex. beräknad som nettoprisindex. Kostnaderna inom byggområdet visar sig dock öka snabbare än kostnaderna generellt i samhället, se **Figur 5.10**. Detta betyder att en högre "inflation" kanske ska användas i LCC kalkyler för anläggningsprojekt. Å andra sidan kräver Riksdagen i Sverige att Trafikverket ska ha en ökad produktivitet över tid. Detta skulle i så fall öka den ränta som ska tillämpas.

Tar man hänsyn till vad som nämnts ovan, så bör man använda ett begrepp som skulle kunna kallas 'kalkylränta' och kan i en del sammanhang bestämmas med utgångspunkt från politiska eller andra samhälliga mål.

⁵ Kanske uttrycken för real- och kalkylräntan ska divideras med faktorn $(1 + p_i)$ för att få ett teoretiskt mer riktigt uttryck. Med hänsyn till osäkerheten i bestämningen av realräntan är denna korrektion onödig.

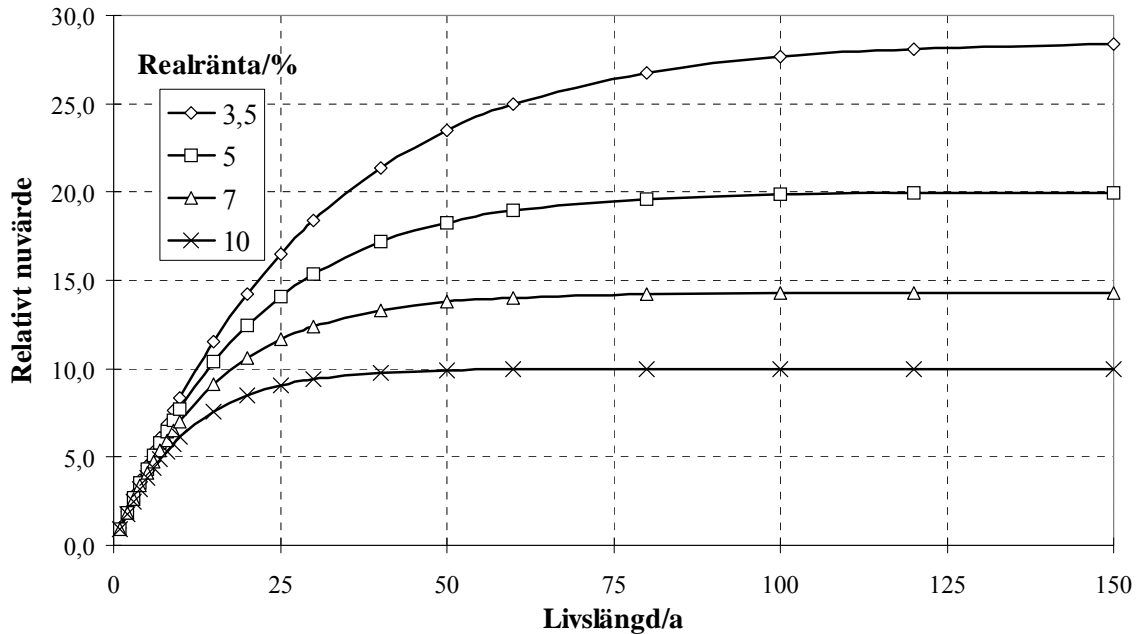


Figur 5.10 Jämförelse av kostnadsutveckling enligt E84 för stål- och betongkonstruktioner och konsumentprisindex. Som framgår ökar anläggningskostnaderna med 2 % à 3 % mer än de allmänna kostnaderna i samhället mätt som nettoprisindex.

Särskild ska här noteras att kostnaderna för broar ökar ändå snabbare än *Index E84, broarbete*⁶. Kostnadsökningen för 2000 ”normala” broar byggda 1990 – 2010 är c:a 1 % högre än *Index E84, broarbete*.

I **Figur 5.11** visas nuvärdet av en intäkt eller kostnad som uppstår varje år och där värdet år 1 är 1. Vi ser att räntan kraftigt påverkar nuvärdet av vår konstruktion. Ju lägre kalkylränta ju högre blir nuvärdet av konstruktionen, d.v.s. att det vid lägre realränta lönar det sig att investera för lång livstid. Vid perioder med höga realräntor gäller regeln om ’köp slit och släng’.

⁶ Vi har funnit det lämpligt att använda ett index som vi kallar E84 Broarbete och som är 75 % av Index för betong och 25 % index för stål.



Figur 5.11 *Nuvärde av en konstruktion som anses tillföra samma samhällsekonomiska nytta varje år vid variation av realränta.*

5.3 LCC-modeller som inkluderar trafikantkostnader

Trafikantkostnader i samband med åtgärder för drift, underhåll, reparation och utbyte av konstruktioner till broar kan uppstå på flera olika sätt. Om man räknar från ett läge då en väg med tillhörande bro fungerar, kan åtgärder av olika slag medföra t.ex. följande typer av problem:

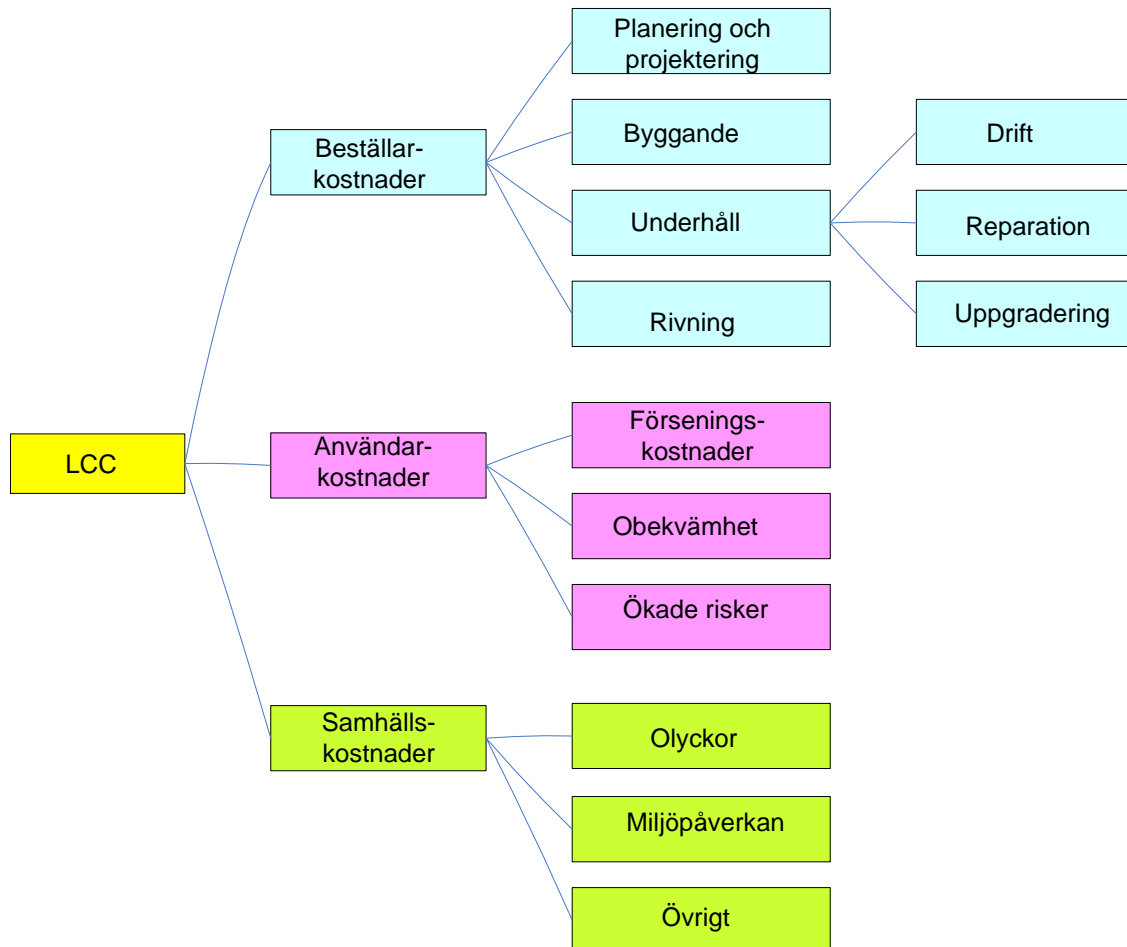
- Om åtgärderna medför inskränkningar i körfältsbredder, tillåten fart eller införande av trafikljus vid avstängning av ett eller flera körfält, kan det uppstå tidsförluster för trafikanterna.
- Om åtgärderna medför för trafiken ogynnsam trafikrytm t.ex. stopp och accelerationer uppstår ökat slitage på fordonen och ökade avgasutsläpp.
- Måste trafiken ledas om så att körvägen ökas, ökar bränsleförbrukningen för trafiken och avgasutsläppen ökas och för trafikanterna uppstår tidskostnader.
- Måste bron stängas av, kan störningar bli mycket svåra för människor och företag som är beroende av bron. Det kan t.ex. handla om en affär som från en stor väg nås via bron och att kundunderlaget därmed minskar kraftigt eller helt uteblir.

Även om särskilda åtgärder för att underlätta framkomligheten vidtas, t.ex. s.k. ”fly-overbroar” kan det inte undvikas att problem av ovan angivet slag uppstår.

Beroende på trafikvolym, dess sammansättning, och på hur underhållsarbetena påverkar trafikanterna på respektive under bron, kan trafikantkostnaderna beräknas. Trafikantkostnader avser inskränkning i trafikantnyttan och dessa belastar därför LCC-kalkylen.

5.4 Mer kompletta LCC modeller

Modeller för analys av de totala kostnader som uppstår för en viss konstruktion inkluderande beställar-, användar- och samhällskostnader, se **Figur 6.12** måste ta hänsyn till en lång rad faktorer. För att kunna göra jämförelser mellan olika alternativ kan olika förenklingar göras, men i princip måste alla viktiga faktorer vägas in även om detta kan göras med förenklade överväganden. Viktigt idag är dock att miljöfaktorer inkluderas genom s.k. LCA analys. Hur denna ska vägas in i de totala kostnadsövervägandena är fortfarande något där forskning måste möta politiska överväganden.



Figur 5.12 Schematisk beskrivning av de olika moment som ingår i en LCC analys.

5.5 Hur kan LCC analyser användas för systemet brobaneplatta

LCC beräkningar används för att bedöma kostnader som förväntas inträffa i framtiden. Det enda man vet om framtiden är att man inte vet något. LCC bör därför främst användas för att göra jämförelser mellan olika alternativa tekniska lösningar. I det följande kommer två förslag att diskuteras.

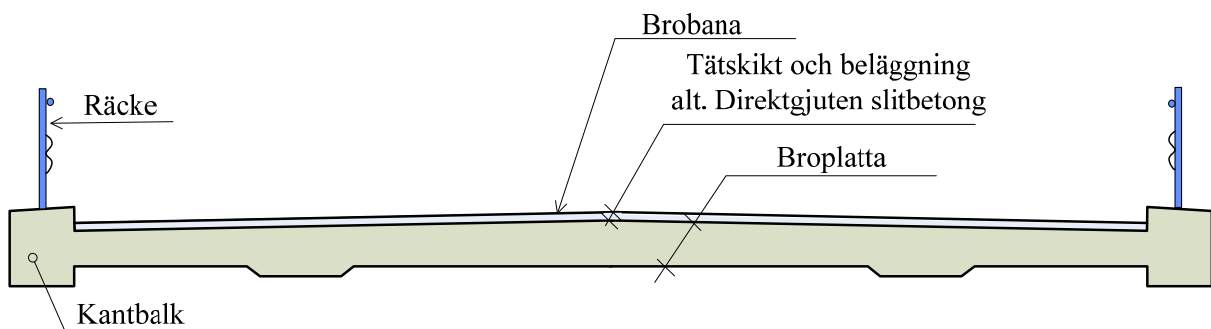
5.5.1 LCC jämförelser för olika tekniska lösningar av systemet brobaneplatta

För att göra en LCC analys för olika tekniska lösningar behövs grunddata i form av mängder och kostnader för byggande, drift och underhåll. Systemet, som blir enklast att förstå utgör betongdelen av en samverkansbro och kan beskrivas med hjälp av **Figur 5.13** och består av följande element:

1. Betongplattan antingen inklusive kantbalkarna eller kantbalken separat
2. Kantbalk
3. Tätskikt och beläggning
4. Räcke

I Systemet ingår också om detta behövs

5. Övergångskonstruktion
6. Lager
7. Avvattningssystem



Figur 5.13 Schematisk beskrivning av de olika moment som ingår i en LCC analys.

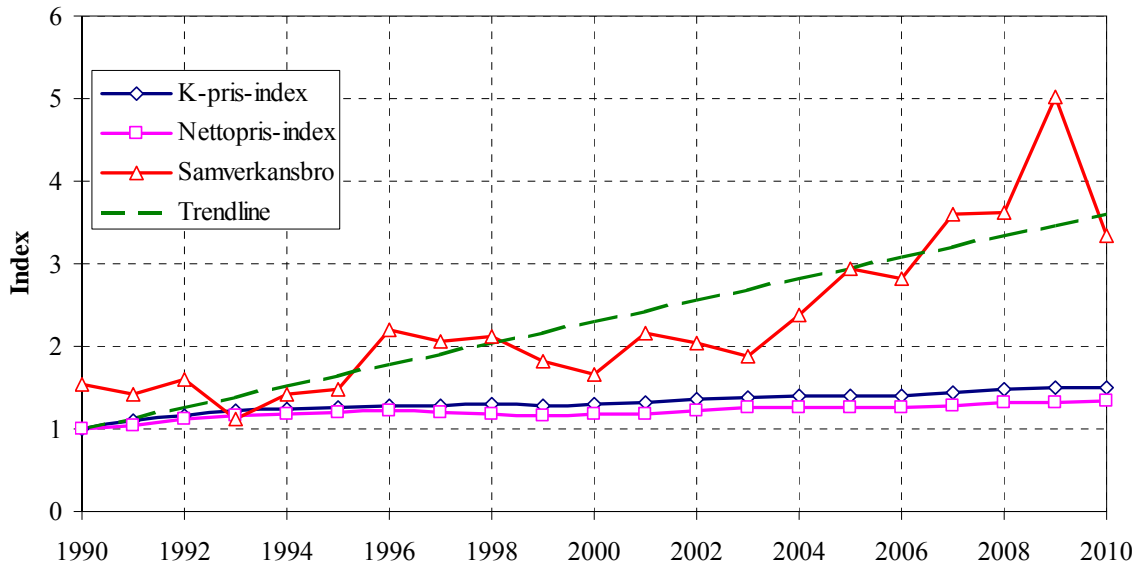
I Sverige finns ingen allmänt accepterad metod för att göra beräkningar för investeringskostnader för broar. I Finland finns en metodik utarbetad av Heikki Rautakorpi, *Rautakorpi (1988)*. Metoden har uppdaterats av Finska Trafikverket och den del som ger mängder för olika brotyper borde kunna användas för mängdberäkning av brobaneplattor. Metoden ger mängder per areaenhet t.ex. för en samverkansbro $\frac{Q_c}{bL}$ (betong), $\frac{Q_f}{bL}$ (form), $\frac{Q_r}{bL}$ (armering) och där b = total brobredd (ut till ytterkant kantbalk) och L är överbyggnadens totala längd (fram till övergångskonstruktionen).

Om man som ett exempel väljer en samverkansbro med bredd $b = 8$ m och längd $L = 50$ m ($L_0 = L - 0,8$) och sätter in kostnadsvärden (totalentreprenadkostnader) får vi följande **Tabell 5.1**.

Tabell 5.1 Exempel på schematisk beskrivning av de olika moment som ingår i en LCC analys.

Totalentreprenadkostnader inkl huvudentreprenörens alla kostnader (proj, tillfälliga fabriken, arvode, oförutsätt m.m) 62 % på UE				
Kostnadsläge feb 2010	$L =$	50	$Q_c/bL =$	0,33
	$L_0 =$	49,2	$Q_f/bL =$	1,19
	$b =$	9	$Q_a/bL =$	69
	$A/m^2 =$	450	$H_{med} =$	0,33
			$Q_a/bL / H_{med} =$	211
		à-pris	Mängd /m²	SEK /m²
Brobetong inkl tempkontroll o efterbehand	kr/m ³	4 360	0,33	1 427
Armering inkl spill, bockning och inläggning	kr/kg	40	69,01	2 761
Betongform	kr/m ²	1 300	1,19	1 547
Broräcke	kr/m	5 800	0,22	1 289
Isolering + beläggning	kr/m ²	1 400	1,00	1 400
Övergångskonstruktion	kr/m	20 000	0,04	800
Lager	kr/st	26 000	0,01	231
				9 455

Vid avd. för brobyggnad pågår arbete med utveckling av LCC. Som en viktig del behövs kostnadsuppskattningar och ur BaTMan kan en massa intressant material tas fram. Bl.a. har en databas skapats baserat på totalentreprenadkostnader för 1897 normala broar byggda under perioden 1990 – 2010. För att jämföra mot ovanstående kostnadsuppskattning har ett utdrag gjorts för samverkansbroar, se **Figur 5.14**. Den dåliga produktivitetens utvecklingen framgår tydligt vid jämförelse med samhällsindex (KPI och NPI). Aktuellt kostnadsläge syns inte direkt av **Figur 5.14**, men totalkostnaden 2010 syns i genomsnitt var 22 000 SEK/m², d.v.s. att systemet brobaneplatta står för c:a 40 % à 45 % av totalkostnaden, beroende på bl.a. kostnader för grundläggningen.



Figur 5.14 Kostnadsutveckling för samverkansbroar baserat på utdrag ur BaTMan för 1987 "normala" broar. Kostnadsnivå 2010 är c:a 22 000 SEK/m². Kostnadsutvecklingen 1990 – 2010 är c:a 6,5 % att jämföra med NPI 1,5 % och KPI 2,1 %.

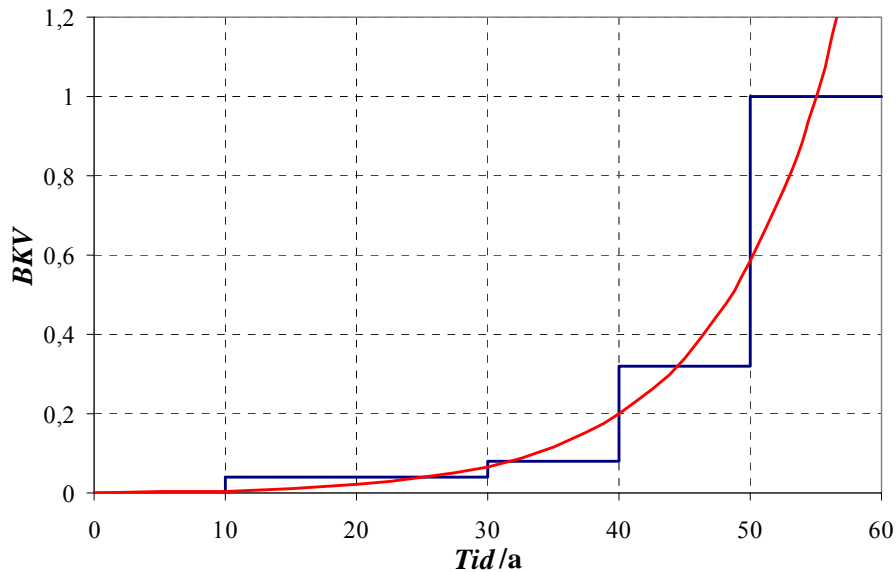
För att kunna göra en Livscykelanalys behövs också data för aktuella drifts-, underhålls- och reparationsåtgärder. I BaTMan finns prislister för många av de åtgärder som behövs för systemet brobaneplatta.

I Appendix finns början till en mall som kan användas. För enkelhets skull bygger mallen på att åtgärder görs i intervall då flera reparationer lämpligen görs samtidigt. Mallen liknar den som håller på att utvecklas av inom ETSI-projektet av Finska Trafikverket.

Tabellen i Appendix är endast i detta skede åtgärder som bör ges noggrannare värden i det fortsatta arbetet. Typiskt hamnar nuvärdet av drift, underhåll och reparation på 30 % à 40 % av investeringskostnaden vid 3 % à 4 % kalkylränta.

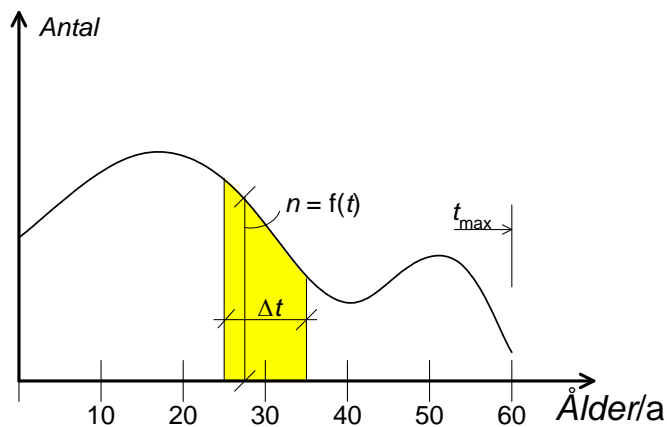
5.5.2 Planering av reparationsmetoder för en population av likartade tekniska lösningar

Trafikverket äger ju en stor mängd likartade konstruktioner. Dessa är av en varierande ålder och har troligen olika kvalitet. På något sätt kan man för en viss typ av produkt, t.ex. kantbalkar, bedöma att det finns ett samband mellan ålder och nedbrytning – i detta fall mätt som BKV, se **Figur 5.14**.



Figur 5.15 Nedbrytningsfunktion, mätt som BKV, för ett stort antal likartade produkter.

Med kännedom av hur många likartade produkter av olika ålder man har, se Figur 6.14, går det att göra LCC analyser för att finna en optimal plan för det mest ekonomiska underhållet. Samma system går att använda även för planering av vilka reparationsåtgärder som är mest ekonomiska.



Figur 5.16 En förutsättning för optimering av underhållet av en population produkter är att vi känner fördelningen av antalet produkter med avseende på tiden.

5.6 Förslag till forskning

Verktyg för LCC beräkningar finns redan tillräckligt utvecklade. Någon särskild forskning behövs därför inte för detta.

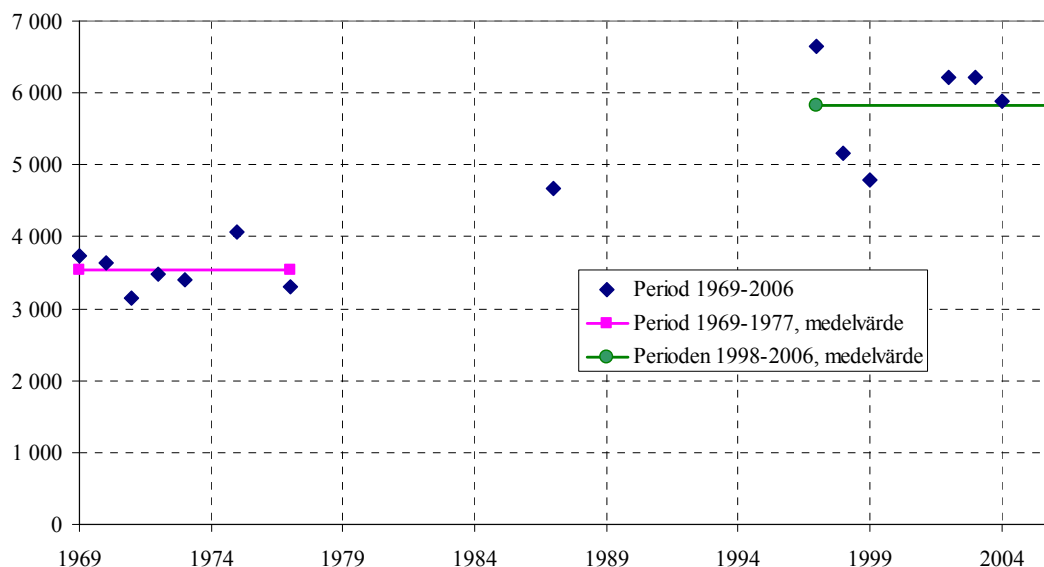
Som underlag för LCC analyser behövs dock en stor mängd indata, t.ex. information om:

- Investeringskostnad
- Underhållskostnader
- Reparationskostnader
- Tidsintervall mellan reparationer
- Tidsåtgång för reparation (inkl. om särskilda åtgärder t.ex. avstängningar under reparationen)
- Kostnader för rivning och omhändertagande av avfall.

Särskilt viktigt och svårfångat för LCC analyser är kännedom om nedbrytningsfunktioner.

Dessa analyser bör göras i respektive avsnitt ovan.

Sätt ur ett samhällsperspektiv finns inget egenvärde med att göra brobaneplattorna ”robustare”. Det gäller att söka de tekniskt ekonomiska lösningar som ger mest bro för insatta LCC-medel. Inget tyder på att drift och underhållskostnader minskat trots att investeringskostnaderna ökar så drastiskt, se **Figur 5.14**. Ett intressant resultat visas i **Figur 5.17**. **Figur 5.17** baseras på mängder som tagits fram inom projektet Bygginnovationen – delrapport Bro, 2010, men som omräknats till 2010 års kostnader. Resultatet avser endast kostnader för betong och armering i broöverbyggnader till spännarmerade betongbroar och kan inte jämföras med andra kostnader diskuterade i föreliggande rapport. Det intressanta är ”trappsteget” i kostnader som främst beror på kraftigt ökade armeringsmängder.



Figur 5.17 Kostnad för betong och armering i broöverbyggnader för ett antal broar byggda under perioden 1969 till 2006. Som figuren är konstruerad är vad som anges aktuellt kostnadsläge 2010.

En slutsats skulle kunna vara att det viktigaste vore att noggrant analysera vad som kan göras för att minska armeringen i broarna, vilket också skulle kunna minska energiförbrukning och utsläpp av CO₂.

Robustare brobaneplatta

6. Sammanfattning och prioriterade forskningsprojekt

6.1 Kompilering av inkomna förslag

I rapporten finns i de olika kapitlen en lång rad förslag till frågor som behöver få svar. En del förslag är formulerade som möjliga forskningsprojekt, medan andra är mer som idéer eller förslag till utvecklingsprojekt.

Vid seminariet den 21 juni 2011, där en lång rad experter från Trafikverket och branschen deltog, framfördes ytterligare nya idéer till forskning och utveckling. De olika förslagen överlappar delvis varandra och en mycket komprimerad sammanställning presenteras nedan:

1. Platta och kantbalk – analys och dimensionering

1.1 Kantbalkutformning

- Utbytbara kantbalkar vid reparation.
- Rostfri armering i kantbalkar.
- Annan geometrisk utformning av kantbalken så att snö och regn spolats bort naturligt.

1.2 Förbättrade analys- och dimensioneringsmetoder för brobaneplattan inkl. kantbalk

- Rostfri armering i överkant brobaneplatta i st.f. tätskikt.
- Brobaneplattan och armering. Provbekastning av broar som ska utgrivas.

2. Isolering och beläggning

2.1 Utveckling av slitbetong som tätskikt och beläggning

- Jämnheter direktgjuten slitbetong (metodutveckling, kvalitetssäkring).
- Inventering direktgjuten slitbetong.
- God vidhäftning direktgjuten slitbetong utan vattenbilning (metodutveckling).
- Fiberbetong direktgjuten slitbetong (verkningsätt, dimensionering, verifiering, vidareutveckling etc.).
- Varför inte betongslitskikt på spännarmerade broar?

2.2 Verktyg för val av tätskikt alternativt direktgjuten slitbetong eller annat alternativ

- Det bör finnas mer funktionskravsbaserade krav och mindre styrning. (Dessa krav måste dock göras så att funktionskraven är ”upphandlings-” och mätbara. Ett exempel är akrylbaserad primer/försegling i tätskiktssystemet). Vem ska ta risken?
- Kunskapsutbyte ”rätt material på rätt plats”.Handledning för val av olika material. Utbildning.

- Dräneringssystem och genomföringar (grundavlopp m.m.) behöver undersökas. Både nya och befintliga. Konsulter och entreprenörer behöver kopplas in! Många (alla?) skador kan kopplas till genomföringarna!
- Studera halksäkerheten på brobanan. Jämföra betong med asfalt i slitbanan. Beror på bl.a. produktionsmetoden och stenmaterialets både bindning och egenskap.
- Bästa lösningen är kanske gjutasfalt som slitlager.

2.3 Oförstörande provning för tätskikt- och beläggningssystem

- Metoder för inspektion av fungerande och icke fungerade tätskikt. Fönsterupp- tagning är inte bra och skadar tätskiktet.

3. LCC

- Bättre underlag för analys av LCC och LCA av brobaneplattan.
- Satsa på LCC vid val av tekniska lösningar.
- Beroende på ”Investering” som bara ser på investeringskostnaden
- Broar byggs i för stor utsträckning för att vara produktionsanpassade och med för liten anpassning mot DoU fasen.

4. Räcken

- Infästning av skruvade räcken. Klarar nuvarande utformning krafterna.
- TRV tillhandahåller inte längre standardritning för t.ex. räcken.

5. DoU frågor

- Katodiskt skydd. Termiskt sprutade offeranoder av zink
- Förebyggande underhåll (vilka åtgärder? när? hur ofta? kvalitetssäkring? ersättningsformer?)
- Vid reparation – undersöker man vad som verkligen inte fungerat. Passa på att göra en fördjupad undersökning av orsakar. Hur mycket skador är det på överkantsarmeringen i brobaneplattan?

6. Mer speciella frågor

- Robust brobaneplatta genom extremt högpresterande fiberarmerad betong.
- Broar utan övergångskonstruktioner.

6.2 Preliminär prioritering

En prioritering kan vara svår att göra och måste naturligtvis diskuteras med Trafikverket. En del projekt genomförs troligen bäst i form av doktorandprojekt, medan andra passar bättre som seniorprojekt. Om endast fem projekt skulle kunna genomföras av resursskäl skulle följande lista och förutsättningar kunna bilda underlag för en diskussion. Förslagen lämnas mycket kort beskrivna, eftersom det är tänkt att projektförslagen ska diskuteras tillsammans med den stora mängd förslag som lämnats i de olika kapitlen och de kompletterande förslag som kom fram vid seminariet 21 juni 2011.

LCC behöver inte genomföras som ett särskilt projekt, utan LCC analyser bör ingå i alla projekt.

Projektet 2.3 Metoder för oförstörande provning av funktionen hos tätskikt är ett sedan länge efterfrågat projekt. Hittills genomförd forskning och utveckling har inte trots många försök funnit någon säker metod. Det finns idag nya oförstörande metoder som behöver testas. Ett sådant projekt skulle lämpa sig som ett doktorandprojekt. (KTH/CBI)

Projekt 2.2 Verktyg för val av tätskikt alternativt direktgjuten slitbetong eller annat alternativ skulle kunna vara ett projekt som kunde drivas inom den forskargrupp inom SBU som tagit fram föreliggande rapport. I ett sådant projekt bör målet vara att finna den samhällsekonomiskt mest gynnsamma tekniska lösningen vid aktuella funktionskrav. (CTH/LTU/CBI)

Armeringen i brobaneplattan utgör den enskilt största kostnadsposten i systemet brobaneplatta, se **Tabell 5.1**. Projektet 1.2, (Förbättrade analys- och dimensioneringsmetoder för brobaneplattan inkl. kantbalk) med särskild inriktning på att minska armeringsmängden i plattan med hänsyn till moment och tvärkrafter, se **Figur 5.17**. Projektet skulle kunna vara ett doktorandprojekt med handledning från 2 högskolor. (KTH/CTH)

Lösningen med slitbetong, som är vanligt förekommande speciellt i norra Sverige, har hög potential till vidareutveckling. En utveckling bör föregås av en fördjupad inventering av utförda broar där bl.a., underhållsbehov samt eventuella skador och reparationer relateras till utformning och utförande. (LTU/CBI)

Ett projekt om att identifiera och föreslå mer effektiva och robusta tätskikts- och beläggnings-system baserat på asfalt och/eller andra typer av teknologi. (CBI)

Robustare brobaneplatta

7. Referenser och Litteratur

7.1 Allmänt

- Collin, P., Johansson, B., Sundquist H., (2008) *Steel Composite Bridges*, TRITA-BKN. Report 116, Structural Design & Bridges, KTH, 2008, ISSN 1103-4289 ISRN KTH/BKN/R -- 116 – SE, Stockholm 2008.
- Sundquist, H., (2008) *Infrastructure Structures*, TRITA-BKN. Report 121, Structural Design & Bridges, KTH, 2008, ISSN 1103-4289 ISRN KTH/BKN/R -- 121 – SE, Stockholm 2008.
- Troive, S., (2008) *Utformning av kantbalkar – State-of-the-art*, Arbetsmaterial, Vägverket, Borlänge 2008.
- Vägverket, BaTMan BaTMan, olika årgångar har använts.

7.2 Betongplattan som konstruktionselement

- Bakht B., Jaeger L.,G., (1985) *Bridge Analysis Simplified*, Mc Graw-Hill Book Company, New York 1985.
- BaTMan (2007). *Bro och tunnel management – Å-prislista för broåtgärder år 2007*. Vägverket, Borlänge, 22 s.
- Bettigole, N., Robison, R. (1997) *Bridge Decks: Design, Construction, Rehabilitation, Replacement*. ASCE Press, New York, USA, 118 pp.
- Carlsson, F., Plos, M., Norlin, B., och Thelandersson, S. (2008). *Säkerhetsprinciper för bärighetsanalyser av broar med icke-linjära metoder*. Avdelningen för Konstruktionsteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet, Sweden, Rapport TVBK – 3056, 244 pp.
- Collin, P., Petursson, H., Tornberg, H. (2010) *Broar med integrerade landfästen. Väg- och vattenbyggaren*, Nr. 3, Augusti 2005, SVR, sid. 45-49.
- Collin, P., Veljkovic, M., Petursson, H. (Ed) (2006) *International Workshop on the Bridges with Integral Abutments: Topics of relevance for the INTAB project*, Luleå University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Technical Report 2006:14, 151 pp.
- Crocetti, R. (1998) *Modular Bridge Expansion Joints – Loads, Dynamic Behaviour and Fatigue Performance*. Institutionen för Konstruktionsteknik, Avdelningen för Stål- och träbyggnad, Chalmers Tekniska Högskola, Licentiatuppsats, Publ. S98:2, 111 sid.
- Cusens A.R., Pama R. P., (1975) *Bridge deck analysis*, John Wiley & Sons, Bristol 1975.
- Ehregren, E., *Kantbalakr och räckesinfästningar – nya tekniska lösningar?*, Uppsala universitet, ISRNUTH-INGUTB-EX—B-2000/02—SE.
- Hambly E., C., (1991) *Bridge Deck Behaviour*, 2nd ed., E& FN Spon, London 1991.

- Hedman, O., Losberg A., (1975) Dimensionering av betongkonstruktioner med hänsyn till tvärkrafter, *Nordisk Betong*, No 5, 1975.
- Hedman, O., Losberg A., (1976) Skjuvhållfasthet hos tunna betongplattor belastade med rörliga punktlaster. Preliminär delrapport till Vägverket maj 1976.
- INTAB (2010) *Design Guide: Economic and Durable Design of Composite Bridges with Integral Abutments*. Available from the project website: www.bridgedesign.de , RFCS RFS-P2-08065 INTAB+, 77 pp.
- Mattsson, H-Å., Sundquist, H., Silfwerbrand, J., (2007) The Real Service Life and Repair Costs for Bridge Edge Beams, *Restoration of Buildings and Monuments*, Vol.13, N. 4, pp 215-228 (2007)
- Menn C., (1990) *Prestressed Concrete Bridges*, Birkhäuser Verlag, Basel 1990.
- O'Connor C., (1971) *Design of Bridge Superstructures*, John Wiley & Sons, Inc, New York 1971.
- Petersson T., Sundquist H., (1997) Spännbetong, TRITA-BKN. Rapport 46, Brobyggnad, KTH, 1997, utgåva 4, 2003, ISSN 1103-4289, ISRN KTH/BKN/R -- 46 – SE, Stockholm 1997.
- Petursson, H. (2000) *Broar med integrerade landfästen*, Luleå Tekniska Universitet, Institutionen för Väg- och vattenbyggnad, Avdelningen för Stålbyggnad, Licentiatuppsats 2000:32, 195 pp.
- Racutanu G., (2000) *The Real Service Life of Swedish Road Bridges - A case study*. Doctoral Thesis TRITA-BKN. Bulletin 59, 2000, ISSN 1103-4270, ISRN KTH/BKN/B--59—SE.
- Schlaich J., Scheef H., (1982) *Concrete Box-Girder Bridges*, IABSE Structural Engineering Documents 1e, Zürich 1982.
- Sundquist, H., (2007): Infrastructure Structures, TRITA-BKN. Report 116, 2007, Structural Design & Bridges, KTH, ISSN 1103-4289 ISRN KTH/BKN/R -- 116 – SE, Stockholm 2007
- Sundquist, H., (2007) *Safety, Loads and Load distribution on Structures*, TRITA-BKN. Report 108, Structural Design & Bridges, KTH, ISSN 1103-4289 ISRN KTH/BKN/R -- 108 – SE, Stockholm 2007.
- Sundquist, H., (2008) *Elastic Plate Theory for Bridge Superstructures*, TRITA-BKN. Report 120, Structural Design & Bridges, KTH, 2007, ISSN 1103-4289 ISRN KTH/BKN/R -- 120 – SE, Stockholm 2008.
- Troive S., (2008) *Utformning av kantbalkar – State of the art*, Arbetsmaterial, Vägverket 2008
- White, H., Petursson, H., Collin, P. (2010): Integral Abutment Bridges: The European Way. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, Vol. 15, No.3, August 2010, ASCE, pp. 201-208.
- Vägverket (1996): *Broprojektering – en handbok*. Vägverket, Publ 1996:63, 130 sid.

Vägverket, Kantbalksgruppen (2000)

Wästlund G., (1964) *Kompendium i Brobyggnad*, del II. KTH, Stockholm 1964.

Silfwerbrand, J., (2002) *Aktivt brounderhåll*

Silfwerbrand, J., (2008) Impregnation of Concrete Bridge Elements Exposed to Severe Environment – Is It Cost Effective?, Proceedings, *Hydrophobe V - the 5th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials*. Brussels, Belgium, April 15-16, 2008, pp. 341-354.

7.3 Tätskikt och beläggning

Abbott B., (2010) *Primers and Substrates*, Polyurea Development Association 2010 Annual Conference, Orlando Florida.

Augustsson C., (2004) NM Epoxihandbok, Upplaga 3, 2004.

Bjurholm Å., (2010) *Tätskikt av mastix. Erfarenheter från Stockholms broar*, Rebet dagen, seminarium kring tätskikt, 2010.

Broekaert M., (2004) *Polyurea Spray Applied Systems for Concrete Protection*, 2004.

Butt A., A., (2009) *Low temperature performance of wax modified mastic asphalt*. Master of Science Thesis, Royal Institute of Technology, TRITA-VT 09:04, 2009.

Colldin Y., (1988) *Fuktisolering av betongbroar. Minnesanteckningar från en studieresa i USA och Kanada*, KTH-Bulletin 1988:4, 1988.

Colldin Y., (1989) *Fuktisolering av betongbroar. Minnesanteckningar från en studieresa till Österrike och Tyskland 1989*, VTI notat V116, 1989.

Colldin Y., (1990a) *Fuktisolering av betongbroar. Minnesanteckningar från en studieresa till Nederländerna, Belgien, Frankrike och Schweiz*, VTI notat V122, 1990.

Colldin Y., (1990b) *Isolering med polyuretan på SJ-bro F529 vid Sävsjö*, VTI notat V127, 1990.

Colldin Y., (1991a) *Waterproofing of Concrete Bridges. Characteristic and performance testing of polymer bitumen sheets*, Licentiate Thesis 1991:13L, Tekniska Högskolan i Luleå, 1991.

Colldin Y., (1991b) *SBS-bitumenmattors vidhäftning till betong. Förslag till kalibreringskurva för vidhäftningsprovning i fält*, VTI notat V158, 1991.

Colldin Y., (1991c) *Isolering av betongbroar. Provning av polymerbitumenmattor*, KTH-rapport 1991:1, 1991.

- Colldin Y., (1992a) *Isolering och beläggning på stålbroar. Minnesanteckningar från en studieresa till Japan, VTI notat V186, 1992.*
- Colldin Y., (1992b) *Isoleringsystem för betongbroar i några europeiska länder. Schweiz, Österrike, Frankrike, Storbritannien och Tyskland, VTI särtryck nr 189, Föredrag vid Brodagar - 11-12 november, 1992.*
- Colldin Y., (1993a) *Isolering och beläggning på broar. Minnesanteckningar från besök vid BAST och Elf, VTI notat V216, 1993.*
- Colldin Y., (1993b) *Waterproofing systems for concrete bridges in Europe - A document on the state of the art, 1993.*
- Colldin Y., (1995) *Isoleringsystem med polymerbitumenmatta på betongbroar. Vidhäftning med blåsbildningsproblem, VTI notat 23, 1995.*
- Colldin Y., (1996) *Isolerings- och beläggningssystem för Höga Kusten-bron. Uppföljande laboratorieprovning av material för utmattningstest vid Otto Graf Institut, VTI notat 7, 1996.*
- Colldin Y., Nilsson Å., (1989) *Isolerings- och beläggningsarbete på bro Y95 över Indalsälven, väg 86 vid Kävsta, VTI notat V119, 1989.*
- Colldin Y., Nilsson Å., (1990) *Isolerings- och beläggningsarbete på bro D14 vid Stallarholmen, VTI notat V124, 1990.*
- Colldin Y., Nilsson Å., (1991) *Isolerings- och beläggningsarbete på bro F301 vid Sjunnen, VTI notat V149, 1991.*
- Colldin Y., Nilsson Å., (1992a) *Isolerings- och beläggningsarbete på broarna P772 vid Steneby, O656:8 i Göteborg, O1325 i Mölndal och W983 vid Brintbodarna, VTI notat V181, 1992.*
- Colldin Y., Nilsson Å., (1992b) *Isolerings- och beläggningsarbete på broarna U116 i Surahammar, G556 mellan Konga och Dångebo och X895 i Järbo, VTI notat V204, 1992.*
- Colldin Y., Nilsson Å., (1993) *Broisolering. Sammanställning av resultat från vidhäftningsprovning på provbroar 1990-1992, för eventuell justering av kalibreringskurva, VTI notat V217, 1993.*
- Colldin Y., Nilsson Å., (1995a) *Isolering och beläggning för Höga Kusten-bron. Provläggning på bro BD 1377 vid Pitsund – Laboratorieprovning på utlagda material, VTI notat 27, 1995.*
- Colldin Y., Nilsson Å., (1995b) *Isolering och beläggning för Höga Kusten-bron. Uppföljning av provbeläggningar på bro BD 1377 vid Pitsund under 1994 och 1995, VTI notat 65, 1995.*
- Colldin Y., Salomonsson J., (1991) *Kantförsegling av betongbroar. Laboratorieprovning av epoxiprodukter, VTI notat V155, 1991.*
- Colldin Y., Westergren P., (1996) *Isolering och beläggning på vägbroar. Polymermodifierad asfaltmastix, VTI notat 31, 1996.*
- Colldin Y., Åström S., *Broisolering. Laboratorieprovning av spackel för ytskadad*

- (1991) *betong*, VTI notat V156, 1991.
- Colldin Y., Åström S., (1992) *Broisolering. Laboratorieprovning av spackel för avjämning av ytskadad betong. Förslag till provningsprogram*, VTI notat V203, 1992.
- Edwards Y., (2000) *State of the art om isolerings- och beläggningssystem i tunnlar och tråg*, KTH Vägteknik, 2000.
- Edwards Y., (2003) *State of the art - Tätskikt och beläggning på träbroar*, Vägverksprojekt, 2003.
- Edwards Y., (2006) *Provningsmetodik "Tätskikt på järnvägsbroar*, Banverksprojekt, KTH Vägteknik, 2006.
- Edwards Y., Butt A., Tasdemir Y., (2010) *Energy saving and environmental friendly wax concept for polymer modified mastic asphalt*, Material and Structures Volume 43, Issue 1 (2010), pp 12, 2010.
- Edwards Y., Henriksson G., (2010) *Kartläggning av vittrings- och korrosionsskador på biologiska behandlingsanläggningar, Etapp II Tätskikt på betong – State of the Art*, 2010.
- Edwards Y., Kinnmark M., (2010) *Varför blåsbildning?* Betong nr 3, 2010.
- Edwards Y., Salomonsson J., (1997) *Broisolering. Asfaltmastix' åldringsbeständighet på broar och viadukter i Stockholm. Laboratorieprovning för kontroll och bedömning*, VTI notat 48, 1997.
- Edwards Y., Salomonsson J., (2000) *Broisolering. Asfaltmastix' åldringsbeständighet på broar och viadukter i Stockholm. Laboratorieprovning för kontroll och bedömning*, VTI notat 75, 2000.
- Edwards Y., Westergren P., (1999a) *Polymermodifierat isolerings- och beläggningssystem för Högakustenbron*, VTI rapport 430, 1999.
- Edwards Y., Westergren P., (1999b) *Blåsbildning på betongbroar med isoleringssystem av polymer-bitumenmatta. Problem, orsak och åtgärder*, VTI notat 49, 1999.
- Edwards Y., Westergren P., (1999c) *Edwards Y., Westergren P., Polymerasfaltmastix och polymergjutasfalt för isolerings- och beläggningssystem till broar*, VTI notat 80, 1999.
- Edwards Y., Westergren P., (2001) *Polymer modified waterproofing and pavement system for the High Coast bridge in Sweden*, VTI rapport 430A, 2001.
- Emery J., (2010) *Structural Concrete Deck Protection Systems*, Transportation Association of Canada, 2010.
- ETAG 033 (2010) *Liquid Applied Bridge Deck Waterproofing Kits*, 2010.
- FAS Metod 447 (1998) *Asfaltbeläggning och -massa. Bestämning av stämpelbelastningstid för asfaltmastix*, 1998.
- Hanson L., (2010) *Physical and Fiscal Improvements of Spray Polyureas. Lower*

- Cost – Higher Performance*, Polyurea Development Association 2010 Annual Conference, Orlando Florida.
- Hedenblad G., (1999) *Bottenplattas förmåga att motstå vattentryck*, 1999.
- Jeppsson, J., (1994) *Livslängd hos de idag vanligaste materialen i våra broar*, Examensarbete 1994:012, E ISSN 0349-6023, Luleå Tekniska universitet, 1994.
- Jol H., (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, ISBN: 978-0-444-53348-7, University of Wisconsin-Eau-Claire, 2009.
- Karlsson R., (2005) *Oförstörande provning av tätskikts funktion på broar – Kartläggning av status och möjligheter*, TRITA-VT AR 05:03, KTH, 2005.
- Karlsson, R., (2011) Personlig kommunikation.
- Lagerblad B., (1998a) *Blåsbildning på vägbana i Åkersbergatunneln*, CBI Uppdragsrapport nr 98053, 1998.
- Lagerblad B., (1998b) *Undersökning av blåsbildning i ett epoxibelagt betonggolv*, CBI Uppdragsrapport nr 98067, 1998.
- Miderman A., Mizanur R., (2009) *Gjutasfalts läggbarhet med inverkan av vax och stenmaterial*, Master of Science Thesis, Royal Institute of Technology, TRITA-VT 09:11, 2009.
- Møller P., Ramböll (2011) *Personlig kommunikation, Rebet seminarium – icke-förstörande provning och instrumentering*.
- Naderahmadi F., (2009) *Bedömning av underhållsbehov på broar med hjälp av fönsterundersökningar*, TRITA-BKN. Examensarbete 280, 2009, ISSN 1103-4297, ISRN KTH/BKN/EX-280-SE
- Nilsson U., (2006) *Blåsbildning på broar*, SBUF projekt 11456, 2006.
- Oba, K., Partl, M., (2000) *Non-destructive IR-Thermography for distress detection in asphalt pavements and bridge deck surfacings*, *Road Materials and Pavement Design*, Volume 1 Issue 4 (2000), pp 407, 2000.
- Schütz F., (1945) *Isolering av byggnadsverk med asfalt och tjära*, 1945.
- Sjöholm H., (1998) *Blåsbildning under isoleringsmattor – Inverkan av betongens fuktighet*, SBUF rapport, 1998.
- SS EN 13108-6 (2006) *Bituminous mixtures - Material specifications - Part 6: Mastic Asphalt*, 2006.
- SS EN 14695 (2010) *Flexible sheets for waterproofing – Reinforced bitumen sheets for waterproofing of concrete bridge decks and other trafficked areas of concrete – Definitions and characteristics*, 2010.
- SS EN 1504-2 (2004) *Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 2: Surface protection system*, 2004.

- SS EN 1504-9 (2008) *Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 9: General principles for the use of products and systems, 2008.*
- SS EN 14224 (2004) *Flexible sheets for waterproofing — Waterproofing of concrete bridge decks and other concrete surfaces trafficable by vehicles — Determination of crack bridging ability, 2004.*
- SS-EN 12970 (2001) *Mastic asphalt for waterproofing – Definitions, requirements and test methods, 2001.*
- Vater E.-J., Neuman B., Rother M., (1983) *Erarbeitung von Prüfkriterien für Betonbrückenabdichtungen mit vorgefertigten Dichtungsbahnen, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 397, 1983.*
- Wegan V., Colldin Y., (1993) *Broisolering med polymerbitumenmatta. En jämförande studie mellan Danmark och Sverige, Statens Vejlaboratorium Notat 243, 1993.*
- Vejdirektoratet, (2009) *Isoleringsfrie broer 1. Fugtisolerering af betonbroeri de nordiske lande. State-of-the-art, Rapport nr. 359, version 1.*
- Vejdirektoratet, (2009) *Isoleringsfrie broer 2. Betonslidlag. Tilstandsundersøgelser og anbefalinger, Rapport nr. 360,.*
- Wolff, L., (2009) *Mechanismen der Blasenbildung bei Reaktionsharzbeschichtungen auf Beton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 576, 2009.*
- Vägverket (2008) *Broregler för nybyggnad - BV Bro, utgåva 9. Banverkets ändringar och tillägg till Vägverkets Bro 2004 inklusive supplement nr 2, 2008.*
- Vägverket (2009a) *VVTBT Tätskikt på broar 09, Vägverket, Publikation 2009:112.*
- Vägverket (2009b) *VVTBT Bitumenbundna lager 09, Vägverket, Publikation 2009:140.*

7.4 Systemet brobaneplatta utan tätskikt

- Berglund M, Nilsson B-L (2007) *Direktgjuten slitbetong – den enkla och kostnadseffektiva metoden. Fullskaleförsök med att återskapa kvalitet från 80-talet. Vägverket, region Norr, Vägunderhållsavdelningen, Luleå 2007, 18 sidor.*
- Brühwiler och Denarié (2008).
- Carlswärd J., (2008) *Fiberarmerad direktgjuten slitbetong – en undersökning av erforderlig stålfibermängd vid fullskaleförsök, Vägverket/LTU, Luleå 2008, 21 sidor.*

- Carlswärd, J., (2002) "Steel Fibre Reinforced Concrete Toppings Exposed to Shrinkage and Temperature Deformation". Rapport 2002:33 (Licentiatavhandling), Institutionen för väg- och vattenbyggnad, Luleå Tekniska Universitet, Luleå.
- Carlswärd, J., (2006) "Shrinkage Cracking of Steel Fibre Reinforced Self Compacting Concrete Overlays". Rapport 2006:55. (Doktorsavhandling), Institutionen för väg- och vattenbyggnad, Luleå Tekniska Universitet, Luleå.
- Charron *et al.* (2007)
- Døssland, Å., L., (2008) "Fibre Reinforcement in Load Carrying Concrete Structures. Laboratory and Field Investigations Compared with Theory and Finite Element Analysis". Doctoral Thesis 2008:50, Department of Structural Engineering, Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 254 pp.
- Hassan Abdiaziz Yusuf (2011): "Slitbanebetong för broar – en inventering av broar samt undersökning av klimatets inverkan på krympning", Avdelningen för Konstruktionsteknik, Luleå Tekniska Universitet, Examensarbete 2011, 50.
- Hultqvist Å. och Carlsson B. (2002) Betongvägen vid Arlanda – Tillståndet efter 10 års trafik, Vägverket, VTI notat, 35 -2002 (från Jannok, 2007).
- Jannok, C. (2004) Direktgjuten slitbetong på broar: stålfiberarmerad och självkompakterad, Avdelningen för konstruktionsteknik, Luleå Tekniska Universitet, LTU-Ex-04/219, 146 sid.
- Laurence, O., Bissonnette, B., Pigeon, M. & Rossi P., (2000) "Effect of Steel Macro Fibres on Cracking of Thin Concrete Repairs". Proceedings, 5th International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (BEFIB 2000), Lyon, Frankrike. (RILEM Publications S.a.r.l., Bagneux, Frankrike), pp 213-222.
- Lindqvist M (1998) Direktgjuten slitbetong p broar – en uppföljning av de broar som har byggts med direktgjuten slitbetong sedan 1992. Vägverket, avdelning teknik, Luleå 1998, 115 sidor
- Löfgren, I. (2005). *Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction – a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis*. Institutionen för Bygg- och miljöteknik, Avdelningen för Konstruktionsteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Doktorsavhandling, ISBN 91-7291-696-6.
- Löfsjögård, M., (2003) "Functional Properties of Concrete Roads – Development of an Optimisation Model and Studies on Road Lighting Design and Joint Performance". Bulletin No. 73 (Doctoral Thesis), Dept. of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 190 pp.

- Pajander, L., (1995) ”Stålfiberbetongsytor - förekomst av och ev. problem med fibrer i ytan.” Examensarbete nr 32, Byggnadsstatik, Institutionen för byggkonstruktion, KTH, Stockholm. (Genomfört inom utbildningen vid Ingenjörsskolan, KTH, Haninge), 23 s.
- Persson R., (2000) Trafikanternas syn på lägsta acceptabla vägstandard, Institutionen för Samhällsbyggnad, Luleå Tekniska Universitet, Examensarbete 2000:267 (från Jannok, 2007).
- Pimienta och Chanvillard (2005).
- Silfwerbrand, J., (1997) ”Pågjutningar av betong”. Rapport nr 10, utgåva 3, byggnadsstatik, institutionen för byggkonstruktion, KTH, Stockholm, 65 s.
- Silfwerbrand, J., (2005) “Bending Tests on Polypropylene Fibre Concrete Beams”. Ur: CBI Research Goes West – Reprint of the Contributions of the Swedish Cement and Concrete Research Institute at the XIX Symposium on Nordic Concrete Research and Development in Sandefjord, Norway, June 12-15, 2005. CBI Betonginstitutet, Stockholm, s 46-50.
- Silfwerbrand, J., (2009) ”Bättre bedömning av vidhäftning mellan betong och betong”. Tidskriften Bygg & teknik, vol. 101, nr. 7/09, s. 12-14.
- Silfwerbrand, J., (2009a) “*Bonded Concrete Overlays for Repairing Concrete Structures*”. Chapter 8, “Failure, Distress and Repair of Concrete Structures” (Edited by N. Delatte), Woodhead Publishing Limited, Oxford, Cambridge & New Dehli, pp- 208-243.
- Silfwerbrand, J., (2009b) “Dimensionering av slitskikt i fiberbetong för brobaneplattor”. Uppdragsrapport nr 2009-230, CBI Betonginstitutet, Stockholm, 29 s.
- Silfwerbrand, J., (2009c) “Skyddsbetong av fiberbetong – skillnader mellan fibrer av vanligt kolstål, galvaniserat stål och rostfritt stål”. Uppdragsrapport nr 2009-63, CBI Betonginstitutet, Stockholm, 29 s.
- SS-EN 14651:2005 (2005) ”Förtillverkade betongprodukter - Provningsmetod för betong med metallfibrer - Bestämning av böjdraghållfasthet”. SIS Förlag AB, Stockholm.
- Svenska Betongföreningen (1997) ”Stålfiberbetong – Rekommendationer för konstruktion, utförande och provning”. Betongrapport nr 4, utgåva 2, Stockholm.
- Svenska Betongföreningen (2009) ”Industrigolv – Rekommendationer för projektering, materialval, produktion, drift och underhåll”. Betongrapport nr 13, Stockholm.
- Vägverket (2004) ”Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av broar Bro 2004”. Publikation nr 2004:56, Borlänge.

7.5 Livscykelkostnadsanalyser

Det finns en mycket omfattande litteratur om livscykelkostnadsanalyser. För litteratur-sammanställning hänvisas till Rapporter utarbetade inom ETSI-projektet, se t.ex. nedan.

- Bygginnovationen (2010) Delrapport BRO, November 2010.
- Jutila A., Sundquist H.,
(Editors) (2007) *ETSI Project (Stage 1), Bridge Cycle Optimisation*, Report
TKK-SRT-37, Helsinki University of Technology.
- Rautakorpi H., (1988) Material Quantity and Cost Estimation Models for the Design of
Highway Bridges, *Acta Polytechnica Scandinavia*, Civil Engineering and Building Construction Series No. 90, Helsinki 1988.
- Riksrevisionen (2011) *Trafikverkens produktivitet – Hur mycket infrastruktur får man
för pengarna?* Rapport RiR 2011:7.
- Salokangas L., (Editor)
(2009) *ETSI Project (Stage 2), Bridge Cycle Optimisation*, Report
TKK-R-BE3, Helsinki University of Technology.
- Vägverket (2011) BaTMan, A`prislista för broåtgärder år 2011.

Appendix

Indata	Brolängd L =	50	Kantbalken antas ha en utsatt area av 500*500*500*250
	Brobredd b =	9	
	Kantbalkarea /m²	1,75	
	Total broarea /m²	450	
	Belagd area /m²	400	
	Livslängd /a =	100	
	Kalkylränta /% =	3	OBS alla kostnader nedan är per m2 bro
	Investeringskostnad /SEK/m² =	9 455	

LCC Periodiska aktiviteter	Kostar	görs:	0,03	Hjälpvariabler		
				n /p	avkortat	mp
Management + Driftåtgärder 0,3 %	28	1	895	99,00	99,00	99
Noggrann inspektion 100 kr/m ²	100	6	479	16,50	15,00	90
Kantbalk Impregnering	300	10	790	9,90	8,00	80
Rivning 10 %	945	100	49	1,00	1	100
Summa LCC kostnad			2 214			

LCC reparationer och utbyten	Kostar år 0	Mängd/m ²	Kostar år 0/m ²	År							
				13	25	37	50	63	75	88	
Kantbalk, rep 0 - 30 mm/m ²	3 000	0,389	1 167		557			181			
Kantbalk utbyte per m	9 000	0,222	2 000				456				148
Räcke bättringsmålning per m	1 100	0,222	244	166		82			38		18
Räcke utbyte	3 000	0,222	667				152				
Beläggning slitlager justering/m2	300	0,889	267	182					41		
Slitlager tätskikt utbyte/m2	2 400	0,889	2 133		715						158
Övergångskonstruktion utbyte/m	30 000	0,040	1 200					402			89
Övergångskonstruktion utbyte tätprofil/m	2 000	0,040	80	54					12		
Lager ommålning/st	7 000	0,009	62				21				7
Lager utbyte/st	35 000	0,009	311				71				
			0								
			0								
				403	1 272	505	679	273	7		414
				Total:							3 552

Investering	9 455	
Periodiska aktiviteter	2 214	23,41%
Reparation och utbyten	3 552	37,57%
	15 220	61%

Figur A.1 Exempel på mall för LCC analys av systemet brobaneplatta.