

Laster och lasteffekter av trafik på broar Litteraturstudie

Håkan Sundquist

Teknisk rapport nr 98:16, Brobyggnad

Laster och lasteffekter av trafik på broar
Litteraturstudie

av

Håkan Sundquist

Teknisk rapport nr 98:16

Institutionen för Byggkonstruktion

Kungliga Tekniska Högskolan

S-100 44 Stockholm

Institutionen för byggkonstruktion KTH

Förord

Föreliggande utredning som utförts på uppdrag av Vägverket, har genomförts vid institutionen för byggkonstruktion vid KTH inom en arbetsgrupp bestående av undertecknad samt doktoranderna Rickard Johnson, Gerard James och Ulrika Johansson. Arbetet utgör en förstudie för kommande arbete och består huvudsakligen av en litteraturstudie samt några korta jämförelser mellan olika dimensionerande laster och lasteffekter för broar. Avsikten är att rapporten ska kompletteras och utvecklas i det fortsatta arbetet.

Innehållsförteckning

1	Problemformulering	1
2	Vertikala laster av trafik på broar	2
2.1	Tillåtna vägtrafiklaster	2
2.1.1	Allmänt	2
2.1.2	Sverige och Norden	3
2.1.3	Övriga Europa	4
2.1.4	USA	4
2.2	I normer föreskrivna dimensionerande laster	4
2.2.1	Allmänt	4
2.2.2	Svenska regler	4
2.2.3	Regler i Europa	5
2.2.4	Jämförelse mellan tillåtna och dimensionerande laster	6
2.3	Kombination av vertikala trafiklaster	6
2.3.1	Verkliga laster	6
2.3.2	Regler i normer	8
3	Horisontella laster av trafik på broar	9
3.1	Allmänt	9
3.2	Bromskrafter	9
3.3	Centrifugalkrafter	10
3.4	Sekundära horisontalkrafter	11
3.5	Kombination av laster	11
4	Dynamiska lasteffekter	12
4.1	Allmänt	12
4.2	Teori	12
4.3	Några praktiska resultat	12
5	Lastfördelning	15
5.1	Allmänt	15
5.2	Punktlaster	15

5.3	Lastfördelning för plattor	16
5.4	Lastfördelning mellan balkar	17
5.5	Kombination av trafiklaster med övriga laster	18
5.6	Strukturmodellering	19
6	Dimensionerande påverkning	20
6.1	Allmänt	20
6.2	Regler vid nybyggnad	20
6.3	Regler vid kontroll av befintliga broar	20
7	Behov av forskning och utveckling	21
7.1	Iakttagelser	21
7.2	Förslag till program	21
8	Litteratur	23
8.1	Allmänt	23
8.2	Laster	24
8.3	Säkerhetsvärdering	26
8.4	Lastfördelning	26
8.5	Dynamiska lastfaktorer	27
9	Appendix A, dynamisk interaktion mellan fordon och bro	29
10	Appendix B, lastfördelning	30

Sammanfattning

I ett land med uppbyggd infrastruktur är utnyttjande av det befintliga beståndet av broar och vägar av stor betydelse. P.g.a önskemål om ökad kapacitet hos dessa befintliga anläggningar finns behov av uppklassning av dessa. I motsatt riktning verkar den nedbrytning av laster och miljö som ständig pågår. Nedbrytningen kan mötas genom underhållsåtgärder.

Uppklassningen kan ske genom noggrannare analys av konstruktionerna eller genom fysisk förstärkning.

Analysen av de befintliga konstruktionerna kan ske utifrån flera olika utgångspunkter

- studium av de verkliga lasterna och dessas statistiska variation,
- studium av hur lasterna påverkar konstruktionerna,
- studium av de befintliga konstruktionernas status t.ex. genom oförstörande eller förstörande provning eller genom
- förbättrade analysmetoder, bättre materialmodeller o.s.v.

Naturligtvis är det i många fall aktuellt med kombinationer av de nämnda åtgärderna.

Förstärkning av konstruktionerna kan ske med en mängd olika åtgärder alltifrån enkla mindre åtgärder till tillfogande av omfattande tilläggskonstruktioner.

I denna rapport ska vi behandla de två förstnämnda fenomenen av den noggrannare analysen. I andra rapporter kommer övriga faktorer att belysas.

Studerar man den befintliga litteraturen inom området finner man att man sällan studerat hela problemkomplexet från verkliga laster över lastinverkan, -fördelning och till analys över broarnas verkliga egenskaper. Särskilt området laster och lasteffekter är ofullständigt undersökt. Mätningar av verkliga laster och lasteffekter står fram som ett mycket viktigt område. Stora samhällsekonomiska besparingar finns troligen att hämta genom FoU inom området.

Summary

1 Problemformulering

Vid dimensionering av en konstruktion, det kan gälla såväl vid nyprojektering som vid kontroll av bärförmåga hos en befintlig konstruktion ställer man normalt sett, *BKR 94*, upp en ekvation av typen

$$R \geq S \quad (a)$$

Vänsterledet (R , resistance) står för konstruktionens förmåga att motstå påverkningar (S) av olika slag.

Påverkningarna kan vara av många olika typer. Det kan handla om vanliga laster, olycks-laster, temperatur, miljöpåverkningar m.m. samt kombinationer av dessa påverkningar.

Bärförmågan är i sin tur beroende av en lång rad faktorer. Det kan handla om materialens hållfasthet och deformationsförmåga, men en mycket viktig faktor är hur laster och påverkningar sprider sig i konstruktionerna.

Ekv. (a) anger dock en stor förenkling eftersom påverkan och bärförmåga är beroende av varandra. Bl.a. finns dynamiska effekter som beror på interaktionen mellan de bägge faktorerna. Andra faktorer där S och R ej är oberoende handlar om hur ofta lasterna upprepas, lasternas varaktighet och om dynamiska förstoring av lasternas inverkan.

I denna rapport kommer främst trafiklasternas inverkan på konstruktionerna att diskuteras. Faktorn S fram till lasteffekt i form av moment, normal- och tvärkrafter kommer att behandlas. I annan rapport kommer dimensioneringen mot dessa krafter och moment att diskuteras.

Tidigare förtjänstfulla allmänna arbeten inom detta arbete har utförts i Lund *Christiansson (1973)* och *Christiansson (1976)*.

2 Vertikala laster av trafik på broar

Laster på broar och vägar kan betraktas ur två synpunkter. De som trafikerar vägar och broar är intresserade av vilka laster som får transporteras på trafiknätet. Vid given stor mängd gods som ska trafikeras, är det mer ekonomiskt att transportera godset med få mycket tungt lastade fordon än med fler lättare fordon. Vid given transportmängd på landsvägsfordon blir också miljöbelastningen mindre med färre tunga fordon än med fler mindre fordon. Olika faktorer sätter dock gränser för hur tunga fordonen ska få bli. Gränserna kan dels ses ur trafikerarnas synpunkt dels ur väghållarens synpunkt. Utöver detta kan samhället önska styra trafikeringen av övergripande samhälls- och miljöpolitiska mål.

Transportföretagen har naturligtvis anledning att optimera fordonens storlek av rent logistiska skäl. Fler mindre fordon ger naturligtvis större flexibilitet än färre stora. Lastfordonen kan inte göras hur stora som helst av rent geometriska och hållfasthetsmässiga skäl. Troligtvis skulle det dock vara fullt möjligt och ekonomiskt fördelaktigt för transportföretagen med fordon med större lastkapacitet än dagens fordon.

Större och tyngre fordon ger ökat slitage på vägar och bärförmågekapacitet på vägar och broar sätter gränser för möjliga fordons-, boggie-, axel- och hjullaster. Det är bl.a. denna aspekt som ska diskuteras i denna rapport.

Samhället kan önska styra lastkapaciteten på vägarna av övergripande samhällsskäl. Ett sådant skäl kan vara att man önskar begränsa tillåtna vägtrafiklaster för att på detta sätt se till att transporter överförs till järnvägs- och fartygstrafik som kan anses vara miljömässigt mer gynnsamt än transporter på vägar.

I Sverige tillåts tyngre vägtrafikfordon än i många andra länder. Skälet till detta torde främst bero på behovet av timmertransporter från inlandet och ut till olika skogsindustriella anläggningar. För många av dessa transporter finns inga alternativa moderna transportmöjligheter.

2.1 Tillåtna vägtrafiklaster

2.1.1 Allmänt

I de olika länderna utger myndigheter regler för hur tunga och stora fordon som ska tillåtas. Vanligtvis begränsas fordonens yttermått, axelvikt, boggievikt, vikt hos de olika fordonen i ett fordonståg samt fordonstågets vikt. I **Fig. 2.1** nedan visas exempel på tillåten totalvikt och längd, *Handegard*, för tyngsta fordonståg bestående av två fordon. Som framgår tillåts de största vikterna i Norden, medan något mindre vikter tillåts i övriga Europa. I USA är tillåtna fordonsvikter något mindre än i Europa.

I vissa länder och för vissa vägar finns speciella regler som möjliggör mycket höga laster t.ex. mellan någon gruvort och en stålindustri. Eftersom fordonstillverkarna önskar erbjuda sina kunder en så stor valfrihet som möjligt måste huvudkomponenterna dimensioneras så att de även kan användas för sådana fall. Detta betyder att sett ur vad som är möjligt finns fordon som klarar mycket högre laster än vad som är tillåtet. Bl.a. detta innebär att det är möjligt att det finns fordon som kan generera högre laster än vad som tillåts.

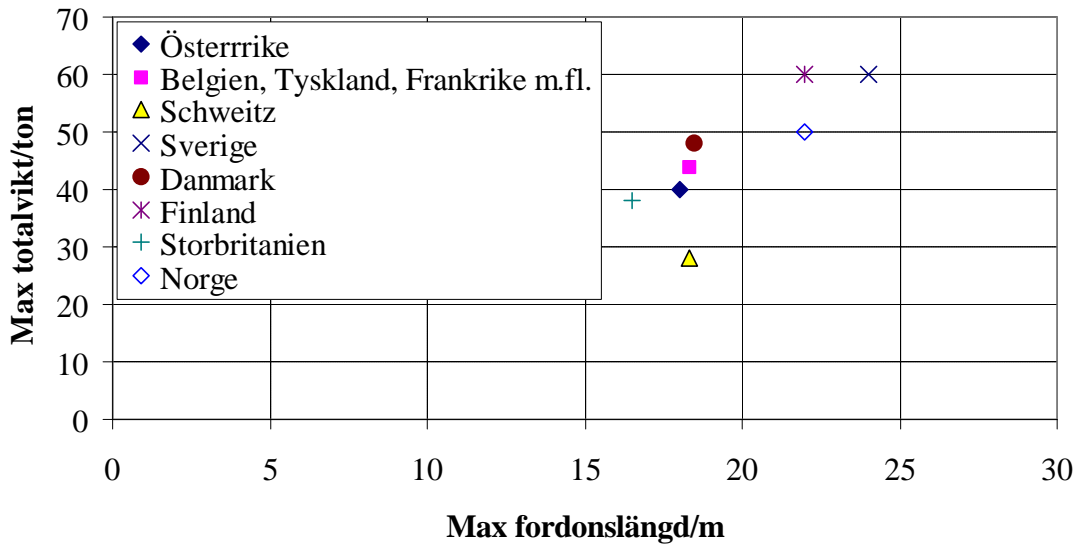


Fig. 2.1 Exempel på maximalt tillåtna fordonsvikter och längder i Europa.

2.1.2 Sverige och Norden

Reglerna i Sverige och övriga Norden är ganska lika, även om de skiljer sig i detaljer och totalt ser det ut som om lasterna är något högre i Sverige än i de övriga nordiska länderna. Vi tar därför Sverige som exempel, *Vägverket (1993)*. I **Fig. 2.2** visas tillåten axellast för den högsta klassen BK1 för olika fordon- och fordonståglängder.

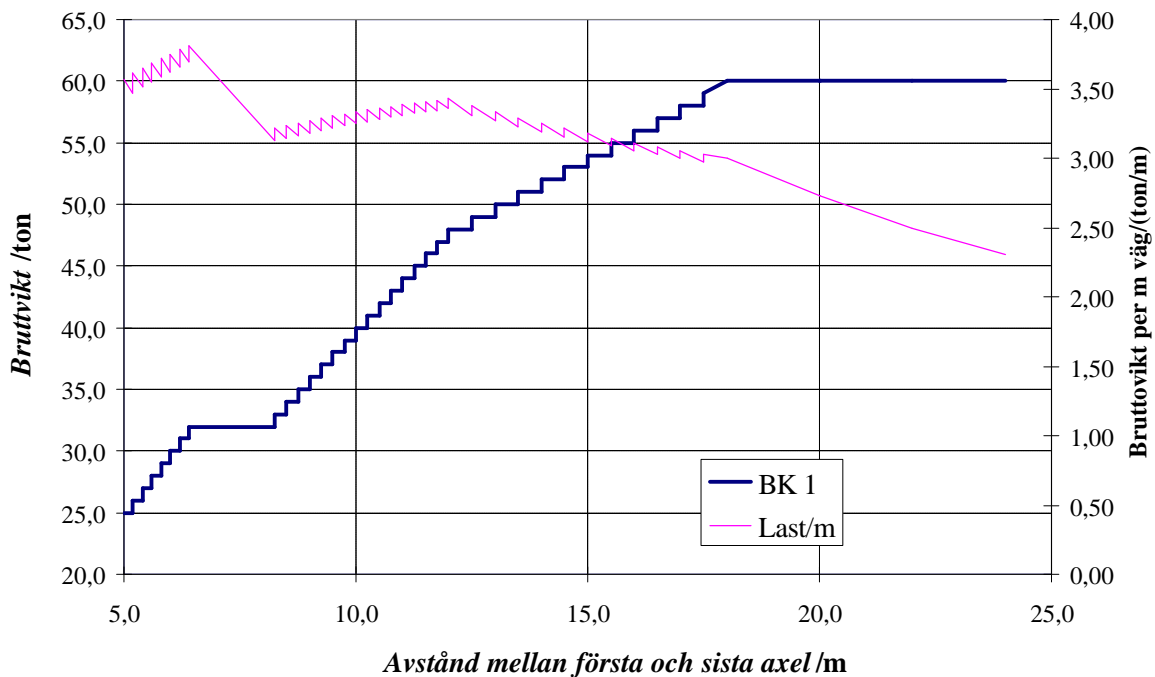


Fig. 2.2 Samband mellan fordonslängd och maximal vikt hos fordon.

2.1.3 Övriga Europa

Som framgår av **Fig. 2.1** är de tillåtna totallasten för fordonståg stor i Sverige jämfört med i övriga Europa. För kortare fordon och för enskild axel skiljer det inte mycket. I Sverige är tillåten axellast 10 (11,5) ton och för boggie med två axlar 18(19) ton. (Värden inom parentes avser *en* drivaxel.) För boggie med 3 axlar 24 ton. Mindre avvikelser uppåt och nedåt förekommer.

2.1.4 USA

Jämfört med i Europa är lasterna i USA, *Taly*, något mindre. Tillåten axellast syns vara 20 kips = (9,1 ton) och tillåten boggielast 34 kips = 15,4 ton. Total längd 33 m. I vissa stater tillåts högre laster. Vid kombination av många axlar tillåts i många fall ganska höga laster.

2.2 I normer föreskrivna dimensionerande laster

2.2.1 Allmänt

Avsikten med lasterna är ej att exakt beskriva hur lasten ser ut, utan meningen är ofta att ekvivalentlasterna med tillräcklig säkerhet täcker in trafikens inverkan på konstruktionerna. I USA syns det dock som om tillåtna fordonsvikter står i en närmare relation till varandra.

2.2.2 Svenska regler

Den viktigaste lasten definierade i *BRO 94* är det s.k. huvudlastfallet som beskriver en ekvivalent last som avser att täcka in olika typer av last från tunga fordon. Nedan visas i **Fig. 2.3** huvudlastfall i *BRO 94*. I *BRO 94* antas att trafiklasten kan fördelas på filbredden 3,0 m.

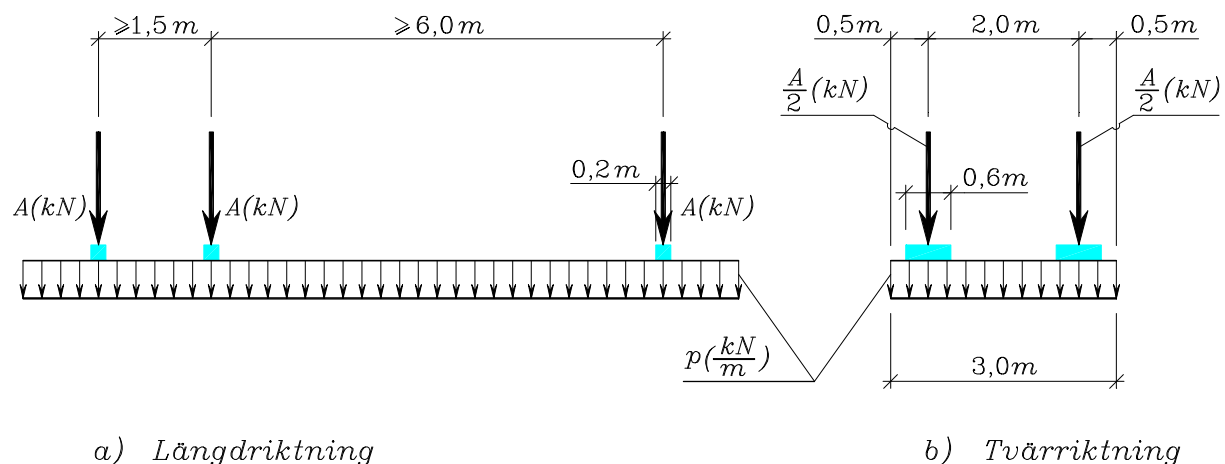


Fig. 2.3 Lastgrupp typ 1 enligt *BRO 94*. För fil 1 är $A = 250$ kN, $p = 12$ kN/m och fil 2 är $A = 170$ kN, $p = 9$ kN/m fil 3 är $A = 0$, $p = 6$ kN/m.

2.2.3 Regler i Europa

Dimensionerande broaster varierar f.n. kraftigt mellan de olika länderna i Europa, *Highways Agency*, ... Kommande gemensamma regler i Europa, *Eurocodes*, kommer att så småningom medföra att reglerna närmar sig varandra. Under en övergångstid kommer varje land att via s.k. "boxed values" kunna modifiera lasterna i Eurocode. I **Fig. 2.4** visas huvudlastfallet enligt *Eurocode 1*.

I Eurocode utgår man från samma filbredd som i BRO 94. Utsträckningen och fördelningen i sidled är dock något annorlunda när bredden på körfälten är större än 3 m.

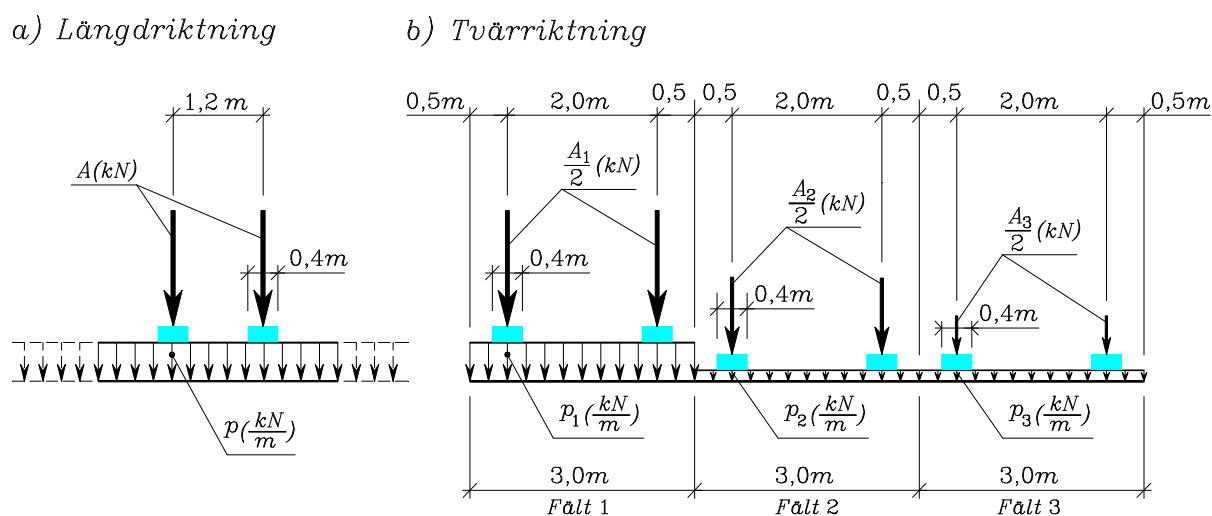


Fig. 2.4 Lastgrupp typ 1 enligt Eurocode 1. För
 fil 1 är $A = 300 \text{ kN}$, $p = 27 \text{ kN/m}$ och
 fil 2 är $A = 200 \text{ kN}$, $p = 7,5 \text{ kN/m}$
 fil 3 är $A = 100 \text{ kN}$, $p = 7,5 \text{ kN/m}$.

I planerade svenska applikationsregler för Eurocodes (*NAD*) kommer, via de ovan nämnda boxed values, Eurocodes laster att multipliceras med en reduktionsfaktor α av storleksordningen 0,8.

Amerikanska dimensionerande laster, *AASHTO 1992*, är uppbyggda på liknande sätt som de svenska och Eurocode med den skillnaden att den dynamiska lastfaktorn ska läggas på i efterhand. Man kan också säga att de amerikanska lasterna mer liknar last från verkliga fordon, medan man för långa spann har liknande regler som i Eurocode. Det tyngsta dimensionerande fordonet ger en lastinverkan som är 330 kN fördelat på en sträcka av 8,5 m. För långa broar blir dimensionerande last 95 kN/m. Eftersom maximal dynamisk lastfaktor är 1,3, se nedan inses att de amerikanska lasterna är lägre för korta broar, men syns kunna bli högre för långa broar.

2.2.4 Jämförelse mellan tillåtna och dimensionerande laster

Det finns i de svenska och europeiska systemet ingen exakt koppling mellan tillåtna trafiklaster och dimensionerande laster. Dimensionerande laster avser att på ett ställföreträdande sätt ge en dimensionerande inverkan som täcker in de tillåtna fordonen. I **Fig. 2.5** visas en jämförelse mellan maximalt moment i en bro belastad med dimensionerande normbelastning och last från *ett* tillåtet fordon. I avsnitt nedan visas motsvarande jämförelse mellan inverkan av normlast och inverkan av mest ogynnsamma *kombination* av fordon.

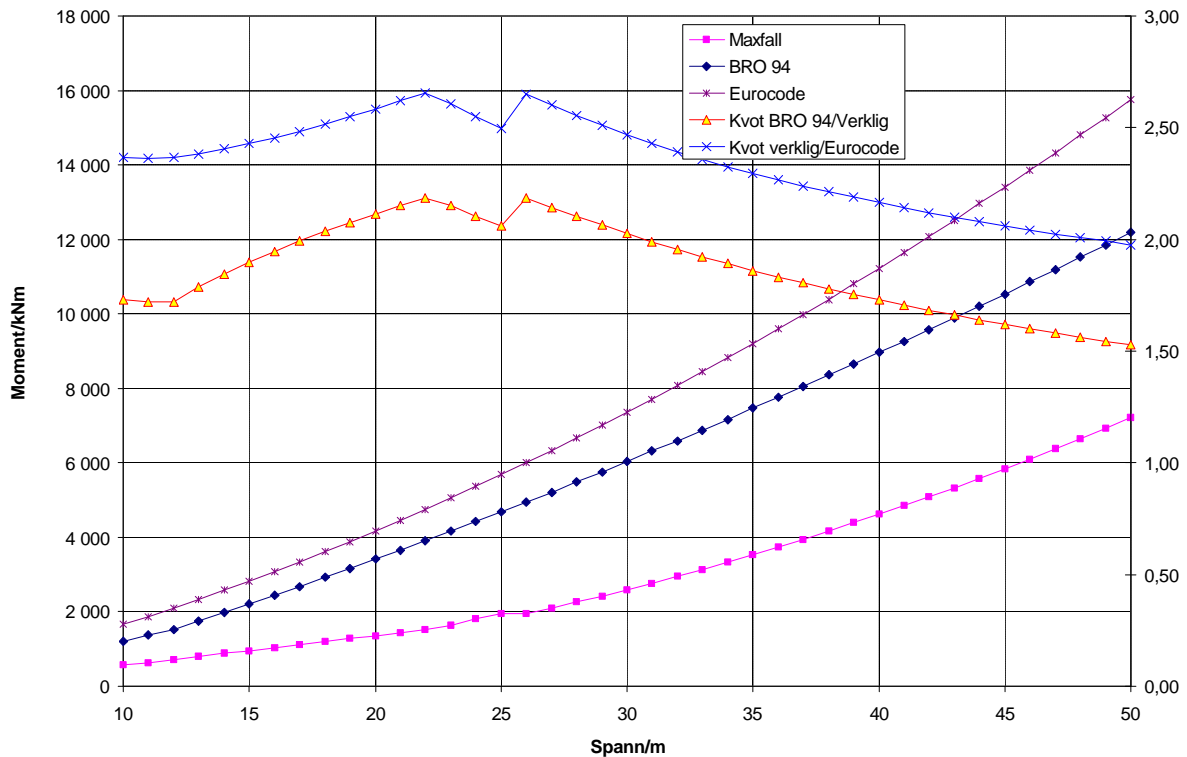


Fig. 2.5 Jämförelse mellan momentinverkan från *ett* fordon som ger maximal momentinverkan och dimensionerande värden enligt Eurocode och BRO 94.

2.3 Kombination av vertikala trafiklaster

2.3.1 Verkliga laster

I reglerna för trafiken finns av naturliga skäl inga regler som talar om hur tillåtna laster får kombineras. Av rent fysiska skäl kan dock inte fordonen köra alldeles intill varandra. Av trafiksäkerhetsskäl är det ej heller möjligt att fordon under körning kan komma alltför tätt. En annan fråga är hur stor sannolikheten är att många fordon i rad efter varandra har tung last. Gör man upp ett diagram där man jämför möjliga tunga tillåtna laster i ett körfält och placerar fordonen med t.ex. en meters lucka erhåller man ett resultat ungefär enligt **Fig. 2.6**.

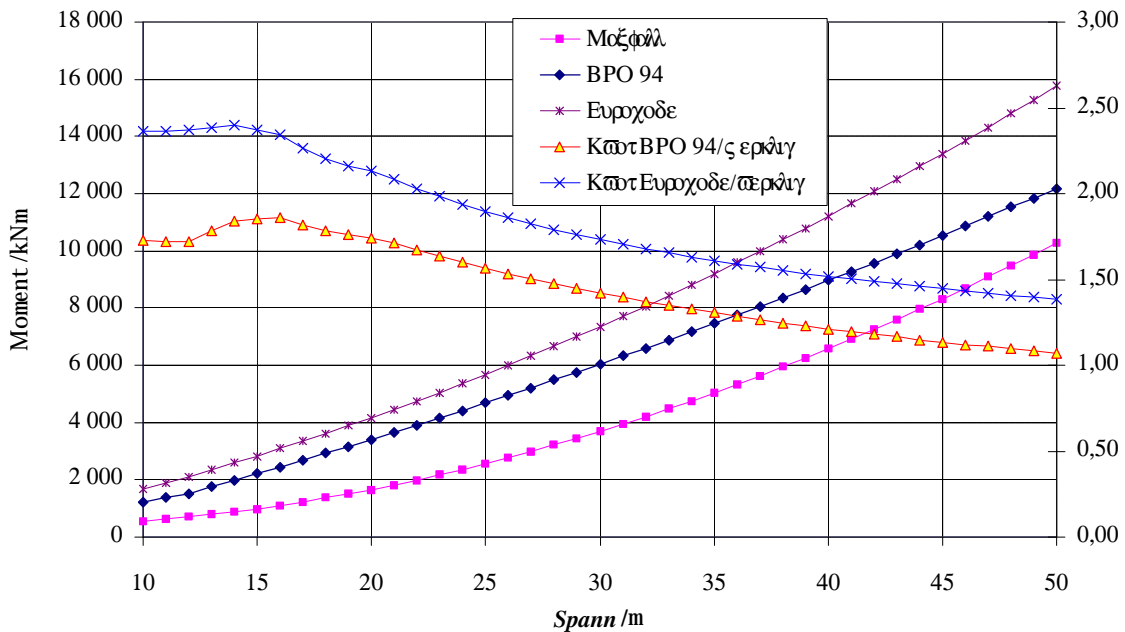


Fig. 2.6 *Jämförelse mellan momentinverkan från ett eller flera tillåtna fordon i kö med 1 m lucka dimensionerande värden enligt Eurocode och BRO 94.*

Av **Fig. 2.6** inses att det är fullt teroretiskt möjligt att med tillåtna laster, kombinerade med dynamiska förstöringsfaktorer komma upp i momentinverkan som är större än vad som förutsatts i normen. I praktiken är detta dock mycket osannolikt dels av rent statistiska skäl och dels eftersom det ej är möjligt att framföra många fordon med hög fart och med mycket liten lucka mellan fordonen.

Frågan om kombination av många tunga fordon i köer baserade på mätningar redovisas i *Östlund (1995a)*, *Östlund (1995b)*. Liknade undersökningar återfinns i *Crespo-Minguillon Casas*. Få liknade mätningar och utvärderingar redovisas i den litteratur vi haft möjlighet kontrollera.

Kombineras dessa frågor med frågan hur sannolikt det är att en bro med flera körfält samtidigt belastas av många tunga fordon uppstår ännu en komplicerad frågeställning, se *Höglund Petersson Sundquist*.

Denna typ av frågor måste lösas genom verkliga mätningar av fordon och troligen för att spara kostnader måste dessa mätningar kombineras med statistiska simuleringar. Olika principer finns för att utföra sådana mätningar. I USA finns särskilda stationer längs de större vägarna där fordonen tas in för kontrollvägning. Sådana metoder kan naturligtvis användas för kontroll och uppföljning av trafiklasterna, men är av begränsat intresse för att få fram underlag för dimensionering av broar och vägar.

Mätning av fordonslast direkt i vägarna med s.k. WIM-teknik, *Cebon, Glover Newton* m.fl., är ett bra sätt för att få fram statistiskt underlag, men mätningens noggrannhet och utvärdering fordrar kunskap och erfarenhet. Även fordonens läge inom körfält, se avsnitt 4.4, har betydelse, men syns nästan ej alls behandlat i litteraturen. Vi anser att det finns stort behov av

denna typ av undersökningar. Undersökningar kan samordnas med liknade undersökningar i olika länder men många av frågorna beror på lokala förhållanden, varför förhållandena bör utredas för olika typiska regioner.

2.3.2 Regler i normer

Redan i ovanstående regler om dimensionerande laster finns inbyggt den sannolikhet som normförfattarna ansett vara att många tunga fordon kan komma att belasta en bro. Vi ser att genom kombinationen av stora punktlaster och en fördelad belastning blir lasten per längdenhet mindre ju längre och bredare bron är. Detta framgår också av momentinverkan enligt **Fig. 2.5**.

Sannolikheten att flera tunga fordon *i skilda körfält* samtidigt belastar en bro har av normförfattarna bedömts genom, den med antalet körfält, successivt minskande dimensionerande belastningen. Skillnaden i synsätt är här stor mellan BRO 94 och Eurocode 1. I USA och Kanada tillämpas liknande regler, se **Tabell 2.1**.

	Antal körfält					
Standard	1	2	3	4	5	6 och fler
AASHTO	1,00	1,00	0,90	0,75	0,75	0,75
CSA	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,55

Tabell 2.1 Lastreduktionskoefficienter i amerikanska (AASHTO) och kanadensiska normer (CSA).

3 Horisontella laster av trafik på broar

3.1 Allmänt

Vid dimensionering av främst underbyggnad, men även vid dimensionering av överbyggnad till t.ex. rambroar inverkar även de horisontella krafterna. Dessa kan vara av många slag. Jordtryck, vindkrafter, jordbävningskrafter, vattentryck och istryck mot underbyggnad i vatten, men även krafter orsakade av trafiken.

Vi ska i denna korta rapport koncentrera oss på horisontella krafter orsakade av trafiken. De viktigaste av dessa är broms- och centrifugalkrafter. Krafter p.g.a. påkörning av fartyg, flygplan och påkörningskrafter på räcken och pelare är också viktiga horisontella krafter som konstruktören måste ta hänsyn till. Eftersom denna senare typ av krafter är ovanliga kombineras dessa vanligen inte med de mer 'normala' krafterna, varför vi utesluter behandling av dessa i denna rapport.

Broms- och centrifugalkrafter är mycket nära förknippade med de vertikala trafiklasterna så kopplingen mellan dessa typer av krafter är viktig.

3.2 Bromskrafter

När ett fordon bromsar eller accelererar uppkommer horisontella krafter. Bromskrafterna som naturligen blir större än accelerationskrafterna blir proportionella mot de bromsande fordons massa (m) och dessas retardation (\ddot{x}) enligt kraftekvationen

$$F = m\ddot{x} \tag{a}$$

I normer förskrivs storlek för bromskrafter som beror på belastad längd, se t.ex. nedanstående diagram, **Fig. 3.1**. Detta innebär att ju längre belastad längd desto mindre blir lasten per längdenhet eftersom den vertikala dimensionerande lasten per längdenhet också minskar med ökande belastad längd.

Studerar man ekvation (a) finner man att bromskraften är beroende på såväl belastad längd som retardation. Stor retardation kan förväntas när fordonen bromsar från hög fart. Fordon i hög fart kan inte ligga alltför nära varandra, varför den genomsnittliga retarderade massan inom aktuell brolängd minskar. Den svenska standarden innehåller en minskande bromskraft per längdenhet vilket tyder på att man tagit hänsyn till detta.

Hur detta fungerar i praktiken har vi emellertid inte kunnat hitta uppgifter om i litteraturen, varför detta skulle kunna implicera att det kunde vara av värde att studera denna fråga lite djupare och utgående från statistiska principer.

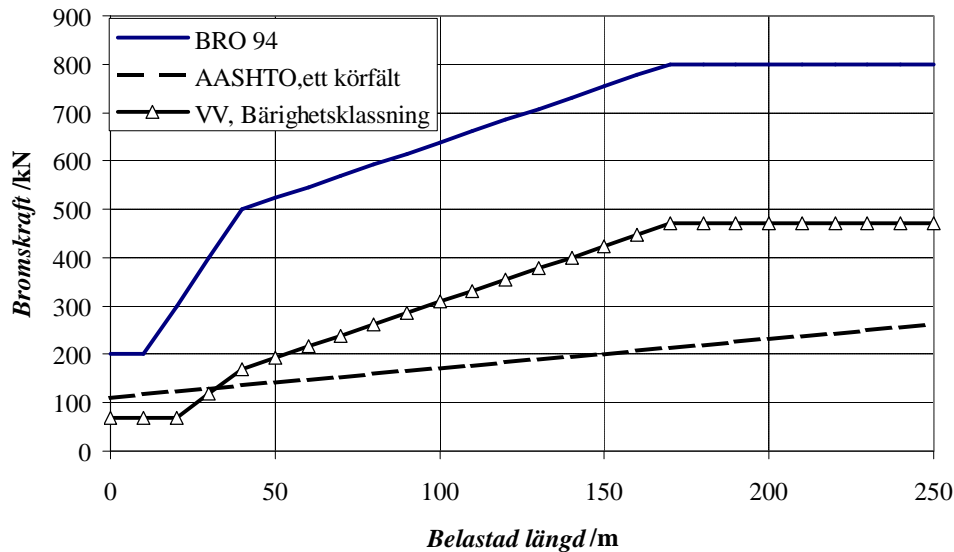


Fig. 3.1 Exempel på bromskrafter på broar enligt några olika normer. Den amerikanska AASHTO-Standarden avser last per körfält i en riktning, medan den svenska standarden avser total bromskraft på bron. Observera att vi i detta diagram approximativt applicerat AASHTO's principer på den svenska vertikala trafiklasten.

3.3 Centrifugalkrafter

Centrifugalkrafter från trafik kan beräknas utgående från den teoretiska formeln

$$\frac{F_H}{F_V} = \frac{1}{g} \frac{v^2}{R} \quad (b)$$

I ekvationen ovan är F_H/F_V kvoten mellan horisontell och vertikal kraft. Ekvationen förutsätter att ingående variabler uttrycks i SI grundenheter d.v.s. v i m/s, R i m och g i m/s^2 . Formeln återfinns i flera länders standarder men ofta maskerade till oingenkännlighet med hjälp av olika lokala enheter. AASHTO's formel överensstämmer således nästan exakt med ekv.(b), men omskriven på ett komplicerat sätt.

Andelen horisontell kraft ökar således med ökande fordonsfart. I olika länders standarder finns olika regler som begränsar inverkan av centrifugalkraften vid kombination av många fordon. Således skall enligt AASHTO, 1994, endast axellasterna, ej den fördelade lasten, tas med vid beräkning av inverkan av centrifugalkrafterna.

I BRO 94 beskrivs formeln för centrifugalkraften med formeln

$$\frac{F_H}{F_V} = \frac{40}{R} \leq 0,2 \quad (c)$$

Vi ser att man här gjort kvoten oberoende av farten. Sätter vi in $v = 72 \text{ km/s} = 20 \text{ m/s}$ i (b) får vi

$$\frac{F_H}{F_V} \approx \frac{40}{R} \quad (d)$$

D.v.s precis formeln i BRO 94. I Olika änders normeln anger man att centrifugalkraften ska angripa på olika nivå över brobanan. AASHTO föreslår tyngdpunkten för fordonen (det teoretiskt riktiga) medan BRO 94 föreslår farbanans överkant.

Eftersom det i samtliga fall handlar om en kvot mellan horisontell och vertikal kraft kommer horisontalkraften att variera på samma sätt som vertikalkraften så när som på

- inverkan av dynamisk förstoring
- statistisk variation av fordons fart och inverkan av att olika fordon kan röra sig längs olika horisontalkurvor.

Precis som bromskraften per längdenhet torde minska med ökande fart, borde även den vertikala kraft som orsakar centrifugalkraften minska med ökande fart, eftersom ökande fart bör ge ökade fordonsavstånd. Teoretiskt innebär överväganden av denna art att formeln (b) om F_V utgörs av all trafiklast alltid torde vara på säkra sidan. Ett liknande sådant angreppssätt återfinns vid beräkning av centrifugalkraftens inverkan för tåg enligt *BV BRO 94*, baserat på de gemensamma lastbestämmelserna för laster från tåg inom UIC.

En bearbetning av centrifugalkraftens storlek baserat på mätningar och statistisk utvärdering skulle eventuellt kunna medföra en reduktion av den dimensionerande lasten vid broar krökta i horisontalplanet.

3.4 Sekundära horisontalkrafter

Horisontella krafter såsom de ovan nämnda kan ge upphov till sekundära krafter t.ex. inverkan av lagerfriktion och jordtryck som uppstår mot underbyggnad och grundläggning, t.ex. mot ändskärmar. I BRO 94 finns speciala metoder för hänsynstagande till detta. Dessa regler är unika för de svenska standarderna.

Särskilt jordtryck mot ramben och ändskärmar p.g.a. horisontella krafter vore ett viktigt område för studium. De svenska reglerna syns i praktiken ha fungerat bra eftersom skador beroende på dessa krafter ej rapporterats. Detta skulle dock eventuellt implicera att de dimensionerande krafterna kan innehålla onödiga marginaler.

3.5 Kombination av laster

Det finns en stark koppling mellan vertikal- och horisontalkrafter av trafik. Särskilt om hänsyn tas till fordonens fart och därmed ökande fordonsavstånd borde den sammanlagda kombinerade inverkan av dessa laster kunna reduceras under förutsättning att man utför mätningar och därmed hörande utvärderingar.

4 Dynamiska lasteffekter

4.1 Allmänt

Ett klassiskt problem för brokonstruktören är bestämning av den s.k. dynamiska lastfaktorn. Denna faktor talar om hur mycket större t.ex. nedböjningarna i en viss punkt blir för en last som rör sig med farten v över en bro än för samma last statiskt placerad i någon punkt. Man antar sedan, vilket är en grov approximation, att övriga parametrar t.ex. spänningarna ökar i samma proportion som nedböjningarna.

Detta problem är mycket komplicerat. Många olika faktorer påverkar lastfaktorn. Som exempel på sådana kan nämnas:

- Brons dynamiska egenskaper och dämpning.
- Fordonens fart på bron.
- Fordonens massa, fjädring och dämpning.
- Fordonens utformning t.ex. axelavstånd och liknande. Förekomst av svängande massor i fordonet (t.ex. kopplingsarmar i gammaldags ånglok och liknande).
- Ojämnheter och vertikalkurvor i vägbanan.
- Förekomst av dämpande och energiupptagande system mellan fordon och bro t.ex. beläggning för vägbroar eller genomgående ballast för järnvägsbroar.

Som vi ser finns många faktorer som är mycket svåra att bestämma och i praktiken är man hänvisad till mätningar. Dessa mätningar måste göras på den färdiga bron varför man inte har så stor nytta av mätningarna i projekteringsstadiet. Att överföra information från en bro till en annan kan medföra stora osäkerheter.

4.2 Teori

I Appendix A diskuteras teori för dynamiska lastfaktorer och dras några korta slutsatser om vilka frågor som vi anser särskilt viktiga.

4.3 Några praktiska resultat

Studerar man standarder i olika länder finner man att man tillämpar vitt skilda principer. I **Fig. 4.1** visas några exempel. I figuren har vissa antaganden gjorts beträffande sambandet mellan spännvidder och lägsta egenfrekvenser för broar enligt *Fryba (1972)*, *Fryba (1996)*, och *Taly*.

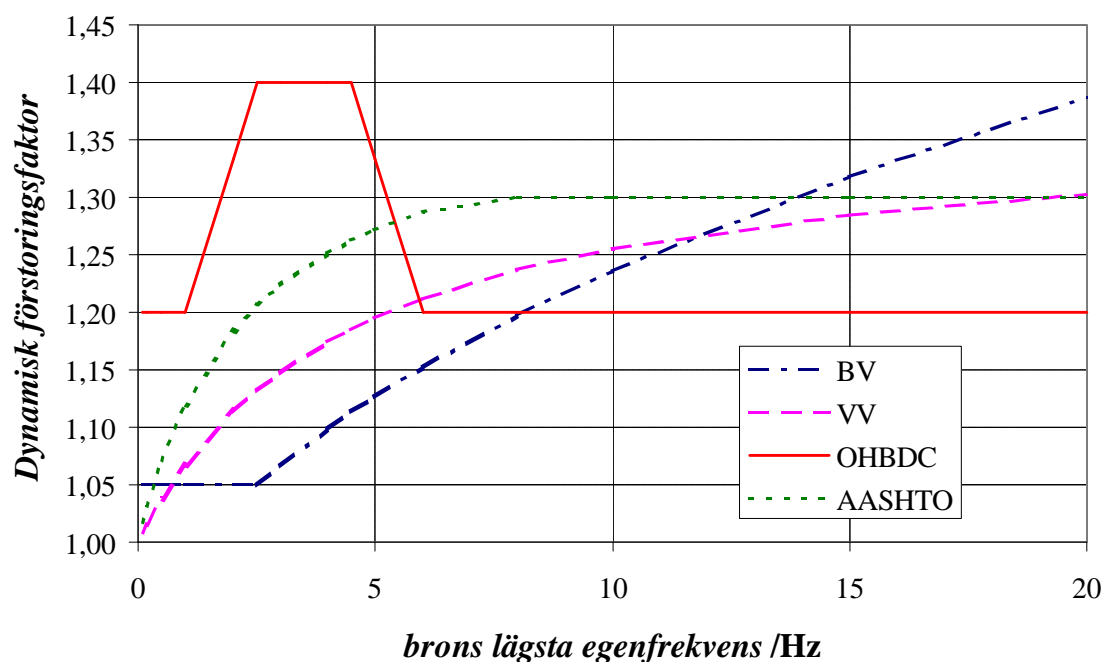


Fig. 4.1 Dynamisk förstoringfaktor enligt några olika standarder. Omvandling mellan lägsta egenfrekvens och spännvidd har gjorts enligt Frýba (1972), Frýba (1996), och Taly.

Som framgår av Appendix A är det många olika faktorer som påverkar den dynamiska förstoringen av lasterna. En uppenbart viktig faktor är fordonens fart på bron. Teoretiskt bör ökad fart ge ökad dynamisk förstoring. Det finns dock inga helt entydiga samband mellan fart och förstoringfaktor. Ej heller är inverkan av den lägsta egenfrekvensen entydig, *Eymard Guerrier Jacob, Green Cebon (1994), Green Cebon (1996), Green Cebon Cole, Karoumi, Hassan Burdet Favre* m.fl. Många länders normer, *BRO 94, Eurocode 1, AASHTO 1994*, innehåller därför en konstant förstoringfaktor oberoende av fart och egenfrekvens. Man kan misstänka att man i detta byggt in ett resonemang om att sannolikheten för att många tunga fordon samtidigt belastar en bro är osannolikt för långa broar som ju har låg lägsta egenfrekvens. Exakt hur stora faktorer man använt i normerna framgår ej för de två förstnämnda, men mycket tyder på att man räknat med en förstoringfaktor av c:a 1,3.

Som framgår av den teoretiska analysen i Appendix A, blir normalt sätt den dynamiska lastfaktorn mindre för system med flera axlar än för system med endast en axel. Detta har beaktats i den kanadensiska normen, *OHBDC*, genom olika dynamiska lastfaktorer vid dimensionering för enstaka axel, eller fler axlar, se **Tabell 4.1**.

Antal dimensionerande axlar		
1	2	3
1,4	1,3	1,25

Tabell 4.1 Dynamisk förstoringfaktor beroende på det antal axlar för vilket kontroll sker enligt den kanadensiska normen, *OHBDC*, 1993.

I flera arbeten t.ex. *Cebon Newland*, diskuteras inverkan av ojämnheter i farbanan för fordon med olika tekniska egenskaper. Ojämnheter påverkar starkt den dynamiska förstoringen. Här finns således en stark koppling mellan underhållsstatus och bärighetsklassning. Broar med stora ojämnheter bör således ges lägre klassning än broar med god underhållsstatus.

5 Lastfördelning

5.1 Allmänt

Under däck och järnvägshjul produceras av de stora lasterna från fordonen lokalt mycket höga tryck. Syftet med en brokonstruktion är att föra över dessa krafter som kan förekomma över nästan hela bron på ett säkert sätt ut och ner till bärkraftig grund. Vi kan kalla detta för lastfördelning. Principer för lastfördelning är i alla böcker om broar ett av de viktigaste avsnitten, *Menn, Taly, Petersson Sundquist (1995a), Petersson Sundquist (1995b)*, m.fl. I amerikanska och kanadensiska standarder behandlas området i ganska hög grad *AASHTO(1992), CSA, OHBDC*, medan de knappast alls berörs i det svenska normsystemet. I nedanstående avsnitt ska några korta kommentarer ges kring några fenomen kopplade till lastfördelning.

5.2 Punktlaster

Eftersom broar i de flesta fall dimensioneras utgående från elasticitetsteorin, vilken enligt förenklade beräkningsmetoder ger oändligt stora moment under punktlaster, är det viktigt att ta hänsyn till den lastfördelning som i praktiken uppstår, se **Fig. 5.1**. (Figuren visar en princip som tillämpas). Den praktiskt användbara lastfördelningen kan hänföras till tre faktorer

- Lastens utbredning (däckens anliggningsyta mot farbanan)
- Den lastfördelning som erhålls via beläggningen (asfalt, skyddsbetong m.m.)
- Den fördelning som erhålls i konstruktionen. Denna är först och främst hänförlig till faktorer som har att göra med skillnaden i verkningsätt mellan tunna och tjocka plattor.
- Metoder för fördelning av laster från punktlaster behandlas i amerikanska normer, se ovan, i *Eurocode, Bakht Jaeger, Cusens Pama, Pucher, Hambly* m.fl.

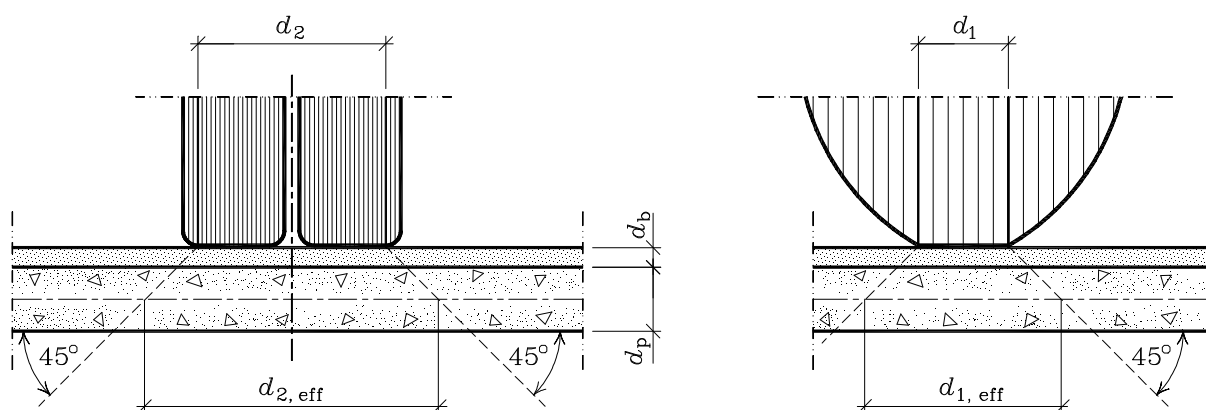


Fig. 5.1 Exempel på princip för bedömning av den lastfördelning man kan tillgodogöra sig vid momentberäkning på grund av hjullaster på plattor.

5.3 Lastfördelning för plattor

När väl lastspridningen från enskilt hjul bestämts måste bestämmas hur lasterna, som vanligen belastar en platta, sprids ut till bärande balkar eller motsv, se **Fig. 5.2**. Detta fenomen behandlas i klassiska verk som t.ex. *Pucher*, återfinns i äldre svenska bestämmelser, se *Petersson Sundquist (1995b)* samt beskrivs i t.ex. amerikanska normer *AASTHO (1992)*. I moderna verk såsom *Bakht Jaeger (1985)* och *Hambly* påvisas noggrannare metoder men dessa är svår-tillämpade.

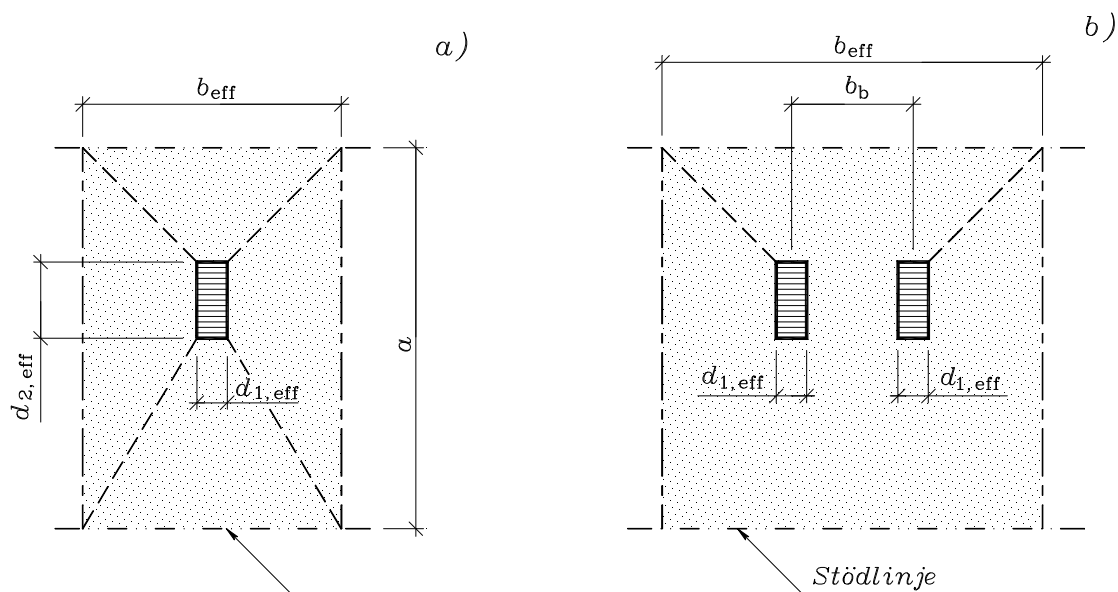


Fig. 5.2 Vid beräkning av stöd- och fältmoment från en punktlast mellan två ränder kan en viss del av plattans bredd (b_{eff}) approximativt medräknas enligt figuren (äldre svenska bestämmelser).

För lastspridningen i brokonsoler, se **Fig. 4.3**, tillämpas av praxis en förenklad metod beskriven i t.ex. *Petersson Sundquist (1995b)*. Metoden är behäftad med ganska stora fel som visas i *Bakht Jaeger (1985)*. Lämpliga förenklade metoder bör utarbetas.

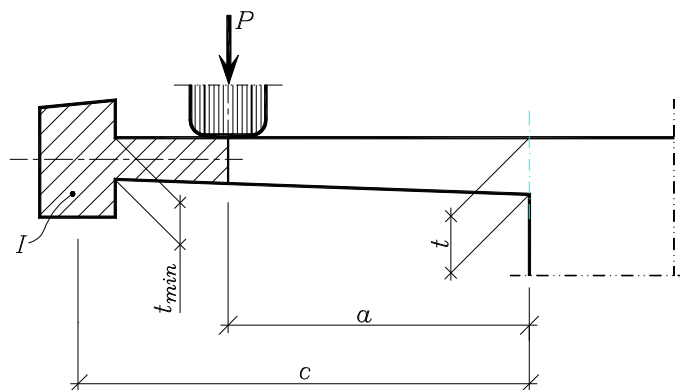


Fig. 5.3 Moment och tvärkraftens spridning i brokonsoler är viktig för dimensionering och kontroll av armering och erf. betongtjocklek.

Lastfördelningen i plattor, se **Fig. 5.4**, behandlas i amerikanska normer *AASHTO (1992)*, kanadensiska standarder *CSA* m.fl., men finns ofta diskuterad i handböcker *Cusens Pama, Hambly* m.fl. P.g.a. tidigare svensk praxis där man ofta studerat 3 m breda körfält utan att fundera över lastspridningen saknas modern praxis. Med de nya laststandarderna, särskild de enligt Eurocode 1, finns behov av analys och utbildning av standard. Såsom visas i *Petersson Sundquist (1995b)* kan såväl resultat på 'säkra' eller 'osäkra' sidan erhållas med tidigare tillämpad praxis.

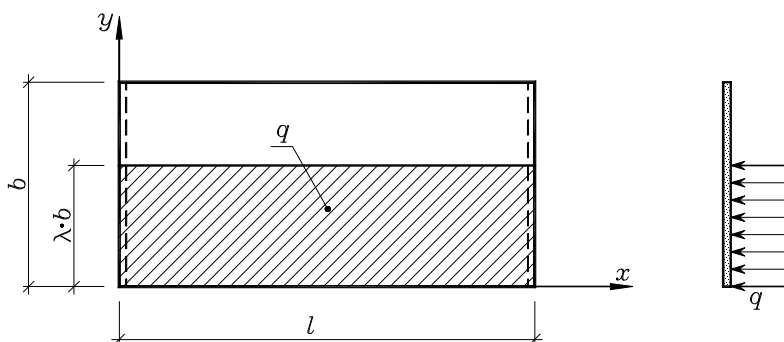


Fig. 5.4 Inverkan av fördelad last på en del av en brobaneplatta, d.v.s. spridningen i sidled på plattbroar eller på plattor mellan balkar kan beroende på utformning, måttförhållanden m.m. i många fall användas för att vid kontrollberäkningar 'klassa upp' befintliga konstruktioner.

5.4 Lastfördelning mellan balkar

Lastfördelningen mellan balkar, d.v.s. bestämning av den s.k. 'filfaktor', se **Fig. 4.5**, är ett klassiskt brokonstruktionsproblem. Vanligtvis tillämpas i Sverige enligt praxis förenklade förfaranden, se *Petersson Sundquist (1997)* där vridstyvheter och andra fenomen försummas. Detta kan vara såväl på 'säkra' som 'osäkra sidan', se *Petersson Sundquist (1995)*. I flera utländska standarder redovisas liknade kraftigt förenklade metoder för denna typ av analys som den praxis vi använder i Sverige.

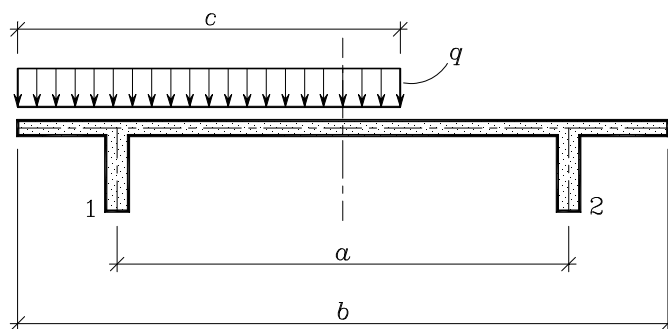


Fig. 5.5 Filfaktorn anger hur stor del av halva totallasten $qc/2$ som belastar respektive balk.

I handböcker t.ex. *Cusens Pama*, finns redovisat teoretiskt mer riktiga metoder, men många av dessa kan vara svåra att tillämpa i praktiskt konstruktionsarbete.

För system med många balkar, se **Fig. 5.6**, blir förhållandena än mer komplicerade. Amerikanska standarder *AASHTO (1992)*, *AASHTO(1994a)*, visar på förenklade metoder som emellertid kan ifrågasättas om dessa tillämpas på fall med många belastade körfält med stor skillnad i intensitet mellan fälten såsom i *Eurocode*.

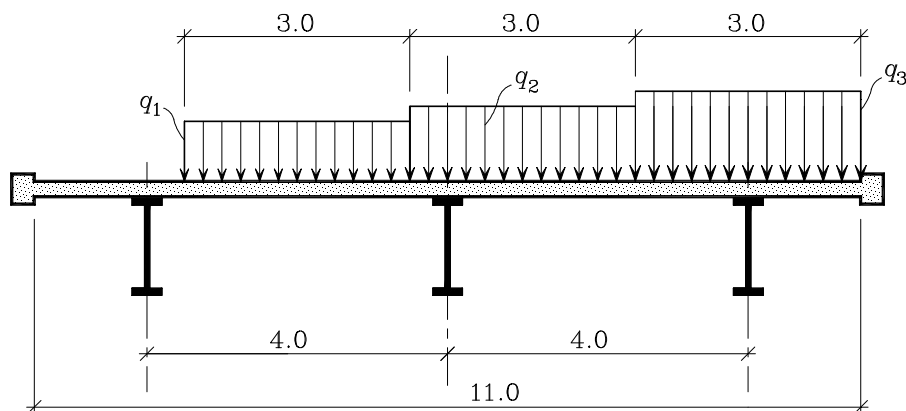


Fig. 5.6 Exempel på ett lastfördelningsproblem för bro med 3 huvudbalkar och samverkande betongplatta.

Lastfördelning och -spridning i lådbalkbroar är ett fenomen som behandlats av många författare. För enklare system kan enkla metoder *Petersson Sundquist (1997)*, *Menn*, *Schleich*, *Scheef* m.fl. tillämpas. För sneda, kontinuerliga eller krökta broar blir förhållandena mer komplicerade och FEM-metoder eller liknande måste tillämpas. Här uppstår dock problemet att bestämma styvheter, främst vridstyvheter, som är extremt svåra att fastställa.

För bestämning av lastinverkan för ovanstående fall erfordras även kunskap om fordonens läge i sidled. Vanligen förutsätter man vid dimensionering att lasterna placeras, i för varje konstruktionselement ogynnsammaste, läge. Detta kan vid kombination av flera laster leda till onödig överdimensionering, särskilt om lasterna inkluderar dynamiska förstoringfaktorer. Det är naturligtvis inte bara statistiskt mycket osannolikt utan även fysikaliskt omöjligt att många fordon i intilliggande fält med hög fart kör intill t.ex. den ena sidan av en bro. Denna fråga finns ej mycket diskuterad i bro litteraturen men för bedömning av slitage av vägar har frågan tagits upp, *Lundquist*.

5.5 Kombination av trafiklaster med övriga laster

I det praktiska konstruktionsarbetet ska laster av trafik kombineras med andra laster, såsom egentygnd, tvångskrafter och liknande. Hur denna kombinerings ska gå till redovisas i alla normverk se t.ex. *BRO 94*, *Taly*, och *Eurocode*. Tillämpade principer med addition av effekter med hjälp av partialkoefficienter och tidsreduktionskoefficienter bygger på principer i *ISO*, *Statens Planverk*. Mer utvecklat diskuteras dessa frågor i *Thoft-Christiansen Baker*, m.fl. Principerna kan emellertid ifrågasättas av flera skäl. Ett skäl är av statistisk art *Ghosn Moses*, *Enevoldsen Arnbjerg-Nielsen*, *Faber Arnbjerg-Nielsen von Scholten*, m.fl. Ett annat skäl kan

vara att klassiskt tillämpade principer för addering av strukturpåverkan i konstruktioner t.ex. samtidig inverkan av yttre laster och tvångsinverkan ej är riktig. Denna senare fråga diskuteras i *Silfwerbrand*.

5.6 Strukturmodellering

I avsnitt ovan har vi kort diskuterat strukturmodellering för spridning av laster från trafiken i enkla strukturer. Det finns många andra problem där olika modeller för analys av broar kan användas för analys av broar. Detta är ett mycket stor och viktigt område och listan av litteraturreferenser skulle kunna göras mycket lång. Vi anser att denna typ av problem ligger utanför ramen för denna rapport och hänvisar till fortsatt arbete.

6 Dimensionerande påverkning

6.1 Allmänt

Det är inte med nu tillgänglig kunskap möjligt att vid praktiskt konstruktionsarbete beakta alla de faktorer som diskuterats i kapitel 2 – 4. Olika förenklingar och bedömningar måste komplettera teorierna. I normer och standarder återfinns regler för de dimensionerande laster och lasteffekter som en konstruktör ska beakta vid dimensionering. Dessa regler sammanfattar normskrivarens syn på de tekniska och säkerhetsmässiga värderingar som denne anser bör göras. Normalt sätt bygger systemen på en helhetssyn där inte bara teorier utan även erfarenhet och praktiskt ingenjörstänkande påverkat reglerna.

6.2 Regler vid nybyggnad

Vi har redan berört normer och standarder vid nybyggnad t.ex. *Eurocode*, *AK 94*, *BRO 94*, *BBK 94*, *BSK 94*, *AASHTO (1992)*. I de flesta fall tillämpas dessa regler strikt och ganska sällan ges konstruktören möjlighet att göra egna värderingar av säkerhetsprinciperna för något broprojekt. Undantag finns för större projekt t.ex. Öresundsbron *Karlsson Arnbjerg-Nielsen Ennemark*.

Sett utifrån resultatet av tillämpade principer, och där brohaverier är extremt sällsynta jämfört med risker som antagits ligga till grund för beräkningarna, kan man konstatera att standarderna nog har en del inbyggda säkerheter utöver de som framgår av valda teoretiska säkerhetsmodeller. Dessa inbyggda säkerheter kan användas vid kontroll av hållfasthet hos redan byggda projekt.

6.3 Regler vid kontroll av befintliga broar

För befintliga konstruktioner inträder andra principer för säkerhetsvärdering än för konstruktioner under projektering. Strukturen finns ju redan på plats och dess egenskaper är ej längre utsatta för antagna statistiska variationer. Detta plus att konstruktionerna ju ofta redan provats under någon tidsperiod medför att man ansett att andra säkerhetsvärdering kan göras för vilket särskilda standarder utarbetats *Vägverket (1991)*, *AASHTO (1989)*, *AASHTO (1994a)*, *Highways Agency*, *ISO/TC98/SC2/WG6*, m.fl. Området har också diskuterats av många forskare t.ex. *Czepiel*, *Ranganatan*, *Enevoldsen Arnbjerg-Nielsen*, *Faber Arnbjerg-Nielsen von Scholten* m.fl.

Inom detta område finns mycket ny forskning och utveckling att göra. Vi önskar särskilt trycka på möjligheterna att studera verkligheten dels genom uppföljningar av egenskaper hos det befintliga brobeståndet, *Racutanu*, och genom mätningar av svängningar, deformationer och responser hos broar under verkliga förhållanden. Genom utveckling av ny modern billig och enkel mätutrustning kalibrerad med strukturmodeller finns troligen stora möjligheter att acceptera större laster och eller ökad livslängd hos befintliga konstruktioner.

7 Behov av forskning och utveckling

7.1 Iakttagelser

Studerar man den tekniska litteraturen inom området projektering och konstruktion av broar finner man att man i stor utsträckning koncentrerat mödan på hållfasthetssidan. Laster och lasteffekter har ofta ansetts givna i standarder och normer och ej alls studerats lika mycket.

En orsak till detta torde också vara svårigheterna att mäta vad som sker ute i verkligheten. Det är lättare att ta in delar av broar och göra modeller av dessa och prova i laboratorier än att ute i verkligheten mäta lasteffekter från trafiken.

Med tillgång på ökad kunskap, elektroniska mätmetoder och datoriserade simuleringsmodeller kan och bör dock en tyngdpunktsförskjutning ske mot studium av laster och lasteffekter.

Lastfördelning har i Sverige ej ägnats stort intresse, troligen beroende av tidigare regler i normer. Med successiv utveckling mot nya regler måste dock detta område studeras och praxis utarbetas. Forskning inklusive mätningar och simulering bör komma till stånd. Kunskap om tunga fordons förekomst och rörelser på broar är av stor betydelse om man önskar dimensionera broar med statistiska betraktelsesätt.

7.2 Förslag till program

Vi föreslår följande program för fortsatt arbete inom området laster och lasteffekter på broar och (vägar):

- Ett nätverk skapas med experter inom de tre områdena fordonstillverkare, broexperter och vägkonstruktörer. I nätverket bör ingå statistisk expertis. I nätverket studeras till att börja med vilka synergieffekter som kan finnas genom samarbete.
- Mätningar av trafiklaster på de svenska vägarna bör utföras och utvärderas. Ett sådant program har redan igångsatts vid inst för byggkonstruktion i samarbete med Vägverket och förutsätts fullföljas och kompletteras med fortsatta mätningar på flera platser i Sverige. Särskilt bör mätningarnas noggrannhet och signifikans studeras.
- Inom mätprogrammet bör inte bara de vertikala lasterna utan även fordonens fart, inbördes avstånd och läge i sidled mätas. Detta behöver inte utföras med lika stor frekvens som mätningarna av de vertikala lasternas, utan här torde mycket kunna baseras på simuleringar.
- Lastfördelning kan i huvudsak endast studeras teoretiskt. Eftersom de modernare normerna t.ex. *Eurocodes* och *OHBDC* fäster större vikt vid lastfördelning i sidled än de äldre svenska normerna *Bro 88*, *BRO 94*, bör teoretiska modeller och praxis utarbetas.
- Området dynamisk interaktion mellan fordon och underliggande system t.ex. bro eller väg kan tack vare avancerade mätmetoder och datoriserade utvärderingsmetoder skapa ny kunskap t.ex för kontroll av befintliga broars status och mätning av lasteffekter från trafik.

- Sambandet mellan laster, lasteffekt och underhåll bör utredas. Laster och lasteffekter bör kanske byggas in i framtida managementsystem på samma sätt som t.ex. ÅDT används som en parameter för styrning av broarnas drift och underhåll.

Som ett första led i ovanstående utveckling föreslås att föreliggande rapport samt de litteratur-sammanställningar som utvecklas i Luleå byggs ut till state-of-the-art-rapporter inom området ”administrativ uppklassning” av brokonstruktioner. På basis av dessa rapporter igångsätts ett FoU-program. Vi föreslår vidare att en arbetsgrupp prövar möjligheten att bilda ett nätverk eller kompetenscentrum med representater för bro- och fordonsforskare och med industri-representanter. Härvid kan arbetet inom Järnvägsgruppen vid KTH tjäna som förelägg. Avsikten med nätverket eller centrat vore att utreda frågor som har att göra med interaktionen mellan fordon och infrastrukturen och med mål att genom samarbete skapa möjligheter till effektivare och mer miljöanpassade landsvägstransporter.

8 Litteratur

8.1 Allmänt

- AASHTO* (1989) Guide specifications for strength evaluation of existing steel and concrete bridges, 1989.
- AASHTO* (1992) Standard Specifications for Highway Bridges, 1992.
- AASHTO* (1993) Guidelines for Bridge Management Systems, 1993.
- AASHTO* (1994a) Manual for Condition Evaluation of Bridges, 1994.
- AASHTO* (1994b) AASHTO - LRFD Bridge Design Recommendations – Customary U S Units, 1994.
- AASHTO* (1994c) Guide specifications for Distribution of Loads for Highway Bridges, 1994.
- BBK 94* Boverkets handbok om betongkonstruktioner, Statens Planverk och AB Svensk Byggtjänst, utgåva 2, band 1, 1994.
- Betonghandbok, Konstruktion*, Svensk Byggtjänst 1990.
- BKR 94* Boverkets konstruktionsregler 94, (BFS 1993:58), Boverket 1994.
- Bro 88* Vägverket, Centralförrådet, Knivsta, 1988.
- BRO 94* BRO 94, Supplement nr 3 1998, Vägverket, Centralförrådet, Knivsta.
- BSK 94* Boverkets handbok om stålkonstruktioner, Statens Planverk och AB Svensk Byggtjänst, 1994.
- BV BRO 94* Banverkets ändringar och tillägg till Vägverkets BRO 94, Utgåva 4, 1997.
- CSA* Code for Design of Highway Bridges, Canadian Standards Association, Ontario 1988.
- Czepiel E.*, Bridge Management Systems, Literature Review and Search, Northwestern University, BIRL Industrial Research Laboratory, .
- Eurocode* Under detta samlingsbegrepp redovisar vi den långa rad av gemensamma europeiska standarder som har utarbetats och som håller på att utarbetas och som berör området behandlat i denna rapport.
- ISO/TC98/SC2/WG6*, Assessment of existing structures, Eighth Draft, 1998.
- Kawatani M., Kudo H., Imaeda T.*, Limit State Probabilities of Highway Bridges Including Deflection Limit, IABSE Symposium 1996.
- Menn C.*, Prestressed Concrete Bridges, Birkhäuser Verlag, Basel 1990.
- OHBD* Ontario Highway Bridge Design Code, 2nd ed., Ontario Ministry of Transportation and Communications, Toronto 1993.

- Petersson T., Sundquist H., (1995a)* Influenslinjer, Kompendium i Brobyggnad vid KTH, TRITA-BKN. rapport 14, Stockholm 1995.
- Petersson T., Sundquist H., (1995b)* Vridning och Lastfördelning, Kompendium i Brobyggnad vid KTH, TRITA-BKN. rapport 15, Stockholm 1995.
- Ranganathan R.,* Evaluation of Bridges through Structural Reliability - Case Study.
- Silfwerbrand J.,* Combined loadings on concrete structures, Structural Loadings in the 21st Century, Proceedings from the Sven Sahlin Workshop, TRITA-BKN. Bulletin 19, 1996
- Taly N.,* Design of Modern Highway Bridges, McGraw-Hill, 1998.
- Vägverket* (1991) Bärighetsklassning av broar, Publ 1991:210, Borlänge 1991.

8.2 Laster

- Bez R., Hirt M.,* Probability based load models of highway traffic for ULS and SLS analyses, "Bridge Evaluation, repair and rehabilitation", ISBN 0-7923-0999-5, 1990, sid 323-337.
- Cebon D.,* Design of Multiple-Sensor Weigh-in-Motion Systems, Journal Automobile Engineering, 1997.
- Crespo-Minguillón C., Casas J., R.,* A comprehensive traffic load model for bridge safety checking, Structural safety Vol. 19, No. 4, Elsevier
- Christiansson P.,* Spectra of Loads and Loadeffects for Bridges. Applications to Prefabricated Bridge Slabs with Estimation of Dynamic Effects, Report 46, Lund 1973.
- Christiansson P.,* Probabilistic Models for Calculation of load Spectra and Loadeffect Spectra for Highway Bridges, Report 71, Lund 1976.
- Ditlevsen O.,* Traffic-Loads on Large Bridges Modeled as White-Noise Fields, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 120, No. 4, April, 1994.
- Ditlevsen O., Madsen H. O.,* Stochastic Vehicle-Queue-Load Model for Large Bridges. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 120, No. 9, Sept., 1994.
- Ditlevsen O.,* Distribution of Extreme Truck Weights. Structural Safety, 5, 1988.
- Dept of Transportation,* The Road Vehicle UK (Construction and Use), Regulations 1986.
- Flint and Neill Partnership,* Interim Design Standard: Long span bridge loading, Transport Road and Research Laboratory Report, 1986.
- Ghosn M., Moses F.,* Bridge Load Models and truck Weight Regulations "Bridge Evaluation, repair and rehabilitation" sid 277-291, 1990.
- Glover M., H., Newton W., H.,* Evaluation of a multile-sensor weigh-in-motion system, TRRL Research Report 307, Crowthorne, GB, 1991.

- Handegard M.*, Jämförelse mellan olika tillåtna laster inom Europa, Personlig kommunikation, 1998.
- Hassan M., Burdet O., Favre R.*, Interpretation of 200 Load Tests of Swiss Bridges, IABSE Colloquium, Copenhagen 1993, Vol 67, Zürich 1993.
- Highways Agency*, (1995) Design Manual for Roads and Bridges, Volume 3, section 4, part 14, 1995.
- Highways Agency*, (1997a) Design Manual for Roads and Bridges, Volume 3, section 4, part 3, 1997.
- Highways Agency*, (1997b) Design Manual for Roads and Bridges, Volume 3, section 4, part 4, 1997.
- HMSO* The Road Vehicle (Construction and Use), amendmen (No 2), Regulation 1994, Schedule 11.
- Jacob B.*, Definition of load Spectra, IABSE Colloquium, Copenhagen 1993, Vol 67, Zürich 1993.
- Karlsson M., Arnbjerg-Nielsen T., Ennemark F.*, Reliability Based Determination of Design Traffic Loads on the Öresund Bridge, .
- König G., Seifert P.*, Fatigue Loading and design for road bridges "Bridge Evaluation, repair and rehabilitation" sid 261-275, 1990.
- Ricketts N., J., Page J.*, Traffic data for highway bridge loading transport, Research Laboratory Report 251, 1997.
- Sokolík A.*, Experimental Investigation of Traffic Load on Highway Bridges, IABSE Colloquium, Copenhagen 1993, Vol 67, Zürich 1993.
- Trautner J., Frangopol D.*, Finite Element modeling and bridge reliability evaluation, "Bridge Evaluation, repair and rehabilitation", sid 307-321, 1990.
- Vägverket* (1996) Sammanställning över nationella regler om fordons mått och vikt i de flesta av Europas länder, personlig kommunikation.
- Vägverket* (1993) Lasta Lagligt. Vikt- och dimensionsbestämmelser för tunga fordon Broschyr 1993.
- Vägverket* (1991) Axel- och Fordonsvikter för Lastbilar 1989, Publ 1991:48, 1991
- Waubke H., Baumgärtner W.*, "Traffic Load Estimation by Long-Term Strain Measurements", IABSE Colloquium, Copenhagen 1993, Vol 67, Zürich 1993.
- Östlund L.*, (1993) Load combination in codes, Journal of Structural Safety, vol 13 1993.
- Östlund L.*, (1995a) Trafiklaster på vägbroar vid stora belastade längder, Vägverket Publ 1995:21.

Östlund L., (1995b) Vägverkets trafiklastmätningar på E6 vid Torp, Opubliserat manuskript, Lund 1995.

8.3 Säkerhetsvärdering

Ghosn M., Moses F., Reliability Calibration of Bridge Design Code, J. of Structural Engineering Vol. 112, No 4, April, 1986.

Enevoldsen I., Arnbjerg-Nielsen T., Reliability Evaluation of Bridges to Reduce Strengthening and Repair Costs.

Faber M., H., Arnbjerg-Nielsen T., Von Scholten C., A Guideline for Reliability Based Reassessment of Existing Bridges.

Höglund T., Petersson T., Sundquist H., Stomprojektering, Kompendium vid inst. för Byggnadskonstruktion, KTH, TRITA-BKN. Rapport 38, 1996.

ISO General principles on reliability for structures, International Standard 2394, 1986.

Racutanu G., Broars reella livslängd

Statens Planverk, AK79/81 allmänna regler för bärande konstruktioner, Principer, rekommendationer och kommentarer samt exempel på tillämpning, Liber Förlag 1982.

Thoft-Christiansen P., Baker M., J., Structural Reliability Theory and its Applications, Springer Verlag, 1982.

8.4 Lastfördelning

Aswad A., Chen Y., Impact of LRFD Specification on Load Distribution of Prestressed Concrete Bridges, PCI Journal sept/Oct 1994.

Bakht B., Jaeger L., G., Bridge Analysis Simplified, Mc Graw-Hill Book Company, New York 1985.

Bakht B., Jaeger L., G., Analytical and Observed Responses of Steel Girder Bridges, IABSE Colloquium, Copenhagen 1993, Vol 67, Zürich 1993.

Cusens A., R., Pama R.P., Bridge deck analysis, John Wiley & Sons, Bristol 1975.

Fanti G., Gamerini G., Mancini G., Non linear interaction of longitudinal and transverse load effects in concrete box girder bridges. "Bridge Evaluation, repair and rehabilitation", sid 349-363, 1990.

Hambly E., C., Bridge Deck Behaviour, 2nd ed., E& FN Spon, London 1991.

Hetenyi M., Beams on Elastic Foundation, The University of Michigan Press 1964.

- Konishi I., Kameda H.*, Safety Assessment of Urban Expressway Bridges based on Probabilistic Modeling of Multiple Load Environments, Structural Safety Vol. 7, 1990.
- Lundquist S-O., m.fl.* Effekter av heldragen kantlinje på tre vägar, VTI-aktuellt nr 2, 1992.
- Petersson T., Sundquist H.*, (1997) Spännbetong, Kompendium vid inst. byggkonstruktion KTH, TRITA-BKN.Rapport 46, Stockholm 1997.
- Pucher A.*, Einflussfelder elastischer Platten, Springer Verlag, Wien 1951.
- Sattler K.*, Betrachtungen zum Berechnungsverfahren von Guyon-Massonnet für frei-aufliegene trägerroste und Erweiterung dieses Verfahrens auf beliebige Systeme, Der Bauingenieur, Berlin 1955.
- Sundquist H.*, (1972) Verkningsätt för plattor med avlänga ursparingar, Inst. för Byggnadsstatik, KTH, Stockholm 1972.
- Schlaich J., Scheef H.*, Concrete Box-Girder Bridges, IABSE Structural Engineering Documents 1e, Zürich 1982.

8.5 Dynamiska lastfaktorer

- Cebon D., Newland D., E.*, The artificial generation of road surface topography by the inverse FFT method, Proc. 8th IAVSD Symposium on the dynamics of vehicles on roads and on railway tracks, Cambridge 1983.
- Clough R., W.*, "Dynamics of Structures", McGraw Hill, Int. ed. 1975.
- Eymard R., Guerrier F., Jacob B.*, Dynamic Behaviour of Bridge under Full Traffic, "Bridge Evaluation, repair and rehabilitation", sid 293-306, 1990.
- Frýba L.*, "Dynamics of Railway Bridges", Thomas Telford, London, 1996.
- Frýba L.*, "Vibration of Solids and Structures under Moving Loads", Noordhoff International Publishing, Groningen 1972.
- Green M., F., Cebon D.*, (1994) Dynamic response of highway bridges to heavy vehicle loads: Theory and experimental validation. Journal of Sound and Vibration Vol 170, No. 1, Feb 1994, pp 51-78.
- Green M., F., Cebon D.*, (1996) Dynamic interaction between heavy vehicles and highway bridges. Computers and Structures, 1996.
- Green M., F., Cebon D., Cole D., J.*, Effects of heavy vehicle suspension design on dynamic response of bridges. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol 121, No. 2, pp 272-282, Feb 1995.
- Karoumi R.*, Dynamic Response of Cable-Stayed Bridges Subjected to Moving Vehicles, TRITA-BKN. Bulletin 22, Byggkonstruktion KTH, 1996.

Newland D., E., General theory of vehicle response to random road roughness, Random Vibration – Status and Recent Developments, edited by Elishakoff and Lyon, Elsevier, 1986.

Petersson T., Sundquist H., Svängningar, utmattning och vågutbredning för infrastrukturkonstruktioner, Kompendium i Brobyggnad vid KTH, TRITA-BKN. rapport 20, Stockholm 1995.

Timoshenko S., P., Young D. H., Weaver W., Vibration problems in Engineering, 5th Ed. New York 1990.

9 Appendix A, dynamisk interaktion mellan fordon och bro

I särskilt häfte.

10 Appendix B, lastfördelning

I särskilt häfte.