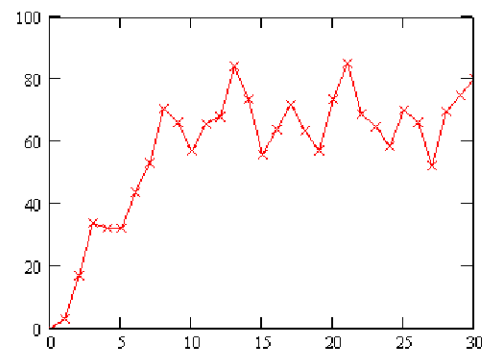
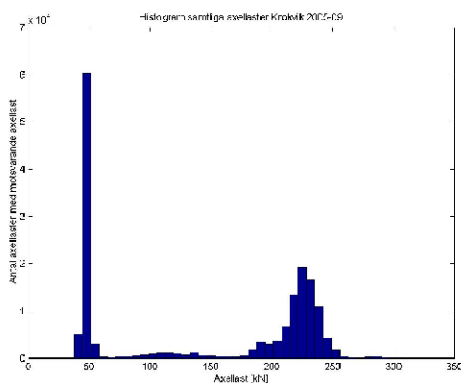




Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg och vattenbyggnad

Institutionen för bygg-och miljöteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
Stål- och träbyggnad
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2005
Examensarbete 2005:109

Examensarbete 2005:109

Beräkningsmetoder för analys av
resterande utmattningstidslängd hos
befintliga järnvägsbroar av stål

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg och vattenbyggnad

JONAS GABRIELSSON & MARTIN LINDSTRÖM

Institutionen för bygg- och miljöteknik
konstruktionsteknik
Stål- och träbyggnad
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2005

Beräkningsmetoder för analys av resterande utmattningstidslängd hos befintliga järnvägsbroar av stål

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg och vattenbyggnad

JONAS GABRIELSSON & MARTIN LINDSTRÖM

© JONAS GABRIELSSON & MARTIN LINDSTRÖM, 2005

Examensarbete 2005:109

Institutionen för Bygg- och miljöteknik

Avdelningen för konstruktionsteknik

Stål- och träbyggnad

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Framsida:

Elevationsritning på bron över Södra Rautasjokk, histogram över samtliga axellaster uppmätta i krokvik under september 2005 samt spänningsvariation i kontinuitetsplåt över stöd

Reproservice / Institutionen för Bygg- och miljöteknik
Göteborg, Sverige 2005

Evaluation methods of remaining fatigue life of existing steel railway bridges

Master's Thesis in Structural Engineering

JONAS GABRIELSSON & MARTIN LINDSTRÖM

Department of Civil and Environmental Engineering

Division of Structural Engineering

Steel and Timber Structures

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

Today there are many railway bridges made of steel that have been operated for a long time. A traditional fatigue analysis of such bridges in many cases show that the fatigue life is already consumed, despite the fact that the bridge still is in use and shows no signs of fatigue damage.

The purpose of this Master's Thesis was to examine how a traditional fatigue analysis using Palmgren-Miner's rule can be improved and which alternative methods can be employed to perform such an analysis. The alternative methods that have been studied are the safety index method and prescription of inspection intervals using fracture mechanics. When using the Safety Index Method a safety index β is calculated as a measure of the failure probability affecting the fatigue life. The method takes the mean value, standard deviation and correlation of the variables into consideration.

To be able to compare the different methods, a reference bridge has been analyzed. Close to this bridge, the Swedish railway authority Banverket has a measuring station that registers mean and peak value of the axle loads. Furthermore the bridge has been used before as a reference bridge for ultimate limit state calculations using the safety index method. This made the bridge a natural choice for further investigations.

Traditional fatigue analyses have been done for three chosen details. The most critical detail of these three was the edge of the cover plate on a secondary beam, which showed a degree of utilization of 2.4. This value indicates that the fatigue life of the bridge was consumed already in 1977. The same critical detail was analyzed with the safety index method and the analysis resulted in a prolonged calculated fatigue life, to 2009. A fracture mechanics analysis of the same detail showed that with an inspection interval of approximately 1.75 years, the bridge can be kept in service with a sufficiently low probability of failure.

Key words: Fatigue, Palmgren-Miner rule, probabilistic assessment, FORM, fracture mechanics, inspection intervals,

Beräkningsmetoder för analys av resterande utmattningslivslängd hos befintliga järnvägsbroar av stål

Examensarbete inom konstruktion och mekanik
JONAS GABRIELSSON & MARTIN LINDSTRÖM
Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
Stål- och träbyggnad
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

I dagsläget finns det många järnvägsbroar gjorda av stål som har varit trafikerade en längre tid. Vid en traditionell utmattningsanalys av en sådan bro beräknas utmattningslivslängden i många fall vara uttömd, trots att broarna trafikeras utan att uppvisa några tecken på utmattningsskador.

Syftet med examensarbetet var att undersöka hur en traditionell delskadeberäkning kan förbättras samt vilka alternativa analysmetoder som kan tillämpas. De alternativa metoder som har studerats är säkerhetsindexmetoden och föreskrivning av inspektionsintervall med hjälp av brottmekanik. Vid användning av säkerhetsindexmetoden beräknas säkerhetsindex β som är ett mått på sannolikheten för brott. Metoden tar hänsyn till de ingående variabelernas spridning, medelvärde och dess korrelation.

För att jämföra de olika beräkningsmetoderna har en referensbro, bro över Södra Rautasjokk, analyserats. I närheten av denna bro har Banverket mätstationer som registrerar medel- samt maxvärde av tågtrafikens axellaster, dessutom har bron tidigare använts som referensbro för brottgränsberäkning med hjälp av säkerhetsindexmetoden. Detta gjorde bron till ett naturligt val för vidare analyser.

Traditionell utmattningsanalys har utförts på tre utvalda detaljer. Den mest kritiska detaljen av dessa tre, var kanten av långbalkens kontinuitetsplåt som hade en utnyttjandegrad på 2.4, vilket motsvarar att den beräknade utmattningslivslängden var uttömd redan 1977. Den kritiska detaljen analyserades med hjälp av säkerhetsindexmetoden och resulterade i att den beräknade utmattningslivslängden för detaljen kunde förlängas till 2009. En brottmekanisk analys av samma detalj visade att bron kan fortsätta trafikeras med tillräckligt låg sannolikhet för brott om ett inspektionsintervall på ca 1.75 år tillämpas.

Nyckelord: Utmattning, delskademethoden, typiserat spänningskollektiv, probabilistisk beräkning, säkerhetsindexmetoden, FORM, brottmekanik, inspektionsintervall

Innehållsförteckning

ABSTRACT	I
SAMMANFATTNING	II
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	III
FÖRORD	V
BETECKNINGAR	VI
1 INTRODUCTION	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Metodik	1
2 TRADITIONELL UTMATTNINGSANALYS	2
2.1 Delskademethoden, Palmgren-Miner	2
3 PROBABILISTISKA BERÄKNINGSMETODER	5
3.1 Säkerhetsindexmetoden	6
3.2 Referensobjekt	9
4 BROTTMEKANISKA BERÄKNINGSMETODER	11
4.1 Referensobjekt	13
5 REFERENSBRO, BRO ÖVER SÖDRA RAUTASJOKK	15
5.1 Beskrivning av bron	15
5.2 Traditionell utmattningsanalys	16
5.2.1 Förutsättningar	16
5.2.2 Utförande	17
5.2.3 Resultat	18
5.3 Utmattningsanalys med säkerhetsindexmetoden	19
5.3.1 Förutsättningar	19
5.3.2 Utförande	19
5.3.3 Resultat	24
5.4 Brottmekanisk utmattningsanalys	25
5.4.1 Förutsättningar	25
5.4.2 Utförande	25
5.4.3 Resultat	27
6 DISKUSSION	29
7 SLUTSATSER	34

BILAGA A	Moment & Spänningsberäkning
BILAGA B	Delskadeberäkning
BILAGA C	Utdrag ur mätdata från Krokvik, 2005-09-01 till 2005-09-30
BILAGA D	MATLAB kod, analys av mätdata
BILAGA E	MATLAB plottar med resultat från analys av mätdata
BILAGA F	MATLAB kod, inputfil till FERUM för beräkning av säkerhetsindex
BILAGA G	Resultat från FERUM
BILAGA H	MATLAB kod, Brottmekanisk analys

Förord

I den här studien har resterande utmattningstid beräknats för Banverkets järnvägsbro över Södra Rautasjokk, med olika beräkningsmetoder. Vid beräkningarna har antagits att bron togs i bruk 1952. Vidare har antagits att karakteristisk axellast från och med år 2000 är 300 kN. Vid beräkning med säkerhetsindexmetoden har resultat från mätdata då karakteristisk axellast antagits till 300 kN skalats ned för den period då karakteristisk axellast enligt normen var 250 kN. Arbetet kan ses som ett pilotprojekt och är utfört på institutionen för Bygg- och miljöteknik, Avdelningen för konstruktionsteknik, Stål- och träbyggnad, Chalmers Tekniska Högskola. Studien har utförts i samarbete med Banverket.

Examensarbetet har utförts med Mohammad Al-Emrani som handledare och examinator.Handledning avseende statistik och säkerhetsindexmetoden har getts av Pär Johannesson vid Fraunhofer-Chalmers Centrum för Industrimatematik och Jacques de Maré, professor i matematisk statistik, Chalmers. En referensgrupp bestående av Frank Axhag och Peter Lidemar på Banverket, Thomas Darholm och Magnus Karlsson på FB Engineering, Ib Enevoldsen på Ramböll i Köpenhamn samt Robert Kliger på Chalmers, har hjälpt till att leda arbetet på rätt väg.

Vi tackar alla som varit delaktiga och visat intresse för vårt arbete, ett särskilt tack till Mohammad för stort engagemang och intresse.

Göteborg december 2005

Jonas Gabrielsson & Martin Lindström

Beteckningar

Romanska bokstäver versaler

A	Sprickdetekteringskonstanten
C	Brottmekanisk materialparameter
D	Delskada
$D(\cdot)$	Standardavvikelse
$E(\cdot)$	Medelvärde
$F(\cdot)$	Fördelningsfunktion (icke-normal)
K	Spänningsintensitetsfaktor
K_C	Övre gräns för spänningsintensitetsfaktor
K_{TH}	Tröskelvärde för Paris lag
N	Antal cykler till brott för en konstant spänningsvidd
N_C	Antal cykler motsvarande C-klassning
N_D	Antal cykler vid fatigue limit
N_f	Antal cykler till brott
N_L	Antal cykler vid "cut-off limit"
$N_{p,insp}$	Antal cykler mellan inspektioner
P	Axellast
$P(\cdot)$	Sannolikhet
S	Spänning
$V(\cdot)$	Variationskoefficient

Romanska bokstäver gemener

a	Spricklängd
a_0	Initiell spricklängd
a_c	Kritisk spricklängd
a_{mes}	Mätbar spricklängd
d	Dynamikkoefficient
$f(\cdot)$	Densitet av icke-normal distribution
$g(\cdot)$	Brottgränsfunktion
m	Lutning på S-N- och Paris lagkurva
n	Antal spänningscykler
$p(\cdot)$	Sannolikhet
$p(cd)$	Sannolikhet för sprickdetektering
p_f	Sannolikhet för brott

Grekiska bokstäver versaler

Grekiska bokstäver gemener

β	Säkerhetsindex
β	Geometrisk spänningskoncentrationsfaktor
$\phi(\cdot)$	Standardiserad normaldensitet
κ	Lastkollektivparameter
μ	Väntevärde
σ	Spänning
$\Delta\sigma$	Spänningsvidd
$\Delta\sigma_C$	Spänningsvidd motsvarande C-klass
$\Delta\sigma_D$	Spänningsvidd motsvarande utmattningsgräns
$\Delta\sigma_L$	Spänningsvidd motsvarande "cut-off limit"

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Livslängden för äldre järnvägsbroar gjorda av stål begränsas ofta av dess beräknade utmattningshållfasthet. Beräkningen av utmattning livslängden görs som regel med ”klassisk” delskadeanalys, där lasthistorien för den aktuella bron ofta är känd, dock normalt endast i form av ton-kilometer/kilometer, och med tågmodeller och utmattningsskador specificerade i normen. I många fall ger beräkningarna enligt delskademetoden en delskada större än 1.0, d.v.s. livslängden är uttömd, trots att bron är i bruk och inte visar några tecken på utmattningsskador vid inspektion. Detta sätt att räkna ger en stor säkerhetsmarginal, och kan i vissa fall leda till att broar byts ut onödigt tidigt eller bekostas med onödiga förstärkningsåtgärder.

1.2 Syfte

Examensarbetet syftar i huvudsak till att undersöka följande tre frågeställningar:

1. Hur kan en konventionell delskadeberäkning förbättras, vilka är de viktigaste parametrarna och hur kan de modelleras för att bättre reflektera verkligheten?
2. Vilka alternativa analysmetoder kan tillämpas vid beräkning av resterande utmattning livslängd hos befintliga järnvägsbroar av stål? När kan dessa metoder tillämpas istället för, eller som ett komplement till konventionell delskadeberäkning?
3. Kan broar för vilka beräkningsresultaten påvisar uttömd utmattning livslängd men inspektion ej påvisar utmattningsskador, fortsätta att trafikeras med bibehållen säkerhet genom att föreskriva inspektionsintervall beräknade med hjälp av brottmekanik?

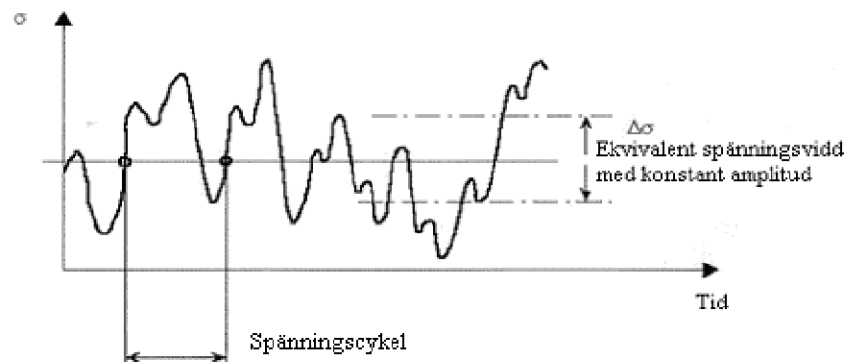
1.3 Metodik

Arbetet i examensarbetet inleddes med litteraturstudier av de olika beräkningsmetoderna. Beräkningsmetoderna tillämpas därefter på en referensbro, bro över Södra Rautasjokk. Bron har tidigare analyserats med säkerhetsindexmetoden med avseende på brottgränstillstånd av Ramböll i Köpenhamn. Data har samlats från Banverkets mätstationer som mäter vertikallaster.

2 Traditionell utmattningsanalys

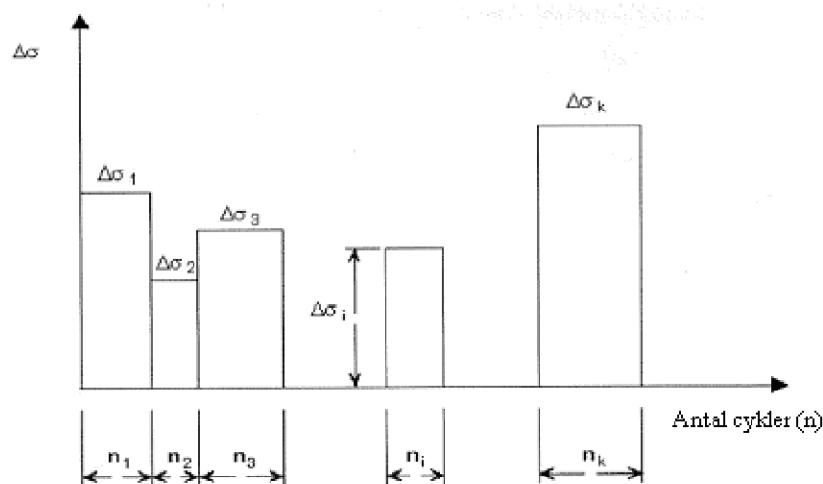
2.1 Delskademethoden, Palmgren-Miner

Varierande last på en konstruktion ger upphov till varierande spänningscykler i en konstruktionsdetalj. Dessa spänningscykler bildar en spänningshistoria som kan utvärderas med hjälp av "Reservoir method" eller "Rainflow method". Dessa två metoder ger bra uppskattningar på spänningsvariationen och antal cykler.



Figur 2.1 Exempel på Spänningshistoria, ESDEP (1994)

Det vanligaste sättet att presentera spänningshistorien på är att samla ihop spänningsvidder med samma amplitud och sätta in resultatet i ett stapeldiagram, se nedan. Varje stapel innehåller antal cykler n_i med tillhörande spänningsvidd $\Delta\sigma_i$.

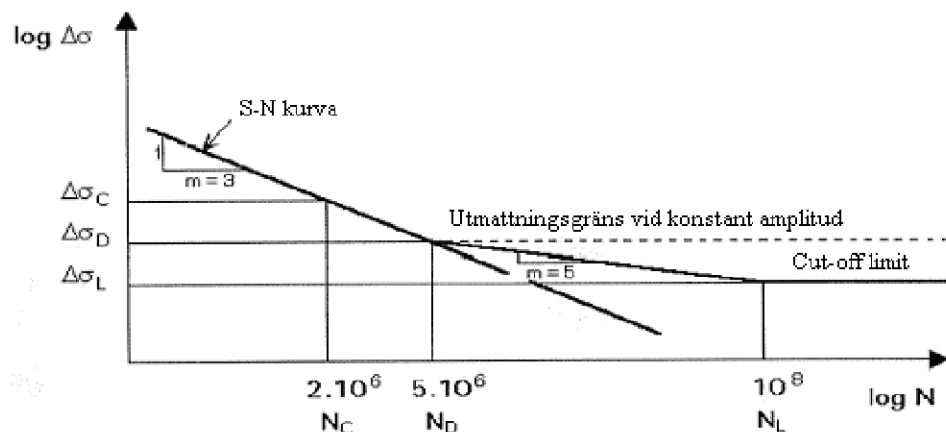


Figur 2.2 Spänningshistogram eller spänningsviddsfördelning, ESDEP (1994)

För att veta hur olika detaljer påverkas av utmattningslast har serier av tester utförts. Klassificering av de olika detaljerna påverkas av olika faktorer så som geometriska

diskontinuiteter och svetsutformning. Resultatet från det intensiva experimentella arbetet har legat till grund för dagens dimensioneringsregler och har resulterat i ett antal spännings–cykelkurvor (S-N) plottade på log-log skala. I t.ex. Eurocode 3 finns dessa kurvor för olika konstruktionsdetaljer, med tillhörande C-klass. C-klasser fås som medelvärde på utmattningshållfastheten vid två miljoner cykler minskat med två standardavvikelser från mätdata.

Alla kurvorna har liknande utseende, först med konstant lutning på $-1/3$ ($m=3$). Slutet på denna lutning är vid 5 miljoner cykler, därefter tar en lutning på $-1/5$ ($m=5$) vid. Dessa lutningar har valts för att passa för så många testresultat som möjligt. Se figuren nedan.



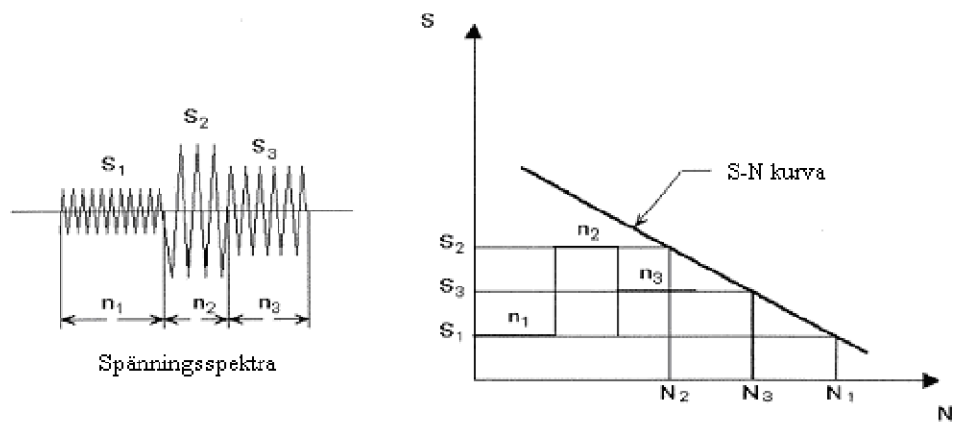
Figur 2.3 Exempel på spännings- cykelkurva (S-N kurva), ESDEP (1994)

När en konstruktionsdetalj är utsatt för cyklisk last kan två fall uppstå.

1. Ingen av spänningsvidderna går upp över utmattningsgränsen. Ingen utmattningsskada antas uppstå, vilket ger att ingen vidare utmattningsanalys behövs.
2. Om minst en spänningsvidd är så stor att den överskrider utmattningsgränsen måste en utmattningsanalys utföras.

Låga spänningsvidder, under "Cut-off limit", är försummade eftersom bidraget till delskadan är mycket litet eller obefintligt.

Utvärdering av återstående livslängd hos konstruktioner som är utsatta för cykliska laster t.ex. broar, oljeplattformar etc rekommenderas av Eurocode 3 och BSK att utföras med hjälp av Palmgren – Miner's delskademetod. Denna metod bygger på antagandet att den totala skadan som en konstruktionsdetalj samlar på sig under dess livslängd fås av linjär summering av delskadorna orsakade av varje spänningsvidd.



Figur 2.4 Schematisk bild över hur addering av delskador utförs, ESDEP (1994)

$$\text{Totala skadan, } D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (2.1)$$

Där n_i är antalet cykler med konstant spänningsvidd och N_i är totala antalet cykler till brott vid konstant spänningsvidd.

Utmattningstidslängden är uttömd om $D \geq 1$.

3 Probabilistiska beräkningsmetoder

Ett alternativ till den klassiska analysen där alla ingående variabler betraktas som fasta värden, exempelvis karakteristiska värden, är probabilistisk analys där hänsyn tas till de ingående variabelernas spridning. Möjligheten finns att med hjälp av informationsinsamling avseende en specifik bro, skapa en "brospecifik dimensioneringskod". Det är naturligt att en generell dimensioneringskod måste täcka ett brett spektrum av laster och konstruktionstyper och därför inte är så optimerad för den aktuella bron som en "brospecifik dimensioneringskod". Med sannolikhetsbaserade beräkningsmetoder ges en möjlighet att optimera utnyttjandegraden med bibehållen kontroll på säkerheten, och det finns ett flertal exempel där detta har tillämpats. Exempelvis har danska vägverket tagit fram ett "guideline document" för sannolikhetsbaserad beräkning av bärförmåga för existerande broar. Dokumentet omfattar dock ej utmattningsgränstillstånd. Den vanligast förekommande probabilistiska beräkningsmetoden är säkerhetsindexmetoden som med framgång har använts för att noggrannare analysera bärförmågan hos befintliga broar och därmed kunnat undvika kostsamma förstärkningsåtgärder och förlänga livslängden på många broar. Ytterligare en möjlighet med metoden är att inkludera resultat från inspektioner och provningar för att uppdatera säkerhetsindex.

Probabilistisk analys kan utföras i olika nivåer enligt nedan, level-1 analys kallas ibland för semi-probabilistisk eller deterministisk, Level-2 analys utvecklas vidare under "säkerhetsindexmetoden".

Level-1 Betraktar ingående variabler som enskilda värden, typiskt karakteristiska värden, 5 percentil eller motsvarande Level-1 används som regel vid dimensionering m.h.a. dimensioneringskoder.

På Level-1 är det ej möjligt att bedöma sannolikheten för brott.

Level-2 Stokastiska variabler representeras av 2 storheter, medelvärde och varians och om nödvändigt kovarians. Level-2 ger en approximation av sannolikheten för "brott".

Level-3 Man antar att information finns för att beskriva hela fördelningen (även svans) för stokastiska variabler. Givet att antagandena är korrekta kan ett precist värde för sannolikheten för "brott" beräknas.

Beroende på hur brottfunktionen ser ut används olika metoder för att räkna ut sannolikheten för brott, FORM (First Order Reliability Method) eller SORM (Second Order Reliability Method). Vanligtvis används FORM vid brottgränsberäkningar och SORM vid bruksgränsberäkningar.

3.1 Säkerhetsindexmetoden

Säkerhetsindexmetoden ger ett mått på säkerheten, β , för en specifik brottmod eller för ett system av olika brottmoder, och det ges därmed möjlighet att jämföra säkerheten i olika lösningar.

För att beskriva vad β är kan vi anta följande

$$R > S \Rightarrow \text{ej brott}$$

$$R \leq S \Rightarrow \text{brott}$$

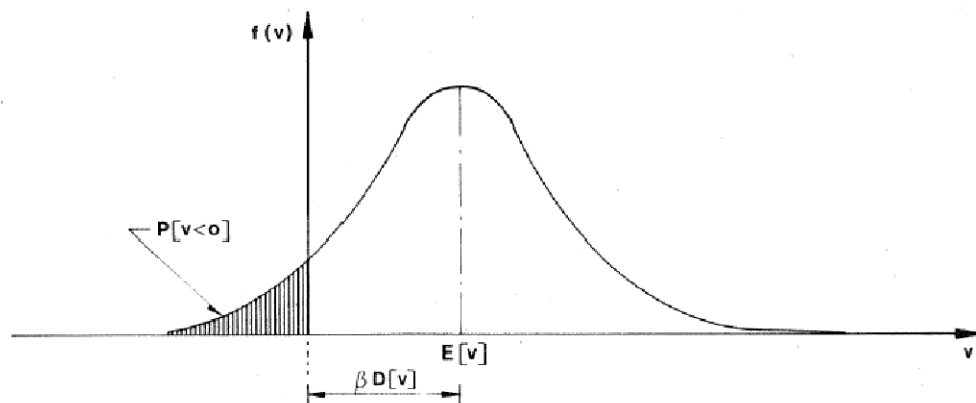
R beskriver bärförmåga och S last.

Vi introducerar en ny variabel $v=R-S$

Om R och S är oberoende variabler så gäller att

$$\text{Medelvärde } E(v) = E(R) - E(S) \quad (3.1)$$

$$\text{Standardavvikelsen } D(v) = \sqrt{D^2(R) + D^2(S)} \quad (3.2)$$



Figur 3.1 Geometrisk tolkning av säkerhetsindex β , NKB-rapport nr 36 (1978)

β anger "avståndet" från förväntat värde till gränsen för brott enligt figur 3.1 ovan. Den årliga sannolikheten för brott är $P(v \leq 0)$, och kan beräknas utifrån β genom

$$P(v \leq 0) = \Phi\left(\frac{0 - E(v)}{D(v)}\right) = \Phi(-\beta) \quad (3.3)$$

där Φ är den standardiserade normalfördelningsfunktionen. Exempelvis ger $\beta=4.75$ en årlig sannolikhet för brott på 10^{-6} .

En beräkningsgång för säkerhetsindexmetoden enligt NKB.rapport nr 36 (1978) följer nedan:

$$\text{Etablera funktion för brottgräns } g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (3.4)$$

Där $x_1, x_2, \dots, x_n$ är grundläggande variabler. Ej brott om $g(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0$

Grundläggande variabler antas vara stokastiskt okorrelerade med fördelningsfunktioner $F(x_i)$

Om x_i är normalfördelad beskrivs den av medelvärde $E(x_i)$ och standardavvikelse $D(x_i)$

Om x_i inte är normalfördelad beskrivs den av formlema nedan

$$E(x_i) = x_i^* - \phi^{-1}(F(x_i^*)) \cdot D(x_i) \quad (3.5)$$

$$D(x_i) = \frac{\phi(\phi^{-1}(F(x_i^*)))}{f(x_i^*)} \quad (3.6)$$

Där

$\phi^{-1}(\cdot)$, invers standardiserad normalfunktion

$F(\cdot)$, icke-normal distribution

$\phi(\cdot)$, standardiserad normaldensitet

$f(\cdot)$, densitet av icke-normal distribution

$$x_i^* = E(x_i) + \beta \cdot \alpha_i \cdot D(x_i), \text{ designpunkt för } x_i \quad (3.7)$$

$$\alpha_i = - \frac{\frac{\partial g}{\partial x_i} D(x_i)}{\sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x_1} D(x_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial x_2} D(x_2)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial g}{\partial x_n} D(x_n)\right)^2}} \quad (3.8)$$

Funktionen för brottgränsen blir

$$g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 0 \quad (3.9)$$

Om log-normalfördelning

$$x_i^* = E(x_i) e^{(\beta \alpha_i V(x_i))}, \text{ där } V(x_i) \text{ är variationskoefficienten för } (x_i) \quad (3.10)$$

$$D(x_i) = e^{(\beta \alpha_i V(x_i) E(x_i) V(x_i))} \quad (3.11)$$

β , säkerhetsindex, löses genom iteration.

Geometrisk data där avvikelser kan ha betydande effekt på bärförmågan

bör beaktas som slumpmässiga variabler, normalfördelade eller log- normalfördelade

Om dimensioneringsvärde på geometrisk variabel är större än medelvärdet skall normalfördelning användas.

Om dimensioneringsvärde på geometrisk variabel är mindre än medelvärdet skall log-normalfördelning användas.

Modellosäkerhet i material inkluderas genom att multiplicera materialvariabler med I_m , log- normalfördelning med medelvärde 1 och variationskoefficient V_{I_m} . Modellosäkerhet i last inkluderas genom att multiplicera lasten med I_f , log-normalfördelad med medelvärde 1 och standardavvikelse $D(I_f)$.

Om lasten är normalfördelad kan standardavvikelsen för I_f introduceras genom att införas i brottgränsfunktionen genom

$$D(\cdot) = \sqrt{D(x)^2 + D(I_f)^2} \quad (3.12)$$

om lasten inte är normalfördelad beaktas I_f som en grundläggande variabel som är stokastiskt oberoende från andra variabler.

$$V_{I_m} = \sqrt{V_{I_1}^2 + V_{I_2}^2 + V_{I_3}^2 + 2 \cdot (\rho_1 \cdot V_{I_1} + \rho_2 \cdot V_{I_2} + \rho_3 \cdot V_{I_3}) \cdot V_m} \quad (3.13)$$

Tabell 3.1 Ingående parametrar i V_{I_m}

Noggrannhet i beräkningsmodellen			
	Bra	Normal	Dålig
V_{I_1}	0.04	0.06	0.09
ρ_1	-0.3	0	0.3

Möjlig avvikelse i materialegenskaper i den aktuella komponenten jämfört med de som härletts från kontrollprover			
	Liten	Medium	Stor
V_{I_2}	0.04	0.06	0.09
ρ_2	-0.3	0	0.3

Kontroll på plats			
	Strikt	Normal	Mild
V_{I_3}	0.04	0.06	0.09
ρ_3	-0.3	0	0.3

För permanent last:

$$D(I_f) = 0.05 \cdot E(\cdot) \quad (3.14)$$

där $E(\cdot)$ är medelvärde av den betraktade permanenta lasten

För variabel last:

$$D(I_f) = 0.2 \cdot \left(\mu + \phi^{-1} \left(1 - \frac{1 - 0.98^{\frac{1}{n}}}{p} \right) \cdot \sigma \right) \quad (3.15)$$

vilket motsvarar 20 % av 98 % fraktilen.

Resulterande säkerhetsindex, β , skall jämföras med ett krav på β som beror på konsekvens av brott samt typ av brott, enligt tabell 3.2 nedan.

Typ av brott

1. Segt brott med kvarvarande extra bärförmåga.
2. Segt brott utan kvarvarande extra bärförmåga.
3. Sprött brott, instabilitetsbrott.

Tabell 3.2 Krav på β

Konsekvens av brott	Typ av brott		
	1	2	3
Mindre allvarligt	3,1	3,7	4,2
Allvarligt	3,7	4,2	4,7
Väldigt allvarligt	4,2	4,7	5,2

3.2 Referensobjekt

Nedan anges några exempel på tidigare utförda analyser där sannolikhetsbaserade beräkningsmetoder har tillämpats.

Bärighetsanalys i brottgränstillstånd av bron över Södra Rautasjokk har utförts av Ramböll i Danmark. Ett flertal brottmoder har studerats och en högre kapacitet jämfört med den traditionellt beräknade har kunnat påvisas, Axhag, Paulsson, Enevoldsen (2003).

E Brühwiler och P Kunz har studerat en nitad bro från 1875 som går över floden Rhine i norra Schweiz. Traditionella beräkningar visade på en utmattad konstruktion och bron belades med kraftiga restriktioner i användningen. Med hjälp av probabilistisk analys kunde restriktionerna hävas för de kommande 170 000 tågen motsvarande 25 års trafik, man har dock föreskrivit tätare inspektionsintervall, Brühwiler, Kunz (1993).

Ramböll i Danmark har räknat på ett flertal broar åt både det danska och svenska vägverket. Exempelvis avstyrde sannolikhetsbaserad klassificering av Vilsundbroen ett förstärkningsprojekt på 20 miljoner DKK 1996. Stora besparingar har också gjorts genom att göra sannolikhetsbaserade driftsplaner, vid t.ex. den 4-filiga motorvägsbron Skovdiget-vest och betongplattan på Storströmsbroen uppgick de sammanlagda besparingarna till mer än 100 miljoner DKK. I Sverige har Ramböll på vägverkets uppdrag kunnat klassa upp tre stora motorvägsbroar till tyngre transporter och undvikit förstärkningsåtgärder, Enevoldsen, Hededal (2001).

4 Brottmekaniska beräkningsmetoder

Vid utmattningsdimensionering läggs fokus ofta på sprickinitieringsfasen medan spricktillväxtfasen försummas. Däremot kan det vara nödvändigt att beräkna spricktillväxten i det fall en spricka upptäcks på en befintlig bro i bruk. En initierad spricka kan växa till och leda till stora plastiska deformationer, segt brott eller ett plötsligt sprött brott. Sprickans tillväxt under spricktillväxtfasen kan beskrivas med hjälp av LEFM (Linear Elastic Fracture Mechanics). Genom att kombinera LEFM med kända funktioner för hur sannolikheten att upptäcka en spricka vid inspektion, P(cd) (Probability Of Crack Detection), varierar med spricklängden kan inspektionsintervall bestämmas så att sannolikheten för brott hålls tillräckligt låg.

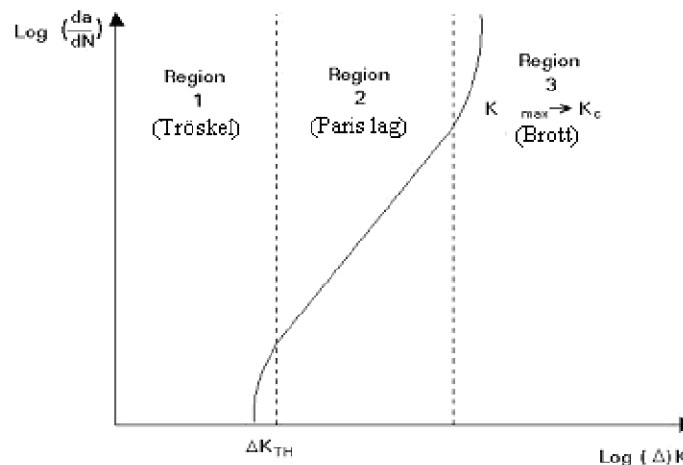
En sprickas ”drivande kraft” beskrivs av spänningsintensitetsfaktorn K som beror på sprickans längd a , spänningsvidd $\Delta\sigma$ och geometriska spänningskoncentrationer β .

$$K = \Delta\sigma \cdot \beta \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (4.1)$$

Förhållandet mellan spricktillväxt och spänningsintensitetsfaktorn beskrivs vanligtvis med Paris lag, där C och m är materialberoende parametrar.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad (4.2)$$

Ett lägre tröskelvärde där ingen spricktillväxt sker finns och kallas K_{TH} , den övre gränsen på sprickintensitetsfaktorn är K_C , som anger gränsen för stabil spricktillväxt och det kritiska värdet på spänningsintensitetsfaktorn vid vilket sprödbrott äger rum. K_C är en materialparameter som dessutom beror på andra faktorer såsom temperatur, belastningshastighet och tjocklek/storleks effekter.



Figur 4.1 Typiskt utseende på spricktillväxt som funktion av spänningsintensitetsfaktorn, ESDEP (2005)

Den geometriska spänningskoncentrationsfaktorn β är enhetslös och beror av detaljens geometri, lastens verkningsätt, spricklängd samt antagande om sprickans form. Ett förenklande antagande på säker sida är att sprickan är genomgående. β är framtagen för olika detaljer och återfinns i handböcker om brottmekanik.

Den kritiska spricklängden a_c beräknas som

$$a_c = \left(\frac{K_c}{\Delta\sigma \cdot \beta} \right)^2 \cdot \frac{1}{\pi} \quad (4.3)$$

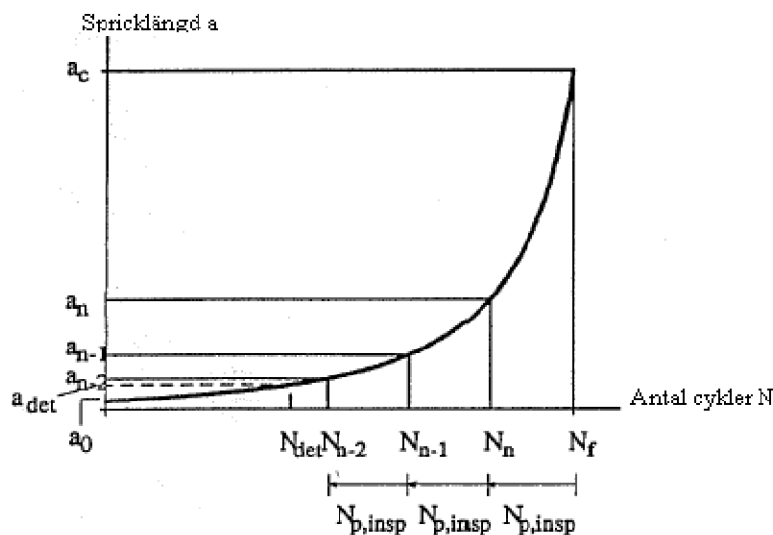
Kontroll av a_c måste utföras så att sprickan faktiskt har möjlighet att bli så lång innan den når en kant eller motsvarande. Kontroll av nominella spänningen mot flytgränsen då spricklängden är a_c måste också utföras för att kontrollera om stålet flyter innan a_c uppnås.

Under antagande om en initieell spricklängd a_0 fås antal cykler till brott N_f som

$$N_f = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C \cdot (\Delta K)^m} \quad (4.4)$$

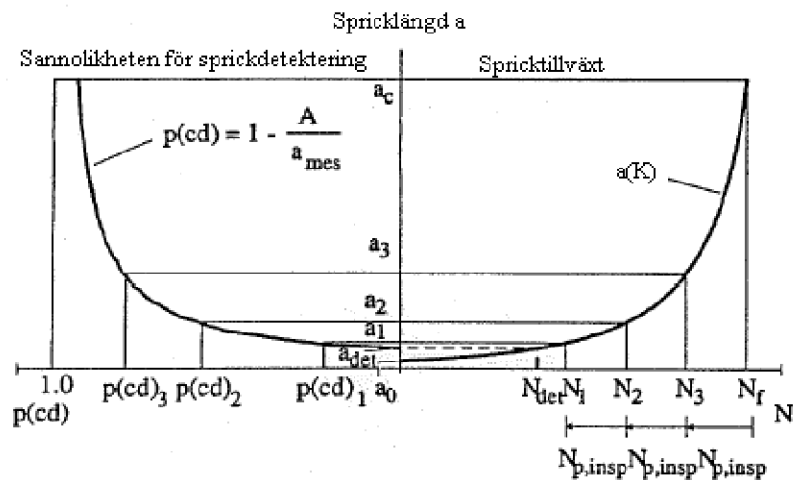
Eftersom ΔK beror på spricklängden a saknar integralen någon analytisk lösning, detta kan lösas antingen genom att spänningskoncentrationsfaktorn antas konstant eller genom att lösa integralen med hjälp av iteration i t.e.x. MATLAB.

Ett typiskt utseende av spricklängden som funktion av antal cykler framgår i figur 4.2 nedan. Figuren visar även spricklängden vid inspektionstillfällena om inspektionsintervallet antas som $N_{p,insp}$.



Figur 4.2 Spricklängd som funktion av antal cykler och spricklängd vid inspektion, Kunz, Hirt (1992)

Genom att kombinera figuren ovan med sannolikheten för att upptäcka en spricka givet spricklängden erhålls figur 4.3, där sprickdetekteringskonstanten A som beror på detekteringsmetod införts och a_{mes} är mätbar spricklängd.



Figur 4.3 Förhållande mellan spricktillväxt och sannolikhet för sprickdetektering, Kunz, Hirt (1992)

Den totala sannolikheten för att sprickan upptäcks innan den når kritisk spricklängd fås som

$$p(cd) = p(cd)_1 + (1 - p(cd)_1) \cdot p(cd)_2 + (1 - p(cd)_1) \cdot (1 - p(cd)_2) \cdot p(cd)_3 + \dots \quad (4.5)$$

Genom att definiera ett krav på sannolikheten att sprickan ej upptäcks ($1 - p(cd)$), kan inspektionsintervallet $N_{p,insp}$ optimeras.

4.1 Referensobjekt

Nedan anges några exempel där brottmekaniska beräkningsmetoder tillämpats för att bedöma inspektionsintervall.

G Sedlaeck och W Hensen har tillämpat beräkningsmetoderna på ett flertal broar i östra Tyskland, beräkningarna har fungerat som beslutsunderlag i frågan om broarna skall bytas ut eller förstärkas, Hensen, Sedlaeck (1995).

Knut Engesvik har studerat en nitad bro byggd 1900 men som byggdes om 1934. Ombyggnaden inkluderade svetsning och det är särskilt dessa delar som har betraktats vid tillståndsbedömningen. LEFM används för att räkna ut delskadan och resterande livslängd, antal inspektioner under kvarvarande livslängd föreskrivs så att det uppsatta kravet för brottsannolikhet ej överskrids, Engesvik (1988).

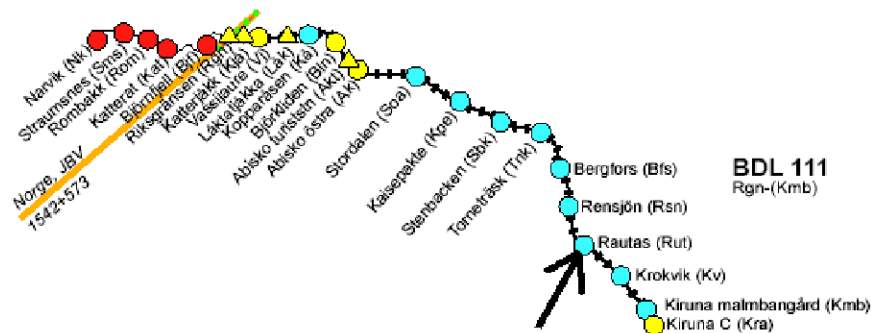
Oregon Department of Transportation (ODOT) i USA är ansvariga för att inspektera 196 broar där ett utmattningsbrott är direkt kritiskt, d.v.s. där det inte finns någon

statisk övertalighet. För att utnyttja resurserna på bästa sätt har LEFM kombinerat med sannolikhet för sprickdetektering införts 1995 för att fördela inspektionsinsatserna till de broar där de bäst behövs. ODOT bedömer att man under en 10-års period sparar mer än 6 miljoner USD, Lovejoy (2003).

5 Referensbro, bro över Södra Rautasjokk

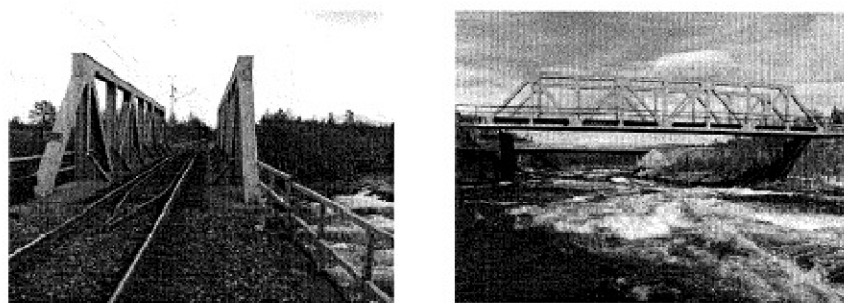
5.1 Beskrivning av bron

Bron ligger på malmbanan mellan Kiruna och Narvik, se figur 5.1 nedan.



Figur 5.1 Malmbanan mellan Kiruna och Narvik, www.banverket.se (2005)

Bron är en ca 50 år gammal enkelspårig järnvägsbro av stål, med trågformad geometri enligt figur 5.2 nedan.



Figur 5.2 Foton av bron över Södra Rautasjokk, Axhag, Paulsson, Enevoldsen (2003)

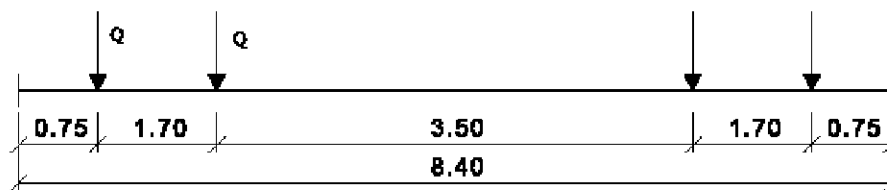
Huvudkonstruktionen består av två parallella fackverk, fritt upplagda med en teoretisk spännvidd på 33 m. Höjden på huvudfackverken är 4.7 m och avståndet mellan de parallella fackverken är 5.5 m. Spåret bärs av ett system av sekundära långbalkar och tvärbalkar. Tåglasten förs via spåret ned i långbalkarna som överför lasten till tvärbalkarna som är svetsade till huvudfackverken med ett avstånd om 4.125 m. Långbalkarna är kopplade till tvärbalkarna med ett nitförband. Långbalkarna är försedda med kontinuitetsplåtar så att långbalkarna utgör en kontinuerlig balk över nio fjädrande stöd. Horisontalstabiliseringen utgörs av ett lokalt horisontalt fackverk som ligger mellan de två parallella långbalkarna och ett globalt horisontalt fackverk som överför horisontalkrafter till huvudkonstruktionen. Eftersom systemet med långbalkar och tvärbalkar ligger i samma nivå som huvudfackverkets underram, medför långbalkarnas axialstyvhet att tvärbalkarna påverkas av tvärböjning. De horisontala fackverken påverkar både långbalkar och tvärbalkar till tvärböjning.

5.2 Traditionell utmattningsanalys

5.2.1 Föresättningar

Beräkningarna utförs enligt Banverkets standard för bärighetsberäkning av järnvägsbroar, BVS 583.11, som anger två alternativa beräkningsmetoder. Dels utmattningskontroll med avseende på typiserat spänningskollektiv där antalet spänningscykler är föreskrivet för olika konstruktionsdelar och dels delskademetoden. Eftersom utmattningskontroll med typiserat spänningskollektiv endast ger information om konstruktionsdelen utmattas inom den förväntade livslängden på 120 år och inte ger någon information om hur stor del av utmattningslivslängden som har utnyttjats hittills har utmattningskontroll med hjälp av delskadeanalys utförts enligt bilaga 3 i BVS 583.11.

Spänningsvidden bestäms genom beräkning av spänningar utgående från belastning av ekvivalent godståg för Malmбанan och antalet vagnspassager bestäms utgående från transporterad godsmängd enligt lasthistorien. Aktuella spänningsnivåer beräknas med inkluderad förenklad dynamikoefficient, med största tillåtna hastighet lägre än 200 km/h enligt kap 6 i bilaga 3, BVS 583.11. Förbandsklasser enligt BSK 99.



Figur 5.3 Axelvstånd och längd över buffert för godsvagn i det "Ekvivalenta godståget" för Malmбанan, BVS 583.11 (2005)

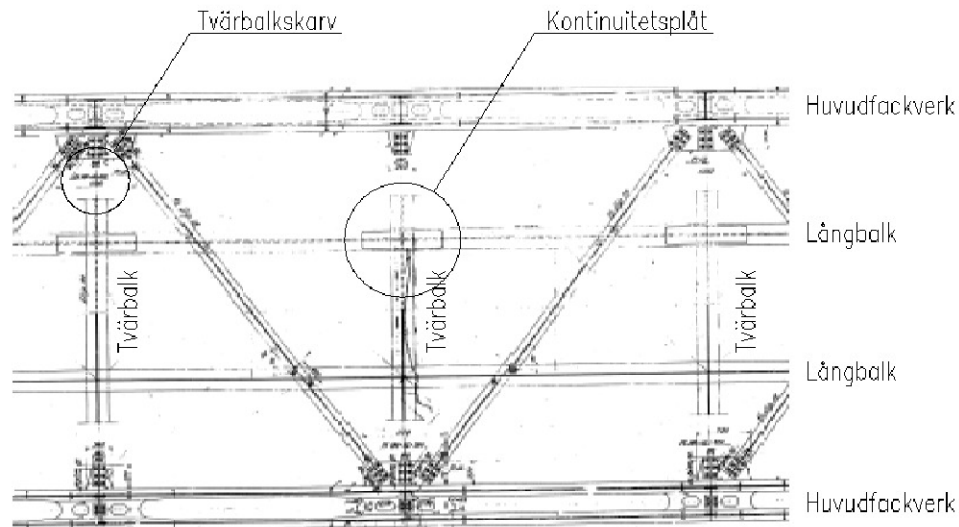
Tabell 5.1 Axellaster och vagnsdata, Malmбанan, BVS 583.11 (2005)

År	---	1921	1941	1961	1981	2000	2000	Medel
	–1920	–1940	–1960	–1980	---	---	---	
						Stax 25 bana	Stax 30 bana	
P_k	225	225	250	250	250	250	300	
P_m	225	225	250	250	250	250	300	
a	4	4	4	4	4	4	4	
P_0	40	40	50	50	50	50	50	

Från och med år 2000 har axellasten antagits till 300 kN.

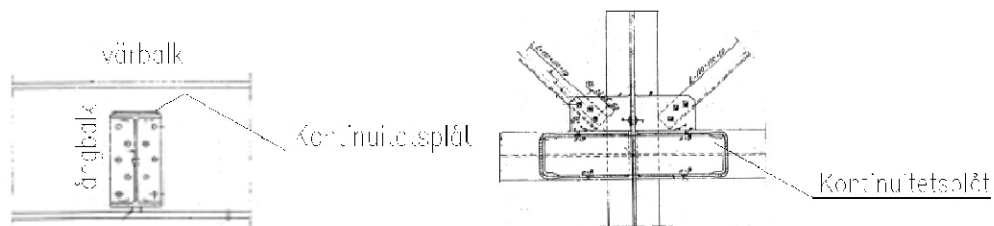
5.2.2 Utförande

Syftet med analysen är att jämföra de olika beräkningsmetoderna. Därför har ingen komplett utmattningsanalys utförts. Två detaljer med sammanlagt tre sprickmoder har analyserats, tvärbalkskarv, spricka i kant på kontinuitetsplåt samt över stöd.



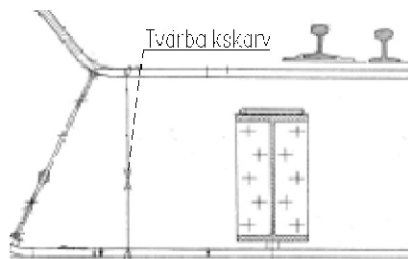
Figur 5.4 Brons huvuddelar och analyserade detaljer

Kontinuitetsplåten vars syfte är att göra långbalken till en kontinuerlig balk istället för ett antal fritt upplagda balkar, går genom en slits i tvärbalkens liv enligt figuren nedan. Kontinuitetsplåten är montagesvetsad på långbalken med kälsvets, a-mått 9 mm. Detta ger en C-klass 45 givet svetsklass WB enligt BSK 99 (detalj nr 48), för sprickmod vid kontinuitetsplåtens kant. För sprickmod i stödsnittet där spänningen är som störst är C-klassen 50 givet svetsklass WB enligt BSK 99 (detalj nr 52).



Figur 5.5 Kontinuitetsplåt i sektion och plan

Tvärbalkarna består av en rak valsad I-balk (DIP 80) som är ihopsvetsad med en böjd svetsad I-balk som utgör infästningen till huvudfackverket. Balkskarven är stumsvetsad med dubbla V-fogar som är planslipade, detta ger en C-klass 80 givet svetsklass WB enligt BSK 99 (detalj nr 18).



Figur 5.6 Tvärbalkskarv i sektion

För beräkning av spänningens variation i de valda detaljerna har momentinfluenslinjer tagits fram för respektive snitt. Med hjälp av influenslinjerna och tågmodellen i figur 5.3 har spänningens variation för en tågpassage erhållits genom att flytta tågmodellen stegvis med en meter. Vid beräkningarna har tvärbalkarna antagits fritt upplagda på huvudfackverken och långbalkarna har antagits kontinuerliga över ett, två respektive tre stöd, beroende på detaljens placering samt influenslinjens utseende.

5.2.3 Resultat

Beräkningarna visar att bron är uttjänt med avseende på sprickmoden vid kanten på kontinuitetsplåten, den totala delskadan är där beräknad till 2,4, se tabell 5.2 nedan. Det är värt att notera att med dagens högre axellast på 300 kN och dagens godsmängder erhålls en årlig delskada på ca 8 %, i kanten på kontinuitetsplåten.

Enligt beräkningarna skulle bron ha bytts ut eller förstärkts 1977 för att uppfylla kraven enligt Banverkets standard BVS 583.11.

Tabell 5.2 Resultat av utmattningsberäkning baserad på delskadeanalys

Ar	Tvärbalk		Kontinuitetsplåt, över stöd		Kontinuitetsplåt, kant	
1941-1960	n_{akt}	29100	n_{akt}	29100	n_{akt}	1455000
	Delskada	0,004	Delskada	0,05	Delskada	0,3
1961-1980	n_{akt}	81000	n_{akt}	81000	n_{akt}	4050001
	Delskada	0,01	Delskada	0,13	Delskada	0,8
1981-2000	n_{akt}	92140	n_{akt}	92140	n_{akt}	4607010
	Delskada	0,01	Delskada	0,15	Delskada	0,9
2001-2005	n_{akt}	22500	n_{akt}	22500	n_{akt}	1125000
	Delskada	0,005	Delskada	0,06	Delskada	0,4
Summa delskada		0,03		0,39		2,4

Med n_{akt} avses för tvärbalk och "kontinuitetsplåt, över stöd" antal tågöverfarter under perioden. För "kontinuitetsplåt, kant" avser n_{akt} antalet överfarter med två närliggande boggiar under perioden. Det faktum att antalet cykler är 50 gånger fler i kanten på kontinuitetsplåten än över stöd, gör att den sprickmoden är dimensionerande.

Den intresserade läsaren hänvisas till bilaga A (Moment & Spänningsberäkning) och bilaga B (Delskadeberäkning).

5.3 Utmattningsanalys med säkerhetsindexmetoden

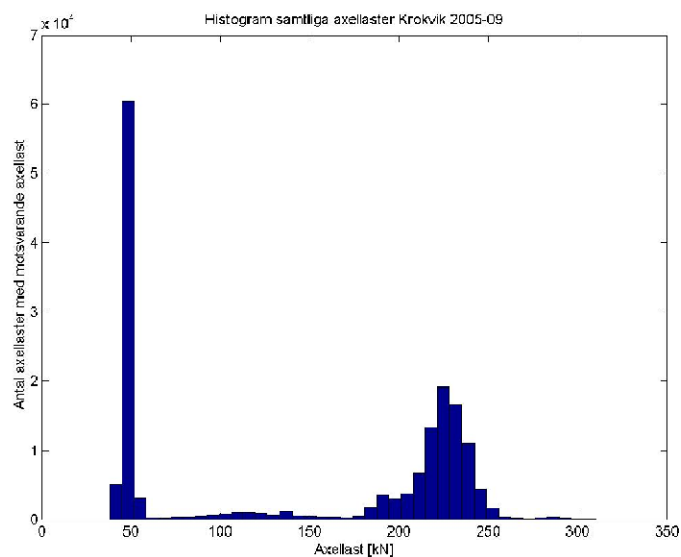
5.3.1 Förutsättningar

I den probabilistiska analysen med hjälp av säkerhetsindexmetoden har endast den detalj som påvisade uttömd utmattningstid i den traditionella delskademethoden analyserats, d.v.s. kanten på kontinuitetsplåten.

Banverket har mätstationer som registrerar olika parametrar för varje tågpassage däribland nominell axellast och maxvärde för axellast, se utdrag i bilaga C. Dessa mätstationer används för att detektera hjulskador, men lämpar sig även till användning vid bärighetsanalys tack vare den höga mätnoggrannheten, Gerard (2001).

5.3.2 Utförande

Mätdata har inhämtats från Banverkets mätstation i Krokvik för september 2005 och analyserats med hjälp av MATLAB, se bilaga D. Medelvärden och standardavvikelser har tagits fram för tåglaster samt dynamikoefficient (stöttillägg).



Figur 5.7 Samtliga axellaster från Banverkets mätstation i Krokvik 2005-09

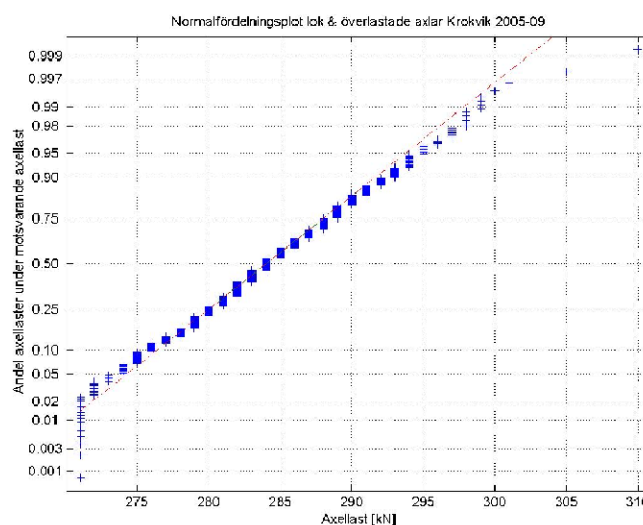
I figuren ovan framgår att axellasterna kan delas upp i fyra huvudkategorier. Därför har det i analysen gjorts skillnad mellan lok och överlastade axlar, lastade axlar, axellaster för persontrafik samt olastade axlar.

Tabell 5.3 Resultat från analys av mätdata

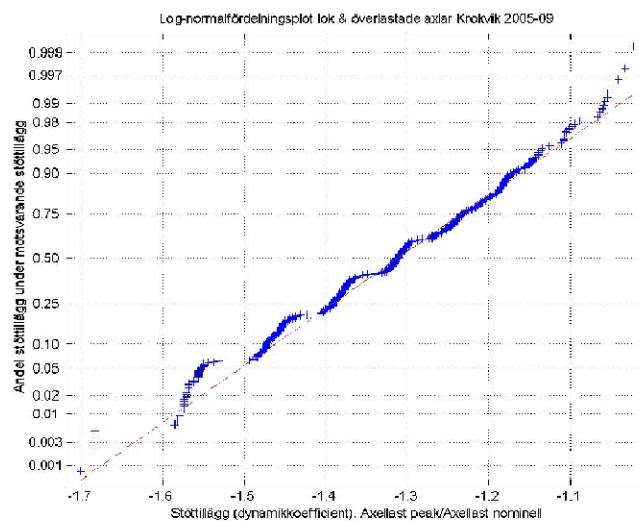
	Axellast [kN]	Medelvärde axellast [kN]	Standardavvikelse axellast [kN]	Medelvärde dynamikoefficient	Standardavvikelse dynamikoefficient
Lok och överlastade vagnar	>270	284.2	6.3	1.050	0.014
Lastade vagnar	175-270	223.5	15.2	1.065	0.032
Persontrafik	60-175	118.4	25.3	1.19	0.11
Olastade vagnar	<60	47.5	2.3	1.18	0.055

Resultaten i tabellen ovan kan jämföras med de värden som användes vid den traditionella utmattningsberäkningen enligt Banverkets BVS 583.11, axellast 300 kN med en lastkollektivparameter κ på 5/6 för att korrigera lutningen i S-N kurvan samt en dynamikoefficient 1.28. Det är värt att notera att dynamikoefficienten är låg för de högre axellasterna vilket är gynnsamt ur utmattningssynpunkt.

Verifiering av fördelningstyp har gjorts genom normalfördelningsplottning, log-normalfördelningsplottning samt weibullfördelningsplottning. Axellasterna visade sig vara normalfördelade. Eftersom dynamikoefficienten är en kvot mellan max och medelvärde på axellast och därför aldrig kan vara mindre än ett har en ny variabel införts som dynamikoefficienten minus ett, denna variabel visade sig vara log-normalfördelad. Exempel visas nedan i figur 5.8 och 5.9, för övriga plottar hänvisas till bilaga E.

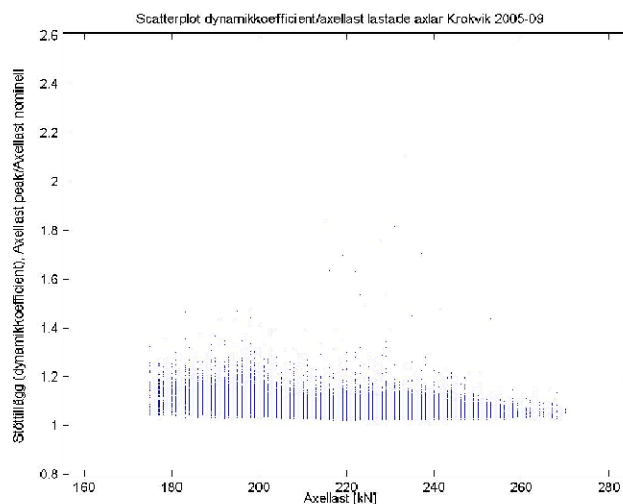


Figur 5.8 Normalfördelningsplot för lok och överlastade axlar



Figur 5.9 Log-normalfördelningsplot för dynamikkoefficient lok och överlastade axlar

Vidare undersöktes om det fanns något samband mellan axellast och dynamikkoefficient inom respektive kategori, dels genom scatterplottning och dels genom att räkna ut kovariansmatris och korrelationsmatris. Det framgår av scatterplotten i figur 5.10 att det finns en negativ korrelation, det vill säga att dynamikkoefficienten är låg för höga axellaster.



Figur 5.10 Scatterplot över sambandet mellan dynamikkoefficient och axellast för lastade axlar

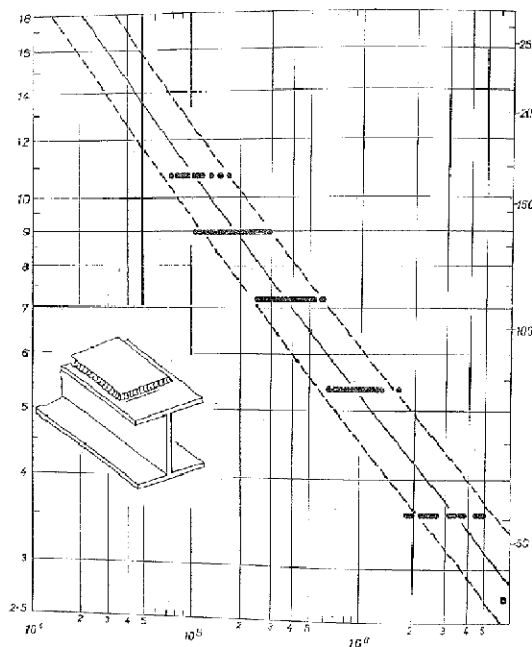
Tabell 5.4 Samband mellan dynamikkoefficient och axellast för respektive kategori

Samband mellan dynamikkoefficient och axellast för lok och överlastade axlar			Samband mellan dynamikkoefficient och axellast för lastade axlar		
Kovariansmatris:	39.6	-0.02	Kovariansmatris:	230.0	-0.21
	-0.02	0,00		-0.21	0,00
Korrelationsmatris:	1.00	-0.27	Korrelationsmatris:	1.00	-0.43
	-0.27	1.00		-0.43	1.00

Samband mellan dynamikkoefficient och axellast för axellaster persontrafik			Samband mellan dynamikkoefficient och axellast för olastade axlar		
Kovariansmatris:	642.0	-1.31	Kovariansmatris:	5.2	-0.01
	-1.31	0,00		-0.01	0,00
Korrelationsmatris:	1.00	-0.47	Korrelationsmatris:	1.00	-0.07
	-0.47	1.00		-0.07	1.00

Korrelationsmatrisen fås genom att normera kovariansmatrisen.

S-N kurvan för den aktuella detaljen beskrivs med en ekvation härledd från Gurney, Maddox (1973), på formen $\log N = a + b \cdot \log S$, där a betraktas som en stokastisk variabel och b är en konstant (lutningen på S-N kurvan).



Figur 5.11 S-N kurva för påläggsplåt, Gurney, Maddox (1973)

Medelvärde för a räknas fram till 11.843 och standardavvikelsen till 0.232, konstanten b anges till -3.08 .

Det råder en stor ovisshet var utmattningsgränsen skall ansättas, i ”1st Draft of the background Document”, prEN1993-1-9 (2003) används $N = 5 \cdot 10^6$ för att identifiera utmattningsgränsen. För svetsade detaljer kan den helt uteslutas vid variabel spänningsamplitud. Spänningsvidden förväntas med utgångspunkt från den traditionella delskadeberäkningen, ha sitt medelvärde i området kring utmattningsgränsen och därför ha sin statistiska spridning in i två områden med olika lutning på S-N kurvan. Vid beräkningen av säkerhetsindex har därför ingen utmattningsgräns satts, lutningen på S-N kurvan antas konstant -3.08 för alla spänningsvidder, vilket är mycket på säker sida.

Modell- och materialosäkerheter enligt NKB 36 var ej möjliga att applicera på utmattningsanalys eftersom de var anpassade till brottgränsanalys. Vid utmattningsanalys är det ej intressant med extremvärden och engångsöverträdelser. Inte heller osäkerheter i materialets flytgräns är relevanta. Materialosäkerheter är vid utmattningsmedtagna i S-N kurvorna. Modellosäkerhet för last är i det här fallet ej relevant eftersom samtliga axellaster har mätts och bron bara har ett spår varför någon hänsyn till möten av tåg och så vidare ej behöver modelleras. Osäkerheter i beräkningsmodellen för att räkna ut spänningen i den aktuella detaljen utifrån givna axellaster, har inte medtagits här då samtliga antaganden i beräkningsmodellen gjorts på säker sida, detta diskuteras vidare i kapitel 6.

Den karakteristiska lasten enligt Banverkets BVS 583.11 var vid tidpunkten för mätningarna 300 kN, fram till år 2000 var den 250 kN, axellasterna har därför fram till och med 1999 skalats ned med motsvarande förhållande.

Antal axelpassager för respektive lastkategori under mätperioden har omräknats till årsbasis. Transporterad godsmängd från mätdata har räknats om till bruttoton/år. För att räkna ut historiskt antal axelpassager för respektive kategori har andelen axelpassager för respektive kategori antagits konstant och antalet axelpassager har proportionerats mot historiska data för bruttoton/år.

Beräkning av säkerhetsindex har utförts med hjälp av FORM-analys i MATLAB-programmet FERUM, som är ett program utvecklat på institutionen för Civil and Environmental Engineering vid Berkeley University of California. Inputfil till programmet återfinns i bilaga F. Brottekvationen har tecknats som

$$1.0 - \sum D_i = 0 \quad (5.1)$$

Där D_i är delskadan för respektive lastfall, när karakteristisk last enligt BVS 583.11 är 300 kN samt när karakteristisk last enligt BVS 583.11 är 250 kN

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (5.2)$$

Antalet cykler n_i motsvarar i detta fallet antalet passager av två närliggande boggier för respektive lastfall

$$N_i = 10^{(a-3.084 \log S_i)} \quad (5.3)$$

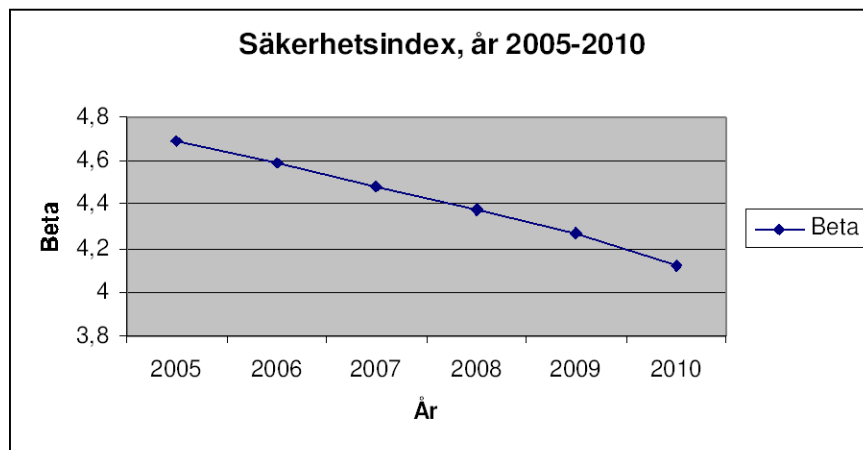
Där N_i är antal cykler till brott för respektive lastfall och a är en stokastisk variabel med medelvärde 11.843 och standardavvikelse 0.232 som beskriver läget på S-N kurvan enligt ovan

$$S_i = d_i \cdot \frac{P_i}{250} \cdot S_{kant250} \quad (5.4)$$

Där d_i är dynamikkoefficient med medelvärde och standardavvikelse för respektive lastfall och P_i är axellast med medelvärde och standardavvikelse för respektive lastfall och $S_{kant250}$ är spänningsvidden vid kanten på kontinuitetsplåten vid en axellast på 250 kN som tidigare beräknats till 26 Mpa.

5.3.3 Resultat

Beräkningarna visar att säkerhetsindex β vid utgången av år 2005 ligger på 4.69 motsvarande en årlig sannolikhet för brott på $1.36 \cdot 10^{-6}$. Krav på β under antagande om segt brott utan kvarvarande extra bärförmåga och med allvarlig konsekvens av brott är 4.2, det finns alltså en resterande beräknad utmattningstidslängd med avseende på den betraktade sprickmoden. Figur 5.12 visar säkerhetsindex som funktion av tiden under antagande om en årlig ökning av antalet bruttoton med 2 %. Som det framgår av figuren kan bron vara i bruk till 2009 med avseende på betraktad sprickmod.



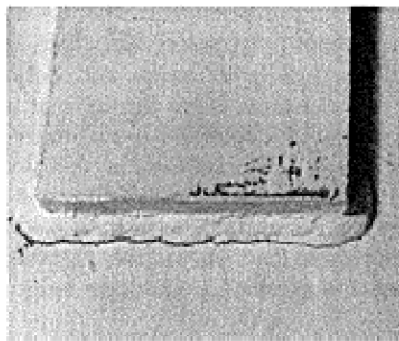
Figur 5.12 Förändring av säkerhetsindex, från 2005 till 2010

Resultatfil för beräkning av säkerhetsindex vid utgången av 2005, med tillhörande känslighetsanalys hur ändring av de enskilda variablerna påverkar säkerhetsindex, samt variabelvärden i designpunkten återfinns i bilaga G.

5.4 Brottmekanisk utmattningsanalys

5.4.1 Förutsättningar

I den brottmekaniska utmattningsanalysen har endast den detalj som påvisade uttömd utmattningstidslängd med den traditionella delskademetoden analyserats, d.v.s. kanten på kontinuitetsplåten.



Figur 5.13 Spricka vid svetstån vid pålaggsplåt (t.ex. kontinuitetsplåt), Barsom, Rolfe (1999)

Brottsegheten K_C har dels satts till $99 \text{ MPa}\sqrt{m}$ motsvarande krav i svensk norm om en minsta slagseghet för konstruktionsstål på 27 J, och dels har K_C satts till $44 \text{ MPa}\sqrt{m}$ motsvarande krav i Canadian National Railways, (K Eriksson 1992) att om en spricka upptäcks med K större än $44 \text{ MPa}\sqrt{m}$ så måste detaljen eller bron bytas ut. $K_C = 44 \text{ MPa}\sqrt{m}$ nämns också i Lovejoy (2003) som det i litteraturen lägsta angivna värdet på K_C .

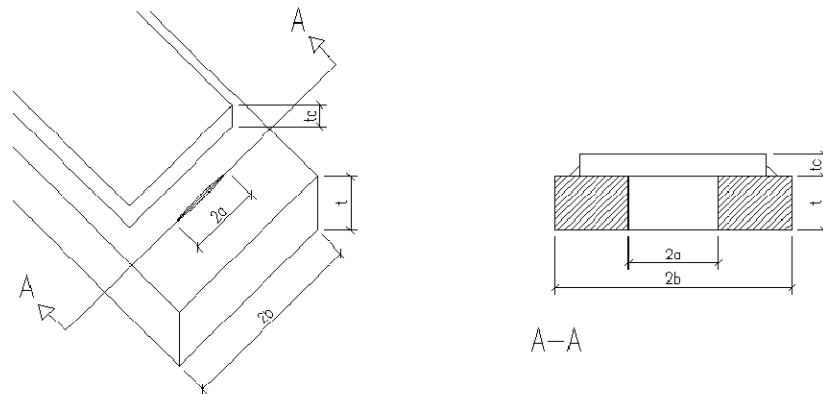
Spänningsvidd hämtas ur tidigare utförd deterministisk beräkning baserad på Banverkets norm.

Vid beräkning av nominell spänning har egentygnd från slipers och räls försumrats.

Krav på sannolikheten att en spricka givet ett visst inspektionsintervall ej upptäcks före sprickan når kritisk längd antas som i beräkningen med säkerhetsindexmetoden till 10^{-5} motsvarande ett säkerhetsindex β på 4.2.

5.4.2 Utförande

Sprickan antas på säker sida vara genomgående, för att göra analysen mer noggrann är ett alternativ att modellera sprickan som en ytspricka som växer både i bredd- och tjockleksriktningen.



Figur 5.14 Genomgående spricka i kontinuitetsplåt svetsad på långbalken

Spänningsintensitetsfaktorn för genomgående spricka med längden $2a$ och geometrisk spänningskoncentrationsfaktor β

$$\Delta K_I = \beta \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (5.5)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot b}{\pi \cdot a} \tan \frac{\pi \cdot a}{2 \cdot b}} \quad (5.6)$$

Spricktillväxt per spänningscykel

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad (5.7)$$

För stål gäller att $m \approx 3$ och $C \approx 2 \cdot 10^{-13} \frac{N}{mm^{-3/2}}$, ESDEP (2005)

Under antagande om en initieell spricklängd på $2 \cdot a_0$ fås antal cykler till brott ur

$$N = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C \cdot (\Delta K)^m} \quad (5.8)$$

där a_c är den kritiska spricklängden

$$a_c = \left(\frac{K_{IC}}{\Delta \sigma \cdot \beta} \right)^2 \cdot \frac{1}{\pi} \leq b \text{ (sprickan når flänskanten)} \quad (5.9)$$

Den kritiska längden på sprickan kan även bestämmas av att normalspänningen överstiger stålets flytgräns. Stål 1311 som motsvarar S235JR, www.sbi.se (2005), har ett karakteristiskt värde på flytgränsen om 235 MPa.

Nominell spänning blir eftersom egentygnd av slipers och räls försummas samma som spänningsvidden, d.v.s. 52.8 MPa. Antal cykler per år n , uppgår till 225 000.

Eftersom integralen i ekvation (5.8) saknar analytisk lösning har iteration med hjälp av MATLAB använts, se bilaga H. Initiell spricklängd a_0 har satts till 5 mm och steglängd 0.1 mm har använts för spricktillväxten.

I samma program beräknas även sannolikheten att upptäcka en spricka vid inspektion givet ett visst inspektionsintervall. Sannolikheten för sprickdetektering vid respektive inspektion beräknas som

$$p(cd)_i = 1 - \frac{A}{a_i} \quad (5.10)$$

Värde på sprickdetekteringskonstanten A har satts till 5 mm motsvarande att sannolikheten att hitta en spricka visuellt som är kortare än 10 mm är 0.

Totala sannolikheten att upptäcka en spricka innan den når kritisk längd beräknas som

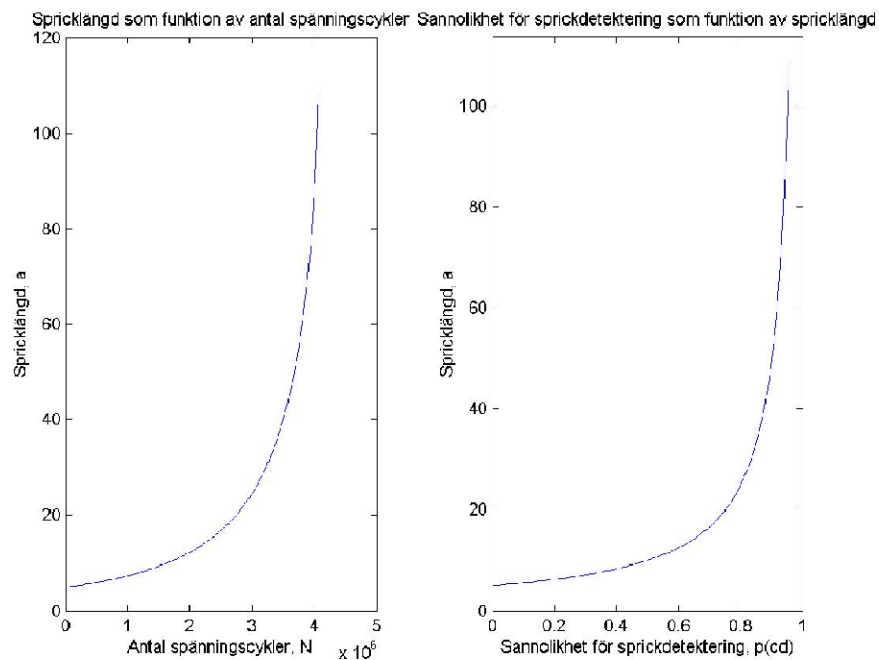
$$p(cd) = p(cd)_1 + (1 - p(cd)_1) \cdot p(cd)_2 + (1 - p(cd)_1) \cdot (1 - p(cd)_2) \cdot p(cd)_3 + \dots \quad (5.11)$$

Sannolikheten att en spricka ej upptäcks fås därmed som

$$p_f = 1 - p(cd) \quad (5.12)$$

5.4.3 Resultat

Den kritiska spricklängden beräknades till ca 108 mm, d.v.s. en total spricklängd på 216 mm att jämföra med flänsbredden 297 mm. Den begränsande faktorn var normalspänningen som överskred flytspänningen, om K_c sätts till $44 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ är det dock nära att detta blir dimensionerande då spänningsintensitetsfaktorn vid den kritiska spricklängden uppgår till $42.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Totalt antal cykler till brott uppgår till $4.06 \cdot 10^6$, motsvarande ca 17 år. Ett inspektionsintervall på 400 000 cykler motsvarande ca 1.75 år ger att sannolikheten för att en spricka ej upptäcks före den når kritisk spricklängd, d.v.s. sannolikheten för brott, är ungefär $7 \cdot 10^{-6}$ som är mindre än kravet på 10^{-5} .



Figur 5.15 Spricklängd som funktion av antal cykler samt sannolikhet för sprickdetektering som funktion av spricklängd

Innan sprickan når kritisk spricklängd kan 10 inspektioner utföras, antal cykler, spricklängd och sannolikhet för sprickdetektering vid respektive inspektion redovisas i tabell 5.5 nedan.

Tabell 5.5 Antal cykler, spricklängd och sannolikhet för sprickdetektering vid respektive inspektion

Inspektion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Antal cykler	395099	786212	1180854	1591714	1990529	2397677	2798775	3197944	3599710	3999946
Spricklängd [mm]	11,4	13,4	16	19,6	24,4	31,4	41,8	58,6	90	176,2
Sannolikhet för sprickdetektering	0,12	0,25	0,38	0,49	0,59	0,68	0,76	0,83	0,89	0,94

6 Diskussion

Förbättring av traditionell utmattningsberäkning

Ett av syftena med examensarbetet var att fundera kring hur en konventionell delskadeberäkning kan förbättras, vilka de viktigaste parametrarna i en sådan beräkning är och hur kan de modelleras för att bättre reflektera verkligheten?

Vid den probabilistiska beräkningen framkom följande svagheter hos den traditionella utmattningsberäkningen.

-För grov lastmodell i BVS 583.11, i verkligheten är ca hälften av tågen olastade. Detta tas till viss del om hand med hjälp av lastkollektivparametern, men det borde vara möjligt att åtminstone för Malmbanan införa fyra lasttyper, i enlighet med vår lastanalys som bättre reflekterar verkligheten. Detta påverkar inte analysens komplexitet nämnvärt. Eftersom det finns så pass bra lastmätningar på Malmbanan skulle det även finnas möjlighet att lägga ut det verkliga antalet axelpassager osv för respektive bandel på Banverkets hemsida så att konsulter kan ta tillvara mätresultaten. Eftersom mätningarna vid en mätstation är relevanta för flera broar längs bandelen bör det vara möjligt att med relativt få mätstationer täcka in stora delar av järnvägsnätet.

-Dynamikkoefficienten antas konstant och någon hänsyn till den viktiga korrelationen mellan axellast och dynamikkoefficient tas således inte. Om fler lasttyper införs enligt vårt förslag ovan kan varje lasttyp tilldelas en dynamikkoefficient och på så vis bättre reflektera verkligheten. Dynamikkoefficienten härrör från ojämnheter samt skador på hjul och räls, genom att lägga dynamikkoefficienten på samtliga axellaster antar man att ojämnheten eller skadan alltid ger ett dynamiskt tillskott just där det ger störst inverkan på den studerade detaljen, detta antagande är givetvis oerhört konservativt. Det borde därför vara möjligt att statistiskt påvisa att dynamikkoefficienten kan skalas ned.

-C-klasserna för många detaljer är mer konservativa i BSK än i andra länders normer.

-BVS 583.11 är kalibrerad efter säkerhetskraven i BKR. Det diskuteras vidare nedan att dessa krav är relativt konservativa och är samma för befintliga som för nya broar.

-Enligt BVS 583.11 finns möjlighet att utföra utmattningskontroll med avseende på typiserat spänningskollektiv. Resultaten från sådana beräkningar säger inte hur mycket av den aktuella detaljens utmattningslivslängd som har förbrukats. För t. ex. långbalkar antas antalet cykler till 10 miljoner under brons livslängd på 120 år, men vi har genom att utföra en influenslinjeanalys visat att antalet cykler i kanten på kontinuitetsplåten är ca 11.2 miljoner redan efter ca 50 år. Detta medför att utmattningskontroll med typiserat spänningskollektiv, där ingen influenslinjeanalys utförs kan ge resultat som klart ligger på osäker sida. Den allmänna uppfattningen är att en grov beräkningsmodell ger lösningar på säker sida, d.v.s. en kort utmattningslivslängd och att en längre utmattningslivslängd erhålls med mer noggranna beräkningsmetoder, vilket alltså inte är fallet här.

Krav på säkerhetsindex

En jämförelse av olika krav på säkerhetsindex redovisas i tabell 6.1-6.3 nedan.

Tabell 6. 1 Krav på β enligt JCSS (2000)

1	2	3	4
Relative cost of safety measure	Minor consequences of failure	Moderate consequences of failure	Large consequences of failure
Large (A)	$\beta=3.1$ ($p_F=10^{-3}$)	$\beta=3.3$ ($p_F=5 \cdot 10^{-4}$)	$\beta=3.7$ ($p_F=10^{-4}$)
Normal (B)	$\beta=3.7$ ($p_F=10^{-4}$)	$\beta=4.2$ ($p_F=10^{-5}$)	$\beta=4.4$ ($p_F=5 \cdot 10^{-6}$)
Small (C)	$\beta=4.2$ ($p_F=10^{-5}$)	$\beta=4.4$ ($p_F=5 \cdot 10^{-6}$)	$\beta=4.7$ ($p_F=10^{-6}$)

Den skuggade rutan anses vara den vanligaste i en dimensioneringssituation. Som konsekvens av brott sammanvägs risk för personskador och ekonomiska konsekvenser. Vi noterar att man vid t. ex. stora konsekvenser av brott och hög kostnad för säkerhetsåtgärder accepterar en 10 gånger så hög brottsannolikhet som vid moderata brottkonsekvenser och normala kostnader för säkerhetsåtgärder. För befintliga konstruktioner är kostnaderna oftast stora för att uppnå en högre säkerhetsnivå, därför bör kravet på β generellt vara lägre för befintliga konstruktioner än vid dimensionering av nya.

Tabell 6. 2 Krav på β enligt NKB 36 (1978)

Konsekvens av brott	Typ av brott		
	1	2	3
Mindre allvarligt	3,1	3,7	4,2
Allvarligt	3,7	4,2	4,7
Väldigt allvarligt	4,2	4,7	5,2

Typ av brott

1. Segt brott med kvarvarande extra bärförmåga.
2. Segt brott utan kvarvarande extra bärförmåga.
3. Sprött brott, instabilitetsbrott.

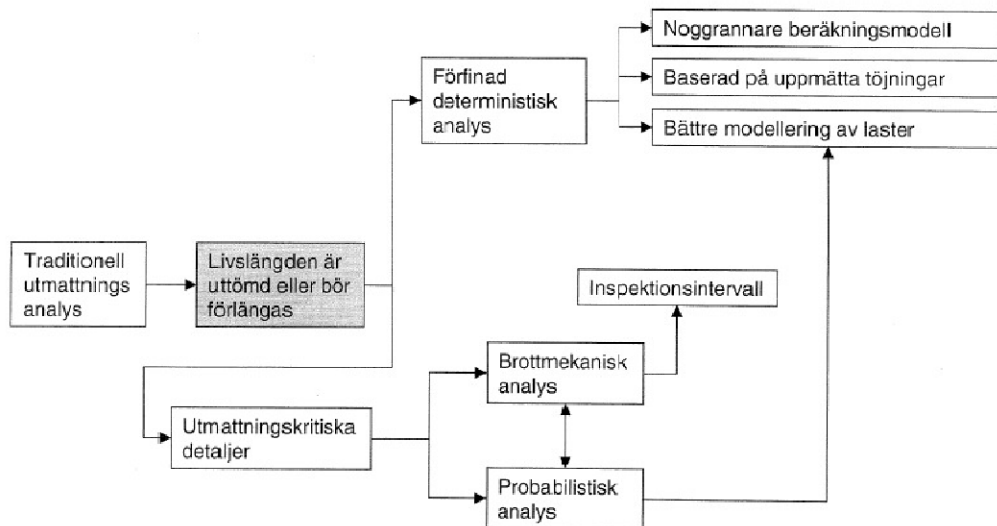
Tabell 6. 3 Krav på β enligt BKR (2003)

	β	pf
Säkerhetsklass 1	3.7	10^{-4}
Säkerhetsklass 2	4.3	10^{-5}
Säkerhetsklass 3	4.8	10^{-6}

Enligt normen skall broar räknas i säkerhetsklass 3, vilket alltså för de flesta fall ger konservativare krav på β än enligt NKB och JCSS.

Beräkningsmetoder

Ett annat delsyfte med arbetet var att utreda vilka alternativa analysmetoder som kan tillämpas vid beräkning av resterande utmattningslivslängd hos befintliga järnvägsbroar av stål, samt att diskutera när dessa metoder kan tillämpas istället för, eller som ett komplement till konventionell delskadeberäkning. Vi har tidigare i arbetet påvisat att det är möjligt att tillämpa probabilistiska och brottmekaniska beräkningsmetoder vid utmattningsberäkning. Eftersom probabilistiska beräkningsmetoder i dagsläget är relativt kostsamma är det förmodligen kostnadseffektivt först på något större broar. Brottmekaniska beräkningsmetoder bedöms vara lämpliga för samtliga broar där man bestämt sig för att byta ut bron, men av olika skäl vill utföra bytet längre fram. Brottmekaniska beräkningsmetoder kan också vara lämpligt att använda där det råder stor osäkerhet om tidigare lasthistoria, eftersom lasthistorien inte har någon effekt när inspektionsintervallet bestäms.



Figur 6.1 Flödeschema utmattningsberäkning

I figuren ovan framgår hur man kan agera om man vid traditionell utmattningsanalys finner att livslängden är uttömd eller bör förlängas. Som det framgår av figur 6.1 finns även möjlighet att kombinera brottmekanisk och probabilistisk analys, eftersom den brottmekaniska analysen sker iterativt i t. ex. MATLAB är det tilltalande att använda sig av Monte Carlo Simulering.

Säkerhetsindexmetoden

Vid beräkning med säkerhetsindexmetoden har mätningar från tiden då karakteristiskt värde på lasten enligt normen var 300 kN använts. För perioden då karakteristiskt värde på lasten enligt normen var 250 kN har lasten erhållits genom att skala ned mätresultaten med motsvarande förhållande. Detta är givetvis en approximation som vore intressant att verifiera med mätdata från en period då karakteristiskt värde på lasten enligt normen var 250 kN, om sådana finns. Hur man ska erhålla lasthistorian när inga mätningar finns är en fråga för både traditionell delskadeanalys och

alternativa beräkningsmetoder. För framtiden finns det dock möjligheten att använda sig av fler mätstationer.

Vid användning av säkerhetsindexmetoden måste S-N kurvan beskrivas med hjälp av flera ekvationer för att även få med utmattningsgränsen. Utmattningsgränsen för svetsade detaljer kan flyttas signifikant vid variabel spänningsamplitud och kan därför uteslutas. Dessutom uppstår matematiska svårigheter då en variabel har sin spridning in i två områden med olika lutning på S-N kurvan. Sammantaget är det därför motiverat att använda sig av konstant lutning och således kunna beskriva S-N kurvan med endast en ekvation, trots att detta är mycket på säker sida.

De normer och rekommendationer som finns idag för material- och modellosäkerheter vid användande av säkerhetsindexmetoden förefaller inte vara anpassade till utmattnings utan till brottfenomen som uppträder vid engångsöverträdelser av last (brottgränstillstånd). T. ex. är det ju uppenbart att en uppförstoring av lastens standardavvikelse med 20 % av de uppmätta lasternas 98% fraktil (ca 50 kN för lastade axlar) är orimligt stor i utmattningssammanhang. För att kunna använda säkerhetsindexmetoden i större utsträckning behövs det därför t. ex. upprättas ett "Guideline Document" motsvarande det som danska vägverket tagit fram fast även med inriktning på utmattnings.

Brottmekanisk analys

Vid den brottmekaniska beräkningen har linjär elastisk brottmekanik (LEFM) använts, denna förenklade modell ger konservativa resultat. Vidare har en genomgående spricka antagits i stället för ytspricka, vilket också är konservativt. Dessa antaganden kan delvis motiveras genom att vi har använt brottmekaniska beräkningsmetoder för att bestämma ett erforderligt inspektionsintervall och alltså inte är intresserade av sprickinitieringsfasen utan endast spricktillväxtsfasen. Av samma anledning har tröskelvärde på spänningsintensitetsfaktorn för spricktillväxt, K_{TH} , ej beaktats då spänningsintensitetsfaktorn vid vår antagna initiala spricklängd klart överskrider tröskelvärde.

När det gäller materialkonstanterna K_c och C så verkar skillnaden vara stor mellan stål producerade vid olika tidsepoker, det är därför viktigt att fastställa vilken typ av stål som gäller i varje enskilt fall. För riktigt gamla broar är det nog rimligt att föreslå provning av material från bron. Vid ansättning av K_c är det lämpligt att ange gränsen på motsvarande sätt som Canadian National Railways har gjort, d.v.s. i form av ett högsta tillåtna värde på K ($44 \text{ MPa}\sqrt{m}$) för en upptäckt spricka. På så sätt ges en viss tid för att reparera eller byta ut bron. Eftersom en sådan ansättning av K_c i någon mening definierar ett bruksgränstillstånd kan man tycka att justering av K_c med någon ytterligare säkerhetsfaktor är överflödig. Eftersom det ställs högre krav på brottsannolikheten för sprödbrott är det viktigt att kontrollera noggrant vilken brottmod som blir dimensionerande, sprött brott kan vara dimensionerande trots att sannolikheten för segt brott är betydligt större.

För att bestämma inspektionsintervall har ett värde på sprickdetekteringskonstanten A resonerats fram till 5 mm, innebärande att man antar att sannolikheten för att hitta en spricka mindre än 10 mm är noll samt att sannolikheten att hitta en spricka som är 20

mm lång är 50 %. Sprickdetekteringskonstanten beror givetvis på tillgängligheten för inspektion, val av inspektionsmetod samt många andra faktorer och bör givetvis bedömas i varje enskilt fall.

7 Slutsatser

Vår analys visar att utmattningskontroll med avseende på typiserat spänningskollektiv som är ett alternativ i Banverkets standard BVS 583.11 kan ge resultat som är klart på osäker sida.

Våra beräkningar utförda med delskadeanalys som också är ett alternativ i BVS 583.11, visar att referensbron med avseende på den analyserade detaljen (kanten på kontinuitetsplåten) behövde repareras eller bytas ut ungefär år 1977. Bron är i drift idag och inga utmattningssprickor har upptäckts.

Genom att statistiskt analysera mätdata från Banverkets mätstation i Krokvik har lasterna på referensbron kunnat beskrivas mer verklighetstroget. Bland annat har en korrelation mellan axellast och dynamikkoefficient påvisats innebärande att dynamikkoefficienten är låg för höga axellaster. Delskadeberäkning med avseende på kanten på kontinuitetsplåten har utförts med säkerhetsindexmetoden, vilket gav att den beräknade utmattningstidslängden kunde förlängas till 2009 med tillräcklig säkerhet.

Brottmekanisk analys av kanten på kontinuitetsplåten har utförts med antagande om en initiell spricklängd på 10 mm. Beräkningarna visar att det tar ca 17 år för sprickan att växa till kritisk längd och att om ett inspektionsintervall på 400 000 cykler (ca 1.75 år) tillämpas är sannolikheten för brott tillräckligt låg. Detta innebär att broar vars utmattningstidslängd beräknas vara uttömd kan fortsätta att trafikeras med tillräckligt hög säkerhet under förutsättning att brotmekanisk analys utförs på utmattningskritiska detaljer och att lämpliga inspektionsintervall föreskrivs.

För att kunna tillämpa de alternativa beräkningsmetoderna i praktiska beräkningar är det av stor vikt att det upprättas ett dokument med riktlinjer och förtydliganden.

8 Referenser

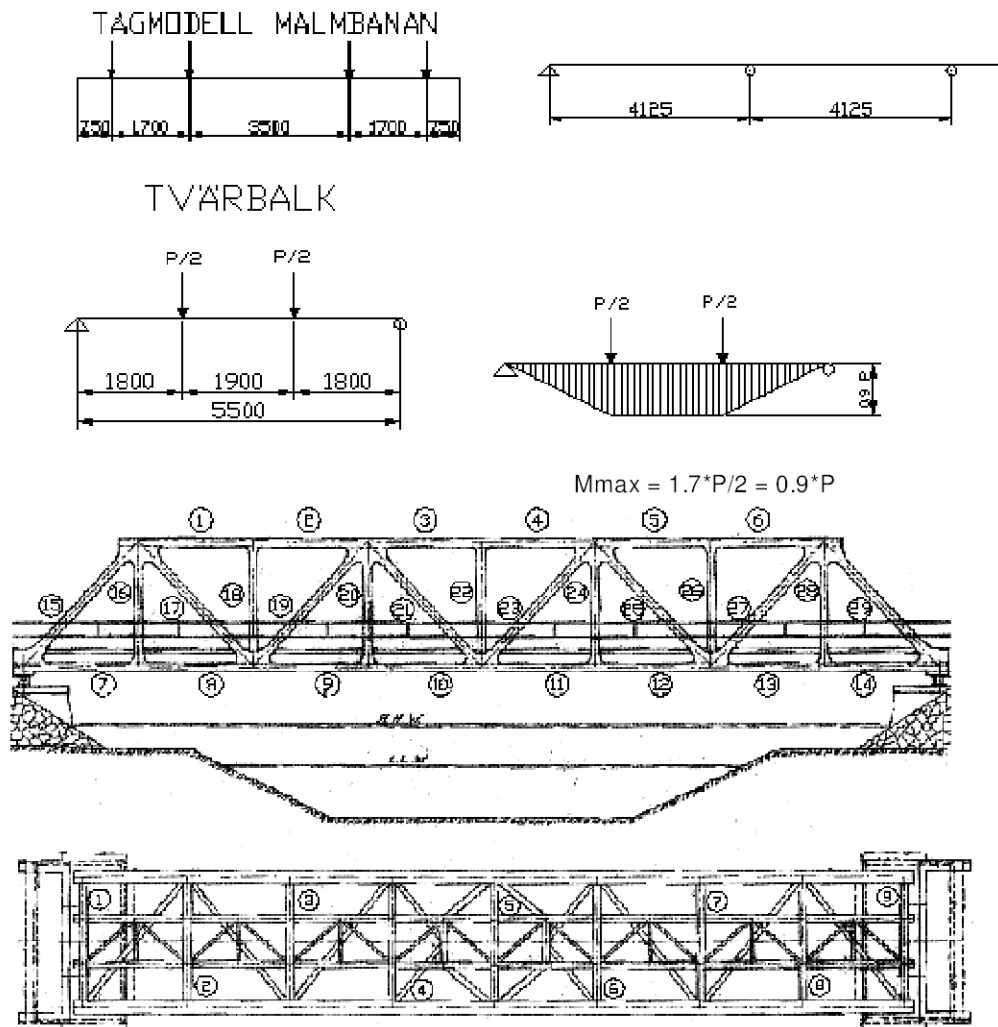
- Akgül, F., Frangopol D.M.: *Reliability Detoriation Prediction of an Existing Bridge Using a Probability-based Analysis Tool*, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, USA.
- Al-Emrani, M. (2005): *En förstudie Rörande Utmattningshållfasthet hos Svetsade Brodetaljer av Stål*, Institutionen för bygg- och miljöteknik, Avdelningen för konstruktionsteknik, Stål- och träbyggnad, Chalmers Tekniska Högskola.
- American Institute of Steel Construction (1963): *Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges*, New York, USA.
- Axhag, F.K.E., Enevoldsen, I., Paulsson, B.: *Application of Probability-based Assesment of Railway Bridges in Sweden*.
- Banverket (2005): *Bärighetsberäkning av Järnvägsbroar BVS 583.11*, Banverket, Borlänge, Sverige.
- Banverket (2003): *Sikkerhedsindeksmetoden, Eksempel på bæreevneberegning for stålbro over Södra Rautasjokk, Km 1432+883 på Malmbanan*, Banverket, Borlänge, Sverige.
- Barsom, J., Rolfe, S. (1999): *Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics*. Butterworth-Heinemann, Woburn, USA, 516 pp.
- Bjerrum, J., Enevoldsen, I., O'Connor, A.J.: *Probabilistic-based Assessment of The Klovtofte Bridges*.
- Boverket (1999): *Boverkets Handbok om Stålkonstruktioner BSK 99*, Boverket, Karlskrona, Sverige.
- Boverket (2003): *Regelsamling för Konstruktion – Boverkets Konstruktionsregler BKR*, Boverket, Karlskrona, Sverige.
- Brühwiler, E., Kunz, P. (1993): *Remaining Service Life of a Riveted Railway Bridge*. Proceedings, IABSE – Colloquium “Remaining Structural Capacity”, Copenhagen, Denmark, March 17-19, 1993.
- De Castro, P.T., Fernandes, A.A., Oliviera, F.: *Structural Integrity Evaluation of Highway riveted bridges*. Faculty of Engineering, University of Porto, Portugal.
- De Maré, J., Johannesson, P. (2004): *Föreläsningssanteckningar i Problemdriven Statistikkurs – Utmattning, Belastning och Tillförlitlighet*. Fraunhofer Chalmers Research Centre Industrial Mathematics, 50 pp.
- Ditlevsen, O., Madsen, H.O. (1996): *Structural Reliability Methods*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 372 pp.

- Enevoldsen, I., Hededal, P. (2001): Sikre besparelser ved sandsynlighedsbaserede beregningsmetoder. *Dansk Vejtidskrift*, No. 1, 2001, pp. 36-37.
- Enevoldsen, I., Lauridsen, J., Sloth, M.: *Danish Guideline for Probability-based Assessment of Bridges*.
- Engesvik, K. (1988): *Assessment of Condition and Future Service Life of a Railway Bridge*.
- ENV 1993-1-1 (1993): *Eurocode 3 Design of Steel Structures – General Rules*, CEN.
- ENV 1993-1-9 (1993): *Eurocode 3 Design of Steel Structures – Fatigue Strength of Steel Structures*, CEN.
- ENV 1993-1-10 (1993): *Eurocode 3 Design of Steel Structures – Selection of Material for Fracture Toughness and Through Thickness Properties*, CEN.
- Eriksson, K. (1992): *Brottseghet hos Konstruktionsstål vid Förhöjd Belastningshastighet. Interrimsrapport*. Hållfasthetslära, LuTH.
- ESDEP 2005.
- ESDEP 1994.
- Faber, M.H., Hommel, D.L., Prato, C.A., Sloth, M.: *Probability-based Capacity Assessment of The Zárate-Brazo Largo Bridges During Rehabilitation*.
- Gerard, J. (2001): *Raising Allowable Axle Loads on Railway Bridges using Simulation and Field Data*. KTH, Universitetsservice US AB, Stockholm, 148 pp.
- Gurney, T.R., Maddox, S.J. (1973): A Re-analysis of Fatigue Data for Welded Joints in Steel. *Welding Research International*, Vol. 3, No. 4, 1973, pp. 1-54.
- Hensen, W., Sedlacek, G. (1995): *New assessment methods for the residual safety of old steel bridges*. Nordic Steel Constructions Conference 95.
- Hirt, M.A., Kunz, P., *Reliability analysis of steel railway bridges under fatigue loading*. Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland.
- Hirt, M.A., Kunz, P. (1992): *Optimisation of inspection intervals with respect to remaining fatigue life*. ICOM – Construction Métallique, Lausanne, Switzerland.
- Joint Committee on Structural Safety, JCSS (2000): *Probabilistic Model Code*.
- Lassen, T., Sørensen, J.D. (2002): A probabilistic damage tolerance concept for welded joints Part 1: data base and stochastic modelling. *Marine Structures*, Vol. 15, 2002, pp. 599-613.
- Lassen, T., Sørensen, J.D. (2002): A probabilistic damage tolerance concept for welded joints Part 2: a supplement to the rule based S-N approach. *Marine Structures*, Vol. 15, 2002, pp. 615-626.

- Lovejoy, S.C. (2003): Determining Appropriate Fatigue Inspection Intervals for Steel Bridge Members. *Journal of bridge engineering*, March/April, 2003, pp. 66-72.
- Madsen, H.O., Krenk, S., Lind, N.C. (1986): *Methods of Structural Safety*. Prentice-Hall, New Jersey, 403 pp.
- Melchers, R.E. (1987): *Structural Reliability, Analysis and Prediction*. Ellis Horwood Limited, Chichester, England, 400 pp.
- Nielsen, S.R.K., Sørensen, J.D., Sørensen, S.: *Fatigue Analysis of Casted Hubs in Wind Turbines*.
- Nordisk Komité for Bygningsbestemmelser, NKB (1978): *Recommendation for Loading- and Safety Regulations for Structural Design*, NKB-report No 36, 1978.
- Righiniotis, T.D., *Fatigue reliability assessment of bridge details based on maximum load specification*, School of Engineering, University of Surrey, Guildford, UK.
- Schijve, J. (2005): Statistical Distribution Functions and Fatigue of Structures. *International Journal of Fatigue*, Vol. 27. 2005, pp. 1031-1039.
- Sustainable Bridges (2005): *D4.2 Guideline for Load and Resistance Assessment of Existing European Railway Bridges*, Revision date 2005-09-22.
- The WAFO Group (2000): *WAFO, a MATLAB Toolbox for Analysis of Random Waves and Loads, Tutorial*, Lund University, Lund Institute of Technology, Centre for Mathematical Sciences, Mathematical Statistics, Lund, Sweden.
- Ueda, K., Hirose, T.: *Development of a Periodic Inspection System*, Osaka, Japan.
- Van Maarschalkerwaart, H.M.C.M. (1990): *Determination of Inspection Intervals for Riveted Structures*. Lausanne, Switzerland.
- Vejdirektoratet (2004): *Reliability-Based Classification of the Load Carrying Capacity of Existing Bridges, Guideline Document*, Vejdirektoratet, København, Danmark.

Moment & Spänningsberäkning

Momentberäkning för tvärbalkar



$$M = -3 \cdot P/32 = 0.094 \cdot P \cdot L$$

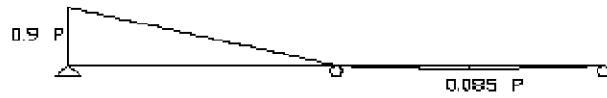
(Vinkeländringsmetoden)

$$R = M/L = 0.094 \cdot P$$

$$M' = 1.7 \cdot R/2 = 1.7 \cdot 0.094 \cdot P/2 = 0.085 \cdot P$$

Tvärbalk 1&9

Momentinfluenstillinje för tvärbalk 1



Antaganden:
Kontinuerlig längsbalk i
två spann och nästa
tvärbalk är helt
aeftergivlig

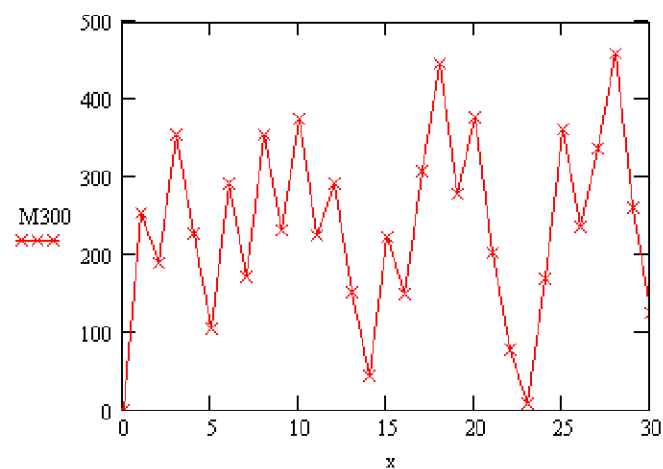
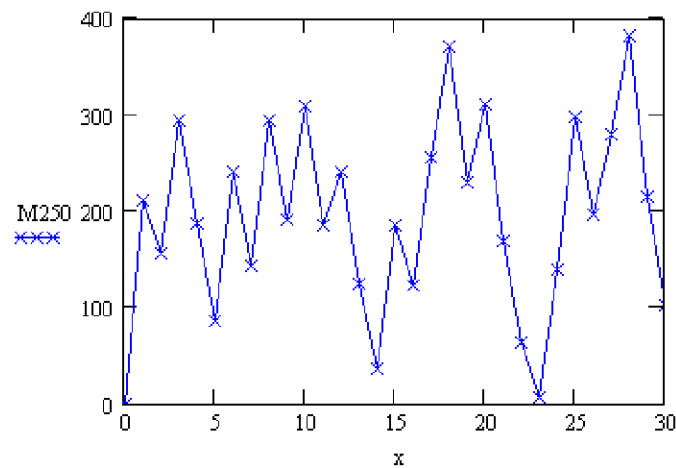
Tågmodell enligt BVS flyttas med 1 m i varje steg
Influenslinjeanalys med indata från AutoCad
Vektor med vagnläge

$x := (0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18 \ 19 \ 20 \ 21 \ 22 \ 23 \ 24 \ 25 \ 26 \ 27 \ 28 \ 29 \ 30)^T$

Perioden 1941 - 2000, axellast 250 kN
Utan dynamiskt tillskott
Perioden 2000 - , axellast 250 kN eller 300 kN
Vektor med moment

$M_{250} = (0 \ 211.25 \ 156.75 \ 294.75 \ 188.25 \ 86 \ 242 \ 143 \ 294.5 \ 192.5 \ 310.75 \ 186.75 \ 242 \ 125 \ 36.5 \ 186 \ 123.75 \ 255.75 \ 371.75 \ 231 \ 312.75 \ 168.75 \ 63.75 \ 7 \ 139.75 \ 299.75 \ 197 \ 279.75 \ 382.25 \ 216.25 \ 103.25)^T$

$M_{300} := M_{250} \cdot \frac{300}{250}$

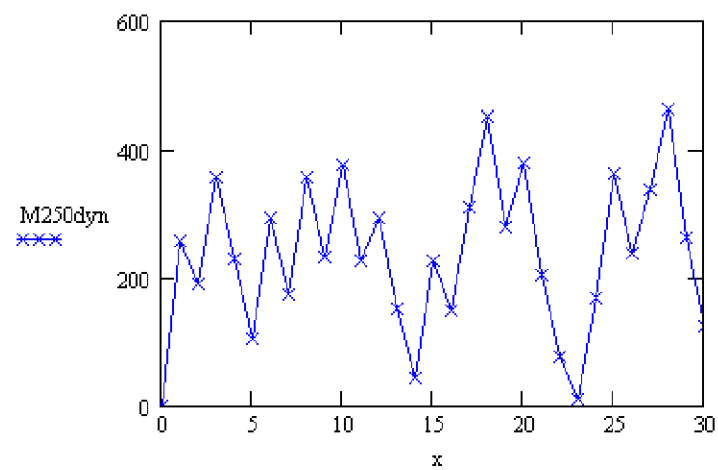


Bestämmande längd är dubbla längden på tvärbalken enligt tabell 5.5 BVS 583.11
Dynamikkoefficient för tvärbalk

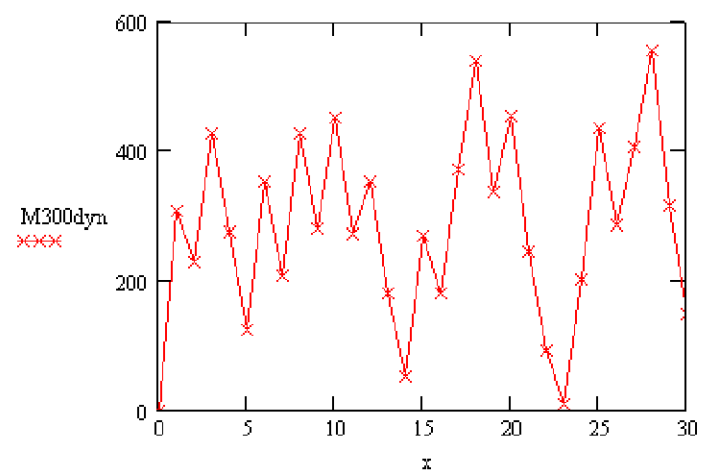
$$D := 1.0 + \frac{4}{(8 + 2 \cdot 5.5)}$$

$$D = 1.211$$

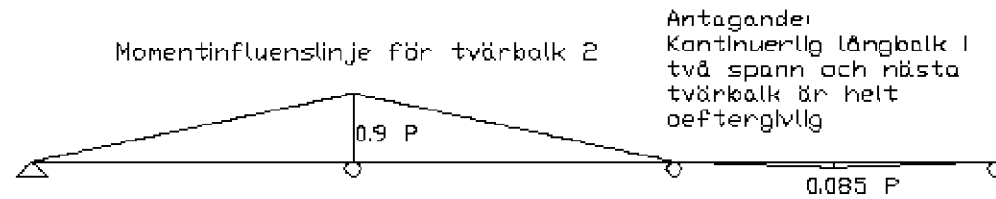
$$M250_{\text{dyn}} := D \cdot M250$$



$$M300_{\text{dyn}} := D \cdot M300$$



Tvärbalk 2&8



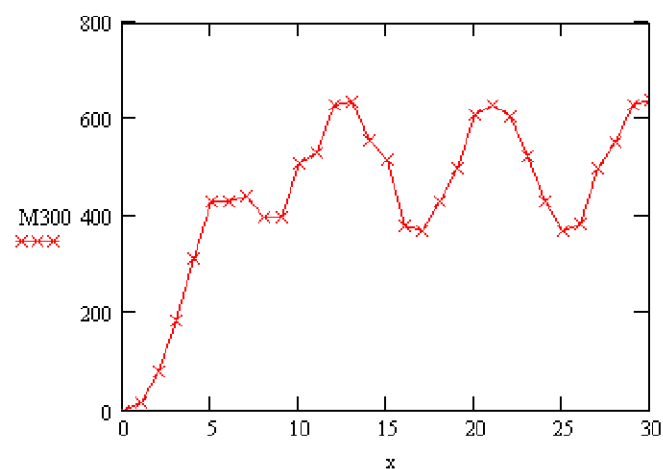
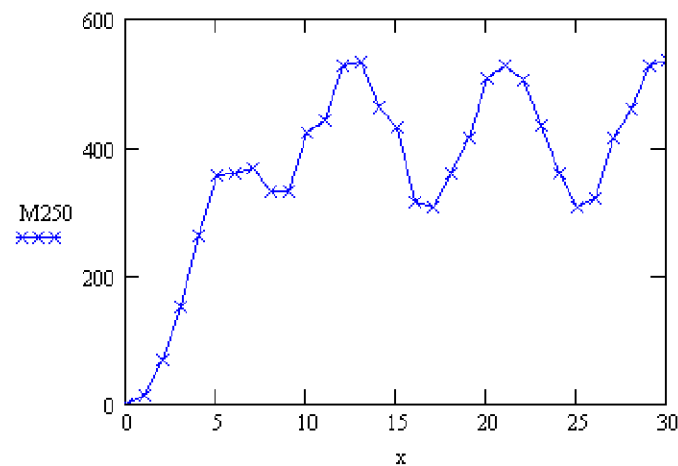
Tågmodell enligt BVS flyttas med 1 m i varje steg
Influenslinjeanalys med indata från AutoCad
Vektor med vagnläge

$x := (0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18 \ 19 \ 20 \ 21 \ 22 \ 23 \ 24 \ 25 \ 26 \ 27 \ 28 \ 29 \ 30)^T$

Perioden 1941 - 2000, axellast 250 kN
Utan dynamiskt tillskott
Perioden 2000 - , axellast 250 kN eller 300 kN
Vektor med moment
Momentinfluenslinjer för långbalkar

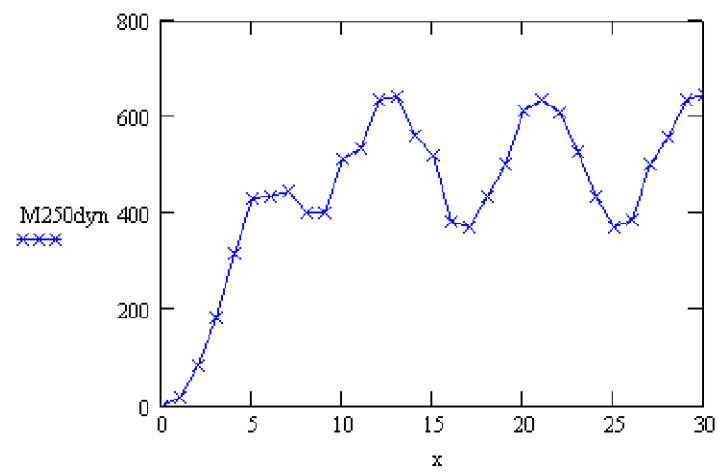
$M_{250} := (0 \ 13.75 \ 68.25 \ 152.75 \ 261.75 \ 357.25 \ 360 \ 368 \ 332.5 \ 332.75 \ 423.5 \ 443 \ 526 \ 532.25 \ 463.5 \ 430.75 \ 316 \ 307.5 \ 359.25 \ 414.75 \ 507 \ 526 \ 503 \ 436 \ 359 \ 308 \ 320 \ 415 \ 459 \ 526 \ 534)^T$

$M_{300} := M_{250} \cdot \frac{300}{250}$



$M_{250\text{dyn}} := D \cdot M_{250}$

$M_{300\text{dyn}} := D \cdot M_{300}$



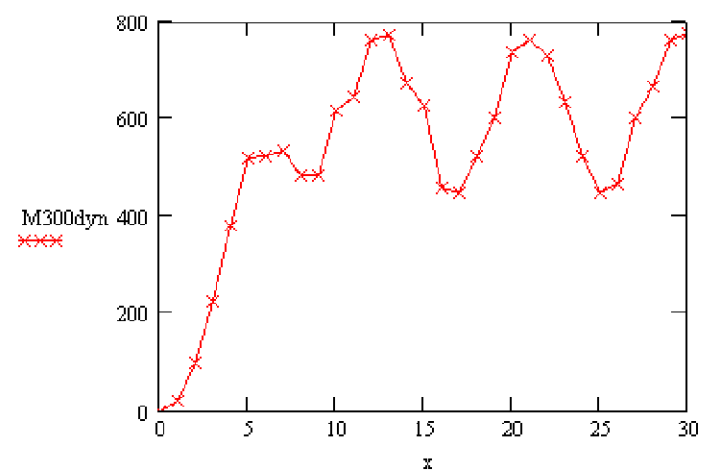
Moment till skarvanalys

$M_{250\text{TB2}} := M_{250}$

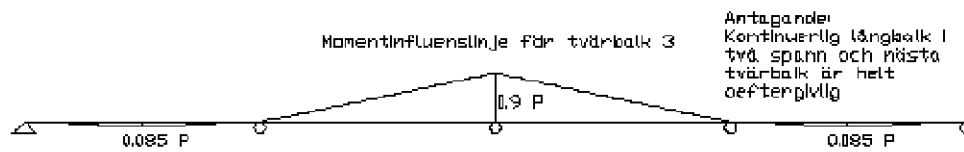
$M_{250\text{TB2dyn}} := M_{250\text{dyn}}$

$M_{300\text{TB2}} := M_{300}$

$M_{300\text{TB2dyn}} := M_{300\text{dyn}}$



Tvärbalk 3, 4, 5, 6 & 7

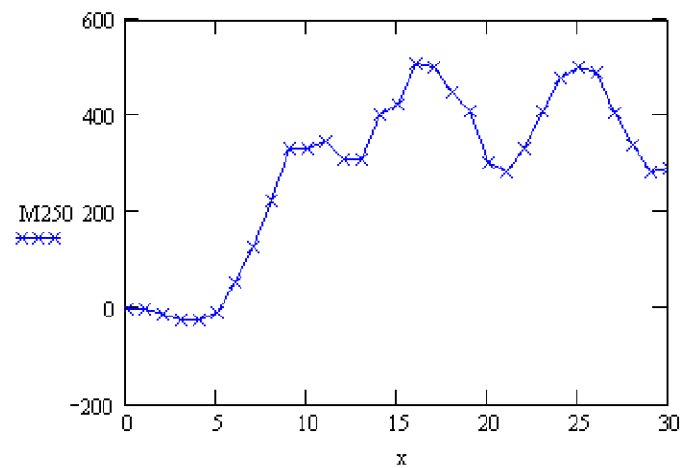


Tågmodell enligt BVS flyttas med 1 m i varje steg
Influenslinjeanalys med indata från AutoCad
Vektor med vagnläge

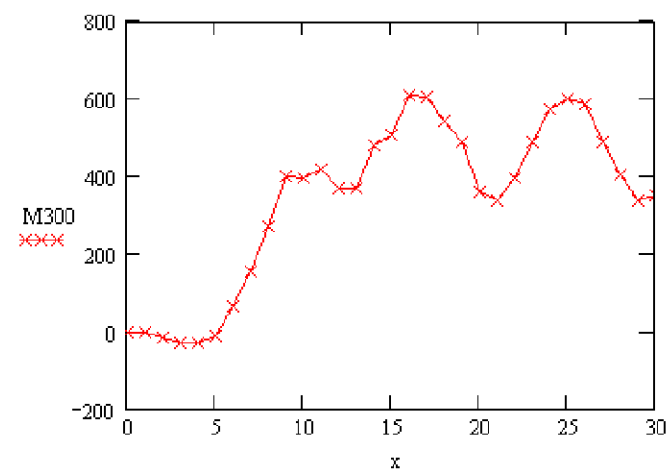
$x := (0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18 \ 19 \ 20 \ 21 \ 22 \ 23 \ 24 \ 25 \ 26 \ 27 \ 28 \ 29 \ 30)^T$

Perioden 1941 - 2000, axellast 250 kN
Utan dynamiskt tillskott
Perioden 2000 - , axellast 250 kN eller 300 kN
Vektor med moment
Momentinfluenstillinjer för långbalkar

$M_{250} := (0 \ -2.75 \ -13 \ -25 \ -25.25 \ -9.5 \ 55.25 \ 128.5 \ 224.25 \ 332.25 \ 330.25 \ 347 \ 307.5 \ 309.5 \ 400.75 \ 423.5 \ 509 \ 503.5 \ 451 \ 408 \ 300.25 \ 282.75 \ 331 \ 408.5 \ 480.25 \ 500.75 \ 490 \ 406.75 \ 338.75 \ 283 \ 292)^T$

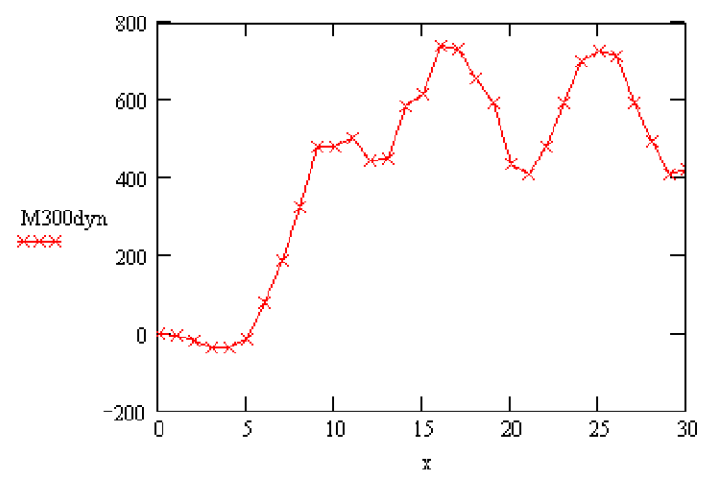
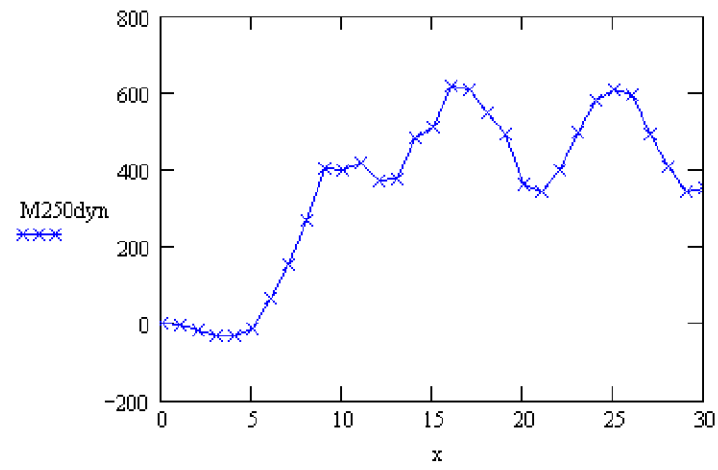


$$M_{300} := M_{250} \cdot \frac{300}{250}$$

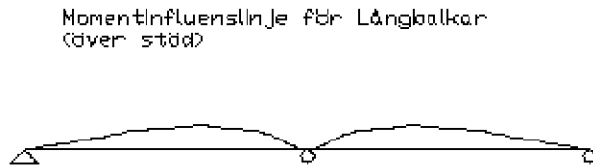


$M250_{\text{dyn}} := D \cdot M250$

$M300_{\text{dyn}} := D \cdot M300$



Momentberäkning för långbalkar Stödsnitt



Antagande:
Kontinuerlig långbalk i
två spann och nästa
tvärbalk är helt
oeftergivlig

Tågmodell enligt BVS flyttas med 1 m i varje steg

Influenslinjeanalys utförd med hjälp av ekvation (4.6) i Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges, AISI. Slutlig summering av moment över stöd har gjorts i Excel.

Ekvation (4.6),

$$\frac{M \cdot s}{s \cdot P} := -0.5 \cdot \frac{y}{s} + 0.8660 \cdot \left(\frac{y}{s}\right)^2 - 0.3660 \cdot \left(\frac{y}{s}\right)^3$$

Vektor med vagnläge

$$x := (0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18 \ 19 \ 20 \ 21 \ 22 \ 23 \ 24 \ 25 \ 26 \ 27 \ 28 \ 29 \ 30)^T$$

Perioden 1941 - 2000, axellast 250 kN

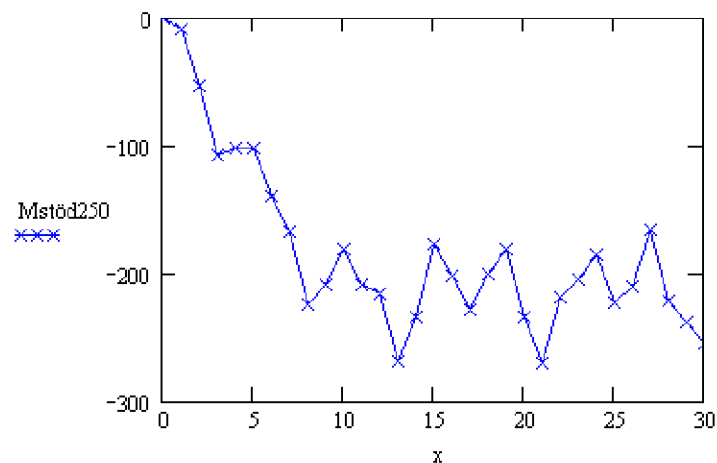
Utan dynamiskt tillskott

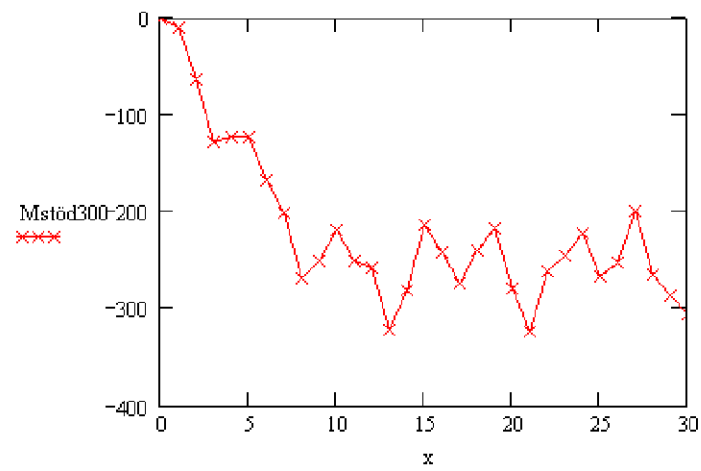
Perioden 2000 - , axellast 250 kN eller 300 kN

Vektor med moment

$$M_{\text{stöd250}} := (0 \ -8.85 \ -93.3 \ -107.1 \ -112 \ -101.5 \ -138.9 \ -167.5 \ -222.8 \ -209.5 \ -181.7 \ -208.5 \ -215.4 \ -208.5 \ -234.1 \ -177.7 \ -201.9 \ -228.8 \ -200.5 \ -180.9 \ -233.5 \ -273.5 \ -218.7 \ -204.8 \ -185 \ -222.3 \ -213.4 \ -165.4 \ -221.2 \ -238.3 \ -255)^T$$

$$M_{\text{stöd300}} := M_{\text{stöd250}} \cdot \frac{300}{250}$$





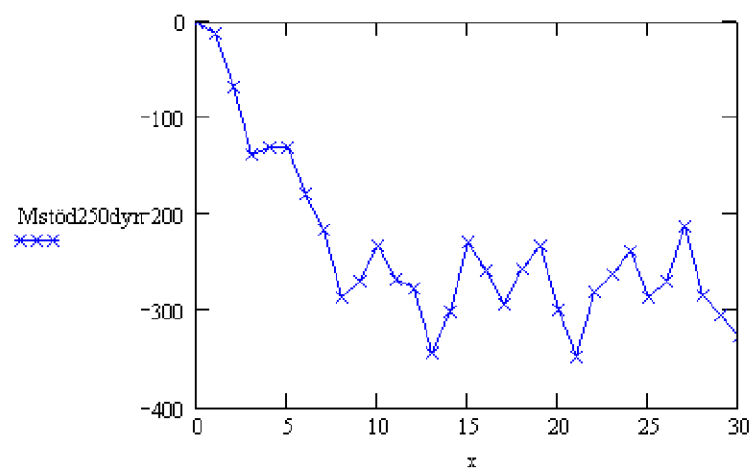
Bestämmande längd är $1,5 \cdot$ längden på långbalken, ty kontinuerlig i 5 spann eller mer enligt tabell 5.5
 BVS 583.11
 Dynamikoefficient för långbalk

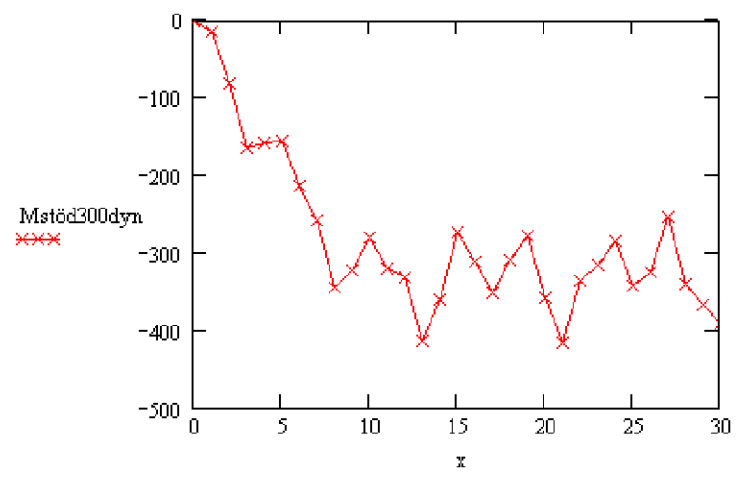
$$D := 1.0 + \frac{4}{(8 + 1.5 \cdot 4.125)}$$

$$D = 1.282$$

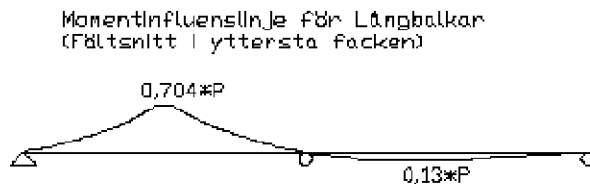
$$Mstöd250dyn := D \cdot Mstöd250$$

$$Mstöd300dyn := D \cdot Mstöd300$$





Momentberäkning för långbalkar Fältsnitt i yttersta facken



Antagande:
Kontinuerlig långbalk i
två spann och nästa
tvärbalk är helt
aeftergivlig

Tågmodell enligt BVS flyttas med 1 m i varje steg

Influenslinjeanalys utförd med hjälp av ekvation (4.8) och (4.9) i Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges, AISC. Slutlig summering av moment över stöd har gjorts i Excel.

Ekvation (4.8),

$$\frac{M \cdot s}{s \cdot P} := 0.183 \cdot \frac{y}{s} + 0.3170 \cdot \left(\frac{y}{s} \right)^2$$

Ekvation (4.9),

$$\frac{M \cdot s}{s \cdot P} := -0.183 \cdot \frac{y}{s} + 0.3170 \cdot \left(\frac{y}{s} \right)^2 - 0.1340 \cdot \left(\frac{y}{s} \right)^3$$

Vektor med vagnläge

$x := (0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18 \ 19 \ 20 \ 21 \ 22 \ 23 \ 24 \ 25 \ 26 \ 27 \ 28 \ 29 \ 30)^T$

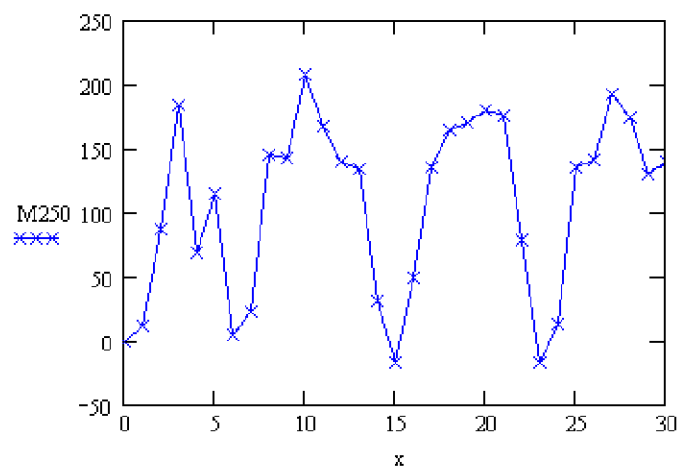
Perioden 1941 - 2000, axellast 250 kN

Utan dynamiskt tillskott

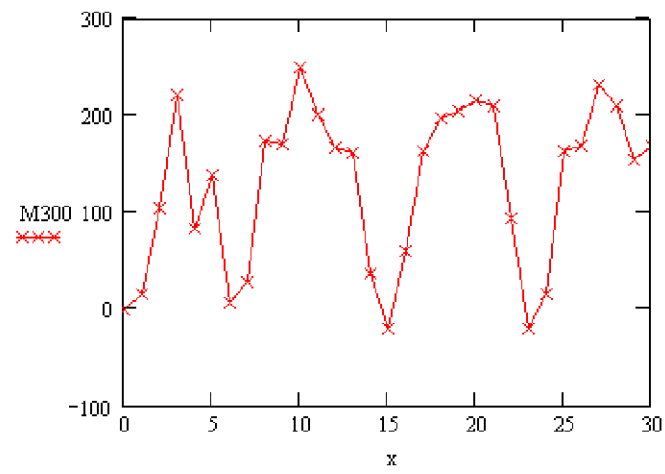
Perioden 2000 - , axellast 250 kN eller 300 kN

Vektor med moment

$M250 := (0 \ 12.2 \ 87.2 \ 184.3 \ 68.5 \ 114.7 \ 5.1 \ 23.2 \ 144.6 \ 142 \ 207.4 \ 166.7 \ 139.7 \ 134.4 \ 30.9 \ -17.3 \ 49.7 \ 136.1 \ 164.1 \ 170.3 \ 179.7 \ 175.4 \ 77.9 \ -17.3 \ 12.7 \ 135.7 \ 140.9 \ 192.5 \ 174.3 \ 129.3 \ 139.9)^T$

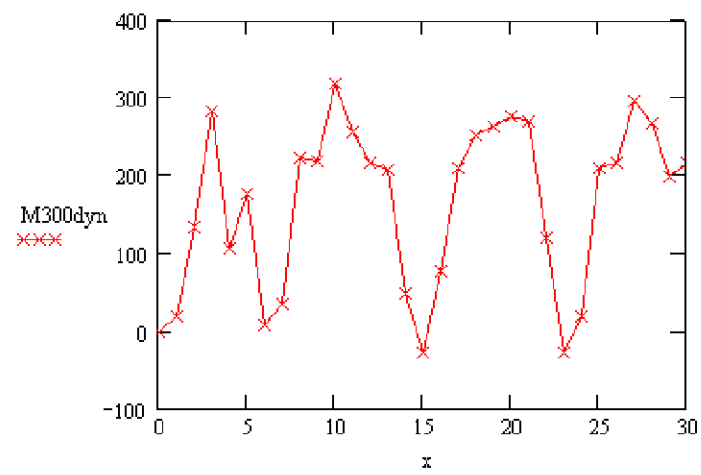
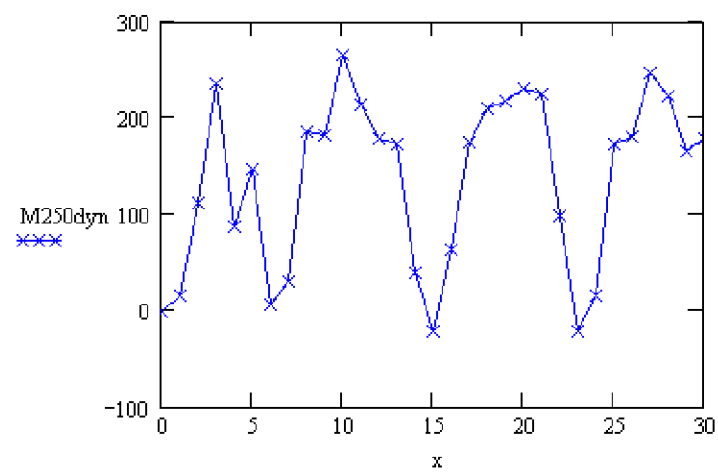


$$M300 := M250 \cdot \frac{300}{250}$$



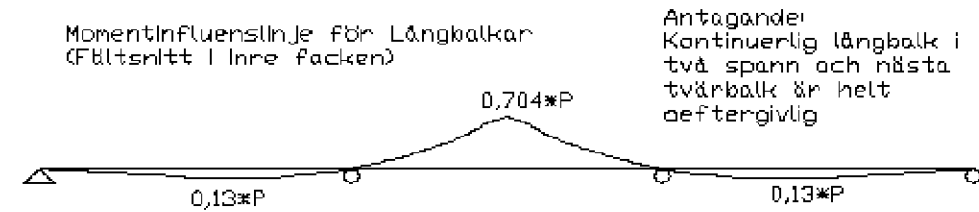
$M250_{\text{dyn}} := D \cdot M250$

$M300_{\text{dyn}} := D \cdot M300$



Momentberäkning för långbalkar

Fältsnitt i inre facken



Tågmodell enligt BVS flyttas med 1 m i varje steg

Influenslinjeanalys utförd med hjälp av ekvation (4.8) och (4.9) i Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges, AISI. Slutlig summering av moment över stöd har gjorts i Excel.

$$\frac{M \cdot s}{s \cdot P} := 0.183 \cdot \frac{y}{s} + 0.3170 \cdot \left(\frac{y}{s} \right)^2$$

Ekvation (4.8),

Ekvation (4.9),

$$\frac{M \cdot s}{s \cdot P} := -0.183 \cdot \frac{y}{s} + 0.3170 \cdot \left(\frac{y}{s} \right)^2 - 0.1340 \cdot \left(\frac{y}{s} \right)^3$$

Vektor med vagnläge

$$x := (0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18 \ 19 \ 20 \ 21 \ 22 \ 23 \ 24 \ 25 \ 26 \ 27 \ 28 \ 29 \ 30)^T$$

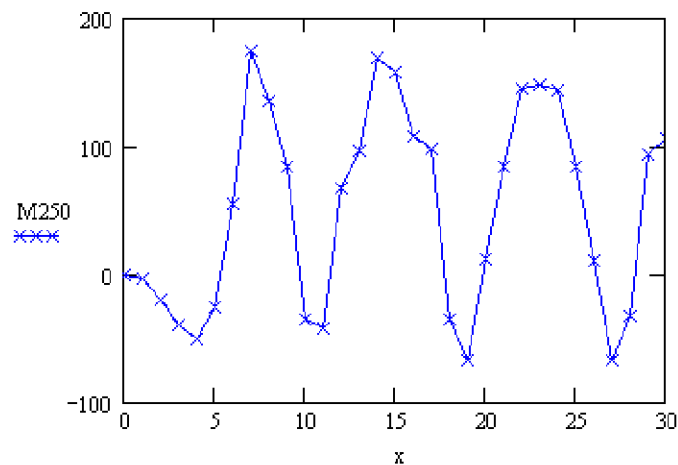
Perioden 1941 - 2000, axellast 250 kN

Utan dynamiskt tillskott

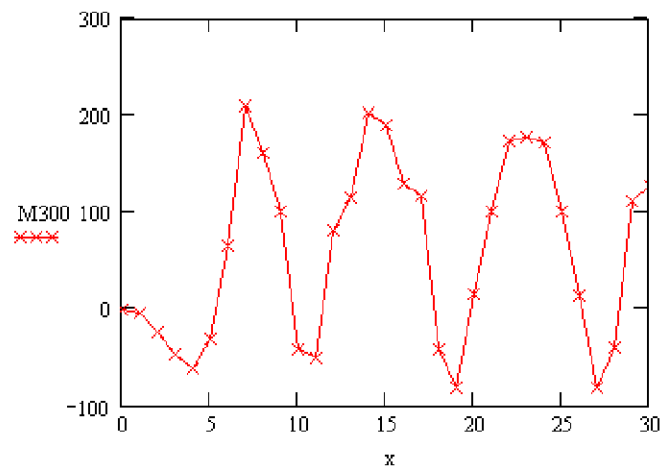
Perioden 2000 - , axellast 250 kN eller 300 kN

Vektor med moment

$$M250 := (0 \ -33.5 \ -19.5 \ -39.2 \ -50.7 \ -26.1 \ 54.8 \ 17.5 \ 134.9 \ 84 \ -35.3 \ -42.7 \ 87.4 \ 96.6 \ 168.4 \ 157.9 \ 107.8 \ 97.3 \ -35.2 \ -87.9 \ 12.5 \ 84.3 \ 145.8 \ 148.3 \ 144.2 \ 84.6 \ 10.6 \ -87.4 \ -33 \ 93.3 \ 106.5)^T$$

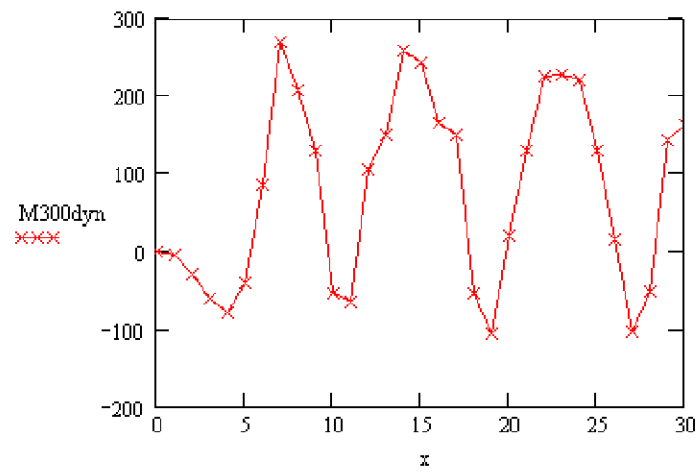
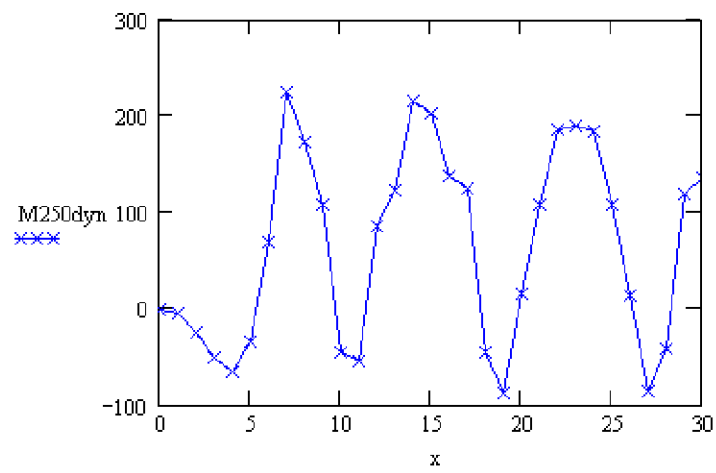


$$M300 := M250 \cdot \frac{300}{250}$$



$$M250_{\text{dyn}} := D \cdot M250$$

$$M300_{\text{dyn}} := D \cdot M300$$



Momentberäkning i tvärbalkskarv

Skarven är 1,2 m in från huvudfackverket varför momentet i skarven blir i TB 2:

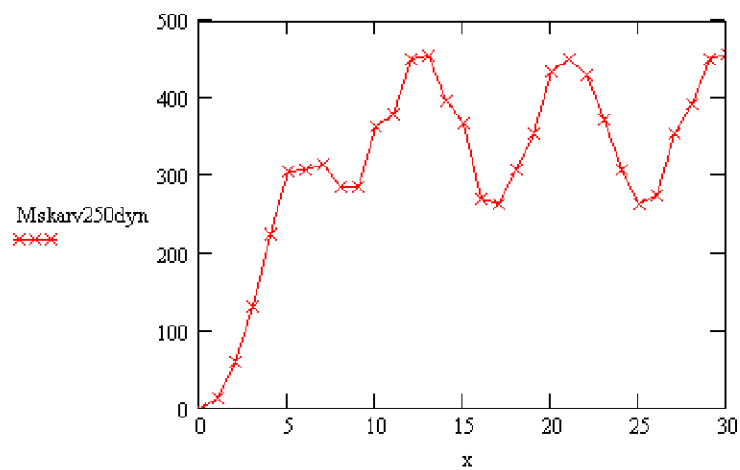
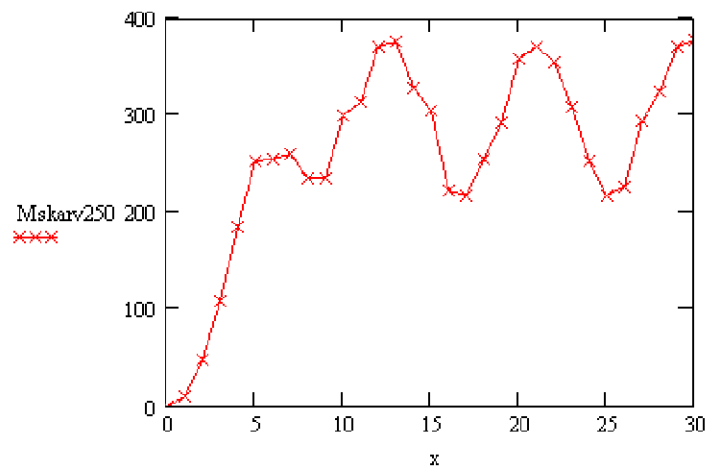
$$M_{\text{skarv250}} := M_{250\text{TB2}} \cdot \frac{1.2}{1.7}$$

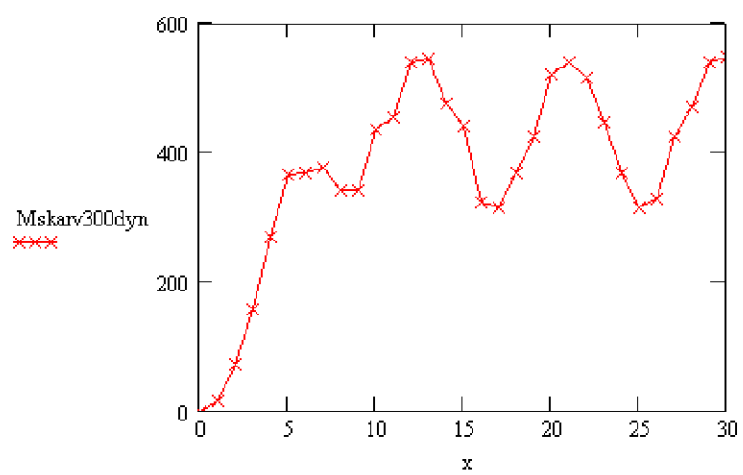
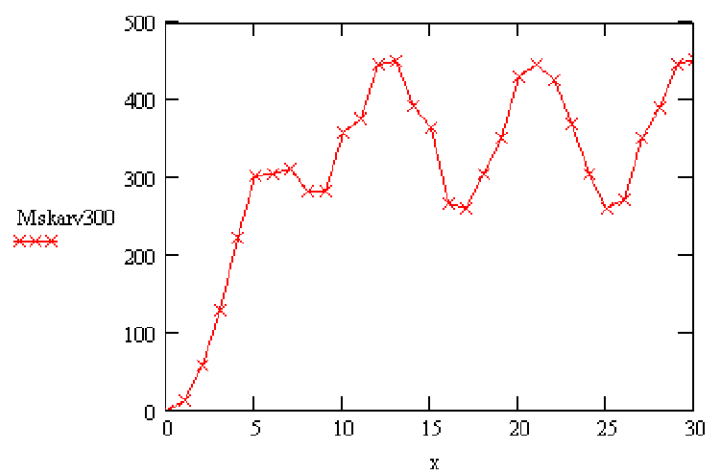
under antagande om att tvärbalken är fritt upplagd på huvudfackverken vilket är på säker sida

$$M_{\text{skarv250dyn}} := M_{250\text{TB2dyn}} \cdot \frac{1.2}{1.7}$$

$$M_{\text{skarv300}} := M_{300\text{TB2}} \cdot \frac{1.2}{1.7}$$

$$M_{\text{skarv300dyn}} := M_{300\text{TB2dyn}} \cdot \frac{1.2}{1.7}$$





Spänningsberäkning i tvärbalkskarv

Tvärbalken är en Dip 80, vilket ungefär motsvaras av en HEB 800
Böjmotstånd

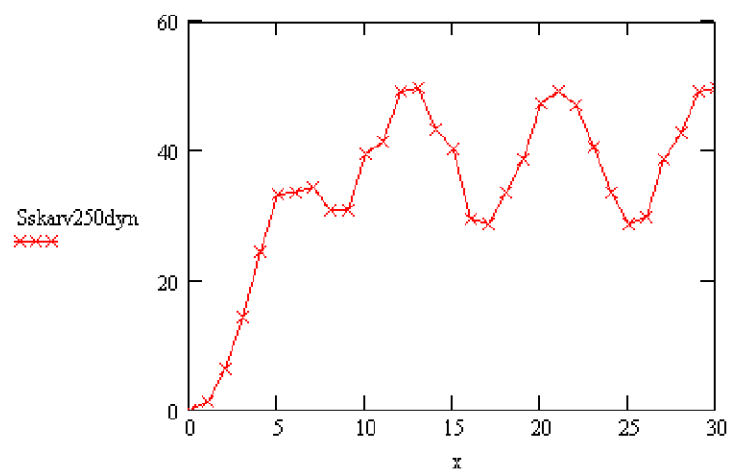
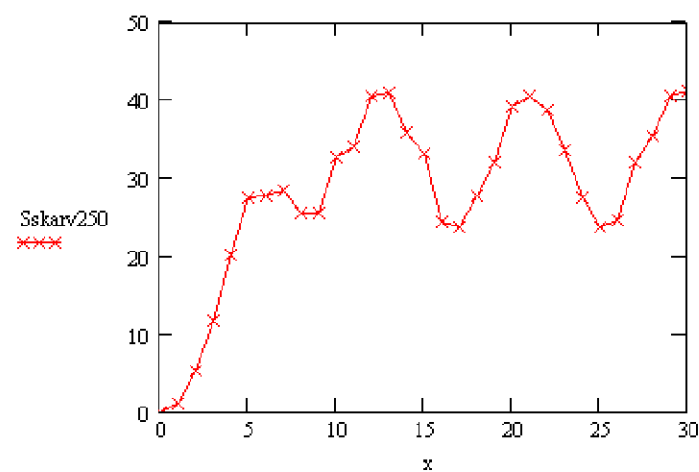
$$W_{tb} := 9.16$$

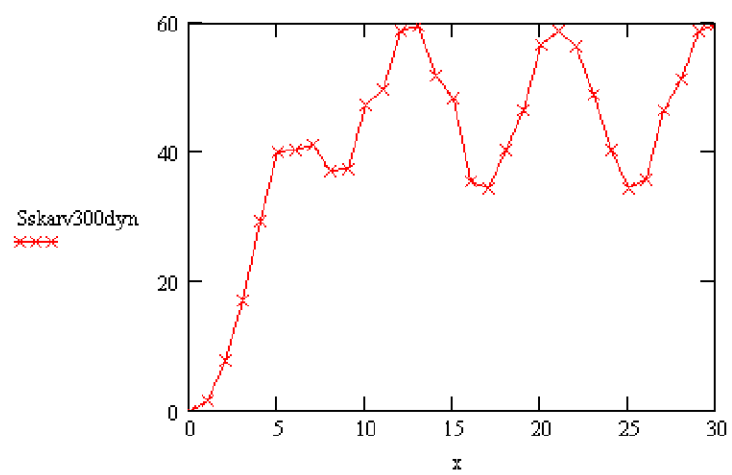
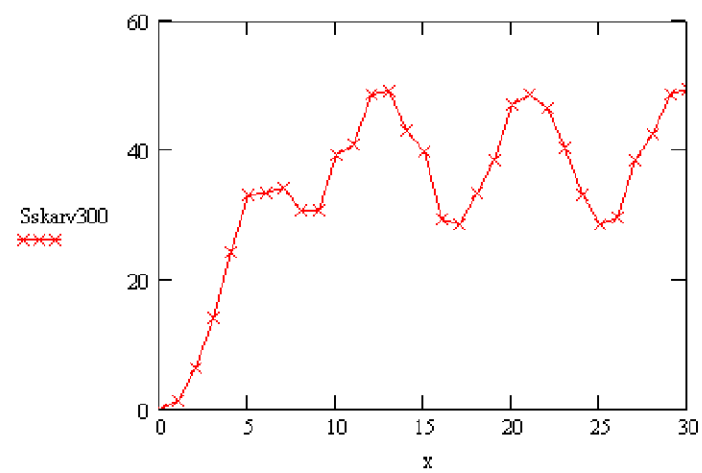
$$S_{skarv250} := \frac{M_{skarv250}}{W_{tb}}$$

$$S_{skarv250dyn} := \frac{M_{skarv250dyn}}{W_{tb}}$$

$$S_{skarv300} := \frac{M_{skarv300}}{W_{tb}}$$

$$S_{skarv300dyn} := \frac{M_{skarv300dyn}}{W_{tb}}$$





Spänningsberäkning i kontinuitetsplåt över stöd

Sprickmod nr 52 (mitt över stödet), har C-klass 50 men större spänning än sprickmod 48 vid kontinuitetsplåtens kant som har c-klass 45 men lägre spänning, därför undersöks vilken som blir dimensionerande.

Långbalken är en Dimel 55, vilket ungefär motsvarar en HEA 550

Böjmotstånd

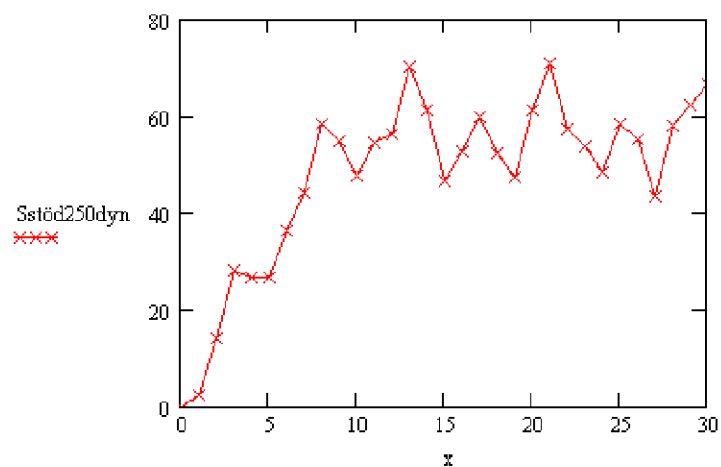
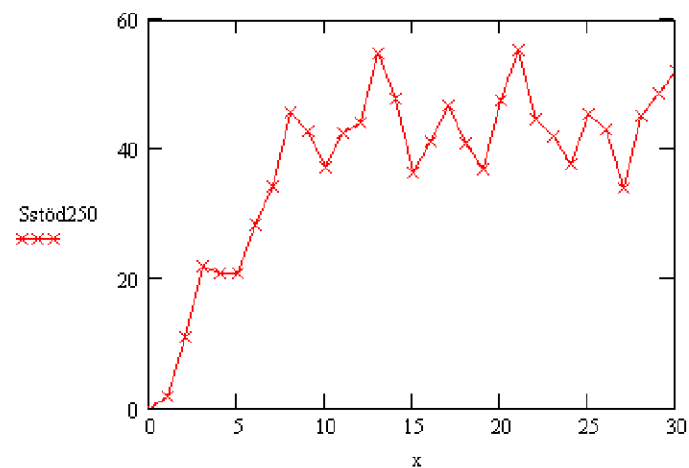
$$W_{lb} := 4899$$

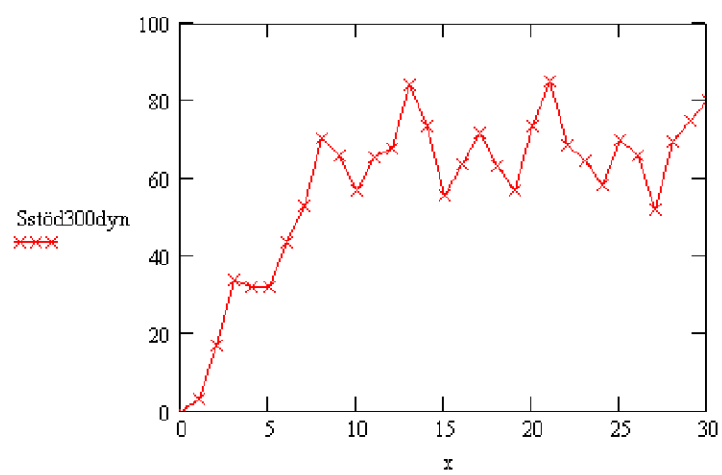
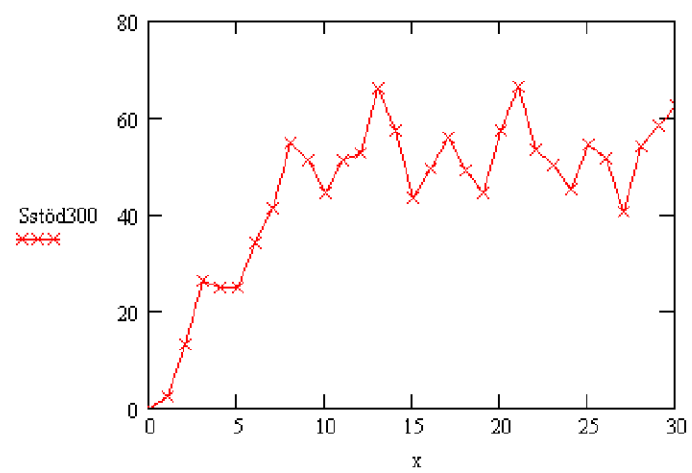
$$S_{stöd250} := \frac{-M_{stöd250}}{W_{lb}}$$

$$S_{stöd250dyn} := \frac{-M_{stöd250dyn}}{W_{lb}}$$

$$S_{stöd300} := \frac{-M_{stöd300}}{W_{lb}}$$

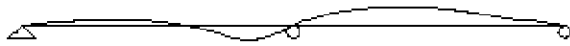
$$S_{stöd300dyn} := \frac{-M_{stöd300dyn}}{W_{lb}}$$





Momentberäkning vid kontinuitetsplåtens kant

Momentinfluenstillinje för Långbalkar
<I kanten på kontinuitetsplåten>



Antagande:
Kontinuerlig långbalk i
två spann och nästa
tvärbalk är helt
oeftergljvlig

Vektor med vagnläge

$x := (0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18 \ 19 \ 20 \ 21 \ 22 \ 23 \ 24 \ 25 \ 26 \ 27 \ 28 \ 29 \ 30)^T$

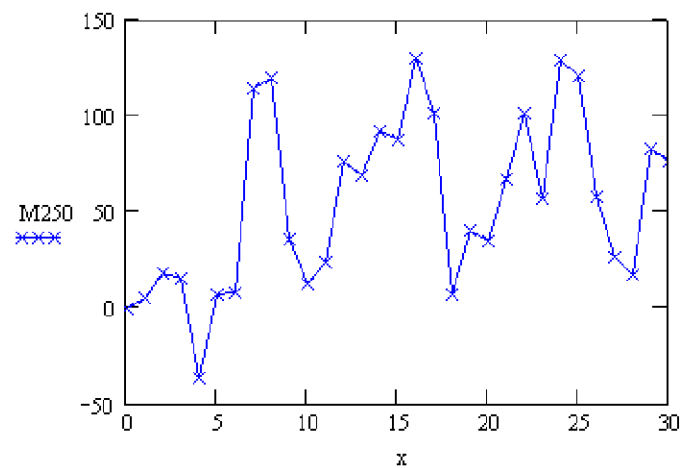
Perioden 1941 - 2000, axellast 250 kN

Utan dynamiskt tillskott

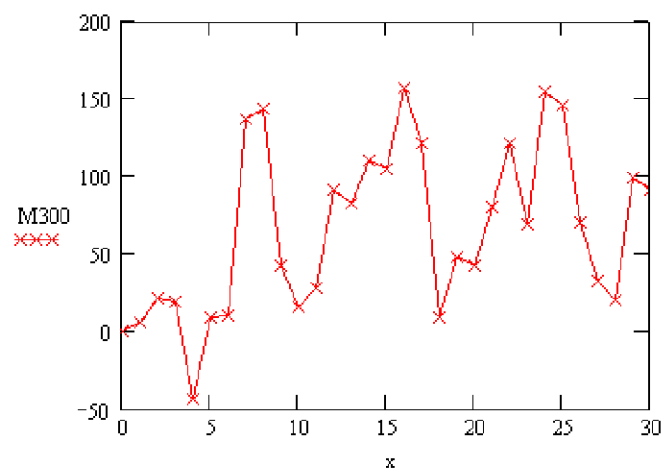
Perioden 2000 - , axellast 250 kN eller 300 kN

Vektor med moment

$M_{250} = (0 \ 4.75 \ 17.75 \ 15.25 \ -36.25 \ 6.75 \ 8 \ 114.5 \ 119.5 \ 35.5 \ 12.75 \ 23.25 \ 76 \ 68.75 \ 92.25 \ 87.5 \ 130.5 \ 101 \ 7 \ 40 \ 35 \ 67 \ 101 \ 57.25 \ 129 \ 121.25 \ 58.25 \ 26.75 \ 16.75 \ 82.75 \ 76.25)^T$

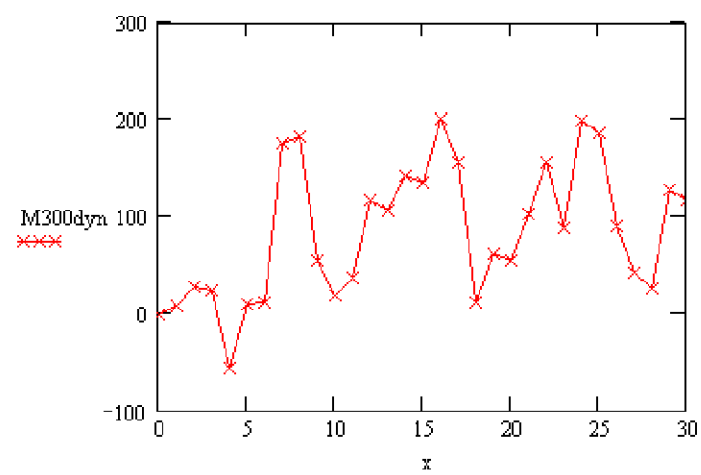
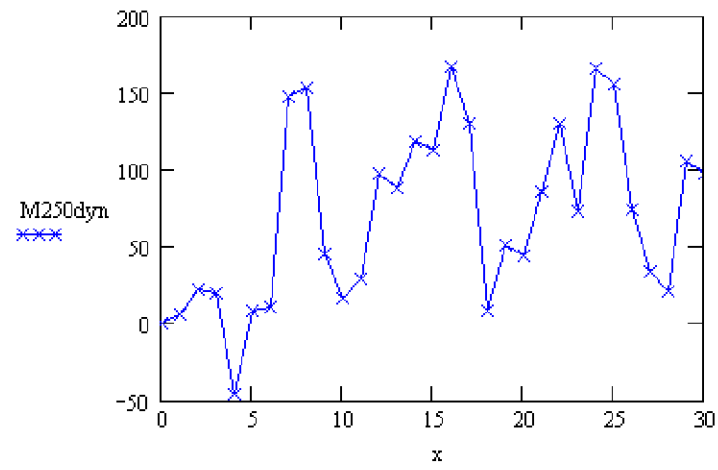


$$M_{300} := M_{250} \cdot \frac{300}{250}$$



$M250_{dyn} := D \cdot M250$

$M300_{dyn} := D \cdot M300$



Spänningsberäkning vid kontinuitetsplåtens kant

Långbalken är en Dimel 55, vilket ungefär motsvarar en HEA 550
Böjmotstånd

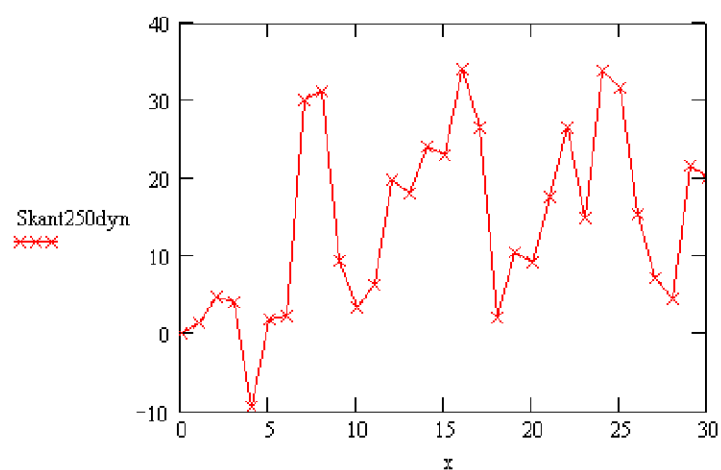
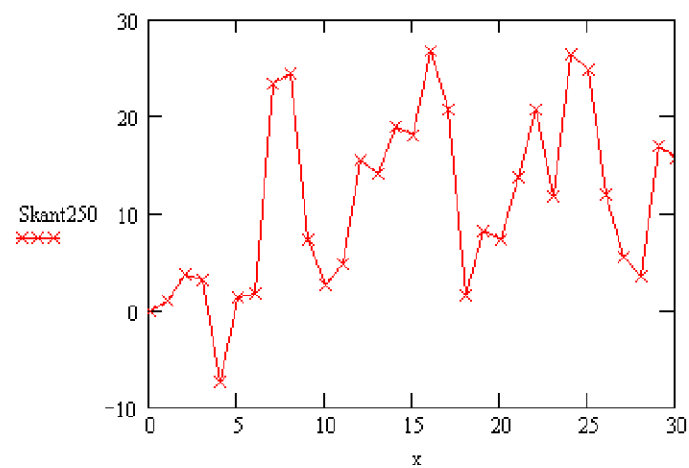
$$W_{lb} := 4899$$

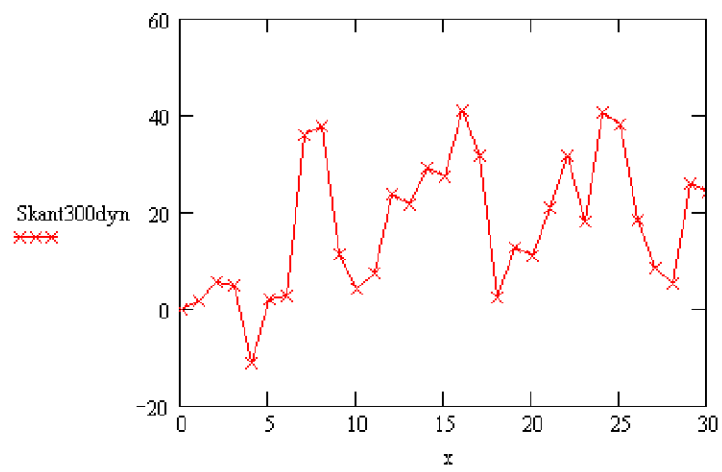
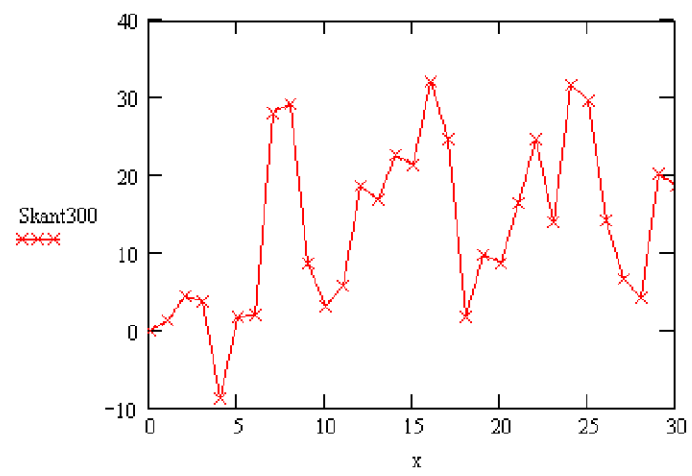
$$Skant250 := \frac{M_{250}}{W_{lb}}$$

$$Skant250_{dyn} := \frac{M_{250_{dyn}}}{W_{lb}}$$

$$Skant300 := \frac{M_{300}}{W_{lb}}$$

$$Skant300_{dyn} := \frac{M_{300_{dyn}}}{W_{lb}}$$





Bilaga B

Delskadeberäkning

Beräkning av n_{till}

Tvärbalkskarv, frk
Gamma-n 1,2

	sigma	frk	ntill	sigma	frk	ntill
250	21	27,72		49,7	65,604	8270386
300	25,2	33,264		59,6	78,672	4931231

Kontinuitetsplåt kant
Gamma-n 1,2

	sigma	frk	ntill	sigma	frk	ntill
250	33	43,56	5193995		0	
300	40	52,8	2720511		0	

Kontinuitetsplåt över stöd
Gamma-n 1,2

	sigma	frk	ntill	sigma	frk	ntill
250	25	33		70	92,4	617509
300	30	39,6		85	112,2	362297

För att beräkna n_{till} har logaritmisk interpolation använts, se nedan.

Logaritmisk interpolation

Karakteristisk utmattningshållfasthet vid typiserade spänningskollektiv, enligt BSK 99 tabell 6:524.

Kappa 5/6
C=45

cykler	1000	10000	100000	1000000	10000000	100000000
frk	661	309	144	67,1	34,2	21,6

Indata			52,8			
Cykler	75482		7456959		5179474679	
			745980		2720511	

Kappa 5/6
C=50

cykler	1000	10000	100000	1000000	10000000	100000000
frk	735	343	160	74,5	38	24

Indata			112,2			
Cykler	74989		362297		5179474679	
			748716		109924852	

Kappa 5/6
C=80

cykler	1000	10000	100000	1000000	10000000	100000000
frk	1180	549	256	119	60,8	38,4

Indata			78,67			
Cykler	74139		7389467		5179474679	
			747688		4931231	

Delskadesummering

Kontinuitetsplåt över												
Tvärbalkskarv							stöd		Kontinuitetsplåt kant			
År	tusental BTM/ KM inkl lok	Pmi	ai	n1i	n2i	n3i	Ntill	Delskada	Ntill	Delskada	Ntill	Delskada
1952	15000	250	4	3000	150000	600000	8270386	0,00036	617509	0,00486	5193995	0,029
1953	15292	250	4	3058	152917	611667	8270386	0,00037	617509	0,00495	5193995	0,029
1954	15583	250	4	3117	155833	623333	8270386	0,00038	617509	0,00505	5193995	0,030
1955	15875	250	4	3175	158750	635000	8270386	0,00038	617509	0,00514	5193995	0,031
1956	16167	250	4	3233	161667	646667	8270386	0,00039	617509	0,00524	5193995	0,031
1957	16458	250	4	3292	164583	658333	8270386	0,00040	617509	0,00533	5193995	0,032
1958	16750	250	4	3350	167500	670000	8270386	0,00041	617509	0,00543	5193995	0,032
1959	17042	250	4	3408	170417	681667	8270386	0,00041	617509	0,00552	5193995	0,033
1960	17333	250	4	3467	173333	693333	8270386	0,00042	617509	0,00561	5193995	0,033
1961	17625	250	4	3525	176250	705000	8270386	0,00043	617509	0,00571	5193995	0,034
1962	17917	250	4	3583	179167	716667	8270386	0,00043	617509	0,00580	5193995	0,034
1963	18208	250	4	3642	182083	728333	8270386	0,00044	617509	0,00590	5193995	0,035
1964	18500	250	4	3700	185000	740000	8270386	0,00045	617509	0,00599	5193995	0,036
1965	18792	250	4	3758	187917	751667	8270386	0,00045	617509	0,00609	5193995	0,036
1966	19083	250	4	3817	190833	763334	8270386	0,00046	617509	0,00618	5193995	0,037
1967	19375	250	4	3875	193750	775000	8270386	0,00047	617509	0,00628	5193995	0,037
1968	19667	250	4	3933	196667	786667	8270386	0,00048	617509	0,00637	5193995	0,038
1969	19958	250	4	3992	199583	798334	8270386	0,00048	617509	0,00646	5193995	0,038
1970	20250	250	4	4050	202500	810000	8270386	0,00049	617509	0,00656	5193995	0,039
1971	20542	250	4	4108	205417	821667	8270386	0,00050	617509	0,00665	5193995	0,040
1972	20833	250	4	4167	208333	833334	8270386	0,00050	617509	0,00675	5193995	0,040
1973	21125	250	4	4225	211250	845000	8270386	0,00051	617509	0,00684	5193995	0,041
1974	21417	250	4	4283	214167	856667	8270386	0,00052	617509	0,00694	5193995	0,041
1975	21708	250	4	4342	217083	868334	8270386	0,00052	617509	0,00703	5193995	0,042
1976	22000	250	4	4400	220000	880000	8270386	0,00053	617509	0,00713	5193995	0,042
1977	22000	250	4	4400	220000	880000	8270386	0,00053	617509	0,00713	5193995	0,042
1978	22000	250	4	4400	220000	880000	8270386	0,00053	617509	0,00713	5193995	0,042
1979	22000	250	4	4400	220000	880000	8270386	0,00053	617509	0,00713	5193995	0,042
1980	22000	250	4	4400	220000	880000	8270386	0,00053	617509	0,00713	5193995	0,042
1981	22000	250	4	4400	220000	880000	8270386	0,00053	617509	0,00713	5193995	0,042
1982	22000	250	4	4400	220000	880000	8270386	0,00053	617509	0,00713	5193995	0,042
1983	22000	250	4	4400	220000	880000	8270386	0,00053	617509	0,00713	5193995	0,042
1984	22000	250	4	4400	220000	880000	8270386	0,00053	617509	0,00713	5193995	0,042
1985	22000	250	4	4400	220000	880000	8270386	0,00053	617509	0,00713	5193995	0,042
1986	22000	250	4	4400	220000	880000	8270386	0,00053	617509	0,00713	5193995	0,042
1987	22000	250	4	4400	220000	880000	8270386	0,00053	617509	0,00713	5193995	0,042
1988	22000	250	4	4400	220000	880000	8270386	0,00053	617509	0,00713	5193995	0,042
1989	22000	250	4	4400	220000	880000	8270386	0,00053	617509	0,00713	5193995	0,042
1990	23031	250	4	4606	230310	921240	8270386	0,00056	617509	0,00746	5193995	0,044
1991	22970	250	4	4594	229700	918800	8270386	0,00056	617509	0,00744	5193995	0,044
1992	22910	250	4	4582	229100	916400	8270386	0,00055	617509	0,00742	5193995	0,044
1993	23790	250	4	4758	237900	951600	8270386	0,00058	617509	0,00771	5193995	0,046
1994	23960	250	4	4792	239600	958400	8270386	0,00058	617509	0,00776	5193995	0,046
1995	26200	250	4	5240	262000	1048000	8270386	0,00063	617509	0,00849	5193995	0,050
1996	21910	250	4	4382	219100	876400	8270386	0,00053	617509	0,00710	5193995	0,042

1997	26700	250	4	5340	267000	1068000	8270386	0,00065	617509	0,00865	5193995	0,051
1998	28080	250	4	5616	280800	1123200	8270386	0,00068	617509	0,00909	5193995	0,054
1999	20650	250	4	4130	206500	826000	8270386	0,00050	617509	0,00669	5193995	0,040
2000	27000	300	4	4500	225000	900000	4931231	0,00091	362297	0,01242	2720511	0,083
2001	27000	300	4	4500	225000	900000	4931231	0,00091	362297	0,01242	2720511	0,083
2002	27000	300	4	4500	225000	900000	4931231	0,00091	362297	0,01242	2720511	0,083
2003	27000	300	4	4500	225000	900000	4931231	0,00091	362297	0,01242	2720511	0,083
2004	27000	300	4	4500	225000	900000	4931231	0,00091	362297	0,01242	2720511	0,083
2005	27000	300	4	4500	225000	900000	4931231	0,00091	362297	0,01242	2720511	0,083

Summa Delskada:	0,029	0,39	2,4
------------------------	--------------	-------------	------------

Summering i årsklasser enligt norm

År	Tvärbalk		Kontinuitetsplåt, över stöd		Kontinuitetsplåt, kant	
1941-1960	n _{akt}	29100	n _{akt}	29100	n _{akt}	1455000
	Delskada	0,004	Delskada	0,05	Delskada	0,3
1961-1980	n _{akt}	81000	n _{akt}	81000	n _{akt}	4050001
	Delskada	0,01	Delskada	0,13	Delskada	0,8
1981-2000	n _{akt}	92140	n _{akt}	92140	n _{akt}	4607010
	Delskada	0,01	Delskada	0,15	Delskada	0,9
2001-2005	n _{akt}	22500	n _{akt}	22500	n _{akt}	1125000
	Delskada	0,005	Delskada	0,06	Delskada	0,4
Summa delskada		0,03		0,39		2,4

Bilaga C

Utdrag ur mätdata från Krokvik, 2005-09-01 till 2005-09-30

Sida 1 av ca 5000.

```
% Skapad 051012 från SQL-Server - Measure (detektordatabas)
% via lokal access databas
%
% Innehåller samtliga axelpassager från Krokvik Salient detektor mellan
% 05-09-01 och 05-09-30
%
% Kolumnerna är ordnade enligt:
% 1: År
% 2: Månad
% 3: Dag
% 4: Tidpunkt
% 5: Riktning
% 6: Antal axlar i tåget
% 7: Hastighet
% 8: Axelnummer
% 9: Sida 0 eller 1
% 10: Medellast i kN
% 11: Maxlast i kN
%
% Skapad av Eric Berggren 051012
05 9 1 003916 2 222 43 1 0 71 80
05 9 1 003916 2 222 43 1 1 70 75
05 9 1 003916 2 222 43 2 0 94 104
05 9 1 003916 2 222 43 2 1 93 101
05 9 1 003916 2 222 43 3 0 96 113
05 9 1 003916 2 222 43 3 1 90 101
05 9 1 003916 2 222 43 4 0 90 100
05 9 1 003916 2 222 43 4 1 99 108
05 9 1 003916 2 222 43 5 0 89 101
05 9 1 003916 2 222 43 5 1 101 112
05 9 1 003916 2 222 43 6 0 102 112
05 9 1 003916 2 222 43 6 1 89 97
05 9 1 003916 2 222 43 7 0 106 115
05 9 1 003916 2 222 43 7 1 89 97
05 9 1 003916 2 222 43 8 0 103 115
05 9 1 003916 2 222 43 8 1 97 106
05 9 1 003916 2 222 43 9 0 101 110
05 9 1 003916 2 222 43 9 1 99 108
05 9 1 003916 2 222 43 10 0 99 105
05 9 1 003916 2 222 43 10 1 95 105
05 9 1 003916 2 222 43 11 0 97 106
05 9 1 003916 2 222 43 11 1 93 103
05 9 1 003916 2 222 43 12 0 87 97
05 9 1 003916 2 222 43 12 1 94 116
05 9 1 003916 2 222 43 13 0 91 103
05 9 1 003916 2 222 43 13 1 98 112
```

Bilaga D

MATLAB kod, analys av mätdata

```
% Läs textfil från krokvik med data från 2005-09 och ta fram statistik
clear all;
close all;

data =
load("\\Vteks16.vtek.chalmers.se\Home1$\v00gabjo\Win\Profile\win\Desktop\Mätningar\kro
kvik_2005_09_axles2.txt','-ascii');

% Eftersom databasen sparar samma axel två gånger för olika sidor ändras indatan om så att
en axel har en rad

dataNew = [data(1:2:end,[1:8 10 11]) data(2:2:end,10:11)];
% Ny ordning av kolumner:
% 1: År
% 2: Månad
% 3: Dag
% 4: Tidpunkt
% 5: Riktning
% 6: Antal axlar i tåget
% 7: Hastighet
% 8: Axelnummer
% 9: Medellast i kN sida 0
% 10: Maxlast i kN sida 0
% 11: Medellast i kN sida 1
% 12: Maxlast i kN sida 1

% Statistisk normplot för att få känsla för mätdata
figure(1)
normplot([sum(dataNew(:,[9 11]),2) sum(dataNew(:,[10 12]),2)]); % Axellast
title('Normalfördelningsplot axellaster (medel och peak) Krokvik 2005-09');
xlabel('Axellast [kN]');
ylabel('Andel axellaster under motsvarande axellast');

% Histogram för alla axellaster för att kunna hitta indelning
figure(2)
hist(dataNew(:,9)+dataNew(:,11),40)
title('Histogram samtliga axellaster Krokvik 2005-09');
xlabel('Axellast [kN]');
ylabel('Antal axellaster med motsvarande axellast');
% 4 st lastområden identifieras

% Separera de 4 olika lastfördelningarna
ind1 = find(sum(dataNew(:,[9 11]),2) > 270);
data1 = dataNew(ind1,:); % Lok & "Överlastade" axlar
```

```
ind2 = find(sum(dataNew(:,[9 11]),2)<=270);
data21 = dataNew(ind2,:);
ind21 = find(sum(data21(:,[9 11]),2)>=175);
data2 = data21(ind21,:);% Lastade axlar
```

```
ind3 = find(sum(dataNew(:,[9 11]),2)<175);
data31 = dataNew(ind3,:);
ind31 = find(sum(data31(:,[9 11]),2)>=60);
data3 = data31(ind31,:);% Persontrafik
```

```
ind4 = find(sum(dataNew(:,[9 11]),2)<60);
data4 = dataNew(ind4,:);% Olastade axlar
```

```
% Plotta histogram för de 4 lastfördelningarna
figure(3)
hist(data1(:,9)+data1(:,11),40);
title('Histogram lok & överlastade axlar Krokvik 2005-09');
xlabel('Axellast [kN]');
ylabel('Antal axellaster med motsvarande axellast');
```

```
figure(4)
hist(data2(:,9)+data2(:,11),40);
title('Histogram lastade axlar Krokvik 2005-09');
xlabel('Axellast [kN]');
ylabel('Antal axellaster med motsvarande axellast');
```

```
figure(5)
hist(data3(:,9)+data3(:,11),40);
title('Histogram axellaster persontrafik Krokvik 2005-09');
xlabel('Axellast [kN]');
ylabel('Antal axellaster med motsvarande axellast');
```

```
figure(6)
hist(data4(:,9)+data4(:,11),40);
title('Histogram olastade axlar Krokvik 2005-09');
xlabel('Axellast [kN]');
ylabel('Antal axellaster med motsvarande axellast');
```

```
% Normalfördelningsplottar
figure(7)
normplot(sum(data1(:,[9 11]),2));
title('Normalfördelningsplot lok & överlastade axlar Krokvik 2005-09');
xlabel('Axellast [kN]');
ylabel('Andel axellaster under motsvarande axellast');
```

```
figure(8)
normplot(sum(data2(:,[9 11]),2));
title('Normalfördelningsplot lastade axlar Krokvik 2005-09');
```

```
xlabel('Axellast [kN]');  
ylabel('Andel axellaster under motsvarande axellast');
```

```
figure(9)  
normplot(sum(data3(:,[9 11]),2));  
title('Normalfördelningsplot axellaster persontrafik Krokvik 2005-09');  
xlabel('Axellast [kN]');  
ylabel('Andel axellaster under motsvarande axellast');
```

```
figure(10)  
normplot(sum(data4(:,[9 11]),2));  
title('Normalfördelningsplot olastade axlar Krokvik 2005-09');  
xlabel('Axellast [kN]');  
ylabel('Andel axellaster under motsvarande axellast');
```

```
% Stöttillägg (dynamikkoefficient)  
figure(11)  
normplot(data1(:,12)./data1(:,11));  
title('Normalfördelningsplot stöttillägg (dynamikkoefficient) lok & överlastade axlar Krokvik 2005-09');  
xlabel('Stöttillägg (dynamikkoefficient), Axellast peak/Axellast nominell');  
ylabel('Andel stöttillägg under motsvarande stöttillägg');
```

```
figure(12)  
normplot(data2(:,12)./data2(:,11));  
title('Normalfördelningsplot stöttillägg (dynamikkoefficient) lastade axlar Krokvik 2005-09');  
xlabel('Stöttillägg (dynamikkoefficient), Axellast peak/Axellast nominell');  
ylabel('Andel stöttillägg under motsvarande stöttillägg');
```

```
figure(13)  
normplot(data3(:,12)./data3(:,11));  
title('Normalfördelningsplot stöttillägg (dynamikkoefficient) axlar persontrafik Krokvik 2005-09');  
xlabel('Stöttillägg (dynamikkoefficient), Axellast peak/Axellast nominell');  
ylabel('Andel stöttillägg under motsvarande stöttillägg');
```

```
figure(14)  
normplot(data4(:,12)./data4(:,11));  
title('Normalfördelningsplot stöttillägg (dynamikkoefficient) olastade axlar Krokvik 2005-09');  
xlabel('Stöttillägg (dynamikkoefficient), Axellast peak/Axellast nominell');  
ylabel('Andel stöttillägg under motsvarande stöttillägg');
```

```
% De övre värdena på dynamikkoefficienten avviker från normalfördelningen, tag reda på vilka axlar det är  
ind5=find(data2(:,12)./data2(:,11)>1.3);  
data5 = data2(ind5,:);
```

```
ind6=find(data3(:,12)./data3(:,11)>1.4);  
data6 = data3(ind6,:);
```

```
ind7=find(data4(:,12)./data4(:,11)>1.4);  
data7 = data4(ind7,:);
```

% Svårt att dra särskild slutsats om vilka axlar som har höga värden på dynamikoefficient

```
% Undersök om dynamikoefficienten är log-normalfördelad  
% Ny variabel införs som  $Y=D-1$ , som antas log-normalfördelad  
figure(15)  
data8=(data1(:,12)./data1(:,11))-1;  
data9=log10(data8);  
normplot(data9);  
title('Log-normalfördelningsplot lok & överlastade axlar Krokvik 2005-09');  
xlabel('Stöttillägg (dynamikoefficient), Axellast peak/Axellast nominell');  
ylabel('Andel stöttillägg under motsvarande stöttillägg');
```

```
figure(16)  
data10=(data2(:,12)./data2(:,11))-1;  
data11=log10(data10);  
normplot(data11);  
title('Log-normalfördelningsplot lastade axlar Krokvik 2005-09');  
xlabel('Stöttillägg (dynamikoefficient), Axellast peak/Axellast nominell');  
ylabel('Andel stöttillägg under motsvarande stöttillägg');
```

```
figure(17)  
data12=(data3(:,12)./data3(:,11))-1;  
data13=log10(data12);  
normplot(data13);  
title('Log-normalfördelningsplot axlar persontrafik Krokvik 2005-09');  
xlabel('Stöttillägg (dynamikoefficient), Axellast peak/Axellast nominell');  
ylabel('Andel stöttillägg under motsvarande stöttillägg');
```

```
figure(18)  
data14=(data4(:,12)./data4(:,11))-1;  
data15=log10(data14);  
normplot(data15);  
title('Log-normalfördelningsplot olastade axlar Krokvik 2005-09');  
xlabel('Stöttillägg (dynamikoefficient), Axellast peak/Axellast nominell');  
ylabel('Andel stöttillägg under motsvarande stöttillägg');
```

```
% Undersök om dynamikoefficienten är weibullfördelad  
% Ny variabel införs som  $Y=D-1$ , som antas weibullfördelad  
figure(19)  
data16=(data2(:,12)./data2(:,11))-1;  
weibplot(data16);  
title('Weibullfördelningsplot lastade axlar Krokvik 2005-09');  
xlabel('Stöttillägg (dynamikoefficient), Axellast peak/Axellast nominell');  
ylabel('Andel stöttillägg under motsvarande stöttillägg');
```

```
figure(20)
```

```

data17=(data3(:,12)./data3(:,11))-1;
weibplot(data17);
title('Weibullfördelningsplot axlar persontrafik Krokvik 2005-09');
xlabel('Stöttillägg (dynamikkoefficient), Axellast peak/Axellast nominell');
ylabel('Andel stöttillägg under motsvarande stöttillägg');

figure(21)
data18=(data4(:,12)./data4(:,11))-1;
weibplot(data18);
title('Weibullfördelningsplot olastade axlar Krokvik 2005-09');
xlabel('Stöttillägg (dynamikkoefficient), Axellast peak/Axellast nominell');
ylabel('Andel stöttillägg under motsvarande stöttillägg');

% Lätt statistik:
mean1=mean(sum(data1(:,[9 11]),2))
std1=std(sum(data1(:,[9 11]),2))

mean2=mean(sum(data2(:,[9 11]),2))
std2=std(sum(data2(:,[9 11]),2))

mean3=mean(sum(data3(:,[9 11]),2))
std2=std(sum(data3(:,[9 11]),2))

mean4=mean(sum(data4(:,[9 11]),2))
std4=std(sum(data4(:,[9 11]),2))

meandynamik1=mean(data8) % Medelvärde av variabeln Y
stddynamik1=std(data8)

meandynamik2=mean(data10) % Medelvärde av variabeln Y
stddynamik2=std(data10)

meandynamik3=mean(data12) % Medelvärde av variabeln Y
stddynamik3=std(data12)

meandynamik4=mean(data14) % Medelvärde av variabeln Y
stddynamik4=std(data14)

% Antal lok & överlastade axlar, per år
N1=size(ind1,1)*12

% Antal lastade axlar, per år
N2=size(ind2,1)*12

% Antal axlar persontrafik axlar, per år
N3=size(ind3,1)*12

% Antal olastade axlar, per år
N4=size(ind4,1)*12

```

```

% Antal passager av 2 närliggande boggier per år, approx
% lok och överlastade
boggiepassagerperar1=N1/4
% lastaste
boggiepassagerperar2=N2/4
% persontrafik
boggiepassagerperar3=N3/4
% olastaste
boggiepassagerperar4=N4/4

% Bruttoton/år
last=sum(dataNew(:,[9 11]));
totaltonperar=(last(1)+last(2))/9.82*12

% Andel lok & överlastade axlar
andel1=size(data1,1)/size(dataNew,1)

% Andel lastade axlar
andel2=size(data2,1)/size(dataNew,1)

% Andel axlar persontrafik
andel3=size(data3,1)/size(dataNew,1)

% Andel olastade axlar
andel4=size(data4,1)/size(dataNew,1)

% Undersök kovariansen och korrelationen mellan dynamikkoefficient (obs variabeln Y) och
last
covarians1=cov(sum(data1(:,[9 11]),2),data8); % Kovarians mellan Axellast och Y för lok
och lastade axlar
corr1=covarians1(1,2)/sqrt(covarians1(1,1)*covarians1(2,2))

covarians2=cov(sum(data2(:,[9 11]),2),data10); % Kovarians mellan Axellast och Y för lok
och lastade axlar
corr2=covarians2(1,2)/sqrt(covarians2(1,1)*covarians2(2,2))

covarians3=cov(sum(data3(:,[9 11]),2),data12); % Kovarians mellan Axellast och Y för lok
och lastade axlar
corr3=covarians3(1,2)/sqrt(covarians3(1,1)*covarians3(2,2))

covarians4=cov(sum(data4(:,[9 11]),2),data14); % Kovarians mellan Axellast och Y för lok
och lastade axlar
corr4=covarians4(1,2)/sqrt(covarians4(1,1)*covarians4(2,2))

% Åskådliggör sambandet mellan dynamikkoefficient och axellast m.h.a. scatterplot
figure(22)
plotmatrix(sum(data1(:,[9 11]),2),data1(:,12)./data1(:,11))
title('Scatterplot dynamikkoefficient/axellast lok & överlastade axlar Krokvik 2005-09');
xlabel('Axellast [kN]');
ylabel('Stöttillägg (dynamikkoefficient), Axellast peak/Axellast nominell');

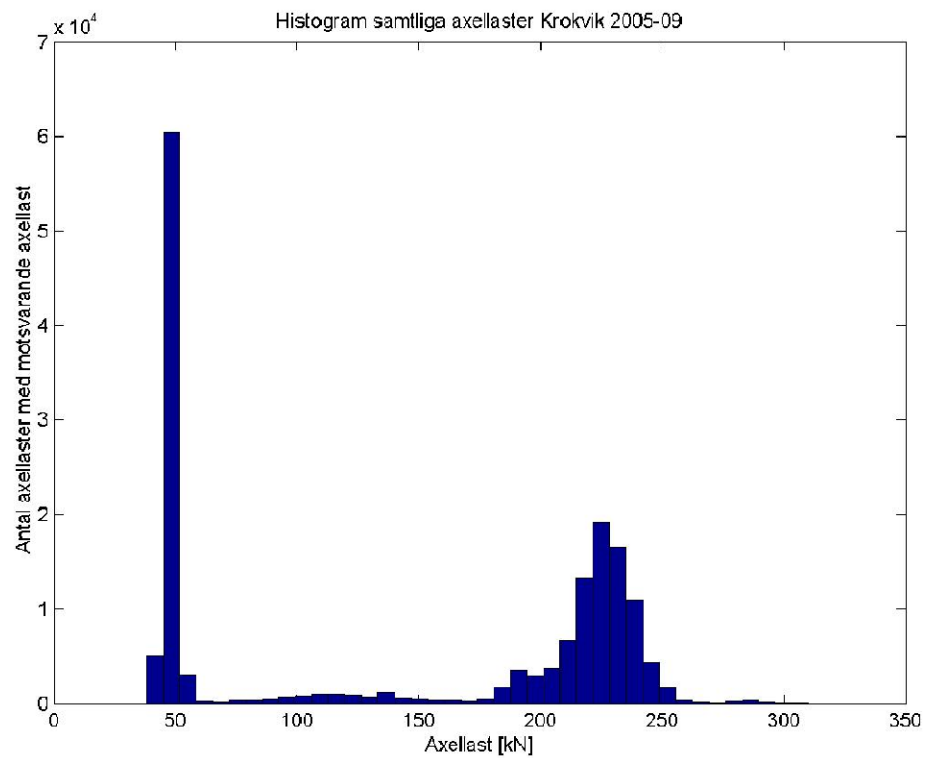
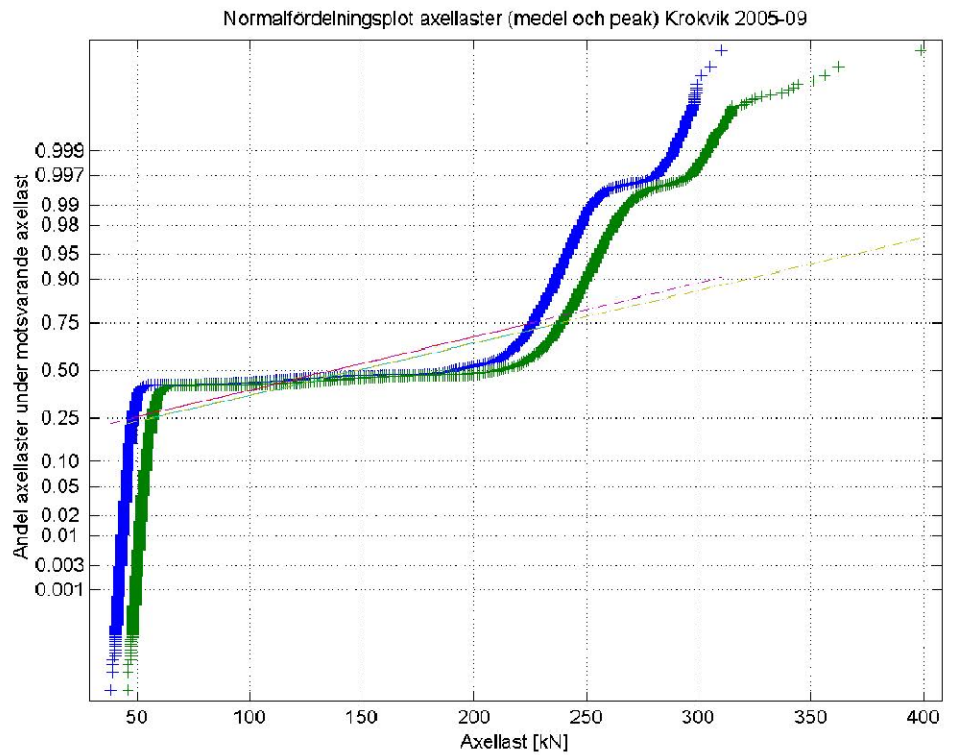
```

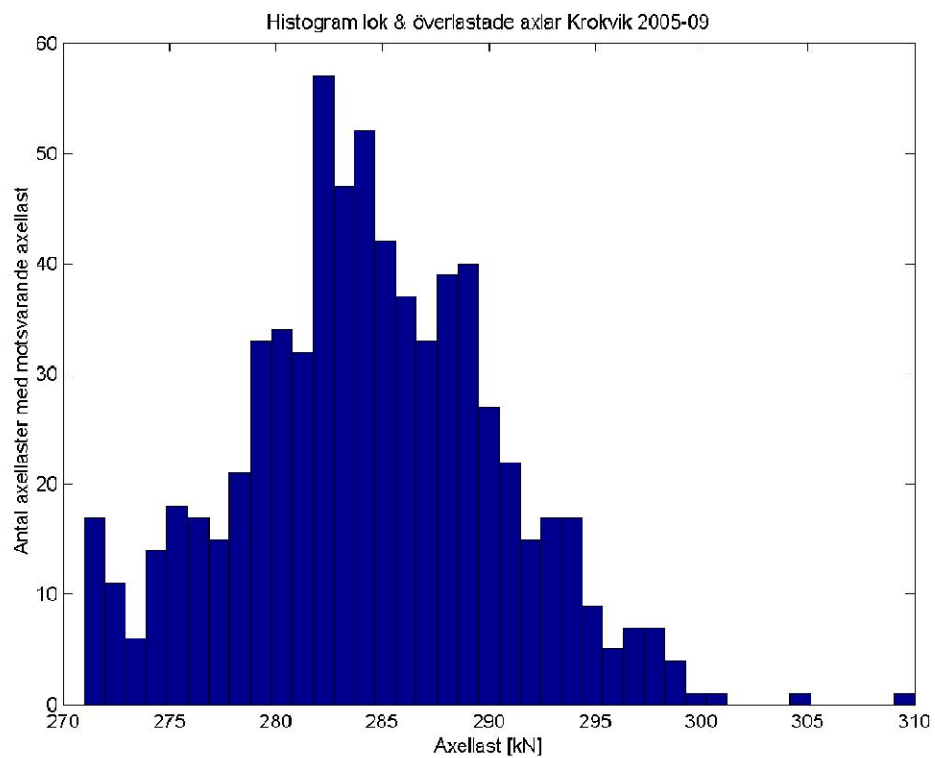
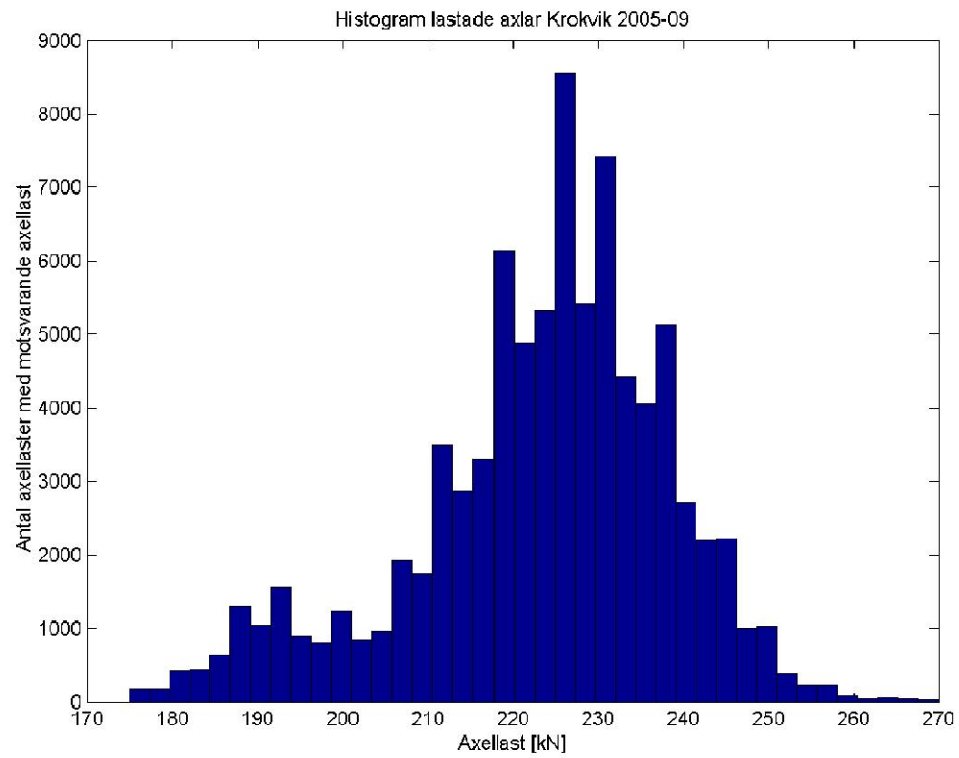
```
figure(23)
plotmatrix(sum(data2(:,[9 11]),2),data2(:,12)./data2(:,11))
title('Scatterplot dynamikkoefficient/axellast lastade axlar Krokvik 2005-09');
xlabel('Axellast [kN]');
ylabel('Stöttillägg (dynamikkoefficient), Axellast peak/Axellast nominell');
```

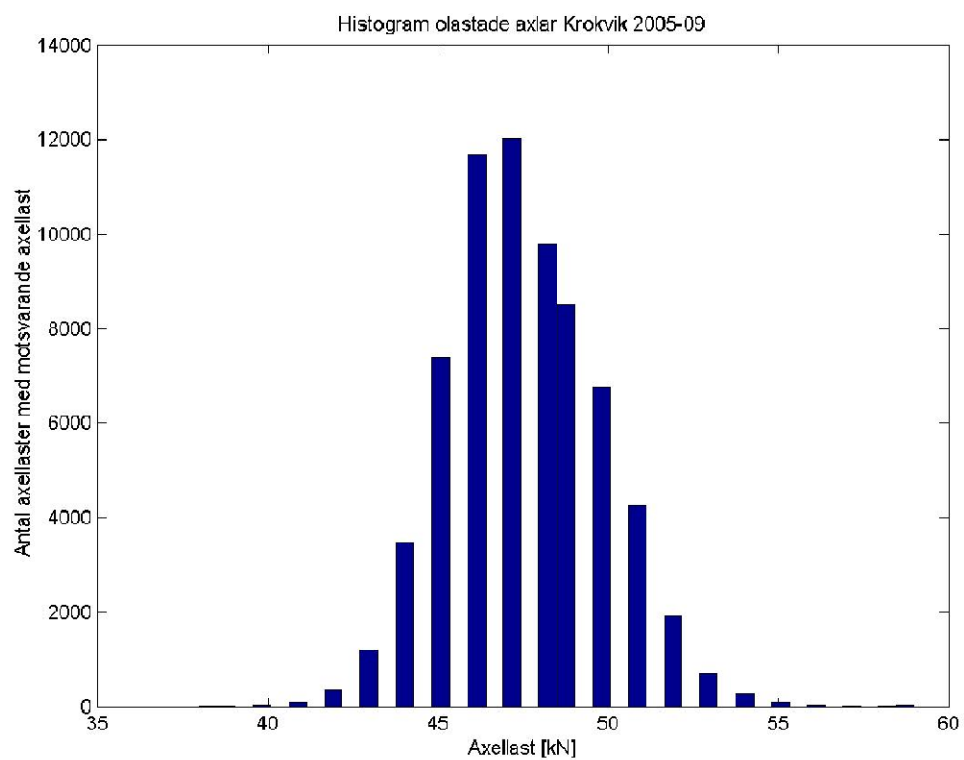
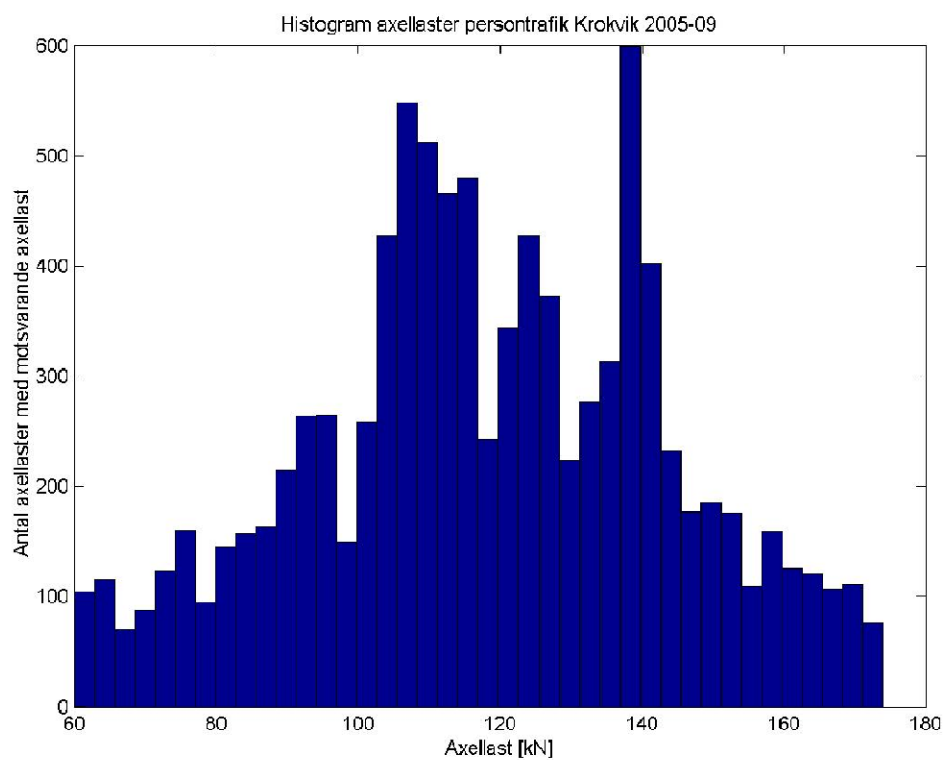
```
figure(24)
plotmatrix(sum(data3(:,[9 11]),2),data3(:,12)./data3(:,11))
title('Scatterplot dynamikkoefficient/axellast axlar persontrafik Krokvik 2005-09');
xlabel('Axellast [kN]');
ylabel('Stöttillägg (dynamikkoefficient), Axellast peak/Axellast nominell');
```

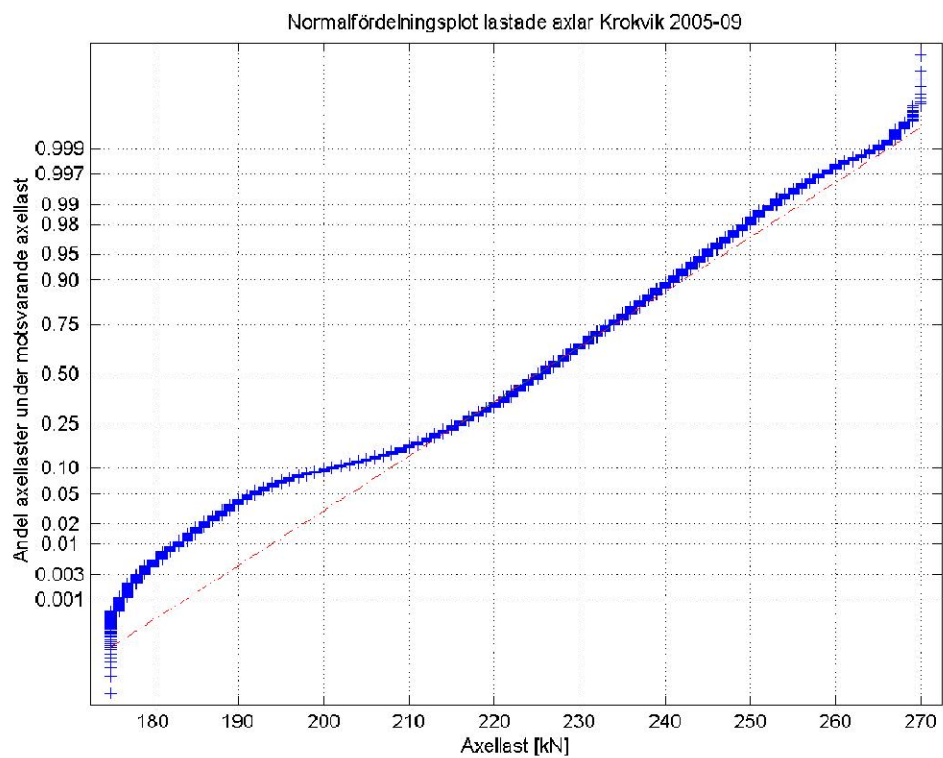
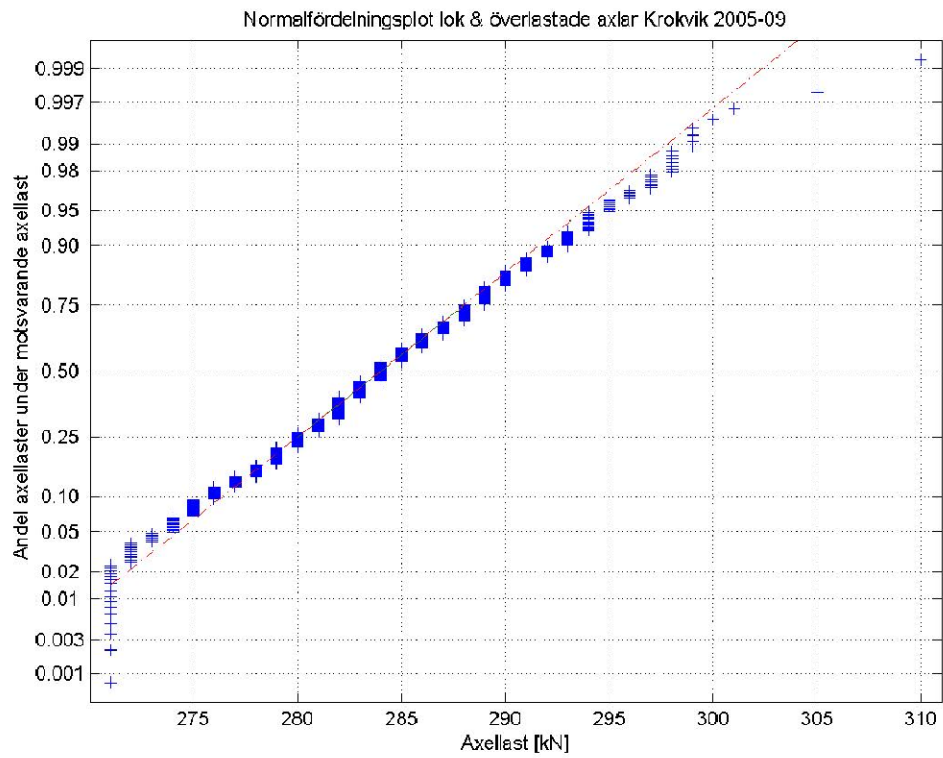
```
figure(25)
plotmatrix(sum(data4(:,[9 11]),2),data4(:,12)./data4(:,11))
title('Scatterplot dynamikkoefficient/axellast olastade axlar Krokvik 2005-09');
xlabel('Axellast [kN]');
ylabel('Stöttillägg (dynamikkoefficient), Axellast peak/Axellast nominell');
```

MATLAB plottar med resultat från analys av mätdata

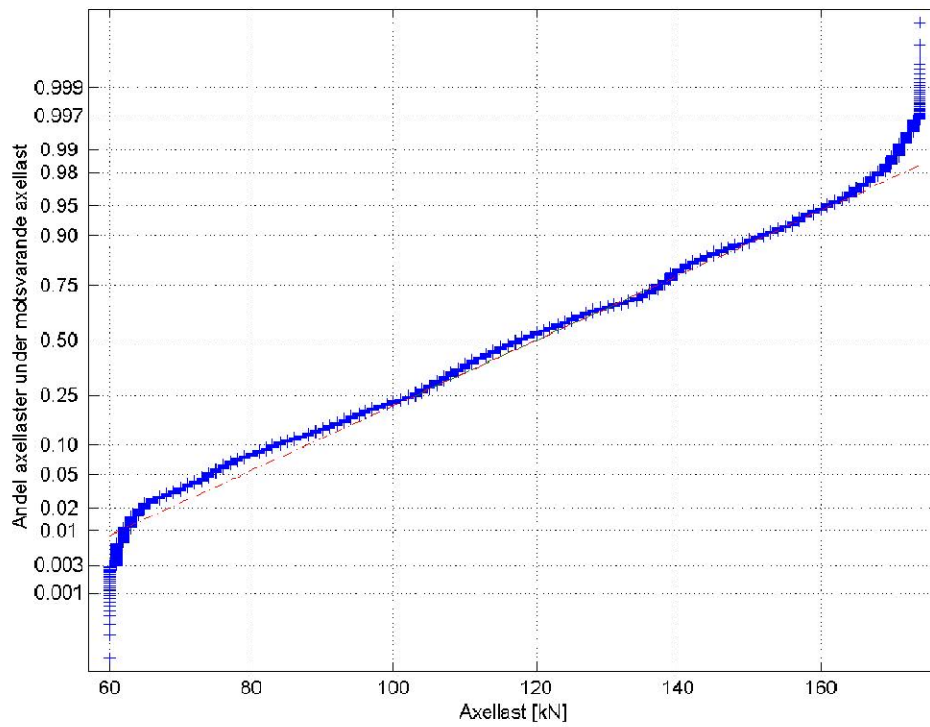




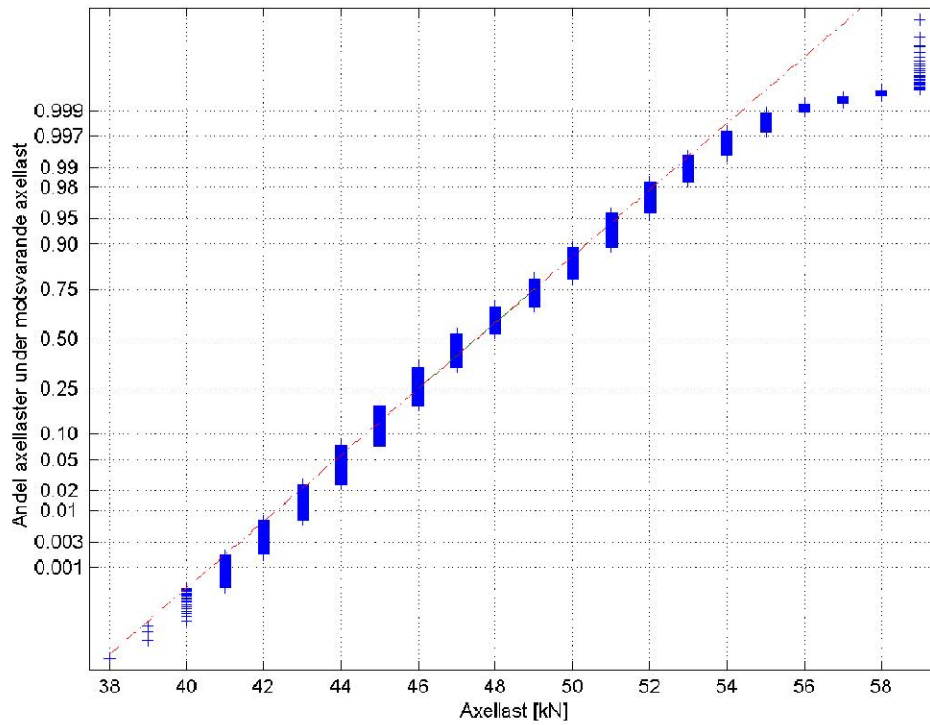




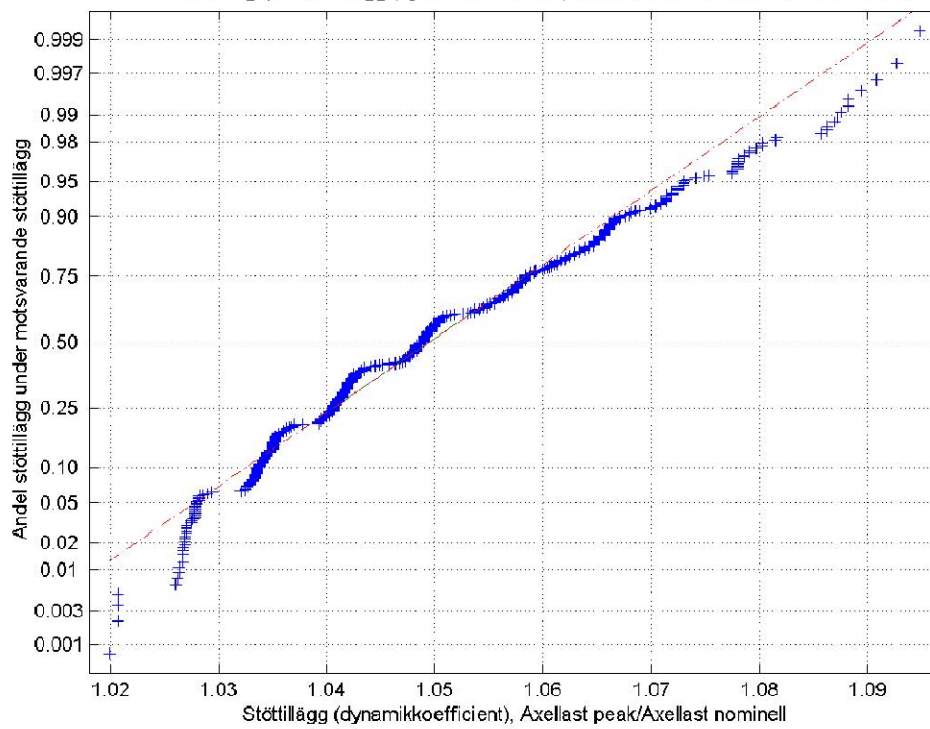
Normalfördelningsplot axellaster persontrafik Krokvik 2005-09



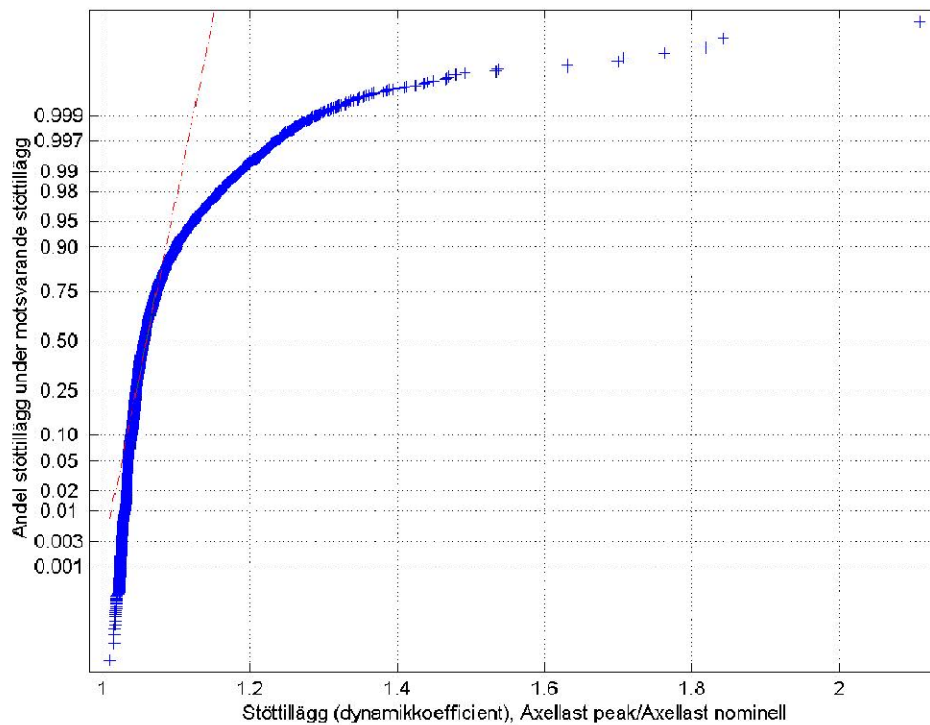
Normalfördelningsplot olastade axlar Krokvik 2005-09

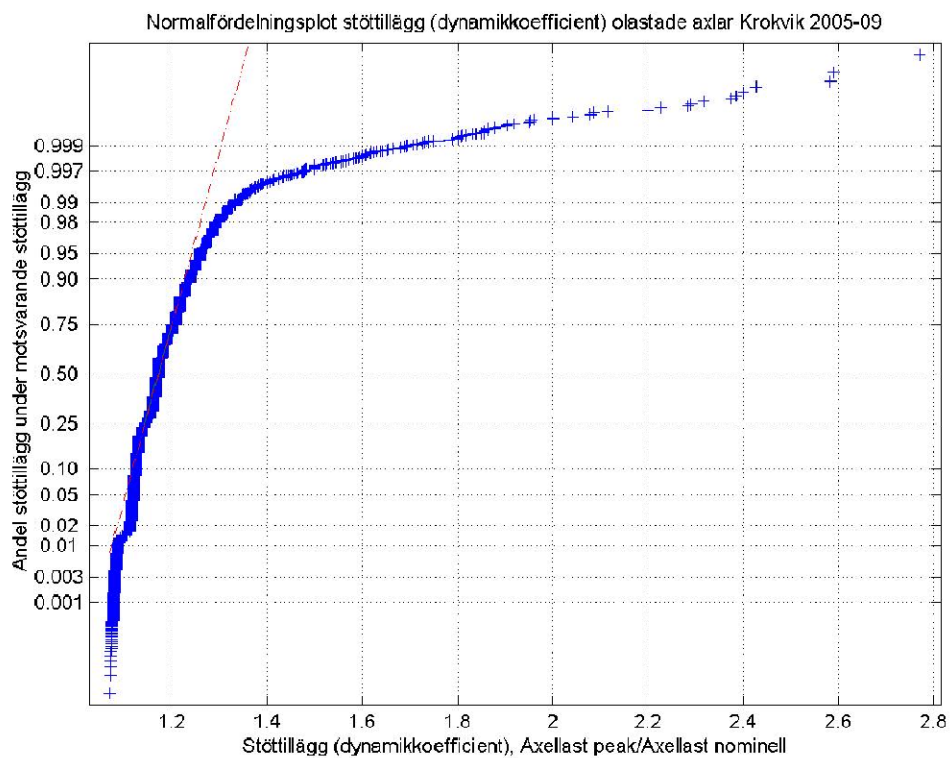
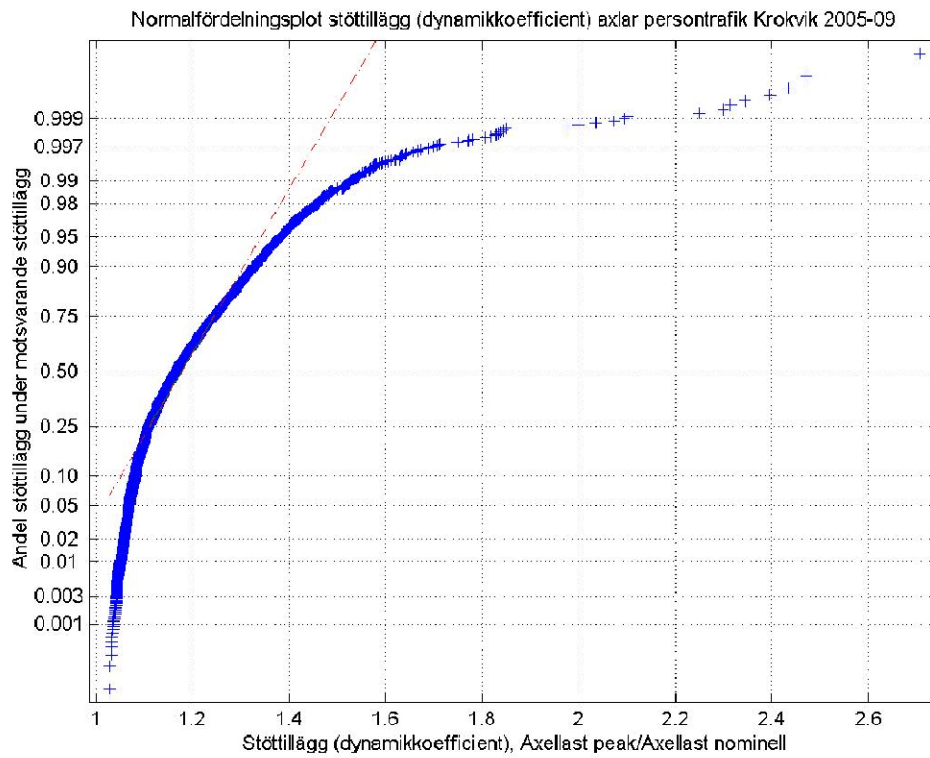


Normalfördelningsplot stöttillägg (dynamikkoefficient) lok & överlastade axlar Krokvik 2005-09

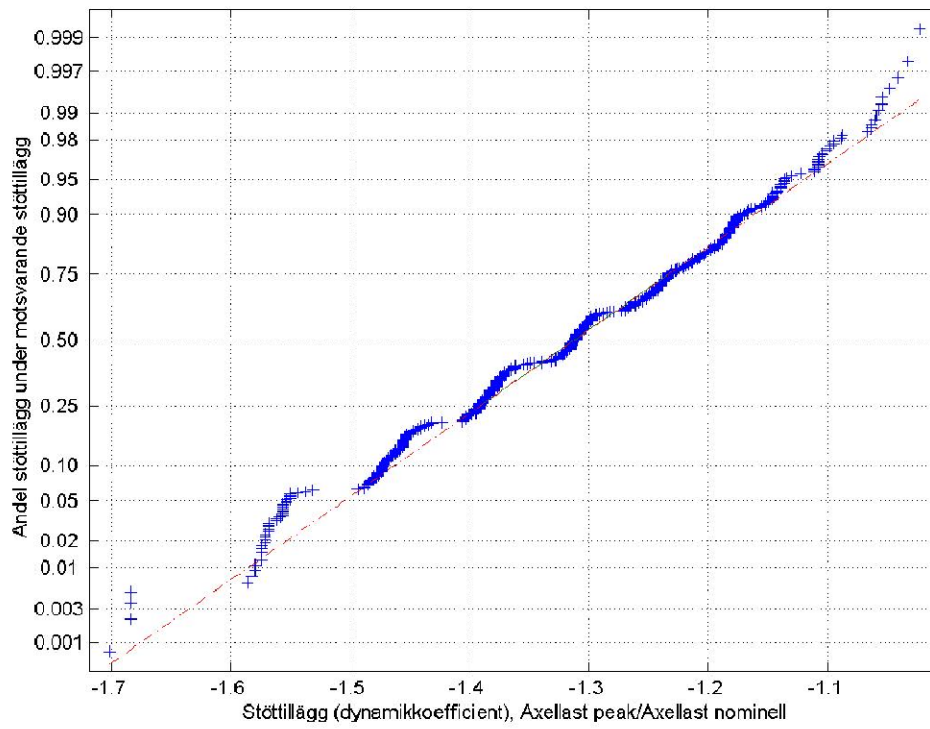


Normalfördelningsplot stöttillägg (dynamikkoefficient) lastade axlar Krokvik 2005-09

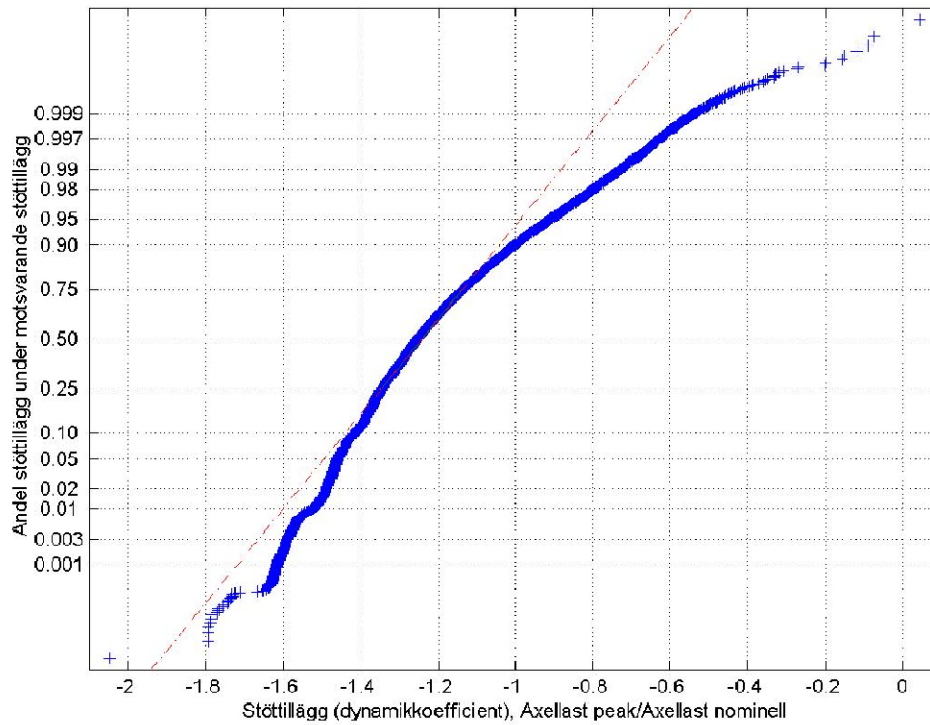




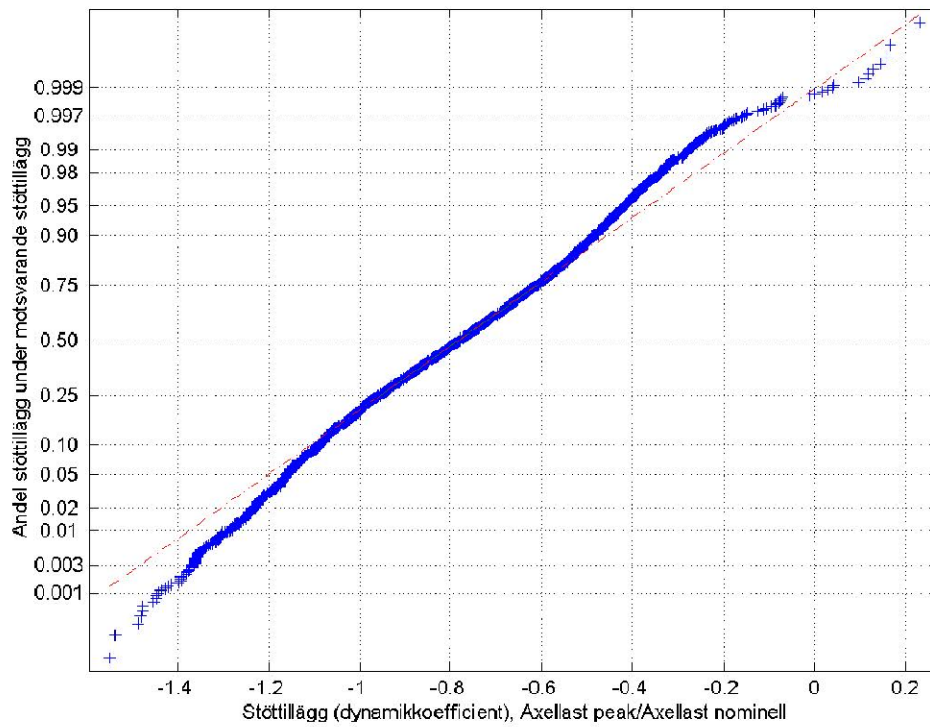
Log-normalfördelningsplot lok & överlastade axlar Krokvik 2005-09



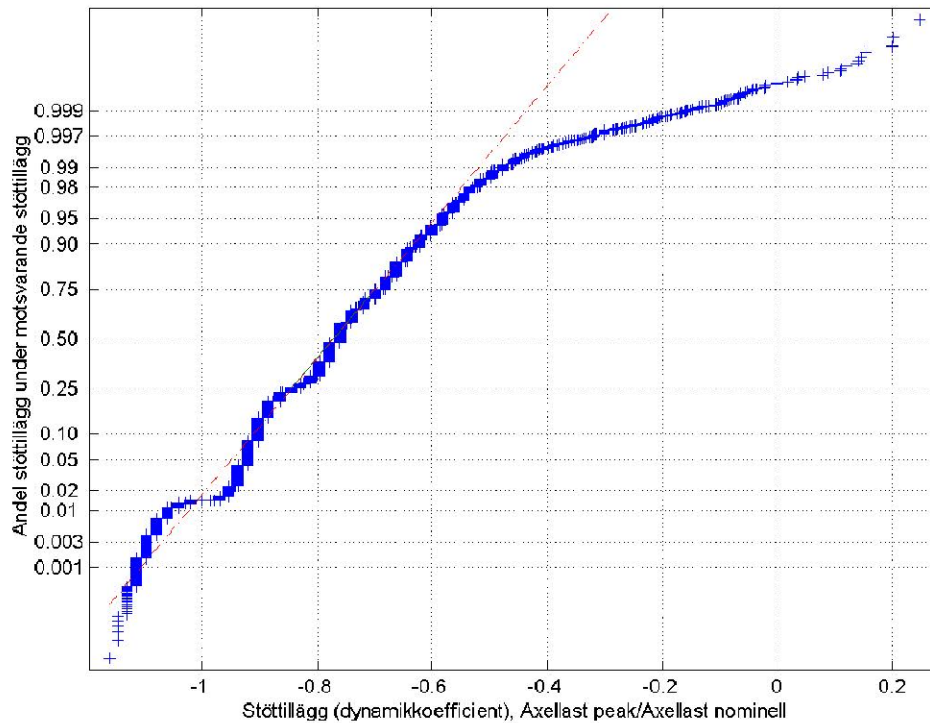
Log-normalfördelningsplot lastade axlar Krokvik 2005-09

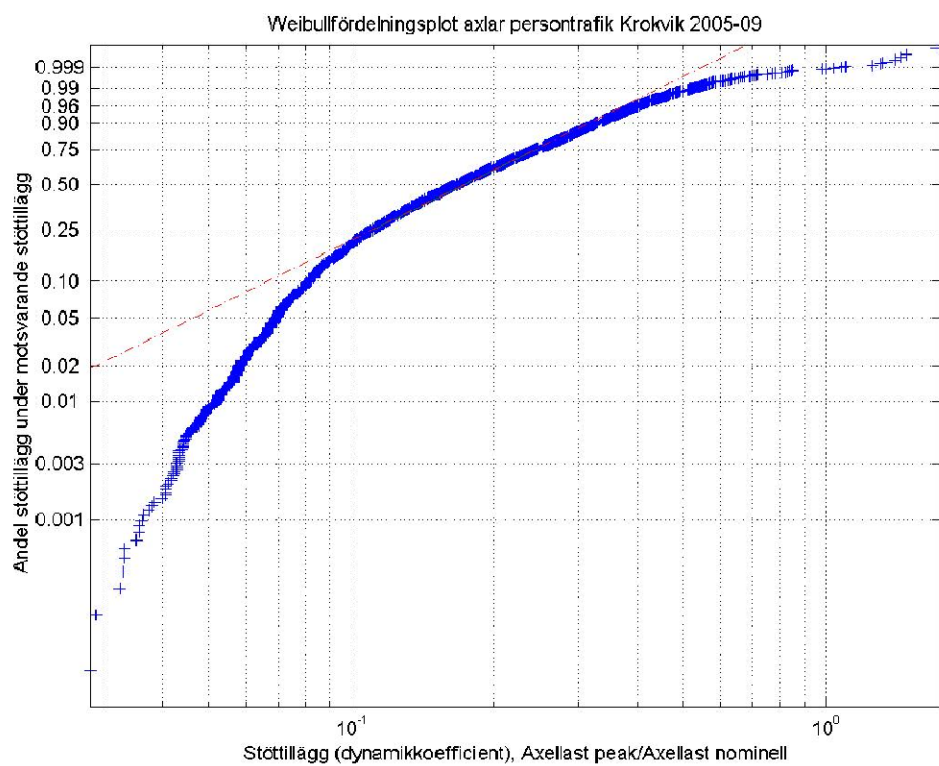
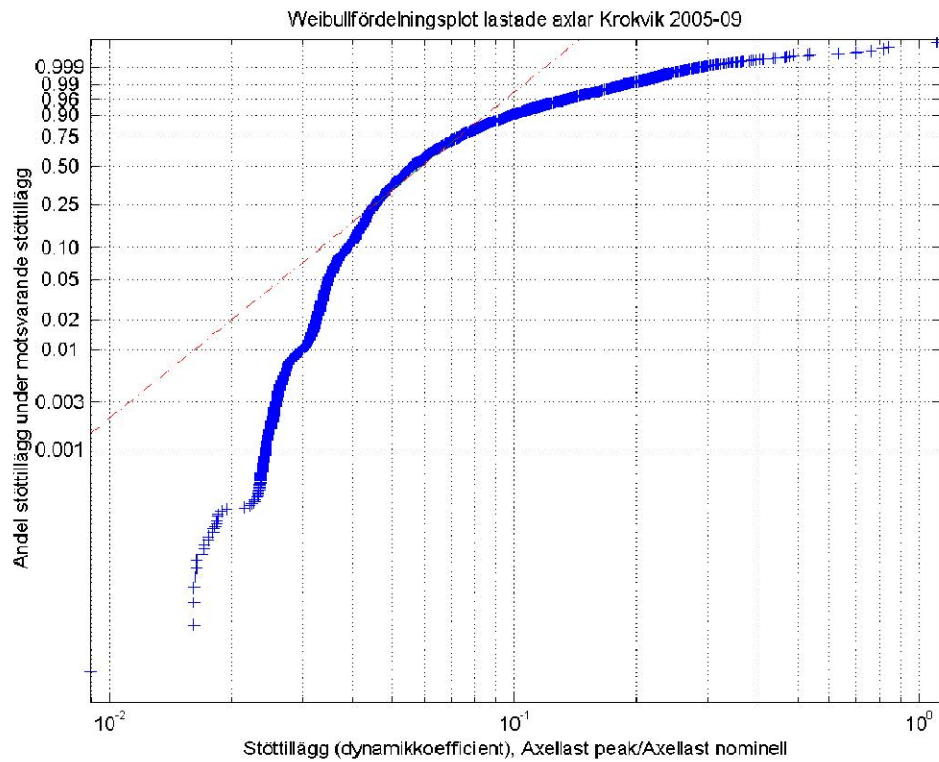


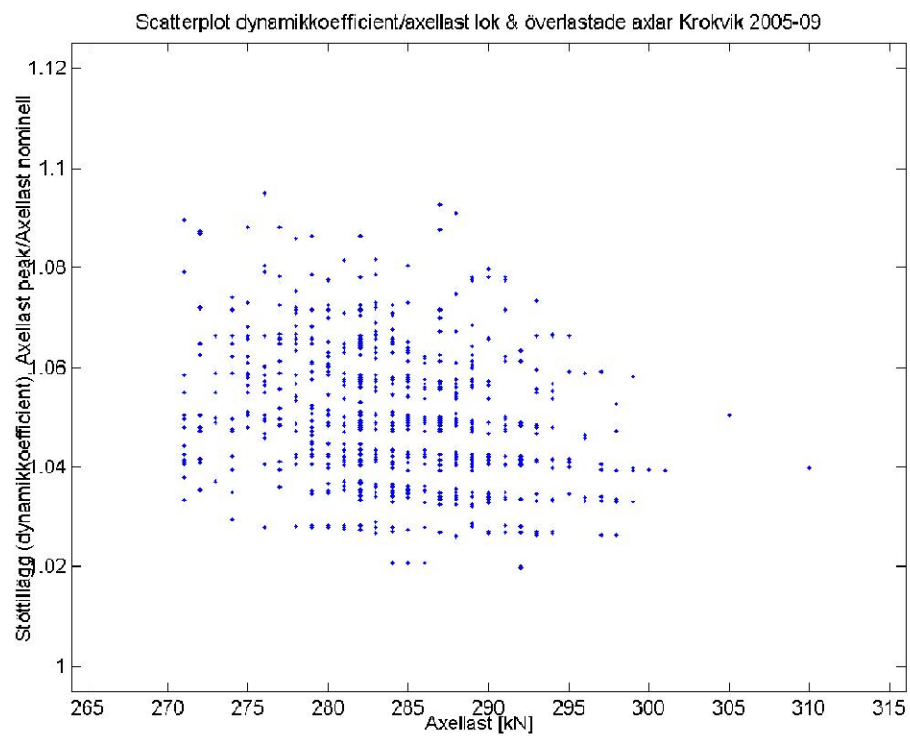
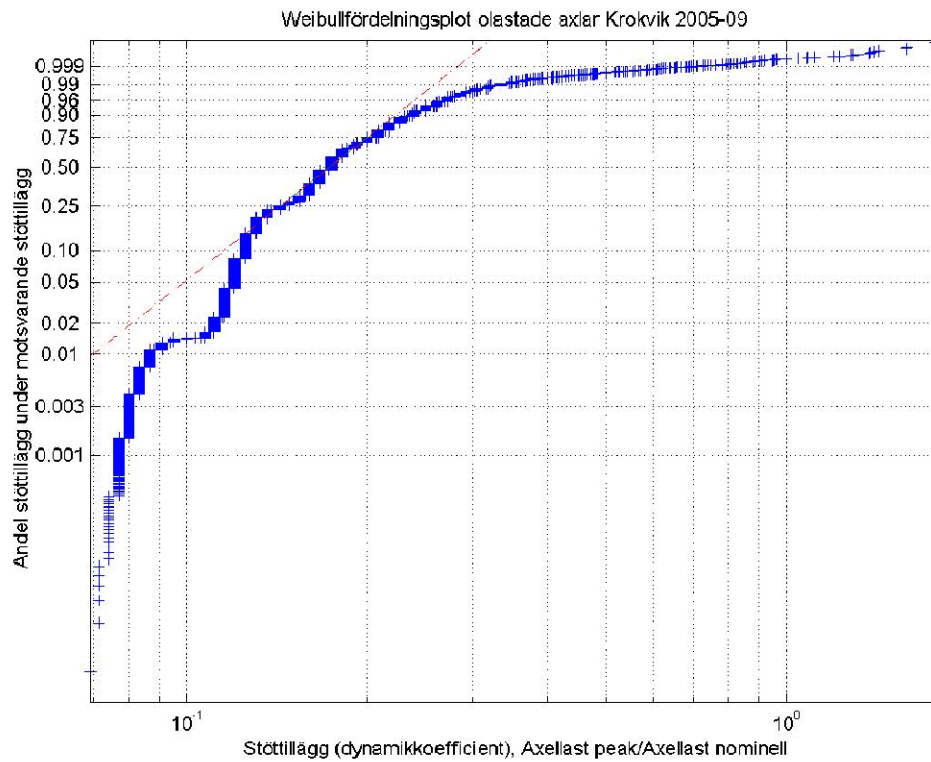
Log-normalfördelningsplot axlar persontrafik Krokvik 2005-09

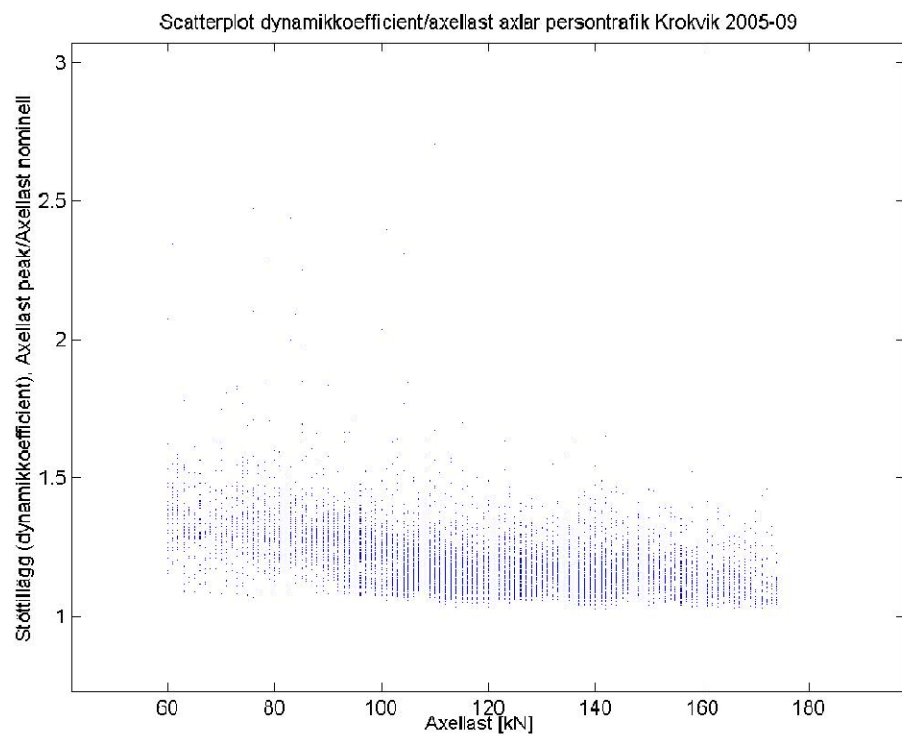
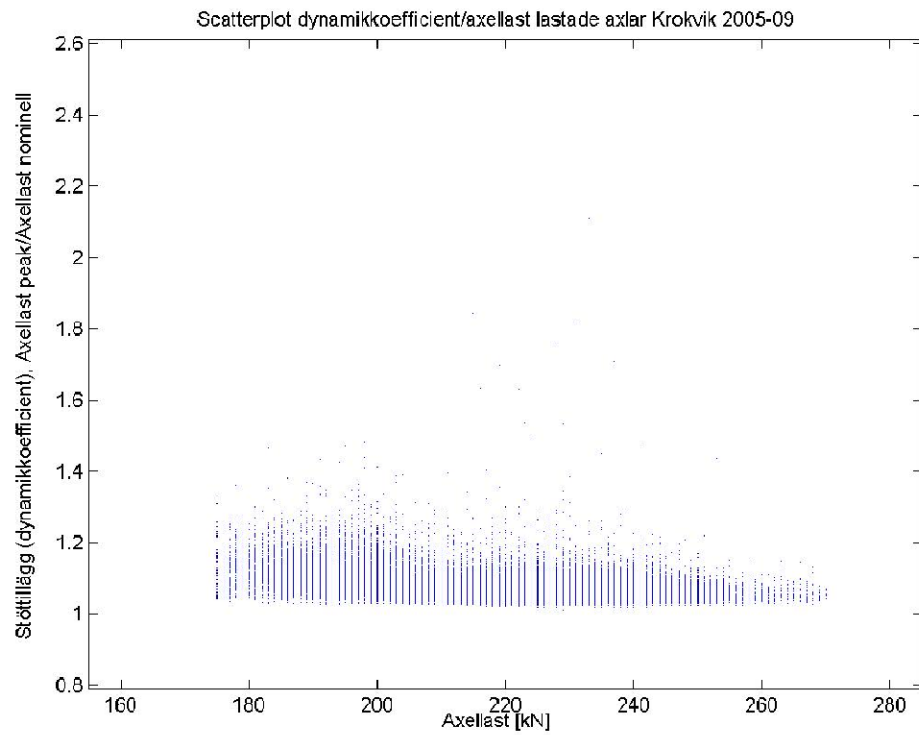


Log-normalfördelningsplot olastade axlar Krokvik 2005-09

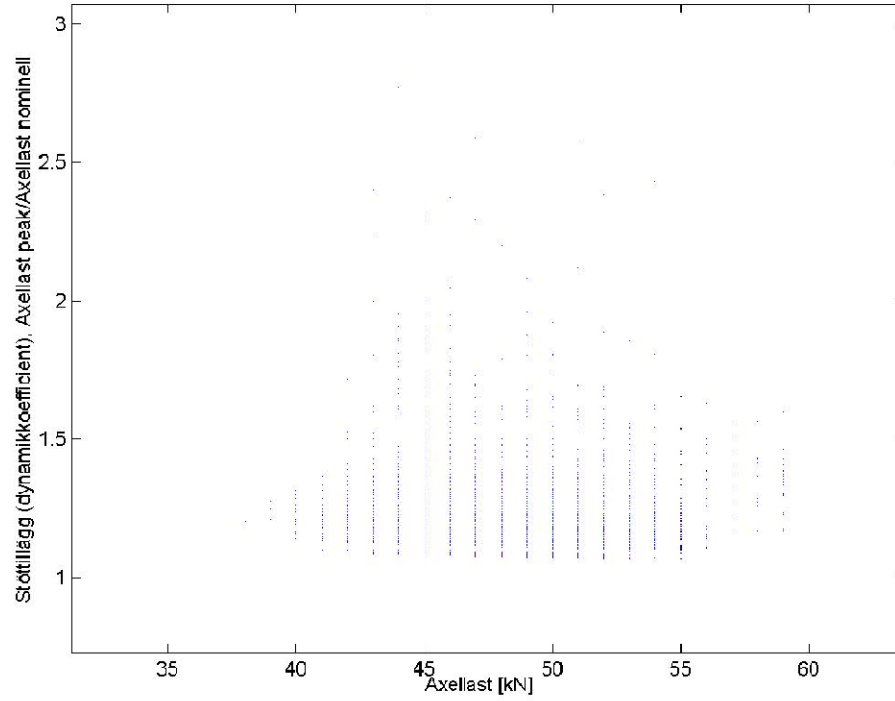








Scatterplot dynamikkoeffisient/axellast elastiske axlar Krokvik 2005-09



Bilaga F

MATLAB kod, inputfil till FERUM för beräkning av säkerhetsindex

```
clear probdata femodel analysisopt gfundata randomfield systems results output_filename

output_filename = 'outputfile_delskada_20051103.txt';

% Ingående stokastiska variabler

% x(1) lok & överlastade axlar 250 kN
% x(2) lastade axlar 250 kN
% x(3) axlar persontrafik 250 kN
% x(4) olastade axlar 250 kN
% x(5) lok & överlastade axlar 300 kN
% x(6) lastade axlar 300 kN
% x(7) axlar persontrafik 300 kN
% x(8) olastade axlar 300 kN
% x(9) Dynamikkoefficient (Y=D-1), lok & överlastade axlar, log-normalfördelad
% x(10) Dynamikkoefficient (Y=D-1),lastade axlar, log-normalfördelad
% x(11) Dynamikkoefficient (Y=D-1),axlar persontrafik, log-normalfördelad
% x(12) Dynamikkoefficient (Y=D-1), olastade axlar, log-normalfördelad
% x(13) log N (första termen)
% x(14) Modellosäkerhet som multipliceras med materialvariabler, log-normalfördelad

% [typ av fördelning, medelvärde, standardavvikelse, startpunkt iteration, p1, p2, p3, p4, typ
av input]

probdata.marg(1,:) = [ 1 236.9 5.25 236.9 0 0 0 0 0];
probdata.marg(2,:) = [ 1 186.2 12.6 186.2 0 0 0 0 0];
probdata.marg(3,:) = [ 1 98.7 21.1 98.7 0 0 0 0 0];
probdata.marg(4,:) = [ 1 47.5 2.3 47.5 0 0 0 0 0];
probdata.marg(5,:) = [ 1 284.2 6.3 284.2 0 0 0 0 0];
probdata.marg(6,:) = [ 1 223.5 15.2 223.5 0 0 0 0 0];
probdata.marg(7,:) = [ 1 118.4 25.3 118.4 0 0 0 0 0];
probdata.marg(8,:) = [ 1 47.5 2.3 47.5 0 0 0 0 0];
probdata.marg(9,:) = [ 2 0.05 0.014 0.05 0 0 0 0 0];
probdata.marg(10,:) = [ 2 0.065 0.032 0.065 0 0 0 0 0];
probdata.marg(11,:) = [ 2 0.19 0.11 0.19 0 0 0 0 0];
probdata.marg(12,:) = [ 2 0.18 0.055 0.18 0 0 0 0 0];
probdata.marg(13,:) = [ 1 11.843 0.232 11.843 0 0 0 0 0];
probdata.marg(14,:) = [ 2 1 0.00001 1 0 0 0 0 0];

% Korrelation mellan stokastiska variabler
```

```

probddata.correlation =    [1.0 0 0 0 0 0 0 0 -0.27 0 0 0 0 0;
                           0 1.0 0 0 0 0 0 0 0 -0.43 0 0 0 0;
                           0 0 1.0 0 0 0 0 0 0 0 -0.47 0 0 0;
                           0 0 0 1.0 0 0 0 0 0 0 0 -0.07 0 0;
                           0 0 0 0 1.0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
                           0 0 0 0 0 1.0 0 0 0 0 0 0 0 0;
                           0 0 0 0 0 0 1.0 0 0 0 0 0 0 0;
                           0 0 0 0 0 0 0 1.0 0 0 0 0 0;
                           -0.27 0 0 0 0 0 0 0 1.0 0 0 0 0 0;
                           0 -0.43 0 0 0 0 0 0 0 1.0 0 0 0 0;
                           0 0 -0.47 0 0 0 0 0 0 0 1.0 0 0 0;
                           0 0 0 -0.07 0 0 0 0 0 0 0 1.0 0 0;
                           0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1.0 0;
                           0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1.0];

```

```

% Antal boggiepassager för lok & överlastade vagnar, 250 kN
% N1=85949;

```

```

% Antal boggiepassager för lastade vagnar, 250 kN
% N2=20119089;

```

```

% Antal boggiepassager för persontrafik, 250 kN
% N3=11535323;

```

```

% Antal boggiepassager olastade vagnar, 250 kN
% N4=10120446;

```

```

% Antal boggiepassager för lok & överlastade vagnar, 300 kN
% N5=11877;

```

```

% Antal boggiepassager för lastade vagnar, 300 kN
% N6=2780133;

```

```

% Antal boggiepassager för persontrafik, 300 kN
% N7=1328329;

```

```

% Antal boggiepassager olastade vagnar, 300 kN
% N8=1165402;

```

```

probddata.parameter = distribution_parameter(probddata.marg);

```

```

analysisopt.ig_max    = 1000; % Max antal globala iterationer
analysisopt.il_max    = 10; % Max antal linjeiterationer
analysisopt.e1        = 0.0001; % Tolerans hur nära designpunkten är till brottgränsytan
analysisopt.e2        = 0.0001; % Tolerans hur noggrannt gradienten pekar mot startpunkten
analysisopt.step_code = 0; % 0: steglängd m.h.a. Armijo rule
analysisopt.grad_flag = 'DDM'; % Direkt differentiering
analysisopt.sim_point = 'dspt'; % design punkt
analysisopt.stdv_sim  = 1; % Standardavvikelse av sampling distribution

```

```

analysisopt.num_sim = 100000; % Antal simuleringar
analysisopt.target_cov = 0.0125; % Riktvärde variationskoefficient på
brottsannolikhetestimering

```

```

gfundata(1).evaluator = 'basic'; % Typ av brottgränsevaluator
gfundata(1).type = 'expression'; % Typ av brottgränsfunktion
gfundata(1).parameter = 'no';
% Brottgränsfunktion
gfundata(1).expression = '1-85949/(x(14)*10^(x(13)-3.08*log10((x(9)+1)*x(1)*26/250)))-
20119089/(x(14)*10^(x(13)-3.08*log10((x(10)+1)*x(2)*26/250)))-
11535323/(x(14)*10^(x(13)-3.08*log10((x(11)+1)*x(3)*26/250)))-
10120446/(x(14)*10^(x(13)-3.08*log10((x(12)+1)*x(4)*26/250)))-11877/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10((x(9)+1)*x(5)*26/250)))-2780133/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10((x(10)+1)*x(6)*26/250)))-1328329/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10((x(11)+1)*x(7)*26/250)))-1165402/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10((x(12)+1)*x(8)*26/250)))';

```

```

% Brottgränsfunktionen deriverad med avseende på respektive variabel
gfundata(1).dgdq = { '-29.61538462*85949*(13/125*x(9)+13/125)/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10(13/125*(x(9)+1)*x(1))/log(10))*(x(9)+1)*x(1))';
'-29.61538462*20119089*(13/125*x(10)+13/125)/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10(13/125*(x(10)+1)*x(2))/log(10))*(x(10)+1)*x(2))';
'-29.61538462*11535323*(13/125*x(11)+13/125)/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10(13/125*(x(11)+1)*x(3))/log(10))*(x(11)+1)*x(3))';
'-29.61538462*10120446*(13/125*x(12)+13/125)/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10(13/125*(x(12)+1)*x(4))/log(10))*(x(12)+1)*x(4))';
'-29.61538462*11877*(13/125*x(9)+13/125)/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10(13/125*(x(9)+1)*x(5))/log(10))*(x(9)+1)*x(5))';
'-29.61538462*2780133*(13/125*x(10)+13/125)/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10(13/125*(x(10)+1)*x(6))/log(10))*(x(10)+1)*x(6))';
'-29.61538462*1328329*(13/125*x(11)+13/125)/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10(13/125*(x(11)+1)*x(7))/log(10))*(x(11)+1)*x(7))';
'-29.61538462*1165402*(13/125*x(12)+13/125)/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10(13/125*(x(12)+1)*x(8))/log(10))*(x(12)+1)*x(8))';
'-3.08*85949/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10(13/125*(x(9)+1)*x(1))/log(10))*(x(9)+1))-3.08*11877/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10(13/125*(x(9)+1)*x(5))/log(10))*(x(9)+1))';
'-3.08*20119089/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10(13/125*(x(10)+1)*x(2))/log(10))*(x(10)+1))-3.08*2780133/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10(13/125*(x(10)+1)*x(6))/log(10))*(x(10)+1))';
'-3.08*11535323/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10(13/125*(x(11)+1)*x(3))/log(10))*(x(11)+1))-3.08*1328329/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10(13/125*(x(11)+1)*x(7))/log(10))*(x(11)+1))';
'-3.08*10120446/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10(13/125*(x(12)+1)*x(4))/log(10))*(x(12)+1))-3.08*1165402/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10(13/125*(x(12)+1)*x(8))/log(10))*(x(12)+1))';
'-3.08*10120446/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10(13/125*(x(12)+1)*x(4))/log(10))*(x(12)+1))-3.08*1165402/(x(14)*10^(x(13)-
3.08*log10(13/125*(x(12)+1)*x(8))/log(10))*(x(12)+1))';

```

```

'85949/(x(14)^2*10^(x(13)-
3.08*log(13/125*(x(9)+1)*x(1))/log(10)))+20119089/(x(14)^2*10^(x(13)-
3.08*log(13/125*(x(10)+1)*x(2))/log(10)))+11535323/(x(14)^2*10^(x(13)-
3.08*log(13/125*(x(11)+1)*x(3))/log(10)))+10120446/(x(14)^2*10^(x(13)-
3.08*log(13/125*(x(12)+1)*x(4))/log(10)))+11877/(x(14)^2*10^(x(13)-
3.08*log(13/125*(x(9)+1)*x(5))/log(10)))+2780133/(x(14)^2*10^(x(13)-
3.08*log(13/125*(x(10)+1)*x(6))/log(10)))+1328329/(x(14)^2*10^(x(13)-
3.08*log(13/125*(x(11)+1)*x(7))/log(10)))+1165402/(x(14)^2*10^(x(13)-
3.08*log(13/125*(x(12)+1)*x(8))/log(10)))';
femodel = 0;
randomfield.mesh = 0;

```

Resultat från FERUM

Känslighetsanalys

```
#####
#                RESULTS FROM RUNNING FORM RELIABILITY ANALYSIS                #
#####
```

Number of iterations: 738

Time to complete the analysis: 57.125

Reliability index beta1: 4.6907

Failure probability pf1: 1.36157e-006

SENSITIVITIES OF THE RELIABILITY INDEX WITH RESPECT TO DISTRIBUTION PARAMETERS

```
-----
var      mean      std dev      par1      par2      par3      par4
1 -9.55495e-005 -1.81061e-007 -9.55495e-005 -1.81061e-007 0.00000e+000 0.00000e+000
2 -3.35934e-002 1.27192e-002 -3.35934e-002 1.27192e-002 0.00000e+000 0.00000e+000
3 -3.17423e-003 -7.77101e-004 -3.17423e-003 -7.77101e-004 0.00000e+000 0.00000e+000
4 -5.61952e-004 -3.16015e-006 -5.61952e-004 -3.16015e-006 0.00000e+000 0.00000e+000
5 -1.92802e-005 -1.09853e-008 -1.92802e-005 -1.09853e-008 0.00000e+000 0.00000e+000
6 -7.73304e-003 -4.26370e-003 -7.73304e-003 -4.26370e-003 0.00000e+000 0.00000e+000
7 -4.92535e-004 -2.87904e-005 -4.92535e-004 -2.87904e-005 0.00000e+000 0.00000e+000
8 -6.46785e-005 -4.51334e-008 -6.46785e-005 -4.51334e-008 0.00000e+000 0.00000e+000
9 -2.77094e-002 6.68383e-003 -1.29190e-003 -1.31437e-006 0.00000e+000 0.00000e+000
10 2.21866e+001 -1.19467e+002 -2.38083e+000 -1.02381e+001 0.00000e+000 0.00000e+000
11 -3.60729e-001 1.29077e-001 -5.43400e-002 1.19319e-003 0.00000e+000 0.00000e+000
12 -2.63642e-002 6.66862e-003 -4.37878e-003 -2.49704e-005 0.00000e+000 0.00000e+000
13 -2.53935e-002 -7.01754e-004 -2.53935e-002 -7.01754e-004 0.00000e+000 0.00000e+000
14 2.70604e+000 -3.70550e-004 2.70604e+000 -3.43490e-004 0.00000e+000 0.00000e+000
-----
```

SENSITIVITIES of THE FAILURE PROBABILITY WITH RESPECT TO DISTRIBUTION PARAMETERS

```
-----
var      mean      std dev      par1      par2      par3      par4
1 6.35893e-010 1.20498e-012 6.35893e-010 1.20498e-012 0.00000e+000 0.00000e+000
2 2.23568e-007 -8.46479e-008 2.23568e-007 -8.46479e-008 0.00000e+000 0.00000e+000
3 2.11248e-008 5.17170e-009 2.11248e-008 5.17170e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
4 3.73985e-009 2.10312e-011 3.73985e-009 2.10312e-011 0.00000e+000 0.00000e+000
5 1.28312e-010 7.31085e-014 1.28312e-010 7.31085e-014 0.00000e+000 0.00000e+000
6 5.14643e-008 2.83754e-008 5.14643e-008 2.83754e-008 0.00000e+000 0.00000e+000
7 3.27788e-009 1.91603e-010 3.27788e-009 1.91603e-010 0.00000e+000 0.00000e+000
8 4.30443e-010 3.00368e-013 4.30443e-010 3.00368e-013 0.00000e+000 0.00000e+000
9 1.84410e-007 -4.44817e-008 8.59773e-009 8.74730e-012 0.00000e+000 0.00000e+000
10 -1.47655e-004 7.95070e-004 1.58447e-005 6.81360e-005 0.00000e+000 0.00000e+000
11 2.40069e-006 -8.59024e-007 3.61639e-007 -7.94079e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
12 1.75457e-007 -4.43805e-008 2.91413e-008 1.66181e-010 0.00000e+000 0.00000e+000
13 1.68997e-007 4.67025e-009 1.68997e-007 4.67025e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
14 -1.80090e-005 2.46606e-009 -1.80090e-005 2.28597e-009 0.00000e+000 0.00000e+000
-----
```

Variabelvärden i designpunkt

Variabel nr.	Variabel	Värde i designpunkten
1	Axellast, lok & överlastade axlar (250 kN)	237
2	Axellast, lastade axlar (250 kN)	181
3	Axellast, persontrafik (250 kN)	104
4	Axellast, olastade axlar (250 kN)	48
5	Axellast, lok & överlastade axlar (300 kN)	284
6	Axellast, lastade axlar (300 kN)	232
7	Axellast, persontrafik (300 kN)	120
8	Axellast, olastade axlar (300 kN)	48
9	Dynamikkoefficient (Y=D-1), lok & överlastade axlar	0,048
10	Dynamikkoefficient (Y=D-1), lastade axlar	0,43
11	Dynamikkoefficient (Y=D-1), persontrafik	0,16
12	Dynamikkoefficient (Y=D-1), olastade axlar	0,17
13	log N (första termen)	11,85
14	Modellosäkerhet materialvariabler	1,00

Bilaga H

MATLAB kod, Brottmekanisk analys

% Brottmekanisk analys av spricka vid kontinuitetsplåt (LEFM)

clear all
close all

m=3;
C=2*10⁽⁻¹³⁾;

%Kc=99*sqrt(1000); % Fracture toughness 99 [Mpa*sqrt(m)] motsvarande kravet i normen
om slagseghet på minst 27 J (K Eriksson 1992)

Kc=44*sqrt(1000); % Motsvarande kravet enligt kanadensisk norm, om spricka upptäcks med
K>44 MPa sqrt(m). Rimligt krav eftersom man ej vill upptäcka spricka som gör att man måste
byta bron med detsamma...

S=52.8; % Spänningsvidd
n=225000; % Antal cykler per år
b=297/2; % halva flänsbredden
a0=5; % Initiell spricklängd
A=5; % Sprickdetekteringsfaktor
Snom=52.8; % Nominell spänning
fyd=235/1.2; % Dimensionerande flytspänning (s.k 3)

% Inspektionsintervall
insp=400000; % ca 1.75 år

N1=insp;
N2=2*insp;
N3=3*insp;
N4=4*insp;
N5=5*insp;
N6=6*insp;
N7=7*insp;
N8=8*insp;
N9=9*insp;
N10=10*insp;
N11=11*insp;
N12=12*insp;
N13=13*insp;
N14=14*insp;
N15=15*insp;
N16=16*insp;
N17=17*insp;
N18=18*insp;
N19=19*insp;
N20=20*insp;

```

% Antal iterationer
j=1500;
% Steglängd
step=0.1;
for i=1:j
    a=a0+(i-1)*step;
    B=sqrt(2*b/(pi*a)*tan(pi*a/(2*b)));
    K=B*S*sqrt(pi*a);
    N(i)=step/(C*K^m);
    ac=(Kc/(S*B))^2*1/pi;
    pcd(i)=1-A/a;
    ames(i)=a;
    Np(i)=sum(N);
    Sigma=b/(b-a)*Snom;
    Khist(i)=K;
    if Np(i)>N19
        p(20)=1-A/a;
        aa(20)=a;
        NN(20)=Np(i);
    elseif Np(i)>N18
        p(19)=1-A/a;
        aa(19)=a;
        NN(19)=Np(i);

    elseif Np(i)>N17
        p(18)=1-A/a;
        aa(18)=a;
        NN(18)=Np(i);

    elseif Np(i)>N16
        p(17)=1-A/a;
        aa(17)=a;
        NN(17)=Np(i);

    elseif Np(i)>N15
        p(16)=1-A/a;
        aa(16)=a;
        NN(16)=Np(i);

    elseif Np(i)>N14
        p(15)=1-A/a;
        aa(15)=a;
        NN(15)=Np(i);

    elseif Np(i)>N13
        p(14)=1-A/a;
        aa(14)=a;
        NN(14)=Np(i);

    elseif Np(i)>N12

```

```

    p(13)=1-A/a;
    aa(13)=a;
    NN(13)=Np(i);

elseif Np(i)>N11
    p(12)=1-A/a;
    aa(12)=a;
    NN(12)=Np(i);

elseif Np(i)>N10
    p(11)=1-A/a;
    aa(11)=a;
    NN(11)=Np(i);

elseif Np(i)>N9
    p(10)=1-A/a;
    aa(10)=a;
    NN(10)=Np(i);

elseif Np(i)>N8
    p(9)=1-A/a;
    aa(9)=a;
    NN(9)=Np(i);

elseif Np(i)>N7
    p(8)=1-A/a;
    aa(8)=a;
    NN(8)=Np(i);

elseif Np(i)>N6
    p(7)=1-A/a;
    aa(7)=a;
    NN(7)=Np(i);

elseif Np(i)>N5
    p(6)=1-A/a;
    aa(6)=a;
    NN(6)=Np(i);

elseif Np(i)>N4
    p(5)=1-A/a;
    aa(5)=a;
    NN(5)=Np(i);

elseif Np(i)>N3
    p(4)=1-A/a;
    aa(4)=a;
    NN(4)=Np(i);

elseif Np(i)>N2

```

```

    p(3)=1-A/a;
    aa(3)=a;
    NN(3)=Np(i);

elseif Np(i)>N1
    p(2)=1-A/a;
    aa(2)=a;
    NN(2)=Np(i);

elseif Np(i)<N1
    p(1)=1-A/a;
    aa(1)=a;
    NN(1)=Np(i);

end

if a>ac
    break
end
if a>b
    break
end
if Sigma>fyd
    break
end
end
end

Ntot=sum(N)

% Ta bort sannolikheter < 0
pnew=p;
pbigger=find(p>0);
p=pnew(:,pbigger);

% Sannolikhet att upptäcka sprickan vid respektive inspektionsintervall
% Nolla sannolikheter upp till 20 inspektioner
q=size(p);
h=q(1,2);
for z=0:20
    p(h+z)=0;
    if (h+z+1)>20
        break
    end
end
end

```

% Total sannolikhet att sprickan upptäcks innan den når kritisk längd

```
ptot=p(1)+(1-p(1))*p(2)+(1-p(1))*(1-p(2))*p(3)+(1-p(1))*(1-p(2))*(1-p(3))*p(4)+(1-  
p(1))*(1-p(2))*(1-p(3))*(1-p(4))*p(5)+(1-p(1))*(1-p(2))*(1-p(3))*(1-p(4))*(1-p(5))*p(6)+(1-  
p(1))*(1-p(2))*(1-p(3))*(1-p(4))*(1-p(5))*(1-p(6))*p(7)+(1-p(1))*(1-p(2))*(1-p(3))*(1-  
p(4))*(1-p(5))*(1-p(6))*(1-p(7))*p(8)+(1-p(1))*(1-p(2))*(1-p(3))*(1-p(4))*(1-p(5))*(1-  
p(6))*(1-p(7))*(1-p(8))*p(9)+(1-p(1))*(1-p(2))*(1-p(3))*(1-p(4))*(1-p(5))*(1-p(6))*(1-  
p(7))*(1-p(8))*(1-p(9))*p(10)+(1-p(1))*(1-p(2))*(1-p(3))*(1-p(4))*(1-p(5))*(1-p(6))*(1-  
p(7))*(1-p(8))*(1-p(9))*(1-p(10))*p(11)+(1-p(1))*(1-p(2))*(1-p(3))*(1-p(4))*(1-p(5))*(1-  
p(6))*(1-p(7))*(1-p(8))*(1-p(9))*(1-p(10))*(1-p(11))*p(12)+(1-p(1))*(1-p(2))*(1-p(3))*(1-  
p(4))*(1-p(5))*(1-p(6))*(1-p(7))*(1-p(8))*(1-p(9))*(1-p(10))*(1-p(11))*(1-p(12))*p(13)+(1-  
p(1))*(1-p(2))*(1-p(3))*(1-p(4))*(1-p(5))*(1-p(6))*(1-p(7))*(1-p(8))*(1-p(9))*(1-p(10))*(1-  
p(11))*(1-p(12))*(1-p(13))*p(14)+(1-p(1))*(1-p(2))*(1-p(3))*(1-p(4))*(1-p(5))*(1-p(6))*(1-  
p(7))*(1-p(8))*(1-p(9))*(1-p(10))*(1-p(11))*(1-p(12))*(1-p(13))*(1-p(14))*p(15)+(1-  
p(1))*(1-p(2))*(1-p(3))*(1-p(4))*(1-p(5))*(1-p(6))*(1-p(7))*(1-p(8))*(1-p(9))*(1-p(10))*(1-  
p(11))*(1-p(12))*(1-p(13))*(1-p(14))*(1-p(15))*p(16)+(1-p(1))*(1-p(2))*(1-p(3))*(1-  
p(4))*(1-p(5))*(1-p(6))*(1-p(7))*(1-p(8))*(1-p(9))*(1-p(10))*(1-p(11))*(1-p(12))*(1-  
p(13))*(1-p(14))*(1-p(15))*(1-p(16))*p(17)+(1-p(1))*(1-p(2))*(1-p(3))*(1-p(4))*(1-p(5))*(1-  
p(6))*(1-p(7))*(1-p(8))*(1-p(9))*(1-p(10))*(1-p(11))*(1-p(12))*(1-p(13))*(1-p(14))*(1-  
p(15))*(1-p(16))*(1-p(17))*p(18)+(1-p(1))*(1-p(2))*(1-p(3))*(1-p(4))*(1-p(5))*(1-p(6))*(1-  
p(7))*(1-p(8))*(1-p(9))*(1-p(10))*(1-p(11))*(1-p(12))*(1-p(13))*(1-p(14))*(1-p(15))*(1-  
p(16))*(1-p(17))*(1-p(18))*p(19)+(1-p(1))*(1-p(2))*(1-p(3))*(1-p(4))*(1-p(5))*(1-p(6))*(1-  
p(7))*(1-p(8))*(1-p(9))*(1-p(10))*(1-p(11))*(1-p(12))*(1-p(13))*(1-p(14))*(1-p(15))*(1-  
p(16))*(1-p(17))*(1-p(18))*(1-p(19))*p(20);
```

% sannolikhet att sprickan ej upptäcks

pfailure=1-ptot

subplot(1,2,1)

plot(Np,ames)

title('Spricklängd som funktion av antal spänningscykler');

xlabel('Antal spänningscykler, N');

ylabel('Spricklängd, a');

subplot(1,2,2)

plot(pcd,ames)

axis([0 1 0 a+5])

title('Sannolikhet för sprickdetektering som funktion av spricklängd');

xlabel('Sannolikhet för sprickdetektering, p(cd)');

ylabel('Spricklängd, a');