



CHALMERS



Preliminärdimensionering av plattrambroar Med parallelliserade FEM-analyser enligt SBD

Examensarbete inom högskoleingenjörprogrammet Byggingenjör

JON DIFS

FREDRIK KARLSSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Konstruktionsteknik
Betongbyggnad
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Examensarbete 2015:91
Göteborg, Sverige 2015

EXAMENSARBETE 2015:91

Preliminärdimensionering av platttrambroar

Med parallelliserade FEM-analyser enligt SBD

Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

JON DIFS

FREDRIK KARLSSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Konstruktionsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2015

Preliminärdimensionering av plattrambroar
Med parallelliserade FEM-analyser enligt SBD

*Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör*

JON DIFS

FREDRIK KARLSSON

© JON DIFS & FREDRIK KARLSSON, 2015

Examensarbete 2015:91 / Institutionen för bygg- och miljöteknik,
Chalmers Tekniska Högskola 2015

Institutionen för bygg och miljöteknik
Avdelningen för Konstruktionsteknik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Omslag: Plattrambro på väg 195 över Åsenvägen i Jönköping.

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Göteborg 2015

Preliminärdimensionering av plattrambroar

Med parallelliserade FEM-analyser enligt SBD

Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

JON DIFS & FREDRIK KARLSSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för Konstruktionsteknik

Betongbyggnad

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Brodimensionering följer idag i stora drag en steg för steg process kallad Point Based Design men som dock innehåller flera stora nackdelar. Det utvecklas därför ständigt nya metoder och möjligheter för att göra bättre dimensioneringar som slutligen skall ge så optimerade konstruktioner som möjligt. Det gäller framförallt den designmetodik kallad Set Based Design som detta projekt bygger på.

Syftet med detta examensarbete är att vidareutveckla ett tidigare framtaget datorscript där försök gjordes till att tillämpa SBD metoden för att preliminärdimensionera två brotyper i ett spann. I detta projekt, som baseras på samma script, skall istället en preliminärdimensionering av plattrambroar göras. En plattrambro är en komplex konstruktion med ingående stödkonstruktioner som vanligen byggs över gång- och cykelvägar i tätort. Brotypen är väldigt vanlig i Sverige vilket gör den mycket intressant ur ett optimeringsperspektiv.

För att analysera och modellera plattrambroarna användes Abaqus med hjälp av ett nytt script, baserat på det tidigare scriptet och som skrevs i programmeringsspråket Python.

Av resultaten från det framtagna scriptet så visar det på intressant potential att kunna användas för preliminärdimensionering av plattrambroar. För att bedöma scriptets pålitlighet så gjordes en validering av scriptet med en verkligt byggd plattrambro av WSP. Därefter gjordes jämförelser med hänsyn till kostnader och miljöpåverkan. Från resultaten därifrån så konstaterades att scriptet och den implementerade SBD metodiken visar på lovande men blandade resultat. Men förbättringar och fördjupningar i scriptet bör göras för att ge det högre pålitlighet och därmed mer användbart i preliminärdimensioneringsprocessen.

Nyckelord: Plattrambro, Preliminärdimensionering, Point Based Design, Set Based Design, Finita element metod, Python, Abaqus, Script

Pre-design of slab frame bridges

With parallel FEM-analyses according to SBD

Diploma Thesis in the Engineering Programme

Building and Civil Engineering

JON DIFS & FREDRIK KARLSSON

Department of Civil and Environmental Engineering

Division of Structural Engineering

Concrete structures

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

Design of bridges is today mostly done by following a design method called Point Based Design but it comes with a lot of disadvantages. New methods are evolving to make the design process as accurate and optimal as possible and in the end give better bridges. This is true for Set Based design which this thesis is based upon.

The purpose of this project is to continue to develop an existing script where Set Based is implemented. The script was earlier applied to make a pre-design on two one span bridges. In this project however the same script will be changed to analyze and pre-design slab frame bridges. A slab frame bridge has a complex design with supportive elements and it is usually built over walkways in urban areas. This type of bridge is very common in Sweden and that makes it interesting from an optimization perspective.

For analyzing and modeling of bridges a Python script was developed and the finite element software Abaqus was used for running the analyses.

From the results of the developed script, it shows interesting potential to be used in a pre-design phase of slab frame bridges. To evaluate the results a validation of the script was made to an existing, already built slab frame bridge, designed by WSP, to estimate its reliability. After that, comparisons were made with regard to cost and environmental impact. The overall conclusion from there is that the script and the implemented Set Based Design shows promising results. However further studies and improvements should be done in the script to improve its performance and thereby usefulness to be used on pre-designing slab frame bridges.

Key words: Slab Frame Bridge, Predesign of bridges, Point Based Design, Set Based Design, Finite element analysis, Python, Abaqus

Innehållsförteckning

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	III
FÖRORD	VI
BETECKNINGAR	VII
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	2
1.2 Syfte	2
1.3 Metod	2
1.4 Avgränsningar	3
2 DESIGNPROCESSER	4
2.1 Point Based Design (PBD)	5
2.2 Set Based Design (SBD)	7
3 BROPROJEKTERING	9
3.1 Broprojekteringens olika steg	10
4 PLATTRAMBRO	11
4.1 Sneda korsningsvinklar:	12
4.2 Konstruktion	13
4.2.1 Brobaneplatta	13
4.2.2 Ramben	13
4.2.3 Vingmurar	14
4.2.4 Voter	14
4.2.5 Vägbank	15
4.2.6 Bottenplattor	15
4.2.7 Kantbalk	15
5 LASTER OCH DIMENSIONERING	16
5.1 Variation med tiden	16
5.2 Variation i rummet	17
5.3 Lastkombinationer	17
6 TIDIGARE SCRIPT	19
6.1 Struktur	19
CHALMERS , <i>Bygg- och miljöteknik</i> , Examensarbete 2015:91	III

7	PLATTRAMBRO SCRIPT	21
7.1	Modellering och analys i Abaqus	21
7.2	Modellens geometri	22
7.2.1	Brobanaplatta	22
7.2.2	Ramben	22
7.2.3	Vingmurar	22
7.2.4	Kantbalkar	22
7.2.5	Upplagsvillkor	23
7.3	Plattrambromodellen	24
7.4	Modellens laster	25
7.4.1	Trafiklast – lastfall 1	25
7.4.2	Införande av trafiklasten i scriptet	27
7.4.3	Jordtryck	27
7.4.4	Egentyngd	28
7.4.5	Tillskottsmoment från vingmurar	29
7.5	Modellens anpassning i Abaqus	30
7.5.1	Mesh	30
7.5.2	Path	30
7.6	Konvergensstudie	31
7.7	Scriptets utdata	33
7.8	Optimering av utdata	33
8	DIMENSIONERING AV ARMERING	34
8.1	Dimensionerande snittkrafter	34
8.2	Dimensionering enligt Eurokod	35
8.2.1	Betongplattan	35
8.2.2	Rambenen	36
8.2.3	Förankringslängder	36
8.3	Kontroller enligt Eurokod	37
9	RESULTAT OCH DISKUSSION	38
9.1	Bromodellen	38
9.2	Jämförelse armeringsmängd WSP bron	39
9.3	Jämförelse totalkostnad WSP bron	40
9.4	Jämförelse CO ₂ WSP bron	42
9.5	Brostatistik genomförbarhet	43
10	SLUTSATS	44
11	UTVECKLING OCH TILLÄMPNING	45
12	REFERENSER	47

Förord

Detta examensarbete utfördes som kandidatarbete på avdelningen för Konstruktionsteknik på Chalmers och är en fortsättning på ett tidigare examensarbete på masternivå från 2014 på samma avdelning.

Vi vill gärna tacka avdelningen och vår handledare Rasmus Rempling för all hjälp vi har fått under projektets gång. Dessutom ägnas ett särskilt tack till upphovsmännen bakom det tidigare examensarbete som gjorde hela vårt projektarbete möjligt. Speciellt till David Tarazona Ramos som hjälpt oss med förståelse och uppbyggnad av det ursprungliga scriptet och som dessutom alltid svarat på frågor gällande kodning och Finita element-teori.

Då vi inte hade några som helst förkunskaper vare sig i programmeringsspråket Python eller i finita elementmjukvaran Abaqus, så har många timmar spenderats på kvällar och helger för att kunna slutföra projektet. Examensarbetet har därför varit mycket omfattande och svårt men samtidigt oerhört givande. Vi har fått mycket nya kunskaper och erfarenheter som vi med all säkerhet kommer att ha stor nytta av i framtida studier och senare ute i arbetslivet.

Göteborg juni 2015

JON DIFS
FREDRIK KARLSSON

Beteckningar

BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer Aided Design
DFMA	Design for Manufacturing Assembly
FEM	Finita element metoden
PBD	Point Based Design
QFD	Quality Function Deployment
SBD	Set Based Design
SLS	Serviceability Limit State (bruksgränstillstånd)
ULS	Ultimate Limit State (brottgränstillstånd)

1 INLEDNING

Vid brodimensionering så finns det flera olika parametrar att ta hänsyn till som mer eller mindre påverkar den slutgiltiga konstruktionen och arkitekturen hos bron. Dessa variabler beaktas i den process benämnd broprojektering där en preliminär dimensionering av bron först tas fram (Vägverket, 1996). Att kunna göra en så bra preliminär brodimensionering som möjligt är därför av stort värde då det ökar chansen till en bättre och mer optimerad konstruktion vid den slutliga dimensioneringen.

Att dimensionera en bro mer ingående följer traditionellt sätt metoden Point Based Design som är en steg för steg process. Metoden är väl etablerad i de flesta ingenjörsområden men har visat sig ha flera betydande nackdelar. Det var därför som man hos biltillverkaren Toyota i början av 1990-talet utvecklade en helt ny typ av metod som idag benämns för Set Based Design (SBD) (Ward, K.Liker, J.Cristiano, & K.Sobek II, 1995). Metoden bygger principiellt på att man arbetar med flera förslag parallellt i dimensioneringsprocessen och utesluter mindre passande alternativ efterhand tills endast ett fåtal förslag blir kvar.

SBD anses dock vara en mycket resurskrävande process men har i och med den digitala utvecklingen, med snabbare datorer och bättre datorverktyg inom CAD, BIM och FEM, blivit mer lämpligt och lättare att implementera i olika datormodeller ("CAD - The greatest advance in construction history," 2012).

SBD är nyligen introducerat i fältet för byggnadskonstruktion till skillnad från andra branscher där metoden använts under en längre tid (Fernández & Ramos, 2014). Att introducera SBD i datorskript skulle därför kunna ha en stor nytta för att också kunna göra en preliminärdimensionering av plattrambroar som till slut skulle kunna medföra att en så optimal konstruktion som möjligt kan fås fram i olika perspektiv.

Detta examensarbete är en fortsättning på det tidigare masterexamensarbetet "*Applicability of Set-Based Design on Structural Engineering*" från 2014. Där togs ett datorskript fram som introducerade SBD till att kunna användas på enspannsbroar. I detta projekt så görs ett försök till att vidareutveckla datorskriptet till att användas för att preliminärdimensionera plattrambroar istället. Bromodellen är en av de vanligaste broarna i Sverige och projektet är ett önskemål från och i samarbete med avdelningen på Konstruktionsteknik på Chalmers.

1.1 Bakgrund

SBD som metod har tidigare varit ganska ovanligt i fältet för brokonstruktion. Därför så gjordes ett försök att introducera SBD i ett script för preliminärdimensionering av broar i masterexamensarbetet ”*Applicability of Set-Based Design on Structural Engineering*” från år 2014. Scriptet utvecklades i programmeringsspråket Python och kördes sedan i Finita element mjukvaran Abaqus där analyser genomfördes. Utifrån analyserna kunde armeringsdimensionering och olika kontroller göras enligt Eurokod i samma program.

I det tidigare examensarbetet så tillämpades därefter scriptet på två existerande enspanssbroar från NCC. Det gjordes jämförelser i kostnader och CO₂utsläpp mellan scriptets framräknade broar och de redan byggda broarna för att kunna ge ett värde på scriptets potential och tillförlitlighet.

Från resultaten i masterexamensarbetet drogs slutsatserna att scriptet gav mycket likartade resultat med de redan byggda broarna. Det visade på stor potential till att göra en preliminärdimensionering i broprojekteringsprocessen med hög noggrannhet. Samtidigt blev resultaten överlag bättre jämfört med den traditionella dimensioneringsmetoden Point Based Design som tillämpades när broarna projekterades fram. Det påpekades dock att scriptet behöver vidareutvecklas mera för att kunna ge det större flexibilitet att kunna köras på andra brotyper än de studerade broarna.

1.2 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att fortsätta på det tidigare examensarbetet och vidareutveckla det befintliga scriptet till att kunna preliminärdimensionera plattrambroar istället. Mer ingående skall en fungerande plattrambromodell först byggas upp, därefter skall försök med att applicera olika laster på modellen göras och slutligen så skall snittkraftsuthämtningar och armeringsdimensionering läggas in i scriptet.

Till skillnad från de tidigare analyserade broarna så består plattrambroar av en annorlunda geometri med stödkonstruktioner såsom ramben och vingmurar som har stor inverkan på plattrambroarna och de snittkrafter som uppkommer. De tidigare kontrollerade broarna från NCC är dessutom av typen balkbroar, vilket plattrambroar inte är. Det gör det därför av stort intresse att se hur mycket scriptet behöver anpassas och förändras för att ge tillfredställande resultat på brotypen plattrambroar.

1.3 Metod

Inledningsvis gjordes en litteraturstudie för att få förståelse för vilka teorier som scriptet bygger på. Dessutom studerades plattrambroar och dess uppbyggnad och konstruktion både teoretiskt och praktiskt. Det var även nödvändigt att studera både hur Abaqus och Python fungerar och integrerar med varandra.

Uppbyggnaden av scriptet gjordes i Python, detta script styrde sedan Abaqus där FEM-analyserna och Eurokod beräkningar utfördes. Detta är en väldigt resurskrävande process och därför användes datorclustret GLENN för att genomföra analyserna.

För att kunna få en uppfattning av scriptets resultat så jämfördes dessa med en existerande plattrambro. Även handberäkningar gjordes för att validera resultaten.

1.4 Avgränsningar

Fokus låg primärt på anpassning av det befintliga scriptet till att kunna köras på plattrambroar och denna typ av bro endast. Dessutom gjordes en del förenklingar i bland annat brogeometrin för plattrambroar och tillhörande armeringsdimensionering.

Eftersom projektet är en preliminärdimensionering så utfördes inte så djupgående analyser och dimensionering. Scriptet var mer tänkt att ge en överblick och uppskattning över mängder av armering och brogeometrier. Detta då omfattningen på arbetet inte skulle bli för stort och invecklat, men också för att ta hänsyn till projektiden.

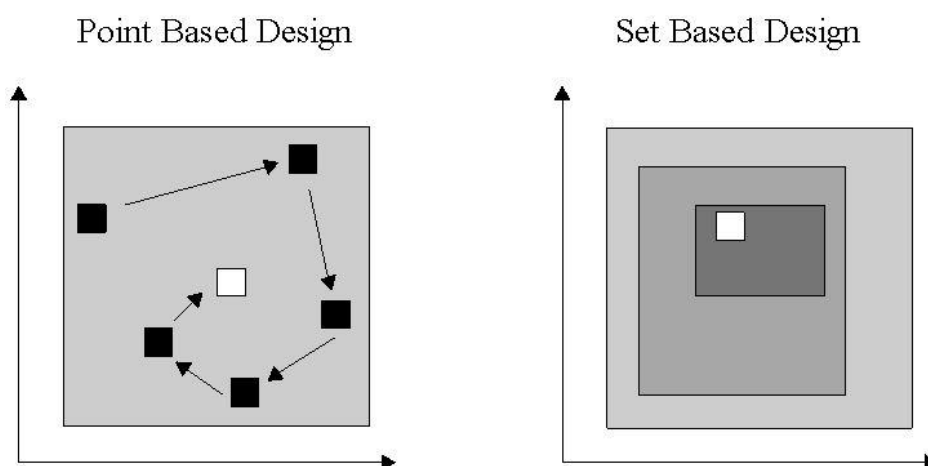
Många olika resultat kunde fås fram men endast jämförelser när det gäller total materialkostnad och CO₂ gjordes för att ge en total helhetsuppfattning. Validering med endast en redan byggd plattrambro valdes att göras även om kontroller mot flera hade varit att bra men tyvärr fick det lov att väljas bort på grund av tidsbrist.

2 DESIGNPROCESSER

Inom i stort sett alla ingenjörsområden idag finns det etablerat olika metoder för att göra dimensioneringar och tillvägagångssätt för att ta fram nya och bättre konstruktioner eller produkter. Många av dessa metoder har sitt ursprung i den traditionella metoden Point Based Design (PBD) men har med tiden utvecklats i olika riktningar och blivit ersatt av andra mer moderna metoder (Gray, 2011). Det gäller till exempel metoder såsom Set Based Design (SBD), Design for Manufacturing Assembly (DFMA), Quality Function Deployment (QFD) och LEAN. Där anses framförallt Toyotas produktionssystem som senare gett upphov till SBD varit av mycket stor framgång.

Idag fyller därför olika designprocesser en vital roll vid produktutveckling, eftersom det är en ständig drivkraft för att få fram bättre och mer optimerade designers till så låga kostnader som möjligt. Detta för att inte förlora konkurrenskraft och tappa viktig information och kunskaper i branscher där konkurrensen hårdnar mer och mer.

Designprocesserna skiljer sig från varandra på flera olika sätt. En tydlig skillnad kan ses mellan PBD och SBD som detta examensarbete berör. Principiellt utgår från samma "designspace" i processerna, men vägarna för att komma fram till ett färdigt koncept skiljer sig åt. En uppfattning om principerna kan ses i nedanstående *Figur 1*.



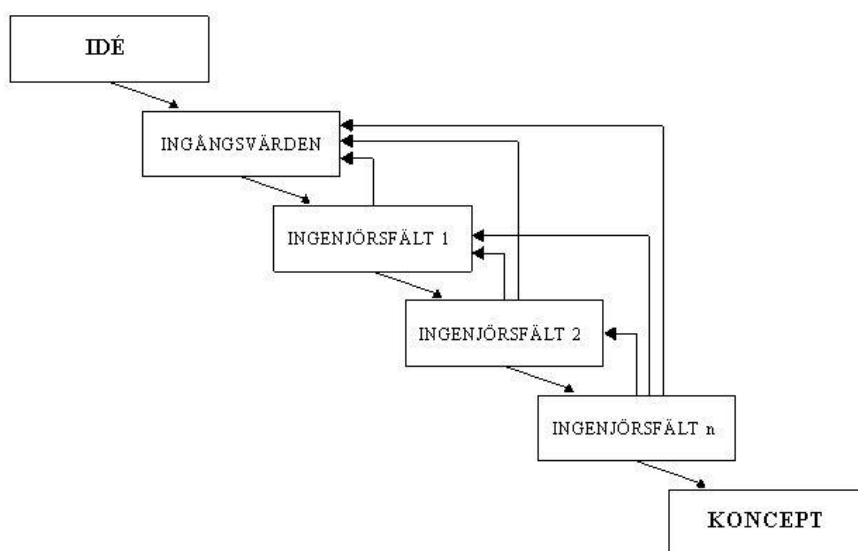
Figur 1 Principen för dimensionering utifrån samma utgångsläge och "designspace" (Fernández & Ramos, 2014)

2.1 Point Based Design (PBD)

Point Based Design (PBD) är en traditionell ingenjörsmetod där dimensioneringsprocessen att ta fram en ny produkt är sekventiellt linjär (Lee, Tommelein, & Ballard, 2012). PBD är enligt traditionellt sätt uppdelad i olika tekniska och enskilda delområden där varje instans har sin specialitet. Det typiska arbetssättet för processen, från idé till färdigt koncept, kan ses i *Figur 2*.

I varje delområde så tar specialister fram förslag ur en ”pool” av ursprungliga variabler, som kan vara olika krav och önskemål som en slutgiltig konstruktion måste uppfylla på olika sätt. Dessa variabler kan till exempel härstamma från broprojektering och förstudier, som är fallet i detta examensarbete. Under hela processkedjan i PBD så väljer man därför att jobba vidare med variabler som man anser har passande egenskaper för slutkonstruktionen.

Arbetsprocessen i varje instans är cirkulär och man jobbar enligt ett visst mönster, som kan skilja sig beroende på specialitet. Översiktligt i denna cirkel så tas förslag fram och analyseras, utvärderas och omarbetas så många gånger det krävs för att göra förslaget så bra som möjligt ("Engineering Design Process," 2015). Ett färdigt förslag skickas sedan vidare till nästa instans i produktutvecklingen där den cirkulära arbetsprocessen börjar om på nytt.



Figur 2 Omarbetningsprocessen som PBD ofta innebär, från idé till färdigt koncept. (Anpassning från (Bernstein, 1998))

Detta sätt att arbeta sekventiellt linjärt enligt PBD, är fortfarande ett av det mest vanliga design- och projekterings idag och har varit det de senaste decennierna (Ward et al., 1995). Men metoden har flertalet nackdelar som medför ett tendensskifte till att man frångår denna utvecklingsprocess mer och mer. Istället börjar man gå över till andra mer samverkande processer, såsom Set Based Design (SBD). Denna, och andra mer moderna metoder, innebär ofta att flera specialister är delaktiga i flera instanser

samtidigt i designutvecklingen och att man jobbar med flera förslag parallellt (Bernstein, 1998).

De väsentliga nackdelarna som finns med PBD anses vara följande:

- Ett genomarbetat förslag i ett teknikområde som skickats vidare till nästa instans kan där visa sig vara ogenomförbart och svårt att jobba vidare på. Detta leder ofta till en negativ upprepningsprocess där förslagen skickas tillbaka för omarbetning. Det slösar på mycket resurser i form av tid och pengar (Lee et al., 2012).
- Det cirkulära arbetssättet i varje instans kan inte fortgå hur länge som helst till följd av begränsning av tillgänglig tid och budget. Ett färdigt förslag som skickas vidare till nästa instans kan därför innehålla brister (Singer, Doerry, & Buckley, 2009).
- Bristen på kommunikation mellan berörda instanser då tendensen är att man bara lämnar över färdiga förslag till nästa enhet utan återkoppling. Detta medför att man i hela processkedjan tappar information vilket ökar risken för omarbetning och större resursslöseri (Gray, 2011).
- Urvalsprocessen är ganska snäv då man väljer att jobba vidare med vissa förslag initialt i processen. Tidigare instanser bestämmer ”spelplanen” för nästkommande vilket påverkar därför hela kedjans arbete. Det blir därför större sannolikhet att fler och sämre kompromisser behöver göras under resten av hela designprocessen. Även om ett kompromissat slutgiltigt förslag uppfyller många ursprungskrav och önskemål, blir det dåligt optimerat (Singer et al., 2009).

Trots att PBD har signifikanta nackdelar så finns det ändå sätt att förbättra metoden. För att effektivisera denna typ utvecklingsprocess och undvika upprepningar finns det en rad av förslag på vad som kan göras, exempel på dessa följer nedan (Ward et al., 1995):

- Öka kommunikationen mellan de olika berörda instanserna och jobba mer gränsöverskridande.
- Definiera nödvändiga specifikationer och tydliggöra ”designspacet” och andra krav tidigt i designprocessen
- Göra den iterativa processen snabbare och hålla uppe flera förslag samtidigt genom att fördröja avgörande beslut så länge som möjligt.

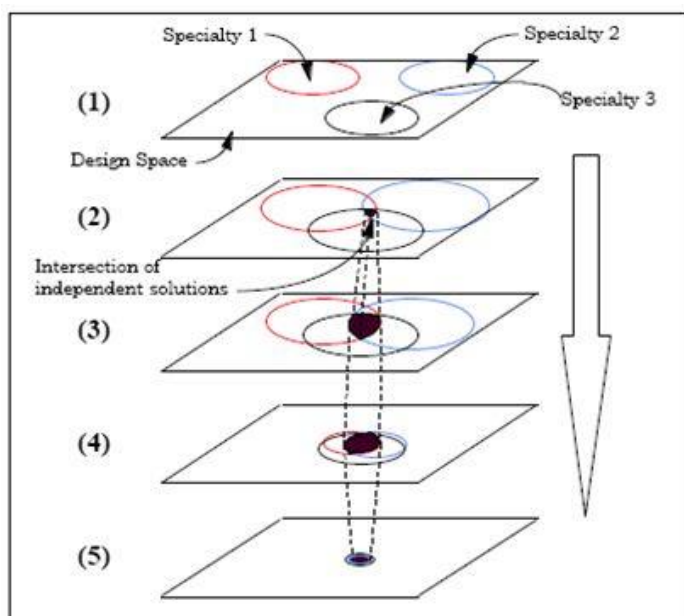
Men trots att förbättringar kan göras med PBD så har metoden så stora nackdelar att andra mer samverkande arbetsmetoder växer fram och tar över, däribland SBD (Gray, 2011).

2.2 Set Based Design (SBD)

SBD är en metod som har sitt ursprung i biltillverkaren Toyotas sätt att effektivisera sin bilproduktion (Ward et al., 1995). Till skillnad från PBD så utgår man i SBD från samma "pool" (eller "designspace") av idéer men man jobbar sedan parallellt med flera olika designkoncept samtidigt istället. I denna "pool" specificeras olika krav och variabler som är avgörande för slutdesignen på olika sätt och kan till exempel härröra från en förstudie precis som PBD.

I principen för SBD så försöker man hitta olika alternativ som har flera likheter med varandra och jobba vidare med dem under designprocessens gång. Avgörande beslut försöker man vänta med så länge som möjligt för att inte utesluta rimliga alternativ för tidigt in i designprocessen. Andra mindre och direkt olämpliga alternativ som tydligt inte uppfyller olika specifikationer och krav man har uppställt, kan uteslutas efter hand av de berörda parterna genom en så kallad steg-för-steg process (Lane & Woodman, 2000).

Arbetsättet i korthet för SBD fungerar på så sätt att man låter inblandade parter kommunicera och ställa upp parametrar och ta fram olika set av möjliga lösningar utifrån en "pool" av idéer, se *Figur 3*. Sedan försöker man hitta gemensamheter mellan förslagen och utesluter de alternativ som anses vara opassande och som inte uppfyller de krav man har. På så sätt så minskar man gradvis på uppsättningen av de ursprungliga möjliga lösningarna i den omfattningen att man får en konvergerande lösning i slutet på hela designprocessen. På detta sätt genom att börja mycket brett och med många ursprungliga förslag på olika områden och sedan gradvis eliminera opassande förslag så ges möjligheten att få en bättre och mer optimerad design som slutresultat jämfört med PBD (Ward, K.Liker, & K.Sobek II, 1999).



Figur 3 Principen för Set Based Design (Bernstein, 1998).

Fördelen med SBD är att i designprocessen så samverkar flera instanser med varandra till skillnad från PBD. Det ökar chansen för en mer optimerad design i slutet på en designprocess. Dessutom är de delaktiga parterna inte låsta till tidigare beslut eftersom man jobbar parallellt och är därför mer fri i sitt tänkande och handlande. Genom att behandla flera alternativ samtidigt så blir processen även mer kreativ samt ökar på intagandet av kunskap och information som senare vid uteslutning av förslag kommer till stor nytta då olämpliga alternativ kan upptäckas smidigare och uteslutas lättare (Singer et al., 2009).

Trots mycket fördelar med SBD finns det även ett flertal nackdelar som är utav stor betydelse:

- Metoden är mycket resurskrävande inledningsvis eftersom många förslag kan tas fram initialt i designprocessen och flera grupper jobbar samtidigt med flera olika uppsättningar av förslag (Ward et al., 1999).
- Metoden ställer höga krav på kommunikation och på rätt nivå mellan inblandade parter. Detta för att det inte ska ske en degradering av informationsutbyte som kan leda till att man tappar viktig information när man går vidare i designprocessen (Gray, 2011).

SBD har implementerats i flertalet ingenjörsområden såsom exempelvis inom bilindustrin, men inom arkitektur och byggnadskonstruktion så är tillämpningen fortfarande i sin linda. Det har gjorts ett fåtal studier och försök men trots det så är inte SBD en så implementerad metod på området (Lee et al., 2012). I och med att SBD förknippas med att vara mycket resurskrävande så medför det ofta, samt underlättar, ett parallelliserat arbetssätt. På grund av begränsade resurser så har det tidigare varit svårt att kunna tillämpa metoden fullt ut i området. Men med den digitala utvecklingen med snabbare datorkraft och mer avancerade program så neutraliseras denna nackdel mer och mer. Samtidigt råder inte nackdelen som kommunikation mellan människor kan innebära generellt sätt i SBD eftersom många digitala verktyg kan jobba med en annan typ av kommunikation.

Fördelarna med SBD är att metoden därför kan ha en mycket stor nytta i omfattande projekteringsprocesser inom byggnadskonstruktion såsom till exempel i broprojektering.

3 BROPROJEKTERING

För att åstadkomma en ny bro så genomgås ett antal processer som är av betydande vikt för det slutgiltiga resultatet som är den färdiga bron. I broprojektering, som är en del av vägprojekteringen, så är målet att uppnå en så bra utformning på bron som möjligt med hänsyn till många påverkande faktorer samt på- och avfarter. För broprojekteringen finns det även ett flertal påverkande parametrar och förutsättningar som man måste förhålla sig till. Det gäller till exempel väggeometri, geoteknik och hydrologiska grundförhållanden. Något som indirekt berör själva brokonstruktionen är också ekonomiska krav och miljöpåverkan (Vägverket, 1996).

Det som är anmärkningsvärt i broprojekteringen är att den bästa lösningen utifrån givna förutsättningar inte behöver vara optimalt utformad med avseende på till exempel brokostnad. Många påverkande faktorer kan även vara motstridiga samt påverkas av hur viktiga de är i sammanhanget. Därför kan vissa faktorer förringas i förmån för andra.

Broprojektering består av flera olika steg och projekteringsarbetet är successivt. Det medför att detaljrikedomen och utformningen på bron blir högre och högre för varje steg i projekteringen. Brodimensioneringen sker under hela processkedjan och att kunna göra en så optimal preliminärdimensionering som möjligt i tidigt skede underlättar stort vid senare dimensioneringen. Det ger därför goda förutsättningar till en bättre passande och mer optimerad bro som slutresultat i hela broprojekteringsprocessen.

3.1 Broprojekterings olika steg

De olika stegen som utgör broprojekteringen kan enligt (Trafikverket, 2015) kategoriseras i följande grupper som börjar med Förstudie och avslutas med färdig Bygghandling:

- **Förstudie:** I detta stadium görs inventering och utredningar med berörda myndigheter om det finns ett behov av nya vägar och broar. Det görs jämförelser mellan kostnader och lönsamheten/nyttan för att, på ett mycket schablonmässigt plan, reda ut de alternativ som anses lämpliga att gå vidare med till vägutredningen.
- **Vägutredning:** I detta steg går man igenom olika brotyper samt plats där den tänkta bron ska byggas, speciellt i tekniska men också i ekonomiska avseenden. I denna process så bestäms det också över om lägets profil och plan för bron.

Omfattningen på vägutredningen beror mycket på den tänkta bronns läge i terrängen. Utöver det bestäms vilken brotyp man vill utnyttja och för konstruktionen ändstödens lägen, eventuella mellanstöd, brolängd, brohöjd och bredd på bron. Även geotekniska grundförhållanden fastställs här. Detta stadium har stor påverkan på helhetsperspektiven i broprojekteringen såsom total brokostnad och materialåtgång för vald bro.

- **Arbetsplan:** Visar den fastlagda geografiska placeringen för den valda bron, samt investeringskostnader och miljöpåverkan. Innan arbetsplanen godkänns så har markägare och andra berörda möjlighet att få uttrycka sig över den preliminära arbetsplanen. Det är under detta skede själva dimensionering av bron med hänsyn till laster och grundläggningsförhållanden görs.
- **Bygghandling:** När arbetsplanen är godkänd upprättas förslagshandlingar och tekniska beskrivningar i bygghandlingen. Den skall innehålla uppgifter och nödvändiga handlingar för att kunna bygga bron såsom broritningar och mängdförteckningar. En slutlig dimensionering av bron sker i detta stadium.

Vägutredningen är en stor del av broprojekteringen och innebär att många olika variabler som påverkar utformningen och konstruktionen är aktuella. Det är även i vägutredningen en första preliminär dimensionering görs för en vald brotyp och därför har metoden SBD mycket goda möjligheter att praktiseras i detta stadium för att göra utformningen så optimal som möjligt.

Att introducera dessa variabler ifrån vägutredningen i ett datorscript där scriptet gör många olika beräkningsalternativ skulle därför vara mycket gynnsamt i vägutredningen och i hela broprojekteringsprocessen för att hitta en så bra optimerad bro som möjligt i olika avseenden. Detta gäller särskilt plattrambro typen som har flera beståndsdelar som kan varieras olika när man ser till tjocklekar, höjder och längder.

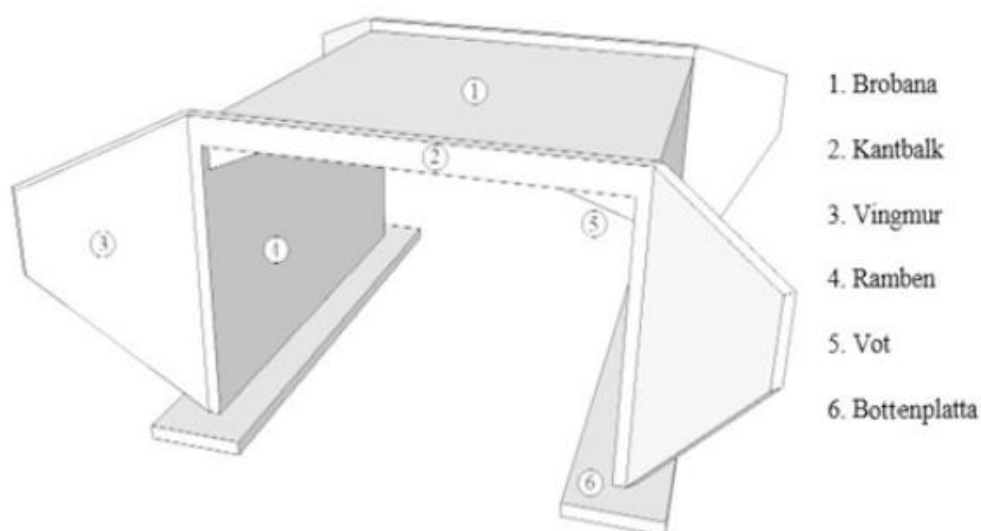
4 PLATTRAMBRO

En rambro är en av de vanligaste och mest dominerande brotyperna i Sverige när en bro ska utföras i ett spann. Den är vanlig i tätort där en gång-cykelväg genomgår rambroen undertill och en trafikerad väg overtill. Byggprocessen för rambrotypen är väl industrialiserad vilket medför att byggnationen är snabb och relativt effektiv (Hult, 2011).

Rambroar indelas i plattrambroar och balkrambroar och karaktäriseras av att det är en betongplatta som är ihopgjuten med ett par ramben (Trafikverket, 2015). Rambenen i sin tur vilar på bottenplattorna. Med en plattrambro menas att man utnyttjar en massiv armerad betongplatta som bär upp trafiklasterna (Axelsson, 2015). För balkrambroar är överdelen av bron istället av typen balk-betongplatta med balkar undertill brobaneplattan som vid ett tvärsnitt av bron har utseendet som ett T.

En rambro kan antingen byggas som slakarmerad eller spännarmerad. En slakarmerad rambro brukar vanligen utföras upp till en spännvidd på 20-25m då bron är mycket ekonomisk upp i de spännvidderna. För spännvidder vidare upp till ungefär 35 meter så brukar en spännarmerad bro utnyttjas istället (Vägverket, 1996) Slakarmering är som namnet antyder armering som inte förspänns vid prefabricerad tillverkning av betongelement eller vid platsgjutning. Spännarmering innebär istället att man innan gjutning förspänner armeringen ("Armering av betong," 2010).

En principiell skiss på en rak plattrambro kan ses i *Figur 4*, men ibland kan man behöva bygga en plattrambro med sneda korsningsvinklar om större vägar skall gå igenom undertill.



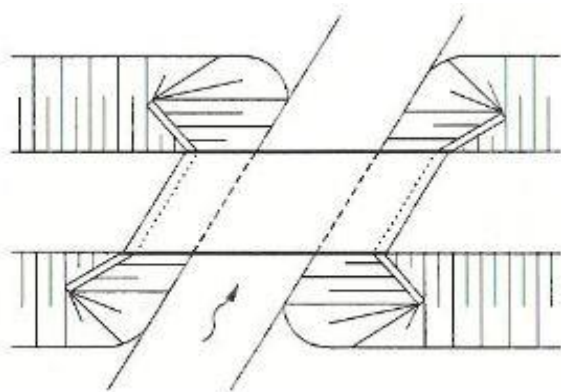
Figur 4 Principiell skiss för en plattrambro (Hult, 2011)

4.1 Sneda korsningsvinklar:

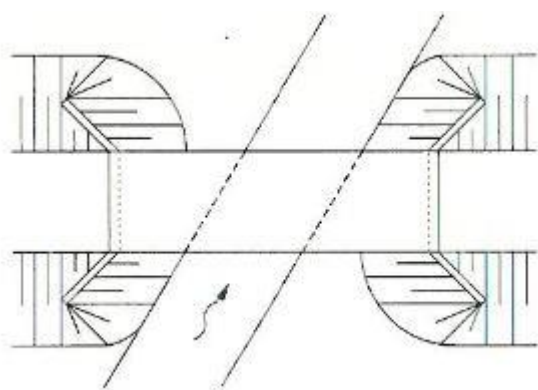
Att man kan behöva bygga broar med sneda korsningsvinklar beror ofta på att man vill få en god linjeföring på vägar som den tänkta bron skall byggas över (Vägverket, 1996). Det bör tilläggas att det är mer tekniskt komplicerat att få till dessa broar vid projektering och byggnation när det gäller exempelvis armeringsdimensionering. Ur ekonomisk synvinkel så är dock brotyper med sneda korsningsvinklar den bättre lösningen än andra brotyper eftersom de löser problemet med linjeföring. Dock medför det att bron i sig blir dyrare men det kan leda till sänkta kostnader på grund av vägen kan dras på andra sätt.

Storleken på korsningsvinklarna beror mycket på hur grundförhållandena ser ut och enligt rekommendationer från trafikverket så bör inte stödvinklarna understiga 75 grader vid mindre goda grundförhållanden jämfört med bronns längdriktning. Vid goda grundförhållanden bör vinklarna inte understiga 50 grader istället.

I vissa fall så kan man dock slippa snedvinkliga broar om brobredden görs mindre men om spännvidden istället förlängs på bron, se *Figur 5* och *Figur 6*.



Figur 5 Snedvinklig plattrambro sedd uppifrån (Vägverket, 1996)



Figur 6 Rätvinklig plattrambro sedd uppifrån (Vägverket, 1996)

4.2 Konstruktion

En plattrambro har flera parametrar som är av betydande karaktär för konstruktionen när de väljs vid dimensioneringen av bron. Det gäller till exempel tjockleken på rambenen och brobaneplattan som även påverkar armeringsinläggningen.

Konstruktionen hos en rambro påverkas också av flera yttre faktorer, såsom placering i fältet, estetiska skäl och hur den är tänkt att användas när man ser till trafikflöden. Något som har stor betydelse för broformningen och som påverkar konstruktionen avsevärt är hur man även väljer att göra genomfarten under bron och broöppningen (Vägverket, 1996). Till en plattrambro finns också stödkonstruktioner som skall ge understöd till bron och avlasta den. Därför byggs de vanligen med så kallade vingmurar.

En plattrambro kan därför dimensioneras på många olika sätt vilket gör konstruktionen mycket varierande och därför svår att optimera. Olika ingående delar i konstruktionen utsätts för olika laster och kan dimensioneras på inbördes olika sätt, som beskrivs mer ingående och tas hänsyn till i Trafikverkets rekommendationer.

4.2.1 Brobaneplatta

Brobaneplattan tar upp laster från trafiken och för sedan över dem till rambenen som den är fast inspänd till. I kanterna sitter det även ingjutna kantbalkar till plattan. Brobaneplattan utförs som ett massivt element i en plattrambro för att tillsammans med rambenen ge vridstyvhet i tvärlängd (Trafikverket, 2014).

4.2.2 Ramben

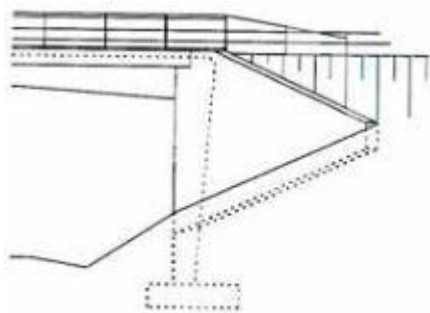
Rambenen, även kallade frontmurar, är av massiva betongelement som bär upp själva brobaneplattan. Rambenen utsätts för jordtryckslaster och görs mer stabila med hjälp av vingmurarna. I botten vilar rambenen på bottenplattor (Vägverket, 1996).

Trafikverket anger flertalet rekommendationer att ta hänsyn till vid dimensionering av rambenen.

- Höjden på rambenen i förhållande till bronns spännvidd bör vara minst 1:4 vid slakarmering och minst 1:6 vid spännarmerad betong.
- Då grundläggning sker mot en undergrund av berg eller jord med låg bärrighet behöver höjden på rambenen vara högre i jämförelse med andra jordar såsom fast lagrat friktionsmaterial.
- De bägge rambenen bör vara relativt symmetriska höjdmässigt för att undvika ojämna påkänningar på grund av ojämn fördelning av laster.
- Av byggtekniska orsaker så bör även rambenen med en tjocklek understigande 0.6 m göras jämntjocka.
- Om det visar sig att det är stora påfrestningar vid rambenens infästning till brobaneplattan kan rambenen göras tjockare där och istället tunnare mot bottenplattorna.

4.2.3 Vingmurar

En vingmur kan sammanfattas i att det är en form av stödmur till bron som stöttar upp banken och rambenen. Vingmurarna är infästa till rambenen och är antingen parallella med brons längdriktning eller så är de snedställda som är det vanligare fallet, se *Figur 7*. De utförs vanligen med vinkel utåt i förhållande till rambenen för att hindra jorden från att glida ut åt sidorna närmast brokonstruktionen. Utformningen av själva vingmurarna beror mycket på plattrambrons geometri och andra estetiska faktorer (Trafikverket, 2014).

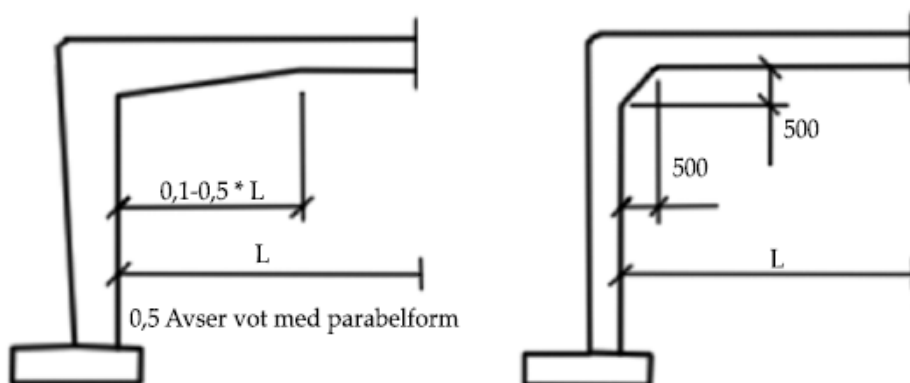


Figur 7 Skiss av en snedställd vingmur, bör inte förknippas med själva lutningen på vingmuren som också kan ses i samma figur (Vägverket, 1996).

4.2.4 Voter

Plattrambroar kan behöva förstärkas undertill brobaneplattan med så kallade voter, se *Figur 8*. En vot är en förtjockning av plattan i hörnen och görs för att överföra tvärkrafter och moment från plattan till rambenen. Utseendet på själva voten beror även i sin tur på brons längd (Trafikverket, 2014).

- För kortare spännvidder med rak undersida sätts ofta en mindre vot vid ramhörnet.
- Över 12 m sätts raka voter där längden är ungefär $1/5$ av brons spännvidd.
- Över 20m sträcker sig ofta voten över hela brons spännvidd. Den görs där vanligen som en parabelbåge på grund av estetiska skäl.



Figur 8 Exempel på voter (Vägverket, 1996)

4.2.5 Vägbank

Är den motfyllning till bron som trycker på baksidan av rambenen och vingmurarna. Den last som genereras av motfyllningen stabiliserar brokonstruktionen på så sätt att den gör så att rambenens utböjning begränsas då brobaneplattan belastas (Trafikverket, 2014).

4.2.6 Bottenplattor

Brokonstruktionen vilar undertill rambenen på bottenplattor. Bottenplattorna kan göras i vissa fall till ett enhetligt fundament som rambenen står på. Detta görs då jordens bäriighet under brokonstruktionen är låg eller om man har mindre spännvidder på hela bron. I det fall en hel bottenplatta används benämns plattramben som slutram (Trafikverket, 2014).

Funktionen på bottenplattorna är att de skall ta upp laster från överbyggnaden för att sedan föra ner och sprida ut lasterna till undergrunden.

4.2.7 Kantbalk

Används för att man ska kunna fästa in skyddsräcken och i vissa fall belysningsstolpar, men då med en ingjuten konsol i kantbalken som fundament (Trafikverket, 2014). Beståndsdelarna i en kantbalk är följande:

- *Droppnäsa*: Är placerad undertill på kantbalken och skall understödja vattenavrinning från bron.
- *Kantskoning*: En ställist som skall skydda kantbalken mot påkörning och slitage. Förekommer främst på äldre rambrokonstruktioner.
- *Avväggningsdubb*: Är mer av en kontrollpunkt för att man ska kunna göra mätningar på om brokonstruktionen rör sig i vertikal riktning.

5 LASTER OCH DIMENSIONERING

De laster som gör sig av betydande storlek för en rambrokonstruktion är egentygnder, jordlaster samt trafiklaster. Andra förekommande laster är till exempel vindlaster som måste beaktas vid en slutgiltig dimensionering.

Eftersom laster varierar när man ser till tiden, rummet, storleken och lastupprepningar så måste hänsyn tas till dessa på olika sätt. Dessutom så kan olika lastkombinationer uppträda samtidigt på konstruktionen. Dimensioneringen av en brokonstruktion sker därför i både bruksgräns- och brottgränsstadier. Där kombinerar man lasterna på olika sätt och låter dem verka på konstruktionen i både kort och på lång tid enligt Eurokod (Engström, 2011a).

5.1 Variation med tiden

Laster som anses variera lite med tiden benämns permanenta laster och betraktas som mer eller mindre konstanta. Det gäller till exempel egentygnder och jordtryck och de ges ett karaktäristiskt värde G_k som utnyttjas vid dimensionering.

De laster som istället varierar med tiden namnges som variabla laster. Exempel på dessa är trafiklaster och vindlaster. Vid dimensionering så ges variabla laster till skillnad från permanenta lasterna ett annat karaktäristiskt värde, Q_k . Det är ett övre gränsvärde som väljs med hänsyn till sannolikheten för att gränsvärdet överstigs en gång inom en viss tidsperiod (SS-EN 1990, 2010).

Olika variabla laster som varierar har ofta olika maximala lastvärden som kan inträffa inbördes olika på en lång tid. Lägre lastvärden inträder mycket oftare än maximala lastvärden och är dessutom vanligen av större varaktighet. Då flera variabla laster kombineras så är det därför vanligare att lägre lastvärden som har större varaktighet medverkar samtidigt. När man då kombinerar variabla laster beaktas detta genom att lasterna görs om till dimensionerande lastkombinationer, som kan läsas om i senare avsnitt.

Tänkbara kombinationer av variabla laster kan kategoriseras i följande grupper:

- *Brottgränstillstånd*: Partialfaktorer utnyttjas vid dimensioneringen. Lasten som förekommer samtidigt reduceras med en kombinationsfaktor Y_0 för att utesluta att maximala lastvärden hos dem inträder samtidigt.
- *Långtidslaster* eller *kvasi-permanent kombinationer*: Utnyttjas främst vid dimensionering av betongkonstruktioner för att uppskatta krypning och sprickvidder. Vid långtidslast så tas därför ett genomsnittligt värde på lasteffekten i anspråk.
- *Karakteristisk kombination*: Uppträder någon enstaka gång under konstruktionens livstid och används för att bedöma risken för att permanenta skador uppkommer.
- *Frekvent kombination*: Uppträder flertalet gånger under konstruktionens livstid och utnyttjas då man vill kontrollera olika krav när det gäller exempelvis olägenheter hos konstruktioner i bruksstadium.

5.2 Variation i rummet

Olika laster hos en konstruktion är av slumpartad natur och kan fördela sig på flera olika sätt över en yta. När man gör dimensionering så sker det i en förenklad form men där man tar hänsyn till de verkliga fallen med olika dimensionerande lastvärden. Något tydligt exempel på variation i rummet är förflyttande laster såsom trafik.

Laster fördelas i sin tur i bundna och fria laster, där den bundna lasten har en uniform fördelning över hela konstruktionen. En fri last är istället slumpmässigt placerad på konstruktionen. Vid dimensionering så placeras alltid de fria lasterna på ett så gynnsamt sätt som möjligt på en konstruktion för att ge störst tänkbara påfrestningar.

5.3 Lastkombinationer

De olika laster som kan förekomma samtidigt beaktas i lastkombinationer där lasterna ges karakteristiska värden Q_k för variabla laster och G_k för egentyngder. De karakteristiska värdena multipliceras sedan med partialkoefficienter för att ge säkerhet vid beräkningar. Flertalet kombinationer bör göras för att hitta den kombinationen som blir värsta fallet och därmed dimensionerande.

I SS-EN 1990 listas tabeller för olika lastkombinationer med karakteristiska värden och tillhörande partialkoefficienter i brottgränstillstånd samt bruksgränstillstånd. Dimensionerande lastfall kan enligt samma Eurokod beräknas fram enligt följande ekvationer nedan för både i brottgränstillstånd och i bruksgränstillstånd.

$$q_{D,ULS} = \gamma_{G,ULS} * G_K + \gamma_{Q,ULS} * Q_k \text{ (brottgränstillstånd)}$$
$$q_{D,SLS} = \gamma_{G,SLS} * G_K + \gamma_{Q,SLS} * Q_k \text{ (bruksgränstillstånd)}$$

För detta projekt användes både ULS och SLS för att undersöka dels brottgränsen för aktuella bron men också hur konstruktionen uppträder under bruksgränslast. I ULS undersöks största möjliga last som bron klarar av innan den kollapsar under hela sin

livstid och används på lång tid. SLS är i bruksgränstillstånd och undersöker till exempel sprickbredden och nedböjning på kort tid (Engström, 2011a).

Även om en brokonstruktion klarar brottgränsen så kan det fortfarande visa sig att det ger upphov till ogynnsamma och negativa effekter i bruksgränstillstånd. I funktionen av scriptet, som kan läsas mer om i kapitel 7, så körs därför dubbla uppsättningar analyser, en för ULS och en för SLS. På så sätt ges scriptet mer kontroller och därmed högre pålitlighet på de erhållna resultaten. För lastkombinationerna i ULS och SLS så dimensioneras lasterna olika vilket framgår i *Tabell 1*.

Tabell 1 Lastkombinationer med partialfaktorer (SS-EN 1990)

LASTKOMBINATIONER	ULS		SLS (Kvasipermanent)	
	Permanent last (γ_G)	Variabel last (γ_Q)	Permanent last (γ_G)	Variabel last (γ_Q)
Gynnsam	1,0	0	1,0	0
Ogynnsam	1,35	1,5	1,0	1,0

6 TIDIGARE SCRIPT

Det ursprungliga scriptet som togs fram i examensarbetet ”*Applicability of Set-Based Design on Structural Engineering*” från 2014 gäller för enspannsbroar med fast eller fri uppläggning. Scriptet utvecklades i programmeringsspråket Python och bygger på att finita element analyser görs med hjälp av mjukvaran Abaqus.

Scriptet är strikt i den bemärkelsen att det är framtaget för en typ av broar, vilket innebär att större förändringar behöver göras för att kunna köra det på andra brotyper.

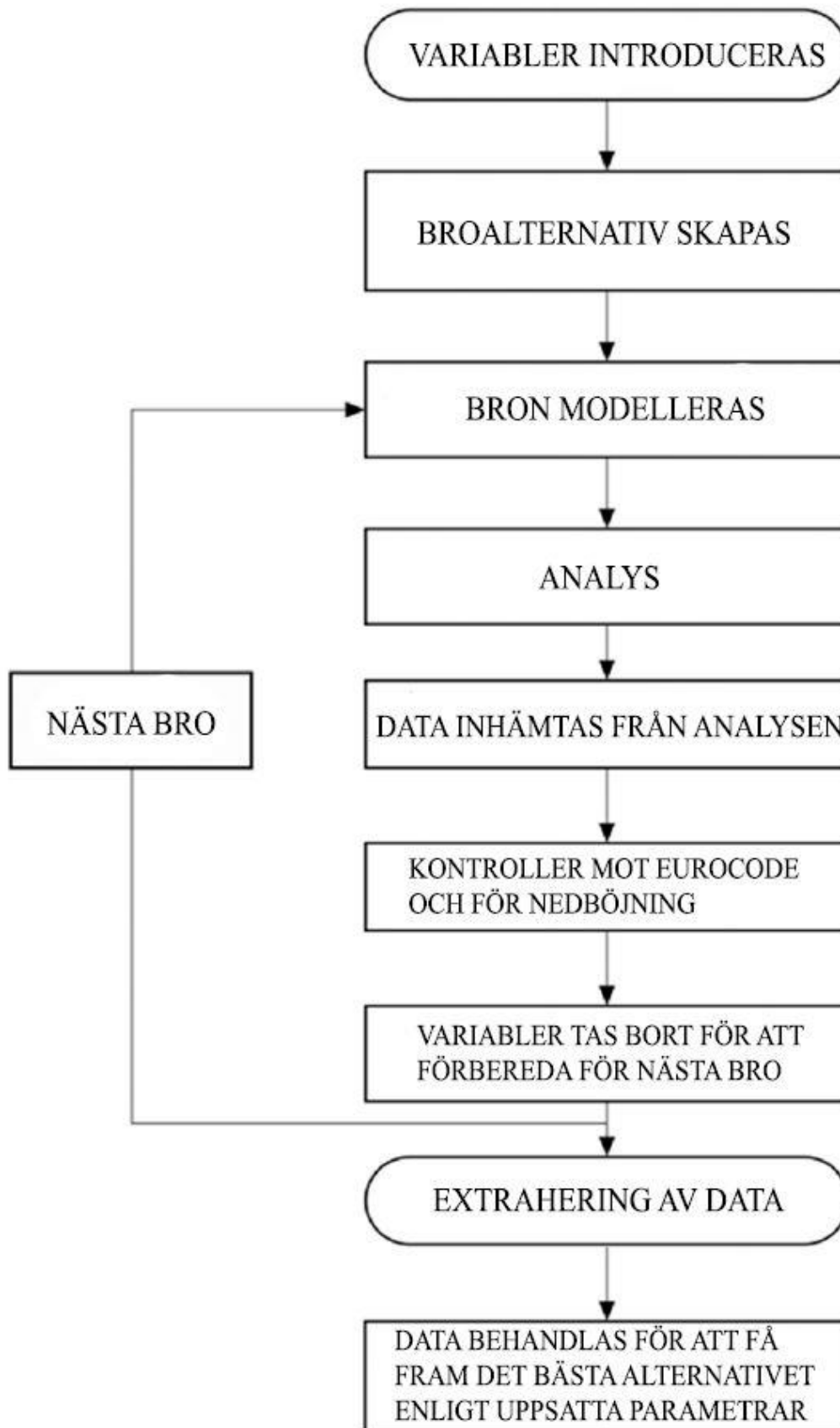
I scriptet finns inbyggda möjligheter till parallelliserad analys vilket är något som ligger nära SBD eftersom metoden bygger på att ha så många olika genomförbara alternativ igång samtidigt.

6.1 Struktur

Det ursprungliga scriptet kan delas in i tre olika delar. I första delen definieras de variabler som senare parametreras såsom geometrier hos bron. Beroende på antalet variabler som definieras så uppskattas det totala antalet jobb här, där ett jobb motsvarar en bro.

Del två i scriptet är huvuddelen och här så byggs bromodellen upp så som den ska se ut. Bromodellen analyseras här och snittkrafter kan erhållas som i samma del används till att göra en armeringsdimensionering. När det har gjorts så skickas bron vidare till del tre av scriptet där optimering sker. *Figur 9* på nästa sida visar ett flödesschema över scriptets uppbyggnad med alla tre delar.

I och med att man anger ett flertal variabler så kommer det skapas och analyseras ett antal broar som inte visar sig komma att klara av kontroller enligt Eurokod, vilket hör till den valda designmetodiken. Dessa felaktiga broar utesluts därefter enligt principen för SBD. Detta kan tyckas vara fel sätt att använda beräkningsresurser men en bro analyseras på cirka två minuter och tar därmed inte så lång tid i förhållande till hur många olika alternativ som utreds. Dessutom finns som tidigare nämnts möjlighet till parallellisering samt att det kraftfulla datorclustret GLENN kunde utnyttjas. En erfaren konstruktör som vet ungefär vilka värden som är optimala kan reducera antalet inmatade variabler och på så sätt behövs färre antal analyser köras.



Figur 9 Scriptets totala flödesschema (anpassning från (Fernández & Ramos, 2014))

7 PLATTRAMBRO SCRIPT

För att genomföra analyser på plattrambroar behövde det befintliga scriptet anpassas på flera olika sätt, främst med hänsyn till geometrin. I stort sett hela avsnittet som behandlar modelleringen av geometrin kunde inte anpassas och fick därför byggas upp på nytt. Till trafiklasten fick det göras små modifieringar och dessutom tillkom ett helt nytt avsnitt som tog hänsyn till jordtryckslaster. Men uppbyggnaden av plattrambroscriptet och dess flödesschema följer samma sätt som det ursprungliga scriptet.

I en mer ingående beskrivning av scriptet så är modelleringsavsnittet en mycket stor del. Här bestäms de olika geometrierna för plattrambro och sedan modelleras dessa för att passa in i ett globalt koordinatsystem enligt finita element metoden. I modelleringsdelen ingår även sådant som upplagsvillkor, materialdefinitioner och angivelse av hur elementen ska agera i kopplingar mellan varandra. Här anges även storlek på mesh rutnätet.

Nästa del i scriptet är trafiklastdelen som även den är ett stort avsnitt som beror på att mycket kod måste skrivas för att ta hänsyn till alla de olika lastfall som uppkommer. Denna del har också sitt egna modelleringsavsnitt för skalelementet som trafiklasten läggs på.

Sista delen består i stort sett enbart av uthämtning av dimensionerande snittkrafter, kontroller och armeringsdimensionering enligt Eurokod 2. Detta är en iterativ process vilket gör den väldigt snabb.

7.1 Modellering och analys i Abaqus

Analyserna gjordes i FEM-programmet Abaqus/CAE version 6.13-3. Det finns även flertalet varianter av Abaqus bland annat BRIGADE/standard som är ett vanligt broanalysverktyg som baseras på Abaqus. I programmet är det möjligt att köra externa filer i form av exempelvis olika script där olika programmeringsspråk har använts, såsom Python.

Den visuella plattrambromodellen med alla ingående beståndsdelar programmerades därför in som ”kod” i plattrambroscriptet. Scriptet fungerar på sätt och vis som en ”instruktion” för Abaqus att bygga upp modellen i programmet på.

7.2 Modellens geometri

För att bygga upp en så korrekt finita element modell av en plattrambro som möjligt så utgicks det från en redan existerande plattrambro från WSP. Detta även för att kunna göra jämförande analyser med den när plattrambroscriptet är komplett. Den av WSP projekterade plattrambro byggdes under 2014 vid E18 trafikplats Viggbyholm strax utanför Stockholm.

När analyser ska genomföras med FEM-mjukvaror så är det viktigt att den geometriska modellen efterliknar den verkliga konstruktionen på ett så korrekt sätt som möjligt. Vid uppbyggnaden av modellen för plattrambroar har skal- och balkelement använts som är vanliga uppbyggnadselement i Abaqus. För skalelement modelleras en tänkt centrumlinje, som motsvarar ett skal. För skalet så definieras tjocklekar men som inte visualiseras i programmet. Att använda skalelement går betydligt snabbare att göra analyser med till skillnad från till exempel solida element och därför valdes dessa.

En fördjupning i modellens geometri och motiveringar till elementval ges i nästkommande delkapitel.

7.2.1 Brobaneplatta

För modelleringen av broplattan användes skalelement som på sätt och vis liknar en betongplatta väldigt väl, och antogs därför inte ha någon direkt påverkan på resultaten. Tjockleken på brobaneplattan gjordes jämntjock över hela dess yta och eventuella förhöjningar hos broplattan såsom vid kanterna (voter) beaktades därför inte. Det togs dock hänsyn till voterna genom att brobaneplattan gjordes något tjockare.

7.2.2 Ramben

Rambenen antogs vara som stående betongplattor (väggar) och samma tankegång angående elementval som hos brobaneplattan tillämpades på dessa. Inspänningsförhållandena mot bottenplattorna förenklades och gjordes till fast inspänt, övergången mellan ramben till brobaneplatta gjordes momentstyvt.

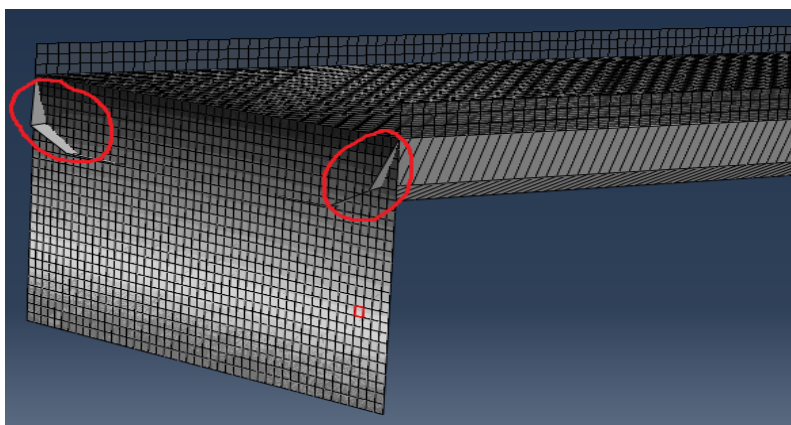
7.2.3 Vingmurar

Vingmurarna modellerades inte in i sin fysiska form i plattrambromodellen för att de skulle göra bromodellen mycket mer komplicerad och omfattande vilket skulle ge en avsevärt längre beräkningstid vid analyser. För att kompensera detta så lades det istället på ett moment, som uppstår i infästningen mellan vingmur och ramben, på kanterna längs rambenen. Hur detta infördes behandlas i kapitel 7.4.5.

7.2.4 Kantbalkar

Modelleringen av kantbalkarna gjordes initialt med skalelement men visade sig vara mycket problematiskt. Några olika försök gjordes för att få skalelementen att fungera någorlunda men slutsatsen blev att det inte gick att genomföra på ett bra sätt vid modelleringen i Abaqus. Problem uppstod främst när egentyngder från kantbalkarna

lades på skalelementen då deformationerna blev väldigt underliga som kan ses i *Figur 10* nedan.



Figur 10 Misslyckat försök att modellera kantbalkar med skalelement

Kantbalkarna i form av skalelement deformerades mycket underligt gentemot sitt ursprungliga (genomskinliga) läge. Dessutom blev det ingen mittnedböjning när skalemenet användes på detta sätt vilket inte är realistiskt vid belastning.

Eftersom det för hela bromodellen utgicks ifrån att kantbalkarna inte skulle ge ett strukturellt tillskott så gavs därför skalelementen en mycket låg E-modul vilket var orsaken till att det resulterade i dessa onaturliga deformationer. Det blev därför tydligt att skalelement inte kan hantera en icke befintlig styvhet (vilket senare bekräftades av egna prov) på önskat sätt och därför undersöktes andra alternativ att modellera kantbalkarna på.

Som alternativ valdes därför att modellera kantbalkarna med balkelement istället. Men då uppstod ett annat problem som berörde interaktionen till skalementen på rambenen och betongplattan. Kortfattat så berodde det på att två olika elementtyper inte kan sammanfogas på ett korrekt sätt utan interaktionen mellan dessa måste ske på andra sätt. Det löstes genom att med hjälp av Abaqus funktionen TIE sammanbinda balkelementet med betongplattan och rambenen.

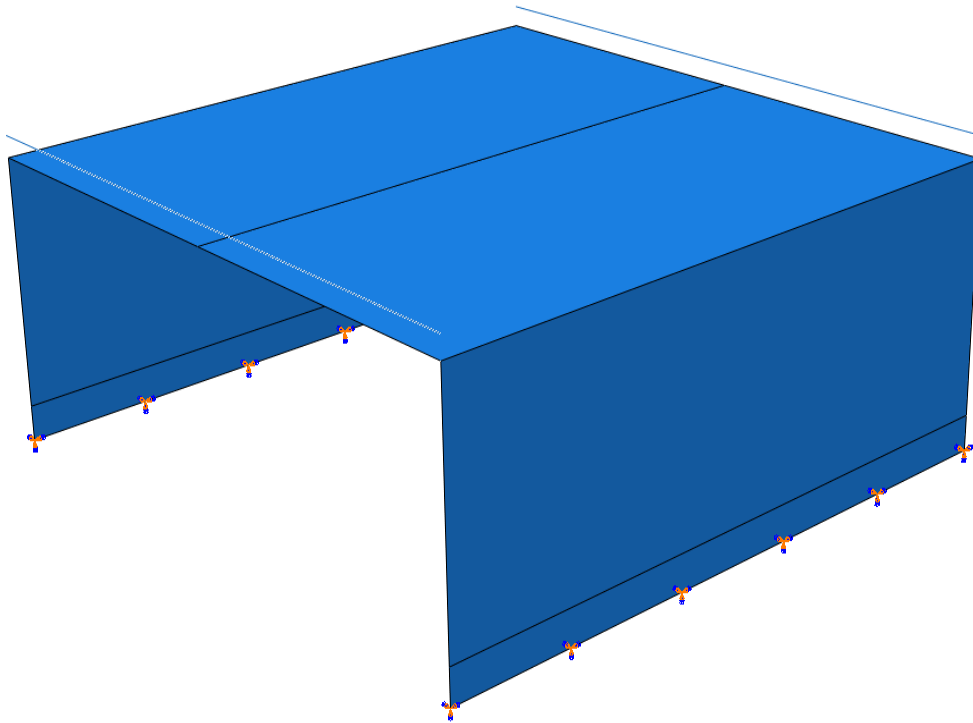
7.2.5 Upplagsvillkor

Rambron modellerades som fast inspänd till bottenplattorna. Denna förenkling gjordes eftersom bron kan ses som momentstyv i foten på grund av bottenplattorna som rambenen förankrades i. Bottenplattorna modellerades även inte eftersom deras främsta uppgift är att fördela ner lasterna från plattrambron ner till undergrunden. Den inverkan de har på själva plattrambron försummas därför i projektet.

Ett resultat som bättre överensstämmer med verkligheten hade eventuellt varit att modellera inspänningsförhållandena som en styv fjäder, alternativt som en balk. Men det bedömdes inte vara värt resurserna och därför valdes dessa alternativ bort.

7.3 Plattrambromodellen

När ovanstående kapitel tagits hänsyn till, så kunde den geometriska slutgiltiga modellen byggas upp till nedanstående modell, se *Figur 11*. Det bör observeras att upplagsvillkor kan ses i modellen.

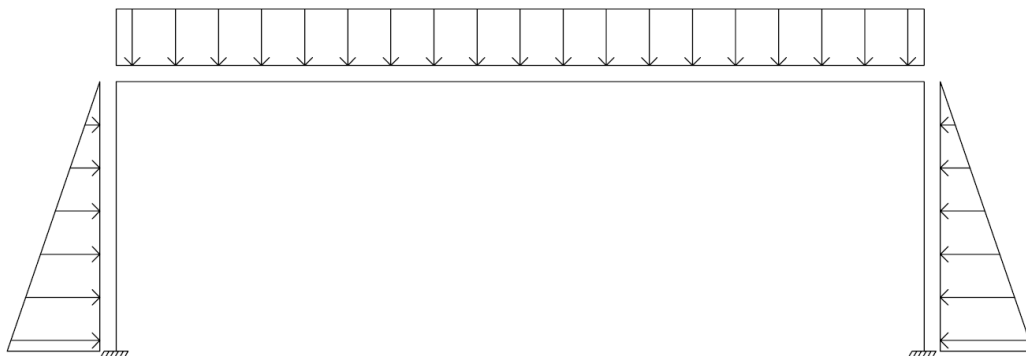


Figur 11 Den uppbyggda modellen av plattrambromodellen i skalelement och kantbalkar i form av balkelement samt upplagsvillkor

7.4 Modellens laster

När den färdiga plattrambromodellen hade bestämts var det dags att se till att applicera de laster som påverkar hela plattrambromodellen.

Plattrambromodellen är utsatt för många olika laster och det gjorde modellen något komplicerad att få till. Då projektet fokuserade på en preliminär dimensionering så gjordes därför ett urval över vilka laster som skulle göras aktuella och som hade betydande inverkan på konstruktionen. De laster som ansågs som mest betydande var jordtryckslast, trafiklast och egentyngder. En beräkningsmodell med lasterna kan ses i *Figur 12*.



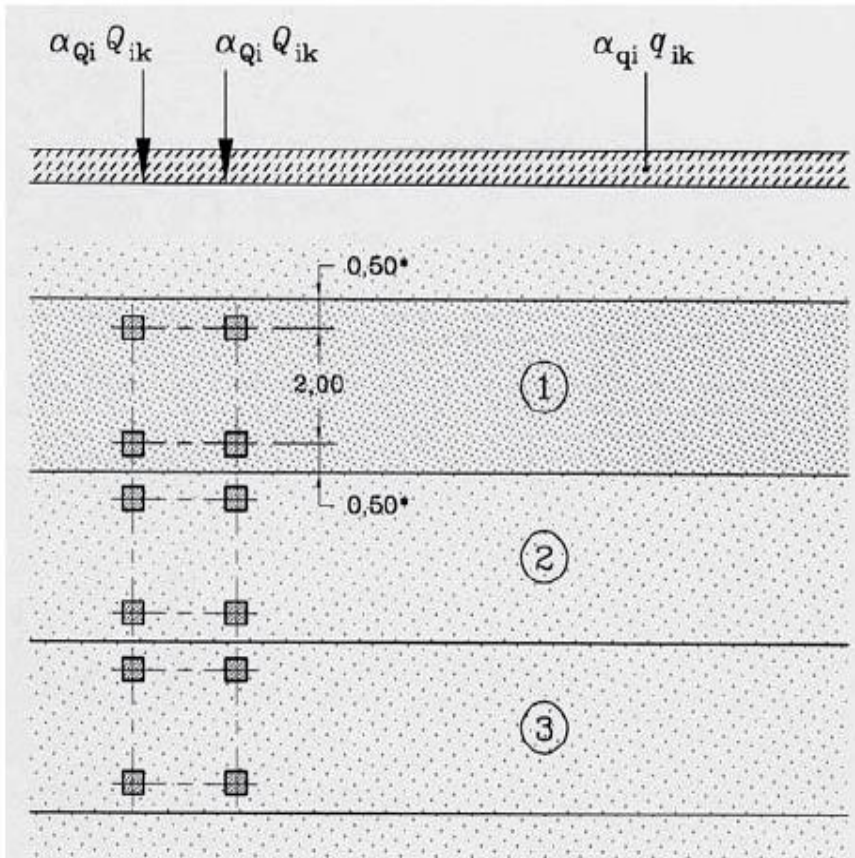
Figur 12 Laster på Plattrambromodellen

7.4.1 Trafiklast – lastfall 1

För att få så verklighetstroga resultat som möjligt så var det viktigt att det som infördes i scriptet var så likt verkligheten som möjligt. Vissa delar är viktigare än andra, ett exempel på en väldigt viktig del av projektet är trafiklasten. Det fanns redan i det ursprungliga scriptet ett inlagt avsnitt för trafiklasten och rekommendationen från upphovsmännen var att i stort sett att ”ta den rakt av”. En djupare analys av hur trafiklast är definierad enligt Eurokod utfördes ändå för att få förståelse för hur koden som trafiklasten består av fungerar.

Därmed studerades de avsnitt av (SS-EN 1991-2) där trafiklast på broar behandlas. Där finns det ett antal olika lastfall för brodimensionering angivna. Det lastfall som var inlagt i det ursprungliga scriptet var lastfall 1 och därmed blev det även det lastfall som användes i plattrambroskriptet. Lastfall 1 består enligt (SS-EN 1991-2) av *“Concentrated and uniformly distributed loads, which cover most of the effects of the traffic of lorries and cars. This model should be used for general and local verifications”*. Med detta följde att inga ändringar behövde göras med hänsyn till lastfallet då det passade väl in på det som skulle åstadkommas i projektet.

Det specificeras senare i (SS-EN 1991-2) att lastfall 1 består av ett dubbel axlat tandemsystem med punktlaster och en jämnt utbredd last. Dessa tandemsystem ställs upp i fiktiva körfält med mått enligt *Figur 13*. Den jämnt utbredda lasten läggs ut på det område som inte ingår i körfälten.



Figur 13 Trafiklastmodellen med fall 1 som infördes i plattrambroskriptet (SS-EN 1991-2)

Till detta anges en storlek på lasterna (karaktäristiska värden) enligt Tabell 2.

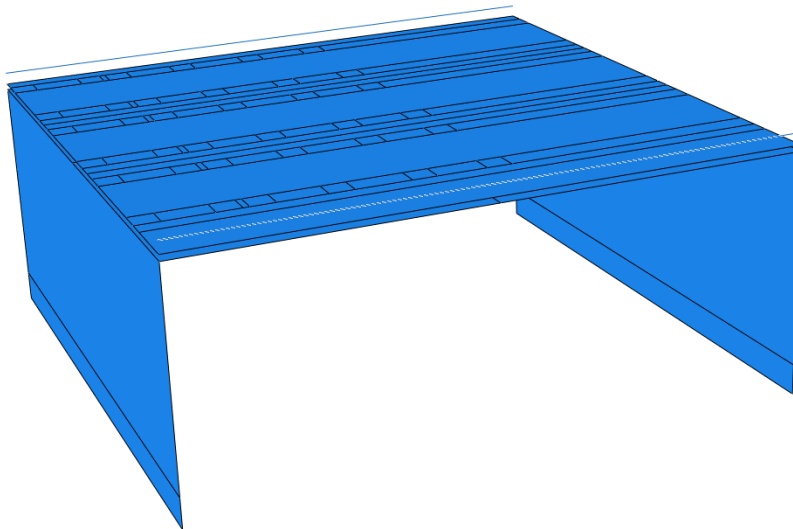
Tabell 2 laststorlek för trafiklast (SS-EN 1991-2)

Location	Tandem system <i>TS</i>	<i>UDL</i> system
	Axle loads Q_{ik} (kN)	q_{ik} (or q_{ik}) (kN/m ²)
Lane Number 1	300	9
Lane Number 2	200	2,5
Lane Number 3	100	2,5
Other lanes	0	2,5
Remaining area (q_{ik})	0	2,5

7.4.2 Införande av trafiklasten i scriptet

Trafiklasten är en komplicerad del av scriptet och som tidigare sagts så togs avsnittet i stort sett rakt av från det redan existerande scriptet. Det som behövdes läggas in i trafiklastdelen av scriptet var jordlasten och det moment som uppkommer längs kanterna på rambenen på grund av vingmurarna. Dessutom behövdes ytterligare förändringar göras då den tidigare trafiklastskoden var anpassad för en balkbro och en stor del i koden bestod av att undvika gynnsamma lastfall för respektive balk. Då det inte finns några balkar i en plattrambro så var dock eventuella, gynnsamma lastfall något som inte beaktades.

För att införa de olika lastkombinationer som uppkommer vid trafiklast modellerades trafiklasten med hjälp av ett skalelement utan styvhet, se *Figur 14*. Det gav fördelar vid partitionering och implementation av de fiktiva körfälten definierade av lastfall 1 (Fernández & Ramos, 2014). Det medförde även att när geometrin ändrades på bron, så följde trafiklasten med korrekt vilket var en förutsättning för projektets genomförande. Slutligen så kopplades trafikplattan samman med bron med hjälp av TIE-funktionen i Abaqus.



Figur 14 Bromodellen med den applicerade trafiklastplattan med tre fiktiva körfält. De olika små kvadratiska rutorna motsvarar olika däckpositioner

7.4.3 Jordtryck

När jordlasten skulle införas i scriptet var målet att göra det så anpassningsbart som möjligt. Till skillnad från trafiklasten modellerades dock inte jordlasten med hjälp av ett tunt skalelement utan den utbredda lasten lades direkt mot rambenen och vingmurarna eftersom lasten är konstant över en yta. Detta kunde göras då behovet för partitioneringar inte var särskilt stort.

Att beräkna jordtryck på ett så korrekt sätt som möjligt är mycket komplext och kräver stor beräkningskapacitet. Dessutom finns flera viktiga variabler att ta hänsyn till såsom tyngden av jordmaterial och typ av jordtryck, men också grundvattennivå samt brottvinkel. Dessa egenskaper bestäms ofta genom provtagningar och på så sätt fås värden på de variabler som behöver anges i formlerna (Sällfors, 2009).

Vid bestämning av jordtryck i plattrambrosriptet så gjordes det därför en del förenklingar för att kunna sätta ett tillfredställande värde på lasten. Antaganden som gjordes var att jordmaterialet bestod av typen fyllnadsmaterial och att brottvinkeln sattes till 45 grader. Vidare förutsattes att grundvattennivån hamnade under rambenens höjd. Övriga materialparametrar valdes enligt (Sällfors, 2009).

Utbredningen av en jordlast skall enligt allmän vedertagen förenkling och praxis vara en triangellast. Det finns i Abaqus ett inbyggt verktyg för triangellaster kallat "Hydrostatic load". Det kunde dock inte utnyttjas på grund av att det endast ger möjlighet att definiera lasten i global z-led. Men eftersom höjden på rambenen och vingmurarna som utsätts för jordtryck definierades i bromodellens globala y-riktning var detta verktyg inte möjligt att använda. Istället infördes jordlasten med hjälp av Abaqus verktyget "Analytic field" enligt ekvationen:

$$Q_{jordlast} = jordlast \text{ ULS/SLS} * Y * 1$$

Implementering på det här sättet medförde att storleken på jordlasten var tvunget att beräknas per meter innan det infördes i ekvationen och gjordes på följande sätt enligt (SS-EN 1997-1):

$$p(z) = K_0(K_A) * z * \gamma + pw$$

$$K_0 = (1 - \sin(\varphi')) * \sqrt{OCR}$$

$$K_A = \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi'_{dim}}{2} \right)$$

$$\varphi'_{dim} = \tan^{-1} \left(\tan \frac{\varphi'}{F_\varphi} \right)$$

Där:

$p(z)$ är jordtrycket i Pa på höjden z meter.

γ är jordmaterialets densitet.

φ' är jordmaterialets friktionsvinkel.

OCR är överkonsolideringsgrad.

K_0 är vilojordskoefficient.

K_A är aktivjordskoefficient.

pw är grundvattnets tyngd (0 i detta fallet).

F_φ är en säkerhetsfaktor med värde 1,3.

Vilojordtryck användes i bruksgräns och aktivt jordtryck i brottgräns.

7.4.4 Egentyngd

De egentyngder som görs sig gällande på konstruktionen, närmare bestämt i brobaneplattan, rambenen och kantbalkarna simulerades med hjälp av den i Abaqus inbyggda funktionen för att hantera egentyngder. Endast densitet på materialet behövde bestämmas som valdes till betong C30/37 och sedan appliceras egentyngderna automatiskt på beståndsdelarna hos den färdiga modellen av plattrambrosriptet. Densiteten för betong uppskattades till 2400 Kg/m^3 .

7.4.5 Tillskottsmoment från vingmurar

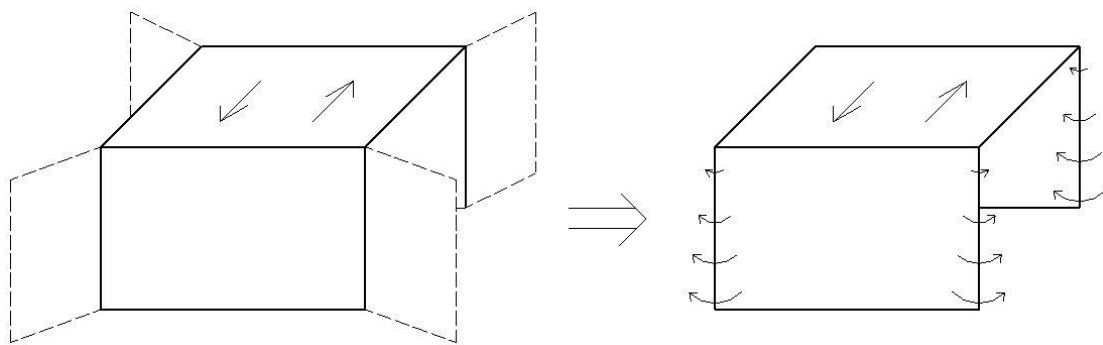
Jordtryckslasten som verkar på vingmurarna modelleras in som tillskottsmoment längs kanterna på rambenen enligt *Figur 15*. En förenkling gjordes till att se vingmurarna som fast inspända i rambenen och sedan räknades det maximala momentet ut med hjälp av ett elementarfall för en fast inspänd balk.

För enkelhetens skull antogs vingmurarna vara rektangelformade. Momentet M_A längs hela rambenskanterna vid inspänningshörnet kunde därmed erhållas ur följande uttryck enligt elementarfall från diverse byggformelsamlingar:

$$M_A = \frac{-q \cdot l^2}{2}$$

Där q är storleken på lasten i N/m och är l bredden på vingmuren.

Då tillskottsmomentet varierar med höjden på rambenen så togs det hänsyn till i jordtryckets storlek q där höjden på rambenen redan var implementerad.



Figur 15 Förenkling av snedställda vingmurar till ett ekvivalent lastfall med pålagt kantmoment

7.5 Modellens anpassning i Abaqus

7.5.1 Mesh

För att kunna få ut snittkrafter i analyser så delades den färdiga modellen in i ett rutnät mönster av rimlig storlek, så kallad ”mesh”. Detta rutnät mönster behövs för kunna genomföra analyser i Abaqus och innebär att en modell delas upp i så kallade element, där varje element utsätts för olika spänningar. Att dela upp modellen i element är den stora essensen i Finita element metoden och det är utifrån dessa som sedan snittkrafter kan erhållas ifrån med hjälp av olika verktyg som finns inbyggda i Abaqus.

Det finns i Abaqus olika mesh-tekniker och olika elementtyper som kan användas beroende på vilken analys och vilken geometri modellen har. I detta fall användes enkla fyrsidiga element, S4R, med reducerad integration för att spara tid vid analysen. Dessa element är robusta och passar bra till många olika analyser (SIMULIA, 2012).

Storleken på ”meshen” bestämdes genom en konvergensstudie, kapitel 7.6.

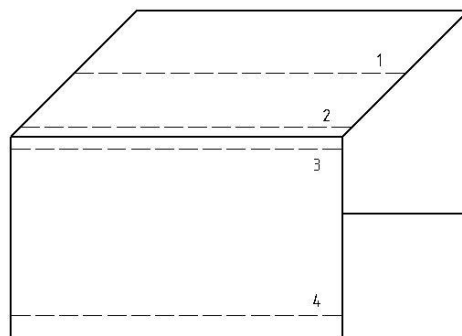
7.5.2 Path

Verktyget ”path” användes i Abaqus för att få fram snittkrafter i olika delar av bron. I detta fall i mittspannet, vid hörnen samt mot inspänningen vid de fiktiva bottenplattorna. Samma ”path” kan användas för att få fram snittkrafter i olika x, y, z-riktningar.

För att erhålla de dimensionerande krafterna och momenten i plattrambromodellen så lades ”pather” in i transversell led (i Z-riktning) enligt *Figur 16*. Alternativet vore att lägga dem istället longitudinellt bron men med det gjorde uthämtning av maxmoment i snittet svårare, detta eftersom moment och krafter även varierar i transversell led.

Då styvheten har stor inverkan på momentfördelningen i framförallt hörnen, så lades två ”pather” in där. Det gjordes också med tanke på att broplattans tjocklek och rambenens tjocklek inte alltid har samma storlek. ”patherna” placerades här en elementstorlek bort från hörnet i respektive riktning för att undvika singulariteter.

De dimensionerande krafterna valdes ut av scriptet som de största någonstans på ”pathen” och sedan dimensionerades hela tvärsnittet efter dessa. Det här medförde dock att överdimensionering kunde förekomma på delar av bron där lasterna inte blev så stora.



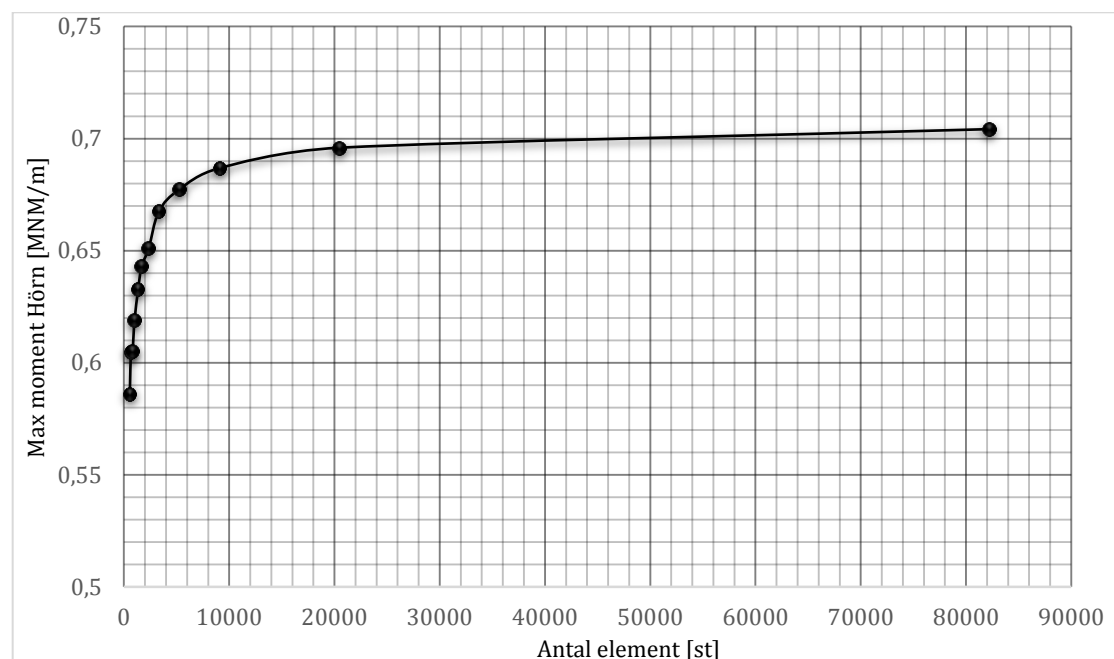
Figur 16 Path (1)-(4) för att få ut moment, tvärkraft och normalkraft i plattrambromodellen

7.6 Konvergenstudie

När FEM-analyser skall genomföras måste det alltid göras en bedömning på elementstorleken för att få så bra resultat som möjligt med hänsyn till tillgängliga resurser. Därför behöver det göras en konvergenstudie för att hitta en bra elementstorlek som möjligt (SIMULIA, 2012).

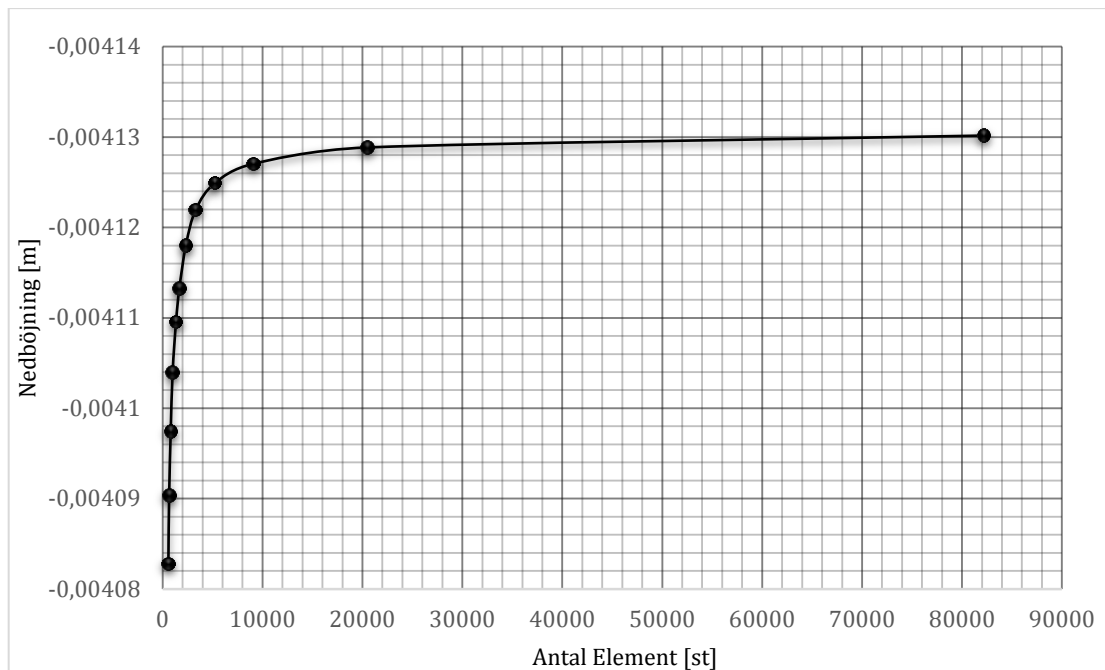
En för liten elementstorlek leder till flera element och mer ackurata resultat än en större elementstorlek. Å andra sidan tar analyser mycket längre tid och förbrukar mycket mer datorresurser. En grövre storlek genererar istället mer felaktiga resultat och kan ge upphov till distorsioner i meshen. Analyserna går dock betydligt snabbare vid en mindre elementstorlek. Att få tillfredsställande resultat är därför en balansgång vid vilken elementstorlek man vill använda sig av vid analyser.

När en konvergenstudie gjordes på platttrambromodellen för två olika delar, så kan det ses i nedanstående *Figur 17* och *Figur 18* att kurvorna tenderade att konvergera, det vill säga plana ut när storleken på elementen ökar. Slutsatsen blev därför att det vore onödigt att ta för små element då resultaten bara blir försumbart bättre i jämförelse med en något större storlek på elementen.



Figur 17 Konvergenstudie för moment vid hörn

Från *Figur 17* i konvergenstudien drogs slutsatserna att en elementstorlek på 0.15 (cirka 10 000 element beroende på längd) skulle ge acceptabla resultat. Det gav en feldifferens på 5.2 % vilket får anses vara en godkänd felmarginal vid en preliminär dimensionering.



Figur 18 Konvergenstudie med avseende på nedböjning i fältet på brobaneplattan

För *Figur 18* är feldifferensen näst intill försumbar vid en elementstorlek på 0.15 (cirka 10 000 element). Därmed valdes elementstorleken till 0.15. En större storlek skulle kunnat väljas med tanke på nedböjning med nästintill samma resultat men eftersom analyserna körs på datorclustret-GLENN så kunde en mindre elementstorlek med hänsyn till maxmoment antas. Följden av det blev att mer korrekta resultat kunde erhållas.

7.7 Scriptets utdata

För att kunna få ut resultat från alla de broanalyser som görs i Abaqus så behöver data extraheras från dem. Många olika data kan fås ut och det gällde därför att välja ut de data som var mest intressant. Det var också intressant att kunna få ut den information på de plattrambroar som faktiskt inte gick att genomföra med hänsyn till Eurokod och nedböjning för att på så sätt senare skapa en felstatistikjämförelse. Genom detta ändamål så var det därför också intressant att föra statistik som talade om vad det var för krav som dessa broar inte uppfyllde.

All data som extraherades från analyserna i Abaqus sparades ner till filer som sedan kunde optimeras enligt principen med SBD. Totalt sparades tre filer ner som innehåller:

1. Information om geometrier.
2. Data angående uppfyllda kontroller, till exempel momentkapacitet för aktuellt tvärsnitt eller seghet.
3. Om en bro av någon anledning inte klarade en kontroll sparades information om anledning ner.

7.8 Optimering av utdata

En stor del av SBD är att välja ut ett så optimalt alternativ som möjligt i en ”pool” av olika möjliga alternativ vilket är en viktig aspekt i detta projekt. Därför behövde det göras en optimering av de utdata som erhöles i det framtagna plattrambroscriptet. Då en stor datamängd genererades så kunde optimering ske i olika riktningar beroende på vad som eftertraktades.

Optimeringen i scriptet går generellt till på så sätt att alla broar som uppfyller kraven med hänsyn till Eurokod och nedböjning sparas ner och går vidare till optimeringsdelen av scriptet. När optimeringsscriptet körs så sparas värdena ner i en Excelfil som innehåller information om broarna. Denna Excelfil används sedan som underlag för att skapa diagram eller kalkyler ifrån.

För att kunna jämföra de olika broalternativen i detta projekt så valdes det att göra en kostnads- och en miljöpåverkanjämförelse. Det gjordes väldigt förenklat genom att bara jämföra kostnaden för materialmängderna respektive koldioxidutsläppen per ton material vid tillverkning. Priset för en kubikmeter betong sattes till schablonmässigt till 1000kr och stålkostnaden för armeringen till 10 000kr per ton stål. Koldioxidutsläppen uppskattades för betong till 360kg per m³ betong och 830kg per ton stål.

Dessa värden är egentligen bara tänkta skalfaktorer och vid byggnation uppkommer kostnader runt omkring även för projektering, transport och arbetskraft. Därmed är det inte säkert att ett alternativ som är billigast sett till materialmängd även är det slutgiltigt billigaste alternativet eftersom saker som byggbarhet måste tas under övervägande när en slutgiltig kostnad beräknas.

8 DIMENSIONERING AV ARMERING

För dimensionering av armering hos plattrambroarna så utnyttjas en elastisk analys som är idealisk att använda så länge inte sprickor uppkommer. Styvheten förändras dock drastiskt hos betongen när bruksgränstillståndet inträder varvid sprickor uppkommer. Därefter påverkas styvheten i hög grad av armeringsinnehållet och armeringsfördelningen i betongplattan (Engström, 2011b). Dock kan enligt (Engström, 2011b) en linjär elastisk analys användas för att ta fram snittkrafter i plattan.

8.1 Dimensionerande snittkrafter

Dimensionering av en betongplatta skiljer sig jämfört med balkar på flera sätt, utöver ett böjande moment så tillkommer även ett vridande moment att ta hänsyn till. Det vridande momentet har stor betydelse för armeringsdimensioneringen och existerar för respektive element i plattrambroen, se *Figur 19*. Precis som övriga snittkrafter så anges momentet som en kraft per längdenhet, i plattrambrosriktets fall till en meter.

Det vridande momentet beaktas genom att absolutbeloppet av det läggs till det böjande momentet i respektive riktning. Det ger en momentresultant enligt ekvationerna nedan som används vid armeringsdimensionering (Shin, Bommer, Deaton, & Alemdar, 2009).

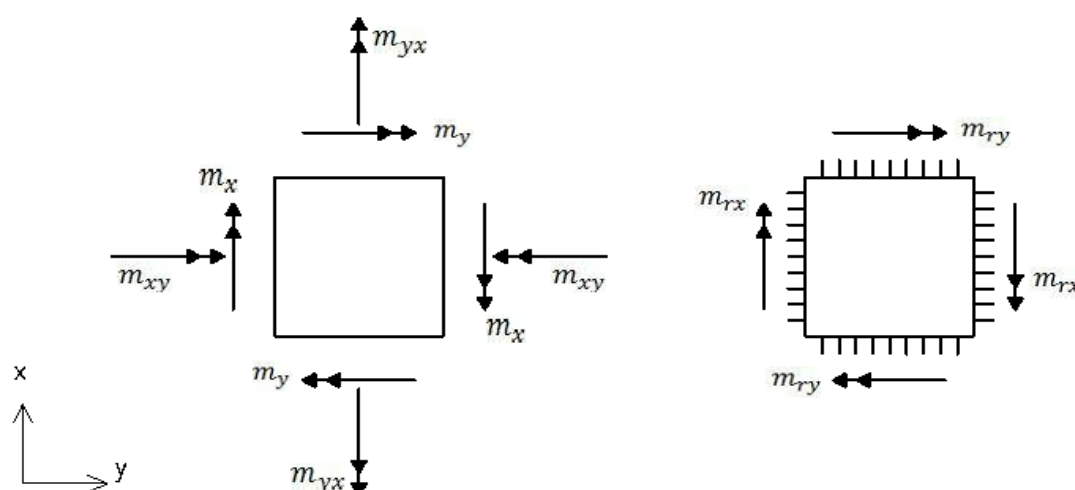
Plattrambroen utsätts även för både negativa och positiva moment vilket också tas hänsyn till i ekvationerna.

$$\begin{aligned} m_{rx} &= m_x \pm \mu * |m_{xy}| && \text{momentresultanten i x-riktning (längs med bron)} \\ m_{ry} &= m_y \pm \mu * |m_{yx}| && \text{momentresultanten i y-riktning (transversellt bron)} \end{aligned}$$

+ tecken för bottenarmering

– tecken för topparmering

$\mu = 1$ (Partialfaktor)



Figur 19 Moment i olika riktningar på varje element kan göras likvärdig till en momentresultant tillsammans med armering (Engström, 2011b)

När det gäller tvärkraften så kan den skrivas som $v_0 = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$. Där v_x och v_y är tvärkraften i respektive elementriktning (Hakimi, 2012).

8.2 Dimensionering enligt Eurokod

Armeringen är en mycket komplex del i en rambro och med anledning av det har det gjorts en hel del förenklingar i projektet. Några allmänna förenklingar och antaganden som gjordes listas här nedan.

- Slakarmering användes i hela plattrambron istället för spännarmering.
- Då man kan se benen och plattan i plattrambron som var för sig enkelbärande betongplattor så placerades endast minimiarmering in i transversell led (SS-EN 1992-1-1:2005).
- Tvärkraftsarmering lades in enligt (SS-EN 1992-1-1:2005). Avståndet mellan tvärkraftsbyglarna där det fanns ett behov sattes minst till att vara 100 mm, och därefter i steg om 200, 300mm tills ingen tvärkraftsarmering behövdes.
- Tvärkraftsbyglarna ansågs korsa sprickor fyra gånger, det vill säga två byglar per tvärsnitt lades in.
- Rambenen och broplattan dimensionerades med både longitudinell och transversell armering för att ta upp böjmoment i bägge riktningarna.

Enligt tidigare kapitel så är det det största absoluta värdet av momentresultanten som blir dimensionerande för armeringen. I projektet så beräknades armeringsbehovet utifrån de snittkrafter som erhöles genom de så kallade ”patherna”, som förklarades i avsnitt 7.5.2.

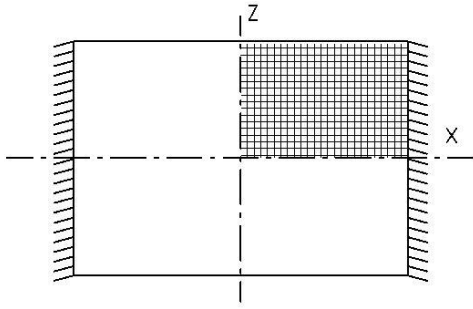
Vid armeringsdimensionering valdes att dimensionera hela plattan efter det mest kritiska snittet med maximala snittkrafter. För att få en mer och bättre optimering skulle det dock vara möjligt att dimensionera delar som är utsatta för mindre last och lägre snittkrafter med mindre armering.

8.2.1 Betongplattan

Fördelningen av längsgående och horisontell armering i brobaneplattan gjordes i ett jämt rutnät för enkelhetens skull enligt *Figur 20*. Det ska poängteras att det dock finns flera olika mönster och andra placeringsarrangemang för armering i en betongplatta (Engström, 2011b).

Längden på den längsgående armeringen i patherna för brobaneplattan sattes till en fjärdedel av broplattans längd. Det innebär att längden av aktuell armeringsmängd i varje ”path” förblev densamma till nästkommande ”path” enligt *Figur 21*.

Tryckarmeringen valdes till $\frac{1}{4}$ av dragarmeringen i samma riktning, dock minst två stänger för att underlätta eventuell tvärkraftsarmeringsinläggning.



Figur 20 Armeringsinläggning i ett jämt rutnätmönster för brobaneplattan, sett ovanifrån

8.2.2 Rambenen

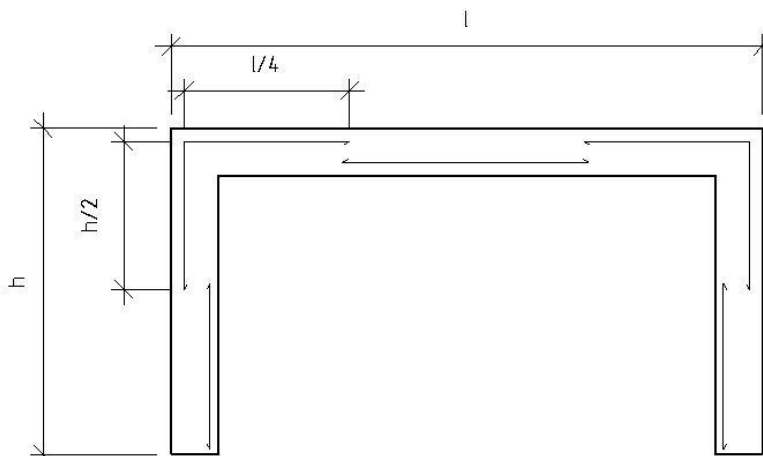
För rambenen antogs gälla samma princip som för betongplattan, det vill säga samma beräkningsprocedur och antaganden gjordes.

8.2.3 Förankringslängder

Förankringslängderna för dragarmeringen vid hörnen sattes till halva höjden på rambenen, respektive till en fjärdedel av brolängden, se *Figur 21*. Förankringslängden kan optimeras mycket mer med hänsyn till Eurokod, men det skulle innebära mycket mer avancerad kodning i scriptet som skulle ta avsevärt mycket mer tid att få till. På grund av att tjockleken på plattan och rambenen kunde varieras inbördes olika så fixerades därför förankringslängden.

Förankringslängden hos armeringen, som i verkligheten passerar genom bottenplattorna och vingmurarna, togs även ej hänsyn till eftersom delarna inte modellerades in i scriptmodellen. Detsamma gäller för kantbalkarna och deras armeringsinfästning.

Den transversella armeringen i bottenplattan och rambenen antogs vara genomgående ända ut till kanterna.



Figur 21: Principiell armeringsinläggning med förankringslängder för dragarmering i longitudinell led

8.3 Kontroller enligt Eurokod

Uppbyggnaden av scriptet leder till att broar som inte klarar kontroller mot Eurokod eller för nedböjning körs genom en FEM-analys. Detta eftersom geometrierna måste analyseras och snittkrafter räknas ut innan armeringsdimensionering kan ske. Därmed var det nödvändigt att lägga in i scriptet kontroller som avgör om en bro är byggbar eller inte. Det var även ett sätt att underlätta vid optimering genom att låta data från icke genomförbara broar falla bort och därmed inte behövs processeras.

För att avgöra om en bro var byggbar eller inte så finns det i scriptet inbyggda kriterier som måste uppfyllas. Dessa kriterier är en blandning av sådana som måste uppfyllas och sådana som inte måste uppfyllas, även om det är föredra att även dessa uppfylls. Ett exempel på ett kriterium som inte måste uppfyllas är nedböjningen, det finns inget i angivet i Eurokod angående nedböjning dock så finns det i (TRVK BRO 11, 2011) angivet att nedböjning maximalt får uppgå till $L/400$ vilket därmed användes som kontroll i scriptet.

Men då endast styvheten från betongen räknas med i FEM-analysen så kommer resultatet bli en större nedböjning än vad som hade varit fallet om styvheten från armeringen räknats med. Följden om det lagts som ett kriterium som måste uppfyllas hade varit att möjliga genomförbara broar hade försvunnit för tidigt i processen vilket inte är i enlighet med SBD. På grund av detta lades inte nedböjning in som ett kriterium som måste uppfyllas samtidigt som broar som inte uppfyllde trafikverkets krav på nedböjning kunde avfärdas senare i projekteringen om de även efter armeringsberäkning inte skulle uppfylla kraven.

Detsamma kunde inte gälla när plattan och benen skulle dimensioneras enligt Eurokod 2. Totalt delades bron in i fyra intressanta snitt enligt tidigare beskrivning. Här fanns en rad kriterier för att uppfylla vad Eurokod anger. Det som måste uppfyllas för varje region (tvärsnitt) är:

- Jämvikt i tvärsnittet, det vill säga kontroll av att armeringen flyter där den antas göra det.
- Momentkapacitet $>$ dimensionerande moment.
- Seghet ("ductility").
- Tvärkraftskapacitet $>$ dimensionerande tvärkraft.
- Minsta avstånd av byglar >100 mm (där tvärkraftsarmering är nödvändig).
- Sprickbredd.

Minsta accepterade värden och ekvationer för att räkna fram ovanstående kriterier gjordes enligt SS-EN 1992-1-1:2005. Notera att sprickbredd och nedböjningen kontrollerades i bruksgränstillstånd.

För att en bro skulle anses som möjlig byggbar så var det nödvändigt att alla dessa kriterier uppfylldes för alla regioner i bron, detta med samma armeringstjocklek. Data sparades då för den aktuella bron som kunde användas i optimeringsscriptet.

9 RESULTAT OCH DISKUSSION

I början av projektet sattes ett antal mål upp. Det gällde inte bara att hitta en så bra kostnads- och CO₂ optimal bro som möjligt utan även se hur väl ett datorscript med SBD skulle kunna tillämpas på plattrambroar. Vidare så var det även intressant att se hur väl en modellering av en plattrambro i Abaqus kunde göras med ”instruktioner” från scriptet samt dess överensstämmelse med en verklig plattrambro från WSP.

9.1 Bromodellen

Ett av projektets mest intressanta mål var att kunna vidareutveckla det tidigare scriptet för enspannsbroar till att kunna köra plattrambroar på. Utifrån erhållna resultaten så får det framtagna scriptet därför anses som lyckat eftersom en modell av en plattrambro implementeras utan att generera några fel, vare sig vid analys, i utdata eller vid optimering. Inga principiella fel i koden kunde hittas i Python eller observeras vid körning i Abaqus.

Kommentar: Plattrambroscriptet fungerar bra. Det ska dock sägas att betydande delar kod behövde läggas till, samt ändras och tas bort från det tidigare scriptet.

En av de stora svårigheterna i projektet var också att kunna anpassa trafiklastdelen från original scriptet till plattrambroscriptet. Det får dock anses som väl genomfört och integrerat i scriptet då den inte gav upphov till några konstiga uppföranden eller andra komplikationer.

Kommentar: De inlagda lasterna fungerar bra. Även jordlasten kunde läggas till och integreras med trafiklasten vilket föll ut med goda resultat. Slutsatsen blev också att trafikdelen fungerar som den var tänkt.

Handberäkning gjordes för moment och nedböjning för att säkerställa med de värden som genererades vid FEM-analyser i Abaqus för modellen. När det gäller armeringsdimensioneringen enligt Eurokod 2 så är beräkningarna för armeringen en iterativ process. Många antaganden och kontroller listas där och därför så gjordes även kontroller med handberäkning för att säkerställa armeringsmängderna erhållna från scriptet.

Kommentar: Handberäkningar överensstämmer någorlunda bra med de erhållna värden i Abaqus när aktuella laster lades på. Slutsatsen blev även att en senare handberäkning för armeringsmängden stämde ganska såväl överens med scriptets framräknade mängder.

9.2 Jämförelse armeringsmängd WSP bron

En av projektets stora tyngdpunkter har också varit att kunna validera det framtagna scriptet med en verklig bro. I detta fall gjordes en jämförelse med den till projektet tilldelad plattrambro från WSP. Den verkliga bronns geometri lades in i scriptet med hänsyn till de förenklingar och antaganden som behandlats i denna rapport. Därefter kördes analysen.

Det intressanta i detta fall var att se hur pass nära den preliminära dimensioneringen hamnade den verkliga bronns slutgiltiga dimensionering med hänsyn till armeringsmängder. På grund av bristande underlag kunde bara en region kontrolleras, den vid "path" två enligt tidigare kapitel. Resultatet enligt *Tabell 3*.

Tabell 3 Jämförelse mellan dragarmering med spricklutning på 45° för path 2

Hörn	Antal stänger (drag)	Bygelavstånd
WSP bro	11	250
Uppskattning	9	100

Kommentar: Den uppskattade plattrambro visar sig ge ett lägre behov av dragarmering i jämförelse med den slutgiltiga dimensioneringen av WSP bron. Den stora skillnaden i bygelavståndet beror mycket på vad för spricklutning som anges, vilket är okänt i WSP bron. I scriptet angavs en spricklutning på 45°. Vid en kontroll där istället en spricklutning på 30° angavs, så visade det sig att värdet på bygelavståndet hamnade på 200mm. Det ska poängteras att det framtagna scriptet avrundar bygelavståndet neråt till hela 100-tals millimeter. Exempelvis så avrundas därför ett bygelavstånd på 250 mm neråt till 200 mm.

Som en intressant jämförelse så gjordes även en uppskattning av armeringsmängden vid "path" 3 på rambenen och därifrån erhöles följande resultat, se *Tabell 4*.

Tabell 4 jämförelse mellan dragarmering med spricklutning på 45° för path 3

Hörn-ben	Antal stänger (drag)	Bygelavstånd
WSP bro	11	Inga byglar
Uppskattning	13	Inga byglar

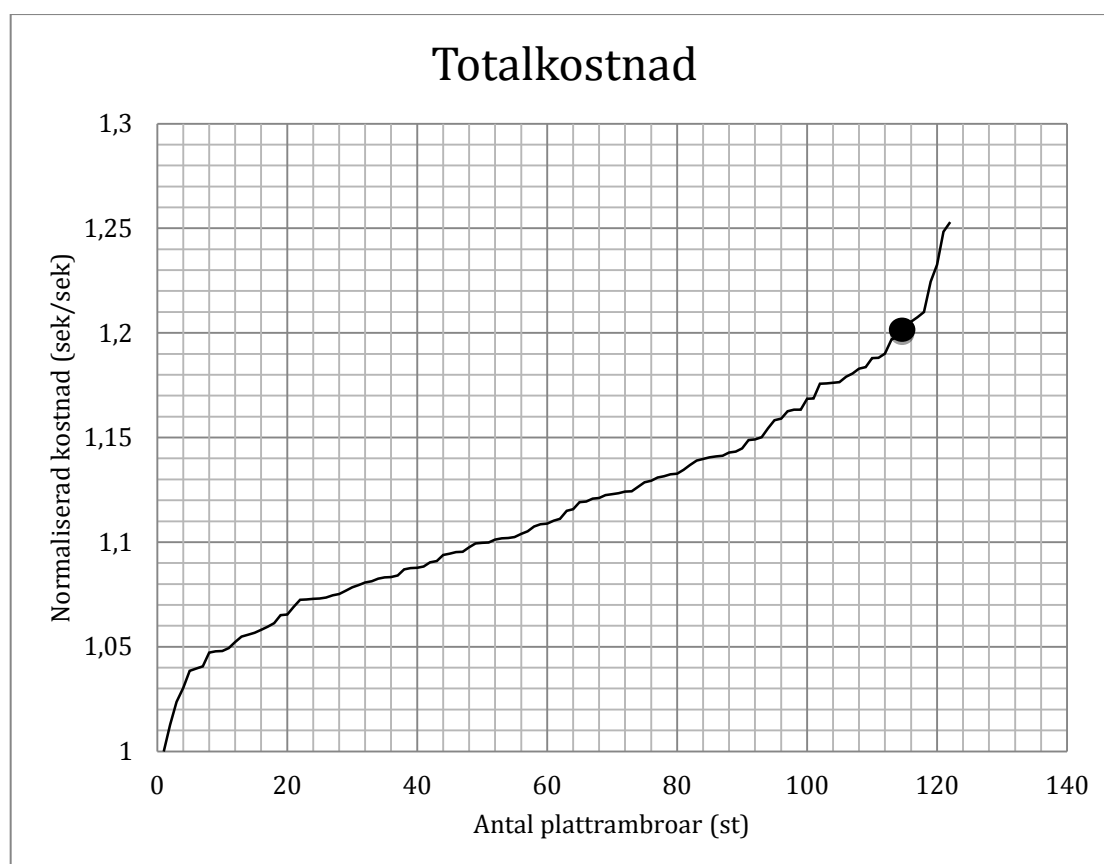
Kommentar: Denna uppskattning från WSP ritningarna bygger även på att armeringen i hörnet är genomgående, här fås en högre armeringsmängd vilket sannolikt har med normalkraften att göra då det enligt (Engström, 2011a) inte går att uppskatta en armeringsmängd lika bra om en normalkraft verkar i tvärsnittet. Det blev ändå en anmärkningsvärd skillnad i jämförelse med path 2

Då det även är en platta som dimensioneras och den i scriptet räknas på en breddmeter så är det lite svårt att från ritningarna bestämma exakt hur stort antalet armeringsjärn det är i WSP bron på aktuella platser där övriga pather lades in i scriptet. Det gäller framförallt i fältmitt på plattan och mot bottenplattorna. Slutsatsen blev ändå att plattrambroscriptets framräknade armeringsmängder både ligger i över- och underkant på de kontrollerade ställena i jämförelse med WSP-bron. Egentligen så skulle dock fler regioner (fält och infästning) kontrolleras för att få en bättre uppfattning om

scriptets tillförlitlighet. Detta då hörnen även är en av de mest komplicerade armeringsdelarna i en plattrambo.

9.3 Jämförelse totalkostnad WSP bron

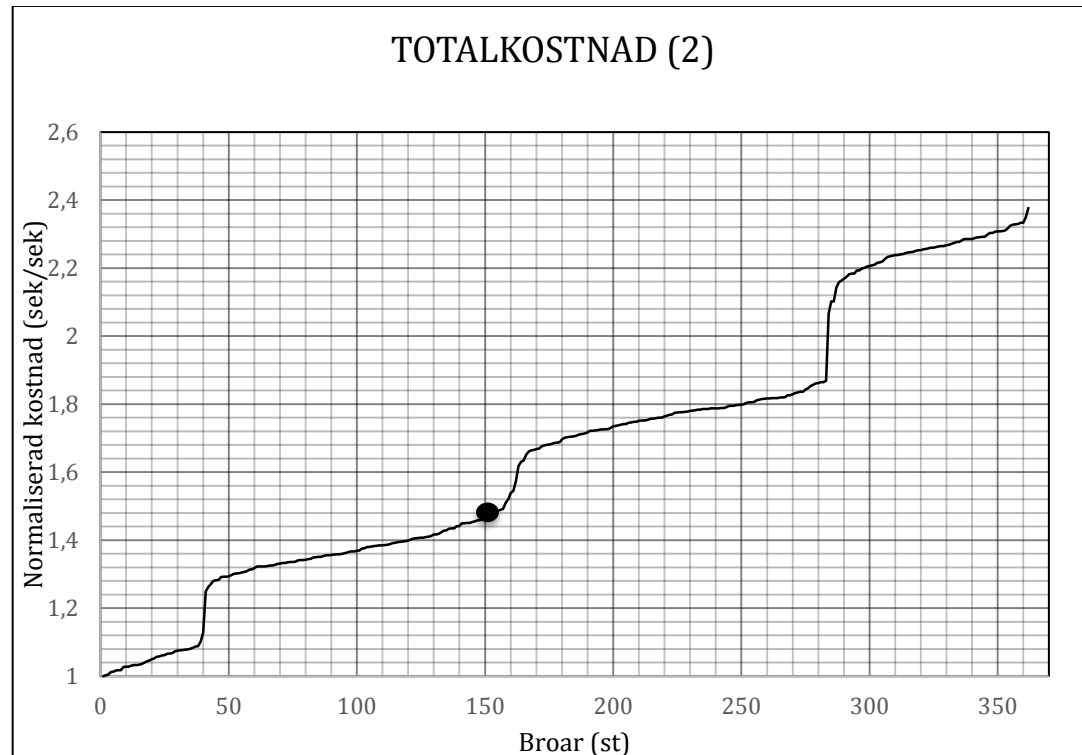
För att få en överblick över skillnaderna i kostnad det blev mellan den verkliga bron och scriptets framräknade broar gjordes en uppskattning inledningsvis med ett fåtal broar med samma längd i scriptmodellen. Liknande geometrier som för WSP bron såsom samma spannlängd och brobredd angavs som variabler i scriptet. Totalt sätt genererades cirka 200 broar och en sammanställning för brokostnaderna kan ses i *Figur 22*.



Figur 22 Kostnadsjämförelse mellan framräknade broar med samma geometri som WSP bron

Kommentar: Från diagrammet kan ses att WSP bron uppskattades till att vara cirka 20% dyrare än den billigaste bron framräknad av scriptet. Möjliga orsaker till det är att förankringslängder för dragarmering inte är optimalt framräknat samt att scriptets dragarmering enligt tidigare eventuellt ligger lite i underkant för brobaneplattan. Resultatet visar ändå på en mycket intressant kostnadsbesparing och att en optimering av plattramboar kan vara fullt möjlig och ha en mycket stor nytta i en preliminär dimensionering.

Det gjordes även en större kostnadsanalys med en mängd olika geometriska kombinationer med främst olika brolängder för att få en total uppfattning av scriptets potential där alla variabler möjliga att variera varierades. Den uppskattade kostanden för WSP bron lades även in här för att få en jämförelse, se *Figur 23*.



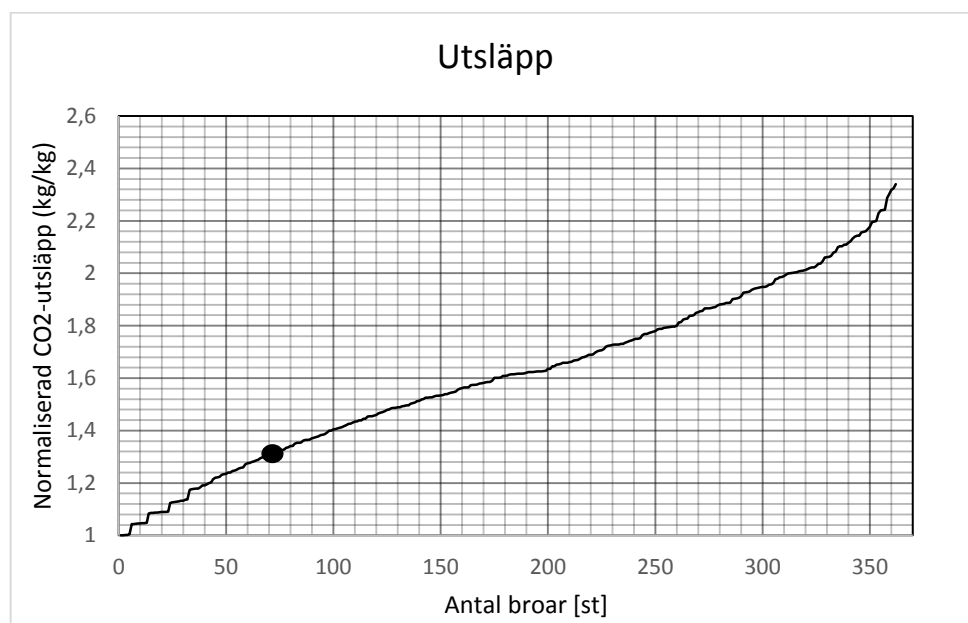
Figur 23 En total jämförelse med kostnadsförändring med alla genomförbara broar med olika brolängder

Kommentar: När fler broar analyserades så blev kostnadsfördelningen av naturliga skäl större. Det intressanta är att kurvan följer lite av ett mönster och är i stort sett linjär fram tills brolängden ändras. Det kan därför konstateras att scriptet och optimeringen fungerar även för större brolängder även för den undersökta bron från WSP.

Svår balansgång vid jämförelse när det gäller preliminärdimensionering och mängdning. Att göra en så korrekt och överensstämmande mängdning utifrån en slutgiltig bygghandling till en preliminär dimensionering kan därför vara mycket svårt.

9.4 Jämförelse CO₂ WSP bron

Miljö är något som idag är viktigt för det flesta och det är en stor strävan att minska sin negativa miljöpåverkan på många olika sätt, både från stat till enskild individ. I detta projekt så var det därför även intressant att ge scriptet en miljöaspekt och se vad för resultat som fås fram även här. Det finns en mängd olika sätt att räkna ut miljöpåverkan med till exempel en livscykelanalys. Det gjordes inte för varje bro i detta projekt, istället togs endast hänsyn till materielmängderna när varje bros miljöpåverkan skulle beräknas.



Figur 24 Diagram över normaliserad CO₂ utsläpp totalt för alla broar körda i Abaqus.

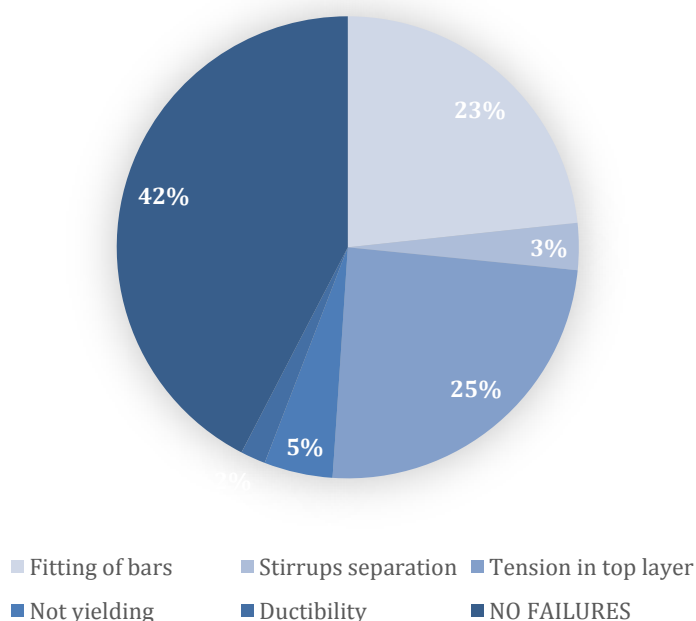
Kommentar: Kurvan skiljer sig här ganska mycket mot den tidigare kostnadskurvan (totalkostnad 2). För det första syns inga stor ”hopp” som det fanns i kostnadskurvan som hörde samman med byte av brolängder. Anledning till det kan vara att armeringsmängderna ökar relativt mycket när spannlängderna ökar. Då ökar kostnaderna rejält eftersom priset för stål angavs till att vara tio gånger högre än betongen men skillnaden i CO₂ utsläpp är endast två gånger så stor. WSP bron visar här på bra optimering med hänsyn till miljöpåverkan speciellt med tanke på att broar med kortare spannlängder även analyserades.

9.5 Brostatistik genomförbarhet

För hela projektet och av alla gjorda analyser var det av stort intresse att även se vilka fel som kunde uppstå i alla körda broar. För att gå vidare till optimeringen så gjordes därför en grov uppskattning där broar som fick några typer av fel, uteslöts och inte gick vidare i processen. Även om en del uppkomna fel är av mindre betydelse för att faktiskt kunna bygga bron, så gick de ej vidare till optimeringsdelen av scriptet för enkelhetens skull. Bron som förklarats tidigare var uppdelad i fyra regioner där varje region fick lov att gå igenom kontrollerna. Det medförde att till exempel tre av fyra regioner kunde vara byggbara men bron hamnade ändå under icke byggbar i scriptet.

Då broarna var enskilt uppdelade i fyra regioner så medförde det också att varje bro kunde ha upp till och med fyra felorsaker. Detta gör statistiken en aning missvisande men ger ändå en idé över vilka felorsaker som var mest framträdande, vilket *Figur 25* visar.

Uppkomna fel



Figur 25 Antalet uppkomna fel totalt för alla broar och alla regioner. Observera att även broar som inte genererade några fel finns med (NO FAILURES)

Kommentar: Här syns att felprocenten är relativt hög, vilket förklaras i tidigare stycket. Det är dock inget som är störande eftersom många olika geometrier kontrollerades även sådana som kanske hade kunnat uteslutas från början. Men tanken med projektet var att följa SBD och därför valdes även dessa parametrar att ta med. Till exempel drag i tryckarmeringen hade inte fått sådan stor felprocent om inte stora tjocklekar hade valts. Ändå gick 42 % av de testade broarna vidare till optimeringsprocessen vilket får anses vara tillräckligt för att kunna göra en någorlunda tillfredsställande och pålitlig statistisk jämförelse.

10 SLUTSATS

SBD är en metod som enligt tidigare datorscript lämpar sig väl för att kunna göra preliminärdimensionering på brotyper i ett spann. Det i detta projekt utvecklade script och dess tillämpning på plattrambroar, som även det är ett försök till preliminär brodimensionering visar på blandade resultat. Men eftersom flera förenklingar fick göras såsom uppskattning av jordtryckslaster och bortseende från stödkonstruktioner, samt vid armeringsdimensionering, så är det naturligt att resultaten skiljer sig.

Det utvecklade scriptet får dock anses som ett fungerande verktyg att utnyttja på plattrambroar. I broprojekteringen kan scriptet därför vara av stor nytta och i de efterföljande processer som slutligen leder fram till en färdig plattrambro. Detta trots att många delar i broprojekteringen ligger utanför detta projekts omfattning och togs därför inte hänsyn till. Det gäller exempelvis påverkande faktorer såsom byggnadskrav och inflytande från samhällsinvånare och myndigheter, eller också den platsen som bron är tänkt att byggas på. Med SBD som metod och scriptets funktion finns det dock även möjligheter att även ta hänsyn till en del av dessa yttre faktorer i ett längre perspektiv. I projektet har det också endast tagits hänsyn till parametrarna materialkostnader och CO₂utsläpp, vilket är intressant, men säger inte allt om en plattrambros egentliga slutkostnad och miljöpåverkan.

Det framtagna scriptet är tänkt att vara ett avancerat, men ett ändå ett enkelt verktyg för konstruktören att använda. På grund av vissa komplicerade delar av scriptet så finns det dock krav på förkunskaper hos användaren, exempelvis för att utnyttja GLENN effektivt krävs vissa förkunskaper i Linux. Även för att tolka resultaten krävs goda kunskaper i såväl Eurokod som i grundläggande hållfasthetslära.

Scriptet är inte 100% färdigutvecklat och användaren bör vara medveten om det samt att de resultat man får fram med scriptet endast är preliminära. Detta eftersom flera förenklingar har gjorts på olika plan och även dessa bör användaren vara medveten om. En preliminärdimensionering är lite utav en uppskattning och därför så skiljer resultaten av naturliga skäl från en sådan i jämförelse med en slutlig dimensionering.

Trots allt är nyttan med det framtagna scriptet säkert stort och kan ha avsevärd nytta och potential att kunna användas vid preliminärdimensionering och i broprojekteringsprocessen trots de begränsningar som finns. Tar man hänsyn till detta och lägger mer tid på att utveckla scriptet vidare så kan väldigt bra resultat uppnås, se kapitel 11 för förslag på förbättringar.

Att, enligt SBD, kunna lägga till fler funktioner och variabler som är av intresse när en plattrambro ska byggas, kommer med all säkerhet att vara av stor fördel och betydelse även för samhället och andra instanser. Med ett mer välutvecklat verktyg skulle det också därför eventuellt med tiden kunna revolutionera och modernisera hela broprojekteringsprocessen och brodimensioneringen i stort.

11 UTVECKLING OCH TILLÄMPNING

Mycket tid har lagts ner på att göra så korrekta uppskattningar och förenklingar som möjligt av olika delar i projektet. Många variabler har även inte tagits i beaktning alls vilket även ger utrymme för stora förbättringar av scriptmodellen. Detsamma gäller för uppbyggnaden av strukturen på scriptet.

Scriptets utformning: För att göra scriptet mer användarvänligt och förenkla navigeringen i det bör även beståndsdelarna sammankopplas på ett bättre sätt. Det aktuella scriptet kan vara något omständligt att navigera i för icke insatta personer och därför bör struktureringen i scriptet göras mer användarvänligt då scriptet är mycket komplext med många intrikata delar.

Optimeringsdelen av scriptet kan även göras bättre. Det fungerar, men tar ganska så lång tid att tolka och förstå generellt sätt. Tillsammans med scriptet bör därför förbättringar göras här för att göra delen mer användarvänlig.

När analyserna kördes på GLENN noterades att processoranvändningen låg någonstans runt 5-10% av den totala kapaciteten. Här får antas att det beror på begränsningar i mjukvaran och att fördjupande studier i hur Abaqus är uppbyggt från grunden och utför beräkningar måste göras. Här finns eventuellt mycket tid att spara in om man utnyttjade resurserna bättre.

Rambromodellen och geometrin: Då projektet haft en begränsad tid samt att fokusering låg på preliminärdimensionering i projektet så har det därför bortsetts från vissa geometrier och stödkonstruktioner. Att modellera in dem behöver inte vara svårt, men att få dem att fungera tillfredsställande och interagera på ett korrekt sätt med den övriga konstruktionen kan vara svårare. Det gäller framförallt voter, vingmurar och till viss grad bottenplattor som ger inverkan på armeringsinläggning och betongmängder.

Det finns därför större utrymme för förbättringar och tillägg när det kommer till modelleringen. Att förfina geometrin är därför en viktig del om scriptet skall förädlas ytterligare.

Armeringsdimensionering: En av projektets största svårigheter och den del där flest antaganden fick lov att göras var för armeringsdimensioneringen. Det finns därför stora vinster att göra enbart här som kan förbättra scriptets potential rejält. Det gäller främst armeringsdimensioneringen för ramben och infästningar av plattramben till olika stödkonstruktioner. Även förankringslängder är något som hade varit väldigt positivt och givande att få in mer tillfredsställande och korrekt i scriptet.

Allmänna kommentarer: Precis som i det tidigare examensarbetet så konstaterades i detta projekt att det är av stort intresse för att lägga till fler funktioner i scriptets optimeringsprocess för att göra scriptet mer flexibelt. Det gäller exempelvis faktorer såsom LCA, byggtider eller optimering med hänsyn till det bästa trafikflödet.

Vidare borde ändringar och tillägg göras för att göra scriptet och resultaten lättare att implementera i en vidare dimensioneringsprocess. Att kunna utveckla scriptet och kunna utnyttja resultaten därifrån i andra beräkningsprogram skulle därför vara av

mycket stor nytta. Det skulle även vara intressant att applicera SBD på andra ställen i byggbranschen, till exempel för modulbyggda bostäder eller för optimering av prefabricerade balkar och pelare. Här finns utan tvekan ett stort outforskat fält där möjlighet finns till kostnadsbesparingar.

12 Referenser

- Armering av betong. (2010). Retrieved 9 Februari, 2015, from <http://www.husgrunder.com/ordlista/armering-av-betong/>
- Axelsson, K. (2015). *Plattrambro*. from Nationalencyklopedien www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lang/plattrambro
- Bernstein, J. I. (1998). *Design Methods in the Aerospace Industry: Looking for Evidence of Set-Based Practices*. (Master), Massachusetts Institute of Technology., Massachusetts. Retrieved from <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/82675/40133158.pdf?sequence=1>
- CAD - The greatest advance in construction history. (2012). *The Architects' Journal*.
- Engineering Design Process. (2015). Retrieved 17/4, 2015, from <https://www.teachengineering.org/engrdesignprocess.php>
- Engström, B. (2011a). *Bärande konstruktioner Del 1* Konstruktionsteknik. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola.
- Engström, B. (2011b). *Design and analysis of slabs and flat slabs (2014 ed.)*. Göteborg: Konstruktionsteknik.
- Fernández, S., & Ramos, D. (2014). *Applicability of Set-Based Design on Structural Engineering*. (Master), Chalmers, Göteborg. (102)
- Gray, A. W. (2011). *Enhancement of Set-Based Design Practices Via Introduction of Uncertainty Through the Use of Interval Type-2 Modeling and General Type-2 Fuzzy Logic Agent Based Methods*. from authentication may be required: http://gateway.proquest.com/openurl?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:dissertation&res_dat=xri:pqdiss&rft_dat=xri:pqdiss:3476481
- Hakimi, P. S. (2012). *Distribution of Shear Force in Concrete Slabs*. (Master), Chalmers Tekniska Högskola, Sverige. Retrieved from <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/164525.pdf>
- Hult, F. (2011). *Analys av plattrambroar med krökta ramben*. Lund: Structural Mechanics, Lund University.
- Lane, R., & Woodman, G. (2000). *Wicked Problems, Righteous Solutions' Back to the Future on Large Complex Projects*. Paper presented at the The 8th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Brighton. <http://new.leanconstruction.org/media/docs/RighteousSolution.pdf>

- Lee, H. W., Tommelein, I. D., & Ballard, G. (2012). *Design of an Infrastructure Project Using a Point-Based Methodology*. *Journal of Management in Engineering*, 28(3), 291-299. doi: 10.1061/(asce)me.1943-5479.0000103
- Shin, M., Bommer, A., Deaton, J. B., & Alemdar, B. N. (2009). *Twisting Moments in Two-Way Slabs*. *ACI*.
- SIMULIA. (2012). *Getting Started with Abaqus: Interactive Edition* Retrieved from http://www.maths.cam.ac.uk/computing/software/abaqus_docs/docs/v6.12/pdf_books/GET_STARTED.pdf
- Singer, D. J., Doerry, N., & Buckley, M. E. (2009). *What Is Set-Based Design?*
- SS-EN 1991-2. (2010). *Eurokod 1: Last på bärverk – Del 2: Trafiklast på broar*.
- SS-EN 1992-1-1:2005. (2010). *Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner – Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader*.
- SS-EN 1997-1:2005. (2010). *Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner – Del 1: Allmänna regler*.
- Naval Engineers Journal Volume 121, Issue 4. *Naval Engineers Journal*, 121(4), 31-43. Retrieved from: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1559-3584.2009.00226.x/abstract>
- Sällfors, G. (2009). *Geoteknik*. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola.
- Trafikverket. (2014). *BaTMan - Bro och Tunnel Management*. 2015, from <https://batman.vv.se/batInfo/handbok31/whnjs.htm>
- Trafikverket. (2015). *Definitioner och Begrepp - Bro typer, fasta broar*. Retrieved 9 februari, 2015, from https://batman.vv.se/batInfo/handbok31/DEF_BrotyperFastaBroar.htm
- TRVK BRO 11. (2011). *Trafikverkets tekniska krav Bro*, Trafikverket.
- Vägverket. (1996). *Broprojektering, en handbok*. Publikation / Vägverket, (pp. 130 s.). Retrieved from <http://www.trafikverket.se/Foretag/Bygga-och-underhalla/Vag/Tekniska-dokument/Bro-och-tunnel/Bro-och-tunnel---dokument/Broprojektering---en-handbok/>
- Ward, A., K.Liker, J., J.Cristiano, J., & K.Sobek II, D. (1995). *The Second Toyota Paradox: How Delaying Decisions Can Make Better Cars Faster*. *Sloan Management Review*, 36(3).
- Ward, A., K.Liker, J., & K.Sobek II, D. (1999). *Toyota's Principles of Set-Based Concurrent Engineering*. *Sloan management review*, 67-81.