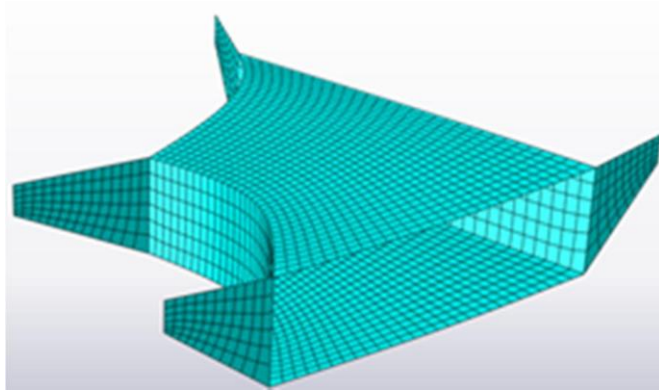


Metod för parametriserad modellering av brokonstruktioner



David Karlsson & Nils Welinder

Avdelningen för Konstruktionsteknik
Lunds Tekniska Högskola
Lunds Universitet, 2011

Avdelningen för Konstruktionsteknik
Lunds Tekniska Högskola
Box 118
221 00 LUND

Department of Structural Engineering
Lund Institute of Technology
Box 118
S-221 00 LUND
Sweden

Metod för parametriserad modellering av brokonstruktioner

David Karlsson & Nils Welinder
2011

Methodology for parametric modeling of bridge structures

© David Karlsson & Nils Welinder 2011
Report TVBK-5196
ISSN 0349-4969
ISRN: LUTVDG/TVBK-11/5196+90p
Printed in Sweden

Master's Thesis
Supervisor: Johan Kölfors, Scanscot Technology AB
Mars 2011

Förord

Denna rapport behandlar examensarbetet som avslutar våra studier vid Väg- och Vattenbyggnad på Lunds Tekniska Högskola. Arbetet har genomförts från september 2010 till och med mars 2011 vid Scanscot Technology i Lund.

Idén till detta examensarbete grundades på Scanscot Technology och har utvecklats i samråd med handledare allteftersom arbetet fortgått.

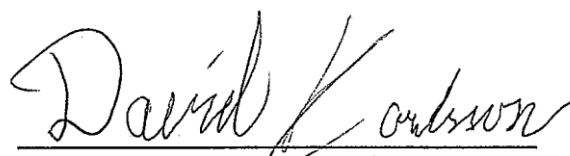
Vi vill tacka vår handledare Johan Kölfors för det stöd och hjälp som han har bidragit med.

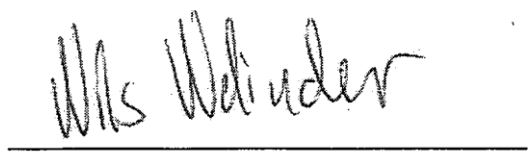
Ett speciellt tack till Anders Vennerstrand för den expertkunskap och hjälp som han bidragit med.

Vi vill även tacka vår examinator Sven Thelandersson.

Slutligen vill vi tacka all personal på Scanscot Technology för det varma välkommandet och den hjälp de bidragit med.

Lund, Mars 2011


David Karlsson


Nils Welinder

Abstract

Today's companies are using three dimensional finite element programs to evaluate structures of different kinds to a much greater extent than before, among them bridge structures. These programs can be divided into two groups: general and specialized programs. The general programs are general in the sense that they don't focus on a specific type of structure and allow the user to model most structures. The work with such programs is often both complex and time consuming. Specialized programs are designed for the modeling and analysis of a specific type of structure. This results in a time efficient modeling with a minimum of input.

The aim of this thesis is to develop a methodology for merging the advantages from both the program types. This will allow the user to create a bridge model through parameterization but the model should be created in such way that it is modifiable using the tools given in general programs.

The methodology is then verified by an implementation into a general program with a script. This script creates a bridge model with both super- and substructure which can vary in many different ways. The substructure is limited to columns, abutments, end shields and wing walls. In addition to the geometric modeling the project also includes the modeling of the following loads: earth pressure, overload, surcharge, dead weight, shrinkage, temperature and support displacement. Sets and surfaces are also predefined by the methodology to make it easier for the user to make changes to the created model.

Sammanfattning

Idag används tredimensionella finita element program i allt större utsträckning vid analys av konstruktioner, inte minst för broar. De program som finns på marknaden kan kategoriseras i två huvudgrupper: generella program respektive specialprogram. Programmen i den förstnämnda gruppen är generella i den mening att de inte är gjorda för att hantera någon speciell typ av konstruktion, utan ger användaren stor frihet att bestämma hur modellen ska vara uppbyggd. Nackdelen med dessa är att kunskapsnivån för att skapa och utnyttja en modell är relativt hög och för en ovan användare kan de även vara väldigt tidskrävande. Specialprogrammen är däremot utformade för att hantera en viss typ av konstruktion som möjliggör en mycket enkel och tidseffektiv modellering genom att strukturens geometri kan beskrivas med ett mindre antal parametrar. Nackdelen med dessa program är att de endast kan användas för modellering av vissa konstruktionstyper. En konstruktör kan då behöva flera specialprogram för att kunna hantera olika konstruktionstyper.

Målet med detta examensarbete är att utforma en metodik som på bästa sätt möjliggör fördelarna hos båda dessa programgrupper. En sådan lösning möjliggör en tidseffektiv parametriserad modellering som resulterar i en modell som användaren fritt kan modifiera i de fall som parametrarna inte fullt beskriver den önskade modellen.

Metodiken har använts för att skriva ett skript som skapar parametriserade modeller av brokonstruktioner. Dessa kan vara allt från raka till sneda, krökta, avsmalnande, bomberade etc. Modelleringen inkluderar både över- och underbyggnad där underbyggnaden kan utgöras av skivstöd, pelare, ändskärmar och vingmurar. Utöver detta behandlas följande laster och normer angivna i Eurocode: egentynngd, överbelastning, beläggning, ballast, jordtryck, krympning, temperaturer och stödförskjutningar. För att underlätta parametriseringen av geometrin har ett enkelt användargränssnitt skapats. Konstruktionsdelar och ytor fördefinieras och grupperas för att underlätta vidare belastning på bron.

Innehållsförteckning

1	INTRODUKTION	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Projektbeskrivning	1
1.3	Metod	2
1.4	Begränsningar	2
1.5	Generalitet vs specialisering	3
2	INLEDNING	5
2.1	Brotyper	5
2.1.1	Rambroar	5
2.1.2	Plattbroar	6
2.1.3	Balkbroar	7
3	BROARS GEOMETRI OCH FUNKTION	9
3.1	Överbyggnad	9
3.1.1	Väggeometri	9
3.1.2	Farbana	12
3.1.3	Kantbalkar	12
3.1.4	Bärande balkar	12
3.1.5	Ändskärmar	13
3.2	Underbyggnad	14
3.2.1	Stöd	14
3.2.2	Lager	15
3.3	Grundläggning	16
4	LASTER PÅ BROAR	17
4.1	Permanent laster	17
4.1.1	Egentyngd	17
4.1.2	Stödförskjutning	18
4.1.3	Tyngd av beläggning	18
4.1.4	Tyngd av överfyllnad	18
4.1.5	Jordtryckslast	19
4.1.6	Krympning	19
4.1.7	Inverkan av förspänning	20
4.2	Variabla laster	20
4.2.1	Trafiklast	20
4.2.2	Temperaturlast	23
4.2.3	Broms- och Accelerationslast	23

4.2.4	Sidokraft	23
4.2.5	Centrifugalkraft.....	24
4.2.6	Vindlast	24
4.2.7	Överlast	24
4.2.8	Is- och strömlast	25
4.2.9	Exceptionella laster	25
4.3	Lastkombinering	25
5	METODBESKRIVNING.....	27
5.1	Arbetsgång	27
5.1.1	Horisontell linjeföring	28
5.1.2	Vertikal linjeföring	29
5.1.3	Bredd och lutning	29
5.1.4	Stödlinjer	30
5.1.5	Stöd.....	31
5.1.6	Vingmurar.....	32
6	IMPLEMENTERING	35
6.1	Väglinjen	36
6.1.1	Horisontell linjeföring.....	36
6.1.2	Vertikal linjeföring	42
6.2	Överbyggnad	45
6.2.1	Kantpunkter.....	45
6.2.2	Stödlinjer	48
6.2.3	Brodäck.....	49
6.3	Underbyggnad	50
6.3.1	Skivstöd.....	50
6.3.2	Pelare.....	51
6.3.3	Vingmur	52
6.4	Set och ytor	53
6.5	Koordinatsystem	54
6.6	Randvillkor	55
6.7	Lager och kopplingar	55
6.8	Laster.....	56
6.8.1	Egentyngd	56
6.8.2	Beläggning och ballast	56
6.8.3	Stödförskjutning	56
6.8.4	Krympning	57
6.8.5	Jordtryck.....	57
6.8.6	Överlast	58
6.8.7	Temperaturlast	59

7	RESULTAT	61
8	SLUTSATS	63
9	DISKUSSION	65
10	KÄLLFÖRTECKNING	67

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Vid modern dimensionering av brokonstruktioner ökas kraven på noggrannhet och tvådimensionella metoder anses i många fall inte tillräckliga. Detta har lett till att tredimensionella finita elementmodeller har blivit allt vanligare för att beräkna dimensionerande krafter och moment.

De analysprogram som finns på dagens marknad kan delas in i två huvudgrupper; generella program och specialprogram. Programmen i den första gruppen är generella i den bemärkelsen att de inte är inriktade på någon speciell konstruktionstyp och har därför ett brett användningsområde. En nackdel är att programmets många modelleringsmöjligheter gör dem svåra att lära sig och mer tidskrävande att använda jämfört med specialprogram, som utvecklats med fokus på modellering av en eller ett fåtal konstruktionstyper. Denna avgränsning möjliggör en effektiv parametrisering av brons egenskaper, vilket leder till en minimering av mängden indata och en tidseffektiv modellering. Specialprogram är ofta användarvänliga i jämförelse med generella program samtidigt som deras snäva användningsområde också är deras nackdel.

1.2 Projektbeskrivning

Examensarbetets syfte är att utveckla en metod, för att på bästa sätt kombinera fördelarna med respektive programtyp. Målsättningen är att metoden ska möjliggöra en tidseffektiv geometri och lastmodellering för de vanligare brotyperna baserat på ett minimum av indata, men att denna modell ska vara uppbyggd på sådant sätt att den är möjlig att bygga vidare på med metoder som återfinns i generella program. Denna metodik verifieras genom att implementeras som ett tillägg i ett generellt modelleringsprogram.

Efter detta projekt är avslutat finns möjligheter att utveckla detta programtillägg för att gälla fler brotyper samt flera användarmöjligheter. Med några enkla indataparametrar kan en bro enkelt modelleras inom rimlig tid, samtidigt som man därefter skall kunna utveckla denna och bygga vidare på den.

Arbetet kommer att omfatta flera olika kunskapsområden såsom brokonstruktionsteknik, modellering och programmering.

Som miljö för utvecklingen och implementeringen av metoden används BRIGADE/Plus som är ett generellt konstruktionsmodelleringsprogram och programmeringsarbetet sker med programmeringsspråket Python. Examensarbetet har utförts vid Scanscot Technologys huvudkontor i Lund.

1.3 Metod

Projektet inleds med en litteraturstudie gällande brokonstruktioners uppbyggnad samt hur dessa modelleras utifrån ett strukturanalytiskt perspektiv. Samtidigt genomgår en kurs för att överskådligt lära känna programmet och dess programmeringsspråk som senare används för implementering av metoden. Det ges även en överblick av skillnaden mellan ett special- och ett generellt program.

Därefter har arbetsgången fortskridit enligt metoden "trial and error" för att hitta optimala lösningar för geometrisk beskrivning av brokonstruktioners olika delar. Även ett flertal olika brolaster har behandlats och fördefinierats för den bro som programmet genererar. Dessa laster, lastkombinationer och övriga lastdata används enligt gällande normer Eurocode samt TK Bro.

1.4 Begränsningar

Projektets idé och omfattning medför att vissa begränsningar måste göras för att projektet inte skall bli för omfattande. Examensarbetet ses som en början och en förstudie till ett större projekt.

De brotyper som detta projekt behandlar begränsas till plattbroar och rambroar med konstanta tvärsnitt på brodäcket.

Ett enklare användargränssnitt skapas vilket behandlar geometridelen av projektet. Användargränssnittet ses inte som det väsentliga i detta examensarbete. Övrig indata som önskas, exempelvis lastdata, fördefinieras lättillgängligt i programkoden.

1.5 Generalitet vs specialisering

Som tidigare nämnt kan finita elementmodelleringsprogram delas upp i två kategorier: generella program och specialprogram. Specialprogram är utformade för att på så kort tid som möjligt bygga upp en modell med ett antal givna parametrar. Fördelen med dessa typer av program är tidseffektivitet och användarvänlighet medan nackdelen är de begränsningar som denna parametrering medför.

Mer komplicerade konstruktioner kan ofta inte beskrivas på ett parametriserat vis. I sådana fall är generella program att föredra. Eftersom de är mycket mer komplexa än specialprogram kräver de också mycket mer kunskap för att utnyttjas och är i regel mer tidskrävande, både att lära sig och att sedan använda. Generella program tillåter användaren att beskriva modellen på ett inte i förväg förenklat, parametriserat vis.

Eftersom projektets huvudsakliga mål är att föra samman de positiva egenskaperna från de båda programtyperna måste hela tiden övervägas hur pass "specialiserat" programmet skall vara. Användaren ska inte behöva tänka på vilka geometriska verktyg som används och hur de används så länge det inte medför alltför stora begränsningar i ett senare skede. Ju mindre val av dessa typer som användaren behöver göra ju snabbare kan en modell skapas. Den resulterande modellen ska vara uppbyggd så att den kan modifieras på ett vis som den parametriserade indatan inte tillåter. På det viset kan parametriseringen utnyttjas som en grund till en mer komplicerad modell.

2 Inledning

Rapporten är uppdelad i en teoretisk samt en praktisk del. Den teoretiska delen inleds med en övergripelig beskrivning av de vanligaste brotyperna för att uppföljas av en allmän beskrivning av en bros geometriska uppbyggnad och funktionalitet. Detta kompletteras med en genomgång av de vanligaste lasterna på brokonstruktioner.

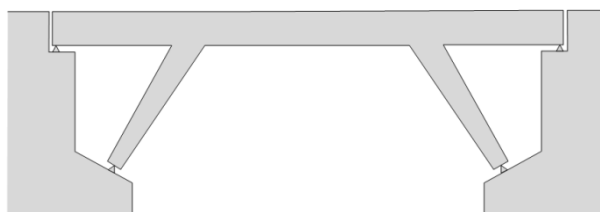
Den praktiska delen är uppdelad i två delar. Den första delen beskriver den utvecklade metoden för behandling av examensarbetets problemställning. Den andra delen beskriver implementerandet av denna metod i programmet BRIGADE/Plus. Slutligen illustreras och diskuteras examensarbetets resultat.

2.1 Brotyper

En bro kan se ut och fungera på en mängd olika sätt och därför delas de upp i olika brotyper. Valet av vilken brotyp som skall upprättas bestäms av en balans mellan funktionalitet och kostnad för uppförande och framtida underhåll. Då det vid givna förutsättningar finns många olika typer av broar som fungerar lika bra brukar ekonomiska skillnader väga tyngst. Ju enklare brotyp som väljs desto billigare och lättare blir den att uppföra. Nedan följer en kort beskrivning av de vanligaste brotyperna.

2.1.1 Rambroar

Den kanske vanligaste brotypen i Sverige är *rambro* och utförs normalt endast i ett spann. Brotypen är ekonomiskt fördelaktig och dimensioneringen sker ofta relativt snabbt och enkelt. Rambroar saknar lager och rörelsefogar vilket minskar underhållskostnaderna för bron. De utmärker sig genom att båda ändstöden är sammangjutna med brodäcket och skapar en fast inspänning, se Figur 1. Konstruktionen fungerar på så sätt som en ram vilken tar upp de horisontala och vertikala krafterna som förekommer och ger även mindre deformationer då en högre styvhet uppnås.



Figur 1. Rambro

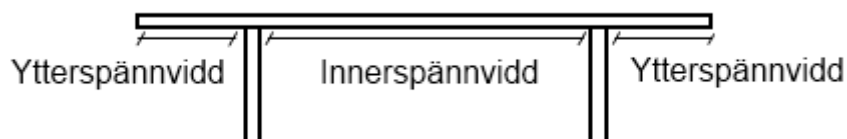
Spännvidden för en rambro varierar mellan 20 och 25 m för en slakarmerad och upp till 35 m för en spännarmerad. Tjockleken på plattan kan variera mellan 0,3 och 1,3 m. Ett sätt att minska mängden armering och betong brukar vara votning vid ändstöden, dvs. att plattans tjocklek ökar över stödet. Andra varianter av denna brotyp är plattrambroar (se Figur 2) och balkrambroar. (Sundquist 2009) (Sundquist 2007) (Vägverket 1996)



Figur 2. Plattrambro

2.1.2 Plattbroar

En annan brotyp är *plattbro*. Till skillnad från rambroar är inte plattbroars båda ändstöd ihopgjutna med brodäcket utan de kännetecknas av en egen gjuten överbyggnad som placeras på olika stöd. Fördelen med denna brotyp är att inga rörelsefogar behövs samt att de är statiskt bestämda vilket underlättar dimensioneringen. Nackdelen är att det kräver lager och ställer på så sätt stora krav på underhåll. Spännvidden för dessa typer av broar är generellt lite större än för rambroar. Innerspännvidden kan uppgå till ungefär 25 m för en slakarmerad platta och 40 m för en spännarmerad. Ytterspännvidderna beräknas ligga mellan 50-90% av innerspännvidden, se Figur 3. Denna brotyp brukar vara att föredra då en något längre spännvidd önskas och den tillgängliga konstruktionshöjden är liten. (Sundquist 2009) (Vägverket 1996)



Figur 3. Definition spännvidder

2.1.3 *Balkbroar*

Balkbroar kan tillverkas i flera spännvidder och kan vara upp emot 200 m långa. De primära bärverken består av längsgående balkar vilka ofta sammanbinds med en platta som medför stabilitet i tvärled. Bron kan utföras i trä, stål eller betong och det vanligaste materialet är betong. I det fall balkarna är gjorda av betong kan dessa vara spännarmerade för att öka bronns spännvidd. Plattans material kan vara stål eller betong och det är viktigt att anslutning mellan balkar och platta utförs ordentligt för att bron skall uppnå önskad stabilitet.

Om balkarna som bär bron är av betong behövs ofta votning vid stöden vilket innebär att dess tvärsnitt har större area på dessa ställen. Detta för att klara av de stora tvärkrafterna som uppstår vid stöden. Balkbroarna är ofta geometriskt och tekniskt enkla och är lämpliga om risken och magnituden för stödsättningar är stor. För balkbroar med längre spännvidd bör dilatationsfogar och rullager finnas för att ta upp de temperaturrörelser som sker. Dilatationsfogen är en koppling som möjliggör för bron att ändra sin längd. (Sundquist 2007) (Vägverket 1996)

3 Broars geometri och funktion

Alla broar delas upp i två huvuddelar: överbyggnad och underbyggnad. Nedan följer en beskrivning av dessa samt deras syfte. Det kompletteras med en översiktlig beskrivning av grundläggningstyper och förutsättningar.

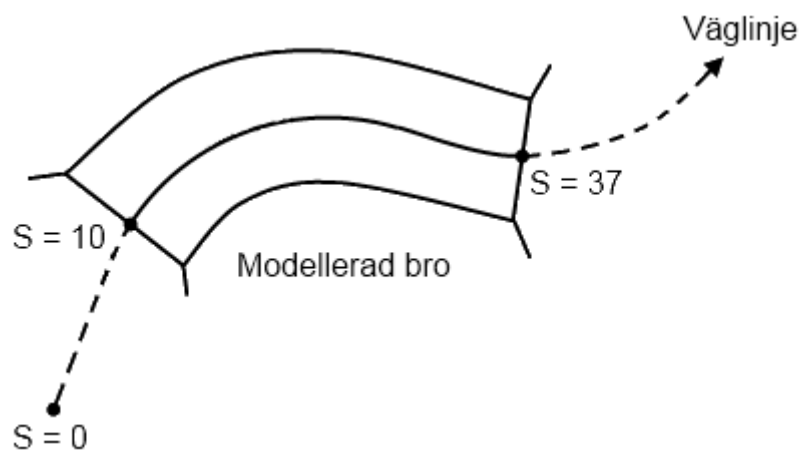
3.1 Överbyggnad

Om en planerad väg passerar ett hinder i landskapet, till exempel i form av ett vattendrag eller en annan väg, uppstår behovet av en bro. Brons geometriska utformning styrs till stor del av vägens utformning samt av hindrets utformning och beskaffenhet.

I detta avsnitt beskrivs hur vägars geometri beskrivs med väglinjer samt hur dessa styr bronns utseende. Dessutom beskrivs överbyggnadens delar och funktion.

3.1.1 Väggeometri

En vägs geometriska utformning beskrivs som regel med hjälp av en stakad linje. För de flesta vägarna sammanfaller stakade linjen med vägmitt. Stakade linjen beskrivs i horisontalplanet och i vertikalplanet oberoende av vart annat. En position längs stakade linjen beskrivs med en sektionskoordinat som entydigt bestämmer avståndet längs den stakade linjen från vägens startpunkt. I Figur 4 visas ett exempel där stöd infogats vid sektionskoordinat 10 och 37, dessa bestämmer entydigt en position längs stakade linjen.

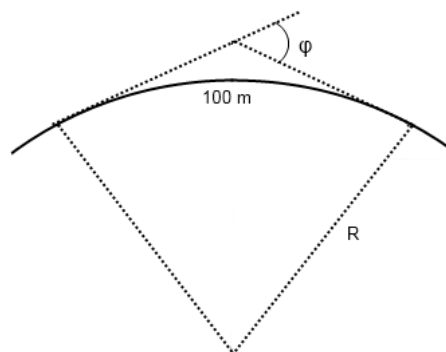


Figur 4. Sektionskoordinatsexempel

3.1.1.1 Horisontal linjeföring

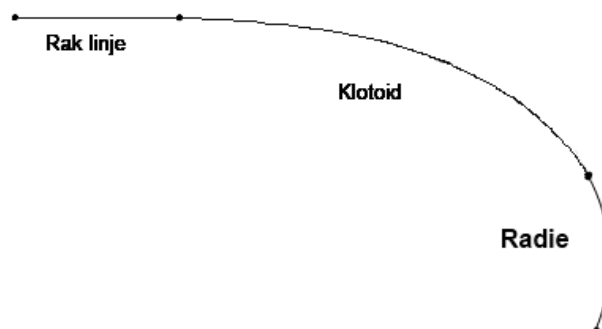
I horisontalplanet beskrivs den stakade linjen som en kombination av tre olika geometrier. Den första är en rak linje som definieras genom en start- och en slutpunkt. Den andra är ett cirkelsegment med en konstant radie. Den sista linjetypen kallas klotoid, vilken är en successiv övergång från rak väg till kurva med konstant radie (eller vice versa).

En sektion av den stakade linjen som antar formen av ett *cirkelsegment* (se Figur 5) definieras liksom den raka linjen med en start- och slutpunkt. Sektionen kan antingen beskrivas med en krökning eller konstant radie (Fwa 2006). Krökningen (φ) definieras som vinkeln mellan två tangenter med 100 m båglängd mellan varandras ursprung. I detta projekt har kurvor valts att endast definieras med hjälp av konstanta radier.



Figur 5. Cirkelsegment

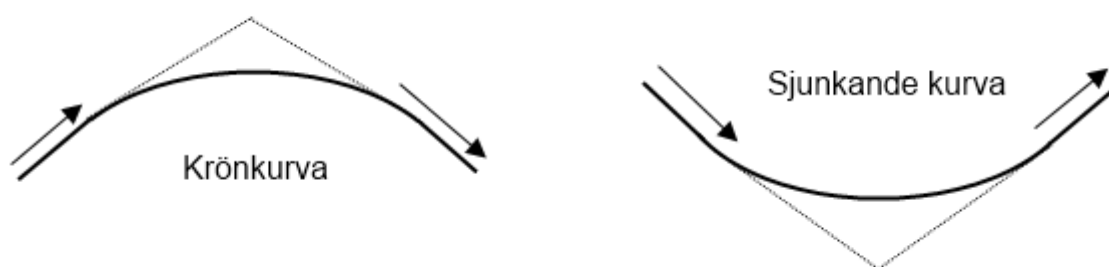
Klotoider är aningen mer komplicerad och används när en körvänlig övergång mellan linje och kurva önskas, se Figur 6. Klotoiden är en krökt linjeform som beskrivs av klotoidparametern som utgör förhållandet mellan den slutliga radien och längden längs klotoiden. För en mer ingående beskrivning av klotoiden se avsnitt 6.2.1.3 samt Appendix II:



Figur 6. Klotoid

3.1.1.2 Vertikal linjeföring

Vägens vertikala linjeföring kan antingen ha en linjär eller radiell förändring och visualiseras med hjälp av en profil som åskådliggör nivåskillnaderna längs sektionskoordinaten. En cirkulär förändring används vid en mjuk övergång mellan två linjära sektioner med olika lutningar. I detta projekt har den cirkulära höjdändringen valts att beskrivas med hjälp av en konstant radie. Den cirkulära höjdändringen kan antingen beskrivas som en krönkurva (eng. *crest curve*) eller en sjunkande kurva (eng. *sag curve*), vilket illustreras i Figur 7. Radien anpassas för att uppnå en så mjuk och säker körning som möjligt med avseende på bl.a. hastighet och sikt. Riktvärden för en vertikal höjdändring definieras oftast som en procentuell stigning över en viss sträcka. (O'Flaherty 1997)



Figur 7 Förklaring av krönkurva och sjunkande kurva

3.1.2 *Farbana*

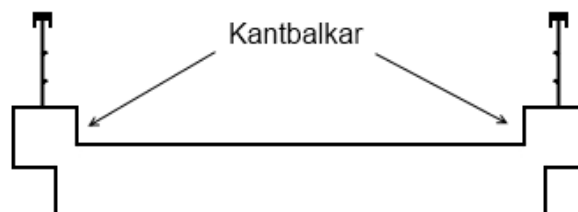
Utöver stakade linjen utgörs vägens beskrivning av en vägbredd på respektive sida av stakade linjen. Denna bredd beror av behovet av körfält och vägren. Brons spännvidder är avgörande för brodäckets utformning och bestäms ofta av terrängen som bron är avsedd att korsa. För att undvika att nederbörd blir kvar på brobanan brukar denna utformas med lutning. Denna rekommenderas till minst 1 % i både längs- och sidled. När detta fall sker åt två håll från stakade linjen sett benämns den bombering. Vid fall av farbanan åt samma håll, t.ex. i en kurva för att kompensera för centrifugalkraften benämns det skevning, se Figur 8 . På längre broar används många gånger en så kallad dilatationsfog som kan ta upp de temperaturrörelser som uppstår. (Vägverket 1996)



Figur 8. Bombering samt skevning

3.1.3 *Kantbalkar*

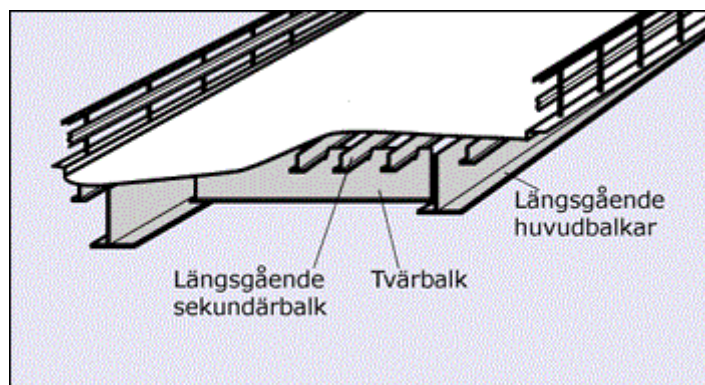
Broar har oftast två icke lastbärande kantbalkar som löper längst ut på bron i dess längsriktning, se Figur 9. Positionen relativt brodäcket är ofta aningen upphöjd vilket skapar en kant och hindrar vatten från att rinna över bron kanter. De används även för infästning av bronns sidoräcken. (Sundquist 2009)



Figur 9. Kantbalkar

3.1.4 *Bärande balkar*

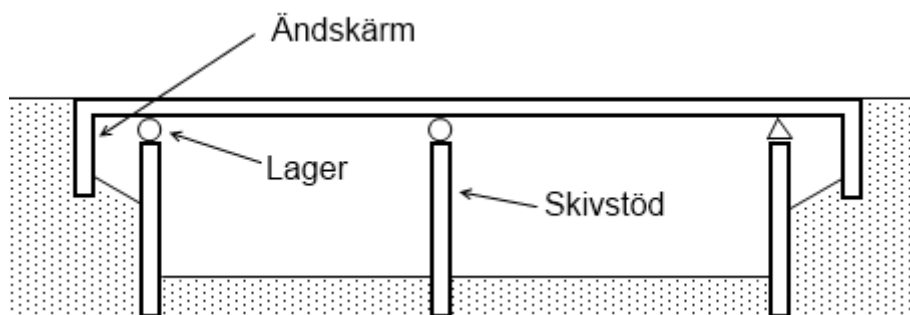
Det är vanligt att överbyggnaden använder sig av bärande balkar. Dessa brukar delas in i två typer: längsgående och tvärgående balkar (alternativt primär- och sekundärbalkar), se Figur 10. De tvärgående balkarnas syfte är att föra krafterna från farbanan vidare till de längsgående balkarna vilka i sin tur för vidare krafterna ner till underbyggnaden. Båda dessa typer behöver inte finnas samtidigt utan vissa broar använder sig endast av längsgående balkar.



Figur 10. Bärande balkar

3.1.5 Ändskärmar

För att undvika horisontellt tryck på skivstöd i form av bl.a. jordtryck väljer man i många fall att använda sig av så kallade *ändskärmar*. Dessa placeras utanför ändstöden och hängs in i broplattan. Genom förhöjt jordtryck kan ändskärmarna även ta upp stor del av bromskrafterna. Ändskärmarna underlättar även inspektionen av ändstöden och tillhörande lager, se Figur 11.



Figur 11. Ändskärm

Som komplement till ändskärmar används ibland *vingmurar* med syfte att förhindra ras som kan orsakas av höjdskillnader och på så sätt ge stabilitet åt bropåfarten. Vinkeln mellan ändskärm och vingmur samt lutningen på vingmurens övre kant bestäms utifrån jordens förutsättningar. Längden bestäms även utifrån dessa förutsättningar men brukar ur estetiskt perspektiv aldrig göras längre än bronns fria spännvidd eller dess totala bredd. (Vägverket 1996)

3.2 Underbyggnad

Underbyggnadens syfte är att föra vidare krafterna från överbyggnaden ner till grunden. Den kan bestå av olika typer av stöd som till exempel skivstöd, pyloner och pelare. Underbyggnadens delar och egenskaper beskrivs nedan.

3.2.1 Stöd

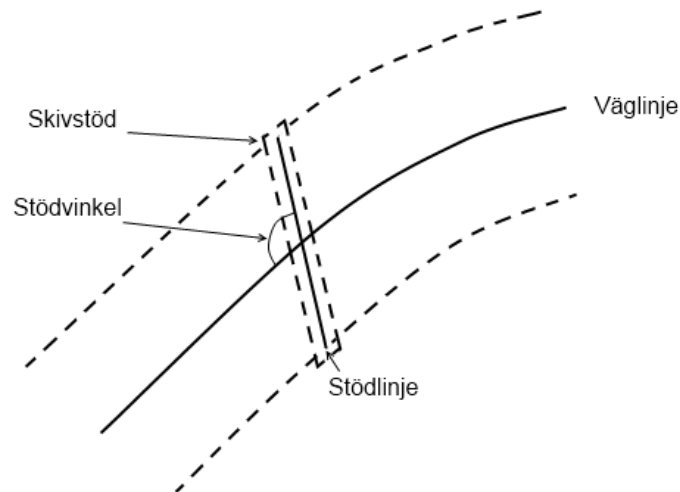
Under denna rubrik beskrivs de vanligaste stödtyperna för de broar som tidigare beskrivits, nämligen skivstöd och pelare.

En typ av brostöd är *skivstöd* vilka antingen är sammangjutna med överbyggnaden eller sammankopplat med lager, se Figur 11. Skivstödens utformning kan variera och vinkling i både det horisontella och vertikala planet kan förekomma. (Vägverket 1996)

Liksom skivstöden ska *pelarstöd* föra vidare laster från överbyggnaden ner till grunden. Dessa kan variera i utformning och ha vinklad positionering. De vanligaste tvärsnittstyperna är cirkulära och rektangulära. (Vägverket 1996)

Ibland kan sneda stöd vara önskvärda av både estetiska och tekniska skäl. Detta medför att det ofta behövs mycket extra armering för att kunna ta upp de krafter och moment som uppstår om däckets är fast inspänt i stödet. Detta brukar i slutändan ändå leda till att sneda stöd föredras framför rätvinkliga. Snedvinkliga stöd i det vertikala planet förekommer för rambroar och hjälper till att fördela de horisontella lasterna. (Vägverket 1996)

Vid planering och modellering av en väg används ofta stömlinjer vilka beskriver stödets tyngdpunktslinje, se Figur 12. I horisontalplanet kan en stödlinjes läge beskrivas med en sektionskoordinat längs stakade linjen samt en vinkel mot denna.



Figur 12. Stömlinje samt stödmur

3.2.2 Lager

Vid mötet mellan över- och underbyggnaden och då dessa ej är sammangjutna krävs olika typer av lager för att möjliggöra eller förhindra de rörelser som kan förekomma på bron. Överbyggnaden måste dock vara fastlåst i längsriktningen vid minst ett av stöden för att kunna ta upp de horisontella krafter som kan uppstå, exempelvis bromskrafter. Lagertyper kan delas upp på många olika sätt men ett sätt kan vara:

- Funktionssätt (exempelvis fasta respektive rörliga lager)
- Material (exempelvis stål, gummi etc.)
- Tillverkningsätt (exempelvis platsgjutna, prefabricerade etc.)

Lagertyper finns i väldigt många olika former och tillverkningsätt. Vid projektering av en bro i Sverige tillåter Trafikverket ett begränsat antal typer för att underlätta underhåll då det i många fall är lagren som är mest mottagliga för nedbrytning.

Vilka påtvingade rörelser som kan uppstå vid upplaget är ofta svåra att förutse och beror på allt från brons belastning och form till stödets utformning. Det kan därför vara svårt att veta i vilka riktningar som rörelser och rotationer ska tillåtas för att inte belasta bron med för stora tvångskrafter. Är det en relativt liten bro behövs oftast bara ta hänsyn till rörelser längs med bron och rotation kring brons stömlinjer. Om bron är bredare bör rörelser i den tvärgående riktningen beaktas. (Vägverket 1996) (Sundquist 2009)

3.3 Grundläggning

Vilken typ av grundläggning som blir aktuell för en bro beror på den geotekniska undersökningen samt vad den svenska bronormen anger. De vanligaste grundläggningsmetoderna i Sverige är:

- Platta på berg
- Platta på jord
- Platta på packad fyllning
- Pålade stöd

För att ge en stabil grund åt brostöden används i de flesta fall bottenplattor av betong. Dessa hjälper till att fördela brons egentyngd och övriga på bron verkande laster ner i marken.

Då broar ofta är till för att korsa svåra hinder i terrängen såsom vattenflöden kan detta innebära dåliga markförhållanden vilket i sin tur också betyder att svåra grundläggningsproblem måste lösas. En vanlig lösning då undergrundens bärighet är dålig är att stabilisera grunden med pålar.

Beroende på vilken grundläggningstyp som väljs blir stöden olika styva vilket måste beaktas vid dimensioneringen av bron. Att tänka på är även vilka sättningar som kan uppkomma beroende på vilken stödtyp som väljs. (Vägverket 1996) (Sundquist 2009)

4 Laster på broar

Detta examensarbete baseras på de europeiska beräkningsstandarderna vid namn Eurocode. Dessa används med nationella föreskrifter och råd som återfinns i TK Bro samt TR Bro. Utöver detta finns författningssamlingar utgivna av trafikverket som beskriver hur de europeiska beräkningsstandarderna skall tillämpas.

Den Eurokoddelen som behandlar lastdelen i detta projekt är SS-EN 1991 och brukar i vardagligt tal benämnas EC 1. Denna är indelad i SS EN 1991-1 (Laster på bärverk: Allmänna laster) och SS EN 1991-2 (Laster på bärverk: Trafiklast på broar). Hur dessa laster skall kombineras beskrivs i SS-EN 1990.

Ofta görs bara en analys av trafiklastens statiska inverkan. Den dynamiska effekten anses då vara inkluderad i trafiklastvärdena. Vid vissa tillfällen behövs även en dynamisk lastanalys för att beakta de svängningseffekter som kan uppstå. Om en sådan analys behövs avgörs av ett antal kriterier enligt EC1.

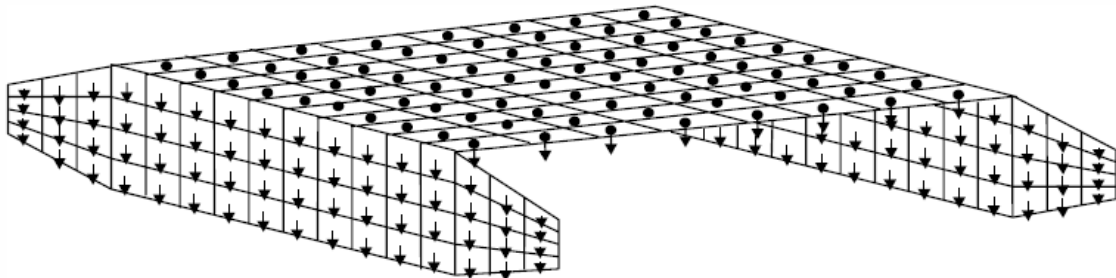
Ett stort antal laster skall beaktas vid dimensionering av broar och dessa brukar delas in i permanenta och variabla laster. De vanligaste lasterna beskrivs i detta avsnitt

4.1 Permanenta laster

Permanent laster är laster som alltid verkar på konstruktionen, och är konstanta i tiden.

4.1.1 Egentyngd

Egentyngden utgörs av över- och underbyggnadens gemensamma tyngd och är riktad i gravitationsriktningen vilket illustreras i Figur 13. Fyllningen på bottenplattan ska också räknas in som en del i brons egentyngd. Storleken på lasten beror på konstruktionsdelarnas volym samt materialets densitet. (TK Bro 2009)



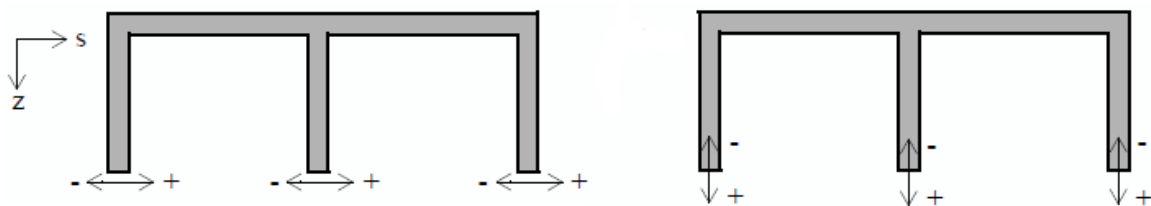
Figur 13. Egentyngd

4.1.2 Stödförskjutning

Vid dimensionering av broar är det viktigt att beakta de krafter som uppkommer då sättningen vid de olika stöden skiljer sig. Som regel dimensioneras bron även för stödförskjutningar i horisontalplanet, se Figur 14.

Vertikala förskjutningar uppkommer då brostöden får olika sättningar beroende på skiljande grundläggningsförhållanden samt om tjällyftning förekommer, dvs. förskjutningar kan både ske uppåt och nedåt. Om flera stödförskjutningar bidrar till en negativ effekt ska dessa kombineras för värsta fallet. Denna typ av förskjutning behöver oftast inte beaktas för ändstöden i en plattrambro.

Stödförskjutningar ger upphov till tvångsspänningar i brodäcket och varierar beroende på förskjutningarnas storlek och relation till övriga stöd. Konstruktionen skall alltid dimensioneras efter den mest ogynnsamma kombinationen i respektive plan, dock ej samtidigt. Vid vissa fall måste man beakta att ett stöd med stor utbredning får en ojämnt fördelad sättning. (TK Bro 2009) (TR Bro 2009)



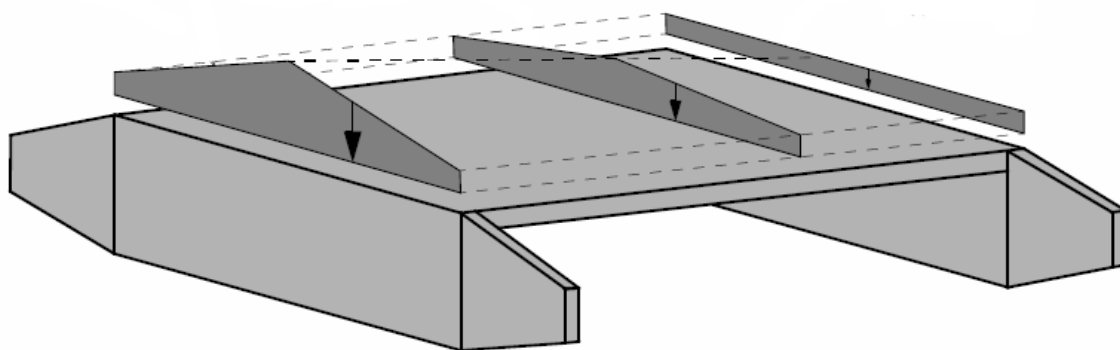
Figur 14. Stödförskjutning

4.1.3 Tyngd av beläggning

Beläggningen syftar på de material som utgör körbanan på bron och räknas som en utbredd last över hela brolängden. Tungheter för beläggning framgår från TK Bro. Lasten räknas som en utbredd last och verkar i gravitationsriktningen. (SS-EN 1991-1-1)

4.1.4 Tyngd av överfyllnad

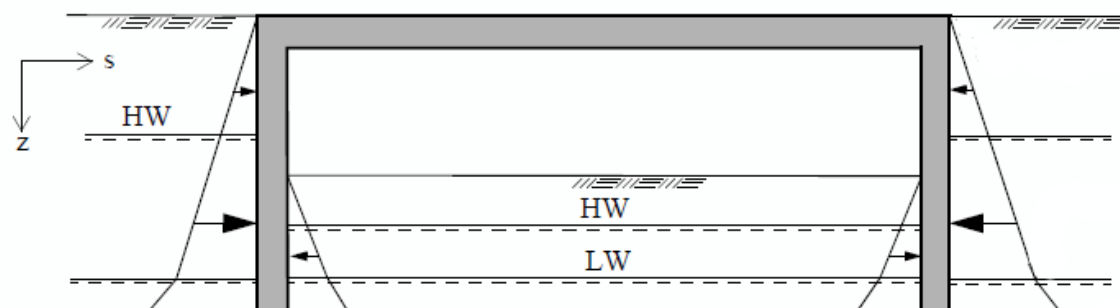
Överfyllnaden avser fyllnaden mellan körbanans beläggning samt brodäcket. Detta kan bestå av exempelvis grus för utjämning av höjdskillnader över bronns längd. Denna last är utbredd över bronns överbyggnad och då tjockleken av överfyllnaden kan variera kan också lasten variera, se Figur 15. Tungheten framgår av TK Geo. (TK Bro 2009)



Figur 15. Tyngd av överfyllnad

4.1.5 Jordtryckslast

Jordtrycket är det tryck som stöd, ändskärmar och vingmurar utsätts för på grund av jordens tunghet. Denna last verkar horisontellt på respektive konstruktionsdel och ökar med djupet. Grundvattnets högsta och lägsta nivå samt jordens tunghet inverkar på lastens storlek och ska bestämmas enligt TK Geo, se Figur 16. Det permanenta jordtryck som broar dimensioneras för motsvarar vilojordtrycket mot konstruktionen. Ökat jordtryck på grund av bromskrafter, konstruktionsrörelser, temperaturer och väglast behandlas i egna delmoment. (TK Bro 2009)



Figur 16. Jordtryck

4.1.6 Krympning

Betongens krympning till följd av härdningsprocessen ska beaktas för statiskt obestämda konstruktioner samt då en konstruktion gjuts under flera olika tidpunkter eftersom denna typ av last ger upphov till extra spänningar i konstruktionen. Vid dessa beräkningar ska, enligt Eurocode, den relativa fuktigheten i betongen antas vara 80 %. (TK Bro 2009)

4.1.7 Inverkan av förspänning

För broar som konstrueras med förspänning ska även spänningsökningen till följd av detta beaktas. Förspänningen ger upphov till normalkraft samt moment i konstruktionsdelen. Spännkraften kommer minska initiiellt till följd av friktion mot foderrör samt vid förankringen av spännkabeln i konstruktionsdelen. Med tiden kommer även en minskning av lasten att uppstå vilken beror på betongens krympning, krypning och relaxationen i spännkabeln. Det är fördelaktigt att använda sig av förspänning i ett brodäck framförallt då det minskar armeringsbehovet men också då det möjliggör längre spännvidder. På så sätt kan man spara in tjockleken på konstruktionsdelen vilket i sin tur leder till ett mindre moment från egentygden och även minskning av sprickbildning. (Sundquist och Silfwerband 2009)

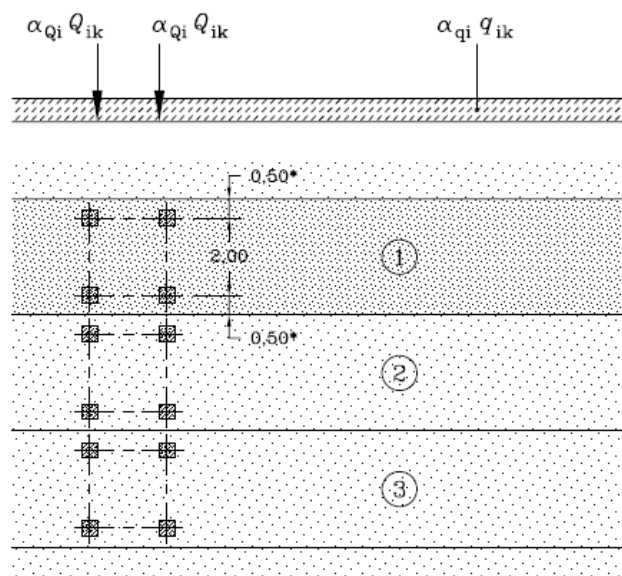
4.2 Variabla laster

Variabla laster är de laster som där storlek och intensitet kan ändras med tiden.

4.2.1 Trafiklaster

Det som gör brokonstruktioner så speciella är rörliga trafiklaster. Då trafiken har oändligt många tänkbara lastplaceringar gör detta dimensioneringsgången komplicerad och tidskrävande. För att underlätta arbetsgången vid dimensionering med trafiklaster är dessa generaliserade och förenklade enligt normer som skall representera hela Europa. Viktigt att ha i åtanke vid hantering av lasterna är att dessa inte beskriver verkliga laster utan endast representerar effekterna av dessa.

Beroende på vilka effekter som skall beaktas delas vägtrafiklaster upp i fyra lastmodeller som beskriver effekter av olika belastningstyper. Dessa lastmodeller anger värden och placering för punktlaster, ytlaster och lasttytor. Exempel på detta kan ses i Figur 17 som visar lastplacering och lasttytor för lastmodell 1.



Figur 17. Lastmodell 1 enl. Eurokod

Läge	Boggisystem	Utbredd last
	Axellast Q_{ik} (kN)	q_{ik} (eller q_{rk}) (kN/m ²)
Lastfält nummer 1	300	9
Lastfält nummer 2	200	2,5
Lastfält nummer 3	100	2,5
Övriga lastfält	0	2,5
Återstående yta (q_{rk})	0	2,5

Tabell 1. Laster för lastmodell 1 enl. Eurokod

Lastmodell 1 beskriver effekterna av trafik med last- och personbilar och används vid globala samt lokala beräkningar. Den andra lastmodellen behandlar enstaka axellaster verkande på hjulkontakttytor och bör beaktas på konstruktioner med små spännvidder. Lastmodell 3 används då effekter från specialfordon ska beaktas och kan användas för både lokala och globala beräkningar. För globala beräkningar av folkmassor används lastmodell 4. Dessa lastmodeller kan kompletteras med lastmodell 5 baserat på utmattningslaster, som endast gäller för vägbroar. För järnvägsbroar finns flertal lastmodeller som skall beaktas.

För att veta hur och var lasterna ska placeras i tvärled delas den körbara ytan upp i olika lastfält. Enligt normerna finns det tre olika typer av lastfält samt en övrig yta och dessa beskriver lasternas värde samt placering på körbanan. Lastfältens placering och storlek beror på körbanans totala bredd och utseende. För lastmodell 1 definieras de enligt Tabell 2 vilken även återfinns i SS-EN 1991-2 kapitel 7, tabell 4.1.

Tabell 4.1 – Antal lastfält och deras bredd

Körbanebredd w	Antal lastfält	Bredd på ett lastfält w_l	Återstående ytans bredd
$w < 5,4$ m	$n_1 = 1$	3 m	$w - 3$ m
$5,4 \text{ m} \leq w < 6$ m	$n_1 = 2$	$\frac{w}{2}$	0
$6 \text{ m} \leq w$	$n_1 = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right)$	3 m	$w - 3 \times n_1$
ANM Exempel. För en körbana med bredden lika med 11m, $n_1 = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right) = 3$, och den återstående ytans bredd blir $11 - 3 \times 3 = 2$ m.			

Tabell 2. Lastfältsbredd enl. Eurokod

Lastfältens numrering beror på var den ogynnsammaste effekten uppstår, där placeras lastfält nr 1 och därefter följer numreringen med minskande lastpåverkan. Antal lastfält beror på hur många som får plats inom körbanan. Om till exempel körbanans bredd är 7 m delas denna upp i tre lastfält varav två av dessa har bredden 3 m och namnges 1 respektive 2. Den återstående ytan är 1 m och namnges "återstående yta".

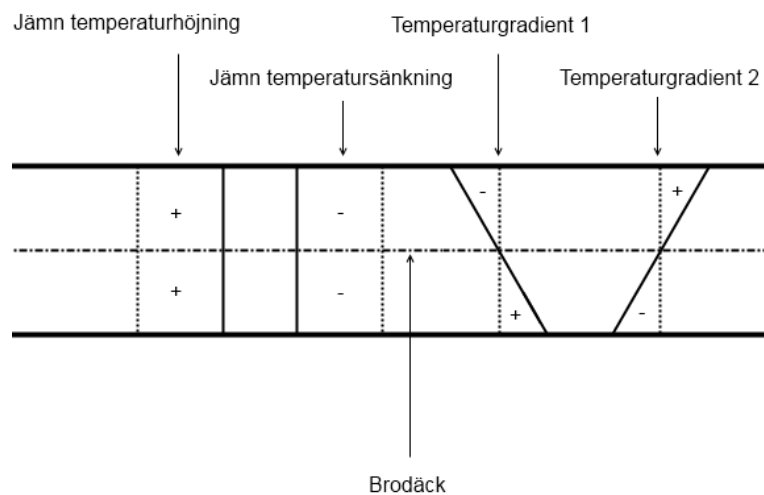
I Eurokod finns för varje lastmodell både axellaster och utbredda laster definierade med både placering och storlek för de olika lastfälten, laster för lastmodell 1 kan åskådliggöras i Tabell 1. Dessa har olika värden och koefficienter beroende på vilken väglklass bron tillhör. I vissa fall räcker inte en statisk analys för att ta hänsyn till de dynamiska effekter som uppstår vid rörlig trafik. I Eurokod anges vilka krav som ska vara uppfyllda för att en dynamisk analys ska kunna negligeras. Den statistiska analysen anses då vara tillräcklig och de dynamiska effekterna som finns beaktade i trafiklastvärdena tillfredsställande.

Beroende på vilken lastmodell som används ges olika storlekar och utbredning på punktlaster och utbredda laster. Dessa placeras sedan så att värsta fallet av den sökta snittkraften i en betraktad punkt uppnås. (Sundquist 2009) (SS-EN 1991-2)

4.2.2 *Temperaturlast*

Då temperaturen i konstruktionen sjunker eller ökar medför det att materialen i konstruktioner krymper eller utvidgas. När rörelser i brokonstruktionen är förhindrade innebär detta att tvångskrafter uppstår då temperaturändringar sker.

Det finns två typer av temperaturlaster där den första beskriver temperaturvariationen över året. Denna temperaturlast ger en jämn temperaturprofil över hela brodäckets tvärsnitt. Den andra typen behandlar en temperaturgradient över brodäcket, vilken kan åstadkommas till exempel genom stark solstrålning på ovensidan samtidigt som en kallare undersida förekommer. Denna temperaturskillnad ger upphov till en krökning av brodäckstvårsnittet. Dessa två typer ger upphov till fyra olika lastfall med både negativa och positiva spänningar vilka kan ses i Figur 18. (SS-EN 1991-1-5)



Figur 18. Temperturspänningar

4.2.3 *Broms- och Accelerationslast*

Accelerationslaster förs från trafiken ned till underbyggnaden genom brodäcket när trafikens hastighet ökar eller minskar. Denna last ger en horisontal belastning på brobanan i broms längsriktning. Lasten anges med ett högsta värde som en punktlast verkande på beläggningens ovensida. Bromslast från trafiken beaktas på samma sätt och med samma värden som accelerationslasten fast med motsatt riktning. (SS EN 1991-2)

4.2.4 *Sidokraft*

Detta lastfall beaktar sned inbromsning och verkar i brons tvärled med storleken 25 % av den totala bromslasten. (SS EN 1991-2)

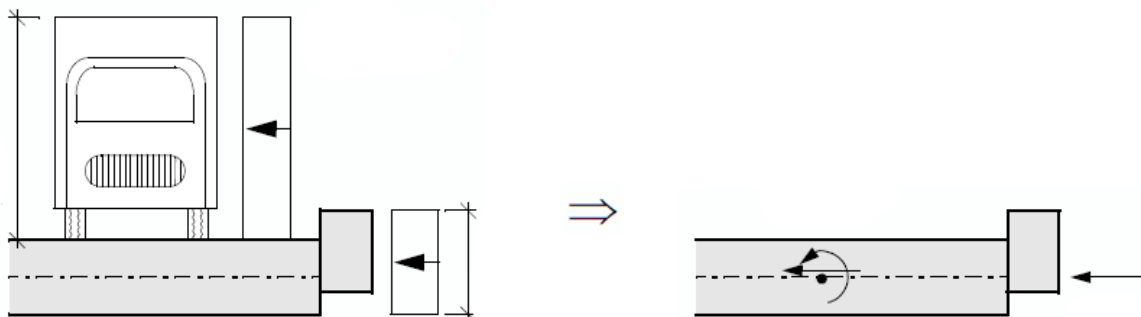
4.2.5 Centrifugalkraft

Centrifugalkraften måste beaktas på svängda broar och verkar utåt i kurvan, tvärs broriktningen. Denna kraft behandlas med ett karakteristiskt värde vilket tar hänsyn till de dynamiska effekter och verkar i nivå med belägningens överyta. (SS EN 1991-2)

4.2.6 Vindlast

Vindlasten kan delas upp i två delar vilka är vindlast på trafiken på bron samt vindlast på själva konstruktionen. Vindlasten som belastar konstruktionen antas som en jämnt utbredd last som verkar tvärs brobanan. Denna kan läggas på båda sidor av bron beroende på vilket fall som ger värst effekter.

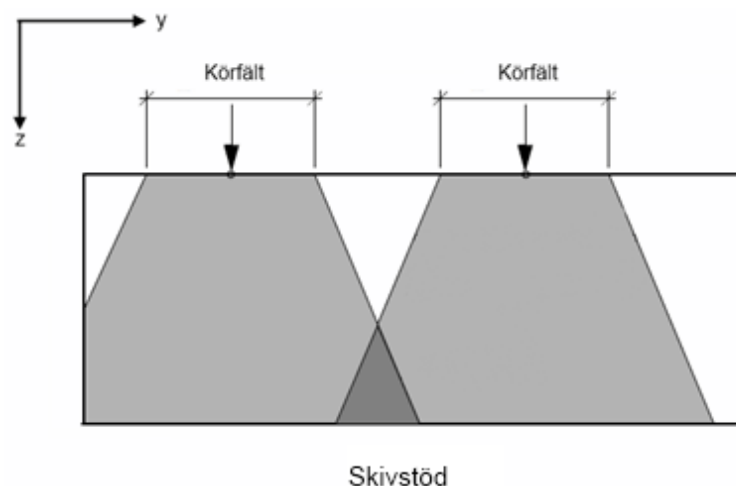
Vindlasten som verkar på trafiken förs genom hjulen ned till brodäcket vilket medför att ett moment måste beaktas på grund av excentriciteten. Även denna kan verka från båda sidor, dock inte på samma gång. Dessa båda vindlaster brukar förenklas från ytlaster och tillhörande höjder till linjelaster längs bronns riktning, se Figur 19. (Scanscot Technology 2005)



Figur 19. Vindlast

4.2.7 Överlast

Överlast beskriver det ökade horisontella jordtrycket som uppstår då trafiklasten vertikalt belastar vägbanken intill ett ändstöd. Stödtyper som skall beaktas för denna last är ändskärmar samt stödmurar i anslutning till bropåfarten. Det ökade jordtryck som uppstår är beroende av trafiklastens storlek, antal körfält samt dess bredd. Detta åskådliggörs i Figur 20. (Scanscot Technology 2005)



Figur 20. Överlast

4.2.8 Is- och strömlast

Denna last skall beaktas om något av stöden står i vatten och betraktas som en horisontal last. Den beskriver ett ökat tryck på stöden vilket orsakas av strömmar, vågor och flytande is. Även en vertikal last i stödets längdriktning beaktas och motsvarar den lastökning som sker vid fastfrusen is. (TK Bro 2009)

4.2.9 Exceptionella laster

Brokonstruktionen skall dimensioneras för eventuella olyckslaster och dimensioneras endast för en olyckslast åt gången. Några exempel på olyckslaster som beaktas är påkörningskrafter och påseglingskrafter. För broar kan påkörningslasten verka på både pelare och brobana beroende på brons utformning och position i landskapet. Karakteristiska värden för dessa laster återfinns i TK Bro och EC1. (TK Bro 2009)

4.3 Lastkombinering

Alla laster på konstruktionen verkar inte samtidigt. Därför används lastkombinationer för att ta hänsyn till lasternas interaktion med varandra. I dessa kombinationer används partialkoefficienter för att begränsa eller förstora lasternas inverkan beroende på vilken kombination som åsyftas. Dessa lastkombinationer beaktar olika skeenden i byggprocessen och har olika koefficienter beroende på vad som skall kontrolleras. Lastkombinationerna återfinns i SS EN 1990 och kombineras för broar med lastgrupper för trafiklast som hittas i SS EN 1991-2. (Sundquist 2009) (SS-EN 1991-2) (SS-EN 1990) (VVFS Vägverket 2009)

5 Metodbeskrivning

Nedan beskrivs den metod som utvecklats för att vid implementering i ett generellt program skall möjliggöra en parametriserad modellering av brokonstruktioner. Den resulterande modellen skall vara definierad på ett sätt att den är fullt modifierbar med de metoder och verktyg som tillgängliga i de generella programmen. Detta medför att fördelarna från både specialprogram och generella program kan utnyttjas, dvs. en snabb och enkel modellering samt möjligheten till omfattande modifierade utvecklingar av denna.

För att möjliggöra kombinationen av parametriserad modellering och en generell modifiering byggs den geometriska modellen upp av olika typer av punkter i rummet som binds samman med linjer och ytor vilka tillsammans skapar geometrin. Exempel på detta kan vara att ett skivstöd skapas med fyra hörnpunkter varemellan linjer dras och en yta kan genereras. Kombinationen medför att punkter i efterhand kan flyttas och geometriformerna ändras.

Som tidigare nämnt i rapporten är det väglinjen som ofta styr vägens utformning och därför även bronns utformning. Metoden använder därför sig av väglinjen som referens vid skapandet och placandet av de olika konstruktionsdelarna. Deras position beskrivs på så sätt genom en sektionskoordinat.

När väglinjen skall modelleras sker detta med tre typer av huvudpunkter som tillsammans definierar vägens linjeföring. De punkter som beskriver väglinjens utformning i horisontalplanet benämns *masterpunkter*. Punkterna som bestämmer väglinjens höjdändring i det vertikala planet benämns *höjdpunkter*. Den sista punkttypen är *breddpunkt* vilken definierar farbanans bredd och lutning. Mer om dessa punkttyper under nästa stycke.

5.1 Arbetsgång

För att metoden ska lyckas utnyttja fördelarna från specialprogrammen, dvs. låta användaren uppföra en bromodell utifrån parametrar, används en speciell arbetsgång. Arbetsgången är tänkt att successivt bygga upp en bromodell utifrån de indata som samlas från användaren. Insamlingen sker i form av ett användargränssnitt som består av ett antal dialogrutor där varje dialog representerar ett delmoment i uppbyggnaden.

De olika dialogrutorna kommer att beskrivas under respektive rubrik och ligger inlagda i den ordning som de har i användargränssnittet. Varje beskrivning har en tillhörande

tabell som listar den sökta indatan. Eftersom metoden ska implementeras i ett engelskspråkigt program benämns dialogrutornas parametrar med engelska termer.

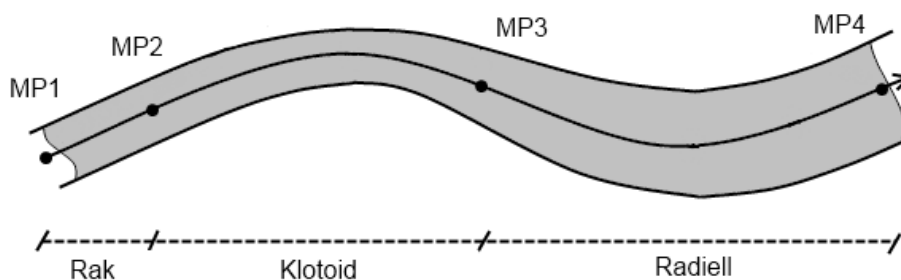
5.1.1 Horisontell linjeföring

I den första dialogen kan användaren lägga till de punkter som används för att definiera formen av den stakade linjen, de så kallade *masterpunkterna*. Utifrån dessa punkter modelleras sedan den stakade linjen i horisontalplanet. De tre linjetyperna som finns att tillgå är rak, konstant radie samt klotoid. För varje punkt som definieras gäller dess egenskaper till närmsta masterpunkt med högre sektionskoordinat. Detta visas i Figur 21 där MP1 anger en rak linje, denna följs tills nästa masterpunkt nås (MP2). Här byter linjetypen till klotoid som fortsätter till nästa masterpunkt osv. De indata som krävs för att beskriva väglinjen visas i Tabell 3:

Input	Unit or alternatives
Section Coordinate:	<i>m</i>
X - Coordinate:	<i>m</i>
Y - Coordinate:	<i>m</i>
Radius:	<i>m</i>
Clothoid Type:	<i>Forward / Backward</i>
Clothoid Parameter:	<i>None</i>

Tabell 3. Horizontal alignment

En negativ radie innebär en vänstersväng då man färdas i riktning mot stigande sektionskoordinat och inget värde på radien innebär en rak linje. Samma sak gäller för klotoidparametern som beskriver hur skarpt klotoiden skall svänga. Klotoidtypen "forward" hänvisar till en klotoid som övergår från en linje till en radie och typen "backward" vice versa. Minst två punkter måste anges och samlas i en lista där varje punkt sedan är redigerbar.



Figur 21. Punktuppbyggd väglinje

5.1.2 Vertikal linjeföring

I den andra dialogen definieras den stakade linjen genom att föreskriva höjder till sektionskoordinater, så kallade *höjdpunkter*. Också denna dialog använder sig av en liknande punktlista med samma redigeringsmöjligheter som den föregående. Indatan som söks visas i Tabell 4

Input	Unit or alternative
Section Coordinate:	<i>m</i>
Level:	<i>m</i>
Radius:	<i>m</i>

Tabell 4. Vertical alignment

En positiv radie anger i detta fall att vägen följer en kulle i landskapet, så kallad krönkurva. Anges ingen radie blir höjddändringen linjär. Minst en uppsättning data måste användas för att placera stakade linjen i rummet.

5.1.3 Bredd och lutning

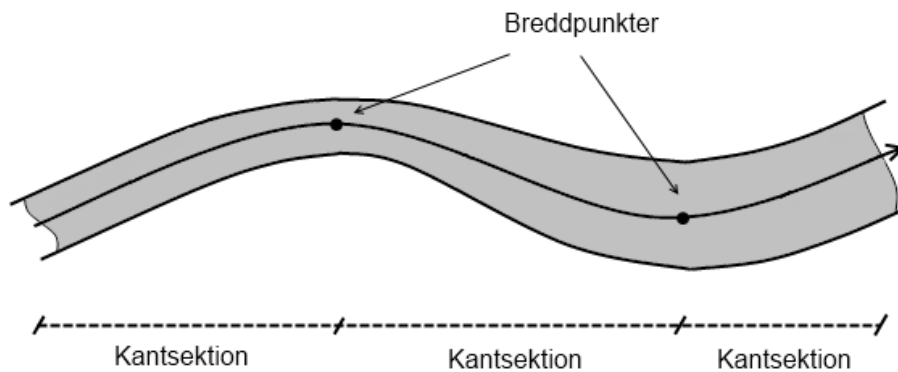
Tredje dialogrutan låter användaren definiera vägens bredd samt lutning i en given sektionskoordinat och det blir dessa *breddpunkter* som lägger grund för vägens tväregenskaper. Minst en punkt måste läggas in under denna rubrik och indata som söks visas i Tabell 5.

Input	Unit or alternative
Section Coordinate:	<i>m</i>
Left Width:	<i>m</i>
Left Banking:	%
Right Width:	<i>m</i>
Right Banking:	%

Tabell 5. Width and banking

Breddpunkterna definierar bredd och lutning på farbanan i olika snitt längs väglinjen. Som visas i Figur 22 delar breddpunkterna in väglinjen i *kantsektioner* där bredd- och lutningsegenskaperna är konstanta. Då inga egenskaper är definierade före den första

och efter den andra breddpunkten i Figur 22, ärvs egenskaperna från närmsta breddpunkt. Mellan de två breddpunkterna sker en linjär interpolering av bredd och lutning med hjälp av sektionskoordinaten, om egenskaperna i de olika snitten skiljer sig åt.



Figur 22. Breddpunkter

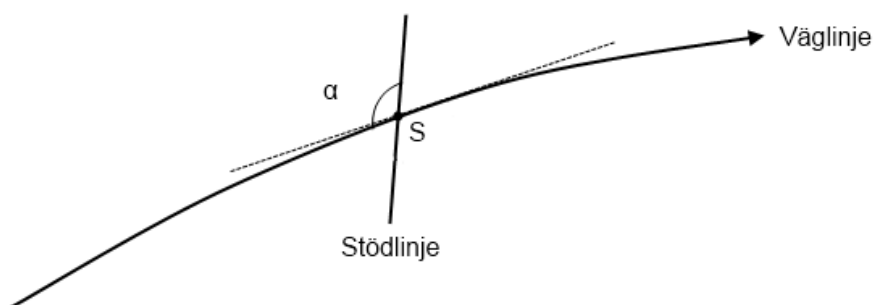
5.1.4 Stömlinjer

I den fjärde dialogrutan definieras var längs den stakade linjen som användaren vill skapa stöd. Stömlinjen definieras med en sektionskoordinat samt önskad vinkel mellan stömlinjen och stakade linjen. Minst två stömlinjer måste anges. Mellan de skapta stömlinjerna modelleras ett brodäck med egenskaper utifrån de tidigare dialogrutorna. Sökt indata åskådliggörs i Tabell 6.

Input	Unit or alternative
Section Coordinate:	<i>m</i>
Angle:	<i>gon</i>

Tabell 6. Support lines

Horisontala stödvinkeln (α) anges i gon och räknas medsols från lägre sektionskoordinat, se Figur 23.



Figur 23. Stödvinkel

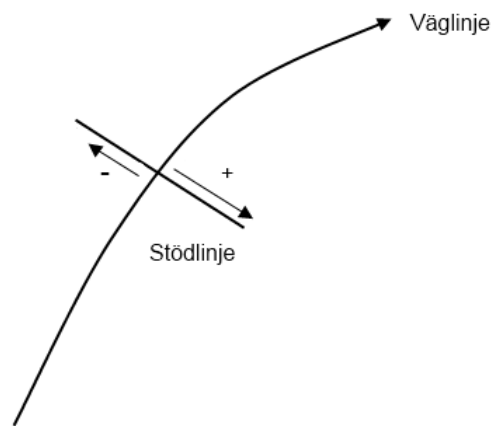
5.1.5 Stöd

I denna dialogruta skall användaren för varje stömlinje ange vilken typ av stöd som önskas. De möjliga stödtyperna är skivstöd, ändskärmar samt pelare, där flera pelare kan placeras på samma stömlinje. De indata som krävs visas i Tabell 7.

Input	Unit or alternative
Type:	<i>Abutment/Column/End shield</i>
Width Placement:	<i>m</i>
Lower Elevation Coordinate:	<i>m</i>

Tabell 7. Supports

Placeringen i sidled (width placement) för pelaren kan anges med negativt värde vilket motsvarar en placering på vänster sida om stakade linjen sett i sektionskoordinatens riktning. Positivt värde anger en högerplacering, se Figur 24.



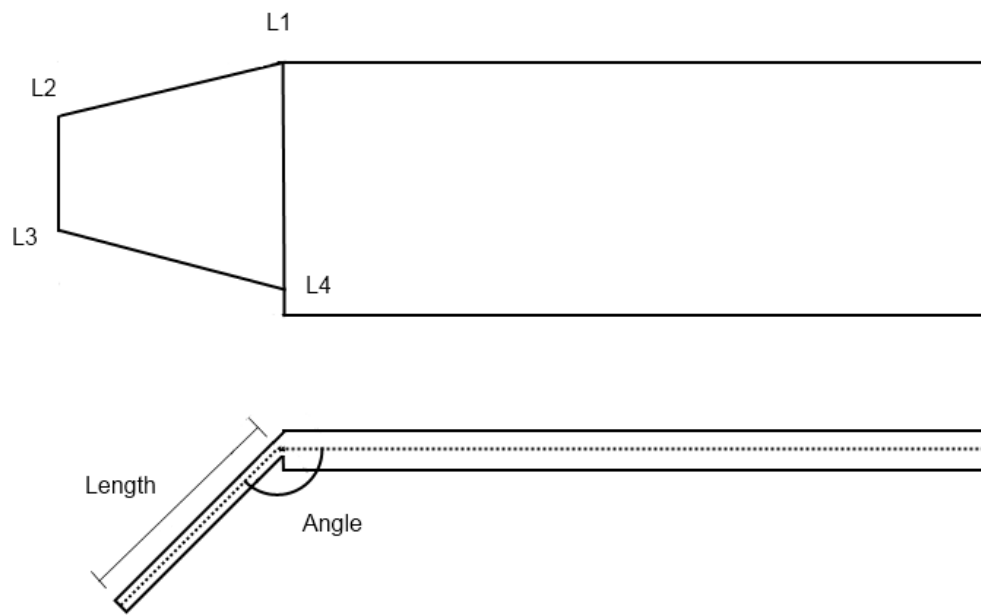
Figur 24. Width placement

5.1.6 Vingmurar

I denna dialog definieras vingmurarna genom sex parametrar som beskriver dess utseende. Om inga vingmurar önskas lämnas dessa dialogrutor tomma. Vingmurarna definieras genom fyra höjdmått, en längd och en vinkel som representerar horisontalvinkeln mellan ändskärmen och vingmurens centrumlinjer, se Figur 25. Indata visas nedan i Tabell 8.

Input	Unit or alternative
L1:	<i>m</i>
L2:	<i>m</i>
L3:	<i>m</i>
L4:	<i>m</i>
Length:	<i>m</i>
Angle:	<i>gon</i>

Tabell 8. Wing Walls

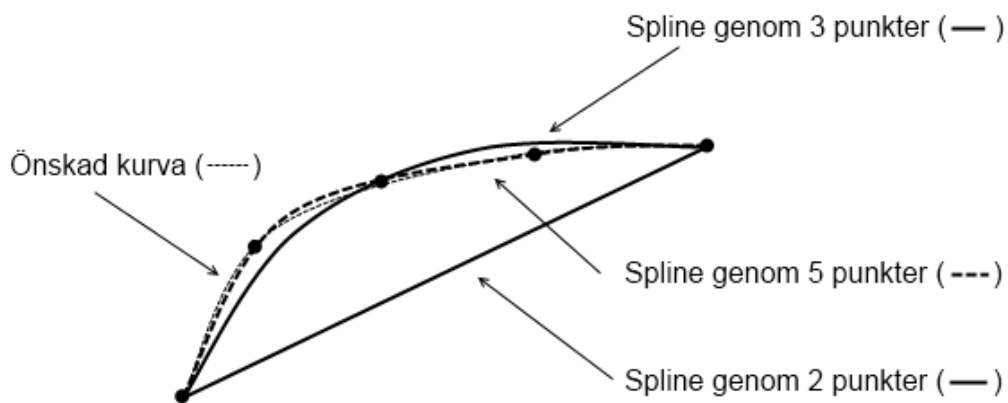


Figur 25. Vingmursparametrar

6 Implementering

För att verifiera att metoden fungerar implementeras den i det generella programmet BRIGADE/Plus i form av ett skript som i rapporten refereras till som *programkoden*. Programkoden syftar till att successivt bygga upp en bro baserat på den av användaren angivna indatan. Efter implementeringen kommer den skapta modellen vara möjlig att modifiera med samtliga verktyg som finns att tillgå i de generella programmen. Viktigt att notera är att implementeringen i BRIGADE/Plus görs som ett exempel eftersom metoden är framtagen för att fungera även i andra program.

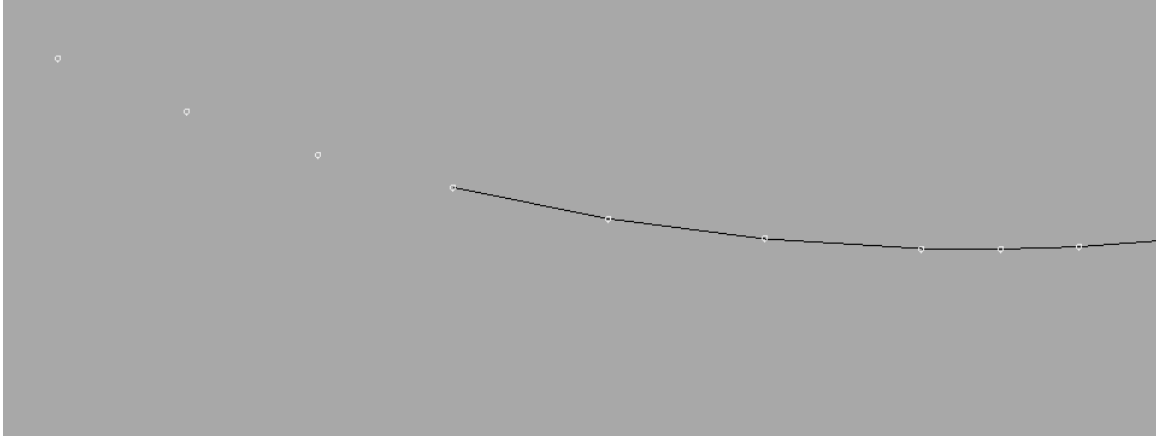
I BRIGADE/Plus används så kallade datumpunkter (datum points) i rymden som hjälpmedel för att skapa geometrier. I återstående delen av rapporten då "punkter" nämns syftar dessa till datumpunkter. Dessa kan sammanbindas med kurvlinjer (splines) för att illustrera den önskade geometrin, se Figur 27. Denna kurvlinje anpassar sin form efter de punkter som den är sammanbunden med. Detta betyder till exempel att om kurvlinjen passerar endast genom två punkter får den formen av en rak linje mellan dessa. Skulle den däremot passera genom tre punkter som inte ligger i linje får den formen av en kurva. Ju fler punkter som linjen passerar desto större kontroll ges därför över dess utformning, se Figur 26.



Figur 26. Splines punktanpassning

Vid skapandet av ett kurvformat väglinjesegment genereras därför ett flertal punkter längs den tänkta linjen för att få en så noggrann och mjuk linje som möjligt. Dessa punkter väljs att benämnas *slavpunkter*. Hur många punkter som används för varje linjesegment bestäms av en parameter som kallas *punktparameter*. Ju större värde punktparametern får desto noggrannare blir modellen men det ökar även generationstiden då detta kräver fler uträkningar och kontroller i programmet.

Generering av olika modeller och geometrier har gjorts och resulterat i att ett tillräcklig värde på punktparametern bör ligga mellan 5 och 10. Användaren ges möjlighet att ändra denna efter behov.



Figur 27. Datumpunkter och kurvlinje

6.1 Väglinjen

Som tidigare nämnt används väglinjen (stakade linjen) och sektionskoordinaten som referens för skapandet av övriga konstruktionsdelar, denna linje utgör dock ingen del av strukturmodellen.

6.1.1 Horisontell linjeföring

Användaren har tre olika linjetyper till sitt förfogande för att beskriva väglinjen, dessa är raklinje, radiellt cirkelsegment samt klotoid. Dessa beskrivs med hjälp av sex variabler: sektionskoordinat, radie, klotoidparameter, klotoidtyp samt x- och y-koordinat. En väglinje måste beskrivas med minst två punkter innan denna kan visualiseras med programkoden.

Eftersom sektionskoordinaten ej anger en riktning kan denna inte anta ett negativt värde utan väglinjens riktning avgörs istället av nästa punkts placering i det horisontella planet. Vägföringens utformning avgörs sedan som en kombination av de övriga variablerna. När den stakade linjen är skapad placeras brodäckets geometriska tyngdpunktslinje med ett specifikt vertikalt avstånd från denna. Avståndets storlek representerar den totala tjockleken av överfyllnaden och beläggningen samt halva broplattans tjocklek (förutsatt att broplattan har sin tyngdpunkt i halva tjockleken). Detta betyder att väglinjen ligger i farbanans överkant och skalytorna i broplattans tyngdpunkt.

6.1.1.1 Raklinje

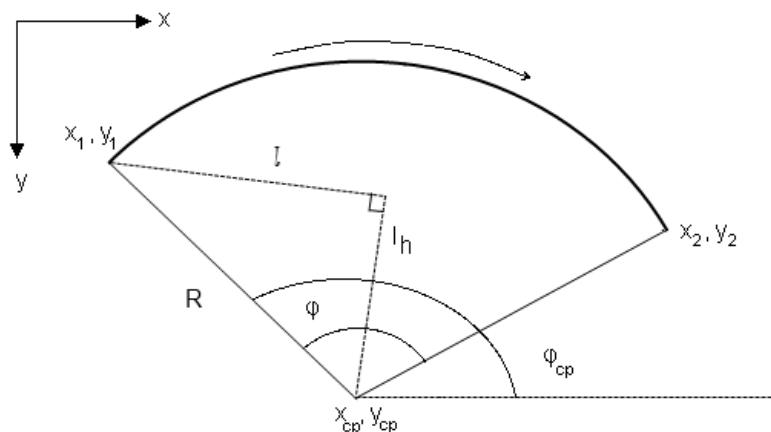
Om radien och klotoidparametern föreskrivs med värde noll blir linjeföringen rak och visas som en rak linje mellan de två angivna masterpunkterna i det horisontella planet. Om ingen höjdförändring med radieform sker på den raka linjen används inte heller några slavpunkter. I de fallen då en punkt (slavpunkt, höjdpunkt eller breddpunkt) ska infogas på en rak linje används interpolering med hänsyn till den infogade punktens sektionskoordinat (S_{sp}) relativt de två masterpunkterna (x_1, y_1, S_1, x_2, y_2 och S_2). Interpolering för den nya punktens x- och y-koordinater sker på följande sätt:

$$\Delta x = \frac{x_2 - x_1}{S_2 - S_1} \quad \Delta y = \frac{y_2 - y_1}{S_2 - S_1}$$

$$x_{sp} = x_1 + \Delta x * (S_{sp} - S_1) \quad y_{sp} = y_1 + \Delta y * (S_{sp} - S_1)$$

6.1.1.2 Radie

Om den av användaren givna indatan saknar klotoidtyp men har ett värde för radien får väglinjen formen av ett cirkelsegment med konstant radie. För att lyckas modellera cirkelns form krävs, utöver de två kända masterpunkterna, även ett antal slavpunkter (se Figur 29). Hur många avgörs som tidigare nämnt av punktparametern, ju fler slavpunkter desto noggrannare geometri. Efter beräkning av slavpunkternas koordinater representeras dessa av datumpunkter som därefter binds samman med en spline. Vid framtagandet av slavpunkters position beräknas centrumunkten för cirkelsegmentet utifrån de två masterpunkternas koordinater (x_1, y_1, x_2 och y_2) samt radien R .



Figur 28. Cirkelsegment orientering

Centrumunkten (x_{cp} och y_{cp}) räknas fram enligt följande. Först beräknas sträckorna l och l_h med Pythagoras sats.

$$l = \sqrt{\left(\frac{x_2 - x_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{y_2 - y_1}{2}\right)^2}$$

$$l_h = \sqrt{R^2 - l^2}$$

Med dessa variabler kan även vinkelförhållandena a_x och a_y beräknas.

$$a_x = \frac{x_2 - x_1}{2 * l} \quad a_y = \frac{y_2 - y_1}{2 * l}$$

Slutligen beräknas centrumpunktens x- och y-koordinater.

$$x_{cp} = \frac{x_2 + x_1}{2} - a_y * l_h \quad y_{cp} = \frac{y_2 + y_1}{2} + a_x * l_h$$

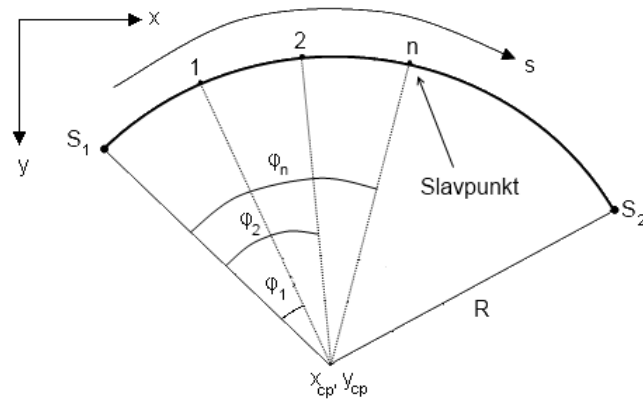
När centrumpunkten är beräknad blir nästa steg att räkna ut varje slavpunkts placering i horisontalplanet. För att kunna göra detta måste cirkelsegmentets vridning i planet beaktas genom beräkningen av translationsvinkeln (φ_{cp}) mellan vektorn från centrumpunkten (x_{cp}, y_{cp}) till cirkelsegmentets första masterpunkt (x_1, y_1) och x-axeln.

φ_{cp} är beroende av första masterpunktens placering jämfört med centrumpunktens placering och beräkningen av denna vinkel ser därför olika ut. Formler och förutsättningar för beräkning av translationsvinkeln visas i Tabell 11 i Appendix I.

För att skilja mellan de olika slavpunkternas positionering längs med cirkelsegmentet används vinkeländringen (φ) mellan den första masterpunkten och den sökta slavpunkten. Vinkeln beror på slavpunktens sektionskoordinat (S_n), punktparametern (∂) samt vilket nummer i ordningen (n) som slavpunkten har, se Figur 29. φ beräknas enligt följande ekvationer:

$$S_n = \frac{S_2 - S_1}{\partial} * n$$

$$\varphi_n = \frac{S_n}{2\pi * R} * 2\pi = \frac{S_n}{R}$$



Figur 29. Slavpunkter

Med hjälp av de framtagna vinklarna kan nu slavpunktens koordinater (x_{sp} och y_{sp}) beräknas enligt följande formler:

$$y_{sp} = y_{cp} + R * \sin(\varphi_{cp} + \varphi)$$

$$x_{sp} = x_{cp} + R * \cos(\varphi_{cp} + \varphi)$$

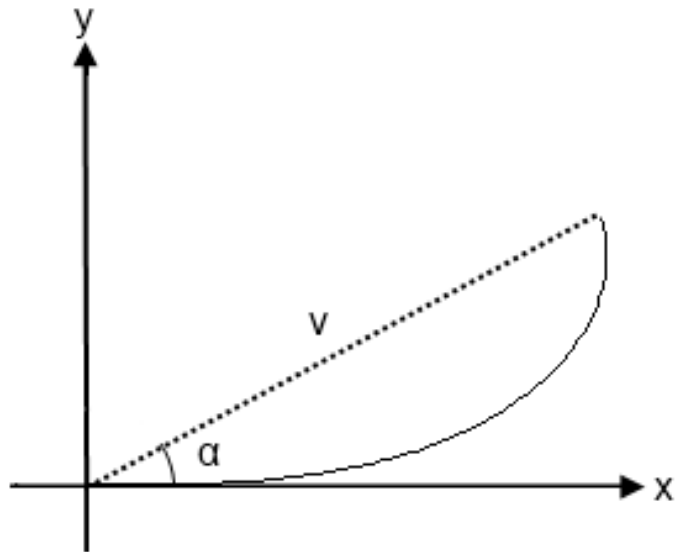
När samtliga slavpunkters koordinater är beräknade modelleras de med datapunkter och sammanfogas med en spline

6.1.1.3 Klotoid

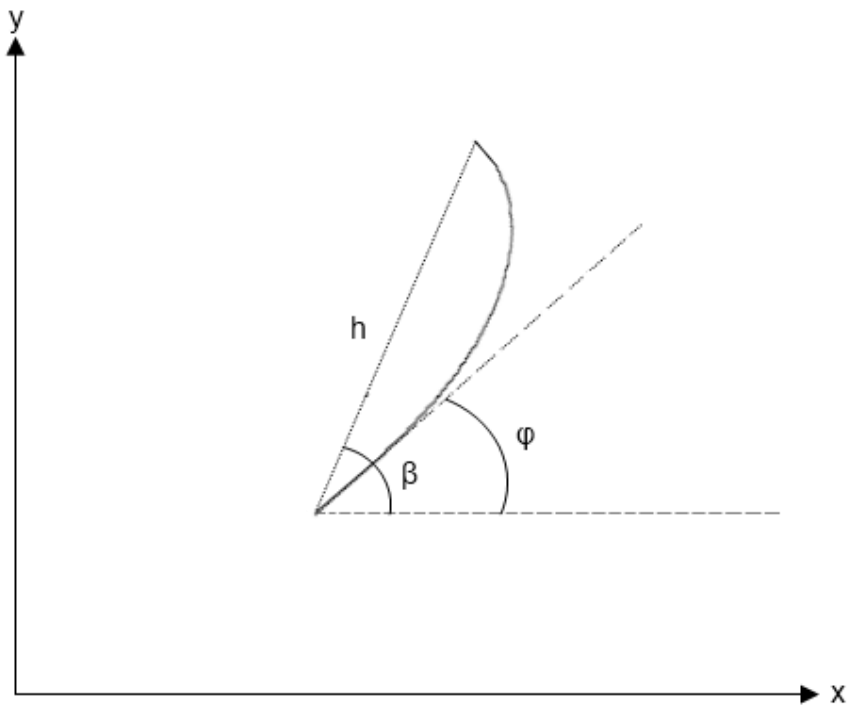
Klotoiden beskrivs med en start- samt slutpunkt (masterpunkter), en klotoidparameter och en klotoidtyp. Klotoidtypen kan endast anta "backward" eller "forward" där den förstnämnda betyder att linjeföringen går från radie till en rak linje. "Forward" är tvärt om, rak linje till radie och illustreras i Figur 30.

Liksom för cirkelsegmentet används slavpunkter för att kunna illustrera klotoidens krökta form. Slavpunkternas koordinater beräknas med metoden som beskrivs nedan. Denna metod använder sig av två ekvationer för att generera en klotoids koordinater längs dess form med hjälp av ingångsdatan nämnt ovan. Ekvationerna har utvecklats från klotoidens matematiska definition och återfinns i Appendix II.

Metodiken för att finna den korrekta positionen är att först generera koordinater för en utgångsklotoid med start i origo och liggandes på x-axeln. Därefter beräknas vinkeln (α) mellan vektorn (v) från origo till slutpunkt och x-axeln. α beskriver alltså vinkeln mellan derivatan i sektionskoordinat = 0 och linjen mellan origo samt slutpunkt, se Figur 30.

Figur 30. Klotoid α -vinkel

Nästa steg är att beräkna vinkeln mellan vektorn (h) från den sökta klotoidens startpunkt till slutpunkt och x-axeln. Denna vinkel benämns β och visas i Figur 31 nedan:

Figur 31. Klotoid β - och φ -vinkel

Med dessa två vinklar samt klotoidens start- och slutpunkt i horisontalplanet kan en ny vinkel, så kallad translationsvinkel (φ), beräknas. Med hjälp av denna vinkel kan sedan utgångsklotoiden roteras och förflyttas till sin korrekta position. Translationsvinkeln (φ) (se Figur 31) beror på start- och slutpunktens relativa position och Tabell 9 visar hur denna beräknas.

Villkor	Vinkel
$x_{slut} > x_{start}$	$\varphi = -\beta + \alpha$
$x_{slut} < x_{start}$	$\varphi = -\pi - \beta + \alpha$

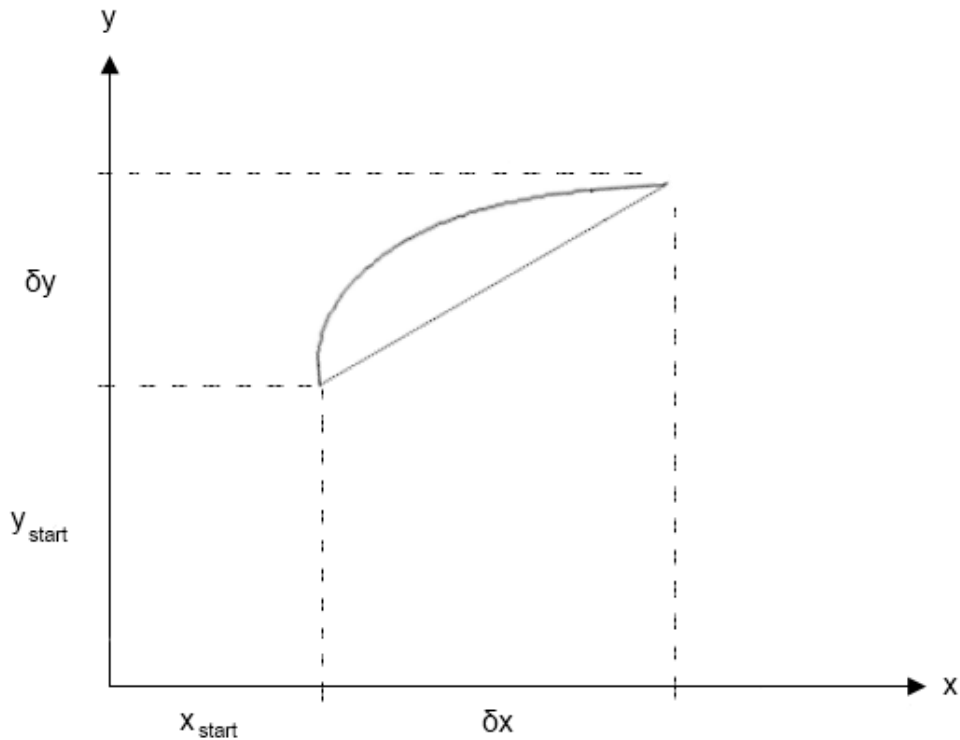
Tabell 9. Klotoid vinkelberäkning

Slavpunkternas slutliga koordinater kan nu beräknas med hjälp av translationsvinkeln samt koordinaterna för utgångsklotoiden och den första masterpunkten.

$$x_{sp} = x_{start} + \delta x + x_{gen} * \cos(\varphi) + y_{gen} * \sin(\varphi)$$

$$y_{sp} = y_{start} + \delta y + y_{gen} * \cos(\varphi) + x_{gen} * \sin(\varphi)$$

Index sp står för slavpunkt och gen för de punkter som genererades från utgångsklotoiden. δx och δy är endast skiljt från noll då klotoiden är av typ "backward" och används för att förflytta klotoiden till dess korrekta position. Den slutliga positionen samt dessa parametrar illustreras nedan i Figur 32.



Figur 32. Klotoid, slutlig position

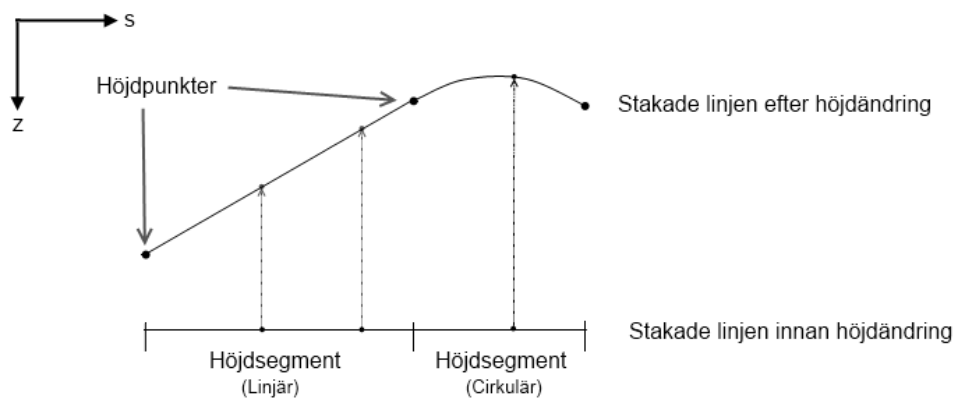
Hur många koordinatpar som genereras beror på punktparametern och dessa koordinatpar används sedan för att skapa datapunkter vilka binds ihop med en spline som får formen av en klotoidkurva.

6.1.2 Vertikal linjeföring

Väglinjens läge i vertikalanplanet beskrivs med höjdpunkter vars koordinater beräknas utifrån indata som angivits av användaren i den andra dialogrutan i användargränssnittet. Dessa punkter definierar stakade linjens utformning i det vertikala planet. Som tidigare förklarats kan den vertikala linjeföringen ha en förändring som antingen är linjär eller som antar formen av ett cirkelsegment.

Höjdpunkterna definierar olika höjdsegment. Ett höjdsegment beskriver en sträcka på väglinjen som har en viss höjdändring. Till exempel, om två efterföljande höjdpunkter har olika höjdkoordinater antar deras gemensamma höjdsegment egenskapen av en höjdändring mellan dessa. Alla slavpunkter och masterpunkter som redan skapats och under programmets gång kommer att tilldelas ett höjdsegment beroende på sin sektionsskoordinat. Varje gång en punkt läggs till i rätt höjdsegment modifieras också dess z-koordinat med hjälp av det tillhörande segmentets höjdändring. Modifieringen beror på vilken typ av sektion punkten placeras i, detta visas illustrativt i Figur 33 där höjdpunkter infogats på stakade linjen och den definieras i vertikalanplanet. Samtliga

punkter på den stakade linjen som antingen ligger innan den första eller efter den sista höjdpunkten tilldelas samma höjdkoordinat som den närmaste höjdpunkten, se Figur 34.

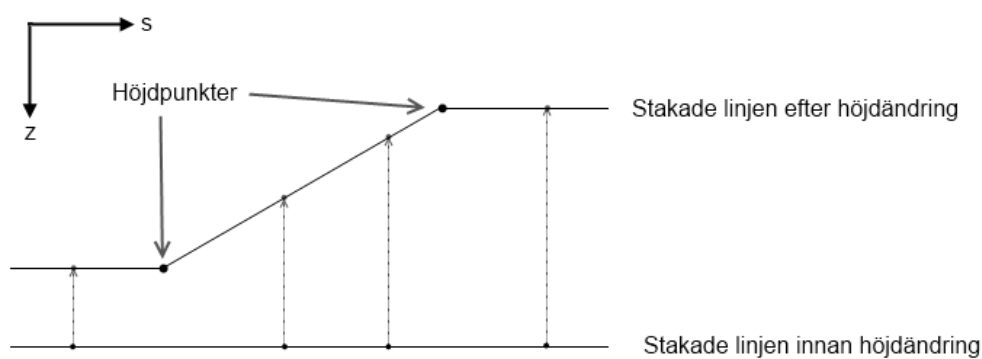


Figur 33. Vertikal position

6.1.2.1 Linjära höjdsegment

En linjär höjdändring sker då två efterföljande höjdpunkter har olika z-koordinater och saknar värde på radien. Höjdändringen för en punkt mellan dessa bestäms av skillnaden mellan höjdsegmentets tillhörande höjdpunkter (z_1 , z_2 , s_1 och s_2) samt sektionskoordinaten för den aktuella punkten (s_{aktuell}). Detta görs enligt linjär interpolering med hjälp av sektionskoordinaten och visas i Figur 34.

$$z_{\text{aktuell}} = z_1 + \frac{z_2 - z_1}{s_2 - s_1} * (s_{\text{aktuell}} - s_1)$$



Figur 34. Linjär höjdinterpolation

6.1.2.2 Cirkelformade höjdsegment

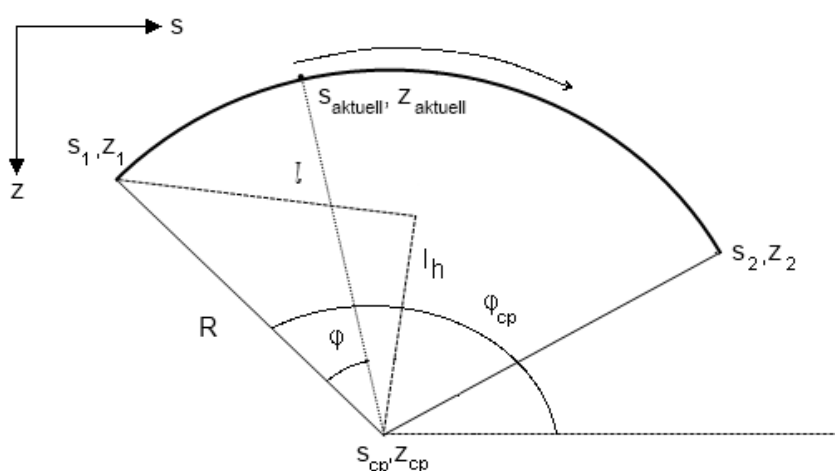
En höjdändring med formen av ett cirkelsegment kräver att det finns fler punkter i höjdsegmentet än höjdpunkterna själva om formändringen skall kunna illustreras. Sträcker sig den radiella höjdändringen över flera linjesektioner som är antingen av typen radie eller klotoid finns det oftast tillräckligt många slavpunkter för att illustrationen ska vara tillräcklig. Skulle däremot höjdändringen sträcka sig inom en rak linjesektion finns där oftast inte mer än några få eller inga punkter alls. För att ändå kunna visualisera höjdändringens form skapas nya slavpunkter inne i den raka linjesektionen. Antalet slavpunkter som skapas beror på skillnaden mellan de två höjdpunkternas sektionkoordinater samt värdet på punktparametern.

När ett nytt höjdsegment definierats utifrån två höjdpunkter skall alla punkter i det aktuella höjdsegmentet tilldelas rätt z-koordinat. Denna beräkning är mycket lik den som genomförs för att generera slavpunkter för en cirkulär kurva i det horisontala planet. Istället för x och y används här istället sektionkoordinaten s och höjdkoordinaten z vilket illustreras i Figur 35. Övriga beteckningar är samma.

$$l = \sqrt{\left(\frac{s_2 - s_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{z_2 - z_1}{2}\right)^2}$$

$$l_h = \sqrt{R^2 - l^2}$$

$$a_s = \frac{s_2 - s_1}{2 * l} \quad a_z = \frac{z_2 - z_1}{2 * l}$$



Figur 35. Elevationsradie

$$z_{cp} = \frac{z_2 + z_1}{2} - a_z l_h \quad s_{cp} = \frac{s_2 + s_1}{2} + a_s l_h$$

Till skillnad från beräkningarna i horisontalplanet där en konstant vinkeländring baserad på punktparametern används, beräknas nu istället en vinkel baserad på den befintliga punktens (eller ny slavpunkts) sektionskoordinat $s_{aktuell}$.

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{s_{aktuell} - s_{cp}}{R} \right)$$

$$z_{aktuell} = z_{cp} + R * \sin(-\varphi)$$

När den nya z-koordinaten är beräknad ersätts datumpunkternas gamla höjddkoordinat och stakade linjen får önskat utseende i det vertikala planet.

6.2 Överbyggnad

För att illustrera farbanans bredd skapas för varje datumpunkt (masterpunkter, höjdpunkter, breddpunkter etc.) på den stakade linjen nya, så kallade *kantpunkter*, på var sida om dessa. Syftet med kantpunkterna är att möjliggöra en modellering och visualisering av bredden på bron farbana. Vidare kommer stömlinjer skapas mellan vilka farbanan sedan definieras.

6.2.1 Kantpunkter

När användaren angivit en eller flera breddpunkter, dvs. punkter på den stakade linjen som definierar kantavstånd samt lutning, skapas så kallade *kantsektioner* utifrån dessa. Kantsektionerna beskriver en variation av farbanans bredd samt lutning. Varje punkt, oavsett typ, som tidigare skapats eller senare kommer att skapas på väglinjen tilldelas sedan en kantsektion baserad på tillhörande sektionskoordinat, se avsnitt 5.1.3.

Om en kantsektion definieras mellan två breddpunkter med olika bredd kommer kantsektionen få egenskapen av en breddändring. Kantavståndet (d) kommer på så sätt interpoleras med hänsyn till sin sektionskoordinat med följande formel:

$$d = d_1 + \delta d * \frac{s_{bp} - s_1}{\delta s}$$

Index 1 står för den första breddpunktens värden och δ står för skillnaden mellan den första och den sista breddpunktens värden. Om en skillnad i lutning mellan en kantsektions båda breddpunkter existerar kommer en liknande interpolation göras för att beräkna den korrekta lutningen för den betraktade datumpunkten på stakade linjen.

För varje datumpunkt på den stakade linjen skapas en motsvarande *kantpunkt* på vardera sida om linjen baserat på informationen som finns i respektive kantsektion, se Figur 36. Dessa skapas genom att numeriskt beräkna kurvans derivata utifrån derivatans definition i respektive datumpunkt på stakade linjen. Linjens funktion bestäms från den betraktade punktens sektionskoordinat som i sin tur hänvisar till korrekt linjetyp.



Figur 36. Kantpunkter

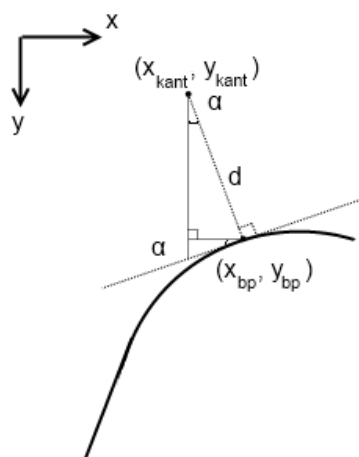
$$f'(S) = \lim_{h \rightarrow 0} \left(\frac{f(S+h) - f(S)}{h} \right)$$

Funktionen genererar koordinater för en punkt på stakade linjen strax efter den betraktade datumpunkten. En vektor (dvs. derivatan) beräknas sedan mellan dessa två punkter från vilken kantpunktens koordinater räknas fram som en ortogonal projektion av den betraktade datumpunkten.

Den nya kantpunktens koordinater beräknas med hjälp av vinkeln (α) mellan derivatan och x-axeln samt kantavståndet (d). Detta görs först i det horisontella planet med formlerna nedan samt illustreras i Figur 37.

$$x_{kant} = x_{bp} + d * \sin(\alpha)$$

$$y_{kant} = y_{bp} - d * \cos(\alpha)$$



Figur 37. Kantpunktsbetäckningar

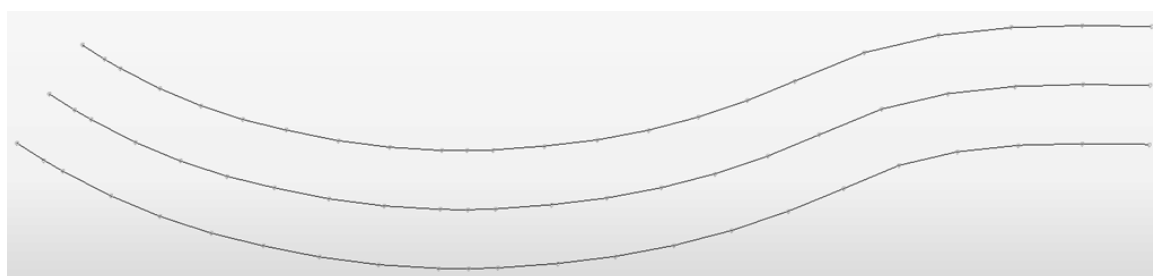
Index *bp* betecknar den betraktade datumpunkten på stakade linjen. Vid skapandet av en kantpunkt på höger sida om väglinjen anges *d* som ett positivt värde och vice versa.

Efter att kantpunkten är skapad i det horisontella planet tilldelas den en korrekt höjdkoordinat. Höjdkoordinaten beror på kantsektionens bombering samt avståndet (*d*) mellan kantpunkten och den stakade linjen. Beräkning görs enligt följande formel:

$$z_{kant} = z_{bp} - \theta * |d|$$

θ betecknar den interpolerade lutningen och index *bp* den betraktade datumpunkten på den stakade linjen.

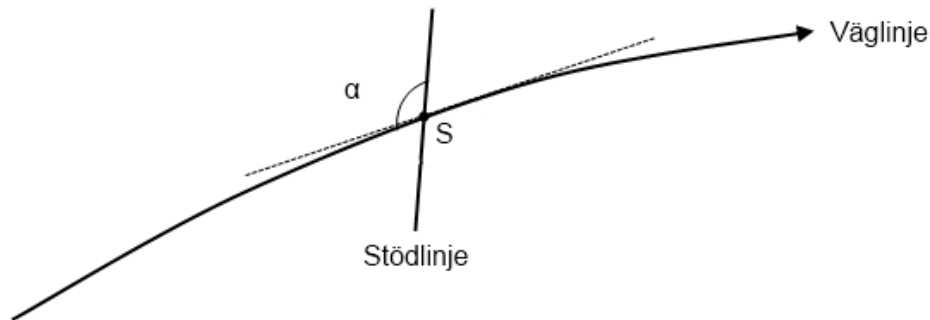
Farbanans kant kan nu visualiseras genom att binda samman dessa kantpunkter med en linje, så kallad *kantlinje*. Detta illustreras i Figur 38 och kan jämföras med Figur 36.



Figur 38. Kantlinjer

6.2.2 Stömlinjer

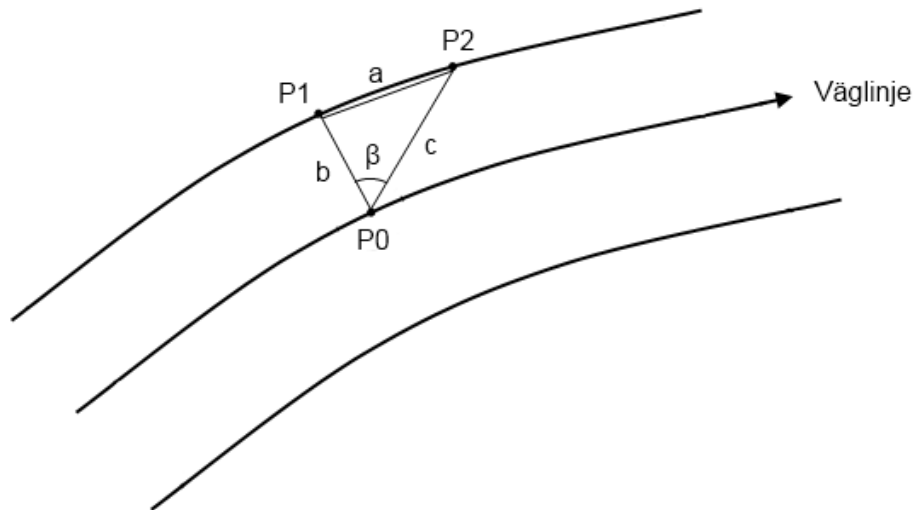
Som tidigare nämnts används så kallade *stömlinjer* för att definiera var på stakade linjen som brons stöd ska placeras. Stömlinjerna behöver inte vara vinkelräta mot väglinjen utan användaren bestämmer själv en så kallad *stödvinkel* (α), se Figur 39.



Figur 39. Stödvinkel

Stömlinjernas placering på stakade linjen bestäms med så kallade *stödpunkter*. Dessa innehåller information om stödvinkeln (α) samt placeringen i form av en sektionskoordinat (S). Tidigare i rapporten (se avsnitt 6.2.1) har beskrivits hur farbanans kant byggs upp av datapunkter. Detta medför att det inte finns något geometriskt sätt att enkelt beräkna skärningspunkten mellan stömlinjen och kantlinjen. Därför används en iterationsmetod för att beräkna koordinaterna för en korrekt skärningspunkt.

Iterationsmetoden beskrivs och illustreras kortfattat i Figur 40. Koordinater för en punkt (P1) ortogonalt sett från stödpunktens (P0) riktningsderivata beräknas och avståndet mellan denna punkt och P0 benämns b. Beroende på om stödvinkeln (α i Figur 39) är större eller mindre än 100 gon beräknas koordinaterna för ytterligare en punkt (P2) före eller efter punkt P1. Därefter beräknas avståndet (a) mellan P2 och P1 samt avståndet (c) mellan P2 och P0. Sedan används cosinussatsen för att beräkna vinkeln β .



Figur 40. Stödvinkelberäkning med cosinussatsen

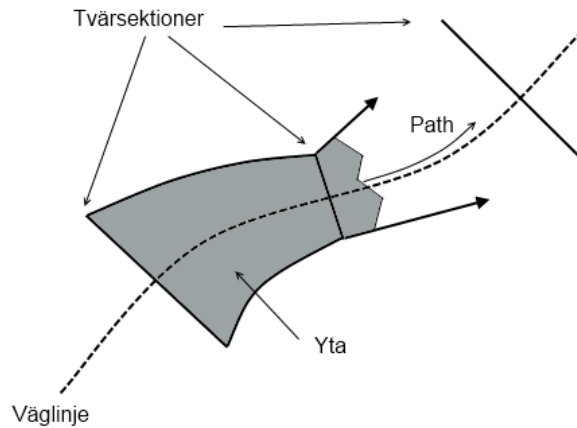
$$\beta = \text{acos} \left(\frac{b^2 + c^2 - a^2}{2 * b * c} \right)$$

En jämförelse görs därefter mellan den önskade stödvinkeln (α) och den beräknade vinkeln (β). Är $\beta > \alpha$, dvs. den sökta skärningspunkten ligger mellan P1 och P2, halveras avståndet a och en ny jämförelse görs. I det motsatta fallet då $\beta < \alpha$, dvs. den sökta skärningspunkten ligger efter P2, ökas avståndet a istället och en ny jämförelse görs.

När denna iterationsgång skapat en punkt framför och en punkt bakom den sökta skärningspunkten halveras avståndet mellan dessa enligt *intervallhalveringsmetoden*. När den jämförda vinkelskillnaden mellan β och α är tillräckligt liten (10^{-5} rad) avbryts iterationen och skärningspunkten anses funnen. Samma procedur genomförs för att hitta skärningspunkten på andra sidan stakade linjen.

6.2.3 Broäck

Brodäcket modelleras med en eller flera skalytor som skapas med hjälp av verktyget "lofting" i BRIGADE/Plus. Loftingen skapar en yta utifrån en definierad "path" och ett antal tvärsektioner (tvärlinjer) längs denna. Ytan bildas genom att tvärlinjerna, vilka representerar farbanans bredd och lutning, förbinds i pathens riktning. I de fall då tvärlinjerna ger varierande bredd, lutning etc. utför verktyget en interpolering mellan dessa, se Figur 41. Detta verktyg medför att en passande och formföljande yta skapas.



Figur 41. Lofting

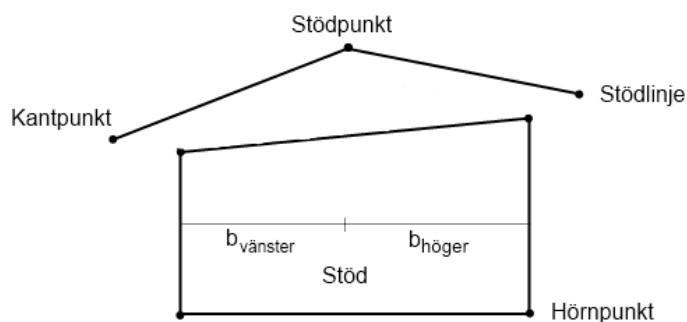
6.3 Underbyggnad

Brons underbyggnad definieras från de stödlinjer som skapats. Examensarbetet behandlar följande konstruktionsdelar i underbyggnaden: skivstöd, pelare, ändskärmar samt vingmurar. Nedan förklaras hur underbyggnaden skapas samt hur randvillkoren definieras.

6.3.1 Skivstöd

Användaren kan välja att skapa ett skivstöd på en stödlinje och måste då även ange dennas bredd och höjd. Bredden anges genom att delas upp i en bredd på vardera sida om stakade linjen. T.ex. om ett stöd ligger mitt under broplattan och har en total bredd på 4 m anges bredden genom att dela upp den i 2 m på var sida om stakade linjen, förutsatt att farbanan är lika bred på båda sidorna av väglinjen. Stödet behöver dock inte ha samma bredd till höger om mittpunkten som till vänster.

Om farbanan har olika lutning på ömse sidor om den stakade linjen betyder detta även att stödlinjens kantpunkter har olika z-koordinater. Detta medför i sin tur att stödmurens övre kant kommer att luta, se Figur 42.



Figur 42 Skivstöd under vägbana med olika bomberingar

För att kompensera för detta vid skapandet av skivstödetts övre och undre hörnpunkter görs en linjär interpolation. För närmare beskrivning av interpolationen se Appendix III.

När samtliga hörnpunkter är skapade sammanfogas de av en linje varefter en yta spänns upp mellan dessa.

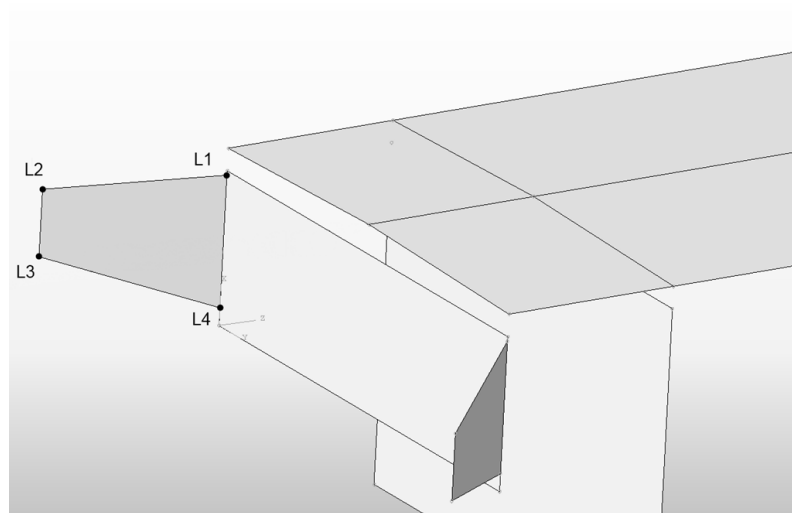
6.3.2 Pelare

Vid modellerandet av pelare sker detta genom att två datapunkter skapas, en i överkant och en i underkant, mellan vilka en linje dras.

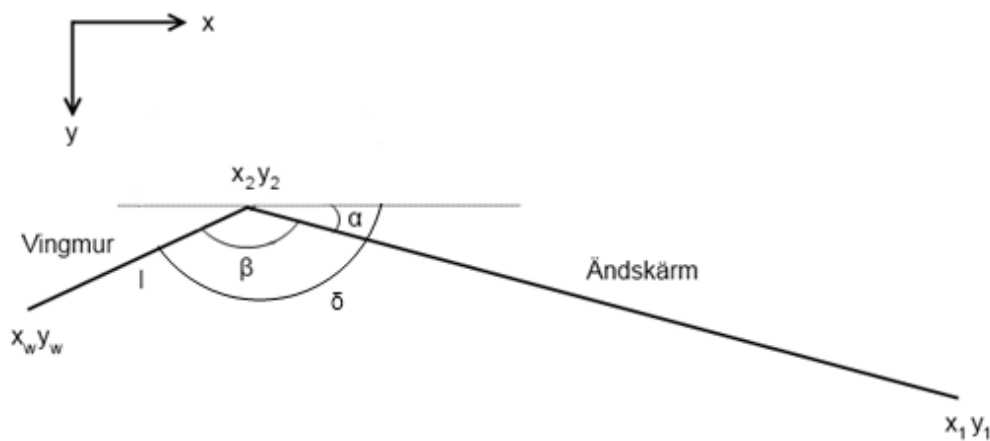
Då en eller flera pelare skapas vid en stödlinje beräknas deras koordinater i det horisontala planet med samma interpolation som användes vid framtagandet av skivstödetts hörnpunkter. Höjdkoordinaterna för pelarnas underkanter bestäms av användaren. Precis som för skivstödetts bredd anges pelarnas position som ett avstånd från stakade linjen. Ett negativt värde på avståndet betyder att pelaren hamnar på vänster sida om stakade linjen och vice versa.

6.3.3 Vingmur

En vingmur byggs upp av fyra hörn (L1 till L4) i vilka datumpunkter skapas. Eftersom vingmurarna är ingjutna i ändstöden är ver punkterna L1 och L4 horisontala koordinater från ändskärmens hörnpunkter, se Figur 43. Höjdkoordinaten på dessa anges som tidigare beskrivet av användaren.



Figur 43. Vingmur hörnpunkter



Figur 44. Beteckningar för vingmursberäkning

Koordinaterna (x_w, y_w) för vingmurens yttre hörnpunkter (L2 och L3) måste däremot genereras med hjälp av vinkeln (δ) och längden (l) , se Figur 44. Detta görs genom att vinkeln (α) beräknas med hjälp av ändstödetts hörnpunkter (x_2, x_1, y_2, y_1) . Denna vinkel

används sedan i kombination med den av användaren givna β för att ta fram den sökta vinkeln (δ), se Tabell 10.

$$\alpha = \text{atan}\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)$$

Villkor	Vinkel
$x_2 > x_1$	$\delta = \pi + \beta + \alpha$
$x_1 > x_2$	$\delta = \beta + \alpha$
$x_1 = x_2$ $y_2 > y_1$	$\delta = \beta - \pi/2$
$y_2 < y_1$	$\delta = \beta + \pi/2$

Tabell 10. Vinkeluträkning vingmurar

Vinkeln (α) är nu känd och de sökta koordinaterna (x_w, y_w) kan nu beräknas enligt formlerna nedan.

$$x_w = x_2 + l * \cos(\delta)$$

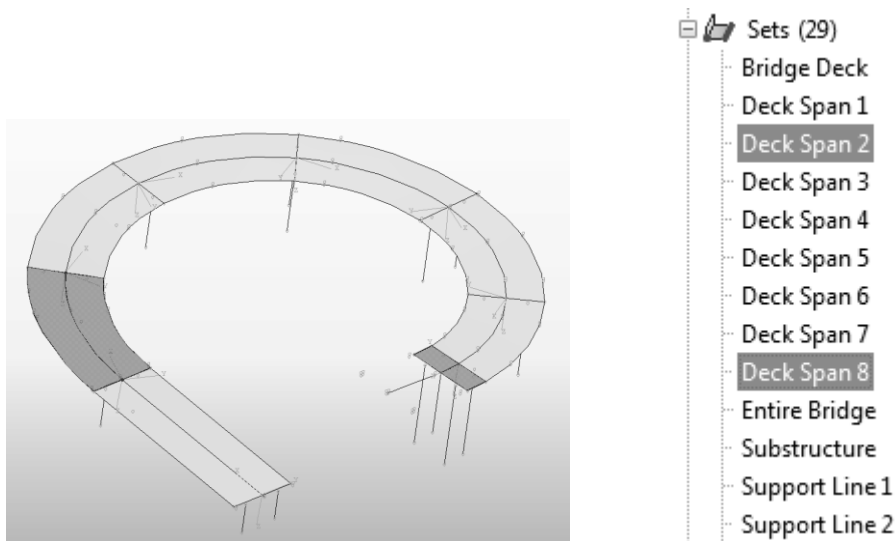
$$y_w = y_2 + l * \sin(\delta)$$

Höjdkoordinaterna för punkt L2 och L3 ges av användaren och när samtliga hörnpunkter är skapade binds de samman med en linje varefter en yta spänns upp.

6.4 Set och ytor

För att underlätta programmeringsarbetet i projektet och användarens möjligheter att hitta brons geometriska detaljer skapar programkoden så kallade *set* vilka är en namngiven delmängd av modellen. Exempel på set som skapas är stömlinjer, brodäckets olika fack, skivstöd, vingmurar och ändskärmar, se Figur 45. Med hjälp av dessa set kan material, tjocklekar och kopplingar definieras.

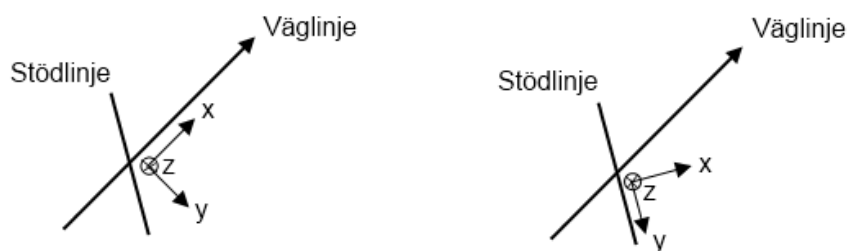
Vid placering av en last på bron måste programmet veta var och i vilken riktning denna ska verka, detta görs genom tilldelning av ytor. Exempel på ytor kan vara en stödmurs båda sidor, brodäckets ovan- och undersida osv.



Figur 45. Illustration av sets

6.5 Koordinatsystem

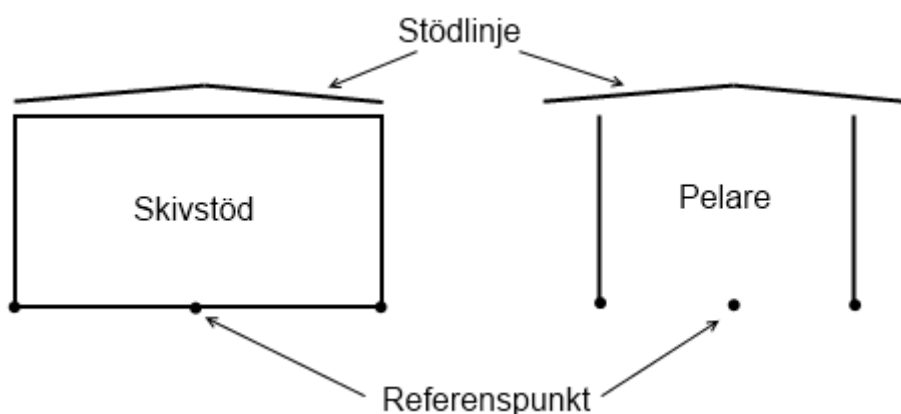
När en modell genereras med hjälp av programkoden skapas ett antal lokala koordinatsystem vilka skall hjälpa användaren att applicera egna randvillkor och laster. Två koordinatsystem har infogats i underkanten av varje stöd, se Figur 46. Det första med x-riktningen i stakade linjens riktning och används för att beskriva stödförskjutningar. Det andra har y-riktningen parallellt med stödlinjen och används för att definiera ett stöds materialorientering och verkande jordtryck. För båda dessa pekar den lokala z-riktningen i den globala z-riktningen (gravitationsriktningen). Dessa skapas även med syfte att hjälpa användaren vid vidare lastpåläggning.



Figur 46. Lokala koordinatsystem

6.6 Randvillkor

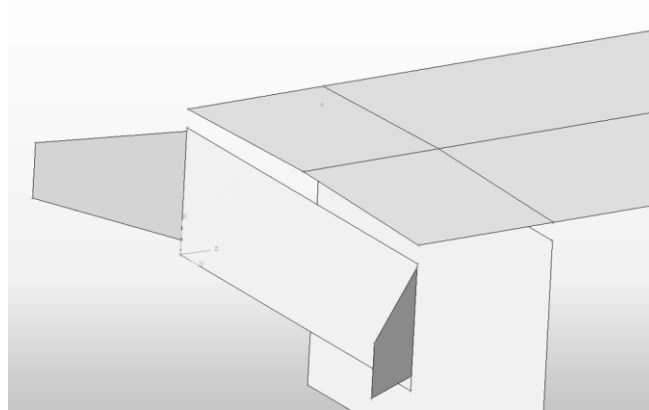
För att beskriva hur bron är grundlagd placeras och kopplas en referenspunkt till undersidan av respektive stöd. Referenspunkten placeras mittemellan stödets yttersta och nedre punkter, dvs. i mitten på ett skivstöds underkant eller på halva avståndet mellan de två yttersta pelarnas underkant på samma stömlinje, se Figur 47. Samtliga pelare på en och samma stömlinje är kopplade till samma punkt och antas på så sätt dela en gemensam grundplatta. Denna referenspunkt tilldelas sedan randvillkor vilka ska representera respektive stöds grundläggningsegenskaper. I detta projekt har randvillkoren valts att låsas i samtliga sex frihetsgrader eftersom eventuella sättningar senare beaktas som ett eget lastfall. Om så önskas kan användaren ändra dessa randvillkor efter att modellen är genererad.



Figur 47. Referenspunktens placering

6.7 Lager och kopplingar

Under- och överbyggnad modelleras inte som sammansatt geometri (se Figur 48) i programmet. Istället genererar programkoden automatiskt kinematiska kopplingar mellan över- och underbyggnaden. Kopplingen kan antingen vara längs hela stödets överkant (ramben, ändskärm) eller punktvis i fallet då användaren önskar lager. Detta innebär två konstruktionsdelar som är kopplade beräkningsmässigt men inte geometriskt. Det ger användaren möjlighet att ange vilka frihetsgrader som skall vara låsta och vilka som skall vara fria för denna koppling. Detta används för att modellera olika lagertyper, till exempel rullager.



Figur 48. Underbyggnad-överbyggnad anslutning

6.8 Laster

Nedan beskrivs de laster som skapas och behandlas av programkoden, för generell beskrivning av lasternas utseende och ursprung se avsnitt 0. För att användaren ska sparas tid fördefinieras dessa laster i koden men är lätta att ändra i BRIGADE/Plus. Det är även lätt för användaren att skapa nya laster och koppla dessa till olika konstruktionsdelar med redan skapade set och ytor. I detta kapitel beskrivs de laster som valts att fördefinieras åt användaren för att bespara denne tid och arbete.

6.8.1 Egentyngd

Egentyngden anges som en gravitationskraft i programmet och angriper därför hela konstruktionen. Storleken på denna kraft beror på respektive konstruktionsdels tvärsnitt och densiteten av rådande material.

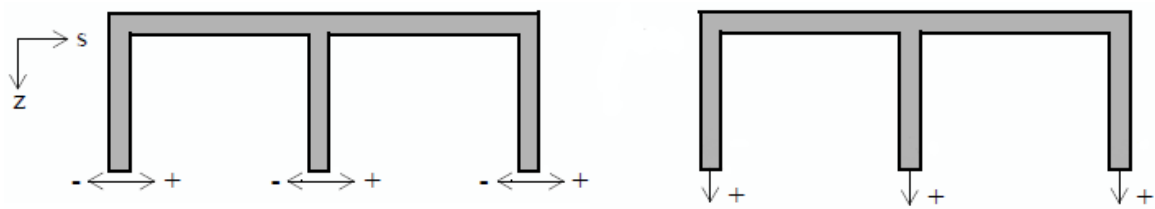
6.8.2 Beläggning och ballast

Beläggning och ballast behandlas som två självständiga laster men beaktas på samma vis. Användaren får ange en tunghet för respektive last som sedan utsätter hela brodäckets ovasida i form av ett jämnt utbrett tryck.

6.8.3 Stödförskjutning

De laster som uppkommer till följd av stödförskjutningar beaktas i programkoden genom att förflytta stöden i vertikal- och horisontalled, se Figur 49. Eftersom en referenspunkt är placerad i, och kopplad till, stödets underkant blir en förskjutning av denna punkt även en förskjutning av stödet. Enligt Bro 2002 bör den horisontala stödförskjutningen sättas till 10 mm i stödets lokala x-riktning. Detta skall endast ses som ett defaultvärde och användaren kan själv ändra detta efter eget tycke. Den vertikala förskjutningen ges

även den ett standardvärde på 10 mm i positiv z-riktning (gravitationsriktningen) men bör ändras av användaren till de beräknade stödsättningarna för aktuellt projekt.



Figur 49. Stödförskjutning

6.8.4 Krympning

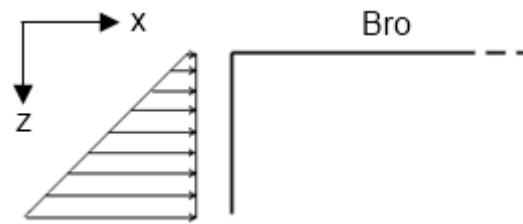
Krympningen av bronns konstruktionsdelar till följd av betongens härdningsprocess väljs i detta projekt att beaktas som ett lastfall där den sökta krympningen är 0,25 ‰. Denna krympning representeras i programkoden som en temperaturändring i materialet med -25 grader Celsius och verkar konstant över respektive konstruktionsdels hela tjocklek samt för hela bron. Denna temperaturändring används då betong och har en expansionskoefficient på $1 \cdot 10^{-5}$ vilket medför den sökta krympningen.

6.8.5 Jordtryck

Jordtryck som belastar stöden beaktas genom att utsätta ytan för ett hydrostatiskt tryck. Storleken på trycket regleras med användarens angivna indata för jordens vilotryckskoefficient (K_o), tunghet (ρ), nivå på jordens överkant (z_0) samt vilket stöd och vilken sida som belastas.

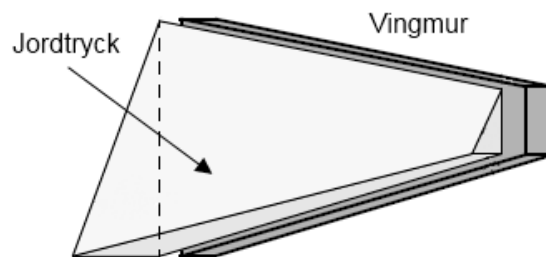
$$P = \rho * K_o * (z - z_0)$$

Eftersom en av projektets begränsningar innebär antagande om konstant, linjär jordtrycksförändring beaktas därför inte grundvattnets inverkan på olika nivåer och inte heller variation i jordart. Detta är dock något som användaren själv i efterhand kan definiera i BRIGADE/Plus användargränssnitt. Jordtryckets nollnivå, det vill säga jordens överkant, anges med en höjdkoordinat och trycket ges som funktion av z-koordinaten i det globala koordinatsystemet, se Figur 50.



Figur 50. Jordtryck på ändstöd

Jordtryck på vingmurar ska egentligen beaktas med en nollnivå som följer vingmurens överkant vilket innebär en avancerad modellering, se exempel i Figur 51. I detta projekt har belastning på vingmurarna förenklats till ett tryck vars nollnivå ligger i samma höjd som vingmurens översta kantpunkt. Vill användaren ändra på hur jordtrycket angriper vingmuren kan sådana förändringar ske i efterhand.

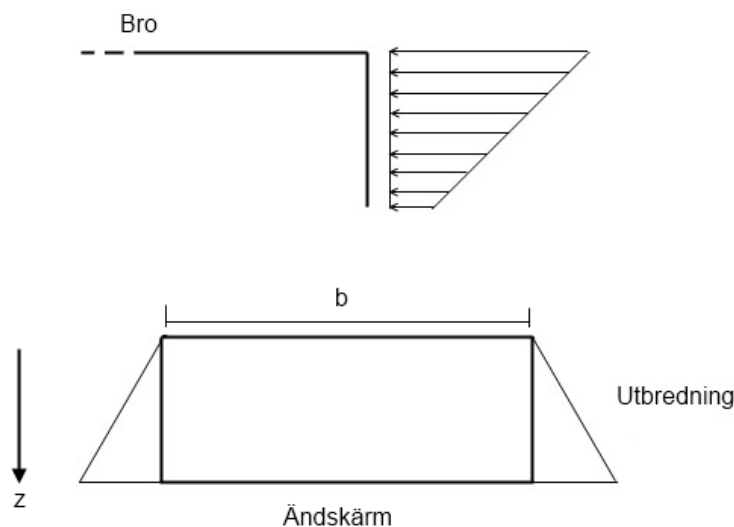


Figur 51. Jordtryck mot vingmur

6.8.6 Överlast

Överlasten beaktas som ett horisontalt tryck på de yttersta stöden som minskar med ökande djup. Användaren anger vid denna last vilket tryck det är vid stödets överkant, vilojordtryckskoefficienten (K_0) samt vilket utbredningsförhållande (C) lasten har. C beskriver utbredningens lutning, dvs. förhållandet mellan utbredningen och djupet. Minskningen av jordtrycket sker enligt följande formel där p betecknar vertikalt tryck från trafiken på vägbanken och z betecknar djupet:

$$P = \frac{p * b * K_0}{b + z * C}$$



Figur 52. Överlastens utbredning

Trycket belastar de yttersta stödets yttre sida och är utbredd över hela ytan. Överlasten är förenklad till att vara utbredd över hela brostödet överkant istället för varje körbana för sig, jämför Figur 20 och Figur 52.

6.8.7 *Temperaturlast*

Då temperaturlasten ska beaktas anger användaren högsta och lägsta jämna temperatur, en gjutningstemperatur samt högsta och lägsta temperaturgradient. I de två fall av jämn temperatur som analyseras är det skillnaden mellan gjuttemperatur och högsta respektive lägsta jämna temperatur som används.

Temperaturgradienten beskriver en temperaturskillnad mellan konstruktionsdelens övre och undre kant. Temperaturgradienten modelleras så att temperaturen i tvärsnittet förblir oförändrad dvs. temperaturen i överkant är lika stor som i underkant fast med omvänt tecken.

7 Resultat

Projektet har resulterat i en metod vilken verifierats genom att implementeras som ett tillägg till BRIGADE/Plus. Implementeringen bygger på en arbetsgång vilken är uppdelad i en geometrisk modellering av en brokonstruktion samt en modellering av lasterna på konstruktionen. Den geometriska modelleringen baseras på ett användargränssnitt i vilken användaren anger brospecifika parametrar som bestämmer konstruktionens utformning. Användargränssnittet består av sex dialogrutor i vilka brokonstruktionen successivt byggs upp. Nedan presenteras resultatet av implementeringen i form av förklarande text med tillhörande figurer vilka återfinns i Appendix IV.

Informationen som användaren givit i användargränssnittets olika dialogrutor använder sig sedan programkoden av för att skapa brons geometriska utformning. En godtycklig väglinje genereras först (se Figur 57) både i det horisontala och vertikala planet vilken antar formen från en kombination av raka linjer, radiella kurvor och klotoider.

Efter detta genereras farbanan (se Figur 58) vilken kan variera i bredd och lutning. Vidare placeras även stödlinjerna ut längs med farbanan vid vilka olika typer av stöd tar form (se Figur 59 och Figur 60). På stödlinjerna kan ändskärmar, skivstöd samt pelare modelleras. På ändskärmarna finns även möjligheten att använda sig av vingmurar.

Underkanten på varje stöd kopplas till en gemensam reaktionsnod där randvillkor enkelt kan definieras. Samtliga stöds överkanter är nedsänkta ett avstånd av halva brodäckets tjocklek från kantlinjerna i det vertikala planet och är istället sammankopplade med randvillkor. Den slutliga bron visualiseras i Figur 60.

Utöver den geometriska bromodelleringen som görs hanteras standardiserade permanenta och variabla laster enligt Eurokod och TK Bro. Lasterna som hanteras är följande: egentygnd, ballast, beläggning, överlast, jordtryck, stödförskjutningar samt temperaturlaster. Inget användargränssnitt är skapat för hantering av dessa laster utan detta sker genom att ändra indata i programkoden eller i BRIGADE/Plus användargränssnitt. När modellen har genererats är den redigerbar med alla de verktyg och metoder som finns tillgängliga i det generella programmet

8 Slutsats

Syftet med examensarbetet var att utveckla en metod med vilken fördelarna från både specialprogram och generella program utnyttjas. Metoden medför en strukturell indelning av geometrin för att på ett effektivt sätt uppföras med hjälp av parametrisk indata. Metoden har utvärderats genom implementering i BRIGADE/Plus men begränsas dock inte till detta program.

Fördelarna från ett specialprogram har utnyttjats genom att möjliggöra modellering med parametriserad indata istället för att rita upp denna manuellt. Detta möjliggör en mycket enkel och tidseffektiv modellering. Själva modellgenereringen sker på under 10 sekunder efter det att samtliga parametrar är givna av användaren. Exempel på fullständiga modeller genererade med hjälp av programkoden åskådliggörs i Figur 60 och Figur 61.

Eftersom metoden kan implementeras i ett generellt program erhåller den alla fördelar från denna programtyp. Detta betyder att användaren i efterhand är fri att göra modifieringar och tillägg i modellen med metoder som återfinns i generella program och därmed inte är begränsad till de möjligheter som den parametriserade indatan ger. Exempel på en sådan modifikation kan ses i Figur 62 där en vanlig plattrambro genererad med programkoden sedan har modifierats med ett cirkulärt hål för ljusinsläpp till undergående väg. Exempel på övriga modifikationer som nu är möjliga är förflyttning och modifiering av stödets utseende och form samt även utbyggnad av modellen med befintliga verktyg. Programtillägget kan även användas för att generera brodäck med krånglig geometri som i annat fall hade varit mycket tidsödande.

Programkoden belastar även den skapta modellen med standardiserade laster enligt Eurocode och TK Bro. Förberedelser genom fördefinierade konstruktionsdelar underlättar för användaren att vidare belasta bron med ytterligare laster.

9 Diskussion

Det kan alltid föras en diskussion om hur mycket ett specialprogram ska innehålla och hur mycket som skall lämnas åt de generella programmen. Examensarbetets framtagna metod kan spara användaren mycket tid vid modellering av broar. Den implementerade programkoden är i sin nuvarande form relativt enkel och klarar endast att modellera ett begränsat antal konstruktionsdelar och laster. Därför finns det stort utrymme för vidareutveckling i form av valmöjligheter för användaren. Sådana valmöjligheter skulle kunna omfatta tvärsnittvariationer, balkar, grundförutsättningar och kopplingar samt en omfattande lastmodul.

Som förklarar av metodbeskrivningen bygger den geometriska modelleringen på olika punkter i rummet. Detta passade bra vid implementeringen i BRIGADE/Plus men i andra generella program kan det tänkas att andra verktyg och metoder fungerar bättre för att uppnå samma resultat.

Ett användargränssnitt för lastpåläggning kan skapas där användaren själv kan definiera vilka laster som skall belasta konstruktionen. Ett speciellt anpassat trafiklastsgränssnitt kopplat till geometrin samt den stakade linjens form vore att föredra för definition av trafiklastlinjer och lastfält.

Slutsatsen är att denna metod går att utveckla långt och skulle kunna underlätta arbetet för många konstruktörer och är i detta stadium en mycket bra start på ett intressant projekt.

10 Källförteckning

Fwa T.F., *The handbook of highway engineering*, Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA 2006

Lamm R m.fl, *Highway design and traffic safety engineering handbook*, McGraw-Hill , USA, 1999

O'Flaherty C.A., *Transport planning and traffic engineering*, Arnold, London 1997

Scanscot Technology, *Brigade/Standard Theory Manual*, Scanscot Technology, Lund 2005

Sparr G., *Linjär algebra*, Studentlitteratur, Lund 1994.

SS-EN 1990, *Eurokod 0 - Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk*, SIS förlag AB, Stockholm 2005

SS-EN 1991, *Eurokod 1 - Laster på bärverk*, SIS förlag AB, Stockholm 2005

Sundquist Håkan, *Beam and frame structures*, KTH Div. for Structural Design and Bridges, Stockholm 2007

Sundquist Håkan, *Infrastructure Structures*, KTH Div. for Structural Design and Bridges, Stockholm 2009

Sundquist H, Silfwerbrand J, *Prestressed Concrete Structures*, KTH Div. for Structural Design and Bridges, Stockholm 2009

Vägverket, *Broprojektering – En handbok*, Vägverket, Borlänge 1996

Vägverket, *TK Bro*, Vägverket, Borlänge 2009

Vägverket, *Vägverkets föreskrifter VVFS 2009:19*, Vägverket, 2009

11 Appendix

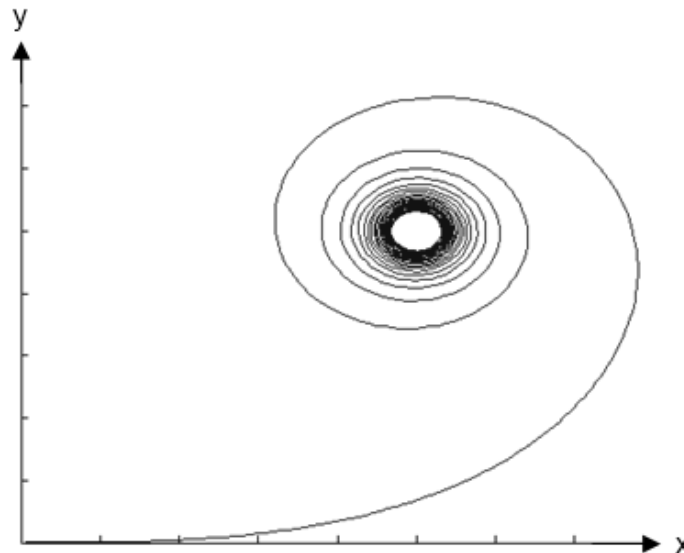
11.1 Appendix I: Translationsvinkel för cirkelsegment

Villkor		Vinkel (radianer)
$x_1 > x_{cp}$	$y_1 > y_{cp}$	$\varphi_{cp} = \text{atan}\left(\frac{y_1 - y_{cp}}{x_1 - x_{cp}}\right)$
	$y_1 < y_{cp}$	$\varphi_{cp} = \text{atan}\left(\frac{y_1 - y_{cp}}{x_1 - x_{cp}}\right)$
	$y_1 = y_{cp}$	$\varphi_{cp} = \frac{3 * \pi}{2}$
$x_1 < x_{cp}$	$y_1 < y_{cp}$	$\varphi_{cp} = \text{atan}\left(\frac{y_1 - y_{cp}}{x_1 - x_{cp}}\right) + \pi$
	$y_1 > y_{cp}$	$\varphi_{cp} = \text{atan}\left(\frac{y_1 - y_{cp}}{x_1 - x_{cp}}\right) + \pi$
	$y_1 = y_{cp}$	$\varphi_{cp} = \frac{3 * \pi}{2}$
$x_1 = x_{cp}$	$y_1 < y_{cp}$	$\varphi_{cp} = \frac{3 * \pi}{2}$
	$y_1 > y_{cp}$	$\varphi_{cp} = \frac{\pi}{2}$
$R < 0$		$\varphi_{cp} = \varphi_{cp} + \pi$

Tabell 11. Translationsvinkel

11.2 Appendix II: Klotoid

Klotoiden är inom matematiken känd som Eulers spiral och bygger på två serier som beskriver x- och y-koordinater som funktion av sträckan på klotoiden (Lamm 1999). Serierna är komplicerade och Eulers spiral illustreras i Figur 53



Figur 53. Eulers spiral

Vid den allmänna tillämpningen av klotoider inom vägbyggnadsteknik används inte definitionen för Eulers spiral då den är onödigt krånglig. Istället görs en förenkling av klotoiden och för att styra utseendet används en klotoidparameter som beror av kurvans längd samt slutradie. Denna är kopplad till hur snabbt klotoiden ändrar sin form och är proportionell mot roten ur slutradie och den totala längden som avverkats längs klotoiden. Ett högt värde på klotoidparametern innebär en långsam kurvändring medan ett lågt värde representerar en snäv kurva (Lamm 1999). Formeln nedan beskriver klotoidparametern där R betecknar dess slutradie och L sträckan längs klotoiden. Klotoidparametern benämns i detta examensarbete CP efter den engelska termen clothoid parameter.

$$CP = \sqrt{R \cdot L}$$

Klotoidens definition bygger på två integraler vilka utvecklas och ger två serier med ett oändligt antal termer. Dessa funktioner och dess utveckling illustreras i nedanstående ekvationer:

$$x = \int_0^L \cos\left(\frac{L^2}{2CP^2}\right) dL = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{L^{4n+1}}{(2n)! \cdot (4n+1) \cdot 2^{2n} \cdot CP^{4n}}$$

$$y = \int_0^L \sin\left(\frac{L^2}{2CP^2}\right) dL = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{L^{4n+3}}{(2n+1)! \cdot (4n+3) \cdot 2^{2n} \cdot CP^{4n+2}}$$

I examensarbetet väljs att använda en förenkling av dessa två funktioner med sju termer i vardera utveckling. Utvecklingarna som tagits fram används genom hela examensarbetet för att beskriva klotoidens koordinater i horisontalplanet. Dessa illustreras nedan där l betecknar sektionsskoordinaten (aktuella längden längs klotoiden i sökt punkt) med värde noll i klotoidens startpunkt. CP är klotoidparametern, c och d betecknar de konstanter som utvecklingen givit och visas i Tabell 12.

$$u = \frac{l^4}{CP^4}$$

$$x_{gen} = l * \left(1 + \frac{u}{c_1} + \frac{u^2}{c_2} + \frac{u^3}{c_3} + \frac{u^4}{c_4} + \frac{u^5}{c_5} + \frac{u^6}{c_6}\right)$$

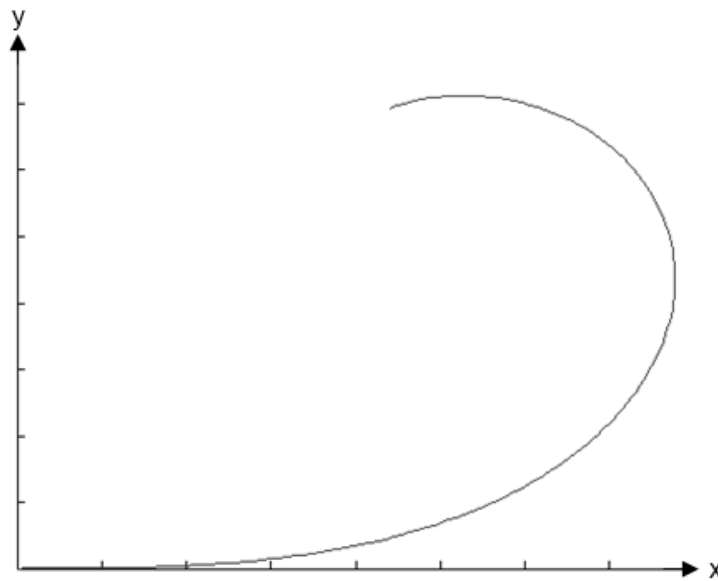
$$y_{gen} = \frac{l^3}{6CP^2} * \left(1 + \frac{u}{d_1} + \frac{u^2}{d_2} + \frac{u^3}{d_3} + \frac{u^4}{d_4} + \frac{u^5}{d_5} + \frac{u^6}{d_6}\right)$$

Ekvationerna beskriver klotoidens koordinater för en klotoid med parametern CP i länden I.

Beteckning	Värde	Beteckning	Värde
c_1	-40	d_1	-56
c_2	3456	d_2	7040
c_3	-599 040	d_3	-1 612 800
c_4	175 472 640	d_4	588 349 440
c_5	$-7,80337152 * 10^{10}$	d_5	$-3,13373491 * 10^{11}$
c_6	$4,90497638 * 10^{13}$	d_6	$2,29552895 * 10^{14}$

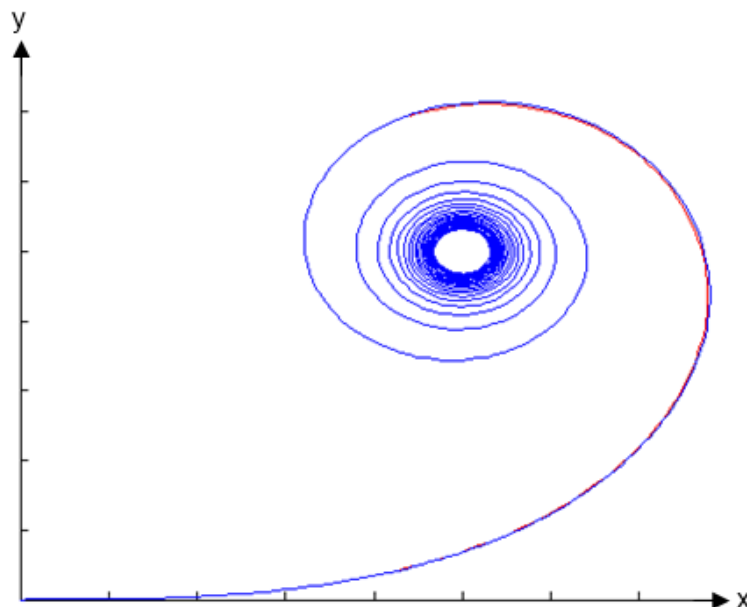
Tabell 12. Klotoidkonstanter

Dessa uttryck som denna förenkling har lett till anses behöva en rimlighetskontroll och denna har genomförts med en passande klotoidparameter vilket illustreras i Figur 54.



Figur 54. Klotoidapproximation

Denna figur ser korrekt ut och slutligen visas Eulers spiral i samma figur som den förenklade klotoiden där det är svårt att urskilja skillnaden, se Figur 55. Utifrån denna jämförelse anses förenklingen och geometribeskriven tillfredsställande samt tillräckligt noggrann.



Figur 55. Klotoidjämförelse

11.3 Appendix III: Interpolering av stödpunkter

Denna del beskriver interpolationen för framtagningen av en stödmurs sneda överkant. Interpolationen baseras på kantpunkternas z-koordinater ($z_{höger}$ och $z_{vänster}$), horisontella avståndet mellan stödpunkten och kantpunkterna ($\Delta a_{höger}$, $\Delta a_{vänster}$) samt stödets bredd (b). Nedan visas ett exempel på hur z-koordinaterna (z_{hp}) för stödmurens övre vänstra hörnpunkt beräknas. Index vänster och höger refererar till stödlinjens högra och vänstra kantpunkter.

$$\Delta a_{vänster} = \sqrt{(x_{mitt} - x_{vänster})^2 + (y_{mitt} - y_{vänster})^2}$$

$$\Delta a_{höger} = \sqrt{(x_{mitt} - x_{höger})^2 + (y_{mitt} - y_{höger})^2}$$

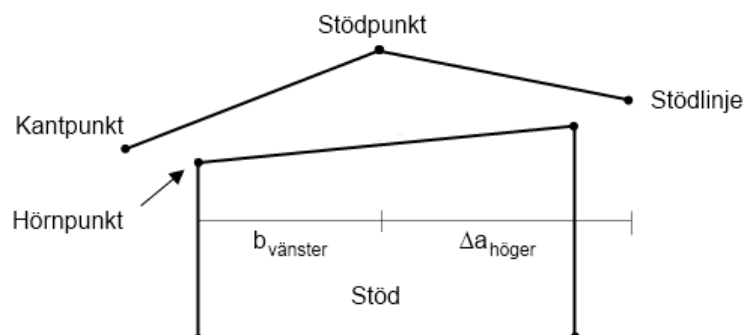
$$\Delta z = z_{vänster} - z_{höger}$$

$$z_{hp} = z_{vänster} + \Delta z * \frac{\Delta a_{vänster} - b_{vänster}}{\Delta a_{vänster} + \Delta a_{höger}}$$

där $\Delta a_{vänster}$ speglar avståndet mellan stödlinjens punkt på den stakade linjen och den vänstra kantpunkten. $b_{vänster}$ beskriver avståndet mellan stödlinjens punkt på stakade linjen och stödets övre vänstra hörn. Stödmurens övre hörnpunkters x- och y-koordinater beräknas med följande interpolation:

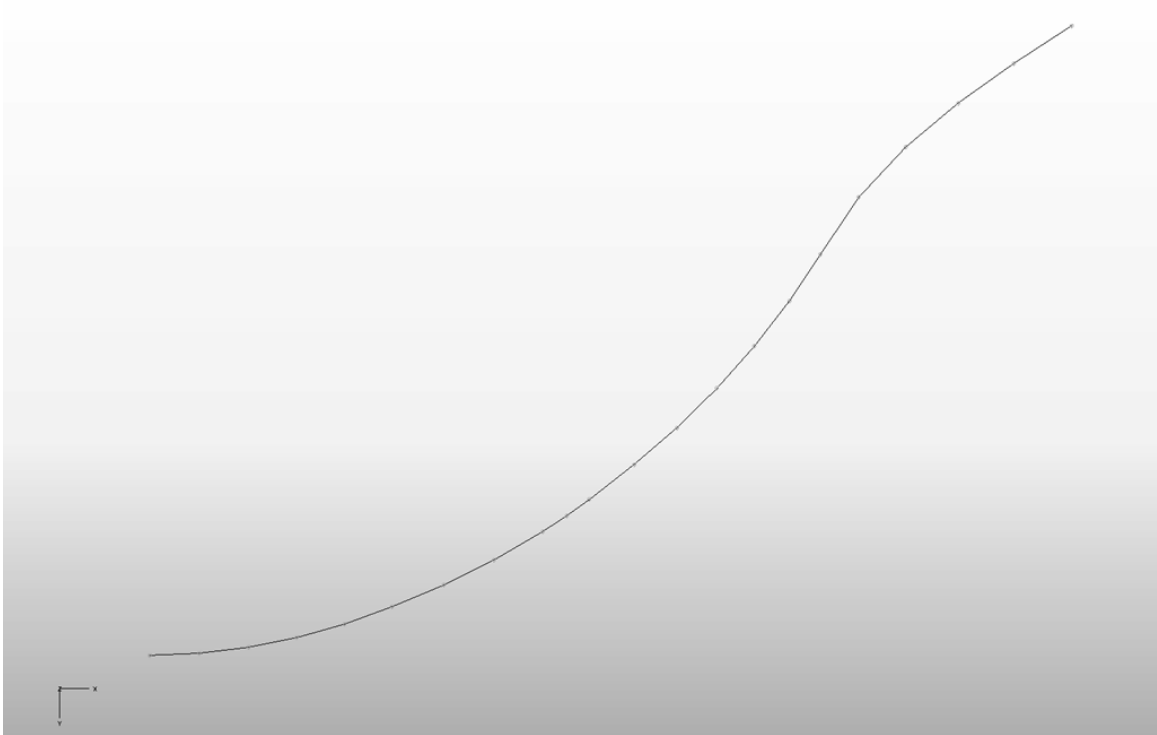
$$x_{vänster} = x_{mitt} + \frac{(x_{vänster,kant} - x_{mitt}) * b_{vänster}}{a_{mitt,vänster}}$$

$$y_{vänster} = y_{mitt} + \frac{(y_{vänster,kant} - y_{mitt}) * b_{vänster}}{a_{mitt,vänster}}$$

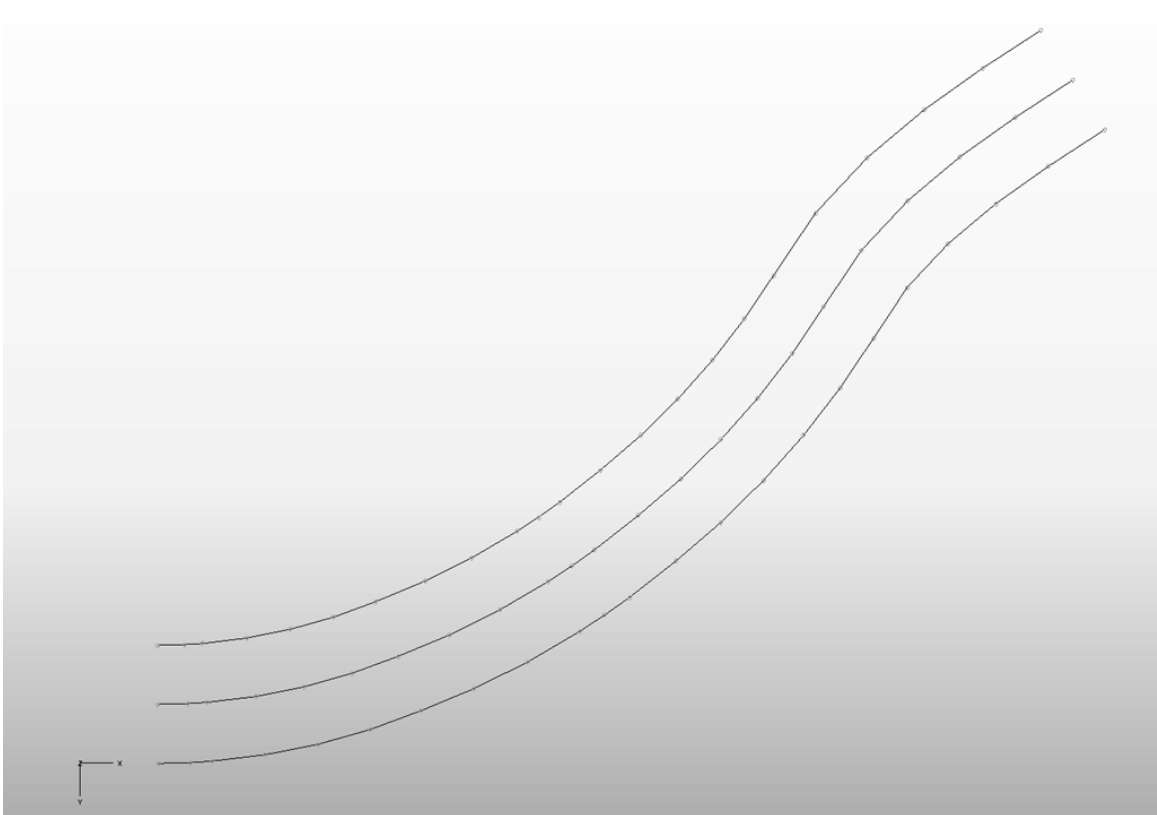


Figur 56. Stödpunktstermer

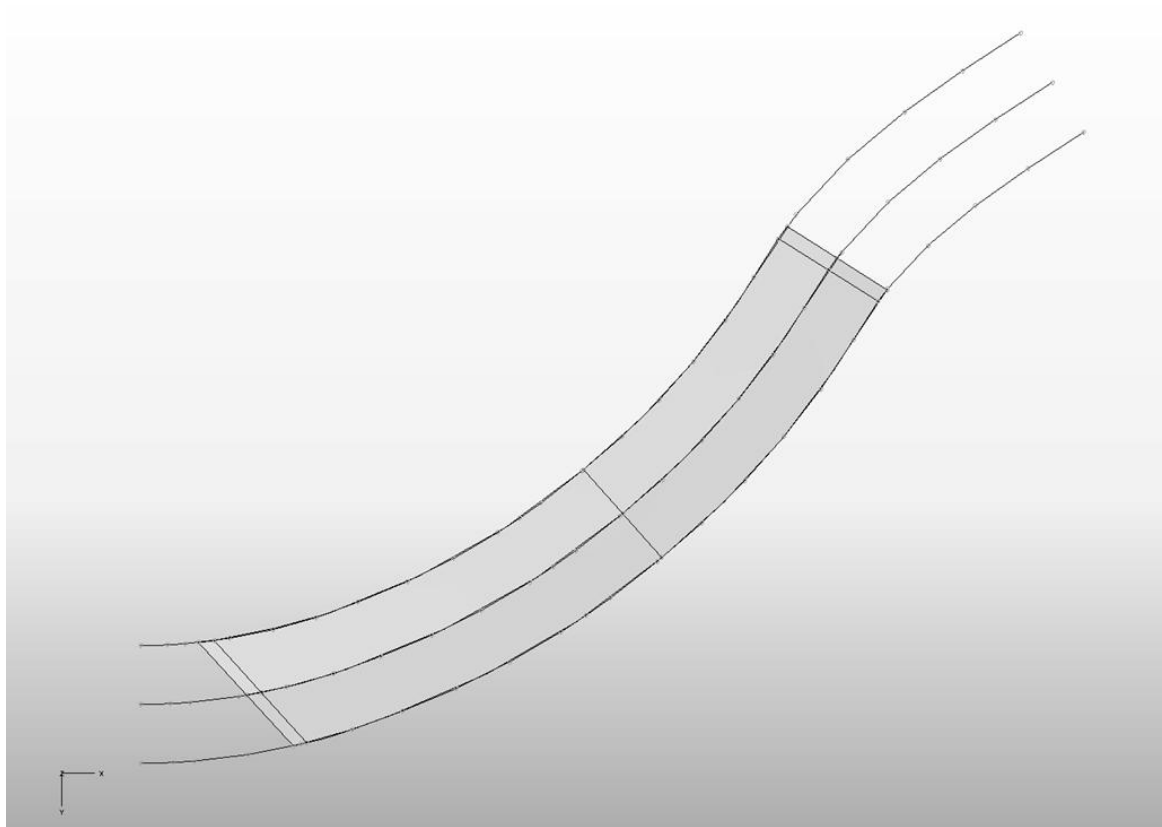
11.4 Appendix IV: Resultatbilder



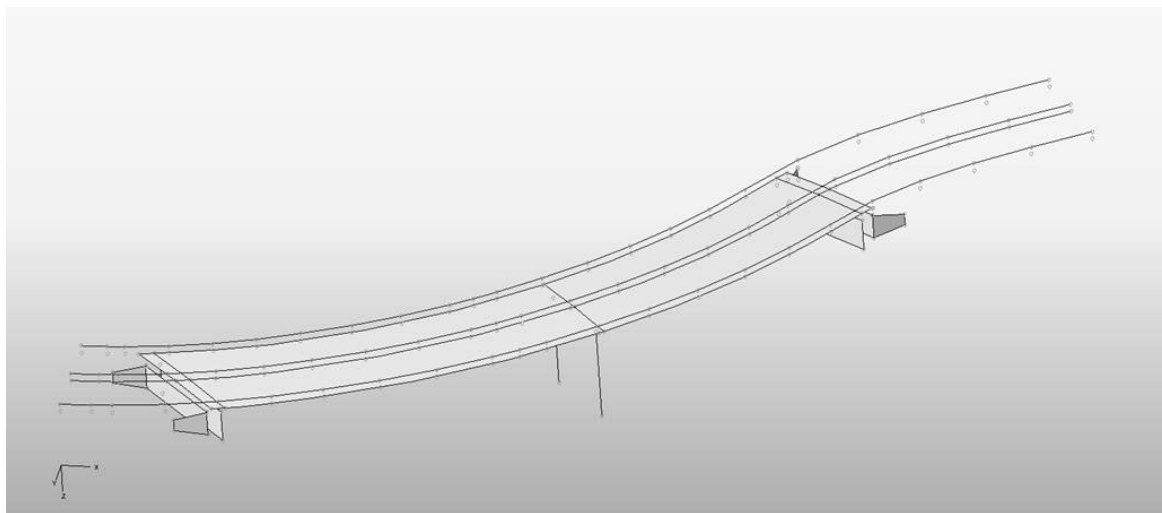
Figur 57 Väglinjen



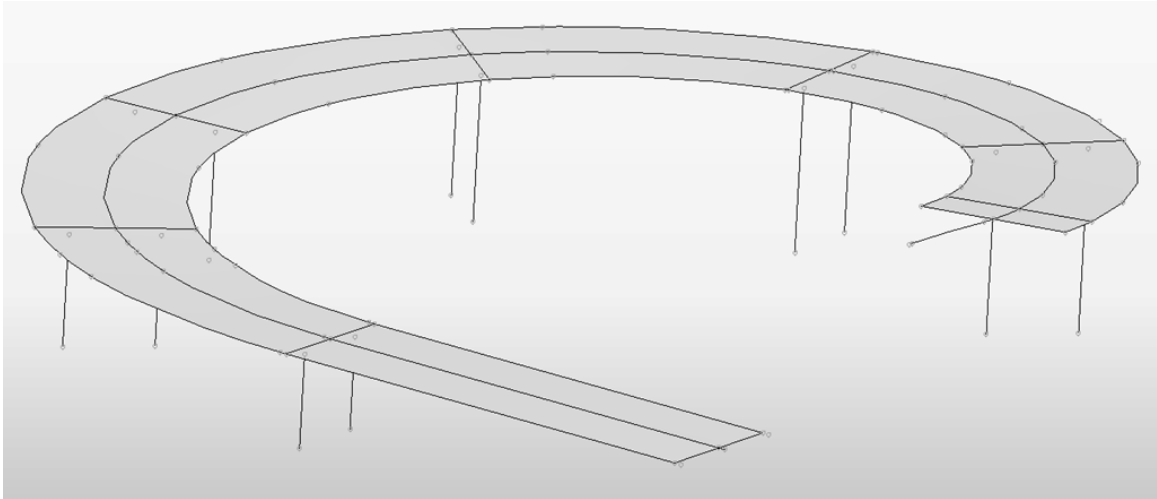
Figur 58 Kantlinjer



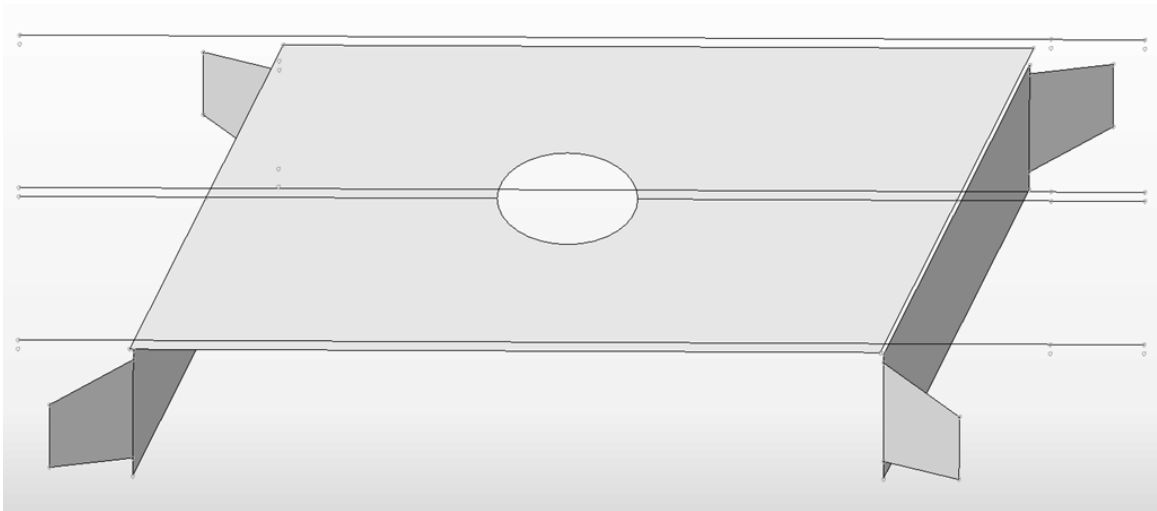
Figur 59 Brodäck med stödlinjer



Figur 60 Färdig bro



Figur 61. Exempelbro



Figur 62. Modifikation av genererad bromodell